

Bartosz OLEJNIK\*

## **BADANIA SYMULACYJNE ZJAWISK WYSTĘPUJĄCYCH PODCZAS ZWARCÓ DOZIEMNYCH OPOROWYCH W SIECI SN**

W artykule przedstawione zostały wyniki badań symulacyjnych prowadzonych w środowisku ATP/EMTP. Analizy dotyczą zjawisk, które występują podczas zwarć doziemnych oporowych w sieci dystrybucyjnej średniego napięcia. Skupiono się przede wszystkim na problemie związanym z wpływem rezystancji przejścia w miejscu zwarcia na wartość składowej zerowej prądu w wybranym miejscu napowietrznej linii SN. Oceniono także wartości składowej zerowej napięcia w sieci podczas tego typu zwarć. Analizie poddany został również proces odbudowy napięcia w sieci po ponownym załączeniu linii. Analizy przedstawione w artykule są powiązane z problemem możliwości zastosowania nowych kryteriów zabezpieczeniowych w sygnalizatorach przepływu prądu zwarciovego.

SŁOWA KLUCZOWE: EMTP/ATP, zwarcie doziemne, rezystancja przejścia, sieć SN

### **1. WSTĘP**

Z punktu widzenia zjawisk występujących podczas zwarć doziemnych sieci średniego napięcia są specyficzne z wielu względów. Przede wszystkim, sieć taka pracuje z nieskutecznie uziemionym punktem neutralnym, co w największej mierze warunkuje zjawiska zachodzące podczas zwarć, zwłaszcza doziemnych. Jeśli założy się ponadto, że rezystancja przejścia w miejscu zwarcia może sięgać kilku kilometrów, to problem późniejszej detekcji takiego zjawiska przez urządzenia do tego celu urządzenie elektroenergetycznej automatyki zabezpieczeniowej (EAZ) może być przedmiotem bardzo rozbudowanych analiz.

W odróżnieniu od sieci wysokiego i najwyższego napięcia, sieć SN może być eksploatowana jako trójfazowa z punktem neutralnym izolowanym, uziemionym przez rezystor lub przez dławik gaszący. W tym ostatnim przypadku sieć nazywana jest często siecią skompensowaną. W sieci skompensowanej stosuje się przeważnie, poza samym dławikiem, dodatkowe układy do wymuszania prądów płynących tylko podczas zwarć doziemnych – automatykę wymuszania składowej czynnej lub biernej.

---

\* Politechnika Poznańska.

Detekcja doziemień w sieciach średniego napięcia jest utrudniona z uwagi na, zwykle, niewielkie prądy zwarciove. Jeśli sieć uziemiona jest przez rezystor to mogą one sięgać kilkuset amperów, dla sieci izolowanej i skompensowanej – kilkudziesięciu. Z tego powodu najłatwiejsze zadanie przez EAZ stoi w pierwszym z opisywanych przypadków, najtrudniejsze zaś – w sieci skompensowanej. Izolowany punkt neutralny stosowany jest w energetyce zawodowej rzadko, tylko w sytuacjach, gdy pojemnościowy prąd zwarcia doziemnego sieci jest mniejszy niż 50 A (dla sieci z przewagą kabli) lub 15 A (dla sieci z przewagą linii napowietrznych) [1].

Statystyki (np. [2]) pokazują, że 80 % wszystkich zwarć w sieci SN to doziemienia, stąd problem detekcji tego typu zjawisk jest bardzo istotny.

W niniejszej publikacji użyto oprogramowania ATP/EMTP do oceny możliwości detekcji doziemień przez zabezpieczenia różnego typu w sieci skompensowanej.

## 2. CHARAKTERYSTYKA ANALIZOWANEJ SIECI

Na potrzeby analizy zjawisk zachodzących w sieci średniego napięcia podczas zwarć doziemnych opracowany został jej model w środowisku ATP/EMTP. Parametry badanej sieci są następujące:

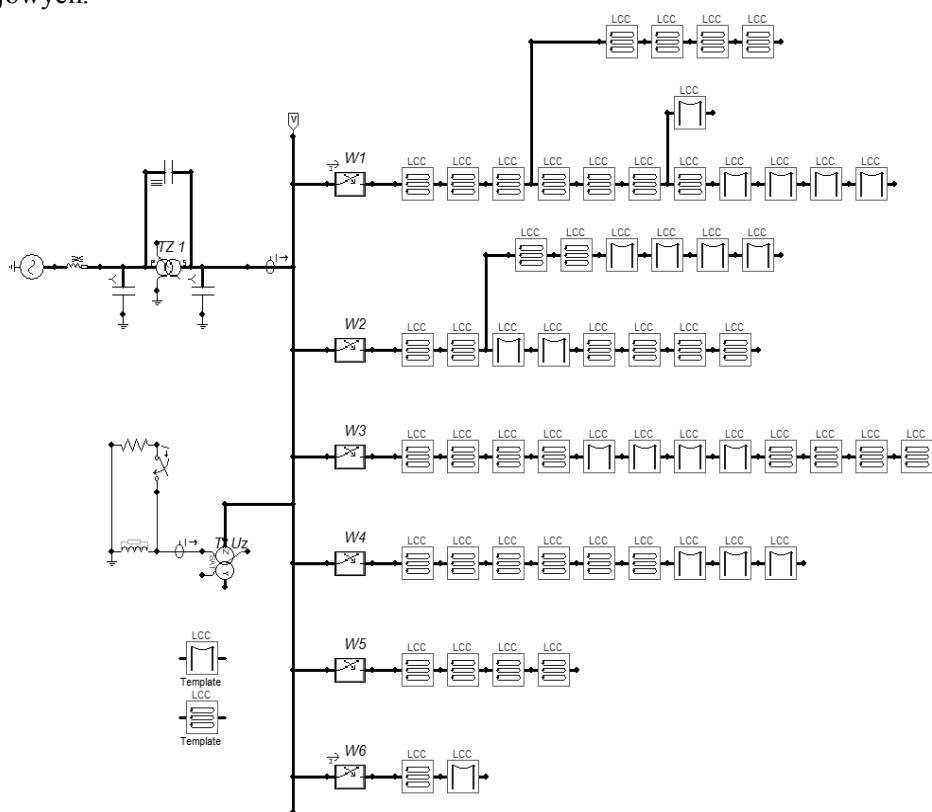
- napięcie znamionowe:  $U_N = 15$  kV,
- moc zwarciova na szynach 110 kV:  $S_k'' = 1,1$  MVA,
- punkt neutralny: uziemiony przez dławik gaszący z automatyką wymuszania składowej czynnej,
- transformator potrzeb własnych z grupą połączeń ZY,
- liczba linii odpływowych: 6,

Widok modelu sieci przedstawiony został na rysunku 1. Struktura i podstawowe parametry linii zostały zestawione w tabeli 2.1.

Tabela 2.1. Struktura i podstawowe parametry linii w badanej sieci

Numer linii	Numer wyłącznika	Typ linii	Pojemnościowy prąd zwarcia doziemnego $I_{CL}$ [A]
L_1	W1	kablowo – napowietrzna, rozgałęziona	25,9
L_2	W2	kablowo – napowietrzna, rozgałęziona	23,3
L_3	W3	kablowo – napowietrzna	20,7
L_4	W4	kablowo – napowietrzna	15,4
L_5	W5	kablowa	10,2
L_6	W6	kablowo – napowietrzna	2,6

Sumaryczny prąd pojemnościowy zamodelowanej sieci wynosi  $I_{CS} = 101,9$  A i jest to wartość typowa dla pojedynczej sekcji rozdzielni SN w warunkach krajowych.



Rys. 1. Struktura modelowanej sieci SN

Do badań wybrano sieć skompensowaną, natomiast reaktancję indukcyjną dławika w punkcie neutralnym sieci dobrano w ten sposób, aby współczynnik rozstrojenia kompensacji ziemnozwarciowej, wyznaczony z zależności:

$$s = 1 - \frac{1}{\omega^2 C_{0s} L_L} \quad (1)$$

był równy ok.  $s = 0,1$ , czyli aby sieć w normalnym stanie pracy była lekko prze-kompensowana. W zależności (1)  $C_{0s}$  to pojemność doziemna całej sieci,  $L_L$  – indukcyjność dławika kompensującego. Dobrany został także opornik automatyki AWSCz o takiej rezystancji, aby prąd wymuszony po załączeniu AW-SCz wynosił ok.  $I_{AWSCz} = 20$  A.

### 3. SKŁADOWA ZEROWA NAPIĘCIA

Przeanalizowana zostanie wartość składowej zerowej napięcia w różnych sytuacjach sieciowych, tzn. przy zwarciach w miejscu 2 linii L\_3 (patrz rys. 2) przy rezystancji przejścia z zakresu  $R_F \in \langle 0-2000 \rangle \Omega$ . W każdej sytuacji wykonywane będzie zwarcie L2–N.

Ogólnie składowa zerowa napięcia sieci może być zapisana w postaci zależności:

$$\underline{U}_0 = \underline{U}_{0z} + \underline{U}_{0asc} + \underline{U}_{0asg} \quad (2)$$

Wartość składowej zerowej może być zatem złożona z następujących elementów [3]:

- składowej zerowej napięcia pochodzącej od zwarcia doziemnego:

$$\underline{U}_{0z} = \frac{\underline{E}_L}{1 + R_F \omega C_{0s} (d_0 + js)} \quad (3)$$

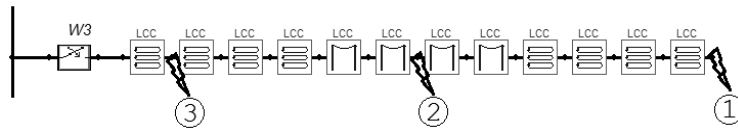
- składowej zerowej napięcia powstałej na skutek występowania naturalnej asymetrii pojemności doziemnej sieci, wynikającej m.in. z ułożenia przewodów linii napowietrznych:

$$\underline{U}_{0asc} = \frac{R_F j \omega C_{0s} \underline{U}_{asc}}{1 + R_F \omega C_{0s} (d_0 + js)} \quad (4)$$

- składowej zerowej napięcia powstałej na skutek występowania naturalnej asymetrii konduktancji doziemnych sieci:

$$\underline{U}_{0asg} = \frac{R_F G_{0s} \underline{U}_{asg}}{1 + R_F \omega C_{0s} (d_0 + js)} \quad (5)$$

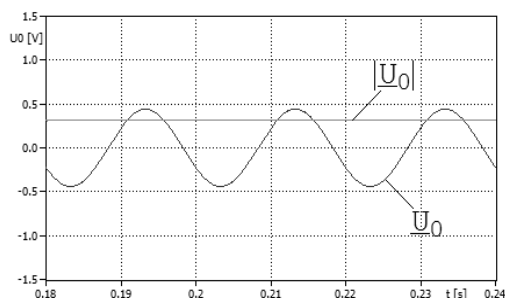
gdzie:  $\underline{E}_L$  – napięcie źródłowe fazy doziemionej,  $R_F$  – rezystancja przejścia w miejscu zwarcia,  $G_{0s}$  – konduktancja doziemna sieci,  $d_0$  – współczynnik tłumienia sieci (zależny od wartości prądu pojemnościowego sieci oraz prądu czynnego w miejscu zwarcia),  $s$  – współczynnik rozstrojenia kompensacji ziemnozwarciowej.



Rys. 2. Miejsca zwarcia w linii L\_3

Symulacja trwała  $t_{sym} = 2$  s, zwarcie było inicjowane w chwili  $T_{zw} = 0,3$  s, natomiast rezystor AWSCz załączany był w chwili  $T_{AWSCz} = 1,5$  s. Zwarcie zostaje wyłączone w chwili  $T_{wyl} = 2$  s.

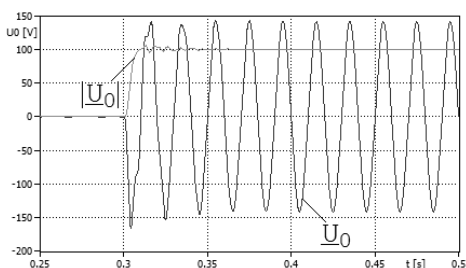
Rysunek 3 przedstawia sumę składowych zerowych napięcia pochodzących od asymetrii pojemnościowej oraz konduktancyjnej linii, czyli tzw. asymetrię naturalną sieci. Pomiar wykonany został po stronie wtórnej filtra składowej zerowej, gdzie napięcie znamionowe wynosi 100 V.



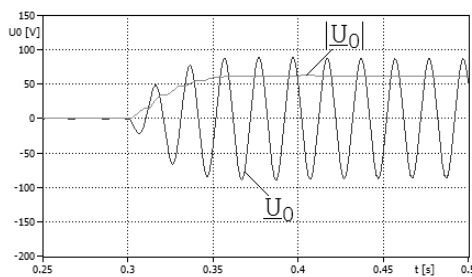
Rys. 3. Asymetria naturalna modelowanej sieci po stronie wtórnej filtra składowej zerowej napięcia

Rysunki 4–8 przedstawiają wartość chwilową oraz moduł składowej zerowej napięcia w chwili wystąpienia zwarcia doziemnego. Są to ważne z punktu widzenia działania zabezpieczeń wartości, ponieważ próg załączenia automatyki AWSCz ustawia się przeciętnie na kilka woltów. Poniżej tej wartości automatyka nie jest uruchamiana co w zasadzie uniemożliwia działanie jakiegokolwiek kryterium zabezpieczeniowego służącego do detekcji doziemień.

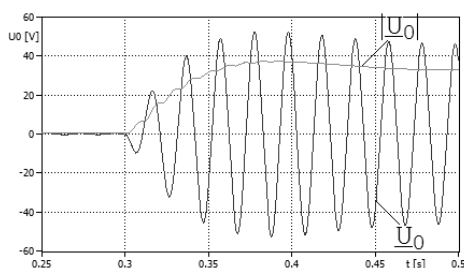
W przypadku zwarcia metalicznego, tzn. gdy  $R_F = 0$ , napięcie fazy doziemnej spada do 0 a napięcia fazowe faz zdrowych wzrasta do wartości napięcia międzyfazowego. Po stronie wtórnej filtra składowej zerowej obserwuje się jej napięcie znamionowe, czyli  $U_0 = 100$  V. Wraz ze wzrostem rezystancji przejścia  $R_F$  moduł składowej zerowej napięcia maleje, przy czym jego konkretne wartości w stanie ustalonym przedstawia rysunek 9.



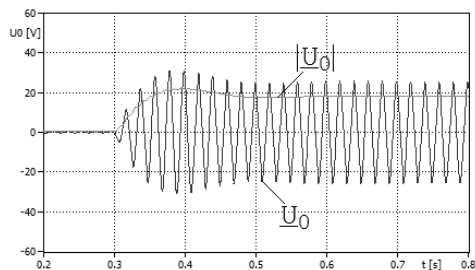
Rys. 4. Składowa zerowa w chwili wystąpienia doziemienia dla  $R_F = 0$



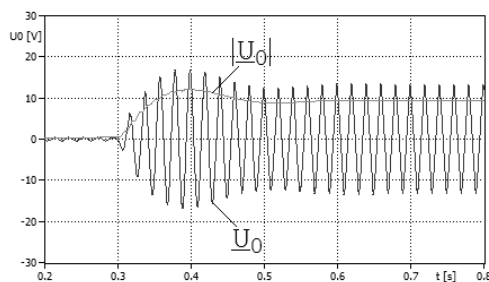
Rys. 5. Składowa zerowa w chwili wystąpienia doziemienia dla  $R_F = 200 \Omega$



Rys. 6. Składowa zerowa w chwili wystąpienia doziemienia dla  $R_F = 500 \Omega$

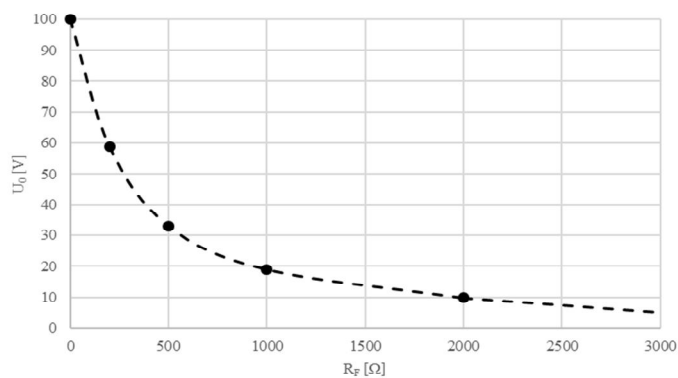


Rys. 7. Składowa zerowa w chwili wystąpienia doziemienia dla  $R_F = 1000 \Omega$

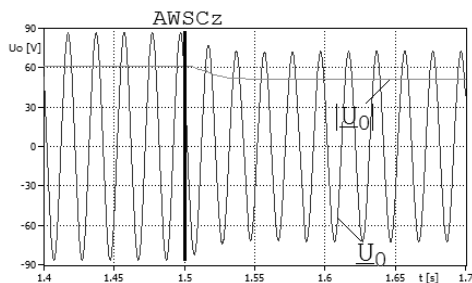


Rys. 8. Składowa zerowa w chwili wystąpienia doziemienia dla  $R_F = 2000 \Omega$

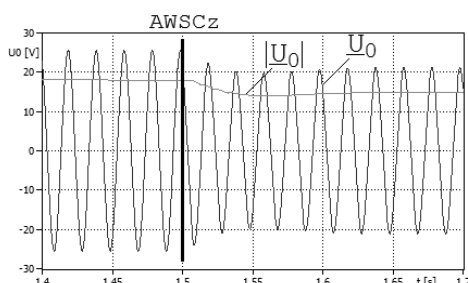
Otrzymane wartości składowych zerowych napięcia są zbliżone do wyników obliczeń przedstawianych w literaturze, np. [4]. Z punktu widzenia działania zabezpieczeń chroniących linie od skutków zwarć doziemnych istotne jest także pokazanie wpływu załączenia automatyki AWSCz na wartość składowej zerowej napięcia. Przykładowe przebiegi pokazują rysunki 10 oraz 11.



Rys. 9. Zależność modułu składowej zerowej napięcia od wartości rezystancji przejścia  $R_F$  dla badanej sieci



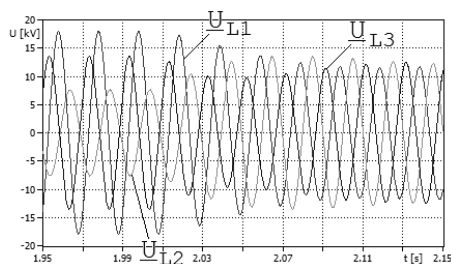
Rys. 10. Wpływ załączenia AWSCz na  $U_0$  przy  $R_F = 200 \Omega$



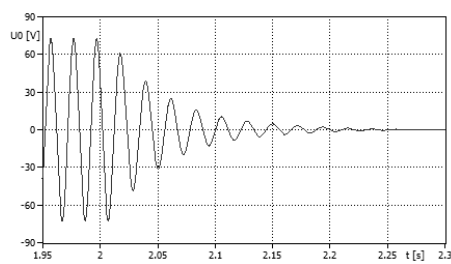
Rys. 11. Wpływ załączenia AWSCz na  $U_0$  przy  $R_F = 1000 \Omega$

W przypadku przedstawionym na rys. 10. po załączeniu automatyki AWSCz moduł składowej zerowej napięcia zmniejszył się z 61,3 V do 51,2 V, zatem o 10,1 V. W sytuacji zobrazowanej na rys. 12 przed załączeniem AWSCz moduł składowej zerowej napięcia wynosił 19,1 V, natomiast po zamknięciu łącznika AWSCz – 15 V. Załączenie rezystora powoduje zatem spadek modułu składowej zerowej napięcia o ok. 20%.

Z punktu widzenia poprawnej detekcji zakłóceń doziemnych w sieci SN, zwłaszcza takich o charakterze przerywanym, istotne znaczenie ma proces odbudowy napięć fazowych oraz zanikania składowej zerowej napięcia po ustaniu zjawisk zwarciovych. Opisywaną sytuację, przy założeniu  $R_F = 200 \Omega$  oraz zwarciu fazy L2, przedstawiają rysunki 12 oraz 13.



Rys. 12. Przebiegi chwilowe napięć fazowych po ustaniu zjawisk zwarciovych przy  $R_F = 200 \Omega$



Rys. 13. Zanikanie składowej zerowej napięcia po ustaniu zjawisk zwarciovych przy  $R_F = 200 \Omega$

Zanikanie składowej zerowej to proces, który dla modelowanej sieci trwa ok. 0,25 s a czas ten jest zależny od parametrów obwodu zwarciovego (pojemności i indukcyjności). Wszelkie zwarcia przerywane, których czas przerwy będzie mniejszy niż czas zanikania składowej zerowej, mają szansę być skutecznie wyeliminowane przez większość poprawnie nastawionych zabezpieczeń ziemnozwarciowych.

#### 4. SKŁADOWA ZEROWA PRĄDU

Analizując rozptyły prądu zwarcia z ziemią na poszczególne linie sieci średniego napięcia należy rozpatrywać dwa różne obwody elektryczne:

- linii doziemionej,
- linii zdrowej.

Rozptył prądu ziemnozwarciowego w postaci składowych zerowych prądów linii wyznaczonych na ich początku odbywa się zgodnie z równaniami:

$$\underline{I}_{0li} = -(\underline{U}_0 - \underline{U}_{asci})j\omega C_{0i} - (\underline{U}_0 - \underline{U}_{asgi})G_{0i} \quad (6)$$

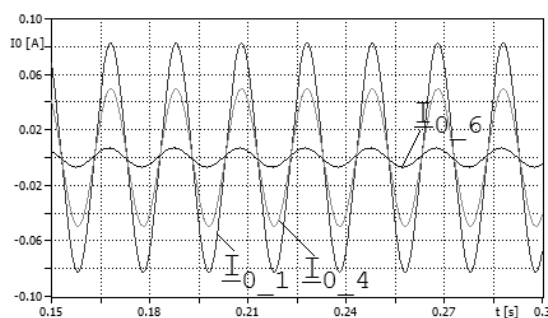
$$\underline{I}_{0d} = \underline{I}_K - \underline{I}_{0li} \quad (7)$$

gdzie  $\underline{I}_{0li}$  – składowa zerowa prądu w i-tej linii nieobjętej zwarcie, które wystąpiło w sieci,  $\underline{I}_{0d}$  – składowa zerowa prądu w linii doziemionej,  $C_{0i}$  – pojemność doziemna linii i-tej,  $G_{0i}$  – konduktancja doziemna linii i-tej,  $\underline{I}_K$  – całkowity prąd zwarcia [3].

Składowa zerowa prądu w linii podczas doziemienia jest zatem, podobnie jak składowa zerowa napięcia, powstaje na skutek różnych zjawisk:

- wystąpienia stanu zwarcia,
- oddziaływania wypadkowej doziemnej asymetrii pojemnościowej linii doziemionej,
- oddziaływania wypadkowej asymetrii pojemnościowej pozostałej części sieci (bez doziemienia).

Składową zerową prądu mierzoną na początku wybranych linii modelu w stanie bezzwarciowym (asymetria naturalna) przedstawia rysunek 14.



Rys. 14. Składowa zerowa prądu linii L\_1, L\_4 oraz L\_6 w stanie bezzwarciowym

Na potrzeby analizy wpływu miejsca wystąpienia doziemienia na wartość składowej zerowej prądu na początku linii wykorzystano linię L\_3. Zwarcia były wykonywane w punktach rozmieszczonych wzdłuż linii co 1 km.

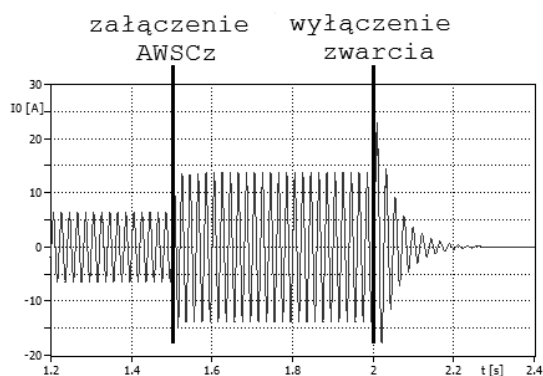
Linia 3 składa się z 12 segmentów, które odwzorowują odpowiednio:

- 4 odcinki kablowe, każdy o długości 1 km,



- 4 odcinki linii napowietrznej, każdy o długości 5 km,
- 4 odcinki kablowe, każdy o długości 1 km.

Prąd pojemnościowy całej linii  $I_{CL3} = 20,7$  A. Przebieg chwilowy składowej zerowej prądu, mierzonej na początku linii L\_3, przy zwarciu metalicznym typu L1–N na końcu linii przedstawia rysunek 15.



Rys. 15. Składowa zerowa prądu linii L\_3 przy zwarciu doziemnym metalicznym na końcu linii L\_3 w wybranych chwilach czasowych

Składowa zerowa prądu linii płynąca przed złazczeniem automatyki AWSCz jest niewielka. Wynika ona ze złozenia się dwóch prądów: prądu wywołanego przez doziemienie i mającego charakter pojemnościowy oraz prądu płynącego na skutek obecności dławika gaszącego w punkcie neutralnym. Zachowana jest jedna z zalet stosowania kompensacji – samoistne gaszenie zwarć łukowych.

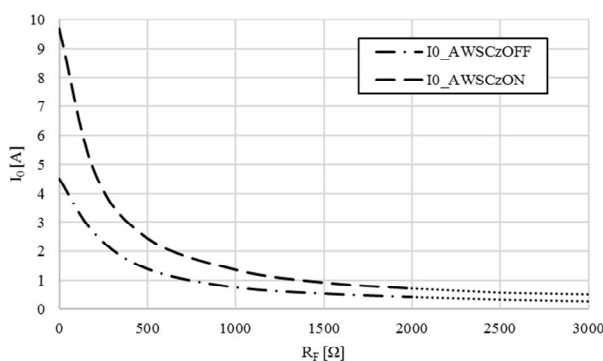
W analizowanym przypadku wartość skuteczna prądu zwarciego jest niższa od 5 A, natomiast prąd graniczny gaszenia łuku elektrycznego w rozpatrywanym przypadku wynosi  $I_{gran} = 30$  A [5]. Po złazczeniu AWSCz prąd zwarciego ulega istotnemu zwiększeniu na skutek zmiany impedancji obwodu zwarciego. Zjawisko to jest korzystne z punktu widzenia lokalizacji linii doziemionej i późniejszej eliminacji zakłócenia. Jeśli zwarcie zostanie wyłazczone to rozpoczyna się proces odbudowy napięcia a prąd zwarciego zaczyna oscylacyjnie zanikać.

Wartości skuteczne prądu zwarciego w stanie ustalonym przed i po złazczeniu automatyki AWSCz w przypadku zwarć na końcu linii L\_3 przy różnych  $R_F$  przedstawiono w tabeli 3.1. Dodatkowo podaje się wartość skuteczną składowej zerowej napięcia po stronie pierwotnej filtru składowej zerowej. Indeks AWSCzOFF to wartość skuteczna wielkości przed złazczeniem AWSCz, indeks AWSCzON – po tym fakcie.

Wybrane dane z tabeli 3.1. obrazuje rysunek 16. Linią kropkowaną przedstawiona została prognoza opisywanych wartości.

Tabela 3.1. Składowa zerowa prądu i napięcia przy zwarcu w linii L\_3

L.p.	$R_F$	$I_0$ AWSCzOFF	$I_0$ AWSCzON	$U_0$ AWSCzOFF <sup>P</sup>	$U_0$ AWSCzON <sup>P</sup>
	[ $\Omega$ ]	[A]	[A]	[V]	[V]
1.	0	4,52	9,70	8784	8767
2.	200	2,62	4,75	5047	4271
3.	500	1,38	2,46	2609	2197
4.	1000	0,75	1,36	1400	1193
5.	1500	0,53	0,93	951	816
6.	2000	0,41	0,72	719	619



Rys. 16. Wartości składowej zerowej prądu przed i po załączeniu AWSCz przy zwarcu w linii L\_3

W każdej sytuacji model zachowuje się poprawnie, tzn. wartość prądu  $I_0$  po załączeniu AWSCz ulega zwiększeniu, niezależnie od wartości rezystancji przejścia. Ułatwia to znacznie rozpoznanie linii doziemionej i ułatwia zdecydowanie pracę różnych typów zabezpieczeń.

#### 4. PODSUMOWANIE

Badania symulacyjne są obecnie jednym z głównych źródeł wiedzy o zachowaniu się złożonych systemów, nie tylko elektroenergetycznych, podczas występowania zakłóceń w ich pracy. Wybór środowisk do prowadzenia eksperymentów jest szeroki a otrzymywane wyniki – w zależności od oprogramowania – przeważnie do siebie zbieżne. W przypadku sieci średnich napięć popularnym jest ich modelowanie w środowisku EMTP/ATP, co także zostało uczynione na potrzeby niniejszej publikacji. Otrzymywane wyniki są zbieżne z otrzymywanymi przez innych badaczy [6].

Z uwagi na bardzo dużą zależność składowej zerowej napięcia od rezystancji przejścia w miejscu zwarcia, detekcja opisywanych zakłóceń metodami klasycz-

nymi, opartymi tylko na pomiarze  $U_0$  oraz  $I_0$ , jest możliwa tylko w wtedy, gdy  $R_F < 2 \text{ k}\Omega$ . Większe możliwości dają kryteria admitancyjne [3], które pozwalają wykrywać zwarcia doziemne o znacznie większym spektrum rezystancji przejścia.

W sieci skompensowanej prądy zwarć doziemnych są niewielkie, stąd konieczność stosowania dodatkowych układów ułatwiających wykrycie stanu zakłóceniewego.

### LITERATURA

- [1] Kujszczyk Sz. [red.]: Elektroenergetyczne sieci rozdzielcze. Tom 1. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2004 (in Polish)
- [2] Strona internetowa: <http://new.abb.com/medium-voltage/distribution-automation/misc/distribution-automation-handbook>. Distribution Automation Handbook. Chapter 8: MV Feeder Earth-fault protection. Dostęp: 3.01.2017
- [3] Lorenc J.: Admitancyjne zabezpieczenia ziemnozwarciowe. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2007 (in Polish)
- [4] Lorenc J., Andruszkiewicz J., Olejnik B., Staszak B., Balcerk P.: Earth fault detection and isolation system for MV network, 2015 Modern Electric Power Systems (MEPS), Wrocław 2015
- [5] Hoppel W., Lorenc J.: Możliwości poprawy jakości kompensacji ziemnozwarciowej w polskich sieciach SN. Automatyka Elektroenergetyczna nr 4/2011, ss. 5–10. (in Polish)
- [6] Nowak W., Moskwa Sz., Tarko R.: Problemy eksploatacji elektroenergetycznych sieci rozdzielczych średniego napięcia w aspekcie niezawodności elektroenergetycznej automatyki zabezpieczeniowej. Acta Energetica nr 1/2011, ss. 31–38. (in Polish)

### HIGH RESISTANCE EARTH FAULT PHENOMENA SIMULATION IN MV GRID

The article presents the results of simulation studies conducted in an ATP / EMTP. The analyzes relate to the phenomena that occur during high resistance earth fault in MV grid. The focus is primarily on the problem associated with the impact of the transition resistance at the fault location on the value of the zero sequence current in the selected place of medium voltage line. Also evaluated the value of the zero sequence voltage network from this type of faults. The analysis has been subjected to the process of rebuilding the network voltage after line re-switch. The analyzes presented in this article are related to the problem of the possibility of applying the new criteria for earth fault passage indicators.

*(Received: 27. 01. 2017, revised: 14. 02. 2017)*