Adrian HALINKA, Mateusz SZABLICKI

Politechnika Śląska, Wydział Elektryczny, Instytut Elektroenergetyki i Sterowania Układów

Zabezpieczenia odległościowe linii *n*-odczepowych (nowe metody wyznaczania impedancji)

Streszczenie. *W artykule przedstawiono, opracowane przez autorów, nowe metody wyznaczania składowych impedancji pętli zwarcia dedykowane zabezpieczeniom odległościowym linii wieloramiennych.*

Abstract. *The article presents, developed by the authors, the new methods of calculating the impedance's components for the distance protection on the multi-ended power lines. (**Distance protection on the multi-ended power lines (the new methods of calculating the impedance)**).*

Słowa kluczowe: elektroenergetyczna automatyka zabezpieczeniowa, zabezpieczenie odległościowe, linie wieloramienne.
Keywords: power system protection, distance protection, multi-ended power lines.

doi:10.12915/pe.2014.07.26

Wstęp

Wzrost złożoności funkcjonalnej i konfiguracyjnej sieci KSE, objawiający się m.in. powstaniem linii wieloramiennych (linii *n*-odczepowych), niejednokrotnie powoduje, że istniejąca elektroenergetyczna automatyka zabezpieczeniowa (EAZ) oraz stosowane algorytmy pomiarowe i decyzyjne nie są w stanie skutecznie i pewnie realizować swych zadań.

Do grupy układów EAZ szczególnie wrażliwych na postać obwodu zwarciowego należą zabezpieczenia odległościowe, dla których prawidłowo określona impedancja – będąca wielkością kryterialną – powinna być proporcjonalna do odległości między punktem zabezpieczeniowym pozyskiwania sygnałów wejściowych zabezpieczenia a miejscem wystąpienia zwarcia dla wszystkich rodzajów zakłóceń zwarciowych [1], [2]. W układach rzeczywistych jest to możliwe praktycznie wyłącznie w zabezpieczeniach zainstalowanych na ciągach liniowych o prostej strukturze, których elementami składowymi są pojedyncze linie, a w stacjach elektroenergetycznych nie ma odgałęzień liniowych ani obiektów będących źródłem prądu zwarciowego. Dodatkowo, odnosi się to jedynie do przypadków zakłóceń zwarciowych nieobarczonych występowaniem czynników fałszujących proces wyznaczania impedancji, do których zalicza się m.in. niezerową wartość rezystancji przejścia w miejscu zwarcia, obciążenie chronionego ciągu bądź linii w stanie przedzakłóceniowym itd. [1], [2].

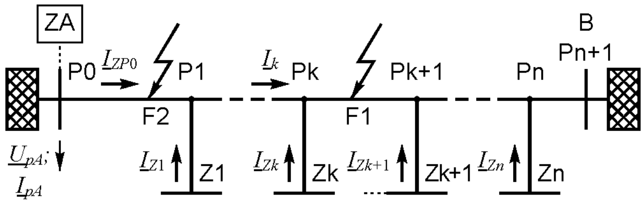
Wobec powyższego konieczne jest opracowanie nowych algorytmów wyznaczania impedancji dla zabezpieczeń odległościowych linii *n*-odczepowych. Jednak z doświadczeń autorów wynika, że niezbędna może być zmiana podejścia do sposobu funkcjonowania tych zabezpieczeń. Ograniczenia funkcjonalności stosowanych – „klasycznych" – zabezpieczeń są bowiem w głównej mierze determinowane przez przyjęty zbiór sygnałów wejściowych. Zabezpieczenia pozyskują napięcia i prądy jedynie z lokalnego punktu zabezpieczeniowego, w którym jest zainstalowany układ EAZ. W zdecydowanej większości stanów pracy układów sieciowych zawierających linie wieloramienne taki zbiór danych jest niewystarczający do poprawnego określenia warunków pracy sieci.

Potrzebę odejścia od „klasycznych" zabezpieczeń odległościowych linii autorzy wykazali już m.in. w [3] i [4], wskazując, że w niektórych przypadkach nieuniknione może się okazać wykorzystanie automatyki bazującej na strukturach obszarowych. Założenie dostępności sygnałów pomiarowych nie tylko lokalnych, ale pochodzących z fragmentu sieci, pozwoliło autorom opracować metody wyznaczania impedancji pętli zwarcia dedykowane zabezpieczeniom odległościowym linii wieloramiennych.

Metody wyznaczania impedancji dla zabezpieczeń odległościowych linii *n*-odczepowych

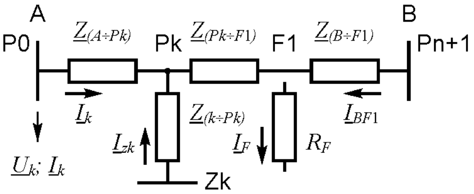
W [5] i [6] autorzy przedstawili sposób obliczania składowych impedancji pętli zwarcia, który można implementować w zabezpieczeniach odległościowych linii z odczepem. Uwzględnienie wyznaczania impedancji zjawiska spływu prądów zwarciowych, niezerowej wartości rezystancji przejścia w miejscu zwarcia, przedzakłóceniowego obciążenia linii oraz zmienności prądu zwarciowego umożliwia praktycznie uniewrażliwienie obliczanej impedancji na wymienione czynniki fałszujące. Jednak proponowane metody wyznaczania skorygowanej impedancji są predestynowane do stosowania w zabezpieczeniach linii wyłącznie z jednym odczepem.

Zastosowany tok wyprowadzania równań określających składowe impedancji opracowanych metod wyznaczania skorygowanej impedancji dla linii z jednym odczepem pozwala na uogólnienie tych zależności również dla linii *n*-odczepowej. W artykule przedstawiono modyfikacje metod wyprowadzonych w [6] dla linii z jednym odczepem. W celu zwiększenia przejrzystości rozważań ograniczono się do zamieszczenia zależności opisujących impedancję „widzianą" w punkcie zabezpieczeniowym jednego z krańców linii głównego ciągu. Skorygowane impedancje dla pozostałych punktów linii *n*-odczepowej można wyznaczyć w sposób analogiczny. Na rysunku 1 przedstawiono schemat rozpatrywanego układu z linią wieloramienną.



Rys.1. Układ sieciowy z linią *n*-odczepową z przyjętym rozpływem prądów zwarciowych dla zwarć trójfazowych w punktach F1, F2

Uogólnienie metod wyznaczania skorygowanej impedancji proponowanych w [6] dla linii z jednym odczepem na potrzeby linii *n*-odczepowej wymaga zmiany sposobu postrzegania linii *n*-odczepowej. Konieczne jest jej przekształcenie do postaci obiektu 3-elementowego, w którym można wyróżnić dwa odcinki linii głównego ciągu i jeden odczep, przy czym jeden z tych odcinków to fragment linii ze zwarciem. Przykładowo, dla zwarcia w punkcie F1 zlokalizowanym za *k*-tym odczepem, linię z rysunku 1 można przedstawić jako obiekt składający się z odcinków P0÷Pk i Pk÷Pn+1 oraz odczepu k. Uproszczony schemat zastępczy linii zmodyfikowanej dla trójfazowego zwarcia pośredniego w punkcie F1 zamieszczono na rysunku 2.



Rys.2. Uproszczony schemat zastępczy umyślonej gwiazdy sieciowej, będącej zmodyfikowaną linią wieloramienną, dla zwarcia trójfazowego przez rezystancję R_F w punkcie F1

Przekształcenie linii *n*-odczepowej do postaci linii z jednym odczepem odpowiada strukturze układu, dla którego w [6] wyprowadzono metodę 1 wyznaczania skorygowanej impedancji dedykowaną odcinkom linii odległym względem punktu zabezpieczeniowego, dla którego określa się impedancję (tj. odcinkom za punktem styku gwiazdy sieciowej). Takie podejście wymaga sprowadzenia równania impedancji „widzianej" w punkcie ZA (rys.1) do postaci, w której prądy płynące odcinkami rzeczywistej linii *n*-odczepowej od rozpatrywanego punktu ZA do punktu styku Pk poprzedzającego odcinek linii ze zwarciem są wyrażone poprzez prąd $\underline{I}_k$ – sumaryczny prąd wszystkich źródeł prądu zwarciowego przyłączonych do krańców linii poprzedzających punkt Pk, tj. prądów przepływających przez punkty ZA, Z1... Zk-1. Pozwala to traktować linię *n*-odczepową jako jedną gwiazdę sieciową ograniczoną krańcami ZA, ZB i Zk, przez którą od strony punktu ZA przepływa prąd $\underline{I}_k$ (rys.2).

Dla układu sieciowego przedstawionego na rysunku 2 impedancja „widziana" w punkcie zabezpieczeniowym ZA przy zwarciu w punkcie F1, obliczona na podstawie sygnałów $\underline{U}_k$ i $\underline{I}_k$ występujących w umyślonej gwieździe sieciowej, jest określona zależnością:

(1) $$\underline{Z}_A = \frac{\underline{U}_k}{\underline{I}_k} = \frac{\underline{I}_k \underline{Z}_{(A\div Pk)} + \left(\underline{I}_k + \underline{I}_{Zk}\right)\underline{Z}_{(Pk\div F1)} + \underline{I}_F R_F}{\underline{I}_k},$$

gdzie: $\underline{Z}_A$ – impedancja wyznaczona przez „klasyczne" zabezpieczenie odległościowe zainstalowane w punkcie ZA rzeczywistej linii wieloramiennej ($\underline{Z}_{pA}$) przeliczona z wartości prądu $\underline{I}_{pA}$, dla którego była obliczana, na wartość prądu $\underline{I}_k$ (patrz wzór (2)); $\underline{I}_F$ – prąd płynący przez rezystancję przejścia R_F równy sumie prądów zwarciowych przepływających przez wszystkie krańce linii wieloramiennej (wzór (3)); $\underline{I}_k$ – suma prądów przepływających przez krańce linii poprzedzające punkt Pk (wzór (4)); $\underline{I}_{BF1}$ – suma prądów przepływających przez krańce linii zlokalizowane za odcinkiem linii objętym zwarciem (wzór (5)):

(2) $$\underline{Z}_A = R_A + jX_A = \underline{Z}_{pA}\frac{\underline{I}_{pA}}{\underline{I}_k},$$

(3) $$\underline{I}_F = \underline{I}_k + \underline{I}_{Zk} + \underline{I}_{BF1} = \sum_{m=0}^{n+1}\underline{I}_{ZPm},$$

(4) $$\underline{I}_k = \sum_{m=1}^{k}\underline{I}_{ZPm-1},$$

(5) $$\underline{I}_{BF1} = \sum_{m=k+1}^{n+1}\underline{I}_{ZPm}.$$

Chcąc przeprowadzić szczegółowe rozpatrywanie podjętego problemu, należy uwzględnić przypadek najbardziej rozbudowany, gdy jednostkowe parametry impedancyjne odcinków linii *n*-odczepowej nie są jednakowe, tj. $\underline{Z}'_{1(P0\div P1)} \neq \underline{Z}'_{1(P1\div Z1)} \ldots \neq \underline{Z}'_{1(Pn\div Pn+1)}$. Wówczas impedancje umyślonej gwiazdy sieciowej występujące w zależności (1) można wyznaczyć, korzystając ze wzorów:

(6) $$\underline{Z}_{(A\div Pk)} = \sum_{m=1}^{k}\left(\underline{Z}'_{1(Pm-1\div Pm)} l_{(Pm-1\div Pm)}\right) = \\ = \sum_{m=1}^{k}\left[\left(\underline{R}'_{1(Pm-1\div Pm)} + j\underline{X}'_{1(Pm-1\div Pm)}\right) l_{(Pm-1\div Pm)}\right],$$

(suma iloczynów jednostkowej impedancji i długości dla odcinków linii od ZA do Pk poprzedzających odcinek linii objęty zwarciem);

(7) $$\underline{Z}_{(Pk\div F1)} = \underline{Z}'_{1(Pk\div Pk+1)} l_{(Pk\div F1)} = \\ = \left(\underline{R}'_{1(Pk\div Pk+1)} + j\underline{X}'_{1(Pk\div Pk+1)}\right) l_{(Pk\div F1)},$$

(iloczyn jednostkowej impedancji odcinka linii objętego zwarciem oraz długości odcinka od punktu Pk do miejsca zwarcia).

Ponieważ w rzeczywistości prąd $\underline{I}_k$ może nie być równy prądom płynącym poszczególnymi odcinkami linii *n*-odczepowej poprzedzającymi punkt Pk, w zależności (1) należy uwzględnić składnik korygujący (wielkość $\underline{Z}^e$ wyrażona wzorem (8)). Ma to na celu ujęcie w wyniku końcowym wyznaczania skorygowanej impedancji jedynie tych części prądu $\underline{I}_k$, które rzeczywiście płyną odcinkami linii poprzedzającymi fragment objęty zwarciem.

(8) $$\underline{Z}^e = R^e + jX^e = \sum_{m=1}^{k}\left[\left(\sum_{m=1}^{k}\underline{I}_{ZPm-1} - \sum_{l=1}^{m}\underline{I}_{ZPl-1}\right)\cdot \right. \\ \left. \cdot\left(\underline{R}'_{1(Pm-1\div Pm)} + j\underline{X}'_{1(Pm-1\div Pm)}\right) l_{(Pm-1\div Pm)}\right] \Big/ \sum_{m=1}^{k}\underline{I}_{ZPm-1},$$

gdzie: $\sum_{l=1}^{m}\underline{I}_{ZPl-1}$ – różnica między umyślonym prądem $\underline{I}_k$ a rzeczywistymi prądami płynącymi poszczególnymi odcinkami linii wieloramiennej poprzedzającymi punkt Pk.

Uwzględniając zależności (2) ÷ (8), równanie (1) przyjmuje postać:

(9) $$\underline{Z}_A = \sum_{m=1}^{k}\left[\left(\underline{R}'_{1(Pm-1\div Pm)} + j\underline{X}'_{1(Pm-1\div Pm)}\right) l_{(Pm-1\div Pm)}\right] + \\ + \left(\underline{R}'_{1(Pk\div Pk+1)} + j\underline{X}'_{1(Pk\div Pk+1)}\right) l_{(Pk\div F1)} + \\ + \underline{\alpha}\left(\underline{R}'_{1(Pk\div Pk+1)} + j\underline{X}'_{1(Pk\div Pk+1)}\right) l_{(Pk\div F1)} + \underline{\beta}R_F - \underline{Z}^e,$$

gdzie: $\underline{\alpha}$, $\underline{\beta}$ – wielkości zespolone oznaczające ilorazy prądów występujące we wzorze (1), opisane zależnościami:

(10) $$\underline{\alpha} = \alpha^{cz} + j\alpha^{b} = \underline{I}_{Zk}/\underline{I}_k = \underline{I}_{Zk}\Big/\sum_{m=1}^{k}\underline{I}_{ZPm-1},$$

(11) $$\underline{\beta} = \beta^{cz} + j\beta^{b} = \underline{I}_F/\underline{I}_k = \sum_{m=0}^{n+1}\underline{I}_{ZPm}\Big/\sum_{m=1}^{k}\underline{I}_{ZPm-1}.$$

Pierwsze dwa składniki wzoru (9) to poprawna, oczekiwana impedancja od rozpatrywanego punktu zabezpieczeniowego ZA do miejsca zaistnienia zwarcia (punkt F1 na rysunku 2). Trzeci składnik wzoru (9) to błąd wyznaczania impedancji wynikający ze zjawiska spływu prądów zwarciowych w pętli zwarciowej „widzianej" przez zabezpieczenie odległościowe ZA. Wystąpienie tego czynnika fałszującego jest skutkiem obecności *k*-tej linii odczepowej w strukturze rozpatrywanej gwiazdy sieciowej. Z kolei czwarty składnik wzoru (9) jest wynikiem wystąpienia w miejscu zwarcia niezerowej rezystancji przejścia. Natomiast piąty składnik wzoru (9) jest niezbędną korektą uwzględniającą przekształcenie rozpatrywanej linii *n*-odczepowej do umyślonej pojedynczej gwiazdy sieciowej.

Zakładając dostępność sygnałów prądowych ze wszystkich krańców chronionej linii wieloramiennej oraz znajomość parametrów impedancyjnych tej linii, zależność (9) można zapisać w postaci układu dwóch równań (dla części rzeczywistej i urojonej) z jedynie dwiema niewiadomymi. Nieznane są rezystancja przejścia w miejscu zwarcia R_F oraz odległość od Pk do miejsca zwarcia $l_{(Pk\div F1)}$. Przekształcając układ równań wyznaczony ze wzoru (9), można określić zależność opisującą szukaną odległość (12):

$$l_{(Pk\div F1)}=\frac{\beta^b\left(R_A+R^e\right)-\beta^{cz}\left(X_A+X^e\right)-\left[\beta^b\sum_{m=1}^{k}R'_{1(Pm-1\div Pm)}l_{(Pm-1\div Pm)}-\beta^{cz}X'_{1(Pm-1\div Pm)}l_{(Pm-1\div Pm)}\right]}{\left(\alpha^{cz}\beta^b-\alpha^b\beta^{cz}+\beta^b\right)R'_{1(Pk\div Pk+1)}-\left(\alpha^{cz}\beta^{cz}+\alpha^b\beta^b+\beta^{cz}\right)X'_{1(Pk\div Pk+1)}} \tag{12}$$

Wiedząc, że impedancja do miejsca zwarcia jest równa sumie iloczynów impedancji jednostkowych i długości odcinków linii poprzedzających fragment linii objęty zakłóceniem oraz iloczynu impedancji jednostkowej odcinka linii ze zwarciem i długości wyznaczonej według zależności (12), skorygowane wartości składowych impedancji od rozpatrywanego punktu ZA do miejsca zwarcia można opisać równaniami:

$$\begin{aligned} R_{AFs}&=\sum_{m=1}^{k}R'_{1(Pm-1\div Pm)}l_{(Pm-1\div Pm)}+R'_{1(Pk\div Pk+1)}l_{(Pk\div F1)}\\ X_{AFs}&=\sum_{m=1}^{k}X'_{1(Pm-1\div Pm)}l_{(Pm-1\div Pm)}+X'_{1(Pk\div Pk+1)}l_{(Pk\div F1)} \end{aligned}. \tag{13}$$

Porównując zależności (12) i (13) – metoda 1 dla linii *n*-odczepowej z zależnością (7) w [6] – metoda 1 dla linii z jednym odczepem, zauważa się, że równania dla linii z jednym odczepem są szczególną postacią równań dla linii *n*-odczepowej. Dla linii z jednym odczepem prąd pozyskiwany w punkcie, w którym wyznacza się impedancję, to jednocześnie prąd płynący odcinkiem linii poprzedzającym fragment ze zwarciem. Tym samym nie ma konieczności przeliczania impedancji obliczanej „klasyczną" metodą wyznaczania impedancji, a składnik korygujący $\underline{Z}^e$ jest równy 0. Pozwala to uprościć zależność (13) do postaci właściwej dla linii z jednym odczepem i w prostszy sposób obliczyć składowe impedancji.

Analogiczne rozpatrywanie można przeprowadzić dla metody 2 wyznaczania skorygowanej impedancji dedykowanej odcinkowi linii bliskiemu względem rozpatrywanego punktu zabezpieczeniowego, dla którego oblicza się impedancję. Uogólniona postać równań określających składowe impedancji metody 2 dla linii *n*-odczepowej to zmodyfikowana zależność (8) wyprowadzona w [6] dla linii z jednym odczepem. Modyfikacja ta dotyczy wyłącznie konieczności uwzględnienia większej liczby prądów w wielkości β. Przykładowo, dla punktu ZA i zakłócenia w punkcie F2 (rys.2) skorygowaną wartość rezystancji można wyznaczyć według wzoru (patrz również zależność (8) w [6]):

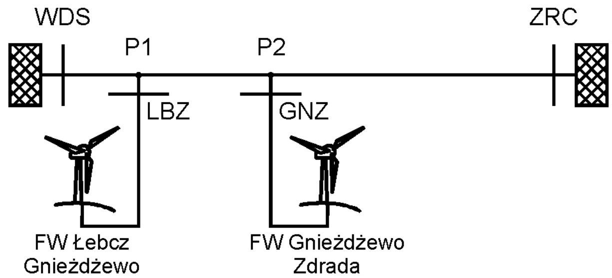
$$R_{AFs}=\frac{R'_{1(A\div P1)}\left(\beta^b R_{pA}-\beta^{cz}X_{pA}\right)}{\beta^b R'_{1(A\div P1)}-\beta^{cz}X'_{1(A\div P1)}}, \tag{14}$$

gdzie: $R'_{1(A\div P1)}$ $\left(X'_{1(A\div P1)}\right)$ – jednostkowa rezystancja (jednostkowa reaktancja) odcinka linii od rozpatrywanego punktu zabezpieczeniowego do najbliższego odczepu; R_{pA} (X_{pA}) – rezystancja (reaktancja) obliczona „klasyczną" metodą wyznaczania impedancji; $\underline{\beta}$ – wielkość określona zależnością:

$$\underline{\beta}=\beta^{cz}+j\beta^b=\sum_{m=0}^{n+1}\underline{I}_{ZPm}\Big/\underline{I}_{ZA}. \tag{15}$$

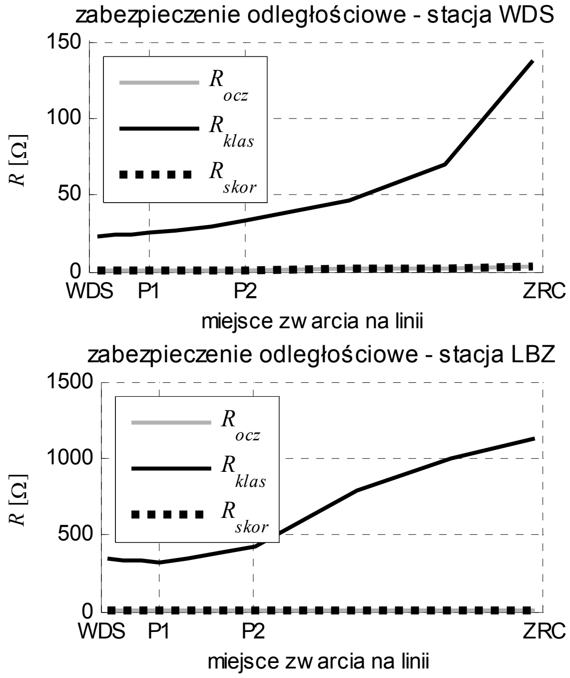
Badania symulacyjne

W celu przeprowadzenia badań symulacyjnych weryfikujących poprawność obliczania impedancji przez proponowane metody opracowano model fragmentu sieci z linią wieloramienną. W KSE taki układ linii z odczepowo przyłączonymi dwiema farmami wiatrowymi (FW Gnieżdżew Zdrada i FW Łebcz Gnieżdżewo) istnieje na linii Władysławowo (WDS) – Żarnowiec (ZRC) – Gnieżdżewo (GNZ) – Łebcz (LBZ). Rozpatrywany fragment sieci odwzorowano w programie DIgSILENT PowerFactory (schemat ideowy układu przedstawiono na rysunku 3). Model zabezpieczenia odległościowego linii zrealizowano w programie MATLAB, korzystając z [3].

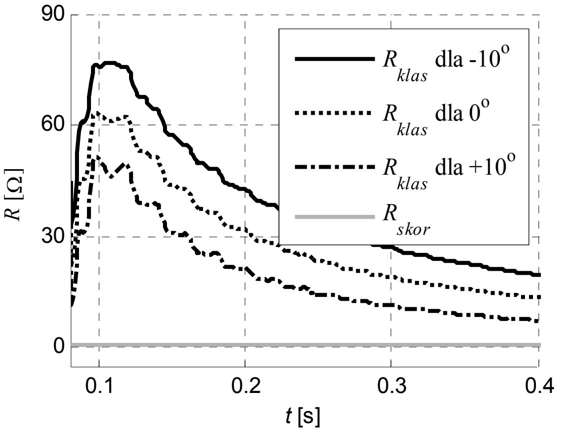


Rys.3. Schemat ideowy modelowanego fragmentu sieci

Wyniki potwierdzają przydatność opracowanych metod wyznaczania skorygowanej impedancji do stosowania w zabezpieczeniach odległościowych linii wieloramiennych. Na rysunku 4 przedstawiono wartości rezystancji obliczone przy wykorzystaniu opracowanych metod (oznaczenie na rysunku *skor*) dla różnych lokalizacji trójfazowych zwarć pośrednich (R_F = 10Ω). Ograniczono się do prezentacji jednego z zabezpieczeń linii głównego ciągu (WDS) i jednego z zabezpieczeń linii odczepowych (LBZ). Wybór ten jest podyktowany największą wrażliwością ich „klasycznych" odpowiedników na wystąpienie zjawiska spływu prądów zwarciowych dla przyjętych warunków pracy modelowanej sieci. Dlatego na rysunku – dla porównania – zamieszczono również wartości rezystancji obliczone metodę „klasyczną" (oznaczenie *klas*). Prezentowane wartości zestawiono z oczekiwanymi, po-prawnymi dla danej lokalizacji zakłócenia (oznaczenie *ocz*). Maksymalny względny błąd wyznaczania rezystancji – spośród przypadków przedstawionych na rysunku 4 – dla „klasycznych" zabezpieczeń odległościowych wynosi prawie 42250% (w odniesieniu do wartości oczekiwanej). Dla porównania, dla opracowanych metod wyznaczania skorygowanej impedancji maksymalny względny błąd obliczania rezystancji wynosi 0,23% (dla identycznych warunków, jak dla zabezpieczeń „klasycznych"). Zaznacza się, że wielkości prezentowane na rysunku 4 odnoszą się do stanu ustalonego zwarcia. W stanie początkowym zwarcia poziom błędów metody „klasycznej" może być wielokrotnie większy. Natomiast dla opracowanych metod względny błąd obliczania składowych impedancji nie przekracza 5% dla wszystkich analizowanych przypadków.



Rys.4. Przykład wpływu zjawiska spływu prądów zwarciowych i niezerowej wartości rezystancji przejścia w miejscu zwarcia na wartości rezystancji obliczone „klasyczną" i opracowanymi metodami wyznaczania impedancji zabezpieczeń odległościowych linii wielo-ramiennej dla różnych lokalizacji zwarć



Rys.5. Przebiegi czasowe wartości rezystancji obliczone przez zabezpieczenie LBZ „klasyczną" i opracowanymi metodami wyznaczania impedancji z pominięciem stanów nieustalonych algorytmów pomiarowych (chwila wystąpienia zwarcia: 60 ms)

Wyniki uzyskiwane z „klasycznych" zabezpieczeń wykazują dużą wrażliwość na wartość i znak różnicy kątów fazowych prądów dopływających do miejsca zwarcia, a tym samym są zależne od kierunku przepływu mocy chronioną linią w stanie przedzakłóceniowym [2]. Wartości składowych impedancji obliczone proponowanymi metodami praktycznie nie zależą od wzmiankowanych wielkości. Wynika to z uwzględniania w składniku β sumy geometrycznej wszystkich prądów zwarciowych. Pozwala to określić wzajemne usytuowanie na płaszczyźnie zespolonej wektorów wzmiankowanych prądów. Brak wrażliwości skorygowanych składowych impedancji na kierunek przepływu mocy zobrazowano na rysunku 5, przedstawiając przebiegi czasowe wartości rezystancji „klasycznej" i skorygowanej „widzianych" w punkcie zabezpieczeniowym LBZ przy zwarciu na odcinku P1P2 3,5 km od punktu P1 dla trzech wartości kąta napięcia w stacji WDS (parametr ten determinuje kierunek przepływu mocy linią).

Porównując kształt przebiegów czasowych rezystancji obliczonych przez „klasyczną" i opracowane metody wyznaczania impedancji (rys.5), zauważa się diametralną różnicę czasu trwania stanu nieustalonego obliczeń obu rodzajów metod. Dla opracowanych metod odchylenie wartości składowych impedancji od wartości ustalonej nie przekracza kilku procent już po 2 lub 3 okresach składowej podstawowej od chwili wystąpienia zakłócenia zwarciowego. Dla „klasycznej" metody wyznaczania impedancji wartość obliczanej rezystancji ustala się na quasi-stałym poziomie dopiero po co najmniej 1,3 s.

Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych badań weryfikujących poprawność określania impedancji pętli zwarcia przez opracowane metody wyznaczania skorygowanej impedancji, których wybrane wyniki przedstawiono w artykule, można wnioskować, że opracowane metody pozwalają uzyskiwać wyniki obliczeń niewrażliwe na czynniki fałszują-ce ujęte podczas konstrukcji równań określających skorygowane składowe impedancji. Tym samym poprawność wyznaczania wektorów impedancji pętli zwarcia nie jest warunkowana zjawiskiem spływu prądów zwarciowych, niezerową wartością rezystancji przejścia w miejscu zwarcia, przedzakłóceniowym obciążeniem chronionej linii, stanem pracy obiektów elektroenergetycznych odczepowo przyłączonych do linii, a także zmiennością wartości i – niejednokrotnie – charakteru prądu generowanego przez źródła prądu zwarciowego. Wymienione czynniki w największym stopniu wpływają na powstanie błędów „klasycznej" metody.

Podsumowując, opracowane przez autorów metody wyznaczania skorygowanej impedancji mogą znacząco poprawić działanie zabezpieczeń odległościowych linii wieloramiennych (linii *n*-odczepowych). Metody te mogą być implementowane m.in. w obszarowych systemach automatyki opisanych w [3] i [7].

LITERATURA

[1] Ungrad H., Winkler W., Wiszniewski A., *Protection techniques in electrical energy systems*, Nwe York, 1995
[2] Ziegler G., *Numerical distance protection: principles and applications*, Berlin and Munich, 1999
[3] Szablicki M., *Obszarowa adaptacyjna automatyka zabezpieczeniowa linii elektroenergetycznych WN z odczepowo przyłączonymi źródłami wiatrowymi*, Rozprawa doktorska, Gliwice, 2013
[4] Halinka A., Sowa P., Szewczyk M., Adaptive decision-taking of protection systems in networks with dispersed power generating sources, *Africon 2011*, Livingstone, 13-15 września 2011, IEEE
[5] Halinka A., Szablicki M., Metoda estymacji składowych impedancji przez zabezpieczenia odległościowe niewrażliwa na odczepowe przyłączanie źródeł wiatrowych (część 1 – minimalizacja wpływu zjawiska spływu prądów zwarciowych), *Przegląd Elektrotechniczny*, 88 (2012), nr 9a, 1-6
[6] Halinka A., Szablicki M., Metoda estymacji składowych impedancji przez zabezpieczenia odległościowe 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., System Automatyki Układów Odczepowych (SAUO), *Przegląd Elektrotechniczny*, 86 (2010), nr 8, 44-49

***Autorzy**: dr hab. inż. Adrian Halinka, profesor Politechniki Śląskiej, E-mail: Adrian.Halinka@polsl.pl; dr inż. Mateusz Szablicki, E-mail: Mateusz.Szablicki@polsl.pl;*
Politechnika Śląska, Instytut Elektroenergetyki i Sterowania Układów, ul. B. Krzywoustego 2, 44-100 Gliwice.