

Relaisbuch

Dritte, unveränderte Auflage

Bearbeitet von

Dr.-Ing. Michael Walter
W. E. V., Berlin

Herausgegeben von der
Wirtschaftsgruppe Elektrizitätsversorgung (W. E. V.)
und dem
Reichsverband der Elektrizitäts-Versorgung (R. E. V.)

1940

Franckh'sche Verlagshandlung Berlin

S. 69

S.06

621.316.925



16927

Alle Rechte, besonders das Übersetzungsrecht, vorbehalten

Copyright 1940 by

Franckh'sche Verlagshandlung, W. Keller & Co.,

Stuttgart, Abteilung Berlin

Printed in Germany

C/1367

Vorwort

Seit dem Erscheinen der ersten Auflage des Relaisbuches (1930) ist die Schutztechnik, im besonderen die Selektivschutztechnik, durch verschiedene Neuschöpfungen und Verbesserungen bereichert worden. Ein großer Teil der Neuerungen hat sich inzwischen im Betrieb bewährt. Weniger geeignete Bauarten und Verfahren sind dagegen verlassen worden. Die neu gewonnenen Erkenntnisse und Erfahrungen auf dem Relaisgebiet sind in der vorliegenden zweiten Auflage des Relaisbuches weitgehend ausgewertet und dem heutigen Entwicklungsstand entsprechend festgehalten.

Diese vollständig neubearbeitete Auflage bringt nur grundsätzliche Dinge aus der Schutztechnik zur Darstellung, die in erster Linie für die Planung und Betriebsführung Bedeutung haben. Dabei werden nur bewährte Geräte und Schaltungen behandelt, von denen man annehmen kann, daß sie nicht in wenigen Jahren veralten. Die Ausführungen sind bewußt einfach gehalten und werden durch zahlreiche Abbildungen unterstützt. Auf diese Weise wird die Schutztechnik weiten Kreisen zugänglich gemacht und das notwendige Interesse für dieses wichtige, aber vielfach unterschätzte Fachgebiet geweckt.

Die Grundbegriffe, wie die Fehlerarten in den Netzen, der Aufbau und die Wirkungsweise von Relais und Wandlern, sowie die Auslösearten der Schutzeinrichtungen werden als Grundlage der Selektivschutztechnik in den einleitenden Kapiteln ausführlich behandelt. Als Hauptteil des Buches folgen die Ausführungen über die Auswahl, Anwendung und Pflege der Schutzeinrichtungen. Das Buch kann somit auch dem Nachwuchs als Einführung in das Gebiet der Selektivschutztechnik dienen. Sein wesentlicher Zweck ist jedoch, dem Planungs- und Betriebsingenieur ein zuverlässiger Ratgeber zu sein. Wer sich darüber hinaus mit den einzelnen Fragen eingehender vertraut machen will, findet im Text und im Anhang zahlreiche Schrifttumshinweise.

Schutzeinrichtungen für Niederspannungsanlagen werden in dieser Auflage nicht behandelt, weil deren Entwicklung gerade in jüngster Zeit

wieder stark in Fluß gekommen ist. Über den derzeitigen Stand dieses Zweiges der Schutztechnik unterrichtet das vorhandene Schrifttum in ausreichendem Maße.

Die vom VDE geprägten bzw. vorgeschlagenen Begriffserklärungen auf dem Gebiet der Relais und Wandler sind ebenso wie die neuesten Bezeichnungen des Ausschusses für Einheiten und Formelgrößen (AEF) weitgehend benutzt worden.

Bei der Abfassung der zweiten Auflage hat wiederum ein Ausschuß von Fachleuten mitgewirkt, nämlich der Ausschuß der Wirtschaftsgruppe Elektrizitätsversorgung (W.E.V.) für die Neubearbeitung des Relaisbuches. Ferner wurden auch die Sachbearbeiter der Herstellerwerke in weitem Maße zu Rate gezogen. Für die wertvolle Mitarbeit sei den Beteiligten an dieser Stelle nochmals bestens gedankt.

Im Ausschuß der W.E.V. für die Neubearbeitung des Relaisbuches arbeiteten die Herren mit:

- Calließ (Obmann), Märkisches Elektrizitätswerk, Berlin;
- Carl, Aktiengesellschaft Sächsische Werke, Dresden;
- Dr. Denzel, Technische Werke der Stadt Stuttgart, Stuttgart;
- Fertl, Elektrowerke, Berlin;
- Dr. Grünewald, Studiengesellschaft für Höchstspannungsanlagen, Berlin;
- Kautzmann, Badenwerk, Karlsruhe;
- Klößener, Bayernwerk, München;
- Dr. Lieber, Verband Deutscher Elektrotechniker, Berlin;
- Schmohl, Berliner Kraft- und Licht (Bewag)-A.-G., Berlin;
- Schmundt, Ostpreußenwerk, Königsberg;
- Schröder, Hamburgische Elektrizitäts-Werke, Hamburg;
- Dr. Walter (Bearbeiter), Wirtschaftsgruppe Elektrizitätsversorgung, Berlin.

Berlin, Mai 1940.

Wirtschaftsgruppe Elektrizitätsversorgung
und
Reichsverband der Elektrizitäts-Versorgung.

Inhaltsverzeichnis

	Seite
I. Einleitung	13
II. Begriffserklärungen	16
A. Relais und Schutzeinrichtungen	16
B. Zeitbegriffe	18
C. Relaiseigenschaften	19
D. Relaiskontakte	21
E. Auslöser und Auslösearten	22
F. Strom- und Spannungswandler	23
G. Prüfung von Relais und Schutzeinrichtungen	25
H. Fehlerarten in Drehstromnetzen	26
III. Fehler und Störungsarten	27
A. Allgemeines	27
B. Kurzschluß	29
1. Dreipoliger Kurzschluß	35
2. Zweipoliger Kurzschluß	37
3. Einpoliger Kurzschluß	37
4. Windungsschluß	39
5. Erdkurzschluß	40
6. Kurzschluß mit Erdberührung	40
7. Ergänzende Bemerkungen über Lichtbogen- und Erdüber- gangswiderstände	41
C. Doppelerdschluß	43
1. Spannungen bei Doppelerdschluß	43
2. Ströme bei Doppelerdschluß	45
3. Verschiedenes	48
D. Erdschluß	49
1. Spannungen bei Erdschluß	50
2. Ströme bei Erdschluß	52
3. Verschiedenes	58
E. Leiterunterbrechung	59
F. Überlastungen	60
G. Pendelerscheinungen	61
1. Grundzüge der Pendelvorgänge	61
2. Pendelfördernde Umstände	68
3. Bekämpfungsmittel	70

IV. Aufbau, Wirkungsweise und Anwendung der Schutzrelais bzw. Schutzeinrichtungen	72
A. Allgemeine Eigenschaften und Bauteile von Relais	72
1. Einleitung	72
2. Meßverfahren	73
3. Halteverhältnis	74
4. Verbrauch	75
5. Abhängigkeit der Relais von der Temperatur, Frequenz, Kurvenform und von Fremdfeldern	77
6. Spulen	79
7. Kontakteinrichtungen	81
8. Gehäuse	83
B. Grundformen von Relais	84
1. Strom- und Spannungsrelais	84
a) Stromrelais	85
b) Spannungsrelais	87
2. Widerstandsrelais	87
3. Anwendung der Strom-, Spannungs- und Widerstandsrelais als Anregerelais	96
4. Zeitrelais	98
5. Richtungsrelais	98
a) Richtungsrelais für Drehstromnetze	98
b) Richtungsrelais für Gleichstromnetze	104
C. Überstromzeitrelais	105
1. Abhängige Überstromzeitrelais	105
2. Begrenzt-abhängige Überstromzeitrelais	107
3. Unabhängige Überstromzeitrelais	109
4. Stufen-Überstromzeitrelais	116
D. Unterspannungszeitrelais	119
1. Abhängige Unterspannungszeitrelais	120
2. Unabhängige Unterspannungszeitrelais	120
E. Distanzrelais (Distanzschutz)	121
1. Grundlagen des Distanzschutzes	121
2. Aufbau eines Distanzrelais	123
3. Zeitkennlinien der Distanzrelais	126
a) Stetige Zeitkennlinien	126
b) Stufenförmige Zeitkennlinien	129
c) Gemischte Zeitkennlinien	132
4. Distanzschutz-Schaltungen	133
5. Anwendung und Wahl der Distanzrelais	141
F. Strom-Vergleichsschutz	146
1. Längs-Stromvergleichsschutz (Differentialschutz)	146
a) Nicht stabilisierte Längs-Stromvergleichsrelais	149

b) Stabilisierte Längs-Stromvergleichsrelais	150
c) Verschiedenes	154
2. Quer-Stromvergleichsschutz (Achter- und Polygonschutz)	154
a) Achterschutz	155
b) Polygonschutz	156
G. Richtungs-Vergleichsschutz	157
1. Stromrichtungs-Vergleichsschutz	158
2. Leistungsrichtungs-Vergleichsschutz	159
3. Längs-Mitnahmeschutz	160
H. Erdschlußanzeige- und Abschalteneinrichtungen	161
1. Melden des Erdschlusses	162
2. Anzeigen des erdgeschlossenen Leiters	164
3. Selektives Anzeigen des erdgeschlossenen Anlageteiles	166
a) In Netzen ohne Erdschlußlöschung	166
b) In Netzen mit Erdschlußlöschung	168
4. Selektives Abschalten des erdgeschlossenen Anlageteiles	171
a) In Netzen mit Erdschlußlöschung	171
b) In Netzen ohne Erdschlußlöschung	172
5. Selektives Anzeigen von Erdschlußwischern	173
I. Pendelschutzeinrichtungen	173
1. Pendelsperreinrichtungen	174
2. Netzauftrenneinrichtungen	176
K. Schutzeinrichtungen gegen unzulässige Erwärmung von Anlageteilen	177
1. Wärmewächter	177
2. Wärmerelais	178
L. Gasfang- und Ölströmungs-Schutzeinrichtungen	179
V. Strom- und Spannungswandler für den Anschluß von Relais	182
A. Stromwandler	182
1. Aufbau	182
2. Leistung und Belastung	184
3. Überstromverhalten (Überstromziffer und Fehlwinkel)	185
4. Stromwandler mit mehreren Kernen	189
5. Kurzschlußfestigkeit der Stromwandler	190
6. Auswahl der Stromwandler nach Isolationsart und Bauform	190
7. Schutzmaßnahmen für Stromwandler	192
a) Schutzerdung	192
b) Offener und geschlossener Sekundärkreis	192
c) Schutzwiderstände für die Primärwicklung	193
B. Spannungswandler	193
1. Aufbau	193
2. Spannungen in Drehstromnetzen	195

3. Leistung und Belastung	197
4. Auswahl der Spannungswandler nach Isolationsart und Bauform	198
5. Schutzmaßnahmen für Spannungswandler	199
a) Schutz- und Betriebserdung	199
b) Absichern der Primär- und Sekundärkreise	200
VI. Auslösearten und Auslöseformen in der Schutztechnik	202
A. Allgemeines	202
B. Gleichstromauslösung	202
C. Wechselstromauslösung	204
D. Wandlerstromauslösung	205
E. Wahl der Auslöseform und Auslöseart	208
F. Schutzmaßnahmen für Gleichstrom-Betätigungs- kreise	209
1. Absicherung	210
2. Überwachung der Spannungsabsenkung und Stromkreisunterbrechung	211
3. Überwachung des Isolationszustandes	212
4. Ergänzende Bemerkungen	213
VII. Schutzeinrichtungen für die einzelnen Anlageteile	215
A. Allgemeines	215
B. Generatorschutz	216
1. Kurzschlußschutz	217
2. Erdschlußschutz	222
a) Erdschlußschutz für Generatoren, die das Netz über eigene Transformatoren speisen	223
b) Erdschlußschutz für Generatoren, die unmittelbar auf die Sammelschienen arbeiten	226
3. Windungsschlußschutz	229
4. Erdschluß- und Windungsschlußschutz für den Läufer	232
5. Überlastungsschutz, Spannungssteigerungsschutz und Brandschutz	233
6. Schutz durch Schnellentregung	234
C. Transformatorschutz	236
D. Sammelschienenschutz	242
E. Netzschutz (Schutz von Freileitungen und Kabeln)	244
1. Kurzschlußschutz	246
a) Staffelfverfahren	246
b) Vergleichsverfahren	255
2. Erdschlußschutz	256
F. Schutz von Motoren, Umformern und Gleichrichtern	256
1. Motorschutz	256

2. Einanker-Umformerschutz	261
3. Gleichrichterschutz	263
G. Schutz von Hochspannungs-Abnehmeranlagen	265
VIII. Prüfung und Wartung der Schutzeinrichtungen	269
A. Allgemeines	269
B. Prüfungsarten	270
1. Typenprüfung des Bestellers	271
2. Abnahmeprüfung.	271
3. Einbauprüfung	272
4. Betriebsprüfung	273
5. Selbsttätige Überwachung	274
C. Prüfverfahren	275
1. Primärprüfung	275
2. Sekundärprüfung.	278
D. Gesamtüberholung der Relais und die Relaiskartei.	280
1. Gesamtüberholung der Relais	280
2. Relaiskartei	281
IX. Störungsklä rung und Fehlerortermittlung	282
X. Schrifttum	286
A. Bücher	286
B. Zeitschriftenaufsätze	286
XI. Sachverzeichnis	290

I. Einleitung

Schutzrelais haben die Aufgabe, die einzelnen Anlageteile elektrischer Netze, wie Generatoren, Transformatoren, Freileitungen, Kabel, Sammelschienen, Motoren und dergleichen gegen die schädlichen Auswirkungen von Kurzschlüssen, Doppelerdschlüssen und Erdschlüssen zu schützen sowie die Lieferung der elektrischen Arbeit auch bei Störungen weitestmöglich sicherzustellen. Sie erfüllen diesen Aufgabenkreis im wesentlichen dadurch, daß sie die schadhaft gewordenen Netzteile in möglichst kurzer Zeit vom übrigen, gesunden Netz abtrennen oder wenigstens durch eine entsprechende Meldung kenntlich machen (selektive Erfassung!). Das Auftreten der Störungen (Fehler) selbst können die Relais freilich nicht verhindern; eine Verminderung der Störanfälligkeit bzw. der Störhäufigkeit läßt sich nur durch bauliche Maßnahmen an den Anlageteilen und durch zweckentsprechende Betriebsführung erzielen.

Ferner muß ein Schutz der elektrischen Anlagen oder Anlageteile auch gegen solche Schäden vorgesehen werden, die durch betriebsmäßige Überlastung, Windungsschluß, Pendelerscheinungen und dergleichen auftreten können. Gerade die Auswirkungen bei Pendelvorgängen erheischen von den Schutzeinrichtungen in dem sich immer mehr durchsetzenden Verbundbetrieb von Kraftwerken und Netzen die Erfüllung besonderer Aufgaben, z. B. die Einhaltung sehr kurzer Auslösezeiten sowie die Auftrennung der Netze an vorbestimmten Schaltstellen in Netzteile, die in der Lage sind, den Betrieb — wenn auch nur vorübergehend — aufrecht zu erhalten.

Sehr kurze Abschaltzeiten (Auslösezeiten der Relais und Ausschaltzeiten der Leistungsschalter) sind bei Kurzschlüssen und Doppelerdschlüssen überdies noch erforderlich, um ein Schwächen oder gar Abschmelzen der Phasenleiter wirksam zu bekämpfen und um die Dauer der Spannungsabsenkungen im Netz klein zu halten, damit unnötiges Abschalten von Motoren, Einanker-Umformern oder dergleichen verhindert wird.

Der heutige Stand der Relais-technik ist im wesentlichen das Ergebnis einer langen und engen Zusammenarbeit zwischen Relais-Herstellern und -Benutzern. Die Neu- und Weiterentwicklung von Schutzrelais selbst war in den letzten zehn Jahren zwar nicht so stürmisch wie in den Jahren 1923 bis 1930; aber durch umfangreiche Versuche in den Laboratorien der Hersteller und in den Netzen der Abnehmer gelang es in Verbindung mit dem hohen Stand der Feinmechanik auf dem Relaisgebiet, auch in dieser Zeit noch bedeutsame Fortschritte zu erzielen, die hauptsächlich eine Folge der gesteigerten Anforderungen an die Relais und ihre Schaltungen sind. Es wurden nicht nur neue Relais entwickelt, sondern es wurden in den letzten Jahren auch viele vorhandene Bauformen von Relais in ihrer Genauigkeit, Leistungsaufnahme, Schaltleistung und dergleichen wesentlich vervollkommenet und außerdem meist mit Zusätzen, wie Schleppzeigern, Fallklappen oder Stromanzeigern, zur besseren Störungsklärung in den Netzen versehen. Auch die Primärauslöser bzw. Primärrelais wurden weiter verbessert.

Obwohl im Laufe der Zeit verschiedene Ausführungsformen von Schutzrelais ganz oder teilweise verlassen worden sind¹⁾, ist die Zahl der gebräuchlichen Relaisarten immer noch sehr groß. In wirtschaftlicher und technischer Hinsicht wäre es bestimmt von Vorteil, wenn die Anzahl der Relaisarten noch weiter vermindert werden könnte. Die Abnehmer hätten es mit weniger Modellen zu tun, und die Hersteller könnten sich der Vervollkommnung der verbliebenen Modelle stärker widmen. Hierzu ist es aber geboten, daß die Abnehmer und z. T. auch die Hersteller sich in der Aufgabenstellung nur auf das unbedingt Erforderliche beschränken und nicht Dinge anstreben, die weitgehende Sonderausführungen notwendig machen. Die gesamte Schutztechnik ist selbst für den Fachmann auch ohnedies schon reichlich schwer zu übersehen.

Die Schutztechnik ist ein Sondergebiet der allgemeinen Starkstromtechnik. Die Beschäftigung mit der Schutztechnik sowie die Behandlung der auftretenden Störungen setzt eine ausreichende Kenntnis der Wechselstromtechnik einschließlich der Schaltungstechnik voraus. Denn bei den Störungen, die sich je nach den Netzverhältnissen und sonstigen Umständen meist stark unterschiedlich gestalten, sind oft sehr verwickelte Vorgänge zu klären. Auch ist eine genaue Kenntnis des Aufbaues der zu

¹⁾ Zu den ganz aufgegebenen Schutzeinrichtungen zählen z. B. der Differentialwattschutz für Transformatoren, die Kabelschutzsysteme nach Pfannkuch, Glaser und Lypro, der selektive Spannungsabfallschutz für Freileitungen, der Rückwattschutz für Generatoren in alter Form.

schützenden Anlageteile vom Generator bis zum letzten Verbrauchergerät (Motor, Lampe oder dergleichen) sowie des Verhaltens der Anlageteile bei Störungen erforderlich. Schwierige Verhältnisse können für die Schutzeinrichtungen und die Störungsklä rung besonders in verbundgespeisten Netzen auftreten.

Mit Rücksicht hierauf haben fortschrittliche Elektrizitätsversorgungsunternehmen seit Jahren Ingenieure und Techniker für die Planung und Unterhaltung der Schutzeinrichtungen sowie für die allgemeine Störungsklä rung in den Netzen mit gutem Erfolg eingesetzt. Dadurch erreichen die EVU eine gewisse Selbständigkeit in der Planung sowie in der Beurteilung des Schutzes im Betrieb; auch lassen sich manche betriebstechnischen Unzuträglichkeiten einfacher und schneller beheben.

Die Relais sollen, wie schon eingangs dieses Kapitels erwähnt, eine störungsfreie Energielieferung ermöglichen und haben gleichzeitig hohe Sachwerte zu schützen. Sie müssen trotz des seltenen Ansprechens stets mit höchster Genauigkeit arbeitsbereit sein. An ihre elektrische und mechanische Ausführung werden daher besonders hohe Anforderungen gestellt. Darüber hinaus müssen die Relais auch im Betrieb gut gepflegt und überwacht werden.

II. Begriffserklärungen

Die hier zusammengefaßten Definitionen berücksichtigen nur die wichtigsten Begriffe aus der Relais-Schutztechnik. Sie werden in den folgenden Kapiteln durch weitere Begriffserklärungen ergänzt und durch Beschreibungen ausführlich erläutert. Ein Teil der Begriffserklärungen ist den einschlägigen VDE-Regeln entnommen worden.

Diese Zusammenstellung soll den Leser vorweg mit den wichtigsten Begriffen der Schutztechnik vertraut machen und ihm nötigenfalls auch das Lesen einzelner Kapitel erleichtern.

A. Relais und Schutzeinrichtungen

Relais ist eine Einrichtung, die durch Änderung physikalischer, insbesondere elektrischer Größen betätigt wird und die elektrisch weitere Einrichtungen steuert.

Primärrelais ist ein Relais, dessen Wicklung unmittelbar im oder am überwachten Stromkreis liegt und dem damit die Meßgröße unmittelbar zugeführt wird.

Sekundärrelais ist ein Relais, dessen Wicklung über Stromwandler, Spannungswandler oder Nebenwiderstände am überwachten Stromkreis liegt und dem damit die Meßgröße mittelbar zugeführt wird.

Meßrelais (messende Relais) sind Relais, die unter Einhaltung einer vorgeschriebenen Genauigkeit beim Über- bzw. Unterschreiten eines bestimmten Wertes der sie beeinflussenden physikalischen Größe eine Betätigung herbeiführen oder verhindern.

Meßrelais für elektrische Größen sind z. B. Stromrelais, Spannungsrelais, Widerstandsrelais, Leistungsrelais, Richtungsrelais, Frequenzrelais.

Meßrelais für nichtelektrische physikalische Größen sind z. B. Temperaturrelais, Strömungsrelais, Druckrelais.

Hilfsrelais (nichtmessende Relais) sind Relais, die durch das Erscheinen oder durch die Änderung der sie beeinflussenden physikalischen Größen ohne besondere Genauigkeit wirksam werden und infolge dieser Änderung des Zustandes des Erregerkreises eine entsprechende Kontaktbetätigung herbeiführen.

Man unterscheidet z. B. Zwischenrelais, Melderelais, Fortschaltrelais, Verzögerungsrelais (Zeitrelais).

Schutzeinrichtung ist eine Anordnung von Relais und Hilfsgeräten (Wandlern, Zwischenrelais, Hilfsstromquellen) mit dem Zweck, einen Anlageteil vor den Auswirkungen anormaler Betriebsverhältnisse zu bewahren oder die Auswirkungen zu begrenzen.

Relaissatz (Schutzrelaissatz) ist die Zusammenfassung der Relais einer Schutzeinrichtung für einen Anlageteil (z. B. für ein Leitungsende).

Verbundrelais (kombiniertes Relais) ist die Zusammenfassung mehrerer oder aller Glieder eines Relaissatzes in einem Gehäuse.

Die Hauptglieder eines Verbundrelais sind: Anregeglied, Ablaufglied und Richtungsglied.

- a) Anregeglied (Ansprechglied) ist das Glied, das beim Erreichen oder Über- bzw. Unterschreiten der eingestellten Größe anspricht und weitere Relaisglieder in Tätigkeit setzt.
- b) Ablaufglied (Verzögerungsglied) ist das Glied, das die Ablaufzeit des Relais bestimmt.
- c) Richtungsglied ist das Glied, das die Betätigung weiterer Relaisglieder abhängig von der Leistungsrichtung erlaubt oder verhindert.

Sind die bisher genannten Relaisglieder in getrennten Gehäusen untergebracht, so nennt man sie z. B. Anregerelais, Verzögerungsrelais und Richtungsrelais. — Jedes einzelne Relaisglied setzt sich wiederum aus Relaisteilen zusammen.

Kurzschlußschutz ist ein Schutz, der die Abschaltung des vom Kurzschluß betroffenen Anlageteiles herbeiführt.

Überlastungsschutz ist ein Schutz, der den zu schützenden Anlageteil bei unzulässiger thermischer Beanspruchung kenntlich macht oder seine Abschaltung herbeiführt.

Erdschlußschutz ist ein Schutz, der den betroffenen Anlageteil bei Erdschluß kenntlich macht oder seine Abschaltung herbeiführt.



Zeitstaffelschutz ist ein Schutz, bei dem von sämtlichen im Fehlerfalle ansprechenden Relais nur die des schadhafte Anlageteiles ablaufen und diesen zum Abschalten bringen, bevor die Ablaufzeit der übrigen im Fehlerstrompfad befindlichen Relais entsprechend der Staffelzeit erreicht ist.

Vergleichsschutz ist ein Schutz, der durch Vergleich von elektrischen Größen (Strom, Spannung oder Leistung) an den Enden des zu schützenden Anlageteiles feststellt, ob ein im Netz aufgetretener Fehler im Bereich des überwachten Anlageteiles liegt und gegebenenfalls diesen kenntlich macht oder seine Abschaltung herbeiführt.

B. Zeitbegriffe

Arbeitszeit einer Relaiseinrichtung ist die Zeit vom Auftreten der das Arbeiten bewirkenden Ursache bis zum Wirksamwerden der Kontakteinrichtung. Bei Schutzeinrichtungen wird die Arbeitszeit meist mit Auslösezeit bezeichnet.

Ansprechzeit (Eigenzeit beim Ansprechen) eines unverzögerten Relais ist die Zeit vom Auftreten der das Ansprechen bewirkenden Ursache bis zum Wirksamwerden seiner Kontakteinrichtung.

Ablaufzeit eines verzögerten Relais ist eine bewußt verlängerte Ansprechzeit.

Laufzeit eines verzögerten Relais ist die Zeit vom Eintreten der das Arbeiten bewirkenden Ursache bis zu dem Zeitpunkt, in dem das Relais seine Bewegung im Arbeitssinne einstellt.

Nachlaufzeit eines verzögerten Relais ist die Zeit vom Aufhören der das Arbeiten bewirkenden Ursache bis zu dem Zeitpunkt, in dem das Relais seine Bewegung im Arbeitssinne einstellt.

Umschlagzeit eines Relais ist die Zeit beim Umschalten eines Umschaltkontaktes, die zwischen dem Verlassen des einen Gegenkontaktes und dem Berühren des anderen Gegenkontaktes verstreicht. Die Umschlagzeit beim Ansprechen ist von der beim Rückgang zu unterscheiden.

Rückfallzeit (Rücklaufzeit) eines verzögerten Relais ist die Zeit vom Fortfall der das Ansprechen bewirkenden Ursache bis zu dem Zeitpunkt, in dem das Relais in seine Ruhelage zurückkehrt und somit zum erneuten Ansprechen bereit ist.

Grundzeit ist die kleinste Arbeitszeit eines Relais mit stetiger Zeitkennlinie (Abb. 81). Sie ist meist in gewissen Grenzen einstellbar.

Endzeit (Grenzzeit) ist die längste eingestellte Arbeitszeit eines verzögerten Relais.

Staffelzeit ist der Unterschied der Auslösezeiten hintereinanderliegender Relaissätze in einem Netz.

Abschaltzeit eines vom Fehler betroffenen Anlageteiles ist die Zeit, die vom Eintreten der das Arbeiten der Schutzrichtungen bewirkenden Ursache bis zu seinem vollkommenen Abtrennen von den gesunden Anlageteilen verstreicht.

C. Relaiseigenschaften

Anzugswert ist der Wert der das Relais beeinflussenden Größe, bei dessen Erreichen in zunehmendem Sinne das Relais seine Kontakteinrichtung betätigt (z. B. schließt oder öffnet).

Abfallwert ist der Wert der das Relais beeinflussenden Größe, bei dessen Erreichen in abnehmendem Sinne das Relais seine Kontakteinrichtung betätigt (z. B. öffnet oder schließt).

Halteverhältnis ist das Verhältnis des Anzugswertes zum Abfallwert bei gleicher Einstellung.

Anzugs- und Abfallwert beziehen sich auf die Eigenschaften des Relais. Das aus diesen Werten gebildete Halteverhältnis ist daher immer größer als 1 (Seite 74).

Außer den vorstehenden Werten unterscheidet man noch Ansprech- und Rückgangswert. Diese Größen beziehen sich auf die Anwendung des Relais (Seite 94).

Ansprechwert ist der Wert der das Relais beeinflussenden Größe, bei dessen Erreichen in zunehmendem oder abnehmendem Sinne das Relais in Tätigkeit tritt und die ihm zugewiesene Aufgabe erfüllt.

Bei Überstromrelais ist der Ansprechwert der Anzugswert. Bei Unterspannungsrelais ist der Ansprechwert der Abfallwert.

Rückgangswert ist der Wert der das Relais beeinflussenden Größe, bei dessen Erreichen das Relais in die Ausgangslage zurückgeht.

Bei Überstromrelais ist sinngemäß der Rückgangswert der Abfall-

wert. Bei Unterspannungsrelais ist der Rückgangswert sinngemäß der Anzugswert.

Einstellwert ist der Sollwert des Anzugs- oder Abfallwertes bzw. der Ablaufzeit eines Relais, auf den das Relais eingestellt ist. Anzugswert, Abfallwert und Ablaufzeit können fest eingestellt oder einstellbar sein.

Einstellbereich ist der Bereich vom kleinsten bis zum größten Einstellwert eines Relais.

Stetig einstellbar ist ein Relais, wenn in seinem Einstellbereich jeder Einstellwert eingestellt werden kann.

Stufig einstellbar ist ein Relais, wenn in seinem Einstellbereich nur bestimmte Einstellwerte eingestellt werden können.

Zeitkennlinie ist die kurvenmäßige Darstellung der Arbeitszeit eines Relais in Abhängigkeit von den den Ablauf bestimmenden elektrischen Größen.

Fehler, z. B. Ansprech-, Abfall- und Ablauffehler, ist die Abweichung des gemessenen Wertes vom Einstellwert. Man unterscheidet positive und negative Fehler. Der Fehler kann in Absolut-Werten oder in Prozenten (z. B. vom Einstellwert) angegeben werden. Die Fehlergrenze gibt den größten positiven oder negativen zulässigen Fehler an. Sie kennzeichnet die Genauigkeit der Relais.

Streubereich ist der Unterschied zwischen größtem und kleinstem gemessenen Wert bei einer bestimmten Einstellung (z. B. des Ansprechstromes). Er kann in Absolutwerten oder in Prozenten (z. B. vom Einstellwert) angegeben werden.

Streuband ist die Aneinanderreihung der Streubereichwerte in Abhängigkeit von einer veränderlichen Größe (Einfluß- oder Einstellgröße).

Verbrauch eines Relais ist seine Leistungsaufnahme in VA oder W, bezogen auf einen Wert der Erregergröße (bei Nennerregung: Nennverbrauch)¹⁾.

Bei vielen Wechselstromrelais ist der Verbrauch in angezogenem Zustand ein anderer als in abgefallenem Zustand.

¹⁾ Bisher vielfach als Eigenverbrauch bezeichnet. Statt des Verbrauches in VA kann auch die Bürde in Ohm angegeben werden.

Zulässiger Dauerwert ist der größte Wert des Stromes bzw. der Spannung (Effektivwerte), den ein Relais ohne unzulässige Erwärmung und ohne Beschädigung dauernd aushalten kann.

Thermischer Grenzstrom (I_{therm}) ist der höchste Wert des Stromes in A_{eff} , dessen Wärmewirkung das Relais 1 s lang aushalten kann, ohne Schaden zu nehmen.

Dynamischer Grenzstrom (I_{dyn}) ist der Wert der größten Stromamplitude in A , dessen Kraftwirkung das Relais aushalten kann, ohne Schaden zu nehmen.

D. Relaiskontakte

Die zur Kontaktgabe dienenden Teile einer Kontakteinrichtung¹⁾ heißen Schaltstücke.

Arbeitskontakt (Schließkontakt) ist eine Kontakteinrichtung, deren Schaltstücke offen sind, wenn die zugehörige Erregerspule nicht erregt ist. Der Arbeitskontakt schließt sich, wenn das Relais erregt wird.

Ruhekontakt (Öffnungskontakt) ist eine Kontakteinrichtung, deren Schaltstücke geschlossen sind, wenn die zugehörige Erregerspule nicht erregt ist. Der Ruhekontakt öffnet sich, wenn das Relais erregt wird.

Umschaltkontakt ist eine Kontakteinrichtung, die aus einem Arbeitskontakt und einem Ruhekontakt mit gemeinsamer Zuführung besteht und die beim Arbeitsvorgang des Relais wirksam wird.

Wischkontakt ist eine Kontakteinrichtung, die bei der Schaltbewegung des Relais sich nur kurzzeitig schließt oder öffnet.

Kontaktweg (Schaltweg) ist die Entfernung zwischen den Schaltstücken einer bis zur Endlage geöffneten Kontakteinrichtung.

Kontaktdruck ist der Druck, den die Schaltstücke in geschlossenem Zustand aufeinander ausüben.

Zulässiger Kontakt-Dauerstrom ist der größte Wert des Stromes (Effektivwert), den ein Kontakt ohne unzulässige Erwärmung und ohne Schaden zu nehmen, dauernd führen kann.

¹⁾ Kontakteinrichtungen werden im Sprachgebrauch einfach „Kontakte“ genannt.

Zulässiger Einschaltstrom ist der höchste Stromwert, den ein Kontakt ohne Schaden zu nehmen und ohne unzulässige Abnutzung einschaltet.

Zulässiger Ausschaltstrom ist der größte Wert des Stromes (Effektivwert), den ein Kontakt bei einer bestimmten Spannung seines Kontaktkreises ohne Schaden zu nehmen und ohne unzulässige Abnutzung ausschaltet.

Hierbei ist zu unterscheiden zwischen Ausschaltströmen in Wechselstrom- und Gleichstromkreisen, zwischen ohmscher und induktiver Belastung.

Zulässige Ausschaltleistung ist das Produkt aus Strom und Spannung des geschalteten Stromkreises, die eine Kontakteinrichtung sicher bewältigt, ohne Schaden zu nehmen (vgl. auch VDE 0660).

Zulässige Schaltzahl ist die Anzahl der Schaltungen, die ein Relais ausführen kann, ohne in seiner Arbeitsweise beeinträchtigt zu werden.

Zulässige Schalthäufigkeit ist die Anzahl der Schaltungen, die ein Relais in der Zeiteinheit (im allgemeinen in einer Stunde) ausführen kann, ohne beschädigt oder unzulässig abgenutzt zu werden.

E. Auslöser und Auslöserarten

Auslösung eines Schaltgerätes ist das Aufheben einer Sperrung (z. B. Klinke, Ventil) mit einem Auslöser zum Ausschalten des Schaltgerätes (VDE 0670).

Auslöser ist eine Einrichtung, die durch Änderung elektrischer Größen betätigt wird und die mechanisch einen Entriegelungsvorgang herbeiführt.

Primärauslöser ist ein Auslöser, dessen Wicklung unmittelbar im oder am überwachten Stromkreis liegt und dem damit die Meßgröße unmittelbar zugeführt wird.

Hilfsauslöser¹⁾ ist ein Auslöser, dessen Wicklung an eine besondere Betätigungsquelle angeschlossen ist. Diese kann auch ein Strom- oder Spannungswandler sein.

Arbeitsauslöser ist ein Hilfsauslöser, der beim Einschalten oder Stärken der Erregung auslöst.

¹⁾ Auch Sekundärauslöser oder einfach Auslöser genannt.

Rubeauslöser ist ein Hilfsauslöser, der beim Ausschalten oder Schwächen der Erregung auslöst.

Gleichstromauslösung ist eine Auslösung, bei der der Hilfsauslöser mit Gleichstrom betätigt wird. (Die genormte Nennspannung für Hilfsauslöser beträgt 24, 60, 110 oder 220 V.)

Wechselstromauslösung ist eine Auslösung, bei der der Hilfsauslöser mit Wechselstrom betätigt wird. (Bei Anschluß an Spannungswandler beträgt die genormte Nennspannung des Hilfsauslösers 100 V.)

Wandlerstromauslösung ist eine Wechselstromauslösung, bei der der Betätigungsstrom für die Hilfsauslöser den Stromwandlern entnommen wird. (Der genormte Auslösernennstrom für die Hilfsauslöser beträgt 5 A und in besonderen Fällen 1 A.)

F. Strom- und Spannungswandler¹⁾

Nennstrom (primär und sekundär) eines Stromwandlers ist der auf dem Leistungsschild angegebene Wert des primären und sekundären Stromes.

Nennspannung (primär und sekundär) eines Spannungswandlers ist der auf dem Leistungsschild angegebene Wert der primären und sekundären Spannung.

Bei Einphasen-Spannungswandlern, die zwischen Leiter und Erde geschaltet werden, sowie bei Fünfschenkelwandlern gilt die Sternspannung als Nennspannung. Sie wird in der Form Dreieckspannung/ $\sqrt{3}$ angegeben, z. B. 15000/ $\sqrt{3}$.

Bürde bei Stromwandlern ist der in Ohm angegebene Scheinwiderstand der sekundär angeschlossenen Geräte einschließlich der Zuleitungen.

Nennbürde bei Stromwandlern ist die auf dem Leistungsschild in Ohm angegebene und unter Berücksichtigung der Bestimmung über die Fehlergrenzen (§ 12) festgesetzte Bürde. Das Produkt aus der Nennbürde und dem Quadrat des sekundären Nennstromes ist die Nennleistung in VA. Diese kann an Stelle der Nennbürde auf dem Leistungsschild in VA angegeben werden.

¹⁾ Vgl. VDE 0414.

Nennleistung bei Spannungswandlern ist die auf dem Leistungsschild in VA angegebene und unter Berücksichtigung der Bestimmungen über die Fehlergrenzen (§ 13) festgesetzte Scheinleistung.

Nennbürden und Nennleistungen beziehen sich auf den Leistungsfaktor $\cos \beta = 0,8$ (induktiv), wenn nichts anderes ausdrücklich angegeben ist.

Nenn-Überstromziffer n bei Stromwandlern ist das Vielfache des Nennprimärstromes, bei dem der Stromfehler bei Nennbürde 10% beträgt.

Grenzleistung bei Spannungswandlern ist die unter Berücksichtigung der Bestimmungen über die Erwärmung (§ 16b) festgesetzte und auf die Nennspannung bezogene Scheinleistung. Sie wird in VA auf dem Leistungsschild angegeben.

Nennübersetzung bei Stromwandlern ist das Verhältnis des primären Nennstromes zum sekundären Nennstrom.

Nennübersetzung bei Spannungswandlern ist das Verhältnis der primären Nennspannung zur sekundären Nennspannung. (Die Nennübersetzung wird als ungekürzter Bruch angegeben.)

Nennfrequenz ist die auf dem Leistungsschild angegebene Frequenz.

Stromfehler F_i eines Stromwandlers bei einer gegebenen primären Stromstärke ist die prozentuale Abweichung der sekundären Stromstärke von ihrem Sollwert; dieser ergibt sich aus der primären Stromstärke durch Division mit der Nennübersetzung. Der Stromfehler wird positiv gerechnet, wenn der tatsächliche Wert der sekundären Größe den Sollwert übersteigt.

Spannungsfehler F_u eines Spannungswandlers bei einer gegebenen primären Klemmenspannung ist die prozentuale Abweichung der sekundären Klemmenspannung von ihrem Sollwert; dieser ergibt sich aus der primären Klemmenspannung durch Division mit der Nennübersetzung. Der Spannungsfehler wird positiv gerechnet, wenn der tatsächliche Wert der sekundären Größe den Sollwert übersteigt.

Fehlwinkel δ_i bei Stromwandlern ist die Phasenverschiebung des Sekundärstromes gegen den Primärstrom.

Fehlwinkel δ_u bei Spannungswandlern ist die Phasenverschiebung der sekundären Klemmenspannung gegen die primäre Klemmenspannung.

Die Ausgangsrichtungen sind hierbei so vorausgesetzt, daß sich bei Fehlerfreiheit des Wandlers eine Verschiebung von 0° (nicht 180°) ergibt.

Der Fehlwinkel wird in (Winkel-)Minuten angegeben und positiv gerechnet, wenn die sekundäre Größe voreilt.

Thermischer Grenzstrom I_{therm} ist der auf dem Leistungsschild angegebene höchste Wert des Primärstromes in kA_{eff} , dessen Wärmewirkung ein Stromwandler bei kurzgeschlossener Sekundärwicklung 1 s lang aushalten kann, ohne Schaden zu nehmen.

Dynamischer Grenzstrom I_{dyn} ist der Wert der größten Stromamplitude in kA , dessen Kraftwirkung ein Stromwandler bei kurzgeschlossener Sekundärwicklung aushalten kann, ohne Schaden zu nehmen.

Über die Umbruchkraft eines Stromwandlers — die an den Primäranschlüssen in der ungünstigsten Richtung (senkrecht zum Isolator) zulässige größte statische Kraft — wird durch die Angabe des dynamischen Grenzstromes nichts ausgesagt¹⁾.

G. Prüfung von Relais und Schutzeinrichtungen

Typenprüfung des Bestellers ist die Prüfung, bei der durch Versuche die besonderen Eigenschaften eines Relais oder einer Schutzeinrichtung und damit die Eignung für die vorliegenden Betriebserfordernisse ermittelt werden.

Abnahmeprüfung ist die Prüfung lieferfertiger Geräte, bei der sich der Abnehmende überzeugt, daß die bei der Bestellung festgelegten Werte eingehalten werden.

Einbauprüfung ist die Prüfung der Relais oder Schutzeinrichtungen nach erfolgtem Einbau in der Anlage.

Betriebsprüfung ist die Prüfung der eingebauten Relais oder Schutzeinrichtungen in bestimmten Zeitabschnitten.

Selbsttätige Überwachung ist die Überwachung der Strom- und Spannungskreise durch ständig wirksame Anzeigeeinrichtungen (z. B. Strom-, Spannungs- oder Leistungsrichtungs-Anzeiger).

¹⁾ Vgl. DIN VDE 8100, 8101, 8102, 8104, 8105, 8106.

Primärprüfung ist die Prüfung einer Schutzeinrichtung durch Zuführung der Prüfgrößen auf der Primärseite der Wandler.

Sekundärprüfung ist die Prüfung von Sekundärrelais (auch von Relais-sätzen) unter Zuführung der Prüfgrößen an den Relais- oder Reihen-klemmen.

H. Fehlerarten in Drehstromnetzen

Dreipoliger Kurzschluß ist die Durchbrechung oder Überbrückung der Isolation zwischen allen drei Leitern (Stromleitern) eines Netzes am gleichen Ort (Seite 35).

Zweipoliger Kurzschluß ist die Durchbrechung oder Überbrückung der Isolation zwischen zwei Leitern eines Netzes am gleichen Ort (Seite 37).

Einpoliger Kurzschluß ist die Durchbrechung oder Überbrückung der Isolation zwischen einem Leiter und Erde in einem kurzgeerdeten Netz (Seite 38).

Windungsschluß ist die Durchbrechung oder Überbrückung der Isolation zwischen zwei oder mehreren Windungen eines Wicklungsstranges (Seite 39).

Kurzschluß mit Erdberührung ist ein Kurzschluß, bei dem der Kurzschlußstrom von Leiter zu Leiter unmittelbar fließt, wobei die Leiter des mit Kurzschluß behafteten Anlageteiles oder der Lichtbogen gleichzeitig Erdberührung haben (Seite 40).

Erdkurzschluß (Kurzschluß über Erde) ist ein zwei- oder dreipoliger Kurzschluß, bei dem der Strom seinen Weg von Leiter zu Leiter derselben Leitung über die Erde am gleichen Ort nimmt (Seite 40).

Gesellschafterschlus ist ein Kurzschluß über Erde zwischen zwei Leitern eines Leitungsabschnittes mit an verschiedenen Stellen liegenden Erdschlußpunkten (Seite 49).

Doppelerdschlus ist ein Kurzschluß über Erde zwischen zwei Leitern mit auf verschiedenen Leitungsabschnitten des Netzes liegenden Erdschlußpunkten (Seite 43).

Erdschlus ist die Durchbrechung oder Überbrückung der Isolation zwischen einem Leiter und Erde in einem nicht kurz geerdeten Netz (Seite 49).

III. Fehler- und Störungsarten

A. Allgemeines

Die Anlageteile elektrischer Netze können durch äußere Einwirkungen oder innere Mängel solchen Beanspruchungen ausgesetzt werden, daß die Grenze ihrer mechanischen und elektrischen Festigkeit erreicht oder gar überschritten wird. Die Höhe der Beanspruchung und ihre Einwirkungsdauer sind maßgebend für das Zustandekommen von Fehlern oder Zerstörungen. Da es aus wirtschaftlichen Gründen praktisch unmöglich ist, die Anlageteile so zu bauen, daß sie allen auftretenden Beanspruchungen in bezug auf Höhe und Dauer gewachsen sind, müssen notwendigerweise Einrichtungen vorgesehen werden, die die Überbeanspruchungen in ihren Auswirkungen auf die Anlageteile und den Netzbetrieb wenigstens auf erträgliche Ausmaße beschränken.

Anlaß zu Fehlern oder Störungen geben, abgesehen von den möglichen Isolationsmängeln der Anlageteile selbst, gewöhnlich Blitz einschläge, Rauhreif, Schneelast, Sturm, Äste, Vögel, Ratten, Anhacken von Kabeln, Erdbewegungen, falsche Schaltheandlungen, Verschmutzung, Schaltüberspannungen und dergleichen. Sie wirken sich als Isolationsdurchbruch zwischen den Leitern (Kurzschlüsse) oder zwischen den Leitern und Erde (Erdschlüsse oder einpolige Kurzschlüsse), gegebenenfalls auch als Leiterunterbrechung (Leiterbruch) aus. Auch betriebsmäßige Überlastungen sowie Schwebungserscheinungen können bei erheblicher Stärke und längerer Dauer gewisse Schäden an den Anlageteilen bzw. Störungen im Netzbetrieb hervorrufen. Sie erfordern ebenfalls eine rechtzeitige Abstellung oder Abschaltung.

Da die elektrische Energie vornehmlich in Form von Drehstrom erzeugt und verteilt wird, sollen die weiteren Betrachtungen hauptsächlich auf Vorgänge und Fragen beschränkt werden, die sich auf Drehstromnetze beziehen. Für Wechselstromnetze anderer Phasenzahl gelten bei sinngemäßer Anwendung die gleichen Überlegungen.

Die Drehstromnetze lassen sich nach der Art der Behandlung ihres

Sternpunktes einteilen in Netze mit kurzgeerdetem Sternpunkt und in solche mit nicht kurzgeerdetem Sternpunkt.

- a) Drehstromnetze mit kurzgeerdetem Sternpunkt sind Netze, bei denen der Sternpunkt entweder starr oder halbstarr geerdet ist. Dabei wird die halbstarre Erdung gewöhnlich über induktive Blindwiderstände kleiner Ohmzahl vorgenommen. Die starre (widerstandslose) Erdung des Netzsternpunktes führt man in Deutschland praktisch nur in Netzen mit einer Betriebsspannung unter 1000 V aus.
- b) Drehstromnetze mit nicht kurzgeerdetem Sternpunkt sind Netze mit freiem Sternpunkt sowie solche Netze, bei denen am Sternpunkt oder am Netzsystem Erdschluß-Kompensationseinrichtungen, wie Petersen-Spulen, Bauch-Löschtransformatoren oder dergleichen angeschlossen sind. Die Erdschlußlöscheinrichtungen stellen induktive Blindwiderstände verhältnismäßig hoher Ohmzahl dar.

Drehstromnetze mit einer Betriebsspannung unter 1000 V werden vorwiegend mit geerdetem vierten Leiter oder mit kurzgeerdetem Sternpunkt betrieben. Bei den Drehstromnetzen mit einer Betriebsspannung über 1000 V pflegt man in Deutschland und in vielen anderen Ländern das Verfahren nach b) zu benutzen, während in Nordamerika sowie in einigen anderen überseeischen Ländern die starre oder halbstarre Erdung vorherrscht.

Zur leichteren Unterscheidung bezeichnet man in der Praxis die Drehstromnetze nach ihrer Betriebsspannung, und zwar

- von 1 bis 30 kV als Mittelspannungsnetze,
- von etwa 45 bis 80 kV als Hochspannungsnetze,
- von 110 bis 400 kV als Höchstspannungsnetze.

Netze mit einer Betriebsspannung unter 1000 V nennt man gewöhnlich Niederspannungsnetze.

Nach diesen allgemeinen Ausführungen soll nunmehr auf die wichtigsten Fehler- und Störungsarten, wie Kurzschluß, Doppelerdschluß, Erdschluß, Leiterbruch, Überlastungen, Schwebungserscheinungen usw., kurz eingegangen und in diesem Zusammenhang das Verhalten der wirk-samen elektrischen Größen, wie Spannung, Strom, Widerstand, Phasenwinkel und dergleichen im Hinblick auf die Selektivschutztechnik besprochen werden.

B. Kurzschluß

Kurzschlüsse entstehen in elektrischen Netzen dadurch, daß die Isolation zwischen den Phasenleitern oder zwischen einem Phasenleiter und Erde in starr oder halbstarr geerdeten Netzen durch äußere Einwirkungen oder innere Vorgänge durchbrochen bzw. überbrückt wird. Nach der Anzahl der kurzgeschlossenen Leiter unterscheidet man in Drehstromnetzen drei-, zwei- und einpolige Kurzschlüsse. Diese werden wiederum nach dem Grad des Kurzschließens eingeteilt in satte Kurzschlüsse und in Lichtbogenkurzschlüsse. Als satte Kurzschlüsse gelten alle Kurzschlüsse mit geringer Spannung zwischen den Elektroden (bis etwa 300 V); dabei wird ein Verschweißen der Leiter nicht unbedingt vorausgesetzt. Die Lichtbogenkurzschlüsse sind dagegen durch den frei brennenden Lichtbogen gekennzeichnet. Außerdem gibt es Kurzschlüsse über Erde (Erdkurzschluß, Doppelerdschluß), die zwischen den Elektroden meist auch eine hohe Spannung aufweisen und u. U. mit Lichtbogen verbunden sein können.

Kurzschlüsse können in elektrischen Anlagen sehr schwere Zerstörungen hervorrufen. Ihre Wirkungen sind um so gefährlicher, je größer die Fehlerströme sind und je länger die Kurzschlußdauer ist. Die Kurzschlüsse stellen wohl die schwersten Beanspruchungen der Anlagen dar. Ihre Einwirkungsdauer muß daher weitestgehend beschränkt werden, um die Auswirkungen gering zu halten. Die Kurzschlußzeit muß auch deswegen sehr klein gehalten werden, weil sonst die Spannungsabsenkungen ein Außertrittfallen der Generatoren, Motoren und Einankerumformer verursachen können, wodurch der Netzbetrieb beeinträchtigt wird.

Da an der Kurzschlußstelle der geringste Widerstand zwischen den Leitern herrscht, so treiben die Stromquellen sofort ihre Ströme in voller oder teilweiser Höhe längs der Zuführungsleitungen über die Fehlerstelle (Abb. 1, vgl. auch die Abb. 3 und 4). Über die Kurzschlußstelle (K) fließt der gesamte Fehlerstrom, der sich aus den Fehlerströmen annähernd algebraisch zusammensetzt, die über die einzelnen Leitungspfade zur Fehlerstelle gelangen (Teilbild d). Die Spannung U zwischen den kurzgeschlossenen Leitern ist dagegen an der Fehlerstelle am niedrigsten. Sie baut sich in Richtung der Stromquellen stetig auf, wogegen der Strom I in den Leitungspfaden praktisch gleich groß bleibt; es sei denn, daß in den vorgelagerten Unterstationen auch während der Kurzschlußdauer Nutzströme entnommen werden. Der Scheinwiderstand

$Z/U/I$ ist daher an der Kurzschlußstelle am kleinsten und nimmt in Richtung zu den Stromquellen zu (Teilbild e).

Sind Werkstoff und Querschnitt der Leiter der einzelnen Leitungsstrecken bei gleicher geometrischer Anordnung verschieden, so verlaufen die Spannungen und der Scheinwiderstand nicht mehr stetig, sondern

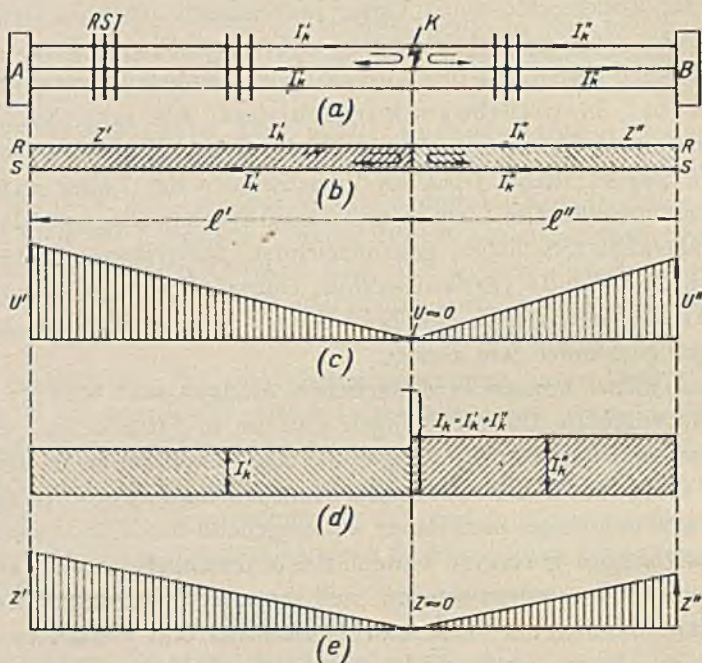


Abb. 1. Verlauf von Spannung, Strom und Scheinwiderstand bei zweipoligem satten Kurzschluß auf einer zweiseitig gespeisten Drehstromleitung.

nach gebrochenen Linien. Ein nicht linearer Verlauf dieser Größen ergibt sich auch dann, wenn an der Kurzschlußstelle hohe Widerstände auftreten, wie Lichtbogenwiderstände oder Erdübergangswiderstände (Ausbreitungswiderstände). — In Abb. 1 sind unter b) für den zweipoligen Kurzschluß K die Strom- bzw. Impedanzschleifen: Leiter—Leiter besonders herausgezeichnet und mit Schraffur versehen.

Der Kurzschlußwinkel, d. h. die Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung im Kurzschlußpfad ist stets induktiv, d. h. der Kurzschlußstrom eilt der treibenden Spannung um einen bestimmten Phasenwinkel φ nach. In Kabeln ist der Kurzschlußphasenwinkel φ meist viel

kleiner als in Freileitungen¹⁾, weil infolge der geringeren Leiterabstände die Induktivität wesentlich kleiner ist. Bei einer Strombegrenzungsdrosselspule erreicht der Kurzschlußphasenwinkel dagegen einen Wert von nahezu 90°. Liegen im Kurzschlußpfad Kabel, Freileitungen und Drosselspulen hintereinander, so ändert sich der Phasenwinkel in Richtung

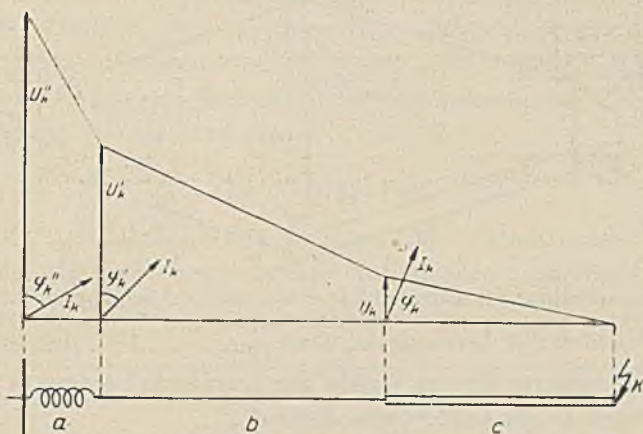


Abb. 2. Änderung des Kurzschlußphasenwinkels φ_K im Zuge eines Kurzschlußstrompfades, bestehend aus einer Kurzschlußdrosselspule (a), einer Freileitung (b) und einem Kabel (c).

zur Stromquelle hin etwa so, wie in Abb. 2 angedeutet. Durch hohen Wirkwiderstand an der Kurzschlußstelle (Lichtbogenkurzschluß oder Kurzschluß über Erde) werden die Phasenwinkel verkleinert.

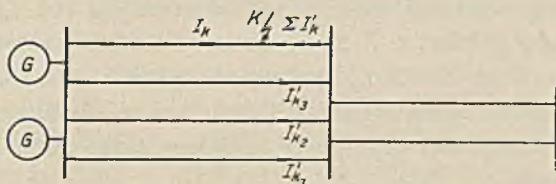


Abb. 3. Stromverteilung bei Kurzschluß in einem Netz mit mehrfach parallelen Leitungen.

In Netzen mit parallelen Leitungen sowie in vermaschten und verbundgespeisten Netzen fließen die Fehlerströme stets in Richtung zur Kurzschlußstelle und verteilen sich dabei über die angrenzenden Leitungs-

¹⁾ Zahlenbeispiele siehe in M. Walter, Kurzschlußströme in Drehstromnetzen, zweite Auflage, Verlag R. Oldenbourg, München 1938, S. 17 und 18.

strecken in ihrer Größe im umgekehrten Verhältnis der Scheinwiderstände der Leitungspfade (Abb. 3 und 4). Die vom Kurzschluß betroffene Leitungstrecke führt in solchen Netzgebilden gewöhnlich den größten Kurzschlußstrom. Eine Ausnahme bildet der in Abb. 165 dargestellte Fall.

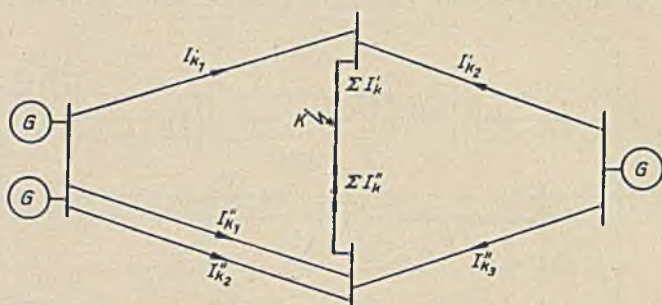


Abb. 4. Stromverteilung bei Kurzschluß in einem von zwei Seiten gespeisten vermaschten Ringnetz.

Als Richtwerte für die Größe der Kurzschlußströme in Drehstromnetzen mögen folgende Hinweise dienen¹⁾.

Die Stoßkurzschlußströme der Generatoren sind bei drei-, zwei- und einpoligem Schluß praktisch gleich groß. Ihre Größe hängt im wesentlichen ab von der Ständerstreuung der Maschinen und dem Blind- bzw. Scheinwiderstand der äußeren Kurzschlußbahn.

Beim Klemmenkurzschluß beträgt der Stoßstromhöchstwert von neuzeitlichen Synchronmaschinen im ungünstigsten Fall das 15fache des Scheitelwertes oder das 21fache des Effektivwertes vom Nennstrom. Diese Stromwerte beziehen sich auf eine Ständerstreuung von 12%. Oft ist die Ständerstreuung größer, z. B. 15%, so daß die erste Stromspitze nur noch den 12fachen Wert der Amplitude (Scheitelwert) des Nennstromes erreicht. Maschinen älterer Bauart, insbesondere solche ohne Dämpferwicklung, weisen infolge der geringeren Ständerreaktanz höhere Kurzschlußstromwerte auf.

Tritt dagegen ein Kurzschluß im Netz auf, d. h. befinden sich zwischen den Maschinen und der Kurzschlußstelle im Kurzschlußpfad noch Transformatoren, Drosselspulen oder Leitungen, so wird der Stoßkurzschlußstrom infolge der dämpfenden Wirkung des Widerstandes der äü-

¹⁾ Ausführlicher siehe in M. Walter, Kurzschlußströme in Drehstromnetzen, 2. Auflage, R. Oldenbourg, München 1938; M. Schleicher, Die moderne Selektivschutztechnik, J. Springer, Berlin 1926, S. 25—56.

ßeren Kurzschlußbahn gewöhnlich viel kleiner als der beim Klemmenkurzschluß.

Die Dauerkurzschlußströme der Maschinen sind im Gegensatz zu den Stoßkurzschlußströmen bei drei-, zwei- und einpoligem Kurzschluß verschieden groß; denn sie sind außer vom Streublindwiderstand der Maschinen und dem Netzblindwiderstand bzw. Netzscheinwiderstand in sehr starkem Maße vom Ankerrückwirkungs-Blindwiderstand abhängig.

Bei Klemmenkurzschluß ergeben sich die in Zahlentafel I zusammengestellten Richtwerte für den Dauerkurzschlußstrom, bezogen auf Vollasterregung der Maschinen bei $\cos \varphi = 0,8$.

Zahlentafel I.

Dauerkurzschlußströme als Vielfaches des Nennstromes bei Kurzschluß an den Klemmen der Generatoren (Angaben nach den REH 1929).

Kurzschlußart	Turbogeneratoren	Schenkelpolgeneratoren
dreipolig	$2 \cdot I_n$	$2,5 \cdot I_n$
zweipolig	$3 \cdot I_n$	$3,75 \cdot I_n$
einpolig	$5 \cdot I_n$	$6,25 \cdot I_n$

Wird im Kurzschlußfall die Erregung der Maschinen gegenüber der Vollasterregung gesteigert, beispielsweise durch Spannungs-Schnellregler, so ergeben sich höhere Kurzschlußstromwerte, als die in Zahlentafel I angegebenen Richtwerte. Sind jedoch die Maschinen mit Strombegrenzungs-Reglern versehen, die die Erregung der Maschinen schwächen, so werden je nach der Einstellung der Stromregler Stromwerte von nur 1,2 bis $1,8 \cdot I_n$ erreicht.

Die Dauerkurzschlußströme sind deswegen bei zwei- und einpoligem Schluß viel größer als bei dreipoligem, weil bei ihnen die Ankerrückwirkung wesentlich kleiner ausfällt. Der sehr hohe Dauerkurzschlußstrom beim einpoligen Schluß wird in kurzgeerdeten Netzen mit einer Betriebsspannung über 1000 V gewöhnlich durch Einbau von Blindwiderständen niedriger Ohmzahl zwischen dem Generator- bzw. Netzsternpunkt und der Erde begrenzt.

Bei Kurzschlüssen im Netz liefern die einzelnen Maschinen infolge der dämpfenden Wirkung der Widerstände, insbesondere der Netzblindwiderstände, natürlich viel kleinere Ströme als die in Zahlentafel I angegebenen. Doch ist im Netz meist nicht die absolute Höhe des Kurz-

schlußstromes maßgebend, sondern in viel stärkerem Maße das Verhältnis des Kurzschlußstromes zum Nennstrom des Anlagenteiles. Diese Verhältniszahl kann sogar Werte über 1000 annehmen, so daß die in der Kurzschlußbahn liegenden Geräte, wie Primärauslöser, Primärrelais, Stromwandler und dergleichen besonders gefährdet sind. Andererseits können die Kurzschlußströme im Netz kleiner ausfallen als der Nennstrom der vom Kurzschluß betroffenen Anlagenteile. Diese Erscheinung tritt gewöhnlich bei geringem Einsatz von Maschinen ein, z. B. bei Schwachlastbetrieb, wie er an Sonn- und Feiertagen und nachts zu meist vorkommt. Schwachlast-Kurzschlußströme können nur mit solchen Schutzrelais im Netz selektiv erfaßt werden, die eine Unterimpedanz-Anregung oder gegebenenfalls eine Unterspannungs-Anregung aufweisen (siehe Seite 97).

In den REH 1937 (VDE 0670) ist zur genaueren Ermittlung des Ausschaltstromes bzw. der Ausschaltleistung von Schaltern und Sicherungen der Begriff Stoßkurzschluß-Wechselstrom eingeführt worden. Dieser Strom stellt den Wechselstromanteil des Stoßkurzschlußstromes dar und wird als Effektivwert aus der Beziehung

$$I_{sw} = \frac{1,1 \cdot U}{\sqrt{3 \cdot \sqrt{R^2 + X^2}}} \cdot \frac{I_n}{\sqrt{2} \cdot z} \quad (1)$$

ermittelt. Hierin bedeuten U die Betriebsspannung des Netzes in V, R den Wirkwiderstand der gesamten Kurzschlußbahn in Ohm, X den Blind-

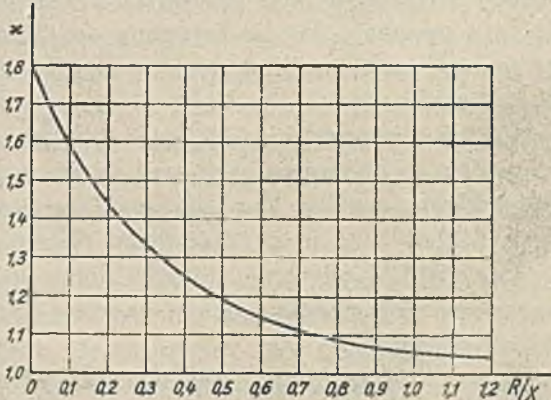


Abb. 5. Stoßziffer z zur Ermittlung des Stoßkurzschluß-Wechselstromes in Abhängigkeit vom Verhältnis $\frac{\text{ohmscher}}{\text{induktiver}}$ Widerstand des Kurzschlußpfades.

widerstand der gesamten Kurzschlußbahn in Ohm, I_S den Stoßkurzschlußstrom in A (Scheitelwert), α die Stoßziffer nach Abb. 5.

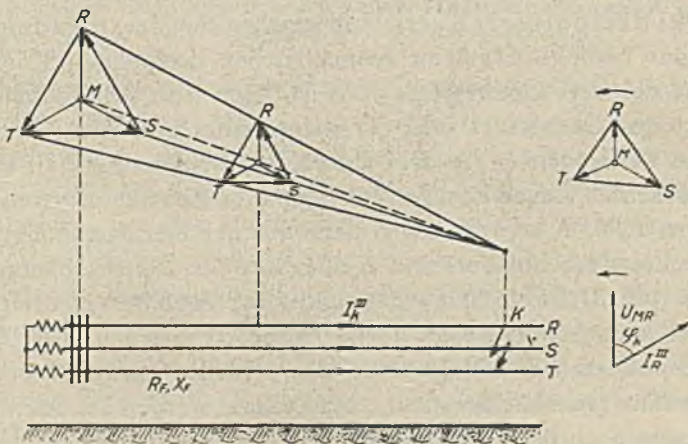
Die Stoßziffer α ist in Abb. 5 in Abhängigkeit von R/X dargestellt. Man sieht daraus, daß mit zunehmendem Anteil des Wirkwiderstandes der Kurzschlußbahn die Höhe der Stoßziffer stark abnimmt.

Mit Rücksicht darauf, daß das Bedürfnis nach sehr kurzen Ablaufzeiten (Auslösezeiten) der Relais, insbesondere im Zusammenhang mit dem Verbundbetrieb, immer größer wird, ist es notwendig, daß auch der Relaisfachmann den Stoßkurzschluß-Wechselstrom bei der Planung von Schutzeinrichtungen und Auswertung von Störungen bevorzugt mitberücksichtigt. Diese Aussage gilt im besonderen für Schutzrelais, deren Laufzeit stromabhängig ist.

Nunmehr folgt die Beschreibung der einzelnen Kurzschlußarten in elektrischen Netzen.

1. Dreipoliger Kurzschluß

Beim dreipoligen Kurzschluß sind die Ströme in allen drei Leitern (R, S, T) praktisch gleich groß. Sie werden von der jeweiligen Stern-



- I_K^III Leiterstrom bei dreipoligem Kurzschluß,
- R_F Wirkwiderstand je Leiter,
- X_F Blindwiderstand je Leiter.

Abb. 6. Dreipoliger Kurzschluß in einem Drehstromnetz mit isoliertem Sternpunkt. Stromverlauf und Spannungsaufbau im Kurzschlußpfad.

spannung' (U_{MR} , U_{MS} und U_{MT}) getrieben und eilen, wie aus dem Vektordiagramm der Abb. 6 ersichtlich ist, der zugehörigen Sternspannung um den Kurzschlußphasenwinkel φ_k nach. In bezug auf die Dreiecksspannung, z. B. zwischen den Leitern T und R , bleibt jedoch der Strom I_R nur um den Winkel $\varphi_k - 30^\circ$ zurück. Da den Meßgliedern der Distanzrelais je nach der Fehlerart im Netz einmal die Sternspannung oder, besser gesagt, die Leitererdspannung und das andere Mal die Dreiecksspannung zugeführt wird, kann bei phasenwinkelabhängigen Distanzrelais eine derartige schaltungstechnische Beeinflussung der Größe des Phasenwinkels unter Umständen Abweichungen von der Soll-Ablaufzeit herbeiführen.

Die Spannung zwischen den Leitern ist bei sattem Kurzschluß an der Fehlerstelle, wie bereits erwähnt, sehr klein¹⁾. Sie baut sich von hier aus infolge der Wirk- und Blindwiderstände der Kurzschlußbahn in gleichseitigen Dreiecken nach der Stromquelle zu allmählich auf. Bei Kurzschlüssen mit verschiedenen großen Übergangswiderständen (z. B. mit verschiedenen langen Lichtbogen) zwischen den Leitern kann die Spannung auch in ungleichseitigen Dreiecken anwachsen²⁾ (vergleiche das Spannungsdreieck rechts oben). Über die Höhe der Lichtbogenspannung bzw. des Lichtbogenwiderstandes wird auf Seite 41 berichtet.

In Abb. 1 sind unter a und b zwei Impedanzschleifen: Leiter—Leiter gezeigt; der zweipolige Kurzschluß K wird dort von zwei Seiten gespeist. Bei dreipoligem Kurzschluß ergeben sich derartige Impedanzschleifen nur bedingt. Da beim symmetrischen dreipoligen Kurzschluß die Summe der drei Leiterströme Null ist, kann man sich zwischen dem Sternpunkt des Generators oder Transformators und der Kurzschlußstelle einen Leiter denken, in dem jedoch kein Spannungsabfall entsteht, weil im gedachten Leiter kein Strom fließt. Der Kurzschlußstrom in den drei Leitern R , S , T errechnet sich dann aus der Sternspannung, geteilt durch den Leiterscheinwiderstand Z oder aus der Dreiecksspannung, geteilt durch $\sqrt{3} \cdot Z$. Der Scheinwiderstand einer Schleife bei dreipoligem Kurzschluß kann somit gleich $\sqrt{3} \cdot Z$ aufgefaßt werden. Die Begriffe Schleifenimpedanz (Scheinwiderstand der Schleife: Leiter—Leiter) und Leiterimpedanz (Scheinwiderstand eines Leiters) werden bei den weiteren Betrachtungen noch öfter gebraucht.

¹⁾ Etwa 200 ... 300 V (s. Seite 42); wenn jedoch der Kurzschluß durch Zuschalten eines dreipoligen Trennschalters auf Erde herbeigeführt wird, so kann die Spannung zwischen den kurzgeschlossenen Leitern bis auf Null Volt zusammenbrechen.

²⁾ Vgl. auch Fr. Kesselring, Selektivschutz, J. Springer, Berlin 1930, S. 26; M. Schleicher, Die moderne Selektivschutztechnik, J. Springer, Berlin 1936, S. 129.

2. Zweipoliger Kurzschluß

Beim zweipoligen Kurzschluß fließt in den beiden betroffenen Leitern der gleiche Strom. Im Gegensatz zum dreipoligen Kurzschluß wird hier, wie bereits erwähnt, der Strom von der Dreiecksspannung getrieben. Der entsprechende Kurzschlußphasenwinkel φ_k ist im unteren Diagramm der Abb. 7 angedeutet. Den Aufbau der zusammengebrochenen Span-

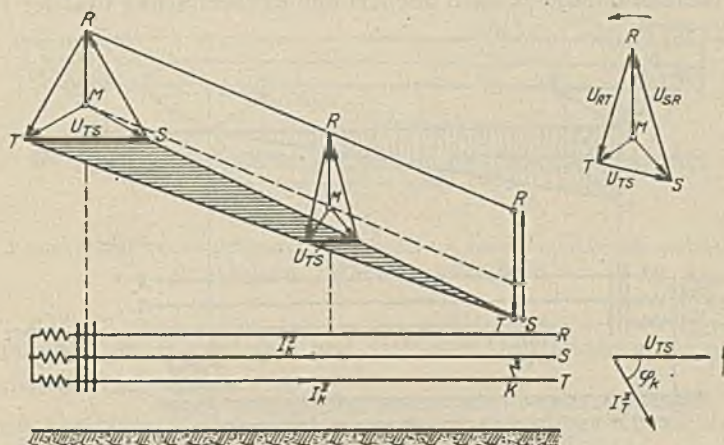


Abb. 7. Zweipoliger Kurzschluß in einem Netz mit isoliertem Sternpunkt. Stromverlauf und Spannungsaufbau im Kurzschlußpfad.

nung zwischen den Leitern von der Kurzschlußstelle in Richtung zur Stromquelle zeigen die Abb. 7 und 1. Die Dreiecksspannungen U_{SR} und U_{RT} zwischen dem gesunden Leiter R und den kranken Leitern S und T können im Zuge des Kurzschlußstrompfades je nach der Ausführung der Dämpferwicklungen der Maschinen auch mehr oder weniger zusammenbrechen. Überdies kann sich das Spannungsdreieck bei zweipoligem Kurzschluß infolge Ankerrückwirkung und ungleichmäßiger Verteilung der Induktivität in der Kurzschlußschleife: Leiter—Leiter unsymmetrisch gestalten¹⁾ (vergleiche das rechte Spannungsdreieck der Abb. 7). In den Abb. 1b und 79 sind die Kurzschluß- bzw. Impedanzschleifen einzelner Strombahnen deutlich herausgezeichnet.

3. Einpoliger Kurzschluß

Abb. 8 zeigt die Strom- und Spannungsverhältnisse für einen einpoligen Kurzschluß auf einer Stichleitung, die über einen Dreieck-Stern

¹⁾ Siehe auch G. Courvoisier, Bull. des SEV 24 (1933) S. 462.

geschalteten Transformator (mit kurzgeerdetem Sternpunkt) gespeist wird. Als treibende Spannung wirkt hier die Spannung des kranken Leiters gegen Erde, die Leitererdspannung U_{ET} . Diese treibt den Kurzschlußstrom durch die Schleife: Leiter—Erde, deren Scheinwiderstand praktisch gleich dem der Schleife bei einem Kurzschluß zwischen zwei Leitern am gleichen Ort ist. Die Leitererdspannung ist an der Kurzschlußstelle gewöhnlich hoch, bedingt durch den Erdübergangswiderstand (Ausbreitungswiderstand), der je nach der Art der Erdberührung und der Beschaf-

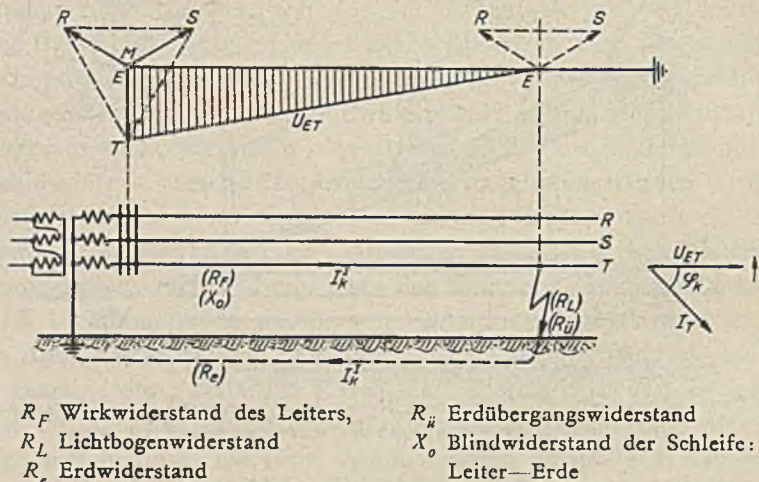


Abb. 8. Einpoliger Kurzschluß in einem kurzgeerdeten Netz nebst Stromverlauf und Spannungsaufbau ($R_{ii} = 0$, $R_L = 0$).

fenheit des Erdbodens beträchtliche Werte annehmen kann (schätzungsweise bis 250Ω). Der Spannungsabfall an der Kurzschlußstelle kann also bei hohen Strömen sehr groß werden, abgesehen vom möglichen Einfluß des Lichtbogenwiderstandes von nahezu gleicher Größenordnung wie der Erdübergangswiderstand. Der Aufbau der Spannung von der Kurzschlußstelle nach der Stromquelle zu erfolgt dabei gewöhnlich nicht mehr linear, sondern nach einer Hyperbel ($U = I \cdot \sqrt{(R_F + R_L + R_{ii} + R_e)^2 + X_o^2}$). Die Widerstandszeichen dieser Gleichung sind in Abb. 8 erläutert.

Im Spannungsdiagramm der Abb. 8 ist der Einfachheit halber ein widerstandsloser Erdübergang des Stromes angenommen ($R_{ii} = 0$). Der Aufbau der Spannung U_{ET} wurde hier daher durch eine gerade Linie dargestellt.

Beim einpoligen Kurzschluß einer Leitungsstrecke können in manchen Netzgebilden Fehlerströme auch an solchen Stellen auftreten, wo man sie bei flüchtiger Betrachtung gar nicht erwartet. In Abb. 9 ist die Stromverteilung auf einer Drehstromleitung mit zwei kurzgeerdeten Transformatoren für einen derartigen Fall gezeigt. Hier fließen nämlich auch am Verbraucherende Kurzschlußströme¹⁾, die in den drei Leitern

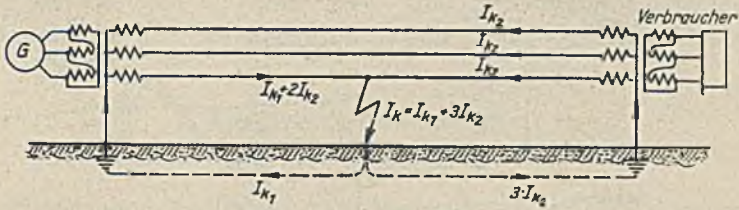


Abb. 9. Stromverlauf bei einpoligem Kurzschluß auf einer doppelseitig geerdeten Drehstromleitung. Paradoxon nach Bauch.

untereinander gleich groß sind und die unter Umständen zu ungewollten Abschaltungen führen können.

In nicht kurzgeerdeten Netzen kann ein einpoliger Kurzschluß dann auftreten, wenn bei Erdschluß eines Phasenleiters auch der Sternpunkt eines Transformators oder Generators gegen Erde durchschlägt.

4. Windungsschluß

Der Windungsschluß stellt eine Sonderform von Kurzschluß dar, bei dem mehrere oder alle Windungen eines Wicklungsstranges von Generatoren, Transformatoren, Motoren oder dergleichen kurzgeschlossen sind, verursacht durch die Überbrückung der Isolation an zwei Punkten mit Spannungsunterschieden (Abb. 10). Infolge der ausgezeichneten magnetischen Kopplung der kurzgeschlossenen Windungen mit den übrigen können sich im überbrückten Teil sehr hohe Ströme ausbilden, die diesen ausglühen und schließlich zu einem Erdschluß (Gestellschluß) führen. Weitere Ausführungen über den Windungsschluß siehe auf Seite 229.

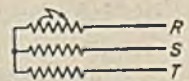


Abb. 10. Windungsschluß.

¹⁾ R. Bauch, E. und M. 35 (1917) S. 371.

5. Erdkurzschluß

Der Kurzschlußstrom nimmt bei dieser Fehlerart seinen Weg von Leiter zu Leiter über Erde am gleichen Ort (Abb. 11₁). Es handelt sich also um zwei- oder dreipolige Kurzschlüsse über Erde. Der Spannungsabfall zwischen den betroffenen Leitern an der Kurzschlußstelle kann infolge der gegebenen zwei Erdübergangswiderstände sehr hoch werden.

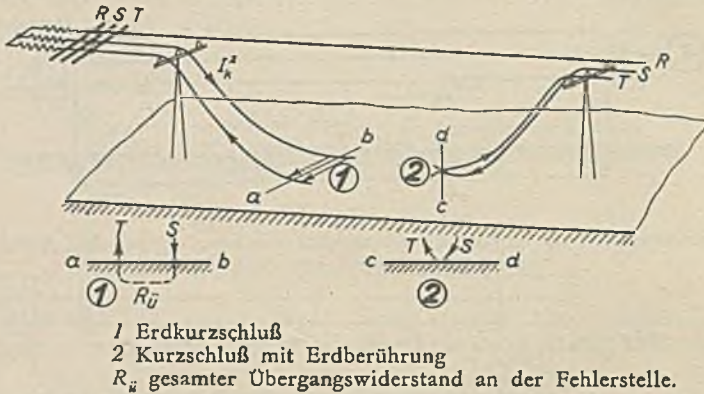


Abb. 11. Drehstromleitung mit Leiterbruch an zwei Phasenleitern.

Stromverlauf und Spannungsaufbau sind im Kurzschlußstromkreis praktisch die gleichen wie bei den einfachen zwei- und dreipoligen Kurzschlüssen satter Form oder über Lichtbogen. Durch die Verbindung der Kurzschlußstelle mit Erde kann zwischen dem Sternpunkt des Systems und der Erde eine Spannung entstehen, die sogenannte Sternpunkterdspannung, die in einem galvanisch zusammenhängenden Netz überall nahezu gleich groß ist.

6. Kurzschluß mit Erdberührung

Der Kurzschluß mit Erdberührung unterscheidet sich vom Erdkurzschluß im wesentlichen dadurch, daß bei ihm der Kurzschlußstrom den Weg durch metallische Berührung oder über Lichtbogen unmittelbar von Leiter zu Leiter nimmt, wobei die Fehlerstelle im Gegensatz zum gewöhnlichen zwei- oder dreipoligen Kurzschluß Verbindung bzw. Berührung mit Erde hat. Ähnlich wie beim Kurzschluß über Erde tritt hier bei zwei- oder dreipoligen Fehlern (aber nicht bei dreipoligen Fehlern) eine Spannung zwischen Netzsternpunkt und Erde auf. — Kurzschlüsse mit Erdberührung

sind in Kabelnetzen vorherrschend. In Freileitungsnetzen kommen sie vor, wenn die Isolatorketten von mindestens zwei ungleichnamigen Leitern zu den geerdeten Querträgern durch Lichtbogen überbrückt werden oder wenn die Kurzschlußlichtbogen am Mastkopf geerdete Teile berühren. In selteneren Fällen kommt ein Kurzschluß mit Erdberührung in Freileitungsnetzen dann zustande, wenn mindestens zwei ungleichnamige Leiter am gleichen Ort reißen (Abb. 11₉). Kurzschlüsse mit Erdberührung weisen gegenüber den einfachen zwei- und dreipoligen Kurzschlüssen keine zusätzlichen Erdübergangswiderstände an der Kurzschlußstelle auf.

7. Ergänzende Bemerkungen über Lichtbogen- und Erdübergangswiderstände

Lichtbogen und Erdübergangswiderstände stellen Wirkwiderstände dar. Sie bilden zusätzliche, veränderliche Widerstände in der Kurzschlußschleife: Leiter—Leiter oder Leiter—Erde und werden von den widerstandsabhängigen Relais (Distanzrelais) ganz oder teilweise in die Messung einbezogen. Da sich jedoch die Größe dieser Widerstände im voraus nicht bestimmen läßt, und da ihr Größenverhältnis zur angrenzenden Schleifenimpedanz sich stark verändert, bilden sie für den Distanzschutz manchmal nicht unbeträchtliche Schwierigkeiten (Seite 144).

So nimmt z. B. in Freileitungen der Lichtbogenwiderstand infolge der Verlängerung des Lichtbogens¹⁾, bedingt durch Winddruck, elektrodynamische Kraftwirkung oder Wärmeforttrieb, mit der Zeit zu. Aus Laboratoriumsversuchen und aus der Praxis wurde die Erkenntnis gewonnen, daß der Spannungsabfall im Lichtbogen etwa 25 V je cm Länge beträgt. Bei einem Leiterabstand von 300 cm würde z. B. der Spannungsabfall des Lichtbogens während der ersten 5 bis 10 Halbperioden etwa 7500 V betragen. Mit der Ausbuchtung des Lichtbogens, die gewöhnlich erst nach einigen Halbperioden beginnt, wird der gesamte Spannungsabfall natürlich noch größer. Überdies ist der Spannungsabfall im Lichtbogen von der Stromstärke insofern abhängig; als er bei kleiner werdendem Strom (von etwa 800 A-abwärts) etwas größer wird.

Nimmt man den Kurzschlußstrom im Lichtbogen beispielsweise zu 150 A an, so ergibt sich der Lichtbogenwiderstand für die Lichtbogenlänge von 300 cm aus der Gleichung:

¹⁾ Ausführlicher siehe in M. Walter, Der Selektivschutz nach dem Widerstandsprinzip, R. Oldenbourg, München 1933, S. 130—141.

$$R_L = \frac{U_L}{I_k} = \frac{u_L \cdot l}{I_k} \dots \dots \dots (2)$$

zu 50 Ohm, bezogen auf die Effektivwerte der Grundwellen von Strom und Spannung. In Gleichung (2) bedeutet U_L die gesamte Lichtbogen-
spannung in V, I_k den Kurzschlußstrom in A, u_L den Spannungsabfall
in V je cm Lichtbogenlänge und l die Lichtbogenlänge in cm.

Abb. 12 stellt die Verhältnisse für einen Kurzschlußlichtbogen auf
einer 60 kV-Versuchsfreileitung dar. Der unstetige Verlauf der Größen

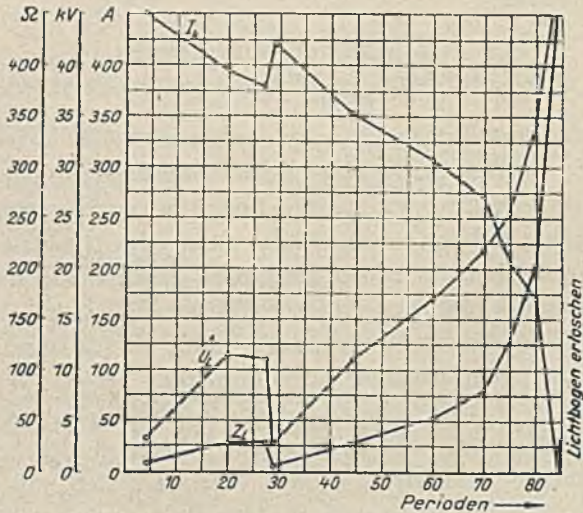


Abb. 12. Kurzschlußstrom, Lichtbogen­spannung und Lichtbogen­widerstand in Abhängig­keit von der Zeit. Auswertungen von oszillo­graphischen Aufnahmen im 60 kV­Netz der Preußenelektra, Kassel. Leiterabstand 1,75 m, Witterung — sehr windig. Bei der 27. Periode erfolgt Kürzung der Lichtbogen­länge, mit der 84. Periode erlischt der weit aus­gezogene Lichtbogen.

U_L , I_k und Z_L rührt vom flatternden Aufsteigen und Zusammenfallen des Lichtbogens her.

Erfahrungen der Praxis zeigen, daß die Lichtbogen auf Freileitungen dann von selbst erlöschen, wenn ihr Spannungsabfall auf den Wert von 40 bis 60% der Netzspannung angewachsen ist.

In diesem Zusammenhang sei darauf hingewiesen, daß der Lichtbogen­widerstand in Kabeln infolge der kleinen Leiterabstände und verhältnismäßig großen Kurzschlußströme sehr klein ist. Der Spannungsabfall im Lichtbogen liegt hier in der Größenordnung von 200 bis 300 V,

bedingt durch den Kathoden- und Anodenfall in Verbindung mit sehr hohem Gasdruck.

Die Erdübergangswiderstände (Ausbreitungswiderstände) können, wie schon früher erwähnt, je nach der Beschaffenheit des Bodens an der Fehlerstelle beträchtliche Werte annehmen (von etwa 2 bis 250 und mehr Ohm). Sehr hohe Werte treten z. B. auf, wenn bei einem Leiterbruch die Leiter auf Schnee, Sand oder trockenen Boden fallen. Dagegen sind die Übergangswiderstände verhältnismäßig klein, wenn die Leiter auf der Traverse eines Eisenmastes liegen. Die Widerstandswerte erhöhen sich jedoch auch hier beträchtlich, wenn sich zwischen den Leitern und der Traverse Lichtbogen bilden, beispielsweise bei rückwärtigen Überschlägen an den Isolatoren, verursacht durch Blitzeinschläge in die Erdseile bzw. Eisenmaste.

C. Doppelerdschluß

Der Doppelerdschluß ist mit dem zweipoligen Erdkurzschluß (siehe Seite 40) wesensverwandt. Er gehört daher auch zur Gruppe der Kurzschlüsse und hätte eigentlich im vorstehenden Abschnitt B mitbehandelt werden müssen. Wegen seiner Bedeutung und Stellung in der Selektivschutztechnik wird er jedoch hier in einem besonderen Abschnitt besprochen.

Ein Doppelerdschluß entsteht durch die Überbrückung (das Kurzschließen) zweier ungleichnamiger Leiter über Erde innerhalb eines galvanisch verbundenen Netzes, wobei die Erdschlußstellen in verschiedenen Leitungsabschnitten des Netzes liegen. Es handelt sich also um eine Kurzschlußform, die im wesentlichen durch das Vorhandensein zweier Erdschlußstellen an verschiedenen Leitern und in verschiedenen Teilen eines Netzes gekennzeichnet ist.

1. Spannungen bei Doppelerdschluß

In Abb. 13 ist ein Doppelerdschluß zwischen den Leitern S und T einer Stichleitung mit Spannungsverteilung und Stromverlauf dargestellt.

Die kranken Leiter S und T haben in diesem Fall unter Vernachlässigung des Erdübergangs- und Lichtbogenwiderstandes¹⁾ an den Erdschluß-

¹⁾ Diese Annahme wird nur zur Vereinfachung der Darstellung gemacht; in der Praxis ist fast immer ein größerer Erdübergangswiderstand vorhanden, und zwar an zwei Stellen.

stellen E_1 und E_2 keine Spannung gegen Erde. Von hier aus steigen die Leitererdspannungen U_{ES} und U_{ET} in Richtung zur Stromquelle um den durch den Kurzschlußstrom und Scheinwiderstand der Strombahn gegebenen Spannungsabfall an. Dabei wird angenommen, daß der Spannungsabfall in der Schleife: Leiter—Erde sich je zur Hälfte auf den Lei-

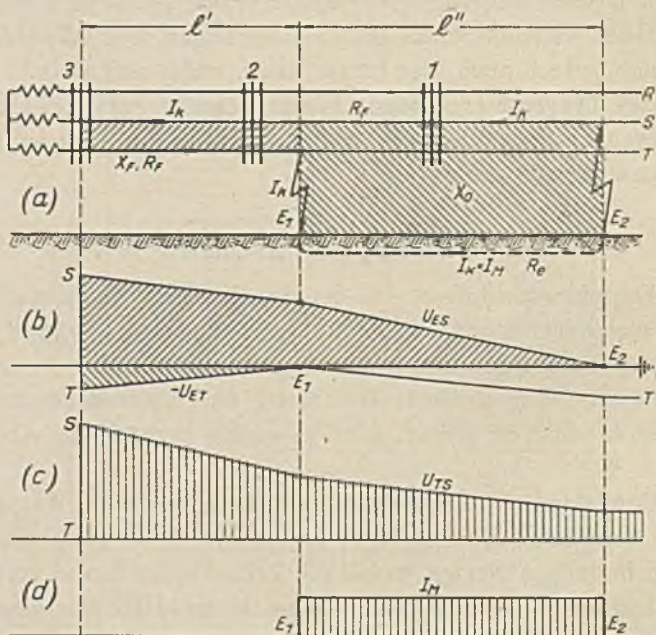


Abb. 13. Stromverlauf und Spannungsverteilung bei Doppelerdschluß auf einer offenen Drehstromleitung mit einer Einspeisung. X_0 Blindwiderstand der Schleife: Leiter(S)—Erde.

ter und die Erde aufteilt. Im Teilbild b ist eine Nulllinie als gemeinsame Erde angenommen, über und unter der die Leitererdspannungen U_{ES} und U_{ET} aufgetragen sind.

Der Verlauf der Dreiecksspannung U_{TS} , d. h. der Spannung zwischen den kranken Leitern T und S, ist aus dem Teilbild c ersichtlich. Er ergibt sich aus den Leitererdspannungen U_{ES} und $-U_{ET}$ durch Subtraktion unter Berücksichtigung der Vorzeichen. Die Dreiecksspannung U_{TS} steigt ebenfalls in Richtung zur Stromquelle an. Sie weist aber im Gegen-

satz zu den Leitererdspannungen U_{ES} und $-U_{ET}$ an den Erdschlußstellen stets noch beträchtliche Werte auf. Ihre Gesamtänderung ist also verhältnismäßig klein. Aus diesem Grunde sind Dreiecksspannungen zur Erzielung kurzer Ablaufzeiten und zur sicheren Auswahl der Schalter bei Doppelerdschluß durch Distanzrelais weniger geeignet als die Leitererdspannungen.

Da ein Doppelerdschluß stets Erdverbindung hat, so tritt im ganzen Netz, soweit es galvanisch verbunden ist, immer auch die Sternpunkt-erdspannung U_{EM} auf. Diese Spannung zwischen dem Schwerpunkt des Spannungsdreiecks und der Erde ändert ihre absolute Höhe von der einen Erdschlußstelle zur anderen, bedingt durch den vom Summenstrom und Erdwiderstand verursachten Spannungsabfall. Vor und hinter den Erdschlußstellen bleibt die Sternpunkterdspannung dagegen konstant. Ihre Größe bewegt sich gewöhnlich zwischen 30 und 80% der vollen Sternspannung¹⁾.

2. Ströme bei Doppelerdschluß

Die Dreiecksspannung U_{TS} treibt in Abb. 13 den Strom I_k über eine aus zwei Teilen zusammengesetzte Impedanzschleife, nämlich über die Schleife: Leiter—Leiter mit der Länge l' und über die Schleife: Leiter—Erde mit der Länge l'' . Der Strom nimmt hierbei seinen Weg in der Erde zwischen den beiden Fußpunkten E_1 und E_2 — infolge des elektromagnetischen Zusammenwirkens zwischen ihm und dem Strom im Leiter S — stets längs der betroffenen Leitung²⁾, und zwar auch dann, wenn sie ihre Richtung unter beliebigen Winkeln wechselt³⁾.

Der Kurzschlußstrom kann bei Doppelerdschluß Werte annehmen, die an die Größenordnung der Ströme bei zweipoligem Kurzschluß heranreichen, vorausgesetzt, daß die Erdübergangswiderstände nicht allzu groß sind.

Zwischen den beiden Erdschlußstellen des Doppelerdschlusses entsteht für die Drehstromleitung ein Summenstrom $I_M = I_R \hat{+} I_S \hat{+} I_T$, der von Null verschieden und praktisch gleich dem Kurzschlußstrom I_k im betroffenen Leiter ist (vergleiche das Teilbild d). In der Zuleitung l' , d. h. in der Schleife: Leiter—Leiter, hat der Summenstrom dagegen prak-

¹⁾ Weitere Ausführungen hierüber siehe in H. Weber, Der Erdschluß in Hochspannungsnetzen, R. Oldenbourg, München 1936, S. 41—42; H. Titze, Erdschluß- und Doppelerdschlußverteilung in elektrischen Netzen, Dissertation 1935, Berlin.

²⁾ Oder längs den Leitungen, die Summenstrom führen.

³⁾ O. Mayr, ETZ 46 (1925) S. 1352 und 1436.

tisch den Wert Null. — Der Summenstrom und gegebenenfalls die Sternpunktterdspannung werden den Distanzrelais als Hilfsmittel zur richtigen Arbeitsweise zugeführt (siehe Seite 133).

In Kabelnetzen fließt der Strom bei Doppelerdschluß vorwiegend über die Bleimäntel (rund 90%) und nur in geringem Maße über das Erdreich zurück. Diese ungleiche Stromverteilung rührt von der unterschiedlichen Größe der Scheinwiderstände der im vorliegenden Fall parallel geschalteten Schleifen: Leiter—Erde und Leiter—Bleimantel her (Abb. 14). Die Schleife: Leiter—Erde umschließt die Eisenarmierung des Kabels; ihr Blindwiderstand ist daher groß gegenüber der Schleife: Leiter—Bleimantel, bei der die Eisenarmierung außerhalb der Schleife liegt¹⁾.

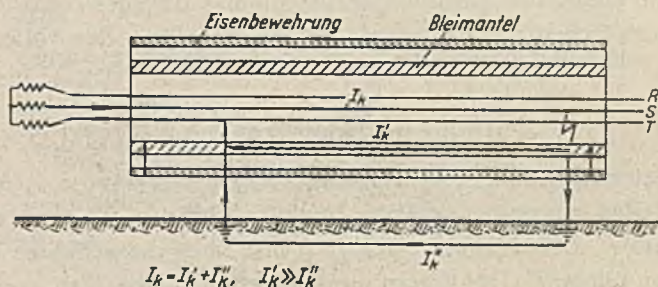


Abb. 14. Stromverteilung bei Doppelerdschluß in einem Drehstromkabel mit Bleimantel.

Entsprechend dem Verhältnis der Scheinwiderstandswerte der beiden Schleifen fließt der weitaus größere Anteil des Fehlerstromes über den Bleimantel zurück. Um Beschädigungen der Bleimäntel infolge Überlastung bei Doppelerdschluß zu vermeiden, ist es notwendig, die Bleimäntel an den Muffen untereinander einwandfrei zu verbinden und an den Anfängen und Enden gut zu erden.

Den Stromverlauf und die Spannungsverteilung bei Doppelerdschluß auf einer von zwei Seiten gespeisten Drehstromleitung zeigt Abb. 15. Hier sind die Strom- und Spannungsverhältnisse noch nahezu gleich denen auf einer einseitig gespeisten Leitung. Im Gegensatz zu Abb. 13 kann hier auch im unbetreffenen Leiter (R) ein Fehlerstrom fließen²⁾, da dieser

¹⁾ Ferner ist die Schleife: Leiter—Erde wesentlich größer als die Schleife: Leiter—Bleimantel und mithin auch ihr Blindwiderstand. Außerdem ist der Wirkwiderstand des Bleimantels verhältnismäßig klein gegenüber dem Erdwiderstand einschließlich der Ausbreitungswiderstände.

²⁾ H. Titze, Erdschluß- und Doppelerdschlußverteilung in elektrischen Netzen, Dissertation 1935, Berlin.

Leiter an den Kopfenden der Leitung mit den übrigen Leitern leitend verbunden ist und mit ihnen dadurch geschlossene Stromkreise bildet. Dieser Fehlerstrom ist jedoch meist verhältnismäßig klein. Bemerkenswert ist ferner, daß im Abschnitt l'' auch der zweite betroffene Leiter (T) einen

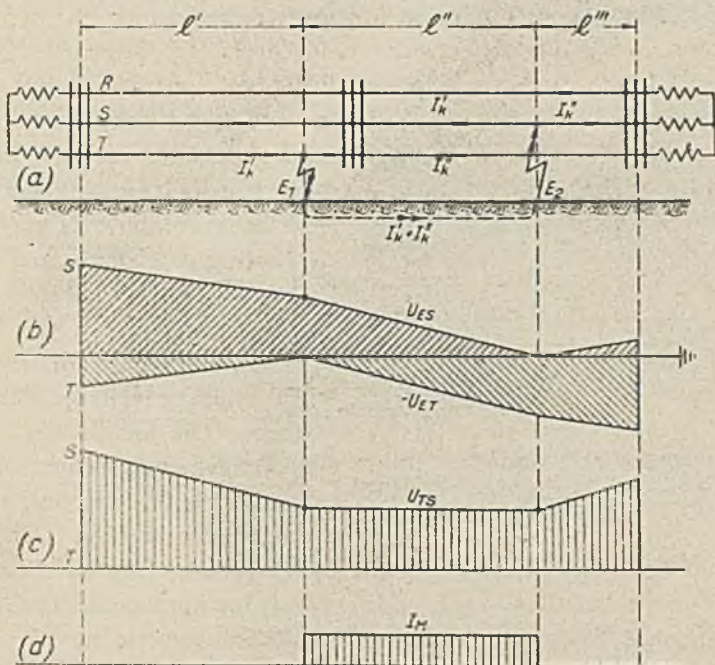


Abb. 15. Stromverlauf und Spannungsverteilung bei Doppelerdschluß auf einer Drehstromleitung mit zweiseitiger und gleichstarker Einspeisung ($I'_k = I''_k$).

Kurzschlußstrom führt, und zwar von derselben Richtung wie der im Leiter S, im Gegensatz zu den Verhältnissen beim zweipoligen Kurzschluß (Abb. 1). Außerdem ändert sich hier die Sternpunktterdspannung zwischen den beiden Erdschlußstellen nicht nur nach der Größe, sondern auch in der Phasenlage zum Summenstrom¹⁾.

Reichlich verwickelt und undurchsichtig sind dagegen die Strom- und Spannungsverhältnisse bei Doppelerdschluß in vermaschten und verbundgespeisten Netzen mit Erdschlußstellen in verschiedenen

¹⁾ Vgl. G. Courvoisier, Bulletin des SEV, 24 (1933) S. 467; A. Thewalt, Siemens-Z. 18 (1938) S. 356.

Netzteilen¹⁾. Für die Berechnung ist es in solchen Fällen zweckmäßig, in der Erde zwischen den beiden Erdschlußstellen eine Ersatz-Spannungsquelle anzunehmen, die den Kurzschlußstrom mit einer Spannung gleich der vollen Netz-Dreieckspannung durch das Netzgebilde treibt²⁾. Das gleiche Hilfsmittel benutzt man bekanntlich auch zur Bestimmung der Dauerkurzschlußströme in Netzen der genannten Form.

3. Verschiedenes

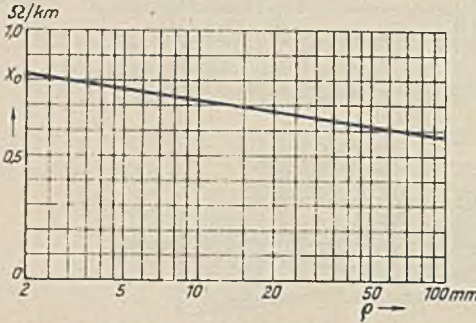


Abb. 16. Blindwiderstand X_0 einer Schleife: Leiter—Erde je km bei 50 Hz in Abhängigkeit vom Seilradius nach O. Mayr.

Der Scheinwiderstand einer Schleife: Leiter—Erde ist bei Freileitungen, wie schon an anderer Stelle erwähnt, ungefähr gleich dem einer gleich langen Schleife: Leiter—Leiter, vorausgesetzt, daß die Übergangswiderstände an den Erdschlußstellen niedrige Werte aufweisen. Die Größe des Blindwiderstandes einer solchen Stromschleife kann der Abb. 16 entnommen werden. Den Wirk-

widerstand des Leiters ermittelt man aus Gleichung (20) auf Seite 251. Dagegen ergibt sich der Wirkwiderstand des homogenen Erdreiches, der sogenannte Erdwiderstand, je km näherungsweise zu

$$R_e = \omega \cdot \frac{\pi}{2} \cdot 10^{-4} = \pi^2 \cdot f \cdot 10^{-4} \Omega/\text{km} \quad \dots \quad (3)$$

Bezieht man den Widerstand R_e nur auf eine dünne leitende Erdschicht, die beispielsweise über einer Felsschicht liegt, so gilt die Beziehung³⁾

$$R'_e = 2 \cdot \pi^2 \cdot f \cdot 10^{-4} \Omega/\text{km} \quad \dots \quad (4)$$

Der Erdwiderstand ist also frequenzabhängig und hat nach den Gleichungen (3 und 4) bei 50 Hz Werte von 0,05 bis 0,1 Ohm/km. Die Erdüber-

¹⁾ H. Titze, Erdschluß- und Doppelerdschlußverteilung in elektrischen Netzen, Dissertation 1935, Berlin; O. Mayr, Arch. Elektrotechn. 17 (1926) S. 163.

²⁾ H. Weber, Der Erdschluß in Hochspannungsnetzen, R. Oldenbourg, München 1936, S. 13.

³⁾ O. Mayr, ETZ 46 (1925) S. 1352 und 1436.

gangswiderstände an den Erdschlußstellen können dagegen Werte von etwa 2 bis 250 und mehr Ohm erreichen.

Bei Kabeln ist der Scheinwiderstand der Schleife: Leiter—Bleimantel+ Erde kleiner als der einer gleich langen Schleife: Leiter—Leiter.

In Kabelnetzen sowie in Freileitungsnetzen mit Holz- oder Betonmasten ohne Erdseil treten Doppelerdschlüsse verhältnismäßig selten auf. Sie entstehen dagegen verhältnismäßig oft in Freileitungsnetzen mit Eisenmasten und Erdseilen.

Befinden sich die beiden Erdschlußstellen in ein- und demselben Leitungsabschnitt, jedoch nicht am gleichen Ort (Erdkurzschluß!), so wird der Fehler als Gesellschaftserdschluß bezeichnet. Den Gesellschaftserdschluß erfassen die Distanzrelais wie den Erdkurzschluß (Seite 40).

Erwähnenswert ist auch der Sonderfall, bei dem auf einem Eisenmast zwei Leitungen des gleichen Netzes befestigt sind, und von denen zwei verschiedene Phasenleiter mit dem Mastgestänge Erdverbindung haben. Solche Doppelerdschlüsse sind überdies zuweilen auch mit einem Kurzschluß örtlich verbunden. Mischfehler derartiger Form bieten für den Selektivschutz meist nicht unerhebliche Schwierigkeiten.

Wegen weiterer Einzelheiten über die physikalischen Zusammenhänge bei Doppelerdschluß sei auf das einschlägige Schrifttum verwiesen¹⁾

D. Erdschluß

In elektrischen Netzen mit nicht kurzgeerdetem Sternpunkt führt jede Durchbrechung bzw. Überbrückung der Isolation zwischen einem Leiter und Erde zu einem Erdschluß. Dieser kann durch seine Wärmewirkung, Lichtbogenbildung oder Spannungsverlagerung noch andere Störungsarten einleiten, wie Kurzschlüsse, Doppelerdschlüsse usw. Seine Auswirkungen werden in der Praxis vornehmlich durch die bekannten Erdschlußstrom-Löscheinrichtungen (Petersen-Spulen, Bauch-Löschtransformatoren oder dergleichen) und gegebenenfalls durch baldige Abschaltung bekämpft.

¹⁾ O. Mayr, ETZ 46 (1925) S. 1352 und 1436; O. Mayr, Arch. Elektrotechnik 17 (1926) S. 163. F. Kesselring, Selektivschutz, J. Springer, Berlin 1930, S. 119—130; H. Weber, Der Erdschluß in Hochspannungsnetzen, R. Oldenbourg, München 1936; H. Titze, ETZ 57 (1936) S. 1031; G. Oberdorfer, Der Erdschluß und seine Bekämpfung, J. Springer, Wien 1930; G. Courvoisier, Bulletin des S.E.V. 24 (1933) S. 427 und 466.

1. Spannungen bei Erdschluß

Im störungsfreien Betrieb hat der Sternpunkt eines Drehstromnetzes, wenn man von den üblichen und meist geringfügigen betriebsmäßigen Spannungsunsymmetrien sowie von Oberwellen absieht, das Erdpotential (vgl. Abb. 17 Teilbild a). Bekommt jedoch ein Pol der Netzanlage Verbindung mit Erde, so entsteht zwischen dem Sternpunkt des Systems und der Erde ein Spannungsunterschied, die Sternpunkterdspannung. Gleichzeitig erhöhen sich auch die Spannungen der gesunden Leiter gegen Erde, die Leitererdspannungen, um einen gewissen Betrag.

Bei satterm Erdschluß, d. h. wenn der Übergangswiderstand zwischen Leiter und Erde sehr klein ist, weisen der erdgeschlossene Leiter praktisch keine Spannung, die beiden gesunden Leiter dagegen etwa die volle Dreieckspannung gegen Erde auf. In Teilbild b der Abb. 17 sind diese Verhältnisse für einen satten Erdschluß durch die entsprechenden

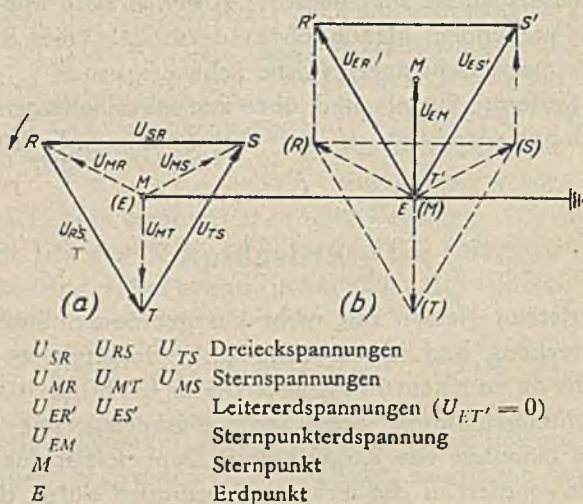


Abb. 17. Spannungsverlagerungen in einer Drehstromanlage bei satterm Erdschluß des Leiters T.

Spannungsvektoren veranschaulicht. In ihm gilt das gestrichelt gezeichnete Spannungsdreieck für den erdschlußfreien Zustand des Netzes, das ausgezogene für die Verhältnisse bei satterm Erdschluß des Leiters T. Der Sternpunkt M im ausgezogenen Dreieck ist also um die Sternpunkterdspannung U_{EM} , die gleich der negativen Sternspannung U_{MT} des Systems

ist, gehoben. Die Sternpunkterdspannung U_{EM} befindet sich also in Gegenphase (180°) mit der ursprünglichen Sternspannung U_{MT} . Ein Erdschluß bewirkt demnach die Verschiebung des Sternpunktes vom Drehstromsystem gegenüber der Erde und damit das Entstehen der Sternpunkterdspannung sowie die Änderung der Spannung aller drei Pole gegen Erde. Die Dreiecksspannungen des Systems bleiben dagegen unverändert.

Erfolgt der Erdschluß über einen längeren Lichtbogen oder ist der Erdübergangswiderstand (Ausbreitungswiderstand) sehr hoch, so ist die Verlagerung des Sternpunktes M gegenüber der Erde E geringer

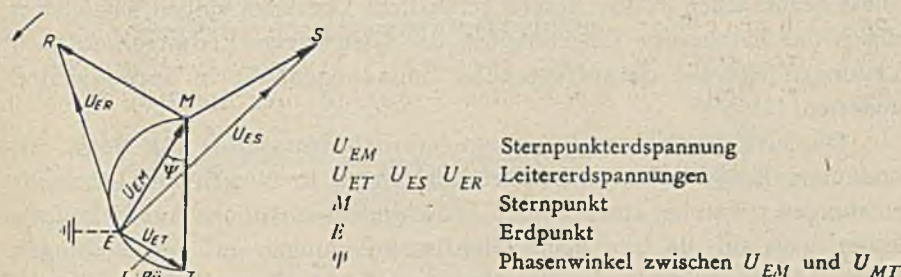


Abb. 18. Größe und Phasenlage der Sternpunkterdspannung in einer Drehstromanlage bei Erdschluß des Leiters T über hohen Wirkwiderstand, z. B. Lichtbogenwiderstand.

(Abb. 18), insbesondere wenn der Erdschlußstrom des Netzes groß ist. Der Vektor der Sternpunkterdspannung U_{EM} wandert dann in Abhängigkeit von Spannungsabfall $U_w = I_e \cdot R_w$ zwischen den Elektroden an der Erdschlußstelle mit einem Ende längs eines Halbkreises und wird bei unendlich hohem Widerstand gleich Null; der Sternpunkt des Systems M hat dann wieder das Erdpotential¹⁾. Die vorhin erwähnte Phasenopposition von 180° besteht hier nicht mehr (siehe z. B. den Winkel ψ).

Die Sternpunkterdspannung ist im erdgeschlossenen Netz praktisch überall gleich groß. Ihre absolute Höhe ist, wie bereits erwähnt, abhängig von der Größe des Übergangswiderstandes zur Erde und der Höhe des Erdschlußstromes. Je größer der Widerstand an der Erdschlußstelle ist, desto kleiner wird die Sternpunkterdspannung und mithin teilweise auch die Leitererdspannungen der gesunden Leiter.

Bei Erdschluß in Generatoren oder Transformatoren werden die Spannungsverlagerungen auch dann kleiner, wenn der Fehler (Ge-

¹⁾ Ausführlicher hierüber mit Zahlenbeispielen siehe in H. Weber, Der Erdschluß in Hochspannungsleitungen, R. Oldenbourg, München 1936, S. 20 und 21.

stellschluß) nicht an einer Klemme, sondern in einem Wicklungsstrang auftritt. Je näher sich die Erdschlußstelle am Sternpunkt dieser Anlagenteile befindet, desto niedriger ist die Sternpunkterdschlußspannung sowie die Spannung der gesunden Wicklungsstränge gegen Erde. Tritt der Erdschluß im Sternpunkt selbst auf, dann erfolgt naturgemäß überhaupt keine Verlagerung der Spannung gegen Erde.

Erdschlüsse mit oder ohne Lichtbogen, die über längere Zeit unverändert bleiben, nennt man Dauererdschlüsse im Gegensatz zu den Wischern, die nur ganz kurzzeitig auftreten. Lichtbogenerdschlüsse, die infolge der von ihnen ausgelösten Schwingungsvorgänge wiederholt verlöschen und zünden, heißen aussetzende (intermittierende) Erdschlüsse. Diese verursachen in den Netzen gefährliche Überspannungen, begünstigt durch das kurzzeitige Liegenbleiben der Gleichstrom-Ladungen auf den Leitungen und die darauffolgenden Umladungen, die in Sprungwellen ausarten.

Die hier geschilderten Spannungsverhältnisse gelten für Netze mit und ohne Erdschlußstrom-Löscheinrichtungen. In Netzen mit Löscheinrichtungen treten bei aussetzenden Erdschlüssen schädliche Auswirkungen kaum noch auf, da hier keine Gleichstromladungen auf den Leitungen liegen bleiben und da die Spannung an der Fehlerstelle nach Unterbrechung des Stromes im Nulldurchgang nur ganz langsam wieder ansteigt.

2. Ströme bei Erdschluß

Ein Erdschluß ruft durch die unter 1. geschilderte Spannungsverlagerung gleichzeitig auch eine Stromunsymmetrie im Leitersystem hervor. Die vor Eintritt des Erdschlusses noch gleich großen Ladeströme der drei Leiter gegen Erde ändern im Erdschlußfall ihre Größe und Phasenlage entsprechend der Änderung der sie verursachenden Leitererdschlußspannungen. Während die Ladeströme sich im störungsfreien Betrieb an jedem Netzpunkt noch zu Null ergänzt haben, bildet sich jetzt durch Fortfall des Ladestromes im erdgeschlossenen Leiter und durch den neuen Phasenwinkel von 60° zwischen den Leitererdschlußspannungen der gesunden Leiter ein Summenstrom aus, der sich dem Betriebsstrom in den drei Phasenleitern überlagert und der auch in der Erde — dem vierten Leiter des Systems — fließt.

In Abb. 19 sind Verlauf und Phasenlage der wichtigsten elektrischen Größen für einen satten Erdschluß des Leiters T einer Stickleitung

dargestellt. Die Ladeströme I_{RC} und I_{SC} werden von den Leitererdspannungen U_{IR} und U_{IS} vom Erdreich über die entsprechenden Erdkapazitäten nach den gesunden Leitern R und S , sodann vereint über den erd-

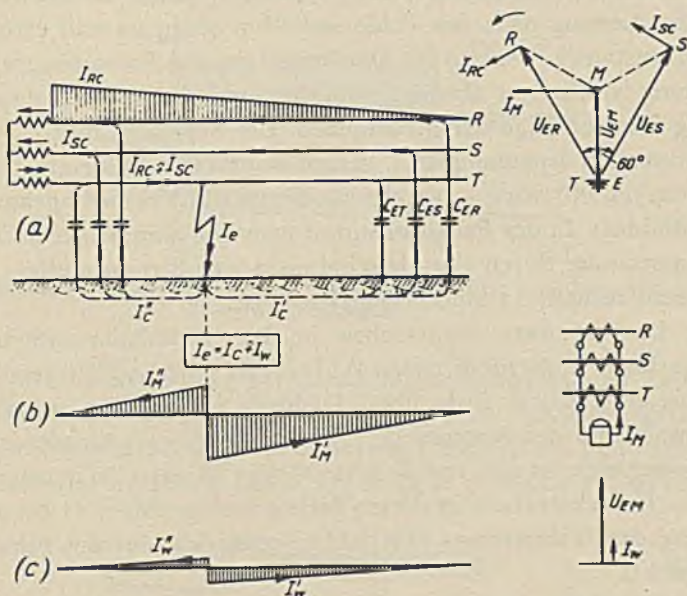


Abb. 19. Stromverteilung auf einer Stickleitung bei satten Erdschluß des Leiters T (Keine Erdschlußkompensation).

geschlossenen Leiter T und die Erdschlußstelle und schließlich wieder nach der Erde getrieben.

Da die Erdkapazitäten längs der Leiter einer einheitlich gebauten Leitung gleichmäßig verteilt sind, so wachsen die Ladeströme vom Ende der Leitung in Richtung zur Stromquelle stetig und linear bis zu einem Höchstwert an. Im Teilbild a ist über dem Leiter R der Aufbau des Ladestromes veranschaulicht. Genau so verläuft der Ladestrom im Leiter S . Die Ladeströme I_{RC} und I_{SC} sind untereinander um 60° phasenverschoben und eilen als kapazitive Blindströme den zwei wirksamen Leitererdspannungen U_{FR} und U_{ES} um 90° voraus, was aus dem danebenstehenden Vektordiagramm hervorgeht. Im erdgeschlossenen Leiter T wird hier dagegen kein Ladestrom erzeugt, weil die Leitererdspannung U_{ET} bei dem angenommenen satten Erdschluß gleich Null ist. Bei einem Erdschluß über Widerstand (Lichtbogen- oder hoher Erdübergangswiderstand) würde

auch im Leiter T ein geringer Ladestrom entsprechend der Höhe von U_{ET} entstehen.

Addiert man nun die Ladeströme der drei Leiter an irgend einem Punkt der Leitung geometrisch, so erhält man den Summenstrom für diesen Punkt. Der Summenstrom I_M wächst in seiner Größe von beiden Enden der Leitung nach der Fehlerstelle hin stetig an und erreicht dort seinen Höchstwert (Teilbild b). Die Verteilung des Summenstromes längs der Leitung ist also nur abhängig von der Lage des Fehlers, dagegen unabhängig von der Lage der Stromquelle. Der Summenstrom I_M wird von der Sternpunkterdspannung U_{EM} getrieben und eilt dieser als kapazitiver Blindstrom um 90° voraus (vergleiche hierzu das Vektordiagramm rechts vom Teilbild a). In der Praxis ermittelt man den Summenstrom für Meß- und Relaiszwecke durch Parallelschalten dreier Stromwandler, wie dies z. B. in dem rechten Teilbild b angedeutet ist.

Die Ladeströme verursachen in der Strombahn natürlich auch Wärmeverluste. Außerdem treten Ableitungsströme (Wirkströme) von den Phasenleitern zur Erde über. Dadurch ergibt sich zusätzlich eine Wirkkomponente des Stromes (I_w), die mit der Sternpunkterdspannung U_{EM} phasengleich ist und nur Bruchteile vom Blindstrom ausmacht, etwa 3 bis 8%. In Kabelnetzen ist dieser Betrag noch geringer (1 bis 3%). Die Verteilung des Wirkstromes (Teilbild c) entspricht der des Blindstromes im Teilbild b.

Die Verteilung des Summenstromes I_M in einigen weiteren Netzgebilden zeigen die Abb. 20 bis 22. Man sieht auch hieraus, daß für die Verteilung von I_M nur die Lage des Erdschlusses maßgebend ist, keineswegs aber die Lage der Stromquelle oder der Verbraucher.

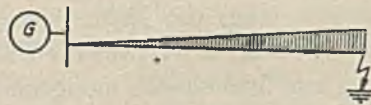


Abb. 20. Verteilung des Summenstromes auf einer Stichleitung bei Erdschluß auf deren Ende.

Aus den Abb. 19 bis 22 geht hervor, daß die Ladeströme I_C einschließlich der Wirkströme I_w von allen Leitungen nach der Erdschlußstelle fließen und dort den Gesamtstrom $I_e = I_C + I_w$ bilden. Dieser im Erdschlußpunkt zusammengefaßte Fehlerstrom heißt Erdschlußstrom (I_e).

Die Größe des Erdschlußstromes eines gegebenen Netzes ist abhängig von der Höhe der Sternpunkterdspannung. Bei satterm Erdschluß, d. h. wenn die Sternpunkterdspannung gleich der vollen Sternspannung ist, ergibt sich der größte Erdschlußstrom. Der Erdschlußstrom ist dabei

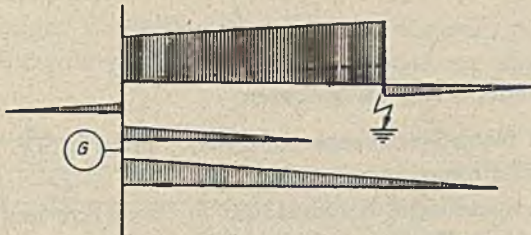


Abb. 21. Verteilung des Summenstromes bei Erdschluß in einem Netz mit mehreren Stiehleitungen.

proportional der Länge aller galvanisch zusammenhängender Leitungen. Der Einfluß des Erdübergangswiderstandes auf die Höhe des Erdschlußstromes ist meist unwesentlich, da dieser im Vergleich mit den kapazitiven Widerständen der gesunden Leiter gegen Erde in vielen Fällen unerheb-

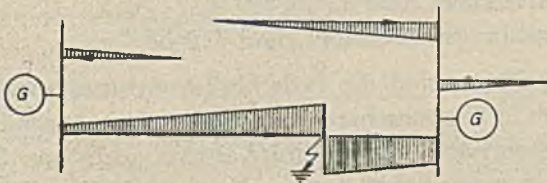


Abb. 22. Verteilung des Summenstromes bei Erdschluß in einem verbundgespeisten Netz.

lich ist. — Der Erdschlußstrom erscheint mit dem Eintritt des Erdschlusses nahezu plötzlich in voller Höhe. Er weist im ersten Moment sogar eine Stromspitze (Gleichstromglied!) auf, die durch das Freiwerden der in den Kapazitäten aufgespeicherten elektrischen Ladung verursacht wird.

Der Erdschlußstrom in A wird aus der Nenn-Dreieckspannung des Netzes, der Länge der Leitungen und der spezifischen Erdkapazität nach folgender Formel ermittelt:

$$I_e = 3 \cdot \frac{U}{\sqrt{3}} \cdot 2 \pi f \cdot l \cdot c_e \dots \dots \dots (5)$$

In der Praxis wird bei der Berechnung des Erdschlußstromes an Stelle der spezifischen Erdkapazität gewöhnlich der spezifische Erdschlußstrom in A (für 10 kV und 100 km bei 50 Hz) benutzt. Die Formel für die Berechnung des Erdschlußstromes lautet dann:

$$I_c = \frac{U}{10} \cdot \frac{l}{100} \cdot I_{sp} \dots \dots \dots (5a)$$

In den Formeln 5 und 5a bedeuten:

- U die Nenn-Dreiecksspannung des Netzes in kV,
- l die Leitungslänge in km,
- c_e die spezifische Erdkapazität in Farad/km und je Leiter,
- I_{sp} den spezifischen Erdschlußstrom in A, bezogen auf 10 kV und 100 km bei 50 Hz.

Der spezifische Erdschlußstrom muß aus der Leiteranordnung der Freileitungen oder aus den Kabelabmessungen ermittelt werden. Für Überschlagsrechnungen kann man folgende Näherungswerte benutzen:

- für Freileitungen mit Erdseil rund 3,2 A,
- für Freileitungen ohne Erdseil rund 2,8 A,
- für Gürtelkabel rund 50 bis 100 A,
- für Strahlungsschutzkabel rund 110 bis 155 A.

Im Fachschrifttum sind die Erdschlußstromwerte von Freileitungen und Kabeln auch in Kurvenscharen festgehalten¹⁾. Insbesondere sind dort die Erdschlußstromwerte von Gürtelkabeln sowie von Strahlungsschutzkabeln in guter Annäherung an die tatsächlichen Werte gebracht.

Am einfachsten und sichersten ermittelt man den Erdschlußstrom eines Netzes dadurch, daß man die Anlage für kurze Zeit einpolig satt erdet und dabei den Erdschlußstrom mit einem Amperemeter mißt. Damit erfaßt man auch diejenigen Ladeströme, die von den Maschinen, Transformatoren, Sammelschienen und dergleichen herrühren.

Die schädlichen Auswirkungen des Erdschlusses, vor allen Dingen des Lichtbogenerdschlusses, werden nach einem Vorschlag von Petersen durch Erdung des Sternpunktes der Transformatoren oder Generatoren über induktive Blindwiderstände (Drosselspulen) geeigneter Dimen-

¹⁾ M. Walter, Kurzschlußströme in Drehstromnetzen, 2. Auflage, R. Oldenbourg, München 1938, S. 162 und 163; M. Schleicher, Die moderne Selektivschutztechnik, J. Springer, Berlin 1936, S. 64 und 65; Rechnungsgrößen für Hochspannungsanlagen, 3. Auflage, AEG.

sion verhindert¹⁾ (Abb. 23). Eine solche Schutzvorrichtung, die im weiteren mit Löscheinrichtung bezeichnet wird, ist im Normalbetrieb praktisch stromlos. Im Erdschlußfall liefert sie jedoch unter der Einwirkung der Sternpunktterdschlußspannung U_{EM} einen induktiven Blindstrom (I_L) über die Erdschlußstelle.

Bei richtiger Einstellung der Löscheinrichtung, d. h., wenn ihr induktiver Blindwiderstand gleich dem kapazitiven Blindwiderstand der

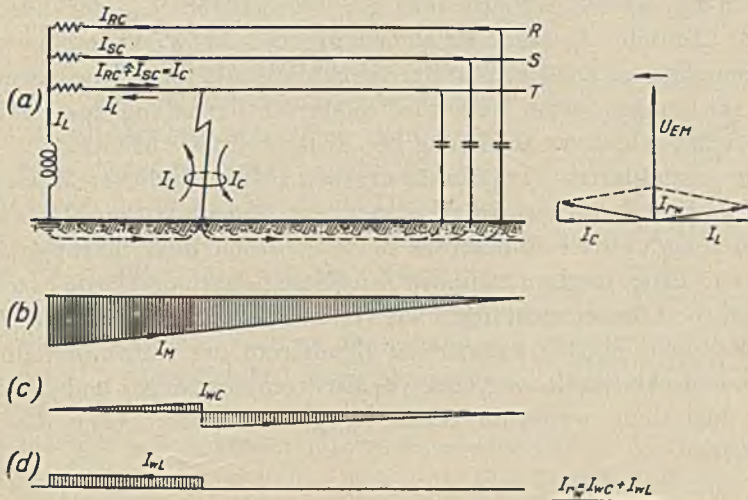


Abb. 23. Stromverteilung auf einer Stickleitung bei satterm Erdschluß des Leiters T. Am Sternpunkt des Transformators oder Generators ist eine Erdschlußspule angeschlossen.

drei parallel geschalteten Leiter gegen Erde ist, heben sich der induktive Blindstrom (I_L) der Löscheinrichtung und der kapazitive Blindstrom (I_C) des Leitungssystems an der Erdschlußstelle auf (Teilbild a). An der Erdschlußstelle fließt dann nur noch der sogenannte Reststrom I_r , der sich aus dem Wirkstrom I_{rw} und dem von den Spannungsüberwellen herführenden Oberwellenstrom I_{ob} zusammensetzt²⁾. In einem gelöschten Netz fließt also der kapazitive Blindstrom über die Erdkapazitäten, die Leiter und den Transformator zur Löscheinrichtung; dementsprechend

¹⁾ W. Petersen, Die Beseitigung von Freileitungsstörungen durch Unterdrückung des Erdschlußstromes und Lichtbogens, ETZ 39 (1918) S. 297.

²⁾ Ist die Kompensierung des kapazitiven Blindstromes unvollständig, so ist im Reststrom I_r auch noch ein Teil des kapazitiven Blindstromes I_C (Unterkompensierung!) bzw. des induktiven Blindstromes I_L (Überkompensierung!) enthalten.

erreicht die Blindkomponente des Summenstromes I_M ihren Höchstwert am Anschlußpunkt der Löscheinrichtung (Teilbild b). Die Verteilung des Summenstroms I_M im Netz ist also abhängig vom Aufstellungsort der Löscheinrichtungen, nicht aber von der Lage des Fehlers im Netz. Folglich ist sie für die selektive Erfassung der Erdschlußstelle ungeeignet.

Die Verteilung des Netzverluststromes I_{wC} (Ableitungsverluste bei Freileitungsnetzen, Dielektrikums-Verluste bei Kabelnetzen) bleibt dagegen dieselbe wie im unkompensierten Netz (Teilbild c). Dem Netzverluststrom I_{wC} überlagert sich noch der Verluststrom I_{wL} der Löscheinrichtung (Teilbild d). Beide zusammen ergeben die Wirkkomponente I_{rw} des Summenstromes, welche an der Erdschlußstelle ihren Höchstwert erreicht. Im kompensierten Netz wird daher die Verteilung des Verluststromes zur selektiven Erfassung der Erdschlußstelle benutzt.

Die geschilderten Verhältnisse ergeben sich in ähnlicher Weise auch beim Bauch-Löschtransformator, der im Gegensatz zur Petersenspule den induktiven Blindstrom nicht zwischen dem Sternpunkt des Netzes und Erde, sondern zwischen den Phasenleitern und Erde erzeugt¹⁾.

Sind die Löscheinrichtungen auf verschiedene Stellen des Netzes verteilt, so saugen sie den kapazitiven Blindstrom des Netzes anteilmäßig von der Erdschlußstelle weg. Der Verluststrom des Netzes und der Spule nimmt auch hier weiterhin seinen Weg unverändert über die Erdschlußstelle.

3. Verschiedenes

In Netzen mit sehr großem oder stark verzerrtem Erdschlußstrom kann der Erdschlußreststrom, d. h. der ungelöschte Wirk- und Blindstrom, beträchtliche Werte annehmen und in seinen Auswirkungen gefährlich werden (Leiterzerstörungen bei Kabeln, hoher Spannungsabfall an der Erdschlußstelle usw.). Diesem Umstand trägt man in der Praxis dadurch Rechnung, daß man das betreffende Netz in mehrere kleinere Netze aufteilt, oder indem man die erforderliche galvanische Trennung über Isolier-Leistungstransformatoren mit einem Übersetzungsverhältnis 1:1 vornimmt, die auch als Regeltransformatoren ausgebildet sein können. Beide Maßnahmen bewirken außer der Herabsetzung des Erdschlußstromes auch die Verminderung der Anzahl der von der Spannungsverlagerung betroffenen Anlageteile und mithin der Anzahl von möglichen Dop-

¹⁾ Vgl. H. Weber, Der Erdschluß in Hochspannungsnetzen, R. Oldenbourg, München 1936, S. 53–55; R. Bauch, ETZ 42 (1921) S. 588 und 616.

pelerdschlüssen oder dergleichen. Das Auskompensieren des Verluststromes I_{rw} hat man bisher kaum vorgenommen. Entsprechende Einrichtungen zur Unterdrückung auch dieses Stromes sind vorgeschlagen und werden zur Zeit erprobt.

Nach Beendigung des Erdschlusses erhält der Sternpunkt des Netzsystems M wieder das Potential der Erde. In kompensierten Netzen wandert dabei der Erdpunkt E langsam infolge Weiterschwingens des Gebildes: Spuleninduktivität—Erdkapazität von der Dreieckspitze auf einer Geraden nach dem Sternpunkt. Weicht die Frequenz des schwingungsfähigen Gebildes: Spuleninduktivität—Erdkapazität von der Netzfrequenz etwas ab, was meist der Fall ist, so wandert der Vektor der Sternpunkterdspannung gegenüber dem Spannungsdreieck nach einer Spirale (Abb. 24), und zwar so lange, bis er sich durch die Dämpfung des schwingungsfähigen Gebildes im Sternpunkt auf den Wert Null verkleinert. Bei diesem Einschwingungsvorgang werden also zu bestimmten Zeitpunkten Erdschlüsse auch an den gesunden Leitern R und S vorgetäuscht¹⁾. Erdschlußanzeigerelais oder -meldegeräte, welche den fehlerhaften Pol anzeigen sollen, können infolgedessen eine falsche Betätigung herbeiführen, wenn sie nicht mit einer entsprechenden Sperreinrichtung²⁾ versehen sind (siehe Seite 165).

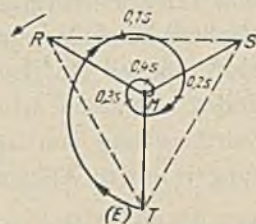


Abb. 24. Einschwingen des Erdpotentials vom geerdeten Leiter T nach dem Sternpunkt des Dreiecks bei unterkompensiertem Netz.

E. Leiterunterbrechung

Die Unterbrechung eines oder zweier Leiter in Drehstromanlagen gilt für den Betrieb auch dann als eine Störung, wenn die Leiter keine Erdverbindung aufweisen. Störungen dieser Art, namentlich solche mit zweipoliger Unterbrechung, treten in der Praxis verhältnismäßig selten auf. Ihre Auswirkungen sind für den Betrieb lästig und manchmal nicht ungefährlich oder unschädlich, insbesondere wenn die Leiterunterbrechung längere Zeit besteht. Leiterunterbrechungen ergeben sich durch das Reißen, Auslöten oder Lockerwerden der Leiter von Freilei-

¹⁾ Siehe auch H. Weber, Der Erdschluß in Hochspannungsnetzen, R. Oldenbourg, München 1936, S. 57.

²⁾ Vgl. auch Fr. Geise, Siemens-Z. 15 (1935) S. 493.

tungen, Kabeln, Motoren, Transformatoren usw. sowie durch das Durchbrennen von Sicherungen oder durch das Ausschalten eines einpoligen Trennungsschalters.

Leiterunterbrechungen rufen gewöhnlich eine Änderung der Ströme in den gesunden Leitern nach Größe und Phase sowie eine Spannungssymmetrie des Systems hervor. So zieht beispielsweise bei einer Stichelung ein einpoliger Leiterbruch den Stromausfall im unterbrochenen Leiter nach sich und zwingt gleichzeitig den Strömen der beiden gesunden Leiter eine gegenseitige Phasenlage von 180° auf statt der ordnungsgemäßen von 120° im Normalbetrieb. Da danach die erforderliche Leistung den Verbrauchern über die zwei gesunden Leiter allein zugeführt werden muß, können Überlastungen von Anlageteilen auftreten. Gewöhnlich ergeben sich auch erhebliche Spannungsverlagerungen, die zuweilen zur Vortäuschung von Erdschlüssen führen und manchmal auch Falschmessungen in den Anlagen verursachen.

F. Überlastungen

Die Anlageteile elektrischer Netze können durch Überströme thermisch gefährdet werden, indem ihre Isolation infolge unzulässiger Erwärmung zerstört oder sogar ihre Leiter abgeschmolzen werden. Dabei sind grundsätzlich zwei verschiedene Fälle zu unterscheiden:

- a) Überlastungen im Zusammenhang mit auftretenden Störungen,
- b) Überlastungen im normalen Betrieb.

Im Fall a) sind es vor allem Kurzschlüsse und Doppelerdschlüsse, die in der Regel mit Überströmen erheblicher Größe verbunden sind. Sie werden von den Schutzrelais, wie Distanzrelais, Differentialrelais, Überstromzeitrelais oder dergleichen mittels der benachbarten Schalter meist in sehr kurzer Zeit abgetrennt (0,1 bis 3 s), so daß eine thermische Gefährdung der Anlageteile nahezu ausgeschlossen ist.

Anders liegen die Verhältnisse im Fall b), d. h. bei den Überströmen, die durch Überlastung der Anlageteile im störungsfreien Betrieb verursacht werden, z. B. wenn die Anlageteile willkürlich oder unwillkürlich gezwungen werden, längere Zeit unangemessen große Leistung fortzuleiten (Kabel, Transformatoren) oder anormal große Kräfte zu entwickeln (Motoren). Die Überschreitung des Nennstromes der Anlageteile ist hier in der Regel verhältnismäßig gering; die Ströme liegen etwa 10 bis 100% über dem Nennstrom. Derartige Überlastungen können

die Anlageteile je nach ihrer Erwärmungs-Zeitkonstante gewöhnlich viele Minuten oder gar einige Stunden schadlos vertragen. Die vorerwähnten Schutzrelais bieten mit ihren sehr kurzen Ablaufzeiten in solchen Fällen also keinen brauchbaren Überlastungsschutz, denn sie schalten die Anlageteile unter Umständen ganz zwecklos dann ab, wenn sie am nötigsten gebraucht werden. Hier müssen vielmehr Relais zur Anwendung gelangen, die die Anlageteile so lange in Betrieb lassen, bis für diese wirklich eine Erwärmungsgefahr entsteht. Das sind Relais, deren Auslösezeiten in der Größenordnung der Zeitkonstante des Schützlings liegen, und die sozusagen ein thermisches Abbild vom Schützling geben. Nähere Ausführungen über die diesbezüglichen Schutzeinrichtungen sind auf Seite 178 gebracht.

G. Pendelerscheinungen

Belastungs- und Entlastungsstöße in elektrischen Netzen können zwischen den wirksamen Maschinen erhebliche Leistungspendelungen hervorrufen und sogar ein Außertrittfallen der Maschinen zur Folge haben. Derartige Pendelungen werden vorwiegend durch Kurzschlüsse eingeleitet. Die Pendelungen entstehen gewöhnlich schon während der Kurzschlußdauer oder, wenn diese sehr kurz ist, auch erst nach dem Abschalten des Kurzschlusses. In Netzen mit mehreren Kraftwerken ist die Pendelgefahr bzw. die Gefahr des Außertrittfallens der Generatoren viel größer als in Netzen mit nur einem Kraftwerk (Kurzakupplung), und zwar aus dem Grunde, weil die Generatoren in den verschiedenen Werken den Laststößen unterschiedlich stark ausgesetzt werden, und weil die synchronisierenden Kräfte je nach der Länge der Verbindungsleitungen mehr oder minder gedämpft sind. Bei den weiteren Betrachtungen soll die Kurzakupplung der Generatoren in einem Werk nur erwähnt, die Fernakupplung im Verbundbetrieb dagegen näher behandelt werden.

1. Grundzüge der Pendelvorgänge

Fast jeder Netzkurzschluß ruft eine gewisse Spannungsminderung auch an den Generatoren hervor. Dadurch werden zunächst die synchronisierenden Kräfte zwischen den Maschinen geschwächt. Außerdem reagieren die Maschinen in den einzelnen Kraftwerken je nach ihrer Bauart¹⁾

¹⁾ Einschließlich der Regeleinrichtungen.

und je nach der Lage des Kurzschlusses zu ihnen unterschiedlich auf Laststöße, indem sie die gegenseitige Polradstellung während mehrerer Sekunden oder gar Minuten fortlaufend verändern. Durch die geschilderten Verhältnisse kommen die Maschinen ins Schlüpfen und laufen schließlich durcheinander. Diese Vorgänge sollen an Hand eines Beispiels noch etwas näher erläutert werden.

Beispiel: Zwei Kraftwerke (A und B) seien über eine lange Drehstromleitung miteinander verbunden (Abb. 25a). Ferner sei angenommen, daß die Spannungsvektoren U_A und U_B der Kraftwerke A und B gleich

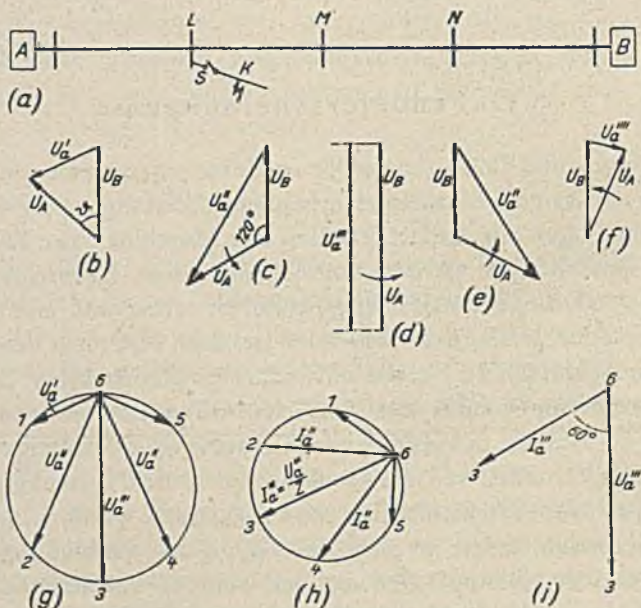


Abb. 25. Pendelerscheinungen auf einer Drehstromleitung zwischen zwei Kraftwerken. Vektorielle Darstellung der Ausgleichsspannung U_a und des Ausgleichsstromes I_a für eine Durchlaufperiode.

groß sind¹⁾, und daß die normale Energieübertragung durch den von diesen Vektoren eingeschlossenen Winkel ϑ gekennzeichnet ist (Abb. 25b). Zwischen den Kraftwerken fließt also kein pulsierender Ausgleichsstrom, denn die Maschinen laufen synchron mit konstantem ϑ .

¹⁾ Unter den Vektoren U_A und U_B kann die Leiterspannung (Dreieckspannung) oder die Sternspannung an den Klemmen der Maschinen verstanden werden.

Plötzlich tritt auf der vom Unterwerk L abgehenden Stickleitung an der Stelle K ein dreipoliger Kurzschluß auf. Die Kraftwerke werden hierbei infolge der mehr oder minder abgesunkenen Spannung und dadurch, daß sie in die Fehlerstelle praktisch nur Blindleistung liefern, stoßartig entlastet, insbesondere das Kraftwerk A , das der Fehlerstelle wesentlich näher liegt. Die noch voll erhaltene Antriebsleistung der Maschinen versucht die Polräder zu beschleunigen, mit dem Erfolg, daß der Vektor U_A gegenüber dem Vektor U_B zeitlich vorseilt und den ursprünglichen Winkel ϑ soweit vergrößert, bis die Maschinen außer Tritt fallen. Nach dem Abschalten des Kurzschlusses durch den Schalter S heben sich die Spannungen der Generatoren praktisch wieder auf ihre ursprünglichen Werte U_A und U_B , und die Maschinen versuchen nun mit den stärker gewordenen synchronisierenden Kräften wieder in Tritt zu kommen, was ihnen je nach den vorherrschenden Bedingungen im Netz leichter

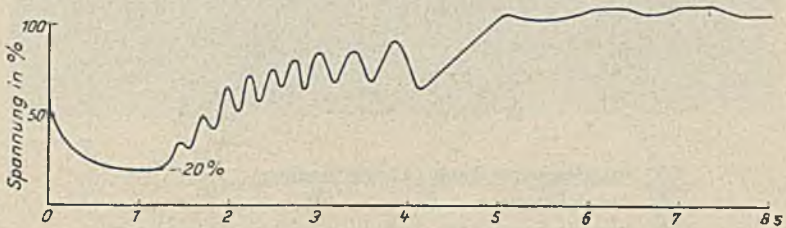
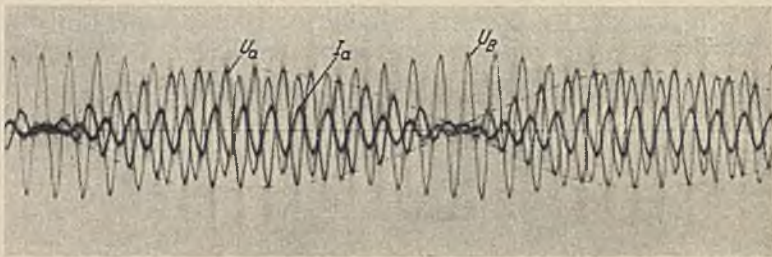


Abb. 26. Spannungsschwabungen in einem 110 kV-Netz nach erfolgtem Abschalten des Kurzschlusses, aufgenommen mit einem Rußschreiber. Die Maschinen haben sich hier verhältnismäßig schnell gefangen.

oder schwerer gelingt (Abb. 26). Unter Umständen kommen die Maschinen überhaupt nicht mehr in Synchronismus; sie müssen dann voneinander getrennt und von neuem synchronisiert werden.

Die Teilbilder c bis f der Abb. 25 zeigen, wie der Vektor U_A dem gleich groß angenommenen Vektor U_B zeitlich vorseilt, mit diesem bei 180° in Phasenopposition kommt (Teilbild d) und nach einer vollen Umdrehung, also bei 360° , mit ihm wieder in Phase liegt. Dieses Spiel kann sich bis zum endgültigen Fangen der Maschinen mehrmals wiederholen. Die Ausgleichsspannung U_d zwischen den Vektoren U_A und U_B (Spannungsunterschied über die ganze Drehstromleitung) wächst dabei, wie auch im Teilbild g dargestellt ist, vom Wert Null bei Phasengleichheit (0°) der Vektoren U_A und U_B bis zum Höchstwert bei Phasenopposition (180°) an und erreicht beim Weiterdrehen des Vektors U_A mit 360° wie-

der den Wert Null. Sie hat infolge Änderung nach Größe und Phase notwendigerweise einen veränderlichen Ausgleichsstrom I_a über die Leitung zur Folge. Dieser Ausgleichsstrom ist der treibenden Spannung U_a proportional. Er verläuft genau so wie die Spannung U_a , nur, daß er ihr um einen bestimmten Winkel, den Leitungsimpedanzwinkel φ , der hier mit 60° angenommen sei, in allen Punkten des Schlupfkreises nacheilt (Teilbild h und i). In den Kreisdiagrammen g und h sind die Verhältnisse für die beiden pulsierenden Größen U_a und I_a für den jeweils gleichen Zeitpunkt während eines vollständigen Überschlagens der Polräder dargestellt.



- U_a Ausgleichsspannung (Längsspannung)
- I_a Ausgleichsstrom
- U_B Leiterspannung (Dreiecksspannung) in Kraftwerk B.

Abb. 27. Strom- und Spannungsschwebungen auf einer Drehstromleitung.

In der Zeit, in der der umlaufende Vektor U_a den vollen Kreis mit 360° beschreibt, bestreichen die Vektoren U_a und I_a lediglich einen Kreisbogen von 180° ; sie bewegen sich dabei nur mit halber Geschwindigkeit.

Abb. 27 zeigt derartige Strom- und Spannungsschwebungen in einem Oszillogramm. Die Amplitudenwerte des Ausgleichsstromes I_a und der Ausgleichsspannung U_a verlaufen nach einer sinusförmigen Schwebung. Die Klemmenspannung U_B (an dem einen Ende der Leitung) schwankt etwas, weil die veränderliche Last im Netzgebilde einen erheblichen Spannungsabfall verursacht hat.

Die Dauer einer einzelnen Schwebung (der Abstand zwischen zwei Pendelknoten) kann je nach den Netzbedingungen etwa 0,2 bis 2 s dauern. Die Anzahl der Schwebungen bei Pendelvorgängen ist im wesentlichen

abhängig von der Größe der zu beschleunigenden Schwungmasse sowie von der Größe des synchronisierenden Momentes.

Leistungspendelungen, bei denen die beteiligten Generatoren in Phasenopposition gelangen, bringen hohe Überströme und starke Spannungsschwankungen mit sich und tragen somit kurzschlußartigen Charakter.

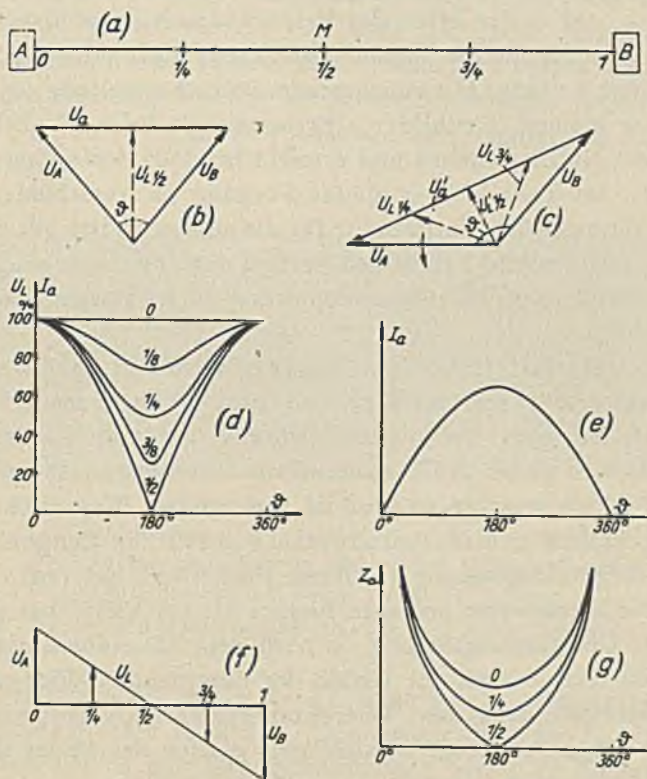


Abb. 28. Zeitlicher Verlauf der Leiterspannung U_L , des Ausgleichsstromes I_a und der Scheinimpedanz Z_a in Abhängigkeit vom Polradwinkel ϑ , bezogen auf verschiedene Punkte der Drehstromleitung zwischen den Kraftwerken A und B.

Der Verlauf der Leiterspannung¹⁾ (Dreieckspannung) U_L , des Ausgleichsstromes I_a und der Scheinimpedanz Z_a in Abhängigkeit von der Größe des Polradwinkels ϑ bzw. von der Zeit, bezogen auf verschiedene Punkte einer Leitung, soll an Hand der Abb. 28 gezeigt werden.

¹⁾ Oder der Sternspannung; es handelt sich hier um eine Ortsspannung.

Hierbei sei angenommen, daß die Kraftwerke A und B durch irgendwelche Vorgänge im Netz außer Tritt gekommen sind, und daß der Vektor U_A dem Vektor U_B , wie auch in Abb. 25 vorauseilt.

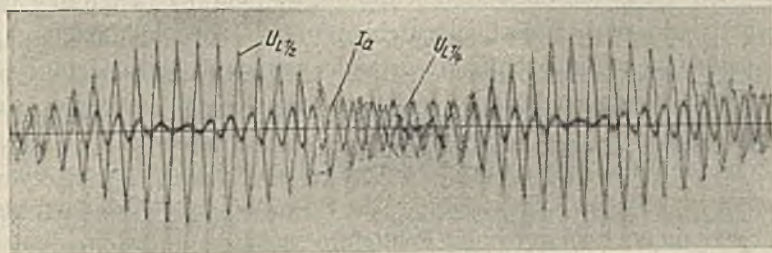
Im Teilbild b ist für einen beliebig gewählten Pendelzustand die Größe der Leiterspannung U_L für die Leitungsmitte ($1/2$) — elektrische Mitte der Kupplung — eingetragen. Der Endpunkt dieses Spannungsvektors $U_{L1/2}$ liegt in der Mitte des Vektors der Ausgleichsspannung U_B , weil bis zu dieser Stelle die Spannungsdifferenz auch halb so groß ist wie über die ganze Leitung. Mit zunehmender Polradverstellung (ϑ) wird der Vektor $U_{L1/2}$ kleiner (Teilbild c). Er schrumpft beim Winkel $\vartheta = 180^\circ$ auf den Wert Null zusammen und erreicht bei 360° den vollen Wert von U_B bzw. U_A . Im Teilbild d ist dieser Vorgang für verschiedene Punkte der einen Leitungshälfte dargestellt; für die andere Hälfte gilt dieses Bild sinngemäß. Das Teilbild f stellt den Verlauf der Leiterspannung U_L längs der Drehstromleitung bei Phasenopposition in kleinerem Maßstab getrennt dar.

Der Ausgleichsstrom I_a ändert seine Größe in Abhängigkeit vom Polradwinkel ϑ bzw. von der Zeit, und zwar in Form einer Sinuskurve (Teilbild e). Für einen bestimmten Zeitpunkt ist er an jeder Stelle der Leitung natürlich gleich groß, während die Leiterspannung dabei an den einzelnen Punkten verschieden groß ist. Den größten Wert in einer Stromschwebung erreicht er beim Polradwinkel $\vartheta = 180^\circ$, im Zeitpunkt, in dem auch die Ausgleichsspannung U_a ihren Höchstwert hat (vgl. Abb. 25 d und 27). Die Stromwerte betragen hierbei oft ein Vielfaches des Nennstromes der Übertragungsleitung, je nach dem Maschineneinsatz in den Kraftwerken und je nach der Größe der dämpfenden Widerstände des Netzes. Überstromrelais bzw. Überstromzeitrelais können durch solche Stromschwebungen angeregt werden und, je nach der Dauer der einzelnen Stromschwebungen, sogar zur Auslösung kommen.

Dividiert man die Leiterspannung U_L aus dem Teilbild d durch den Ausgleichsstrom I_a nach dem Teilbild e, so erhält man den Verlauf der sogenannten Scheinimpedanz Z_s in Abhängigkeit vom Polradwinkel ϑ bzw. von der Zeit an verschiedenen Stellen der Drehstromleitung. Aus dem Teilbild g geht hervor, daß die Scheinimpedanz bei $\vartheta = 0^\circ$ oder 360° an allen Punkten der Kupplungsleitung unendlich groß ist, bei Phasenopposition dagegen nur geringe Werte erreicht. An der Leitungsmitte erhält sie zu einem bestimmten Zeitpunkt (180°) sogar den Wert Null. Das bedeutet, daß dort ein Kurzschluß vorgetäuscht wird. Die hierbei

auftretenden elektrischen Größen I_a , U_L und Z_a werden von den Schutzrelais gemessen und führen, wenn nicht besondere Gegenmaßnahmen getroffen sind, unter Umständen zu ungewollten Auslösungen von Schaltern (s. Seite 174).

Die Scheinreaktanz $X_a = Z_a \sin \varphi$ geht beim Durcheinanderlaufen der Kraftwerke an jeder Stelle der Leitung durch Null. Der scheinbare Kurzschlußpunkt wandert hier über die ganze Kupplungsleitung hinweg!). Reaktanzrelais sind daher besonders empfindlich bei Pendelungen. Sie müssen unbedingt mit Sperreinrichtungen versehen werden (Seite 174), damit ein wahlloses Auslösen der Schalter bei Pendelungen verhindert wird.



I_a Ausgleichsstrom
 $U_{L1/2}$ Leiterspannung an der elektrischen Mitte der Leitung
 $U_{L1/4}$ Leiterspannung auf einem Viertel der Leitung.

Abb. 29. Strom- und Spannungsschwabungen auf einer Drehstromleitung.

Das Oszillogramm der Abb. 29 zeigt die Schwabungsverhältnisse für die Leitungspunkte $1/2$ und $1/4$. Der Ausgleichsstrom I_a erreicht hier seine Höchstwerte in den Stromschwabungen, wenn die Leiterspannung $U_{L1/2}$ an der Leitungsmitte durch Null geht. Die Leiterspannung $U_{L1/4}$ hat zu diesem Zeitpunkt noch einen endlichen Wert. Die Begrenzungslinien der Schwabungen verlaufen hier, wie es in der Praxis meist der Fall ist, nicht sinusförmig, weil die Schwabungen selbst nur als gedämpfte Schwingungen auftreten können. Die Schlupffrequenz ist also nicht konstant, sondern ändert ihre Größe mit der Zeit (vgl. auch Abb. 26).

In der Praxis sind die Spannungen U_A und U_B an den Leitungen infolge der hohen Ausgleichsströme, die bei Pendelerscheinungen zwischen

¹⁾ R. Schimpf, ETZ 54 (1933) S. 1134; H. Titze, Elektrizitätswirtschaft 33 (1934) S. 475 und 514.

den Kraftwerken fließen, gewöhnlich nicht konstant und meist auch nicht gleich groß. Sie verändern nämlich ihre Größe im Takt der Pendelungen, abhängig von der Kraftwerkleistung und den dämpfenden Widerständen des Netzgebildes. Dessen ungeachtet bleibt der gezeigte Kurvenverlauf für die einzelnen elektrischen Größen im wesentlichen erhalten. Der Punkt der Drehstromleitung, der bei Phasenopposition die Scheinimpedanz Null aufwies und sich bei $U_A = U_B$ in der Mitte der Leitung befand, verschiebt sich dann in Richtung des Werkes mit der geringeren Frequenz.

Die mit den Pendelerscheinungen verbundene Umkehr der Leistungsrichtung erfolgt an den verschiedenen Punkten der Leitung nicht gleichzeitig, sondern nacheinander¹⁾. Das Wandern des scheinbaren Kurzschlußpunktes über die Leitung veranlaßt die Richtungsrelais an den verschiedenen Unterstationen der Kupplungsleitung nacheinander bald nach rechts, bald nach links „auszuschlagen“²⁾. Dadurch können ungewollte Auslösungen von Schaltern zustande kommen. Diese Gefahr läßt sich allerdings durch zusätzliche Mittel an den Relais beseitigen (siehe Seite 175).

Neben den hier geschilderten asynchronen Pendelungen, die im wesentlichen durch das Überschlagen der Polräder gekennzeichnet sind, kennt die Praxis noch synchrone Pendelungen. Diese unterscheiden sich von den asynchronen Pendelungen dadurch, daß bei ihnen ein Überschlagen der Polräder nicht stattfindet, sondern daß sich nur ein wiederholtes wechselseitiges Verschieben der Polräder gegeneinander vollzieht. Sie sind daher weniger gefährlich als asynchrone Pendelungen, obwohl auch bei ihnen die Schutzrelais ansprechen können. Im übrigen gelten die in diesem Abschnitt gemachten Überlegungen bei sinngemäßer Anwendung auch für die synchronen Pendelungen.

2. Pendelfördernde Umstände

Einmal ausgelöste Pendelungen können durch verschiedene Umstände im Netz begünstigt werden. Von Einfluß sind vor allen Dingen Art und Lage der Kurzschlüsse im Netz, Antriebsform und Schwungmasse der Maschinen, ferner die Eigenschaften der Generatoren- und Kraftmaschinenregler.

Bei dreipoligen Kurzschlüssen neigen die Maschinen viel leicht-

¹⁾ Vgl. auch R. Schimpf, ETZ 54 (1933) S. 1134.

²⁾ Die Dauer des Verweilens auf der einen oder anderen Kontaktseite ist dabei je nach dem Charakter der Leitung (φ_k) nicht unbedingt gleich groß.

ter zum Außertrittfallen als bei zweipoligen, weil der Energiefluß zwischen den Werken auf der betroffenen Leitung praktisch unterbunden wird. Beim zweipoligen Schluß bleiben dagegen die synchronisierenden Momente infolge der nur wenig verkleinerten Spannung zwischen der gesunden und den beiden kranken Leitern meist in hohem Maße aufrecht erhalten. — Unsymmetrisch zu den Kraftwerken liegende Kurzschlüsse fördern den Asynchronismus mehr als symmetrisch gelegene, da sie infolge der ungleichmäßigen Lastverteilung gewöhnlich größere Frequenz- und Spannungsunterschiede zwischen den Kraftwerken hervorgerufen. — Die Antriebsart der Maschinen spielt besonders beim Zusammenarbeiten von Wasser- und Dampfkraftwerken eine Rolle, die sich wegen der verschiedenen Maschinenbauart (Schwungmasse, Drehzahl usw.) und mithin infolge der ungleichen Eigenschwingungen nach starken Pendelungen sehr schwer fangen. — Von den Reglern wirken die Strombegrenzungsregler an den Generatoren im allgemeinen ungünstig auf die Stabilität der Netze, besonders in solchen mit langen Kupplungsleitungen, da sie die treibende Spannung herabdrücken und somit die synchronisierenden Kräfte schwächen. Spannungsschnellregler üben dagegen auf die Stabilität einen günstigen Einfluß aus, indem sie versuchen, die treibende Spannung hochzuhalten. In manchen Fällen wird, z. B. bei großen Spannungsrückgängen, sogar eine Stoßerregung von Vorteil sein.

Weitgehender Zusammenschluß großer Netze kann die Stabilität des Betriebes dann ungünstig beeinflussen, wenn infolge geringer Netzbelastung nur wenige und verhältnismäßig kleine Maschineneinheiten in Betrieb sind. Die Generatoren werden nämlich, falls Kompensationsdrosseln¹⁾ im Netz nicht eingebaut sind, bei Schwachlast zum großen Teil durch die Netzkapazität erregt. Tritt nun ein Kurzschluß in einem solchen Netz auf, so verschwindet die Netzerregung plötzlich, die Spannungsschnellregler greifen zwar sofort ein, können aber die Erregung oft erst nach mehreren Sekunden entsprechend der Erregermaschine-Zeitkonstante auf eine angemessene Höhe bringen (vgl. z. B. Abb. 26). Durch die stark zusammengebrochene Spannung verlieren die Generatoren ihre synchronisierenden Kräfte, der gegenseitige Schlupf zwischen ihren Polrädern wächst an, und das Wiederfangen der Maschinen ist dann unter Umständen sehr erschwert.

¹⁾ Regelbare Drosselwindungen zur Kompensierung des Ladestromes langer Hochspannungsleitungen, vgl. z. B. v. Mangoldt, VDE-Fachberichte 10 (1938) S. 2.

3. Bekämpfungsmittel

Das Außertrittfallen kurz gekuppelter Generatoren sowie ganzer Kraftwerke im Verbundbetrieb kann durch verschiedene Maßnahmen bekämpft werden.

Als wirksamstes Mittel gilt wohl das rasche Abschalten der Kurzschlüsse, damit die gegenseitige Polradverstellung erst gar nicht über 90° hinauskommt und die Maschinen sich nach dem Abschalten des Kurzschlusses wieder schnell und sicher fangen. Bei Normallast ist der Winkel $\vartheta = 40 \dots 50^\circ$. Im allgemeinen dürfte eine Abschaltzeit von 0,4 s ausreichen¹⁾, um ein Außertrittfallen der Maschinen zu verhindern. In besonders ungünstigen Fällen, z. B. bei dreipoligen Kurzschlüssen an den Klemmen der Maschinen, müßte die Abschaltzeit möglichst noch unter 0,2 s liegen²⁾.

Das schnelle Steigern der Maschinenspannung im Störfall wirkt sich, wie bereits gesagt, ebenfalls günstig auf die Stabilität der Generatoren aus. Hierzu ist es erforderlich, daß die Erregermaschinen mit großer Erregungsgeschwindigkeit arbeiten. Erregermaschinen mit Fremderregung und lamelliertem Eisenkern werden als geeignetes Mittel gewertet³⁾. Überdies ist es erwünscht, daß die Erregermaschinen im Störfall mit sogenanntem Spannungsüberschuß arbeiten. Mit Elektronenreglern soll ein Außertrittfallen der Maschinen selbst bei Polradwinkeln von $\vartheta = 90 \dots 120^\circ$ vermieden werden können⁴⁾.

Die Verkleinerung der Kupplungsimpedanz zwischen den Kraftwerken wirkt sich auf die Stabilität ebenfalls günstig aus. Lange Leitungen, insbesondere Leitungen mit hohem induktivem Blindwiderstand, verursachen nämlich schon im normalen Betrieb bei Vollast einen großen Polradwinkel ϑ und machen das Netzgebilde empfindlich gegen Laststöße. Das Hinzubringen paralleler Leitungen sowie jede andere Verminderung der Kupplungsimpedanz rücken das Netzgebilde der stabileren Kurzkupplung näher.

Falls sich die Maschinen bei Pendelvorgängen in einem verbundgespeisten Netz nach einer gewissen Zeit nicht wieder fangen, so empfiehlt es sich, das Netz durch die Schutzrelais mit Sondereinrichtungen an den

1) Vgl. auch S. Holzach, Bulletin des SEV 23 (1932) S. 645.

2) Th. Buchhold, Elektrische Kraftwerke und Netze, J. Springer, Berlin 1938, Seite 86.

3) A. Einsele, E. und M. 57 (1939) S. 145.

4) Novosti tehniki (1938) S. 17 oder ETZ 59 (1938) S. 883.

Leistungsscheiden auftrennen zu lassen (Seite 176), also an Netzstellen, die für die Aufrechterhaltung des Betriebes mittels getrennter Kraftwerke günstig liegen.

Weitere Einzelheiten über Pendelerscheinungen können dem einschlägigen Schrifttum entnommen werden¹⁾.

¹⁾ R. Schimpf, ETZ 54 (1933) S. 1134; A. v. Timascheff, Wiss. Veröff. a. d. Siemens-Konzern 13 (1934) Heft 2; M. Walter, E. und M. 50 (1932) S. 261; L. N. Chrichton, Electr. Engg. 56 (1937) S. 1261; K. Kühn 52 (ETZ) 1931, S. 1185 und 1349; W. Peters, ETZ 52 (1931) S. 1509; U. R. Mason, Electr. Engg. 56 (1937) S. 823; Th. Buchhold, Elektr. Kraftwerke und Netze, J. Springer 1938, S. 83—90; H. Gutmann, Elektrizitätswirtschaft 39 (1940) S. 14.

IV. Aufbau, Wirkungsweise und Anwendung der Schutzrelais bzw. Schutzeinrichtungen

A. Allgemeine Eigenschaften und Bauteile von Relais

1. Einleitung

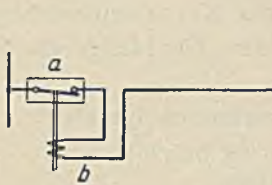
Tritt eine der erläuterten Fehler- oder Störungsarten in einem Anlageteil auf, so ist dieser gewöhnlich nicht mehr betriebsfähig und muß schnellstens abgeschaltet werden. Nur bei Erdschlüssen, Überlastungen, Leiterunterbrechungen, Pendelvorgängen oder dergleichen ist eine rasche Abschaltung nicht immer erforderlich bzw. nicht erwünscht. Hier genügt es in vielen Fällen, wenn der schadhafte Anlageteil lediglich durch eine Anzeigeeinrichtung, wie Fallklappe, Lampe, Hupe oder Glocke kenntlich gemacht wird.

Die bei einem Fehler auftretenden Meßgrößen werden durch die Schutzgeräte, wie Stromrelais (Stromauslöser), Spannungsrelais (Spannungsauslöser), Widerstandsrelais, Leistungs-Richtungsrelais oder dergleichen erfaßt, die entweder das Abschalten des schadhafte Anlageteiles veranlassen oder diesen durch Anzeigeeinrichtungen kenntlich machen. An manchen Anlageteilen werden die Wirkungen der elektrischen Größen von den Schutzgeräten nur mittelbar in Form von Erwärmung, Gasbildung oder Strömung erfaßt, die sich von der schadhafte Stelle ausbreiten.

Die Schutzgeräte bzw. Schutzeinrichtungen führen die Auslösung der Schaltgeräte durch Aufheben der Sperrung (z. B. Klinke, Ventil) herbei, und zwar entweder mechanisch über Gestänge bzw. Hebel oder elektrisch über Hilfsauslöser. Die Hilfsauslöser können dabei mit Gleichstrom, Wechselstrom oder „Wandlerstrom“ betätigt werden (siehe Seite 202).

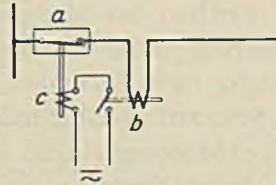
Die Schutzgeräte werden grundsätzlich unterteilt in Primärauslöser, Primärrelais und Sekundärrelais. Die weitaus größte Bedeutung haben die Sekundärrelais.

Unter Primärauslösern versteht man solche Einrichtungen, deren Wicklungen im oder am überwachten Stromkreis liegen, denen die Meßgröße unmittelbar zugeführt wird und die mechanisch einen Entriegelungsvorgang am Schalter herbeiführen (Abb. 30). Die Primärrelais haben den gleichen Aufbau und die gleiche Anschlußart wie die Primärauslöser, bewerkstelligen aber den Entriegelungsvorgang am Schalter elektrisch über Hilfsauslöser (Abb. 31).



a Leistungsschalter
b Primärauslöser

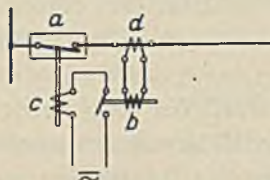
Abb. 30. Leistungsschalter mit Primärauslöser.



a Leistungsschalter
b Primärrelais
c Hilfsauslöser

Abb. 31. Leistungsschalter mit Primärrelais und Hilfsauslöser.

gelungsvorgang am Schalter herbeiführen (Abb. 30). Die Primärrelais haben den gleichen Aufbau und die gleiche Anschlußart wie die Primärauslöser, bewerkstelligen aber den Entriegelungsvorgang am Schalter elektrisch über Hilfsauslöser (Abb. 31).



a Leistungsschalter
b Sekundärrelais
c Hilfsauslöser
d Stromwandler

Abb. 32. Leistungsschalter mit Sekundärrelais und Hilfsauslöser.

Sekundärrelais sind Einrichtungen, deren Wicklungen über Stromwandler, Spannungswandler oder Nebenwiderstände am überwachten Stromkreis liegen, denen die Meßgröße somit mittelbar zugeführt wird, und die elektrisch weitere Einrichtungen steuern, z. B. die Hilfsauslöser an den Schaltern (Abb. 32).

2. Meßverfahren

In der Relais-technik werden die gleichen Meßverfahren angewendet wie in der Meßtechnik. Nur müssen die Relais bezüglich des Meßbereiches und der zu entwickelnden Kräfte meist viel reichlicher ausgelegt sein als die entsprechenden Meßgeräte; denn sie müssen nicht nur messen,

sondern auch Kontakteinrichtungen oder mechanische Übertragungen betätigen, und zwar mit großer Sicherheit auch dann, wenn sie erst nach Jahren erstmalig zum Ansprechen kommen. Ferner müssen ihre Kräfte so groß sein, daß kleine Einstellzeiten erreicht werden. Dabei muß ein Pendeln (Prellen) der Meßglieder oder der Kontakteinrichtungen nach dem Ansprechen möglichst vermieden werden. Für Meßgeräte sind solche Eigenschaften meist belanglos.

Die Schutzrelais führt man heute vornehmlich aus als

- a) elektromagnetische Relais (Seite 84 bis 96)
- b) Induktionsrelais (Seite 105 bis 109)
- c) elektrodynamische Relais (Seite 99 bis 103)
- d) thermische Relais (Seite 178).

Von einer besonderen Erläuterung der genannten Prinzipien wird hier abgesehen, da diese aus der allgemeinen Meßtechnik schon bekannt sind (siehe auch VDE 0410/X 38). In den weiteren Abschnitten werden nur diejenigen Seiten der Meßverfahren näher herausgestellt, die für die Relais als Schutzgeräte von besonderer Bedeutung sind.

3. Halteverhältnis

Hierunter versteht man das Verhältnis des Anzugswertes eines Relais oder Auslösers zum Abfallwert bei gleicher Einstellung. Die Größe des Halteverhältnisses wird bedingt durch das Wechselspiel zweier Kräfte, z. B. zwischen der mechanischen Kraft der Rückstellfeder und der Gegenkraft des Elektromagneten. Das Halteverhältnis ist stets größer als 1; diese Aussage gilt in gleicher Weise für Strom-, Spannungs- und Widerstandsrelais.

Bei den Stromrelais mit Klappanker- oder Tauchankermagneten (Abb. 40 und 41), insbesondere wenn diese Relais nur zur Anregung dienen, beträgt das Halteverhältnis etwa 1,1 ... 1,3 (vgl. z. B. Abb. 33). Die kleineren Werte treffen für tiefe, die größeren für hohe Stromeinstellwerte der Relais zu. Relais mit Drehankermagneten (Abb. 41) haben gewöhnlich ein kleines Halteverhältnis (1,05 ... 1,15), das bei allen Einstellwerten nahezu gleich groß bleibt (Abb. 34). Kleine Halteverhältnisse sind dann erforderlich, wenn die eingestellten Ansprechwerte der Relais nur wenig den normalen Betriebsstrom überschreiten. Anderenfalls genügen Halteverhältnisse von 1,1 ... 1,2. Eine Herabsetzung des Halteverhältnisses wird gewöhnlich auf Kosten der Schaltleistung der Relaiskontakte erreicht.

Der Verlauf der Kennlinien für die Anzugs- und Abfallwerte von Unterspannungs- und Unterscheinwiderstandsrelais (Unterimpedanzrelais) ist aus den Abb. 49 und 50 ersichtlich. Ein kleines Haltever-

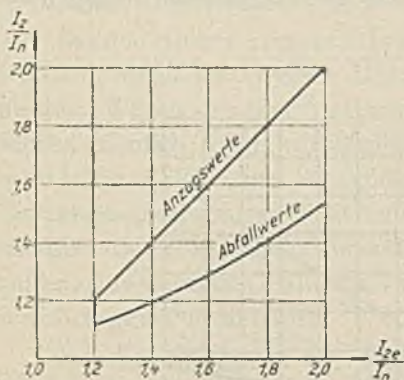


Abb. 33. Ungefäher Verlauf der Anzugs- und Abfallkennlinien eines Überstromrelais mit Klappankermagneten (Abb. 40). I_{zc} bedeutet den Einstellstrom.

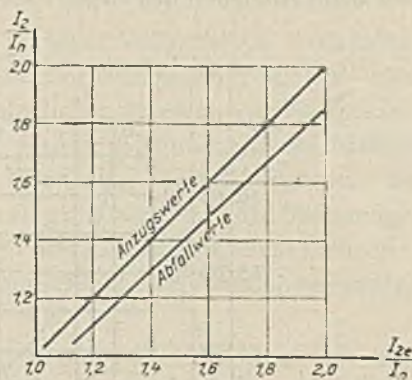


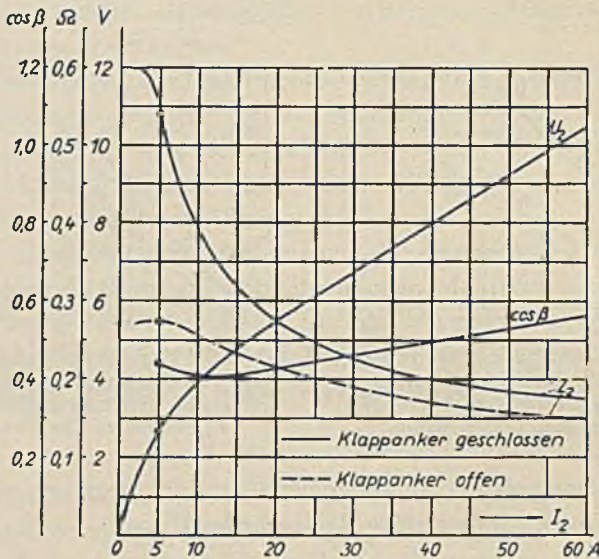
Abb. 34. Ungefäher Verlauf der Anzugs- und Abfallkennlinien eines Überstromrelais mit Drehankermagneten (Abb. 41). I_{zc} bedeutet den Einstellstrom.

hältnis wird von solchen Relais gewöhnlich dann verlangt, wenn sie zur Anregung weiterer Relais oder Relaisglieder dienen.

4. Verbrauch

Zur Beurteilung der Relais hinsichtlich ihrer Eigenschaften sowie ihrer Anwendung im Betrieb ist die Kenntnis des Verbrauchs (der Leistungsaufnahme) oft von großer Bedeutung. Unter Verbrauch eines Relais versteht man seine Leistungsaufnahme in VA bzw. W, die es bei einem bestimmten Wert der Erregergröße aufnimmt. Bei Nennerregung, d. h. bei Nennspannung oder Nennstrom, ergibt sich der Nennverbrauch. Oft wird an Stelle des Verbrauchs die sogenannte Bürde benutzt (hauptsächlich bei Relais mit Stromspulen), um damit für die Belastung der Stromwandler einen Anhalt zu bekommen. Die Bürde wird in Ohm (Scheinwiderstand) angegeben und kann durch Bildung des Quotienten U/I errechnet oder durch einen Bürdenmesser bestimmt werden. Bei den elektromagnetischen Relais (Seite 84) ist dabei zwischen der Leistungsaufnahme vor und nach dem Ansprechen zu unterscheiden; denn bei ihnen ergeben sich mit der Stellung des Ankers im angezogenen oder abgefallenen Zustand verschieden große Luftspalte und damit verschie-

dene Scheinwiderstände (vergleiche z. B. Abb. 35). Im angezogenen Zustand des Ankers ist der Scheinwiderstand größer als im nicht angezogenen (offenen) Zustand. Der Verbrauch eines Stromrelais nimmt somit beim Anziehen des Ankers zu, der eines Spannungsrelais hingegen ab.



U_2 Spannungsabfall an der Stromspule
 I_2 Stromstärke in der Stromspule
 $\cos \beta$ Phasenverschiebung zwischen U_2 und I_2
 Z_2 Scheinwiderstand der Stromspule (U_2/I_2).

Abb. 35. Kennlinien eines elektromagnetischen Überstromrelais: $Z_2 = f(I_2)$,
 $\cos \beta = f(I_2)$ und $U_2 = f(I_2)$

Ein kleiner Verbrauch der Relais ist im allgemeinen von Vorteil. Durch günstige Auslegung eines Relais kann der Verbrauch des Strom- oder Spannungspfades herabgesetzt werden. Die Kräfte oder Drehmomente müssen jedoch so gewählt sein, daß die Ansprechbarkeit, Genauigkeit, Schaltleistung oder dergleichen nicht beeinträchtigt werden.

Ein geringer Verbrauch der Stromrelais bringt den Vorteil, daß die Stromwandler weniger belastet werden, so daß diese größere Überstromziffern ergeben oder bei gleichem Preis kurzschlußfester gebaut werden können. — Mit wachsender Stromstärke wird der Blind- bzw. Scheinwiderstand der Relais mit Eisenkern infolge Verminderung der magnetischen Leitfähigkeit immer kleiner und nähert sich bei Eisensätti-

gung einem Grenzwert¹⁾). Auch dadurch wird die Überstromziffer der Wandler günstig beeinflusst, was für die Distanzrelais und die stromabhängigen Überstromzeitrelais von Bedeutung ist. Hierauf wird auf Seite 187 noch näher eingegangen.

Bei den Spannungsrelais ist ein geringer Verbrauch z. B. dann erwünscht, wenn sie in einer Distanzschutzeinrichtung im Fehlerfall mitmessen. Wegen des hier vielfach erforderlichen großen Arbeitsbereiches führen nämlich schon verhältnismäßig geringe Spannungen am Meßort in solchen Relais eine Sättigung der Eisenkerne herbei, wodurch die Leistungsaufnahme der Elektromagnete so groß wird, daß die Spannungswandler die erforderliche Genauigkeit²⁾ unter Umständen nicht mehr einhalten. Für derartige Fälle muß die Nennleistung der Spannungswandler reichlich gewählt werden.

Im allgemeinen ist zu beachten, daß die Leistungsaufnahme eines Relais sich etwa mit dem Quadrat des Stromes bzw. der Spannung ändert, sofern die Sättigung des Eisenkernes nicht erreicht ist.

5. Abhängigkeit der Relais

von der Temperatur, Frequenz, Kurvenform und von Fremdfeldern

Der Einfluß der Temperatur auf die Arbeitsweise der Relais ist im allgemeinen gering. Er kann sich jedoch bei Zeitstaffelschutzeinrichtungen (Überstromzeitrelais und Distanzrelais) störend auswirken, wenn in den einzelnen Stationen eines Netzes besonders hohe Temperaturunterschiede herrschen (30...40° C), zu denen sich weitere Temperaturunterschiede gesellen, die sich in den Relais infolge Erwärmung aus verschieden starker Vorbelastung ergeben. Dadurch können bei Relais mit Zeitwerken, Induktionsmotoren oder dergleichen Zeitfehler von mehreren Zehntelsekunden entstehen, die bei knappen Staffelzeiten (0,4...0,6 s) die Selektivität der Schutzeinrichtungen gefährden. Solche Schwierigkeiten fallen nahezu ganz fort, wenn die Zeitfehler der Verzögerungsglieder der Relais 1% je 10° C nicht überschreiten, oder wenn die Staffelzeiten des Selektivschutzes auf etwa 0,7...1,0 s heraufgesetzt werden. — Bei den Spannungsregelrelais mit enger Regelgrenze kann eine durch die

¹⁾ M. Walter, ETZ 55 (1934) Seite 483.

²⁾ M. Walter, Strom- und Spannungswandler, R. Oldenbourg, München 1937, Seite 115.

Temperatur verursachte Widerstandsänderung der Erregerwicklung die Regelgenauigkeit beeinträchtigen, wenn die Relais ohne Kompensations einrichtung ausgeführt sind.

Die Änderung der Frequenz ist in den heutigen Netzen auch bei Kurzschlüssen nicht mehr so groß, daß die richtige Arbeitsweise der Relais nennenswert gefährdet wird. Selbst ein Zeitstaffelschutz, dessen Relais eine gewisse Frequenzabhängigkeit aufweisen (Induktionsrelais oder dergleichen), wird kaum nachteilig beeinflusst, denn es wird im allgemeinen allen Relais des Netzes die gleiche veränderte Frequenz aufgedrückt. Eine Sonderstellung nehmen allerdings die Überspannungsrelais (Spannungssteigerungsrelais) ein¹⁾, beispielsweise solche für Generatoren. Diese Relais müssen frequenzunabhängig sein, da sonst ihre Ansprechwerte mit der Frequenzsteigerung wachsen und die Abschaltung in Frage stellen²⁾.

Die Kurvenform des Wechselstromes hat in der Selektivschutztechnik ebenfalls kaum einen nachteiligen Einfluß, weil alle gleichartigen Relais eines galvanisch verbundenen Netzes hinsichtlich der Kurvenverzerrung praktisch den gleichen Bedingungen ausgesetzt sind. Verzerrungen der Stromkurven, die durch die Wandler sättigung bei hohen Kurzschlußströmen verursacht werden, sind, soweit es die Betriebserfahrungen zeigen, gleichfalls von nur geringer Bedeutung. Bei Erdschlußrelais können allerdings verzerrte Kurvenformen nachteilig sein.

Fremde und eigene magnetische Felder können die Relais in ihrer Arbeitsweise gegebenenfalls schwer beeinträchtigen. Bei großen Kurzschlußströmen streuen nämlich auch die eisengeschlossenen Relaisglieder nicht unerheblich, wodurch die Ansprechwerte und Ablaufzeiten der Relais größere Abweichungen von ihren Sollwerten erfahren können. Solche Fehlerquellen ergeben sich z. B. leicht bei Verbundrelais (kombinierten Relais), bei denen die einzelnen Glieder gewöhnlich dicht beieinander sitzen. Durch Eisentrennwände, größere Abstände oder durch besondere schaltungstechnische Maßnahmen lassen sich derartige Mißstände meist beheben.

Vor der Beschreibung der einzelnen Relaisarten sollen zunächst noch einige Bestandteile und Eigenschaften, die allen Relais gemeinsam sind, besprochen werden.

¹⁾ Gilt teilweise auch für Unterspannungsrelais zum Schutze von Motoren und Einankerumformern. Die Anker bleiben bei Frequenzabsenkung leicht kleben. Die Frequenzabhängigkeit wird durch Vorschalten eines Wirkwiderstandes gemildert.

²⁾ Vgl. auch F. Fröhlich, AEG-Mitteilungen (1939) S. 177.

6. Spulen

Den Spulen kommt in der Relais-technik eine sehr wichtige Rolle zu¹⁾. Ihrer Ausführung muß man daher größte Sorgfalt widmen. Einige Anhaltspunkte hierzu seien kurz angeführt.

Jede Relaispule besteht gewöhnlich aus einem Spulenkörper und einer von ihm getragenen Wicklung (Abb. 36a).

Die Spulenkörper werden in Deutschland vorwiegend aus Preßmasse oder aus Porzellan hergestellt (Abb. 36b und c), seltener aus ge-



Abb. 36. Relaispule (a) sowie Spulenkörper aus Tenazit (b) und Porzellan (c).

klebtem Hartpapier. Preßmasse und Klebemittel der Spulenkörper müssen säurefrei sein, um eine Oxydation der Wicklung zu verhindern und um eine dauerhafte Isolation zu gewährleisten. Im Ausland benutzt man anstatt der Spulenkörper meist Bewicklungen aus Jakonettband oder son-



Abb. 37. Relaispulen mit Umwicklungen bzw. Umhüllungen (hauptsächlich ausländische Praxis).

stige Umhüllungen, z. B. aus Asphalt, Bakelit, die die Wicklung halten und gegen Erde oder gegen spannungsführende Leiter isolieren (Abb. 37).

Die Wicklungen werden aus Kupferdraht mit Baumwoll- bzw. Seidenbespinnung oder mit Lacküberzug hergestellt. Zuweilen imprägniert man sie mit Compoundmasse oder tränkt sie mit Lack, z. B. mit Bakelit-

¹⁾ Die Magnetsysteme werden im Abschnitt B auf Seite 84 und 85 besprochen.

lack; diese beiden Maßnahmen sind erforderlich für Relais, die in feuchten Räumen arbeiten sollen oder die für die Tropen bestimmt sind. Das Löten von Drähten im Innern der Spulen ist zu vermeiden. Die Wicklungsenden dürfen nur mit säurefreien Bindemitteln befestigt werden, da sonst eine elektrolytische Wirkung entsteht, die die Windungs- oder Lagenisolation zerstört und dann Windungs- bzw. Lagenschlüsse einleitet.

Bei Wicklungen, die mit Gleichstrom erregt werden, kann eine schädliche elektroosmotische Wirkung eintreten, wenn das eine Wicklungsende dauernd am Pluspol der Stromquelle angeschlossen ist. Diese Polaritätswirkung bleibt aus, wenn das eine Wicklungsende am Minuspol der Stromquelle liegt und der Pluspol lediglich beim Wirksamwerden des Relais zugeschaltet wird (siehe auch Seite 214). Hierauf muß schon in den Schaltbildern geachtet werden.

Bei den Spannungsspulen sollte der Durchmesser der Drähte nicht unter 0,1 mm betragen, da sonst Drahtunterbrechungen im Betrieb infolge mechanischer Überbeanspruchung bei Erwärmung oder durch Oxydation entstehen können.

Für Stromspulen sollte man den Leiterquerschnitt von Kupferdrähten so wählen, daß eine Stromdichte von 3 A/mm² bei Nennstrom nicht überschritten wird. Dadurch ergibt sich eine hohe Dauerbelastbarkeit der Spulen.

Bei den Stromspulen hat man noch im besonderen die thermische und dynamische Beanspruchung durch Kurzschlußströme zu beachten. Die zulässige Beanspruchung wird in den VDE-Regeln durch den thermischen Grenzstrom (I_{therm}) und den dynamischen Grenzstrom (I_{dyn}) gekennzeichnet. Die Begriffserklärungen für diese Grenzströme sind auf Seite 21 gebracht.

Die thermische Überbeanspruchung der Relaispulen führt gewöhnlich zur Zerstörung der Windungs- und Lagenisolation, gegebenenfalls auch zum Ausglühen der Drähte. Solche Schäden lassen sich durch Beachten der zulässigen Werte für den thermischen Grenzstrom leicht vermeiden. Den thermischen Grenzstrom, der auch mit Einsekundenstrom bezeichnet wird, ermittelt man in A aus der nachstehenden Beziehung zu

$$I_{therm} = 180 Q \dots \dots \dots (6)$$

Darin bedeutet Q den Querschnitt des Kupferdrahtes in mm². Der Faktor 180 gibt die höchstzulässige Stromstärke je mm² Cu während einer Se-

kunde an, bei der die Endtemperatur von 200° C nicht überschritten wird Für Aluminiumdrähte ist der Faktor 118.

Will man wissen, welche Stromstärke eine gegebene Spule bei einer anderen Kurzschlußdauer, beispielsweise bei 2 Sekunden, anstandslos aushält, so wird die Beziehung

$$I_k = \frac{I_{\text{überm}}}{\sqrt{t}} \dots \dots \dots (7)$$

benutzt. Hierin bedeutet I_k die zu bestimmende Stromstärke in A und t die vorgegebene Zeit in Sekunden. Aus dieser Beziehung kann auch die zulässige Beanspruchungszeit t bei gegebener Kurzschlußstromstärke I_k ermittelt werden.

Die dynamische Überbeanspruchung der Spulen wirkt sich in einer mechanischen Zerstörung aus: Die Wicklungsenden werden abgerissen oder die Spulenkörper zerbrochen. Zuweilen werden auch die Isolation der Wicklung sowie das Magnetsystem in Mitleidenschaft gezogen. Solche Schäden beeinträchtigen oder verhindern das richtige Arbeiten der Relais.

Bei den Sekundärrelais tritt eine derartige Gefahr infolge der Eisensättigung in den vorgeschalteten Stromwandlern verhältnismäßig selten auf. Trotzdem darf dieser Umstand bei der Planung von Schutzeinrichtungen nicht unberücksichtigt gelassen werden.

Schwieriger liegen die Verhältnisse bei den Primärauslösern und -relais, weil deren Wicklungen unmittelbar im überwachten Stromkreis liegen und die Eisensättigung der Stromwandler fortfällt. — Den dynamischen Grenzstrom eines Relais oder Auslösers ermittelt man am besten durch Versuche.

7. Kontakteinrichtungen

Eine sehr große Rolle spielen in der Relais-technik auch die Kontakteinrichtungen, die im Sprachgebrauch einfach „Kontakte“ genannt werden. Sie zählen zu den Teilen, die in den Relais erheblichen Abnutzungen unterliegen können, insbesondere ihre Schaltstücke. Als Kontaktmaterial verwendet man zumeist chemisch reines Silber¹⁾, weil dieses Metall verhältnismäßig schwer oxydiert und weil auch seine Oxydschicht noch gut leitet. Für Sonderzwecke benutzt man gelegentlich Platin, Platin-

¹⁾ Oder Silberlegierungen.

iridium oder Wolfram. Quecksilberkontakte finden in der Schutztechnik seltener Verwendung, ebenso Kontakte aus Kupfer.

Großer Wert wird bei den Kontakten gelegt auf guten Kontaktdruck, prellfreie Kontaktgabe, reichlichen Kontaktweg und schließlich auf ausreichende Abmessungen der gesamten Kontakteinrichtung entsprechend dem zu erwartenden Belastungsstrom. Diese Eigenschaften geben ein Bild von der Wertigkeit (Brauchbarkeit) eines Kontaktes. Im besonderen wird durch sie die Schaltleistung maßgeblich beeinflusst. Die Definitionen über den zulässigen Ein- und Ausschaltstrom sowie über die zulässige Schaltzahl und Schalthäufigkeit von Relaiskontakten sind auf Seite 22 gebracht.

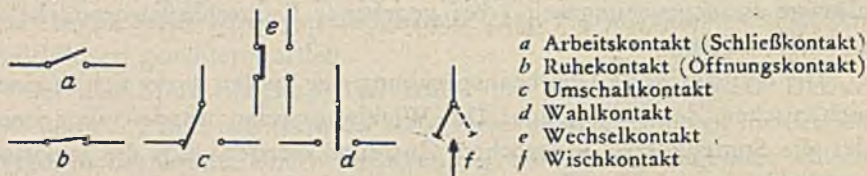
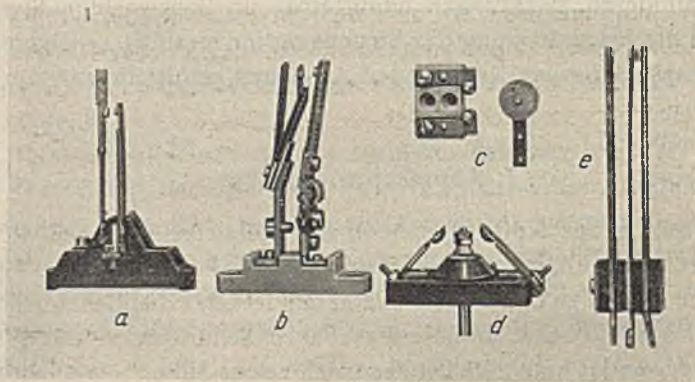


Abb. 38. Schaltzeichen der gebräuchlichsten Kontaktarten.

Die Kontakte werden nach ihrer Schaltart eingeteilt in Arbeitskontakte, Ruhekontakte, Umschaltkontakte, Wahlkontakte, Wechselkontakte und Wischkontakte. Der Arbeitskontakt ist bei unerregter oder nicht ausreichend erregter Relaispule offen, der Ruhekontakt geschlossen.



a Warzenkontakt
b Bürstenkontakt
c Tellerkontakt
d Kegelkontakt
e Warzenkontakte (Umschaltkontakt)

Abb. 39. Relaiskontakteinrichtungen in üblicher Ausführung

Der Umschaltkontakt setzt sich aus einem Arbeits- und einem Ruhekontakt mit gemeinsamer Zuführung zusammen. Ein Umschaltkontakt mit ausgeprägter Mittelstellung als Ausgangsstellung heißt Wahlkontakt. Der Wechselkontakt faßt einen Arbeits- und Ruhekontakt zu einer Kontakteinrichtung mit einem gemeinsamen Schaltstück zusammen. Der Wischkontakt wird nur kurzzeitig geschlossen, auch dann, wenn die zugehörige Spule längere Zeit erregt ist. Die einzelnen Kontakte sind in Abb. 38 in ihrer Schaltung schematisch dargestellt. Ihre genaue Definition ist auf Seite 21 gegeben.

Abb. 39 zeigt einige Kontaktausführungen. Am meisten werden die Warzenkontakte auf Blattfedern verwendet. Bürsten-, Teller- und Kegellkontakte kommen in der Relais-technik vorwiegend aus Preisgründen weniger zur Anwendung.

8. Gehäuse

Die Gehäuse von Relais werden meist in viereckiger Form ausgeführt. Als Werkstoff benutzt man vielfach Stahlblech. Seit einigen Jahren kommt in steigendem Maße auch Preßstoff zur Anwendung.

Die Grundplatten tragen die eigentlichen Relais-teile sowie die Anschlußklemmen. Die Anschlußklemmen werden für vorder- oder rückseitigen Anschluß, oder aber für beide Anschlußarten gleichzeitig ausgeführt.

Die Abdeckkappen erhalten eine möglichst große Glasscheibe, damit die Stellung und der Zustand der einzelnen Relais-teile beobachtet und das Leistungsschild mit Anschlußschema leicht gelesen werden können (Abb. 92 bis 94). Bei den größeren Relais erhalten die Kappen überdies oft aufklappbare Deckel, wodurch sich Überwachung und Bedienung besonders bequem gestalten (Abb. 92 bis 94). Zuweilen werden die Abdeckkappen auch ganz aus Glas hergestellt (Amerika).

Die Abdichtung zwischen Grundplatten, Abdeckkappen und Deckeln erfolgt gewöhnlich mit getränkten oder ungetränkten Baumwoll- oder Wollschnüren oder mit Einlagen aus schwefelfreiem Gummi. Die Dichtung muß bei den Schutzrelais in der Regel staub- und tropfwassersicher ausgeführt sein¹⁾. Zuweilen werden flut- und wasserdichte sowie schlagwettersichere Relais in der Praxis benötigt. Die Gehäuse für solche Relais stellt man aus Bronze, aus Aluminiumguß in Sonderlegierung oder aus Sonderpreßstoff her.

¹⁾ DIN-VDE 50, Kurzzeichen für Schutzarten, 1934.

Schließlich sei erwähnt, daß die Relaisgehäuse sowohl für Aufbau als auch für versenkten Einbau, in Schalttafeln hergestellt werden. Für den versenkten Einbau ist zumeist ein zusätzlicher Einbaurahmen erforderlich.

B. Grundformen von Relais

1. Strom- und Spannungsrelais

Die Strom- und Spannungsrelais weisen praktisch gleiche Bauart auf. Sie werden vorwiegend als elektromagnetische Relais mit Klappanker-, Tauchanker- oder Drehankermagnet ausgeführt und haben gewöhnlich

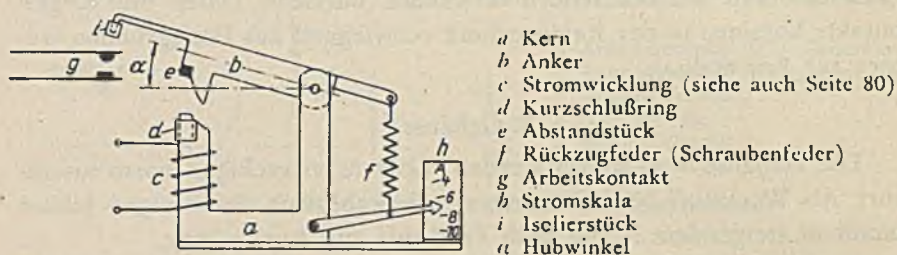


Abb. 40. Unverzögertes Überstromrelais mit Klappankermagnet

die gleichen Kontakteinrichtungen. Nur sind die Erregerspulen in dem einen Fall als Stromspulen und in dem anderen Fall als Spannungsspulen ausgelegt. Die Amperewindungszahl (AW-Zahl) ist in beiden Fällen jedoch praktisch gleich groß.

Den grundsätzlichen Aufbau eines Klappankermagnetsystems für Gleich- oder Wechselstrom zeigt Abb. 40.

Der Kern *a* und der Anker *b* werden zur Verminderung der Wärmeverluste bei Erregung mit Wechselstrom gewöhnlich aus lamelliertem Siliziumeisen hergestellt¹⁾. — Anker und Magnetschenkel erhalten am Luftspalt vielfach eine Abschrägung, damit die Luftspaltänderung während des Ankerhubs klein bleibt und mithin auch die Änderung der Zugkraft (je Wegeinheit) bzw. des Drehmomentes. — Der eine Schenkel des Kerns trägt meist eine Kupferwindung (*d*), die die Schwingungsstärke des Ankers und damit das Brummen des Relais bei Wechselstrom vermindert oder sogar beseitigt. Dieser Kurzschlußring teilt nämlich den Gesamtfluß im Luftspalt in zwei phasenverschobene Teilflüsse auf und

¹⁾ Ausgesprochene Gleichstromrelais führt man mit unlamellierten Kernen und Ankern aus.

verhindert dadurch den periodischen Nulldurchgang der magnetischen Kraft. Bei richtiger Bemessung des Kurzschlußringes und bei guter Pasung der Ankerlagerung am anderen Schenkel kann ein geräuschloses Anliegen des Ankers sogar bei $16\frac{2}{3}$ Hz erreicht werden. — Das unmagnetische Abstandsstück *e* verhindert eine unmittelbare Berührung von Anker und Schenkel, so daß die Induktion im Eisenkern und mithin die Remanenzkraft in mäßigen Grenzen gehalten werden. Dadurch wird ein

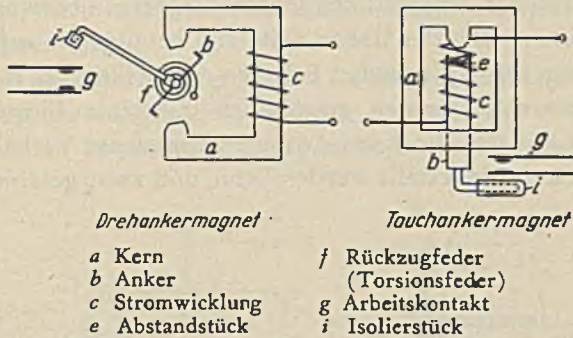


Abb. 41. Unverzögerte Überstromrelais mit Dreh- und Tauchankermagneten

„Klebenbleiben“ des Ankers beim Entregen des Elektromagneten verhindert und gleichzeitig das Halteverhältnis (siehe Seite 74) des Systems verbessert. Der verbleibende Luftspalt beträgt bei angezogenem Anker gewöhnlich 0,1...0,5 mm und ist durch das Abstandsstück *e* gegeben.

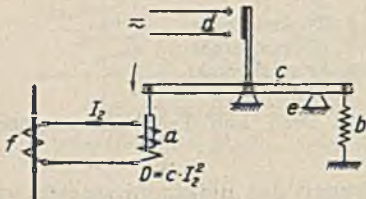
Den Aufbau der Magnetsysteme mit Dreh- und Tauchanker zeigt die Abb. 41. Der Anker *b* des Drehankermagneten wird beim Ausbleiben oder Schwächen der Erregung gewöhnlich durch eine Torsionsfeder (*f*) in die Ausgangsstellung zurückgeholt. Beim Tauchankermagneten fällt der Anker *b* durch sein Eigengewicht von selbst in die Ausgangsstellung zurück. Tauchanker- und Klappankermagnete haben im Vergleich zu den Drehankermagneten eine verhältnismäßig hohe Leistungsaufnahme (4...20 VA) und ein weniger günstiges Halteverhältnis. Dafür erfolgt ihre Kontaktgabe stets mit großem Druck und gewöhnlich schlagartig.

a) Stromrelais

Die Stromrelais werden zumeist als Überstromrelais ausgeführt. Eine Verwendung als Unterstromrelais kommt in der Praxis nur in geringem Maße vor, z. B. als Steuerrelais in selbsttätigen Anlagen.

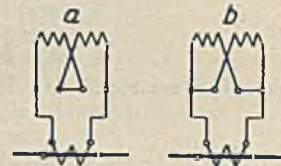
Schaltung und Wirkungsweise eines unverzögerten Überstromrelais gehen aus Abb. 42 hervor. Der Anker des Elektromagneten *a* wird beim Erreichen oder Überschreiten des eingestellten Ansprechwertes unverzögert angezogen und kehrt nach Fortfall der das Ansprechen bewirkenden Ursache ohne Verzögerung wieder in seine Ruhelage zurück. Die Wirkungsweise eines Stromrelais gleicht dabei der eines Waagebalkens, bei dem auf den einen Hebelarm ein Elektromagnet (*a*) und auf den anderen gewöhnlich eine Feder (*b*) einwirken. Wird die eingestellte Spannkraft der Feder durch die Zugkraft des Elektromagneten überwunden, so kippt der Waagebalken nach der linken Seite und betätigt die zugehörige Kontakteinrichtung, im vorliegenden Fall den Arbeitskontakt *d*.

Die Stromrelais werden gewöhnlich mit einer Einstellvorrichtung versehen, mit der der Wert des Ansprechstromes im Verhältnis 1:2 oder 1:3 an einer Skala eingestellt werden kann, und zwar geschieht dies durch



- | | |
|-----------------------|-------------------------|
| <i>a</i> Strommagnet | <i>d</i> Arbeitskontakt |
| <i>b</i> Rückzugfeder | <i>e</i> Anschlag |
| <i>c</i> Waagebalken | <i>f</i> Stromwandler |

Abb. 42. Überstromrelais
(grundsätzliche Darstellung)



- | |
|----------------------------|
| <i>a</i> Reihenschaltung |
| <i>b</i> Parallelschaltung |

Abb. 43. Reihen- und Parallelschaltung
von Relaispulen

Änderung der Federvorspannung (vergleiche Abb. 40), durch Gewichtsverstellung oder durch Anzapfen der Erregerwicklung. Unter den angegebenen Einstellmitteln hat die Anzapfung den Vorteil, daß die Leistungsaufnahme eines Relais bei jedem eingestellten Ansprechwert etwa die gleiche ist, denn die AW-Zahl bleibt unverändert. Die Anzapfung hat aber den Nachteil, daß eine stetige RelaisEinstellung wirtschaftlich nicht durchführbar ist. — Bei Relais mit zwei Erregerpulen kann man durch Reihen- oder Parallelschalten der Wicklungen den Meßbereich im Verhältnis 1:2 verändern (Abb. 43). Die größeren Stromeinstellwerte ergeben sich beim Parallelschalten der Stromspulen (*b*).

Unverzögerte Überstromrelais dienen in der Hauptsache zur Anregung weiterer Einrichtungen eines Relaissatzes bei Eintritt von Über-

lastungen und Kurzschlüssen. In Sonderfällen läßt man durch sie die Hilfsauslöser (Sekundärauslöser) von Schaltgeräten auch unmittelbar steuern.

b) Spannungsrelais

Die Spannungsrelais werden als Unterspannungs- oder Überspannungsrelais ausgeführt. Die ersten sind wirksam beim Erreichen oder Unterschreiten, die zweiten beim Erreichen oder Überschreiten des Spannungseinstellwertes.

Bei den Unterspannungsrelais ist im Normalbetrieb der Anker des Elektromagneten angezogen, da seine Erregerspule dauernd an der zu überwachenden Spannung über Spannungswandler oder unmittelbar

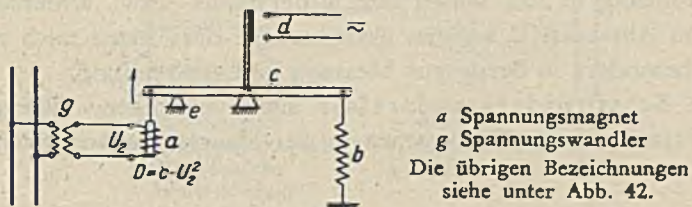


Abb. 44. Unterspannungsrelais (grundsätzliche Darstellung)

am Netz liegt (vergleiche Abb. 44). Beim Absinken der Spannung auf oder unter den eingestellten Ansprechwert — z. B. 45 ... 90% der Nennspannung — geht der Anker unverzögert zurück und betätigt die zugehörige Kontakteinrichtung. — Unterspannungsrelais läßt man teils als Anregelrelais, teils aber auch unmittelbar auf die Hilfsauslöser von Schaltgeräten arbeiten.

Die Überspannungsrelais (Spannungs-Steigerungsrelais) entsprechen in ihrer Wirkungsweise den Überstromrelais. Von einer weiteren Erörterung der Überspannungsrelais kann daher abgesehen werden, zumal sie auch verhältnismäßig selten Anwendung finden (Seite 234).

2. Widerstandsrelais

Die Widerstandsrelais teilt man nach der von ihnen zu messenden Komponente des Widerstandes eines Anlageteiles (Freileitung, Kabel, Transformator) grundsätzlich ein in:

a) Scheinwiderstandsrelais (Impedanzrelais) zur Erfassung

$$\text{von } Z = \frac{U}{I},$$

β) Blindwiderstandsrelais (Reaktanzrelais) zur Erfassung

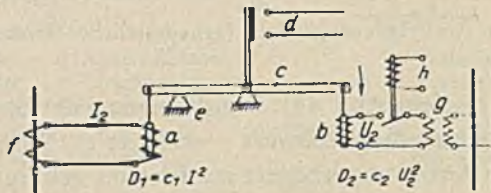
$$\text{von } X = \frac{U}{I} \cdot \sin \varphi \text{ und}$$

γ) Wirkwiderstandsrelais (Resistanzrelais) zur Erfassung

$$\text{von } R = \frac{U}{I} \cdot \cos \varphi.$$

In diesem Abschnitt sollen nur die Scheinwiderstandsrelais besprochen werden; denn sie eignen sich dank ihrer einfachen Form am besten zur Einführung in das Wesen der Widerstands- bzw. Widerstandszeitrelais. Im Abschnitt E werden übrigens alle drei Arten noch näher erläutert, besonders in bezug auf Messung und Anwendung.

Die Scheinwiderstandsrelais sind vorwiegend Waagebalkenrelais (Balancerelais). Sie bestehen in der Hauptsache aus einem Strom-



- | | | | |
|---|-----------------|---|------------------|
| a | Strommagnet | e | Anschlag |
| b | Spannungsmagnet | f | Stromwandler |
| c | Waagebalken | g | Spannungswandler |
| d | Arbeitskontakt | h | Hilfsrelais |

Abb. 45. Überimpedanzrelais (grundsätzliche Darstellung)

system und einem Spannungssystem, deren Kräfte über einen Waagebalken oder über eine Tribscheibe verglichen werden (siehe die Abb. 45 und 46). Diese Relais werden als Überimpedanzrelais oder als Unterimpedanzrelais ausgeführt.

Die Überimpedanzrelais sind wirksam beim Überschreiten des eingestellten Widerstandswertes. Ihre Spannungsspule ist im Normalbetrieb wenig oder überhaupt nicht erregt; sie wird nur im Fehlerfall durch

ein Hilfsrelais (*b*) an die Fehlerspannung gelegt (Abb. 45). -- Die Überimpedanzrelais wendet man verhältnismäßig selten an; man benutzt sie gelegentlich beim Stufen-Distanzschutz als Meßglieder, keineswegs aber als Anregeglieder. Zur Anregung eignen sie sich deswegen nicht, weil die zu überwachende Betriebsimpedanz (Seite 90) im Kurzschlußfall nicht steigt, sondern fällt. Außerdem sind sie ja im Normalbetrieb, wie bereits erwähnt, wirkungslos.

Die Unterimpedanzrelais sprechen dagegen beim Unterschreiten des eingestellten Widerstandswertes an; ihre Spannungsspule wird im störungsfreien Betrieb stets mit der vollen Spannung erregt (Abb. 46). --

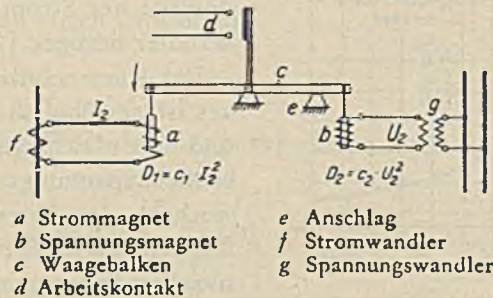


Abb. 46. Unterimpedanzrelais (grundsätzliche Darstellung)

Die Unterimpedanzrelais verwendet man hauptsächlich beim Distanzschutz, und zwar sowohl zur Anregung als auch zur Messung. Über die Messung wird im Abschnitt 124 näher berichtet. An dieser Stelle soll nur die grundsätzliche Wirkungsweise der Relais klargestellt und deren Aufgabe für Anregezwecke beschrieben werden.

Beim Unterimpedanzrelais nach Abb. 46 überwiegt im Normalbetrieb der Einfluß des Spannungsmagneten *b*, und der Waagebalken *c* ruht auf dem Anschlag *e*. Bricht die Betriebsspannung infolge einer Netzstörung auf einen niedrigeren Wert zusammen, so wird die Zugkraft des Spannungsmagneten gemindert. Hierdurch erhält die Kraft des Strommagneten *a*, die meist noch durch den Kurzschlußstrom gesteigert wird, Übergewicht. Die Folge ist, daß der Waagebalken nach links kippt und den Arbeitskontakt *d* betätigt, der beispielsweise den Erregerkreis eines nachgeordneten Verzögerungs- oder Richtungsrelais schließt.

Die Strom- und Spannungsmagnete eines Unterimpedanzrelais überwachen durch ihr Zusammenwirken eigentlich nichts anderes als das je-

weilige Verhältnis der Betriebsspannung U_{B_1} zum Betriebsstrom I_1 , d. h. die Betriebsimpedanz

$$Z_{B_1} = \frac{U_{B_1}}{I_1} \dots \dots \dots (8)$$

Nimmt man $U_{B_1} = \text{konst.}$, d. h. als Parameter an und verändert I_1 , so ergibt sich aus Gleichung (8) eine gleichseitige Hyperbel, die die Kennlinie der Betriebsimpedanz darstellt (Abb. 47). Die Kurve $Z_{B_1} = f(I_1)$ besagt, daß die Betriebsimpedanz mit zunehmendem Betriebsstrom I_1 kleiner wird. In den Abb. 48 . . 50 ist die Betriebsimpedanz ebenfalls aufgetragen, allerdings auf die Sekundärseite der Strom- und Spannungswandler bezogen [$Z_{B_2} = f(I_2)$].

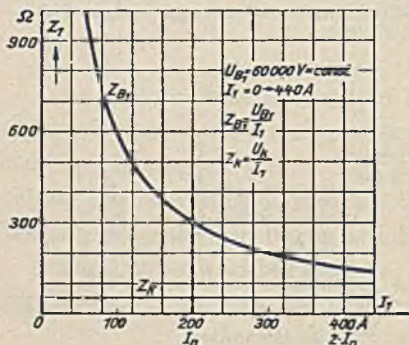


Abb. 47. Betriebsimpedanz Z_{B_1} und Kurzschlußimpedanz Z_K (für eine etwa 40 km lange Schleife: Leiter—Leiter). I_n Primärnennstrom, I_1 und Z_1 Strom und Scheinwiderstand auf der Primärseite einer Leitung.

Der Kurzschlußzustand eines Netzes ist gewöhnlich durch Überstrom und eine gleichzeitig auftretende erhebliche Spannungsabsenkung gekennzeichnet. Im Kurzschlußfall bricht folglich auch die Betriebsimpedanz Z_{B_1} meist stark zusammen, und zwar auf den Wert der Kurzschlußimpedanz Z_K , die zunächst durch die Fehlerentfernung bestimmt ist und bei sattem Kurzschluß praktisch gleich der reinen Leitungsimpedanz Z ist (siehe Abb. 47). Tritt der Kurzschluß aber über Lichtbogen oder über

Erde auf, so ist die Kurzschlußimpedanz natürlich größer als die Leitungsimpedanz allein, bezogen auf den gleichen Anlageteil, beispielsweise auf die gleiche Leitungs- oder Kabelstrecke. Nach den vorstehenden Ausführungen ist also $Z_{B_1} > Z_K \geq Z$.

Damit die Unterimpedanzrelais für Anregezwecke anormale Betriebszustände von normalen sicher unterscheiden, legt man ihre Ansprechennlinie entweder überhaupt für hohe Scheinwiderstandswerte aus (Abb. 48) oder paßt die Ansprechennlinie der Kennlinie der Betriebsimpedanz entsprechend an (Abb. 49 und 50). In der Praxis benutzt man drei verschiedene Wege, die auf Seite 92 . . 95 beschrieben werden, und die mit mehr oder weniger Erfolg zum Ziel führen.

Bei den weiteren Betrachtungen werden die auf der Sekundärseite der Strom- und Spannungswandler sich ergebenden Meßgrößen grundsätzlich mit I_2 , U_2 , Z_2 , X_2 und R_2 bezeichnet man im Gegensatz zu den Größen I_1 , U_1 , Z_1 usw., die auf der Primärseite der Wandler, also in den Anlageteilen unmittelbar, auftreten.

Ein Unterimpedanzrelais nach Abb. 46 kippt und schließt seine Kontakte, wenn das Drehmoment des Stromsystems $D_1 = c_1 \cdot I_2^2$ größer ist als das Drehmoment des Spannungssystems $D_2 = c_2 \cdot U_2^2$ zuzüglich einem im gleichen Sinne wirkenden mechanischen Drehmoment $D_m = k$

$$c_1 \cdot I_2^2 \geq c_2 \cdot U_2^2 + k$$

Hieraus erhält man durch Umstellung

$$c_2 \cdot U_2^2 \leq c_1 \cdot I_2^2 - k$$

und schließlich den Wert der Kippimpedanz zu

$$Z'_2 = \frac{U_2}{I_2} = \sqrt{\frac{c_1}{c_2} - \frac{k}{c_2 \cdot I_2^2}} \dots \dots \dots (9)$$

Z'_2 ist derjenige Impedanzwert, bei dem das Waagebalkensystem sich im Gleichgewicht befindet oder gerade kippen kann. c_1 und c_2 sind Relaiskonstanten.

Das Glied $\frac{k}{c_2 \cdot I_2^2}$ bewirkt im wesentlichen, daß das Waagebalkensystem nicht bei $I_2 = 0$, sondern erst bei $I_2 > 0$ anspricht, und daß die Ansprechennlinie mit einer gewissen Krümmung anfängt (siehe Abb. 48 und 50). Das Vormoment $D_m = k$ wird erzielt durch Aufsetzen eines Gewichts oder durch Anbringen einer Zugfeder auf der Spannungsseite des Waagebalkens. Die Folge ist, daß das Drehmoment der Spannungsspule verstärkt wird, so daß zum Kippen des Relais ein größeres Drehmoment auf der Stromseite durch Erhöhen des Mindestarbeitsstromes I_2 entgegengesetzt werden muß.

Wenn das mechanische Drehmoment D_m vernachlässigbar klein ist ($k \approx 0$), so ergibt sich ein fester Wert der Kippimpedanz zu

$$Z'_2 = \sqrt{\frac{c_1}{c_2}} \dots \dots \dots (10)$$

Ändert man die Relaiskonstanten c_1 und c_2 in den Gleichungen (9 und 10), so spricht das Waagebalkenrelais jeweils bei anderen Werten von Z'_2 an, d. h. das Relais arbeitet dann mit verschiedenen Ansprech- bzw. Kippimpedanzwerten.

Die Einstellung des erforderlichen Kipp- oder Ansprechwertes Z'_2 wird hauptsächlich durch Änderung der Ampèrewindungszahl am Strom- oder Spannungsmagneten vorgenommen. Am Strommagneten verstellt man dabei die Anrege­stromstärke durch Nebenwiderstände oder durch Anzapfen der Wicklungen. Am Spannungsmagneten oder im Spannungskreis ändert man die An­spannung durch Anwendung von Vorwiderständen oder anzapfbaren Spannungswandlern oder aber auch durch Anzapfen der Spannungsspule. Zum gleichen Ziel führt gegebenenfalls das Verstellen des Luftspaltes der Elektromagnete oder das Schwenken bzw. Verstellen der Triebkerne bei Induktionssystemen.

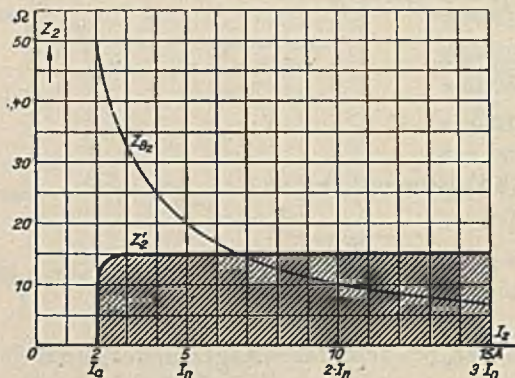


Abb. 48. Grundsätzlicher Verlauf der Ansprech­kennlinie Z'_2 eines Unterimpedanzrelais nach Abb. 46. Den Kurven liegen die Wandler-Nenn­Übersetzungen 60000/100 V und 200/5 A zu­grunde. I_a kleinster Ansprechstrom.

Wert des kleinsten Ansprechstromes I_a begrenzt und bleibt dann für alle Ströme über I_a nahezu konstant. Solche stromunabhängigen Ansprech­kennlinien haben allgemein den Nachteil, daß sie die Kennlinie der Be­triebsimpedanz Z_{B_2} bereits bei verhältnismäßig kleinen Stromstärken schneiden; die Anregerelais sprechen also schon bei kleinen betriebsmäßi­gen Überlastungen der Anlageteile trotz voller Netzspannung an. Will man die Anregung bei voller Betriebsspannung erst beim zweifachen Nennstrom zulassen, wie dies z. B. bei Doppelleitungen oft erforderlich ist, so muß die Kippimpedanz Z'_2 vermindert werden; im Beispiel der Abb. 48 von 15 Ω auf 10 Ohm. Durch eine solche Maßnahme kann aber die Anregung bei hohen Kurzschluß-Impedanzwerten, wie solche z. B. bei Lichtbogen- oder Erdkurzschlüssen vorkommen, unter Umständen un-

sicher werden¹⁾. — Die schraffierte Fläche der Abbildung 48 stellt demnach den Arbeitsbereich des Anregerrelais dar. I_a ist hierbei, wie bereits erwähnt, der kleinste Stromwert, bei dem ein Ansprechen des Relais bei gegebener Einstellung gerade noch erfolgt.

Schaltet man die Kontakte von einem Stromrelais (m) und einem Spannungsrelais (n) gemäß Abb. 49 in Reihe, so ergibt sich eine strom-

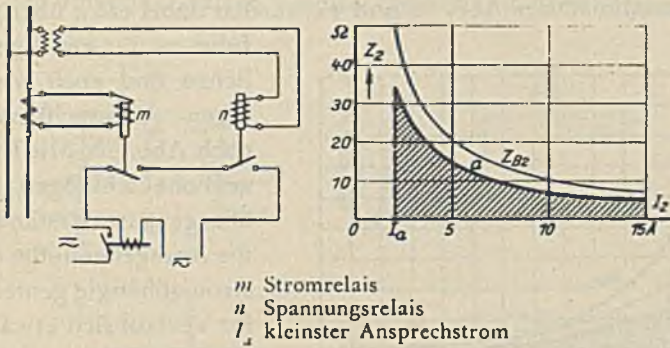


Abb. 49. Grundschaltung von Strom- und Spannungsrelais zur Erzielung einer stromabhängigen Ansprechkenlinie nach a .

abhängige Anregekennlinie entsprechend a im rechten Bild. Das Stromrelais spricht hier bei 2 A und das Spannungsrelais bei etwa 70% der Nennspannung an^2). Die Ansprechkenlinie (Hyperbel) a schmiegt sich an die Kennlinie der Betriebsimpedanz Z_B , mit einem gewissen Abstand an, ohne diese an irgendeiner Stelle zu überschneiden. Die Relaiskupplung gemäß Abb. 49 kann ihren Steuerkreis nur schließen, wenn bei Kurzschlüssen die Netzspannung unter 70% der Nennspannung sinkt. Sie ist daher für Netze, bei denen am Einbauort der Relais Kurzschlußspannung-

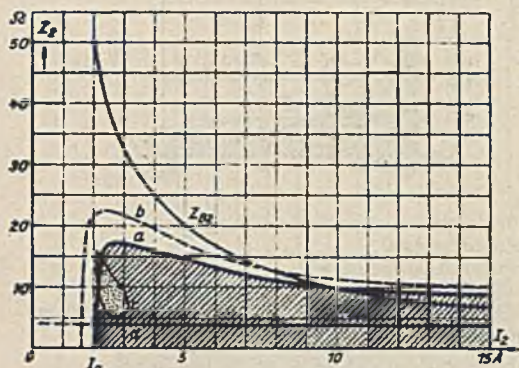
¹⁾ Den Kipp-Impedanzwert von $Z'_2 = 15$ Ohm hat z. B. eine 60 kV-Freileitung mit einer Länge von etwa 180 km, mit Leiterquerschnitten von 70 mm² Al und mit Wandler-Nennübersetzungen von 60000/100 V und 200/5 A (siehe Seite 123). Da die Entfernungen von Station zu Station bei 60 kV-Betriebsspannung bis 60 km betragen, so würden die Anregerrelais mit $Z'_2 = 15$ Ohm bei satten Kurzschlüssen mit einer Reichweite von drei Stationen noch sicher ansprechen. Bei Kurzschlüssen über Lichtbogen oder Erde kann sich dagegen die Reichweite infolge der zusätzlichen Widerstände an den Fehlerstellen stark vermindern.

²⁾ Die Ansprechspannung wird deshalb so tief gewählt, weil sonst das Spannungsrelais auch bei betriebsmäßiger Überlastung infolge einer Spannungsabsenkung ansprechen würde.

gen von über 70% der Nennspannung auftreten können, gänzlich ungeeignet. Kurzschlußspannungen solcher Höhe treten beispielsweise auf in Netzen mit großen Kurzschlußleistungen und erheblichen Leitungsimpedanzen. Bei Kurzschlüssen über Erde kann die Kurzschlußspannung ebenfalls sehr hoch ausfallen, insbesondere wenn die Erdübergangswiderstände (Erdausbreitungswiderstände) sehr groß sind (siehe Seite 43).

Eine Kopplung der beschriebenen zwei Verfahren miteinander — die Ansprechkennlinien der Abb. 48 und 49 werden dabei etwa überlagert —

führt zu der meist gebräuchlichen und auch zweckmäßigen Ansprechkennlinie *a* nach Abb. 50. Mit Rücksicht auf hohe Lichtbogen- und Erdübergangswiderstände wird die Anregekennlinie *a* derart stromabhängig gemacht, daß ihr Verlauf sich etwa bis zum doppelten Nennstrom dem der Betriebsimpedanz Z_{B_2} anpaßt. Bei höheren Strömen schneiden sich die beiden Kennlinien, wodurch auch bei unzulässiger Betriebsüberlastung eine Auslösung gewährleistet wird. Anregerelais mit solchen Kennlinien kippen praktisch bei allen Kurzschlüssen, also auch bei solchen



- a* Ansprechkennlinie (Abfallkennlinie)
- b* Rückgangskennlinie (Anzugskennlinie)
- c* Gebiet der Lichtbogenwiderstände
- d* Scheinwiderstand einer Leitungsstrecke
- I_0 kleinster Ansprechstrom
- Z_{B_2} Betriebsimpedanz (sekundärseitig)

Abb. 50. Grundsätzlicher Verlauf der Ansprech- und Rückgangskennlinien von Unterimpedanzrelais nach Abb. 51.

mit kleinen Strömen, und darüber hinaus auch bei Betriebsüberlastungen mit größeren Strömen.

Relaistechnisch wird die Ansprechkennlinie *a* dadurch erreicht, daß entweder der Kern des Strommagneten über eine Feder (1) mit dem Waagebalken verbunden wird (Abb. 51a) oder daß der Kern aus hochpermeablem Werkstoff hergestellt (2) und nach unten verjüngt wird (Abb. 51b); ferner dadurch, daß parallel zur Spule des Strommagneten eine Eisendrossel (3) geschaltet wird (Abb. 51c), oder aber daß ein Eisenkern mit Streublechen (4) auf der Stromseite des Waagebalkensystems angeordnet wird, der nur magnetisch mit dem eisenarmierten Waagebalken-

ende verbunden ist (Abb. 51d). Die nähere Beschreibung solcher Anregerelais ist im Schrifttum gegeben!).

Die schraffierte Fläche in Abb. 50 stellt den Ansprechbereich des Anregerelais dar. Durch Anzapfen der Spannungsspulen oder durch Ändern der Federkraft, durch Verstellen der Drossel oder des Sättigungskernes kann die Anregekennlinie a gegenüber der Kennlinie der Betriebsimpedanz Z_{B_2} in weiten Grenzen verschoben werden. Die Kennlinie b gibt an, bei welchen Impedanzwerten das Anregerelais in Abhängigkeit von der

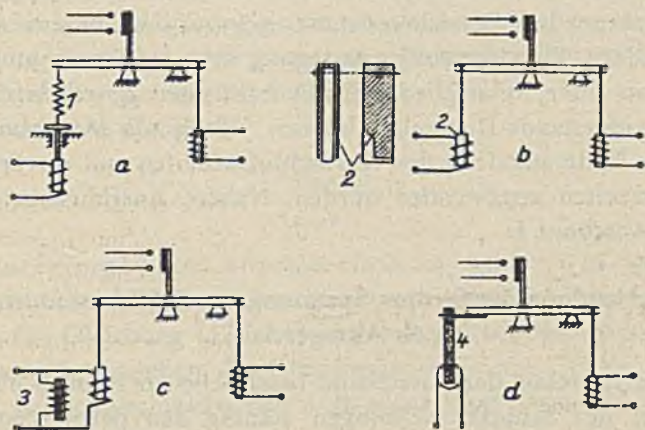


Abb. 51. Ausführungsformen von Unterimpedanz-Anregerelais zur Erzielung der Ansprech- und Rückgangskennlinien nach Abb. 50.

Stromstärke in seine Ruhelage zurückkehrt. Diese Kennlinie heißt Rückgangskennlinie. Die Fläche c entspricht ungefähr dem Gebiet der Lichtbogenwiderstände. Die Gerade d kennzeichnet den Scheinwiderstand einer Leitungsstrecke von etwa 50 km.

Das Verhalten der Unterimpedanz-Anregerelais kann auch durch Kennlinien $I_2 = f(U_2)$ oder $U_2 = f(I_2)$ dargestellt werden.

Die Spannungsspulen der Unterimpedanz-Anregerelais werden zu meist an die Dreiecksspannung angeschlossen. Seltener benutzt man die Sternspannung. In diesem Falle werden die Spannungsspulen bei Netzen mit nicht kurz geerdetem Sternpunkt zu einem System in Stern geschaltet, dessen Nullpunkt mit dem Sternpunkt des Spannungswandlersatzes nicht

¹⁾ M. Schleicher, Die moderne Selektivschutztechnik, J. Springer, Berlin 1936, S. 190; M. Walter, Der Selektivschutz nach dem Widerstandsprinzip, R. Oldenbourg, München 1933, S. 23.

verbunden werden darf, da sonst ein Ansprechen der Relais auch bei Erdschlüssen im Netz stattfinden würde.

Wird bei einem Widerstands-Kipprelais (vergleiche z. B. Abb. 46) auf der Spannungsseite an Stelle von U^2 die Blindleistung $U_2 I_2 \sin \varphi$ oder die Wirkleistung $U_2 I_2 \cos \varphi$ zur Erzeugung des Drehmomentes benutzt, so ergeben sich Wirk- bzw. Blindwiderstands-Kipprelais, die ihren Kontakt in Abhängigkeit vom Blind- oder Wirkwiderstand des Anlage- oder Netztes betätigen. Für Anregezwewecke können derartige Widerstandsrelais nicht verwendet werden, weil die zu überwachenden Betriebsgrößen (Betriebsreaktanz und Betriebsresistanz) sich mit der Phasenverschiebung im Netz ändern. Eine eindeutige Anregung weiterer Einrichtungen durch solche Relais oder Relaisglieder ist deshalb nicht gewährleistet. Blind- und Wirkwiderstands-Kipprelais können jedoch als Meßrelais zur Erfassung der Widerstände in den Kurzschlußschleifen und zur Bestimmung der Auslösezeiten angewendet werden. Nähere Ausführungen hierüber folgen im Abschnitt E.

3. Anwendung der Strom-, Spannungs- und Widerstandsrelais als Anregerelais

Die Anregerelais der vorstehend beschriebenen Formen überwachen im Rahmen der Schutzeinrichtungen ständig den Betriebszustand der Netze, stellen das Auftreten von Fehlern fest und kennzeichnen gewöhnlich auch die Art der Fehler. Von ihrem Arbeiten sind die weiteren Relais eines Relaissatzes abhängig, z. B. die Verzögerungsrelais, Richtungsrelais und dergleichen. Der richtigen Auswahl der Anregerelais ist daher eine sehr große Bedeutung beizumessen. Um eine richtige Auswahl treffen zu können, müssen in erster Linie die Netzverhältnisse, insbesondere der größte Betriebsstrom $I_{B \max}$ und der kleinste Kurzschlußstrom $I_{K \min}$ in den zu schützenden Anlageteilen bekannt sein. Die Werte von $I_{B \max}$ werden gewöhnlich von der Betriebsleitung des betreffenden Werkes genannt. Der kleinste Kurzschlußstrom wird unter Voraussetzung des kleinsten Maschineneinsatzes (Schwachlastbetrieb an Sonn- und Feiertagen sowie nachts) für die Stellen des Netzes ermittelt, die die größten Impedanzwerte bis zur Stromquelle aufweisen.

Ist in den Anlageteilen eines Netzes das Verhältnis

$$\frac{I_{K \min}}{I_{B \max}} > 1, \dots \dots \dots (11)$$

so wird man Überstrom-Anregegliedern den Vorzug gegenüber Unterimpedanz- und Unterspannungs-Anregegliedern geben, da sie sehr einfach aufgebaut sind und auch bei betriebsmäßiger Überlastung je nach ihrer Stromeinstellung ansprechen und damit die nachgeordneten Relais des gleichen Relaissatzes in Tätigkeit setzen.

In Kabel- und Freileitungsnetzen von 1...30 kV sind die Kurzschlußströme fast immer größer als der höchste Betriebsstrom, so daß hier die Überstrom-Anregerelais durchaus am Platze sind. Den Überstrom-Anregerelais wird man in Kabelnetzen auch aus Gründen der thermischen Sicherheit den Vorzug geben, da sie in Verbindung mit Verzögerungsgliedern die Kabel auch gegen unzulässige Erwärmung bei zu großen Betriebsströmen schlechthin schützen.

Ist jedoch das Verhältnis

$$\frac{I_{K \min}}{I_{B \max}} < 1, \dots \dots \dots (12)$$

so sind Unterimpedanz-Anregerelais zu wählen. (In Sonderfällen können auch Unterspannungs-Anregerelais angewendet werden.) Die Bedingungen für Gleichung (12) sind in der Regel bei Netzen über 50 kV-Betriebsspannung gegeben. In Höchstspannungsnetzen (110...400 kV) kann $I_{K \min}$ bei Schwachlastbetrieb z. B. sogar Werte von 25 bis 50% des Nennstromes annehmen.

Anregerelais der in 1) und 2) beschriebenen Art verwendet man beim Distanzschutz (siehe Seite 124), beim Überstrom- und Unterspannungszeitschutz, beim Vergleichsschutz usw. Die Steuerung weiterer Glieder oder Relais einer Schutzeinrichtung durch die Anregerelais braucht nicht unbedingt elektrisch herbeigeführt zu werden. Sie kann auch auf mechanischem Wege durchgeführt werden, beispielsweise durch Entklinken einer Sperreinrichtung oder durch Spannen einer Anwurfsfeder. Wichtig ist nur, daß die Anregung raschest erfolgt, d. h. daß die Eigenzeit der Anregerelais sehr klein ist. Abb. 52 zeigt den ungefähren Verlauf der Ansprechzeiten eines Überstrom-Anregerelais für 5 A Nennstrom in

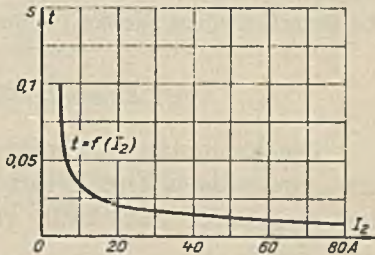


Abb. 52. Ansprechzeit (Eigenzeit) von unverzögerten Überstromrelais in Abhängigkeit von der Stromstärke.

Abhängigkeit von der Stromstärke. Danach beträgt die Anregezeit bei kleinen Stromstärken mehrere Halbwellen, bei großen dagegen nur eine Halbwelle, bezogen auf 50 Hz.

In den Abschnitten über Überstromzeitrelais und Distanzrelais wird das Zusammenarbeiten der Anregerrelais mit den übrigen Relais oder Relaisgliedern der Schutzeinrichtungen an Hand mehrerer Schaltungen näher herausgestellt.

4. Zeitrelais

Zeitrelais sind Einrichtungen, die im wesentlichen zur verzögerten Weitergabe von Schaltimpulsen dienen. Sie werden in der Schutz- und Steuertechnik als Hilfsrelais oder Hilfsglieder in großem Ausmaße benutzt und je nach dem Aufgabengebiet in verschiedener Form ausgeführt¹⁾. So unterscheidet man Zeitrelais für mäßige und hohe Zeitgenauigkeit, für kleine und große Schalthäufigkeit, für kurze oder lange Auslösezeiten, für Anzugs- oder Abfallverzögerung.

In der Selektivschutztechnik verwendet man vorwiegend Zeitrelais mit großer Zeitgenauigkeit und womöglich mit Schleppeizern. Solche Relais bzw. Relaisglieder sind auf Seite 110 beschrieben.

5. Richtungsrelais

Richtungsrelais sind Relais, die die Leistungsrichtung bzw. Stromrichtung im zu überwachenden Anlageteil feststellen und weitere Einrichtungen betätigen oder steuern. Sie werden hauptsächlich zum Überwachen der Leistungsrichtung in Störungsfällen angewendet, z. B. bei Kurzschluß, Doppelerdschluß, Erdschluß²⁾ und dergleichen. Zuweilen benutzt man die Richtungsrelais auch zum Feststellen der Leistungsumkehr im ungestörten Betrieb, beispielsweise in Kuppelleitungen beim Leistungsaustausch zweier Werke (Seite 104).

a) Richtungsrelais für Drehstromnetze³⁾

Die Richtungsrelais werden je nach der anzuwendenden Schaltung ein-, zwei- oder dreipolig zum Anschluß an Strom- und Spannungswandler ausgeführt, und zwar vorwiegend als elektrodynamische Relais

¹⁾ Ausführlicher siehe in M. Schleicher, Die moderne Selektivschutztechnik, J. Springer, Berlin 1930, S. 177—184.

²⁾ Hierüber siehe Abschnitt H auf Seite 169.

³⁾ Für Einphasennetze gelten sinngemäß die gleichen Betrachtungen.

(Abb. 53) oder als Induktionsrelais (Abb. 54). Man benutzt sie teils als selbständige Schutzrelais, teils als Bestandteile einer Schutzeinrichtung. Die Richtungsrelais haben festzustellen, ob die Leistung im Fehlerfall über die von ihnen zu überwachenden Anlageteile in die betreffende Sta-

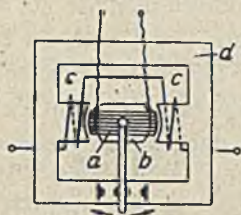
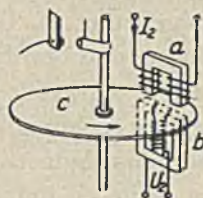


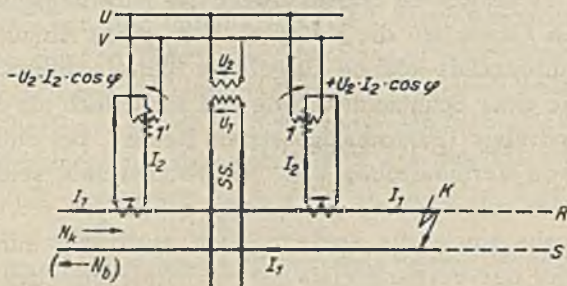
Abb. 53. Eisengeschlossenes elektrodynamisches Richtungsrelais. Das Spannungsrähmchen *a* ist um den Eisenkern *b* beweglich angeordnet. Die Stromspulen *c* sind am lamellierten Eisenkern *d* starr befestigt.



a Stromtriebhorn
b Spannungtriebhorn
c Ferrarisscheibe

Abb. 54. Richtungsrelais nach dem Induktionsverfahren.

tion (Knotenpunkt) hineinfließt oder aus ihr herausfließt (vgl. die Abb. 68, 70 und 78). Diese Unterscheidung der Leistungsrichtung stellt ein wichtiges Mittel für den selektiven Schutz solcher Anlageteile dar, die im Fehlerfall von zwei oder mehreren Seiten gespeist werden können.



- I* und *I'* Richtungsrelais
- N_b* Richtung der Betriebsleistung vor Eintritt des Kurzschlusses
- N_k* Richtung der Fehlerleistung während des Kurzschlusses
- K* Kurzschlußstelle
- † Freigabe der Auslösung
- Sperrung der Auslösung
- SS. Sammelschienen

Abb. 55. Schematische Darstellung der Schaltung von Richtungsrelais für einen Knotenpunkt (Station)

In Abb. 55 sind im Prinzip die Wirkungsweise und Schaltung der Richtungsrelais für eine Durchgangsstation eines Ringnetzes dargestellt. Im ungestörten Betrieb möge die Leistung N_b von rechts nach links fließen. Tritt nun an der Stelle K ein satter Kurzschluß zwischen den Leitern R und S der angenommenen Ringleitung auf, so ändert der Leistungsfluß plötzlich seine Richtung auf die Kurzschlußstelle zu, wie dies im Bild angedeutet ist. Gleichzeitig ändert auch der Strom im Leiter R seine Richtung und bewirkt zusammen mit der Sammelschienenspannung, die hier als Bezugsgröße gilt, an den Richtungsrelais Ausschläge in entgegengesetzter Richtung¹⁾. Das Relais 1 erhält dabei einen positiven Ausschlag und kann dadurch, je nach der Schaltung, entweder die Kontaktbetätigung weiterer Relais des zugehörigen Relaissatzes freigeben oder die Auslösung des Schalters unmittelbar veranlassen. Das Relais $1'$ führt dagegen eine Sperrung der genannten Einrichtungen aus.

Würde an Stelle des Kurzschlusses K auf der rechten Seite der Station ein solcher auf der linken Seite entstehen, so würde nunmehr das Relais $1'$ die Auslösung freigeben und das Relais 1 sperren.

Die Richtungsrelais einer Station (eines Knotenpunktes) werden grundsätzlich so geschaltet, daß nur diejenigen die Auslösung bei Kurzschluß oder Doppelerdschluß freigeben, über die die Fehlerenergie von den Sammelschienen fortfließt. Richtungsrelais, über welche die Fehlerenergie nach den Sammelschienen hinfließt, sollen die Auslösung verhindern; in Abb. 79 schiebt zu diesem Zweck das Richtungsglied c z. B. ein Isolierblättchen f zwischen die Kontakthälften g des Ablaufgliedes b .

Die Richtungsrelais können ausgeführt sein als selbständige Relais, als Bestandteile einer Schutzeinrichtung und schließlich als einzelne Glieder in Verbundrelais (zusammengesetzten Relais). Bei einigen Ausführungsformen von Verbundrelais, z. B. bei Distanzrelais, sind die Ablauf- bzw. Meßglieder selbst richtungsabhängig gebaut²⁾.

Die Freigabe sowie die Sperrung der Auslösung kann durch die Richtungsglieder der Verbundrelais auf mechanischem oder elektrischem Wege erfolgen. Die elektrische Steuerung geschieht gewöhnlich mit Hilfe von Zwischenrelais (womöglich mit Selbsthaltung), da eine unmittelbare Steuerung durch die Richtungsglieder (gilt auch für Richtungsrelais!)

¹⁾ Die Spannungsspulen der Relais 1 und $1'$ werden nämlich vom Strom, der von der Sammelschienenspannung getrieben wird, in allen Fällen in der gleichen Richtung durchflossen.

²⁾ Kneller und Lesch, BBC-Nachrichten 17 (1930) S. 181; J. Biermanns, ETZ 46 (1925) S. 909 und E. und M. 43 (1925) S. 369.

bei satten Kurzschlüssen in der Nähe der Sammelschienen infolge der geringen Drehmomente unter Umständen unsicher werden kann.

Damit die Richtungsrelais oder Richtungsglieder auch dann einwandfrei arbeiten, wenn die ihnen zugeführte Leistung gering ist, wählt man die Schaltung der Richtungsrelais stets so, daß die Wirkung ihrer Strom- und Spannungsspulen aufeinander bei allen Fehlerarten im Netz möglichst groß ist. Es kommt dabei gar nicht auf eine saubere Messung der Fehlerenergie an, sondern lediglich auf die Feststellung ihres Vorzeichens, wobei ein möglichst starkes Drehmoment erzielt werden soll. Dies muß manchmal unter Zuhilfenahme einer Spannung erreicht werden, die vom Kurzschluß wenig oder überhaupt nicht betroffen ist (eine „impedanzfremde“¹⁾ Spannung!). Die Auslösung soll grundsätzlich nur dann gesperrt werden, wenn das Richtungsglied eindeutig in Sperrichtung ausschlägt.

Bei Zwei- oder Dreirelaischaltungen benutzt man vielfach die 30°- oder 60°-Schaltung²⁾. Für Einrelaisschaltungen (Sparschaltungen für ein ganzes Drehstromende) wird gewöhnlich die 0°-Schaltung³⁾ bevorzugt (vgl. Abb. 87). Die Sparschaltungen zeichnen sich dadurch aus, daß die zugehörigen Richtungsrelais oder Richtungsglieder bei zwei- oder dreipoligen Kurzschlüssen sowie bei Doppelerdschlüssen etwa mit dem natürlichen Phasenwinkel (Impedanzwinkel) der Anlagenteile arbeiten⁴⁾.

Das Drehmoment der Richtungsrelais kann fernerhin dadurch wirksam gesteigert werden, daß die Spannungsspulen sehr reichlich in ihrer AW-Zahl bemessen und nur im Fehlerfall durch besondere Anregerrelais an Spannung gelegt werden. Die Spannungsspulen können daher wegen der nur kurzzeitigen Belastung sozusagen thermisch unterdimensioniert, d. h. stark überlastet werden. Durch diese Maßnahme ergeben sich ausreichende Drehmomente der Relais auch bei den kleinsten Spannungen im Kurzschluß, und zwar auch bei den kleinsten Kurzschlußströmen, verbunden mit großen Phasenwinkeln.

Die Eigenschaften der Richtungsrelais oder Richtungsglieder bewertet man hauptsächlich nach ihrer Richtungsempfindlichkeit (An-

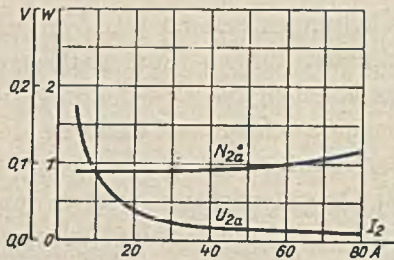
¹⁾ Darunter versteht man eine Spannung des Drehstromsystems, die den Scheinwiderstand der Kurzschlußschleife nicht bestimmt, d. h. den Kurzschlußstrom nicht treibt.

²⁾ M. Walter, ETZ 53 (1932) S. 476; J. Sorge, Siemens-Z. 7 (1927) S. 785.

³⁾ G. Stark, AEG-Mitt. (1940) S. 111.

⁴⁾ M. Schleicher, Die moderne Selektivschutztechnik, J. Springer, Berlin 1936, S. 96—122; M. Walter, Der Selektivschutz nach dem Widerstandsprinzip, R. Oldenbourg, München 1933, S. 36—45.

sprechempfindlichkeit). Darunter versteht man die zugeführte Mindestleistung als Wirk- oder Blindleistung, bei der die Richtungsrelais noch einwandfrei ansprechen und die erforderliche Sperrung oder Freigabe mit Sicherheit ausführen. Die Richtungsempfindlichkeit wird entweder durch die Mindestleistung in VA ($\cos \varphi = 1$) bzw. in W oder durch die kleinsten Spannungswerte in Volt gekennzeichnet, die zum Wirksamwerden der Relais bei einer bestimmten Stromstärke notwendig sind. Zur genauen Beurteilung der Richtungsempfindlichkeit der Relais empfiehlt es sich, die entsprechenden Kennlinien gemäß den Abb. 56 und 57 heranzuziehen. Wenn diese fehlen, dann muß zum mindesten angegeben sein, auf welche Stromstärke sich die in W genannte Richtungsempfindlichkeit bezieht. Werden Spannungswerte genannt, so sind Stromstärke und Phasenwinkel mit anzugeben.



U_{2a} Ansprechspannung
 N_{2a} Ansprechleistung

Abb. 56. Kennlinien der Ansprechempfindlichkeit von Richtungsrelais $U_2 = f(I_2)$ und $N_2 = f(I_2)$ bei $\cos \varphi = 1$

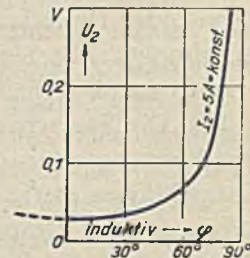


Abb. 57. Kennlinie der Ansprechempfindlichkeit von Richtungsrelais $U_2 = f(\varphi)$ bei $I_2 = 5$ A.

Die Kurve N_{2a} der Abb. 56 zeigt, daß mit zunehmender Stromstärke eine größere Mindestleistung für die Sperrung der Auslösung erforderlich ist. Diese Erscheinung ist durch den sogenannten Rähmchen-Effekt bedingt, der von der gegenseitigen Induktion zwischen den Strom- und Spannungsspulen herrührt. Durch Hilfsmaßnahmen kann die Stromabhängigkeit mehr oder minder geschwächt werden. Bei eisengeschlossenen Richtungsrelais kann eine Stromabhängigkeit auch durch die Eisensättigung auftreten. — Die Kurve U_{2a} besagt, daß die zur einwandfreien Sperrung der Auslösung erforderliche Mindestspannung mit zunehmendem Strom abnimmt.

Die Abb. 57 zeigt die Richtungsempfindlichkeit des gleichen Relais als Kurve $U_2 = f(\varphi)$, die auf die Stromstärke von 5 A bezogen ist. Bei größeren Stromstärken ergeben sich zu dieser Kurve fast parallele Kurven mit entsprechend kleineren Spannungswerten.

Die Richtungsempfindlichkeit der heutigen Richtungsrelais kann nach den gewonnenen Erfahrungen als vollkommen ausreichend bezeichnet werden. Die sogenannten „toten Zonen“, mit denen man es früher zu tun hatte, können daher als überholt abgetan werden¹⁾; bleiben doch auch bei den satten Kurzschlüssen in unmittelbarer Nähe einer Station genügend Übergangswiderstände, die zusammen mit dem Strom eine ausreichende Spannung für die Richtungsrelais ergeben. Überdies hat man durch Versuche festgestellt, daß selbst bei metallischen Kurzschlüssen ein Spannungsabfall zwischen den Elektroden von mindestens 200 bis 300 V auftritt (s. auch Seite 42).

Von den meisten Richtungsrelais, insbesondere von denen, die im Vergleichschutz oder beim Schnelldistanzschutz verwendet werden, verlangt man sehr kurze Ansprechzeiten. In Abb. 58 sind derartige Ansprechzeiten als Kurve $t = f(N_2)$ dargestellt. Sehr kurze Ansprechzeiten sollen nach Möglichkeit auch bei den ungünstigsten Arbeitsverhältnissen eingehalten werden, nämlich bei metallischen Kurzschlüssen in der Nähe der Sammelschienen, selbst dann, wenn der Phasenwinkel sehr groß und der Kurzschlußstrom verhältnismäßig klein ist. Für derartige Bedingungen eignen sich am besten elektrodynamische Relais. Durch schaltungstechnische Maßnahmen kann die Ansprechzeit dieser Relais sogar auf eine Halbwelle bei 50 Hz herabgedrückt werden (Ruhestromschaltungen im Kontakt-Stromkreis!). Induktionsrelais in üblicher Ausführung sind dagegen zu träge. Diese werden vorwiegend als Erdschlußrichtungsrelais (S. 169) oder als Richtungsrelais für Maschennetzschalter verwendet, bei denen rasches Arbeiten nicht unbedingt erforderlich ist.

Richtungsrelais bzw. Verbundrelais mit Richtungsgliedern verwendet man in der Hauptsache zum Schutze von Mehrfachleitungen und ver-

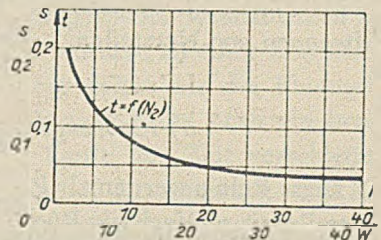


Abb. 58. Kennlinie der Ansprechzeit von Richtungsrelais $t = f(N_2)$.

¹⁾ Vgl. auch M. Walter, ETZ 53 (1932) S. 476.

maschten Netzen sowie von allen Netzgebilden, die von zwei oder mehreren Seiten gespeist werden können (s. Seite 253). Die Anwendung von „Rückleistungsrelais“ zum Schutze von Generatoren gegen die Auswirkungen von Kurzschlüssen hat sich als nachteilig herausgestellt, weil bei Schwebungsvorgängen ungewollte Auslösungen herbeigeführt werden.

Außer den hier beschriebenen üblichen Richtungsrelais, die lediglich in Störungsfällen zu arbeiten haben, gibt es noch solche, die den Leistungsfluß im ungestörten Betrieb zu überwachen haben, beispielsweise den Energieaustausch zwischen zwei Werken.

Diese sogenannten Leistungsrelais werden vorwiegend zweipolig als Induktionsrelais oder als elektrodynamische Relais ausgeführt. Ihr Anschluß erfolgt im allgemeinen nach der Zweiwattmeterschaltung. Solche Relais stellen nichts anderes dar als Leistungsmesser mit Kontakteinrichtungen. Sie lassen sich sowohl für Vorwärtsleistung als auch für Rückleistung einstellen und betätigen beim Erreichen oder Überschreiten der Einstellwerte ihre Kontakte. Zuweilen benutzt man diese Art Relais nur zum Überwachen von Leistungsgrenzen. — Das Ansprechen solcher Relais wird meist für Meldungen ausgewertet, weniger zum Abschalten oder Auftrennen von Netzteilen.

b) Richtungsrelais für Gleichstromnetze

Diese Relais werden als Primär- oder Sekundärrelais¹⁾ ausgeführt und in der Praxis vielfach als Rückstromrelais bezeichnet. Es handelt sich um elektromagnetische (polarisierte) Relais mit Strom- und Spannungswicklungen, die die Stromrichtung in Anlageteilen zu überwachen haben. An Stelle der Erregung durch besondere Spannungswicklungen erhalten manche Ausführungsformen Dauermagnete, die ein gleichbleibendes Feld als Bezugsgröße erzeugen.

Die Gleichstrom-Richtungsrelais sollen nach Möglichkeit so gebaut sein, daß eine Fremdfeldbeeinflussung und Temperaturabhängigkeit sowie eine Remanenzwirkung auf die Ansprechempfindlichkeit praktisch ausbleiben. Richtungsrelais, die an Nebenwiderstände angeschlossen werden, müssen sich überdies durch eine geringe Leistungsaufnahme auszeichnen.

Gleichstrom-Richtungsrelais verwendet man dort, wo die Umkehr

¹⁾ Sekundärrelais werden an Nebenwiderstände oder an Gleichstromwandler angeschlossen.

des Stromes in einem Anlageteil einer fehlerhaften Speisung entspricht. Dies ist im besonderen bei Gleichrichter-, Umformer- und Ladeanlagen der Fall. Gelegentlich benutzt man die Rückstromrelais auch zum Überwachen einer vertraglich vorgeschriebenen Leistungsrichtung.

C. Überstromzeitrelais

Überstromzeitrelais sind Schutzrelais, die bei Erreichen oder Überschreiten des eingestellten Stromwertes ansprechen und die nach einer bestimmten Zeit (bewußte Verzögerung!) die zugeordneten Leistungsschalter betätigen. Dabei können die Auslösezeiten von der wirksamen Stromstärke abhängig, begrenzt-abhängig oder unabhängig sein¹⁾. Dementsprechend teilt man diese Schutzrelais ein in:

- a) abhängige Überstromzeitrelais,
- b) begrenzt-abhängige Überstromzeitrelais,
- c) unabhängige Überstromzeitrelais und
- d) Stufen-Überstromzeitrelais.

Die nachstehend unter 1., 2. und 3. beschriebenen Relaisformen sind schon um die Jahrhundertwende entwickelt worden, zu einer Zeit als die Hochspannungstechnik gerade aufkam²⁾. Sie gelten als die klassischen Relais und behaupten in der Schutztechnik auch heute noch ein breites Anwendungsgebiet. Natürlich sind sie im Laufe der Zeit verschiedentlich verbessert worden, namentlich in bezug auf die Ansprech- und Zeitgenauigkeit, Kontaktleistung, Leistungsaufnahme (Verbrauch) sowie hinsichtlich des Halteverhältnisses. Überdies werden sie heute meist mit Fallklappen, Schleppzeigern und manchmal sogar mit Ansprech-Zähleinrichtungen zur leichteren Störungsklärung versehen. Die Stufen-Überstromzeitrelais unter 4. sind dagegen erst vor einigen Jahren angegeben worden.

1. Abhängige Überstromzeitrelais

Diese Relais arbeiten vorwiegend nach dem Induktions- oder Wärmeprinzip. Hier sollen lediglich die Induktionsrelais (Ferrarisrelais) behan-

¹⁾ Primärauslöser und Primärrelais (Definitionen hierzu siehe auf Seite 73) arbeiten in den Grundzügen ähnlich wie die Sekundärrelais. Die Ansprüche an sie in bezug auf die Ansprech- und Zeitgenauigkeit sowie auf das Halteverhältnis werden jedoch im allgemeinen milder als bei den Sekundärrelais gehalten (vgl. auch VDE 0670/1937). Bei ihnen fallen die Stromwandler fort, dafür müssen sie aber meist eine sehr hohe Kurzschlußfestigkeit aufweisen.

²⁾ Vgl. auch H. Calliess, ETZ 59 (1938) S. 1309.

delt werden. Für die Erörterung der Wärmerelais ist auf Seite 178 ein besonderer Abschnitt vorgesehen.

Der grundsätzliche Aufbau eines Induktionsrelais ist aus Abb. 59 ersichtlich. Sein beweglicher Teil (Scheibe oder Trommel) besteht aus einem gutleitenden Werkstoff, meist aus Aluminium oder Kupfer: Die

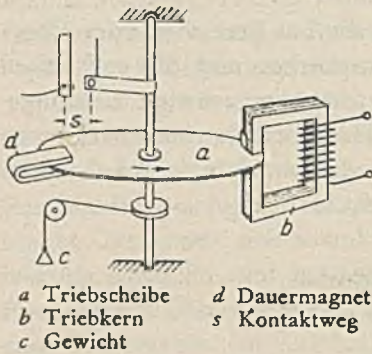


Abb. 59. Schematische Darstellung eines abhängigen bzw. begrenzt-abhängigen Überstromzeitrelais nach dem Induktionsverfahren.

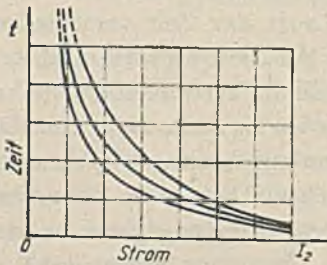


Abb. 60. Grundsätzlicher Verlauf der Zeitkennlinien abhängiger Überstromzeitrelais.

Laufscheibe *a* wird durch den Triebkern *b* (mit Kurzschlußring) entgegen dem Moment des Rückstellgewichtes *c* angetrieben und setzt sich beim Überschreiten des eingestellten Stromwertes in Bewegung. Die Wirkungsweise eines Induktionsrelais gleicht in ihrer Grundform also auch der eines Waagebalkens (s. Seite 86), bei dem auf der einen Seite ein Triebsystem und auf der anderen Seite ein Gewicht einwirken. Der Kontaktweg *s* wird mit um so größerer Geschwindigkeit zurückgelegt, je höher die antreibende Stromstärke ist. Der Dauermagnet *d* wirkt dabei bremsend auf die Laufscheibe. Näheres über die physikalischen Zusammenhänge bzw. Vorgänge bei einem Induktionssystem kann im Schrifttum nachgelesen werden¹⁾.

Der grundsätzliche Verlauf der Zeitkennlinien von abhängigen Überstromzeitrelais ist in Abb. 60 dargestellt. Bei sehr großen Stromstärken erreicht die Ablaufzeit der Relais sehr kleine Werte (fast den Wert Null),

was durch geringes Gewicht der beweglichen Teile, reichliche Bemessung des Eisenkerns und kleinen Luftspalt des Triebsystems erzielbar ist. In der Praxis werden die beschriebenen Induktionsrelais jedoch meist so

¹⁾ M. Schleicher, Die moderne Selektivschutztechnik, J. Springer, Berlin 1936, S. 158; J. Möllinger, Wirkungsweise der Motorzähler, J. Springer, Berlin 1925.

ausgeführt, daß ihre Ablaufzeit nur im Anfangsbereich von der Stromstärke abhängig ist (Abb. 61).

2. Begrenzt-abhängige Überstromzeitrelais

Bei diesen Relais wird der Triebmagnet b (vgl. Abb. 59) so bemessen, daß von einer bestimmten Stromstärke ab die Sättigung des Eisenkernes eintritt, wodurch die Triebkraft kaum mehr zunehmen und mithin die Ablaufzeit praktisch nicht mehr abnehmen kann. Die entsprechenden Zeitkennlinien sind aus Abb. 61 ersichtlich. Im Bereich von 5 bis 25 A ist hier die Ablaufzeit stromabhängig und darüber hinaus stromunabhängig. Daher auch die Bezeichnung begrenzt-abhängige Überstromzeitrelais.

Die Ansprechstromstärke wird gewöhnlich durch Änderung der AW-Zahl mittels einer anzapfbaren Wicklung des Triebmagneten b eingestellt, beispielsweise im Bereich von 4...12 A. Die verschiedenen Ablaufzeiten bzw. Zeitkennlinien erhält man durch Verstellung des Kontaktweges bzw. des Sektors der Scheibe, der im Luftspalt des Triebmagneten bis zur Kontaktgabe durchlaufen werden muß.

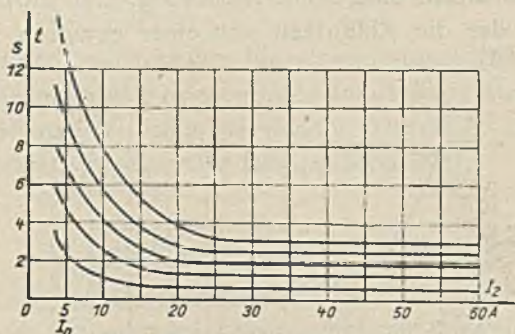


Abb. 61. Grundsätzlicher Verlauf der Zeitkennlinien begrenzt-abhängiger Überstromzeitrelais.

Mit den Zeitkennlinien nach Abb. 61 lassen sich in Netzgebilden mit einseitiger Einspeisung (z. B. in Strahlennetzen) ausreichende Staffelzeiten¹⁾ von Schalter zu Schalter erreichen (Abb. 62). Allerdings ergeben sich zur Zeit des Schwachlastbetriebes, d. h. bei kleinen Kurzschlußströmen sehr hohe Ablaufzeiten (Auslösezeiten), wodurch die Stabilität des

¹⁾ Unter Staffelzeit versteht man den Unterschied der Auslösezeiten hintereinanderliegender Relais; sie beträgt gewöhnlich 0,5—0,8 s.

Netzbetriebes gefährdet werden kann. Bei kurzzeitigen betriebsmäßigen Überlastungen bzw. bei hohen Anlaufströmen von Motoren bieten aber solche Zeitkennlinien den Vorteil, daß unnötige Abschaltungen leichter vermieden werden.

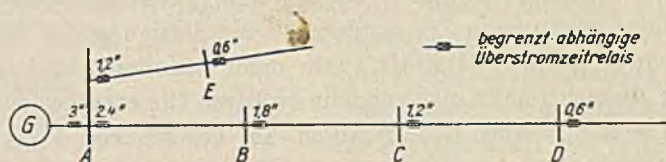


Abb. 62. Staffelschutz eines strahlenförmigen Netzes durch begrenzt-abhängige Überstromzeitrelais. Die Staffelzeit beträgt hier durchweg 0,6 s.

Die abhängigen sowie die begrenzt-abhängigen Überstromzeitrelais werden zuweilen mit Anreegliedern in Form von zusätzlichen Elektromagneten versehen (vgl. Abb. 40), um die vorgegebene Anlaufstromstärke genauer einzuhalten und um im Ansprechbereich geringere Zeitstreuungen zu bekommen. Ferner erhalten die begrenzt-abhängigen Überstromzeitrelais gegebenenfalls eine Schnellauslösung, z. B. durch einen Klappankermagneten, der die Ablaufzeit von einer gewissen Stromstärke ab

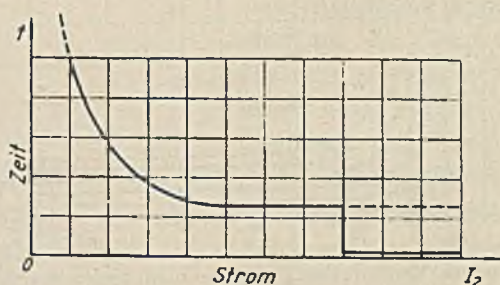


Abb. 63. Grundsätzlicher Verlauf der Zeitkennlinie eines begrenzt-abhängigen Überstromzeitrelais mit Schnellauslösung.

auf etwa eine Halbwelle bei 50 Hz herabdrückt (vgl. Abb. 63). Dadurch wird die Zeitkennlinie solcher Relais der eines abhängigen Überstromzeitrelais angenähert (vgl. Abb. 60).

Es gibt auch Überstromzeitrelais mit Zeitkennlinien nach Abb. 64. Solche Relais stellen ein Mittelding zwischen abhängigen und begrenzt-abhängigen Überstromzeitrelais dar.

Die Relais nach 1. und 2. haben gewöhnlich ein kleines Halteverhältnis (etwa 1,1), dagegen meist eine hohe Rücklaufzeit. Diese kann mehrere Sekunden betragen. Die Relais werden in der Regel einpolig ausgeführt, und zwar vorwiegend für Gleichstromauslösung (s. Seite 202). Manchmal

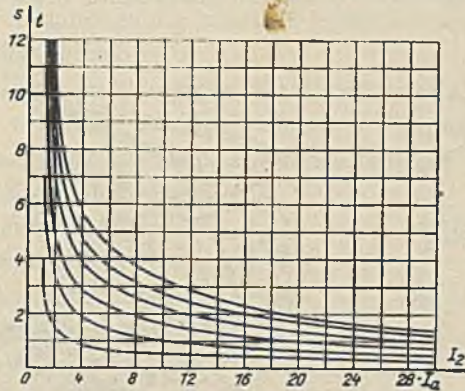


Abb. 64. Zeitkennlinien eines angenähert begrenzt-abhängigen Überstromzeitrelais (I_a eingestellter Ansprechstrom).

werden diese Relais auch in der Einrelaisschaltung (Sparschaltung) mit zwei Anregegliedern und einem einzigen Induktionssystem als zwei- bzw. dreipolige Schutzeinrichtung verwendet. Derartige Relais führt man auch für Wandlerstromauslösung aus (s. Seite 205).

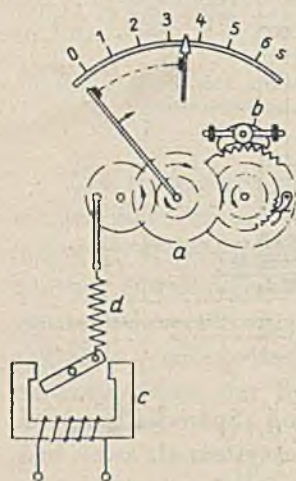
3. Unabhängige Überstromzeitrelais

Diese Relais bestehen in der einfachsten Form (einpolige Ausführung) aus einem Anregeglied (Ansprechglied) und einem Ablaufglied (vgl. z. B. Abb. 73).

Das Anregeglied wird vorwiegend als Klappanker- oder Drehankermagnet mit einer Stromeinstellvorrichtung ausgeführt (s. Seite 84 bis 87). Dadurch, daß das Anregeglied als selbständiges Glied nur die ihm eigene Arbeit zu vollbringen hat, ergibt sich eine ausreichende Ansprechgenauigkeit und ein geringes Halteverhältnis (s. Seite 74).

Das Ablaufglied, das die gewünschte Zeitverzögerung herbeiführt und vom Ansprechglied angeregt wird, besteht im wesentlichen aus einem mechanischen Hemmwerk (Hemmregler, Abb. 65) oder einem synchronisierten Induktionsmotor mit Zeitrad (Abb. 66). Die Zeiteinstellung kann

dabei je nach der Ausführung des Verzögerungsgliedes beispielsweise im Bereich von 0,1 ... 3 s; von 0,2 ... 6 s oder von 0,3 ... 12 s vorgenommen werden. Je geringer der Einstellbereich des Verzögerungsgliedes ist, desto kleiner werden die Zeitfehler¹⁾ bei gleicher Zeiteinstellung. Bei neuzeitlichen Relais betragen die Zeitfehler (Streuband) etwa 0,08 ... 0,2 s.



- a Hemmwerk
- b Hemmregler
- c Antriebsmagnet
- d Feder

Abb. 65. Schematische Darstellung eines Zeitrelais mit Hemmwerk

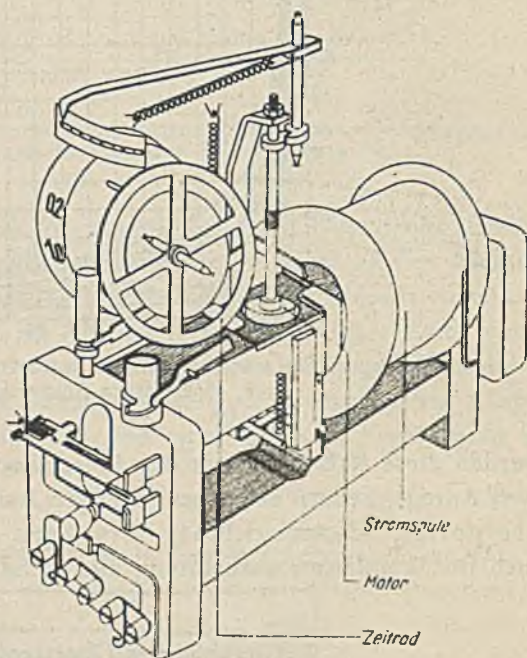


Abb. 66. Schematische Darstellung eines Überstromzeitrelais mit synchronisiertem Motor.

Das erforderliche Drehmoment für den Ablauf des Hemmwerkes wird von einer Feder erzeugt, die von einem Elektromagneten gespannt wird (Abb. 65). Der Elektromagnet wird dabei grundsätzlich durch Gleichspannung erregt; denn die synchrone Wechselspannung bricht im Kurzschlußfalle gewöhnlich stark zusammen. Erforderlichenfalls kann der Elektromagnet auch mit „Wandlerstrom“ erregt werden (s. Seite 205). Das in Abb. 65 dargestellte Ablaufglied wird vielfach auch bei Distanz-

¹⁾ Zeitfehler ist die in Sekunden gemessene Abweichung der tatsächlichen Arbeitszeit eines Relais oder einer Schutz Einrichtung vom eingestellten Sollwert.

relais verwendet. Außerdem benutzt man es in verschiedenen Schutzschaltungen oft auch als selbständiges Zeitrelais (vgl. Abb. 72).

Ist das Verzögerungsglied ein synchronisierter Motor (Abb. 66), so wird dieser im Fehlerfall durch das Anregeglied unverzüglich mit einem Zeitrads gekuppelt. Dieses Zeitrads mit Nocken durchläuft bis zur feststehenden Kontaktanordnung einen Winkel, der der jeweils eingestellten Zeit verhältnismäßig ist¹⁾.

Die Zeitkennlinien unabhängiger Überstromzeitrelais sind in Abb. 67 dargestellt. Diese verlaufen bei den Relais mit Hemmwerken bei allen Stromstärken parallel zur Abszisse. Bei den Relais mit synchronisiertem Motor weisen die Kennlinien dagegen im Anlaufbereich eine gewisse Stromabhängigkeit auf, die durch den asynchronen Anlauf bedingt ist. Außerdem ändert sich die eingestellte Zeit dieser Relais bei Netzkurzschlüssen verhältnismäßig mit der Netzfrequenz. Die geringe Stromabhängigkeit beim Anlaufen sowie die angedeutete Frequenzabhängigkeit spielen in der Selektivschutztechnik jedoch nur eine untergeordnete Rolle.

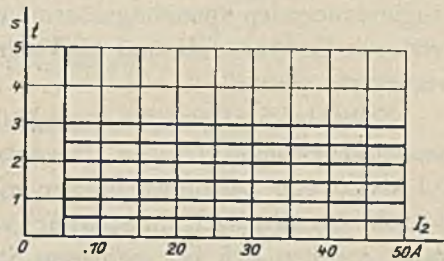


Abb. 67. Grundsätzlicher Verlauf der Zeitkennlinien unabhängiger Überstromzeitrelais.

Die unabhängigen Überstromzeitrelais werden in Deutschland ausgiebig benutzt. Sie haben sich hier gegenüber den abhängigen und begrenzt-abhängigen Überstromzeitrelais im wesentlichen deswegen durchgesetzt, weil sie in Netzen auch bei veränderlichem Maschineneinsatz stets mit den gleichen Ablaufzeiten arbeiten, weil sie eine übersichtliche und sichere Zeiteinstellung gewährleisten und weil sie schließlich im Zusammenarbeiten mit dem Distanzschutz feste und eindeutige Anhaltspunkte in bezug auf Zeiteinstellung liefern. Man verwendet diese Relais gern als Reserveschutz²⁾ gegen die Auswirkungen von Kurzschlüssen in Generatoren, Transformatoren und Sammelschienen (s. Seite 217). Außerdem schützt man durch sie in selektiver Weise Stickleitungen und oft Netzgebilde mit einseitiger Einspeisung. Hierbei werden die Relais-Auslösezeiten der einzelnen aufeinanderfolgenden Stationen in Richtung auf

¹⁾ Fr. Parschalk, BBC-Nachrichten 23 (1936) S. 131.

²⁾ Darunter versteht man einen Schutz, der auslöst, wenn die anderen, den Anlagenteilen gleichfalls beigeordneten Schutzeinrichtungen oder die Schalter versagen.

das Kraftwerk um etwa 0,5 ... 0,8 s gestaffelt (vgl. z. B. die Abb. 62, die hier sinngemäß anzuwenden ist), so daß entweder nur der kranke Anlageteil allein oder mit ihm nur wenige gesunde Anlageteile, die nachgeordnet liegen, abgetrennt werden.

Der grundsätzliche Nachteil dieser starren Zeitstaffelung besteht darin, daß gerade bei den Kurzschlüssen in der Nähe des Kraftwerkes, wo die Fehlerströme die größten Werte annehmen, die Auslösezeiten der Relais am höchsten sind. Bei den Kurzschlüssen in der Nähe des Kraftwerkes erfahren die vom Kurzschlußstrom durchflossenen Anlageteile eine außerordentlich hohe thermische Beanspruchung. Überdies fallen die Motoren, Umformer und Generatoren infolge der großen und langandauernden Spannungsabsenkung im ganzen Netz leicht außer Tritt, wodurch Stromausfall und eine erhebliche Beunruhigung des Betriebes verursacht werden.

Selbst bei Staffelzeiten von nur 0,4 s, die man unter Verwendung von neuzeitlichen unabhängigen Überstromzeitrelais mit einem Zeitfehler von 0,1 s und von Leistungsschaltern mit Ausschaltzeiten (Schalt ereigenzeit + Lichtbogenlöschzeit im Schalter) von nur 0,1 ... 0,15 s noch gut heißen kann, ergeben sich bei mehreren Staffelungen in der Nähe des Kraftwerkes noch so hohe Abschaltzeiten (Auslösezeit der Relais + Ausschaltzeit der Schalter), daß der Netzbetrieb gefährdet wird.

In einseitig gespeisten Netzen können mit unabhängigen Überstromzeitrelais in Verbindung mit Richtungsrelais auch parallele Leitungen in beliebiger Anzahl sowie einfache Ringleitungen selektiv geschützt werden.

Die Abb. 68 zeigt ein Netzgebilde mit parallelen Leitungen (Kabeln oder Freileitungen), das mit den genannten Relais ausgerüstet ist. Diejenigen Leitungsenden, durch welche im ungestörten Betrieb die Leistung von den jeweiligen Sammelschienen fortgeführt wird, sind hier mit unabhängigen Überstromzeitrelais ausgerüstet, während die anderen Leitungsenden, über welche die Leistung auf die entsprechenden Sammelschienen zufließt, Richtungsrelais mit Überstromanregung aufweisen. Die Überstromzeitrelais sind untereinander mit 0,5 s gestaffelt, wogegen die Richtungsrelais unverzögert arbeiten, wenn man von der Ansprechzeit der Überstrom-Anregeglier und der der Richtungsglieder absieht (s. die Abb. 52 und 58).

Entsteht z. B. im oberen Bild der Abb. 68 an der Stelle *K* ein Kurzschluß, so fließen die Fehlerströme vom Kraftwerk aus über die Lei-

von Umformern oder Motoren angeschlossen, so würden diese einen erheblichen Stoßkurzschlußstrom nach der Fehlerstelle liefern; gegebenenfalls auch einen merklichen Dauerkurzschlußstrom¹⁾). Bei hoher Motorenleistung, wie dies oft in großen Industrieanlagen der Fall ist, können dabei gleichzeitig mit dem Richtungsrelais 3 auch die Richtungsrelais in C auslösen und diese Spannungslos machen. Ein solcher Übelstand wird behoben, indem man den Richtungsrelais in C je ein Verzögerungsrelais beifügt und diese auf etwa 0,3 s einstellt. In dieser Zeit verlischt nämlich der Stoßkurzschlußstrom der Motoren ganz, so daß eine Auslösung in C unterbleibt.

In Abb. 69 ist ein Ringnetz mit einseitiger Einspeisung dargestellt, das mit unabhängigen Überstromzeitrelais und Richtungsrelais gegen die Auswirkung von Kurzschlüssen selektiv geschützt werden soll. Die Aufgabe läßt sich durch Anwendung der sogenannten gegenläufigen Staffelung lösen.

Die gegenläufige Staffelung beruht auf folgendem Prinzip: Bei einer Ringleitung, die über verschiedene Unterstationen zur gleichen Sammelschiene in einem Kraftwerk oder Umspannwerk zurückführt (Abb. 69), sind die Überstromzeitrelais mit den Richtungsrelais so verteilt und geschaltet, daß sie nur dann auslösen, wenn der Fehlerstrom von den Sammelschienen in die geschützte Leitung hineinfließt. Die Ablaufzeiten der Überstromzeitrelais werden dabei so gestaffelt, daß sie sich, ausgehend von der Sammelschiene A, fortlaufend um den Betrag der vorgegebenen Staffelzeit bis auf einen Mindestwert verringern. Das Zusammenwirken der gegenläufig gestaffelten Überstromzeitrelais mit den Richtungsrelais hat zur Folge, daß die Relais der Fehlerstrecke mit der kürzesten Ablauf- bzw. Arbeitszeit auslösen und dadurch eine selektive Abschaltung herbeiführen. Der Kurzschluß K würde z. B. durch die Schalter m und n in 1,15 s selektiv abgeschaltet werden.

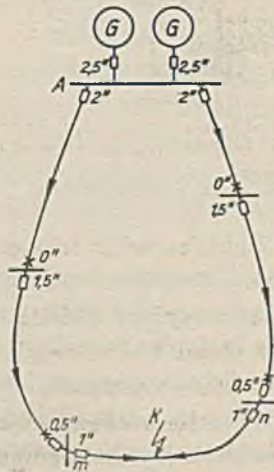


Abb. 69. Gegenläufiger Staffelschutz mit unabhängigen Überstromzeitrelais und Richtungsrelais für ein Ringnetz. (Die Erklärungen der Relaiszeichen siehe bei Abb. 68.)

¹⁾ Vgl. M. Walter, Kurzschlußströme in Drehstromnetzen, 2. Auflage, R. Oldenbourg, München 1938, S. 57 und 62.

Trennt man die Sammelschienen in A in zwei Teilsammelschienen auf, so daß an jeder Hälfte ein Generator angeschlossen bleibt, so ergibt sich eine Kuppelleitung mit zweiseitiger Speisung, die man sich als einfache Übertragungsleitung vorstellen kann (Abb. 70). Der Schutz wirkt bei einem solchen Netzgebilde auch dann noch selektiv, wenn abwechselnd

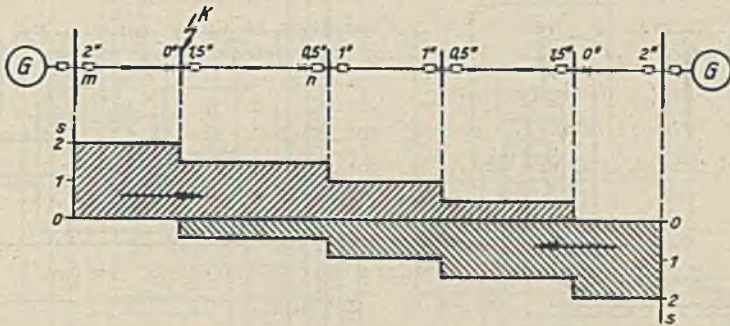


Abb. 70. Gegenläufiger Staffelschutz mit unabhängigen Überstromzeitrelais und Richtungsrelais für eine zweiseitig gespeiste Übertragungsleitung. Das Diagramm zeigt die Auslösezeiten für beide Stromrichtungen.

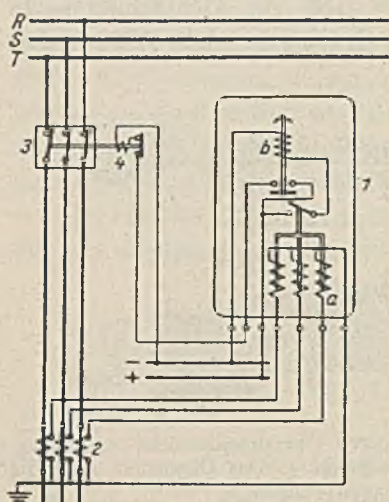
der eine oder andere Generator abgeschaltet wird. Die Selektivität ist hier also auch bei wechselseitiger Speisung gewährleistet.

Sammelschienen-Kurzschlüsse werden durch die „Abgangs“-Schalter der benachbarten Stationen abgeschaltet. Den Kurzschluß K in Abb. 70 würden die Schalter m und n nach etwa 2,15 s bzw. 0,65 s abtrennen.

Die unabhängigen Überstromzeitrelais haben im allgemeinen eine sehr kleine und daher günstige Rückstellzeit (gewöhnlich nur wenige Halbwellen bei 50 Hz). Sie werden ein-, zwei- oder dreipolig ausgeführt, d. h. ihre Anrege- und Ablaufglieder sind jeweils in einem gemeinsamen Relaisgehäuse untergebracht (Abb. 71). Gelegentlich bildet man aus einzelnen Überstromrelais und Zeitrelais den erforderlichen ein-, zwei- und dreipoligen Relaisatz (Abb. 72).

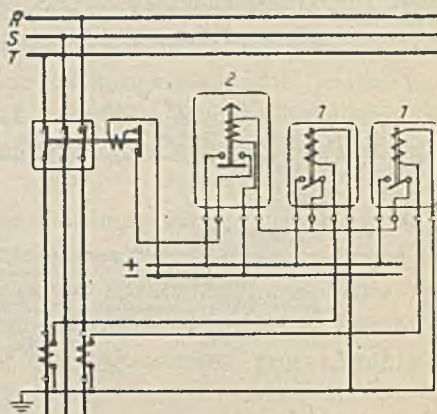
In Drehstromnetzen mit kurzer Erdung wird der Überstromzeit-schutz durchweg dreipolig ausgeführt, wogegen in Netzen mit nicht kurzer Erdung ein zweipoliger Schutz durchaus genügt. Allerdings müssen die Schutzrelais zur Erfassung von Doppelerdschlüssen stets an die gleichen zwei Phasenleiter angeschlossen werden. Für Generatoren und teilweise auch für Transformatoren führt man den Überstromzeitschutz vornehmlich dreipolig aus, damit auch die einpoligen Kurzschlüsse

abgeschaltet werden, die beim Durchbruch der Isolation zwischen dem Sternpunkt der Schützlinge und Erde bei gleichzeitigem Erdschluß im Netz zustande kommen können.



- 1 dreipoliges unabhängiges Überstromzeitrelais
- a drei Überstrom-Anreglieder
- b ein Ablaufglied (Zeitwerk)
- 2 Stromwandler
- 3 Leistungsschalter
- 4 Hilfsauslöser

Abb. 71. Dreipoliger Überstromzeit-schutz. Der Relaisatz wird aus einem dreipoligen unabhängigen Überstromzeitrelais (Verbundrelais) gebildet.



- 1 Überstromrelais (Anregerelais)
- 2 Zeitrelais (vgl. Abb. 65)

Abb. 72. Zweipoliger Überstromzeit-schutz. Der Relaisatz wird aus zwei Überstromrelais und einem Zeitrelais in getrennter Ausführung gebildet. Der stumpfe Pfeil im Zeitrelais 2 sowie am Ablaufglied b der Abb. 71 stellt das Symbol für die Zeitverzögerung der Relais dar. Der Pfeil gibt außerdem an, bei welcher Betätigungsrichtung des Kontaktes die Verzögerung auftritt (hier Anzugsverzögerung).

Die unabhängigen Überstromzeitrelais werden gewöhnlich für Gleichstromauslösung hergestellt. Ausführungen für Wandlerstromauslösung gelangen allerdings in Mittelspannungsnetzen auch oft zur Anwendung (siehe Seite 205).

4. Stufen-Überstromzeitrelais

Die hohen Auslösezeiten unabhängiger Überstromzeitrelais bei mehreren hintereinanderliegenden Schaltern können unter gewissen Bedingungen durch Hinzunahme weiterer Relais oder Relaisglieder gleicher Art

stark gekürzt werden. Der Relaisatz für einen Schalter wird dabei so geschaltet und eingestellt, daß die Ablaufzeit beim Überschreiten einer bestimmten Stromstärke sprunghaft kleiner wird. Man erhält dadurch einen Stufen-Überstromzeitschutz¹⁾. Schaltung, Wirkungsweise und Zeitkennlinie einer solchen Relaiseinrichtung gehen aus Abb. 73 hervor. Das linke Überstromzeitrelais weist die übliche Strom- und Zeiteinstellung

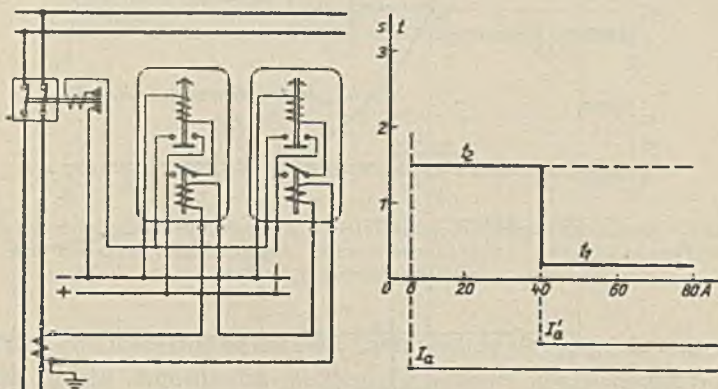


Abb. 73. Stufen-Überstromzeitschutz in einpoliger Darstellung. Daneben Stufenzeitkennlinie.

auf, beispielsweise $I_a = 6$ A und $t_2 = 1,5$ s. Beim rechten Überstromzeitrelais beträgt dagegen die Anrege- oder Ansprechstromstärke $I_a = 40$ A und die Auslösezeit $t_1 = 0,2$ s. Gegebenenfalls kann das Zeitglied beim rechten Relais fortfallen, so daß die Auslösung des Schalters dann beim Erreichen oder Überschreiten der eingestellten Ansprechstromstärke unverzüglich erfolgt. Die beiden Überstromzeitrelais können natürlich auch in einem Gehäuse untergebracht sein.

Die geschilderte Relaiseinrichtung eignet sich vornehmlich zum Schutze von Anlageteilen in Mittelspannungsnetzen mit einseitiger Einspeisung, bei denen die Kurzschlußströme ein Vielfaches des Nennstromes betragen und die treibende Spannung an der Einspeisestelle praktisch unverändert bleibt²⁾. In Abb. 74 ist die Kürzung der Relais-Ablaufzeiten für eine Stichleitung gezeigt. Hier wirken die Relais bei dreipoligem Kurzschluß mit der Kurzzeitauslösung auf eine Entfernung von 80 bis 70%

¹⁾ M. Walter, ETZ 55 (1934) S. 206.

²⁾ Trifft in der Regel für solche Mittelspannungsnetze zu, die über 50-, 60-, 110- und 220-kV-Netze gespeist werden.

des zugehörigen Leitungsabschnittes. Bei zweipoligem Kurzschluß verringert sich jedoch die Kurzzeitzone um etwa 13,5%, bedingt durch den kleineren Kurzschlußstrom infolge des größeren Widerstandes in der Kurzschlußschleife. Sinkt die treibende Spannung im Umspannwerk A bei Kurzschluß auf der Leitung infolge eines geringen Maschinenein-

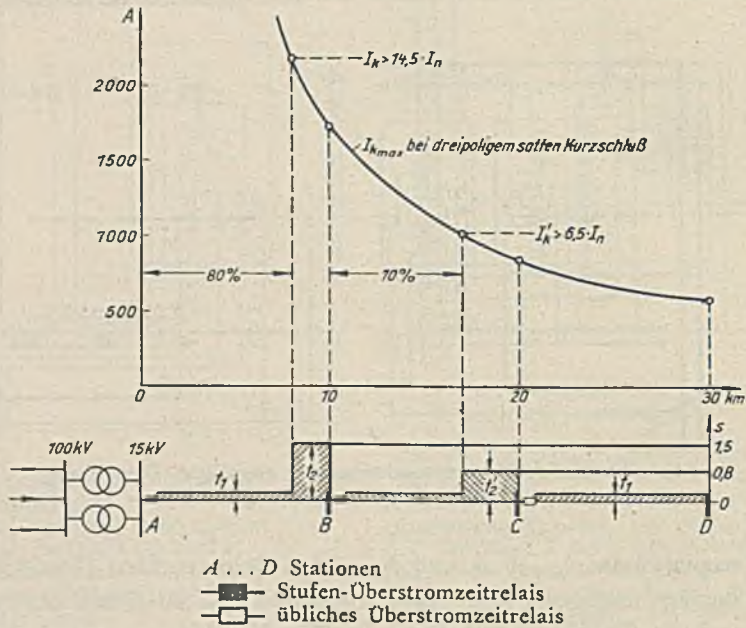


Abb. 74. Zeitstaffelschutz durch Stufen-Überstromzeitrelais für eine Stichleitung.

satzes in den Kraftwerken um einen bestimmten Betrag ab, so wird die jeweilige Kurzzeitzone durch Verringerung der Kurzschlußströme ebenfalls kleiner. Im Grenzfall vermindert sich die Kurzzeitzone auf Null, und der Relaisatz arbeitet nur noch als gewöhnlicher Überstromzeit-schutz. Dann hat man es aber mit einem kleinen und ungefährlichen Kurzschlußstrom zu tun, bei dem die Auslösezeit von 1,5 s bestimmt nicht zu hoch ist.

In Abb. 75 ist der Unterschied der Auslösezeit von Überstromzeit-relais mit üblichen und stufenförmigen Zeitkennlinien dargestellt. Die Verminderung der Auslösezeit gerade auf demjenigen Teil der Leitungs-abschnitte, wo die Kurzschlußströme am größten sind, ist beträchtlich.

Außerdem wird trotz kleiner Auslösezeiten die Selektivität mit erhöhter Sicherheit gewährleistet, da größere Zeitstaffelungen zwischen den vor- und nachgeordneten Schaltern auftreten. Es bleiben bei diesem Verfahren in der gesamten Auslösekennlinie der Strecke $A \dots D$ eigentlich nur noch zwei Höcker, die man bei genauer Relais-einstellung noch verkleinern kann.

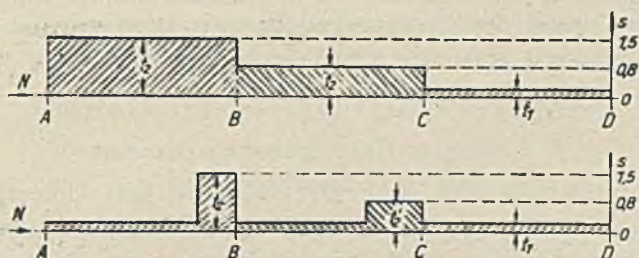


Abb. 75. Zeichnerische Darstellung der Zeitstaffelung für eine Sticheitung. Oben: Zeitstaffelung mit üblichen unabhängigen Überstromzeitrelais. Unten: Zeitstaffelung mit Stufen-Überstromzeitrelais.

Der Stufen-Überstromzeitschutz kann auch in der gegenläufigen Staffelung mit Erfolg angewendet werden. Er arbeitet überdies gut mit dem Distanzschutz zusammen und stellt für diesen nicht selten eine willkommene Ergänzung dar. Im besonderen aber gewährleistet er eine geringe thermische Beanspruchung der vom Kurzschluß durchflossenen Anlagenteile, so daß diese schwächer und preiswerter ausgelegt werden können (Stromwandler!).

D. Unterspannungszeitrelais

Unterspannungszeitrelais sind Schutzrelais, die bei Erreichen oder Unterschreiten des eingestellten Spannungswertes ansprechen und die im Gegensatz zu den auf Seite 87 beschriebenen Unterspannungsrelais die weiteren Einrichtungen, wie Leistungsschalter, Hupen, Lampen und dergleichen verzögert betätigen. Diese Relais sind also bei kurzzeitigen Spannungsabsenkungen unwirksam¹⁾, wodurch beispielsweise Asynchronmotoren und Umformer von unnötigen Abschaltungen verschont bleiben und der Netzbetrieb weniger beunruhigt wird. Sie trennen die genannten Anlagenteile erst bei größeren und länger dauernden Spannungsabsenkungen vom Netz ab, jedoch noch so rechtzeitig, daß die Schützlinge bei

¹⁾ Z. B. bei Kurzschlüssen, die in sehr kurzer Zeit abgeschaltet werden (0,1–2 s).

plötzlicher Wiederkehr der vollen Betriebsspannung durch Stromstöße keinen Schaden nehmen oder gar der Netzbetrieb in Frage gestellt wird, z. B. in Industrierwerken mit vielen und großen Kurzschlußläufer-Motoren. Schließlich werden dadurch auch Unfälle verhütet. — Zuweilen schützt man mit einem Unterspannungszeitrelais mehrere Motoren oder sogar ganze Abnehmeranlagen.

Die Auslösezeit der Unterspannungsrelais kann vom Ausmaß der Spannungsabsenkung entweder abhängig, begrenzt-abhängig oder unabhängig sein.

1. Abhängige Unterspannungszeitrelais

Die abhängigen bzw. begrenzt-abhängigen Unterspannungszeitrelais haben meist den gleichen Aufbau wie die auf Seite 106 beschriebenen Induktionsrelais, nur ist bei ihnen anstatt der Stromspule eine von der zu überwachenden Spannung erregte Wicklung vorhanden. Beim Absinken der Spannung überwiegt der Einfluß des Gewichts oder der Feder gegenüber dem des Triebkernes (Abb. 59), wodurch sich die Ferrarisscheibe von ihrer Endstellung im Normalbetrieb mehr oder weniger schnell zurückdreht und schließlich den Auslösekontakt betätigt. Die Ablaufzeit des Relais wird also um so kürzer, je größer die Spannungsabsenkung ist. In Abb. 76 ist der grundsätzliche Verlauf der Relaiszeitkennlinien dargestellt.

2. Unabhängige Unterspannungszeitrelais

Unabhängige Unterspannungszeitrelais werden gewöhnlich aus einfachen Unterspannungsrelais (Seite 87) und Zeitrelais mit Gleichstromerregung (Seite 110) zusammengesetzt. Ihre Zeitkennlinien sind aus Abb. 77 ersichtlich.

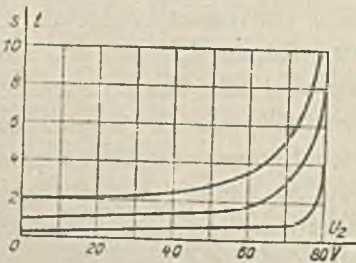


Abb. 76. Zeitkennlinien eines abhängigen Unterspannungszeitrelais.

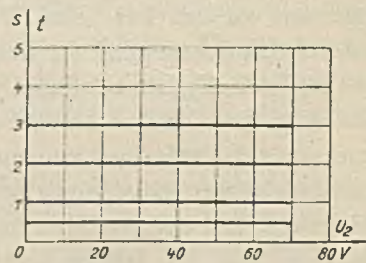


Abb. 77. Zeitkennlinien eines unabhängigen Unterspannungszeitrelais.

Die Zeitkennlinien nach Abb. 76 entsprechen den Bedürfnissen der Praxis besser als die nach Abb. 77, weshalb bei einer Auswahl die abhängigen bzw. begrenzt-abhängigen Unterspannungszeitrelais den unabhängigen vorzuziehen sind¹⁾).

Der Unterspannungszeitschutz wird je nach den Netzverhältnissen und den gestellten Forderungen ein-, zwei- oder dreipolig ausgeführt. Weitere Ausführungen über diesen Schutz folgen auf Seite 260 und 268.

E. Distanzrelais (Distanzschutz)

1. Grundlagen des Distanzschutzes

Distanzrelais sind Schutzrelais, deren Auslösezeit von der Fehlerentfernung abhängig ist. Als Maß für die Fehlerentfernung dient der Scheinwiderstand der zu schützenden Leitungen oder eine seiner Komponenten, der Blind- oder Wirkwiderstand. Je weiter der Fehler entfernt liegt, um so größer ist der gemessene Widerstand und somit die Relaisauslösezeit. Da der Widerstand in der Regel der Leitungslänge verhältnismäßig ist, so ist die Auslösezeit der Relais auch abhängig von der Fehlerentfernung. Darum auch die Bezeichnung Distanzrelais oder Widerstandszeitrelais. Der Distanzschutz ist also ein Zeitstaffelschutz, bei dem die Staffelzeit durch den Leitungswiderstand bestimmt wird.

Bei einem Kurzschluß im Netz werden die Distanzrelais durch ihre Anregeglierer zum Arbeiten gebracht. Es laufen gewöhnlich alle in der Kurzschlußbahn liegenden Distanzrelais an, jedoch nur diejenigen ab, die die kürzeste Fehlerentfernung messen und dementsprechend die kleinsten Auslösezeiten haben. Die übrigen Distanzrelais kommen nicht mehr zum Auslösen, weil der Kurzschlußzustand durch die Relais der kürzesten Fehlerentfernung zuvor aufgehoben wird.

Da mehrere in demselben Knotenpunkt (Station) eingebaute Distanzrelais die gleiche Fehlerentfernung messen können, wird als weiteres Merkmal die Leistungsrichtung herangezogen, so daß nur diejenigen Relais zum Auslösen kommen, bei welchen die Kurzschlußenergie von den Sammelschienen wegfließt; bei den anderen Relais mit auf die Sammelschienen zufließender Leistung wird das Auslösen durch die Richtungsglieder unterbunden.

¹⁾ Vgl. auch E. M. K. Sommer, Elektrizitätswirtschaft 28 (1929) S. 388 und 567; R. Ulbricht, ETZ 58 (1937) S. 763.

Zum besseren Verständnis des Distanz- bzw. Widerstandsprinzips soll ein einfaches Beispiel herangezogen werden (Abb. 78).

Auf der Leitung zwischen den Kraftwerken *A* und *E* entstehe zwischen den Unterstationen *C* und *D* bei *K* ein zweipoliger satter Kurzschluß. Der Scheinwiderstand am Kurzschlußort sei Null. Er wächst von

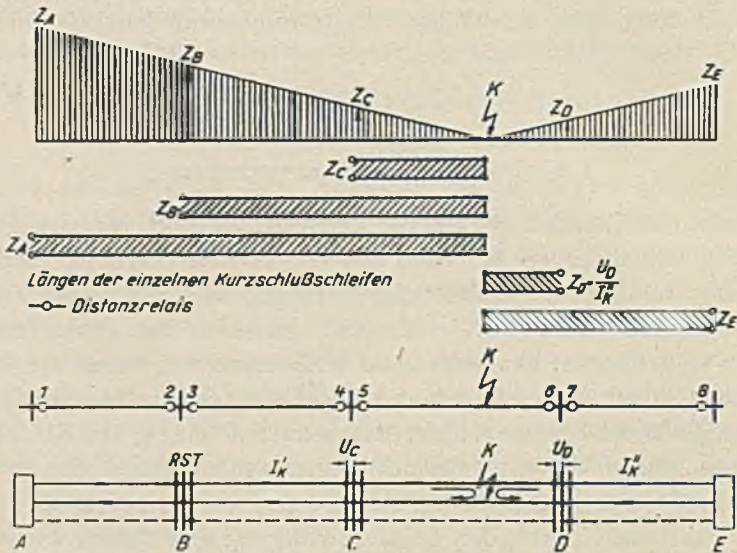


Abb. 78. Kurzschlußschleifen und ihre Widerstände in Abhängigkeit von der Fehlerentfernung zwischen Relais einbauort und Kurzschlußstelle.

da in Richtung nach den Kraftwerken hin stetig an (vergleiche auch die Ausführungen auf Seite 30). Die Widerstandsgrößen sowie die Kurzschlußschleifen, die von den Relais in den einzelnen Stationen dabei erfaßt werden, sind im oberen Teil des Bildes besonders herausgezeichnet (Z_A, Z_B, Z_C, Z_D und Z_E). Bei dem angenommenen Kurzschluß *K* besteht eine Auslösemöglichkeit nur für die Relais bzw. Leistungsschalter 1, 3, 5, 6 und 8, nicht dagegen für die Relais 2, 4 und 7. Diese sperren, weil die Fehlerenergie für sie auf die Sammelschiene zufließt. Die selektive Abtrennung der betroffenen Leitungstrecke *C—D* vom übrigen Netz wird durch die Relais 5 und 6 veranlaßt. Sollte jedoch z. B. der Schalter bei 5 durch Versagen seiner Auslöseeinrichtung (Hilfsauslöser, Ventil) nicht ausschalten, dann veranlaßt das Relais 3 etwa 0,5 bis 0,7 s später entsprechend der vorgegebenen Staffelzeit die Abtrennung in der Station *B*.

Die Zeitstaffelung erfolgt also beim Distanzschutz selbsttätig von der Fehlerstelle aus (Distanz-Zeitstaffelung!); dabei sind die Auslösezeiten lediglich von der Fehlerentfernung bzw. vom Widerstandswert der Kurzschlußschleife abhängig.

Die Distanzrelais werden als Sekundärrelais stets über Strom- und Spannungswandler an die zu schützenden Anlageteile, wie Freileitungen, Kabel, Transformatoren usw. angeschlossen. Sie messen daher nicht den tatsächlichen Scheinwiderstand Z_1 der Kurzschlußschleifen, sondern einen ihm verhältnismäßigen Wert Z_2 , der durch die Wandlerübersetzungen gegeben ist zu

$$Z_2 = Z_1 \cdot \frac{\ddot{u}_i}{\ddot{u}_u} \dots \dots \dots (13)$$

Der gemessene Widerstand hat infolgedessen in den meisten Fällen von den Primärwiderständen stark abweichende Werte. In der Gleichung (13) bedeuten:

- Z_2 den sekundären Scheinwiderstand (Sekundärimpedanz) in Ohm,
- Z_1 den primären Scheinwiderstand (Primärimpedanz) in Ohm,
- \ddot{u}_i die Nennübersetzung der Stromwandler,
- \ddot{u}_u die Nennübersetzung der Spannungswandler.

Die Distanzrelais erfassen also anstatt der Primärimpedanz die Sekundärimpedanz. Dasselbe gilt auch für die Komponenten des Scheinwiderstandes, den Blind- und Wirkwiderstand, falls diese gemessen werden:

$$X_2 = X_1 \cdot \frac{\ddot{u}_i}{\ddot{u}_u} \dots \dots \dots (14)$$

oder

$$R_2 = R_1 \cdot \frac{\ddot{u}_i}{\ddot{u}_u} \dots \dots \dots (15)$$

Weitere Ausführungen hierüber siehe auf Seite 124, 125, 127 und 143.

2. Aufbau eines Distanzrelais

Ein Distanzrelais besteht in der einfachsten (einpoligen) Ausführung grundsätzlich aus einem Anregeglied, einem Ablaufglied und einem Richtungsglied, die gewöhnlich in einem Gehäuse untergebracht sind (Abb. 79).

Das Anreaglied *a* dient zum unverzögerten Ingangsetzen des Ablaufgliedes *b* und des Richtungsgliedes *c* bei Eintritt von anormalen Betriebszuständen, z. B. bei Kurzschluß oder Doppelerdschluß. Es wird entsprechend den Netzverhältnissen als Überstrom-, Unterspannungs- oder Unterimpedanz-Anreaglied ausgeführt (siehe Abschnitt B).

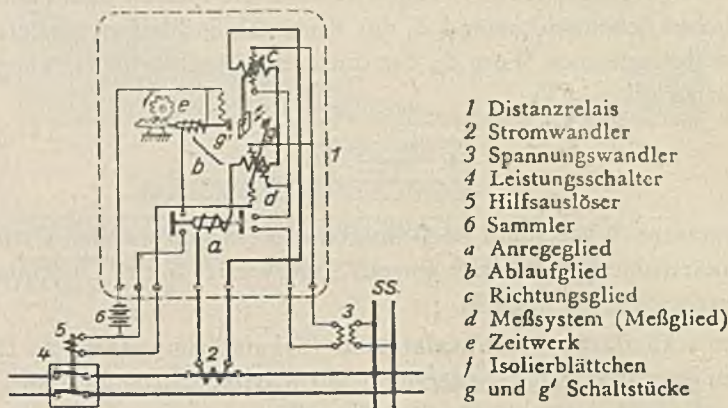


Abb. 79. Schematische Darstellung der Innen- und Außenschaltung eines Distanzrelais mit stetigen Zeitkennlinien.

Das Ablaufglied *b*, das gewöhnlich aus einem Quotientenmesser (Meßglied) und einem Zeitwerk (Abb. 65) besteht, bestimmt die widerstandsabhängige Laufzeit des Relais, die sich aus den jeweiligen Kurzschlußschleifen ergibt. Als Widerstandsgrößen können gemessen werden:

$$\text{Der sekundäre Scheinwiderstand } Z_2 = \frac{U_2}{I_2},$$

$$\text{der sekundäre Blindwiderstand } X_2 = \frac{U_2}{I_2} \cdot \sin \varphi$$

$$\text{oder der sekundäre Wirkwiderstand } R_2 = \frac{U_2}{I_2} \cdot \cos \varphi.$$

Die Werte Z_2 , X_2 und R_2 beziehen sich ganz allgemein auf Schleifen, die von zwei Leitern oder einem Leiter und Erde gebildet werden.

Die Meßglieder benutzen zum Erfassen der erwähnten Widerstands-

werte hauptsächlich das elektromagnetische, das thermische, das elektrodynamische oder das Induktions-Meßverfahren¹⁾.

Das Richtungsglied c hat die Aufgabe, die Auslösung derjenigen Distanzrelais zu verhindern, bei denen die Fehlerleistung nach den Sammelschienen hinfließt. Weitere Ausführungen über die Richtungsglieder siehe in Abschnitt B.

Das Zusammenarbeiten der drei Hauptglieder wird an folgendem Beispiel erläutert: Bei einem Kurzschluß im Netz spricht das Überstrom-Anreagglied a mit seiner Eigenzeit von wenigen Halbwellen an (vergleiche Abb. 52) und legt den Quotientenmesser d , das Zeitwerk e und das Richtungsglied c durch seine Kontakte unverzögert an Spannung. Der Quotientenmesser stellt sich danach mit dem Schaltstück g auf den Widerstandswert der gegebenen Kurzschlußschleife ein, und das Zeitwerk bewegt mit konstanter Geschwindigkeit sein Schaltstück g' auf g zu. Inzwischen stellt das Richtungsglied die Richtung der Fehlerenergie fest (vergleiche auch die Abb. 58 und 55) und läßt dabei entweder die Kontaktgabe des Ablaufgliedes zu oder verhindert diese, indem es das Isolierblättchen f zwischen die beiden Schaltstücke g und g' schiebt.

Nach erfolgtem Abschalten des Kurzschlusses öffnet das Überstrom-Anreagglied seine Kontakte. Somit gehen alle Relaisglieder wieder in die Anfangsstellung entsprechend ihrer Rückstellzeit — gewöhnlich in wenigen Halbwellen — zurück.

Die Distanzrelais teilt man nach der Art der zu messenden Widerstandsgrößen bzw. der Ausführungsart des Ablaufgliedes grundsätzlich ein in:

- Impedanzrelais (Scheinwiderstands-Zeitrelais),
- Reaktanzrelais (Blindwiderstands-Zeitrelais),
- Resistanzrelais (Wirkwiderstands-Zeitrelais).

Die letzteren werden nur selten angewendet und dann nur in Kabelnetzen (siehe Seite 146). Es gibt auch Ausführungsformen von Distanzrelais, die nicht genau auf Blindwiderstandsmessung abgeglichen sind und die teilweise auch den Wirkwiderstand miterfassen. Solche Relais bezeichnet man als angenäherte Reaktanzrelais (Mischrelais).

¹⁾ M. Walter, Der Selektivschutz nach dem Widerstandsprinzip, R. Oldenbourg, München 1933; M. Schleicher, Die moderne Selektivschutztechnik, J. Springer, Berlin 1936; G. Stark, VDE-Fachberichte 10 (1938) S. 158; H. Neugebauer, Siemens-Z. 16 (1936) S. 272; Kneller und Lesch, BBC-Nachrichten (1930) S. 181; H. Gutmann, ETZ 61 (1940) S. 107.

3. Zeitkennlinien der Distanzrelais

Der Zeitablauf der Distanzrelais kann nach stetigen, stufenförmigen oder gemischten Zeitkennlinien erfolgen (Abb. 80). Die stufenförmigen und gemischten Zeitkennlinien gewährleisten kürzere Auslösezeiten und bieten eine bessere Übersicht über die Arbeitsweise des Schutzes.

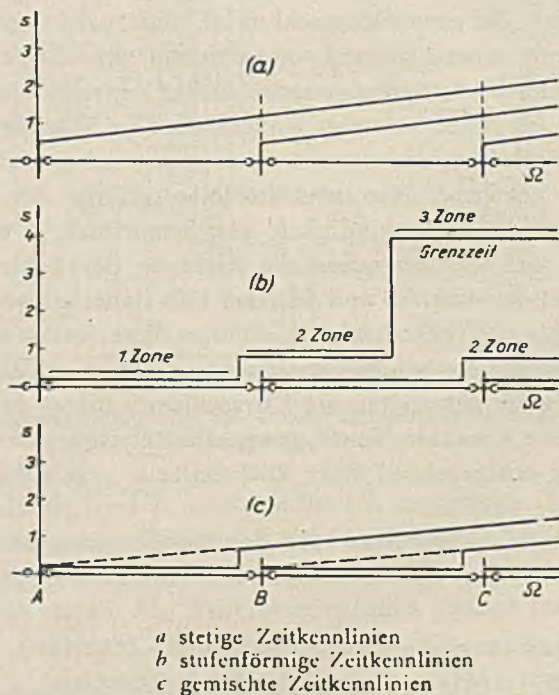


Abb. 80. Grundsätzlicher Verlauf der Zeitkennlinien von Distanzrelais

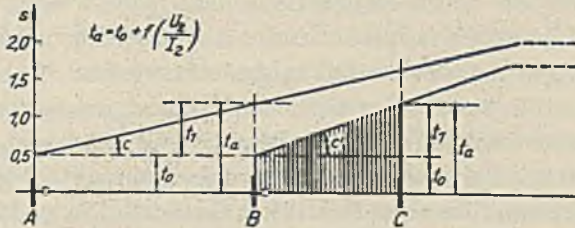
a) Stetige Zeitkennlinien

Bei den stetigen Zeitkennlinien wird die kleinste Ablaufzeit Grundzeit genannt, die zusätzliche Laufzeit dagegen, die durch die Entfernung des Fehlers bzw. durch den Widerstand der jeweiligen Kurzschlußschleife verursacht wird, widerstandsabhängige Laufzeit.

Die Grundzeit ist gewöhnlich innerhalb eines gewissen Bereiches einstellbar und bewegt sich in der Größenordnung von 0,5 bis 1,5 s.

Die widerstandsabhängige Laufzeit richtet sich nach der Entfernung des Fehlerortes. Sie ist innerhalb des zu schützenden Leitungsab-

schnittes am kleinsten, wenn der Fehler unmittelbar am Relaiseinbauort auftritt, und am größten, wenn der Fehler sich am anderen Ende des Leitungsabschnittes befindet (vergleiche Abb. 81).



- t_0 Grundzeit
- t_1 Staffelzeit bzw. widerstandsabhängige Zeit
- t_a Auslösezeit der Relais bei Kurzschluß am Ende der Leitung
- c und c' Neigung der Zeitkennlinien
- A, B, C Unterstationen

Abb. 81. Stetige Zeitkennlinien. Zeichnerische Darstellung der Gl. (17).

Die für den zu schützenden Anlageteil erforderliche Neigung c der Zeitkennlinie ergibt sich, indem man die gewünschte Staffelzeit (t_1) von Schalter zu Schalter durch den Sekundärwiderstand (Z_2, X_2 oder R_2) des Anlageteiles, ebenfalls von Schalter zu Schalter gerechnet, dividiert:

$$c = \frac{t_1}{Z_2} \dots \dots \dots (16)$$

Diese Beziehung hat für alle Kurzschlußarten Gültigkeit. Bei einigen Ausführungen von Distanzrelais kann c für Werte von 0 bis 15 s/Ω ausgeführt werden. Im allgemeinen wird $c = 0,5$ bis 2 s/Ω eingestellt.

Die Gleichungen für die Arbeitszeit (Auslösezeit) von Distanzrelais mit stetigen Kennlinien lauten ganz allgemein:

Für Impedanzrelais $t_a = t_0 + c \cdot Z_2 \dots \dots \dots (17)$

Für Reaktanzrelais $t_a = t_0 + c \cdot X_2 \dots \dots \dots (18)$

Für Resistanzrelais $t_a = t_0 + c \cdot R_2 \dots \dots \dots (19)$

Hierin bedeuten:

- t_a die Arbeitszeit eines Relais in Sekunden,
- t_0 die Grundzeit eines Relais in Sekunden,
- c die Neigung (Steilheit) der Kennlinie in s/Ω,
- Z_2 die Sekundärimpedanz in Ohm,

- X_2 die Sekundärreaktanz in Ohm,
 R_2 die Sekundärresistenz in Ohm,
 $c \cdot Z_2$ die widerstandsabhängige Zeit in Sekunden.

Die stetigen Zeitkennlinien werden zuweilen im Endbereich gebrochen (Abb. 81), um die Auslösezeiten bei sehr großen Widerstandswerten zu begrenzen. Diese Grenzzeiten sind meist einstellbar und können daher für Staffelungen der Reservezeit mitbenutzt werden.

Die Auslösezeiten der Distanzrelais sind je nach der Ausführung des Meßgliedes auch in geringem Maße vom Strom und teilweise auch vom Phasenwinkel zwischen Strom und Spannung abhängig. Der Verlauf der Zeitkennlinien eines Relais kann daher bei einer bestimmten Einstellung nicht durch einen einzigen Linienzug, sondern nur durch eine Kurvenschar dargestellt werden. Einzelne Zeitkennlinien der Kurvenschar können sich dabei sogar überschneiden¹⁾. Auch die Grundzeit kann mehr oder weniger stromabhängig sein.

In Abb. 82 ist die Auslösezeit der Distanzrelais der beiden Enden einer vom Kurzschluß betroffenen Leitung über die ganze Leitungsstrecke hinweg dargestellt. Darin ist die Grundzeit t_0 mit 0,5 s und die Staffelzeit t_2 ebenfalls mit 0,5 s angenommen.

Laufen die Relaisätze an beiden Enden der zu schützenden Leitungsstrecke infolge unsymmetrischer Lage des Fehlers zum Kraftwerk

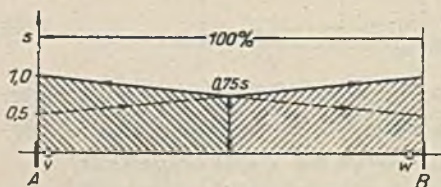


Abb. 82. Kennlinie der resultierenden Auslösezeit von Distanzrelais mit stetigen Zeitkennlinien für eine Leitungsstrecke. Grundzeit $t_0 = 0,5$ s; Staffelzeit $t_1 = 0,5$ s.

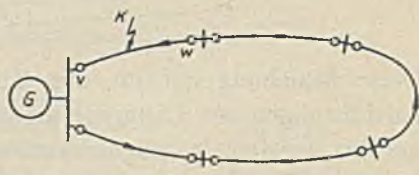


Abb. 83. Ringnetz mit unsymmetrisch gelagertem Kurzschluß K zur Stromquelle. Die Relais v und w lösen nacheinander aus (Addition der Auslösezeiten!).

nicht gleichzeitig, sondern nacheinander an, so addieren sich ihre Auslösezeiten, zuzüglich der Ausschaltzeit des zuerst auslösenden Schalters (vergleiche Abb. 83). Man hat es hier mit der sogenannten Addition der Auslösezeiten zu tun, die bei nahezu allen Schutzsystemen vorkommt.

¹⁾ M. Walter, Der Selektivschutz nach dem Widerstandsprinzip, R. Oldenbourg, München 1933, S. 64 und 65.

Die Staffelzeit beträgt im allgemeinen 0,4 bis 1 s. Diese Werte sind durch die Ausschaltzeiten der Schalter (Eigenzeit + Lichtbogendauer) und die Zeitfehler bzw. Zeitstreuung der Relais bedingt.

Weichen die sekundären Widerstände der zu schützenden Anlageteile eines Netzes in ihrer Größe stark voneinander ab, so empfiehlt es sich, die Zeitkennlinien der Relais mit unterschiedlicher Neigung auszulegen, wobei die erforderliche Zeitstaffelung gewahrt werden muß (Abb. 81). In engvermaschten Netzen genügt unter Umständen trotz stark in Widerstand oder Länge voneinander abweichender Leitungsstrecken eine Neigung der Zeitkennlinien, weil hier in den gesunden Leitungsstrecken nur je ein Teil des Kurzschlußstromes fließt und weil die Sekundärimpedanzen infolge ihrer umgekehrten Proportionalität zu den Strömen sich selbsttätig erhöhen. Je stärker ein Netz vermascht ist, desto größer sind die Unterschiede zwischen den Sekundärimpedanzen, die die Relais an den kranken und gesunden Leitungsstrecken messen, und folglich auch die Staffelzeiten¹⁾.

b) Stufenförmige Zeitkennlinien

Bei den Distanzrelais mit Stufen-Zeitkennlinien²⁾ wachsen die Ablaufzeiten nicht stetig mit dem Schein- oder Blindwiderstand der Kurzschlußschleife an, sondern stufenförmig (vergleiche Abb. 80b). Dadurch ergeben sich für den größten Teil einer zu schützenden Leitungsstrecke kürzere Auslösezeiten. Die Stufen-Zeitkennlinien werden gewöhnlich so ausgelegt, daß die Relais bei Fehlern innerhalb 80 bis 90% der zu schützenden Leitungsstrecke (1. Zone) mit der Laufzeit der ersten Stufe, innerhalb des Restes dieser Leitungsstrecke und etwa der Hälfte der angrenzenden Leitungsstrecke (2. Zone) mit der Laufzeit der zweiten Stufe arbeiten. Für den Fall, daß in der folgenden Station (B) das zuständige Distanzrelais oder der zu ihm gehörige Leistungsschalter versagen, ist noch eine dritte, die Reservezeitstufe vorgesehen (End- oder Grenzzeit).

Im Beispiel der Abb. 84 ist angenommen, daß die Leitungsstrecke zwischen den Stationen C und D in D offen sei, so daß eine Stromliefe-

¹⁾ M. Walter, Der Selektivschutz nach dem Widerstandsprinzip, R. Oldenbourg, München 1933, S. 68 bis 70.

²⁾ Stufen-Distanzrelais. Solche Distanzrelais sowie diejenigen mit gemischten Zeitkennlinien (Seite 132) setzen sich ähnlich dem in Abb. 79 dargestellten Distanzrelais mit stetiger Zeitkennlinie im wesentlichen aus Anregegliedern, Ablauf-(Meß-)gliedern und Richtungsgliedern zusammen.

nung nur über A nach B erfolgen kann. Tritt zwischen der Station A und dem Leitungspunkt P_1 ein Kurzschluß auf, so löst das Distanzrelais in A mit der Zeit t_1 aus. Liegt hingegen der Fehler zwischen P_1 und P_2 , so arbeitet das Relais A mit der Zeit t_2 . Bei einem Fehler zwischen B und P_2 kommt allerdings dem Relais in A das zuständige Relais in B mit der kürzeren Zeit t_1 zuvor, wenn in B nicht durch irgend einen Umstand die Aus-

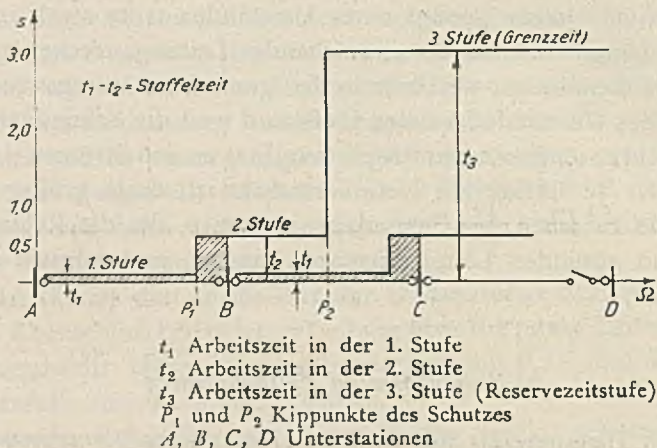


Abb. 84. Stufenförmige Zeitkennlinien

lösung ausbleibt. Versagt dagegen bei einem Fehler zwischen P_2 und C das zuständige Relais oder der Leistungsschalter in B , so veranlaßt das Relais in A die Abschaltung in A mit der Grenzzeit t_3 .

Wäre der Schalter in D geschlossen und würde die Stromlieferung lediglich über D nach C, B und A erfolgen, so bekäme man dasselbe Bild der aufgezeichneten Zeitkennlinien mit dem Unterschied, daß die Stufenzeiten von D nach A zunehmen.

Die Auslösezeit t_1 wird im allgemeinen nicht für die ganze Leitungstrecke $A-B$ gewählt, weil mangels genauer Kenntnis des tatsächlichen Leitungswiderstandes und infolge Streuung der Relaismeßglieder die Auslösung in A und B unter Umständen gleichzeitig erfolgen kann. In Sonderfällen (z. B. bei Gewitter) kann der Bereich der ersten Zeitstufe bis über die angrenzende Station hinaus, beispielsweise auf 115% der zu schützenden Leitungstrecke, verlängert werden (Abb. 84a). Durch eine solche Maßnahme wird zwar die Selektivität bei Kurzschlüssen in der

Nähe der Stationen beeinträchtigt, dafür werden aber die Fehler über die ganze Länge der einzelnen Leitungsstrecken und an den Sammelschienen der Stationen sehr rasch abgeschaltet. Bei Doppelleitungen mit zweiseitiger Einspeisung vermindert sich dabei die Gefahrenzone wesentlich gegenüber der bei Einfachleitungen (auf etwa ein Drittel!).

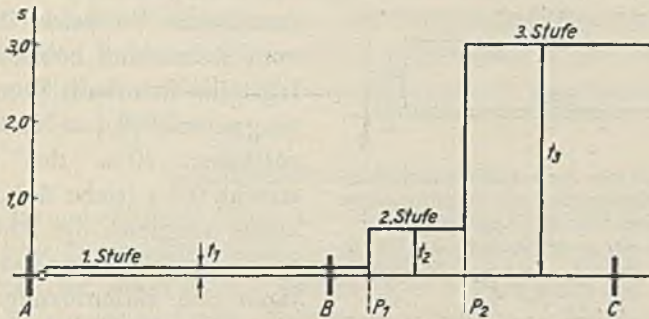


Abb. 84a. Stufenförmige Zeitkennlinie, bei der sich die erste Zeitstufe auf etwa 115% des zu schützenden Leitungsabschnittes $A-B$ erstreckt. Diese „Weiterstufung“ kann in gleicher Weise auch bei Distanzrelais mit gemischten Zeitkennlinien (Abb. 86) durchgeführt werden.

Distanzrelais mit stufenförmiger Zeitkennlinie werden zwecks besserer Anpassung an stark unterschiedliche Leitungslängen in jüngster Zeit sogar mit vier oder fünf Zeitstufen ausgeführt. Die Relais weisen entweder soviel Meßglieder (Abb. 46) auf, wie Zeitstufen gefordert werden¹⁾, oder haben nur ein Meßglied, dessen Meßbereich vom Zeitwerk stufenweise erweitert wird.

Das erste Meßglied arbeitet bei Fehlern in der ersten Zone mit etwa 0,02 bis 0,1 s, das zweite bei Fehlern in der zweiten Zone mit rund 0,4 bis 1 s. Dem zweiten sowie den weiteren Meßgliedern ist für die Verzögerung stets ein einstellbares Zeitwerk zugeordnet.

Die Betätigung des Stufenzeitwerkes sowie des Spannungskreises des Richtungsgliedes erfolgt gewöhnlich durch zwei oder mehrere Anreglieder, die man beim Distanzschutz für Höchstspannungsanlagen in der Regel als Unterimpedanz-Anreglieder, in Mittelspannungsnetzen dagegen meist als Überstrom-Anreglieder wählt. In Sonderfällen werden

¹⁾ Bei den Unterimpedanz-Kippgliedern, die zur Messung dienen, wird stets ein fester Wert der Kippimpedanz angestrebt. Von den Unterimpedanz-Anregliedern fordert man dagegen in der Regel Ansprechwerte (Kippwerte), die von der Stromstärke abhängig sind (vgl. z. B. die Ansprechkurve a in Abb. 50).

beide Anregearten auch gleichzeitig vorgesehen. Diese Maßnahme verbürgt bei ausreichender Stromstärke kürzere Ansprech- bzw. Auslösezeiten.

Sind Stufen-Distanzrelais für eine Ablaufzeit in der ersten Stufe von 0,1 s und für eine Staffelzeit von 0,5 s eingestellt, so beträgt die

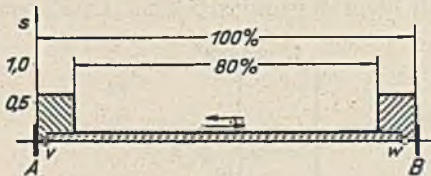


Abb. 85. Kennlinie der resultierenden Auslösezeit von Distanzrelais mit stufenförmigen Zeitkennlinien für eine Leitungsstrecke. Arbeitszeit in der ersten Stufe $t_1 = 0,1$ s; in der zweiten Stufe $t_2 = 0,6$ s. Staffelzeit $t_2 - t_1 = 0,5$ s.

Auslösezeit für beide Enden des vom Kurzschluß betroffenen Anlageteiles innerhalb 80% der Leitungsstrecke 0,1 s und für die restlichen 20% der Leitungsstrecke 0,6 s (siehe Abb. 85). Aus einem Vergleich der Abb. 82 und 85 ist der Zeitgewinn zwischen stetigen und stufenförmigen Kennlinien klar ersichtlich.

Bezüglich der Addition der Auslösezeiten gilt hier dasselbe wie bei den Distanzrelais mit stetigen Zeitkennlinien.

c) Gemischte Zeitkennlinien

Distanzrelais mit gemischten Zeitkennlinien stellen ein Mittelding zwischen Distanzrelais mit stetigen und stufenförmigen Zeitkennlinien dar (Abb. 80c). Gemischte Zeitkennlinien werden bei neueren Relaisausfüh-

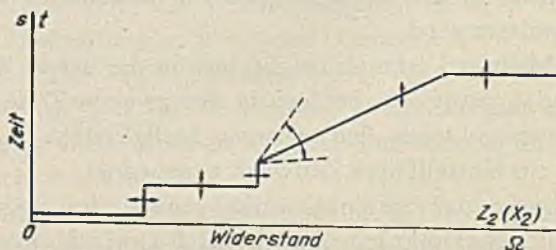


Abb. 86. Gemischte (doppelt gebrochene) Zeitkennlinie eines Distanzrelais. Die Pfeile besagen, in welcher Richtung die Zeitkennlinie durch Einstellungen im Relais geändert werden kann.

rungen sogar doppelt gebrochen (Abb. 86). Relais mit derartigen Zeitkennlinien sowie Relais mit vier oder fünf Zeitstufen ermöglichen eine sehr sichere Auswahl der gestörten Anlageteile, denn sie sind, wie bei-

spielsweise die Abb. 86 durch Pfeile zeigt, in jeder Richtung leicht einstellbar¹).

Stetige Zeitkennlinien lassen eine ungefähre Fehlerortermittlung zu, wenn die Relais mit Schleppzeigern oder Schlepptrommeln ausgerüstet sind²). Bei Relais mit stufenförmigen sowie gemischten Zeitkennlinien kann an Hand der Fallklappen an den Meßgliedern nur die Zone festgestellt werden, in der der Kurzschluß aufgetreten ist; die Fehlerortmessung kann hier neuerdings mit einem Zusatzgerät durchgeführt werden (siehe auch Seite 284).

4. Distanzschutz-Schaltungen

Die Grundschialtung eines einzelnen Distanzrelais ist in Abb. 79 gezeigt. Eine Distanzschutzeinrichtung für Drehstrom besteht vielfach aus zwei, drei oder sogar sechs³) gleichartigen Relais oder nur aus einem Relais, das durch geeignete Zusammenstellung von Relaisgliedern und durch entsprechende Wahl- bzw. Umschalteinrichtungen gebildet wird (Verbundrelais). Die Schaltungen für ein Drehstromende heißen nach der Anzahl der gleichartigen Distanzrelais Ein-, Zwei-, Drei- oder Sechrelaisschaltungen. Die Art und Weise, wie einem Relaisatz die sekundären Spannungen und Ströme zugeführt werden, hat hierbei eine viel größere Bedeutung als bei der einfachen Prinzipschialtung nach Abb. 79; denn durch die vollständigen Schaltungen müssen die Netzfehler (Kurzschlüsse und Doppelerdschlüsse) nicht nur richtig gekennzeichnet (Anregung), sondern auch meßtechnisch richtig erfaßt werden.

Dem Spannungspfad eines Distanzrelais werden entweder die Dreiecksspannung, Sternspannung, Leitererdspannung oder Teilbeträge dieser Spannungen zugeführt. Der Strompfad wird entweder mit Leiterstrom, mit Teilbeträgen von diesem oder mit beliebig zusammengesetzten Strömen beschickt. Außerdem benutzt man oft den Summenstrom der drei Leiter oder die Sternpunkterdspannung für Umschaltungen, damit eine richtige Messung der Fehlerschleife bei Doppelerdschluß zustande kommt (vgl. die Abb. 87, 88 und 90).

Die Spannungen und Ströme werden einem Relaisatz grundsätzlich so zugeführt, daß bei allen Fehlerarten distanzgetreu gemessen wird, d. h.

¹) H. Neugebauer, Siemens-Z. 20 (1936) S. 272 und 1938, S. 25; G. Walther, AEG-Mitteilungen (1938) S. 99.

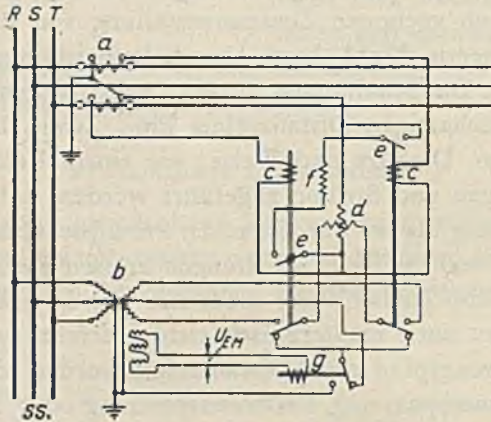
²) M. Walter, ETZ 52 (1931) S. 1056.

³) Amerikanische Praxis.

daß der Relaisatz bei allen Kurzschlußarten und Doppelerdschlüssen bei gleicher Fehlerentfernung die gleiche Auslösezeit aufweist¹⁾. Das distanzgetreue Arbeiten wird besonders von den Distanzrelais mit stufenförmigen oder gemischten Zeitkennlinien gefordert. Dabei ist es gleichgültig, ob der Relaisatz den Widerstand einer Schleife oder einer halben Schleife (d. h. eines Leiters) mißt.

In Deutschland²⁾ verwendet man Drei-, Zwei- und Einrelaisschaltungen. Die beiden letzten sind Sparschaltungen. Bei ihnen kann nämlich die Anzahl der Ablauf- und Richtungsglieder gegenüber den Dreirelaischaltungen wesentlich vermindert werden. Allerdings sind dann gewöhnlich mehr Kontakte mit gegenseitiger Abhängigkeit erforderlich.

Da die Ein-Relaisschaltungen seit einigen Jahren immer mehr angewendet werden — zum mindesten in Mittel- und Hochspannungsnetzen —, soll hier auf sie etwas näher eingegangen werden, zumal sich dabei



- a Zwei Stromwandler in Differenzschaltung
- b Drei Einphasen-Spannungswandler mit Hilfswicklung zur Gewinnung der Sternpunkterdspannung
- c Zwei Anregeglieder
- d Ablauf- und Richtungsglied
- e Stromkontakte
- f Stromdrossel
- g Spannungs-Umschaltrelais
- U_{EM} Sternpunkterdspannung

Abb. 87. Einrelaisschaltung (Einsystemschaltung) für ein Drehstromende (mit Halbierung des Stromes).

¹⁾ Dies ist bei älteren Schaltungen nicht immer der Fall.

²⁾ In USA und in Frankreich werden Dreirelaischaltungen, u. U. sogar Sechstreilaischaltungen bevorzugt; im wesentlichen deswegen, weil dort die Kurzerdung des Netzsternpunktes vorherrscht.

leicht zeigen läßt, wie mit der Stromdifferenzschaltung sowie mit Umschaltvorrichtungen das distanzgetreue Messen der Widerstände in den Fehlerschleifen bei Kurzschluß und Doppelerdschluß zustande kommt.

Die Schaltung nach Abb. 87 sieht z. B. für alle in der Zusammenstellung I aufgezählten Fehlerarten die Messung von Impedanzwerten vor, die der Schleifenimpedanz bei zweipoligem satten Kurzschluß entsprechen. Hierzu werden die zwei Stromwandler a auf der Sekundärseite so geschaltet, daß dem Ablauf- und Richtungsglied d in der Brücke der Schaltung die Differenz der entsprechenden Leiterströme bzw. ein ihr verhältnisgleicher Strom zugeführt wird. Die Anregeglieder c werden dagegen nur von den zugehörigen Leiterströmen durchflossen. Das Zuschalten der richtigen Dreiecksspannung an d wird bei zwei- und dreipoligen Kurzschlüssen durch die Anregeglieder bewerkstelligt. Bei Doppelerdschlüssen läßt man an d die betreffende Leitererdspannung U_{ER} oder U_{ET} durch ein Hilfsrelais (g) legen, das von der Sternpunktterdspannung U_{EM} oder vom Summenstrom der drei Leiter erregt wird.

Damit auch bei den Kurzschlußarten nach 3 und 4 gemäß Zusammenstellung I die Widerstandsmessung distanzgetreu erfolgt, wird dem Meßsystem d bei diesen Fehlerarten nur der jeweilige halbe Brückenstrom zugeführt. Die von den Anregegliedern c zu betätigenden Kontakte e schalten dann nämlich die Drosselspule f parallel zur Stromspule des Systems d . Die Widerstände der Drosselspule und der Stromspule von d sind dabei nach Größe und Phase gleich.

Da bei dieser Schaltung die gemessenen Widerstandswerte der Kurzschlußschleifen 1...4 für dieselbe Fehlerentfernung gleich groß sind, so ergeben sich bei allen Kurzschlüssen auch gleiche Relaisauslösezeiten.

Die Widerstandswerte der Doppelerdschlußschleifen: Leiter—Erde nach 5, 6 und 7 der Zusammenstellung I haben bei Doppelerdschluß mit einseitiger Speisung praktisch die gleiche Größe wie die der vier Kurzschlußschleifen. Durch Einführung des Erdstromes (Summenstromes I_M) in die Messung, z. B. mit Hilfe eines Zwischenwandlers, können auch bei Doppelerdschlüssen mit zweiseitiger Speisung etwa dieselben Impedanzwerte wie bei den Kurzschlüssen erfaßt werden. Nimmt man nämlich den Strom in der Erde bei Doppelerdschluß, beispielsweise zwischen den Leitern R und S , mit

$$I_E = I_R + I_S$$

an (vgl. auch Abb. 15), so ist die entsprechende Leitererdspannung

$$U_{ER} = I_R \cdot Z_R + I_E \cdot Z_E$$

und der Scheinwiderstand der Schleife: Leiter—Erde

$$\frac{U_{ER}}{I_R} = Z_R + \frac{I_E}{I_R} \cdot Z_E$$

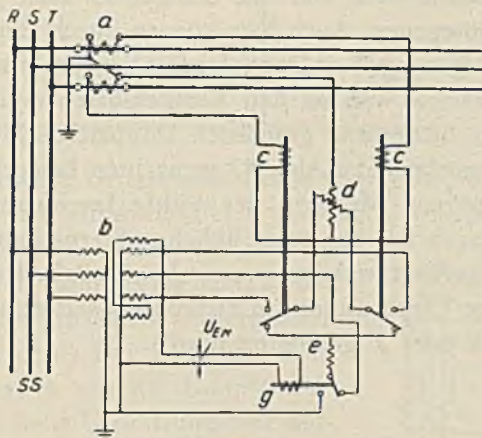
Es wird allgemein angenommen, daß die „Erdimpedanz“ $Z_E \approx Z_R$ bzw. Z_T ist.

Zusammenstellung I

Fehler Nr.	Kurzschluß zwischen den Leitern	Gemessener Scheinwiderstand (Schleifenimpedanz)
1	SR	$\frac{U_{SR}}{I_R} = 2 \cdot Z_R$
2	TS	$\frac{U_{TS}}{I_T} = 2 \cdot Z_T$
3	RT	$\frac{U_{RT}}{2 \cdot \frac{I_R}{2}} = 2 \cdot Z_R$
4	RST	$\frac{U_{RT}}{\frac{I_R \Delta I_T}{2}} = \frac{\sqrt{3} \cdot U_R}{\sqrt{3} \cdot I_R} = 2 \cdot Z_R$

Fehler Nr.	Doppelerdschluß zwischen den Leitern	Gemessener Scheinwiderstand (Schleifenimpedanz)
5	SR	$\frac{U_{ER}}{I_R} = Z_R + \frac{I_E}{I_R} \cdot Z_E \approx 2 \cdot Z_R$
6	TS	$\frac{U_{ET}}{I_T} = Z_T + \frac{I_E}{I_T} \cdot Z_E \approx 2 \cdot Z_T$
7	RT	$\frac{U_{ER}}{I_R} = Z_R + \frac{I_E}{I_R} \cdot Z_E \approx 2 \cdot Z_R$

Besondere Beachtung erfordert der zweiseitig gespeiste Doppelerdschluß RT nach 7 der Zusammenstellung I. In diesem Fall würden bei der Schaltung nach Abb. 87 beide Überstrommagnete c ansprechen und das Meßglied d an die Dreiecksspannung U_{RT} anstatt an die Leitererdspannung U_{ER} legen. Außerdem würde infolge der Differenzschaltung der beiden Stromwandler a auch der Strom des Leiters T in die Messung miteingehen und damit die Distanzmessung fälschen. Da bei



- a* Zwei Stromwandler in Differenzschaltung
- b* Fünfschenkelspannungswandler mit Hilfswicklung zur Gewinnung der Sternpunkterdspannung
- c* Zwei Überstrom-Anreeglieder
- d* Ablauf- und Richtungsglied
- e* Spannungsdrossel
- g* Spannungs-Umschaltrelais
- U_{EM} Sternpunkterdspannung

Abb. 88. Einrelaisschaltung (Einsystemschialtung) für ein Drehstromende (mit Halbierung der Spannung).

allen zwischen den beiden Erdschlußpunkten liegenden Distanzrelais die Ströme I_R und I_T im Gegensatz zum zueipoligen Kurzschluß gleiche Richtung haben (vgl. Abb. 15), wird der Scheinwiderstand zu hoch gemessen. Will man nun im Fall des beiderseitig gespeisten Doppelerdschlusses zwischen den Leitern RT die Distanzmessung verbessern, so muß die Schaltung nach Abb. 87 so erweitert werden, daß das Relais die in der Zusammenstellung I für den Fall 7 angegebenen Meßgrößen er-

faßt. Hierzu sind zusätzliche Umschaltungen im Strom- und Spannungspfad erforderlich.

Bei der Schaltung nach Abb. 88 mißt das Impedanzrelais in allen Kurzschlußfällen die halben Schleifenimpedanzwerte (Streckenimpedanzwerte, d. h. den Scheinwiderstand eines Leiters). Zu diesem Zweck wird bei den Fehlerfällen 1 und 2 (vgl. die Zusammenstellung II) der Spannungsspule des Meßgliedes d ein gleichgroßer Widerstand e vorgeschaltet. Das Ablaufglied mißt dadurch in allen vier Kurzschlußfällen gleichgroße Impedanzwerte und hat demgemäß auch gleiche bzw. distanzgetreue Auslösezeiten. Auch hier können durch Einführen des Erdstromes in die Messung bei Doppelerdschluß praktisch die gleichen Streckenimpedanzwerte wie bei den Kurzschlüssen erzielt werden. Für die Erfassung des beiderseits gespeisten Doppelerdschlusses RT gelten sinngemäß die vorstehend zu Abb. 87 gemachten Bemerkungen.

Die distanzgetreue Messung der Schleifenimpedanz kann mit gleichem Erfolg auch bei der sonst üblichen Sternschaltung der Stromwandler a durchgeführt werden, wenn das Meßglied d jeweils durch unterbrechungslose Umschaltung im Stromkreis selbsttätig an den erforderlichen Leiter R oder T geschaltet wird¹⁾.

Zusammenstellung II

Fehler Nr.	Kurzschluß zwischen den Leitern	Gemessener Scheinwiderstand (Streckenimpedanz)
1	SR	$\frac{1/2 U_{SR}}{I_R} = Z_R$
2	TS	$\frac{1/2 U_{TS}}{I_T} = Z_T$
3	RT	$\frac{U_{RT}}{2 I_R} = Z_R$
4	RST	$\frac{U_{RT}}{I_{RT}} = Z_R$

¹⁾ Ausführliche Schaltung siehe in M. Schleicher, Die moderne Selektivschutztechnik, J. Springer, Berlin 1936, S. 207.

Fehler Nr.	Doppelerdschluß zwischen den Leitern	Gemessener Scheinwiderstand (Streckenimpedanz)
5	SR	$\frac{1/2 U_{ER}}{I_R} = \frac{Z_R + \frac{I_E}{I_R} \cdot Z_E}{2} \approx Z_R$
6	TS	$\frac{1/2 U_{ET}}{I_T} = \frac{Z_T + \frac{I_E}{I_T} \cdot Z_E}{2} \approx Z_T$
7	RT	$\frac{1/2 U_{ER}}{I_R} = \frac{Z_R + \frac{I_E}{I_R} \cdot Z_E}{2} \approx Z_R$

Die gewünschte Differenzschaltung nach Abb. 87 und 88 kann bei Sternschaltung der Stromwandler a aber auch mittels eines zweipoligen Zwischenwandlers (vgl. Abb. 89) gebildet werden. Dadurch kann gegebenenfalls der Summenstrom der gleichen Wandlergruppe entnommen werden¹⁾. Der Zwischenwandler a' muß ähnlich wie die Hauptstromwandler a eine hohe Überstromziffer aufweisen, damit der Sekundärstrom dem Distanzrelais D zur richtigen Quotientenbildung $\frac{U}{I_2}$ verhältnisgleich dem Primärstrom zugeführt wird.

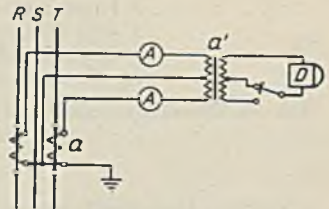
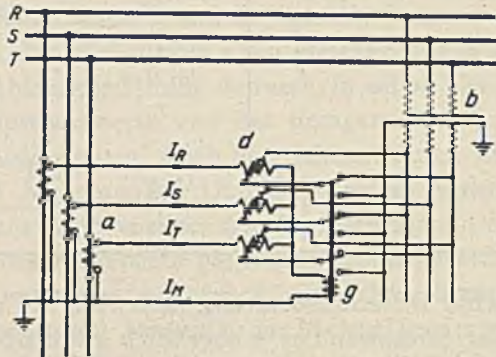


Abb. 89. Zwischenstromwandler a' zur Bildung der Differenzschaltung für Einrelaisschaltungen.

Für die selektive Erfassung der Doppelerdschlüsse muß an Stelle der Dreiecksspannung stets die entsprechende Leitererdspannung herangezogen (vgl. die Abb. 87, 88 und 90) werden, da diese als distanzgetreue Spannung längs des Strompfades einen steileren Anstieg bzw. zwischen den Stationen größere Spannungsunterschiede ergibt (vgl. die Abb. 13 und 15). Das Zuschalten der Leitererdspannung erfolgt, wie schon erwähnt, gewöhnlich durch ein Hilfsrelais, das entweder von der Sternpunkterdspannung, oder aber vom Summenstrom der Drehstromleitung erregt wird. Zur Gewinnung der Leitererdspannung und

¹⁾ Es muß dann allerdings auch im dritten Leiter ein Stromwandler eingebaut sein.

der Sternpunkterdspannung sind Erdungs-Spannungswandler erforderlich (vgl. Abb. 87 und 88). Den Summenstrom gewinnt man dagegen durch die Sternschaltung (Summenschaltung) von drei Stromwandlern (Abb. 90 und 114).



- a* drei Stromwandler
- b* Fünfschenkelspannungswandler ohne Hilfswicklung
- d* drei Distanzrelais
- g* Spannungs-Umschaltnrelais
- I_M Summenstrom (Sternpunkteleiterstrom)

Abb. 90. Dreirelaischaltung (Dreisystemschaltung) mit Umschalteneinrichtung für Doppelerdschlußerfassung (Prinzipschaltung).

Die Umschaltung durch den Summenstrom wird bevorzugt, weil durch sie lediglich die Distanzrelais zwischen den beiden Erdschlußstellen an die Leitererdspannung gelegt werden und nicht alle Distanzrelais des Netzes, wie dies bei Benutzung der Sternpunkterdspannung der Fall ist; denn bei Doppelerdschluß tritt die Sternpunkterdspannung im gesamten galvanisch verbundenen Netz auf, während ein ausreichender Summenstrom nur auf den Leitungsstrecken zustandekommt, die die beiden Erdschlußstellen verbinden.

Die Doppelerdschluß-Schaltungen werden im allgemeinen so ausgebildet, daß nur eine von den beiden Erdschlußstellen abgetrennt wird, die andere dagegen bestehen bleibt (Beseitigung des Kurzschlußzustandes!). Beim Abschalten beider Erdschlußstellen kämen nämlich meist mehrere Stationen für längere Zeit außer Betrieb. Das Abtrennen nur einer Erdschlußstelle wird dadurch erreicht, daß die Leitererdspannung lediglich mit dem Fehlerstrom eines bevorzugten Leiters (gewöhnlich *R* oder *T*) in Beziehung gebracht wird. Bei den Zwei- und Dreirelais-

schaltungen wird dem Fehlerstrom des anderen Leiters meist eine höhere Spannung (Dreieckspannung) für die Quotientenbildung bereitgestellt, so daß das zugehörige Ablaufglied nicht oder verspätet auslöst. Es gibt auch Schaltungen, bei denen für die Auswahl der einen Erdschlußstelle anstatt der Spannungserhöhung eine Stromverminderung vorgenommen wird; zuweilen wird auch lediglich die Auslösung gesperrt.

Bei den Distanzschutzschaltungen mit zwei Stromwandlern ist darauf zu achten, daß diese in galvanisch verbundenen Netzen stets in dieselben Leiter, beispielsweise in R und T , eingebaut werden (wegen der Erfassung der Doppelerdschlüsse!).

Die Schaltungen des Distanzschutzes werden von den Lieferfirmen in den verschiedensten Formen ausgeführt¹⁾.

Die Wahl einer Distanzschutzschaltung für ein bestimmtes Netz wird einerseits durch die Art der Behandlung des Systemsternpunktes (ob kurze oder nicht kurze Erdung), andererseits durch die Beschaffenheit des Netzes selbst beeinflusst.

5. Anwendung und Wahl der Distanzrelais

Distanzrelais dienen vorwiegend zum Schutze der Anlageteile gegen die Auswirkungen von Kurzschlüssen. — Doppelerdschlüsse werden durch sie, wie bereits ausgeführt, ebenfalls erfaßt. Befinden sich die zwei Erdschlußstellen auf einer Leitung zwischen zwei Nachbarstationen (Gesellschaftserdschluß!), so wird die gestörte Leitung von den Relais genau so wie beim zweipoligen Kurzschluß abgeschaltet. Dasselbe gilt allgemein auch für zwei- und dreipolige Erdkurzschlüsse bzw. für Kurzschlüsse mit Erdberührung (s. Seite 40). Sind die Fehlerstellen hingegen über zwei oder mehrere hintereinanderliegende Stationen verteilt (Doppelerdschluß), so wird gewöhnlich nur der eine Erdschluß abgetrennt (Beseitigung des Kurzschlußzustandes!), während der andere Erdschluß weiter bestehen bleibt. — Erdschlüsse schalten die Distanzrelais in Netzen mit nicht kurzer Sternpunkterdung in der Regel nicht ab. In Netzen mit kurzer Sternpunkterdung stellt dagegen jede Erdberührung eines Phasenleiters einen einpoligen Kurzschluß dar, der von den Distanzrelais erfaßt wird.

¹⁾ M. Schleicher, Die moderne Selektivschutztechnik, J. Springer, Berlin 1936, S. 249 bis 270; M. Walter, Der Selektivschutz nach dem Widerstandsprinzip, R. Oldenbourg, München 1933, S. 95 bis 118; A. Thewalt, Siemens-Z. 18 (1938) S. 355.

Distanzrelais schalten den gestörten Netzteil in verhältnismäßig kurzer Zeit (0,1 bis 2 s) selektiv ab, und zwar unabhängig von der Netzgestaltung, von der Anzahl der Stromquellen bzw. Einspeisungen und von der Größe des Kurzschlußstromes. Man braucht auf die Distanzrelais bei Netzgestaltänderungen, die durch Betriebsschaltungen entstehen, in den meisten Fällen keine Rücksicht zu nehmen, da eine Änderung der bestehenden Relaiseinstellung, die sich grundsätzlich auf einzelne Leitungstrecken bezieht, nicht erforderlich ist.

Die Anwendung des Distanzschutzes ist in Kabelnetzen, Freileitungsnetzen und gemischten Netzen¹⁾ am Platze:

- a) bei Einfachleitungen mit wechselseitiger oder beiderseitiger Einspeisung,
- β) bei zwei oder mehreren parallelen Leitungen mit einseitiger, wechselseitiger oder beiderseitiger Einspeisung,
- γ) bei Ringleitungen mit einer oder mehreren Einspeisungen,
- δ) bei vermaschten sowie verbundgespeisten Netzgebilden.

Transformatoren und Generatoren können ebenfalls durch Distanzschutz geschützt werden (s. Seite 217 und 236).

Die wesentlichen Eigenschaften des Distanzschutzes sind:

- a) Selektive Abtrennung der von Fehlern betroffenen Anlageteile.
- β) Kurze und praktisch von der Höhe des Fehlerstromes unabhängige Auslösezeiten.
- γ) Beim Versagen eines Relaisatzes oder eines Schalters des gestörten Anlageteiles veranlaßt der Relaisatz des in Richtung zur Stromquelle vorgeordneten gesunden Anlageteiles eine selektive Auslösung durch seinen Schalter entsprechend der vorgegebenen Staffelzeit. Die Distanzrelais bieten also auch einen selektiven Reserveschutz.
- δ) Sammelschienen werden von den Distanzrelais der anliegenden Leitungen selektiv mitgeschützt.
- ε) Hilfsleitungen zwischen den Relais an beiden Enden des zu schützenden Anlageteiles fallen fort.
- ζ) Beim Zu- und Abschalten von Anlageteilen braucht im allgemeinen auf die Relais keine Rücksicht genommen zu werden.
- η) Ungefähre Fehlerortbestimmung auf Grund der widerstandsabhängigen Auslösezeiten (vgl. Seite 133).

¹⁾ Das sind Netze, in denen Kabel und Freileitungen galvanisch miteinander verbunden sind.

Die weitgehende Vermaschung von Netzen sowie auch der Verbundbetrieb solcher Netze können meist erst bei Anordnung eines Distanzschutzes durchgeführt werden.

Für die Wahl der Art des Distanzschutzes, d. h. ob in einem bestimmten Netz Impedanz-, Reaktanz- oder Resistanzrelais einzubauen sind, mögen nachstehende Ausführungen als Grundlage dienen.

Impedanzrelais lassen sich in Kabel-, Freileitungs- und gemischten Netzen verwenden. Sie sind einfach aufgebaut und ergeben übersichtliche Innen- und Außenschaltungen. Da die Arbeitsweise und Auslösezeit der Impedanzrelais vom Phasenwinkel zwischen Kurzschlußstrom und Kurz-

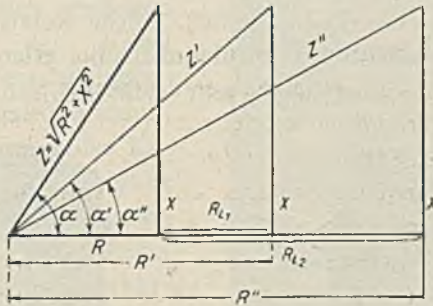


Abb. 91. Einfluß des Lichtbogenwiderstandes (R_{L_1} und R_{L_2}) auf die Größe des Scheinwiderstandes einer Kurzschlußschleife ($Z < Z' < Z''$).

schlußspannung unabhängig oder nahezu unabhängig sind, arbeiten sie auch einwandfrei, wenn in die Kabel oder Freileitungen Kurzschlußdrosselspulen eingebaut sind. Gewisse Schwierigkeiten bereiten allerdings die Lichtbogenwiderstände in Freileitungsnetzen, die die Wirkkomponente im Scheinwiderstand der Kurzschlußschleifen vergrößern (Abb. 91) und dadurch die Auslösezeiten der Impedanzrelais u. U. beträchtlich verlängern können.

In Mittelspannungsnetzen mit kleinen Leiterabständen und großen Kurzschlußströmen ist dieser Einfluß gewöhnlich von geringer Bedeutung. In Hoch- und Höchstspannungsnetzen ist er jedoch nicht zu vernachlässigen, weil die Lichtbogen infolge der großen Leiterabstände im allgemeinen viel länger sind und besonders im Schwachlastbetrieb beträchtliche Widerstandswerte haben können. Durch sehr kurze Auslösezeiten der Relais (etwa 0,1 bis 0,3 s) wird lediglich das Vergrößern des Lichtbogenwiderstandes in Abhängigkeit von der Zeit unter-

bunden, da dem Lichtbogen die Möglichkeit genommen ist, sich zu verlängern bzw. auszuweiten (vgl. auch die Ausführungen auf Seite 41 sowie die Abb. 12). Der Anfangslichtbogenwiderstand ist dagegen nicht fortzudenken. Man ermittelt ihn aus Gl. (2) auf Seite 42, in die man die kürzeste Entfernung l zwischen den Phasenleitern oder die doppelte Länge einer Isolatorreihe einsetzt. Besonders ungünstig wirkt sich der Lichtbogenwiderstand auf die Auslösezeit der Impedanzrelais bei kurzen Leitungsstrecken aus. Er kann hier unter Umständen die Selektivität gefährden¹⁾.

Diesen Schwierigkeiten kann mit Reaktanzrelais begegnet werden, weil bei diesen der Lichtbogenwiderstand (Wirkwiderstand) in die Messung nicht oder nur zum Teil eingeht²⁾. Solche Relais erfordern allerdings Stromwandler mit kleinen Fehlwinkeln bei allen Kurzschlußströmen, lösen bei Pendelerscheinungen sehr leicht aus, falls nicht besondere

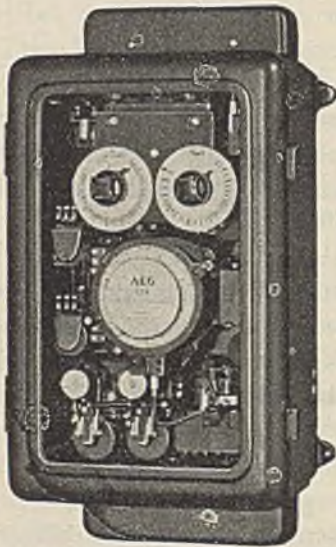


Abb. 92. Schnelldistanzrelais SD_1 der AEG in Grundform und Sparschaltung (Einsystemiger Relaisatz).

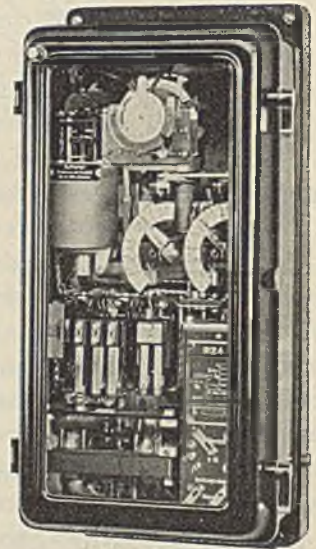


Abb. 93. Schnelldistanzrelais RZ_1 von SSW in Grundform und Sparschaltung (Einsystemiger Relaisatz). Für Höchstspannungsnetze ist das Schnelldistanzrelais RZ_{14} vorgesehen.

¹⁾ Vgl. auch H. Neugebauer, *Elektrizitätswirtschaft* 37 (1938) S. 396.

²⁾ Vgl. auch M. Schleicher, *Die moderne Selektivschutztechnik*, J. Springer, Berlin 1936, S. 129 und 130; A. Schmolz, *ETZ* 50 (1929) S. 597; H. Gutmann *ETZ* 61 (1940) S. 541.

Einrichtungen dagegen vorgesehen sind, und erfordern schließlich einen größeren Aufwand. — Der Anwendungsbereich der Reaktanzrelais ist im Vergleich zu den Impedanzrelais wesentlich kleiner. In Kabelnetzen lassen sich Reaktanzrelais wegen des geringen induktiven Blindwiderstandes der Kabel nicht verwenden. In Netzen mit unmittelbar verbundenen Kabeln und Freileitungen ist ihre Anwendung noch weniger am Platze; denn hier macht sich außer dem an sich niedrigen Blindwiderstand der Kabel noch die Tatsache sehr ungünstig bemerkbar, daß die induktiven Blindwiderstände bei Kabeln und Freileitungen von ganz verschiedener Größenordnung sind. Dazu sind in der Regel die einzelnen Kabelstrecken kürzer als die Freileitungsstrecken. In solchen Fällen lassen sich ausreichende Staffelzeiten von Schalter zu Schalter mitunter überhaupt nicht erzielen. Die Reaktanzrelais eignen sich somit nur für Freileitungsnetze. Sie wurden für Hoch- und Höchstspannungsnetze entwickelt, wo sie bis heute in geringerer Anzahl als die Impedanzrelais eingebaut sind.

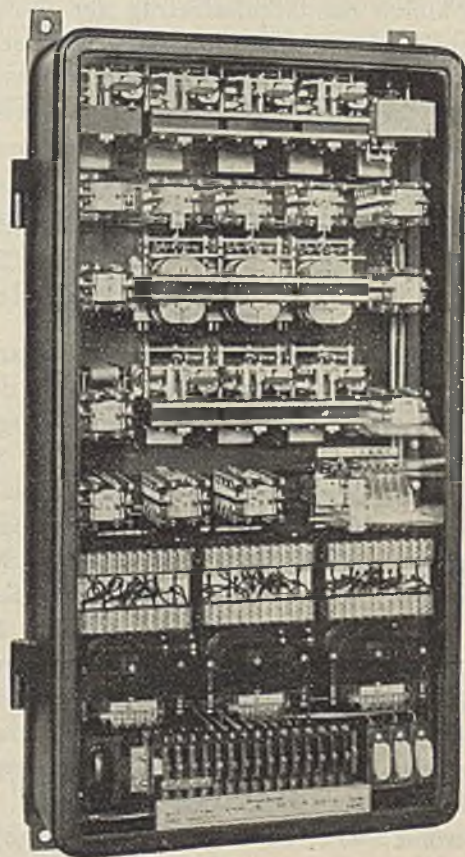


Abb. 94. Schnelldistanzrelais L_1 von BBC für Höchstspannungsnetze (Dreistufiger Relaisatz). Der einsystemige Relaisatz (Drehfeld-Schnelldistanzrelais CM) ist in der Druckschrift „BBC-S-K-39/719“ beschrieben.

Unter den Distanzrelais mit stufenförmigen und gemischten Zeitkennlinien gibt es auch Ausführungen, bei denen einige Stufen für Reaktanzmessung, die anderen für Impedanzmessung ausgelegt sind¹⁾.

¹⁾ Vgl. M. Walter, Der Selektivschutz nach dem Widerstandsprinzip, R. Oldenbourg, München 1933, S. 75; H. Neugebauer, Siemens-Z. 18 (1938) S. 25.

Resistanzrelais werden nur selten angewendet, höchstens für Kabelnetze, für die man besser die einfacheren Impedanzrelais benutzt.

Die Grenze der Anwendbarkeit des Distanzschutzes in einem Netz ist durch den Mindestbetrag der Schleifenwiderstände der Anlageteile gegeben, der durch die Meßglieder noch sicher erfaßt werden kann, um die erforderliche Zeitstaffelung zu gewährleisten. Neuzeitliche Distanzrelais arbeiten noch einwandfrei, wenn der sekundäre Schleifenwiderstand den Betrag von 0,2 Ohm nicht unterschreitet.

Die Abb. 92, 93 und 94 zeigen neuzeitliche Distanzrelais, sogenannte Schnelldistanzrelais, von drei Herstellerfirmen.

F. Strom-Vergleichsschutz

Stromvergleichsrelais sind Schutzrelais, die in Brückenschaltungen gleichartige Größen vergleichen bzw. deren Differenz bilden. Die Innen- und Außenschaltungen werden so ausgelegt, daß im ungestörten Netzbetrieb im Relaispfad praktisch kein Strom fließt. Erfolgt jedoch eine Störung, beispielsweise ein Kurzschluß¹⁾, im geschützten Anlageteil, so wird der Strom in den Relaiskreis abgedrängt, wodurch das Relais anspricht und weitere Kreise steuert, d. h. die Schalter auslöst, die Entregung der Maschine einleitet oder die Störung meldet.

Stromvergleichsrelais stellen im Prinzip unverzögerte Stromrelais dar. Ihr Ansprechstrom wird meist nur auf Bruchteile des Wandler-Nennstromes eingestellt, denn sie brauchen nicht den Betriebsstrom, sondern lediglich die Differenz der Ströme in der Schutzschaltung zu überwachen. Solche Relais vergleichen entweder die Ströme am Anfang und Ende des zu schützenden Anlageteiles, oder aber am gleichen Ende die Ströme zweier oder mehrerer Leitungen, die im Betrieb parallel geschaltet sind. Im ersten Fall handelt es sich um Längs-Stromvergleichsschutz, im zweiten Fall um Quer-Stromvergleichsschutz.

1. Längs-Stromvergleichsschutz (Differentialschutz)

Stromvergleichsrelais, die in Längsvergleichsschaltungen angewendet werden, heißen Längs-Stromvergleichsrelais (Differentialrelais). Die Grundschaltung des Längs-Stromvergleichsschutzes für Generatoren,

¹⁾ Bei Erdschlüssen sprechen die Stromvergleichsrelais gewöhnlich nicht an, weil meist kein ausreichender Fehlerstrom auftritt. Bei Doppelerdschlüssen sind sie dagegen wirksam.

Transformatoren und kurze Leitungen ist in Abb. 95 dargestellt. Darin sind die Stromwandler auf der Sekundärseite gleichsinnig in Reihe und das Längs-Stromvergleichsrelais über eine Brückenleitung parallel geschaltet. Hier sollen nur die wichtigsten Eigenschaften des Schutzprinzips herausgestellt werden, während die ausführlichen Schaltungen in den Abschnitten über Generator-, Transformator- und Leitungsschutz noch näher behandelt werden.

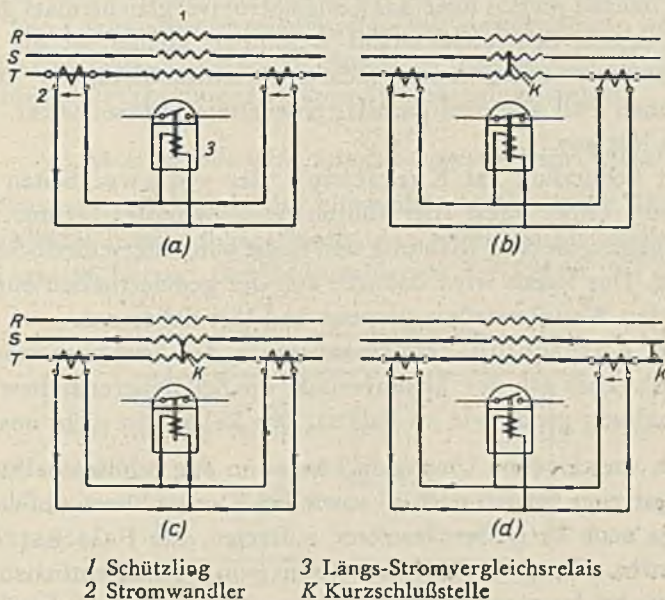


Abb. 95. Grundsätzliche Schaltung des Längs-Stromvergleichsches (Einpolige Darstellung).

Sind die Sekundärströme der Stromwandler nach Größe und Phase gleich, und ist das Relais in der Mitte der Verbindungsleitungen zwischen den Wandlern angeschlossen, dann liegt die Brückenleitung bzw. das Relais zwischen Punkten gleichen Potentials. Die Brückenleitung und mithin die Relaispule sind dabei stromlos. Werden jedoch die Wandlerströme infolge eines Fehlers oder anderen Umstandes ungleich, so fließt über die Brückenleitung ein Ausgleichstrom, der bei ausreichender Größe das Relais zum Auslösen bringt.

Zur Beurteilung des Aufgabenkreises bzw. der Arbeitsweise des

Längs-Stromvergleichsschutzes sind folgende vier Hauptfälle zu unterscheiden:

- a) Der Schützling und die übrigen Netzteile sind störungsfrei (Abb. 95a). Die Sekundärströme haben dabei am Anfang und Ende des Schützlings gleiche Größe und Richtung. Das Längs-Stromvergleichsrelais bleibt stromlos und löst nicht aus.
- β) Der Schützling hat Kurzschluß und wird nur von einer Seite gespeist (Abb. 95b). Der Fehlerstrom wird hier vom linken Wandler nahezu restlos über das Längs-Stromvergleichsrelais getrieben, da dessen Scheinwiderstand wesentlich kleiner ist als der des nichtstromdurchflossenen rechten Stromwandlers, der im vorliegenden Fall wie eine parallel geschaltete Drossel wirkt. Das Relais löst aus.
- γ) Der Schützling hat Kurzschluß, der von zwei Seiten gespeist wird¹⁾ (Abb. 95c). Hier führen beide Wandler Ströme, die von entgegengesetzter Richtung und meist von unterschiedlicher Größe sind. Das Relais wird dadurch von der geometrischen Summe der beiden Wandlerströme gespeist und löst daher aus.
- δ) Der Kurzschluß erfolgt außerhalb des Schutzbereiches (Abb. 95d). Hier ist der Stromverlauf im Schutzbereich bzw. in der Schaltung genau wie im Fall a). Das Relais löst nicht aus.

Durch verschiedene Umstände können in der Schutzschaltung auch im störungsfreien Betrieb nach a) sowie bei Kurzschlüssen außerhalb des Schützlings nach δ) Differenzströme auftreten, die Falschströme genannt werden. Die Falschströme müssen von den eigentlichen Fehlerströmen, die bei kurzschlußartigen Fehlern innerhalb des Schutzbereiches in der Schutzschaltung entstehen (vgl. Abb. 95b und c), grundsätzlich unterschieden werden. Falschströme treten z. B. auf, wenn die zusammengeschalteten Stromwandler unterschiedliche Strom- und Winkelfehler aufweisen oder wenn zu beiden Seiten des Relais ungleiche Bürden vorhanden sind. Falschströme ergeben sich auch dann, wenn das Verhältnis der Wandlerübersetzungen nicht dem des zu schützenden Transformators entspricht. Größere Falschströme lassen sich insbesondere dann nicht vermeiden, wenn die zu schützenden Transformatoren z. B. mit Stufenschaltern geregelt werden, weil die Ströme der zusammengehörigen Wandler hier-

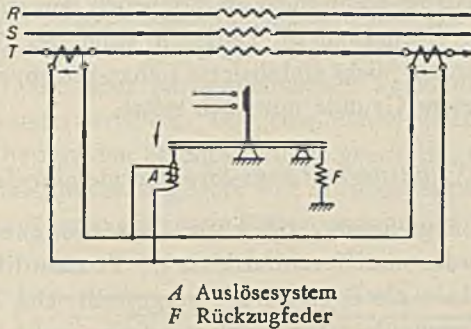
¹⁾ Bei Dreiwicklungstransformatoren kann die Speisung des Kurzschlusses auch von drei Seiten erfolgen.

bei nach Größe und Phasenlage erheblichen Schwankungen ausgesetzt sind.

Im störungsfreien Betrieb sind die Falschströme noch verhältnismäßig klein. Sie können aber bei Kurzschlüssen, die außerhalb des Schutzbereiches liegen, u. U. so hohe Werte annehmen¹⁾, daß Falschauslösungen zustande kommen, falls bei den Längs-Stromvergleichsrelais nicht besondere Maßnahmen getroffen werden. Die Gegenmaßnahmen bestehen im wesentlichen darin, daß die Relais entweder unempfindlich eingestellt, oder aber mit Haltesystemen versehen bzw. mit Sperrelais ergänzt werden. Die Längs-Stromvergleichsrelais mit Haltesystemen oder mit besonderen Sperrelais heißen im Gegensatz zu den einfachen Längs-Stromvergleichsrelais stabilisierte Längs-Stromvergleichsrelais.

a) Nicht stabilisierte Längs-Stromvergleichsrelais

Aufbau und Wirkungsweise eines nicht stabilisierten Längs-Stromvergleichsrelais in einpoliger Darstellung gehen beispielsweise aus den Abb. 40 und 96 hervor. Der Ansprechstrom der Relais, der gewöhnlich



A Auslösesystem
F Rückzugfeder

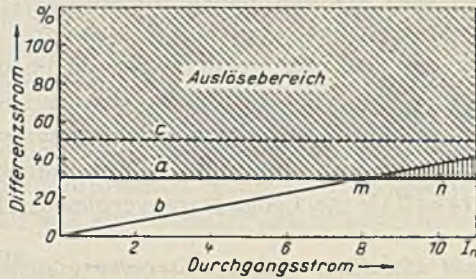
Abb. 96. Nicht stabilisierter Längs-Stromvergleichsschutz. Der Stromverlauf ist für störungsfreien Netzbetrieb eingezeichnet.

zwischen 30 bis 50% des Nennstromes²⁾ eingestellt wird, ist gleichbleibend, vergleiche z. B. die Kennlinie *a* in Abb. 97. Der Falschstrom nimmt dagegen mit der Größe des Belastungs- bzw. Kurzschlußstromes etwa verhältnisgleich zu (Kennlinie *b*). Überschreitet der Falschstrom den eingestellten Ansprechstrom, so erfolgt eine Falschauslösung. In Abb. 97 ist z. B. durch den Schnittpunkt *m* der Kennlinien *a* und *b* angedeutet, daß

¹⁾ Insbesondere, wenn die Stromwandler im Sättigungsgebiet arbeiten.

²⁾ Des Schützlings.

bei Fehlern außerhalb des Schutzbereiches mit Kurzschlußströmen über dem 8fachen Nennstrom bereits Falschauslösungen zustande kommen. Um die Falschauslösungen zu vermeiden, ist es erforderlich, den Ansprechstrom der Relais so hoch zu wählen, bis ein Überschneiden der Ansprech-



a, c Auslösekennlinien *m* Schnittpunkt
b Falschstromkennlinie *n* Bereich der Falschstromauslösung

Abb. 97. Arbeitskennlinien von nicht stabilisierten Längs-Stromvergleichsrelais.

strom- und Falschstrom-Kennlinien im möglichen Bereich des Kurzschlußstromes ausbleibt (Kennlinie *c*). Dadurch kann der Schutz aber sehr unempfindlich werden. Nicht stabilisierte Längs-Stromvergleichsrelais benutzt man aus diesem Grunde nur noch selten.

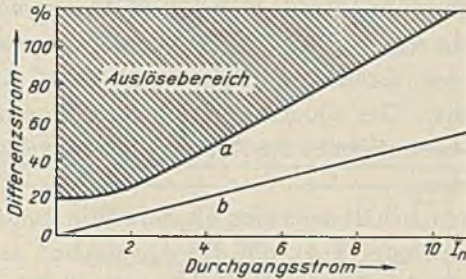
b) Stabilisierte Längs-Stromvergleichsrelais

Stabilisierte Längs-Stromvergleichsrelais werden entweder mit Haltesystemen [Quotientendifferentialrelais¹⁾, Prozentdifferentialrelais²⁾] oder mit Sperrelais als Ergänzung³⁾ hergestellt. Die Vorzüge der stabilisierten Relais gegenüber den nicht stabilisierten bestehen im wesentlichen darin, daß sie bei Kurzschlüssen außerhalb des ihnen zugewiesenen Schutzbereiches auch bei Wandlern mit voneinander abweichenden Überstromkennlinien eine Falschauslösung sicher verhindern und daß sie mit empfindlicher AnsprechEinstellung auch bei Regeltransformatoren einwandfrei arbeiten.

Die Längs-Stromvergleichsrelais mit Haltesystemen werden gewöhnlich als elektromagnetische Relais ausgeführt. Ihre Ansprechwerte

¹⁾ G. Stark, AEG-Mitteilungen (1931) S. 148.
²⁾ Fr. Parschalk, ETZ 57 (1936) S. 278.
³⁾ Fr. Geise, Siemens-Z. 12 (1932) S. 413.

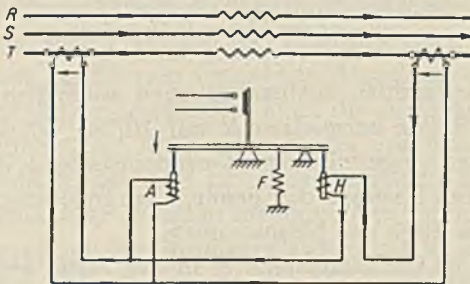
sind im Gegensatz zu den einfachen, unstabilisierten Längs-Stromvergleichsrelais nicht gleichbleibend, sondern sie wachsen ungefähr verhältnismäßig mit dem Belastungsstrom (Durchgangsstrom) des Schützlings, wie dies durch die Kennlinie *a* in Abb. 98 dargestellt ist. Hierdurch ist ein



a Auslösekennlinie
b Falschstromkennlinie

Abb. 98. Auslösekennlinie (*a*) eines stabilisierten Längs-Stromvergleichsrelais mit Haltesystem (vgl. Abb. 99).

Überschneiden der Ansprechstromkennlinie *a* und der Falschstromkennlinie *b* verhindert. Diese Eigenschaft wird durch zwei Stromsysteme erreicht (Abb. 99), die über ein gemeinsames Verbindungsglied (Anker, Welle) gegeneinander arbeiten. Das eine Stromsystem, der Haltemagnet *H*, ist in Reihe mit den Stromwandlern geschaltet und führt den Belastungsstrom, das andere dagegen, der Auslösemagnet *A*, liegt in Parallelschaltung und kann nur vom Differenzstrom durchflossen werden.



A Auslösesystem
H Haltesystem
F Rückzugfeder

Abb. 99. Stabilisierter Längs-Stromvergleichsschutz. Längs-Stromvergleichsrelais mit Haltesystem.

Die Feder F unterstützt dabei das Haltesystem. Derartig zusammengesetzte Relais arbeiten im Prinzip wie eine Waage, auf deren Hebelarme zwei Zugkräfte gegeneinander einwirken. Ein Kippen des Waagebalkens, d. h. ein Auslösen des Relais, kann nur erfolgen, wenn der Auslösemagnet A das Gegendrehmoment des Haltemagnetes H zuzüglich der gleichbleibenden Kraft der Feder F überwindet (vergleiche auch die Ausführungen auf Seite 91). Die Größe des Ansprechstromes wächst daher gleichsinnig mit der Größe des Belastungs- bzw. Kurzschlußstromes (Durchgangsstromes). Der Quotient aus dem Differenzstrom und dem Durchgangsstrom kennzeichnet die Arbeitsbedingung bzw. das Ansprechverhältnis des Relais.

Das Haltesystem erhält stets eine kleinere Windungszahl als das Auslösesystem (etwa 1:3 oder 1:4), um das Ansprechen des Relais bei gleichem Strom in den beiden Systemen sicherzustellen¹⁾. Durch entsprechende

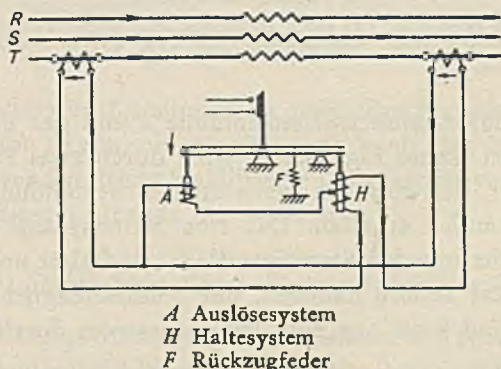


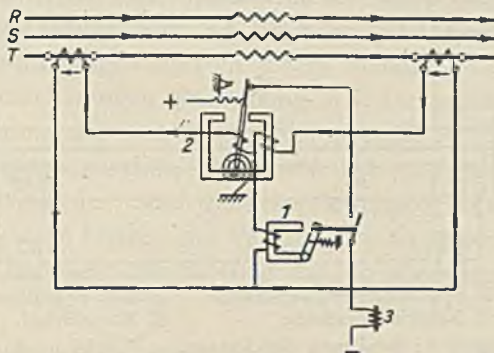
Abb. 100. Stabilisierter Längs-Stromvergleichsschutz. Längs-Stromvergleichsrelais mit angezapftem Haltesystem.

Wahl der Windungszahlen zueinander wird außerdem das Ansprechverhältnis der Relais beispielsweise auf 10, 20, 30, 40 oder 50% des Durchgangsstromes eingestellt. Die Grundeinstellung des Ansprechstromes wird nur durch Spannen der Feder F vorgenommen; gewöhnlich im Bereich von 20 bis 40% des Nennstromes.

In Abb. 100 ist die Haltespule H in der Mitte angezapft. Dadurch wirkt das Relais auch bei einseitiger Speisung des Schützlings, gleichgültig, ob die Speisung im Störfall von der einen oder anderen Seite erfolgt, etwa mit derselben Empfindlichkeit.

¹⁾ Beispielsweise bei einseitig gespeistem Kurzschluß.

Abb. 101 zeigt die Grundschaltung und Wirkungsweise eines einfachen Längs-Stromvergleichsrelais in Verbindung mit einem Sperrelais¹⁾. Das Stromvergleichsrelais 1 ist in der üblichen Brückenschaltung angeschlossen und arbeitet mit gleichbleibender Empfindlichkeit. Das Sperrelais 2 wird hingegen von den Strömen der beiden Wandlerkreise erregt, so daß eine im wesentlichen dem Produkt dieser Ströme verhältnismäßige Kraft auf den Anker wirkt, die positive oder negative Richtung haben kann.



1 Längs-Stromvergleichsrelais
2 Sperrelais
3 Auslöser

Abb. 101. Stabilisierter Längs-Stromvergleichsschutz mit Sperrelais.

Der Kontakt des Sperrelais ist normal geschlossen und liegt mit dem Arbeitskontakt des Stromvergleichsrelais in Reihe. Bei Fehlern, die außerhalb des Schützlings auftreten, schlägt das Sperrelais in positiver Richtung aus und öffnet seinen Kontakt. Bei innenliegenden Fehlern bleibt dagegen der Kontakt geschlossen (negativer Ausschlag oder Nulldrehmoment), und das Stromvergleichsrelais kann die Auslösung der Leistungsschalter herbeiführen. Der Ansprechwert des Sperrelais wird unterhalb des Wertes eingestellt, bei dem bei außenliegenden Kurzschlüssen entweder durch vorhandene Wandlerunsymmetrien oder durch Reglereinstellung ein Ansprechen des Stromvergleichsrelais zu erwarten ist (z. B. unter dem 2fachen Wandlernennstrom). Die Einstellung des Stromvergleichsrelais ist davon unabhängig. Dieses wird gewöhnlich auf 20 bis 30% des Wandlernennstromes und darüber eingestellt.

¹⁾ Siehe auch Fr. Geise, Siemens-Z. 16 (1936) S. 283.

c) Verschiedenes

Der Längs-Stromvergleichsschutz wird gewöhnlich für 5 A Nennstrom ausgelegt. Sind jedoch die beiden Meßorte weit voneinander entfernt, so bemißt man den Schutz für 1 A. Dadurch wird die Belastung der Stromwandler durch die Verbindungsleitungen geringer, und zwar auch denn, wenn die Leiterquerschnitte der Verbindungsleitungen klein gewählt werden. Beim Schutz von längeren Kabeln werden überdies die Stromwandler mit Nebenschlüssen versehen, um die Ströme in stromproportionale Spannungen zu übersetzen (Abb. 102). Es bringt dann die Differenz der Wandlerspannungen die zwei in einer Stromschleife lie-

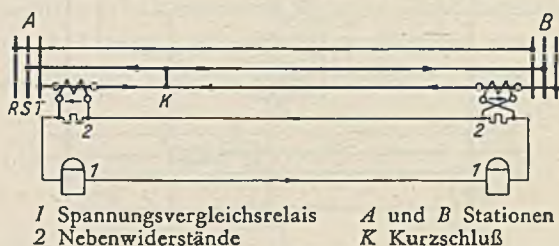


Abb. 102. Grundsätzliche Schaltung des Spannungs-Vergleichsschutzes. Stromverlauf bei Kurzschluß des Kabels mit zweiseitiger Speisung.

genden „Spannungs-Vergleichsrelais“ bei Störungen des Kabels zum Ansprechen. Dieser Spannungsvergleichsschutz wird ebenfalls in stabilisierter Ausführung geliefert.

Die Auslösezeit von stabilisierten und nicht stabilisierten Längs-Stromvergleichsschutzeinrichtungen liegt in der Größenordnung von 0,03 bis 0,1 s. In Sonderfällen muß die Auslösezeit des Längs-Stromvergleichsschutzes durch Zeitrelais verzögert werden, beispielsweise um Falschauslösungen beim Einschalten von Transformatoren zu verhindern (Magnetisierungsströme!). In jüngster Zeit sind jedoch Schaltungen bekannt geworden, die solche Zeitrelais einsparen und eine Schnellauslösung im Störfall auch bei Transformatoren bewirken¹⁾.

2. Quer-Stromvergleichsschutz (Achter- und Polygonschutz)

Die Schutzeinrichtungen nach diesem Verfahren vergleichen die Ströme gleichnamiger Leiter von parallel geschalteten Anlageteilen,

¹⁾ Fr. Geise, Siemens-Z. 18 (1938) S. 492; Fr. Jahn, AEG-Mitteilungen (1940) Heft 7/8.

hauptsächlich von Freileitungen oder Kabeln, an jedem Ende der Schützlinge untereinander und benutzen größere Abweichungen, die z. B. durch Kurzschlüsse oder Doppelerdschlüsse hervorgerufen werden, als Kriterium zum Auslösen. Den Quer-Stromvergleichsschutz für zwei parallele Leitungen nennt man Achterschutz und den für drei oder mehr parallele Leitungen -- Polygonschutz.

a) *Achterschutz*¹⁾

In Abb. 103 ist der Achterschutz für eine Doppelleitung im Prinzip dargestellt. Die Stromwandler der zusammengehörigen Phasenleiter von beiden Drehstromleitungen sind an jedem Meßort (Stationen *A* und *B*) mit ihren Sekundärleitungen gleichsinnig in Reihe geschaltet und speisen in Brückenschaltung die zuständigen Stromvergleichsrelais²⁾. Diese sind unverzögerte Überstromrelais, die gewöhnlich auf den Wandler-Nennstrom eingestellt werden. Sind die Hauptleitungen *1* und *2* gleichmäßig stromdurchflossen, so bleiben die Vergleichsrelais stromlos. Tritt jedoch auf einer der Leitungen eine Störung auf, so überwiegt der Strom des

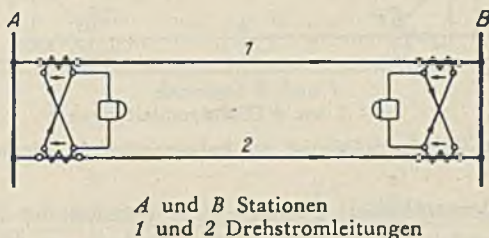


Abb. 103. Grundsätzliche Schaltung des Achterschutzes. Einpolige Darstellung.

einen oder anderen Leitungsstranges und bringt die Stromvergleichsrelais in den beiden Brückenschaltungen zum Ansprechen. Durch zusätzliche Richtungsrelais, die im Schaltbild nicht eingezeichnet sind, wird die kranke Leitung ausgewählt und allein abgetrennt. Empfindlich eingestellte Stromvergleichsrelais müssen dann durch eine Hilfseinrichtung (z. B. am Leistungsschalter) unwirksam gemacht werden, da sie im Einleitungs-

¹⁾ Ausführlicher siehe in M. Schleicher, Siemens-Z. 6 (1926) S. 36; Fr. Geise, Siemens-Z. 12 (1932) S. 413.

²⁾ Die Stromvergleichsrelais werden in jüngster Zeit mit Sperrelais (siehe Seite 153) ergänzt, um den Einfluß von Falschströmen, die durch außenliegende Kurzschlüsse verursacht werden können, zu unterdrücken.

betrieb den Belastungsstrom führen. Der im Betrieb verbleibende gesunde Leitungsstrang wird dann vom überlagerten Zeitstaffelschutz (Distanzschutz oder Überstromzeitschutz) allein überwacht. Der überlagerte Zeitstaffelschutz dient überdies als Sammelschienenschutz und ferner als Reserveschutz für den Fall, daß ein Leistungsschalter oder ein Achterschutzrelais versagen sollten. — Die Auslösezeit des Achterschutzes beträgt rund 0,1 bis 0,15 s.

b) Polygonschutz¹⁾

Der Polygonschutz stellt eine Erweiterung des Achterschutzes dar und ist anwendbar, wenn mehr als zwei parallele Leitungen zu schützen sind. Die Grundschialtung dieses Schutzes ist in Abb. 104 für vier parallele

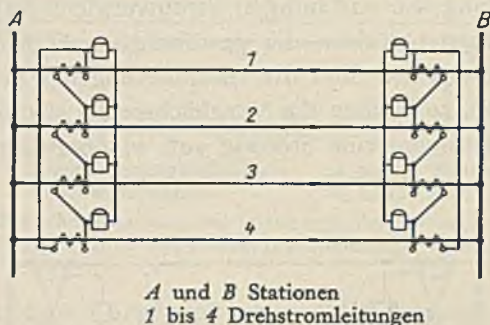


Abb. 104. Grundsätzliche Schaltung des Polygonschutzes. Einpolige Darstellung.

Leitungen (Drehstromkabel) gezeigt. Hier werden die Parallelströme an jedem Leitungsende mittels einer Polygonschaltung (Brückenschaltung) nach Größe und Richtung verglichen. Bei Kurzschluß einer Leitung entsteht zwischen deren Strom und dem der Nachbarleitung ein Unterschied in der Größe und teilweise auch in der Richtung, wonach die zuständigen Stromvergleichsrelais das Abtrennen des kranken Leitungsstranges veranlassen²⁾. Die Auslösezeiten des Polygonschutzes liegen in der Größenordnung von 0,1 s. — Dem Polygonschutz muß ebenfalls ein Zeitstaffelschutz überlagert werden, damit dieser bei etwaigem Versagen eines Polygonschutzrelais oder eines Leistungsschalters als Reserveschutz in 1 bis 2 s den Netzfehler selektiv abtrennt.

¹⁾ Ausführlicher siehe bei Völzing, Siemens-Z. 3 (1923) S. 368.

²⁾ Den Stromvergleichsrelais werden in jüngster Zeit Sperrelais (siehe Seite 153) zugeordnet, um Falschauslösungen bei außenliegenden Kurzschlüssen zu verhindern

G. Richtungs-Vergleichsschutz

Solche Schutzarten unterscheiden sich von dem in Abschnitt F beschriebenen Längs-Stromvergleichsschutz (Stromdifferentialschutz) dadurch, daß bei ihnen am Anfang und Ende eines Leitungsabschnittes nicht die Größe der Ströme miteinander verglichen wird, sondern lediglich die Richtung der Ströme oder der Leistungen, die bei kurzschlußartigen Störungen in den zu schützenden Anlageteilen, wie Kabeln und Freileitungen, auftreten (Abb. 105). Während beim Längs-Stromvergleichsschutz die Hilfsleitungen für die volle Größe der Meßströme ausgelegt sein müssen, genügen bei den Schutzeinrichtungen mit Richtungsvergleich beliebige Verbindungen, da es sich hier nur darum handelt, im Fehlerfall die Stellung (den Ausschlag) der Schutzrelais eines Leitungsabschnittes miteinander zu vergleichen. Diese Verbindungen sind unabhängig von den Wandlern und werden gewöhnlich mit Gleichstrom oder mit Hoch- bzw. Tonfrequenzstrom betrieben. Die Schutzeinrichtungen mit Richtungsvergleich können daher im Gegensatz zum Längs-Stromvergleichsschutz auch bei sehr langen Leitungen angewendet werden.

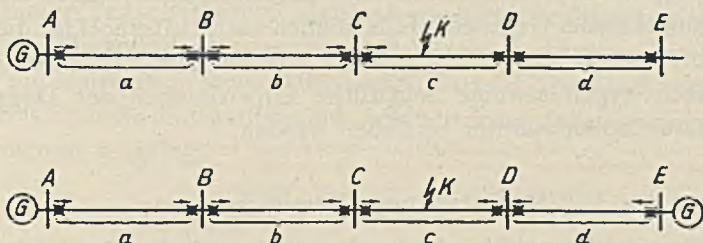


Abb. 105. Richtung des Strom- oder Leistungsflusses an den Enden von fehlerfreien (a , b , d) und fehlerbehafteten (c mit dem Kurzschluß K) Leistungsabschnitten.

In Abb. 105 ist die Richtung des Stromes bzw. der Leistung in den einzelnen Leitungsabschnitten von Einfachleitungen mit ein- und zweiseitiger Speisung der Kurzschlußstelle durch Längspfeile angedeutet. Der kranke Leitungsabschnitt ist jeweils durch einen einzigen Pfeil oder durch zwei gegeneinander gerichtete Pfeile gekennzeichnet. Die gesunden Leitungsabschnitte haben dagegen entweder zwei Pfeile mit gleicher Richtung oder überhaupt keine Pfeile. Weisen die Relais an den Enden eines Leitungsabschnittes verschieden gerichtete Kontaktstellungen auf oder schlägt nur ein Relais aus, so zeigt dieser Tatbestand einen Kurzschluß auf

diesem Leitungsabschnitt an, und es erfolgt eine Auslösung. Auf diesem Grundprinzip beruht die Wirkungsweise der Schutzeinrichtungen mit Richtungsvergleich.

Mit solchen Schutzeinrichtungen können natürlich auch parallele Leitungen, Ringleitungen sowie die Leitungen von vermaschten und verbundgespeisten Netzen gegen die Auswirkung von Kurzschlüssen und Doppelerdschlüssen selektiv geschützt werden. Zur Vollständigkeit des Netzschutzes ist jedoch hier in gleicher Weise wie bei den im Abschnitt F beschriebenen Schutzeinrichtungen noch ein gerichteter Zeitstaffelschutz [Distanzrelais oder unabhängige Überstromzeitrelais mit Richtungsrelais¹⁾] erforderlich, der insbesondere den Schutz der Sammelschienen übernimmt und der als Reserveschutz für den Fall dient, daß ein Leistungsschalter oder gar ein Glied des Vergleichsschutzes versagen sollten.

Bei kurzen Leitungsabschnitten wird der Vergleich der Strom- bzw. Leistungsrichtung mittelbar über Hilfsleitungen mit Gleichspannung durchgeführt. Bei langen Leitungen erfolgt der Richtungsvergleich vorwiegend über Kanäle für leitungsgerichtete Hoch- oder Tonfrequenz als Übertragungsmittel²⁾. Hier bilden die Hochspannungsleitungen selbst die Übertragungskanäle. Gegebenenfalls können auch Hilfskabel für die Hoch- oder Tonfrequenzübermittlung benutzt werden. Die Hilfskabel müssen dann jedoch gegen etwaige schädliche Einwirkungen der Doppelerdschlüsse über Isolierwandler betrieben werden.

1. Stromrichtungs-Vergleichsschutz

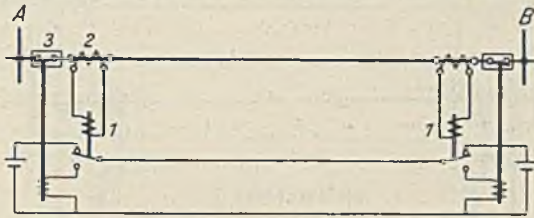
Der Stromrichtungs-Vergleichsschutz³⁾ benutzt den Vergleich der jeweiligen Augenblicksrichtung der Ströme am Anfang und Ende des Schutzabschnittes zum Entscheid über Sperren oder Auslösen. Die Augenblicksrichtung des Kurzschlußstromes wird durch polarisierte Steuerrelais an den Enden des Schützlings mit Umschaltkontakten festgestellt. Beide Steuerrelais werden vom Kurzschlußstrom selbst erregt und sind über eine Hilfsleitung miteinander verbunden (Abb. 106). Die Umschalt-

¹⁾ Diese Richtungsrelais bzw. Richtungsglieder können beim Leistungsrichtungs-Vergleichsschutz fortfallen, da solche schon im Grundschutz vorhanden sind und beim Überlagerungsschutz gut mitbenutzt werden können.

²⁾ H. Neugebauer, Siemens-Z. 14 (1934) S. 83; M. Schleicher, Die moderne Selektivschutztechnik, J. Springer 1936, S. 291; M. Fallou, Bulletin S.F.E. (1931) Heft 9; P. du Mont und R. Baranowsky, ETZ 60 (1939) S. 1472.

³⁾ F. Jahn und H. Gutmann, Elektrizitätswirtschaft 37 (1938) S. 113.

kontakte der Steuerrelais schwingen mit der Netzfrequenz und schalten an jedem Ende des zu schützenden Anlageteiles eine Gleichspannung je nach der Stromrichtung in gleichem oder verschiedenem Takt auf die Hilfsleitung, wodurch der Auslösekreis entweder geschlossen wird oder geöffnet bleibt. Da es sich hier um ein Verfahren mit Stromrichtungsver-



- 1 Polarisierte Stromrelais
- 2 Stromwandler
- 3 Leistungsschalter

Abb. 106. Grundsätzliche Schaltung des Stromrichtungs-Vergleichsschutzes.

gleich handelt, können Spannungswandler grundsätzlich entbehrt werden. Man braucht solche jedoch, wenn dem Stromrichtungs-Vergleichsschutz ein gerichteter Zeitstaffelschutz als Reserveschutz überlagert wird.

Die Auslösezeit des Stromrichtungs-Vergleichsschutzes beträgt bei Überstrom-Anregung etwa 0,06 s, bei Unterimpedanz-Anregung etwa 0,15 s. Die Stromwandler und Relais werden im allgemeinen für 5 A Nennstrom ausgelegt.

2. Leistungsrichtungs-Vergleichsschutz

Der Leistungsrichtungs-Vergleichsschutz überwacht die Richtung der Leistung bei kurzschlußartigen Fehlern im Netz und veranlaßt die Abschaltung nur desjenigen Leitungsabschnittes, in den der Fehlerstrom hineinfließt aber nicht herausfließt. Diese selektive Wirkung wird im wesentlichen durch das Zusammenarbeiten von üblichen Richtungsrelais (siehe Seite 98) an den Enden der einzelnen Leitungsabschnitte über Hilfsverbindungen erzielt (Abb. 107). Bei zweiseitiger Speisung des Kurzschlusses bewegen die Richtungsrelais im gestörten Leitungsabschnitt ihre Kontakte in Richtung zur Fehlerstelle, schließen beiderseitig den Stromkreis der Hilfsleitung und betätigen mithin die zugehörigen Leistungsschalter gleichzeitig über ihre Hilfsauslöser. Wird die Kurzschlußstelle nur von einer Seite der Leitung gespeist, so erfolgt ebenfalls eine selektive Ab-

trennung des kranken Leitungsabschnittes. Der Stromkreis der Hilfsleitung wird hierzu am nichtstromdurchflossenen Leitungsende durch eine im Bild nicht dargestellte Hilfseinrichtung geschlossen gehalten.

Die Richtungsrelais werden durch Überstrom- oder Unterimpedanz-Anreglieder nur im Störfall an Spannung gelegt und können dadurch für eine höhere Richtungsempfindlichkeit ausgelegt und gegebenen-

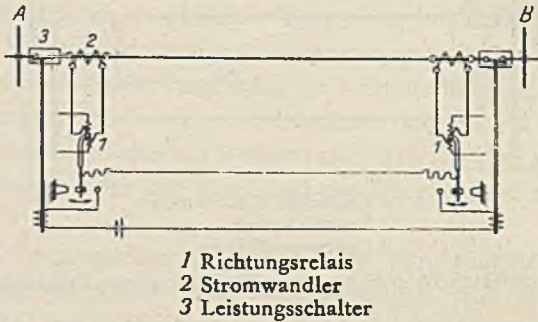


Abb. 107. Grundsätzliche Schaltung des Leistungsrichtungs-Vergleichsschutzes.

falls in Sparschaltung ausgeführt werden (siehe Seite 101). Zuweilen läßt man den Richtungsvergleich durch die Richtungsglieder der Distanzrelais ausführen. Mit dieser Maßnahme ist dann auch die Frage des überlagerten Zeitstaffelschutzes günstig geregelt. Der Leistungsrichtungs-Vergleichsschutz wird übrigens in der Ein-, Zwei- oder Dreirelaischaltung ausgeführt, von denen jede verschiedene Abwandlungen aufweist¹⁾.

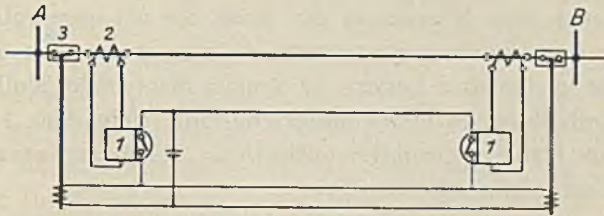
Die Auslösezeit der Leistungsrichtungs-Vergleichsschutzeinrichtungen beträgt etwa 0,06 bis 0,15 s. Stromwandler und Relais werden gewöhnlich für 5 A Nennstrom ausgelegt.

3. Längs-Mitnahmeschutz

Das gleichzeitige Abschalten der Leistungsschalter an beiden Enden des gestörten Leitungsabschnittes kann auch mit Distanzrelais erzielt werden. Man läßt nämlich durch das zuerst auslösende Distanzrelais über Hilfsleitungen oder Hoch- bzw. Tonfrequenzkanäle gleichzeitig auch den zweiten Schalter betätigen (Abb. 108). Durch eine solche Mitnahme-

¹⁾ H. Neugebauer, Siemens-Z. 13 (1933) S. 94; A. Thewalt, Siemens-Z. 16 (1936) S. 278; M. Schleicher, Die moderne Selektivschutztechnik, J. Springer, 1936. S. 285 bis 290.

schaltung können die Kurzschlüsse mit beliebiger Lage auf einem Leitungsabschnitt mit der Auslösezeit der ersten Zeitstufe für den vollen Schutzabschnitt erfaßt werden. Außerdem hat man durch die Distanzrelais



- 1 Distanzrelais
- 2 Stromwandler
- 3 Leistungsschalter

Abb. 108. Grundsätzliche Schaltung des Längs-Mitnahmeschutzes.

noch einen Sammelschienenschutz sowie einen Reserveschutz für die Leitungen. Die kürzeste Auslösezeit des Mitnahmeschutzes beträgt rund 0,08 bis 0,15 s.

H. Erdschlußanzeige- und Abschaltvorrichtungen

Zu einem geregelten Betrieb von elektrischen Netzen gehört außer einem selektiven Kurzschlußschutz auch ein wirksamer Erdschlußschutz. Hier werden nur solche Einrichtungen behandelt, die den Erdschluß entweder kenntlich machen oder dessen selektives Abschalten veranlassen. Von einer Besprechung der Erdschlußstrom-Löscheinrichtungen wird dagegen abgesehen.

Zum Melden, Anzeigen oder Abschalten der Erdschlüsse benutzt man mittelbar die im Abschnitt D des Kapitels III besprochenen Erdschlußkennzeichen, die der besseren Übersicht halber hier noch einmal kurz aufgezählt seien:

- a) Absinken der Spannung zwischen dem kranken Leiter und der Erde. Die Leitererdspannung U_{EL} des kranken Leiters wird dabei kleiner als die Sternspannung (Abb. 17).
- β) Erhöhung der Spannung zwischen den gesunden Leitern und der Erde. Die Leitererdspannung U_{EL} der gesunden Leiter wird dabei größer als die Sternspannung (Abb. 17).

- γ) Auftreten einer Spannung zwischen dem Netzsternpunkt und der Erde, weil die geometrische Summe der drei Leitererdspannungen nicht mehr gleich Null ist. Es stellt sich die Sternpunkterdspannung U_{EM} ein (Abb. 17 und 18).
- δ) Auftreten eines Stromes in der Erde, die als ungewollter vierter Leiter des Übertragungssystems zu werten ist. Die Summe der Ströme in den drei Leitern ist danach nicht mehr Null. Es bildet sich deshalb in der Dreiwandlerschaltung (siehe Abb. 114a und b) oder im Kabelringwandler (siehe Abb. 114c) ein Summenstrom aus (Sternpunkterdstrom I_M).

In Netzen über 500 V werden diese Erdschlußkennzeichen den Überwachungs- bzw. Schutzgeräten vorwiegend über Meßwandler vermittelt. Bei den Spannungswandlern muß dabei zur einwandfreien Übertragung der Erdschlußverhältnisse der Sternpunkt auf der Hochspannungsseite starr geerdet sein (vergleiche die Abb. 109 bis 111). Zur Gewinnung des Summenstromes in Drehstromnetzen sind Stromwandler in Summenschaltungen gemäß den Abb. 114a ... c erforderlich.

Die Erdschluß-Überwachungseinrichtungen lassen sich entsprechend ihrer Aufgabe in folgende vier Gruppen einteilen:

1. Einrichtungen zum Melden des Erdschlusses,
2. Einrichtungen zum Melden des Erdschlusses und zum Anzeigen des erdgeschlossenen Leiters,
3. Einrichtungen zum Melden des Erdschlusses und zum selektiven Anzeigen des erdgeschlossenen Anlageteiles,
4. Einrichtungen zum Melden des Erdschlusses und zum selektiven Abschalten des erdgeschlossenen Anlageteiles.

Die aufgezählten Schutzseinrichtungen werden von den Herstellerfirmen in unterschiedlicher Form ausgeführt. Hier sollen nur die wichtigsten Einrichtungen in ihren Grundzügen geschildert werden.

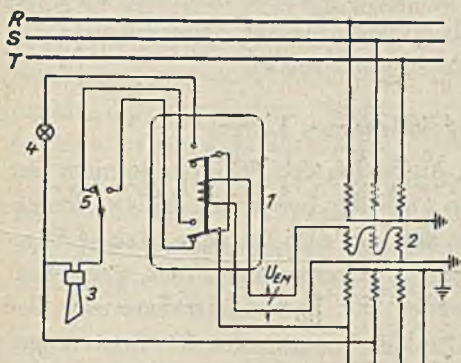
1. Melden des Erdschlusses

Die bei Erdschluß auftretende Sternpunkterdspannung (siehe Seite 197) wird dem Erdschlußmeldegerät meist über Spannungswandler¹⁾ zugeführt, deren Sternpunkt auch auf der Hochspannungsseite starr geerdet sein muß. Übersteigt die Sternpunkterdspannung den im Meldegerät

¹⁾ Seltener über die Löscheinrichtungen.

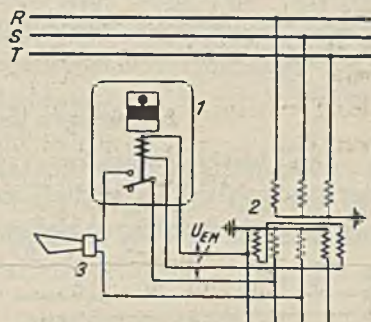
eingestellten Spannungswert, so spricht das Gerät an und betätigt eine Fallklappe, Lampe, Hupe oder dergleichen.

Abb. 109 zeigt die Schaltung einer solchen Erdschlußmeldeeinrichtung. Der Klappankermagnet des Relais betätigt zwei Umschaltkontakte, sobald der eingestellte Wert von etwa 25 V überschritten wird. Dadurch werden Lampe und Hupe, die im Meldekreis der Schaltung angedeutet sind, eingeschaltet. (Die Hupe kann durch den Umschalter 5 abgeschaltet werden.) Der Meldekreis ist an eine Dreiecksspannung als unveränderliche Größe bei Erdschluß angeschlossen. Verschwindet der Erdschluß, so spricht die Hupe wieder an, während die Lampe erlischt. Durch abermaliges Abstellen der Hupe wird der Anfangszustand der Meldeeinrichtung



- 1 Melderelais
- 2 Spannungswandler mit drei Hilfswicklungen im offenen Dreieck
- 3 Hupe
- 4 Lampe
- 5 Umschalter

Abb. 109. Erdschlußmeldeeinrichtung mit Anfangs- und Schlußtonzeichen



- 1 Melderelais mit dreiteiliger Fallklappe
- 2 Spannungswandler mit Hilfswicklungen auf dem 4. und 5. Schenkel (Fünfschenkel-Spannungswandler)
- 3 Hupe

Abb. 110. Erdschlußmeldeeinrichtung mit Warnstellung

tion wieder hergestellt. Es werden somit Anfang und Ende des Erdschlusses durch das Tönen der Hupe angezeigt.

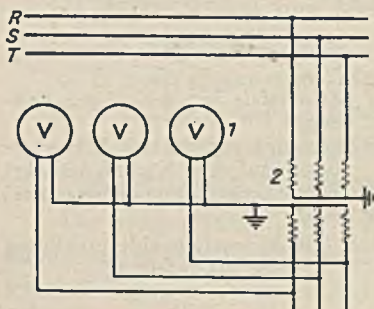
Die bei Erdschluß auftretende Sternpunkterds Spannung ist, wie bereits berichtet, in einem galvanisch verbundenen Netz nahezu überall gleich groß. Bei satterm Erdschluß¹⁾ im Netz beträgt sie auf der Sekundärseite der Wandler 100 oder 110 V. Diese Spannungswerte müssen die Melderelais dauernd aushalten, ohne Schaden zu nehmen.

¹⁾ Bei nicht satten Netzerdschlüssen ist die Sternpunkterds Spannung kleiner. Der Ansprechwert der Meldegeräte wird deshalb meist auf etwa 25 V eingestellt.

In Abb. 110 ist die Schaltung einer anderen Erdschluß-Meldeeinrichtung gezeigt. Das Melderelais, das ebenfalls an die Sternpunktterdspannung angeschlossen ist, besitzt hier eine dreiteilige Fallklappe. Im erdschlußfreien Zustand des Netzes ist das Relais unerregt, und die Fallklappe zeigt im Relaisfenster ihr schwarzes Feld. Bei Eintritt eines Erdschlusses läßt der Klappankermagnet das weiße Klappenfeld mit rotem Punkt im Fenster erscheinen; gleichzeitig schaltet das Relais über seinen Hilfskontakt noch ein Ton- oder Lichtgerät ein. Will man nun z. B. die Hupe abstellen, so öffnet man den Kontakt im Relais durch einen von außen zu bedienenden Druckknopf, wodurch zwangsläufig hinter das Fenster das dritte, weiße Feld der Fallklappe gerückt wird. Diese Warnstellung des Relais zeigt der Betriebsmannschaft, daß die Anlage noch immer im Erdschluß fährt. Sobald der Erdschluß behoben ist, wird das Relais spannungslos; sein Anker fällt ab und läßt das schwarze Feld der Fallklappe selbsttätig wieder zum Vorschein kommen.

2. Anzeigen des erdgeschlossenen Leiters

Soll beispielsweise zum raschen Auffinden der Fehlerstelle nicht nur der Erdschluß als solcher, sondern auch der betroffene Leiter kenntlich gemacht werden, so bedient man sich der drei Leitererdspannungen



1 Spannungsmesser
2 Spannungswandler ohne Hilfswicklungen
Abb. 111. Erdschluß-Anzeigeeinrichtung mit Spannungsmessern

des Drehstromsystems, wobei entweder die Spannungsminderung des kranken Leiters oder die Spannungserhöhung der gesunden Leiter gegen Erde zu Hilfe genommen wird.

In einfachster Weise ermittelt man den erdgeschlossenen Leiter eines Netzes mit drei anzeigenden oder schreibenden Spannungsmessern, deren Anschluß aus Abb. 111 hervorgeht. Daneben benutzt man hierzu auch die noch anderen Aufgaben dienenden schreibenden Spannungsmesser mit Schnellablauf, sogenannte Störungsschreiber (siehe Seite

283), die den Verlauf der Leitererdspannungen nach Größe und Zeit auf Papierstreifen festhalten.

Da die Leitererdspannung bei Erdschluß nur am kranken Leiter

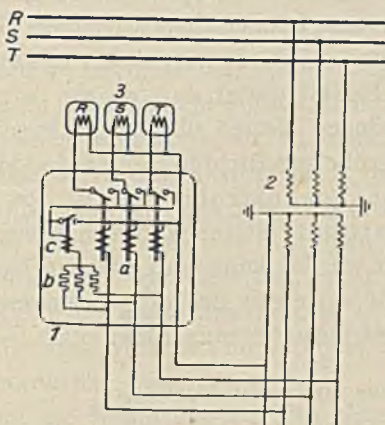
sinkt, an den beiden gesunden dagegen steigt, so wird der betroffene Leiter durch die Zeigerstellung oder Aufzeichnungen der erwähnten Geräte eindeutig gekennzeichnet.

Anschaulich wird der erdgeschlossene Leiter eines Netzes auch durch das sogenannte Asymmetrier¹⁾ angegeben (Abb. 112). In diesem Gerät schwebt eine kleine rote Scheibe vor dem feststehenden Spannungsdreieck auf dem Skalenblatt und zeigt jeweils die Lage des Erdpunktes im Spannungsdreieck an. Die rote Scheibe wird hierbei über Kokonfäden von drei Induktionsmeßwerken gesteuert, die an die drei Leitererdspannungen angeschlossen sind. Bei Erdschluß im Netz ändern sich die Drehmomente der Meßwerke, und die rote Scheibe wird aus ihrer normalen Mittellage, dem Schwerpunkt des Dreiecks, zu demjenigen Meßwerkgezogen, das die kleinere Spannung aufgedrückt erhält. Zur akustischen Meldung des Erdschlusses ist eine Ergänzungseinrichtung erforderlich.



Abb. 112. Asymmetrier.

In Abb. 113 ist die Schaltung einer Erdschluß-Überwachungseinrichtung²⁾ mit drei Unterspannungsrelais (a) dargestellt, die von den drei Leitererdspannungen des Drehstromsystems gespeist werden. Der Steuerkreis für die drei dazugehörigen Fallklappenrelais ist dagegen an



- 1 Erdschlußmelder
- 2 Spannungswandler
- 3 Fallklappenrelais
- a Unterspannungsrelais
- b Widerstände in Sternschaltung
- c Hilfsrelais

Abb. 113. Erdschlußanzeigeeinrichtung mit Anregesperre

1) C. Schmittutz, ETZ 46 (1925) S. 925.

2) Fr. Geise, Siemens-Z. 15 (1935) S. 495.

die Sternpunkterdspannung angeschlossen, die hier über einen künstlichen Sternpunkt gewonnen wird. Die Verwendung der Sternpunkterdspannung zum Betätigen der Fallklappenrelais bietet den Vorteil, daß diese nur bei Erdschluß ansprechen, nicht dagegen bei zwei- oder dreipoligen Kurzschlüssen oder beim Abschalten des Spannungswandlers. Bekommt z. B. der Leiter R Erdschluß, so schließt das Unterspannungsrelais dieses Leiters den Steuerkreis zum Fallklappenrelais R , das über Kontakte Licht- und Tonzeichen auslösen kann. Diese Überwachungseinrichtung weist noch die Besonderheit auf, daß nach dem Ansprechen des zum erdgeschlossenen Leiter gehörigen Fallklappenrelais der gesamte Steuerkreis von einem Hilfsrelais (c) kurzgeschlossen wird, so daß beim Ausschwingungsvorgang nach dem Abschalten des Erdschlusses im Netz (siehe Seite 59) nicht auch noch die anderen Fallklappenrelais ansprechen.

Der fehlerhafte Leiter kann bei Erdschluß auch durch Überspannungsrelais (Spannungserhöhungsrelais) angezeigt werden, und zwar über eine besondere Schaltung im Gleichstrom-Steuerkreis¹⁾. Eine solche Erdschluß-Überwachungseinrichtung ist ebenfalls nur bei Erdschluß wirksam.

3. Selektives Anzeigen des erdgeschlossenen Anlageteiles

Für die selektive Erfassung des erdschlußbehafteten Anlageteiles wird von den Leitererdspannungen überhaupt kein Gebrauch gemacht, denn ihr Spannungsgefälle im Erdschlußpfad ist zu gering, um eine Selektivität zu erzielen. Außerdem können die Lastströme die Spannungsverhältnisse gänzlich fälschen. Die Sternpunkterdspannung stellt gleichfalls kein geeignetes Selektivmittel dar, da sie, wie bereits ausgeführt, in galvanisch verbundenen Netzen überall praktisch gleich groß ist. Sie leistet aber als Hilfsgröße zur Richtungsunterscheidung gute Dienste. In Verbindung mit dem Summenstrom bietet sie den Vorteil, daß der kranke Anlageteil mit wattmetrischen Relais in Netzen beliebiger Form fast immer festgestellt werden kann. In einfachen Netzgebilden reicht unter Umständen zum Anzeigen des erdgeschlossenen Anlageteiles die Verwendung des Summenstromes allein aus.

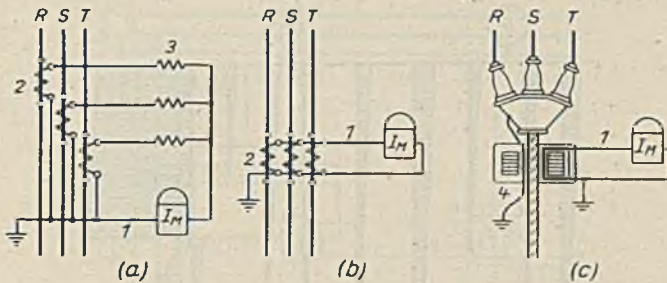
a) In Netzen ohne Erdschlußlöschung

In unkompensierten Netzen ist der Summenstrom an der Erdschlußstelle am größten und nimmt von da aus nach den Enden der an-

¹⁾ H. Piloty, AEG-Mitteilungen (1927) S. 443.

geschlossenen Leitungen ab (s. d. Abb. 20, 21, 22 und 115). Größe und Richtung des Summenstromes können also zum selektiven Anzeigen der fehlerhaften Anlageteile benutzt werden.

Zum selektiven Anzeigen von erdgeschlossenen Stickleitungen genügen oft gewöhnliche Stromrelais, wenn diese vom Summenstrom I_M erregt werden (Abb. 114). Die Abb. 115 zeigt ein einfaches Strahlennetz, in dem auf einer Stickleitung ein Erdschluß angenommen und der Sum-



- 1 Stromrelais
- 2 Stromwandler
- 3 Scheinwiderstände, die Relais oder Meßgeräte darstellen sollen
- 4 Ringstromwandler

Abb. 114. Schaltungen zur Gewinnung des Summenstromes, in denen ein Stromrelais für die selektive Anzeige von erdgeschlossenen Anlageteilen in nicht kompensierten Netzen benutzt wird.

menstrom in den einzelnen Stickleitungen nach Größe und Verlauf eingezeichnet ist. Daraus geht hervor, daß das Erdschlußrelais in der kranken Leitung einen weit größeren Summenstrom führt als die in den gesunden Leitungen. Wird der Ansprechwert der Relais auf etwa 50% des Summenstromes, der sich aus dem Gesamtlastestrom des Netzes ergibt, eingestellt, so ist ein selektives Anzeigen der erdgeschlossenen Stickleitung auch dann noch gewährleistet, wenn einzelne Anlageteile abgeschaltet sein sollten. — Diese Stromrelais werden gewöhnlich mit Einstellskala und Fallklappe versehen und können im Bedarfsfalle über Kontakte weitere Stromkreise steuern¹⁾.

Sind die Summenströme des Netzes bei Erdschluß im Verhältnis zu den Wandlernennströmen klein und befinden sich in den Schaltanlagen

¹⁾ Vgl. auch M. Walter, Selektivschutzrichtungen für Hochspannungsnetze, R. Oldenbourg 1929, S. 123.

schon Einrichtungen zur Gewinnung der Sternpunkterdspannung, so sollte man auch für Stickleitungen Erdschluß-Richtungsrelais (Blindleistungsrelais) verwenden.

Für Ringleitungen, parallele Leitungen, vermaschte Netze oder dergleichen müssen zum selektiven Anzeigen des erdgeschlossenen Anlageteiles grundsätzlich Erdschluß-Richtungsrelais benutzt werden. Diese

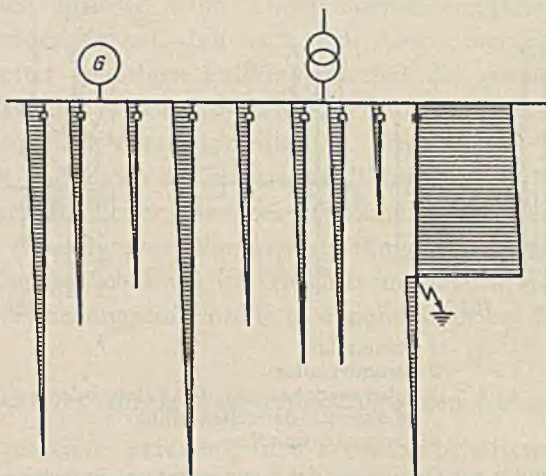


Abb. 115. Verteilung des Summenstromes in einem unkompenzierten Strahlennetz bei Erdschluß und selektives Anzeigen der erdgeschlossenen Stickleitung durch Stromrelais. In den gesunden Stickleitungen sind die Stromrelais unwirksam (weiße Vierecke), in der kranken Stickleitung betätigt das Stromrelais seine Fallklappe (schwarzes Viereck).

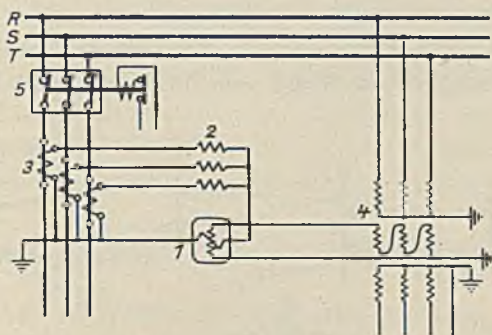
Erdschluß-Richtungsrelais werden vom Summenstrom und der Sternpunkterdspannung erregt und bilden in der ihnen eigenen $\sin \varphi$ -Schaltung das Produkt $U_{EM} \cdot I_M \cdot \sin \varphi$. Durch Vergleich der Richtungsangaben der einzelnen Relais im Netz kann auf den erdgeschlossenen Anlageteil geschlossen werden (s. Seite 170 und Abb. 117).

Die Blindleistungsrelais werden nur noch verhältnismäßig selten verwendet, da die größeren Netze heute meist mit Löscheinrichtungen versehen sind.

b) In Netzen mit Erdschlußlöschung

In kompensierten Netzen hat nur der Wirkstromanteil des Summenstromes an der Erdschlußstelle seinen größten Wert. Er nimmt von der Fehlerstelle nach den Enden der anliegenden Leitungsabschnitte hin

ab, während die Größe und Richtung des Blindstromanteiles von der Verteilung der Löscheinrichtungen im Netz abhängig ist (vgl. Abb. 23). Für das selektive Anzeigen des erdgeschlossenen Anlageteiles eignet sich daher in kompensierten Netzen nur die Verteilung des Wirkstromes in den Anlageteilen. Der Wirkstromanteil wird als Bestandteil des nicht kompensierten Reststromes mit der ihm phasengleichen Sternpunktterdspannung den Erdschluß-Richtungsrelais in $\cos \varphi$ -Schaltung zugeführt



- 1 Erdschluß-Richtungsrelais
- 2 Scheinwiderstände, die Relais oder Meßgeräte darstellen sollen
- 3 Stromwandler
- 4 Spannungswandler
- 5 Leistungschalter

Abb. 116. Innen- und Außenschaltung eines Erdschluß-Richtungsrelais

(Abb. 116) und für das selektive Anzeigen des erdgeschlossenen Anlageteiles benutzt.

Der mit Erdschluß behaftete Anlageteil wird in Kabel- und Freileitungsnetzen durch diese Wirkleistungsrelais¹⁾ dadurch kenntlich gemacht (Abb. 117), daß die Relais infolge ihrer Richtungsempfindlichkeit an beiden Enden des gestörten Schützlings ihre Fallklappen auslösen und in den gesunden Anlageteilen höchstens an einem Ende. Die übrigen Erdschluß-Richtungsrelais der gesunden Anlageteile sperren. Über die ausgelösten Fallklappen wird von den einzelnen Stationen nach einer vorgegebenen Betriebsstelle telephonisch berichtet und von dort aus der betroffene Anlageteil, also derjenige mit zwei ausgelösten Fallklappen²⁾, festgestellt. Anschließend daran kann nach zweckentsprechenden

¹⁾ Der Aufbau dieser Relais ist aus den Abb. 53 und 54 ersichtlich.

²⁾ In Stichleitungen wird nur eine Fallklappe ausgelöst.

Netzumschaltungen der kranke Anlagenteil außer Betrieb genommen werden.

Die Erdschluß-Richtungsrelais in $\cos\varphi$ -Schaltung können in beliebigen Netzgebilden verwendet werden. Sie müssen im allgemeinen eine hohe Ansprechempfindlichkeit aufweisen, da der Wirkstromanteil des gesamten Reststromes eines Netzes oft nur einen Bruchteil der Wandlernennströme beträgt und dieser sich überdies vom Fehlerort nach zwei Seiten — sogar sehr ungleich — verteilen kann. Die Relais müssen also auch noch bei Bruchteilen des Gesamtreststromes sicher ansprechen und richtig arbeiten. Dem stehen jedoch mitunter größere Falschströme der Wandler hinderlich im Wege, die durch ungleiche Bürden noch er-

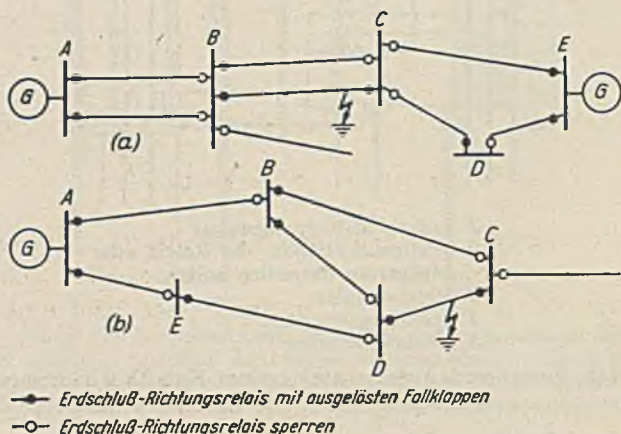


Abb. 117. Selektives Anzeigen des erdgeschlossenen Anlagenteiles durch Erdschluß-Richtungsrelais in zwei kompensierten Netzen verschiedener Form.

höht werden. Auch können Oberwellen, bedingt durch das Netz oder den Magnetisierungsstrom der Wandler, störend wirken und das richtige Arbeiten der Relais beeinträchtigen¹⁾. Solche Schwierigkeiten lassen sich zum Teil dadurch beseitigen, daß die Wandler in der Summenstromschaltung (Abb. 114a und b) untereinander auf gleiche Strom- und Winkelfehler abgeglichen und im Betrieb gleichmäßig bebürdet werden. In Kabelnetzen kann man den Summenstrom auch durch Ringwandler, die über die Drehstromkabel gemäß Abb. 114c geschoben werden, gewinnen.

¹⁾ Siehe auch H. Weber, Der Erdschluß in Hochspannungsnetzen, R. Oldenbourg, München 1936, S. 75; W. Reiche, Arch. Elektrotechnik 31 (1937) S. 618.

Hier fallen die von den Wandlerfehlern herrührenden Falschströme freilich fort.

Das richtige Arbeiten der Erdschluß-Richtungsrelais kann auch in Frage gestellt werden, wenn z. B. in parallel betriebenen Drehstromleitungen das Verhältnis der Scheinwiderstände gleichnamiger Leiter untereinander nicht genau gleich ist. Den Relais werden nämlich in solchen Fällen durch die Lastströme Unsymmetrieströme vorgetäuscht, die mit dem eigentlichen Erdschlußwirkstrom des Netzes in keinem Zusammenhang stehen. Ähnliche Verhältnisse ergeben sich, wenn die Impedanzwinkel parallel betriebener Leitungen verschieden groß sind. Den Erdschluß-Richtungsrelais wird hier beim Fließen von Erdschlußblindstrom auf den Leitungen ebenfalls ein zusätzlicher (erdschlußfremder) Wirkstrom vorgetäuscht. Durch gleichmäßiges Verteilen der Löscheinrichtungen im Netz kann dieser Falschstrom vermindert werden¹⁾.

4. Selektives Abschalten des erdgeschlossenen Anlageteiles

a) In Netzen mit Erdschlußlöschung

In Freileitungsnetzen und kleineren Kabelnetzen begnügt man sich meist mit dem selektiven Anzeigen der erdgeschlossenen Anlageteile, da die Auswirkungen des Erdschlusses in den Netzen infolge der Löscheinrichtungen gering sind.

Anders liegen die Verhältnisse in großen Kabelnetzen²⁾. Hier wird der Erdschluß-Lichtbogen in dem kurzen Durchbruchskanal der Kabelisolation nicht mehr gelöscht; er führt daher meist zum Dauererdschluß. Der erhebliche Reststrom zerstört in kurzer Zeit die Isolation zu den anderen Leitern des Kabels und leitet einen Kurzschluß ein. Um die Ausbildung des Kurzschlusses mit seinen weit gefährlicheren Auswirkungen zu verhindern, ist ein baldiges und selektives Abschalten des erdgeschlossenen Kabels erwünscht. Diese Aufgabe erfüllen Wirkleistungs-Zeitrelais, deren Auslösezeit fest eingestellt oder von der Größe des Wirkstromanteiles des Summenstromes abhängig ist. Da in kompensierten Netzen der Wirkstromanteil des Summenstromes in Richtung zur Fehlerstelle zunimmt, insbesondere in vermaschten Netzen³⁾,

¹⁾ E. Schulze, Elektrizitätswirtschaft 32 (1933) S. 277 und 298.

²⁾ Wie Fußnote ¹⁾.

³⁾ Hier führt die kranke Leitung die Summe der Wirkströme aller Zuführungsleitungen.

und da durch eine entsprechende Verteilung der Löscheinrichtungen im Netz die Wirkstromverteilung im günstigsten Sinne beeinflusst werden kann, so ist die Voraussetzung für ein selektives Abschalten des Erdschlusses gegeben¹⁾. Die Auslösezeit solcher Relais beträgt z. B. 1 bis 6 s (vgl. auch die Zeitkennlinie nach Abb. 118).

Bei Doppelerdschlüssen müssen diese Wirkleistungsrelais am Auslösen verhindert werden, denn die dabei im Netz auftretenden Stern-

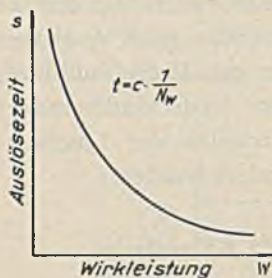


Abb. 118. Zeitkennlinie eines Wirkleistungs-Zeitrelais.

punkterdspannungen und Summenströme gehorchen anderen Gesetzen²⁾. Überdies nehmen hier die Summenströme die Größenordnung der Kurzschlußströme an, wodurch die Erdschlußrelais nicht mehr in ihrem abhängigen Bereich arbeiten und dadurch nicht mehr einwandfrei staffeln. Das Sperren der Erdschlußrelais kann von der Größe des Summenstromes, von der Höhe der Sternpunkterdspannung, vom Auftreten des gegenläufigen Drehfeldes oder vom Ansprechen der Kurzschlußrelais abhängig gemacht werden³⁾.

Sofern Hilfsleitungen zur Verfügung stehen, kann mit Hilfe eines Richtungsvergleiches jede Erdschlußrichtungsanzeige-Einrichtung zum Abschalten der erdschlußbehafteten Leitung benutzt werden.

b) In Netzen ohne Erdschlußlöschung

In unkompenzierten Netzen können die erdgeschlossenen Stichleitungen durch gewöhnliche Stromrelais selektiv abgeschaltet werden (siehe Abb. 114 und 115). Bedingung ist allerdings, daß der Summenstrom des Netzes im Verhältnis zur Übersetzung der Stromwandler nicht allzu klein ist. Andernfalls müssen Leistungs-Richtungsrelais in sin φ -Schaltung verwendet werden.

Erdschlüsse an Maschinen, sogenannte Gestellschlüsse, werden je nach den Netzverhältnissen durch Erdschluß-Richtungsrelais, Stromrelais oder Spannungsrelais selektiv abgeschaltet oder nur selektiv angezeigt (näheres siehe auf Seite 222).

¹⁾ E. Schulze, Elektrizitätswirtschaft 32 (1933) S. 277 und 298.

²⁾ H. Titze, Dissertation T. H. Berlin 1935 und ETZ 57 (1936) S. 1031.

³⁾ Siehe auch H. Weber, Der Erdschluß in Hochspannungsnetzen, R. Oldenbourg 1936, S. 87 bis 90.

5. Selektives Anzeigen von Erdschlußwischern

Die bisher geschilderten Melde-, Anzeige- und Abschalteinrichtungen eignen sich streng genommen nur zum Erfassen von Dauererdschlüssen. Zum Feststellen von Erdschlußwischern sind sie infolge ihres mechanischen Aufbaues in der Regel zu träge. In der Praxis besteht aber nicht selten das Bedürfnis, auch die Wischer selektiv anzuzeigen und abzustellen, da diese nicht nur zu Dauererdschlüssen, sondern unmittelbar auch zu Kurzschlüssen führen können.

Der Durchschlag gegen Erde erfolgt bei den Wischern stets in der Nähe des höchsten Spannungswertes und ist im ersten Augenblick lediglich mit dem Entladestoß der Netzkapazität verbunden. Die Erdschlußwischer rufen dabei gedämpfte Schwingungen mit einigen 1000 Hz hervor und haben unter Umständen, insbesondere in Kabelnetzen, eine Zeitdauer von nur wenigen Millisekunden. Außerdem gehorcht die Verteilung des Entladestromes anderen Gesetzen als die des Summenstromes bei Dauererdschluß. Eine einwandfreie Feststellung des angeschlossenen Anlageteiles ist in solchen Fällen nur möglich, wenn die Messung innerhalb des ersten Stromstoßes abgeschlossen ist. Hierzu eignen sich z. B. Einrichtungen, die mit gesteuerten Röhren arbeiten¹⁾. Diese werden von den Augenblickswerten der Sternpunktterdspannung und des Summenstromes erregt. Aus dem Anzeigen der Fallklappen, die von den Röhren gesteuert werden, läßt sich der betroffene Anlageteil ermitteln.

Mit schnellarbeitenden elektrodynamischen Erdschluß-Richtungsrelais lassen sich, wenn man von besonderen Hilfsmitteln absieht, nur solche Wischer selektiv erfassen, die mindestens 1 Halbwelle dauern²⁾.

I. Pendelschutzeinrichtungen

Leistungspendelungen zwischen den Kraftwerken elektrischer Netze sind meist mit hohen Überströmen und starken Spannungsabsenkungen verbunden³⁾. Sie täuschen den Schutzrelais, wie Distanzrelais, Überstromzeitrelais, Richtungsrelais und dergleichen dreipolige Kurzschlüsse mit rhythmischer Aufeinanderfolge und mit stetig wandernder Fehlerstelle vor⁴⁾. Die Relais werden dabei wiederholt angeregt⁵⁾ und lösen

1) H. Neugebauer, Siemens-Z. 16 (1936) S. 287.

2) Vgl. z. B. K. Meyer, AEG-Mitteilungen (1936) S. 84.

3) Siehe auch die Ausführungen über Pendelerscheinungen im Kapitel III.

4) Vgl. auch R. Schimpf, ETZ 54 (1933) S. 1134.

5) Bei jeder Schwebung erfolgt im allgemeinen ein Anziehen und Abfallen der Anregeglier.

wahllos im Netz aus, besonders wenn ihre kleinste Auslösezeit kürzer ist als die längste Dauer der Schwebung, bei der die Anregung des Schutzes noch besteht. Ein selektives Abschalten ist bei Pendelungen nicht möglich, weil im Netz kein Störungsherd vorhanden ist. Da die einzelnen Schwebungen bis etwa 2 s dauern können, namentlich bei Eintritt der Pendelungen sowie kurz vor dem Fangen der Maschinen, so ist die Auslösemöglichkeit bei schnellarbeitenden Relais besonders leicht gegeben.

In früheren Jahren, als die Auslösezeiten der Schutzrelais in den Netzen noch 1 bis 4 s betragen, traten Relaisauslösungen bei Pendelerscheinungen verhältnismäßig selten auf¹⁾. Heute werden mit den Schutzrelais aber Auslösezeiten erreicht, die kleiner sind als die kürzeste Schwebungsdauer (etwa 0,2 s), so daß die Gefahr für ein unerwünschtes Auslösen bei Pendelungen sehr groß ist. Durch eingehendes Studium der Pendelerscheinungen und durch Sammeln von Betriebserfahrungen sind jedoch in den letzten Jahren Lösungen gefunden worden, die auch die schnellarbeitenden Relais pendelfest machen und die überdies im Notfall ein Trennen der Kraftwerke an solchen Netzstellen ermöglichen, die für die Aufrechterhaltung des Betriebes bei aufgetrenntem Netz günstig liegen. Es handelt sich um Pendelsperr- und Netzauftrenneinrichtungen, die den Schutzrelais (z. B. Distanzrelais) zugeordnet werden.

1. Pendelsperreinrichtungen

Den Pendelsperreinrichtungen wird gewöhnlich als Arbeitskriterium entweder das wiederholte Anziehen und Abfallen der Anregeglieder der Hauptschutzeinrichtungen oder das Verhalten der Richtungsglieder bzw. Richtungsrelais bei Pendelvorgängen zugrundegelegt.

Die Einrichtungen nach dem ersten Verfahren bereiten bei den Schutzrelais nach deren Ansprechen infolge eines Kurzschlusses eine Zusatzzeit (Pufferzeit) zur Auslösezeit vor. Wenn sämtliche Anregeglieder eines Relaissatzes nach dem ersten Ansprechen durch die anschließende Schwebung neu anregen, addiert sich sofort die Pufferzeit von etwa einer bis zwei Sekunden zu der Grundzeit²⁾ der Schutzrelais. Dadurch wird die kleinste Auslösezeit stets länger als die längste Schwebungsdauer, und die Schutzrelais werden pendelfest. Ist der Kurzschlußschutz längere Zeit in Ruhe geblieben (5 bis 10 s), so wird die Pufferzeit wieder überbrückt.

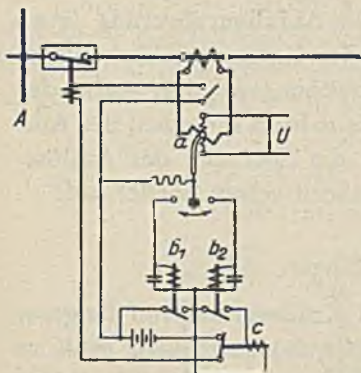
¹⁾ Vgl. auch M. Walter, E. und M. 50 (1932) S. 261.

²⁾ Bzw. zu der Arbeitszeit der ersten oder zweiten Zeitstufe.

In Abb. 119 ist die Schaltung einer Pendelsperreinrichtung nach dem zweiten Verfahren dargestellt¹⁾. Das Richtungsrelais bzw. das Richtungsglied *a* der Kurzschlußschutzeinrichtung betätigt abwechselnd die beiden Zwischenrelais mit Abfallverzögerung b_1 und b_2 , die ihrerseits über hintereinanderliegende Arbeitskontakte das Zwischenrelais *c* steuern, das den Auslösekreis zum Leistungsschalter geschlossen hält oder unterbricht.

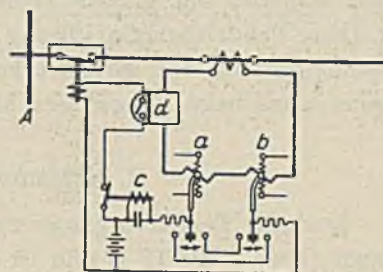
Bei Kurzschlüssen im Netz wird der Umschaltkontakt des Richtungsgliedes entweder nur auf die Auslöseseite oder nur auf die Sperrseite hin bewegt. Von den beiden Abfallverzögerungsrelais wird dadurch nur eines an Spannung gelegt, und das eigentliche Pendelsperrelais *c* bleibt geschlossen.

Bei Pendelungen im Netz schlägt dagegen der Umschaltkontakt des Richtungsrelais mit jeder Schwebungsperiode einmal um. Da die



a Richtungsglied eines Distanzrelais
*b*₁ und *b*₂ Abfallverzögerungsrelais
c Hilfsrelais

Abb. 119. Pendelsperreinrichtung.



a und *b* Richtungsrelais
c Abfallverzögerungsrelais
d Distanzrelais

Abb. 120. Schnell-Pendelsperreinrichtung

Abfallverzögerung der Relais b_1 und b_2 gleich der längsten Schwebungsdauer von etwa 2 s gesetzt wird, so erfolgt ein Durchschalten des Stromkreises für das Hilfsrelais *c*, das sofort mit seinem Ruhekontakt den Auslösekreis zum Leistungsschalter unterbricht. Die Sperrung der Auslösung erfolgt schon innerhalb der ersten Schwebungsperiode und setzt, von der Abfallverzögerung der Hilfsrelais b_1 und b_2 abgesehen, unmittelbar nach dem Aufhören der Pendelungen aus.

¹⁾ Vgl. auch H. Gutmann, Elektrizitätswirtschaft 39 (1940) S. 14; ferner H. Neugebauer, Siemens-Z. 14 (1934) S. 83.

Abb. 120 zeigt die Schaltung einer weiteren Pendelsperreinrichtung, die ebenfalls nach dem zweiten Verfahren arbeitet¹⁾. Getrennt vom Kurzschlußschutz steuert hier z. B. ein Wirkleistungsrelais *a* und ein Blindleistungsrelais *b* über ihre Umschaltkontakte (Wahlkontakte) das Hilfsrelais *c*, das den Auslösekreis zum Leistungsschalter stets geschlossen hält und nur bei Pendelungen öffnet.

In Kurzschlußfällen schlagen die Richtungsrelais mit ihren Umschaltkontakten immer gleichsinnig aus, so daß das Hilfsrelais *c* unerregt bleibt. Bei Netzpendelungen bewegen sich dagegen die Richtungsrelais in entgegengesetzter Richtung und schalten dadurch das Hilfsrelais *c* ein, das seinerseits den Auslösestromkreis sofort unterbricht. Das abwechselnd gleich- und gegensinnige Ausschlagen der beiden Richtungsrelais ist durch die stetige Winkeländerung zwischen dem Vektor des Schwebungsstromes und dem der Dreiecksspannung während jeder Schwebung bedingt. Das Hilfsrelais *c* muß hier mit Abfallverzögerung (etwa 1 s) arbeiten, da die gegensinnige Stellung der Richtungsrelaiskontakte nicht während der ganzen Dauer einer Schwebungsperiode vorhanden ist. Diese Pendelsperreinrichtung arbeitet bereits beim Einsetzen des Auseinanderlaufens der Kraftwerke und hebt die Sperrung des Auslösestromkreises beim Fangen der Maschinen nahezu sofort wieder auf.

2. Netzauftrenneinrichtungen

Sind die Pendelvorgänge zwischen den Kraftwerken von längerer Dauer (etwa 6 bis 15 s) und ist dabei die Schwebungsfrequenz groß, so ist im allgemeinen die Aussicht auf ein Wiederfangen der Maschinen gering. Um dem auf die Dauer untragbaren Pendelzustand ein Ende zu bereiten, ist ein Auftrennen des Netzes erforderlich. Die Auftrennung wird man am zweckmäßigsten an solchen Netzstellen durchführen lassen, wo Synchronisierereinrichtungen vorhanden sind und wo die Leistungsscheiden der einzelnen Kraftwerke liegen²⁾.

Das Auftrennen der Netze läßt sich in einfacher Weise durch Zeitrelais herbeiführen, die von den beschriebenen Pendelsperreinrichtungen über Zusatzkontakte gesteuert werden, z. B. durch einen Arbeitskontakt an den Hilfsrelais *c* der Abb. 119 und 120.

¹⁾ Vgl. auch H. Gutmann, Elektrizitätswirtschaft 39 (1940) S. 14 sowie M. Schleicher, Die moderne Selektivschutztechnik, J. Springer, Berlin 1936, S. 299.

²⁾ Siehe auch M. Schleicher, Die moderne Selektivschutztechnik, J. Springer, Berlin 1936, S. 300.

K. Schutzeinrichtungen gegen unzulässige Erwärmung von Anlageteilen

Die Wärmeschutzeinrichtungen dienen vornehmlich dazu, Maschinen, Transformatoren, Kabel oder dergleichen gegen unzulässige Erwärmung, die durch Überlastung, Kurzschluß, Windungsschluß, Eisenbrand usw. entstehen kann, zu schützen. Die Schutzgeräte können dabei der Wärmewirkung des Fehlers selbst ausgesetzt sein oder vom Strom des Schützlings durchflossen werden. Es handelt sich hier um Kontaktthermometer, Wärmewächter und Wärmerelais, die in die Wicklungen oder in das Eisen der Maschinen eingebaut, in das Öl von Transformatoren und Kondensatoren getaucht, oder aber in den Stromkreis der Schützlingle geschaltet werden.

1. Wärmewächter

In Abb. 121 sind zwei Wärmewächter (Gefahrmelder) schematisch dargestellt, wie sie in Öltransformatoren und Ölkondensatoren zum Feststellen unzulässiger Erwärmung infolge Überlastung oder infolge von



Abb. 121. Wärmewächter in schematischer Darstellung

Störungen in der Ölumlaufkühlung Verwendung finden. Die Wächter enthalten einen Bimetallstreifen¹⁾, der sich beim Erreichen oder Überschreiten der eingestellten Grenztemperatur soweit durchbiegt, daß eine

¹⁾ Diese bestehen aus zwei Metallstreifen, die bei hoher Temperatur aufeinander gewalzt oder geschweißt sind und die eine stark verschiedene Längenausdehnung bei Erwärmung aufweisen; als Werkstoff werden meist Nickelstahllegierungen benutzt.

Kontaktgabe zustande kommt. Das rechte Bild zeigt einen halbautomatischen Wärmewächter mit Temperatureinstellskala und schlagartiger Kontaktgabe, der sich zum Steuern auch von Starkstromkreisen gut eignet¹⁾. — In besetzten Stationen läßt man die Wärmewächter gewöhnlich nur auf einen Meldekreis für Hupen, Sirenen oder Glocken arbeiten, in unbesetzten Stationen jedoch vielfach auch auf den Auslösekreis der Schalter. Damit die höchste Temperatur (an der Oberschicht des Öles) erfaßt wird, erfolgt der Einbau der Wächter stets am Deckel der Schützlinge.

2. Wärmerelais

Die Wärmerelais werden gewöhnlich als Überstrom-Zeitrelais zum Anschluß an Stromwandler ausgeführt und hauptsächlich zum Schutze von Motoren, Gleichrichtern oder dergleichen gegen die Auswirkungen von Überlastungen und Kurzschlüssen verwendet²⁾. Ihre Verzögerungsglieder bestehen in der Regel aus Bimetallstreifen³⁾, denen oft ein zweiter, nicht strombeheizter Bimetallstreifen zugeordnet wird, der den Einfluß der Raumtemperatur auf die Arbeitsweise der Relais auszugleichen hat. Übersteigt die Stromaufnahme des Schützlings den eingestellten Stromwert, so biegen sich die strombeheizten Bimetallstreifen soweit aus, daß sie den Kontakt je nach Ausführung der Kinematik schleichend oder schlagartig (Arbeits- oder Ruhekontakt) im Auslösekreis zum Leistungsschalter betätigen. Beim Abkühlen des erwärmten Bimetalls nimmt die Kontakteinrichtung ihre Anfangslage wieder ein. Die meisten Ausführungen der Wärmerelais werden außerdem mit Klappanker magneten versehen, die bei Kurzschlußströmen, etwa dem 6- bis 12fachen Nennstrom des Schützlings, eine Schnellauslösung herbeiführen. Aus Abb. 122 ist der grundsätzliche Verlauf der Zeitkennlinien eines Wärmerelais für die genannten Zwecke ersichtlich.

Zum Schutze der Bimetallstreifen gegen Zerstörung durch sehr hohe Kurzschlußströme sowie auch zur Erzielung von nahezu begrenzt-abhängigen Zeit-Strom-Kennlinien werden die Wärmerelais überdies vielfach mit Sättigungs-Stromwandlern versehen.

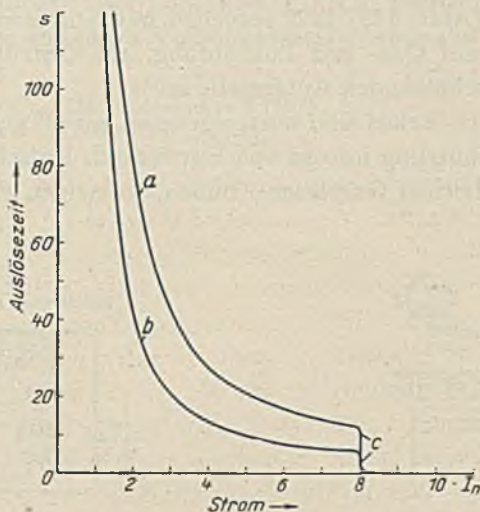
Grundsätzlich sollten die Wärmeglieder der Relais so ausgeführt sein, daß ihre Zeitkonstante der des Schützlings einigermaßen angepaßt ist. Thermische Abbilder lassen sich jedoch sehr schwer und nur mit

¹⁾ Ausführlicher siehe bei v. Wiarda und E. Wilm, ETZ 49 (1928) S. 88.

²⁾ Vgl. z. B. F. Fröhlich, AEG-Mitteilungen (1938) S. 149.

³⁾ Seltener aus Schmelzlot.

großem Aufwand herstellen. Die Schwierigkeit liegt im wesentlichen darin, daß die wechselnde Erwärmung und Abkühlung der Aufbauteile eines Schützlings nur durch mehrere Zeitkonstanten erfaßt werden kann, und daß die Wärmeausbildung dort von den Wärmerelais eigentlich übet



- a* Zeitkurve für kalte Bimetallstreifen
b Zeitkurve für vorgewärmte Bimetallstreifen
c Schnellauslösung durch unverzögerte Überstrommagnete

Abb. 122. Grundsätzlicher Verlauf der Zeitkennlinien von Wärmerelais

einen längeren Zeitraum einschließlich der „Vorgeschichte“ integriert werden müßte. In jüngster Zeit ist ein Überlastrelais (Primärrelais bzw. Primärauslöser) entwickelt worden, dessen Zeitkennlinien sich schon in weiten Grenzen den thermischen Verhältnissen des zu schützenden Gegenstandes anpassen lassen¹⁾.

Die Wärmerelais werden vorwiegend in zweipoliger Ausführung geliefert. Falls der Sternpunkt des Schützlings kurz geerdet ist, müssen dreipolige Ausführungen angewendet werden.

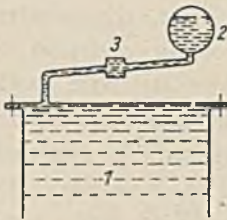
L. Gasfang- und Ölströmungs-Schutzeinrichtungen

Gasfang- bzw. Ölströmungsschutzeinrichtungen haben die Aufgabe, die im Innern von ölfüllten Anlagenteilen, wie Transformatoren, Kon-

¹⁾ Fr. Parschalk, ETZ 59 (1938) S. 219.

ensatoren oder dergleichen, auftretenden Fehler entweder durch Tonzeichen zu melden oder, falls die Betriebssicherheit der Schützlinge stark gefährdet ist, diese über Leistungsschalter abzutrennen. Es handelt sich hierbei um mechanische Schutzgeräte (Buchholz-Relais). Diese Geräte werden in das Verbindungsrohr zwischen Schützling und Ausdehnungsgefäß eingebaut (Abb. 123) und sprechen mit Schwimmeranordnungen in ihrem Innern auf Gas- und Luftbildung, auf Ölströmung sowie auf Ölverlust der zu schützenden Anlageteile an¹⁾.

Die Buchholz-Relais sind normalerweise mit Öl gefüllt (Abb. 124). Sobald sich im Schützling infolge von Eisenbrand, Erdschluß, Windungsschluß oder dergleichen Gasblasen²⁾ bilden, so steigen diese zunächst in



1 Öltransformator
2 Öldehnungsgefäß
3 Buchholz-Relais

Abb. 123. Anordnung einer Gasfang- und Ölströmungs-Schutzeinrichtung.

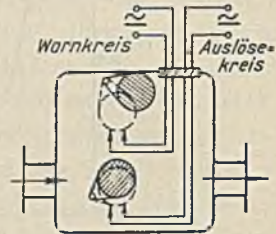


Abb. 124. Buchholz-Relais mit zwei Schwimmern.

das Buchholz-Relais und verdrängen dort allmählich das Öl. Der obere Schwimmer folgt dabei dem Ölspiegel, bis er den Kontakt für ein Warnsignal schließt. Tritt jedoch im Transformator ein schwerer Fehler, z. B. ein Kurzschluß ein, so wird durch die heftige Ölbewegung vom Transformator zum Ausdehnungsgefäß hin der untere Schwimmer (bzw. eine Strömungsklappe) des Relais schlagartig gegen seinen Kontakt gedrückt, der den Stromkreis zu den Auslöseeinrichtungen der Leistungsschalter schließt. Beim Undichtwerden des Transformators kann das Buchholz-Relais ebenfalls ansprechen, und zwar wenn der Ölspiegel in ihm ein gewisses Maß unterschreitet.

¹⁾ M. Buchholz, ETZ 49. (1928) S. 1257; H. Schwenkhagen, VDE-Fachberichte (1928) S. 27; H. Prinz, Siemens-Z. 16 (1936) S. 298.

²⁾ Jeder auch noch so kleine Isolationsschaden im Öltransformator hat eine örtliche mit Gasentwicklung verbundene Ölersetzung zur Folge.

Das Buchholz-Relais ist ein Schutzgerät, das auf innere Fehler des Schützlings anspricht und diese im allgemeinen schon im Entstehen erfaßt¹⁾).

In jüngster Zeit ist ein ähnliches Schutzgerät bekannt geworden, das im wesentlichen auf Druckausgleich zwischen Öltransformator und Ausdehnungsgefäß im Verbindungsrohr anspricht²⁾).

¹⁾ E. Schmohl, VDE-Fachberichte 8 (1936) S. 39.

²⁾ K. Täuber, ETZ 60 (1939) S. 314.

V. Strom- und Spannungswandler für den Anschluß von Relais

Strom- und Spannungswandler bilden wesentliche Bestandteile der im Kapitel IV beschriebenen Schutzeinrichtungen und bieten im allgemeinen folgende Vorteile:

- a) Fernhaltung der Hochspannung von den der Berührung zugänglichen Relais.
- b) Umwandlung der Ströme und Spannungen beliebiger Höhe in eine für die Messung geeignete Größe.
- c) Erhöhung der Meßgenauigkeit bei großen Stromstärken, da die Sekundärrelais leichter den elektromagnetischen Einwirkungen der Hauptstromleitungen entzogen werden können als unmittelbar in die Leiter eingebaute Primärrelais oder Primärauslöser.
- d) Begrenzung der durch Kurzschlußströme entstehenden thermischen und dynamischen Beanspruchung der Relais.
- e) Möglichkeit der Trennung von „Schaltanlage“ und „Warte“.

Die Strom- und Spannungswandler müssen, um ein richtiges Arbeiten der Relais zu gewährleisten, gewissen Bedingungen in bezug auf Leistung, Genauigkeit, Überstromziffer und Kurzschlußfestigkeit genügen; für sie gelten in Deutschland die VDE-Regeln für Wandler (VDE 0414). Außerdem sind bei der Auslegung der Wandler die Erfordernisse der Schutzrelais zu berücksichtigen¹⁾.

A. Stromwandler

1. Aufbau

Die Arbeitsweise eines Stromwandlers gleicht derjenigen eines kurzgeschlossenen Einphasen-Transformators. Im einfachsten Fall hat der Stromwandler einen aus Eisenblechen zusammengesetzten Kern und zwei,

¹⁾ Vgl. auch M. Walter, ETZ 55 (1934) S. 483; H. Neugebauer, Siemens-Z. 11 (1931) S. 147 und 192.

meist auf einem Schenkel konzentrisch angeordnete Stromspulen, die primäre und die sekundäre. Bei Stromdurchgang sind die beiden Stromkreise durch den magnetischen Fluß im Eisenkern miteinander verkettet (Abb. 125).

Der Sekundärstrom soll in einem bestimmten Meßbereich den Primärstrom möglichst verhältnisgleich und winkelgetreu wiedergeben. Auf-

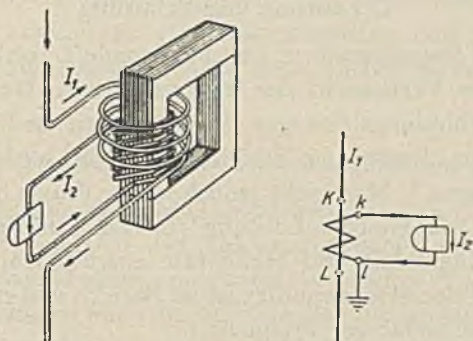


Abb. 125. Aufbau und Grundsaltung eines Stromwandlers.

tretende Abweichungen, nämlich die Strom- und Winkelfehler (Begriffserklärungen siehe auf Seite 24), sind im wesentlichen durch den notwendigen Erregerstrom (Magnetisierungsstrom + Verluststrom) bedingt. Die Strom- und Winkelfehler können durch verschiedene Mittel in den für die Messung zulässigen Grenzen gehalten werden, beispielsweise durch geeignete Bemessung des Querschnittes und entsprechende Wahl des Werkstoffes der Eisenkerne, durch Kunstschaltungen, durch Änderung der Windungszahl und schließlich durch Anbringen von Kurzschlußwindungen.

Als genormte Nennstromstärken für Stromwandler gelten die Werte:

Primäre Nennströme	5 10 15 20 30 50 75 100 150 200 300 400 500
	600 750 800 1000 1500 2000 3000 4000 5000 6000 A
Sekundäre Nennströme	5 A und in besonderen Fällen 1 A

Während für Meßgeräte und Zähler die Größe der Strom- und Winkelfehler eigentlich nur bei Stromstärken von $0,1$ bis $1,2 \cdot I_n$ von Bedeutung ist, interessiert für Schutzrelais das Verhalten der Wandler meist nur bei Stromstärken, die über dem Nennstrom liegen¹⁾. Die Bedingungen für die Stromfehler und Fehlwinkel können hier allerdings wesentlich milder sein.

2. Leistung und Belastung

Die von den Stromwandlern aufzubringende Leistung ist durch die Widerstände (den Verbrauch) der angeschlossenen Geräte und der erforderlichen Verbindungsleitungen (Zuleitungen) bedingt; für Schutzrelais genügen im allgemeinen Stromwandler mit einer Nennleistung von 30 VA in Klasse 3. Man zieht jedoch in der Praxis meist Stromwandler der Klasse 1 mit gleicher Leistung vor, um erforderlichenfalls auch Erdschluß-Richtungsrelais und Meßgeräte anschließen zu können.

Die Leistung der Stromwandler ist im Bereich von etwa 10 bis 100 Hz angenähert proportional der Frequenz.

Zur Kennzeichnung der Leistungsfähigkeit der Stromwandler dient auch der Begriff Nennbürde (siehe Seite 23).

Als genormte Nennbürden und Nennleistungen gelten für Stromwandler die Werte:

Nennbürde bei 5 A Ω	0,2	0,4	0,6	1,2	1,8	2,4	3,6
Nennbürde bei 1 A Ω	5	10	15	30	45	60	90
Nennleistung VA	5	10	15	30	45	60	90

Die Belastung der Stromwandler durch die Geräte und Zuleitungen wird entweder als Bürde in Ohm oder als Verbrauch in VA angegeben. Sie ist in der Regel induktiv ($\cos \beta = 0,4 \dots 0,8$), da die Geräte meist Wicklungen mit Eisenkernen enthalten.

Die tatsächliche Belastung eines Stromwandlers ermittelt man ent-

¹⁾ Eine umfassende Darstellung über Meßwandler findet man bei M. Walter, Strom- und Spannungswandler, R. Oldenbourg, München 1937 sowie bei B. Hague, Instrument Transformers, Pitman, London 1936.

weder rechnerisch durch Addition¹⁾ des Verbrauchs der einzelnen Geräte und der Zuleitungen (vgl. Abb. 130) oder durch Strom- und Spannungsmessung. Beim zweiten Verfahren wird der Sekundärkreis mit dem Nennstrom beschickt und dabei der Spannungsabfall an den Sekundärklemmen des Stromwandlers gemessen. Das Produkt aus dem Nennstrom und der gemessenen Spannung gibt den Verbrauch in VA an. Den entsprechenden Bürdenwert in Ohm liefert der Quotient aus dem gemessenen Spannungsabfall und dem Nennstrom. Die Bürde kann auch unmittelbar durch einen Bürdenmesser²⁾ ermittelt werden, und zwar nicht nur nach ihrer Gesamtgröße, sondern auch nach ihrem Wirk- und Blindwiderstandsanteil.

3. Überstromverhalten (Überstromziffer und Fehlwinkel)

Bei den üblichen Betriebsstromstärken (bis etwa 120% des Wandler-Nennstromes) heben sich die Amperewindungen (Durchflutungen) der Primär- und Sekundärspulen eines Stromwandlers gegenseitig nahezu auf, so daß der Eisenkern nur eine verhältnismäßig schwache Magnetisierung erfährt. Bei Überströmen bzw. Kurzschlußströmen wächst jedoch die Induktion im Eisenkern über den Normalwert von einigen 100 oder 1000 Gauß hinaus an und kann bis zur Sättigung des Eisens ansteigen, d. h. 15000 bis 20000 Gauß bei siliziertem Eisen erreichen. Zwangsläufig steigt infolge der zunehmenden magnetischen Sättigung auch der Erregerstrom an, und zwar stärker als verhältnismäßig. Da nun bei Stromwandlern der Primärstrom sowohl den Erregerstrom als auch den Sekundärstrom liefern muß, so kann der Sekundärstrom dem Primärstrom nicht bis zu den größten Überströmen verhältnismäßig folgen. Er bleibt mit zunehmender Sättigung des Kernes gegenüber seinem Sollwert immer mehr zurück; die Sollübersetzung des Wandlers wird dadurch mehr oder weniger stark gefälscht.

Abb. 126 zeigt dieses Verhalten in Form einer Kennlinie (Überstromkennlinie). Der Sekundärstrom ist hier beim 15fachen Primärstrom schon um 10% kleiner als sein Sollwert. Ist der Wandler dabei mit seiner Nennbürde belastet³⁾, so bezeichnet man das Vielfache des Pri-

¹⁾ Eigentlich müßte eine vektorielle Addition vorgenommen werden, da die Leistungsfaktoren der Summanden verschieden sind.

²⁾ A. Keller, VDE-Fachberichte 8 (1936) S. 55; W. Hohl, Phys. Zt. (1937) S. 389.

³⁾ In den neuen Wandlerregeln (VDE 0414/1940) ist der Nennbürde ein Leistungsfaktor $\cos \beta = 0,8$ zugrunde gelegt (s. auch Seite 24).

mär-Nennstromes, bei dem der Stromfehler 10% erreicht, als Nenn-Überstromziffer (siehe auch Seite 24). Im vorliegenden Beispiel ist die Nenn-Überstromziffer $n = 15$.

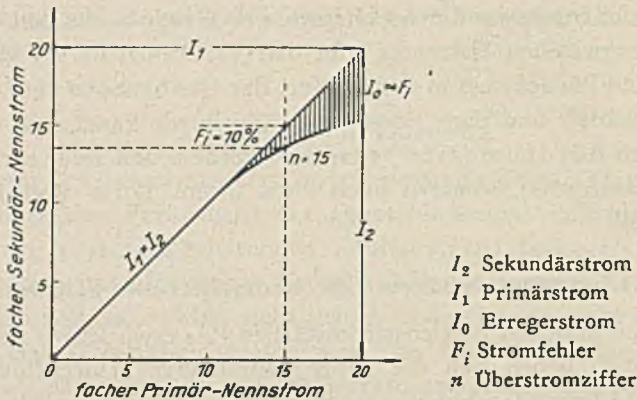


Abb. 126. Grundsätzlicher Verlauf der Überstromkennlinie eines Stromwandlers 5/5 A bei konstanter Bürde.

Der Verlauf der Überstromkennlinie ist bei jedem Stromwandler im wesentlichen abhängig von der Größe der angeschlossenen Bürde, vom Kernmaterial, von der Induktion im Eisenkern bei Nennstrom (Nenninduktion) und in gewissem Maße vom Leistungsfaktor der Bürde. Je größer die Bürde oder der Phasenwinkel β ist, desto früher weicht die Überstromkennlinie von der Sollübersetzungskennlinie ab (Abb. 127).

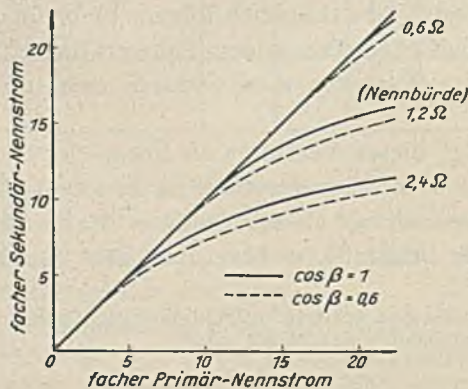


Abb. 127. Überstromkennlinien eines Stromwandlers bei verschiedenen Bürden. Die Nennbürde beträgt 1,2 Ohm.

Die gleiche Wirkung stellt sich ein, wenn die Nenninduktion des Wandlers hoch gewählt wird, weil dann mit zunehmendem Primärstrom die Eisensättigung früher eintritt.

Bei einem gegebenen Wandler ändert sich die Überstromziffer n näherungsweise umgekehrt proportional zur Größe der angeschlossenen Bürde (Abb. 127). Hat z. B. ein Stromwandler bei Belastung mit der Nennbürde von 1,2 Ohm eine Nenn-Überstromziffer $n = 15$ und wird er mit einer Bürde von 0,6 Ohm (Betriebsbürde!) belastet, so steigt die Überstromziffer annähernd auf den doppelten Wert, d. h. auf $n \approx 30$. Weist jedoch die Betriebsbürde einen Wert von 2,4 Ohm statt 1,2 Ohm auf, so geht die Nenn-Überstromziffer etwa auf die Hälfte zurück, d. h. von $n = 15$ auf $n \approx 7,5$.

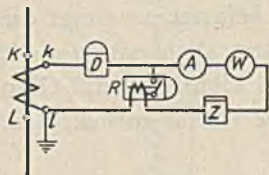
Hohe Überstromziffern der Wandler ($n = 8 \dots 20$) sind vorwiegend erforderlich für Distanzrelais, abhängige bzw. begrenzt-abhängige Überstromzeitrelais, Stufen-Überstromzeitrelais, thermische Überstromzeitrelais und gegebenenfalls auch für Längs-Stromvergleichsrelais (Differentialrelais), damit ihnen für die richtige Arbeitsweise bei Kurzschluß und Doppelerdschluß die Netzströme auf der Sekundärseite möglichst verhältnismäßig zugeführt werden. Die Stromwandler für solche Relais erhalten fast ausnahmslos Kerne aus siliziertem Eisen.

Für unabhängige Überstromzeitrelais, Richtungsrelais und Erdschlußrelais sowie für Meßgeräte und Zähler sind dagegen Wandler mit kleinen Überstromziffern ($n \approx 2 \dots 8$) zweckmäßig, denn es ist weder nötig noch erwünscht, daß sie jeden Überstrom getreu erfassen und im Sekundärkreis führen, zumal manche der angeschlossenen Geräte sehr hohe Überströme schlecht vertragen. Hier sind Wandlerkerne aus siliziertem Eisen mit hoher Nenninduktion, oder aber Kerne aus Nickeleisenlegierungen von Vorteil.

Bei der VDE-Definition der Nenn-Überstromziffer wird vorausgesetzt, daß die Bürde eines Wandlers bei allen Stromstärken, auch bei den größten, konstant bleibt. In Wirklichkeit nimmt jedoch die angeschlossene Bürde bei großen Stromstärken allmählich ab, weil der Blind- bzw. Scheinwiderstand der Relais infolge der auftretenden Eisensättigung in den Relaiskernen kleiner wird und sich schließlich einem Grenzwert nähert (vergleiche Abb. 35). Der Übersetzungsfehler von 10% tritt infolgedessen erst bei einem viel größeren Strom als dem angenommenen auf. Die Sicherheit nach oben wird dadurch oft unnötig hoch und nicht selten durch überflüssigen Aufwand an Werkstoff erkauft. Bei Bestel-

lungen ist es daher ratsam, die Überstromziffer eines Stromwandlers nur auf diejenige Bürde zu beziehen, die die anzuschließenden Geräte einschließlich der Zuleitungen bei der der Überstromziffer entsprechenden Stromstärke, beispielsweise beim 15fachen Nennstrom, aufweisen.

Wenn an den gleichen Kern eines Stromwandlers neben den Schutzrelais auch Meßgeräte und Betriebszähler anzuschließen sind und dadurch die erforderliche Überstromziffer nicht erreicht werden kann, so empfiehlt es sich, wie in Abb. 128 angedeutet, den Sekundärkreis im Kurzschlußfall durch ein Kurzschließerrelais zu entlasten, das die Meßgeräte und Betriebszähler durch einen kräftigen Arbeitskontakt überbrückt. Mit dieser Maßnahme wird nicht nur die Bürde des Wandlers bei hohen Strömen gemindert, sondern es werden auch gleichzeitig die Meßgeräte gegen den Dauerkurzschlußstrom geschützt.



- A Strommesser
- D Distanzrelais
- R Kurzschließerrelais
- W Leistungsmesser
- Z Betriebszähler

Abb. 128. Schaltung mit Kurzschließerrelais zur Erzielung einer größeren Überstromziffer.

Sind dagegen die Stromwandler gegenüber ihrer Nennleistung nur schwach belastet und die angeschlossenen Geräte (auch Relais!) infolgedessen durch hohe Überströme thermisch gefährdet, so ist der Einbau von Zusatzwiderständen (Zusatzbürden) in den Sekundärkreis der Wandler von Vorteil. Als Zusatzwiderstände können z. B. Widerstände mit verstellbaren Schellen von 0,2... 1,2 Ohm verwendet werden.

Der Fehlwinkel (siehe Seite 24) bleibt bei neuzeitlichen Stromwandlern auch bei sehr hohen Überströmen in Grenzen, die für Richtungsrelais und phasenwinkelabhängige Distanzrelais noch annehmbar sind, etwa unter 5° (vergleiche Abb. 129). Unzulässig groß kann er dagegen bei Einleiterstromwandlern älterer Ausführung mit weniger als 300 A Nennstrom werden. Hier ist

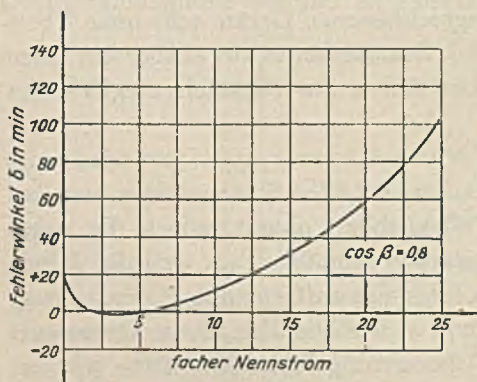


Abb. 129. Ungefäherer Verlauf der Fehlwinkelkennlinie eines Stromwandlers bei konstanter Bürde und konstantem Leistungsfaktor der Bürde ($\cos \beta$).

Vorsicht geboten, besonders wenn an die Stromwandler Reaktanzrelais angeschlossen werden sollen, weil der Fehlwinkel δ sich von dem primären Phasenwinkel φ des gestörten Anlagenteiles meist subtrahiert und dadurch dem Meßglied ein kleinerer Schleifen-Blindwiderstandswert vorgetäuscht wird.

Stromwandler für den Anschluß von Erdschluß-Richtungsrelais in $\sin \varphi$ - oder $\cos \varphi$ -Schaltung sollen besonders bei niedrigen Strömen (Bruchteilen des Nennstromes) winkelgetreu arbeiten. Hier müssen die Fehlwinkel sogar bei den drei Stromwandlern eines Wandlersatzes untereinander genau übereinstimmen und gegebenenfalls abgeglichen werden (siehe Seite 170). Dasselbe gilt in diesem Falle auch für die Stromfehler¹⁾.

4. Stromwandler mit mehreren Kernen

Sollen an die gleichen Stromwandler Relais, Meßgeräte und Betriebszähler angeschlossen werden, so ist es aus Gründen der Meßgenauigkeit und Betriebssicherheit zweckmäßig, bei jedem Wandler des Meßsatzes

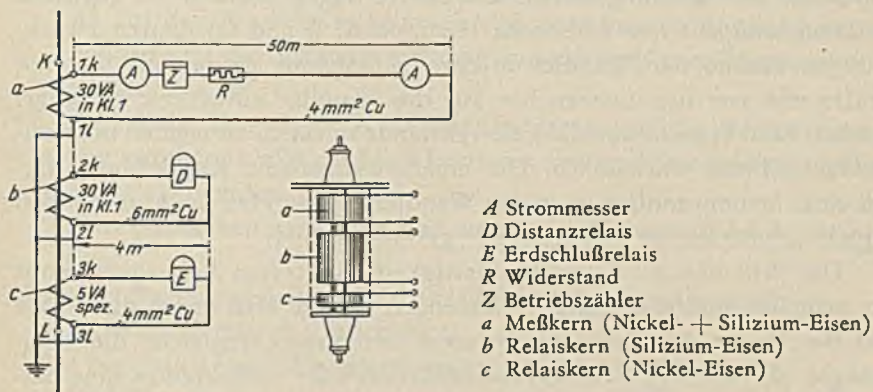


Abb. 130. Schaltung und Skizze eines Stabstromwandlers mit drei getrennten Kernen und Wicklungen für den Anschluß von Meßgeräten, Betriebszählern und Schutzrelais.

zwei oder mehrere getrennte Kerne vorzusehen (Abb. 130). Dadurch wird einerseits eine größere Übersichtlichkeit in der Leitungsführung geschaffen und die Gefahr von Schaltfehlern, insbesondere bei Vornahme von Prüfungen, vermieden, andererseits wird das ordnungsmäßige Arbeiten des Schutzes auch dann gewährleistet, wenn die Meßgeräte aus irgend einem Grund unterbrochen oder gestört sind.

¹⁾ Vgl. auch W. Reiche, Archiv f. Elektrotechn. 31 (1937) S. 618.

Im allgemeinen kommt man mit zwei Kernen je Stromwandler aus, von denen der eine für Meßgeräte und der andere für Relais bestimmt ist. Falls empfindliche Erdschluß-Richtungsrelais angeschlossen werden sollen, so empfiehlt es sich, für diese einen dritten Kern zu wählen. Bezüglich der Überstromziffer für die einzelnen Kerne siehe Seite 187).

5. Kurzschlußfestigkeit der Stromwandler

Da die Stromwandler im Leitungszug angeordnet werden und folglich den Beanspruchungen der Kurzschlußströme unmittelbar ausgesetzt sind, bemißt man sie so, daß sie die höchsten Kurzschlußströme an ihrer Einbaustelle unter den obwaltenden Umständen schadlos aushalten können. Dabei hat man bei den Stromwandlern grundsätzlich zwischen dynamischer und thermischer Kurzschlußfestigkeit zu unterscheiden.

Bei der dynamischen (mechanischen) Kurzschlußfestigkeit ist die innere und die äußere Festigkeit zu beachten. Die innere mechanische Festigkeit ist bedingt durch die Anordnung der Wicklungen und durch die Größe der Windungszahlen, die äußere dagegen durch die gegebene Umbruchfestigkeit der Isolatoren (Gruppe A, B und C). Durch zweckmäßigen Einbau der Wandler in den Leitungszug können die äußeren Kräfte, die von den Leitern her auf die Wandler einwirken, gesteuert werden. Man braucht nur die Leiterabstände reichlich zu wählen oder zusätzliche Stützer vorzusehen. Die innere dynamische Kurzschlußfestigkeit eines Stromwandlers ist in den Wandlerregeln (VDE 0414) durch den Begriff „dynamischer Grenzstrom“ gekennzeichnet.

Die thermische Kurzschlußfestigkeit hängt vom Leiterquerschnitt der primären und sekundären Wicklungen ab und wird durch die Größe und die Dauer des Kurzschlußstromes bestimmt [vergleiche die Gleichungen (6) und (7)]. Stoßkurzschlußströme oder wiederholtes Einschalten auf bestehende Kurzschlüsse müssen durch entsprechende Zuschlagzeiten berücksichtigt werden¹⁾. Die thermische Kurzschlußfestigkeit ist in den Wandlerregeln (VDE 0414) durch den Begriff „thermischer Grenzstrom“ gekennzeichnet (siehe auch Seite 25).

6. Auswahl der Stromwandler nach Isolationsart und Bautorm

In geschlossenen Schaltanlagen sollte man den Einbau von Öl- oder Massewandlern wegen Explosions-, Brand- und Qualmgefahr vermeiden

¹⁾ Ausführlicher hierüber siehe im Buch von M. Walter, Kurzschlußströme in Drehstromnetzen, 2. Auflage, R. Oldenbourg 1938, S. 81—87; K. Johannsen, E. und M. 57 (1939) S. 535—539.

und trockenisolierte Bauformen, z. B. solche mit Porzellan- oder Preßstoffisolation bevorzugen. Dies gilt besonders für Anlagen unter 30 kV Betriebsspannung, weil bei ihnen die Kurzschlußströme infolge der verhältnismäßig niedrigen Betriebsspannung gewöhnlich sehr hoch ausfallen und leicht Zerstörungen verursachen können. In Anlagen mit Betriebsspannungen über 30 kV sind die Kurzschlußströme bei gleicher Kurzschlußleistung wesentlich kleiner. Überdies werden solche Schaltanlagen vielfach offen ausgeführt (Freiluftanlagen). Hier ist gegen die Anwendung von ölisolierten Stromwandlern nichts einzuwenden.

Falls es die baulichen Verhältnisse einer Anlage zulassen, sollte man (bei einer möglichen Wahl) die Einleiterwandler den Mehrleiterwandlern vorziehen, insbesondere für Anlagen, in denen sehr große Kurzschlußströme auftreten können. Hier dürfte es in vielen Fällen sogar besser sein, sich mit etwas kleinerer Leistung oder geringerer Genauigkeit zu begnügen, als auf die Verwendung von Stabwandlern zu verzichten. Die Vorzüge der Einleiterwandler sind im wesentlichen:

- a) Praktisch unbegrenzte innere dynamische Kurzschlußfestigkeit, da auf der Primärseite keine einzige geschlossene Windung vorhanden und die Sekundärwicklung symmetrisch zum Primärleiter angeordnet ist.
- β) Sehr hohe thermische Kurzschlußfestigkeit, da die Primärleiter von vornherein sehr reichlich bemessen sind und fast beliebig stark ausgelegt werden können.
- γ) Anordnung von zwei, drei und sogar vier Kernen ist leicht möglich.
- δ) Höchste Sprungwellensicherheit; Überbrückungswiderstände (Schutzwiderstände) fallen fort.

Als Nachteile der Einleiterwandler sind zu erwähnen:

- a) Einleiterwandler können nur sekundärseitig auf eine andere Übersetzung umgeschaltet (angezapft!) werden. Bei Umschaltung im Verhältnis 2:1 geht die Leistung auf etwa $\frac{1}{4}$ zurück.
- β) Bei Nennströmen unter 100 A liegen die Einleiterwandler, wenn sie eine angemessene Leistung und Genauigkeit aufweisen sollen, preislich ungünstig, da für den Aufbau der Kerne wegen der geringen AW-Zahl meist hochpermeables Eisen (Nickleisen) oder siliziertes Eisen in großer Menge verwendet werden muß.
- γ) Einleiterwandler mit Nennströmen unter 50 A erfordern auf der Sekundärseite meistens einen Nennstrom von 1 A statt 5 A.

Die Leistungsfähigkeit der Einleiterwandler ist im Laufe der Jahre infolge der Verwendung von Kunstschaltungen, Nickeisenkernen oder Mischkernen stark gestiegen. Durch die unübertroffene Kurzschlußfestigkeit und die im allgemeinen günstige Preislage verdrängen die Stabwandler die Mehrleiter-Durchführungswandler immer mehr. Topf- oder Stützwandler in Trockenausführung werden dagegen von dieser Konkurrenz weniger betroffen, weil sie raumsparend gebaut sind und bei den niederen und mittleren Reihenspannungen preislich viel günstiger liegen als Durchführungswandler. In Anlagen mit nicht allzu großen Kurzschlußströmen, besonders aber in Industrieanlagen mit beschränkten Raumverhältnissen, werden diese Wandler daher bevorzugt benutzt.

7. Schutzmaßnahmen für Stromwandler

a) Schutzerdung

Zur gefahrlosen Bedienung der an die Wandler angeschlossenen Geräte ist es erforderlich, eine Sekundärklemme und das Gehäuse der Wandler unmittelbar zu erden¹⁾. Bei zwei oder mehreren leitend verbundenen Stromwandlern muß darauf geachtet werden, daß durch die Erdung keine Nebenschlüsse über Erde entstehen (Abb. 71 und 87). Für die Ausführung der Erdung selbst gelten die „Leitsätze für Schutzerdungen in Hochspannungsanlagen“ (VDE 0141) und die „Leitsätze für Schutzmaßnahmen in Starkstromanlagen mit Betriebsspannungen unter 1000 V“ (VDE 0140).

b) Offener und geschlossener Sekundärkreis

Der Sekundärkreis eines Stromwandlers darf bei Stromdurchgang im Primärkreis nie geöffnet werden²⁾ oder offen bleiben, weil sonst der gesamte Primärstrom als Erregerstrom wirkt und hohe Spannungen in der Sekundärwicklung erzeugt. Außerdem kann eine unzulässige Erwärmung des Eisenkernes und dadurch auch der benachbarten Isoliermittel auftreten. Ferner ist eine Beeinträchtigung der Meßgenauigkeit des Wandlers durch Restmagnetismus (Remanenzwirkung) möglich. Darum muß der Sekundärkreis eines Stromwandlers stets entweder über Geräte (Relais,

¹⁾ Erleidet nämlich die Isolation zwischen den Primär- und Sekundärwicklungen Schaden, so kann die Hochspannung in die Sekundärwicklung übertreten.

²⁾ Die Unterbrechung des Sekundärkreises eines Stromwandlers kann auch ungewollt auftreten, beispielsweise infolge von Schaltfehlern, Drahtbruch oder Lockerwerden von Kontaktstellen.

Meßgerät oder Widerstand) oder unmittelbar über eine Lasche oder einen Bügel an den Sekundärklemmen geschlossen sein.

c) Schutzwiderstände für die Primärwicklung

Stromwandler mit großer Induktivität¹⁾ müssen zum Schutze ihrer Isolation, insbesondere zwischen den Primärklemmen und zwischen den einzelnen Windungen, gegen übermäßige Spannungsbeanspruchungen bei

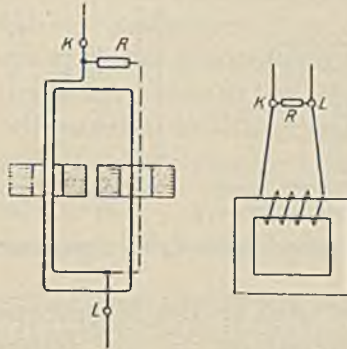


Abb. 131. Anordnung des Schutzwiderstandes (R) bei einem Schleifenstromwandler und einem Stützer-(Topf)-Stromwandler.

Wanderwellen oder bei hohen Kurzschlußströmen mit spannungsabhängigen Widerständen versehen sein, die parallel zu den Primärklemmen angeordnet werden (Abb. 131). Die Schutzwirkung solcher Widerstände erstreckt sich auch auf den Sekundärkreis der Stromwandler, wo ebenfalls eine Spannungsentlastung herbeigeführt wird²⁾.

B. Spannungswandler

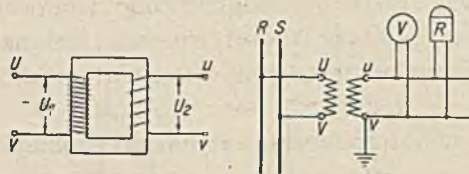
1. Aufbau

Spannungswandler sind Ein- oder Dreiphasen-Transformatoren besonderer Ausführung mit verhältnismäßig kleiner Nennleistung. Sie arbeiten im Gegensatz zu den Leistungstransformatoren vorwiegend in einem Bereich, der an den Leerlaufzustand grenzt. Die Spannungswandler

¹⁾ Das sind vorwiegend Mehrleiterwandler mit vielen Windungen oder mit großen Windungsschleifen auf der Primärseite.

²⁾ Ausführlicher siehe in M. Walter, Strom- und Spannungswandler, R. Oldenbourg 1937, S. 67—69.

bestehen im einfachsten Falle ähnlich wie die Stromwandler aus einem lamellierten Eisenkern, auf dessen einem Schenkel die primären und sekundären Wicklungen konzentrisch angeordnet sind. In Abb. 132 sind die Wicklungen jedoch zur besseren Übersicht auf zwei Schenkel verteilt. Der Primärwicklung wird die zu messende Netzspannung U_1 aufgedrückt. Diese induziert in der Sekundärwicklung mittelbar die Spannung U_2 , die ihrerseits die parallel geschalteten Geräte mit Strom speist.



U_1 Primärspannung V Spannungsmesser
 U_2 Sekundärspannung R Spannungsrelais

Abb. 132. Grundschtung eines Spannungswandlers

Der Wirkungsgrad spielt bei den Spannungswandlern im Vergleich zu den Leistungstransformatoren nur eine untergeordnete Rolle, dafür wird von ihnen eine hohe Übersetzungsgenauigkeit, d. h. kleine Spannungsfehler und kleine Fehlwinkel, verlangt (VDE 0414).

Die Beherrschung der Fehlergrößen ist bei Spannungswandlern im allgemeinen leichter als bei Stromwandlern, weil ihnen im Normalbetrieb eine annähernd gleichbleibende Spannung zugeführt wird und der Erregerstrom sich dadurch bei der üblichen Nenninduktion von 6000... 10000 Gauß nur unwesentlich ändert. Überdies können die kleinen Belastungsströme in Verbindung mit den Wirk- und Blindwiderständen des Wandlers und der angeschlossenen Bürde nur geringe Fehler hervorrufen.

Das Abgleichen der Spannungswandler auf die zulässigen Spannungsfehler erfolgt vornehmlich durch Änderung der primären Windungszahl, während der Fehlwinkel entweder durch Vergrößern der Streuung oder durch zusätzliche Wirkwiderstände, die parallel zur Nutzbürde zu schalten sind, vermindert werden kann.

Die vom VDE genormten primären Nennspannungen für Spannungswandler sind in kV: 1, 3, 6, 10, 15, 20, 30, 45, 60, 110, 150, 220, 400.

Bei Einphasenwandlern, die zwischen Leiter und Erde geschaltet werden, sowie bei Fünfschenkel-Spannungswandlern gelten die durch $\sqrt{3}$ geteilten Werte dieser Zahlenreihe als Nennspannung.

Die genormte sekundäre Nennspannung beträgt 100 V. Mit Rücksicht auf bereits vorhandene und für 110 V Nennspannung ausgeführte Geräte werden die Spannungswandler oft mit einer sekundären Nennspannung von 110 V bestellt. Aus diesem Grunde liefern einige Herstellerfirmen die Spannungswandler grundsätzlich mit Anzapfungen für zwei sekundäre Nennspannungen, für 100 und 110 Volt.

Bei Relais, insbesondere bei Distanzrelais, muß die Spannung im Gegensatz zu vielen anderen Spannungsmessungen in Schaltanlagen statt von $0,8 \dots 1,2 \cdot U_n$ im ganzen Meßbereich, d. h. von nahezu Null Volt bis zur 1,2fachen Nennspannung, möglichst genau erfaßt werden. Spannungsfehler von $\pm 3\%$ sind noch zulässig. Der Fehlwinkel der Spannungswandler hält im allgemeinen die Klassengenauigkeit im ganzen Meßbereich ein, d. h. von etwa Null Volt bis zur 1,2fachen Nennspannung.

2. Spannungen in Drehstromnetzen

Für die Betätigung der Relais in Drehstromnetzen werden im wesentlichen folgende vier Spannungs-Grundgrößen¹⁾ benutzt (vergleiche die Abb. 133 und 134):

- a) Dreiecksspannung (Leiterspannung, früher verkettete Spannung). Dreiecksspannung ist die Spannung zwischen je zwei Leitern (U_{RT}, U_{TS}, U_{SR}).
- b) Sternspannung (früher Phasenspannung). Sternspannung ist die Spannung zwischen einem Leiter und dem Sternpunkt²⁾ M eines Generators, Transformators, Spannungswandlers oder von sonstigen Geräten mit Wicklungssträngen bzw. Widerständen (U_{MR}, U_{MS}, U_{MT}). Bei einem symmetrisch belasteten Drehstromsystem fällt im Spannungsdreieck der Sternpunkt M mit dem Schwerpunkt des Dreiecks zusammen (Abb. 133).
- c) Leitererdspannung (früher Erdspannung). Leitererdspannung ist die Spannung zwischen einem Leiter und dem Erdpunkt³⁾ E (U_{ER}, U_{ES}, U_{ET}). Es kann mit einer für die Praxis genügenden Genauigkeit vorausgesetzt werden, daß eine Betriebserdung, die nach den VDE-Regeln hergestellt ist, Erdpotential führt.

¹⁾ Vgl. auch DIN 1346.

²⁾ Gemeinsamer Punkt von mehreren unter sich gleichen (symmetrischen) Wicklungssträngen oder Widerständen.

³⁾ Ein Punkt, der bei jedem Betriebszustand des Systems Erdpotential hat.

d) Sternpunkterdspannung (früher Nullspannung oder Nullpunktspannung). Sternpunkterdspannung ist die Spannung zwischen dem Sternpunkt eines Generators, Transformators oder dergleichen und dem Erdpunkt. Sie wird durch U_{EM} bezeichnet.

Diese Spannungsgrößen werden den Relais oder Meßgeräten durch entsprechend geschaltete Spannungswandler vermittelt (Abb. 87, 88, 109 und 113) und sind in den Abb. 133 und 134 für zwei Betriebszustände eines Drehstromsystems zur besseren Veranschaulichung auch in Vektor-

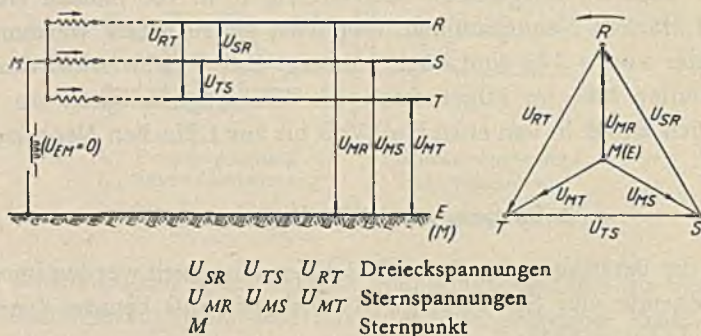


Abb. 133. Spannungen bei einem symmetrisch belasteten Drehstrom-System

diagrammen dargestellt. Der Sternpunkt des die Drehstromleitung speisenden Generators oder Transformators ist entweder voll isoliert oder über einen hohen Blindwiderstand (Löschspule) geerdet.

Abb. 133 zeigt die Drehstromleitung mit symmetrischer Belastung und mit gleich großen Kapazitäten zwischen den drei Leitern und der Erde. Die Spannung zwischen dem Sternpunkt M des Drehstromsystems und der Erde ist gleich Null. Es decken sich die Sternspannungen mit den entsprechenden Leitererdspannungen nach Größe und Richtung; beide sind hier identisch.

In Abb. 134 ist dieselbe Drehstromleitung unsymmetrisch belastet¹⁾, außerdem möge eine erhebliche Unsymmetrie zwischen den Kapazitäten der drei Leiter gegen Erde bestehen (Erdschluß des Leiters R über Widerstand!). Der Sternpunkt M hat hier gegen den Erdpunkt E die Sternpunkterdspannung U_{EM} . Leitererdspannungen und Sternspannungen sind in diesem Falle nach Größe und Phasenlage verschieden.

Die vektorielle Zusammensetzung der einzelnen Spannungsgrößen

¹⁾ Die Leiter R und S seien höher belastet als der Leiter T .

ist aus den Spannungsdreiecken der Abb. 133 und 134 ersichtlich. In den linken Teilbildern der beiden Abbildungen ist angedeutet, wo und zwischen welchen Leitern die einzelnen Spannungen auftreten.

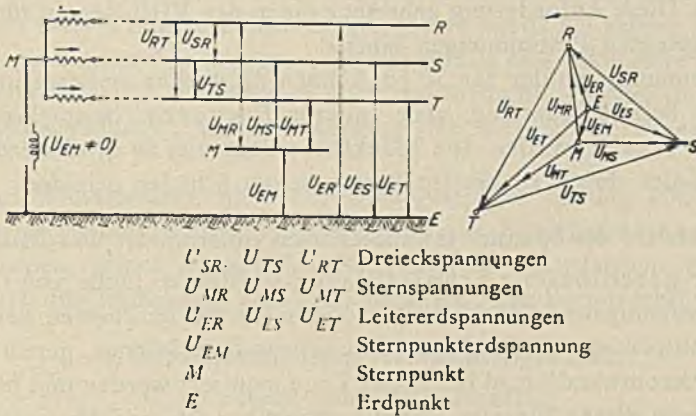


Abb. 134. Spannungen bei einem unsymmetrisch belasteten Drehstrom-System

3. Leistung und Belastung

Für Einphasen-Spannungswandler gelten als genormte Nennleistung die Werte 5, 10, 15, 30, 45, 60, 90, 120, 150, 180, 240, 300, 450 und 600 VA; bei Dreiphasen-Spannungswandlern gelten die dreifachen Werte. Die größeren Nennleistungen mit der Genauigkeit der Klasse 1 sind für Schutzrelais in den meisten Fällen ausreichend. Bezüglich der Meßgenauigkeit würden in vielen Fällen auch Wandler der Klasse 3 genügen. — Die Spannungswandler führt man, abgesehen von der Hilfswicklung für Erdschlußanzeige oder dergleichen, zuweilen mit zwei Sekundärwicklungen für getrennten Anschluß von Relais und Meßgeräten aus.

Die Belastung der Spannungswandler durch die angeschlossenen Geräte und Verbindungsleitungen wird zumeist als Verbrauch in VA angegeben, seltener als Bürde bezeichnet. Der Leistungsfaktor der angeschlossenen Verbraucher liegt in der Größenordnung von $\cos \beta = 0,4 \dots 0,8$.

Die Belastung der Spannungswandler durch Relais, Meßgeräte und Zähler ist bei Nennspannung bzw. bei der höchsten Betriebsspannung am größten und geht bei gleichbleibender Bürde mit sinkender Spannung etwa quadratisch zurück. Bei der Auswahl von Spannungswandlern, ins-

besondere für Distanzschutz, ist darauf zu achten, daß sie eine ausreichende Leistung mit der erforderlichen Meßgenauigkeit auch dann hergeben, wenn im Gefolge von Netzstörungen die Spannung im Netz mehr oder weniger absinkt und Relaisglieder mit hohem Verbrauch sich zuschalten. Diese Anforderung geht über die in den VDE-Regeln für Wandler festgelegten Bestimmungen hinaus.

Spannungswandler für 50 Hz können nicht ohne weiteres in Netzen gleicher Betriebsspannung, aber anderer Frequenz, beispielsweise für $16\frac{2}{3}$ Hz, benutzt werden. Die Induktion würde viel zu groß werden, und die Wandler durch zu großen Erregerstrom Schaden erleiden.

4. Auswahl der Spannungswandler nach Isolationsart und Bauform

Für geschlossene Schaltanlagen werden an Stelle von Öl- oder Massespannungswandlern häufig trockenisolierte Bauformen bevorzugt. Viele Bauformen von Trockenspannungswandlern können, genau wie die Trockenstromwandler, in beliebiger Lage montiert werden und bieten somit auch in dieser Hinsicht Vorteile gegenüber Öl- und Massewandlern. In Freiluftanlagen werden dagegen vorwiegend ölisierte Spannungswandler — meist in ölarmen Ausführung — verwendet, weil hier die Auswirkungen von Bränden geringer sind als in geschlossenen Anlagen und weil Ölspannungswandler preislich günstiger liegen als Trockenspannungswandler.

In der Selektivschutztechnik benutzt man in der Regel Spannungswandler mit Rückschlußschenkeln (Fünfschenkel-Wandler) oder Drehstromsätze aus drei Einphasen-Spannungswandlern, wobei der Sternpunkt auf der Hochspannungsseite starr geerdet wird (Abb. 87, 88, 109 und 113). Mit solchen Wandlern können neben den Leitererdspannungen U_{EL} auch die Dreiecksspannungen U gewonnen werden. Weisen diese Spannungswandler außer den Hauptwicklungen noch Hilfswicklungen auf, die entweder auf dem vierten und fünften Schenkel in Reihenschaltung (Abb. 87 und 110) oder auf drei Schenkeln im offenen Dreieck angeordnet sind (Abb. 88 und 116), so kann die oft notwendige Sternpunkterdspannung U_{EM} ebenfalls für Meß- bzw. Steuerzwecke bereitgestellt werden. Die Hilfswicklungen werden meist so ausgelegt, daß an ihren Klemmen bei satterm Erdschluß eine Spannung von 100 oder 110 V auftritt¹⁾. Die Nennleistung der Hilfswicklungen ist gewöhnlich ge-

¹⁾ Bei Erdschlüssen mit Lichtbogen oder sonstigen Widerständen fällt die Sternpunkterdspannung natürlich kleiner aus.

ring, etwa 10 bis 150 VA. Eine Klassengenauigkeit wird für diese Wicklungen im allgemeinen nicht angegeben.

Die Sternpunkterdspannung kann auch mit Hilfe eines Einphasen-Spannungswandlers gewonnen werden, der an den Sternpunkt eines Generators oder Transformators angeschlossen wird. Bei sattem Erdschluß liefert ein solcher Spannungswandler ebenfalls eine sekundäre Spannung von 100 oder 110 V. Erwähnt sei auch, daß Erdschlußlöcher im allgemeinen Hilfswicklungen für die Messung der Sternpunkterdspannung besitzen.

An Wandlerätze mit hochspannungsseitiger Erdung können neben den Relais grundsätzlich auch Meßgeräte und Betriebszähler angeschlossen werden, sofern die erhöhte Belastung die erforderliche Klassengenauigkeit für Meßgeräte und Betriebszähler nicht beeinträchtigt.

5. Schutzmaßnahmen für Spannungswandler

a) Schutz- und Betriebserdung

Die Spannungswandler müssen ähnlich wie die Stromwandler zur gefahrlosen Bedienung der angeschlossenen Geräte im Sekundärkreis geerdet werden. Diese Erdung (Schutzerde!) wird meist über den Sternpunkt der Wandler ausgeführt, soweit dieser vorhanden ist (Abb. 109, 110 und 113). In großen elektrischen Anlagen mit verschiedenartigen Meßeinrichtungen und Spannungswandlern von unterschiedlicher Bauform kann jedoch die Sternpunkterdung nicht ausnahmslos durchgeführt werden. So dürfen z. B. Spannungswandler für Synchronisierzwecke, insbesondere wenn sie in verschiedenen Schaltungen zusammen arbeiten, nur an Leitern gleicher Phasenbezeichnung geerdet werden, um störende Potentialunterschiede zwischen den Erdungsstellen zu vermeiden. Große Anlagen werden daher der Einheitlichkeit halber oft mit Polerdung statt Sternpunkterdung ausgeführt. Für die Ausführung der Erdung selbst gilt hier sinngemäß das Gleiche wie für die Stromwandler (s. Seite 192).

Auf der Hochspannungsseite darf der Sternpunkt nur bei Fünfschenkel-Spannungswandlern und bei drei Einphasen-Spannungswandlern geerdet werden.

In den Schaltungen der Abb. 109, 110 und 111 sind Schutzerde und Betriebserde getrennt eingezeichnet. Die Sternpunkte der Sekundär- und Primärwicklungen können jedoch ohne nachteiligen Einfluß auf die Meßergebnisse auch an eine gemeinsame Erde gelegt werden (Abb.

87 und 88), wie es in der Praxis auch meist der Fall ist. Wandlergehäuse und Eisenkerne müssen in die Schutzerdung einbezogen werden.

b) Absichern der Sekundär- und Primärkreise

Spannungswandler sollen möglichst auf der Ober- und Unterspannungsseite abgesichert werden. In Frage kommen hauptsächlich Abschmelzsicherungen, seltener Schalter. Auf der Hochspannungsseite sind dabei alle drei Leiter, auf der Niederspannungsseite nur die nicht geerdeten Leiter zu sichern. Der geerdete Leiter muß ohne Abschalteneinrichtung bleiben, weil sonst bei seinem Abtrennen die Schutzerdung für die restlichen Leiter unter Umständen unwirksam werden würde.

Für die Niederspannungsseite bemißt man die Sicherungen oder Kleinselbstschalter gewöhnlich so, daß sie erst dann ausschalten, wenn die Grenzleistung der Spannungswandler erreicht oder überschritten wird. Bei Wandlern mit großer Nenn- bzw. Grenzleistung paßt man die Ansprechstromstärke der Abschalteneinrichtungen mit einem gewissen Überschuß derjenigen Stromstärke an, die der höchsten Belastung (Nutzbürde) entspricht. Die üblichen Ansprechwerte liegen dabei in der Größenordnung von 6 bis 40 A. Oft werden die am gleichen Spannungswandler angeschlossenen Meßgeräte, Betriebszähler, Schnellregler und Schutzrelais durch getrennte (eigene) Abschalteneinrichtungen geschützt. — Bei Schutzrelais mit Unterimpedanz-Anregung wird der Sekundärkreis zweckmäßig durch Kleinselbstschalter gesichert, die im Falle der Unterbrechung einer Meßspannung die Anregung der Schutzeinrichtungen über eine zweite Kontakteinrichtung sofort unwirksam machen oder die Auslösung der Schalter sperren und gleichzeitig Signal geben. Dadurch werden ungewollte Ausschaltungen von Leistungsschaltern oder gar Unterbrechungen in der Stromlieferung vermieden.

Beim Absichern der Spannungswandler auf der Hochspannungsseite muß man grundsätzlich zwischen dem Anschluß der Spannungswandler an einzelne Abzweigleitungen und an Sammelschienen unterscheiden.

Spannungswandler, die an Abzweigleitungen angeschlossen werden, bedürfen hochspannungsseitig keiner besonderen Abschalteneinrichtung, denn sie werden von den vorhandenen Leitungsschaltern mitgeschützt¹⁾. Bei diesem Verfahren braucht man zwar mehr Wandler, dafür

¹⁾ Die Spannungswandler müssen dabei hinter den Stromwandlern im Leitungs-zug angeordnet sein.

ist aber die Sicherheit höher, insbesondere auch im Hinblick darauf, daß die Relais und Meßgeräte zu einem Wandler gehören und folglich Umschalteinrichtungen, wie sie bei Wandlersätzen mit Sammelschienenanschluß oft erforderlich sind, fortfallen.

Spannungswandlern, die man an Sammelschienen anschließt, werden gewöhnlich Abschmelzsicherungen¹⁾ vorgeschaltet. Der Querschnitt der Schmelzeinsätze muß reichlich ausgelegt sein (für etwa 2 A), damit ein ungewolltes Abschmelzen durch Zerstäubung des Schmelzdrahtes oder durch Einschaltstromstöße bei nicht gleichzeitigem Einschalten der drei Pole eines Drehstrom-Spannungswandlers vermieden wird. Zu schwach bemessene Schmelzeinsätze können in Netzen mit großen Ladeströmen auch beim Abschalten des Erdschlusses durchbrennen. Die auf den gesunden Leitern verbleibende überschüssige Ladung fließt dabei plötzlich über die geerdeten Spannungswandler zur Erde ab. Es brennen dabei vornehmlich die Sicherungen bei denjenigen Spannungswandlern durch, die die kleinsten Wirkwiderstände haben, also bei Wandlern mit hoher Nennleistung oder starken primären Leiterquerschnitten.

In Netzen mit Betriebsspannungen unter 45 kV werden die Spannungswandler seit einigen Jahren vorzugsweise mit Hochleistungssicherungen²⁾ geschützt. Diese zeichnen sich neben der hohen Ausschaltleistung noch dadurch aus, daß sie das Abschmelzen durch Licht- oder Tonzeichen mittelbar kenntlich machen können.

In Netzen mit Betriebsspannungen über 45 kV werden die Spannungswandler auf der Primärseite meist ohne Sicherungen belassen, weil es Schwierigkeiten bereitet, zuverlässige Sicherungen herzustellen. Die Schmelzeinsätze müssen nämlich für verhältnismäßig kleine Ströme, also mit schwachem Querschnitt ausgelegt sein und können bei der üblichen Bauart durch Korona-Erscheinungen mit der Zeit so geschwächt werden, daß sie unnötige Abschaltungen bewirken.

Die Sicherungen auf der Primärseite schützen die Spannungswandler nur bei Störungen an den Hochspannungsklemmen und unter Umständen an den Primärwicklungen. Kurzschlüsse auf der Niederspannungsseite werden dagegen von ihnen wegen des hohen Scheinwiderstandes der Spannungswandler gewöhnlich nicht miterfaßt.

¹⁾ In seltenen Fällen Leistungsschalter.

²⁾ K. A. Lohausen, AEG-Mitt. (1936) S. 415; H. Läßle, Siemens-Z. 16 (1936) S. 68; H. Läßle, Elektrizitätswirtschaft 38 (1939) S. 684 und 701.

VI. Auslösearten und Auslöseformen in der Schutztechnik

A. Allgemeines

Das Auslösen der Leistungsschalter durch Relais¹⁾ erfolgt über Hilfsauslöser²⁾ (s. Seite 22), die entweder von einer besonderen Stromquelle (Hilfsstromquelle), oder aber aus dem zu schützenden Netz selbst gespeist werden. Als Hilfsstrom (Fremdstrom) dient in der Regel Gleichstrom, der einer Sammlerbatterie entnommen wird, vereinzelt jedoch auch Wechselstrom, der aus einem „Fremdnetz“ bezogen oder von einer besonderen und nur für Auslöse- und Steuerzwecke aufgestellten Maschine erzeugt wird. Die Speisung der Hilfsauslöser vom Netz erfolgt gewöhnlich über Strom- oder Spannungswandler. Die Hilfsauslöser selbst werden hauptsächlich in Form von Klapp- oder Tauchankermagneten hergestellt und an den Schaltern so angeordnet, daß sie deren Sperrung (Klinke, Ventil) auf mechanischem Wege aufheben können.

In der Schutztechnik unterscheidet man grundsätzlich drei Auslösearten: die Gleichstromauslösung, die Wechselstromauslösung und die Wandlerstromauslösung (Definition siehe auf Seite 23). Zu beachten ist, daß die Schutzrelais für Wandlerstromauslösung sich von den Relais für Gleich- oder Wechselstromauslösung teilweise im Aufbau und in der Schaltung unterscheiden und daher in den Listen der Herstellerfirmen getrennt geführt werden.

B. Gleichstromauslösung

Bei der Gleichstromauslösung unterscheidet man zwei Auslöseformen: die Arbeitsstromauslösung und die Ruhestromauslösung.

¹⁾ Primärauslöser bewirken das Auslösen der Leistungsschalter mechanisch über eine Isolierstange.

²⁾ Im Sprachgebrauch werden die Hilfsauslöser vielfach als Auslöser und teilweise auch als Sekundärauslöser bezeichnet.

Am häufigsten verwendet man die Arbeitsstromauslösung, die dadurch gekennzeichnet ist, daß der Strom im Auslöser durch das Schließen des Auslösekontaktes am Schutzrelais eingeschaltet oder verstärkt wird (Abb. 135). Der Arbeitsauslöser muß dabei zur sicheren Auslösung des Schalters stets so ausgelegt sein, daß er nicht nur bei der Nennspannung der Hilfsstromquelle einwandfrei arbeitet, sondern auch noch bei einer Spannung, die um 25% unter oder 10% über der Nennspannung liegt. Außerdem ist es zweckmäßig, die Nennspannung der Hilfsstromquelle möglichst über 24 V zu wählen, damit die Spannungsabfälle in den Leitungen und an den Übergangsstellen im Auslösekreis, beispielsweise am Auslösekontakt des Schutzrelais, am Hilfskontakt an der Schalterwelle und schließlich an allen Verbindungsstellen des Auslösekreises, im Verhältnis zur Gesamtspannung klein ausfallen. Zu knapp bemessene Erregerwicklungen der Auslöser — zu schwaches Magnetfeld — und zu niedrig gewählte Nennspannungen der Hilfsstromquellen geben in unzulänglich gepflegten Anlagen gelegentlich Anlaß zu Auslöseversagern und damit auch zur Störung der durch die Schutzrelais erreichbaren Selektivität.

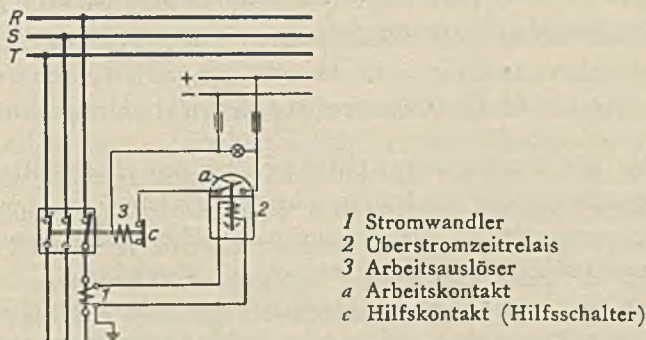


Abb. 135. Arbeitsstromauslösung mit Gleichstrom (Grunddarstellung)

Die Auslösekontakte der Schutzrelais für Gleichstromauslösung sind in der Regel nicht geeignet, auch das Ausschalten des Gleichstromkreises zu übernehmen. Hierfür dient in der Regel ein Hilfskontakt (c) am Leistungsschalter (Abb. 135), der für alle vorkommenden Ausschaltleistungen ausreichend bemessen werden kann. Dieser Kontakt wird durch die Schalterwelle oder ein Gestänge betätigt und unterbricht zwangsläufig den Hilfsstromkreis. Zuweilen wird das Ein- und Ausschalten der

Auslöser über ein Hilfsschütz bewerkstelligt; der Hilfskontakt am Leistungsschalter ist dann entbehrlich.

Der Nennverbrauch der Arbeitsauslöser ist verschieden groß und im wesentlichen durch die zum Aufheben der Schaltersperrung erforderliche Kraft bedingt. Er beträgt je nach Ausführung der Schalter und Auslöser größenordnungsmäßig 20 bis 200 W. Mit solchen Leistungswerten werden die Arbeitsauslöser gewöhnlich nur kurzzeitig — während der Ausschaltzeit des Schalters — belastet.

In Sonderfällen, z. B. beim Versagen der Schalterauslösung oder bei wiederholtem elektrischen Ausschalten eines Leistungsschalters, ist die thermische Beanspruchung eines Arbeitsauslösers wesentlich stärker. Mit Rücksicht auf solche Fälle sollten die Arbeitsauslöser grundsätzlich so ausgelegt sein, daß sie ihren Nennverbrauch zum mindesten 10 s lang schadlos vertragen.

Die Ruhestromauslösung (s. Seite 23) mit Gleichstrom wird sehr selten angewendet. Der Vorteil der selbsttätigen und dauernden Überwachung der Auslösestromkreise ist nicht so groß, um die Nachteile, wie das Auslösen der Schalter beim Abschmelzen der Sicherungen, den ständigen Stromverbrauch und die dadurch erforderliche größere Kapazität der Sammler wettzumachen.

C. Wechselstromauslösung

Die Wechselstromauslösung, die von einer Hilfs-Wechselspannungsquelle gespeist wird, unterscheidet sich kaum von der beschriebenen Gleichstromauslösung. Da sie nur ganz selten zur Anwendung kommt, wird hier von einer weiteren Betrachtung abgesehen.

Die Wechselstromauslösung, die den Betätigungsstrom aus dem Netz über Spannungswandler oder Leistungstransformatoren erhält, ist als Arbeitsstromauslösung für Kurzschlußschutzeinrichtungen nur bedingt brauchbar. Die Netzspannung kann nämlich bei Kurzschluß so stark absinken, daß die Auslöser gegebenenfalls nicht mehr ausreichend erregt werden. Für reinen Überlastschutz ist diese Arbeitsstromauslösung jedoch ausreichend.

Die Ruhestromauslösung mit synchroner Wechselspannung wird lediglich für Sonderaufgaben benutzt (Abb. 136), vornehmlich in Industrieanlagen, wo z. B. Motoren bei starken und langdauernden Netzspannungsabsenkungen abgetrennt werden müssen, um kurzschlußartige

Vorgänge bei der Wiederkehr der Spannung zu verhüten. Die Ruheauslöser müssen hier grundsätzlich mit Verzögerung arbeiten¹⁾). Die Auslöseverzögerung darf nur dann fortfallen, wenn die Eigenart der zu schützenden Anlage es erfordert (s. auch Seite 260 und 268).

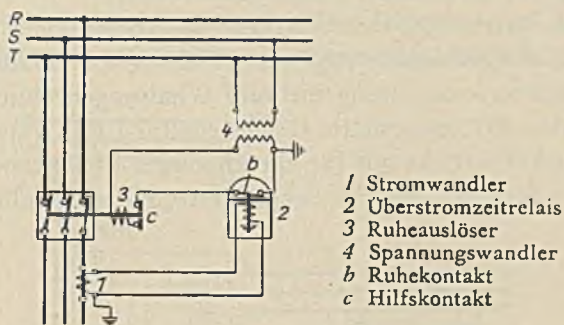


Abb. 136. Ruhestromauslösung mit Wechselstrom (Grunddarstellung)

D. Wandlerstromauslösung

Die Wandlerstromauslösung (s. auch Seite 23) ist ihrem Wesen nach eine Arbeitsstromauslösung, obwohl der Auslösekontakt des zuständigen Schutzrelais hier als Ruhe- oder Arbeitskontakt ausgeführt sein kann. Diese Auslöseform unterscheidet sich von der Gleichstrom-Arbeitsstromauslösung in der Hauptsache dadurch, daß bei ihr der Arbeitsauslöser im Augenblick des Öffnens oder Schließens des Relais-Auslösekontaktes vom Sekundärstrom des vom Kurzschlußstrom durchflossenen Stromwandlers erregt wird. In der Regel benutzt man hierzu die gleichen Stromwandler, an die auch die Schutzrelais angeschlossen sind. Diese Wandler müssen so leistungsfähig sein, daß der Sekundärstrom für die Betätigung des Schutzrelais und des Auslösers noch sicher ausreicht; Wandler mit einer Nennleistung von etwa 30 VA der Klasse 1 genügen meistens.

Die Auslöser werden gewöhnlich für 5 A oder 1 A Nennstrom²⁾ und einen Nennverbrauch von 7,5 bis 30 VA ausgelegt; doch gibt es auch solche mit einem Nennverbrauch bis zu 100 VA. Der Nennverbrauch

¹⁾ Vgl. auch R. Ulbricht, ETZ 58 (1937) S. 763.

²⁾ Die Auslöser sollen aus Sicherheitsgründen die Schalter auch dann noch betätigen können, wenn der Nennstrom um etwa 25% unterschritten wird.

der Arbeitsauslöser für Wandlerstrom ist im Vergleich zu dem der Arbeitsauslöser für Gleichstrom (s. Seite 20+) nur darum so gering, weil bei ihnen z. T. Hilfskraftspeicher mitbenutzt werden und weil die Wandlerstromauslösung eigentlich nur bei Leistungsschaltern bis zu 350 A Nennstrom und da nur bis Reihe 30 angewendet wird.

Während für die Gleichstrom- und Wechselstromauslösung grundsätzlich nur je eine Schaltung angewendet wird (Abb. 135 und 136), sind für die Wandlerstromauslösung mehrere Schaltungen üblich¹⁾.

Die in Abb. 137 dargestellte Grundschaltung für Wandlerstromauslösung mit Ruhekontakt gilt für ein einpoliges Überstromzeitrelais. Im störungsfreien Betrieb fließt der Sekundärstrom des Wandlers 1 über die

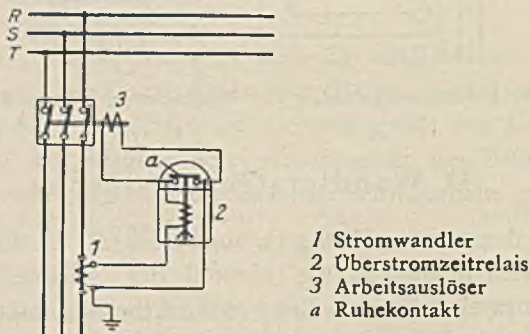


Abb. 137. Wandlerstromauslösung mit Ruhekontakt (Grunddarstellung)

Spule des Relais 2 und dessen Ruhekontakt *a*. Der Auslöser 3 am Schalter ist dabei überbrückt. Bei Überlast oder Kurzschluß im Netz wird der Ruhekontakt nach Ablauf der eingestellten Relaiszeit geöffnet, wonach der Wandlerstrom seinen Weg auch über den Auslöser nimmt, der das Ausschalten des Leistungsschalters einleitet. Der Ruhekontakt muß hier kräftig und für hohen Druck sowie große Schaltleistung ausgelegt sein, damit er den Kurzschlußstrom während der Relaislaufzeit (Kurzschlußdauer) einwandfrei führen kann und die Überbrückung des Auslösers sicher öffnet. Dieser Ruhekontakt wird gewöhnlich als halbsselbsttätiger Fallkontakt ausgeführt, d. h. er muß nach jeder Auslösung von Hand wieder in die Betriebsstellung gebracht werden.

¹⁾ Vgl. auch M. Walter, AEG-Mitt. (1934) S. 141; J. Sorge, Siemens-Z. 8 (1928), S. 211; Fr. Jahn, Feinmechanik und Präzision 46 (1938) S. 257.

Abb. 138 zeigt die Grundschaltung der Wandlerstromauslösung mit Arbeitskontakt. Hier braucht der Auslösekontakt *b* des Relais 2 nicht so kräftig ausgeführt zu sein, da er erst nach Ablauf des Zeitwerkes den Sekundärkreis eines schon bei kleinen Überströmen gesättigten Hilfswandlers 5 einschaltet und dadurch den Arbeitsauslöser 3 — gewöhnlich für 1 A Nennstrom — kurzzeitig betätigt. Der Hauptstromwandler 1 wird bei dieser Schaltung im störungsfreien Betrieb etwas hoch belastet — mit

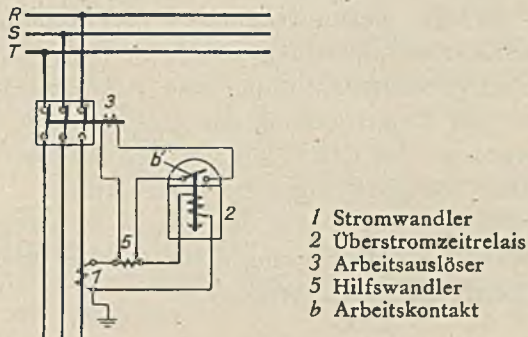


Abb. 138. Wandlerstromauslösung mit Arbeitskontakt und Hilfswandler 5/1 A (Grunddarstellung)

etwa 50 VA bei Nennstrom —, weil der Hilfswandler dabei auf der Sekundärseite offen ist und wie eine Stromdrossel wirkt. Während des Auslösevorganges, namentlich beim Ausschalten des Leistungsschalters, vermindert sich die Belastung des Stromwandlers 1 jedoch auf etwa 30 VA, bezogen auf 5 A. Das Relais 2 arbeitet vollselbsttätig.

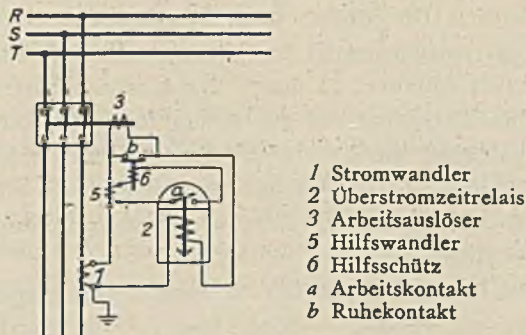


Abb. 139. Wandlerstromauslösung mit Arbeits- und Ruhekontakt (Grunddarstellung)

In Abb. 139 ist eine Schaltung für Wandlerstromauslösung dargestellt, in der die Grundschaltungen nach den Abb. 137 und 138 mit Ruhe- und Arbeitskontakt vereinigt sind. Hier schließt das Ablaufglied des Relais 2 beim Auslösen mit einem schwachen Kontakt *a* den Sekundärkreis eines kleinen Hilfswandlers 5 und betätigt damit zunächst ein Hilfsschütz 6, das seinerseits durch einen kräftigen Ruhekontakt *b* die Überbrückung des Auslösers 3 öffnet. Die Verwendung eines Hilfswandlers sowie eines Hilfsschützes verbürgt große Schaltleistung bei verhältnismäßig geringer Leistungsaufnahme der Schutzeinrichtung. Das Hilfsschütz arbeitet halbselbsttätig.

Bei der Wandlerstromauslösung sind Hilfsschalter an den Leistungsschaltern zur Unterbrechung des Auslösekreises überflüssig, denn der Betätigungsstrom für das Relais und den Auslöser wird durch den Leistungsschalter hochspannungsseitig unterbrochen.

Für die üblichen zwei- oder dreipoligen Schutzeinrichtungen werden bei der Wandlerstromauslösung mitunter zwei oder drei Arbeitsauslöser je Leistungsschalter benötigt.

E. Wahl der Auslöseform und Auslöseart

Aus Vorstehendem geht hervor, daß für die Relais-Schutztechnik nur die Arbeitsstromauslösung mit Gleichstrom und die Wandlerstromauslösung in ihren verschiedenen Formen Bedeutung haben. In gewissen Fällen wird auch die Ruhestromauslösung mit Wechselstrom in größerem Umfange angewendet.

Die Arbeitsstromauslösung mit Gleichstrom ist die am häufigsten benutzte Auslöseform. Sie wird überall dort verwendet, wo eine Gleichstrombatterie für Steuer- und Signalzwecke oder für die Notbeleuchtung schon vorhanden ist bzw. aufgestellt werden muß, ferner in allen elektrischen Anlagen, in denen der Kurzschlußstrom bei Schwachlast den größten Betriebsstrom der Anlageteile unterschreiten kann. Die Gleichstromauslösung ist durchaus betriebssicher, erfordert aber eine sorgfältige Überwachung der Gleichstrombatterie, ein Absichern der Auslösekreise und die Einhaltung einer bestimmten Polung beim Anschluß der Relais und Hilfsauslöser (s. Seite 214).

Die Wandlerstromauslösung wird im allgemeinen nur in solchen Stationen angewendet, in denen eine von der Betriebsspannung unabhängige Hilfsstromquelle nicht zur Verfügung steht. Das sind gewöhn-

lich kleinere, unbesetzte Anlagen. Überdies ist die Wandlerstromauslösung nur in Netzen anwendbar, in denen die Kurzschlußströme auch im Schwachlastbetrieb größer als der höchste Betriebsstrom bzw. Nennstrom der Relais sind. Diese Bedingung trifft gewöhnlich für Netze mit Betriebsspannungen von 3 bis 30 kV zu. Die Wandlerstromauslösung bedarf dafür im Gegensatz zur Arbeitsstromauslösung mit Gleichstrom keiner Hilfsschalter an den Leistungsschaltern, keiner Hilfsstromquellen mit Ladeeinrichtungen und folglich auch keiner besonderen Wartung. Die Wandlerstromauslösung hat sich in ihren verschiedenen Ausführungsformen in den letzten Jahren, nachdem einige Übelstände auf Grund gesammelter Erfahrungen und neuer Erkenntnisse beseitigt wurden, als durchaus brauchbar und zuverlässig erwiesen. Sie arbeitet im allgemeinen um so sicherer, je größer der Kurzschlußstrom ist.

Die Ruhestromauslösung mit synchroner Wechselspannung verwendet man vorwiegend in Industrie- und Verbraucheranlagen, um die Motoren und gegebenenfalls die Umformer bei großen und langandauernden Spannungsabsenkungen vom Netz abzutrennen, damit heftige Stromstöße und sonstige gefährliche Erscheinungen (z. B. Kollektorrundfeuer) bei Wiederkehr der vollen Betriebsspannung vermieden werden (s. auch Seite 260). Die Leistungsschalter müssen jedoch außer dieser Ruhestromauslösung mit Zeitverzögerung dann grundsätzlich noch eine Arbeitsstromauslösung aufweisen, damit die Motoren bzw. Umformer auch bei eigenem Kurzschluß vom gesunden Netz sicher und rasch abgetrennt werden. — Überwachungseinrichtungen sind bei der Ruhestromauslösung nicht nötig, da der Ruheauslöser (Unterspannungsauslöser) selbst den Auslösekreis überwacht.

F. Schutzmaßnahmen für Gleichstrom-Betätigungskreise

Die meisten Störungen in Gleichstrom-Betätigungskreisen entstehen gewöhnlich durch unzulässige Absenkung der Betätigungsspannung, durch Unterbrechung der Stromkreise oder durch Isolationsfehler. So können z. B. die Hilfsauslöser sowie die Hilfseinrichtungen der Schutzrelais nicht ordnungsmäßig arbeiten, wenn ihre Betätigungsspannung infolge Erschöpfung oder Überlastung der Sammlerbatterie oder infolge zu großen Spannungsabfalles in den Zuleitungen um mehr als 25% ihres Nennwertes absinkt oder wenn die Stromkreise durch die Abschmelzsiche-

rungen (bzw. Kleinselbstschalter) oder durch Drahtbruch bzw. durch Kontaktlockerung an den Klemmen unterbrochen sind. Die Betriebssicherheit ist schließlich auch dann gefährdet, wenn Isolationsfehler an den Leitern infolge mechanischer oder chemischer Einwirkung den Stromkreis schließen oder teilweise überbrücken. Damit solche Störungen bzw. Mängel behoben oder rechtzeitig gemeldet werden, sind zuverlässig wirkende Schutz- bzw. Überwachungseinrichtungen erforderlich.

1. Absicherung

Die Betätigungsleitungen, und zwar die Hauptleitungen von der Stromquelle sowie die Abzweigleitungen, müssen unter Benutzung des hochwertigsten Materials sorgfältig verlegt und gegen die Wirkungen von Kurzschlüssen sowie zum gefahrlosen Arbeiten an den abgeschalteten

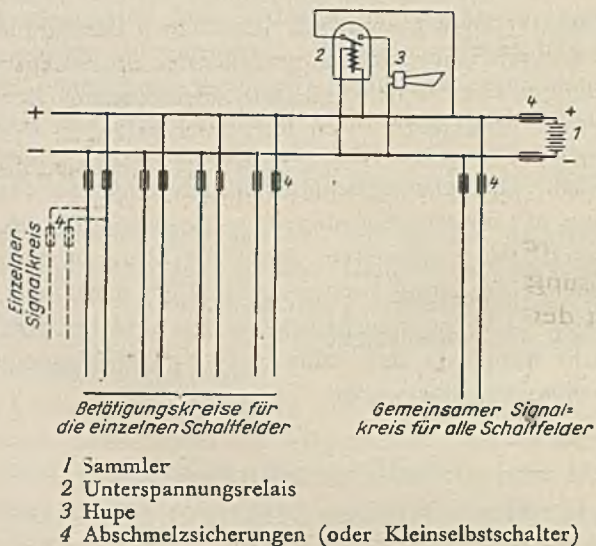


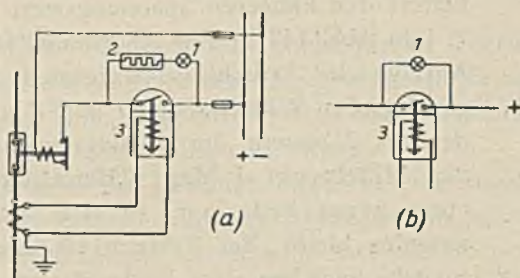
Abb. 140. Gleichstromanlage für Auslöse-, Steuer- und Signalzwecke und deren Absicherung

Geräten doppelpolig abgesichert werden (vgl. z. B. Abb. 140). Der Ansprechstrom der Abschmelzsicherungen oder Kleinselbstschalter soll so groß wie irgend zulässig gewählt werden, damit ein Abschalten der Auslöseleitungen nur bei Kurzschlüssen erfolgt. Dies gilt besonders für die Hauptzuleitung, weil diese in vielen Fällen stoßweisen Beanspruchungen

unterliegt. Unbedingt erforderlich ist es, die Betätigungskreise der einzelnen Schaltfelder gesondert abzusichern und den Kurzschlußschutz der Stromquelle so zu bemessen bzw. zu staffeln, daß er allen betriebsmäßigen Beanspruchungen gewachsen ist. Stromkreise für gemeinsame Signalgeräte müssen eigene Zuleitungen erhalten, um Rückwirkungen eines Relaiskreises auf den anderen und gegebenenfalls Falschauslösungen der Schalter zu vermeiden (s. auch Abb. 140). Eine einheitliche und genaue Bezeichnung der Sicherungen oder Kleinselbstschalter ist notwendig, damit etwaige Störungen leicht erkannt und behoben werden können. Kleinselbstschalter mit Hilfskontakten für Signalzwecke eignen sich hierzu besonders gut.

2. Überwachung der Spannungsabsenkung und Stromkreisunterbrechung

Die Höhe der Spannung zwischen den Leitern der Hauptzuleitung wird gewöhnlich durch Unterspannungsrelais oder Spannungsmesser mit Kontakteinrichtungen überwacht (Abb. 140). Bei Absinken der Betriebsspannung um etwa 10% unter ihren Nennwert betätigen die Überwachungseinrichtungen ein Licht- oder Tongerät; gegebenenfalls schalten sie die Gleichstromkreise auf die Notsammlerbatterie um.



- 1 Glimmlampe
2 Vorwiderstand
3 Überstromzeitrelais

- a richtige Schaltung der Glimmlampe
b falsche Schaltung der Glimmlampe

Abb. 141. Anzeige von Unterbrechungen im Gleichstrom-Auslösekreis mit Glimmlampen

Zum Anzeigen von Unterbrechungen in den abgesicherten Kreisen können Glimmlampen in Schaltungen ähnlich wie in den Abb. 135 und 141 benutzt werden. Die Glimmlampen haben einen hohen inneren Widerstand und erlöschen, wenn z. B. eine oder beide Sicherungen des Abzweiges unterbrochen oder abgeschmolzen sind.

In Abb. 141a ist die Glimmlampe 1 in Reihe mit einem Widerstand 2 geschaltet. Dieser Widerstand ist so zu bemessen, daß der Auslöser am Schalter bei Kurzschluß der Glimmlampe nicht betätigt wird. Die Schaltung nach Abb. 141b darf nicht angewendet werden, da sonst der Schalter bei etwaigem Kurzschluß der Glimmlampe auslöst.

Glimmlampen haben im allgemeinen den Nachteil, daß sie infolge der hohen Empfindlichkeit auch bei Erdschluß der Gleichstromanlage leuchten und dadurch zu Trugschlüssen über die Betriebsbereitschaft der Betätigungskreise Anlaß geben können. In wichtigen Anlagen benutzt man darum an Stelle der Glimmlampen vorzugsweise Melderelais, Schutzkreiswächter¹⁾ oder dergleichen.

3. Überwachung des Isolationszustandes

Zur Überwachung des Isolationszustandes der Gleichstromkreise kann z. B. bei den Hauptzuleitungen zwischen beide Pole und Erde je ein anzeigender oder schreibender Spannungsmesser geschaltet werden (Abb. 142). Im ungestörten Betrieb zeigen die Spannungsmesser gleich große Spannungswerte an. Liegt jedoch ein Isolationsfehler vor, so zeigt der Spannungsmesser des erdschlußbehafteten Leiters den kleineren Spannungswert an.

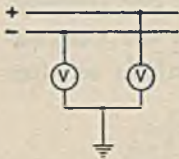


Abb. 142. Überwachung des Isolationszustandes der Gleichstromanlage mit zwei gegen Erde geschalteten Spannungsmessern. Optische Anzeige der Erdschlüsse.

In Abb. 143 ist eine Anordnung für akustische Anzeige der Erdschlüsse dargestellt, die aus zwei gleichgroßen Widerständen 1 und 1' und einem Melderelais 2 besteht. Im störungsfreien Betrieb weist der Mittelpunkt *P* der Widerstände keine Spannung gegen Erde auf, so daß das Melderelais stromlos bleibt. Bei Erdschluß eines Leiters der Gleichstromanlage entsteht zwischen dem Punkt *P* und der Erde eine Spannung, die das Relais für die Betätigung der Hupe 3 erregt. Die Art der Spannungsverlagerung geht aus dem unteren Teilbild hervor.

Die Anzeige der Überwachungseinrichtungen nach den Abb. 142 und 143 wird unzuverlässig, wenn am Minus- und Pluspol gleichzeitig eine etwa gleich große Verschlechterung der Isolation eintritt.

Es gibt auch Einrichtungen, die die absolute Größe sowie die Änderung des Isolationswiderstandes der Gleichstromanlage laufend messen

¹⁾ P. Kannengießer, AEG-Mitt. (1929) S. 709

bzw. anzeigen¹⁾). Diese Überwachungseinrichtungen bestehen im wesentlichen aus einem Milliampereometer, einem wattmetrischen Wechselstromrelais, einem Einphasen-Isoliertransformator und einem Kondensator, die von einer Wechselspannung erregt werden. Solche Einrichtungen zeichnen sich durch sehr hohe Empfindlichkeit aus und sprechen auch bei kurzzeitig auftretenden Erdschlüssen (0,1 s) noch sicher an.

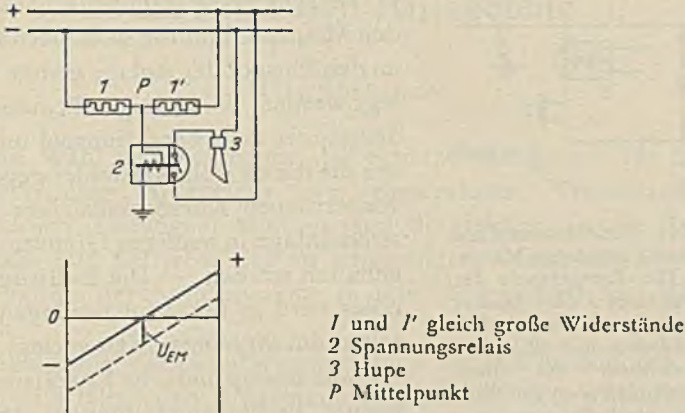


Abb. 143. Überwachung des Isolationszustandes der Gleichstromanlage durch ein Spannungsrelais mit Hupe. Akustische Anzeige der Erdschlüsse.

Einrichtungen nach Abb. 156 können für die Überwachung des Isolationszustandes der Gleichstromanlagen ebenfalls benutzt werden. Die Einrichtung nach Abb. 156a entspricht in ihren wesentlichen Zügen der vorgeschriebenen Überwachungseinrichtung.

Schließlich muß die Sammlerbatterie eine angemessene Kapazität sowie eine zuverlässige Ladeeinrichtung aufweisen und mit Einrichtungen, wie Säuredichtemesser, Strommesser und Spannungsmesser, versehen sein, die ihren Ladezustand erkennen lassen.

4. Ergänzende Bemerkungen

In feuchten Räumen kann bei Betriebsspannungen über 60 V die Isolation des Minusleiters der Gleichstrom-Betätigungskreise infolge Elektro-Osmose leiden. Durch die Osmose wird nämlich Feuchtigkeit in die Isolierhülle der Minusleiter hineingedrückt, so daß dieser mit der Zeit

¹⁾ Bütow, ETZ 52 (1931) S. 502; Fr. Fritsch und H. Jüttner, Feinmechanik und Präzision 43 (1935) Heft 1.

Erdverbindung erhält. Tritt danach an einem Pluspolleiter ein Erdschluß auf, so bildet sich ein geschlossener Stromkreis, der u. U. den Hilfsauslöser am Schalter erregen kann.

Man kann die Osmose unterdrücken und damit zusammenhängende Schalterfalschauslösungen nahezu völlig vermeiden, wenn der Minuspol der Gleichstromanlage von vornherein über einen Widerstand geerdet wird und die Wicklungen der Auslöser sowie der Hilfsrelais

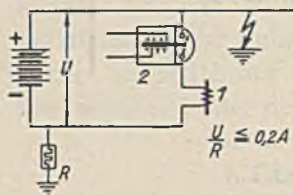


Abb. 144. Gleichstromanlage mit ständig geerdetem Minusleiter. Die Erregerspule des Hilfsauslösers 1 darf hierbei nur an den Minuspol fest angeschlossen und über den Arbeitskontakt des Überstromzeitrelais 2 an den Plusleiter geschaltet werden.

in den Schutzeinrichtungen mit einem Ende an den Minuspol und die sie steuernden Kontakte an den Pluspol der Anlage gemäß Abb. 144 gelegt werden. Bei richtiger Bemessung des Widerstandes zwischen Minuspol und Erde können die durch Isolationsfehler gegen Erde hervorgerufenen Kurzschlußströme der Gleichstromanlage in mäßigen Grenzen (etwa 0,2 A) gehalten werden. — Die Erdung des Minuspoles wird in Betätigungsanlagen jedoch nur selten durchgeführt. Man verlegt lieber gegen Osmose unempfindliche Kabelleitungen (sogenannte Feuchtraumleitungen) anstatt NGA-Leitungen und sorgt für eine ausreichende Über-

wachung des Isolationszustandes. Die teilweise mit der Erdung im Zusammenhang stehende Polung der Auslöser- und Relaispulen gemäß Abb. 144 wird dagegen in der Schutztechnik fast ausnahmslos benutzt, und zwar in der Hauptsache zur Bekämpfung der möglichen Korrosion an den Spulen.

Eine ausreichende Sicherung gegen Schalterfalschauslösungen erhält man auch, wenn die Betätigungsleitungen zweipolig verlegt und doppelpolig abgeschaltet werden. Diese Maßnahme ist leider technisch und wirtschaftlich nur sehr schwer durchführbar, weshalb von ihr in der Schutztechnik selten Gebrauch gemacht wird. Bei fernbetätigten Trennschaltern hat sich die zweipolige Steuerung dagegen restlos durchgesetzt, weil hier sonst Störungen mit unübersehbaren Folgen hervorgerufen werden können.

VII. Schutzeinrichtungen für die einzelnen Anlageteile

A Allgemeines

Für die Wahl und Auslegung der Schutzeinrichtungen für die einzelnen elektrischen Anlageteile, wie Generatoren, Transformatoren, Sammelschienen, Leitungen, Motoren und dergleichen, ist die Kenntnis des Aufbaues und Betriebes der zu schützenden Anlageteile sowie eine genaue Kenntnis der Schutzsysteme in ihrer Eigenschaft und Wirkung unerlässlich.

Die Auslegung der Schutzeinrichtungen für die besonderen Eigenheiten der zu schützenden Anlageteile läßt sich am besten durchführen, wenn auf der einen Seite der Sachbearbeiter des Bestellers die Eigenart der Schützlinge und des Betriebes und auf der anderen Seite der Planungsingenieur der Lieferfirma die Leistungsfähigkeit der in Frage kommenden Schutzeinrichtungen genau gegeneinander abwägen. Aus der Gegenüberstellung der Forderungen und der für die selektive Erfassung der Störungen zur Verfügung stehenden Lösungen kann dann der zu erzielende Schutzzumfang festgelegt werden. Dabei müssen nicht selten die Forderungen für den Schutz entweder gemildert, oder aber die Eigenschaften des Schutzes verbessert bzw. seine Wirksamkeit erweitert werden. Der Schutzzumfang eines Anlageteiles oder einer Netzanlage wird natürlich oft auch von den verfügbaren Geldmitteln bestimmt.

Für die Auswahl der Schutzsysteme ist von besonderer Bedeutung, daß der Besteller die Eigenschaften und Wirkungen der einzelnen Schutzsysteme miteinander vergleicht und sich über ihre Brauchbarkeit für den vorliegenden Fall ein genaues Urteil bildet (s. Seite 271). Erst dann kann er entsprechend der Wertigkeit und Wichtigkeit des zu schützenden Anlageteiles den notwendigen und möglichen Schutzzumfang festlegen. Den Schutzeinrichtungen mit einfachem, übersichtlichem Aufbau wird er den Vorzug geben, weil bei ihnen „eigene“ Störungen seltener vorkom-

men und außerdem Wartung und Prüfung leichter sind. Ein „Überladen“ der zu schützenden Anlageteile mit Schutzrelais, die sich womöglich gegenseitig noch selbst überwachen bzw. schützen müssen, ist aus technischen, betrieblichen und wirtschaftlichen Gründen tunlichst zu vermeiden.

B. Generatorschutz

Generatoren sind die wichtigsten und die am schwierigsten zu ersetzenden Anlageteile eines Netzes. Störungen an ihnen, die als Folge der nachstehend erwähnten Fehler an Wicklungen und im aktiven Eisen zustandekommen, können so umfangreich sein, daß die Wiederherstellung manchmal Wochen oder gar Monate dauert. Abgesehen von den damit verbundenen hohen Wiederherstellungskosten kann durch den längeren Ausfall der beschädigten Maschine auch das Aufrechterhalten einer geordneten Energieversorgung stark gefährdet werden. Generatoren müssen daher grundsätzlich mit Schutzeinrichtungen versehen sein; diese sollen im Störfall rasch abschalten und entregen, um den Schadenumfang auf das geringstmögliche Maß zu beschränken. Bei großen und wichtigen Maschinen, insbesondere bei solchen, die das Netz über Transformatoren speisen, wird man die Erdschlüsse unter Kleinhaltung des Fehlerstromes durch die entsprechenden Schutzrelais nur melden lassen, damit vor dem notwendigen Abschalten Ersatzmaschinen in Betrieb genommen werden können.

An Generatorenwicklungen können im allgemeinen folgende elektrische Fehler auftreten:

- | | | |
|------------------------------|---|------------|
| a) Kurzschluß | } | im Ständer |
| b) Erdschluß (Gestellschluß) | | |
| c) Windungsschluß | | |
| d) Erdschluß | } | im Läufer |
| e) Windungsschluß | | |

Außerdem können die Generatoren durch übermäßige Spannungssteigerung, durch elektrische Pendelvorgänge (s. Seite 61), durch Eisenbrand¹⁾ oder durch langandauernde Überlastung gefährdet werden. Schließlich ist das Abschalten eines Generators auch dann erforder-

¹⁾ Schutzeinrichtungen zum Erfassen des Eisenbrandes in Generatoren gibt es in brauchbarer Form noch nicht.

lich, wenn in ihm als Folge der Fehler a) bis e) ein mit Lichtbogen verbundener Brand entsteht, ferner wenn die Antriebsmaschine versagt bzw. wirkungslos wird.

Zur Bekämpfung der schädlichen Auswirkungen, die durch die erwähnten Fehler und außergewöhnlichen Betriebsverhältnisse entstehen können, ist im Laufe der Jahre eine große Anzahl verschiedenartiger Schutzeinrichtungen bekannt geworden. Besonders mannigfaltig sind dabei die entsprechenden Schutzschaltungen. Nachstehend sollen lediglich die gebräuchlichen und bewährten Einrichtungen in ihren wesentlichen Grundzügen besprochen werden.

1. Kurzschlußschutz

Zum Schutze der Generatoren gegen die Auswirkungen von außen- und innenliegenden Kurzschlüssen benutzt man im allgemeinen zwei Arten von Schutzrelais. Die eine Art von Schutzrelais veranlaßt die erforderliche Abschaltung hauptsächlich nur bei „äußeren“ Kurzschlüssen, die andere dagegen nur bei „inneren“ Kurzschlüssen.

Zu den „äußeren“ Kurzschlüssen zählen diejenigen an den Kraftwerks-Sammelschienen sowie an den davon abgehenden Leitungen, wenn bei diesen die notwendige Abschaltung aus irgendeinem Grunde ausbleibt. Als Schutzrelais der Generatoren zum Abtrennen solcher „außenliegender“ Kurzschlüsse dienen vorwiegend unabhängige Überstromzeitrelais, deren Ansprechstrom auf etwa den 1,4 ... 1,8fachen Generator-Nennstrom¹⁾ und deren Auslösezeit etwa 1 s höher als die der Schutzrelais in den nachgeordneten Anlageteilen eingestellt werden. Bei einer großen Anzahl von gestaffelten Anlageteilen ergeben sich dadurch an den Generatoren leider sehr lange Auslösezeiten (etwa 4 bis 12 s), was besonders bei Kurzschlüssen an den Kraftwerks-Sammelschienen unerwünscht ist.

In manchen Anlagen benutzt man daher an Stelle der Überstromzeitrelais Distanzrelais ohne Richtungsentscheid, die Kurzschlüsse wesentlich rascher abtrennen, bei Überlastungen dagegen höhere Auslösezeiten aufweisen. Die Verwendung von Distanzrelais bei Generatoren setzt allerdings voraus, daß das anschließende Netz ebenfalls mit Distanz-

¹⁾ Der Ansprechstrom muß dabei zum mindesten niedriger sein als der Dauerkurzschlußstrom der Maschine bei Klemmenkurzschluß und Nennerregung. Sind die Maschinen mit Stromreglern zur Begrenzung des Dauerkurzschlußstromes versehen, so ist auch hierauf Rücksicht zu nehmen.

schutz ausgerüstet ist und daß die Selektivität in Richtung auf das Netz dabei gewahrt wird.

Die unabhängigen Überstromzeitrelais und Distanzrelais können nicht als Überlastungsschutz gewertet werden, sondern sind lediglich als Kurzschlußschutz bzw. Staffelschutz zu betrachten. Brauchbare Überlastrelais für Generatoren gibt es zurzeit noch nicht. Das Bedürfnis nach ihnen ist übrigens verhältnismäßig klein, da die Generatoren im Gegensatz zu den Motoren in der Regel ständig überwacht werden.

Als Schutz bei „inneren“ Fehlern eines Generators ist der besprochene Überstromschutz nicht ausreichend.

Zum Erfassen der „inneren“ Kurzschlüsse¹⁾, d. h. solcher in oder an den Generatoren, wird grundsätzlich ein Längs-Stromvergleichsschutz (Differentialschutz) benutzt (Abb. 145), der den Vorteil hat, daß

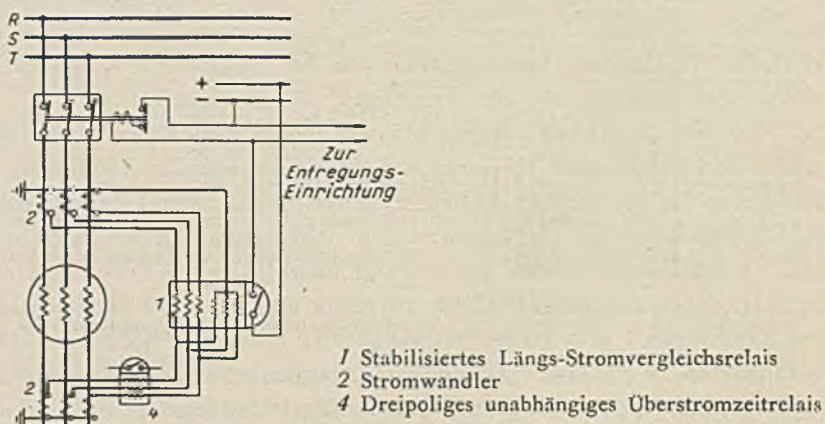


Abb. 145. Stabilisierter Längs-Stromvergleichsschutz für einen Generator, der unmittelbar auf die Sammelschienen arbeitet.

er sehr kurze Auslösezeiten (etwa 0,05 ... 0,1 s) aufweist und überdies mit großer Sicherheit selektiv wirkt. Zur Anwendung kommt in der Regel der stabilisierte Längs-Stromvergleichsschutz (s. Seite 150).

Für Generatoren, die unmittelbar (galvanisch) mit dem zu speisenden Netz verbunden sind oder zum mindesten unmittelbar auf die anliegenden Sammelschienen arbeiten, genügen unter Umständen auch nicht-

¹⁾ Kurzschlüsse in Generatoren treten meist als Folge von Erd- oder Windungsschlüssen auf.

stabilisierte Längs-Stromvergleichsrelais (s. Seite 149), weil die zugehörigen Stromwandler an beiden Enden eines jeden Wicklungsstranges vollkommen gleich ausgeführt werden können und dadurch übermäßige Falschströme auch im Überstromgebiet nicht zu erwarten sind¹⁾. Falls an die gleichen Stromwandler noch andere Relais oder Meßgeräte angeschlossen werden sollen, so ist unbedingt auf gleichmäßige Verteilung der Wandlerbürden zu achten, da sonst bei unsymmetrischer Belastung der Wandler zu hohe Falschströme zustande kommen können. Dies ist einer der Hauptgründe, weshalb der nichtstabilisierte Längs-Stromvergleichsschutz bei Generatoren kaum noch Verwendung findet.

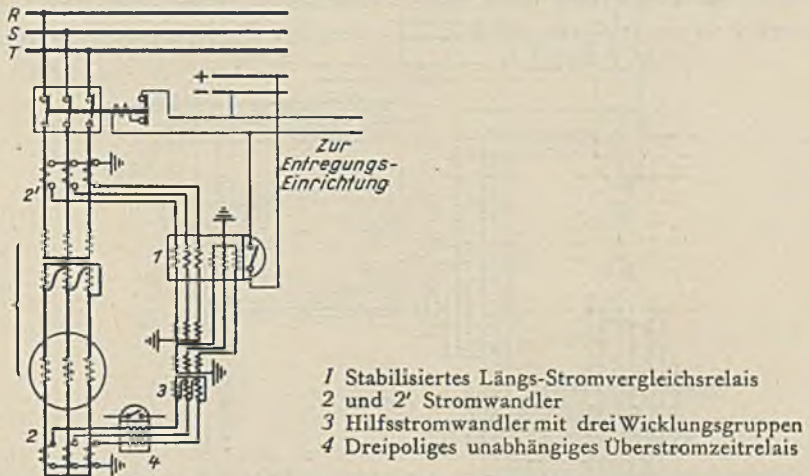


Abb. 146. Stabilisierter Längs-Stromvergleichsschutz für die Betriebs-Einheit: Generator—Transformator.

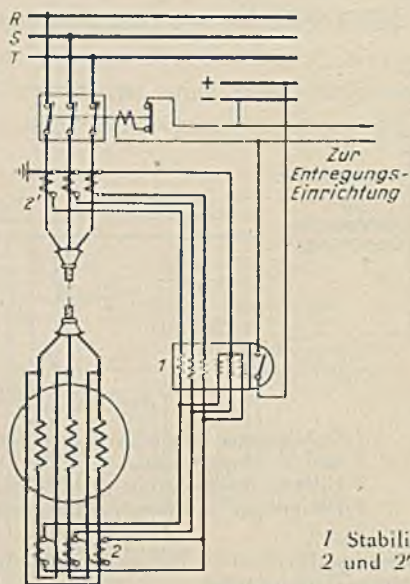
Arbeiten Generator und Transformator als eine Betriebseinheit zusammen²⁾, so müssen stabilisierte Längsstromvergleichsrelais (siehe Seite 150) verwendet werden³⁾, denn die zusammenarbeitenden Stromwandler auf der Sternseite des Generators und auf der Hochspannungsseite des Transformators weisen kaum gleiche Eigenschaften im Überstromgebiet auf (vgl. Abb. 146). Hier sind außerdem zumeist noch drei-

¹⁾ Solche Längsstromvergleichsrelais lassen sich gut anwenden, wenn Stromwandler in Sonderausführung benutzt werden (vgl. Abb. 148).

²⁾ Der Transformator wird hier mitgeschützt.

³⁾ Zu den stabilisierten Längs-Stromvergleichsrelais zählen z. B. das Quotientendifferentialrelais der AEG, das Prozentdifferentialrelais der BBC und das SSW-Differentialrelais mit Sperrelais.

polige Zwischenwandler (Hilfsstromwandler!) notwendig, um die unterschiedlichen Übersetzungen der Stromwandler am Generatorsternpunkt und auf der Hochspannungsseite des Transformators auszugleichen, falls die Stromwandler schon im störungsfreien Betrieb keine gleichen Sekundärströme liefern. Diese Zwischenwandler besitzen je Pol eine dritte Wicklung für den teilweisen Anschluß der Längs-Stromvergleichsrelais. Ein derartiger Zwischenwandler kann außerdem vorgesehen werden, wenn der Transformator eine Dreieck-Stern-Schaltung aufweist



1 Stabilisiertes Längs-Stromvergleichsrelais
2 und 2' Stromwandler

Abb. 147. Stabilisierter Längs-Stromvergleichsschutz für einen Generator in Dreieckschaltung

(Abb. 146) und dadurch sein Spannungsstern auf der Hochspannungsseite gegenüber dem Spannungsstern des Generators um 30° in der Phase verschoben ist. Diese Phasenverschiebung wird im Zwischenwandler dadurch ausgeglichen, daß die Wicklungen der Wandler 2 des Generators im Hilfswandler 3 in Dreieck geschaltet werden, wodurch auch auf der Generatorseite eine Dreieck-Stern-Schaltung zustandekommt, und zwar im Sekundärkreis.

Bei Generatoren mit Dreieckschaltung (Abb. 147) sind die Ströme in den Zuführungen zu den Sammelschienen um 30° gegenüber denen in

den Generatorwicklungen verdreht und um den $\sqrt{3}$ fachen Wert größer. Die Verschiedenheit der Ströme muß hier durch sekundärseitige Dreieckschaltung der Stromwandler 2 ausgeglichen werden.

Ähnliche Überlegungen gelten auch für die magnetische Differenzbildung durch einen gemeinsamen Stromwandler (2) für beide Enden eines Wicklungsstranges (Abb. 148). Hier werden im Vergleich zur normalen Schaltung (Abb. 145 und 146) zwar drei Wandler eingespart, dafür müssen aber die Vergleichswandler in Sonderausführung hergestellt und die Sternpunktenden des Generators bis zum Leistungsschalter gezogen werden, wenn der Schutzbereich sich auf die Zuleitungen erstrecken soll. Bei dieser Schutzanordnung sind nur nichtstabilisierte Längs-Stromvergleichsrelais (1) bzw. einfache Überstromrelais im Platze.

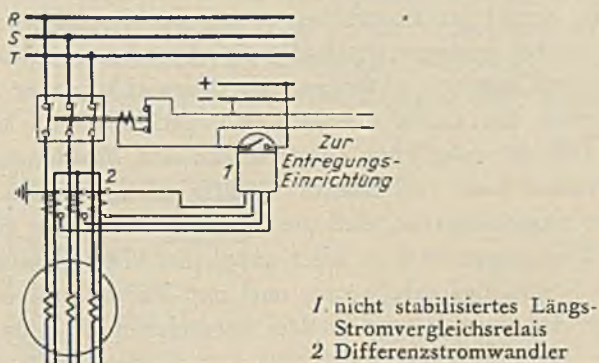


Abb. 148. Längs-Stromvergleichsschutz unter Verwendung von Differenzstromwandlern

Für Doppelgeneratoren (Ljungström-Aggregate) benutzt man andere Schaltungen in verschiedenartiger Ausführung¹⁾ mit Längs-Stromvergleichsrelais.

Die Längs-Stromvergleichsrelais (Differentialrelais) werden gewöhnlich so eingestellt, daß sie bei einem Fehlerstrom von etwa 25% des Generatornennstromes auslösen. Eine Zeitverzögerung ist im allgemeinen nicht erforderlich, insbesondere bei Maschinen, die ohne Transformatoren auf die Sammelschienen arbeiten und die überdies mit stabilisierten Längs-Stromvergleichsrelais ausgerüstet sind.

Der unabhängige Überstromzeitschutz (siehe Pos. 4 in den Abb. 145

¹⁾ Siehe R. Schimpf, Siemens-Z. 15 (1935) S. 128; M. Schleicher, Die moderne Selektivschutztechnik, J. Springer, 1936, S. 305.

und 146) bzw. der Distanzschutz sowie der Längs-Stromvergleichsschutz werden für Generatoren in der Regel dreipolig ausgeführt, um ein Abtrennen der Schützlinge auch dann sicher zu ermöglichen, wenn aus irgendeinem Grunde ein einpoliger Kurzschluß entstehen sollte (siehe Seite 39).

2. Erdschlußschutz

Die Wicklungen eines Generators sind nahezu vollständig in geerdeten Teilen eingebettet. Isolationsschäden an ihnen führen daher am häufigsten zum Erdschluß im Generator (Gestellschluß). Infolgedessen wurde im Laufe der Jahre zum Erfassen dieser Fehlerart eine besonders große Anzahl von Schutzverfahren ausgebildet. Wertvoll ist, daß die Erfassung derartiger Erdschlüsse meist die Möglichkeit gibt, den Generator schon bei geringer Beschädigung abzuschalten, also bevor der Erdschluß durch seinen Lichtbogen zum Kurzschluß oder Windungsschluß führen kann. Ein sicher arbeitender Erdschlußschutz kann somit einen großen Teil der möglichen Kurzschlüsse und Windungsschlüsse vorbeugend erfassen bzw. verhindern. Wichtig ist dabei, daß der Erdschlußschutz so ausgebildet ist, daß die Wärmewirkung des Erdschlußstromes an den Wicklungen und im Eisen möglichst klein gehalten wird.

Die Spannungsverlagerung und der Erdschlußstrom sind je nach der Lage des Erdschlusses in dem betroffenen Wicklungsstrang und je nach der Schaltart des Generators verschieden groß. Bei Generatoren in Sternschaltung liegen diese Werte zwischen Null (Erdschluß im Sternpunkt!) und dem vollen Wert (Erdschluß an den Klemmen!); bei Generatoren in Dreieckschaltung bewegen sich die Werte dagegen nur vom halben bis zum vollen Wert der Sternspannung. Der halbe Wert gilt für einen satten Erdschluß in der Wicklungsmittle¹⁾.

Arbeiten die Generatoren unmittelbar auf das Netz, so ist im Falle eines Erdschlusses in ihnen der Erdschlußstrom groß, und zwar gleich dem des ganzen Netzes. Arbeiten sie dagegen über Transformatoren auf das Netz, so ist der Erdschlußstrom infolge der geringen Erdkapazität der galvanisch zusammenhängenden Anlageteile meist verschwindend klein.

Die Gestaltung des Erdschlußschutzes ist daher in starkem Maße

¹⁾ Siehe auch H. Weber, Der Erdschluß in Hochspannungsnetzen, R. Oldenbourg, München 1936, S. 97—103.

davon abhängig, ob der Generator das Verteilungsnetz über einen Transformator oder unmittelbar mit Strom beliefert.

a) Erdschlußschutz für Generatoren, die das Netz über eigene Transformatoren speisen

Der Erdschlußschutz für eine Betriebseinheit: Generator-Transformator läßt sich verhältnismäßig einfach ausführen. Es genügt im allgemeinen ein gewöhnlicher Spannungs- oder Stromschutz, weil durch die im Transformator vorhandene galvanische Trennung vom übrigen Netz an und für sich schon eine natürliche Selektivität gegeben ist. Man braucht im wesentlichen nur die auf der Generatorseite auftretende Spannungsverlagerung (oder den dadurch bedingten Erdschlußstrom) als Kennzeichen für das Erfassen des Erdschlusses zu benutzen. Wichtig ist dabei, daß die Relais so empfindlich arbeiten, daß sie die Erdschlüsse in den Wicklungssträngen von den Klemmen bis nahezu zum Wicklungsstern einwandfrei erfassen, bei Erdschlüssen im Netz dagegen nicht auslösen.

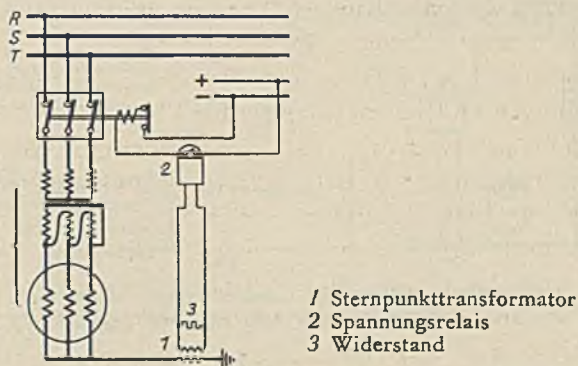


Abb. 149. Erdschlußschutz für einen Generator, der auf das Netz über den eigenen Transformator arbeitet (Spannungsrelais!)

Spannungsverlagerungen im örtlichen Schutzbereich, die dort durch Netzerdschlüsse infolge der kapazitiven Kopplung von Ober- und Unterspannungsseite des Transformators hervorgerufen werden, dürfen die Erdschlußrelais also nicht zum Ansprechen bringen.

In Abb. 149 ist eine Erdschlußschutzeinrichtung dargestellt, die die Spannungsverlagerung im Generator mit Hilfe eines Sternpunkttransformators (1) und eines Spannungsrelais (2) überwacht. Um zu ver-

hindern, daß das Spannungsrelais auch bei Netzerdschlüssen anspricht, wird der Sekundärwicklung des Sternpunkttransformators ein Widerstand (3) von bestimmter Größe parallel geschaltet¹⁾. Mit einem derartigen Erdschlußschutz können etwa 90% der Windungen eines Wicklungsstranges — von der Klemme aus gerechnet — geschützt werden. Dabei erreicht der Fehlerstrom bei Erdschluß auch an den Klemmen keine bedenkliche Höhe. Erdschlüsse in den restlichen 10% des Wicklungsstranges werden nicht erfaßt, weil dort die Spannungsverlagerung (Sternpunkterdschlußspannung) unter 10% der Nenn-Spannung liegt und damit zu gering ist, um das Relais bei seiner mit Rücksicht auf die Netzerdschlüsse begrenzten Empfindlichkeit zum Ansprechen zu bringen. Durch besondere Maßnahmen kann die Empfindlichkeit einer solchen Schutzanordnung auch für den Schutzbereich von 95% ausgelegt werden²⁾.

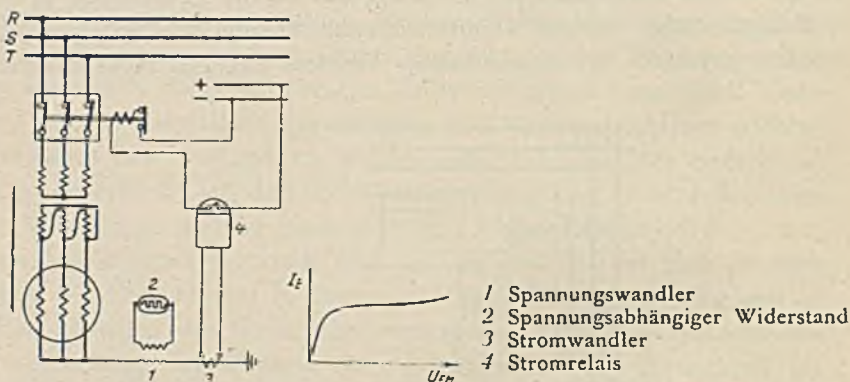


Abb. 150. Erdschlußschutz für einen Generator, der auf das Netz über den eigenen Transformator arbeitet (Stromrelais!)

In Abb. 150 ist ein Erdschlußschutz dargestellt, der in Abhängigkeit von der Größe des Fehlerstromes arbeitet. Zwischen Sternpunkt des Generators und Erde ist hier ein Spannungswandler (1) geschaltet, der mit einem spannungsabhängigen Widerstand (Eisenwasserstoff-Lampen) belastet ist (2). In der Erdverbindung befindet sich außerdem ein Stromwandler (3), an dessen Sekundärseite ein Stromrelais (4) als Erdschlußrelais angeschlossen ist. Der Spannungswandler und die Eisenwasserstoff-Lampen werden so bemessen, daß die Größe des Fehlerstromes in

¹⁾ Ausführlicher siehe in E. Bopp, Siemens-Z. 16 (1936) S. 457.

²⁾ Vgl. E. Bopp, Siemens-Z. 16 (1936) S. 458.

der Erdverbindung von der Lage der Erdschlußstelle im Wicklungsstrang des Generators nahezu unabhängig ist¹⁾ (siehe auch das Stromspannungs-Diagramm in Abb. 150). Dadurch wird erreicht, daß bei Fehlern in der Nähe der Generatorklemmen die Beschädigungen am Fehlerort klein bleiben und dennoch ein möglichst großer Teil des Wicklungsstranges (etwa 90%) vom Schutz erfaßt wird. Die Größe des Erdschlußstromes wird so gewählt (1 bis 5 A), daß eine Falschauslösung des Erdschlußrelais bei Erdschlüssen im Netz ausgeschlossen ist, selbst dann, wenn über die Kopplungs-Kapazität des Transformators im Erdungskreis des Generators ein größerer Fehlerstrom (bis etwa 0,5 A) fließen sollte.

Die vorstehend beschriebenen zwei Erdschluß-Schutzeinrichtungen haben den Nachteil, daß sie den Teil der Wicklungsstränge in der Nähe des Sternpunktes nicht schützen und daß die Relais sehr empfindlich eingestellt werden müssen, um den Schutzbereich möglichst weit zu treiben.

Diese Mängel scheiden aus, wenn dem Sternpunkt des Generators dauernd eine Spannung von bestimmter Höhe gegen Erde aufgedrückt wird, die sich in ihrer Richtung mit keiner der Sternspannungen deckt. Abb. 151 zeigt die Schaltung einer Schutzeinrichtung, in der die Stern-

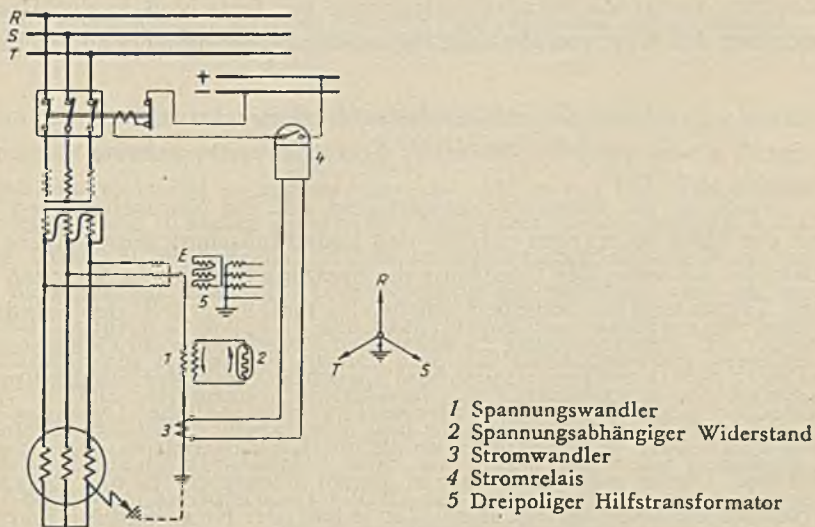


Abb. 151. Erdschlußschutz mit künstlicher Spannungsverlagerung für einen Generator, der auf das Netz über den eigenen Transformator arbeitet (Stromrelais!)

¹⁾ W. Bütow, Elektrizitätswirtschaft 29 (1930) S. 301; AEG-Mitt. (1937) S. 233.

punktverlagerung zur Erfassung aller Erdschlüsse in einem Wicklungsstrang, d. h. von der Klemme bis zum Sternpunkt des Generators, durch einen dreipoligen Hilfstransformator (5) mit unsymmetrischer Erdung erzwungen wird. Zwischen dem Sternpunkt des Generators und dem Erdpunkt *E* des Hilfstransformators herrscht hier bereits im störungsfreien Betrieb eine Spannung, die im Spannungs-Vektordiagramm der Abb. 151 vom Sternpunkt nach unten angedeutet ist. Tritt in einem Wicklungsstrang des zu schützenden Generators ein Erdschluß auf, so treibt die verlagerte Spannung einen ausreichenden Strom in dem mit Pfeilen angedeuteten Kreis, und zwar auch dann, wenn der Erdschluß im Sternpunkt entsteht. Das an den Stromwandler 3 angeschlossene Erdschlußrelais 4 (Stromrelais) leitet die erforderliche Meldung oder Abschaltung ein.

Diese Schutzanordnung kann in gleicher Weise auch bei Doppelgeneratoren (Ljungström-Aggregaten) angewendet werden¹⁾. Sie läßt sich ferner bei Generatoren mit zugänglichem und unzugänglichem Sternpunkt gleich gut benutzen.

Schließlich sei erwähnt, daß die drei beschriebenen Erdschlußschutzeinrichtungen die gesamte Dreieckwicklung des Haupttransformators mit-schützen, zumal die Mindestverlagerung bei Erdschluß in der Dreieckwicklung den Wert von 50% der Nenn-Sternspannung nicht unterschreitet.

b) Erdschlußschutz für Generatoren, die unmittelbar auf die Sammelschienen arbeiten

Arbeitet ein Generator unmittelbar auf die Sammelschienen bzw. auf das Netz, so ergeben sich für den Erdschlußschutz schwierigere Verhältnisse, als wenn der Generator die Speisung des Netzes über den eigenen Transformator betreiben würde. So muß hier z. B. der Schutz die selektive Unterscheidung zwischen den Erdschlüssen im Generator und im Netz allein treffen, zu welchem Zweck an Stelle der verhältnismäßig einfachen Spannungs- oder Stromrelais empfindliche Leistungs-Richtungsrelais oder wattmetrische Relais mit Gleichstromspeisung erforderlich sind. Ferner muß der Schutz in seinem Stromkreis für den Erdschlußstrom des Netzes ausgelegt sein²⁾, der je nach der Netzschaltung sehr groß oder auch sehr klein sein kann und darüber hinaus auch noch von der

¹⁾ Vgl. H. Scheu, AEG-Mitt. (1940) S. 115.

²⁾ Er muß auch den Kurzschlußstrom bei Doppelerdschluß vertragen können.

Lage des Fehlers im Generator selbst abhängig ist. Mit Rücksicht auf den hohen Erdschlußstrom, der auch in Netzen mit Löscheinrichtungen als Reststrom noch beträchtlich sein kann, ist es hier notwendig, daß die Relais stets auf die Auslösung arbeiten¹⁾, damit der Schadenumfang im Generator klein ausfällt. Die Relais müssen daher im allgemeinen empfindlich und schnellarbeitend sein.

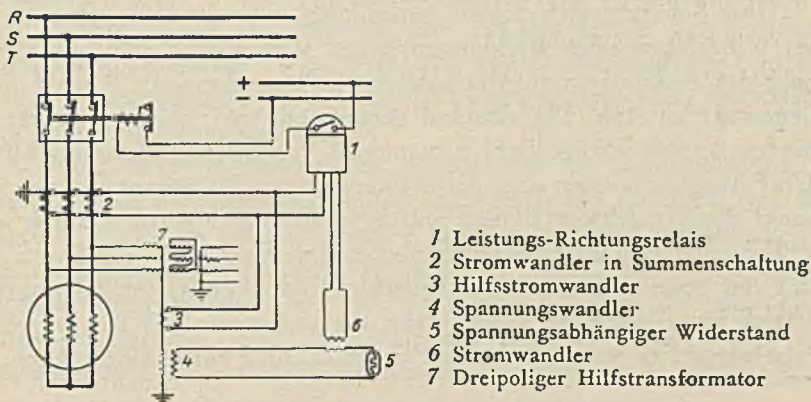


Abb. 152. Erdschlußschutz für einen Generator, der unmittelbar auf die Sammelschiene arbeitet (Leistungs-Richtungsrelais!)

Die in Abb. 152 dargestellte Schutzvorrichtung verwendet ein elektrodynamisches Leistungs-Richtungsrelais (siehe Seite 99), das an die Strom- und Spannungswandler so angeschlossen ist, daß es nur bei Erdschlüssen im Generator und in seinen Zuleitungen bis zu den Stromwandlern 2 auslöst, bei Erdschlüssen außerhalb dieses Schutzbereiches, also im Netz, dagegen nicht auslöst. Die selektive Wirkung des Schutzes wird im wesentlichen dadurch erzielt, daß den drei Hauptstromwandlern 2 in Summenschaltung ein Hilfsstromwandler 3 in der Erdverbindung gegengeschaltet ist. Die Stromwandler 2 müssen zur Verhinderung von Falschströmen untereinander abgeglichen und unterschiedlich zum Wandler 3 bemessen sein. Beide Maßnahmen haben zur Folge, daß in das Erdschlußrelais 1 bei außenliegenden Erdschlüssen nur ein Teil des Summenstromes der drei Stromwandler 2 gelangt, bei Erdschlüssen im Schutzbereich dagegen die Ströme von beiden Wandlergruppen gleichsinnig zur Wir-

¹⁾ Bei großen und wichtigen Einheiten läßt man die Erdschlüsse mit kleineren Spannungsverlagerungen, also Erdschlüsse in der Nähe des Generatorsternpunktes, zuweilen nur melden.

kung kommen und das Relais zum Auslösen bringen. Hierbei ist die Richtung des Stromes im Relais eine andere als bei außen liegenden Fehlern.

Damit das Relais 1 auch bei Erdschlüssen in der Nähe des Generatorsternpunktes ein ausreichendes Drehmoment entwickelt, wird die Verlagerungsspannung an einen spannungsabhängigen Widerstand gelegt (Eisen-Wasserstofflampen) und der in diesem Widerstand fließende Strom über den Wandler 6 der Erregerspule des Relais zugeführt.

Der Schutzbereich dieser Anordnung erstreckt sich auf etwa 90% der Windungen eines Wicklungsstranges. Von einer künstlichen Verlagerung des Erdpunktes am dreipoligen Hilfstransformator 7 wird hier im Gegensatz zu Abb. 151 Abstand genommen, weil sonst schon im ungestörten Betrieb infolge der vorhandenen Verlagerungsspannung ein größerer Ausgleichsstrom über die Erdkapazitäten des Netzes und den Sternpunkt des Generators fließen würde; hierdurch können nämlich in der Schutzanordnung unerwünschte Erscheinungen ausgelöst werden, z. B. erhält die Spannungsspule des Erdschlußrelais bereits im störungsfreien Betrieb eine Spannung aufgedrückt, die zusammen mit einem größeren Falschstrom im Strompfad eine Falschauslösung herbeiführen kann.

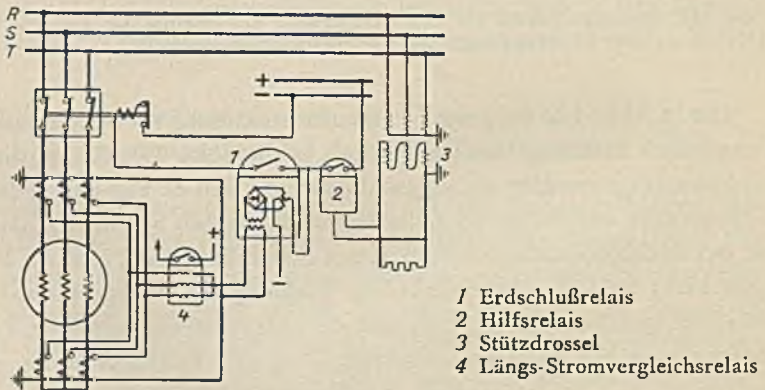


Abb. 153. Erdschlußschutz für einen Generator, der unmittelbar auf die Sammelschiene arbeitet (Wattmetrisches Gleichstromrelais!)

In Abb. 153 ist eine weitere Erdschlußschutzeinrichtung dargestellt, deren Schutzbereich sich ebenfalls auf 90% der Windungen eines Generatorwicklungsstranges erstreckt, die aber ein mit Gleichstrom erregtes wattmetrisches Erdschlußrelais (1) benutzt. Dem beweglichen Rähmchen des Relais wird der Summenstrom der Anlage über einen Zwischenwandler und

eine Trockengleichrichter-Anordnung zugeführt. Die ruhende Wicklung des Spannungspfades wird nur bei Erdschluß an die Betriebsspannung der Gleichstrombetätigungsanlage gelegt, und zwar durch das Hilfsrelais 2, das an die Sternpunktterdspannung angeschlossen ist, die über den dreipoligen Spannungswandler (Gestelldrossel) 3 gewonnen wird. Das Erdschlußrelais ist als Gleichstromrelais von der gegenseitigen Phasenlage des Summenstromes und der Verlagerungsspannung unabhängig. Es entwickelt außerdem ein Drehmoment, das mit der Größe des Summenstromes linear anwächst¹⁾. Dadurch, daß das Erdschlußrelais 1 in der Brücke des Längs-Stromvergleichsschutzes liegt, werden alle Oberwellenströme von ihm ferngehalten.

Arbeiten mehrere Generatoren parallel auf die Sammelschiene, so vereinfacht sich die Schutzanordnung nach Abb. 153 dadurch, daß das Hilfsrelais 2 und die Gestelldrossel 3 in einer einzigen Ausführung für sämtliche Generatoren genügen. In ähnlicher Weise läßt sich auch die Schutzanordnung gemäß Abb. 152 vereinfachen, indem der dreipolige Hilfstransformator 7 sowie der Einphasen-Transformator 4 mit den Eisenwasserstoff-Widerständen gemeinsam für die parallel geschalteten Generatoren an die Sammelschienen angeschlossen werden.

Die in diesem Abschnitt beschriebenen Erdschlußschutzeinrichtungen lassen sich durch einfache Mittel²⁾ dahin ergänzen, daß sie den Erdschluß auch dann erfassen, wenn der Generator noch nicht an das Netz geschaltet ist, d. h. beim „Hochfahren“ der Maschine auf Spannung.

3. Windungsschlußschutz

Der Windungsschluß (siehe Seite 39) im Ständer eines Generators wird von den in den Abschnitten 1 und 2 beschriebenen Kurzschluß- und Erdschlußschutzeinrichtungen nicht erfaßt. Für seine Erfassung sind andere Einrichtungen erforderlich.

Die Ansichten über die Notwendigkeit eines Windungsschlußschutzes sind in den Fachkreisen nicht einheitlich. Die einen behaupten, Windungsschlüsse werden im wesentlichen durch Erdschlußlichtbogen im Generator eingeleitet; und sollten welche unabhängig davon auftreten, so führen sie unweigerlich zum Erdschluß (Gestellschluß), der von den Erdschlußschutzeinrichtungen beherrscht wird. Die anderen meinen dagegen, daß

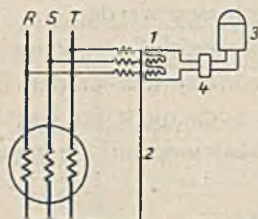
¹⁾ Vgl. E. Bopp, Siemens-Z. 18 (1938) S. 53.

²⁾ Vgl. z. B. H. Scheu, AEG-Mitt. (1940) S. 115.

Windungsschlüsse durchaus selbständig entstehen und bestehen können, und daß ihre große Zerstörungsfähigkeit allein schon den Einbau eines hierfür geeigneten Schutzes rechtfertigt. Einigkeit besteht zwischen beiden Parteien nur darin, daß Windungsschlüsse an und für sich verhältnismäßig selten auftreten.

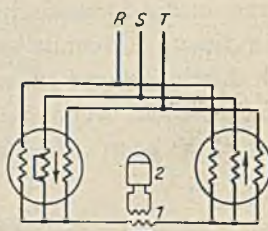
Jeder Windungsschluß ruft eine Veränderung der magnetischen Verhältnisse im betroffenen Generator hervor¹⁾ und bewirkt eine größere oder kleinere Verschiebung des „Generatorsternpunktes“ aus dem elektrischen Sternpunkt des Netzes. Die geometrische Summe der drei Sternspannungen im Generator ist dadurch nicht mehr gleich Null. Der Windungsschluß ist in erster Linie durch eine Verminderung der Sternspannung im betroffenen Wicklungsstrang des Generators erkennbar, wobei die Größe der Spannungsabsenkung in starkem Maße von der Anzahl der überbrückten bzw. kurzgeschlossenen Windungen abhängt.

Der in Abb. 154 dargestellte Windungsschlußschutz beruht auf mittelbarer Ausnutzung der erwähnten Spannungsverlagerung. Der Sternpunkt des Spannungswandlers 1 ist mit dem Sternpunkt des Generators über die



- 1 Stützdrossel
- 2 Sternpunkt-Verbindungsleitung
- 3 Spannungsrelais
- 4 Siebdrossel

Abb. 154. Windungsschlußschutz für Generatoren mit Sternschaltung



- 1 Spannungswandler
 - 2 Spannungsrelais
- Abb. 155. Windungsschlußschutz für Doppelgeneratoren

nichtgeerdete Leitung 2 verbunden. Die sekundäre Dreieckwicklung des Spannungswandlers versucht den Sternpunkt des Wandlers stets im Schwerpunkt des Spannungsdreiecks zu halten. Infolgedessen tritt bei offener Dreieckwicklung an dieser eine Spannung auf, die der Abwei-

¹⁾ Kurzgeschlossene Windungen drängen nämlich einen Teil des Flusses aus dem Eisen, so daß die induzierte EMK im betroffenen Wicklungsstrang bei gleichbleibender Erregung kleiner wird.

chung des Generatorsternpunktes vom Schwerpunkt des Spannungsdreiecks entspricht (Leerlaufmessung!) oder bei geschlossener Dreieckwicklung ein Strom, der durch die Sternpunktabweichung und die Widerstände in diesem Kurzschlußkreis bestimmt ist (Kurzschlußmessung!). Um zu verhindern, daß dieses Relais auch im ungestörten Betrieb durch die in der Sternspannung des Generators meist vorhandenen dritten Harmonischen auslösen kann, wird ein Siebkreis (Drosselkette) 4 in den Relaiskreis geschaltet. Diese Schutzeinrichtung erfaßt überdies auch unsymmetrische Belastungen in der Maschine, die z. B. durch Unterbrechung eines Leiters oder Teilleiters entstehen können (Lösen einer Lötverbindung).

Sehr einfach läßt sich der Windungsschlußschutz bei Doppelgeneratoren gestalten (Abb. 155). Man braucht nur die Sternpunkte beider Generatoren über einen Spannungswandler (1) zu verbinden und an diesen ein Spannungsrelais (2) anzuschließen. Im ungestörten Betrieb ist die Verbindung stromlos und mithin auch das Spannungsrelais. Bei Windungsschluß an einem Generator-Wicklungsstrang wird in diesem die Sternspannung kleiner, so daß ein Ausgleichsstrom über beide Generatoren in der durch Pfeile angedeuteten Weise zustande kommt, der das Windungsschlußrelais 2 zum Auslösen bringt.

Für Generatoren mit Dreieckschaltung sowie mit Doppelwicklungen sind ebenfalls Windungsschluß-Schutzeinrichtungen entwickelt worden, die im wesentlichen auf einem Vergleich der Ströme im Generator beruhen¹⁾.

Bei Generatoren mit höchstens zwei Stäben je Nut (größere Einheiten!) dürften reine Windungsschlüsse im Nutenbereich kaum auftreten. An den Wickelköpfen ist eine solche Möglichkeit ebenfalls unwahrscheinlich. Leichter können dagegen reine Windungsschlüsse bei Generatoren mit vielen Windungen je Wicklung (bei kleineren Maschineneinheiten!) auftreten, insbesondere, wenn die Betriebsspannung der Maschinen hoch ist (etwa 10 kV). Die Notwendigkeit eines Windungsschlußschutzes kann demnach von Fall zu Fall anders beurteilt werden. Wichtig ist, daß der Schutz empfindlich und sorgfältig eingestellt wird, damit er auch bei kleiner Anzahl überbrückter Windungen noch sicher anspricht, bei anderen Störungen bzw. Unsymmetrien aber nicht auslöst.

¹⁾ Vgl. M. Schleicher, Die moderne Selektivschutztechnik, J. Springer, 1936, S. 307.

4. Erdschluß- und Windungsschlußschutz für den Läufer

Auch im Läufer eines Generators können sich durch Isolationsschäden zwischen Erregerwicklung und Eisen Erdschlüsse ausbilden. Der einfache Erdschluß ist hier für den Betrieb des Generators an und für sich unbedenklich. Entsteht aber im Erregerkreis noch ein zweiter Erdschluß, so wird ein Teil der Erregerwicklungen kurz geschlossen und damit ein Windungsschluß gebildet. Die Folge ist, daß die Flüsse in den einzelnen Polen verschieden groß werden und am Läufer einseitige radiale Kräfte auftreten, die zu gefährlichen Vibrationen der Maschine führen. Ein Erdschluß im Läufer kann daher gefährlich werden und muß zur Behebung zum mindesten gemeldet werden.

Abb. 156a zeigt eine Erdschlußmeldeeinrichtung, bei der eine Wechselspannung an den Erregerkreis 1 des Generators über einen Spannungswand-

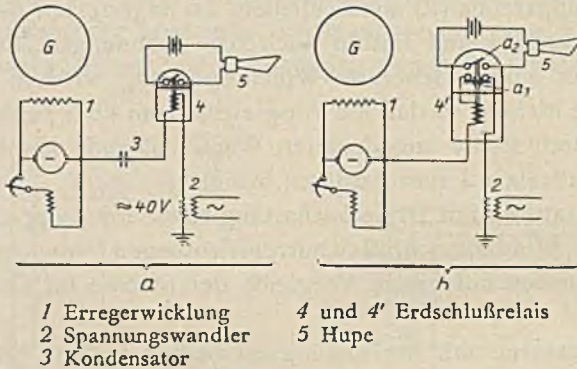


Abb. 156. Erdschlußschutz für den Läufer eines Generators

wandler 2 und einen Kondensator 3 angeschlossen ist. Im störungsfreien Betrieb vermag über den Kondensator nur ein ganz schwacher Strom zu fließen, so daß das Erdschlußrelais 4 unerregt bleibt. Tritt jedoch im Läufer ein Erdschluß auf, so kann über die Kapazität des Kondensators ein größerer Strom fließen, der sich über die Fehlerstelle und Erde schließt. Das Relais 4 spricht dadurch an und betätigt die Hupe 5.

In Abb. 156b ist eine Erdschlußüberwachungseinrichtung mit ähnlicher Schaltung dargestellt, bei der der Kondensator durch eine Umschalteneinrichtung im Erdschlußrelais 4' entbehrlich gemacht wird. Im Erdschlußfall spricht das Erdschlußrelais unverzüglich an, öffnet gleich-

zeitig über den Kontakt a_1 den Wechselstromkreis und betätigt durch den Haltekontakt a_2 die Hupe.

Bei der großen Windungszahl der Erregerwicklungen können auch reine Windungsschlüsse im Läufer eines Generators auftreten. Einfach lassen sich solche Windungsschlüsse jedoch nur bei Doppelgeneratoren erfassen, vergleiche z. B. 157a. Die beiden Generatoren haben im

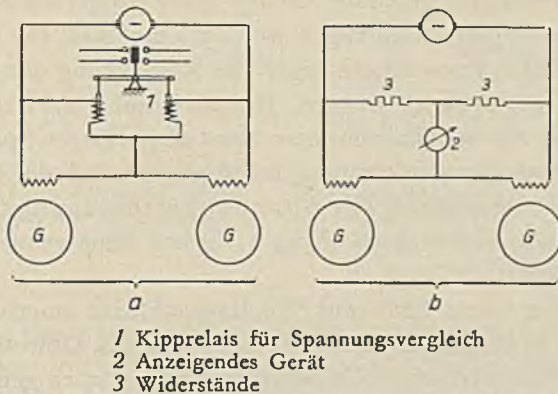


Abb. 157. Windungsschlußschutz für die Läufer von Doppelgeneratoren

störungsfreien Betrieb an den Schleifringen der Läufer gleich große Spannungen, so daß das Spannungsvergleichs-Kipprelais 1 in seiner Mittelstellung (Ruhestellung) bleibt. Sinkt die Spannung an den Schleifringen eines Läufers infolge Windungsschluß ab, so kippt der Waagebalken des Relais nach der Seite des ungestörten Generators und betätigt über seine Kontaktanordnung weitere Einrichtungen (Hupe oder Schalter). An Stelle des Kipprelais kann auch ein Anzeigergerät (2) gemäß der Schaltung nach Abb. 157b angewendet werden.

5. Überlastungsschutz, Spannungssteigerungsschutz und Brandschutz

Die Generatoren werden, wie bereits auf Seite 218 besprochen, im Gegensatz zu den Motoren ohne Überlastungsschutz im eigentlichen Sinne betrieben. Man bedient sich hier nur der Angaben der elektrischen Meßgeräte oder eines Wärmemeßgerätes, das im Kühlmittel der Maschinen angeordnet ist (z. B. eines Kontaktthermometers im Abluftraum).

Generatoren weisen bei plötzlicher Entlastung meist einen erheblichen Spannungsanstieg an den Klemmen auf, der etwa dem Betrag

des Spannungsabfalles der fortgefallenen Belastung entspricht. Die darauf folgende Drehzahlerhöhung der Maschinen bewirkt vorübergehend eine weitere Spannungssteigerung, denn die Regler der Antriebsmaschinen treten nicht sofort in Tätigkeit. Bei Wasserkraftmaschinen kann die Drehzahlerhöhung z. B. Werte bis zu 30% über der Nennzahl erreichen. Während in Dampfkraftanlagen der durch Entlastung und Drehzahlerhöhung bedingte Spannungsanstieg noch einigermaßen durch die Spannungsschnellregler aufgefangen werden kann, muß bei Wasserkraftmaschinen ein besonderer Schutz gegen die Auswirkung des hohen Spannungsanstieges angewendet werden. Hierzu benutzt man in der Regel Spannungsrelais, die bei Überschreiten eines einstellbaren Spannungswertes die Feldschwächungseinrichtung betätigen, so daß die Spannung in kurzer Zeit zusammenbricht. Der Spannungssteigerungsschutz muß so beschaffen sein, daß er auch bis zu 1,5facher Nennfrequenz noch einwandfrei arbeitet¹⁾.

Kurzschlüsse sowie Erd- und Windungsschlüsse innerhalb der Maschinen können in diesen gefährliche Brände auslösen. Obwohl der Brandumfang durch eine wirkungsvolle Schnellentregung stark gemildert wird, ist die Benutzung einer zusätzlichen Brandlöschung durch Einblasen inaktiver Gase (z. B. Kohlensäure) in den Lüftungskreis von Vorteil. Bei Generatoren mit Kreislaufkühlung läßt man z. B. durch den Längs-Stromvergleichsschutz Kohlensäure aus Stahlflaschen in den Luftkreislauf zur Erstickung des Brandes ausströmen. Die Ventile der CO₂-Stahlflaschen können auch von einem Rauchmelder gesteuert werden. Sie werden vielfach aber auch von Hand betätigt.

6. Schutz durch Schnellentregung

Das rasche Abtrennen eines mit Kurz-, Erd- oder Windungsschluß behafteten Generators vom Netz ist allein nicht ausreichend, um den Schadenumfang an den Wicklungen und am Eisen wirksam zu begrenzen. Es muß vielmehr gleichzeitig, und zwar so schnell wie möglich, auch die Erregung unterdrückt werden, weil sonst die Fehlerstelle beim „Auslaufen“ der Maschine infolge der noch hohen Spannung unzulässig lang von einem erheblichen Strom durchflossen wird, der größere Zerstörungen anrichtet. Die Entregung erfolgt daher im allgemeinen so, daß im Erregerkreis in geeigneter Schaltung Wirkwiderstände zugeschaltet

¹⁾ Vgl. auch E. Bopp, Siemens-Z. 16 (1936) S. 408; F. Fröhlich, AEG-Mitt. (1939) S. 177.

werden, die die aufgespeicherte Feldenergie vernichten und gleichzeitig den Erregerstrom stark vermindern oder sogar ganz aufheben.

Abb. 158 zeigt eine Einrichtung, bei der im Falle der Entregung in den Erregerkreis des Generators und in den Nebenschluß der Erregermaschine je ein Wirkwiderstand eingeschaltet wird. Diese Entregungseinrichtung läßt sich in ihrer Wirksamkeit noch weiter steigern, wenn an-

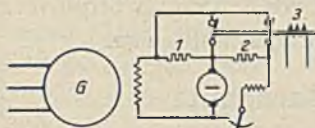


Abb. 158. Entregungseinrichtung (Feldschwächung durch Zuschalten der Widerstände 1 und 2).

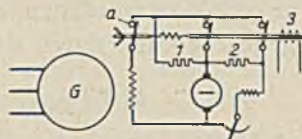


Abb. 159. Entregungseinrichtung (Feldschwächung durch Zuschalten der Widerstände 1 und 2 und anschließendes Öffnen des Haupterregerkreises).

schließend an die Freigabe der Wirkwiderstände 1 und 2 der Erregerkreis des Generators durch einen Zusatzkontakt (*a*) am Feldschwächungs-Selbstschalter 3 geöffnet und somit stromlos gemacht wird (Abb. 159). Der Kontakt *a* unterbricht dabei den verminderten Erregerstrom, der im wesentlichen nur noch von der Remanenzspannung der Erregermaschine herrührt.

In Abb. 160 ist die Schaltung eines anderen Entregungsverfahrens (Schwingungsentregung) dargestellt, bei der im Falle der Entregung im Erregerkreis des Generators ebenfalls ein Wirkwiderstand freigegeben wird. Bei diesem Verfahren wird der Erregerstrom des Generators durch den Widerstand 1 gemindert und durch selbsttätige Umpolung der Erregermaschine in kürzester Zeit ganz zum Verschwinden gebracht¹⁾. Gleichzeitig hebt sich auch die Remanenz der Erregermaschine auf.

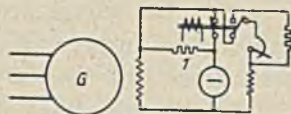


Abb. 160. Entregungseinrichtung (Schwingungsentregung). Entregung durch Zuschalten des Widerstandes 1 und durch selbsttätiges Umpolen der Erregermaschine.

Die Entregung eines Generators läßt man steuern durch den Längsstromvergleichsschutz (Differentialschutz), den Windungsschlußschutz, wenn ein solcher vorhanden ist, und schließlich durch den Erdschluß-

¹⁾ Vgl. auch M. Schleicher, Die moderne Selektivschutztechnik, J. Springer, Berlin 1936, S. 316.

schutz, sofern er auf die Auslösung und nicht auf die Meldung arbeitet. Überstromzeitrelais und Spannungssteigerungsrelais betätigen gewöhnlich nur den Leistungsschalter; das Schwächen der Erregung des Generators auf das betriebsübliche Maß wird dabei vom Spannungsschnellregler ausgeführt. Nur bei Wasserkraftmaschinen läßt man die Spannungssteigerungsrelais auch auf die Entregung arbeiten (siehe Seite 234). Die Brandlöschung (z. B. mit Kohlensäure) braucht nur bei Kurzschlüssen im Generator ausgelöst zu werden, und zwar durch den Längs-Stromvergleichsschutz; gegebenenfalls durch den Windungsschlußschutz.

C. Transformatorschutz

Bei Transformatoren können im wesentlichen die gleichen inneren Fehler wie bei Generatoren auftreten: Kurzschluß, Erdschluß und Windungsschluß. Außerdem werden Transformatoren ebenfalls durch langandauernde Überlastung sowie durch Eisenbrand gefährdet. Schließlich bedeutet für Transformatoren das Versagen der Kühleinrichtung auch eine gewisse Gefahr, und zwar schon bei Belastung unter Nennstrom.

Transformatoren lassen sich im allgemeinen mit einfacheren Mitteln als Generatoren schützen, was im wesentlichen dadurch bedingt ist, daß sie fast ausschließlich in Ölbehältern eingebaut sind. Bei ölgefüllten Transformatoren kann nämlich auch die sekundäre Wirkung der Fehler (Gasentwicklung, Wärmewirkung) mit gutem Erfolg als Fehlerkriterium herangezogen werden. Dadurch wird ein großer Teil der nur auf elektrischer Grundlage arbeitenden Schutzeinrichtungen zum Erfassen von Fehlern im Innern des Transformators entbehrlich, beispielsweise ein besonderer Erd- und Windungsschlußschutz.

Da die Transformatoren Kupplungsglieder zwischen den Generatoren und dem Netz oder zwischen den einzelnen Netzen darstellen, so muß auch ihr Schutz, ähnlich wie bei den Generatoren (siehe Seite 217), dem allgemeinen Anlagenschutz in bezug auf Selektivität angepaßt sein. Dies gilt im besonderen für denjenigen Teil des Transformatorenschutzes, der zum Erfassen der Kurzschlüsse an den anliegenden Sammelschienen sowie an den davon abgehenden Leitungen bestimmt ist, falls bei diesen die Auslösung ausbleiben sollte. Als Schutzrelais zum Erfassen solcher Kurzschlüsse kommen vorwiegend unabhängige Überstromzeitrelais oder Distanzrelais in Frage, die mit Rücksicht auf die erforderliche Selektivität gegenüber den benachbarten Anlageteilen gewöhnlich eine verhältnismäßig hohe Auslösezeit aufweisen müssen.

Ein solcher Überstromschutz mit der hohen Ansprechstromstärke von etwa 1,2 bis $2 I_n$ und der langen Auslösezeit von etwa 0,5 bis 8 s ist natürlich nicht in der Lage, einen Transformator bei inneren Fehlern vor größeren Zerstörungen zu schützen; diese Aufgabe wird von den noch zu beschreibenden schnellarbeitenden Schutzeinrichtungen viel besser gelöst. Er kann höchstens als Reserveschutz eines Transformators gewertet werden für den Fall, daß die zum Erfassen der kurzschlußartigen Fehler im oder am Transformator vorgesehenen Schutzeinrichtungen aus irgend einem Grunde versagen sollten.

Als Schutz gegen unzulässige Erwärmung eines Transformators infolge Überlastung, Eisenbrand oder infolge einer Störung in der Ölumlaufrückführung benutzt man vorwiegend Kontaktthermometer oder Wärmewächter (siehe Seite 177). Gegen Überlastung werden manchmal auch Wärmerelais oder besondere Überlastrelais¹⁾ (siehe Seite 178) verwendet. Diese Relais lassen sich im Ansprechwert und in der Abschaltzeit der thermischen Beanspruchung der Wicklungen eines Transformators in verhältnismäßig weiten Grenzen anpassen.

Den Hauptschutz eines Transformators bildet jedoch der Gasfang- bzw. Ölströmungsschutz (Buchholz-Schutz) oder der Längsstromvergleichsschutz (Differentialschutz) oder beide zusammen.

Mit Gasfang- bzw. Ölströmungsgeräten (siehe Seite 179) schützt man heute fast alle großen und mittleren Transformatoren, mitunter auch kleine Einheiten. Diese Schutzgeräte sprechen auf alle inneren Fehler eines Transformators an, beispielsweise auf Kurzschluß, Erdschluß, Windungsschluß, Unterbrechung eines Wicklungsstranges, Eisenbrand, und sind dabei ihrer Wirkungsweise entsprechend völlig unabhängig von der Schaltart des Schützlings. Für große und mittlere Transformatoren wählt man die Schutzgeräte meist mit zwei Schwimmern (Klappen), von denen der eine als „Gas-Schwimmer“ nur die Warngeräte (Hupe, Glocke), der andere als „Strömungs-Schwimmer“ dagegen die Leistungsschalter betätigt. Bei kleineren Transformatoren benutzt man gewöhnlich Schutzgeräte mit nur einem Schwimmer und läßt diese entweder auf die Auslösung oder auf die Meldung arbeiten. Ganz große Transformatoren, insbesondere solche mit einer Betriebsspannung von 110 oder 220 kV, werden sogar mit mehreren Gasfang- bzw. Ölströmungsgeräten ausgerüstet. Die Schutzgeräte überwachen hier getrennt die Haupttransforma-

¹⁾ Fr. Parschalk, ETZ 59 (1938) S. 219; R. Bauch, VDE-Fachberichte 3 (1928) S. 128.

torenteile (in den Ölbehältern), die einzelnen Durchführungen und bei Regeltransformatoren schließlich auch die zum Spannungsregler gehörigen Vorwahlschalter, sofern diese in besonderen Behältern untergebracht sind.

Der Gasfang- bzw. Ölströmungsschutz erfaßt die genannten Fehler vielfach schon im Entstehen und kann als der empfindlichste und umfassendste Schutz für Transformatoren angesprochen werden. Seine Wirksamkeit erstreckt sich, wie bereits erwähnt, allerdings nur auf Fehler, die im Innern eines Transformators auftreten. Überschlüge an den Außenklemmen des Transformators sowie Fehler an den Zuleitungen, gerechnet bis zu den benachbarten Sammelschienen, erfaßt er nicht. Für solche Fehler muß ein Längs-Stromvergleichsschutz vorgesehen werden, der übrigens auch auf kurzschlußartige Vorgänge im Transformator anspricht und deren Abschaltung miteinleitet. Beide Schutzarten schließen sich weder gegenseitig aus, noch können sie sich ersetzen. Sie ergänzen sich vielmehr, indem sie den Schutzbereich und mithin die Gesamtwirkung erweitern. Große und wertvolle Transformatoren werden daher meist mit beiden Schutzarten ausgerüstet.

Die Auslegung des Längs-Stromvergleichsschutzes für Transformatoren ist im wesentlichen bedingt durch:

- a) Die Schaltart des Transformators (Stern-Sternschaltung, Stern-Dreieckschaltung oder dergleichen),
- b) die Ausführungsform des Transformators (Zwei-, Drei- oder Mehrwicklungstransformatoren),
- c) die Betriebsform des Transformators (selbständige Transformatoren oder solche, die mit Generatoren eine Betriebseinheit bilden),
- d) die Behandlung des Transformator-Sternpunktes (freier Sternpunkt, über Löschspule geerdeter Sternpunkt oder kurz geerdeter Sternpunkt).

Diese Umstände beeinflussen in starkem Maße die Ausführung und den Umfang der Schaltungen.

Da die Längs-Stromvergleichsrelais die Ströme auf der Ober- und Unterspannungsseite eines Transformators der Größe nach vergleichen, so muß in erster Linie dafür gesorgt werden, daß ihnen schon im störungsfreien Betrieb keine allzu großen Falschströme zugeführt werden, wie sie durch Ungleichheit der Übersetzung der in den gleichen Leitern eingebauten Stromwandler, durch große Phasenverschiebung der Ströme in-

folge der inneren Schaltung der Transformatoren (z. B. bei der Stern-Dreieckschaltung) oder durch Regelung der Transformatoren zustande kommen können. Dieser Bedingung muß durch geeignete Schaltung der Stromwandler auf der Sekundärseite und gegebenenfalls auch durch Hinzunahme eines Hilfsstromwandlers (siehe Seite 220) Rechnung getragen werden. Schließlich benutzt man zum Schutze von Transformatoren heute nur noch stabilisierte Längs-Stromvergleichsrelais¹⁾, die an und für sich gegen Falschströme bis zu einem gewissen Grade unempfindlich sind.

In Abb. 161 ist z. B. die Schaltung eines Längs-Stromvergleichsschutzes für einen Drehstromtransformator mit Stern-Dreieckschaltung

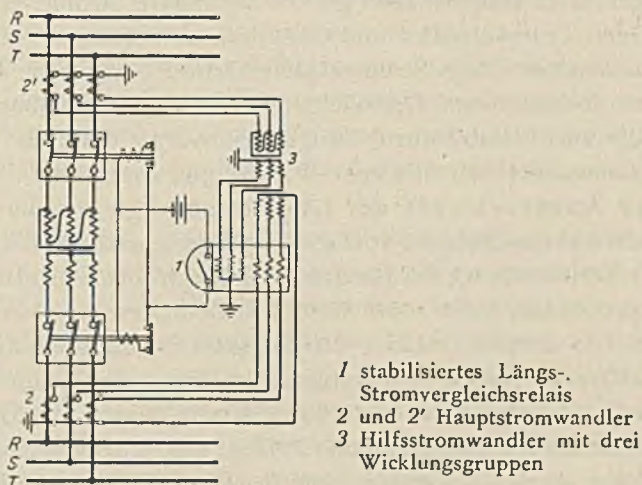


Abb. 161. Stabilisierter Längs-Stromvergleichsschutz für einen Transformator in Stern-dreieckschaltung

dargestellt. Der Hilfsstromwandler 3 hat die Aufgabe, die Ströme auf der Sekundärseite der Stromwandler 2 und 2' im störungsfreien Betrieb auf magnetischem Wege nach Größe und Phase auszugleichen (siehe Seite 220), so daß über seine dritte Wicklungsgruppe nach dem Längs-Stromvergleichsrelais 1 praktisch kein Strom gelangt, wenn man vom Leerlaufstrom des Transformators absieht, der 2 bis 10% des Transformator-Nennstromes betragen kann²⁾. Sollten über das Relais dennoch größere Falschströme fließen, beispielsweise bei selbsttätiger Regelung

¹⁾ Siehe Fußnote ³⁾ auf Seite 219.

²⁾ Die kleineren Werte gelten für Transformatoren großer Leistung.

des Transformators, so werden diese durch die Stabilisierungseinrichtung im Relais unwirksam gemacht. Eine Falschauslösung des Schutzes bei außenliegenden Kurzschlüssen wird also auch in solchen Fällen verhindert. Die Stromwandler 2 und 2' sind hier im Gegensatz zu Abb. 146 hinter den Schaltern angeordnet, damit die Zuleitungen zum Transformator einschließlich der Leistungsschalter möglichst in ihrer vollen Länge überwacht werden.

Bei Transformatoren mit Stern-Sternschaltung kann unter Umständen auf den Hilfsstromwandler 3 verzichtet werden, beispielsweise wenn die Stromwandler 2 und 2' dem Haupttransformator entsprechende Übersetzungen, d. h. einigermaßen gleiche sekundäre Ströme, aufweisen.

Bilden Transformator und Generator eine Betriebseinheit, so genügt ein gemeinsamer Längs-Stromvergleichsschutz (vergleiche Abb. 146).

Zum Schutze von Dreiwicklungstransformatoren benutzt man gewöhnlich zwei stabilisierte Längs-Stromvergleichsrelais und legt den Hilfsstromwandler oft mit vier Wicklungsgruppen aus.

Der Ansprechwert des Längs-Stromvergleichsschutzes wird mit Rücksicht auf den dauernd vorhandenen Leerlaufstrom (Magnetisierungsstrom + Verluststrom), der für den Schutz auch einen Ausgleichsstrom darstellt, gewöhnlich nicht unter 30% des Transformator-Nennstromes eingestellt. Die Empfindlichkeit des Schutzes ist dadurch nach unten beschränkt¹⁾, was jedoch bedeutungslos ist, wenn der Transformator auch mit einem Gasfang- bzw. Ölströmungsschutz ausgerüstet ist. Die im örtlichen Schutzbereich auftretenden Fehler, z. B. Kurzschlüsse und Doppelerdschlüsse an den Außenklemmen des Transformators und in den Zuleitungen, erfaßt der Längs-Stromvergleichsschutz auf jeden Fall. Zum Erfassen der möglichen Erdschlüsse in diesem örtlichen Schutzbereich können getrennte Erdschluß-Richtungsrelais in $\cos \varphi$ - oder $\sin \varphi$ -Schaltung eingebaut werden (s. Seite 169).

Wird ein spannungsloser Transformator auf das unter voller Betriebsspannung stehende Netz geschaltet, so kann bei ungünstigem Schaltmoment ein sehr hoher Magnetisierungsstrom entstehen²⁾ und den Schutz zum Auslösen bringen. Um ein solches Falschauslösen des Schutzes zu verhindern, läßt man die Auslösung durch ihn notgedrungen in allen

¹⁾ Erdschlüsse, Windungsschlüsse, Wicklungs-Unterbrechungen kann er daher bei kleinen Betriebsströmen und Eisenbrand im allgemeinen nicht erfassen.

²⁾ Beim Nulldurchgang der Spannung können die Stromstöße Werte erreichen, die in der Größenordnung des Transformator-Nennstromes liegen. Eine große Rolle spielt hierbei auch der Sättigungsgrad des Transformators.

Fällen verzögert betätigen (etwa nach 0,5 bis 1 s). In jüngster Zeit ist es gelungen, den Längs-Stromvergleichsschutz gegen den Magnetisierungsstromstoß unempfindlich zu machen¹⁾, so daß die Leistungsschalter ähnlich wie bei den Generatoren unverzögert ausgelöst werden können. Dieser Umstand erlaubt es, die Auslösezeiten auch der Staffelschutzrelais im Netz niedriger einzustellen.

Daß die Stromwandler des Längs-Stromvergleichsschutzes für die an ihrem Einbauort vorkommenden höchsten Kurzschlußbeanspruchungen ausgelegt sein müssen, ist wohl eine Selbstverständlichkeit. Dabei ist zu beachten, daß der Scheinwiderstand bzw. die Kurzschlußspannung des Transformators für die Größe des Kurzschlußstromes nicht allein maßgebend ist, sondern auch der Schaltzustand der Anlage.

Der in früheren Jahren zum Erfassen von Eisenbränden, Erdschlüssen und Windungsschlüssen in Transformatoren gelegentlich benutzte „Differential-Wattschutz“ ist vom Gasfang- bzw. Ölströmungsschutz restlos verdrängt worden, da dieser die Aufgabe einfacher und besser löst.

Kleinere und kleine Transformatoren, insbesondere solche in unbesetzten Abspannstationen (Übergabestationen, Ortsnetzstationen), versieht man meist mit einem Überstromzeitschutz, beispielsweise mit Überstromzeitrelais, Überstromzeitauslösern, Zeitsicherungen²⁾ oder, falls kein Leistungsschalter vorhanden ist, mit Leistungs-Abschmelzsicherungen. In besonderen Fällen verlangt man, daß derartige Transformatoren mit einem Erwärmungsschutz (Wärmegeräte, Kontaktthermometer) ausgerüstet werden, der entweder den Leistungsschalter oder das Meldegerät (Hupe, Sirene oder Glocke) betätigt. Darüber hinaus werden zuweilen auch Gasfang- bzw. Ölströmungsgeräte oder besondere Ölschauzeichen³⁾ benutzt. In kleinen Ortsnetzstationen der Überlandwerke werden auf der Oberspannungsseite der Transformatoren in der Regel nur Abschmelzsicherungen verwendet.

Die Auswahl der Schutzeinrichtungen für Transformatoren richtet sich nach deren Wichtigkeit und Wertigkeit und wird unter Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit und Sicherheit des Betriebes getroffen.

¹⁾ Vgl. z. B. Fr. Geise, Siemens-Z. 18 (1938) S. 492; F. Jahn, AEG-Mitt. (1940) Heft 7/8.

²⁾ In der sog. Cleveland-Schaltung.

³⁾ Diese anzeigenden Geräte sind im störungsfreien Betrieb voll Öl und lassen bei Luft- oder Gasansammlung in ihnen auf Mängel im Transformator schließen (MEW).

Bei Transformatoren kleiner Leistung, z. B. bei solchen in Ortsnetzstationen, ist der wirtschaftliche Gesichtspunkt meist von ausschlaggebender Bedeutung. Man begnügt sich daher bei ihnen mit einfachen und wenigen Arten von Schutzeinrichtungen. Bei großen oder sehr wichtigen Transformatoren ist die Wahl des Schutzes durch die Forderung höchster Sicherheit bedingt. Einerseits sollen durch eindeutiges und schnelles Erfassen der möglichen Fehler die Zerstörungen tunlichst klein gehalten werden, andererseits sollen alle Falschauslösungen vermieden werden, weil der unnötige Ausfall wichtiger Einheiten stets mit einer starken Beunruhigung des Betriebes verbunden ist. Hier sind also die technischen Erfordernisse den wirtschaftlichen voranzustellen.

D. Sammelschienenschutz

Sammelschienen-Kurzschlüsse treten zwar verhältnismäßig selten auf, haben aber meist längere und umfangreiche Lieferungsunterbrechungen zur Folge. Sie zählen daher zu den unangenehmsten Fehlern in elektrischen Anlagen. Dieser Umstand bedingt einen wirksamen und einfachen Sammelschienenschutz, der die Kurzschlüsse rasch und selektiv abschaltet, um Zerstörungen an den einzelnen Schienen, Isolatoren und angrenzenden Anlageteilen weitestmöglich auszuschließen bzw. auf das Mindestmaß zu beschränken und um eine baldige Wiederinbetriebnahme der Sammelschienen zu ermöglichen. Die Ausführung eines solchen Schutzes ist jedoch infolge der betrieblichen Eigenart der Sammelschienen in den meisten Fällen außerordentlich schwer.

Zum Schutze der Sammelschienen gegen die Auswirkungen von Kurzschlüssen benutzt man derzeit mit mehr oder weniger Erfolg zwei verschiedene Verfahren.

Das erste Verfahren beruht auf dem Vergleich der zu- und abfließenden Ströme eines Sammelschienensystems, deren Summe im störungsfreien Betrieb gleich Null ist, bei Kurzschluß an den Sammelschienen innerhalb des zu schützenden Bereichs dagegen davon abweicht. Dieses Verfahren setzt einen für die Sammelschienen eigenen Vergleichschutz voraus (Längs-Stromvergleichsschutz, Strom-Richtungsvergleichsschutz oder Leistungs-Richtungsvergleichsschutz), der diejenigen Leistungsschalter auslöst, die das mit Kurzschluß behaftete Sammelschienensystem unmittelbar eingrenzen¹⁾. Die ankommenden Leitungen bleiben

¹⁾ Siehe auch M. Schleicher, Die moderne Selektivschutztechnik, J. Springer, Berlin 1936, S. 293—296.

dadurch unter Spannung, was für die Wiederinbetriebnahme eine gewisse Erleichterung darstellt. Da die über ein Sammelschienensystem zusammengeschlossenen Betriebsmittel häufigen Veränderungen ihres Schaltzustandes unterworfen sind, und da die Eingrenzung eines Sammelschienen-Kurzschlusses in vielen Fällen die Abschaltung einer großen Anzahl von Leistungsschaltern erfordert, ergibt sich gewöhnlich ein verwickelter Aufbau der Schutzschaltungen, der dazu noch von vielen Umschaltgeräten und Hilfsleitungen sowie teilweise von Zwischenwandlern abhängig ist.

In Anlagen mit Doppel- oder Mehrfachsammschienen wird der Vergleichsschutz infolge der verschiedenen Möglichkeiten der Zusammenschaltung oder des asynchronen Betriebes besonders umständlich und unübersichtlich, was die Betriebssicherheit des Schutzes beeinträchtigen kann. Dies ist wohl der Hauptgrund, weshalb der Vergleichsschutz bei Sammelschienen nur selten angewendet wird, obwohl er sich durch kurze Auslösezeiten (etwa 0,03 bis 0,1 s) auszeichnet.

Seit einigen Jahren werden zum Schutze der Sammelschienen an Stelle der hier genannten Vergleichsrelais auch Distanzrelais ohne Richtungsentscheid verwendet. Die Auslösezeit dieser liegt zwar um eine Staffelfstufe höher als bei denen der abgehenden Leitungen, sie gestattet dafür jedoch den Schutz auch für Mehrfach-Sammelschienen anzuwenden, ohne daß eine Umschaltung im Strompfad notwendig ist. Sammelschienen mit asynchroner Spannung können durch diese Schaltung ebenfalls selektiv geschützt werden¹⁾.

Das zweite Verfahren setzt keine eigenen Schutzeinrichtungen für die Sammelschienen voraus, sondern benutzt den Staffelschutz des Netzes mit. Hierbei lösen die Schutzrelais der Leitungen und Transformatoren an den nächstliegenden Sammelschienen der gleichen oder der benachbarten Stationen aus. Dies bedeutet kaum einen Nachteil, da die kurzgeschlossenen Sammelschienen doch spannungslos gemacht werden müssen und die Zubringer-Transformatoren und -Leitungen dann in der Regel keinen Strom mehr zu führen brauchen. Dieses Schutzverfahren hat allerdings den Nachteil, daß die Eingrenzung des Kurzschlusses mitunter verhältnismäßig lange dauert (mehrere Sekunden), besonders dann, wenn der Kurzschlußstrom zu den Sammelschienen über eine große Anzahl Leitungen fließt, die womöglich erst nacheinander abgeschaltet

¹⁾ Siehe M. Schleicher, Die moderne Selektivschutztechnik, J. Springer, Berlin 1936, S. 296, Abb. 74.

werden. Die Gesamtschaltzeit läßt sich allerdings kürzen durch Unterteilen der Sammelschienen, damit auf die einzelnen Systeme nur wenige Leitungen kommen¹⁾, oder durch Sonderschaltungen der gerichteten Schutzrelais (Distanzrelais, gerichtete Überstromzeitrelais), damit die Relais in der gleichen Station auslösen²⁾. Obwohl die Leitungsrelais mit gestaffelter Selektivität bei Sammelschienen-Kurzschlüssen lange Auslösezeiten aufweisen, bilden gerade sie den für Sammelschienen fast ausschließlich angewendeten Schutz. Die Ursache hierzu liegt darin, daß ein besonderer Sammelschienenschutz einschließlich der Wartung fortfällt.

Ein besonderer Sammelschienenschutz ist im allgemeinen dann unentbehrlich, wenn die Sammelschienen sehr viele Zuführungsleitungen aufweisen und dabei keine Auftrennung zulassen und darüber hinaus der Maschineneinsatz bei Schwachlastbetrieb sehr klein sein kann.

E. Netzschutz (Schutz von Freileitungen und Kabeln)

Die Übertragungsleitungen, insbesondere die Freileitungen, sind infolge ihrer weiten Ausdehnung zwar störungsanfälliger als Generatoren und Transformatoren, die Beschädigungen auf ihnen lassen sich jedoch im allgemeinen rascher und mit geringeren Mitteln beheben als bei diesen. Außerdem ist bei Verbundbetrieb und weitgehender Vermaschung der Netze die Auswirkung der Fehler für den Betrieb meist eine geringere. Trotzdem ist ein zuverlässig arbeitender Leitungsschutz unerlässlich, da ohne einen solchen die Aufrechterhaltung der Energieübertragung bzw. die Beherrschung des Energieflusses überhaupt nicht durchzuführen ist.

Freileitungsnetze sind wiederum störungsanfälliger als Kabelnetze, was im wesentlichen durch atmosphärische Einflüsse und größere räumliche Ausdehnung bedingt ist. Außerdem sind bei Freileitungen die Kurz- und Doppelerdschlüsse gewöhnlich mit längeren Lichtbogen verbunden, die leicht wandern und dabei nicht selten auch die Leiter wechseln (Kurzschlußwechsel)³⁾. Dies trifft besonders für Kurzschlüsse in Freileitungsnetzen mit hoher Betriebsspannung (über 50 kV) zu, weil bei diesen die Kurzschlußströme gewöhnlich unerheblich und die Leiterabstände dagegen verhältnismäßig groß sind (vgl. auch Seite 143). Bei

¹⁾ Vgl. M. Walter, Kurzschlußströme in Drehstromnetzen, 2. Auflage, R. Oldenbourg, München 1938, S. 107 und 108.

²⁾ Vgl. z. B. Fr. Parschalk, BBC-Nachr. 19 (1932) S. 107.

³⁾ Wechselkurzschlüsse werden mit „Abfrageeinrichtungen“ der Distanzrelais selektiv erfaßt.

Doppelleitungen können überdies die Lichtbogen sogar von einem Leitungsstrang nach dem anderen Strang übergreifen und dadurch „Doppelleitungs-Kurzschlüsse“ hervorrufen¹⁾, die womöglich noch Erdverbindung über die Eisenmaste oder Erdseile aufweisen. Von den Kurzschlußarten herrschen im übrigen in Freileitungsnetzen die zweipoligen, in den Kabelnetzen dagegen die dreipoligen Kurzschlüsse vor.

Als Hauptfehler, die an Freileitungen und Kabeln auftreten können, gelten Kurzschlüsse, Doppelerdschlüsse und Erdschlüsse. Eine gewisse Gefährdung für den Betrieb der Netze bedeuten auch Schwebungserscheinungen, Leiterbrüche und Überlastungen (Kabel!).

Die mit Kurzschluß oder Doppelerdschluß behafteten Leitungsabschnitte müssen so rasch wie möglich von den gesunden Netzteilen abgetrennt werden²⁾, damit nicht nur der Schadenumfang und die Dauer der Spannungsabsenkung klein bleiben, sondern auch das Auftreten von Schwebungsvorgängen weitgehend verhindert wird. Die gestörten Leitungsstrecken sind innerhalb kürzester Frist wieder in betriebsfähigen Zustand zu bringen, damit die Fortleitung der Energie durch die Ausschaltung nicht unnötig lange behindert wird. Eine rasche Ermittlung der Fehlerstelle ist hierzu erforderlich (s. Seite 283). — Erdschlüsse läßt man im allgemeinen nur selektiv anzeigen (s. Seite 166), da ihre schädlichen Auswirkungen zunächst durch die Erdschluß-Lösch-einrichtungen wirksam bekämpft werden. Die vom Erdschluß betroffene Leitungsstrecke wird von der Betriebsmannschaft gewöhnlich erst dann abgeschaltet, wenn diese Leitung durch Umschaltungen im Netz für die Energieübertragung entbehrlich gemacht ist³⁾. — Leiterbrüche können je nach der Netzgestalt größere unsymmetrische Belastungen der Leitungen hervorrufen und gegebenenfalls auch Lebewesen gefährden (siehe Seite 59), was ein baldiges Abschalten des betroffenen Leitungsabschnittes erforderlich macht. — In unbesetzten Stationen von Kabelnetzen sollte der Ansprechstrom der Schutzrelais (Distanzrelais, Überstromzeitrelais) auf Grund des Übertragungsvermögens der einzelnen Kabel festgesetzt, d. h. der thermischen Belastbarkeit angepaßt sein, damit beim Ausfall eines Kabels oder durch sonstige Umschaltungen im Netz die im Betrieb verbleibenden Kabel infolge Überlastung nicht beeinträch-

¹⁾ Doppelleitungsfehler werden vielfach auch von vornherein durch Blitz-einschläge und Nebelüberschläge eingeleitet.

²⁾ Bei Doppelerdschluß wird in der Regel nur ein Leitungsabschnitt abgeschaltet und damit der Kurzschlußzustand aufgehoben.

³⁾ Siehe auch VDE 0105, § 5i.

tigt werden oder gar ausbrennen. Eine bessere Lösung der Aufgabe ergibt sich in solchen Fällen dadurch, daß parallel zu den genannten Schutzrelais Wärmerelais geschaltet werden, weil ihre Auslösezeit bei Überlastungen wesentlich länger ist und sich überdies dem Überlastungsvermögen der Kabel selbsttätig anpaßt. Bei Freileitungen werden die Anregeglieder der Schutzrelais oft so eingestellt, daß eine Abschaltung der überlasteten Leitung erst bei Strömen über dem zweifachen Nennstrom erfolgt (Doppelleitungen!).

1. Kurzschlußschutz

Das selektive Abtrennen der mit Kurzschluß oder Doppelerdschluß behafteten Leitungsabschnitte kann entweder mit Schutzeinrichtungen nach dem Staffelverfahren oder mit Schutzeinrichtungen nach dem Vergleichsverfahren erfolgen. Die einzelnen Schutzeinrichtungen sind im Kapitel IV bereits beschrieben worden. Hier brauchen daher in der Hauptsache nur noch die Gesichtspunkte für deren Auswahl und Anwendung erörtert zu werden.

a) Staffelverfahren

Die in den Abschnitten C und E des Kapitels IV beschriebenen Schutzsysteme arbeiten sämtlich mit einer Zeitstaffelung. Diese kann fest eingestellt sein (unabhängige Überstromzeitrelais), stromabhängig sein (abhängige oder begrenzt abhängige Überstromzeitrelais), oder aber von der Entfernung zwischen der Fehlerstelle und dem Relais abhängig sein (Distanzrelais). Die genannten Schutzrelais arbeiten mit Rücksicht auf die notwendige Zeitstaffelung gewöhnlich mit einer verhältnismäßig langen Auslösezeit¹⁾. Sie haben aber den Vorteil, daß sie die Sammelschienen der einzelnen Stationen in das Staffelsystem miteinbeziehen und selektiv mitschützen und darüber hinaus eine Reserveauslösung gewähren, wenn bei einem Leitungsabschnitt aus irgendeinem Grunde die erforderliche Abschaltung ausbleiben sollte (s. Seite 111).

Für strahlenförmige Netze sowie für Stichleitungen überhaupt genügen im allgemeinen unabhängige Überstromzeitrelais²⁾. In weniger wichtigen Netzen oder Netzteilen benutzt man an Stelle dieser Relais aus Sparsamkeitsgründen auch Primärauslöser bzw. Primärrelais

¹⁾ Für Schnelldistanzrelais trifft diese Aussage weniger zu.

²⁾ In Höchstspannungsnetzen wird man jedoch von solchen Relais kaum Gebrauch machen.

mit gleicher Überstromzeitcharakteristik. Abb. 162 zeigt ein Strahlennetz, in dem die unabhängigen Überstromzeitrelais mit den fest eingestellten Auslösezeiten für die selektive Wirkung durch viereckige Kästchen angedeutet sind. Im Ausland werden zum gleichen Zweck anstatt der unabhängigen Überstromzeitrelais vielfach noch abhängige bzw. begrenzt abhängige Überstromzeitrelais oder Primärauslöser bzw. Primärrelais mit gleichen Zeitkennlinien verwendet.

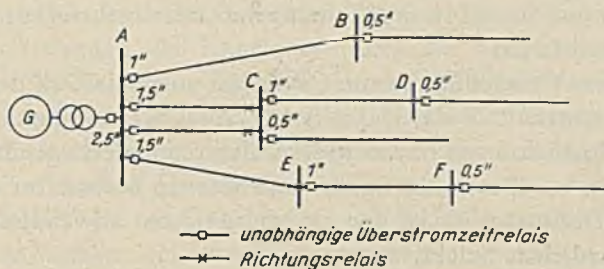


Abb. 162. Schutzeinrichtungen für ein Strahlennetz.

Kommen in strahlenförmig betriebenen Netzen neben den Stichleitungen auch parallele Leitungen vor, so müssen an denjenigen Schaltern der parallelen Leitungen, bei denen sich die Leistungsrichtung bei kurzschlußartigen Vorgängen umkehren kann, Leistungs-Richtungsrelais mit oder ohne Zeitverzögerung benutzt werden (Abb. 162 sowie Abb. 68). — Einseitig gespeiste Ringnetze lassen sich in einfachen Fällen ebenfalls mit unabhängigen Überstromzeitrelais schützen. Nur müssen hier in bestimmten Stationen neben den Überstromzeitrelais noch Leistungs-Richtungsrelais vorgesehen werden, damit die sogenannte gegenläufige Zeitstaffelung ermöglicht wird (vgl. Abb. 69 und 70). — In Strahlennetzen, bei denen die Spannung im Kraftwerk oder an der Übergabestation bei Kurzschluß starr bleibt, kann die Auslösezeit der unabhängigen Überstromzeitrelais für eine bestimmte Länge der einzelnen Leitungsabschnitte durch Hinzunahme eines weiteren Überstromzeitrelais mit größeren Ansprechwerten und kleineren Ablaufzeiten stark gekürzt werden, so daß der Schutz (Stufen-Überstromzeitschutz!) innerhalb der einzelnen Leitungsabschnitte mit stufenförmiger Zeitkennlinie arbeitet (Abb. 74 und 75).

Der Überstromzeitschutz für Kabel und Freileitungen wird in Netzen mit nicht kurzgeerdetem Sternpunkt gewöhnlich zweipolig ausgeführt.

In Netzen mit kurzgeerdetem Sternpunkt ist dagegen stets ein dreipoliger Schutz erforderlich.

Der Schutz mit unabhängigen Überstromzeitrelais ist einfach im Aufbau, übersichtlich in der Planung und verhältnismäßig billig. Er hat aber den Nachteil, daß die Auslösezeiten bei vielen hintereinandergeschalteten Leitungsabschnitten gerade an den Stellen mit der größten Kurzschlußgefährdung in der Nähe des Einspeisepunktes lang werden, und daß er in verbundgespeisten und vermaschten Netzen sowie für parallele Leitungen und Ringleitungen mit zwei- oder mehrfacher Einspeisung nicht anwendbar ist.

Für diese Netzgebilde benutzt man fast ausschließlich den Distanzschutz (s. Abschnitt E des Kapitels IV). Auch wendet man den Distanzschutz bei Stickleitungen mit mehreren hintereinanderliegenden Abschnitten an, wenn bei diesen auf kurze Auslösezeiten besonderer Wert gelegt wird. Der Distanzschutz ist der am vielseitigsten anwendbare und auch der gebräuchlichste Selektivschutz.

In einem galvanisch verbundenen Netz ist es ratsam, Distanzrelais nur der gleichen Art (Schein-, Blind- oder Wirkwiderstandszeitrelais) und derselben Ausführungsform zu verwenden. Dies gilt besonders für Distanzrelais mit stetigen Zeitkennlinien; bei Distanzrelais mit stufenförmigen oder gemischten Zeitkennlinien ist eine Angleichung der Auslösezeiten mit Hilfe der festen Zeiteinstellung leichter zu erreichen. Außerdem ist eine einheitliche Doppelerdschlußfassung erforderlich.

Sind zwei oder mehrere Netze über Transformatoren gekuppelt, so können die Distanzrelais in den einzelnen, so getrennten Netzen untereinander verschieden sein, weil die Transformatoren für die Relais meist verhältnismäßig hohe Widerstände darstellen und somit eine natürliche Grenze zwischen den Netzen bilden¹⁾. In dem einen oder anderen Netz sind dabei sogar auch andere Schutzrelaisarten (Überstromzeitrelais, Vergleichsrelais) zulässig, wichtig ist nur, daß die Selektivität bei Kurz- und Doppelerdschlüssen gegenseitig gewahrt wird. Die Kupplungstransformatoren werden dabei in der Regel mit Gasfang- und Längs-Stromvergleichsschutz ausgerüstet und überdies entweder mit unabhängigen Überstromzeitrelais oder Distanzrelais versehen (s. auch Seite 236).

Die Ansprüche an den Distanzschutz sind in bezug auf Schutzumfang und Vielseitigkeit bei Freileitungsnetzen mit einer Betriebsspan-

¹⁾ So sprechen z. B. die Distanzrelais in den 110 kV-Netzen bei Kurz- und Doppelerdschlüssen in 15 kV-Netzen meist gar nicht an.

nung über 50 kV in der Regel besonders groß. Der Distanzschutz muß hier mit Rücksicht auf den möglichen Schwachlastbetrieb zunächst mit Unterimpedanz-Anreggliedern versehen sein (s. Seite 97). Er muß ferner für eine eindeutige Doppelerdschlußfassung ausgelegt sein (s. Seite 140) und überhaupt möglichst kurze Auslösezeiten aufweisen¹⁾, um dadurch auch Störungseinflüsse der Lichtbogenwiderstände in der Widerstandsmessung zu begrenzen²⁾ und um dem Kurzschlußwechsel rechtzeitig vorzubeugen. Schließlich muß die Schaltung des Distanzschutzes so ausgelegt sein, daß auch „Doppelleitungs-Kurzschlüsse“ (s. Seite 245) einigermaßen richtig erfaßt werden. Bei Kabelnetzen sind die Verhältnisse einfacher, denn Kurzschlußwechsel und „Doppelleitungs-Kurzschlüsse“ treten bei ihnen überhaupt nicht auf, es sei denn in der Nähe der Sammelschienen.

Obwohl durch kurze Auslösezeiten auch die Pendelgefahr zwischen den Kraftwerken gemindert wird, ist es in manchen Verbundnetzen dennoch erforderlich, die Distanzrelais mit Pendelsperreinrichtungen gegen wahlloses Auslösen bei Schwebungsvorgängen zu versehen (s. Seite 174) und gegebenenfalls den Distanzrelais an gewissen Stellen des Netzes auch Auftrennrelais zuzuordnen (s. Seite 176). Bei Stickleitungen sowie bei allen Netzteilen mit nur einer Einspeisung sind Pendelsperr- und Netzauftrennrelais selbstverständlich überflüssig.

Um den hohen Forderungen in bezug auf Selektivität und sehr kurze Auslösezeiten leichter nachkommen zu können, werden die Distanzschutzeinrichtungen für Netze über 50 kV-Betriebsspannung vielfach auch zwei- oder dreisystemig ausgeführt, obwohl hierdurch der Aufwand gegenüber dem einssystemigen Schutz größer wird (siehe Seite 134).

Für Netze mit Betriebsspannungen unter 50 kV genügen im allgemeinen Distanzrelais mit Überstromanregung, mit einfacherer Doppelerdschlußfassung und unter Umständen auch mit weniger kurzen Auslösezeiten. Der „Kurzschlußwechsel“ braucht hier nicht besonders berücksichtigt zu werden, auch fallen die Pendel-Sperr- und Auftrenneinrichtungen meist fort. Bei manchen Kabelnetzen und Mittelspannungs-Freileitungsnetzen³⁾ wird der Einfachheit halber sogar auf eine besondere Doppelerdschlußfassung verzichtet. Die Doppelerdschlüsse werden

1) Gegebenenfalls unter Anwendung von Hochfrequenzkanälen für Vergleichs- oder Mitnahmeschaltungen (s. Seite 160).

2) Dem Ausweiten des Lichtbogens wird durch kurze Auslösezeiten zuvorgekommen. Übrigens kann der Lichtbogenwiderstand durch eine Blindwiderstandsmessung in weitem Maße eliminiert werden.

3) Z. B. bei Freileitungsnetzen mit Holzmasten und ohne Erdseile.

dann von den Distanzrelais mit etwas längerer Auslösezeit ähnlich wie Kurzschlüsse behandelt.

Die Grundlage für die Planung von Distanzschutzanlagen bildet gewöhnlich ein Netzplan¹⁾, in dem sämtliche Stationen und Leitungen des

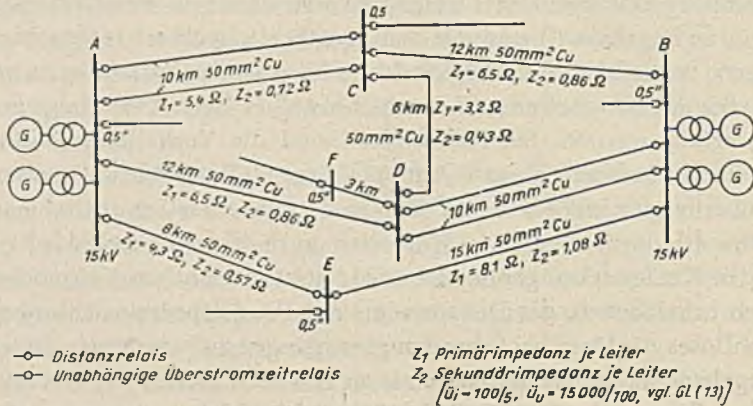


Abb. 163. Schutzanlagen für ein vermaschtes Netz.

Netzes eingetragen sind (vgl. Abb. 163). Darüber hinaus sind im wesentlichen folgende Angaben erforderlich, die am besten im Netzplan eingetragen werden:

1. Betriebsspannung des Netzes.
2. Frequenz des Netzes.
3. Längen der zu schützenden Leitungsstrecken (Leitungsabschnitten).
4. Leiterwerkstoff.
5. Leiterquerschnitt.
6. Anzahl der Kraftwerke und ihre Nennleistung.
7. Geringster, höchster und üblicher Maschineneinsatz in den einzelnen Kraftwerken.
8. Sind die Generatoren mit selbsttätigen Spannungsreglern ausgerüstet?
9. Werden die Generatoren durch selbsttätige Stromregler zur Fergrenzung des Kurzschlußstromes gesteuert?
10. Strom- und Zeiteinstellung der Überstromzeitrelais an d u Generatorschaltern.

¹⁾ Vgl. auch H. Titze, ETZ 61 (1940) S. 471.

11. Anzahl der Transformatoren zwischen den Generatoren und dem mit Distanzschutz auszurüstenden Netz.
12. Nennleistung dieser Transformatoren und ihre prozentuale Kurzschlußspannung.
13. Strom- und Zeiteinstellung der Überstromzeitrelais an den Transformatorenschaltern.
14. Anzahl der vorhandenen Stromwandler, Einbauort, Ausführungsform, Nennleistung, Nennübersetzung und Nenn-Überstromziffer.
15. Anzahl der vorhandenen Spannungswandler, Einbauort, Ausführungsform, Nennleistung und Nennübersetzung.
16. Anzahl der Hochspannungsschalter in den einzelnen Stationen.
17. Ist der Sternpunkt des Netzes isoliert oder kurz geerdet?
18. Ausführungsart der Kabel: ob Drei- oder Einleiterkabel, ob Gürtelkabel oder Strahlungsschutzkabel?

An Hand der Angaben über die Beschaffenheit der Leiter und Leitungen können die Primärwiderstände (R_1, X_1, Z_1) der einzelnen Leitungsstrecken ermittelt werden.

Den Wirkwiderstand einer Leitungstrecke je Leiter errechnet man aus der Beziehung

$$R_1 = \frac{1000 \cdot l}{\kappa \cdot Q} \dots \dots \dots (20)$$

Darin bedeuten:

l die Länge der Leitungstrecke in km

Q den Querschnitt des Leiters in mm^2

κ die elektrische Leitfähigkeit des Leiterwerkstoffes in $\frac{\text{m}}{\Omega \cdot \text{mm}^2}$

Die Leitfähigkeit ist:

- | | | | |
|-----------------------|-----------------|---|-----------|
| α) bei Freileitungen: | | | |
| für Kupfer | $\kappa = 56$ | } | bei 20° C |
| für Aluminium | $\kappa = 34,5$ | | |
| für Aldrey | $\kappa = 30$ | | |
| β) bei Kabeln: | | | |
| für Kupfer | $\kappa = 51$ | } | bei 40° C |
| für Aluminium | $\kappa = 31$ | | |

Als Blindwiderstand für Freileitungen wird je Leiter und km gewöhnlich der Durchschnittswert von 0,4 Ohm angenommen, so daß der

Blindwiderstand für die einzelnen Leitungsstrecken je Leiter aus der Beziehung

$$X_1 = 0,4 l \dots \dots \dots (21)$$

errechnet werden kann.

Der Scheinwiderstand für die einzelnen Leitungsstrecken ergibt sich je Leiter als geometrische Summe des Wirk- und Blindwiderstandes gemäß der Beziehung

$$Z_1 = \sqrt{R_1^2 + X_1^2} \dots \dots \dots (22)$$

Die Sekundärwiderstände werden aus den Primärwiderständen und den Nennübersetzungen der Strom- und Spannungswandler anhand der Gl. (13), (14) oder (15) auf Seite 123 errechnet. Grundsätzlich sollten die Nennübersetzungen der Strom- und Spannungswandler bei Ringleitungen sowie bei parallelen Leitungen möglichst die gleichen sein, damit die Widerstände der Leitungen unter den gleichen Verhältnissen gemessen werden. Weitere Unterlagen für die Berechnung der Leiterwiderstände, insbesondere auch solche von Kabeln, können dem Schrifttum entnommen werden¹⁾.

Die Primär- und Sekundärwiderstände trägt man der besseren Übersicht halber ebenfalls in den Netzplan ein (Abb. 163).

Die Auslegung und Einstellung der Relais-Anregeglieder richtet sich im wesentlichen nach der Größe des Kurzschlußstromes bei kleinstem Maschineneinsatz (s. auch Seite 96), wobei auch der Einfluß der Spannungsschnellregler sowie der Strombegrenzungsregler, falls die Generatoren mit solchen versehen sind, zu berücksichtigen ist.

Die Meßglieder der Relais werden in ihrer Arbeitsweise und in der Zeiteinstellung grundsätzlich auf die Sekundärwiderstände der Leitungsstrecken abgestimmt, mit der Maßgabe, daß eine ausreichende Staufelzeit zwischen den benachbarten Leitungsstrecken zustande kommt. Von Bedeutung ist dabei die Kenntnis des kleinsten und größten Kurzschlußstromes am Einbauort der Relais, damit diese für den zu beherrschenden Strombereich zwischen dem Ansprechwert und dem größten Kurzschlußstrom richtig ausgelegt und ungenaue Messungen der Widerstände infolge Sättigungserscheinungen der Meßglieder vermieden werden können. In krassen Fällen, beispielsweise bei Strombereichen 1:20 und mehr, wird

¹⁾ M. Walter, Kurzschlußströme in Drehstromnetzen, 2. Auflage, Verlag R. Oldenbourg, München 1938, S. 37—44 und 123—137; M. Schleicher, Die moderne Selektivschutztechnik, Verlag J. Springer, Berlin 1936, S. 36—37.

stande kommt, wenn, wie in Abb. 165 gezeigt, an den Sammelschienen oder auf einem Leitungsstrang in deren Nähe ein Kurzschluß auftritt und dabei ein Leitungsstrang des vorgelagerten Doppelleitungsabschnittes abgeschaltet ist. Es handelt sich hier um den einzigen Fall, bei dem das Widerstandsprinzip nicht bedingungslos anwendbar ist. Dieser Übelstand läßt sich durch verschiedene Mittel beseitigen¹⁾.

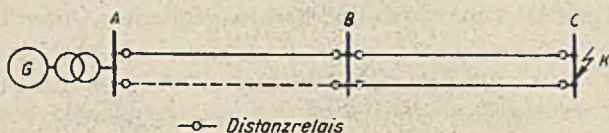


Abb. 165. Sonderfall für Distanzrelais bei Doppelleitungen.

In vielen Netzen, insbesondere in Kabelnetzen, kommt es vor, daß von einem einzigen Sammelschienensystem eines Unterwerkes 5 bis 10 oder noch mehr Leitungen abgehen (Abb. 166). Diese Art der Betriebsführung bringt vom Gesichtspunkt des Kurzschlußschutzes aus zwei wesentliche Nachteile mit sich. Erstens kann bei Kurzschluß an einem solchen Unterwerk-Sammelschienensystem zurzeit des geringsten Maschi-

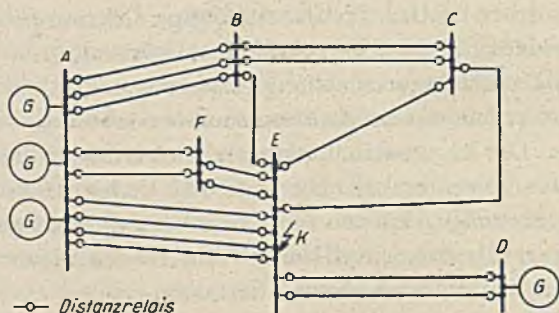


Abb. 166. Zu stark vermaschtes Kabelnetz. Nachteile bei Sammelschienen-Kurzschlüssen.

neneinsatzes der Strom zur Anregung der Relais unter Umständen nicht mehr ausreichen, so daß die Abschaltung nicht an den richtigen Stellen erfolgt, sondern irgendwo, z. B. durch die Generatorschalter. Zweitens kann die gesamte Abschaltzeit infolge einer Addition der Auslösezeiten

¹⁾ Siehe z. B. Fr. Kesselring, Selektivschutz, J. Springer, Berlin 1930, S. 65 bis 68; M. Walter, Der Selektivschutz nach dem Widerstandsprinzip, R. Oldenbourg, München 1933, S. 164 und 165.

an den vielen Zubringerleitungen sehr hoch ausfallen. Diese Nachteile lassen sich durch Verteilen der Leitungsstränge auf zwei oder mehrere Sammelschienensysteme bzw. durch Aufteilung des einzigen Sammelschienensystems in mehrere Teilsysteme beseitigen.

b) Vergleichsverfahren

Die in den Abschnitten F und G des Kapitels IV beschriebenen Vergleichs-Schutzeinrichtungen zeichnen sich dadurch aus, daß sie nur bei Fehlern im eigenen Leitungsabschnitt ansprechen und auslösen und keinerlei Rücksicht auf die Relais der benachbarten Leitungsabschnitte zu nehmen brauchen. Sie sind außerdem vom Leiterwiderstand, Lichtbogenwiderstand, Kurzschlußwechsel und von Schwebungserscheinungen nahezu unabhängig und erfassen daher alle Kurzschlüsse längs des zu schützenden Leitungsabschnittes mit der gleichen kurzen Auslösezeit (0,1 bis 0,2 s). — Vergleichs-Schutzeinrichtungen sind sowohl für kurze als auch für lange Leitungen verwendbar. Längs-Stromvergleichsrelais (Differentialrelais) eignen sich eigentlich nur für kurze Kabelstrecken.

Die Vergleichs-Schutzsysteme haben dafür die Nachteile, daß sie stets Verbindungskanäle zu den anderen Vergleichspunkten erfordern, die Sammelschienen nicht mitschützen und überdies keine Reservezeit aufweisen. Längs-Vergleichssysteme (Stromrichtungs- und Leistungsrichtungs-Vergleichs-Schutzeinrichtungen) benötigen bekanntlich oft lange Verbindungsleitungen oder Hochfrequenzkanäle. Quer-Vergleichssysteme (Achter- und Polygonschutzeinrichtungen) haben zwar kurze Verbindungsleitungen, verlangen aber, daß die zu schützenden Leitungen immer parallel gefahren werden. Zum Schutze der Sammelschienen sowie für Reserveauslösungen muß den Vergleichssystemen an den Übertragungsleitungen noch ein Zeitstaffelschutz überlagert werden (s. Seite 158). Man erhält dadurch stets einen kombinierten selektiven Kurzschlußschutz, der allerdings die Vorteile der beiden Schutzverfahren vereinigt.

Die Vergleichssysteme werden vornehmlich in Netzen mit kurzen Kabelstrecken und teilweise in Höchstspannungs-Freileitungsnetzen verwendet. Bei kurzen Kabelstrecken aus dem Grunde, weil bei ihnen oft ein einwandfreies Messen des Widerstandes durch die Distanzrelais nicht erreicht werden kann, bei den Hochspannungs-Freileitungen dagegen, um durch sehr kurze Auslösezeiten der Pendelgefahr zu begegnen und um überhaupt kurze Abschaltzeiten zu erhalten.

2. Erdschlußschutz

In Netzen mit kurzgeerdetem Sternpunkt stellt jeder Erdschluß einen einpoligen Kurzschluß dar, der von den beschriebenen Kurzschlußschutzeinrichtungen genau so wie zwei- und dreipolige Kurzschlüsse abgetrennt werden muß. Die selektive Erfassung der Erdschlüsse in nicht kurzgeerdeten Netzen, die kompensiert oder nicht kompensiert sind, erfolgt nach den im Abschnitt II_{3, 4 und 5} des Kapitels IV beschriebenen Verfahren. In solchen Netzen wird die mit Erdschluß behaftete Leitungsstrecke in der Regel nur selektiv angezeigt¹⁾, meist durch Leistungs-Richtungsrelais. Damit soll der Betriebsmannschaft Gelegenheit gegeben werden, den Betrieb so zu gestalten, daß die Abschaltung der betroffenen Leitungsstrecke keine Beeinträchtigung in der Stromlieferung hervorruft; darüber hinaus kann die Erdschlußstelle ausfindig gemacht werden.

Die Erdschluß-Richtungsrelais schließt man gewöhnlich an dieselben Strom- und Spannungswandler an, die auch für den selektiven Kurzschlußschutz (Staffelschutz, Vergleichsschutz) bestimmt sind (Abb. 116). In der Regel genügt je Leistungsschalter ein Erdschlußrelais (Abb. 117). Bei Verwendung einer Sparschaltung reicht ein einziges Erdschlußrelais auch für mehrere Leitungsabgänge aus. Die Stromspule des Relais muß dann allerdings bei Erdschluß von Hand auf die einzelnen Stromwandlergruppen nacheinander umgeschaltet werden, bis der von der gleichen Station abgehende und vom Erdschluß betroffene Leitungsstrang gefunden ist. Die Spannungsspule des Erdschluß-Richtungsrelais bleibt dagegen an der Sternpunkterdspannung dauernd angeschlossen.

Das selektive Abschalten der erdgeschlossenen Leitungsstrecken durch Erdschlußrelais ist nur in Netzen möglich, die bestimmten Voraussetzungen entsprechen (s. Seite 171).

F. Schutz von Motoren, Umformern und Gleichrichtern

1. Motorschutz

Große und wichtige Motoren, insbesondere Synchronmotoren, schützt man gegen die Auswirkungen von Kurzschlüssen und Erdschlüssen in ähnlicher Weise wie Generatoren, wobei Umfang und Empfindlichkeit der Schutzeinrichtungen gewöhnlich in mäßigeren und wirtschaftlich noch vertretbaren Grenzen gehalten werden. Mittlere und kleine Motoren

¹⁾ Der Erdschluß ist nämlich eine Fehlerart, durch die die Stromlieferung an den Abnehmer nicht unmittelbar gefährdet wird.

versieht man in der Regel mit verhältnismäßig einfachen Schutzgeräten, z. B. mit den üblichen Wärmerelais (s. Seite 178) oder Motorschutzschaltern. Solche Geräte schützen die Motoren sowohl bei Überlastung als auch bei Kurzschluß¹⁾.

Gewisse Schwierigkeiten ergeben sich für die Schutzgeräte bei den sich immer mehr einführenden Drehstrom-Asynchronmotoren mit Kurzschlußläufern und bei Synchronmotoren mit asynchronem An-

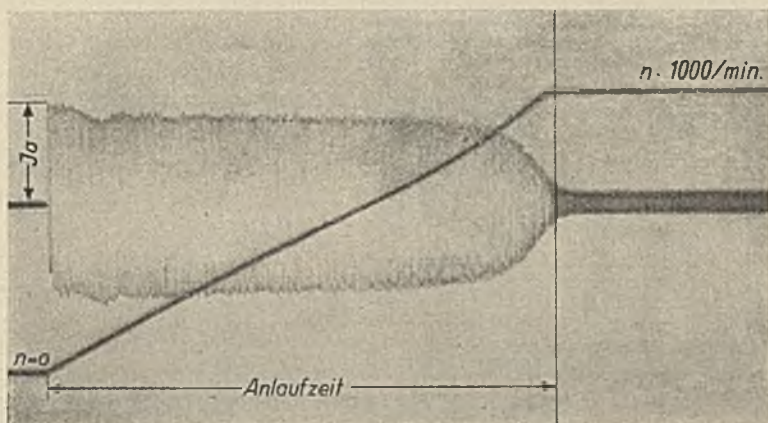


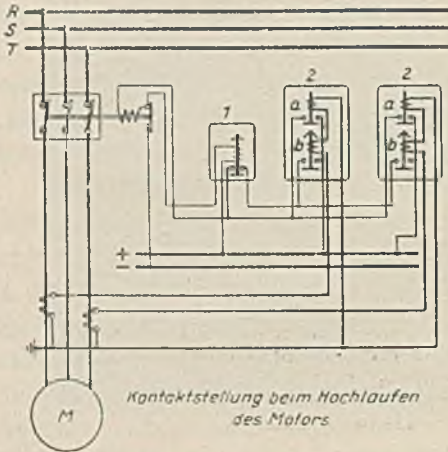
Abb. 167. Grundsätzlicher Verlauf des Anlaufstromes und der Drehzahl von Motoren mit Kurzschlußläufern.

lauf. Die Schutzeinrichtungen müssen hier nämlich zwischen Anlaufstrom, Kurzschlußstrom und Überlaststrom eindeutig unterscheiden. Beim Anlaufstrom, der ein Vielfaches des Nennstromes betragen und bis zu 30 s dauern kann (Abb. 167), darf keine Auslösung erfolgen, bei Kurzschluß im Motor oder an seinen Klemmen soll dagegen eine unverzügerte Auslösung zustandekommen, während bei Überlastung, beispielsweise durch Unterbrechung eines Phasenleiters, eine Abschaltung mit stromabhängiger Auslösezeit erfolgen muß. Diese Aufgabe wird mit mehr oder weniger gutem Erfolg durch stromabhängige Schutzeinrichtungen gelöst, die sich entweder durch eine große Zeitkonstante auszeichnen oder mit besonderen Sperrelais zum Auf-

¹⁾ Bei Niederspannungsmotoren mit isoliertem Sternpunkt können die Erdschlüsse durch „Schutzmaßnahmen gegen zu hohe Berührungsspannung“, z. B. durch den Heinisch-Riedelschutz, erfaßt werden.

fangen des Anlaufstromes versehen sind¹⁾. Darüber hinaus enthalten sie neben den Ablaufgliedern, welche den Überlaststrom überwachen, noch unverzögert wirkende Überstromglieder für die Kurzschlußauslösung (vgl. z. B. Abb. 168).

Die stromabhängigen Schutzrelais für Hochspannungsmotoren sollten im allgemeinen einen geringen Verbrauch aufweisen, damit sie auch bei kleinen Motor-Nennstromstärken an Einleiterstromwandler



- 1 Sperrelais
- 2 abhängige Überstromzeitrelais
- a Schnellauslösung (Elektromagnet)
- b Ablaufglied (Ferraristriebwerk)

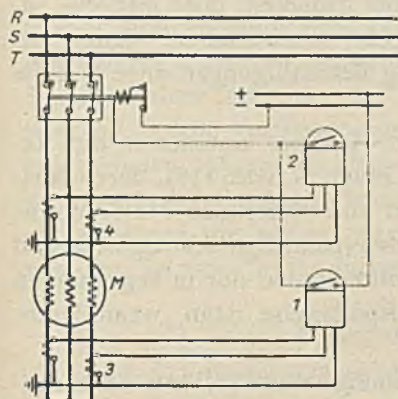
Abb. 168. Schutzanordnung für Hochspannungsmotoren mit großen und langdauernden Anlaufströmen; geeignet auch für Anlagen mit großen Kurzschlußströmen. Bei entsprechender Änderung der Schaltung kann an Stelle des Ferraristriebwerkes ein thermisches Ablaufglied benutzt werden.

angeschlossen werden können; denn gerade in Motorabzweigen kann oft mit Rücksicht auf den sehr hohen Kurzschlußstrom auf den Einbau von Einleiterstromwandlern aus thermischen und dynamischen Gründen nicht verzichtet werden. Zum einwandfreien Arbeiten der abhängigen Überstromzeitrelais ist es notwendig, daß die Stromwandler bei der angeschlossenen Bürde möglichst eine Überstromziffer $n \approx 8$ aufweisen.

Ist der Verbrauch der Überstromzeitrelais so hoch, daß eine ausreichende Leistung durch Einleiterstromwandler mit kleiner Nennstromstärke (z. B. $I_n \leq 100$ A) nicht gewährleistet wird, so können für die Relaisablaufglieder (Überlastungsschutz!) Mehrleiterstromwandler mit grö-

¹⁾ Vgl. M. Walter, AEG-Mitt. (1936) S. 357.

ößerer Nennleistung hinter dem Motor und für die unverzögert wirkenden Überstromglieder der Relais (Kurzschlußschutz!) Einleiterstromwandler mit kleinerer Nennleistung und sogar höherer Nennstromstärke vor dem Motor eingebaut werden (Abb. 169). Die Mehrleiterwandler am Sternpunkt des Motors sind nämlich infolge des hohen Motorscheinwiderstandes nur noch geringen Kurzschlußbeanspruchungen ausgesetzt. Gegebenenfalls können die Stromwandler vor dem Motor fortfallen und dort Primärauslöser oder Hochleistungssicherungen eingebaut werden.



- 1 abhängiges Überstromzeitrelais (zweipolig)
- 2 unverzögert wirkendes Überstromrelais (zweipolig)
- 3 Mehrleiterstromwandler
- 4 Einleiterstromwandler

Abb. 169. Schutzanordnung für Hochspannungsmotoren in Anlagen mit großen Kurzschlußströmen.

In Netzen mit sehr hohen Kurzschlußströmen ist es mitunter zweckmäßig, vor den Motoren mit kleinen Nennströmen zusätzlich zu den Leistungsschaltern bzw. Leistungstrennschaltern auch Hochleistungssicherungen einzubauen, damit die Verheerungen bei Kurzschlüssen bis zur Abschaltung durch die Schalter (rd. 0,1 ... 0,2 s) nicht allzu groß werden können. Die Hochleistungssicherungen haben nämlich die gute Eigenschaft, daß sie die Ströme schon unterbrechen, bevor diese ihre Höchstwerte erreichen. Die Sicherungen üben im Kurzschlußfalle also eine stark strombegrenzende Wirkung aus und schützen somit den Motor samt seinen Zuleitungen sowohl thermisch als auch dynamisch. Bei einer derartigen Schaltanordnung dienen die Leistungsschalter eigentlich nur noch zum Abschalten der gefährdeten Anlageteile bei betriebsmäßiger Überlastung, die Hochspannungssicherungen dagegen bei Kurzschluß.

Der Überstromschutz für Niederspannungsmotoren wird auch manch-

mal so ausgeführt, daß die Kurzschlüsse im Motor oder an seinen Klemmen von Abschmelzsicherungen, die Überlastungen dagegen von Wärmerelais¹⁾ erfaßt werden. Eine solche Trennung führt zur weitgehenden Schonung der Wärmeglieder bei großen Kurzschlußströmen und überdies brauchen die Wärmeglieder nicht für große Kurzschlußströme bemessen zu werden.

Neben dem besprochenen Überstromzeitschutz werden die Motoren aller Gattungen und Größen vielfach auch mit einem Unterspannungsschutz versehen²⁾, der die Aufgabe hat, die Motoren im Netz bei allpoligem Ausbleiben der Spannung oder bei größeren, über mehrere Sekunden dauernden Spannungsabsenkungen³⁾ abzuschalten, damit bei plötzlicher Wiederkehr der Netzspannung Beschädigungen oder Unfälle vermieden werden.

Als Unterspannungs-Relais oder -Auslöser kommen in der Regel nur solche mit Zeitverzögerung in Frage (s. Seite 119), deren Auslösespannung nach der Kippspannung der zu schützenden Motoren eingestellt wird. Unverzögert wirkende Unterspannungs-Schutzgeräte sind im allgemeinen viel zu empfindlich und sollten daher nur in begründeten Ausnahmefällen angewendet werden, beispielsweise dann, wenn Drehzahlschwankungen unzulässig sind.

Der verzögert wirkende Unterspannungsschutz soll nur dann auslösen, wenn die Netzspannung mehrere Sekunden lang stark zusammengebrochen ist oder ganz ausbleibt. Dadurch werden unnötige Abschaltungen von Motoren vermieden und mithin Schäden und Verluste erspart, die durch etwaige Motorstillstände verursacht werden können. Mit Rücksicht darauf, daß in ein und demselben Netz je nach Art und Lage des Kurzschlusses die Größe der Spannungsabsenkung und ihre Dauer verschieden sein können, ist es bei einer gegebenen Wahl zweckmäßig, den Relais oder Auslösern mit spannungs-abhängiger Auslösezeit denen mit spannungs-unabhängiger Auslösezeit den Vorzug zu geben.

Die Zeitkennlinien der Unterspannungs-Relais oder -Auslöser paßt man, wie bereits ausgeführt, der Kippspannung des Motors an, wobei auch die Betriebsverhältnisse des betreffenden Netzes zu berücksichtigen sind. Notfalls können die geeigneten Zeitkennlinien der Relais oder Auslöser durch Versuche im Netz festgelegt werden.

1) Die unverzögerten Überstromglieder für die Kurzschlußauslösung fallen hier fort, da deren Aufgabe von den Abschmelzsicherungen übernommen wird.

2) Siehe auch R. Ulbricht, ETZ 58 (1937) S. 763.

3) Die durch zwei- und dreipolige Kurzschlüsse im Netz entstehen können.

Die Motoren sollen nach VDE 0530 ein Kippmoment haben, das bei Nennspannung dem 1,6fachen des Nenn Drehmomentes entspricht. Das Kippmoment des Synchronmotors geht proportional mit der Spannung, das des Asynchronmotors quadratisch mit der Spannung zurück.

Überlastungen der Motoren, die durch Spannungsabsenkungen hervorgerufen werden, lassen sich durch den Überstromschutz überwachen. Sind die Zeitkennlinien des Überstromschutzes günstig geformt, so kann in vielen Fällen sogar auf einen Unterspannungsschutz verzichtet werden¹⁾.

Die Anzahl der jeweils bei Kurzschlüssen in einem Netz abzuschaltenden Motoren kann nicht zuletzt auch durch den Einbau eines schnellarbeitenden selektiven Netzschutzes stark vermindert werden. Denn jeder Bruchteil einer Sekunde, der hier eingespart wird, ist außerordentlich wertvoll. Solche Verbesserungen von seiten der Elektrizitätsversorgungsunternehmen führen im allgemeinen nur dann zum gewünschten Ziel, wenn auch auf der Abnehmerseite bei der Wahl der Motoren und Schutzeinrichtungen die nötige Sorgfalt waltet, d. h. die Wahl der Motoren und des Schutzes unter fachmännischer Beratung erfolgt.

2. Einanker-Umformerschutz

Einanker-Umformer werden in Verbindung mit Transformatoren betrieben, die die Wechselspannung des Hochspannungsnetzes auf die Schleifringspannung des Umformers herabsetzen. Einanker-Umformer bilden also mit den vorgeschalteten Transformatoren geschlossene Betriebseinheiten und sind hinsichtlich des Schutzes auch als solche zu behandeln.

Die Schutzeinrichtungen für Einanker-Umformer konnten in den letzten Jahren auf Grund eingehender Versuche weitgehend vereinfacht werden²⁾. So erfaßt man heute Kurzschlüsse und Überlastungen bei großen Umformern, die mit anderen Umformern oder mit einer Sammlerbatterie parallel arbeiten, vorwiegend nur noch von der Drehstromseite her, und zwar durch abhängige oder unabhängige Überstromzeitrelais, die zunächst den Schalter auf der Gleichstromseite und anschließend über ein getrenntes Zeitrelais denjenigen auf der Drehstromseite auslösen (vgl. Abb. 170). Kurzschlüsse an den angrenzenden Gleichstrom-Sammel-

¹⁾ Vgl. auch H. Feindt, ETZ 53 (1932) S. 1193.

²⁾ H. Freiburger, VDE-Fachberichte 6 (1934) S. 81; H. Feindt, ETZ 58 (1937) S. 599

schienen werden also durch denselben Überstromschutz lediglich auf der Gleichstromseite zum Abschalten gebracht; die Schalter auf der Drehstromseite bleiben dagegen eingeschaltet. Dadurch kann auch die Fehlerstelle leichter und schneller gefunden werden.

Der besprochene Überstromzeitschutz muß in bezug auf Ansprechstrom und Auslösezeit so eingestellt werden, daß die Selektivität gegenüber dem vorgeordneten Hochspannungsnetz gewahrt bleibt. — Kurzschlüsse und andere Fehler im Transformator werden zusätzlich von einem Gasfang-Relais überwacht.

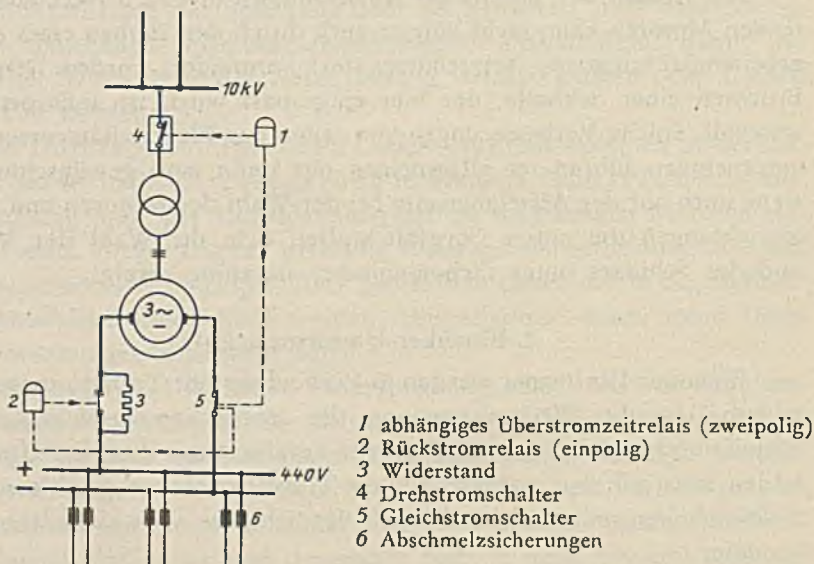


Abb. 170. Schutzanordnung für Einanker-Umformer, die mit weiteren Umformern parallel arbeiten.

Das richtige Arbeiten der Einanker-Umformer kann außerdem wesentlich durch Spannungsabsenkungen¹⁾ im Drehstromnetz beeinträchtigt werden. Die Gefahr besteht dabei weniger in den Spannungsabsenkungen selbst — die zwar im Umformer Ausgleichsströme und auch Pendelungen hervorrufen können — als vielmehr im Auftreten hoher Rückströme, die durch das Parallelarbeiten der Umformer mit anderen Maschinen oder Sammlerbatterien verursacht werden. Hohe

¹⁾ Vornehmlich Spannungsabsenkungen als Folge von Kurzschlüssen.

Rückströme¹⁾ können nämlich erhebliche Schäden durch Rundfeuer an den Stromwendern herbeiführen.

Die Auswirkungen der Rückströme lassen sich in wirkungsvoller Weise durch folgende Maßnahmen bekämpfen. Sofort nach Auftreten des Rückstromes wird zwischen Umformer und Gleichstrom-Sammelschienen durch ein schnellarbeitendes Gleichstrom-Rückstromrelais ein entsprechend bemessener Widerstand geschaltet (vgl. Abb. 170), der den Rückstrom auf einen ungefährlichen Wert begrenzt. Bei Wiederkehr normaler Verhältnisse wird der Widerstand selbsttätig wieder überbrückt.

Dauert der Rückstrom länger als etwa 10 s, so wird der Umformer gleichstromseitig durch ein Zeitrelais, das vom Rückstromrelais gesteuert wird, vollkommen abgeschaltet.

Oft schützt man die Umformer auch folgendermaßen: Die Kurzschlüsse im Schutzbereich des Umformers werden drehstromseitig durch gewöhnliche Überstromzeitrelais und gleichstromseitig durch Rückstromrelais erfaßt. Die Überstromzeitrelais dienen ferner als Schutz gegen Überlastungen. — Unempfindlich eingestellte Unterspannungszeitrelais verhüten unnötiges Abschalten der Umformer bei Spannungsabsenkungen im Drehstromnetz. — Zur Erfassung der Kurzschlüsse an den Gleichstrom-Sammelschienen dienen Überstromzeitrelais bzw. Auslöser im Gleichstromkreis, die dieselben Gleichstromschalter steuern wie die Rückstromrelais.

3. Gleichrichterschutz

Gleichrichter werden an Wechsel- bzw. Drehstromnetze in der Regel über entsprechend ausgestaltete Transformatoren angeschlossen und bilden mit diesen Betriebseinheiten.

Die Schutzeinrichtungen für Gleichrichteranlagen haben im wesentlichen zu erfassen:

- a) Fehler im Gleichrichter (hauptsächlich Rückzündungen)
- b) Fehler im Transformator
- c) Fehler an den Hilfseinrichtungen
- d) Überlastungen durch Betriebsvorgänge oder durch Kurzschlüsse außerhalb des Gleichrichters.

¹⁾ Auch solche, die bei Kurzschlüssen im Schutzbereich des Umformers oder sogar im Drehstromnetz auftreten.

Innere Fehler der Gleichrichter (ohne Gitterspannung!) werden von der Gleichstromseite her durch Schnellschalter abgetrennt, die gegenüber den Schaltern der parallel arbeitenden Gleichrichter selektiv wirken, weil diese dabei Vorwärtsstrom führen (Rückstromschalter!). Der Rückstromschnellschalter löst zweckmäßig zugleich den Drehstromschalter mit aus. Bei Glasgleichrichtern müssen außerdem Anodensicherungen verwendet werden, weil diese bei großen Kurzschlußströmen schneller als Schalter arbeiten und dadurch die Anodeneinschmelzungen wirksamer schützen.

Fast alle neueren Gleichrichter-Anlagen besitzen Gitterschnellabschaltung¹⁾, bei der die Sperrung des Anodenstromes mittels negativer Gitterspannung erfolgt. Die dazu erforderlichen Schnellschaltrelais werden zwecks selektiven Arbeitens vorzugsweise als Gleichstrom-Rückstromrelais ausgeführt.

Die zu den Gleichrichtern gehörigen Öltransformatoren sind durch Gasfang-Geräte zusätzlich gegen innere Fehler zu schützen.

Da die Gleichrichter gegen größere Temperaturschwankungen sowie ungenügendes Vakuum sehr empfindlich sind, werden verschiedene Hilfs-Schutzeinrichtungen vorgesehen, beispielsweise Ventilator-Windklappenrelais (bei Glasgleichrichtern), Temperatur- sowie Vakuum-Überwachungseinrichtungen (bei Eisengleichrichtern mit Pumpen) u. ä.

Überlastungen der Gleichrichter können auftreten durch zu hohe Betriebslast sowie durch Fehler in parallel arbeitenden Gleichrichtern oder im Gleichstromnetz. Gegen langandauernde Überlastungen werden besondere Wärmerelais angewendet, deren Zeitkennlinien der Belastungscharakteristik des Gleichrichters (vgl. z. B. VDE 0555/36) ungefähr entsprechen. Kurzzeitige und hohe Überlastungen der Gleichrichter werden durch abhängige oder unabhängige Überstromzeitrelais auf der primären Seite des Transformators bzw. durch Schnellschalter oder schnell arbeitende Selbstausschalter auf der Gleichstromseite überwacht. Bei Glasgleichrichtern übernehmen die Anodensicherungen zusätzlich diesen Schutz.

Arbeitet ein Gleichrichter allein auf ein Gleichstromnetz und ist in diesem keine Sammlerbatterie vorhanden, so genügen für die Drehstromseite auch unverzögert wirkende Überstromrelais mit einer Stromeinstellung von etwa dem 3 bis 7fachen Nennstrom des Gleichrichters. Damit lassen sich aber nur die inneren Fehler des Gleichrichters erfassen.

¹⁾ Vgl. L. Lebrecht, AEG-Mitt. (1934) S. 23 und 36; W. Brockmann, Siemens-Z. 15 (1935) S. 235.

Die Überlastungen des Gleichrichters müssen dann auf der Gleichstromseite noch durch Selbstausschalter mit Wärmeauslösern oder durch Abschmelzsicherungen überwacht werden.

Kurzschlüsse an den Gleichstrom-Sammelschienen werden auf der Gleichstromseite durch unverzögert wirkende Auslöser erfaßt und nur gleichstromseitig abgeschaltet. Bei kleineren Gleichrichtern werden für diesen Zweck vorwiegend Abschmelzsicherungen benutzt.

Gegen Spannungsabsenkungen auf der Drehstromseite sind Gleichrichter vollkommen unempfindlich, so daß sich ein besonderer Unterspannungsschutz erübrigt. Eine Ausnahme bilden nur Glühkathodengleichrichter, weil bei ihnen die Heizspannung nicht unter einen bestimmten Betrag (etwa 90%) sinken darf.

G. Schutz von Hochspannungs-Abnehmeranlagen¹⁾

Die Schutzeinrichtungen für Hochspannungs-Abnehmeranlagen haben im wesentlichen zur Aufgabe, die möglichen Fehler in derartigen Anlagen, wie Kurzschlüsse, Überlastungen und Erdschlüsse, in geeigneter Weise zu erfassen und darüber hinaus störende Wirkungen aus dem liefernden Netz von den Abnehmeranlagen weitgehend fernzuhalten.

Die Hochspannungssammelschienen einer Abnehmeranlage werden im allgemeinen vom vorgeordneten Netz über eine oder mehrere Speiseleitungen mit Strom versorgt. Von diesen Sammelschienen führen die Abzweige zu den Transformatoren, Hochspannungs-Motoren, Gleichrichtern und dergleichen.

Wird die Anlage des Abnehmers nur über eine Leitung gespeist, so ordnet man den Überstromschutz für die gesamte Abnehmeranlage entweder am Anfang oder am Ende der Speiseleitung an. Strom- und Zeiteinstellung des Überstromschutzes müssen dabei so gewählt werden, daß die Selektivität gegenüber den vorgeordneten Relais im Netz und den nachgeordneten Relais der Abnehmeranlage gewahrt bleibt. Die Zeiteinstellung der nachgeordneten Relais ist dabei im allgemeinen so knapp wie möglich zu halten, damit der Überstromschutz am Speisekabel ebenfalls auf eine niedrige Auslösezeit eingestellt werden kann. Als Schutzrelais kommen gewöhnlich unabhängige oder abhängige bzw. begrenztabhän-

¹⁾ Unter Hochspannungs-Abnehmeranlagen sind alle elektrischen Anlagen zu verstehen, die von den Elektrizitätsversorgungsunternehmen mit einer Übergabe-Betriebsspannung von 1000 V aufwärts aus den Speisenetzen mit Strom beschickt werden.

gige Überstromzeitrelais in Frage. Bei Abnehmeranlagen mit großen Kurzschlußläufer-Motoren sollte man den abhängigen bzw. begrenzt abhängigen Überstromzeitrelais den Vorzug geben, da diese bei stoßweisen Belastungsvorgängen (bei Anlaßvorgängen oder beim Aufholen der Nenn-Tourenzahl nach Spannungsabsenkungen) infolge ihrer stromabhängigen Ablaufzeit nicht so leicht bzw. so schnell auslösen. Diese Relais haben aber im allgemeinen den Nachteil, daß sie bei Kurzschlüssen während des Schwachlastbetriebes verhältnismäßig lange Auslösezeiten aufweisen.

Erfolgt die Speisung der Abnehmeranlage über mehrere Leitungen (Ringleitungen oder parallele Leitungen), so erhalten diese in der Regel den gleichen Schutz wie die übrigen Leitungen des Speisernetzes, d. h. Distanzschutz, Vergleichsschutz oder Überstromzeitschutz mit Richtungsrelais.

Die einzelnen Transformatoren, Motoren und Gleichrichter der Abnehmeranlagen versieht man mit entsprechenden Schutzeinrichtungen, wie in den Abschnitten C und F dieses Kapitels bereits beschrieben, mit der Maßgabe, daß größte Sicherheit bei angemessenem Aufwand erreicht wird. Von besonderer Bedeutung sind kürzeste Abschaltzeiten bei Kurzschluß innerhalb der Anlage sowie eine hohe Kurzschlußfestigkeit der einzelnen Anlageteile und Geräte selbst. Über die Beanspruchung der Anlageteile und Geräte bei Kurzschluß sowie über die Ausgestaltung der Schutzeinrichtungen für einige besondere Fälle soll nachstehend noch etwas näher berichtet werden.

Tritt in einer Abnehmeranlage ein Kurzschluß auf, so nimmt der Kurzschlußstrom einen Wert an, der, abgesehen vom Maschineneinsatz in den Kraftwerken, von der Größe des Widerstandes zwischen den Stromquellen und der Fehlerstelle abhängig ist. Entsprechend diesen Bedingungen können sich für den Kurzschlußstrom in den Abnehmeranlagen ganz verschiedene Werte ergeben, und der Kurzschlußstrom kann unter Umständen sogar sehr groß werden.

Aber noch aus einem anderen Grunde ist es verkehrt, allgemein anzunehmen, daß Abnehmeranlagen bei eigenen Kurzschlüssen nur verhältnismäßig schwach beansprucht werden und daher mit Geräten von geringerer Kurzschlußfestigkeit ausgerüstet sein können als die vorgelagerten Netzstationen. Die Kurzschlußströme in den Abnehmeranlagen sind zwar in ihrer absoluten Höhe kleiner als diejenigen bei Kurzschlüssen im eigentlichen Netz, dafür sind sie aber in ihrer relativen Höhe, d. h. bezogen auf den gewöhnlich kleineren Nennstrom der Anlage-

teile der Abnehmerstationen, oft unerwartet hoch. Infolgedessen sind diese dann den thermischen und mechanischen Wirkungen der Kurzschlußströme besonders schwer ausgesetzt. Die Gefährdung eines Anlageteiles hängt nämlich nicht allein von der absoluten Höhe des Kurzschlußstromes, sondern in viel stärkerem Maße vom Verhältnis des Kurzschlußstromes zum Nennstrom ab. In dieser Hinsicht besonders gefährdet sind daher gewöhnlich Primärauslöser und Stromwandler für kleine Nennstromstärken in Abnehmeranlagen, die an engvermaschte Kabelnetze angeschlossen sind, weil hier die Kurzschlußströme infolge des geringen Widerstandes des vorgeschalteten Netzes meist sehr groß ausfallen.

Primärauslöser bzw. Primärrelais für kleine Nennstromstärken, deren Wicklungen bei ungünstigem Verhältnis der Kurzschlußströme zum Nennstrom ($I_k/I_n \geq 200$) ausglühen oder zum Spritzfeuer führen können, sind daher in solchen Fällen mit Vorsicht zu verwenden; es sei denn, daß es möglich ist, sie für eine sehr hohe Kurzschlußfestigkeit auszuliegen. In schwierigen Fällen wird gewöhnlich der Nennstrom solcher Schutzgeräte wesentlich höher als der des Schützlings gewählt. Dadurch erhält man aber einen Schutz nur für Kurzschlüsse, der zweckmäßig mit fester Zeiteinstellung arbeitet. Als Überlastungsschutz müssen dann andere Einrichtungen, z. B. für Transformatoren Wärmewächter, vorgesehen werden (s. Seite 177).

Für **Motoren** ist eine solche Lösung der Schutzfrage überhaupt nicht anwendbar. Hier müssen die Schutzgeräte zur ausreichenden Überwachung der Überlastungen vom Motorstrom unmittelbar durchflossen werden und stets stromabhängige Zeitkennlinien aufweisen. Außerdem müssen sie mit einer unverzögert wirkenden Kurzschluß-Auslöseeinrichtung versehen sein. Diese Bedingungen erfüllen nur abhängige bzw. begrenzfabhängige Überstromzeitrelais — vorwiegend Wärmerelais — unter Verwendung von kurzschlußfesten Stromwandlern mit einer Überstromziffer $n \geq 8$.

Die in solchen Fällen erforderliche oft sehr hohe Kurzschlußfestigkeit der Stromwandler wird dabei meistens auf Kosten ihrer Leistung oder Meßgenauigkeit erzielt, wobei der Preis und die Abmessungen der Wandler erheblich werden können. Es empfiehlt sich dann, auf eine besondere Meßgenauigkeit der Stromwandler in dem für Schutzzwecke nicht interessierenden Gebiet unterhalb des Nennstromes zu verzichten und dabei die Leistung der Wandler der Leistungsaufnahme der Relais anzugleichen.

Im allgemeinen ist darauf zu achten, daß die Leistung der Stromwandler, der Widerstand der Relais und die Ausschaltzeit des Leistungsschalters so im Einklang stehen, daß die Relaismeßglieder und womöglich auch die Sekundärwicklungen der Stromwandler bei Kurzschlüssen an den Schützlingen keine allzu großen Ströme führen und bis zur Abschaltung durch den Leistungsschalter (0,1 bis 0,2 s) thermisch keinen Schaden nehmen. Im Zweifelsfall sind Zwischenwandler („Sättigungswandler“) für eine Überstromziffer von $n \approx 8$ oder Zusatzbürden in den Sekundärkreis der Stromwandler zu schalten.

Erdschlüsse in den Abnehmeranlagen können durch Schutzeinrichtungen, wie auf S. 161 beschrieben, erfaßt werden.

Die eingangs dieses Abschnittes erwähnten störenden Wirkungen aus dem liefernden Netz auf die Abnehmeranlagen sind in der Hauptsache Spannungsabsenkungen als Folge von Netzkurzschlüssen. Große und langandauernde Spannungsabsenkungen können nämlich, wie bereits auf Seite 260 besprochen, bei den Motoren zu Unzuverlässigkeiten führen und gegebenenfalls auch Schäden hervorrufen. Eine gewisse Rolle spielt dabei auch die Art der Arbeitsmaschinen und deren Belastung, wodurch eine Stillsetzung der Motoren schon in sehr kurzer Zeit erfolgen kann. Als Schutz gegen die schädlichen Auswirkungen von Spannungsabsenkungen bei Motoren benutzt man in der Hauptsache verzögert wirkende Unterspannungsrelais bzw. Auslöser. Unverzögert wirkende Unterspannungsgeräte sind im allgemeinen zu vermeiden, da sie die Motoren viel zu schnell und zu oft in unnötiger Weise außer Betrieb setzen; man verwendet sie nur dann, wenn es die Betriebsmittel unbedingt erfordern.

Werden in der Abnehmeranlage mehrere Motoren betrieben, so kann man für einzelne Gruppen oder für alle Motoren ein einziges Unterspannungszeitrelais benutzen.

VIII. Prüfung und Wartung der Schutzeinrichtungen

A. Allgemeines

Die Relais oder Auslöser befinden sich im störungsfreien Betrieb im Gegensatz zu den Meßgeräten stets in der Ruhelage und werden ihren Aufgaben gemäß nur bei Netzstörungen in Bewegung versetzt, und dann auch nur für wenige Sekunden oder Bruchteile von Sekunden. Bei Auftreten von Störungen (Fehlern) im Netz sollen jedoch die Schutzeinrichtungen trotz monatelangen Stillstandes und aller inzwischen aufgetretenen schädlichen Einwirkungen auf ihre Einzelteile eine unveränderte Genauigkeit beim Arbeiten behalten; denn ein Versager kann zu folgenschweren Betriebsstörungen führen.

Die Schutzeinrichtungen mit Relais oder Auslösern können erfahrungsgemäß ihre Aufgabe im Betrieb nur dann zuverlässig erfüllen, wenn sie von Zeit zu Zeit überprüft und gegebenenfalls überholt werden. Die Zeitabstände zwischen den einzelnen Prüfungen sind dabei je nach der Zuverlässigkeit der einzelnen Gerätetypen bei längerem Betrieb und je nach den Betriebsverhältnissen zu wählen, üblicherweise ein bis zweimal im Jahr. Zeitabstände bis zu einem Jahr sind z. B. zulässig bei einfachen oder bewährten Geräten, die unter günstigen Bedingungen arbeiten. Bei weniger zuverlässigen oder empfindlichen Geräten oder bei solchen, die unter schwierigen Verhältnissen zu arbeiten haben, z. B. in Räumen mit großer Feuchtigkeit, mit starker Staubentwicklung oder Gasbildung, sind die Zeitabstände für die Betriebsprüfungen entsprechend kleiner zu halten.

Große Elektrizitätsversorgungsunternehmen haben die Prüfung und Wartung der Schutzeinrichtungen schon seit Jahren eingeführt und damit einen hohen Grad der Betriebssicherheit erzielt. Es konnten dabei manche Unzulänglichkeiten rechtzeitig aufgedeckt und abgestellt werden. Überdies sind solche EVU auf Grund reicher Erfahrungen in der Lage, auf-

getretene Mängel in kürzester Zeit selbst zu beheben. Die neueren Prüfungseinrichtungen zeichnen sich zudem durch einfachen Aufbau und leichtes Gewicht aus und sind vor allem einfach in der Bedienung. Auch kleineren Elektrizitätsversorgungsunternehmen ist daher die Möglichkeit zur Prüfung ihrer Schutzeinrichtungen gegeben, zumal die Ausbildung hierzu geeigneter Betriebsmannschaften im allgemeinen keine Schwierigkeiten bereiten dürfte.

Auch das Reinigen bzw. Überholen der Relais und Auslöser in bestimmten Zeitabschnitten ist erforderlich, weil im Laufe der Zeit an den mechanischen Teilen eine Verschmutzung, Korrosion, Verklemmung auftreten oder das Schmieröl verdicken bzw. verharzen kann. Dadurch werden die Genauigkeit und die Auslösezeiten der Schutzgeräte unliebsam verändert und mithin die Selektivität oder gar die Auslösung gefährdet. Ferner sind die Verschraubungen und Klemmen auf festen Sitz zu überprüfen. Durch systematische Prüfung und Überholung der Relais und Auslöser können derartige Mängel rechtzeitig und wirksam ausgemerzt werden.

Die Prüfung und Pflege der Geräte bzw. Schutzeinrichtungen soll nur von geschultem Personal durchgeführt werden, das womöglich unter einheitlicher Leitung innerhalb des EVU steht.

Die überwachende Dienststelle (Relaisabteilung) ist dabei auf die verständnisvolle Mitarbeit des Betriebspersonals angewiesen, da nur dieses in den meisten Fällen die Möglichkeit hat, das Arbeiten der Relais oder Auslöser während einer Störung zu beobachten. Es ist infolgedessen notwendig, auch das Schaltpersonal über die große Bedeutung und die wichtigen Aufgaben des Schutzes und seiner einzelnen Teile aufzuklären und es zur sorgfältigen Beobachtung und Behandlung der Schutzgeräte anzuhalten.

Die folgenden Abschnitte behandeln lediglich die Prüfung von Schutzeinrichtungen mit Sekundärrelais. Die dort gemachten Angaben können sinngemäß auch auf Primärrelais und Primärauslöser angewendet werden.

B. Prüfungsarten

Die Begriffserklärungen für die einzelnen Prüfungsarten sind auf Seite 25 gebracht. Der Umfang der Prüfungen ist abhängig von der Art der Prüfung, wie Typenprüfung, Abnahmeprüfung, Betriebsprüfung usw.,

und von der Eigenart des Prüflings, wie Überstromzeitrelais, Richtungsrelais, Distanzrelais usw. Bei den Prüfungen, insbesondere bei den Betriebsprüfungen von Staffelschutzrelais (Überstromzeitrelais, Distanzrelais) muß die erste Zeitaufnahme der eingestellten Auslösezeit besonders sorgfältig durchgeführt werden (das zu prüfende Relais darf vorher weder von Hand noch elektrisch in Tätigkeit gesetzt werden!), weil dieser erste Zeitablauf das Verhalten und die Zuverlässigkeit der Relais im Betrieb am besten erkennen läßt.

1. Typenprüfung des Bestellers

Diese Prüfung führt der Besteller im Laboratorium des Herstellers oder im eigenen Laboratorium bzw. Versuchsraum durch, um sich über die Eigenschaften der in Frage kommenden Schutzgeräte vor Erteilung eines Auftrages eingehend zu unterrichten. Hierbei werden die vom Hersteller gemachten Angaben über die Genauigkeit und Betriebssicherheit der Geräte nachgeprüft und insbesondere die Eigenschaften des Schutzes im Hinblick auf die besonderen Verhältnisse der zu schützenden Anlage teile festgestellt. Eine genaue Typenprüfung ist sehr zweckmäßig bei umfangreichen Schutzeinrichtungen, die zum erstenmal zur Anwendung gelangen sollen. Die Versuche dazu werden am besten unter Bedingungen vorgenommen, die denen im praktischen Betrieb möglichst nahekommen. Dabei sind die Netzstörungen weitgehend nachzuahmen, damit das Verhalten des Schutzes sich auch für schwierige Verhältnisse beurteilen läßt. Bei weniger wichtigen sowie bei bewährten Schutzgeräten kann eine Typenprüfung fortfallen, besonders wenn nur kleine Stückzahlen in Frage kommen oder der Schutzzumfang gering ist.

Die Typenprüfung wird vom Bestellenden gewöhnlich an Erzeugnissen mehrerer Herstellerfirmen durchgeführt, um sich danach an Hand eines Vergleichs für die beste Ausführung entscheiden zu können. Die bei den Versuchen gewonnenen Ergebnisse sind bei der Aufstellung der Lieferbedingungen für die Relais zu verwenden. Forderungen, die dabei zu Sonderausführungen des jeweiligen Schutzes führen können, sind möglichst zu vermeiden.

2. Abnahmeprüfung

Die Abnahmeprüfung der Relais bzw. Schutzeinrichtungen wird in der Regel beim Hersteller und seltener beim Abnehmer an geeigneten Prüfständen vorgenommen. Sie dient dazu, die in der Bestellung ange-

gebenen technischen Daten zu überprüfen und erstreckt sich in der Hauptsache auf die Feststellung von mechanischen Fehlern, der Strom- und Spannungseinstellung, der Kennlinien und Zeitfehler, der Schaltleistung der Kontakteinrichtungen¹⁾ sowie auf die Spannungsprobe (Isolationsprüfung).

Relais, die den an sie gestellten Anforderungen nicht genügen, werden nicht abgenommen und zur Behebung der Mängel an den Hersteller zurückgegeben. Hat sich bei früheren Prüfungen herausgestellt, daß alle Relais den gestellten Anforderungen genügen, so kann die Abnahme späterer Lieferungen in Form einer Stichprobe durchgeführt werden. Diese vereinfachte Art der Prüfung ist jedoch sofort zu verlassen, wenn sich bei ihr wesentliche Mängel herausstellen.

3. Einbauprüfung

Nach Beendigung der Montage, während der die Relais beschädigt und verschmutzt werden können, hat eine eingehende Prüfung der gesamten Schutzeinrichtung zu erfolgen. Bei den einzelnen Teilen der Schutzeinrichtung ist hauptsächlich zu achten auf die Leitungsführung, die Klemmenbezeichnung und die Schaltung der Wandler, auf etwaige mechanische Beschädigungen und Verschmutzungen, ferner auf die Einstellung der Anrege-, Ablauf- und Richtungsglieder. Bei der Inbetriebnahme von Richtungsrelais, Distanzrelais oder dergleichen ist auch die Drehfeldrichtung mit einem Drehfeldrichtungsanzeiger eindeutig festzustellen²⁾. Gegebenenfalls muß auch der Wickelsinn (Polarität) der Wandler ermittelt und richtiggestellt werden³⁾.

Nachdem an Hand des Schaltbildes die einzelnen Teile der Schaltung überprüft sind, werden zweckmäßig vor Inbetriebnahme des Anlageteiles die Relais entsprechend dem Relaisplan eingestellt und mit dieser Einstellung nachgeprüft. Wird der geschützte Anlageteil mit besonderen Stromquellen vor Inbetriebsetzung geprüft (Hochfahren von Leitungen, Transformatoren oder dergleichen), so ist die Einbauprüfung des Schutzes am besten mit dieser Anlageprüfung zu verbinden. Falls ein Hochfahrversuch nicht durchgeführt wird, ist möglichst die primäre Prü-

¹⁾ Die Nachprüfung der Schaltleistung der Kontakteinrichtungen wird seltener durchgeführt.

²⁾ M. Walter, Der Selektivschutz nach dem Widerstandsprinzip, R. Oldenbourg, München 1933, S. 116.

³⁾ M. Walter, Strom- und Spannungswandler, R. Oldenbourg, München 1937, S. 133.

fung der Schutzeinrichtung anzustreben (s. Seite 275). Bei ganz einfachen Anlagen kann die Einbauprüfung auf die sekundäre Prüfung der Relais (s. Seite 278) und eine Kontrolle der Schaltung beschränkt werden.

Die Einbauprüfung soll sich im besonderen auf Ansprechwert, Abfallwert, Zeitkennlinie und Richtungseinstellung erstrecken. Außerdem sind die Leistungsschalter mit Hilfe der Relais wenigstens einmal auszulösen. Bei Wandlerstromauslösung (Seite 205) ist auch diese mitzuprüfen, und zwar mit möglichst hohem sekundärem Kurzschlußstrom.

Nach beendeter Prüfung ist die Anlage in ordnungsgemäßen Zustand zu versetzen und über die Einbauprüfung ein Bericht aufzustellen.

4. Betriebsprüfung

Diese Prüfung sollte nach einem festgelegten Zeitplan erfolgen, damit alle Relais einer Anlage während eines festgesetzten Zeitabschnittes mindestens einmal überprüft werden. Außerdem empfiehlt es sich, nach jeder Netzstörung die Schutzeinrichtungen des unmittelbar betroffenen Anlageteiles zu überprüfen, besonders bei Falschauslösungen.

Die regelmäßige Nachprüfung der Relais sollte in Zeitspannen erfolgen, die ein Jahr nicht übersteigen. Je öfter sie erfolgt, desto größer ist die Sicherheit für den Betrieb. Die Betriebsprüfung besteht aus der „ersten“ Prüfung der Schutzeinrichtung im vorgefundenen Zustand¹⁾, der Aufnahme des Befundes, den notwendigen Ausbesserungen und einer Schlußprüfung.

Befundaufnahme. Aufzunehmen sind im wesentlichen die vorgefundenen Relais-Einstellungen, der Reinlichkeitszustand, etwaige Rost- und Wasserbildung im Relais, der Zustand der Spulen und Kontakteinrichtungen sowie der Zustand der Schaltung und der Erdung.

Ausbesserungen. Die Relais sind zu säubern, etwaige kleine Ausbesserungen, die an Ort und Stelle ausgeführt werden können, sind vorzunehmen. Schadhafte Relais sind gegen Reserverelais auszuwechseln. Es ist zweckmäßig, hierüber in der Prüfvorschrift genaue Anweisungen zu erteilen.

Schlußprüfung. Sind vorstehende Arbeiten erledigt, so ist wieder zu prüfen, ob die eingestellten Kennwerte, z. B. der Ansprechstrom, die Ablaufzeit und dergleichen der Schutzeinrichtung eingehalten werden. Nötigenfalls sind sie entsprechend zu verändern. Die Schutzeinrichtung

¹⁾ Siehe auch Seite 271.

soll bei dieser Nachprüfung den Leistungsschalter ausschalten, um die Kontakteinrichtungen entsprechend den Betriebsbeanspruchungen zu belasten und den Zustand der Auslöseleitungen zu kontrollieren.

Wertvoll sind auch Prüfungen, bei denen die Relais von Zeit zu Zeit von Hand oder über Prüftasten zum Ansprechen und zum Ablaufen gebracht werden. Der Auslösekreis ist während dieser Prüfung durch einen besonderen Schalter zu unterbrechen. Zu Zeiten geringer Belastung kann man die Leistungsschalter — wenn es die Betriebsverhältnisse zulassen, beispielsweise bei Ringleitungen, — auch durch die Relais auslösen lassen, um sie in die Prüfung einzubeziehen. Solche Prüfungen können vom Schaltpersonal etwa monatlich durchgeführt werden.

Nach jeder Falschauslösung ist es, wie bereits erwähnt, notwendig, die Schutzeinrichtungen des unmittelbar betroffenen Anlageteiles einer zusätzlichen Prüfung zu unterwerfen. Diese liefert durch die dabei erzielten Ergebnisse einen Anhalt für die Erkenntnis des Verlaufs der Störung und insbesondere die Gründe für das unrichtige Arbeiten des Schutzes.

5. Selbsttätige Überwachung

Außer diesen zu bestimmten Zeiten vorzunehmenden Prüfungen empfiehlt es sich, die Relais mit dauernd in Betrieb befindlichen Einrichtungen zu versehen, die den Zustand einer Schutzeinrichtung fortlaufend überwachen und Schäden erkennen lassen, bevor diese zu Relaisversagern oder falschen Auslösungen führen. Hierzu gehören:

- a) Einrichtungen, die den ordnungsgemäßen Zustand der Strom- und Spannungspfade der Relais überwachen,
- b) Meldeeinrichtungen, die anzeigen, ob die Auslösespannung dauernd an den Relais vorhanden ist (z. B. Glimmlampen, Abb. 141a),
- c) Melderelais oder Fallklappen, die die Kontaktgabe der Relais kenntlich machen. Dies ist besonders bei selbsttätigen Relais notwendig,
- d) Einrichtungen, wie Schleppzeiger, Mehrfachzeitschreiber oder Störungsschreiber, die die tatsächliche Laufzeit jedes Relais nachträglich erkennen lassen, auch wenn eine Auslösung nicht erfolgt ist.

Diese Einrichtungen bzw. Hilfseinrichtungen leisten überdies auch gute Dienste für Störungsklärungen (Seite 282).

unberücksichtigt. Diese kann je nach Ausführung und Größe der Schalter 0,01 bis 0,04 s betragen. Die Primärprüfung wird hauptsächlich bei Einbauprüfungen (Seite 272) vorgenommen.

Die Prüfeinrichtungen müssen für große Stromstärken ausgelegt sein, um die Primärseite der Stromwandler mit einem Mehrfachen ihres Nennstromes beschicken zu können. Solche Prüfeinrichtungen werden in der Regel nur einpolig ausgeführt. Sie sollen trag- oder fahrbar und darüber hinaus so ausgebildet sein, daß mit ihnen möglichst viele Relaisarten an ihrem Einbauort geprüft werden können. Schließlich sollen sie auch gelegentliche Überlastungen, wie sie bei derartigen Prüfungen kurzzeitig auftreten können, ohne Schaden aushalten.

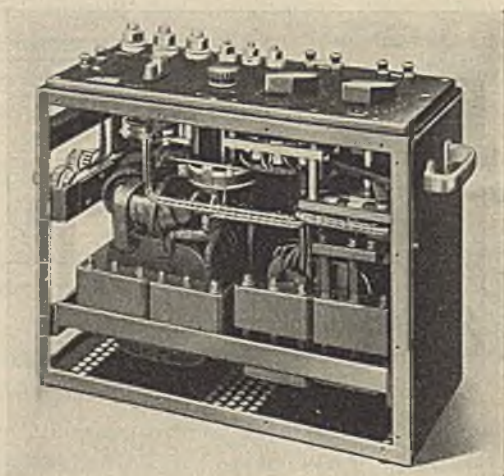


Abb. 172. Tragbare Relaisprüfeinrichtung, regelbar bis 2000 A (AEG).

Trag- oder fahrbare Relaisprüfeinrichtungen werden fast ausschließlich für induktive Regelung gebaut und weisen verschiedene Leistungen auf (Dauerleistungen von 0,15 bis 15 kVA). Abb. 172 zeigt die Ausführung einer Relaisprüfeinrichtung mit induktiver Regelung für eine Dauerleistung von 2 kVA. Die Hauptbestandteile dieser Prüfeinrichtung sind ein Regel- und ein Hochstrom-Transformator. Der Regeltransformator ist als Spartransformator ausgebildet und kann auf der Primärseite wahlweise an 110, 220 oder 380 V angeschlossen werden. Die Regelspan-

nung wird der Primärseite des Hochstromtransformators zugeführt¹⁾. In Abb. 173 ist eine weitere Prüfeinrichtung dargestellt²⁾. Solche Prüfeinrichtungen können für Primär- und Sekundärprüfungen verwendet werden. Man benutzt sie auch für die Prüfung von Primärauslösern und Primärrelais.

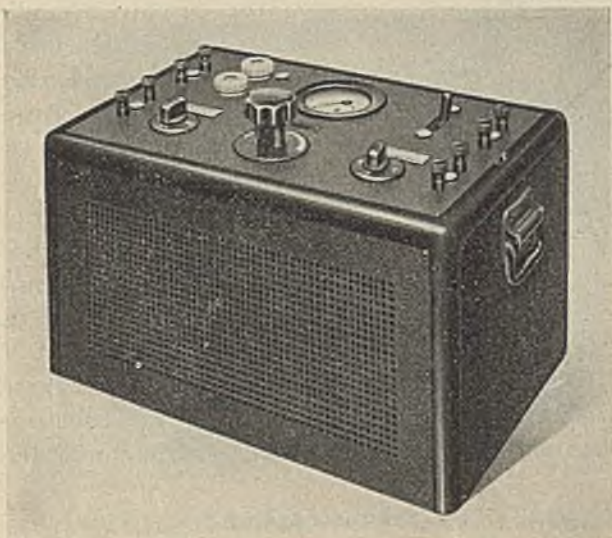


Abb. 173. Tragbare Relaisprüfeinrichtung, regelbar bis 2000 A (S & H).

Die Auslösezeit der Relais samt der Eigenzeit der Leistungsschalter muß genügend genau bestimmt werden. Bei langen Auslösezeiten kann die Zeitmessung gegebenenfalls durch eine Stoppuhr vorgenommen werden. Eine genauere Zeitmessung erzielt man jedoch, insbesondere bei kurzen Auslösezeiten, mit einem Sekundenmesser³⁾, der gleichzeitig mit dem Prüfling anläuft und durch dessen Kontaktgabe oder durch das Ausschalten des Leistungsschalters angehalten wird (Abb. 174). Ein solcher Sekundenmesser enthält einen selbst anlaufenden Synchronmotor, der an 110 oder 220 V Wechselspannung mit 50 Hz angeschlossen werden kann.

¹⁾ Siehe auch K. Johannsen, AEG-Mitt. (1939) S. 476.

²⁾ W. Skirl, Elektrische Messungen, Walter de Gruyter & Co., Leipzig 1936, S. 422—427.

³⁾ G. Stark, AEG-Mitt. (1938) S. 130; W. Skirl, Elektrische Messungen, Walter de Gruyter & Co., Leipzig 1936, S. 420.

Er ist mit zwei Zeigern versehen, von denen der eine Hundertstel-Sekunden, der andere volle Sekunden anzeigt. Die Zeitfehler eines Sekundenmessers liegen in der Größenanordnung von 0,01 bis 0,02 s.



Abb. 174. Sekundenmesser.

Durch die Primärprüfung der Sekunderelais kann gegebenenfalls auch die Überstromkennlinie bzw. die Überstromziffer der Stromwandler bei der betriebsmäßig angeschlossenen Bürde (Betriebsbürde) überprüft werden. Dies ist bei abhängigen bzw. begrenzt-abhängigen Überstromzeitrelais sowie bei Distanzrelais von Bedeutung.

Als Sonderfall einer Primärprüfung gelten auch die Versuche durch Hochfahren eines Generators auf einen künstlich hergestellten Fehler (Kurzschluß, Erdschluß). Solche Versuche werden mit Vorteil zur Überprüfung (Einbauprüfung und Betriebsprüfung!) der Längs-Stromvergleichsschutzeinrichtungen von Leitungen und der Schutzeinrichtungen von Generatoren und teilweise auch von Transformatoren durchgeführt.

2. Sekundärprüfung

Die Sekundärprüfung erstreckt sich im Gegensatz zur Primärprüfung nur auf die Prüfung der Sekundärrelais selbst. Dem Relais wird der Strom von einer Prüfeinrichtung unmittelbar an seinen Klemmen, an den entsprechenden Reihenklemmen oder über besonders dazu eingebaute Steckbuchsen zugeführt. Bei dieser Prüfung wird entweder die Auslöseleitung zum Leistungsschalter für die Prüfungszeit unterbrochen, oder aber der Anlageteil spannungslos gemacht und dann der Leistungsschalter mitausgelöst.

Die Sekundärprüfung benutzt man in der Hauptsache bei den Betriebsprüfungen (Seite 273). Die Prüfeinrichtungen dazu werden ebenfalls meist nur einpolig ausgeführt. Sie sind für verhältnismäßig geringe Ströme ausgelegt (etwa 30 A) und daher leicht im Gewicht. Aufbau und Bedienung sind sehr einfach gehalten¹⁾ (vgl. z. B. Abb. 175a und 175b). Stoppuhren und Sekundenmesser finden auch hier Anwendung. Oft be-

¹⁾ Vgl. z. B. L. Rimmack, Siemens-Z. 16 (1936) S. 305.

nutzt man auch zwei- oder dreipolige sekundäre Prüfeinrichtungen. Solche Einrichtungen werden auch in den Laboratorien der Hersteller für Versuchszwecke sowie für Typenprüfungen der Abnehmer benutzt. Über die Prüfung ganzer Relaissätze unter gleichzeitiger Beschickung dieser mit Strom und Spannung sind im Schrifttum weitgehende Angaben gemacht¹⁾.

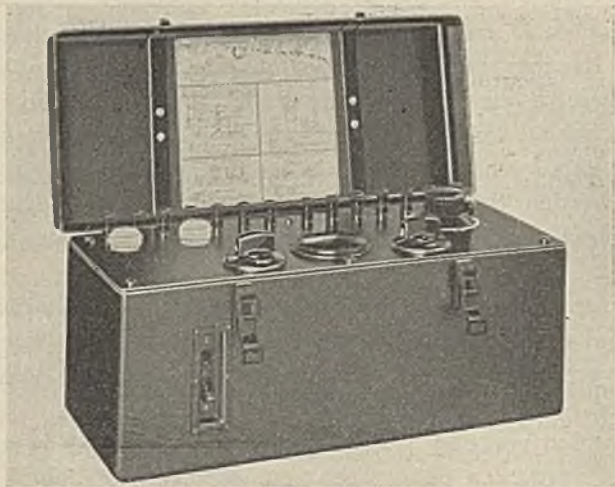


Abb. 175a. Tragbare Prüfeinrichtung von S & H, regelbar bis 30 A.

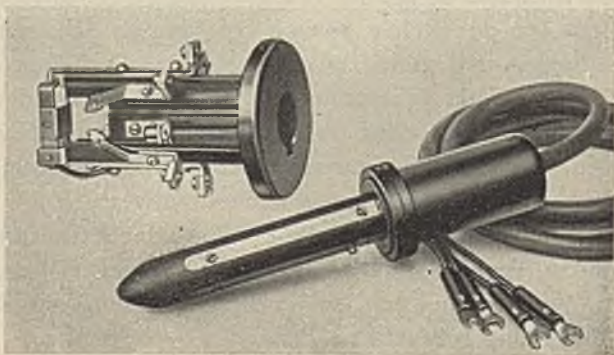


Abb. 175b. Steckhülse mit Prüfstecker der Prüfeinrichtung nach Abb. 175a.

¹⁾ A. Schmolz, ETZ 32 (1931) S. 433; Fr. Parschalk, BBC-Nachr. 22 (1935) S. 41; K. Johannsen, AEG-Mitt. (1939) S. 476; M. Schleicher, Die moderne Selektivschutztechnik, J. Springer, Berlin 1936, S. 228—245.

D. Gesamtüberholung der Relais und die Relaiskartei

1. Gesamtüberholung der Relais

Die Relais sollten im allgemeinen nach mehrjähriger Betriebszeit zur eingehenden Überholung und Nacheichung in eine Relais- oder Zählerwerkstatt gebracht werden¹⁾. Erfahrungsgemäß bedürfen dabei meist die Lager, das Schmieröl und die Kontakte einer gründlichen Überholung.

Die Lager sind im störungsfreien Betrieb gewöhnlich leichten Vibrationen und darüber hinaus bei hohen Kurzschlußströmen oft heftigen Stößen ausgesetzt. Sie können dadurch zu Bruch gehen oder sich stark ausarbeiten, so daß das Spiel im Lager zu groß und folglich die Empfindlichkeit des Relais schlechter wird. Solche Lager müssen gegen neue ausgetauscht werden. Ferner sind Rostbildung und sonstige Schmutzansätze an den Lagerzapfen zu beseitigen und diese danach wieder leicht einzufetten.

Die Schmiermittel in den Lagern und an den Zahnrädern (Steigradzähne und Ankerpaletten) können im Laufe der Zeit leicht verdicken und sogar verharzen, so daß das richtige Arbeiten der Relais in Frage gestellt wird. Durch die Einwirkung von Staub, Licht, Luftsauerstoff und Gasdämpfen von den Tränkungsmitteln der Spulen kann aber auch das beste Öl verdicken oder verharzen. Bei der Überholung der Relais müssen daher die alten Schmiermittel mit Toluol, Benzin oder Trichloräthylen entfernt und anschließend die betreffenden Relaisstellen mit vorgeschriebenem Spezialöl in kleiner Menge (Ölfilm!) versehen werden.

Die Kontakte der Relais können bei öfterem Schalten einer Abnutzung unterliegen und zum Teil Schmelzperlen erhalten. Außerdem können im Laufe der Zeit Verspannungen an den Kontaktfedern sowie an den Kontakteinrichtungen selbst auftreten und die sichere Kontaktgabe beeinträchtigen. Solche Mängel müssen beseitigt werden. Nötigenfalls sind die alten Kontakteinrichtungen gegen neue auszuwechseln.

Schließlich muß bei der Gesamtüberholung der Relais auch der Zustand der Spulen, der Isolierstoffe und Rostschutzmittel (Lack, metallischer Überzug oder dergleichen) sowie die Abdichtung der Relais überprüft bzw. in Ordnung gebracht werden.

Die so überholten Relais werden dann je nach dem Umfang der vorgenommenen Arbeiten einer Nach- oder Neueichung unterzogen. Solche

¹⁾ Vgl. auch M. Schleicher, Die moderne Selektivschutztechnik, J. Springer, Berlin 1936, S. 244.

Eichungen werden zweckmäßig an ortsfesten Prüfständen der Relais- oder Zählerwerkstatt durchgeführt, zumal sich dort im Bedarfsfall (bei wattmetrischen Relais!) auch eine Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung leicht herstellen läßt.

2. Relaiskartei

Einen guten Überblick über den Zustand der Relais oder Schutzeinrichtungen eines Netzes liefert die Relaiskartei¹⁾. Diese ist zur Überwachung der laufend durchzuführenden Relaisprüfungen und u. U. auch für Störungsklärungen unerlässlich. Auf der für jedes Relais oder jede Schutzeinrichtung angelegten Karte (Vordruck) sind der Einbauort, der zu schützende Anlageteil, die Lieferfirma der Schutzeinrichtung, das Lieferjahr, die Garantiezeit, die Angaben über die Strom- und Spannungswandler, die Angaben über die Relais, wie Einstellwerte, Kennlinie und dergleichen, zu vermerken. Zweckmäßig werden auf dem Vordruck auch Hinweise auf Einzelheiten gemacht, die bei der Relaisprüfung besonders beachtet werden sollen, z. B. auf den Zustand des Lageröles, die Bildung von chemischen und physikalischen Veränderungen an Metall- oder Isolierteilen, den Zustand der Gehäuseabdichtungen, der Kontaktflächen, des Kontaktdruckes, den Zustand der Fallklappen und ihrer Rückstellungen, einwandfreies Spiel der Hubmagneten und sonstige Relaislagerungen.

In die Karten werden jeweils die Ergebnisse und die Zeitpunkte der wiederkehrenden Relaisprüfungen sowie etwaige Mängel und Ausbesserungen eingetragen. Wichtig ist, daß die Karten wirklich immer auf dem neuesten Stand gehalten werden.

¹⁾ Siehe auch K. Schneider, Elektrizitätswirtschaft 39 (1940) S. 178.

IX. Störungsklärung und Fehlerortermittlung

Es muß das Bestreben eines jeden Betriebes sein, auftretende Störungen durch Kurzschlüsse, Erdschlüsse oder dergleichen schnell ausfindig zu machen, sie zu beheben und ihre Ursachen zu klären. Die sogenannte Störungsklärung sollte bei den einzelnen EVU möglichst an einer Stelle zusammengefaßt und allein von dieser Stelle durchgeführt werden¹⁾. Dorthin sind alle Berichte der einzelnen Betriebsstellen zu leiten, wo sie zu einem einheitlichen Störungsbericht verarbeitet werden. Gegebenenfalls sind hierzu auch Berichte von den benachbarten EVU einzuholen, wenn deren Netzanlagen an den Störungen mitgewirkt haben bzw. von den Störungen in Mitleidenschaft gezogen wurden. Die mit der Bearbeitung beauftragte Stelle des EVU hat den Verlauf und, soweit möglich, auch die Ursachen und Wirkungen der Störungen zu erforschen. Daraus ergeben sich die notwendigen Folgerungen für Abhilfemaßnahmen, wie Änderung der Relaisstellungen, weitere Ausgestaltung des Schutzes, Änderung der Netzschaltung oder dergleichen.

Ein Störungsbericht muß in der Hauptsache folgende Angaben enthalten:

- a) Schaltzustand des Netzes vor Eintritt der Störung, gegebenenfalls auch der Erdschlußlöscheinrichtungen.
- b) Betriebszustand der Maschinen, die zum Kurzschlußstrom beigetragen haben.
- c) Ort, Ursache und Verlauf der Störung.
- d) Ansprechen und Auslösen der einzelnen Schutzeinrichtungen. Die betroffenen Betriebsmittel und deren Phasenleiter sowie die Auslösezeit der Schutzeinrichtungen sind zu nennen.

Dem Bericht ist ein übersichtliches Störungsschaltbild beizufügen, in dem im wesentlichen die Leitungen, die Schalter in den einzelnen Stationen, die ausgelösten Schalter und der Störungsort gekennzeichnet sind.

¹⁾ Die Ausführungen über die Störungsklärung beziehen sich hier in erster Linie auf das Gebiet der Schutzeinrichtungen mit Relais.

Als besonders geeignete Mittel zur Störungsklä rung gelten die Stel lungsangaben der Schleppzeiger, Fallklappen und Zählwerke, die Auf zeichnungen von Schnellschreibern (Spannungs- bzw. Stromschrei bern mit Umschaltvorrichtungen für verschiedene Papiergeschwindig keiten, Rußschreibern, Mehrfachzeitschreibern), die Schalterauslösungen, die Aufzeichnungen von Frequenzmessern und schließlich eine gut ausgebaute

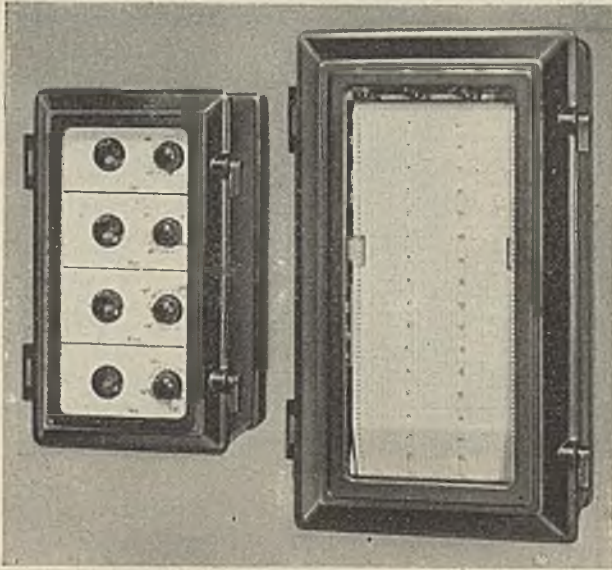


Abb. 176. Dreipoliger Störungsschreiber mit Zusatzgerät (AEG).

Fernmeldung bzw. Fernverständigung. Von diesen Hilfsmitteln wird be reits ausgiebig Gebrauch gemacht. Die Anzeigeeinrichtungen in Form von Fallklappen oder Schleppzeigern sind heute so ziemlich bei allen neueren Schutzrelais vorhanden. Die dreipoligen Spannungs-Schnellschreiber (Abb. 176 und 177) und z. T. auch die Stromschnellschreiber sind in mehreren Ausführungsformen in den Netzen eingebaut¹⁾. Sie haben sich für größere Betriebe als unerläßliche Überwachungsgeräte erwiesen²⁾.

¹⁾ Vgl. W. Brauer, AEG-Mitt. (1937) S. 62; W. Lange, Siemens-Z. 18 (1938) S. 393; W. Hofmann und P. Pflüger, Siemens-Z. 11 (1931) S. 325.

²⁾ Vgl. O. Kautzmann, Elektrizitätswirtschaft 35 (1936) S. 493; V. Aigner, Elektrizitätswirtschaft 30 (1931) S. 598.

Auch die selbsttätige Fernmeldung der Schalterstellungen nach der Zentralbetriebsstelle (Lastverteiler) ist für die Störungsklä rung wertvoll. Bei großen Werken werden für die Störungsklä rung zuweilen auch Fernschreiber zur schnellen und sicheren Verständigung herangezogen.

Von großem Wert ist eine Störungsstatistik. Diese soll einen Überblick über die Anzahl der Unterbrechungen wichtiger Versorgungs-

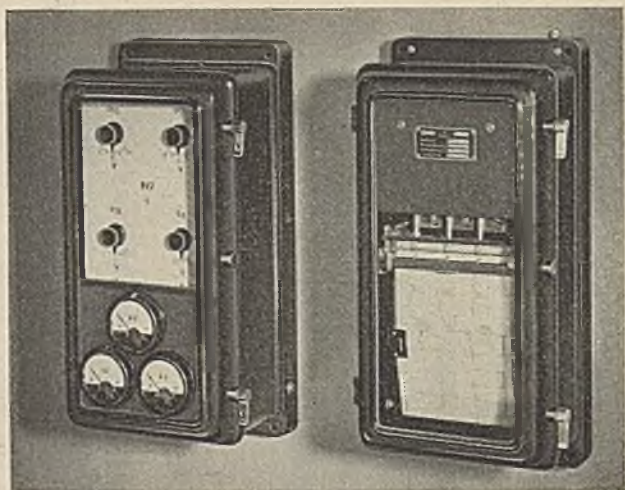


Abb. 177. Dreipoliger Störungsschreiber mit Zusatzgerät (S & H).

anlagen, über das Verhalten der Schutzeinrichtungen und Anlageteile sowie über die Störungshäufigkeit in den Stationen und auf den Leitungsstrecken über einen längeren Zeitraum geben. Daraus lassen sich besonders gefährdete Netzgebiete erkennen und mithin die erforderlichen Gegenmaßnahmen treffen. Eine gewissenhaft geführte Störungsstatistik bringt betriebliche und wirtschaftliche Vorteile und gibt ein zuverlässiges Bild über den Sicherheitsgrad der Anlagen.

Die Ermittlung bzw. Schätzung des Fehlerortes bei Kurzschluß in Freileitungsnetzen erfolgt vornehmlich an Hand der Schleppezeigeranzeige und der (stetigen) Zeitkennlinien von Distanzrelais oder an Hand der Aufzeichnungen von Spannungs-Schnellschreibern¹⁾. In jüngster Zeit wurden Fehlerort-Meßeinrichtungen entwickelt, die den Distanzrelais mit stufenförmigen oder gemischten Zeitkennlinien als Zusatzgeräte beigege-

¹⁾ Vgl. M. Walter, ETZ 52 (1931) S. 1056.

ben werden können. Damit ist ein großer Fortschritt in der Schutztechnik und Störungsklärung erzielt worden.

Die Fehlerortbestimmung für Kurz- und Erdschlüsse mittels besonderer Meßeinrichtungen, die eine betriebsfremde Frequenz oder Gleichstrom-Stoßspannung erforderlich machen, hat wegen des verwickelten Aufbaus und des hohen Aufwandes an Einrichtungen keine nennenswerte Anwendung gefunden. Eine auf Vereinfachung und erhöhte Wirksamkeit hinzielende Weiterentwicklung ist im Gange. Es ist zu wünschen, daß eine praktisch brauchbare Einrichtung bald geschaffen wird.

Manche EVU bedienen sich auch mit Erfolg zur Feststellung des Fehlerortes der Mitarbeit der Bevölkerung, indem sie die fernmündliche Mitteilung Außenstehender über Lichtbogenscheinungen und sonstige Störungen belohnen.

In Kabelnetzen bedient man sich zur Feststellung (Einmessung) des Fehlerortes besonderer Meßbrücken. Die Geräte sowie die Meßverfahren sind so weitgehend durchentwickelt und beschrieben¹⁾, daß sich näheres Eingehen auf diese hier erübrigt.

¹⁾ Siehe z. B. W. Skirl, Elektrische Messungen, 2. Auflage, Walter de Gruyter & Co., Leipzig 1936, S. 637—655; M. Klein, Kabeltechnik, J. Springer, Berlin 1929; Zwilling, Kabelmessungen in Großstadtnetzen, E. und M. 51 (1933) S. 300; F. Kaiser, Elektrizitätswirtschaft 34 (1935) S. 229.

X. Schrifttum

A. Bücher

- Bernett P., Die Bekämpfung des Erd- und Kurzschlusses in Höchstspannungsnetzen, R. Oldenbourg, München 1927.
- Biermanns J., Überströme in Hochspannungsanlagen, J. Springer, Berlin 1926.
- Buchhold Th., Elektrische Kraftwerke und Netze, J. Springer, Berlin 1938.
- Kesselring F., Selektivschutz, J. Springer, Berlin 1930.
- Kyser H., Die elektrische Kraftübertragung, Dritter Band, 3. Auflage, J. Springer, Berlin 1940.
- Oberdorfer G., Der Erdschluß und seine Bekämpfung, J. Springer, Wien 1930.
- Schleicher M., Die moderne Selektivschutztechnik und die Methoden zur Fehlerortung in Hochspannungsanlagen, J. Springer, Berlin 1936.
- Walter M., Selektivschutzeinrichtungen für Hochspannungsanlagen, R. Oldenbourg, München 1929.
- Walter M., Der Selektivschutz nach dem Widerstandsprinzip, R. Oldenbourg, München 1933.
- Walter M., Strom- und Spannungswandler, R. Oldenbourg, München 1937.
- Walter M., Kurzschlußströme in Drehstromnetzen, 2. Auflage, R. Oldenbourg, München 1938.
- Weber H., Der Erdschluß in Hochspannungsnetzen, R. Oldenbourg, München 1936.

B. Zeitschriftenaufsätze

- Binder L., Kurzschlußerwärmung in Kraftwerken und Überlandnetzen, ETZ 37 (1916) S. 585 und 606.
- Bopp E., Die grundsätzliche Bedeutung und der allgemeine Aufbau des Schutzes elektrischer Maschinen, Siemens-Z. 15 (1935) S. 105.
- Bopp E., Der grundsätzliche technische Aufbau der fünf Hauptfehlerüberwachungssysteme des Generatorschutzes, Siemens-Z. 16 (1936) S. 405.
- Bopp E., Vereinheitlichen der Bauformen des Schutzes elektrischer Maschinen, Siemens-Z. 16 (1936) S. 293.
- Bopp E., Der hochempfindliche Gestellschlußschutz für unmittelbar das Netz speisende Generatoren, Siemens-Z. 18 (1938) S. 53.
- Buchholz M., Das Buchholz-Schutzsystem und seine Anwendung in der Praxis, ETZ 49 (1928) S. 1257.
- Bütow W., Erdschlußschutz für Generatoren, Elektrizitätswirtschaft 29 (1930) S. 301.
- Bütow W., Der Einfluß der Induzierung auf die Bemessung von Erdschlußeinrichtungen für Generatoren, die auf Transformatoren arbeiten, Arch. f. Elektrotechnik 22 (1931) S. 177.
- Bütow W., Die Entwicklung des Erdschlußschutzes für Stromerzeuger, AEG-Mitt. (1937) S. 233.
- Calliess H., Die Entwicklung von Schutzeinrichtungen mit Relais für Starkstromnetze, ETZ 59 (1938) S. 1309.

- Denzel P., Falschmeldungen von Erdschlußrelais und ihre Verhütung, AEG-Mitt. (1931) S. 342.
- Feindt H., Einanker-Umformer mit neuzeitlichem Schutz bei Netzstörungen, ETZ 58 (1937) S. 599.
- Fischer R., Erfahrungen mit dem Schutzsystem des Ostpreußenwerkes, ETZ 49 (1928) S. 395.
- Freiberger H., Neuere Versuche über das Verhalten von Einanker-Umformern bei Netzstörungen, VDE-Fachberichte 6 (1934) S. 81.
- Fröhlich F., Spannungsrelais für Wechselstrom, AEG-Mitt. (1939) S. 177.
- Fröhlich F., Prüfung von Schutzrelais, AEG-Mitt. (1939) S. 473.
- Fröhlich F., Abhängige und unabhängige Überstromzeitrelais, ETZ 66 (1939) S. 551.
- Geise F., Der stabilisierte Differentialschutz, Siemens-Z. 12 (1932) S. 413.
- Geise F., Der Schnelldifferentialschutz für Großtransformatoren und die Netzstaffelung, Siemens-Z. 18 (1938) S. 492.
- Geise F., Längsvergleichsschutz mit Impedanzreservezeit als Schutz für große Kabelnetze, Siemens-Z. 18 (1938) S. 446.
- Grünwald H., Die Berechnung dreipoliger Dauerkurzschlüsse in verbundgespeisten Netzen bei Berücksichtigung der Vorbelastungen, ETZ 56 (1935) S. 33.
- Gutmann H., Pendelsperreinrichtungen für schnellarbeitende Distanzrelais, Elektrizitätswirtschaft 39 (1940) S. 14.
- Gutmann H., Verhalten von Reaktanzrelais bei zweiseitig gespeisten Kurzschlüssen, ETZ 61 (1940) S. 541.
- Gutmann H., Aufbau und Wirkungsweise der wichtigsten Distanzrelaissysteme, ETZ 61 (1940) S. 107.
- Hameister G., Die Berechnung des Kurzschlußstromes in Hochspannungsnetzen, ETZ 56 (1935) S. 669.
- Jahn F. und Gutmann H., Der Stromrichtungs-Vergleichsschutz, Elektrizitätswirtschaft 37 (1938) S. 113.
- Jahn F., Schnellarbeitender Differentialschutz, AEG-Mitt. (1940) Heft 7/8.
- Johannsen K., Relaisprüfeinrichtungen, AEG-Mitt. (1939) S. 476.
- Johannsen K., Zur Frage der Überstromziffer von Stromwandlern, Elektrizitätswirtschaft 38 (1939) S. 166.
- Johannsen K., Die Berücksichtigung des Stoßkurzschlußstromes bei der Berechnung der thermischen Kurzschlußfestigkeit, E. u. M. 57 (1939) S. 533.
- Kautzmann O., Der Überstromschutz von Überlandnetzen und die Organisation seiner Überwachung, ETZ 52 (1931) S. 1077.
- Kautzmann O., Über die Verwertung der Aufzeichnungen von Spannungs-Störungsschreibern im Netzbetrieb, Elektrizitätswirtschaft 35 (1936) S. 493.
- Kautzmann O., Der Selektivschutz der 20 kV- und 15 kV-Netze des Badenwerkes, Elektrizitätswirtschaft 36 (1937) S. 421.
- Krohne E., Die Schutzrichtungen in den 30 kV- und 6 kV-Netzen der Berliner Kraft- und Licht (Bewag)-A.-G., Elektrizitätswirtschaft 36 (1937) S. 417.
- Kühn K., Schutzrichtungen in Höchst- und Mittelspannungs-Freileitungsnetzen, Elektrizitätswirtschaft 37 (1938) S. 27 und 107.
- Mayr O., Die Erde als Wechselstromleiter, ETZ 46 (1925) S. 1352 und 1436.
- Mayr O., Einphasiger Erdschluß und Doppelerdschluß in vermaschten Netzen, Archiv f. Elektrotechn. 17 (1926) S. 163.
- Neugebauer H., Stromwandler für Schutzsysteme, Siemens-Z. 11 (1931) S. 147 und 192.
- Neugebauer H., Was ist Streckenschutz?, Siemens-Z. 19 (1933) S. 94.
- Neugebauer H., Streckenschutz mit Hochfrequenz-Verbindung, Siemens-Z. 14 (1934) S. 83.

- Neugebauer H., Grundsaltungen für den Richtungsvergleich beim Streckenschutz, Siemens-Z. 13 (1933) S. 332.
- Neugebauer H., Schnellschaltung beim Selektivschutz, ETZ 55 (1934) S. 181.
- Neugebauer H., Schnellimpedanzschutz RZ₄, Siemens-Z. 16 (1936) S. 272.
- Neugebauer H., Lichtbogenwiderstand und widerstandsabhängiger Zeitstaffelschutz, Elektrizitätswirtschaft 37 (1938) S. 392.
- Neugebauer H., Kennliniengestaltung beim widerstandsabhängigen Staffelschutz, Siemens-Z. 18 (1938) S. 25.
- Neugebauer H., Das Zusammenwirken verschiedener Meßverfahren in neuzeitlichen Selektivschutzeinrichtungen, ETZ 61 (1940) S. 243.
- Parschalk Fr., Transformator- und Sammelschienenschutz durch BBC-Distanzrelais, BBC-Nachr. 19 (1932) S. 107.
- Parschalk Fr., Einbau und Prüfung von BBC-Distanzrelais, BBC-Nachr. 22 (1935) S. 41.
- Parschalk Fr., Das neue stromanzeigende Sekundärrelais Bauart S, BBC-Nachr. 23 (1936) S. 131.
- Parschalk Fr., Das neue Hauptstromrelais Bauart IIB 4 und IIK 4 für höchste Anforderungen, BBC-Nachr. 23 (1936) S. 110.
- Parschalk Fr., Prozent-Differentialrelais, ETZ 57 (1936) S. 278.
- Parschalk Fr., Ein neues BBC-Prüfgerät für Hauptstromrelais, BBC-Nachr. 25 (1938) S. 13.
- Petersen W., Erdschlußströme in Hochspannungsnetzen, ETZ 37 (1916) S. 493 u. 512.
- Poleck H., Der Drehstrom-Reaktanzschutz, Siemens-Z. 12 (1932) S. 386.
- Prinz H., Die neuen Siemens-Buchholz-Relais, Siemens-Z. 16 (1936) S. 298.
- Reiche W., Über die Kurzschlußfestigkeit von Stromwandlern, ETZ 49 (1928) S. 1772.
- Reiche W., Störungen beim Betrieb von Erdschlußrelais im Anschluß an Meßwandler, Arch. f. Elektrotechn. 31 (1937) S. 618.
- Rimmark L., Prüfverfahren für Netzschutzrelais, Siemens-Z. 16 (1936) S. 305.
- Scheu H., Erdschlußschutz für Drehstromgeneratoren, AEG-Mitt. (1940) S. 115.
- Schimpf R., Verhalten des Selektivschutzes beim Außertrittfallen von Kraftwerken, ETZ 54 (1933) S. 1134.
- Schimpf R., Die Entwicklung der schnellschaltenden Schutzsysteme in Amerika, Deutschland, England, Frankreich, Bulletin SEV (1934) S. 336 u. 374.
- Schimpf R., Generatorschutz bei Gegenlauf-Radialturbinen, Siemens-Z. 15 (1935) S. 128.
- Schmohl A., Aus Betriebserfahrungen abgeleitete Verbesserungen am Buchholz-Schutz, VDE-Fachberichte 8 (1936) S. 39.
- Schmolz A., Entwicklung des Kurzschlußschutzes in den 110 kV-Leitungsanlagen der Bayernwerk-A.-G., ETZ 50 (1929) S. 597.
- Schmolz A., Einbau und Kontrolle von Kurzschlußschutzeinrichtungen in 110 kV-Netzen, ETZ 52 (1931) S. 433.
- Schmundt W., Auf dem Wege zum Stufenschutz besonders in Mittelspannungs-Freileitungsnetzen, Elektrizitätswirtschaft 36 (1937) S. 424.
- Schulze E., Erdschlußprobleme in großen Kabelnetzen, Elektrizitätswirtschaft 35 (1936) S. 277 und 298.
- Schwenkhagen H., Der Buchholzschutz und seine Anwendung in der Praxis, VDE-Fachberichte 3 (1928) S. 27.
- Sorge J., Neuerungen auf dem Relaisgebiet, Siemens-Z. 8 (1928) S. 211.
- Sorge J., Das Energierichtungsrelais in Selektivschutzschaltungen, Siemens-Z. 7 (1927) S. 785.
- Stark G., Die Anwendung eines neuartigen Meßgliedes in Schnelldistanzrelais, VDE-Fachberichte 10 (1938) S. 158.

- Stark G., Ein neues Differentialrelais, AEG-Mitt. (1931) S. 148.
- Stark G., Über ein schnellarbeitendes Richtungsglied in Schutzeinrichtungen, AEG-Mitt. (1940) S. 111.
- Szieghart, Der Doppelerdschluß in Hochspannungs-Kabelnetzen und seine Beseitigung durch Distanzrelais, ETZ 55 (1934) S. 928.
- Thewalt A., Einsystemiger Streckenschutz, Siemens-Z. 16 (1936) S. 278.
- Thewalt A., Die Doppelerdschlußfassung beim widerstandsabhängigen Zeitstafel-schutz, Siemens-Z. 18 (1938) S. 355.
- Timaschew A., Die Anzeigen von Strom-Spannungsrelais längs der Leitung beim Außertrittfallen von Synchronkraftwerken, Wiss. Veröffentl. des Siemens-Konzerns 13 (1934) Heft 2.
- Titze H., Erdschluß- und Doppelerdschluß-Stromverteilung in elektrischen Netzen und ihr Einfluß auf den Erdschlußschutz, Dissertation T.H., Berlin; Auszug in ETZ 57 (1936) S. 1031.
- Titze H., Die Bestimmung der Ablaufzeiten von Relais bei veränderlichen Betriebsbedingungen, Elektrizitätswirtschaft 35 (1936) S. 590.
- Titze H., Übersicht über den heutigen Stand des Erdschlußschutzes, ETZ 58 (1937) S. 101.
- Titze H., Die elektrischen Vorgänge auf Kuppelleitungen bei Kraftwerkspendungen, Elektrizitätswirtschaft 33 (1934) S. 475 u. 514.
- Titze H., Planung von Schutzsystemen unter Berücksichtigung mehrerer gleichzeitiger oder kurz aufeinanderfolgender Fehler, VDE-Fachberichte 10 (1938) S. 161.
- Titze H., Die Planung und Bemessung von Schutzeinrichtungen für elektrische Netze, ETZ 61 (1940) S. 471.
- Ulbricht R., Spannungsrückgangsschutz in Industrie-Anlagen, ETZ 58 (1937) S. 763.
- Walter M., Die Entwicklung des Distanzschutzes, VDI-Z. 75 (1931) S. 1555.
- Walter M., Fehlerortbestimmung in Freileitungsnetzen, ETZ 52 (1931) S. 1056.
- Walter M., Kurzschlußlichtbogen in Drehstromnetzen und sein Einfluß auf die Arbeitsweise der Distanzrelais, ETZ 53 (1932) S. 1056.
- Walter M., Über die Richtungsglieder der Distanzrelais, ETZ 53 (1932) S. 476.
- Walter M., Über das Verhalten der Distanzrelais bei Pendelerscheinungen, E. u. M. 50 (1932) S. 261.
- Walter M., Über die Eigenschaften der Stromwandler für Schutzrelais, ETZ 55 (1934) S. 483.
- Walter M., Neue Verfahren beim Überstrom-Zeitschutz, ETZ 55 (1934) S. 206.
- Walter M., Neue Schutzeinrichtung für Hochspannungsmotoren mit großen Anlaufströmen, AEG-Mitt. (1936) S. 357.
- Walter M., Grundsätzliche Betrachtungen über den Netzschutz, Elektrizitätswirtschaft 36 (1937) S. 415.
- Walter M., Über den Schutz von Hochspannungsnetzen mit Relais, Elektrizitätswirtschaft 39 (1940) S. 234.
- Walther G., Schnelldistanzrelais mit gebrochener Kennlinie, AEG-Mitt. (1938) S. 99.

XI. Sachverzeichnis

- Abfallwert 19, 75
Ablaufglied 17, 109, 124
Ablaufzeit 18, 106, 117, 129
Abnahmeprüfung 271
Abnehmeranlagen, Schutz 265
Abschaltzeit 19, 112
Absicherung
 der Spannungswandler 200
 der Gleichstrom-Auslösekreise 210
Achterschutz 155
Addition der Auslösezeiten 128, 132, 254
Anregeglied 17, 97, 116, 124
Anregerelais 17, 97
Ansprechwert 19
Ansprechzeit 18, 97, 103
Anzugswert 19, 74
Arbeitsauslöser 22, 203
Arbeitskontakt (Schließkontakt) 21, 82
Arbeitsstromauslösung 203, 208
Arbeitszeit (Auslösezeit) 18, 130
Auslöseart 202
Auslöseform 202
Auslöser 22, 202
Auslösezeit (Arbeitszeit) 18, 154
Auslösung der Schalter 22
Ausschaltleistung der Kontakte 22
Ausschaltzeit eines Schalters 112

Begriffserklärungen 16
Belastung
 der Stromwandler 184
 der Spannungswandler 197
Betriebsbürde 187, 278
Betriebserde 199
Betriebsimpedanz 90, 92
Betriebsprüfung 273
Blindwiderstand der Leitungen 249

Brandschutz 234
Bürde 23, 184
Bürdenmesser 185
Buchholz-Schutz (Gasfangschutz)
 180, 237
Bütow-Schutz (Erdschlußschutz)
 224, 225, 227

Dauerkurzschlußstrom 33
Differentialschutz 146, 218, 239
Differenzschaltung 135, 139
Distanzschutz 121, 143, 248
Doppelerdschluß 26, 43, 140, 249
Dreiecksspannung 195
Dreipoliger Kurzschluß 26, 35
Dreiwandlerschaltung 140, 167
Drehankermagnet 85
Drehfeldrichtung 272
Drehstromnetze
 mit kurzgeerdetem Sternpunkt 28
 mit nicht kurzgeerdetem Sternpunkt
 28
Dynamischer Grenzstrom 21, 25, 81
Dynamische Kurzschlußfestigkeit 81, 190

Eigenzeit der Relais 18, 97
Einanker-Umformer, Schutz 261
Einbauprüfung 272
Einpoliger Kurzschluß 26, 37
Einschaltstrom, zulässiger 22
Einstellbereich 20
Einstellwert 20
Einsystemiger Distanzschutz 134, 144, 249
Eisenbrand 216, 237
Eisenkern 84, 183, 194
Elektromagnetische Relais 84, 85, 89

- Elektrodynamisches Relais 99
- Endzeit (Grenzzeit) 19
- Erdkurzschluß (Kurzschluß über Erde) 26, 40
- Erdung der Wandler 192, 199
- Erdschluß 26, 49, 161
- Erdschlußrelais 163, 165, 167, 169
- Erdschlußschutz 161, 222, 256
- Erdschlußstrom 54
- Erdübergangswiderstand 43
- Erdwiderstand 48
- Entregung der Maschinen 235
- Erregung der Maschinen 33, 77

- Falschstrom 148, 170, 238
- Fehler
 - Ansprech- 20
 - Abfall- 20
 - Zeit- 20
- Fehlerarten
 - dreipoliger Kurzschluß 26, 35
 - zweipoliger Kurzschluß 26, 37
 - einpoliger Kurzschluß 26, 37
 - Windungsschluß 26, 39, 229
 - Kurzschluß mit Erdberührung 26, 40
 - Erdkurzschluß 26, 40
 - Doppelerdschluß 26, 43, 140
 - Gesellschaftserdschluß 26, 49
 - Erdschluß 26, 49
 - Leiterunterbrechung 59
- Fehlergrenze 20
- Fehlerortermittlung 133, 282
- Fehlerschleife 135
- Fehlerstrom 46, 148
- Fehlwinkel 24, 188, 194
- Ferrarisrelais (Induktionsrelais) 106
- Freileitungen, Schutz 244
- Frequenz 78, 198
- Fünfschenkel-Spannungswandler 137, 163, 198

- Gasfangschutz (Buchholz-Schutz) 180, 237
- Gehäuse von Relais 83

- Generatorschutz 216
- Gesamtüberholung der Relais 280
- Gesellschaftserdschluß 26, 49
- Gestellschluß 222
- Gleichrichterschutz 263
- Gleichstromauslösung 23, 202
- Gleichstrom-Betätigungs-kreise 209
- Grenzleistung der Spannungswandler 24, 200
- Grenzstrom
 - dynamischer 21, 25
 - thermischer 21, 25
- Grenzzeit 19, 128, 130
- Grundzeit 19, 126

- Halteverhältnis 19, 74
- Hilfsauslöser 22, 202
- Hilfsrelais 17
- Hochspannungs-Abnehmeranlagen, Schutz 265
- Hochspannungsnetze 28
- Höchstspannungsnetze 28

- Impedanz (Scheinwiderstand) 252
 - primäre 123, 252
 - sekundäre 123, 252
- Impedanzfremde Spannung 101
- Impedanzrelais 88, 125, 143
- Impedanzschleife 30, 36
- Induktionsrelais 106

- Kabel, Schutz 244
- Kippimpedanz 91
- Klappankermagnet 84
- Kompensation des Erdschlußstromes 57
- Kontakt-druck 21
- Kontakteinrichtungen 21, 81
- Kontaktweg 21, 82
- Kontaktwerkstoff 81
- Kurzschließerrelais 188
- Kurzschluß
 - dreipoliger 26, 35
 - zweipoliger 26, 37
 - einpoliger 26, 37

- satter 29
- über Lichtbogen 29
- Kurzschlußfestigkeit
 - der Stromwandler
 - thermische 190
 - dynamische 190
- Kurzschluß-Lichtbogen 42
- Kurzschluß-Phasenverschiebung 31
- Kurzschlußschleife 122, 135
- Kurzschlußschutz 217, 246
- Kurzschlußstrom 32, 33
- Kurzschlußwechsel 244, 249
- Ladeströme 53
- Laufzeit eines Relais 18
- Längs-Mitnahmeschutz 160
- Längs-Stromvergleichsschutz
 - (Differentialschutz) 146, 218
- Leistungsaufnahme eines Relais 75
- Leistungsrelais 104
- Leistungsrichtung 98
- Leistungsrichtungsrelais
 - (Richtungsrelais) 98
- Leistungsrichtungs-Vergleichsschutz 159
- Leitererdspannung 50, 161, 195
- Leiterunterbrechung 59
- Leiterspannung (Dreieckspannung) 195
- Leiterströme 135
- Leitungen
 - parallele 31, 113
 - Ring- 32, 114, 128, 253
 - Stich- 108, 118, 247
- Lichtbogen 41
- Lichtbogenwiderstand 41, 143
- Löscheinrichtungen 57, 58
- Meßglied 124, 252
- Meßrelais 16
- Messung
 - des Scheinwiderstandes 124
 - des Blindwiderstandes 124
 - des Wirkwiderstandes 124
 - der Sternpunktterdspannung 163, 196, 198
 - des Summenstromes 167
- Meßverfahren 73
- Mitnahmeschaltung 161
- Mittelspannungsnetze 28
- Motorschutz 256, 267
- Nachlaufzeit 18
- Neigung der Zeitkennlinien
 - (Steilheit) 127
- Nennbürde 23, 184, 185
- Nennfrequenz 24
- Nennleistung 24, 184, 197
- Nennspannung 23, 194
- Nennstrom 23, 183
- Nennüberstromziffer 24, 186
- Netzauftrenneinrichtungen 176
- Netzschutz 244
- Netzplan (Relaisplan) 250
- Niederspannungsnetze 28
- Öffnungskontakt 21
- Offener Sekundärkreis bei Stromwandlern 192
- Pendelerscheinungen 61, 174
- Pendelsperreinrichtungen 174, 249
- Phasenverschiebung bei Kurzschluß 31
- Planung (Projektierung) 215, 241, 250
- Polarität der Stromwandler 272
- Polygonschutz 156
- Primärauslöser 22, 73, 105
- Primärimpedanz
 - (Primärscheinwiderstand) 123, 252
- Primärprüfung 275
- Primärrelais 16, 73, 105
- Primärwiderstände 123, 252
- Prüfeinrichtungen 276
- Quer-Stromvergleichsschutz 154
- Quotientendifferentialrelais 150
- Reaktanz (induktiver Blindwiderstand) 251
- Reaktanzrelais 88, 127, 144
- Regeltransformator, Schutz 150

- Relais 16, 72, 105
- Relaisigenschaften 19
- Relaiskartei 281
- Relaiskontakte 21, 81
- Relaissatz 17, 116
- Relaispulen 79
- Remanenzkraft 85
- Reserveschutz 111, 142
- Resistanz (Wirkwiderstand) 251
- Resistanzrelais 146
- Reststrom 57
- Richtungsglied 17, 125
- Richtungsempfindlichkeit 103
- Richtungsrelais 98
- Richtungs-Vergleichsschutz 157
- Ringnetze 32, 114, 128
- Ringwandler 167
- Ruheauslöser 23
- Ruhekontakt (Öffnungskontakt) 21, 82
- Ruhestromauslösung 204, 209
- Rückgangswert 19
- Rückfallzeit 18
- Rücklaufzeit 18

- Sammelschienenschutz 242
- Schalzhäufigkeit, zulässige 22
- Scheinwiderstand (Impedanz) 252
- Schleife:
 - Leiter—Leiter 30, 122
 - Leiter—Erde 44, 48
- Schleifenimpedanz 135, 136
- Schließkontakt 21
- Schnellauslösung 108, 178
- Schnelldistanzschutz 146
- Schnellentregung 234
- Schutzeinrichtung 17, 215
- Schutzerde 199
- Schutzwiderstand 193
- Schwebungen 64, 174
- Sekundärimpedanz 123
 - reaktanz 123
 - resistanz 123
- Sekundärprüfung 278
- Sekundärwiderstände 252
- Sekundenmesser 277

- Selektivität (selektive Erfassung der Fehler) 13, 113, 122, 170
- Spannungsdiagramm 196, 197
- Spannungs-Differentialschutz 154
- Spannungsfehler 24, 194
- Spannungsrelais 87, 119
- Spannungsschnellregler 33, 234
- Spannungsschnellschreiber 283
- Spannungs-Steigerungsschutz 87, 233
- Spannungsverlagerung 50, 197
- Spannungsverteilung bei Kurzschluß 30, 35, 37
- Spannungswandler 193
- Sparschaltungen 134, 256
- Spulen 79
- Stabsstromwandler (Einleiterwandler) 191
- Staffelschutz 18, 108, 113, 114, 121
- Staffelzeit 19, 107, 113, 122, 129
- Sternspannung 50, 195
- Sternpunktterdspannung 50, 162, 196
- Sternschaltung der Stromwandler 140, 169
- Störungsschreiber 283
- Störungsstatistik 284
- Stoßkurzschlußstrom 32
- Stoßkurzschluß-Wechselstrom 34
- Stoßziffer 34
- Strahlennetz 247
- Streuband 20
- Streubereich 20
- Strombegrenzungsregler 33
- Stromfehler 24, 183
- Stromrelais 85
- Stromverteilung bei Kurzschluß 31
- Stromwandler 182
- Stufen-Überstromzeitschutz 117, 247
- Summenstrom 54, 162

- Tauchankermagnet 85
- Temperaturabhängigkeit 77
- Thermische Kurzschlußfestigkeit 80, 190
- Thermischer Grenzstrom 21, 25
- Thermisches Abbild 61, 178

- Thermisches Relais 178
 „Tote Zone“ 103
 Transformatorschutz 236
 Typenprüfung des Bestellers 271
- Überlastung 60, 245
 Überlastungsschutz 177, 233, 267, 268
 Überstrom-Anregeglied 97
 Überstromrelais 86
 Überstromzeitrelais
 abhängige 105
 begrenzt-abhängige 107
 unabhängige 109
 Stufen- 116
 Überstromziffer 185
 Umschaltkontakt 21, 83
 Unsymmetrisch belastetes Drehstrom-
 system 186
 Unterimpedanz-Anregeglied 89, 97
 Unterspannungs-Anregeglied 87, 97
 Unterspannungsrelais 87
 Unterspannungszeitrelais 120, 190, 260
 abhängige 120
 unabhängige 120
 Unterteilung der Sammelschienen
 244, 254
- Verbrauch 20, 75
 Verbundnetze 244, 248
- Verbundrelais 17, 116, 124
 Vergleichsschutz 18, 146, 157, 255
 Vermaschtes Netz 32, 250
- Wärmerelais 178
 Wärmewächter 177
 Wahlkontakt 83
 Wandler 83
 Wandlerstromauslösung 23, 205, 208
 Wartung der Relais 269
 Wechselkontakt 83
 Wechselstromauslösung 23, 204
 Weiterstufung 131
 Windungsschluß 26, 39
 Windungsschlußschutz 229, 232
 Wirkwiderstand (Resistanz) 251
 Wischer 173
- Zeitbegriffe 18
 Zeitfehler 20
 Zeitkennlinie 20
 stetige 126, 127
 stufige 126, 130
 gemischte 126, 132
 Zeitstaffelung 123, 246
 Zeitstaffelschutz 18, 246
 Zweipoliger Kurzschluß 26, 37
 Zwischenstromwandler 139



BG Politechniki Śląskiej

nr inw.: 11 - 13364



Dyr.1 16927