

A. BOGUCKI, E. LAWERA, W. WINKLER  
Katedra Elektroenergetyki  
Politechniki Śląskiej

WYBRANE ZAGADNIENIA AUTOMATYKI ZAKŁÓCENIOWEJ  
UKŁADÓW ELEKTROENERGETYCZNYCH NAJWYŻSZYCH NAPIĘĆ

S t r e s z c z e n i e

W pracy przedstawiono aktualne tendencje w automatyce zabezpieczeniowej i łączeniowej sieci i systemów elektroenergetycznych o napięciu od 220 kV do 765 kV. Omówiono rozwój środków do wyeliminowania wpływu stanów niestacjonarnych pochodzenia zwarciovego na działanie bardzo szybkich zabezpieczeń. Dokonano przeglądu łącz telekomunikacyjnych i radiowych aktualnie stosowanych do współpracy z automatyką zakłóceniovą. Przedstawiono perspektywy stosowania cyfrowych maszyn matematycznych jako kompleksowych układów automatyki zakłócenioviej.

1. Aktualne tendencje w automatyce zabezpieczeniowej linii i stacji najwyższych napięć

Datujący się od kilku lat intensywny rozwój układów elektroenergetycznych najwyższych napięć na świecie spowodował zaostrenie podstawowych wymagań stawianych automatyce zabezpieczeniowej tych układów. W szczególności dotyczy to: szybkości, niezawodności i selektywności działania.

Zwiększenie szybkości działania zabezpieczeń stało się możliwe przede wszystkim dzięki zastąpieniu przekaźników elektromechanicznych przekaźnikami elektronicznymi z wykorzystaniem półprzewodników. Dla przykładu warto tutaj porównać czasy działania zabezpieczeń różnicowych szyn zbiorczych, zbudowanych na różnych zasadach:

- zabezpieczenia na elementach elektromechanicznych:
  - 40 ... 150 ms
- zabezpieczenia elektroniczne:
  - 5 ... 13 ms.

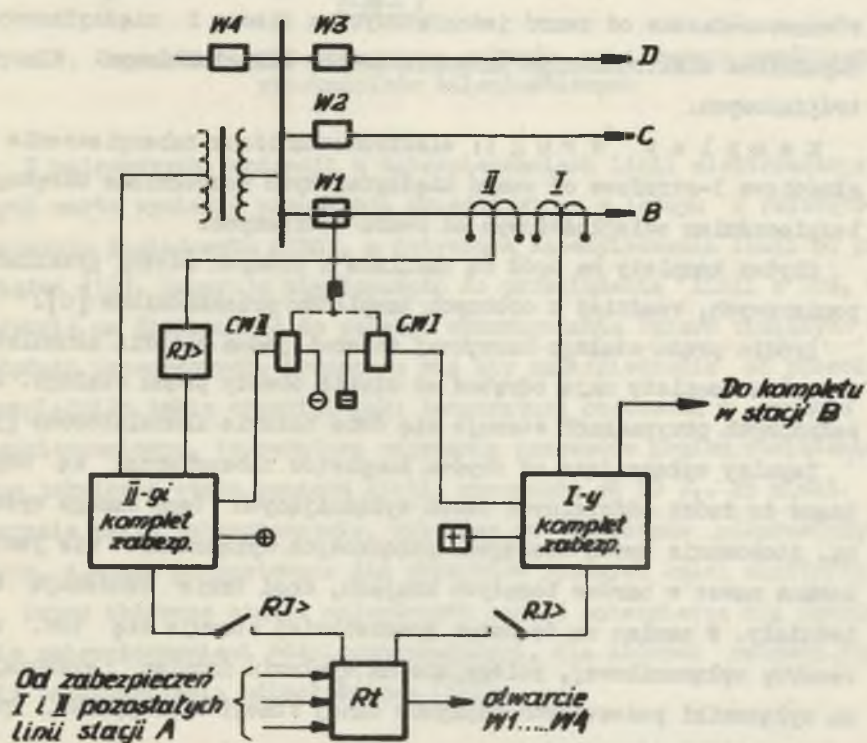
Poważne skrócenie czasów działania zabezpieczeń było przyczyną powstawania nowych problemów, nie obejmujących wolno działających zabezpieczeń, a wpływających bezpośrednio na selektywność działania bardzo szybkich zabezpieczeń. Mowa tutaj o procesach przejściowych towarzyszących zwarciom. Zagadnienie to zostanie szczegółowo omówione w dalszej części pracy.

Innym problemem, związanym z wprowadzaniem do eksploatacji zabezpieczeń elektronicznych, jest duża wrażliwość elementów półprzewodnikowych tych zabezpieczeń na impulsy przepięciowe, mające swe źródła zarówno w układzie elektroenergetycznym (odłączanie zwarć, manipulacje łączeniowe itp.) [1] [2] jak i w obwodach prądu stałego [3]. Wrażliwość na impulsy przepięciowe w poważnym stopniu zmniejszała niezawodność zabezpieczeń elektronicznych, co z kolei było powodem nieufności i rezerwy z jaką odnoszono się w początkowej fazie do tych nowych zabezpieczeń. Stosowanie środków, eliminujących niszczące działanie impulsów przepięciowych, w postaci filtrów w obwodach wejściowych przekładników, ekranowania kabli sterowniczych itp., przy jednoczesnym udoskonaleniu półprzewodników i podzespołów, miały poważny wpływ na wzrost niezawodności zabezpieczeń elektronicznych. Obecnie nawet najbardziej konserwatywni wytwórcy aparatury zabezpieczeniowej przekonali się do techniki półprzewodnikowej w zastosowaniu do automatyki zabezpieczeniowej. Różny przy tym jest zakres wykorzystania elementów półprzewodnikowych w budowie przekładników. Jedne firmy ograniczają stosowanie półprzewodników tylko do podstawowych członów (np. pomiarowych i kierunkowych w zabezpieczeniach odległościowych), inne natomiast wykorzystują elektronikę półprzewodnikową w maksymalnym stopniu - do układów wyjściowych włącznie.

Podstawową formą zwiększenia niezawodności działania automatyki zabezpieczeniowej w układach elektroenergetycznych najwyższych napięć stało się podwajanie elementów zabezpieczeń. Zasada podwajania ele-

mentów zabezpieczeń, znana powszechnie pod niezbyt ścisłą [4] w tym przypadku nazwą "rezerwowanie lokalne zabezpieczeń", polega na tzw. dublowaniu takich elementów jak:

- przełączniki,
- przekładniki pomiarowe,
- źródła napięcia pomocniczego,
- cewki wyłączające wyłączników mocy.



Rys. 1. Typowy układ zabezpieczeń linii najwyższych napięć

Komplet I - zabezpieczenie porównawczo-fazowe, komplet II - zabezpieczenie odległościowe

Mimo istnienia pewnych różnic w tendencjach podwajania elementów zabezpieczeń w poszczególnych krajach, o czym m.in. decydują względy ekonomiczne, dla większości linii elektroenergetycznych można przyjąć rozwiązanie, podane na rys. 1.

Zabezpieczenie linii składa się z dwóch równorzędnych kompletów, działających na różnych zasadach. W krajowych rozwiązaniach linii 220 kV dla przykładu komplet pierwszy jest elektronicznym zabezpieczeniem porównawczo-fazowym z łączem nośnym lub kablowym, drugi komplet natomiast stanowi elektromechaniczne zabezpieczenie odległościowe [5] [6]. Jedno z rozwiązań amerykańskich dla linii 500 kV "Willow Glen-Richard" [7] dla porównania jest następujące:

**K o m p l e t p i e r w s z y:** elektroniczne zabezpieczenie porównawczo-fazowe od zwarć jednofazowych z ziemią i międzyfazowych uzupełnione elektronicznym zabezpieczeniem odległościowym dla zwarć trójfazowych.

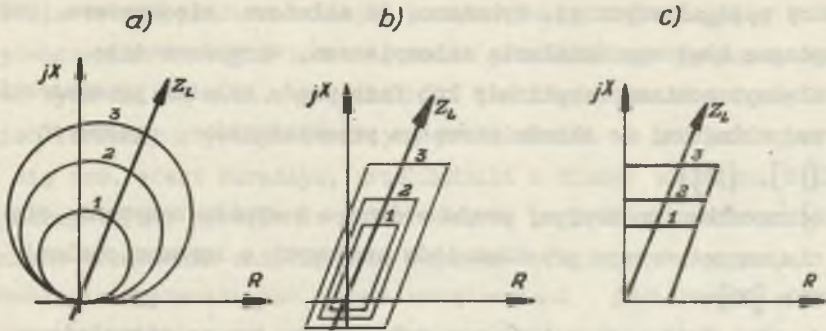
**K o m p l e t d r u g i:** elektromechaniczne zabezpieczenie odległościowe 3-strefowe od zwarć międzyfazowych uzupełnione odrębnym zabezpieczeniem odległościowym od zwarć doziemnych.

Obydwa komplety na ogół są zasilane z różnych rdzeni przekładników pomiarowych, rzadziej z osobnych kompletów przekładników [8].

Zródło prądu stałego zazwyczaj stanowi jedna bateria akumulatorowa a obydwie komplety mają odrębne od siebie obwody prądu stałego. W uzasadnionych przypadkach stosuje się dwie baterie akumulatorowe [9].

Impulsy wyłączające od obydwu kompletów zabezpieczeń są doprowadzane do dwóch oddzielnych cewek wyłączających tego samego wyłącznika. Stosowanie dwóch szeregowo połączonych wyłączników nie jest stosowane nawet w bardzo bogatych krajach, choć takie tendencje kiedyś istniały. W zamian za to coraz powszechniej stosuje się tzw. układy rezerwy wyłącznikowej, polegające na wysłaniu impulsu wyłączającego na wyłączniki pozostałych odpyłów danej stacji w przypadku, gdy jeden z wyłączników zawodzi.

Kształt charakterystyk rozruchowych członów pomiarowych aktualnie stosowanych zabezpieczeń odległościowych jest dość zróżnicowany. Poza tradycyjnymi charakterystykami impedancyjno-kierunkowymi (rys. 2a), niektóre wytwórnice [10] [11] produkują już seryjnie przekaźniki, których człony pomiarowe posiadają charakterystyki podane na rys. 2b i c zaproponowane do niedawna tylko w rozwiązaniach prototypowych.



Rys. 2. Charakterystyki rozruchowe członów pomiarowych współczesnych przekładników odległościowych

Z najnowszych tendencji w zabezpieczeniach linii elektroenergetycznych warto wymienić propozycję przedstawioną w jednym z referatów na ostatnim posiedzeniu CIRGE, a dotyczącą zabezpieczenia linii od przeciążeń [16]. Sugeruje się dopuścić do przeciążenia linii o 50%, co w efekcie ma doprowadzić do pełnego wykorzystania rezerw tkwiących w układach przesyłowych. Proponuje się aby zabezpieczenie od przeciążeń uwzględniło także czynniki jak: temperaturę otoczenia w punkcie zabezpieczeniowym, temperaturę nagrzania przewodów prądem obciążenia oraz termiczną stałą czasową linii, wynoszącą od 10 ... 25 minut. Jak narazie takie zabezpieczenie, wykonane na elementach półprzewodnikowych, zostało przygotowane dla przewodów jezdnych kolei elektrycznych.

Szyny zbiorcze stacji najwyższych napięć zabezpiecza się powszechnie zabezpieczeniami różnicowo-prądowymi, dla których rezerwą stanowią zabezpieczenia odległościowe linii.

## 2. Rozwój środków do wyeliminowania wpływu stanów niestacjonarnych pochodzenia zwarciowego na działanie zabezpieczeń elektroenergetycznych

Tematyce stanów niestacjonarnych, a w szczególności zagadnieniu składowej nieokresowej prądu zwarciowego w powiązaniu z przekładnikami prądowymi i przekładnikami o bardzo szybkim działaniu, poświęcono w ostatnich latach dużo miejsca na łamach zagranicznej i krajowej lite-

ratury specjalistycznej. Wykazano, że składowa nieokresowa może być przyczyną błędnego działania zabezpieczeń, spowodowanego:

- a) błędnym pomiarem amplitudy lub fazy prądu wskutek przenoszenia się tej składowej do obwodu wtórnego przekładników prądowych [17], [18], [19];
- b) odkształceniem krzywej prądu wtórnego w wyniku nasycenia się rdzenia magnetycznego przekładników prądowych o konwencjonalnej budowie [20].

Błędne działanie zabezpieczenia polega przy tym na niepożądanym wyłączeniu chronionego obiektu z chwilą wystąpienia zwarcia poza tym obiektem lub na pewnym opóźnieniu w zadziałaniu przy zwarciu w strefie działania zabezpieczenia.

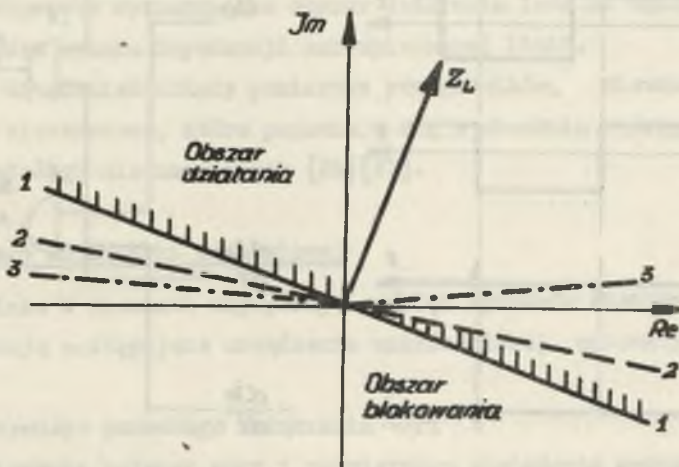
Prace, mające na celu wyeliminowanie niekorzystnego wpływu składowej nieokresowej prądu zwarciovego na działanie zabezpieczeń, idą obecnie w trzech kierunkach:

- 1) skonstruowanie przekładników prądowych lub innych urządzeń pomiarowych, nie nasycających się pod wpływem składowej nieokresowej;
- 2) opracowanie przekaźników, działających prawidłowo również po nasyceniu się rdzenia magnetycznego przekładników o tradycyjnej budowie;
- 3) zastosowanie metod pomiarowych w przekaźnikach automatyki zabezpieczeniowej niewrażliwych na sygnały nieokresowe, wiernie przenieszone z obwodu pierwotnego do wtórnego (tzn. gdy nie następuje zjawisko nasycenia przekładnika).

Z urządzeń pomiarowych, nie nasycających się pod wpływem składowej nieokresowej prądu, najbardziej wypróbowane są tzw. przekładniki liniarne [21] [22]. Różnią się one od konwencjonalnych przekładników istnieniem szczelin powietrznych w obwodzie magnetycznym rdzenia. Ich zaletą jest liniowa zależność pomiędzy prądem wtórnym i pierwotnym również przy dużych wartościach prądu zwarciovego, zawierającego wolno zanikające składowe nieokresowe. Wadę stanowi wysoki koszt i wzrost gabarytów, spowodowanych zwiększaniem przekrojów rdzenia oraz uzwojeń.

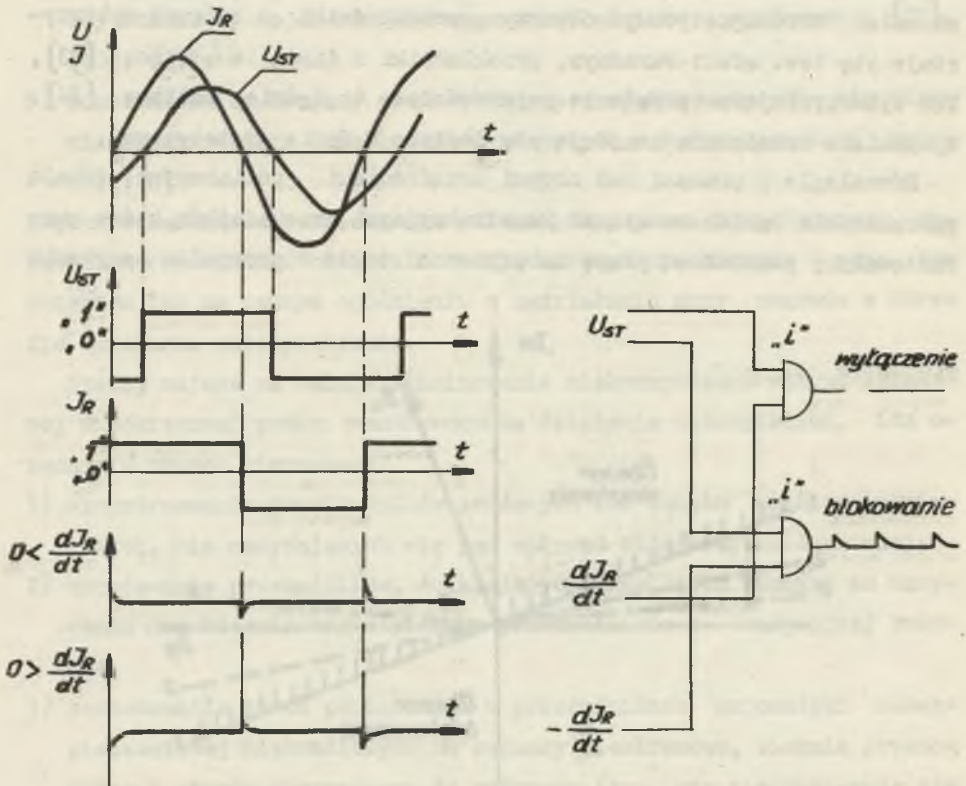
Obecnie trwają prace nad innymi urządzeniami, które mogłyby z lepszym powodzeniem zastąpić konwencjonalne przekładniki prądowe. Do urządzeń tych należą m.in.: przekładniki indukcyjne bezrdzeniowe lub z rdzeniem ferromagnetycznym otwartym, przekładniki w których wykorzystuje się tzw. efekt Faradaya, przekładniki z diodą emitującą [23], lub wykorzystujące sprzężenie pojemnościowe względnie radiowe [24]. Wymienione urządzenia znajdują się dopiero w fazie prototypowej.

Równoległe z pracami nad nowymi urządzeniami pomiarowymi trwają poszukiwania takich rozwiązań konstrukcyjnych przekładników, które gwarantowałyby prawidłową pracę zabezpieczeń także w przypadku nasycenia



Rys. 3. Zasada działania elektronowego członu kierunkowego w nowoczesnym przekładniku odległościowym

się rdzeni aktualnie stosowanych przekładników prądowych. Mimo, że nie znaleziono jeszcze idealnego rozwiązania, to daje się zauważyć pewien postęp w tej dziedzinie, dzięki wykorzystaniu układów statycznych opartych o elementy półprzewodnikowe. Prawidłowe działanie w warunkach nasycenia zapewnione jest wskutek przekształcania wielkości pomiarowych na wierne co do fazy wielkości dyskretne. Do wypróbowanych w praktyce zabezpieczeń należą m.in.: elektroniczne zabezpieczenie szyn zbiorczych [25] oraz człon kierunkowy przekładnika odległościowego [26].



Rys. 4. Charakterystyki rozruchowe elektronicznego członu kierunkowego w zależności od stopnia nasycenia przekładnika prądowego

$Z_L$  - wskaź impedancji linii, 1 - charakterystyka rozruchowa podstawowa, 2 - charakterystyka rozruchowa dla  $I_N = 10I_N$  i stałej czasowej zanikania składowej nieokresowej  $T_1 = 20$  ms, 3 - charakterystyka rozruchowa dla  $I_N = 10I_N$  i  $T_1 = 100$  ms



W członie kierunkowym np., którego zasadę działania podano na rys. 3, niewrażliwość na kształt krzywej prądu uzyskuje się dzięki zróżniczkowaniu prostokątnych sygnałów prądowych podczas kolejnej zmiany polaryzacji przebiegu prądowego. Otrzymane impulsy wraz z sygnałem napięciowym prostokątnym, proporcjonalnym do napięcia faz zdrowych (w przypadku jednofazowych zwarć doziemnych), są następnie doprowadzane do elementu logicznego mnożenia impulsów. Wyłączenie nastąpi, gdy polaryzacje obydwu porównywanych sygnałów są przeciwne. Na rys. 4 przedstawiono charakterystyki członu kierunkowego w zależności od stopnia nasycenia przekładnika prądowego. Z charakterystyk wynika, że wraz ze wzrostem stopnia nasycenia, obszar działania członu zmniejsza się, jednak półproste wyznaczające obszar działania leżą na ogół symetrycznie względem wskazu impedancji zabezpieczanej linii.

Znane są również układy pomiarowe przekładników, niewrażliwe na składowe nieokresowe, które pojawiają się w obwodzie wtórnym przekładników prądowych nie nasyconych [26] [27].

### 3. Problemy automatyki łączeniowej

Aktualnie w sieciach najwyższych napięć systemów elektroenergetycznych pracują następujące urządzenia zakłócenieniowej automatyki łączeniowej:

- a) samoczynnego ponownego załączania -SPZ
- b) ograniczenia kołysań mocy i nadmiernego obciążenia sprzęgłowych układów przesyłowych
- c) ograniczenia skutków naruszenia równowagi dynamicznej i deficytu mocy czynnej.

Łączeniowa automatyka zakłócenieniowa staje się obecnie jednym z elementów postępującej, kompleksowej automatyzacji systemu. Dlatego też rozwój automatyki zakłócenieniowej jest ściśle związany z rozwojem innych elementów tej automatyzacji. Należy tu przede wszystkim mieć na uwadze automatyzację i komputeryzację służby dyspozytorskiej w połączeniu z jej najbardziej właściwą organizacją.

Łączeniowa automatyka zakłócenieniowa sieci najwyższych napięć jest zarówno funkcjonalnie jak i strukturalnie współzależna z automatyką

zakłóceniami pracującą w sieci rozdzielczej oraz w elektrowniach systemu. Dotyczy to urządzeń automatyki samoczynnego częstotliwościowego odciążania - SCO oraz samoczynnego załączania rezerwy SZR. Na pracę łączeniowej automatyki zakłóceniami w sposób istotny wpływa również działanie układów automatycznej regulacji parametrów pracy systemu - częstotliwości mocy czynnej, napięcia i mocy biernej.

Najbardziej rozpowszechnioną łączeniową automatyką zakłóceniami w sieci najwyższych napięć jest automatyka samoczynnego załączania. W sieci najwyższych napięć automatyka SPZ pracuje prawie wyłącznie na liniach dwustronnie zasilanych. Układy automatyki SPZ pracujące w tej sieci możemy podzielić na układy trójfazowego SPZ (TSPZ) i jednofazowego SPZ (JSPZ). Automatyka TSPZ realizowana jest przeważnie jako szybkie niesynchroniczne SPZ. Inne układy automatyki TSPZ są dosyć powszechne w sieci systemu ZSRR [33], należy tu przede wszystkim wymienić układ automatyki TSPZ z wyczekiwaniem synchronizmu. Dla niektórych systemów może okazać się efektywnym kojarzenie automatyki szybkiego, niesynchronicznego TSPZ i powolnego TSPZ z wyczekiwaniem synchronizmu [12].

Obydwa wymienione wyżej rodzaje automatyki mają swoje wady i zalety. Na korzyść automatyki TSPZ w stosunku do JSPZ przemawiają:

- prostsze układy przekaźnikowe
- krótszy czas dejonizacji z uwagi na brak sprzężeń pojemnościowych podtrzymujących, przy obecności napięcia na fazach nieuszkodzonych, łuk elektryczny i utrudniających dejonizację.

Automatyka JSPZ jest natomiast korzystniejsza z uwagi na fakt, że nie prowadzi do przerywania przesyłu mocy linią, na której jest zainstalowana. Fakt ten wpływa w sposób bezpośredni i istotny na możliwość zwiększenia czasu trwania zakłócenia.

Zagadnienie wpływu sprzężeń pojemnościowych linii na czas dejonizacji przy automatyce JSPZ jest od dłuższego już czasu przedmiotem badań w wielu krajach [29, 30, 32, 36]. Prowadzone nad tym problemem badania zmierzają w dwu kierunkach:

- a) ustalenia dopuszczalnych wartości prądu pojemnościowego (wtórnego prądu łukowego) i napięcia powrotnego z uwagi na warunki dejoniza-

cji, względnie określenia zależności czasu dejonizacji od wartości prądu powrotnego [29, 32, 36],

b) opracowania środków eliminujących wpływ sprzężeń pojemnościowych [30].

W wyniku badań przeprowadzonych w systemach rzeczywistych i laboratoriach ustalono, że w sieciach o napięciach 220÷380 kV dopuszczalna wartość prądu pojemnościowego wynosi 15÷25 A, a napięcia powrotowego 15-22 kV [29]. Badania prowadzone w ZSRR [36] pozwoliły ustalić zależność czasu dejonizacji od prądu powrotnego dla linii 400 kV. Czas dejonizacji wynosił 0,4 sek przy prądzie 20 A i 2,8 sek przy prądzie 80 A. W laboratoryjnych badaniach wykonanych w Japonii [32] określono zależność czasów dejonizacji od wartości prądu powrotnego dla układów o napięciu 300 kV. Czasy te wahały się od około 0,2 sek. przy prądzie 8 A do około 0,6 sek przy prądzie 42 A.

Środkami stosowanymi względnie proponowanymi do stosowania w celu eliminacji zjawiska podtrzymywania łuku i utrudniania dejonizacji przez sprzężenia pojemnościowe przy JSPZ są [30]:

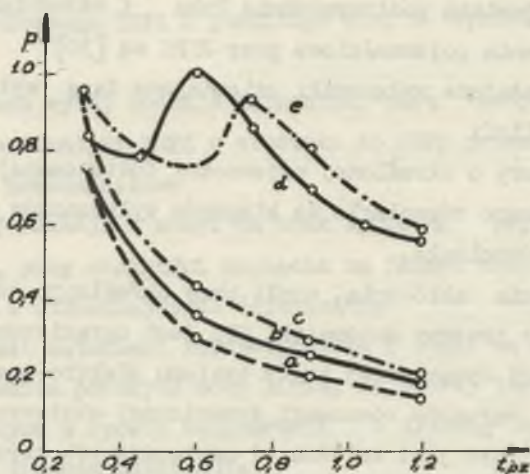
- a) szybkodziałające wyłączniki uziemiające fazę wyłączoną na obydwu krańcach linii
- b) kondensatory o określonej pojemności dostosowanej do pojemności linii załączane równolegle do biegunów wyłączników
- c) dławiki równoległe.

Czas trwania zakłócenia, czyli przy określonym czasie wyłączenia zwarcia, czas przerwy automatyki SPZ jest ograniczony od góry warunkami równowagi dynamicznej pracy systemu elektro-energetycznego. Z punktu widzenia warunków równowagi dynamicznej skuteczność danego rodzaju automatyki SPZ jest zależna od następujących czynników:

- a) ilości torów linii wyposażonej w automatykę SPZ a w przypadku linii jednotorowej od istnienia i zdolności przesyłowej dodatkowych sprzężeń między częściami systemu, które ta linia łączy
- b) wielkości mocy przesyłanej linią, na której zainstalowano SPZ
- c) rodzaju i lokalizacji zakłócenia zwarciego
- d) rodzaju regulatorów napięcia i prędkości obrotowej, w które wyposażone są źródła mocy pracujące w systemie

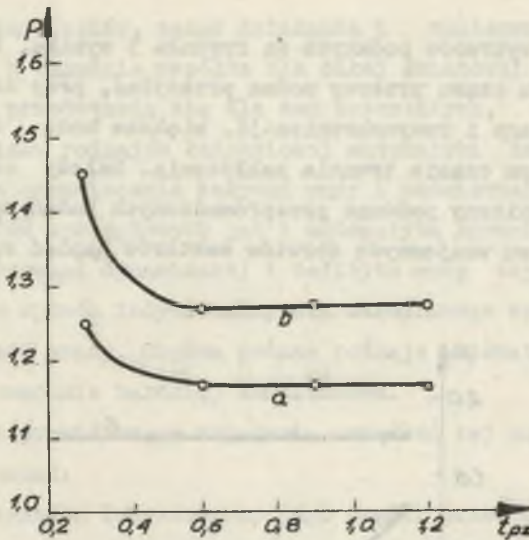
e) dopuszczalności asynchronicznego biegu oraz resynchronizacji części systemu.

Występującym obecnie, istotnym problemem jest określenie wpływu działania szybkiej regulacji wzbudzenia i prędkości obrotowej generatorów na podniesienie skuteczności automatyki SPZ jako środka poprawy równowagi dynamicznej pracy systemu [28, 31]. Problem ten wiąże się ściśle z drugim aktualnym zagadnieniem, a mianowicie warunkami pracy układów elektroenergetycznych wyposażonych w automatykę SPZ, dla których dopuszcza się bieg asynchroniczny, likwidowany w wyniku resynchronizacji. Wyniki dotychczasowych badań dotyczących tych problemów wykazały, że moc przesyłana przed zakłóceniem linią z automatyką SPZ - dopuszczalna z uwagi na równowagę dynamiczną - może zostać poważnie zwiększona jeżeli generatory pracujące w układzie wyposażone są w szybkie regulatory wzbudzenia i prędkości obrotowej. Wyniki badań w tym zakresie ilustrują wykresy podane na rysunkach 5, 6.



Rys. 5. Zależności dopuszczalnych mocy przesyłanej linią jednorodową od czasu trwania zakłóceń likwidowanych przez automatykę TSPZ przy czasie wyłączenia zwarcia 0,14 sek.

Krzywe: a) zwarcie trójfazowe przy braku szybkiej regulacji generatorów, b) zwarcie trójfazowe przy istnieniu szybkiej regulacji generatorów, c) zwarcie jednofazowe przy istnieniu szybkiej regulacji generatorów, d) zwarcie trójfazowe przy dopuszczeniu asynchronicznego biegu sprzęganych części systemu, e) zwarcie jednofazowe przy dopuszczeniu asynchronicznego biegu sprzęganych części systemu



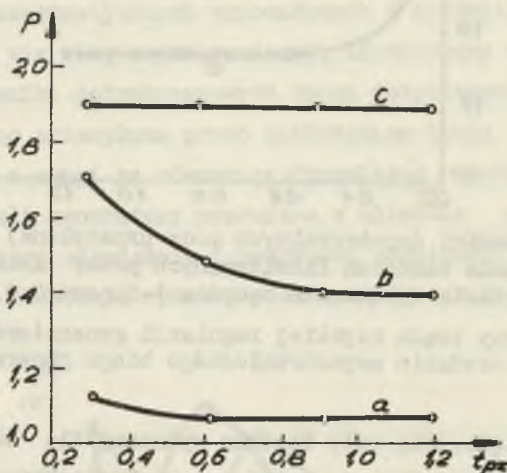
Rys. 6. Zależności dopuszczalnych mocy przesyłanej linią jednorodną od czasu trwania zakłóceń likwidowanych przez automatykę JSPZ przy czasie wyłączenia zwarcia 1-fazowego 0,14 sek

Krzywe: a) przy braku szybkiej regulacji generatorów, b) przy dopuszczaniu asynchronicznego biegu generatorów

Możliwość zwiększenia mocy została wykazana dla wszystkich badanych układów automatyki SPZ. Przeciętne zwiększenie mocy dla układów z szybkodziałającymi regulatorami wynosi około 20% w stosunku do układów bez takich regulatorów.

Wyniki badań i obserwacji eksploatacyjnych [12, 28] wykazały również, że wielkość dopuszczalnej mocy przesyłanej może nawet wzrosnąć, przy jednoczesnym zwiększeniu czasu przerwy automatyki SPZ, jeżeli dopuści się dla układu bieg asynchroniczny likwidowany następnie w wyniku resynchronizacji. Wartość mocy dopuszczalnej i warunki resynchronizacji zależą ściśle dla danego układu przesyłowego od rodzaju zakłócenia i automatyki SPZ oraz od czasu działania tej automatyki, co ilustrują wykresy podane na rysunku 5. Bieg asynchroniczny może wystąpić między rozdzielonymi częściami systemu lub częściami, które zachowały ograniczone sprzężenie. W tym ostatnim przypadku w systemie wystąpią kołysania asynchroniczne.

Z analizy wykresów podanych na rysunku 5 wynika, że przy odpowiednim wydłużeniu czasu przerwy można przesyłać, przy dopuszczeniu biegu asynchronicznego i resynchronizacji, większe moce dopuszczalne niż przy minimalnym czasie trwania zakłócenia. Należy zwrócić uwagę, że bieg asynchroniczny podczas przeprowadzonych badań ograniczał się do jednego lub dwu wzajemnych obrotów wektorów napięć sprzęganych części systemu.



Rys. 7. Zależności dopuszczalnej mocy przesyłanej linią dwutorową od czasu trwania zakłócenia na jednym z torów

Krzywe: a) zwarcie trójfazowe likwidowane przez automatykę TSPZ, b) zwarcie jednofazowe likwidowane przez automatykę TSPZ, c) zwarcie jednofazowe likwidowane przez automatykę JSPZ

Na rysunku 7 podano zależności dopuszczalnej mocy przesyłanej linią dwutorową w zależności od czasu trwania zakłócenia w systemach z generatorami o szybkiej regulacji wzbudzenia i obrotów przy działaniu różnych układów automatyki SPZ. Wykresy podane na rysunkach 5, 6, 7 mogą być podstawą oceny skuteczności poszczególnych układów SPZ.

Przy niesynchronicznym SPZ i biegu asynchronicznym sprzęganych części systemu względem siebie istotnym zagadnieniem jest określenie dopuszczalnych wielkości prądów niesynchronicznych dla takich elementów systemu jak generatory, kompensatory, transformatory [35]..

Problemy dotyczące celów, zasad działania i skuteczności pracy automatyki SPZ są w zasadzie wspólne dla całej światowej energetyki. Inaczej sprawa ta przedstawia się dla dwu pozostałych, wymienionych na początku rozdziału rodzajów łączeniowej automatyki zakłóceniewej. Zarówno automatyka ograniczenia kołysań mocy i nadmiernego obciążenia przesyłowych układów sprzęgłowych jak i automatyka ograniczenia skutków naruszenia równowagi dynamicznej i deficytu mocy czynnej muszą być rozwiązywane w sposób indywidualny dla określonego systemu zależnie od warunków jego pracy. Obydwa podane rodzaje automatyki ściśle współzależne, są znacznie bardziej kompleksowe.

Dla zapewnienia prawidłowego działania urządzeń tej automatyki konieczna jest znajomość:

- warunków pracy systemu lub znacznej jego części przed zakłóceniem
- bieżącego przebiegu stanu przejściowego w systemie
- bieżącego działania innych układów automatyki i automatycznej regulacji.

Dalszy rozwój tych rodzajów automatyki jest ściśle związany z rozwojem nadrzędnych układów automatyzacji i służby dyspozytorskiej. Wymagana prawidłowość decyzji tej służby, szybkość ich podjęcia i realizacji może zostać zapewniona poprzez jej komputeryzację i automatyzację, wykorzystującą możliwości współczesnej teletechniki [31].

#### 4. Środki łączności dla celów elektroenergetycznej automatyki zakłóceniewej

Istotne znaczenie dla poprawy wybiórczości i przyśpieszenia działania automatyki zabezpieczeniowej w sieciach najwyższych napięć mają środki łączności pomiędzy półkompletami zabezpieczeń, zainstalowanymi na obydwu końcach chronionej linii. Zakres informacji wymienianych między współpracującymi układami zabezpieczeń zależy przy tym od rodzaju zabezpieczenia, natomiast o charakterze łącza (przewodowe, łącze nośne wielkiej częstotliwości lub radiowe) decydują ponadto takie czynniki jak: długość zabezpieczonej linii, ilość informacji przekazywanych danym łączem itp.

W liniach najwyższych napięć stosuje się na ogół dwa podstawowe rodzaje zabezpieczeń łączowych, zwanych też zabezpieczeniami odcinkowymi:

- 1) zabezpieczenia porównawczo-fazowe prądowe;
- 2) zabezpieczenia z wykorzystaniem przekaźników odległościowych.

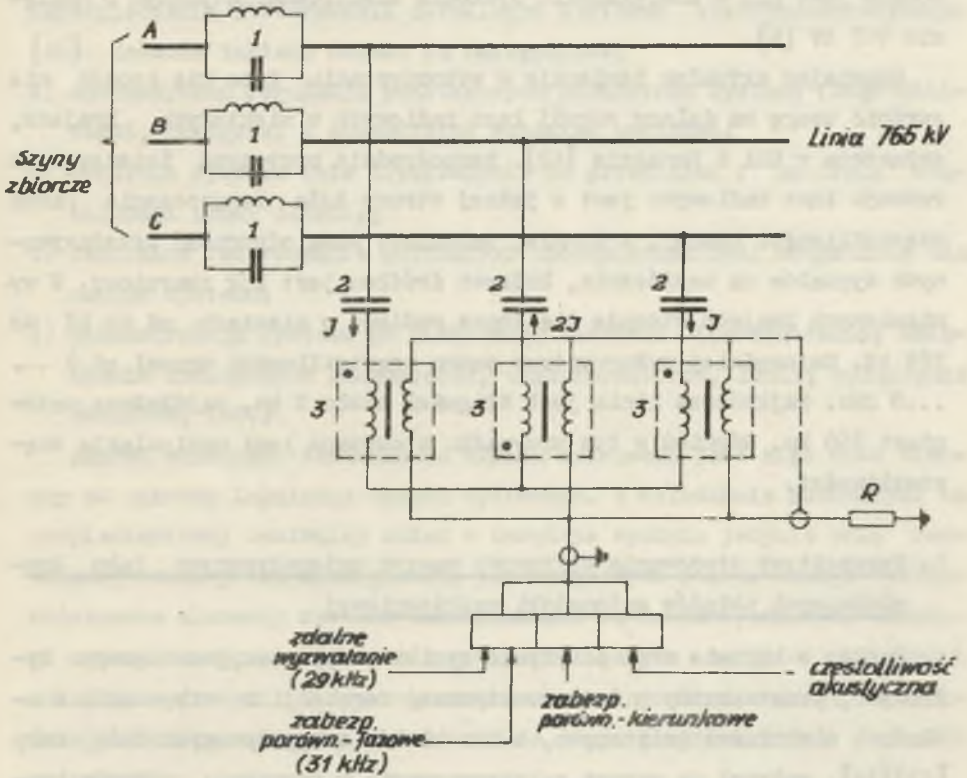
W przypadku zabezpieczenia porównawczo-fazowego informacja przekazywana za pomocą łącza dotyczy argumentu pomiędzy wskazani prądu na początku i końcu zabezpieczanej linii. Informacja o argumentcie prądu jest przesyłana w postaci sygnału blokującego o częstotliwości akustycznej. Dla krótkich linii (do 30 km) stosuje się łącza przewodowe z wykorzystaniem kabli telefonicznych. W liniach dłuższych z reguły stosowane są łącza nośne wielkiej częstotliwości (w.cz.) z wykorzystaniem przewodów roboczych zabezpieczanej linii elektroenergetycznej.

W zachodniej Europie powszechne stało się wykorzystanie łącz do współpracy z zabezpieczeniami odległościowymi [37] [38]. Ten rodzaj zabezpieczeń odcinkowych często jest określany mianem zabezpieczenia współbieżnego i charakteryzuje się likwidacją wszystkich zwarć występujących na całym odcinku chronionym z czasem pierwszej strefy. Najczęściej stosowanymi układami są:

1. Układ z kontrolą impulsu wyłączającego przez człon rozruchowy podimpedancyjny zabezpieczenia odległościowego zainstalowanego na drugim końcu linii;
2. Układ z wydłużeniem pierwszej strefy.

Duży wpływ na prawidłowe działanie zabezpieczeń współpracujących ze sobą za pomocą łącz telekomunikacyjnych ma odporność łącza na zakłócenia. Zakłócenia takie mogą wystąpić podczas manipulacji łączeniowych, pod wpływem ulotu lub w czasie zwarć łukowych na linii [39] [40]. Dla łącz w.cz. z wykorzystaniem przewodów linii elektroenergetycznej zwłaszcza zwarcie łukowe tej fazy, po której przesyłany jest sygnał użyteczny, stanowi poważne zagrożenie dla prawidłowej transmisji tego sygnału. W miejscu zwarcia następuje bowiem znaczne wytłumienie sygnału użytecznego. Dla zwiększenia pewności łącza w.cz. w sieciach najwyższych napięć z podanych przyczyn z reguły wykorzystuje się przesył fali nośnej po dwóch fazach tej samej linii [41] zaważa-





Rys. 8. Łącze wielkiej częstotliwości linii 765 kV w USA

1 - filtr zaporowy, 2 - kondensator sprzęgający, 3 - filtr sprzęgający

jąc jednocześnie pasmo manipulowanej częstotliwości. W liniach o bardzo ważnym znaczeniu czasami spotyka się rozwiązanie podane na rys. 8 w którym wykorzystuje się wszystkie fazy danej linii. Taki układ stosowany jest np. w amerykańskim systemie elektroenergetycznym o napięciu 765 kV [9].

Omawiając aktualne tendencje w wykorzystaniu łącz nie sposób nie zwrócić uwagi na dalszy rozwój łącz radiowych w niektórych krajach, zwłaszcza w USA i Kanadzie [42]. Bezpośrednią przyczyną intensywnego rozwoju łącz radiowych jest z jednej strony duże zagęszczenie pasma częstotliwości nośnej, z drugiej natomiast duża odporność przekazywanych sygnałów na zakłócenia, których źródłem jest łuk zwarciowy. W wymienionych krajach stosuje się łącze radiowe w sieciach od 69 kV do 765 kV. Najczęściej wykorzystane pasmo częstotliwości wynosi od 6 ... ..8 GHz. Najkrótsza linia jest długości około 2 km, najdłuższa natomiast 360 km. Również w tym przypadku stosowana jest manipulacja częstotliwości.

##### 5. Perspektywy stosowania cyfrowych maszyn matematycznych jako kompleksowych układów automatyki zakłóceńowej

Postęp w budowie oraz pozytywne wyniki eksploatacyjne maszyn cyfrowych, przeznaczonych do automatycznej regulacji i sterowania w układach elektroenergetycznych, m.in. bloków energetycznych dużej mocy [43] [44], wpłynął na wzrost zainteresowania w tworzeniu układów kompleksowej automatyki zakłóceńowej w oparciu o matematyczne maszyny cyfrowe. Mimo, że techniczna realizacja z różnych przyczyn wydaje się być jeszcze dość odległa, istnieją obecnie dwie zasadnicze koncepcje takich układów.

Koncepcja pierwsza polega na stosowaniu lokalnych układów cyfrowych w wybranych węzłach wytwórczych lub sieciowych [45]. Maszyna cyfrowa spełnia w tym przypadku wszystkie zadania dotychczas realizowane przez zespoły automatyki łączeniowej oraz zabezpieczeniowej wszystkich elementów danego węzła (generatorów, transformatorów, linii szyn zbiorczych). Zaletą takiego rozwiązania jest m.in. możliwość przyspieszenia likwidacji zakłóceń, wyeliminowanie zjawiska fałszowania

pomiaru impedancji wskutek tzw. "spływu prądu", możliwość samoczynnej zmiany wartości rozruchowych w zależności od konfiguracji układu i obciążenia linii.

Drugie z proponowanych rozwiązań stanowi centralny układ kontroli, zabezpieczenia i sterowania określonym systemem elektroenergetycznym [46]. Zadania takiego układu są następujące:

- a) automatyczna regulacja podstawowych parametrów systemu (częstotliwości, napięcia) i ekonomiczny rozdział obciążeń;
- b) kontrola systemu (nie dopuszczanie do przeciążeń i kontrola stabilności pracy układu);
- c) centralne rezerwowanie automatyki zabezpieczeniowej wszystkich elementów systemu;
- d) rekonstrukcja systemu po likwidacji zakłóceń (przełączenia, załączenie dodatkowych generatorów, transformatorów, linii; wyłączenie odbiorów, itd.).

Zakres czynności centralnego układu cyfrowego jest więc dużo szerszy od zakresu lokalnego układu cyfrowego. W dziedzinie automatyki zabezpieczeniowej centralny układ w zasadzie spełnia jedynie rolę centralnej rezerwy dla zabezpieczeń poszczególnych stacji danego systemu. Podstawowe elementy systemu zabezpieczane są konwencjonalnymi układami zabezpieczeń, względnie - w przypadku całych stacji - lokalnymi układami cyfrowymi. W tych warunkach centralny układ stanowi oczywiście jednostkę nadrzędną w stosunku do wszystkich lokalnych układów cyfrowych.

Wydaje się być pewne, że w pierwszym okresie nastąpi rozwój lokalnych układów cyfrowych, zwłaszcza że układ centralny wymaga odpowiednich łącz do przekazywania dużej ilości danych (dla systemu średniej wielkości rzędu 200...400 informacji) z różnych punktów danego systemu. Dane dotyczą takich wielkości jak: prąd, napięcie, częstotliwość itp.

Inny problem stanowi wybór sposobu przekazywania mierzonych wielkości elektrycznych. W tej chwili nie ma zgodności, czy wielkości te mają zostać przekazywane w postaci sygnałów analogowych czy cyfrowych. Podczas gdy zaletą przesyłania sygnałów analogowych jest większa do-

kładność przy mniejszym nakładzie kosztów na urządzenia peryferyjne, to przenoszenie mierzonych wielkości w postaci sygnałów dyskretnych charakteryzuje się istnieniem większego zapasu pomiędzy najmniejszą i największą wartością wielkości mierzonej. Do rozwiązania pozostaje ponadto opracowanie urządzeń peryferyjnych maszyny cyfrowej, tzn. elementów dopasowujących, przekształcających itp.

Wymienione problemy decydują o tym, że wprowadzanie maszyn cyfrowych jako kompleksowych układów automatyki zakłóceńowej nawet w krajach wysoko rozwiniętych pod względem technicznym jest jeszcze ciągle kwestią przyszłości.

#### LITERATURA

- [ 1 ] Sutton H.J.: Transients induced in control cables located in E.H.V. substations. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems 1970 z. 6.
- [ 2 ] Synal B.: Współczesne tendencje w dziedzinie zabezpieczeń linii najwyższych napięć. Materiały Konferencyjne Polit. Wrocławskiej. 1967 r.
- [ 3 ] Sonnemann W.K.: Transient voltages in Relay Control Circuits AIEE Transactions. Part. III 1962 z. 2.
- [ 4 ] Trojak J.: Zabezpieczenie układów blokowych; niektóre zagadnienia dyskusyjne. Materiały Konferencyjne Polit. Wrocławskiej. 1967 r.
- [ 5 ] Ines Z., Radecki J., Seydak W.: Automatyka zabezpieczeniowa i łączeniowa w sieciach zasilających i wewnętrznych zakładów przemysłowych. Materiały Konferencyjne NOT - Oddział Katowice, 1967 r.
- [ 6 ] Gumiński J.: Problemy doboru automatyki zabezpieczeniowej sieci najwyższych napięć. Energetyka 1968 z. 11.
- [ 7 ] Sutton H.J.: The application of relaying on an EHV System. IEEE Transactions on Power App. and Syst., 1967 z. 4.
- [ 8 ] IEEE Committee Report: Local Backup Relaying Protection. IEEE Transactions on Power App. and Syst., 1970 z. 6.
- [ 9 ] Horowitz S.H., Seeley H.T.: Relaying the AEP-765 kV System. IEEE Transactions on Power App. and Systems 1969 z. 9.
- [ 10 ] Razow S.S.: Rozwitiye techniki rielejnoj zaszczyty w Japonii. Energochazajstwo za rubieżam. 1967 z. 6.

- [11] Björklund R.: Static distance protection type RAZOG. ASEA Journal 1970 z. 1.
- [12] Committee Report: Relaying the Keystone 500 - kV system. IEEE Transactions on Power App. and Syst. 1968 z. 6.
- [13] IEEE Committee Report: Supplement to recent practices and trends in protective relaying. IEEE Transactions on Power App. and Syst. 1964 z. 10.
- [14] Acker J.: Moderne Lösungen für Leitungs- und Sammelschienen-schutz. Bull. SEV. 1970 z. 4
- [15] Uhlig H.: Höchstspannungs-Netzschutz. Bull SEV 1970 z. 4
- [16] Possner O.: Omówienie 23 konferencji CIGRE. Zabezpieczenia, Automatyka i technika sterowania. ETZ-A, 1971 z. 1.
- [17] Mathews P., Nellist B.: Transients in distance protection. Proceedings I.E.E. 1963 z. 2.
- [18] Lewis W.: Effect of transients on EHV protection. Electrical Times. 1967 t. 151.
- [19] Żydanowicz J.: Wpływ składowej nieokresowej prądu zwarciovogo na komparatory fazowe koincydencyjne do zabezpieczeń odległościowych. Archiwum Elektrotechniki 1969 z. 2.
- [20] Wiszniewski A.: Uchyby dynamiczne zabezpieczeniowych przekładników prądowych. Przegląd Elektrot. 1970 z. 6.
- [21] Fischer A., Rosenberger G.: Verhalten von linearen und eisengeschlossenen Stromwandlern bei verlagerten Kurzschlussströmen. Elektrizitätswirtschaft 1968, z. 12.
- [22] Gericke G., Thomas R.: Messung verlagelter Kurzschlussströme in Prüffeldern mit Hilfe von Linearwandlern. ERZ-A 1970 z. 8.
- [23] Roszkowski A., Salnikow A., Wiszniewski A.: Nowe metody pośrednich pomiarów prądu elektrycznego. Prace Naukowe Instytutu Energoelektryki Polit. Wrocławskiej 1970 z. 4.
- [24] Wolfkowitz J.W.: Transformatory toka swierchwysokich naprażeń s opticeskoj, radio - i jemkostnoj swjazu, Energochazajstwo za rubieżam 1970 z. 4.
- [25] Forster M.: Der elektronische Sammelschienenschutz. Brown Boveri Mitt. 1966 z. 11/12.
- [26] Diskussionen zu den Fachvorträgen der VDE Hauptversammlung. Themengruppe 6: Netzschutz mit elektronischen Bauelementen ETZ-A 1970 z. 12.
- [27] Jackson L., Patrickson J.B., Wedephol L.M.: Distance protection: optimum dynamic design of static relay comparators. Proceedings of IEE. 1968 z. 2.
- [28] Humpage W.D., Stott B.: Effect of autoreclosing circuit breakers on transient stability in e.h.v transmission systems. Proceedings IEE nr 7 1964 r.

- [29] Farouk A.: Single-phase autoreclosure of extra-high-voltage transmission lines. Proceedings IEE nr 1 1969 r.
- [30] Peterson H., Dravid N.: A method for reducing dead time for single-phase reclosing in EHV. Transmission. IEEE Transactions on power apparatus and systems nr 4 1969 r.
- [31] Ziejlidzon E., Ługinskij I., Mamikonjanc Ł., Portnoj M., Sowałow S., Chaczaturow A.: Protiwawarijnaja awtomatika w energosistiemach SSSR. Elektrizestwo nr 3 1970.
- [32] Fukunishi M., Anjok Terase H., Yano K., Ozaki Y., Kawaguchi Y.: Laboratory study on dead time of high speed reclosing of 500 kV systems. CIGRE Int. Conf. Large High Tens. Elec. Syst. Paris 1970 r.
- [33] Zejlidzon E.: Pierspiektiwij primienienia APW s udawliwaniem synchronizma. Elektrizestwskie stancji nr 4 1965.
- [34] Jones D., Johns A.: Autoreclose-circuit design for large substations using logic sequence swithing. Proceedings IEE nr 12 1967.
- [35] Gizita E.: Rasczet ustrojstw awtomatiki energosistem. G.I. USSR Kljew 1962.
- [36] Majkopar A.: Minimum time of automatic reclosing. Electric Technology USSR 1970.
- [37] Gantner J.: Brown Boveri Distanzschutz-Schaltungen mit Übertragung eines Signals zur Gegenstation. Brown Boveri Mitt. 1968 z.7.
- [38] Schumm G.: TFH Distanzschutz in Hoch- und Höchstspannungsanlagen ETZ-A 1967 z. 2.
- [39] A. de Quervain, Balm Ch.: Hochfrequenzkupplung für den Schnelldistanzschutz. Brown Boveri Mitt. 1960 z. 5/6.
- [40] Bozoki B.: Effects of noise on transfer-trip carrier relaying. IEEE Transactions on Power Appar. and Syst. 1968 z. 1.
- [41] Bartsch R., Bergmann G.: Trägerfrequenz-Nachrichtenübertragung über Höchstspannungsleitungen. Siemens Z. 1965 z. 8.
- [42] I.E.E.E. Committee Report: Use of micriwave radio for protective relaying. I.E.E.E. Transactions on Power Appar. and Syst. 1970 z. 5/6.
- [43] Anstine L.T.: Application of digital computer techniques to the economic scheduling of marginal generating units for the Pennsylvania-New Jersey-Maryland interconnection. Trans. IEEE 1964 z. 4.
- [44] Oughton A.G.: Der Einsatz von Rechenmaschinen beim Central Electricity Generating Board. ETZ-A 1966 z. 12.
- [45] Rockefeller G.D.: Fault protection with a digital computer. IEEE Transactions on Power Appar. and Syst. 1969 z. 4.

- [46] Ungrad H., Glawitsch H.: Centrally coordinated back-up protection and system security monitoring as constituents of an integrated system for the automation of power transmission. Referat CIGRE 1970.
- [47] Kolar A.: Einsatz von Computern in elektrischen Netzen. Bull.SEV 1970 z. 4.

А. БОГУЦКА, Э. ЛАЗЕРА, В. ВИНКЛЕР  
Кафедра Электроэнергетики  
Силезского Политехнического Института  
Гливице

### ИЗБРАННЫЕ ПРОБЛЕМЫ АВТОМАТИКИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

#### К о р о т к о е   с о д е р ж а н и е

В работе представлены актуальные тенденции автоматизации защиты в связи с развитием электроэнергетических сетей и систем высокого напряжения. Особое внимание уделено автоматическому повторному включению (АПВ). Обсуждены условия работы и эффективность избранных схем автоматизации. Обращено внимание на прогресс использования защиты на полупроводниках в удвоении релейной аппаратуры и других элементов автоматизации защиты. Проанализированы перспективы применения цифровых вычислительных машин в качестве центрального устройства защиты и управления электроэнергетической системой.

Отмечено большую роль средств связи в ускорении ликвидации помех. Рассмотрены применяемые в настоящее время телекоммуникационные каналы связи с учетом преимуществ и недостатков отдельных типов этих устройств.

Подвергнуто оценке состояние работ по способам исключения влияния аperiodической составляющей тока короткого замыкания на работу быстродействующих реле.

#### ОПИСАНИЕ РИСУНКОВ

Рис. 1. Типовое устройство защиты линий высокого напряжения комплект I - дифференциально-фазная защита, комплект II - дистанционная защита



Рис. 2. Пусковые характеристики измерительных элементов современного дистанционного реле

Рис. 3. Принцип действия электронного направленного элемента современного дистанционного реле

Рис. 4. Пусковые характеристики электронного направленного элемента в зависимости от степени насыщения трансформатора тока

$Z_L$  - показатель импеданса линии, 1 - основная пусковая характеристика, 2 - пусковая характеристика для  $I_Z = 10 I_N$  и постоянной времени затухания апериодической составляющей  $T_I = 20$  мсек, 3 - пусковая характеристика для  $I_Z = 10 I_N$  и  $T_I = 100$  мсек

Рис. 5. Зависимости допустимых передаваемых мощностей одноцепной линией от длительности выступления нарушений ликвидированных автоматикой трехфазного АПВ (TSPZ) для времени отключения короткого замыкания 0,14 сек. кривые:

- а) трёхфазное к.з. при отсутствии быстродействующего регулирования генераторов,
- б) трёхфазное к.з. при наличии быстродействующего регулирования генераторов,
- в) однофазное к.з. при наличии быстродействующего регулирования генераторов,
- г) трёхфазное к.з. при допущении асинхронного хода сопрягаемых частей системы,
- ж) однофазное к.з. при допущении асинхронного хода сопрягаемых частей системы.

Рис. 6. Зависимости допустимых передаваемых мощностей одноцепной линией от длительности выступления нарушений ликвидированных автоматикой ОАПВ для времени отключения однофазного к.з. 0,14 сек. кривые:

- а) при отсутствии быстродействующего регулирования генераторов
- б) при допуске асинхронного хода генераторов.

Рис. 7. Зависимости допустимой передаваемой мощности двухцепной линией от длительности выступления нарушения в одной линии. кривые:

- а) трёхфазное к.з. ликвидированное автоматикой ТАПВ
- б) однофазное к.з. ликвидированное автоматикой ТАПВ
- в) однофазное к.з. ликвидированное автоматикой ОАПВ

Рис. 8. Канал высокой частоты линии 765 кв в США

1. заграждающий фильтр
2. сопрягающий конденсатор
3. сопрягающий фильтр

A. BOGUCKI, E. LAWERA, W. WINKLER  
Chair of Electrical Power Systems  
Technical University of Gliwice

### SOME RELAYING PROBLEMS IN E.H.V. POWER SYSTEMS

#### S u m m a r y

In the paper there are described the recent trends in protection and switch-gear automatic techniques in e.h.v. networks and power systems. Special interest was focused on auto-reclosing techniques together with operating conditions and efficiency of certain arrangements being discussed. Attention was payed to the development of semi-conductor protection devices as well as to the tendency of reduplication of relay-gear and automatic control protection elements. There are discussed the prospects of employing of digital computer operating as central, both protection and control mechanism in power system.

The weight means of communication in fast clearing of faults was emphasized. Recently being used carrier current circuits were described with regard to their advantages and disadvantages.

Firmly there was given the evaluation of development of techniques concerning the problem of eliminating of fault current d.c. component effect on extra-quick-response relays performance.

## FIGURES DESCRIPTIONS

Fig. 1. Typical protection scheme for e.h.v. transmission lines

set I - phase-comparison protection  
set II - distance protection

Fig. 2. Starting characteristics of measuring elements of contemporary distance relays

Fig. 3. Operation principle of electronic directional element of modern distance relay

Fig. 4. Starting characteristics of electronic directional element as functions of current transformer saturation rate

$Z_L$  - line impedance vector, 1 - basic starting characteristic, 2 - starting characteristic for  $I_Z = 10 I_N$  and time constant of decay of d.c. component  $T_1 = 20$  ms, 3 - starting characteristic for  $I_Z = 10 I_N$  and  $T_1 = 100$  ms

Fig. 5. Relations between permissible power single-line transmitted and duration of faults being cleared by 3-phase auto-reclosing gear; fault tripping time 0,14 s.

Curves:

- 3-phase fault when there is no quick control of generators
- 3-phase fault when there is quick control of generators
- single-phase fault when there is quick control of generators
- 3-phase fault when asynchronous operation of parts of system being coupled is allowed
- single-phase fault when asynchronous operation of parts of system being coupled is allowed

Fig. 6. Relations between permissible power single-line transmitted and duration of faults being cleared by single-phase auto-reclosing gear; single-phase fault tripping time 0,14 s.

Curves:

- when there is no quick control of generators
- when there is quick control of generators

Fig. 7. Relations between permissible power double-line transmitted and duration of fault on one of lines

Curves:

- 3-phase fault cleared by 3-phase auto-reclosing gear
- single-phase fault cleared by 3-phase autoreclosing gear
- single-phase fault cleared by single-phase auto-reclosing gear

Fig. 8. Carrier current high frequency circuit for 765 kV line in the USA

1 - stop filter, 2 - coupling condenser, 3 - coupling filter