

## Lokalizator zwarcć dla linii elektroenergetycznej z odgałęzieniem skojarzony z zabezpieczeniami różnicowymi – pomiary impedancji pętli zwarciowej

**Streszczenie.** Przedstawiono problemy pomiaru impedancji pętli zwarciowej w linii elektroenergetycznej z odgałęzieniem dla lokalizatora zwarcć skojarzonego z prądowymi zabezpieczeniami różnicowymi. Pomiar przeprowadza się dla trzech hipotetycznych zwarcć, położonych w poszczególnych sekcjach linii, a następnie dokonuje się selekcji rezultatu, który odpowiada rzeczywistemu zwarcciu. Przy pomiarze impedancji kompensowany jest wpływ rezystancji przejścia w miejscu zwarcia. Przedstawiono przykład pomiaru z użyciem sygnałów z symulacji komputerowej.

**Abstract.** Issues related to fault-loop impedance measurement in a three-terminal power line for a fault locator associated with current differential relays are presented. The measurement is carried out for three hypothetical faults located at particular line sections and then the result consistent with the real fault is selected. Influence of fault path resistance on the measurement is compensated for. A sample measurement with use of signals from computer simulation is presented. (*Fault locator for three-terminal power line associated with current differential relays – measurement of fault-loop impedance*).

**Słowa kluczowe:** linia elektroenergetyczna, zwarcie, lokalizator zwarcia, impedancja pętli zwarciowej.

**Keywords:** power line, fault, fault locator, fault-loop impedance.

doi:10.12915/pe.2014.03.02

### Wstęp

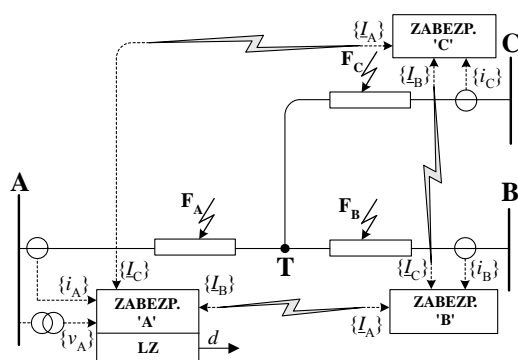
Względy techniczne, ekonomiczne i ochrony środowiska powodują występowanie w systemie elektroenergetycznym, oprócz linii energetycznych o prostej konfiguracji, jeszcze linii rozgałęzionych oraz linii z odczepami [1].

Jako linie rozgałęzione (ang. three-terminal, four-terminal, itd.) uważa się linie o co najmniej trzech końcach, z wyraźną (niepomijalną) generacją na każdym z końców. Z kolei, linie z odczepami są definiowane jako linie o co najmniej trzech końcach, przy czym wyraźna (niepomijalna) generacja występuje co najwyżej na dwóch końcach. Poprzez odczepy zasilane są odbiory, podczas gdy poza pozostałymi końcami linii mamy podsystemy aktywne (tj. z generacją). Do dalszych rozważań bierze się linię z jednym odgałęzieniem (ang. three-terminal line), jak na rys. 1. Taka konfiguracja występuje np. przy przyłączeniu źródła generacji rozproszonej do linii podstawowej [1].

Realizacja zabezpieczenia [2]–[5] oraz lokalizacji zwarcć dla celów inspekcyjno-remontowych [6]–[8] dla linii z odgałęzieniami jest utrudniona. Zwarcie może bowiem wystąpić w różnych sekcjach (rys. 1 – zwarcia:  $F_A$ ,  $F_B$ ,  $F_C$ ), a do zwarcia wpływają prądy z trzech końców linii, przez co rezystancja występująca w miejscu zwarcia powoduje „zafalszowanie” pomiaru impedancji pętli zwarciowej.

### Lokalizator zwarcia skojarzony z zabezpieczeniami różnicowymi – podstawy

Na rys. 1 przedstawiono schemat dla rozważanej lokalizacji zwarcć.



Rys. 1. Schemat funkcjonalny lokalizatora zwarcć dla linii rozgałęzionej

Założono, że lokalizator zwarcć (LZ) jest skojarzony z prądowymi zabezpieczeniami różnicowymi (ZABEZP. 'A'; ZABEZP. 'B'; ZABEZP. 'C'). Jako sygnały wejściowe lokalizatora rozpatruje się fazory prądów trójfazowych z zabezpieczeń różnicowych na wszystkich końcach linii (A, B, C) oraz trójfazowe napięcia z końca linii A gdzie jest zainstalowany lokalizator. W ten sposób do dokładnej lokalizacji zwarcć wykorzystywane są kanały komunikacyjne zabezpieczeń różnicowych, bez wymagania dodatkowych środków przesyłu sygnałów [6].

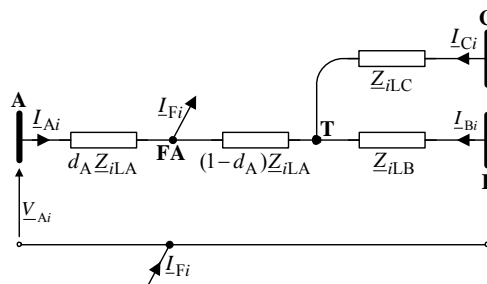
Rozważana lokalizacja polega na użyciu trzech procedur obliczeniowych (PROC\_A, PROC\_B, PROC\_C) przeznaczonych do lokalizacji zwarcć:  $F_A$ ,  $F_B$ ,  $F_C$  w hipotetycznych lokalizacjach w poszczególnych sekcjach linii: A–T, B–T, C–T. Następnie dokonana zostanie selekcja procedury, która daje rezultat odpowiadający rzeczywistemu zwarcciu.

### Procedura lokalizacji PROC\_A

Procedura ta jest przeznaczona do lokalizacji zwarcć występujących w sekcji A–T (rys. 2). Stosując uogólniony model pętli zwarciowej [1] otrzymuje się:

$$(1) \quad \underline{V}_{Ap} - d_A \underline{Z}_{iLA} \underline{I}_{Ap} - R_{FA} \underline{I}_F = 0$$

gdzie:  $d_A$  – odległość do zwarcia;  $R_{FA}$  – rezystancja przejścia w miejscu zwarcia;  $\underline{V}_{Ap}$ ,  $\underline{I}_{Ap}$  – napięcie i prąd pętli zwarciowej;  $\underline{Z}_{iLA}$  – impedancja sekcji linii A–T dla składowej zgodnej;  $\underline{I}_F$  – całkowity prąd zwarcia (prąd w miejscu zwarcia).



Rys. 2. Procedura PROC\_A – schemat zastępczy linii z odgałęzieniem dla  $i$ -tej składowej symetrycznej

W celu określenia odległości do zwarcia, rozpatrywane procedury rozważają naturalne pętle zwarciove, stosownie do rodzaju zwarcia:

- zwarcia jednofazowe – pętla: faza-ziemia,
  - zwarcia międzyfazowe – pętla: faza<sub>1</sub>-faza<sub>2</sub>,
- dla których formuje się napięcie ( $\underline{V}_{Ap}$ ) oraz prąd ( $\underline{I}_{Ap}$ ) pętli zwarciovej, w sposób analogiczny jak dla tradycyjnych zabezpieczeń odległościowych [1]–[2].

Przed rozwiązaniem (1) należy jeszcze wyznaczyć całkowity prąd zwarcia ( $\underline{I}_F$ ). W celu uzyskania wyższej dokładności lokalizacji, zamiast sumowania prądów poszczególnych faz z trzech końców linii można zastosować następujący uogólniony model zwarcia [1]:

$$(2) \quad \underline{I}_F = \underline{a}_{F1} \underline{I}_{F1} + \underline{a}_{F2} \underline{I}_{F2} + \underline{a}_{F0} \underline{I}_{F0}$$

gdzie:

$$\underline{I}_{F1} = (\underline{I}_{A1} - \underline{I}_{A1}^{pre}) + (\underline{I}_{B1} - \underline{I}_{B1}^{pre}) + (\underline{I}_{C1} - \underline{I}_{C1}^{pre});$$

$$\underline{I}_{F2} = \underline{I}_{A2} + \underline{I}_{B2} + \underline{I}_{C2}; \quad \underline{I}_{F0} = \underline{I}_{A0} + \underline{I}_{B0} + \underline{I}_{C0},$$

$\underline{a}_{F1}$ ,  $\underline{a}_{F2}$ ,  $\underline{a}_{F0}$  – współczynniki udziału poszczególnych składowych symetrycznych, wyznaczone z warunków granicznych poszczególnych zwarć (np. dla zwarcia fazy L1 z ziemią uwzględnia się, że dla pozostałych faz zachodzi:  $\underline{I}_{F\_L2} = \underline{I}_{F\_L3} = 0$ ).

Należy zwrócić uwagę, że składowa zgodna całkowitego prądu zwarcia ( $\underline{I}_{F1}$ ) występująca w (1) została obliczona w ten sposób, że dla każdego końca (A, B, C) są odejmowane prądy przed zwarcie (górnym indeksem: pre) od prądów w trakcie zwarcia (brak indeksu górnego). Pozwala to ograniczyć negatywny wpływ nieuwzględnianych prądów pojemnościowych linii, co jest szczególnie istotne przy liniach o znacznych długościach.

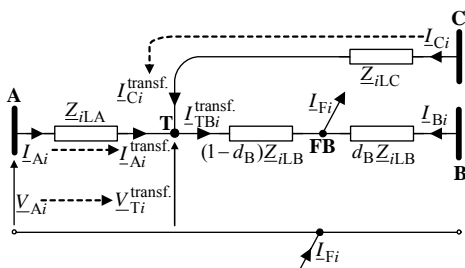
Po rozpisanie (1) dla części rzeczywistej oraz urojonej można wyznaczyć poszukiwaną odległość do zwarcia:

$$(3) \quad d_A = \frac{\text{real}(\underline{V}_{Ap}) \text{imag}(\underline{I}_F) - \text{imag}(\underline{V}_{Ap}) \text{real}(\underline{I}_F)}{\text{real}(\underline{Z}_{1LA} \underline{I}_{Ap}) \text{imag}(\underline{I}_F) - \text{imag}(\underline{Z}_{1LA} \underline{I}_{Ap}) \text{real}(\underline{I}_F)}$$

Mając obliczoną odległość do zwarcia (3) można następnie wyznaczyć drugą niewiadomą – rezystancję  $R_{FA}$ .

### Procedury lokalizacji PROC\_B, PROC\_C

Procedura PROC\_B jest przeznaczona do lokalizacji zwarć występujących w sekcji B–T (rys. 3). Zwarcia zachodzące sekcji C–T można rozważać (PROC\_C) w sposób analogiczny i z tego względu dalsze rozważania ograniczą się tylko do procedury PROC\_B (rys. 3).



Rys. 3. Procedura PROC\_B – schemat zastępczy linii z odgałęzieniem dla *i*-tej składowej symetrycznej

W odniesieniu do rys. 3, uogólniony model pętli zwarciovej jest formułowany następująco:

$$(4) \quad \underline{V}_{Tp}^{transf.} - (1 - d_B) \underline{Z}_{1LB} \underline{I}_{TBp}^{transf.} - R_{FB} \underline{I}_F = 0$$

gdzie:  $\underline{V}_{Tp}^{transf.}$ ,  $\underline{I}_{TBp}^{transf.}$  – napięcie i prąd pętli zwarciovej w punkcie T,  $\underline{I}_F$  – całkowity prąd zwarciovej (2).

Napięcie i prąd pętli zwarciovej z (4) są formowane stosownie do rodzaju zwarcia, po uprzednim analitycznym przeniesieniu (transferze) poszczególnych składowych symetrycznych prądów i napięć do tego punktu (górnym indeks w (4): transf.). Analityczne przeniesienie napięć z punktu A do węzła T (rys. 3) polega na odjęciu spadku napięcia na sekcji linii A–T. W przypadku przeniesienia prądów z punktów A i C w kierunku do węzła T, należy odjąć prądy poprzeczne tych sekcji, bądź bez zmiany, tzn. bez uwzględniania tych prądów, co jest jednak dopuszczalne dla niezbyt długich sekcji [1]. Rozwiązanie (4) ze względu na niewiadome:  $d_B$ ,  $R_{FB}$  uzyskuje się analitycznie jak dla (1).

### Selekcja obowiązującej procedury

W wyniku zastosowania trzech procedur (PROC\_A, PROC\_B, PROC\_C) uzyskuje się trzy pary rezultatów dla odległości do zwarcia oraz rezystancji przejścia: ( $d_A$ ,  $R_{FA}$ ), ( $d_B$ ,  $R_{FB}$ ), ( $d_C$ ,  $R_{FC}$ ). W związku z tym należy dokonać selekcji obowiązującej procedury, jako odpowiadającej rzeczywistemu zwarcie.

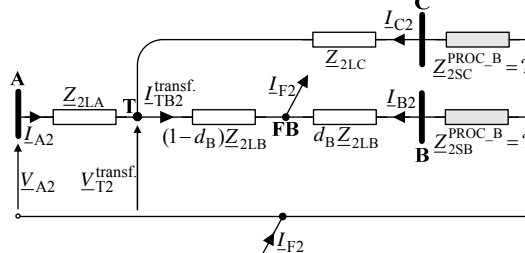
W pierwszym rzędzie należy wykluczyć tę procedurę, z której uzyskuje się odległość do zwarcia wskazującą na zwarcie poza tą sekcją bądź gdy wyznaczona rezystancja przejścia jest ujemna. Jeśli nie doprowadzi to do pozostania tylko jednej procedury, to selekcję należy kontynuować.

W następnej kolejności należy przeprowadzić selekcję w oparciu o estymację impedancji zastępczych podsystemów za szynami B i C, odległymi w stosunku do punktu zainstalowania lokalizatora (rys. 1 – koniec A). Zasadę określenia tych impedancji w przypadku rozważania procedury PROC\_B przedstawiono na rys. 4, gdzie zamieszczono schemat zastępczy dla składowej przeciwnej. Dla zwarć trójfazowych symetrycznych te składowe są nieobecne i należy wtedy rozważać składowe zgodne przyrostowe. Wyznacza się impedancje:

$$(5) \quad \underline{Z}_{2SB}^{PROC\_B} = \frac{-\underline{V}_{T2}^{transf.} + (1 - d_B) \underline{Z}_{2LB} \underline{I}_{TB2}^{transf.} - d_B \underline{Z}_{2LB} \underline{I}_{B2}}{\underline{I}_{B2}}$$

$$(6) \quad \underline{Z}_{2SC}^{PROC\_B} = \frac{-\underline{V}_{T2}^{transf.} + \underline{Z}_{2LC} \underline{I}_{C2}}{\underline{I}_{C2}}$$

Impedancje podsystemów zastępczych [9], poza szczególnymi przypadkami, mają charakter rezystancyjno-indukcyjny: *R–L*. Jeśli chociaż jedna z impedancji (5)–(6) nie spełnia tego warunku, to ta procedura (PROC\_B) winna być odrzucona. Można również wykluczyć procedurę gdy obliczona dla niej impedancja ma charakter obwodu *R–L*, lecz rezystancja bądź reaktancja znacznie odbiegają od rzeczywistych wartości, co wymaga ich znajomości.



Rys. 4. Procedura PROC\_B – zasada selekcji obowiązującej procedury z wyznaczaniem impedancji podsystemów B i C

### Pomiar impedancji pętli zwarciowej

Impedancja pętli zwarciowej, wyznaczana na podstawie napięcia i prądu pętli zwarciowej – formowanych odpowiednio do rodzaju zwarcia, a więc tak jak w tradycyjnych zabezpieczeniach odległościowych, podczas zwarc oporowych jest obarczona błędem. Powodowane jest to sływem prądów z wszystkich końców linii do miejsca zwarcia. W wyniku zafalszowania pomiaru mogą wystąpić błędne zadziałania zabezpieczenia lub opóźnienie w jego działaniu [3]–[4].

Wskazane wyżej problemy w odniesieniu do tradycyjnych zabezpieczeń odległościowych wynikają ze stosowania w nich pomiarów tylko z jednego końca linii, przez co pozyskuje się za mało informacji o zaistniałym zwarcu. Wobec tego stosując zwiększoną dostępność pomiarową, np. taką jak w niniejszej pracy (rys. 1), można uzyskać poprawę pomiaru impedancji pętli zwarciowej. W szczególności, biorąc odległość do zwarcia z procedury lokalizacji, która w wyniku selekcji została wskazana jako obowiązująca, można dokładniej określić impedancję pętli zwarciowej widzianej z odpowiedniego końca linii.

Jeśli po przeprowadzeniu lokalizacji, uzyskuje się w wyniku selekcji, że zwarcie wystąpiło w sekcji linii A–T, to kompensację (górny indeks w (7): komp.) wpływu efektu sływu prądów z końców linii do miejsca zwarcia można uzyskać biorąc odległość  $d_A$  (3) do obliczenia impedancji pętli zwarciowej w postaci:

$$(7) \quad \underline{Z}_{Ap}^{komp.} = d_A \underline{Z}_{ILA}$$

zamiast tradycyjnego pomiaru:

$$(8) \quad \underline{Z}_{Ap} = \frac{V_{Ap}}{I_{Ap}}$$

W przypadku gdy procedura PROC\_B zostaje wybrana jako obowiązująca, impedancję pętli zwarciowej widzianej z końca linii B określa się następująco:

$$(9) \quad \underline{Z}_{Bp}^{komp.} = d_B \underline{Z}_{ILB}$$

Z kolei, bez kompensacji efektu sływu prądów z wszystkich końców linii do miejsca zwarcia, do obliczenia impedancji można użyć napięcia  $V_{Tp}^{transf.}$  i prądu  $I_{TBp}^{transf.}$  pętli zwarciowej, utworzonych dla węzła rozgałęziowego T. Jednak by uzyskać możliwość porównania z impedancją (9), należy przejść na impedancję widzianą nie z węzła T, lecz z końca linii B:

$$(10) \quad \underline{Z}_{Bp} = \underline{Z}_{ILB} - \frac{V_{Tp}^{transf.}}{I_{TBp}^{transf.}}$$

W przypadku gdy procedura PROC\_C zostaje wybrana jako obowiązująca (zwarcie wystąpiło w sekcji linii: C–T), to impedancję pętli zwarciowej wyznacza się analogicznie jak w (9)–(10).

### Analiza algorytmów z użyciem symulacji ATP-EMTP

Do badań przedstawionych algorytmów zastosowano symulację komputerową [9]–[10]. Z użyciem programu ATP-EMTP [10] zamodelowano testowy układ sieciowy z linią 110 kV posiadającą trzy sekcje, tj. A–T: 80 km, B–T: 100 km, C–T: 50 km. Przyjęto impedancje linii dla składowej zgodnej (przeciwnej) oraz zerowej o wartościach:  $\underline{Z}'_{IL} = (0,0276 + j0,351) \Omega/\text{km}$ ;  $\underline{Z}'_{OL} = (0,275 + j1,0265) \Omega/\text{km}$ .

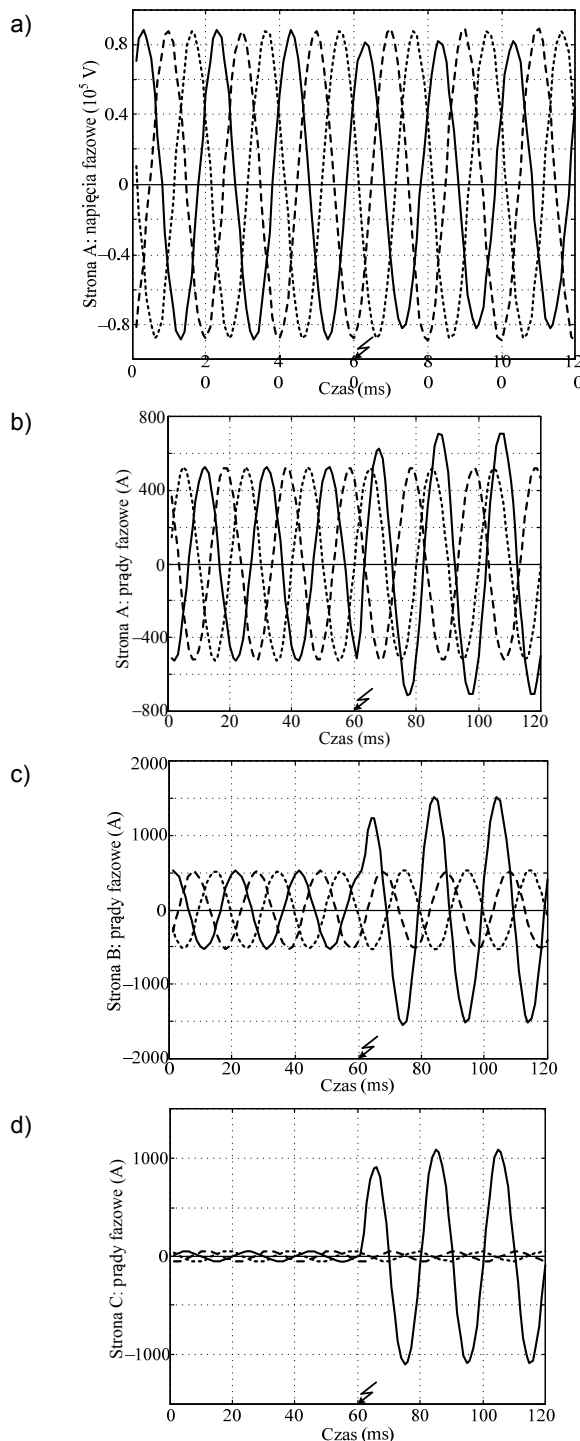
W celu analizowania błędów tylko rozważanych algorytmów, rozważono idealną transformację przekładników. Zamodelowano filtry analogowe

dolnoprzepustowe o częstotliwości odcięcia: 350 Hz. Sygnały próbkowano z częstotliwością 1000 Hz i użyto pełno-okresową filtrację Fouriera.

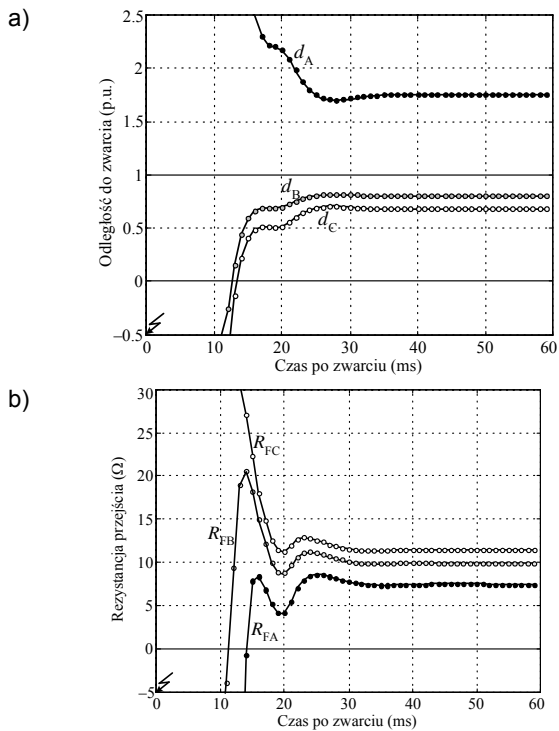
Na rys. 5–7 przedstawiono rezultaty dla przykładowego zwarcia o następujących parametrach – zwarcie jednofazowe: L1–E, zwarcie w sekcji B–T, odległość do zwarcia:  $d_B=0,8$  p.u., rezystancja przejścia:  $R_F=10 \Omega$ .

Na rys. 5 przedstawiono sygnały pomiarowe, przeliczone na stronę pierwotną. Wyznaczone odległości do zwarcia oraz rezystancje przejścia zamieszczono na rys. 6. Uśrednione w przedziale (30 ÷ 50) ms wartości wynoszą:

- $d_A=1,7482$  p.u.,  $d_B=0,8002$  p.u.,  $d_C=0,6799$  p.u.
- $R_{FA}=7,45 \Omega$ ,  $R_{FB}=9,96 \Omega$ ,  $R_{FC}=11,43 \Omega$ .



Rys. 5. Przykład: zwarcie w sekcji linii B–T: a) strona A – napięcia fazowe, b) strona A – prądy fazowe, c) strona B – prądy fazowe, d) strona C – prądy fazowe



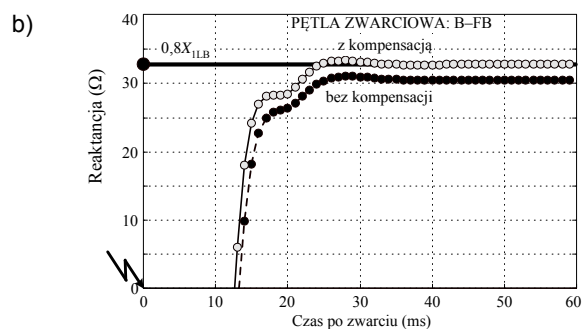
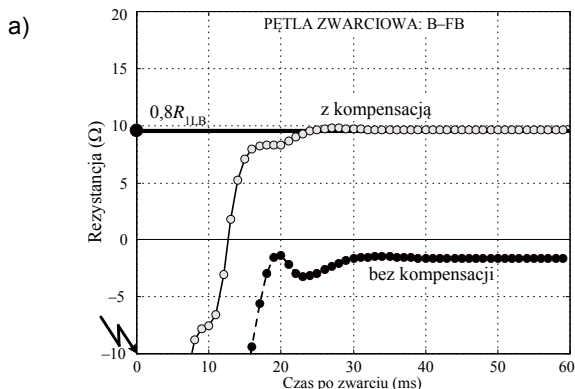
Rys. 6. Przykład: zwarcie w sekcji linii B-T: a) odległości do zwarcia, b) rezystancje przejścia

Na podstawie uzyskanych rezultatów (rys. 6) można od razu wykluczyć procedurę lokalizacji PROC\_A, ponieważ daje ona odległość do zwarcia niemieszczącą się w sekcji A-T ( $d_A=1,7482$  p.u.). W przypadku procedury PROC\_B wyznaczono następujące impedancje zastępcze podsystemów za szynami B i C:

- $Z_{2SB}^{PROC\_B} = (0,61 + j3,61) \Omega$ ;  $Z_{2SC}^{PROC\_B} = (2,02 + j11,2) \Omega$ , natomiast dla procedury PROC\_C:
- $Z_{2SB}^{PROC\_C} = (-5,26 - j16,0) \Omega$ ;  $Z_{2SC}^{PROC\_C} = (7,63 + j31,2) \Omega$ .

Konfrontacja tych impedancji z wartościami użytymi w symulacji:  $Z_{2SB} = (0,65 + j3,69) \Omega$ ,  $Z_{2SC} = (1,95 + j11,1) \Omega$  prowadzi do wyraźnego wskazania procedury PROC\_B jako obowiązującej, co jest prawidłowe.

Na rys. 7a i b przedstawiono wykresy rezystancji i reaktancji pętli zwarciowej, obliczanych zgodnie z (9)–(10). Zaznaczono tam również ich dokładne wartości. W przypadku braku kompensacji (10) występują duże odstępstwa obliczanych wartości od wartości dokładnych. Natomiast przy zastosowaniu kompensacji (9), uzyskuje się ustalanie obliczanej rezystancji i reaktancji na poziomie wartości dokładnych.



Rys. 7. Przykład: zwarcie w sekcji linii B-T: a) rezystancja oraz b) reaktancja pętli zwarciowej

## Podsumowanie

Analizie poddano lokalizację zwarców w linii napowietrznej z jednym odgałęzieniem. Jako sygnały wejściowe lokalizatora zwarców rozpatrzono prądy trójfazowe z prądowych zabezpieczeń różnicowych oraz trójfazowe napięcia z miejsca zainstalowania lokalizatora. Zastosowano trzy procedury do lokalizacji zwarców w poszczególnych sekcjach linii i selekcję obowiązującej procedury. Pokazano, że rezultat z lokalizacji zwarcia można zastosować do dokładnego określania impedancji pętli zwarciowej.

Przedstawiono i przedyskutowano rezultaty dla przykładowego zwarcia z symulacji za pomocą programu ATP-EMTP.

## LITERATURA

- [1] Saha M. M., Izykowski J., Rosołowski E., Fault Location on Power Networks, Springer, London, 2010
- [2] Synal B., Rojewski W., Zabezpieczenia elektroenergetyczne: podstawy, INPE, Bełchatów, 2008
- [3] Halinka A., Rzepka P., Szewczyk M., Szabliski M., Przyłączanie farm wiatrowych – potrzeba nowego podejścia do sposobu funkcjonowania automatyki elektroenergetycznej sieci WN, *Przegląd Elektrotechniczny*, 2011, nr 9a, 218-221
- [4] Halinka A., Rzepka P., Szabliski M., Szewczyk M., Wpływ poprawności pracy automatyki elektroenergetycznej na bezpieczeństwo SEE w aspekcie nowych rozwiązań technicznych i ekonomicznych realizowanych i planowanych do realizacji w KSE, *Przegląd Elektrotechniczny*, 2011, nr 2, 140-143
- [5] Kasztenny B., Benmouyal G., Altuve H.J., Fischer N., Tutorial on operating characteristics of microprocessor-based multiterminal line current differential relays, *Present Problems of Power System Control*, Autumn 2013, 5–73, (<http://www.psc.pwr.wroc.pl>)
- [6] Izykowski J., Rosołowski E., Saha M.M., Fulczyk M., Balcerek P., A fault location method for application with current differential relays of three-terminal lines, *IEEE Trans. on Power Delivery*, 2007, Vol. 22, No. 4, 2099 - 2107
- [7] Brahma S.M., Fault location scheme for a multi-terminal transmission line using synchronized voltage measurements, *IEEE Trans. on Power Delivery*, 2005, Vol. 20, No. 2, 1325-1331
- [8] Izykowski J., Mołag R., Rosołowski E., Saha M. M., Fault location in three-terminal line with use of limited measurements, *Proceedings of IEEE PowerTech Conference*, St. Petersburg, 27-30.06.2005
- [9] Sowa P., Dynamiczne układy zastępcze w analizie elektromagnetycznych stanów przejściowych. *Wydawnictwo Politechniki Śląskiej*, Gliwice, 2011
- [10] Dommel H.W., Electro-Magnetic Transients Program, BPA, Portland, Oregon, 1986

**Autorzy:** prof. dr hab. inż. Jan Izykowski, prof. dr hab. inż. Eugeniusz Rosołowski, dr inż. Piotr Pierz, Politechnika Wrocławska, Instytut Energoelektryki, Wybrzeże St. Wyspiańskiego 27, 50-370, Wrocław, E-mail: [fjan.izykowski@pwr.wroc.pl](mailto:fjan.izykowski@pwr.wroc.pl); [eugeniusz.rosolowski@pwr.wroc.pl](mailto:eugeniusz.rosolowski@pwr.wroc.pl); dr inż. Przemysław Balcerek, Korporacyjne Centrum Badawcze ABB, ul. Starowiślna 13A, 31-038 Kraków, E-mail: [przemyslaw.balcerek@pl.abb.com](mailto:przemyslaw.balcerek@pl.abb.com).