ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 2000
Seria: ELEKTRYKA z. 174 Nr kol. 1472

Bernard WITEK

MOŻLIWOŚCI REALIZACJI ADAPTACYJNYCH FUNKCJI STEROWANIA I ZABEZPIECZEŃ W ELASTYCZNYCH UKŁADACH PRZESYŁOWYCH (FACTS)

Streszczenie. W artykule przedstawiono wybrane zagadnienia współpracy niekonwencjonalnych układów regulacji stosowanych w elastycznych systemach przesyłowych z układami elektroenergetycznej automatyki zabezpieczeniowej. Pokazano możliwości realizacji adaptacyjnego zabezpieczenia odległościowego dwutorowej linii przesyłowej, którego moduł decyzyjny uwzględnia zarówno zmiany parametrów układu (związane np. z działaniem układu regulacji), jak również jego aktualną konfigurację określoną przez położenia łączników.

REALIZATION POSSIBILITIES OF ADAPTIVE PROTECTION AND CONTROL FUNCTIONS IN FLEXIBLE AC TRANSMISSION SYSTEMS (FACTS)

Summary. The paper presents chosen aspects of FACTS control devices co-operation with protective relays. The concept of double-circuit line adaptive distance protection is proposed. Decision criteria consider both: transmission system parameters (implied e.g. by the Unified Power Flow Controller operation), as well as its topology determined by the switches positions in the entire system.

1. WPROWADZENIE

W związku z ciągłym wzrostem obciążeń w systemie elektroenergetycznym przy jednoczesnych ograniczeniach w zakresie budowy nowych torów przesyłowych, konieczne staje się stosowanie środków umożliwiających zwiększenie mocy przesyłanych istniejącymi torami systemu przesyłowego. Dokonujący się obecnie postęp w technologii półprzewodników umożliwił rozwój układów tzw. elastycznego przesyłu energii elektrycznej (FACTS – ang. *Flexible AC Transmission Systems*). Znanych i opisanych w literaturze jest wiele

rozwiązań o różnych możliwościach regulacyjnych [1, 2, 15]. Należą do nich na przykład: zunifikowany układ sterowania przesyłem mocy (UPFC – ang. *Unified Power Flow Controller*), układ kompensacji SVC (ang. *Static Var Compensator*), kompensator statyczny STATCON (ang. *Static Condenser*) czy tyrystorowy układ kompensacji szeregowej TCSC [16] (ang. *Thyristor Controlled Series Capacitor*).

Z punktu widzenia szybkości regulacji układy FACTS można sklasyfikować na trzech poziomach:

- sterowanie przepływem mocy w stanach *ustalonych*; zakres czasowy regulacji jest rzędu minut i jest realizowany poprzez włączenia elementów biernych oraz układów wytwórczych,
- sterowanie w stanach *przejściowych* pomiędzy różnymi stanami ustalonymi pracy systemu w warunkach możliwych przeciążeń związanych z wyłączeniami - czasy odpowiedzi układów regulacji są wówczas rzędu sekund, zatem metody konwencjonalne mogą być stosowane jedynie w przypadkach najprostszych, natomiast w większości przypadków konieczne jest stosowanie przełączalnych elementów energoelektronicznych,
- sterowanie w stanach dynamicznych i przejściowych wymaga czasów reakcji poniżej 100 ms, możliwych do osiągnięcia jedynie za pomocą niekonwencjonalnych środków regulacji w układach FACTS, wykorzystujących elementy energoelektroniczne o złożonych opcjach sterowania.

Przegląd podstawowych elementów FACTS oraz zakresu ich oddziaływania przedstawiono w tabeli 1 [2].

Tabela 1

Zakresy oddziaływania elementów FACTS

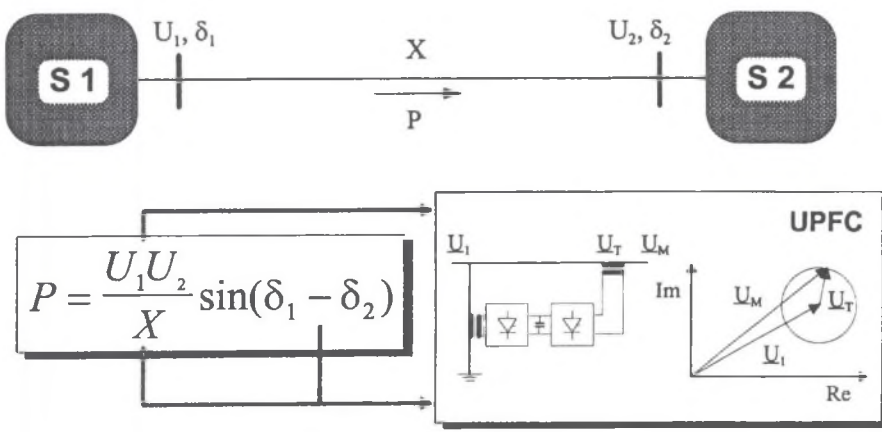
	SVC	STATCON	CSC	TCSC	PST	UPFC
Poziom napięcia	***	***	*	*	*	***
Przepływ mocy	-	-	*	**	***	***
Stabilność przejściowa	*	*	***	***	**	***
Tłumienie kołysań mocy	*	*	***	***	**	***

- brak oddziaływania
* słaby wpływ
** średni wpływ
*** maksymalny wpływ

2. MODELOWANIE UKŁADÓW FACTS NA PRZYKŁADZIE UPFC

Przesłanki przedstawione wyżej oraz wnioski płynące z analizy tabeli 1 skłaniają do szczególnego skoncentrowania się na układzie typu UPFC. Idea FACTS na przykładzie tego układu została przedstawiona na rys. 1.

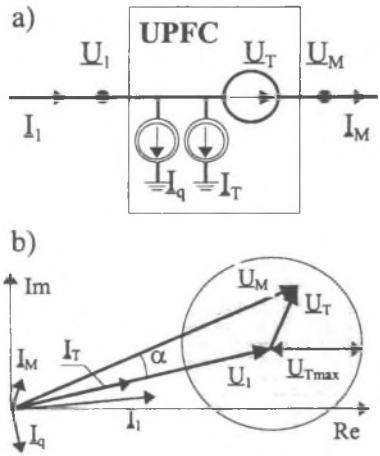
Przedstawiona na rys. 1 struktura regulatora UPFC zawiera dwa transformatory – poprzeczny oraz szeregowy, które podłączone są do konwerterów GTO wraz z gałęzią pojemnościową. W układzie UPFC moc bierna „wstrzykiwana" do linii poprzez gałąź szeregową jest w tej gałęzi generowana i nie musi być dostarczana z gałęzi poprzecznej. Natomiast moc czynna pobierana jest z systemu przez gałąź poprzeczną (prąd I_T – rys.2a) i dostarczana do gałęzi szeregowej poprzez obwód stałoprądowy. Również wartość składowej biernej prądu gałęzi poprzecznej I_q może być regulowana. Obszar regulacji ograniczony jest kołową charakterystyką o promieniu U_{Tmax} przedstawioną na rys. 2b.



Rys. 1. Idea sterowania przepływem mocy i utrzymaniem stabilności układu przesyłowego za pomocą regulatora UPFC

Fig. 1. UPFC – based power flow control and stability improvement system

Z powyższego wynikają parametry regulacji UPFC, które mogą być wykorzystane jako wielkości wejściowe adaptacyjnych układów sterowania i zabezpieczeń, są to mianowicie: moduł i faza napięcia U_T oraz wartość składowej biernej I_q. Zgodnie z rys.2(b) dla wielkości charakterystycznych regulatora obowiązują następujące zależności:



Rys. 2. Model (a) i wykres wektorowy (b) regulatora UPFC

Fig. 2. UPFC model (a) and a vector diagram (b)

$$\underline{U}_M = \underline{U}_1 + \underline{U}_T, \tag{1}$$

$$\mathrm{Arg}(\underline{I}_q) = \mathrm{Arg}(\underline{U}_1) \pm 90°, \tag{2}$$

$$\mathrm{Arg}(\underline{I}_T) = \mathrm{Arg}(\underline{U}_1), \tag{3}$$

$$\underline{I}_T = \frac{\mathrm{Re}[\underline{U}_T \underline{I}_M^*]}{\underline{U}_1}. \tag{4}$$

Model regulatora UPFC zawiera źródło napięciowe U_T oraz dwa źródła prądowe I_T i I_q. Z punktu widzenia analizy matematycznej korzystne jest umieszczenie regulatora w węźle sieci, w którym napięcie jest niezależne od prądu obciążenia linii. Wówczas parametr I_q nie wpływa na charakterystyki przesyłowe [2], a problem sprowadza się do sterowania pozostałymi wielkościami (U_T i φ_T) w celu uzyskania maksymalnego zakresu zmienności mocy czynnej przesyłanej.

Dla $U_T = U_{T\max}$ zachodzi:

$$\frac{\partial P_1}{\partial \varphi_T} = 0 \Rightarrow \varphi_T = \pm 90°, \ \varphi_T = \angle(\underline{U}_2, \underline{U}_T), \tag{5}$$

przy czym:

$$P_1 = P_2 = \frac{U_M U_2}{X_L} \sin(\delta + \alpha), \ \alpha = \angle(\underline{U}_1, \underline{U}_M). \tag{6}$$

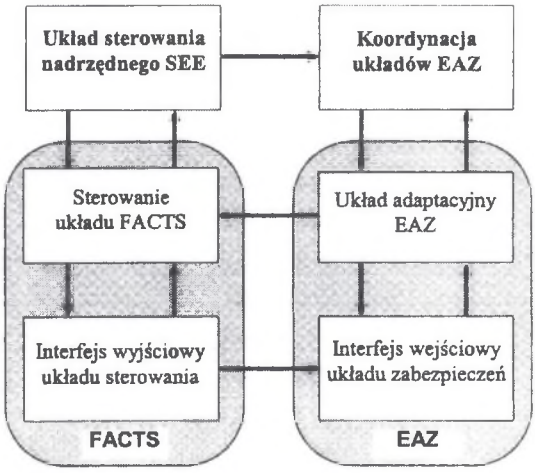
Należy zaznaczyć, że umieszczenie UPFC wewnątrz toru przesyłowego znacznie utrudnia określenie optymalnej wartości φ_T i wiąże się z koniecznością przeprowadzenia złożonych obliczeń symulacyjnych.

3. WYBRANE ZAGADNIENIA WSPÓŁPRACY UKŁADÓW FACTS Z UKŁADAMI EAZ

Zastosowanie układów FACTS wiąże się z istotną ingerencją w dynamikę systemu i z tego względu powinno się znaleźć w kręgu zagadnień związanych z doborem funkcji, nastaw i charakterystyk układów EAZ. Odnosi się to w szczególności do wprowadzanych przez układy regulacji zmian takich wielkości, jak: impedancja linii, kąt mocy oraz prądy obciążeniowe, jak również do związanych z tymi zmianami stanów przejściowych SEE.

Stosowane w urządzeniach FACTS układy tyrystorowe są źródłem wyższych harmonicznych, co jest istotne dla układów EAZ wrażliwych na obecność tych składowych w sygnałach pomiarowych bądź podejmujących decyzję o wyłączeniu obiektu zabezpieczanego na podstawie określonych harmonicznych - np. blokowanie zabezpieczenia różnicowego transformatora drugą harmoniczną prądu różnicowego przy udarach prądu magnesującego. Z kolei zbyt szybkie zmiany mocy w pobliżu węzłów wytwórczych mogą prowadzić do rezonansów podsynchronicznych oraz drgań skręcających wałów generatorów, co wiąże się z doborem odpowiednich układów zabezpieczeń dla generatora [10]. Dla zabezpieczeń *linii przesyłowych* przyjmuje się następujące podstawowe funkcje: odległościową, różnicowoprądową, porównawczo-fazową oraz porównawczo-kierunkową. W dalszej części artykułu szczególna uwaga zostanie poświęcona wpływowi układów UPFC na pracę zabezpieczeń odległościowych. Zatem poza zakresem szczegółowych rozważań pozostaną np. układy TCSC, które podobnie jak inne układy z kompensacją szeregową, mogą istotnie wpływać na pracę zabezpieczeń porównawczo-fazowych [18].

Podstawowym wymaganiem w zakresie współpracy układów FACTS i EAZ będzie dostęp do szybkich łącz transmisji informacji zarówno na poziomie lokalnym (LAN), jak i systemowym (WAN) z uwzględnieniem synchronizacji zegarów próbkujących tych urządzeń, np. w oparciu o system satelitarny GPS [19]. Skoordynowane działanie urządzeń FACTS i EAZ wymaga uwzględnienia odpowiednich wejść i wyjść jak również przyjęcia konwencji w zakresie używanych protokołów komunikacyjnych. Zakres interakcji pomiędzy tymi urządzeniami przedstawiono schematycznie na rys. 3.



Rys. 3. Ogólna struktura powiązań pomiędzy układem sterowania urządzeniem FACTS a zabezpieczeniem

Fig. 3. FACTS device control and protective system co-ordination structure

Zastosowanie systemów FACTS powoduje pełniejsze wykorzystanie zdolności przesyłowych SEE z jednej strony, z drugiej jednak prowadzi do zaostrzenia wymagań w zakresie szybkości wyłączania zwarć. W tym kontekście można sformułować następujące założenia dla układów EAZ:

- należy wprowadzać adaptacyjne funkcje zabezpieczeniowe, pozwalające na pełne dopasowanie się do dynamicznych zmian parametrów i konfiguracji SEE ze szczególnym uwzględnieniem zmian generowanych przez urządzenia FACTS,
- konieczna będzie wnikliwa analiza możliwych zakłóceń w działaniu systemów FACTS i ich wpływu na poprawność działania zabezpieczeń ze względu na ograniczenie marginesu bezpieczeństwa i tolerancji zakłóceń w systemie regulowanym za pomocą urządzeń FACTS, należy zweryfikować wymagania stawiane układom sterowania prewencyjnego i EAZ w zakresie szybkości likwidacji zwarć oraz minimalizacji skutków zakłóceń i zapobiegania kaskadowym wyłączeniom i rozszerzaniu się awarii,
- funkcje EAZ powinny być niezależne od funkcji sterowania zabezpieczanym obiektem w tym sensie, że sygnały wyjściowe układu sterowania jedynie wspomagają proces decyzyjny w zakresie eliminacji zakłóceń, ale go nie warunkują.

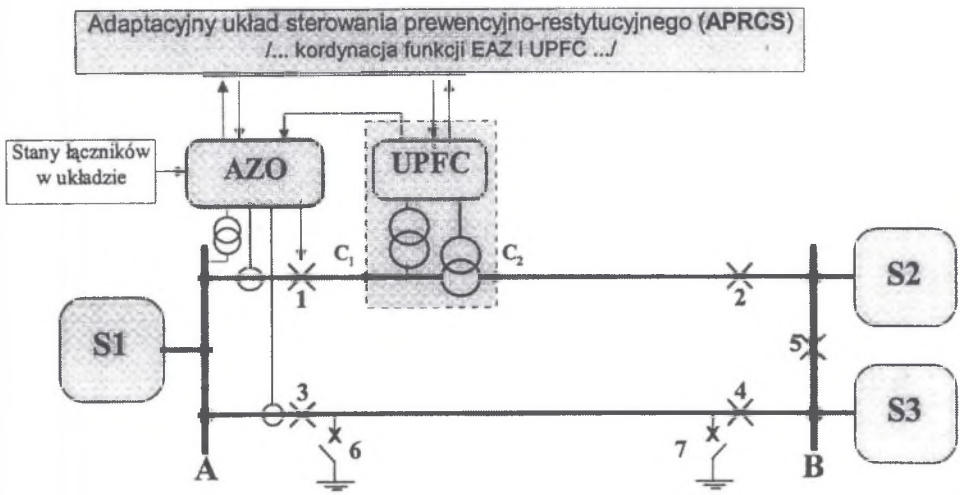
Koordynacja funkcji układów zabezpieczeniowych oraz układów regulacji, wpływających na parametry kryterialne układu zabezpieczanego może odbywać się za pośrednictwem nadrzędnego, adaptacyjnego układu sterowania prewencyjno-restytucyjnego (APRCS - ang. *Adaptive Preventive-Restoration Control System*), którego koncepcję opisano m.in. w [20].

Z punktu widzenia zabezpieczeń odległościowych istotne jest, że impedancja transformatora szeregowego regulatora może przyjmować znaczne wartości w porównaniu z impedancją linii przesyłowej, dochodząc – w zależności od długości linii – nawet do 30% jej impedancji [7]. Prowadzi to w przypadku zwarcia przy końcu pierwszej strefy do konieczności znacznego jej wydłużenia. W przeciwnym przypadku dochodzi do opóźnionego zadziałania zabezpieczenia (z czasem drugiej strefy). W [7] proponuje się dosyć kłopotliwe rozwiązanie, polegające na instalacji dodatkowego zabezpieczenia w p. C_2 układu na rys. 4. Alternatywą dla takiego podejścia mogłoby być rozszerzenie funkcji adaptacyjnego układu zabezpieczeniowego, zwłaszcza w kontekście postępującej integracji funkcji starowania i zabezpieczeń w stacjach elektroenergetycznych, jak i możliwości oferowanych przez funkcjonalne moduły cyfrowe.

Uwzględniając powyższe rozważania, w adaptacyjnym układzie zabezpieczeń należy przyjąć następujące wejścia:

- dwustanowe – położenia łączników w układzie dla identyfikacji jego topologii,
- pomiarowe – składowe fazorów napięć i prądów w punkcie zabezpieczeniowym oraz impedancji podłużnej, wynikającej z aktualnych parametrów UPFC - napięcia gałęzi wzdłużnej $\underline{U}_T$ oraz składowych prądu gałęzi poprzecznej I_q i I_T (rys.1, 2),

- sygnały alarmowe, informujące o pobudzeniu lub zadziałaniu funkcji zabezpieczeniowych uzyskiwane z modułów wchodzących w skład układów zabezpieczeniowo-pomiarowych obiektów sterowanych z APRCS,
- sygnały wyjściowe uzyskane z modułów identyfikacji zakłóceń FID (*Fault Identification*) obiektów sąsiednich (por. [20]).



Rys. 4. Adaptacyjne zabezpieczenie odległościowe linii przesyłowej z układem UPFC oraz model układu przesyłowego przyjęty do symulacji zakłóceń

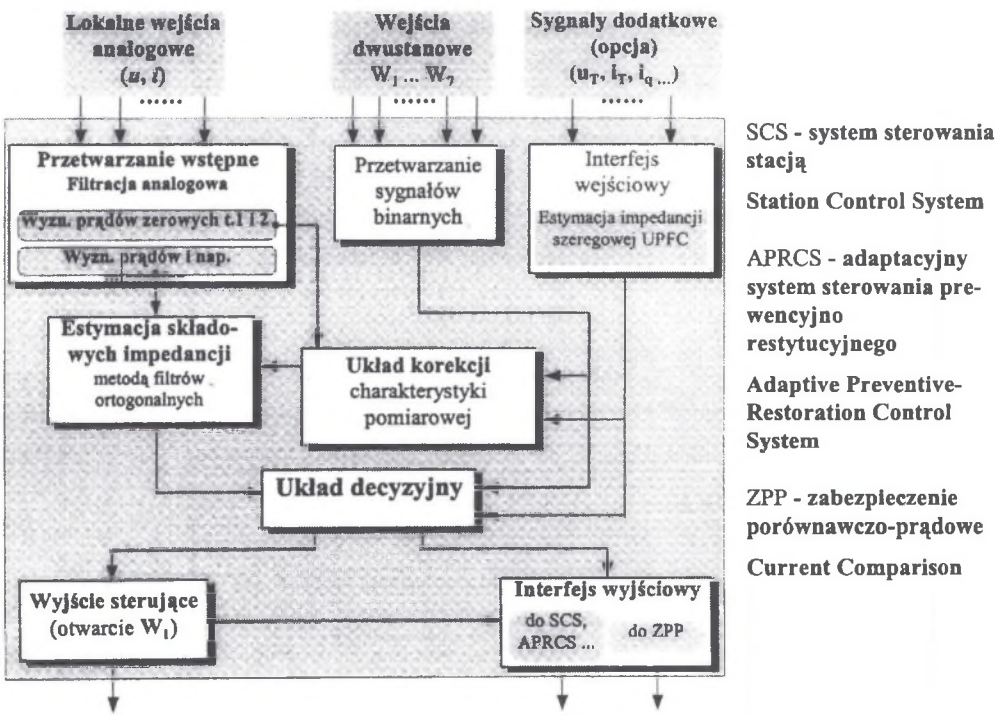
Fig. 4. Adaptive transmission line distance protection with UPFC and transmission System model assumed for faults simulation studies

4. KONCEPCJA ADAPTACYJNEGO ZABEZPIECZENIA ODLEGŁOŚCIOWEGO LINII PRZESYŁOWEJ

Na rys. 4 przedstawiono podstawową strukturę zabezpieczenia. Jak widać, informacjami doprowadzanymi z obiektu są sygnały analogowe w postaci napięć fazowych oraz prądów przewodowych toru chronionego i równoległego, które w zabezpieczeniu są poddane filtracji i przetwarzane na wartości dyskretne. Dodatkowo wprowadza się informacje o stanie wszystkich łączników zainstalowanych w układzie, które następnie są wykorzystywane przez *adaptacyjny algorytm decyzyjny*. Mechanizm adaptacyjny można zrealizować na bazie systemu ekspertowego (ES), który na podstawie gromadzonych danych dobiera charakterystyki pomiarowe oraz wartości współczynników kompensacji dla składowych zerowych prądów w obu torach [11]. Dodatkowo, mechanizm ten uwzględnia aktualne parametry układu UPFC

dla estymacji wartości impedancji szeregowej, dokonując następnie odpowiedniej korekcji pomiaru rzeczywistej odległości do miejsca zwarcia. W zabezpieczeniu nie ma konieczności przesyłania spróbkowanych wartości wielkości prądów czy napięć z drugiego krańca linii oraz synchronizacji próbkowania w stacjach skrajnych [12].

Informacja o stanie łączników ma charakter binarny, co znacznie upraszcza realizację (nie jest wymagany dostęp do łączy o znacznych przepływnościach). W przypadku uszkodzenia łączy, zabezpieczenie może przejść w tryb pracy nieadaptacyjnej, tzn. może spełniać funkcje konwencjonalnego zabezpieczenia odległościowego. W praktyce można przyjąć, że zabezpieczenie odległościowe będzie funkcjonować równorzędnie z opisanym np. w [13] zabezpieczeniem porównawczo-prądowym, stanowiąc uzupełnienie jego funkcji w warunkach uszkodzenia łącz lub błędów w transmisji danych zawierających informacje o wartościach chwilowych prądów mierzonych na krańcach linii zabezpieczanej. Rys. 5 przedstawia schemat powiązań modułów funkcjonalnych zabezpieczenia.



Rys. 5. Struktura powiązań modułów funkcjonalnych w odległościowym zabezpieczeniu adaptacyjnym (AZO_{ES}) dwutorowej linii przesyłowej

Fig. 5. Functional modules structure of an adaptive distance protection (ADP_{ES}) for double-circuit transmission line

Program realizujący funkcje AZO_{ES} otrzymuje informacje o wartości napięć i prądów fazowych obu torów w postaci kolejnych próbek, które zostają doprowadzone do modułów wyznaczających wartości napięć międzyfazowych oraz różnicy prądów fazowych. Przebiegi napięć i prądów poddawane są wstępnej filtracji antyaliasingowej i doprowadzone do algorytmu wyznaczającego impedancję, który dla każdej z trzech par napięcie-prąd wyznacza parę rezystancja-reaktancja pętli zwarciowych międzyprzewodowych. Z kolei z przebiegów prądów fazowych obu torów wyznaczone są składowe zerowe i_{01}, i_{02}, wykorzystane do wyznaczenia skompensowanych prądów fazowych toru chronionego. Tak skorygowane próbki prądów doprowadzane są już do algorytmu obliczającego impedancję, wyznaczającego również trzy pary przebiegów czasowych składowych impedancji dla pętli fazowych. System ekspertowy umożliwia dla każdej konfiguracji układu dobór osobnych wartości współczynników kompensacji własnej k_{0k} oraz wzajemnej k_{0M} [9, 11]. Algorytm pomiarowy oparto na metodzie składowych ortogonalnych, uzyskanych za pomocą pary pełnookresowych filtrów o oknach w postaci funkcji sinus i cosinus [15].

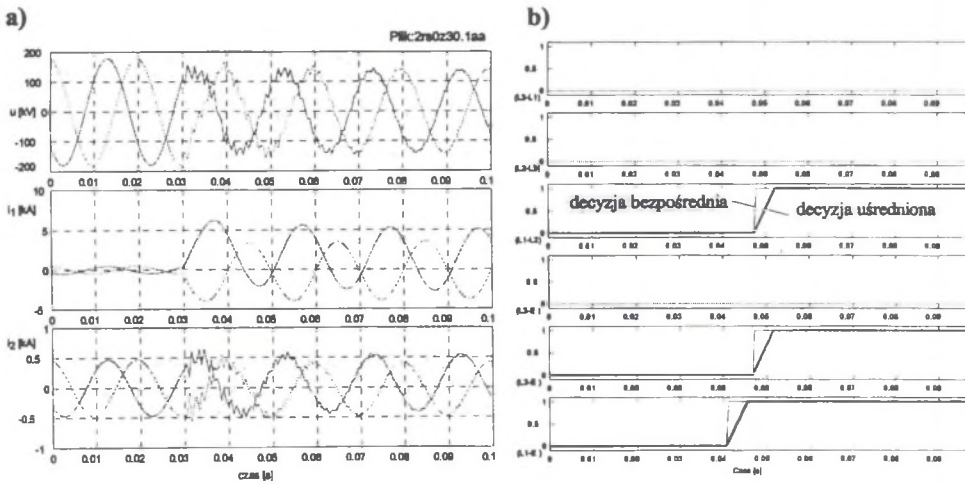
Weryfikacji opracowanego algorytmu decyzyjnego dokonano, opierając się na programie zrealizowanym w środowisku MATLAB®. Graficzny pulpit użytkownika umożliwia wybór pliku zwarciowego (wygenerowanego np. przy użyciu programu EMTP/ATP) oraz pełną wizualizację wyników działania algorytmu. Rys. 6 prezentuje przykładowe przebiegi decyzji dla zwarcia dwufazowego z ziemią w strefie. W badaniach symulacyjnych przyjęto uśrednienie sygnału decyzyjnego za czwartą część okresu składowej podstawowej, co powoduje opóźnienie czasu reakcji zabezpieczenia zwiększając jednak poprawność jego działania.

Przykładową sekwencję zdarzeń i odpowiadające jej przebiegi czasowe napięć i prądów uzyskane z symulacji EMTP przedstawiono poniżej w tabeli 2 i na rys. 6.

Tabela 2

Przykładowa sekwencja zdarzeń w symulacji EMTP

Przedział	Zdarzenie	Czas
1	Inicjacja programu	[0 .. 100) ms
2	Inicjacja regulatora UPFC	[100 .. 200) ms
3	Stan ustalony	[200 .. 300) ms
4	Zwarcie	[300 .. 370) ms
5	Stan przejściowy związany z eliminacją zwarcia	[370 .. 500] ms



Rys. 6. Przykładowe decyzje modułu AZO_{ES} przy zwarciu dwufazowym z ziemią na końcu I strefy zabezpieczenia (b) oraz przebiegi zwarciowe napięć i prądów w linii (a)

Fig. 6. Exemplary ADP_{ES} module decisions (b) during double–phase–to–ground fault at the end of the Ist zone and line voltage and current waveforms (a)

5. MOŻLIWOŚCI REALIZACJI ADAPTACYJNEGO ZABEZPIECZENIA ODLEGŁOŚCIOWEGO, OPARTEGO NA STRUKTURACH ANN

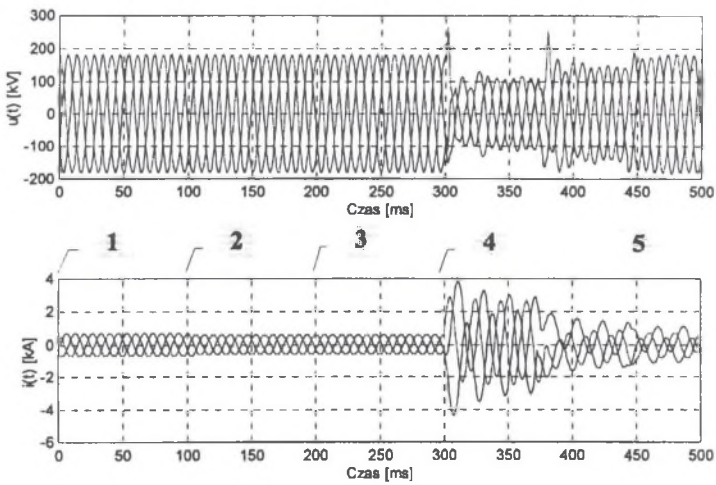
Wychodząc z rozważań analitycznych przedstawionych wcześniej można sformułować podstawy mechanizmu adaptacyjnego zabezpieczenia odległościowego, opartego na sztucznej sieci neuronowej (ANN) typu MLP [7, 8]. Zadaniem takiej sieci jest estymacja aktualnego stanu układu przesyłowego na bazie danych gromadzonych zarówno w trybie off-line, jak i on-line. W przypadku rozwiązania opartego na ES zarówno brak danych, jak i ich nadmiar istotnie wpływa na zachowanie się zabezpieczenia. W pierwszym przypadku może spowodować zablokowanie mechanizmu adaptacyjnego, w drugim zaś znaczne wydłużenie czasu podejmowania decyzji oraz zwiększenie ryzyka pojawienia się błędnych informacji lub braku informacji (niekomplementarności sygnałów). Lepsze właściwości adaptacyjne można uzyskać poprzez zastosowanie modułów wypracowywania decyzji o następujących własnościach:

- zdolność do „uczenia się" na bazie wzorców obrazujących różne stany SEE i związane z nimi błędy pomiaru impedancji w zabezpieczeniu,
- znaczna liczba wejść zarówno dwustanowych, jak i analogowych - na bazie wzorca następuje klasyfikacja układu do określonej klasy stanów; zasadnicze klasy stanowią: stan pracy normalnej oraz stan zakłóceniowy,
- nieliniowość - przejście od normalnego stanu pracy do stanu zakłóceniowego ma zazwyczaj charakter nieliniowy,

- zdolność do uogólniania wynikająca z konieczności przedstawiania jedynie wybranych wzorców, jak również z ciągłości parametrów charakteryzujących SEE,
- niewrażliwość na zakłócenia,
- szybkość wypracowywania decyzji, tj. możliwie krótki czas od chwili zmiany stanu systemu (zmiany wielkości wejściowych modułu adaptacyjnego) do momentu pojawienia się ustalonych wartości wielkości korygujących nastawy zabezpieczenia.

Przedstawione wyżej wymagania spełniają sieci typu MLP. W zastosowaniu do modułu adaptacyjnego zabezpieczenia odległościowego szczególnego znaczenia nabierają następujące własności tych sieci:

- modelowanie procesu odbywa się na zasadzie prezentacji par wejście-wyjście,
- nieliniowy charakter sieci,
- zdolność do uogólniania - w procesie uczenia wystarczające jest uwzględnienie najbardziej charakterystycznych przypadków,
- tolerancja na zakłócenia - niewielkie zakłócenia na wejściu mają ograniczony wpływ na jakość sygnału wyjściowego ze względu na rozproszenie informacji w procesie przetwarzania,
- szybkość przetwarzania - wynikająca z prostej struktury i jednokierunkowego przepływu informacji.



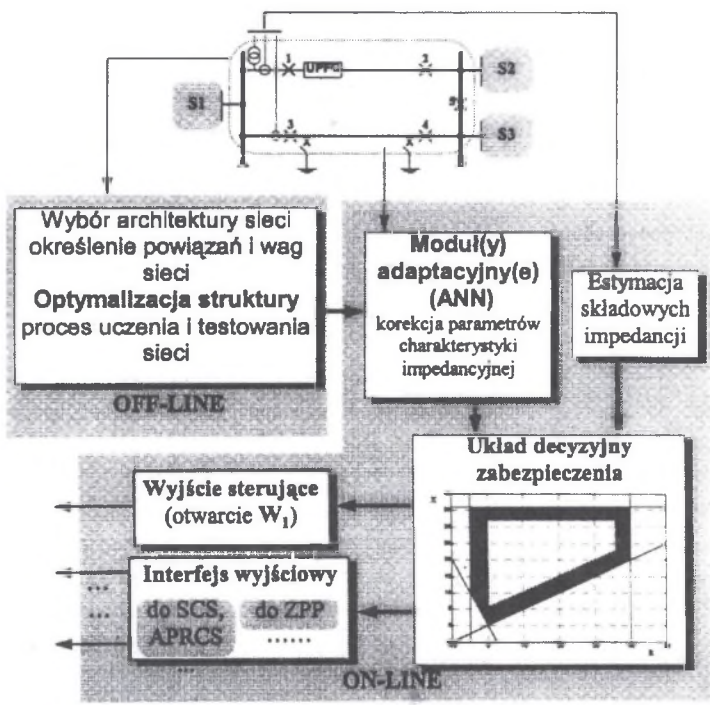
Rys. 7. Przykładowe przebiegi napięć i prądów przy uwzględnieniu regulatora UPFC i zwarciu trójfazowym w torze równoległym z przewrotem prądu ($AB_{(2)}$ -por. rys. 4)

Fig. 7. Exemplary voltage and current waveforms with UPFC switch–on assumption and three–phase fault in parallel circuit with current reversal (line $AB_{(2)}$ - comp. Fig. 4)

Koncepcję układu adaptacyjnego zabezpieczenia odległościowego, wykorzystującego sztuczną sieć neuronową (AZO_{ANN}), przedstawiono na rys. 8. Podobnie jak w przypadku

układu AZO_{ES}, funkcjonowanie mechanizmu adaptacyjnego sprowadza się do określenia parametrów korygujących charakterystykę pomiarową zabezpieczenia.

Podstawowe informacje, jakie należy doprowadzić do wejścia sieci, to: wartość napięcia na szynach stacji, prąd w torze chronionym i torze (torach) sąsiednim, stany łączników w układzie, sygnały informujące o aktualnym stanie pracy i parametrach układu regulacji mocy (UPFC). Liczbę wejść i rodzaj dostarczanej informacji należy przyjmować doświadczalnie dla określonej konfiguracji układu. Zbyt duża liczba i zbyt szerokie zakresy wielkości wejściowych mogą prowadzić do trudności w klasyfikacji układu do określonej klasy ze względu na utknięcie sieci w minimum lokalnym. Konieczne może być wówczas rozproszenie układu decyzyjnego na sieci podrzędne (o określonym charakterze wejść) wypracowujące decyzje cząstkowe, stanowiące wejścia sieci globalnej. Wykorzystanie zdalnych sygnałów dwustanowych, jak to przyjęto w AZO_{ES} i AZO_{ANN}, daje pełniejsze możliwości identyfikacji aktualnej topologii układu, a ze względu na potrzebę przesyłu jedynie sygnałów binarnych wymagania stawiane łączom są niewysokie. W przypadku AZO_{ANN} nawet uszkodzenie łącza umożliwia poprawną identyfikację stanu układu przesyłowego z linią zabezpieczaną. Koncepcja taka może zostać z niewielkimi modyfikacjami przeniesiona na układy o strukturze bardziej złożonej niż dwutorowa linia przesyłowa.



Rys. 8. Realizacja adaptacyjnego zabezpieczenia odległościowego linii typu AZO_{ANN}

Fig. 8. Concept of an adaptive transmission line distance protection ADP_{ANN}

6. WNIOSKI I UWAGI KOŃCOWE

Testy algorytmu decyzyjnego AZO opartego na doradczym systemie ekspertowym wykazały, że czas reakcji na zwarcia w najniekorzystniejszych przypadkach nie przekracza 30 ms, natomiast minimalny czas reakcji nie jest krótszy niż 10 ms. Czasy te wynikają z przyjętej koncepcji wyznaczania składowych impedancji i pełnookresowego okna pomiarowego, jak również uśredniania decyzji na wyłączenie dla zapewnienia maksymalnej selektywności zabezpieczenia. Przeprowadzone badania potwierdziły hipotezę, że znajomość topologii układu zabezpieczanego i jego najbliższego otoczenia może istotnie poprawić warunki pracy zabezpieczenia odległościowego, tj. ograniczyć wpływ niektórych czynników fałszujących pomiar impedancji pętli zwarciowej. Uwzględnienie wejść dla sygnałów pochodzących z układów regulacji (np. UPFC) wiąże się z rozbudowaniem funkcji pomiarowych zabezpieczenia, a w szczególności układu korekcji charakterystyki pomiarowej w celu jej adaptacji do aktualnych parametrów linii zabezpieczanej.

Pewne ograniczenia możliwości mechanizmu adaptacyjnego opartego na regułach decyzyjnych, objawiające się np. błędną decyzją przy braku lub niejednoznaczności informacji wejściowej, można przezwyciężyć stosując moduły adaptacyjne oparte na strukturach sztucznych sieci neuronowych. Możliwości te będą przedmiotem dalszych badań.

LITERATURA

1. Kremens Z., Sobierajski M.: Analiza systemów elektroenergetycznych. WNT, Warszawa 1996.
2. Povh D. (convenor): Load flow control in high voltage power systems using FACTS controllers. CIGRE Task Force 38.01.06, 1996.
3. EMTP Center: Alternative Transients Program - Rule Book, Leuven EMTP Center, 1987.
4. CIGRE Publications: Application guide on protection of complex transmission networks configurations. CIGRE WG-34.04, 1990.
5. Kulicke B., Hinrichs H.-J.: Parameteridentifikation und Ordnungsreduktion mit Hilfe des Simulationsprogramms Netomac, etzArchiv Bd. 10 (1988) H.7, s. 207–213.
6. PSCAD/EMTDC Version 3.0 Manual, Manitoba HVDC Research Centre, Manitoba, Canada, 1998.
7. Niebur D. et al.: Artificial Neural Networks for Power Systems: A literature Survey. Engineering Intelligent Systems, Vol.1, No. 3, 1993, pp. 133-157.
8. Jongepier A.G., van der Sluis L.: Adaptive Distance Protection of Double-Circuit Lines using Artificial Neural Networks. IEEE Trans. On Power Delivery, Vol.12, No.1, Jan. 1977, pp.97-105.
9. Żydanowicz J.: Elektroenergetyczna automatyka zabezpieczeniowa, t.II. Automatyka eliminacyjna. WNT, Warszawa 1978.