

Józef LORENC*
Aleksandra SCHÖTT*
Bogdan STASZAK*

WSPOMAGANIE UKŁADÓW POMIAROWYCH PARAMETRÓW DOZIEMNYCH SIECI SN

W artykule przedstawiono stacjonarny układ MPZ (Miernik Parametrów Ziemnozwarciowych) do identyfikacji parametrów doziemnych linii w skompensowanych sieciach średniego napięcia. Pomiary w układach MPZ związane są z wprowadzaniem dodatkowej asymetrii napięciowej w punkcie neutralnym podczas normalnej pracy sieci. Źródła takiego dodatkowego napięcia może być wprowadzane do punktu neutralnego sieci w sposób równoległy do dławika kompensującego lub szeregowo z dławikiem. W referacie zamieszczono wyniki badań symulacyjnych i dokonano oceny skuteczności pomiarowej obu układów wprowadzania do sieci dodatkowych źródeł napięciowych. W badaniach wykorzystano powszechnie znane oprogramowanie PSCAD.

SŁOWA KLUCZOWE: zwarcia doziemne, sieci SN, asymetria napięciowa, pomiar parametrów doziemnych, zabezpieczenia ziemnozwarciowe

1. WPROWADZENIE

W polskich sieciach średniego napięcia dominują rozwiązania, w których stosuje się urządzenia do kompensacji pojemnościowego prądu ziemnozwarciowego. Do pomiaru parametrów doziemnych takich sieci coraz częściej stosuje się specjalistyczne układy MPZ (miernik parametrów ziemnozwarciowych), które opracowano w Instytucie Elektroenergetyki Politechniki Poznańskiej. Miernik MPZ działa w oparciu o metody, w których sygnały pomiarowe uzyskuje się po włączeniu w obwody doziemne sieci dodatkowego źródła energii [1].

Wyniki pomiarów wykonanych układem MPZ wykorzystywane są do wyznaczania parametrów sieci i oceny jakości kompensacji ziemnozwarciowej, a także w doborze wartości nastawczych urządzeń ziemnozwarciowej automatyki EAZ. Ponadto zasady działania mierników MPZ wykorzystuje się w algorytmach pomiarowych i sterujących podczas realizacji kompensacji ziemnozwarciowej z regulacją nadążną.

* Politechnika Poznańska.

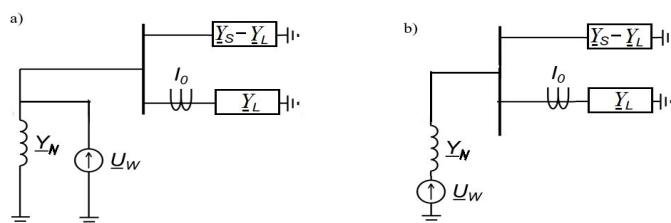
Autorzy podjęli próbę oceny wpływu sposobu wprowadzania dodatkowego źródła napięcia do sieci na dokładność wyznaczania jej parametrów obwodu doziemnego. W tym celu zaprojektowano za pomocą aplikacji EMTP kompensowaną sieć SN o parametrach przedstawionych w tabeli 1.

Tabela 1. Parametry modelowanej sieci SN

Parametr	Oznaczenie	Przyjęte wartości (lub zakresy)
Napięcie znamionowe	U_N	15 kV
Doziemny prąd pojemnościowy	I_{CS}	100 A
Prąd dławika kompensującego	I_L	80 ÷ 120 A
Współczynnik rozstrojenia Kompensacji ziemnozwarciowej	s	-20 ÷ 20%
Współczynnik tłumienności sieci	d_0	2 ÷ 5%
Współczynnik udziału linii w doziemnym prądzie pojemnościowym sieci	a	5 ÷ 40%
Asymetria naturalna sieci	U_{0as}	0 V

Wykorzystanie urządzeń MPZ i powodowanie w sieci asymetrii o napięciu na poziomie mniejszym od niż 10 % napięcia fazowego daje szereg możliwości wyznaczania parametrów doziemnych całej sieci oraz poszczególnych ciągów liniowych.

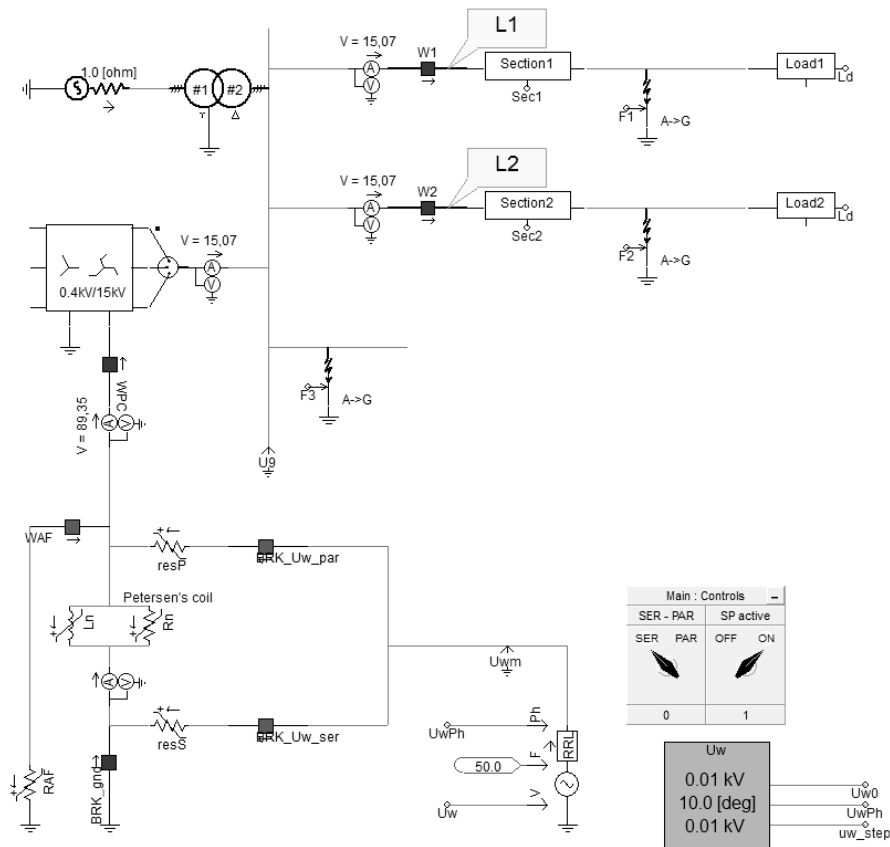
Wprowadzenie dodatkowego napięcia do sieci najlepiej jest zrealizować w jej punkcie neutralnym, który fizycznie jest dostępny w uzwojeniu napięcia SN transformatora potrzeb własnych (często nazywany jako transformator uziemiający). Na rys. 1 pokazano dwa sposoby włączania takiego dodatkowego źródła.



Rys. 1. Schematy włączania dodatkowego źródła napięciowego U_w do punktu neutralnego kompensowanej sieci SN: a) – układ równoległy, b) układ szeregowy. Przyjęto, że: Y_N – to admityncja dławika kompensującego, Y_S – admityncja doziemna całej sieci, Y_L – admityncja doziemna linii, I_0 – składowa zerowa prądu

Zmiany mierzonej admityncji doziemnej sieci Y_S oraz admityncji doziemnej linii Y_L po wprowadzaniu napięcia U_w mogą być obserwowane za pomocą różnych wielkości charakteryzujących obwody doziemne. Przykładowo mogą to być: składowa zerowa prądu linii I_0 , składowa zerowa napięcia siecią U_0 , kon-

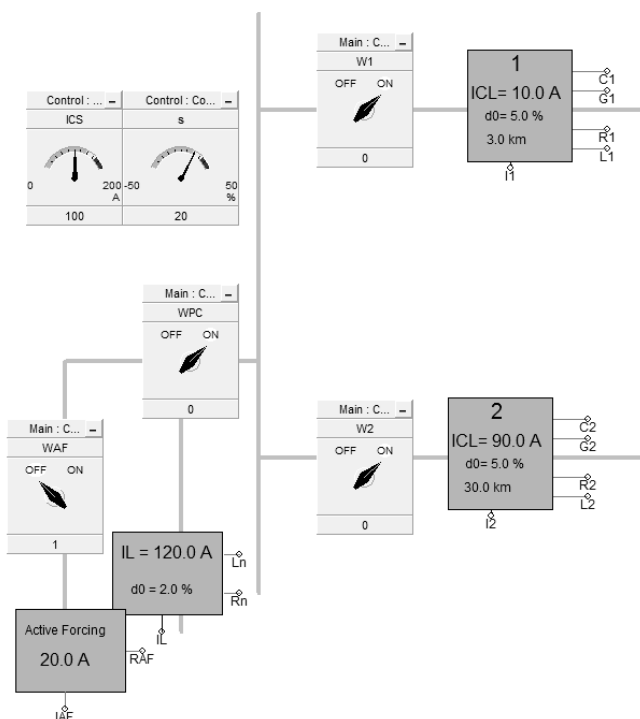
duktancja obwodu dla składowej zerowej G_0 , pojemność doziemna linii lub sieci, admitancja Y_0 lub relacje między tymi wielkościami. Wykonany w środowisku PSCAD [2] model badanej sieci SN z układami wprowadzania dodatkowego źródła przedstawiono na rysunkach 2 i 3. Do szyn rozdzielni SN przyłączono 2 linie zamodelowane za pomocą złożonych komponentów *Sectionx*, uwzględniających parametry poprzeczne (pojemność i konduktancję) oraz wzdłużne (rezystancja i reaktancja). Uziemienie punktu neutralnego zostało wykonane przez dławik przyłączony do punktu gwiazdowego transformatora uziemiającego, zamodelowanego za pomocą specjalnie przygotowanego komponentu.



Rys. 2. Schemat sieci SN zamodelowanej za pomocą aplikacji PSCAD

Całość uzupełniono o komponenty umożliwiające pomiar składowych zerowych napięcia (na szynach) i prądu (w poszczególnych polach rozdzielni), elementy modelujące testowe zwarcia doziemne w wybranych punktach sieci oraz układy sterowania stanami łączników.

W dolnej części schematu pokazanego na rys. 2 umieszczono elementy ułatwiające modelowanie układów równoległego i szeregowego wymuszania asymetrii napięciowej w punkcie neutralnym sieci. Istnieje możliwość zadawania poziomu napięcia wymuszania U_w , a komponenty $resP$ i $resS$ odwzorowują rezystancję wewnętrzną źródła. Przedstawiona na rys. 2 konfiguracja wyłączników odpowiada stanowi pracy sieci bez dodatkowego wymuszania. W zależności od stanu przełącznika $SER-PAR$, po uruchomieniu symulacji nastąpi szeregowe lub równoległe wymuszenie dodatkowego sygnału i rejestracja wybranych sygnałów dla potrzeb dalszej analizy.



Rys. 3. Moduł określania parametrów badanej sieci

Określanie parametrów badanej sieci wykonywane jest za pomocą modułu przedstawionego na rys. 3. Dla linii L1 określono wstępnie wartość doziemnego prądu pojemnościowego I_{CL} równą 10 A, natomiast linia L2 (o wartości I_{CL} równej 90 A) jest reprezentacją pozostałej części sieci. Wartości te są weryfikowane w trybie testowym symulacji dla zamodelowanego metalicznego zwarcia doziemnego [3].

Współczynnik rozstrojenia kompensacji ziemnozwarciowej s jest wyznaczany po określeniu wartości prądu dławika I_L .

2. WYNIKI BADAŃ SYMULACYJNYCH

2.1. Sposób prowadzenia badań

Korzystając ze schematów przedstawionych na rysunkach 1 i 2, składową zerową napięcia można wyznaczyć z następujących zależności:

– dla układu równoległego

$$\underline{U}_0 = \underline{U}_w \frac{1}{1 + R_w \omega C_{0s} (d_0 + js)} \quad (1)$$

– dla układu szeregowego

$$\underline{U}_0 = \frac{\underline{U}_w}{\omega C_{0s} (d_0 + js)} \quad (2)$$

Po wprowadzeniu zależności na współczynnik kompensacji K , który definiowany jest zależnością:

$$K = \frac{1}{\omega^2 L_N C_{0s}} \quad (3)$$

wzór 2 można zapisać w postaci:

$$\underline{U}_0 = \frac{\underline{U}_w}{(jd_0 - s)} K \quad (4)$$

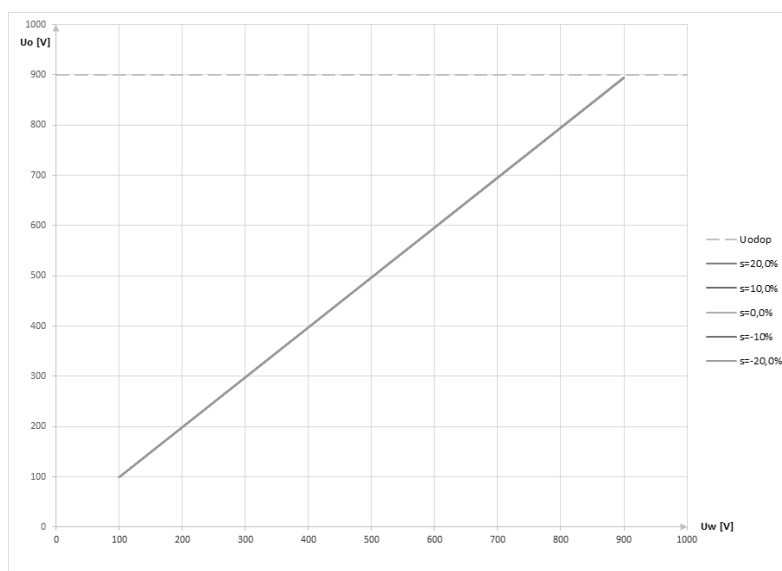
W powyższych wzorach: ω – pulsacja sieci, L_N – indukcyjność dławika kompensującego, C_{0s} – pojemność doziemna całej sieci SN.

Napięcie U_0 , które pojawia się w sieci po wprowadzeniu źródła napięciowego U_w wymusza prądy doziemne w poszczególnych liniach oraz w dławiku kompensacyjnym. W układzie połączenia źródła U_w szeregowo z dławikiem pominięto wpływ rezystancji wewnętrznej źródła ($R_w = 0$), natomiast przyjęto, że rezystancja wewnętrzna źródła napięciowego U_w , pracującego w układzie wymuszania równoległego, przyjmuje wartości R_w od 10 Ω do 100 Ω .

Zadaniem badań symulacyjnych była ocena dokładności wyznaczania parametrów doziemnych sieci podczas stosowania obu sposobów wymuszania. W pierwszej kolejności badano poziom składowej zerowej napięcia oraz prądów doziemnych w liniach w zależności od napięcia U_w i współczynnika rozstrojenia kompensacji ziemnozwarciowej s . Następnie określano zgodność wyznaczanych parametrów doziemnych z wartościami zamodelowanymi i dokonywano oceny poziomu tej zgodności. Wyniki takich badań przedstawiono oddzielnie dla układu wymuszania równoległego oraz wymuszania szeregowego.

2.2. Wyniki dla układu równoległego

Na rys. 4 przedstawiono graficznie zmiany napięcia U_0 podczas włączania źródła o napięciach w zakresie od 100 V do 900 V i rezystancji wewnętrznej na poziomie 10 Ω . W badaniach stwierdzono, że dla przyjętych parametrów sieci i relatywnie małej wartości R_w napięcie U_0 praktycznie nie zależy od wartości współczynnika rozstrojenia kompensacji ziemnozwarciowej, jeżeli mieści się on w zakresie zmian $-0,2$ do $0,2$. Kreskowana linia na rys 4. oznacza wartość dopuszczalnego napięcia U_{0dop} odpowiadającą poziomowi 10% napięcia fazowego.

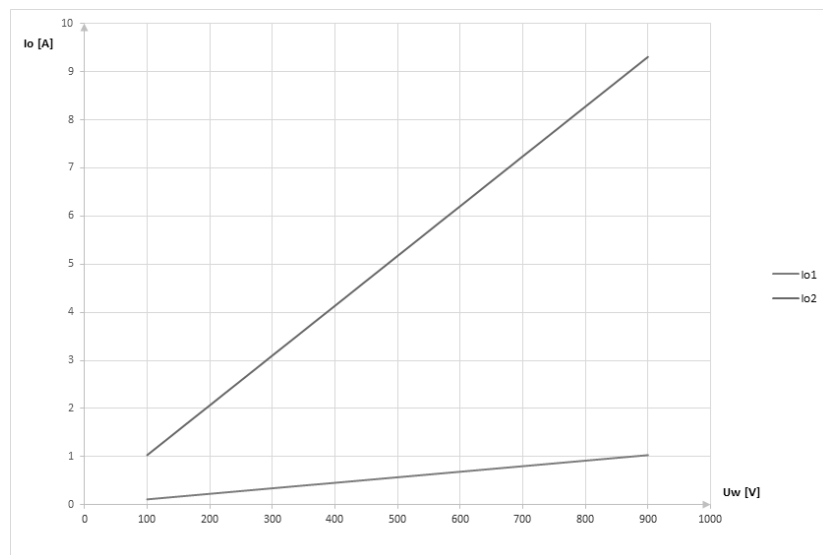


Rys. 4. Zależność $U_0 = f(U_w)$ dla równoległego połączenia źródła wymuszenia

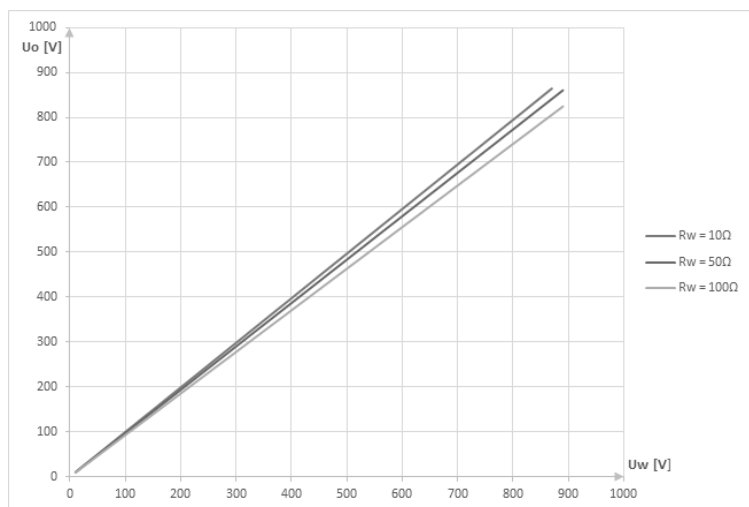
Podobną charakterystykę mają przebiegi prądu w obwodach doziemnych obu zamodelowanych linii. Na rys. 5 wartości prądu I_{02} zmierzonego w linii L2 dla różnych wartości współczynnika s są reprezentowane przez krzywą położoną wyżej.

Wpływ większych wartości rezystancji R_w na wartość składowej zerowej napięcia U_0 , pojawiającej się w punkcie neutralnym sieci w wyniku włączenia napięcia U_w pokazano na rys. 6.

Zmienność napięcia U_0 od R_w wymusza podobne i proporcjonalne zmiany w prądach doziemnych poszczególnych linii. Taka proporcjonalność zmian napięcia U_0 i prądów I_0 powoduje, że wyznaczone admitancje doziemne w obu badanych liniach są niezależne od napięcia U_w i przyjmują stałe wartości wynikające przede wszystkim z pojemności doziemnych tych linii. Pokazano to na rys. 7.

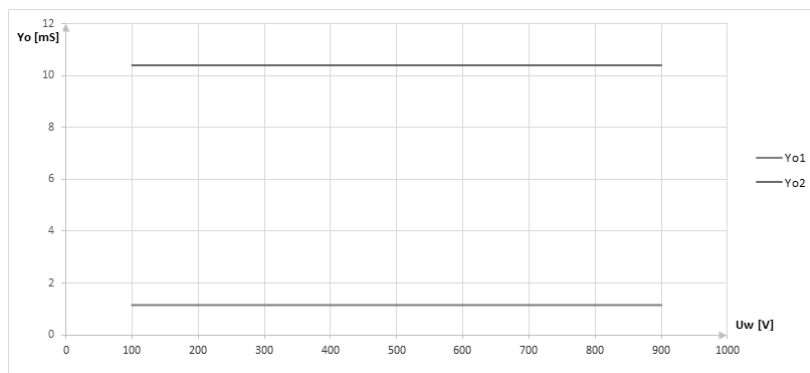


Rys. 5. Zależność $I_{01} = f(U_w)$ oraz $I_{02} = f(U_w)$ dla równoległego połączenia źródła wymuszenia

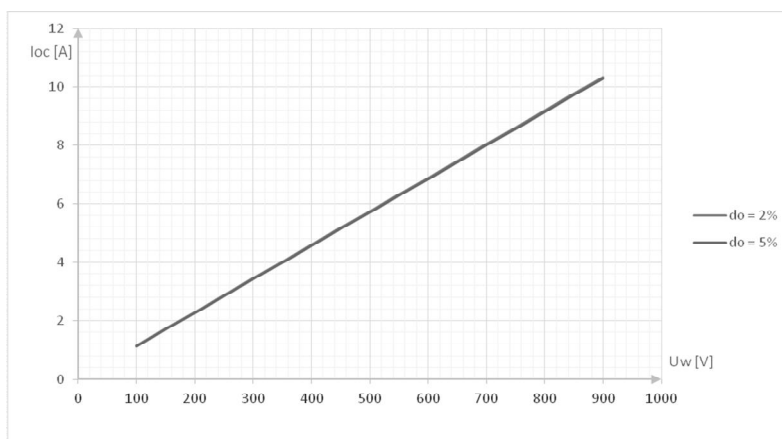


Rys. 6. Zależność $U_0 = f(U_w)$ dla równoległego połączenia źródła wymuszenia dla przekompensowanej sieci ($s = 20\%$) i dla 3 wartości rezystancji wewnętrznej źródła R_w

W badaniach nie stwierdzono istotnej zależności pomiędzy napięciem U_0 lub prądem I_0 a konduktancją doziemną. Pokazano to na rys. 8, przyjmując dwie wartości współczynnika $d_0 = 2\%$ i $d_0 = 5\%$. Są to wartości graniczne dla zakresu znanego z praktyki eksploatacyjnej sieci SN.



Rys. 7. Porównanie zależności $Y_{01} = f(U_w)$ oraz $Y_{02} = f(U_w)$ dla równoległego połączenia źródła wymuszenia

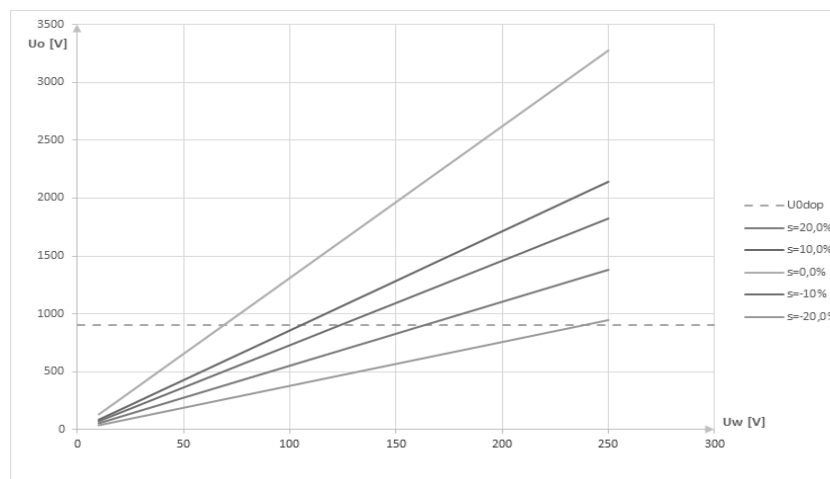


Rys. 8. Zależność zmierzonej składowej zerowej prądu sieci $I_{0c} = f(U_w)$ przy wymuszaniu równoległym w sieci kompensowanej o wartości współczynnika $s = 10\%$ dla dwóch wartości d_0

2.3. Wyniki dla układu szeregowego

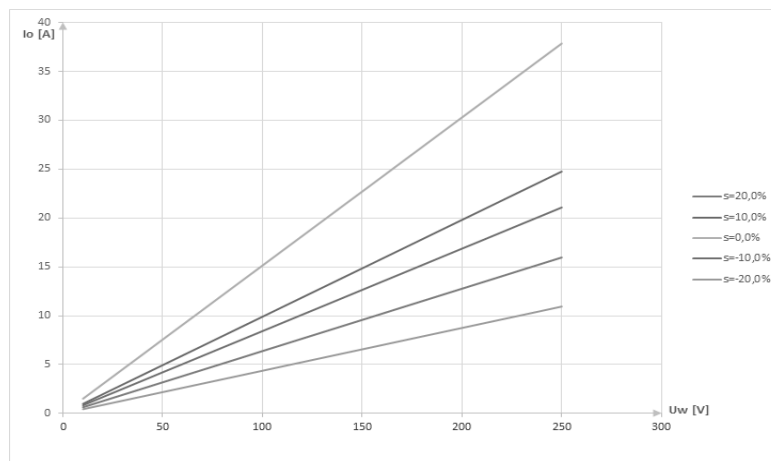
Dla osiągnięcia podobnego poziomu asymetrii napięciowej, jak przy wymuszaniu równoległym należy zastosować niższe wartości napięcia wymuszenia. W badaniach wykorzystano zakres $10 \div 250$ V. Zauważono zależność napięcia U_0 nie tylko od wartości napięcia wymuszenia U_w , ale także od wartości współczynnika rozstrojenia kompensacji ziemnozwarciowej. Na rys. 9 oznaczono również poziom dopuszczalnego napięcia U_{0dop} , odpowiadający 10% napięcia fazowego. Wymuszanie szeregowe w przeciwieństwie do układów z wymuszaniem równoległym wymaga dokładnej kontroli wartości napięcia U_w . W przeprowadzonych badaniach przy sieci mocno skompensowanej napięcie wymu-

szania nie może przekroczyć wartości 70 V, przy większym rozstrojeniu kompensacji sieci można użyć wyższej wartości napięcia wymuszania.



Rys. 9. Zależność $U_o = f(U_w)$ dla szeregowego połączenia źródła wymuszania

Podobne zależności od zmian napięcia U_w w układzie wymuszania szeregowego występują również dla składowych zerowych prądów zmierzonych dla całej sieci i poszczególnych linii oraz dla prądu dławika I_L . Przykład takiej relacji przedstawiono na rys. 10.

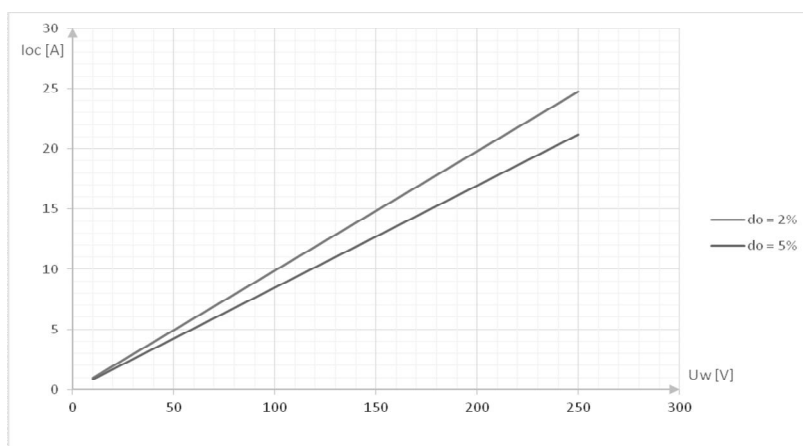


Rys. 10. Zależność $I_{0e} = f(U_w)$ dla szeregowego połączenia źródła wymuszania

W układzie wymuszania szeregowego, inaczej niż w przypadku układu równoległego, pojawia się niekorzystne zjawisko oddziaływania konduktancji do-

ziemnej (tłumienności sieci) na wartości rejestrowanych prądów w liniach. Stopień tego oddziaływania pokazano to na rys. 11 przyjmując takie same, jak w układzie wymuszania równoległego, wartości współczynnika d_0 .

W niniejszym artykule przedstawiono tylko wybrane wyniki badań dotyczących pomiarów parametrów doziemnych sieci SN z wykorzystaniem dwóch sposobów wprowadzania dodatkowego źródła napięcia. Wszystkie uzyskane z badań informacje umożliwiały ocenę zdolności i ograniczeń pomiarowych opisywanych układów i ich wpływ na poprawność wyznaczania wartości nastawczych i dobór zabezpieczeń ziemnozwarciowych [4, 5, 6] oraz właściwą ocenę kompensacji ziemnozwarciowej.



Rys. 11. Zależność zmierzonej składowej zerowej prądu sieci $I_{0c} = f(U_w)$ przy wymuszaniu szeregowym w sieci o wartości współczynnika $s = 10\%$ dla dwóch wartościach d_0

3. WNIOSKI I PODSUMOWANIE

Jednym z celów przeprowadzonych badań było porównanie właściwości dwóch sposobów wymuszania dodatkowego napięcia w punkcie neutralnym sieci. Z analiz zamieszczonych w rozdziale drugim wynika, że napięcie wymuszania w układzie szeregowym musi być ograniczone poziomem dopuszczalnych napięć rezonansowych, a to powoduje obniżenie wartości sygnałów pomiarowych. Niskie wartości tych sygnałów mogą utrudnić osiągnięcie wymaganej dokładności pomiarowej. Ponadto w układzie szeregowym wartości sygnałów pomiarowych uzależnione są nie tylko od napięcia wymuszania, ale i od współczynnika rozstrojenia kompensacji ziemnozwarciowej s . W związku z tym wyznaczanie wartości współczynnika s w układzie szeregowym narażone jest na określone błędy, których poziom jest różny w zależności od aktualnych parametrów sieci i dławika. Układ szeregowego wymuszania jest też układem trudniejszym

w realizacji technicznej i przy jego stosowaniu mogą wystąpić wyraźne przebiegi w obwodach doziemnych sieci.

Przeprowadzone badania wskazały dostatecznie wyraźnie, że stosowanie w stacjonarnych miernikach typu MPZ układów z wymuszaniem równoległym jest korzystniejsze ze względu na stopień trudności rozwiązań technicznych oraz na dokładność pomiarową. Potwierdzają zasadność dotychczasowych rozwiązań stosowanych w praktyce [7, 8].

LITERATURA

- [1] Lorenc J.: Admitancyjne zabezpieczenia ziemnozwarciowe, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2007 (in Polish).
- [2] PSCAD Electromagnetic Transients, User's guide, Manitoba HVDC Research Centre Inc., 2005.
- [3] Lorenc J., Staszak B.: Modelowanie zjawisk wywołujących asymetrię napięć doziemnych w sieciach SN, Poznan University of Technology Academic Journals. Electrical Engineering, Poznań 2016 (in Polish).
- [4] Synal B.: Zjawiska ziemnozwarciowe w sieciach z małym prądem zwarcia doziemnego, Problematyka zabezpieczeniowa, Prace Instytutu Energoelektryki Politechniki Wrocławskiej, Monografia, Wrocław 1974 (in Polish).
- [5] Winkler W., Wiszniewski A.: Automatyka zabezpieczeniowa w systemach elektroenergetycznych, WNT, Warszawa 2004 (in Polish).
- [6] Żydanowicz J.: Elektroenergetyczna Automatyka Zabezpieczeniowa, tom 2, WNT, Warszawa 1985 (in Polish).
- [7] Lorenc J., Staszak B., Handke J.: Określenie doziemnych prądów pojemnościowych sieci SN za pomocą miernika MPZ, XVI Ogólnopolska Konferencja 2013: Zabezpieczenia Przekaznikowe w Energetyce, Licheń Stary 2013 (in Polish).
- [8] Dawidowski P., Krakowski M., Balcerek P., Lorenc J., Staszak B.: Pomiar parametrów sieci SN na podstawie wprowadzonej asymetrii napięcia w punkcie neutralnym, Materiały seminarium: Automatyka elektroenergetyczna inteligentnych sieci rozdzielczych, Łódź 2016 (in Polish).

SUPPORT OF MEASUREMENT OF EARTH FAULT PARAMETERS IN MV NETWORK

Measurement of fault parameters in MV network is often difficult, because of low level of voltage and current zero sequence components during earth fault. Results of analysis carried by a MV network model implemented in EMTP application, related to new solution, which inducts additional generated signal forcing in neutral point, in this paper are presented.

(Received: 28. 02. 2017, revised: 6. 03. 2017)