

Koncepcja obszarowego zabezpieczenia odległościowego wieloramiennych linii elektroenergetycznych

Streszczenie. Warunki działania zabezpieczeń elektroenergetycznych stają się coraz trudniejsze. Obserwuje się zmiany warunków ich działania podczas zwarć w sieci, w odniesieniu do warunków przyjmowanych podczas ich projektowania. Może to powodować niepoprawne ich działanie. Stanowi to wyzwanie i wymusza poszukiwanie nowych koncepcji zabezpieczeń. W artykule przedstawiono koncepcję obszarowego zabezpieczenia odległościowego dla wieloramiennych linii elektroenergetycznych. Zamieszczono wyniki testów skuteczności proponowanego rozwiązania.

Abstract. The operating conditions of power system protections are getting much more difficult. Changes in their operating conditions are observed during short-circuits in the power network in relation to the conditions assumed during their design. It may cause their incorrect operation. It is a challenge and forces the research for new concept of protection schema. The concept of area distance protection for multi-terminal lines has been presented in this paper. The tests results of the effectiveness of this solution have been included. (The concept of area distance protection of multi-terminal lines).

Słowa kluczowe: automatyka zabezpieczeniowa, zabezpieczenie odległościowe, linia wieloramienna.

Keywords: power system protection, distance protection, multi-terminal line.

Wstęp

W Krajowym Systemie Elektroenergetycznym (KSE) zabezpieczenia odległościowe stanowią podstawowy składnik automatyki zabezpieczeniowej linii elektroenergetycznych. Rolą tych zabezpieczeń jest ocena stanu pracy linii (warunki normalne lub zwarcie) i wypracowanie decyzji stosownej do zidentyfikowanego stanu pracy (niezadziałanie dla normalnych warunków pracy linii lub zadziałanie i doprowadzenie do wyłączenia linii objętej zwarcie). Ocenę stanu pracy linii przeprowadza się wieloetapowo: dokonuje się pomiaru napięcia i prądu w linii i na ich podstawie wyznacza impedancję, której wartości parametrów porównuje się następnie z impedancją linii. Do obliczania impedancji służy algorytm pomiarowy. Natomiast do detekcji zwarcia służy algorytm decyzyjny, który sprawdza położenie wektora tej impedancji względem stref pomiarowych ustawionych w zabezpieczeniu. Zadziałanie zabezpieczenia nastąpi, jeśli koniec wektora impedancji znajdzie się wewnątrz charakterystyki działania zabezpieczenia.

Taki sposób działania zabezpieczenia odległościowego linii powoduje, że poprawność identyfikacji stanu pracy chronionej linii silnie zależy od dokładności obliczania impedancji przez algorytm pomiarowy. Nawet niewielki błąd wyznaczania impedancji może spowodować błędną decyzję algorytmu decyzyjnego i nieuzasadnione wyłączenie linii bez zwarcia bądź opóźnione lub brakujące wyłączenie linii objętej zwarcie. Zbyt późne lub brakujące zadziałanie zabezpieczenia jest niedopuszczalne, ponieważ stanowi niebezpieczeństwo dla linii, innych obiektów sieci elektroenergetycznej oraz odbiorców energii elektrycznej.

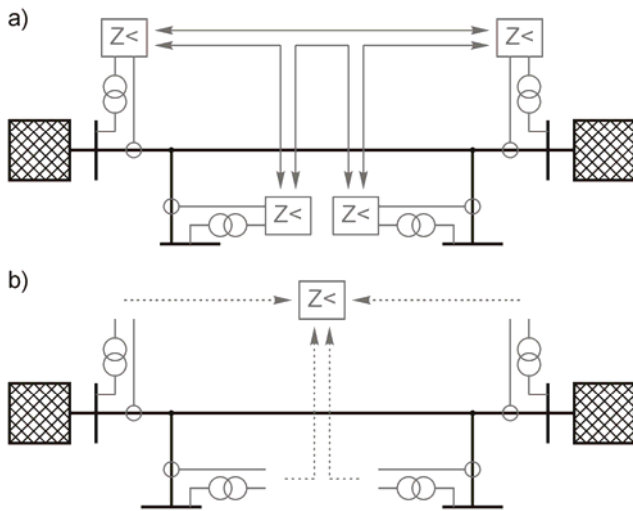
Największe nieprawidłowości w działaniu zabezpieczeń odległościowych obserwuje się w liniach złożonych. Z doświadczeń autorów wynika, że już dla linii z jednym odczepem błędy wyznaczania impedancji mogą być bardzo duże. Utrudnia to, nieraz uniemożliwia, poprawną detekcję i eliminację zwarć przez zabezpieczenia odległościowe [1], [2]. Warunki pracy tych zabezpieczeń mogą być jeszcze trudniejsze dla linii wieloramiennych [3].

Poprawność działania zabezpieczeń odległościowych próbuje się zwiększyć, modyfikując kształt charakterystyk działania. Jednak w wielu przypadkach jest to niewystarczające [4]. Nadal mogą wystąpić błędne decyzje algorytmu decyzyjnego. Przyczyną są duże błędy obliczania impedancji przez algorytmy pomiarowe stosowane w tych zabezpieczeniach.

Brak skutecznej metody poprawiającej działanie klasycznych zabezpieczeń odległościowych linii determinuje potrzebę poszukiwania nowej formuły realizacji tego zabezpieczenia. Rozwiązaniem wydaje się wykorzystanie automatyki obszarowej. W [5] autorzy przedstawili koncepcję nowego zabezpieczenia odległościowego dla linii z jednym odczepem. Założono dostępność sygnałów pomiarowych nie tylko lokalnych, ale pochodzących ze wszystkich krańców linii (identycznie, jak dla zabezpieczeń różnicowych). Dla zdefiniowanych nowych algorytmów pomiarowego [6] i decyzyjnego [7] pozwoliło to z powodzeniem wyeliminować niepoprawne zadziałania dotychczasowej formuły wykorzystania kryterium podimpedancyjnego w klasycznych zabezpieczeniach odległościowych linii. Analogiczne podejście autorzy zastosowali dla zabezpieczeń odległościowych linii wieloramiennych – w niniejszej publikacji przedstawiono podstawowe cechy koncepcji obszarowego zabezpieczenia odległościowego dedykowanego do aplikacji w takich liniach. Zamieszczono wyniki testów skuteczności tego rozwiązania, w odniesieniu do wyników uzyskanych dla klasycznych zabezpieczeń odległościowych.

Koncepcja obszarowego zabezpieczenia odległościowego linii wieloramiennych

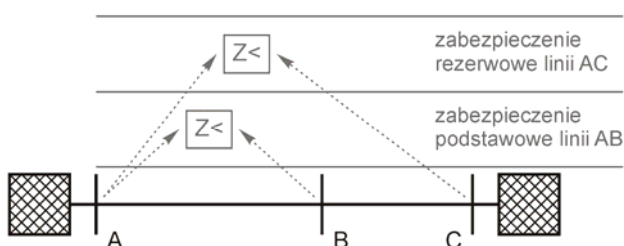
Proponowane nowe obszarowe zabezpieczenie odległościowe linii wieloramiennych stanowi nowe podejście do zabezpieczeń linii elektroenergetycznych. Klasyczne zabezpieczenia odległościowe linii identyfikują stan pracy linii jedynie na podstawie lokalnie zmierzonych napięć i prądów (patrz rys. 1a). Implikuje to wiele błędów działania, ponieważ klasyczny algorytm pomiarowy wykazuje dużą wrażliwość na obecność czynników fałszujących [4]. Niezerowa rezystancja przejścia w miejscu zwarcia i zjawisko splotu prądów mogą powodować błędy w wyznaczaniu impedancji sięgające kilku tysięcy % [2], [3], [4]. W łączowych zabezpieczeniach odległościowych dodatkowo dostarcza się sygnały dwustanowe z pozostałych krańców linii. Jednak nie powoduje to zmniejszenia błędów algorytmu pomiarowego, a mocno komplikuje algorytm decyzyjny. Dlatego autorzy opracowali koncepcję nowego obszarowego zabezpieczenia odległościowego linii. Zabezpieczenie to nie ogranicza się do lokalnie dostępnych napięć i prądów. Wykorzystuje się sygnały ze wszystkich krańców linii (patrz rys. 1b).



Rys.1. Zestawienie sygnałów wejściowych dla klasycznego (a) i nowego (b) zabezpieczenia odległościowego linii wieloramiennej

W koncepcji autorów zmienia się także podejście do konfigurowania automatyki zabezpieczeniowej linii. Dla klasycznych zabezpieczeń odległościowych zabezpieczenia instaluje się na każdym krańcu linii (dla linii z n odczepami jest to $n+2$ urządzeń). Natomiast nowe obszarowe zabezpieczenie odległościowe wymaga stosowania tylko jednego urządzenia (dla zwiększenia niezawodności ochrony linii można zastosować drugie urządzenie, redundantne). Takie podejście do konfigurowania zabezpieczeń linii znacząco uprości i przyspieszy czynności związane z parametryzacją i testowaniem zabezpieczenia. Czynności te ograniczą się do jednego lub dwóch urządzeń; dotychczas należało je powtarzać dla wszystkich zabezpieczeń odległościowych zainstalowanych w linii.

Przyjęta postać struktury nowego zabezpieczenia linii wymaga nowego podejścia do realizacji zdalnego rezerwowania działania zabezpieczeń sąsiednich obiektów elektroenergetycznych. Obecnie obiekty za linią z klasycznym zabezpieczeniem odległościowym są objęte rezerwowaniem działaniem tego zabezpieczenia (strefa druga, strefa trzecia i kolejne). Jednak identyfikacja stanu pracy tych obiektów odbywa się wyłącznie na podstawie lokalnie zmierzonych napięć i prądów, co w wielu przypadkach prowadzi do dużych błędów w działaniu zabezpieczenia i nieskutecznej realizacji ochrony zdalnej [4]. Dla nowego zabezpieczenia odległościowego realizacja zdalnego rezerwowania działania zabezpieczeń sąsiednich obiektów wymaga doprowadzenia do zabezpieczenia sygnałów z tego kolejnego obiektu (patrz rys. 2). Nieznacznie komplikuje to strukturę automatyki zabezpieczeniowej w sieci, jednak powinno to zapewnić bezbłędną i bezzwłoczną identyfikację i eliminację zwarć w obiekcie objętym ochroną zdalną. Wskazuje się przy tym, że realizacja takiej funkcjonalności będzie prosta w systemach automatyki zgodnych z IEC 61850.



Rys.2. Rezerwowanie zdalne w nowym obszarowym zabezpieczeniu odległościowym linii [8]

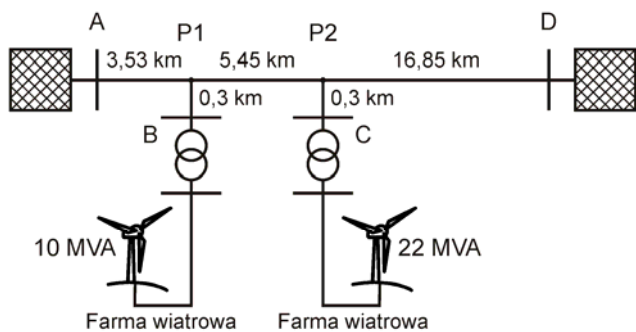
Dla nowego obszarowego zabezpieczenia odległościowego linii wieloramiennej opracowano nowe algorytmy pomiarowy i decyzyjny.

Koncepcję nowego algorytmu pomiarowego, dedykowanego dla linii wieloramiennej, autorzy przedstawili w [9]. Są to uogólnione równania wyznaczania skorygowanej impedancji zdefiniowane przez autorów w [5] i [6] dla linii z jednym odczepem. Nowy algorytm pomiarowy służy – podobnie jak dotychczasowy – do wyznaczania impedancji pętli zwarcia, przy czym – odmiennie niż dotychczas – do poszczególnych odcinków linii są przypisane dedykowane równania wyznaczania impedancji (obecnie wykorzystuje się jedno równanie, niezależnie od struktury chronionej linii). Takie podejście do konstrukcji nowego algorytmu pozwoliło ująć w równaniach wyznaczania skorygowanej impedancji zróżnicowanie występowania czynników fałszujących „pomiar impedancji” na poszczególnych odcinkach linii. Wyniki badań symulacyjnych nowego algorytmu, zamieszczone w [8] i [9], dowiodły wysokiej dokładności wyznaczania impedancji, nawet w liniach wieloramiennej z odczepami aktywnymi. Dzięki temu działanie nowego zabezpieczenia stało się niewrażliwe na czynniki, które w największym stopniu wpływają na powstanie błędów w klasycznym algorytmie pomiarowym zabezpieczeń odległościowych linii, tj.: zjawisko sływu prądów zwarciovych, niezerowa wartość rezystancji przejścia w miejscu zwarcia, przedzakłóceniove obciążenie chronionej linii, stan pracy obiektów elektroenergetycznych odczepowo przyłączonych do linii (w tym także zmienność wartości i – niejednokrotnie – charakteru prądu generowanego przez źródła prądu zwarciovego).

Nowe podejście do algorytmu pomiarowego zabezpieczenia odległościowego wymusiło opracowanie nowego algorytmu decyzyjnego. W [5] i [7] autorzy szczegółowo przedstawili koncepcję *kryterium sum impedancji*. Dla każdego odcinka linii z n odczepami wyznacza się $n+1$ sum impedancji. Każda suma impedancji składa się z dwóch składników. Są to impedancje obliczone dla danego odcinka linii w dwóch różnych krańcach linii. Wszystkie te sumy stanowią podstawę wypracowania decyzji przez nowy algorytm decyzyjny. Wskazuje to na bardzo wysoką wiarygodność wyniku, dzięki dużej wzajemnej weryfikacji. W nowym algorytmie decyzyjnym wykorzystano zaobserwowaną prawidłowość zachowania się sum impedancji podczas zwarć w linii. Dla zwarć w linii obliczane sumy impedancji są równe impedancji odcinków linii między tymi krańcami linii, dla których wyznaczano składniki danej sumy impedancji. Dotyczy to sum impedancji dla odcinka linii ze zwarcievem. Dla zwarć poza linią wszystkie sumy impedancji są wielokrotnie większe od impedancji linii. Tym samym realizacja nowego algorytmu decyzyjnego jest bardzo prosta i polega na sprawdzeniu czy koniec wektora obliczonej sumy impedancji jest ulokowany na płaszczyźnie impedancji zespolonej w pobliżu punktu odpowiadającego impedancji odpowiednich odcinków linii wieloramiennej. Ułatwia to wyznaczanie charakterystyki działania zabezpieczenia, w porównaniu do skomplikowanego określania wielu stref pomiarowych dla klasycznego zabezpieczenia odległościowego linii. Dla nowego zabezpieczenia charakterystyka działania ma postać równoległoboków, które umieszcza się na płaszczyźnie zespolonej w taki sposób, aby punkt przecięcia przekątnych równoległoboku był zlokalizowany w punkcie odpowiadającym impedancji odcinków linii. Jedna para boków równoległoboku jest równoległa do osi odciętych, natomiast druga para boków jest nachylona względem osi odciętych o kąt linii. Szczegółowy opis nowego algorytmu decyzyjnego zamieszczono w [7].

Badania symulacyjne obszarowego zabezpieczenia odległościowego linii wieloramiennej

Jako studium przypadku linii wieloramiennej przyjęto fragment sieci WN w KSE. Jest to linia Władysławowo (punkt A linii) – Żarówiec (punkt D linii), do której odczepowo przyłączono dwie farmy wiatrowe (patrz rys. 3; patrz także [9]). W programie RelaySimTest zbudowano złożony model symulacyjny układu sieciowego. Dla składowych modeli poszczególnych obiektów przyjęto: rezystancja jednostkowa linii 0,12 Ω /km, reaktancja jednostkowa linii 0,41 Ω /km, moc zwarciova w punkcie A 0,9 GV·A i moc zwarciova w punkcie D 4 GV·A. Model nowego obszarowego zabezpieczenia odległościowego dla przyjętej linii zbudowano w programie MATLAB, odwzorowując wszystkie najważniejsze bloki cyfrowego układu automatyki zabezpieczeniowej (filtracja, przetwarzanie, pomiary, decyzja).

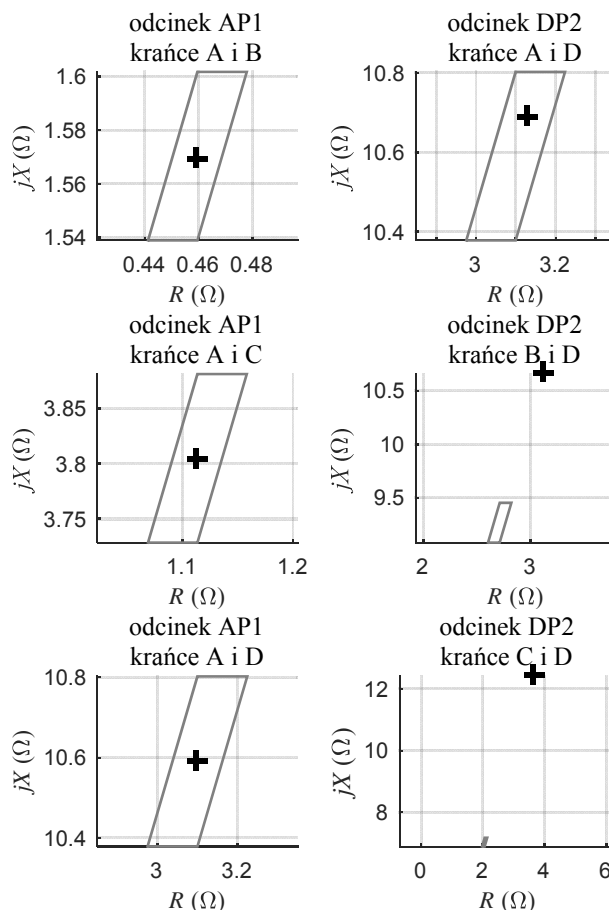


Rys.3. Schemat modelu układu z linią wieloramienneą

Zrealizowane badania symulacyjne objęły wiele scenariuszy. Zmieniano lokalizację zwarcia (wewnątrz i poza linią wieloramienneą), liczbę faz objętych zwarcie (1f, 2f i 3f, z i bez udziału ziemi) oraz wartość rezystancji przejścia w miejscu zwarcia (metaliczne i pośrednie).

W artykule ograniczono się do przedstawienia wyników symulacji uzyskanych dla dwufazowego zwarcia pośredniego (rezystancja przejścia w miejscu zwarcia równa 10 Ω) zlokalizowanego na odcinku AP1 modelowanej linii wieloramiennej. Działanie weryfikowanego nowego obszarowego zabezpieczenia odległościowego linii będzie można uznać za poprawne, jeśli końce wektorów wszystkich sum impedancji nowego algorytmu decyzyjnego wyznaczone dla odcinka linii AP1 (odcinek linii, na którym symulowano wystąpienie zwarcia) znajdują się wewnątrz przypisanych do nich charakterystyk działania. Jednocześnie dla każdego z pozostałych odcinków linii co najmniej dla jednej sumy impedancji, spośród właściwych do tych odcinków, koniec wektora tej sumy musi być zlokalizowany poza charakterystyką działania. Wyniki symulacji, przedstawione na rysunku 4, pozwalają stwierdzić, że nowe obszarowe zabezpieczenie odległościowe rozpatrywanej linii wieloramiennej poprawnie wykryło zwarcie i wskazało odcinek linii ze zwarcie. Detekcja zwarcia nastąpiła po 56 ms. Czas ten wynika przede wszystkim z zastosowania w modelu zabezpieczenia filtrów cyfrowych z oknem pomiarowym o długości 20 ms, wykorzystania procedury weryfikującej trwałość zmiany stanu dwustanowych decyzji cząstkowych algorytmu decyzyjnego (sprawdzenie dotyczyło próbek sygnałów wyznaczanych w okresie 3 ms) oraz uwzględnienia czasu transmisji sygnałów między poszczególnymi krańcami linii i zabezpieczeniem (przyjęto 10 ms).

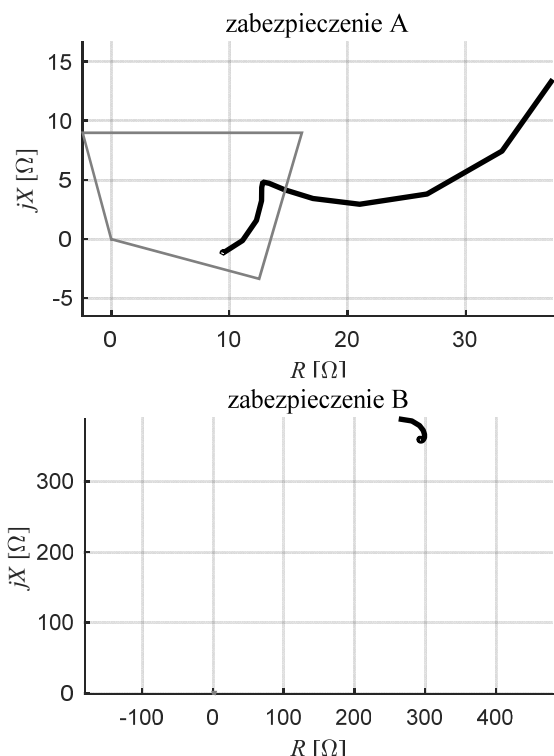
Wyniki badań symulacyjnych nowego obszarowego zabezpieczenia odległościowego linii wieloramiennej, uzyskane dla innych scenariuszy, przedstawiono w [8].



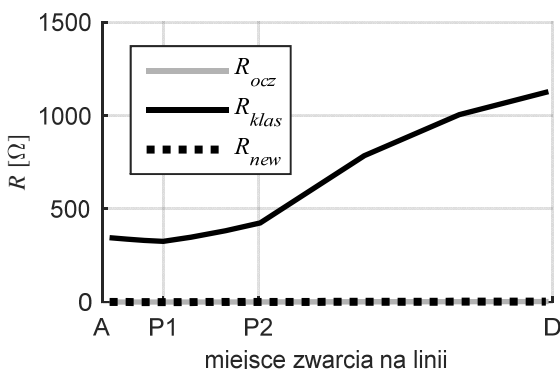
Rys.4. Końcowe fragmenty trajektorii wektorów sum impedancji na tle charakterystyk działania obszarowego zabezpieczenia odległościowego linii wieloramiennej dla dwufazowego zwarcia pośredniego na odcinku AP1 (ograniczono się do przedstawienia sum impedancji dla odcinków AP1 i DP2)

Porównawcze badania symulacyjne klasycznych zabezpieczeń odległościowych linii wieloramiennej

Dla scenariusza zwarcia w linii wieloramiennej identycznego z przedstawionym na rysunku 4 klasyczne zabezpieczenia odległościowe nie doprowadziły do wyłączenia chronionej linii. Jedynie zabezpieczenia zainstalowane w punktach A i D poprawnie wypracowały decyzję o zadziałaniu. Natomiast wymagane zadziałanie zabezpieczeń w punktach B i C nie nastąpiło, ponieważ końce wyznaczonych wektorów impedancji znalazły się daleko poza strefami pomiarowymi tych zabezpieczeń (patrz rys. 5). Przerwanie przepływu prądu zwarcioowego od farm wiatrowych nastąpi dopiero z chwilą wyłączenia tych źródeł przez zabezpieczenia od pracy wyspowej. Niepoprawna reakcja zabezpieczeń odległościowych w punktach B i C jest determinowana bardzo dużymi błędami obliczenia impedancji przez klasyczny algorytm pomiarowy. Na rysunku 6 przedstawiono wartości rezystancji obliczone przy wykorzystaniu klasycznego algorytmu pomiarowego (oznaczenie *klas*) i – dla porównania – nowego algorytmu pomiarowego (oznaczenie *new*) dla różnych lokalizacji trójfazowego zwarcia pośredniego (rezystancja przejścia w miejscu zwarcia równa 10 Ω) na odcinkach A-P1-P2-D linii wieloramiennej. Prezentowane wartości zestawiono z oczekiwanymi, poprawnymi dla danej lokalizacji zwarcia (oznaczenie *ocz*). Maksymalny względny błąd wyznaczania rezystancji w stanie ustalonym zwarcia – spośród przypadków przedstawionych na rysunku 6 – wynosi ponad 40000% dla algorytmu klasycznego i nie przekracza 0,5% dla nowego algorytmu pomiarowego (w odniesieniu do wartości oczekiwanej).



Rys.5. Trajektorie końców wektorów impedancji na tle pierwszych stref pomiarowych klasycznych zabezpieczeń odległościowych w punktach A i B linii wieloramiennej dla dwufazowego zwarcia pośredniego na odcinku AP1



Rys.6. Przykład wpływu czynników fałszujących na wartości rezystancji obliczone przez klasyczny i nowy algorytm pomiarowy dla różnych lokalizacji trójfazowego zwarcia pośredniego na linii wieloramiennej (obliczenia algorytmów dla punktu B linii)

Podsumowanie

Koncepcja nowego obszarowego zabezpieczenia odległościowego linii jest bardzo interesująca i aktualna. Wynika to z problemów coraz częściej występujących w sieciach elektroenergetycznych. Obserwowany dynamiczny rozwój generacji rozproszonej implikuje powstanie złożonych struktur sieciowych z liniami wieloramiennymi. Diametralnie zmienia to (pogarsza) warunki działania elektroenergetycznej automatyki zabezpieczeniowej, w tym zabezpieczeń odległościowych linii. W wielu sytuacjach dalsze stosowanie klasycznych algorytmów pomiarowego i decyzyjnego w tych zabezpieczeniach może prowadzić do powstania ryzyka braku wymaganego lub opóźnionego ich zadziałania.

Wykorzystanie proponowanych przez autorów nowych algorytmów pomiarowego i decyzyjnego umożliwi poprawę działania zabezpieczeń odległościowych linii. Zweryfikowano to dla wielu zróżnicowanych scenariuszy zwarć symulowanych w złożonych strukturach sieciowych z liniami wieloramiennymi. Wymiana klasycznych zabezpieczeń odległościowych na nowe zabezpieczenia obszarowe może być niezbędna, aby nie dopuścić do powstania niebezpiecznych sytuacji zagrażających życiu lub zdrowiu użytkowników energii elektrycznej lub mogących doprowadzić do uszkodzenia obiektów sieci elektroenergetycznej.

Do realizacji funkcjonalności zaproponowanej koncepcji nowego obszarowego zabezpieczenia odległościowego linii można wykorzystać m.in. system automatyki przedstawiony w [10] lub wieloagentowe systemy automatyki elektroenergetycznej. Przykładową strukturę agenta takiego systemu zdefiniowano i scharakteryzowano w [11]. Oczekuje się, że zwiększy to poprawność identyfikacji warunków pracy sieci elektroenergetycznej, a także szybkość wypracowania decyzji przez automatykę zabezpieczeniową.

Autorzy: dr inż. Mateusz Szablicki, mgr inż. Tomasz Bednarczyk, dr inż. Piotr Rzepka, prof. dr hab. inż. Adrian Halinka, Politechnika Śląska, Wydział Elektryczny, Instytut Elektroenergetyki i Sterowania Układów, ul. Bolesława Krzywoustego 2, 44-100 Gliwice, E-mail: mateusz.szablicki@polsl.pl.

LITERATURA

- [1] Halinka A., Szablicki M., Wpływ sposobu przyłączania farm wiatrowych do sieci dystrybucyjnej WN na działanie zabezpieczeń odległościowych, *Przegląd elektrotechniczny*, 86 (2010), nr 8, 50-56
- [2] Tziouvaras D.A., Roberts J.B., and Benmouyal G., New multi-ended fault location design for two-or three-terminals lines, *7th International Conference Developments in Power System Protection 2001*, 395-398
- [3] Halinka A., Szablicki M., Zabezpieczenia odległościowe linii n-odczepowych (ocena istniejących struktur zabezpieczeniowych), *Śląskie Wiadomości Elektrotechniczne*, 21 (2014), nr 21, 13-17
- [4] Ziegler G., *Numerical distance protection: principles and applications*, Berlin and Munich, 1999
- [5] Halinka A., Rzepka P., Sowa P., Szablicki M., New Area Measuring and Decision Algorithm Concepts for Power Lines' Distance Protection, *18th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE) 2017*, 649-653
- [6] Halinka A., Szablicki M., Metoda estymacji składowych impedancji niewrażliwa na odczepowe przyłączanie źródeł wiatrowych (część 2 – minimalizacja wpływu niezerowej wartości rezystancji przejścia w miejscu zwarcia), *Przegląd elektrotechniczny*, 88 (2012), nr 9a, 7-11
- [7] Halinka A., Szablicki M., Nowe kryterium sum impedancji algorytmu decyzyjnego obszarowych zabezpieczeń odległościowych, *Przegląd elektrotechniczny*, 90 (2014), nr 3, 63-67
- [8] Szablicki M., Bednarczyk T., Halinka A., Rzepka P., The concept of a new of wide area distance protection – virtual tests using RelaySimTest. *PAC World Conference 2018*, 1-17
- [9] Halinka A., Szablicki M., Zabezpieczenia odległościowe linii n-odczepowych (nowe metody wyznaczania impedancji), *Przegląd elektrotechniczny*, 90 (2014), nr 7, 131-134
- [10] Halinka A., Szablicki M., System Automatyki Układów Odczepowych (SAOU), *Przegląd elektrotechniczny*, 86 (2010), nr 8, 44-49
- [11] Halinka A., Rzepka P., Szablicki M., Agent model of multi-agent system for area power system protection. *Modern Electric Power Systems Conference 2015 (MEPS)*, 191-194