

JULIUSZ WRÓBLEWSKI, MACIEJ GULIŃSKI

ZEOPd - Katowice

WSPÓŁCZESNE ZABEZPIECZENIA  
GENERATORÓW SYNCHRONICZNYCH DUŻEJ MOCY  
I BLOKÓW "GENERATOR-TRANSFORMATOR"

Streszczenie. W artykule omówiono sposoby wykrywania różnych rodzajów uszkodzeń wewnątrz jednostki i poza nią. Sporo uwagi poświęcono również zabezpieczeniom reagującym przy nienormalnych stanach pracy. W zasadzie artykuł dotyczy zabezpieczeń części elektrycznej generatorów i bloków "generator-transformator", zawiera jednak także pewne informacje o powiązaniach z częścią mechaniczno-cieplną.

1. Wprowadzenie

Celem zabezpieczeń przekaźnikowych jest ochrona obiektu przed powstaniem uszkodzeń, a w przypadku gdy nie udało się uniknąć uszkodzenia - zmniejszenie jego rozmiarów do minimum. Zadanie to powinno być zrealizowane w pełni w odniesieniu do generatorów lub bloków generator - transformator. Można zaryzykować twierdzenie, że jednostki prądowców jako elementy drogie, o budowie i pracy skomplikowanej, należy wyposażać w dowolnie rozbudowany, technicznie uzasadniony zespół zabezpieczeń. Koszt tych urządzeń będzie w każdym wypadku niewielki w stosunku do ceny obiektu oraz kosztów remontu i strat przestoju powiększonych wskutek nie dość sprawnie lub czule działającego zabezpieczenia. Zadaniem projektanta jest również znalezienie rozwiązania uwzględniającego sprzeczne czasem interesy producenta i użytkownika. W interesie producenta generatora leży praca w warunkach najbardziej zbliżonych do normalnych, a więc widzi on chętnie jak najszybsze likwidowanie stanów nienormalnych lub wyłączenie generatora przy domniemanym lub niewielkim uszkodzeniu. Interes użytkownika wymaga często pracy generatora w stanie odbiegającym od

normalnego, lub z niegroźnym uszkodzeniem w celu zapewnienia ciągłości zasilania odbiorców i odłożenia ewentualnych remontów na przygotowany i bardziej sprzyjający okres.

Dane techniczne generatorów i ich połączenia z systemem energoelektrycznym uległy w okresie powojennym olbrzymim przeobrażeniom. Generatory starszej konstrukcji były jednostkami przewymiarowanymi, budowanymi przeważnie na moce kilku - kilkunastu MW i napięcia do 6,3 kV. Pracowały z reguły bezpośrednio na szyny zbiorcze w niewielkich często systemach sieciowych. Znacznie mniejsze były również wymagania w zakresie ciągłości dostawy energii tak, że możliwe było (a w ówczesnym stanie urządzeń zabezpieczających nawet celowe) przedwczesne często wyłączenie generatora przy wystąpieniu nienormalności w jego pracy.

Olbrzymi wzrost zapotrzebowania na energię elektryczną zmusił do wykonywania i instalowania coraz większych i bardziej sprawnych jednostek. Związana z tymi wymaganiami konieczność stosowania lepszych materiałów i konstrukcji oraz wzrost wymiarów spowodowały z kolei dążność do maksymalnego wykorzystania materiałów. Znalazło to np. wyraz w szczególnie oszczędnym projektowaniu wirników generatorów, co jak wynika z późniejszych omówień wpłynęło na zwiększenie ich awaryjności i w konsekwencji rozbudowanie zespołu zabezpieczeń tej części generatora.

Przeobrażenia te doprowadziły do powstania typowej jednostki prądoworczej. Jest nią blok generator - transformator o mocy co najmniej 50 MW i napięciu powyżej 10 kV pracujący w układzie blokowym na sieć o napięciu znamionowym co najmniej 110 kV. Potrzeby własne jednostki zasilane są z odzepu generatora poprzez transformator o napięciu wtórnym 6 kV. Transformator ten nie posiada wyłącznika po stronie napięcia generatorowego.

W dalszym ciągu rozważań omówione zostaną zespoły zabezpieczeń elektrycznych tego rodzaju jednostek blokowych.

## 2. Omówienie zabezpieczeń

Zabezpieczenia generatorów i bloków generator - transformator, przyjęło się dzielić na trzy podstawowe grupy. Po-dział wynika z zakresu działania poszczególnych zabezpieczeń i roli jaką spełniają one w procesie eksploatacji.

Do grupy 1 zalicza się zabezpieczenia reagujące przy uszkodzeniach wewnątrz urządzeń, do grupy 2 - zabezpieczenia

reagujące przy zwarcjach zewnętrznych i do grupy 3 - zabezpieczenia reagujące przy nienormalnych stanach pracy, groźnych dla zabezpieczanego urządzenia lub powiązanego z nim układu elektroenergetycznego.

W tym właśnie porządku omówimy poszczególne zabezpieczenia, mając na uwadze w zasadzie bloki generator - transformator, jako układy typowe dla jednostek dużej mocy.

### 2.1. Zabezpieczenia reagujące przy uszkodzeniach wewnętrznych

Przeznaczenie tej grupy zabezpieczeń jest oczywiste. Chodzi o ograniczenie do minimum skutków ewentualnych uszkodzeń przez szybkie wyłączenie bloku i wygaszenie strumienia magnetycznego generatora.

Łączny zakres działania zabezpieczeń tej grupy powinien obejmować wszystkie możliwe rodzaje uszkodzeń wewnątrz generatora oraz na jego zaciskach wyjściowych i wyprowadzeniach. W przypadku bloków generator - transformator zasięg zabezpieczeń musi być rozszerzony na transformator blokowy i na transformator odczepowy potrzeb własnych, gdyż nie jest on najczęściej wyposażony w wyłącznik od strony generatora.

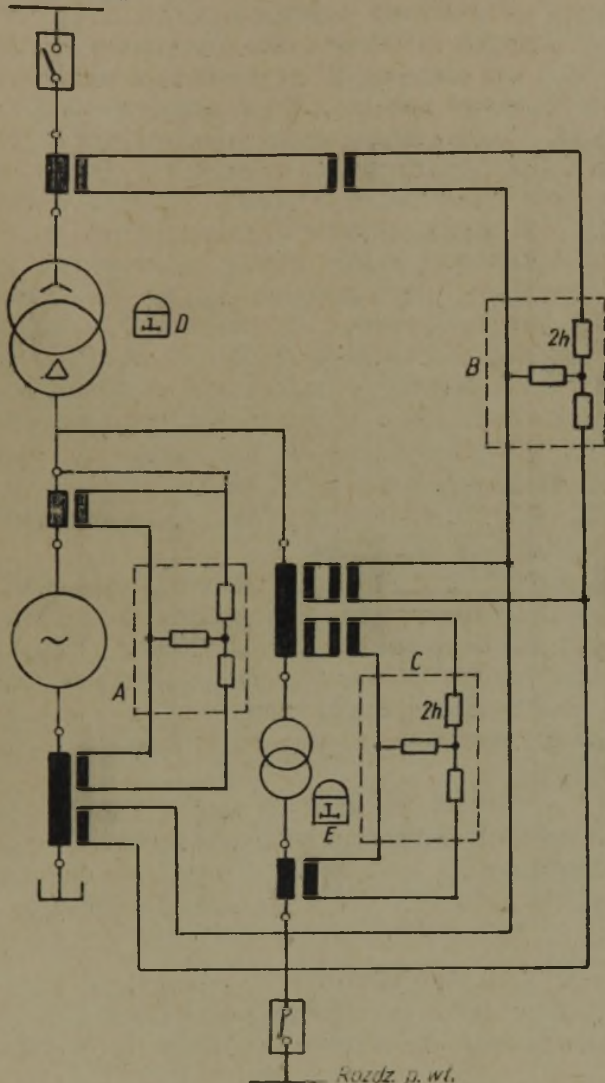
Skład omawianej grupy jest już od pewnego czasu ustabilizowany. Zmiany dotyczą raczej środków technicznych niż zasad. W tabelicy 1 zabezpieczenia zostały usystematyzowane w zależności od rodzajów zakłóceń, na które mają reagować jako zabezpieczenia podstawowe. Omówmy bliżej poszczególne zabezpieczenia.

Zabezpieczenie różnicowe wzdłużne generatora. Zabezpieczenie różnicowe wzdłużne porównuje wartości prądów poszczególnych faz przed i za zabezpieczanym obiektem. W normalnym stanie prądy te są sobie równe, a ich różnica równa zeru. W przypadku generatorów porównywane są prądy poszczególnych faz w punkcie gwiazdowym i na wyprowadzeniach do transformatora blokowego (rys.1A). Zabezpieczenie to reaguje na zwarcia międzyfazowe w uzwojeniach stojana (z wyjątkiem mało prawdopodobnych zwarć w pobliżu punktu gwiazdowego), zwarcia międzyfazowe na zaciskach wyjściowych i na części połączeń generatora z transformatorem blokowym. Stosowane są zazwyczaj przekaźniki stabilizowane (niewrażliwe na ewentualne uchyby przekładników prądowych), choć ze względu na stosunkowo łatwe warunki pracy (niskie krotności prądów przy zwarcjach zewnętrznych), niezłe rezultaty dają zwykłe przekaźniki prądowe. Wg polskich przepisów zabezpieczenia różnicowe generatora są instalowane niezależnie od zabezpieczeń różnicowych bloku, obejmujących swym zasięgiem także i generator.

Zabezpieczenia regulujące przy zwarciaach wewnętrznych

Lp.	Rodzaj swarc	Rodzaj zabezpieczenia	Ogólna charakterystyka zabezpieczenia	U w a g i
1.	Zwarcia międzyfazowe w generatorze i osłdci wy-prowadzeń	Różnicowe wzdłużne gen.	Stabilizowane lub nie	
		Różnicowe wzdłużne bloku	Stabilizowane niewrażliwe na udary prądów magnesujących	
2.	Zwarcia międzyfazowe i międzyfazyowe w transformatorze bloku	Różnicowe poprzeczne genera-tora	Pełne lub uproszczone, reagujące na prąd wyrównawczy między punktami gwiazdowymi obu uzwojeń równoległych	W generatorach bliźniaczych lub posiadających gał. równoległ. w uswo-żeniu stojana
		Podm. gazowe transformatora blokowego	Reagują na gwałtowny przepływ oleju z kadzi do transformatora i przy znacznej obniżce poziomu oleju	
3.	Zwarcia międzyfazowe i międzyfazyowe w transformatorze potrzeb własnych	Różnicowe transformatora potrzeb własnych	Stabilizowane, niewrażliwe na udary prądów magnesujących	Są one stosowane z zabezpieczenia prostsze
		Podmuchowo-gazowe transformatora p.wł.	Patrz wyżej pl.	
4	Zwarcia międzyfazowe na powiązaniach między gen. transf. blok. i transf. p.wł.	a) Różnicowe generatora (oszczędniowo)	Patrz wyżej p. 1 i p. 3	Łącznie objęte są wszystkie powiązania
		b) Różnicowe wzdłużne bloku (oszczędniowo)		
		c) Różnicowe transf. p.wł. (oszczędniowo)		
5	Zwarcia międzyfazyowe i międzyuzwojeniowe w generatorze	a) Różnicowe poprzeczne gen.	Patrz wyżej p. 1	W generatorach bliźniaczych lub posiadających gał. równoległe w uswo-żeniu stojana
		b) Specjalne zabezpieczenia reag. przy zwarciaach międzyuzwojeniowych	Reagują na składową zerową napięć fazowych generatora	Nie obowiązujące
6	Zwarcia z ziemią w stojanie generatora, na powiązaniach z transformatorami oraz w uzwojeniach pierwotnych transformatorów	Tak zwane ziemnozwarcia	W generatorach pracujących w bloku zabezpieczenia te reagują najczęściej na składową zerową napięć faz generatora względem ziemi	Stosowane bywają układy pozwalające objąć całość uzwojeń generatora
7	Podwójne zwarcia z korpusem w obwodzie wzbudzenia	a) Specjalne zabezpieczenie reagujące przy powstaniu drugiego doziewienia w uzwojeniu wirnika	Układy mostkowe zrównoważone przy pierwszym doziewieniu	Zabezpieczenia przylęczone są po wystąpieniu pierwszego doziewienia

Rozdz. sieciowa



Rys.1. Układ zabezp. różnicowych bloku

Zabezpieczenie różnicowe wzdłużne bloku generator - transformator (rys.1, B) obejmuje swym zakresem działania zwarcia międzyfazowe w stojanie generatora (z wyjątkiem okolicy punktu gwiazdowego), zwarcia międzyfazowe na zaciskach generatora, na powiązaniach między generatorem i transformatorem blokowym i na części powiązań z transformatorem potrzeb włas-

nych. Wewnątrz transformatora blokowego ujmowane są zwarcia międzyfazowe strony pierwotnej i wtórnej oraz silne zwarcia międzyzwojowe; po stronie wtórnej zabezpieczenie ujmuje także zwarcia międzyfazowe na części wyprowadzeń transformatora, a w przypadku uziemionego punktu gwiazdowego sieci, również zwarcia jednofazowe. W zabezpieczeniu różnicowym bloku muszą być stosowane normalne przekaźniki różnicowe, przewidziane dla dużych jednostek transformatorowych, to jest stabilizowane i niewrażliwe na udary prądów magnesujących.

W procesie sprowadzania prądów strony pierwotnej i wtórnej do wspólnej wartości, porównywanej następnie przez przekaźniki, powstają zazwyczaj pewne uchyby, uwydatniające się szczególnie przy zwarciach zewnętrznych. Co prawda, najistotniejsza przyczyna uchybów - zmienność współczynnika transformacji transformatora - w przypadku transformatorów blokowych nie występuje, gdyż nie są one zazwyczaj wyposażone w przełączniki zaczepów pod obciążeniem. Mimo to stosowanie przekaźników stabilizowanych jako znacznie pewniejszych jest całkowicie uzasadnione.

W transformatorach blokowych mogą także występować udary prądów magnesujących, mimo iż transformatory te nie są w zasadzie łączone wprost na pełne napięcie. Udary powstają przy wyłączaniu bliskich zwarć, a nawet przy gwałtownym wzbudzeniu generatorów. Prądy magnesujące zamykają się po stronie wtórnej przez obwody różnicowe i przekaźnik musi je odróżnić od prądów zwarciovych.

Najprostsze i najstarsza ze znanych metod "odstrajania" przekaźników różnicowych transformatorów od udarów prądów magnesujących - opóźnienia działania - jest nie do przyjęcia dla dużych jednostek. Stosuje się więc metody bardziej doskonałe:

1. Wykorzystanie jako kryterium rozpoznawczego aperiodycznej składowej udarowych prądów magnesujących, zanikającej znacznie wolniej, niż składowa aperiodyczna prądów zwarciovych.

2. Wykorzystanie 2-harmonicznej, występującej obficie w udarowych prądach magnesujących, a skąpo w prądach zwarciovych.

Na metodzie pierwszej bazują szeroko rozpowszechnione przekaźniki z przekładnikami szybko nasycającymi się oraz przekaźniki z układami rezonansu mechanicznego. Z winy metody nie zapewniają one jednak ani szybkości działania, ani bezwzględnej nieczułości na udary prądów magnesujących. Be-

dania lat ostatnich wykazały bowiem, iż możliwe są przypadki, co prawda statystycznie rzadkie, gdy w udarowych prądach magnesujących składowa aperiodyczna nie występuje. Dlatego też coraz szersze rozpowszechnienie znajdują przekaźniki konstruowane wg metody drugiej.

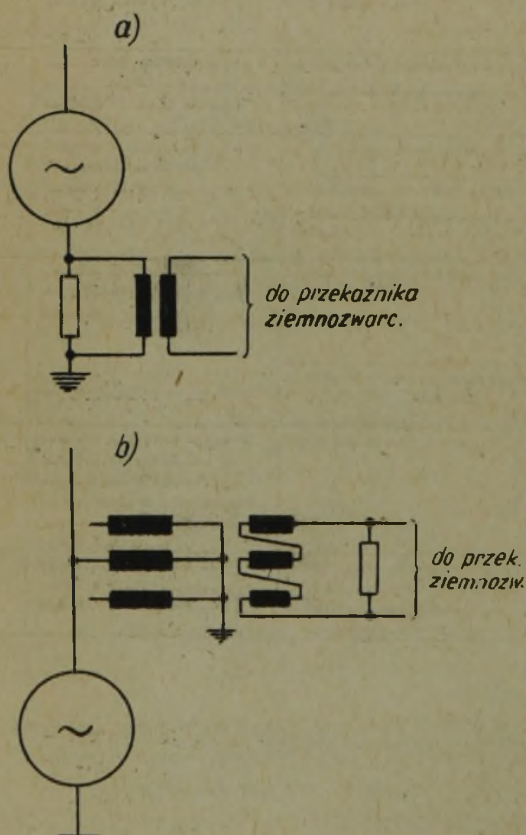
Zabezpieczenie różnicowe transformatora potrzeb własnych (rys.1, C). Objęcie transformatora potrzeb własnych zabezpieczeniem różnicowym bloku jest w zasadzie możliwe, w praktyce jednak nie znajduje u nas zwolenników. Powodem tego jest niewystarczająca wartość współczynnika czułości dla zwarć po stronie wtórnej transformatora potrzeb własnych. Prądy zwarciovowe mogą być tam nawet mniejsze od prądów nominalnych generatora i transformatora blokowego, do których przecież musiały by być dostosowane nastawienia zabezpieczenia. Stosowanie oddzielnego zabezpieczenia różnicowego transformatora potrzeb własnych znajduje więc pełne uzasadnienie, tym bardziej, iż przekładniki prądowe instalowane być muszą także z innych względów. Zakres działania tego zabezpieczenia: zwarcia międzyfazowe i międzyzwojowe wewnątrz transformatora, zwarcia międzyfazowe na części doprowadzeń od generatora i części wyprowadzeń strony wtórnej. Pożądane są w tym zabezpieczeniu przekaźniki stabilizowane i odstrojone od udarów prądów magnesujących, choć stosowane bywają również rozwiązania prostsze.

Zabezpieczenia podmuchowo-gazowe (2 stopień) transformatora blokowego i transformatora potrzeb własnych (rys.1 D,E). W przekaźniki podmuchowo-gazowe wyposaża się wszystkie transformatory dużej mocy. Posiadają je także transformatory blokowe i transformatory potrzeb własnych. Zakres działania tych zabezpieczeń: wszystkie rodzaje zwarć wewnątrz kadzi transformatora, a ponadto także uszkodzenia, jak nagłe wycieki oleju, silne lokalne przegrzania itp. Stosowane winny być wypróbowane konstrukcje przekaźników, pozwalające na ilościową kontrolę szybkości przepływu oleju z kadzi do konserwatora (cechowanie w cm/sek).

Zabezpieczenie ziemnozwarciowe stojana generatora. Doziemienia w uzwojeniach stojana należą niewątpliwie do uszkodzeń statystycznie najczęstszych, będąc równocześnie punktem wyjściowym do uszkodzeń dalszych. Dlatego też zabezpieczeniom ziemnozwarciowym poświęca się wiele uwagi. Rozwiązania tych zabezpieczeń, w odróżnieniu od innych zabezpieczeń omawianej grupy, w zasadniczy sposób zależą od układu pracy generatora.

W przypadku generatorów pracujących bezpośrednio na szyny zbiorcze podstawowym problemem jest rozróżnienie zwarcia z ziemią w sieci od zwarcia z korpusem w uzwojeniu stojana.

Stosowane są układy bazujące na rozpiływach prądów doziemnych, na rozpiływach ich składowych biernych lub naturalnych składowych czynnych, pochodzących ze stratności izolacji i strat w urządzeniach kompensujących, a także układy bazujące na rozpiływach sztucznie uzyskiwanych czynnych prądów doziemnych. W charakterze filtrów składowej zerowej prądu stosowane są układy Holmgreena i przekładniki Ferrantiego. W aparaturze przekąźnikowej występują czułe przekąźniki prądowe lub przekąźniki kierunkowe. Rozmaitość układów jest duża i omówienie ich przekracza ramy niniejszego opracowania, poświęconego w zasadzie zabezpieczeniom dużych jednostek, pracujących z reguły w układzie blokowym.



Rys.2. Sposoby zasilania zabezpieczeń ziemnozwarciowych bloku

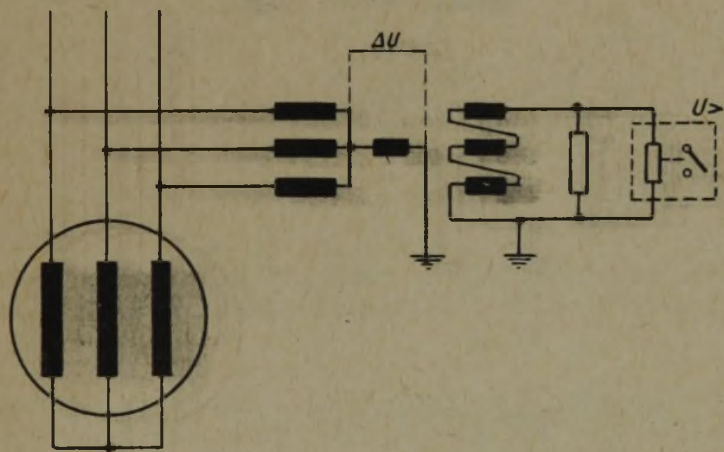
W układach blokowych, generatory nie są galwanicznie powiązane z siecią, stąd też uzyskanie selektywności działania zabezpieczeń ziemnozwarciowych jest znacznie łatwiejsze. Jeśli tylko wpływ pojemnościowego oddziaływania sieci WN na uzwojenie stojana generatora zostanie należycie ograniczony, np. drogą uziemienia punktu gwiazdowego przez odpowiednio dobrane opory, dostatecznym kryterium zwarcia z korpusem staje się wzrost napięcia punktu gwiazdowego względem ziemi. Rolę zabezpieczenia ziemnozwarciowego spełniać więc może prosty układ (rys.2), w którym główną rolę odgrywa zwykły przekąźnik nadmiarowo-napięciowy. Obejmuje on swym zasięgiem uzwo-

zenia stojana, powiązania generatora z transformatorami oraz



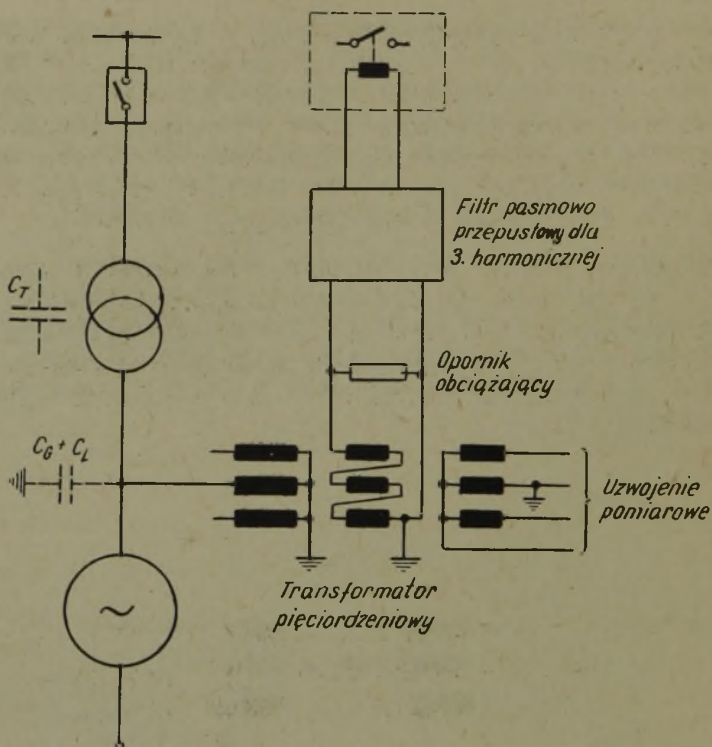
uzwojenia pierwotne transformatorów. Oczywiście, układ taki nie może obejmować 100% uzwojeń stojana. Nie jest to wada zasadnicza, gdyż uszkodzenia izolacji w okolicach punktu gwiazdowego są mało prawdopodobne. Mimo to istnieje cały szereg rozwiązań rozszerzających zakres działania zabezpieczeń ziemnozwarciowych na całość uzwojeń stojana. Bazują one z reguły na którejś z następujących zasad:

1. Potencjał punktu gwiazdowego jest sztucznie przesunięty i to w ten sposób, iż doziemienie jakiegokolwiek punktu uzwojeń zmienia stan poprzedni. Przesunięcie może być uzyskane zarówno drogą przyłożenia dodatkowego napięcia zmiennego (rys.3) o odpowiedniej wartości i fazie, jak i pewnego napięcia stałego.



Rys.3. Układ zabezpieczenia ziemnozwarciowego obejmującego 100% uzwojenia stojana

2. Kontrolowane są wartości napięcia 3-harmonicznej względem ziemi (np. układ przedstawiony na rys.4). W stanie normalnym poziom ich jest znacznie wyższy w punkcie gwiazdowym niż na zaciskach wyjściowych, obciążonych pojemnościami wyprawodzeń i uzwojeń pierwotnych transformatorów (w punkcie gwiazdowym pojemności są znacznie mniejsze). W przypadku doziemienia w okolicach punktu gwiazdowego poziom napięć 3 harmonicznej rośnie osiągając pełną wartość napięcia 3 harmonicznej faz generatora.

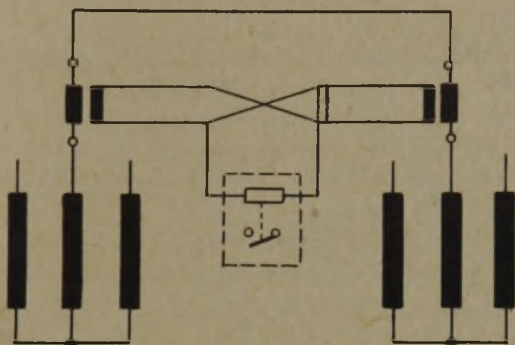


Rys.4. Układ zabezpieczenia ziemnozwarciowego generatora, reagującego przy zwarciach w pobliżu punktu gwiazdowego

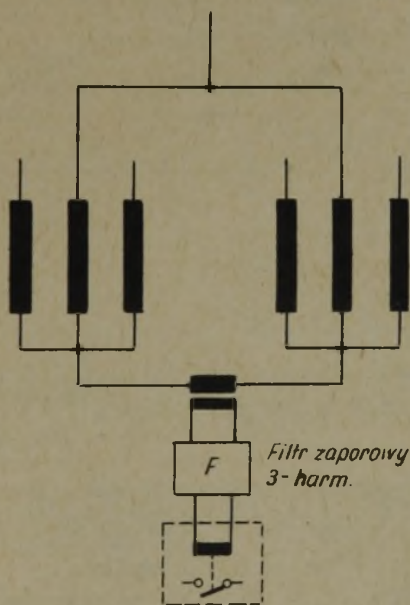
Zabezpieczenie różnicowe poprzeczne generatora. Zabezpieczenia te realizowane być mogą w generatorach bliźniaczych lub w generatorach posiadających równoległe gałęzie w uzwojeniu stojana. Pełne zabezpieczenia różnicowe poprzeczne kontrolują różnicę wartości prądów w poszczególnych gałęziach każdej z faz z osobna, normalnie równą zero (rys.5). Wykonanie pełnych zabezpieczeń poprzecznych jest kłopotliwe, dlatego też częściej stosowane są układy uproszczone, kontrolujące prądy wyrównawcze między obydwoma punktami gwiazdowymi (rys.6), lub też napięcia między nimi.

W zakres działania tego rodzaju zabezpieczeń wchodzi: zwarcia międzyzwojowe, zwarcia międzyfazowe i międzyuzwojeniowe\*) (z wyjątkiem zwarć w pobliżu punktu gwiazdowego i zacisków wyjściowych generatora), przerwy w uzwojeniach, występujące czasem np. na połączeniach czołowych.

\*) Gdy uzwojenia stojana składają się z dwóch gałęzi równoległych.



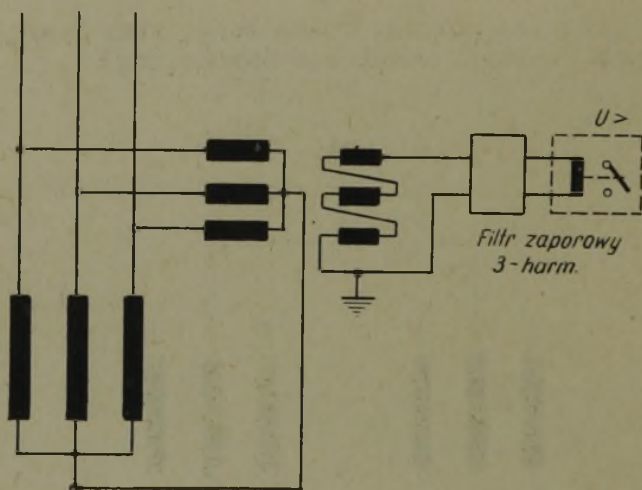
Rys.5. Układ połączeń zabezp. reagującego przy zwarcjach zwojowych (zabezp. różnicowe poprzeczne)



Rys.6. Układ połączeń zabezpieczenia reagujący przy zwarcjach zwojowych

Przekładniki muszą być wyposażone w filtry zaporowe dla trzeciej harmonicznej.

Specjalne zabezpieczenia reagujące przy zwarciach międzyzwojowych. Dla uchwycenia zwarć międzyzwojowych w generatorach posiadających pojedyncze uzwojenia stojana instalowane są specjalne zabezpieczenia. Bazują one na składowej zerowej napięcia odniesionej do napięć fazowych generatora. Do pomiaru tego napięcia służą przekładniki napięciowe na wyjściu generatora, połączone w gwiazdę, przy czym ich punkt gwiazdowy połączony jest z punktem gwiazdowym generatora (rys.7).



Rys.7. Układ połączeń zabezpieczenia reagującego przy zwarciach międzyzwojowych

Przekładnik nadmiarowo-napięciowy przyłączony jest za pośrednictwem filtru zaporowego dla 3 harmonicznej do otwartego trójkąta po stronie wtórnej przekładników.

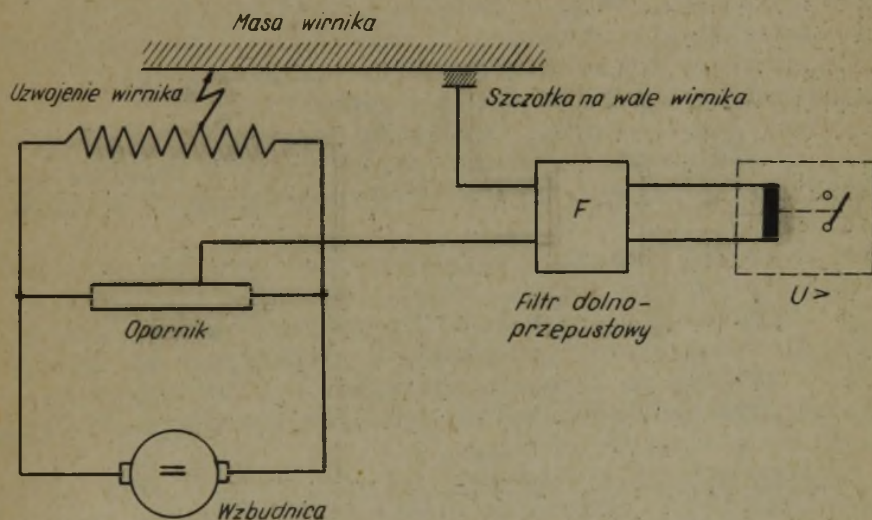
Celowość stosowania tego rodzaju zabezpieczeń jest problematyczna, gdyż zwarcia międzyzwojowe w generatorach są mało prawdopodobne, a w dużych jednostkach w ogóle wykluczone.

Zabezpieczenie reagujące przy dwupunktowych uszkodzeniach izolacji w obwodzie wzbudzenia. O ile pojedyncze doziemienia w obwodzie wzbudzenia nie wpływają na pracę generatora i są w eksploatacji traktowane jedynie jako nienormalne stany pracy\*) o tyle podwójne zwarcia z korpusem są bardzo groźne

\*) Z wyjątkiem dużych hydrogeneratorów (patrz pkt 2.3).

i mogą prowadzić do poważnych uszkodzeń zarówno natury elektrycznej jak i mechanicznej (silne wibracje spowodowane asymetrią pola magnetycznego).

Dla umożliwienia doraźnej eksploatacji generatorów z jednopunktowym doziemieniem instalowane są specjalne zabezpieczenia oparte na zasadzie mostkowej (rys.8). Gałęziami mostka są: uzwojenie wzbudzenia generatora i równolegle przyłączony specjalny opornik. W przekątnej mostka tj. między punktem o uszkodzonej izolacji (masą wirnika) i odpowiadającym mu pod względem podziału oporności punktem opornika, włączony jest przekaźnik napięciowy o odpowiednio dobranej oporności i czułości.



Rys.8. Układ połączeń zabezpieczenia reagującego przy podwójnych zwarcjach w wirniku gen.

Uszkodzenie izolacji w drugim punkcie niweczy równowagę mostka i powoduje pobudzenie przekaźnika. Układ posiada ograniczoną czułość, określającą % chronionych zwojów, zależną w dodatku od miejsca, w którym wystąpiło pierwsze uszkodzenie (im bliżej początków uzwojenia wirnika, tym mniejszą jest czułość). Pamiętać należy, iż mostek zostaje wstępnie zrównoważony jedynie dla prądu stałego i ogólnie biorąc, należy się spodziewać zachwiania jego równowagi w stanach nieustalonych (rozkład indukcyjności wzdłuż uzwoje-

nia wirnika nie pokrywa się z rozkładem oporności czynnej). Dlatego też przekątnik musi być przyłączony za pośrednictwem filtrów, wykluczających jego pobudzenie pod wpływem składowej zmiennej.

## 2.2. Zabezpieczenia reagujące przy zwarcjach zewnętrznych

Zabezpieczenia tej grupy mają za zadanie ochronę generatora przed skutkami nie wyłączonych zwarcz zewnętrznych. W stosunku do obiektów powiązanych z szynami zbiorczymi, które zasila generator, są one zabezpieczeniami rezerwowymi. W stosunku do szyn zbiorczych - rezerwowymi lub podstawowymi, w zależności od tego, czy specjalne zabezpieczenie szyn zbiorczych jest zainstalowane czy też nie. Wymaga się również, by co najmniej jedno z zabezpieczeń tej grupy rezerwowało zabezpieczenia reagujące przy zwarcjach międzyfazowych wewnątrz jednostki prądowłórczej. Równocześnie, zabezpieczenia muszą być w miarę możliwości niewrażliwe na przeciążenia, zapewniając należytą pewność ruchową jednostek.

Tak więc, zakresem swego działania omawiane zabezpieczenia powinny obejmować wszystkie rodzaje zwarcz w najbliższych odcinkach linii i innych urządzeniach przyłączonych do szyn zbiorczych.

Zabezpieczenia reagujące przy zwarcjach zewnętrznych komplikowały się w miarę rozwoju sieci. Uzyskanie niezbędnego zasięgu (końce najdłuższych linii) przy równoczesnej niewrażliwości na przeciążenia było coraz to trudniejsze do zrealizowania. W tablicy nr 2 podano zestawienie stosowanych zabezpieczeń usystematyzowanych wg rodzajów zwarcz zewnętrznych, dla których są one przewidziane.

Zabezpieczenia nadmiarowo-prądowe niezależne dawały zadowalające rezultaty w przypadku niewielkich jednostek pracujących - bez powiązania z systemem na sieci lokalne. Wzrost generowanych mocy, przejście na układy blokowe, rozwój sieci i jej powiązanie w jednolity system przy równoczesnym wzroście wymagań co do pewności zasilania zmieniły sytuację w sposób zasadniczy. Dziś zabezpieczenia takie stosowane są wyłącznie dla bardzo małych jednostek.

Zabezpieczenia nadmiarowo-prądowe niezależne z blokadą napięciową są znacznie pewniejsze ruchowo, gdyż wprowadzenie kryterium napięciowego pozwala na precyzyjniejsze odróżnienie stanów zwarcziowych od przeciążeń, nawet przy niższym nastawieniu przekątników prądowych. Osiągalne zasięgi zabezpieczenia zwiększyły się przy tym nieznacznie.

Tablica 2

## Zabezpieczenia reagujące przy zwarciach zewnętrznych

Ip.	Rodzaj zwarć	Rodzaj zabezpieczenia	Ogólna charakterystyka zabezpieczenia
1	Zwarcia 3-faz.	1) Zabezpieczenie nadmiarowo-prądowe z niezależnym opóźnieniem w działaniu 2) Zabezpieczenie nadmiarowo-prądowe z niezależnym op. i blokadą napięciową 3) Zabezpieczenie odległościowe	a) Trudności w uzyskaniu wymaganego zasięgu b) Błędne działanie w przypadku uszkodzenia w układzie reg., wzbudzenia i przy celowym forsowaniu wzbudzenia  Jak wyżej w p.a)  Dość duży zasięg, choć często nie wystarczający
2	Zwarcie 2-faz.	Jak wyżej i dodatkowo: 4) Zabezpieczenie nadmiarowo-prądowe z niezależnym op. reagujące na składową pręciwną prądu	a) Dostatecznie duży zasięg; nie reagują jedynie przy rzadkich zwarcjach symetrycznych (3-fazowych) b) Wydajne, proste, godne polecenia
3	Zwarcia 1-faz. 2-faz. z ziemią (w sieciach z uziemnionym punktem gwiazdowym)	Jak wyżej i dodatkowo: 5) Zabezpieczenie nadmiarowo-prądowe z niezależnym opóźnieniem, reagujące na składową zerową prądu, w przypadku gdy punkt gwiazdowy transformatora blokowego jest uziemiony	Dostateczny duży zasięg, lecz duże ograniczenie co do rodzajów zwarć

W naszej praktyce omawiane zabezpieczenia są obowiązujące, traktuje się je jednak jako rezerwowe w stosunku do zabezpieczeń reagujących przy zwarcjach wewnętrznych (dlatego też przekładniki prądowe umieszcza się w punkcie gwiazdowym generatora) oraz jako rezerwowe w stosunku do innych zabezpieczeń tej grupy. Do wyłącznej kompetencji zabezpieczeń nadprądowych z blokadą napięciową pozostawia się co najwyżej niewyłączone zewnętrzne zwarcia 3-fazowe i coraz rzadziej, 2-fazowe.

Zabezpieczenia odległościowe pozwalają zwiększyć zasięgi w porównaniu do zabezpieczeń nadmiarowo-prądowych z blokadą napięciową, jednak w przypadku dużych mocy generowanych i silnych powiązań systemowych uzyskanie rezerwowania dłuższych linii jest nadal niemożliwe. Ujmować mogą wszystkie rodzaje zwarć, łącznie z trójfazowymi, dla których pozwalają uzyskać zasięgi niedostępne dla innych zabezpieczeń. W naszej praktyce są stosowane rzadko i raczej jako podstawowe zabezpieczenia szyn zbiorczych w przypadkach, gdy nie są instalowane specjalne zabezpieczenia szyn np. różnicowe.

Zabezpieczenia zerowo-prądowe niezależne zainstalowane po stronie WN transformatora blokowego z uziemionym punktem gwiazdowym pozwalają uzyskać znaczne zasięgi i są niewrażliwe na stany przeciążeniowe. Znajdują one powszechne zastosowanie ze względu na prostotę i skuteczność (zwarcia z udziałem ziemi są bowiem prawie wyłącznymi rodzajami zwarć w sieciach najwyższych napięć). Jedynym mankamentem jest wrażliwość na ewentualne wady w działaniu aparatury łączeniowej (niezamknięcie jednej z faz wyłącznika), co zmusza do ostrożnych nastawień i nie pozwala na pełne wykorzystanie teoretycznie możliwych zasięgów.

Zabezpieczenia reagujące na składową przeciwną prądu działające z opóźnieniem (niezależnym) są niewrażliwe na przeciążenia i pozwalają uzyskać znaczne zasięgi przy zwarcjach 2-fazowych, 2-fazowych z ziemią i 1-fazowych. Ich zakres działania jest więc większy niż zabezpieczeń zerowo-prądowych, co predystynuje je do szerokiego stosowania. W naszej praktyce są one jednak dotychczas stosowane sporadycznie. Wyjaśnić warto, iż na składową przeciwną prądu połączone są także zabezpieczenia reagujące przy asymetrii obciążeń generatorów (patrz pkt 2.3). Posiadają one jednak zazwyczaj charakterystyki czasowo zależne (odpowiadające krzywym  $J_2^2 t = \text{const}$ ). Jako zbyt powolne przy bardziej odległych zwarcjach, nie mogą być zaliczone do zabezpieczeń omawianej obecnie grupy.



Jak widać z dokonanego przeglądu istnieją w zasadzie możliwości uzyskania pełnego zasięgu zabezpieczeń generatorów lub bloków, reagujących przy zwarciach zewnętrznych. Jedyne w zakresie zwarc 3-fazowych, na szczęście rzadkich, problem ten nie znalazł rozwiązania. W praktyce często zdarzają się jednak przypadki, gdy duże ryzyko związane ze zbyt czułym nastawieniem zabezpieczeń zerowo-prądowych lub zabezpieczeń reagujących na składową przeciwną prądu, zmusza do rezygnacji z rezerwowania zabezpieczeń liniowych w ich całkowitym podstawowym zakresie działania, a więc także przy zwarciach na przeciwległych końcach długich linii. W przypadkach takich powinny być stosowane układy rezerwowania lokalnego, polegające na instalowaniu rezerwowych zabezpieczeń liniowych, przy równoczesnym rezerwowaniu wyłącznika każdej z linii wyłącznikami wszystkich innych obiektów przyłączonych do danego systemu szyn zbiorczych.

Generalna zasada, iż zwarcia muszą być wyłączone, powinna znaleźć pełne pokrycie w układach i aparaturze zabezpieczającej.

### 2.3. Zabezpieczenia działające przy nienormalnych stanach pracy bloku

Zabezpieczenia tej grupy działają przy nienormalnych stanach pracy, które:

- a) wymagają ingerencji obsługi, a w razie gdy usunięcie nienormalności jest niemożliwe - wyłączenia bloku,
- b) stanowią groźbę dla urządzeń ciepłno-mechanicznych bloku lub urządzeń rozdzielni i sieci,
- c) uniemożliwiają produkcję energii o wymaganych parametrach.

Zadziałania zabezpieczeń tej grupy mogą poza tym stanowić materiał pomocniczy przy analizie przyczyn i przebiegu zakłócenia oraz być pomocne przy wyszukiwaniu miejsca uszkodzenia i ustalaniu terminów i zakresu przeglądu i napraw. Dla lepszego zorientowania czytelnika zabezpieczenia zestawiono w tablicy 3.

Zabezpieczenie reagujące przy przeciążeniach prądowych generatora i transformatora blokowego. Stosowane od dawna zabezpieczenie działające przy wzroście prądu ponad wartość znamionową informuje dość wcześnie obsługę o zaistniałym przeciążeniu prądowym. Nie odzwierciedla ono jednak aktualnego stanu cieplnego generatora lub transformatora, gdyż nie

Tablica 3

## Zabezpieczenia działające przy niernormalnych stanach pracy bloku

Ip.	Rodzaj niernormalności	Rodzaj zabezpieczenia	Ogólna charakterystyka zabezpieczenia	U w a g i
1	2	3	4	5
1	Przebieżenie generatora	Przebieżeniowo-prądowe Termiczne - model cieplny generatora Pomiar temperatury uzwojeń, żelaza oraz czynnika chłodzącego	Przebieżenie nadprądowe, niezależny, zwłoczny Nadprądowe - zależne ze stałą nagrzewania dopasowaną do generatora (w założeniu, że czynne są sprawnie działające urządzenia chłodzące). Termopary umieszczone w żłokach stojana. Określanie temperatury wirnika na podstawie pomiaru napięcia i prądu wzbudzenia. Termopary lub termometry oporowe umieszczone w urządzeniu chłodzenia generatora	
2	Przebieżenie transformatorów	Przebieżeniowo-prądowe Termiczne - model cieplny transformatora Termometryczne	Przebieżenie nadprądowe - niezależny, zwłoczny Nadprądowe - zależne ze stałą nagrzewania dopasowaną do transformatora (w założeniu, że czynne są sprawnie działające urządzenia chłodzenia), lub modele cieplne zamurzone w oleju transformatora Sygnalizacja nadmiernej wyższej temperatury górnych warstw oleju. Pomiar temperatury oleju, uzwojeń i żelaza transformatora	Najczęściej wspólne dla gen. i transf. blok. Stosuje się dla dużych transformatorów (transf. blokowy)

cd. tablicy 3

1	2	3	4	5
3	Asymetria prądowa generatora	Nadprądowe z opóźnieniem (zależnym) reagujące na składową prędkościową prądu	Przełączniki nadprądowe - niezależne, zwłoczne lub zależne z charakterystyką dopasowaną do krzywej dopuszczalnej wartości $J_2/J_n$ w funkcji czasu jej trwania (w zasadzie charakterystyka zbliżona do wykresu równania $J_2 t = \text{const}$ . jednak dążąca asymptotycznie do prostej dopuszczalnej trwałej asymetrii prądowej)	Charakterystyka działania przedstawiana na rys.9
4	Nadmierny wzrost napięcia stojana generat.	Nadnapięciowe	Przełączniki nadnapięciowe - niezależne zwłoczne (zabezpieczenie jedno-stopniowe lub dwustopniowe) lub przełącznik zależny	
5	Doziemienie w sieci silanej przez blok	Ziemiowarciowe, zerowonapięciowe	Przełącznik nadnapięciowy - niezależny, zwłoczny włączony do uzwojenia otwartego trójkąta przekładników napięciowych na szynach zbiorczych rozdzielni	Zabezpieczenie ziemnowarciowe, zerowoprądowe dla sieci silanej przez blok opisane w p.2.2

cd. tablicy 3

1	2	3	4	5
6	Pojedyncze doziemienie w obwodach wzbudzenia generatora	Ziemnozwarciowe, działające przy uszkodzeniu izolacji obwodów wzbudzenia generatora Pomiar stanu izolacji obwodów wzbudzenia generatora	Przełącznik nadprądowy - niezależny, bezwzględny działający przy zamknięciu obwodu specjalnie doprowadzonego źródła napięcia zmiennego włączonego do uzwojenia wzbudzenia i wału wirnika Woltomierz z przełącznikiem umożliwiającym pomiar napięcia końców uzwojenia wzbudzenia generatora względem wału wirnika. Na podstawie wyników pomiaru oblicza się oporność izolacji obwodów wzbudzenia	Stosuje się jeden z podanych ze- społów
7	Utrata wzbudzenia generatora, wypadnięcie generatora z synchronizmu	Kontrolujące prąd wzbudzenia generatora Oporo-zależne w obwodach wzbudzenia generatora Kierunkowe, biernomocowe w obwodzie stojana generatora Kierunkowo-oporowe w obwodzie stojana generatora	Przełącznik podnapięciowy zasilany z bocznika umieszczonego w głównym obwodzie wzbudzenia Zespół przełączników w obwodach wzbudzenia: nadrezystancyjne w obwodzie wzbudzenia generatora i wzbudnicy podnapięciowy w obwodzie wzbudnicy pomocniczej Przełącznik mocy, działający przy przepływie mocy biernej indukcyjnej z sieci do generatora Przełącznik susceptancyjny włączony we wtórne obwody prądowe i napięciowe generatora	Stosuje się jeden z podanych ze- społów

cd. tablicy 3

	2	3	4	5
1				
8	Brak dopływu pary do turbin - przejście generatora na pracę silnikową	Kierunkowe, czynno - mocowe	Przełącznik mocy działający przy przepływie mocy czynnej z sieci do generatora i równoczesnym stwierdzeniu krańcowego (stan zamknięty) położenia zaworu szybkozamykającego turbiny	
9	Nadmierny spadek poziomu oleju w transformatorze	Pływakowe działające przy spadku poziomu oleju w transformatorze	Urządzenie pływakowe w zbiorniku konserwatora	W urządzenie to wyposaża się tylko duże transf. (blokowe)
10	Powolne tworzenie się gazów w kadzi transf.	Podmuchowo-gazowe I-stopień Podmuchowo-gazowe I-stopień	Urządzenie pływakowe w przełączniku podmuchowo-gazowym, działające przy powstaniu przestrzemi bezolejowej w zbiorniku przełącznika	Działanie drugiego stopnia przekątnika podmuchowo-gazowego opisane jest w p.2.1
11	Zakłócenia w obwodach chłodzenia transformatora	Automaty bezpiecznikowe silników chłodzenia Przepływomierze w obwodach chłodzenia	Wyłączenie bezpieczników samoczynnych w obwodach zasilania silników chłodzenia trans. Przepływomierze kontrolujące strumień czynników chłodzących (powietrze, woda, olej)	Urządzenia stosowane przy większych jednostkach (transf. blokowe)

uwzględnia czasu trwania przeciążenia, stanu cieplnego przed jego wystąpieniem oraz stanu urządzeń i temperatury czynników chłodzących. Zabezpieczenie to jest z reguły wspólne dla generatora i transformatora blokowego ze względu na ich zbliżone moce znamionowe.

Zabezpieczenie termiczne - model cieplny generatora. Zabezpieczenie to stosowane przez nieliczne firmy zagraniczne oparte jest na przekaźniku termicznym o stałej czasowej nagrzewania dopasowanej do zabezpieczanego obiektu i wnioskującym o stanie cieplnym generatora na podstawie pomiaru prądu stojana.

Przeszkodą w jego stosowaniu jest trudność określenia stałej czasowej potrzebnej dla odwzorowania temperatury w najgorętszych punktach uzwojenia generatora. Wadą zabezpieczenia jest nieuwzględnianie zakłóceń w pracy urządzeń chłodzenia.

Pomiar temperatury uzwojeń, żelaza oraz temperatury czynnika chłodzącego. Wytwórca wyposaża generatory w termopary umieszczone w żłobkach stojana (na dnie żłobka lub między prętami uzwojeń). Określenie temperatury uzwojeń wirnika następuje przez pomiar napięcia i prądu wzbudzenia. Ilość tych wartości przedstawia aktualną oporność uzwojenia wzbudzającego, która porównana ze znaną wartością oporności w stanie zimnym pozwala określić temperaturę wirnika. Spotyka się również mierniki wskazujące bezpośrednio temperaturę wirnika, oparte na tej samej zasadzie. Istnieją rozwiązania, w których pomiar temperatury wirnika dokonywany jest przez termopary. Wynik pomiaru przekazywany jest przy pomocy łącza radiowego lub przewodowo, poprzez specjalne zespoły szczotek na wale wirnika. Pomiar temperatury czynnika chłodzącego na wlocie i wylocie z generatora dokonywany jest w komorach chłodzenia przez termopary lub termometry oporowe. W istniejących układach nie spotyka się urządzeń sygnalizujących lub wyłączających w przypadku nadmiernego wzrostu temperatury uzwojeń generatora.

Zabezpieczenie termiczne - model cieplny transformatora. Zabezpieczenie to, stosowane przez niektóre firmy zagraniczne, w Polsce mało jest znane. Zabezpieczenie oparte jest na modelu cieplnym transformatora zanurzonego w górnych warstwach oleju transformatora. Aparat podgrzewany jest prądem z przekładników prądowych transformatora. Wnioskowanie o zagrożeniu transformatora na podstawie pomiaru odwzorowującego temperaturę w najgorętszym miejscu uzwojenia jest najważniejszym kryterium przeciążenia cieplnego. Przeszkodą w sto-

sowaniu tego zabezpieczenia jest trudność w określeniu danych potrzebnych dla wykonania modelu. Wytwórcy transformatorów wyposażają w to urządzenie transformatory większej mocy. Wydaje się możliwe ograniczenie stosowalności zabezpieczenia tylko do transformatorów sprzęgających i odbiorczych. W transformatorach blokowych, rzadko przeciążanych prądowo, wystarczy przewidzieć pomiar lub sygnalizację temperatury górnych warstw oleju.

Zabezpieczenie termometryczne. Transformatory wyposażane są w termometry kontaktowe (jednostopniowe lub dwustopniowe) sygnalizujące nadmiernąwyżkę temperatury górnych warstw oleju. Wytwórca przewiduje również miejscowy i zdalny pomiar temperatury oleju (termometr rtęciowy i oporowy), a niekiedy też pomiar temperatury uzwojeń i żelaza transformatora (termopary).

Zabezpieczenie reagujące przy niesymetrycznych obciążeniach. Prądy składowej przeciwnej będące wynikiem asymetrii prądów przewodowych generatora mogą powodować znaczne podgrzewanie wirnika. Strumień magnetyczny pochodzący od tych prądów wiruje względem wirnika z podwójną prędkością synchroniczną indukując w zamkniętych jego obwodach znaczne prądy wirowe.

Najczęściej stosowane zespoły zabezpieczenia reagujące na składową przeciwną prądów posiadają następujące człony:

- człon sygnalizujący posiadający przekaźnik nadprądowy - niezależny, działający przy przekroczeniu dopuszczalnej trwałej asymetrii prądowej,
- człon wyłączający, posiadający nadprądowy przekaźnik zależny o charakterystyce dopasowanej do krzywej dopuszczalnej asymetrii prądowej w funkcji czasu jej trwania, zbliżonej do krzywej  $J_2^2 t = \text{const}$ .

Sygnalizowanie asymetrii prądowej niewiele przekraczającej trwałe wartości dopuszczalne umożliwia obsłudze zmniejszenie mocy biernej lub czynnej generatora a przez to zmniejszenie również prądu składowej przeciwnej. Człon sygnalizujący działa w zasadzie w przypadku asymetrii wywołanej dużymi odbiornikami o niesymetrycznym poborze mocy lub przerwą w sieci zasilanej przez blok (przerwa w przewodach, otwarcia się wyłącznika nie we wszystkich fazach). Należy dodać, że na tego rodzaju nienormalności lub uszkodzenia nie reagują z reguły zabezpieczenia sieciowe.

Oprócz powyższych zabezpieczeń układ przyrządów pomiarowych generatora wyposaża się w amperomierz wyskalowany w war-

tościach procentowych prądu składowej przeciwnej (w stosunku do prądu znamionowego).

Zabezpieczenie nadnapięciowe stojana generatora. Zabezpieczenie nadnapięciowe instaluje się na wszystkich hydrozespołach. Znaczne zwwyżki obrotów hydrozespołów spowodowane nagłymi obciążeniami mogą ze względu na dużą bezwładność urządzeń do regulacji dopływu wody powodować niebezpieczne podwyższenia napięcia stojana. Działające w takich razach zabezpieczenie powoduje odwzbudzenie i wyłączenie generatora oraz zamknięcie zasuwy wodnej. Turbogeneratory wyposażane są w te zabezpieczenia w przypadku posiadania skomplikowanych, często uszkadzających się lub powolnie działających samoczynnych regulatorów wzbudzenia.

Zabezpieczenie ziemnozwarciowe, zerowo-napięciowe sieci zasilanej przez blok. Zabezpieczenie to instaluje się na blokach zasilających sieć z bezpośrednio uziemionym punktem gwiazdowym. W sieci takiej (dla zachowania odpowiedniego stosunku  $X_0/X_1$ ) nie wszystkie transformatory posiadają uziemiony punkt gwiazdowy uzwojenia górnego napięcia, możliwe jest więc wydzielenie się układu energoelektrycznego zawierającego transformatory i bloki i nie posiadającego uziemionego punktu gwiazdowego. Może się to zdarzyć w przypadku niewyłączonego zwarcia doziemnego w sieci, po odcięciu zasilania tego zwarcia przez wszystkie transformatory z uziemionym punktem gwiazdowym.

Zabezpieczenie ziemnozwarciowe działające przy uszkodzeniu izolacji obwodów wzbudzenia generatora. Zabezpieczenie to instaluje się na generatorach, których obwody wzbudzenia są izolowane względem korpusu wirnika.

Praca turbogeneratorsa z doziemionym wirnikiem nie jest specjalnie groźna, szczególnie, gdy po zaistnieniu uszkodzenia uruchomione zostanie zabezpieczenie reagujące na podwójne zwarcie wirnikowe. Znacznie większe ryzyko przedstawia praca hydrogeneratora z uszkodzoną w jednym punkcie izolacją wirnika. Takie uszkodzenie skłania na ogół eksploatatora do szybkiego odstawienia zespołu w celu dokonania naprawy, gdyż ewentualne uszkodzenie izolacji w drugim punkcie i powstająca wówczas symetria pola magnetycznego w generatorze napędzanym turbiną wodną, posiadającym dużą średnicę i wagę części wirujących, może spowodować drgania doprowadzające do zniszczenia elementów hydrozespołu (łożyska, sprzęgła) lub jego fundamentów.

Pomiar oporności izolacji obwodów wzbudzenia w czasie pracy generatora. W celu umożliwienia pomiaru oporności izolacji obwodów wzbudzenia w czasie pracy generatora instaluje



się woltomierz prądu stałego (o dużej oporności wewnętrznej) uzupełniając go przełącznikiem lub przyciskami umożliwiającymi pomiar napięcia końców uzwojenia wzbudzenia generatora względem wału wirnika. Na podstawie wyników pomiaru oblicza się oporność izolacji.

Zaletą układu jest duża jego czułość umożliwiająca wykrycie początkowej fazy powstawania uszkodzenia, wadą - stwierdzanie uszkodzenia dopiero w czasie dokonywania okresowych odczytów.

Zabezpieczenia działające przy utracie wzbudzenia generatora. Generator, pozbawiony częściowo lub całkowicie wzbudzenia, może wypaść z synchronizmu oraz doprowadzić do powstania silnych oscylacji mocy i napięcia w sieci, do której jest przyłączony. Na otwartym uzwojeniu wzbudzenia indukuje się poza tym napięcie, mogące stanowić groźbę dla izolacji obwodów wzbudzenia; mogą również wystąpić groźne przegrzania wirnika.

Jeśli konstrukcja generatora, lub względy sieciowe nie pozwalają na przejście do pracy asynchronicznej, instalowane są specjalne zabezpieczenia, działające na wyłączenie.

Znane są w zasadzie cztery rodzaje zabezpieczeń reagujących na utratę wzbudzenia generatorów. Działają one dostatecznie szybko, aby przeszkodzić pracy asynchronicznej. Dwa z nich kontrolują prądy lub prądy i napięcia w obwodzie wzbudzenia, pozostałe dwa - prądy i napięcia w obwodzie stojana generatora.

a) Zabezpieczenie kontrolujące prąd wzbudzenia generatora. Zabezpieczenie to instaluje się na generatorach niewyposażonych we wzbudnice pomocnicze. W tym przypadku wystarczy przewidzieć przekaźnik podnapięciowy mierzący spadek napięcia na boczniku włączonym w obwód wzbudzenia generatora, gdyż prąd w tym obwodzie w czasie normalnej pracy generatora nie może spaść poniżej pewnej minimalnej wartości. Opóźnienie w działaniu zapobiega niepożądanym wyłączeniom przy przejściowych obniżkach prądu wywołanych nagłymi odciążeniami generatorów.

b) Zabezpieczenie oporozależne w obwodach wzbudzenia generatora. Zabezpieczenie to stosowane jest w przypadku generatorów wyposażonych we wzbudnice pomocnicze. Poprzednio opisany układ zabezpieczenia tu nie wystarcza, gdyż prąd wzbudzenia generatora może spaść do zera, a nawet przybrać wartości ujemne. Zespół składa się z przekaźników rezystancyjnych, umieszczonych w obwodzie wzbudzenia generatora i wzbudnicy oraz przekaźnika podnapięciowego w obwodzie wzbudnicy

pomocniczej. Opóźnienie w działaniu zapobiega niepożądanym wyłączeniom przy nagłych odciążeniach generatora.

c) Zabezpieczenie kierunkowe, biernomocowe w obwodzie stojana generatora. Zabezpieczenie działa przy przepływie mocy indukcyjnej z sieci do generatora. Reaguje ono nie tylko w przypadku przerwy w obwodzie wzbudzenia, lecz także przy silnym zredukowaniu pola wzbudzenia. Konieczne jest tu również opóźnienie w działaniu.

d) Zabezpieczenie kierunkowo-oporozależne w obwodzie stojana generatora. Przekaznik oporozależny posiada charakterystykę kołową tak usytuowaną na płaszczyźnie  $\hat{Z} = R + jX$ , iż działa on przy stanach bardzo bliskich wypadnięciu generatora z synchronizmu, lecz w trakcie kołysań mocy.

Prócz omówionych powyżej zabezpieczeń stosowane jest powszechnie powiązanie, otwierające wyłącznik sieciowy w razie wypadnięcia wyłącznika wzbudzenia (pobudzenie od zestyku pomocniczego wyłącznika wzbudzenia).

Zabezpieczenie działające przy przejściu generatora na pracę silnikową. Przy pracy silnikowej turbozespołu zarówno pełnej, z poborem energii czynnej z sieci, jak i częściowej (tj. takiej, przy której przepływ pary istnieje, lecz nie wystarcza na pokrycie strat), może wystąpić nagrzewanie się układu łopatkowego turbiny i zwyżka temperatury krućca wylotowego.

Aby nie dopuścić do osiągnięcia niebezpiecznych temperatur konieczne jest wyłączenie bloku po stronie elektrycznej. Do samoczynnego działania można wykorzystać czujniki temperatury krućca wylotowego, zestyki krańcowe przy zaworach szybkozamykających lub przekaznik kierunkowy - czynnomocowy przyłączony do obwodów prądowych i napięciowych generatora.

Zestyki krańcowe w zaworach szybko zamykających powinny zamykać się w położeniu zaworów odpowiadającym przepływowi pary w ilości mniejszej od 1/2 ilości niezbędnej dla pokrycia strat biegu jałowego. Przekaznik mocy powinien reagować na wartość mocy co najmniej dwukrotnie niższej od całkowitej mocy potrzebnej dla napędzania turbozespołu od strony sieci.

Najchętniej stosowanym układem zabezpieczenia jest łączenie szeregowo zestyków krańcowych zaworów i przekaznika mocowego, zwiększające pewność działania zabezpieczenia i zapobiegające ewentualnemu rozbieganiu się turbozespołu przy nieszczelnym zamknięciu zaworów. Nieszczelności te mogą być spowodowane przedostaniem się ciał obcych, zasoleniem zaworu lub zakleszczeniem wałka.

Opisane zabezpieczenie stanowi w zasadzie jedyne powiązanie zabezpieczeń ciepłno-mechanicznych turbozespołu (impulsujących na zawór szybko zamykający) z wyłącznikiem strony elektrycznej bloku. Ponieważ kilkusekundowa praca silnikowa turbozespołu jest dopuszczalna, zabezpieczenie działa z opóźnieniem.

W niektórych wykonaniach spotyka się impulsowanie samego przekaźnika mocy zwrotnej na wyłączenie bloku bez bezpośredniej kontroli zamknięcia się zaworu turbiny (kontakt na zaworze szybko zamykającym). W tym przypadku dopuszcza się znacznie większe opóźnienia czasowe aby zapobiec niepotrzebnym wyłączeniom w czasie synchronizacji lub po jej wykonaniu przy pracy generatora na sieć z niewielkim obciążeniem.

Zwolennicy tego zabezpieczenia zwracają uwagę, że przepływ mocy zwrotnej może mieć miejsce wskutek nie tylko zadziałania zaworu szybko zamykającego. Moc zwrotna może na przykład wystąpić wtedy, gdy z jakichkolwiek przyczyn podnie się częstotliwość sieci. Ponieważ w tym przypadku regulator obrotów zamknie całkowicie zawory regulacyjne turbina przestanie otrzymywać parę, a będąc powiązana z siecią przejdzie na pracę silnikową.

Wydaje się, że takie działanie zabezpieczenia jest nie wskazane ze względu na rzadkość występowania tego rodzaju zakłóceń, a istniejącą możliwość błędnych wyłączeń przy zakłóceniach we wtórnych obwodach napięciowych generatora.

Zabezpieczenie działające przy podwyższeniu lub obniżeniu się poziomu oleju w transformatorze. Większe transformatory, prócz olejowskazu pozwalającego na kontrolę stanu oleju w konserwatorze, posiadają często sygnalizację granicznych poziomów oleju. Sygnalizację tę uruchamia urządzenie pływakowe umieszczone wewnątrz zbiornika konserwatora i wyposażone w zestyki zamykające obwody urządzeń sygnalizacyjnych.

Zabezpieczenie podmuchowo-gazowe (I stopień) transformatora. W razie znacznego obniżenia się poziomu oleju w transformatorze, a także w przypadku tworzenia się (w niewielkiej ilości) gazów w kadzi transformatora, następuje działanie sygnalizacyjnego stopnia przekaźnika podmuchowo-gazowego umieszczonego w przewodzie olejowym łączącym konserwator z kadzią transformatora.

Spadek poziomu oleju uruchamiający urządzenie sygnalizacyjne może być skutkiem spadku temperatury transformatora przy niedostatecznym napełnieniu lub nieszczelności kadzi powodującej wyciek oleju.

Powodem zbierania się w przekaźniku gazu przepływającego z transformatora może być:

- wyzwalanie się wolnych pęcherzyków powietrza przyczepionych do elementów stałych konstrukcji wewnętrznej transformatora,
- wydzielanie się powietrza zawartego w oleju wskutek wzrostu temperatury, lub
- tworzenie się substancji gazowych rozkładu oleju spowodowanego silnym wzrostem temperatury żelaza lub miedzi transformatora albo powoli rozwijającym się zwarcie (łuk elektryczny).

Zabezpieczenia reagujące na zwarcia w silnikach chłodzenia transformatora. Zabezpieczenie silników pracujących w układzie chłodzenia transformatora wykonane jest z reguły przy użyciu automatów bezpiecznikowych wyposażonych w wyzwalacze termiczne i elektromagnetyczne. Wyłączenie tych automatów powinno być sygnalizowane na nastawni.

Urządzenia kontrolujące przepływ czynników chłodzących transformatora. W celu kontroli prawidłowej pracy urządzeń chłodzenia na drodze strumienia czynnika chłodzącego (powietrze, woda, olej). Umieszcza się przepływomierze, wyposażone w zestyki; zamykają one obwody urządzeń sygnalizacyjnych.

### 3. Powiązanie urządzeń zabezpieczających i wyłączających turbiny i generatora

Działanie zabezpieczeń turbiny na wyłączniki części elektrycznej bloku i odwrotnie - działanie zabezpieczeń bloku generator-transformator na zawór szybko zamykający turbiny jest obecnie problemem szeroko dyskutowanym. Zagadnienie to dla wielkich jednostek można rozszerzyć o dalsze elementy układu blokowego a mianowicie działanie zabezpieczeń bloku: kocioł, turbina, generator i transformatory, na wyłączenie silników ciągu i podmuchu kotła, podajników paliwa, młynów i pomp zasilających.

W dalszym ciągu zajmiemy się pokrótce jedynie zabezpieczeniami strony cieplno-mechanicznej turbiny, gdyż one tylko (w zasadzie) powodują zamknięcie dopływu pary do turbiny, a więc w konsekwencji (poprzez zabezpieczenie reagujące przy przepływie mocy czynnej w kierunku generatora), wyłączenie i odzwbudzenie bloku.

Działanie zabezpieczeń turbiny na wyłączenie części elektrycznej bloku. Zakłóceniami w pracy turbiny, powodującymi zamknięcie dopływu pary są:

- zwiększa obrotów turbozespołu,
- utrata próżni w kondensatorze,
- zaburzenia w łożysku oporowym,
- spadek ciśnienia oleju w układzie smarowniczym i regulacyjnym,
- osiowe przesunięcie wału,
- nadmierne drgania turbozespołu,
- obniżenie się poziomu oleju w zbiorniku,
- podwyższenie temperatury krućca wylotowego turbiny i korpusu kondensatora,
- przekroczenie poziomu skroplin w podgrzewaczu regeneracyjnym.

Zabezpieczenia turbiny po stwierdzeniu nienormalności w pracy działają na zamknięcie dopływu pary. Po zamknięciu się styku krańcowego na zaworze szybko zamykającym i zestyku przekaznika mocy zwrotnej (stwierdzenie biegu silnikowego) następuje wyłączenie i odwzbudzenie bloku.

Istnieją tendencje, aby w identyczny sposób wyłączać i zatrzymywać turbozespół w przypadkach awaryjnych. Przycisk awaryjny uruchamiany przez personel nastawni powinien działać tylko na zawór szybkozamykający. Wyłączenie po stronie elektrycznej następowałoby za pośrednictwem zabezpieczenia mocy zwrotnej.

Przy tym sposobie odstawiania bloku można uniknąć zniszczenia turbozespołu w przypadku zawiedzenia zabezpieczenia od zwiększenia obrotów lub istnienia nieszczelności w zaworze szybkozamykającym.

Działanie zabezpieczeń bloku generator - transformator na zamknięcie dopływu pary do turbiny. W nowoczesnych układach blokowych nie ma w zasadzie potrzeby utrzymywania turbozespołu w ruchu po wyłączeniu i odwzbudzeniu jego części elektrycznej. Zgodnie z tym stwierdzeniem wszystkie zabezpieczenia działające na odwzbudzenie generatora powinny równocześnie zamykać dopływ pary.

Zasada ta jest stosowana często, choć wielu wytwórców turbin nie obawiając się zawiedzenia regulatora obrotów lub zabezpieczenia od zwiększenia obrotów turbiny albo nie zaleca w ogó-

le działania zabezpieczeń części elektrycznej na zawór parowy, albo przewiduje to działanie tylko dla zabezpieczeń reagujących na uszkodzenia wewnętrzne w generatorze (patrz pkt 2.1), a niekiedy także dla zabezpieczenia nadnapięciowego stojana - (patrz pkt 2.3).

### СОВРЕМЕННАЯ РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ И БЛОКОВ "ГЕНЕРАТОР - ТРАНСФОРМАТОР"

В статье рассмотрены способы обнаружения разного рода повреждений внутри агрегата и вне его. Много внимания посвящается также защитам реагирующим при ненормальных режимах работы. В основном статья относится к защитам электрической части генераторов и блоков "генератор - трансформатор", содержит однако также некоторые данные об увязках с механически - тепловой частью.

### LES PROTECTIONS CONTEMPORAINES DES GÉNÉRATEURS SYNCHRONES DE GRANDE PUISSANCE ET DES GROUPES "GÉNÉRATEUR-TRANSFORMATEUR"

Dans cet article on a discuté les moyens de révéler de différentes sortes d'endommagements a l'intérieur du groupe et hors de lui. On a aussi consacré beaucoup d'attention aux protections qui reagissent pendant les conditions anormales de travail. En principe, l'article concerne les protections de la partie électrique des alternateurs et des groupes "alternateur-transformateur", mais il contient aussi de certains renseignements qui se rapportent à la partie mécanique-thermique.