

Krzysztof ŁOWCZOWSKI*

SYMULACJA ZJAWISK ZIEMNOZWARCIOWYCH W SIECI SN UZIEMIONEJ PRZEZ UKŁAD RÓWNOLEGŁY

W artykule przedstawiono różne sposoby pracy punktu neutralnego, a także opisano parametry mające istotny wpływ na przebiegi ziemnozwarciowe oraz prąd zwarcia płynący w sieci podczas zwarcia. Przedstawiono wyniki symulacji z programu PSCAD oraz model wykorzystany do przeprowadzenia badań.

SŁOWA KLUCZOWE: zwarcia doziemne, przebiegi ziemnozwarciowe, PSCAD, punkt neutralny.

1. WPROWADZENIE

1.1. Sposoby pracy punktu neutralnego w sieciach SN

Sposób pracy punktu neutralnego ma duży wpływ na działanie całej sieci dystrybucyjnej zasilanej przez stacje 110/SN. W polskich sieciach dystrybucyjnych stosuje się następujące sposoby pracy punktu neutralnego: uziemienie przez rezystor, dławik, układ równoległy oraz punkt neutralny izolowany [1].

Sposób pracy punktu neutralnego często wynika z zaszczości historycznych i dlatego w poszczególnych krajach można spotkać różne rozwiązania. W Finlandii popularny jest izolowany punkt neutralny, z kolei w USA gdzie sieć jest 4-przewodowa powszechnie stosowane jest uziemienie bezpośrednie [2, 3]. Ponadto do punktu neutralnego przyłącza się układy energoelektroniczne, których zadaniem jest dokładna kompensacja prądu zwarciego [4].

W Niemczech popularne jest uziemienie punktu neutralnego przez cewkę Petersena [5]. Rozwiązanie to jest sukcesywnie wprowadzane w wielu krajach w tym w Polsce, ponieważ dławik kompensuje pojemnościowy prąd zwarciego co w wielu przypadkach prowadzi do wygaszenia łuku i w konsekwencji ogranicza konieczność wyłączania linii napowietrznych lub ciągów kablowo-napowietrznych. Oczywiście korzyścią, jest więc, poprawa niezawodności działania sieci. Uziemienie przez dławik wiąże się z pojawieniem się dużej wartości napięcia zgodnie z krzywą rezonansową długą odbudową napięcia po wystąpie-

* Politechnika Poznańska

niu zwarcia. W celu ograniczenia negatywnego wpływu wymienionych zjawisk równolegle do dławika dołącza się rezystor, co ogranicza napięcie asymetrii naturalnej [6].

1.2. Zjawiska ziemnozwarciowe

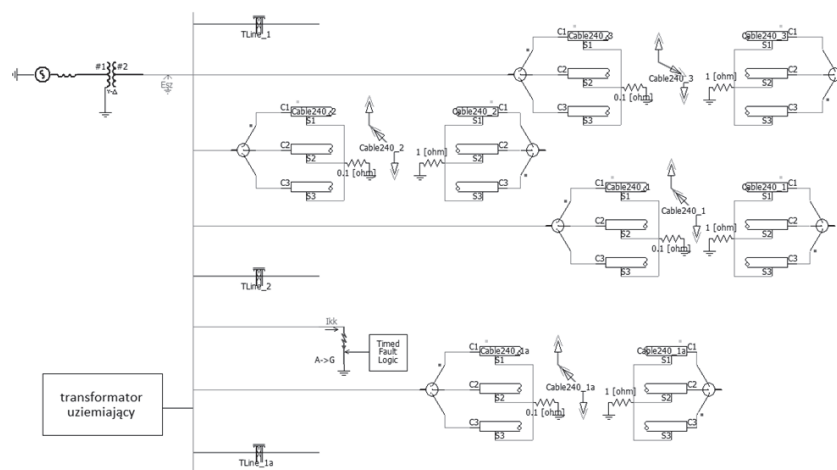
Znaczna część awarii kabli SN jest spowodowanych przepięciami sieciowymi. Do przepięć sieciowych zalicza się m. in. przepięcia ziemnozwarciowe. Szczególnie niebezpieczne są zwarcia przerywane ponieważ na skutek efektu kumulacyjnego następuje obniżenie wytrzymałości izolacji (o 10 - 20%) [7]. Przepięcia ziemnozwarciowe towarzyszące zwarciom 1f mogą doprowadzić do wystąpienia szczególnie niekorzystnego zwarcia – zwarcia 2 fazowego z ziemią podczas, którego prąd zwarcia osiąga dużą, niebezpieczną wartość [8]. Prąd zwarcia jest niekorzystny ponieważ ze wzrostem amplitudy prądu zwarcia rośnie zagrożenie porażeniowe oraz ryzyko uszkodzenia elementów sieci elektroenergetycznej. Ryzyko porażenia jest związane ze spadkiem napięcia w miejscu doziemienia. W celu ograniczenia spadku napięcia i związanej z tym różnicy potencjałów wywołujących prąd rażeniowy rezystancje uziemienia w sieci dystrybucyjnej muszą mieć możliwie małe wartości [9].

2. SYMULACJE W PROGRAMIE PSCAD

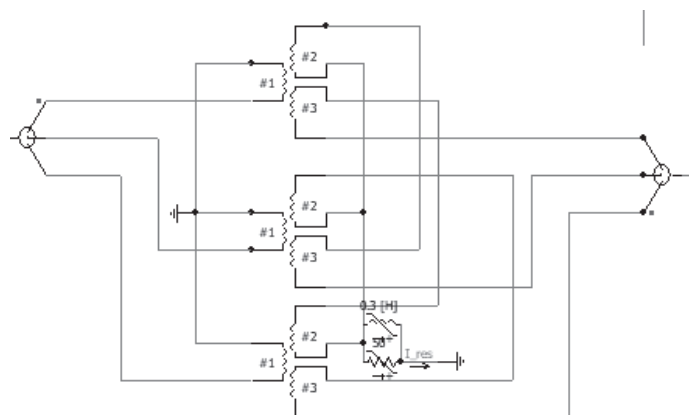
2.1 Uproszczony model sieci

Celem artykułu jest zbadanie wpływu wartości rezystancji rezystora przyłączonego równolegle z dławikiem do punktu neutralnego. W celu identyfikacji parametrów charakterystycznych dla zwarcia doziemnego w sieci SN zbudowano model w programie PSCAD. Model sieci został przedstawiony na rys. 1. Model składa się z transformatora 110/15, transformatora uziemiającego oraz linii kablowych i napowietrznych o sumarycznym prądzie pojemnościowym 100 A.

Typowym transformatorem uziemiającym w polskich sieciach dystrybucyjnych jest transformator o uzwojeniach ZNyn [10]. Ze względu na brak transformatora ZNyn w bibliotece programu transformator zbudowano poprzez połączenie 3 trójuzwojonych transformatorów 1 fazowych – rys. 2.



Rys. 1. Model sieci testowej

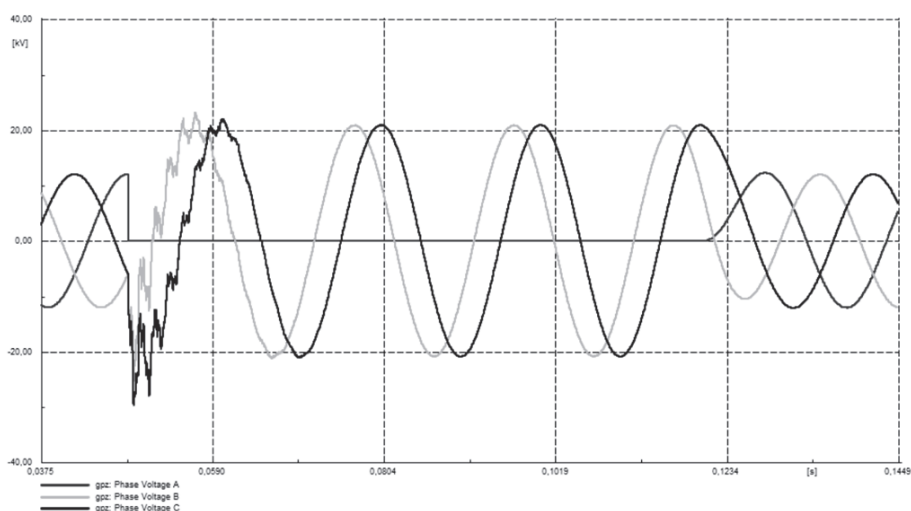


Rys. 2. Transformator uziemiający

Zwarcie na szynach jest najgorszym przypadkiem zwarcia w sieci SN ponieważ impedancja pętli zwarcia jest wtedy najmniejsza, w związku z czym prąd zwarcia osiąga największą wartość, czemu towarzyszą również największe przepięcia ziemnozwarciowe. Przepięcia osiągają większą wartość ze wzrostem odległości od stacji 110/SN.

Do symulowania zwarć wykorzystano komponent z biblioteki Faults programu PSCAD i wybrano moment wystąpienia zwarcia cechujący się największymi przepięciami. Proces został zautomatyzowany dzięki wykorzystaniu możliwości programowania symulacji w języku python [11].

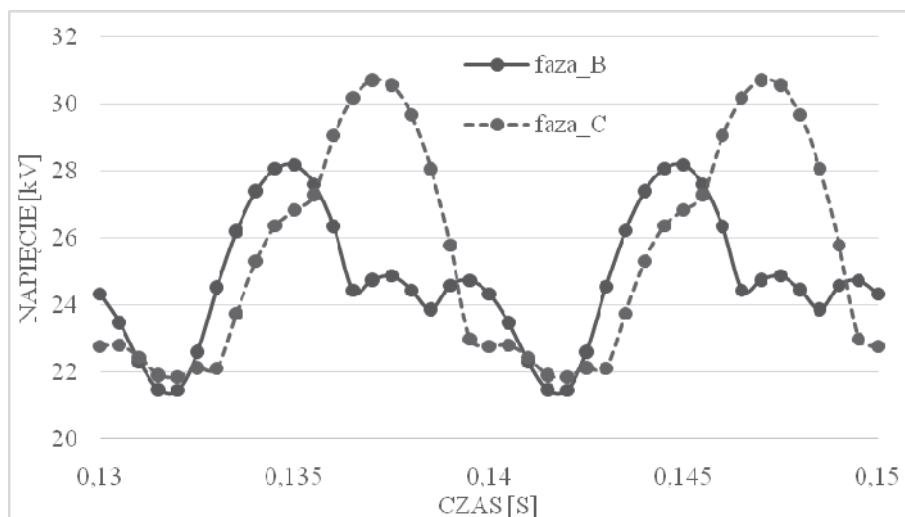
2.1 Wybrane wyniki badań symulacyjnych



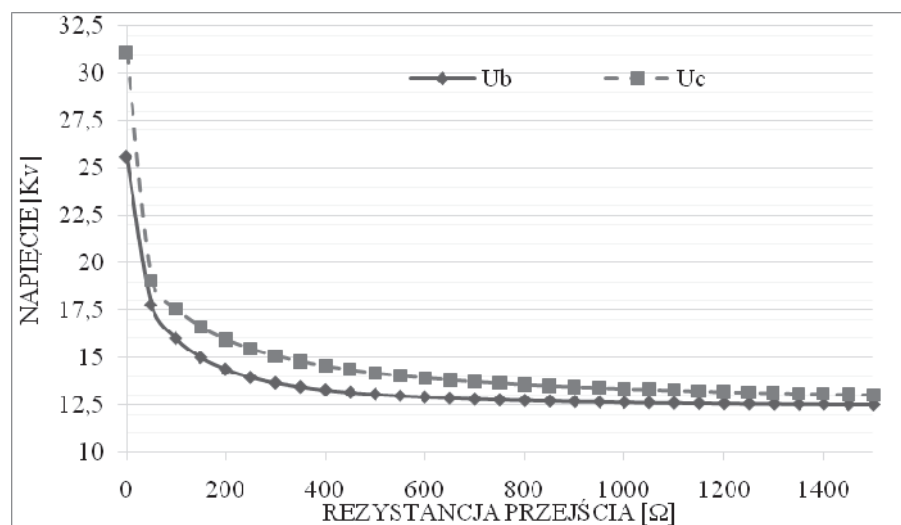
Rys. 3. Przebieg napięcia podczas zwarcia doziemnego dla równoległego połączenia dławika – 85 Ω i rezystora 200 Ω (przebieg wygenerowano w programie PowerFactory 2018)

Przykładowy przebieg napięcia podczas zwarcia przedstawiono na rys. 3. Jak można zauważyć wartość szczytowa przepięcia występuje w momencie wystąpienia zwarcia, po czym przepięcie szybko osiąga stan ustalony. Po usunięciu zwarcia napięcie bardzo szybko wraca do parametrów znamionowych, co jest zaletą układu równoległego.

Wpływ momentu wystąpienia zwarcia na wartość szczytową przepięcia na szynach rozdzielni przedstawiono na rys. 4. Jak można zaobserwować moment zapłonu ma bardzo duży wpływ na wartość szczytową napięcia podczas zwarcia doziemnego. W celu oszacowania skutków przepięć ziemnozwarciowych w konkretnej stacji 110/SN można posłużyć się narzędziami statystycznymi [12].



Rys. 4. Wpływ momentu wystąpienia zwarcia na wartość szczytową przepięcia

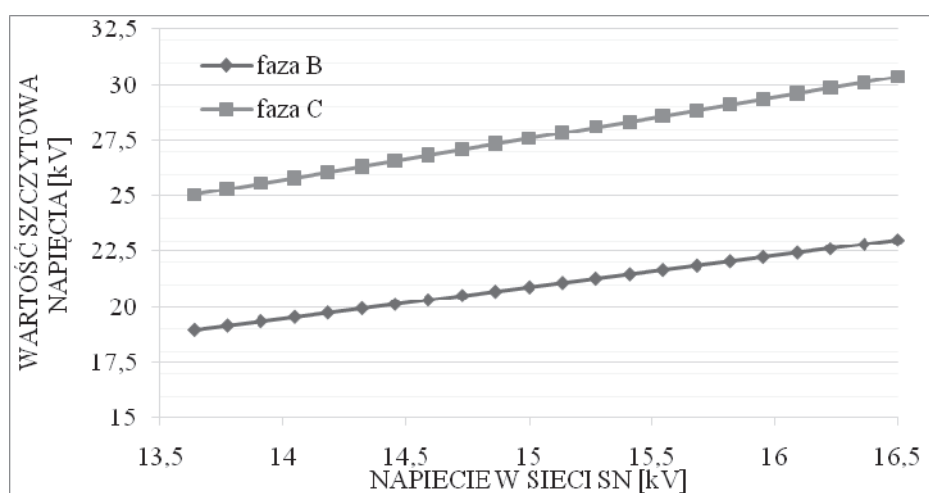


Rys. 5. Wpływ rezystancji przejścia na wartość szczytową przepięcia

Na kolejnym rysunku (rys. 5) przedstawiono wpływ rezystancji przejścia na wartość szczytową przepięć. Jak można zauważyć przepięcia są silnie tłumione ze wzrostem rezystancji przejścia – R_p . Ponadto R_p znacząco ogranicza prąd zwarcia. Wzrost R_p powoduje ograniczenie naprężeń termicznych oraz elektrycznych. Należy jednak podkreślić, że wzrost rezystancji przejścia powoduje, że powoduje pogorszenie warunków pracy zabezpieczeń ziemnozwarciowych.

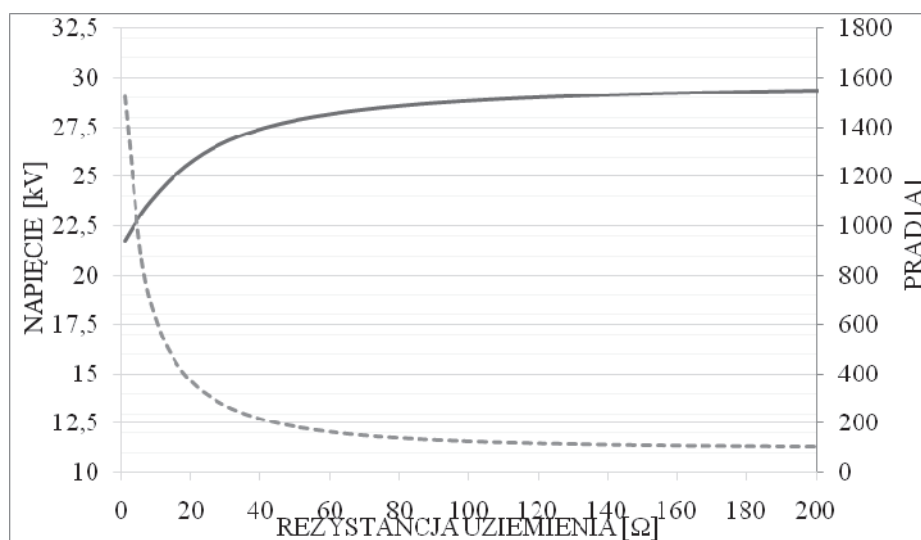
Przyjmuje się, że największa wykrywalna rezystancja przejścia wynosi kilka $k\Omega$, przykładowo w sieci skompensowanej maksymalna wykrywalna rezystancja przejścia to około $4 k\Omega$ [13].

Wartość szczytowa przepięć zależy od poziomu napięcia w sieci SN. Jak można zaobserwować na rys. 6 obniżenie poziomu napięcia w sieci SN prowadzi do zmniejszania wartości szczytowej przepięć ziemnozwarciowych, z kolei wzrost poziomu napięcia powoduje wzrost wartości szczytowej przepięć ziemnozwarciowych.



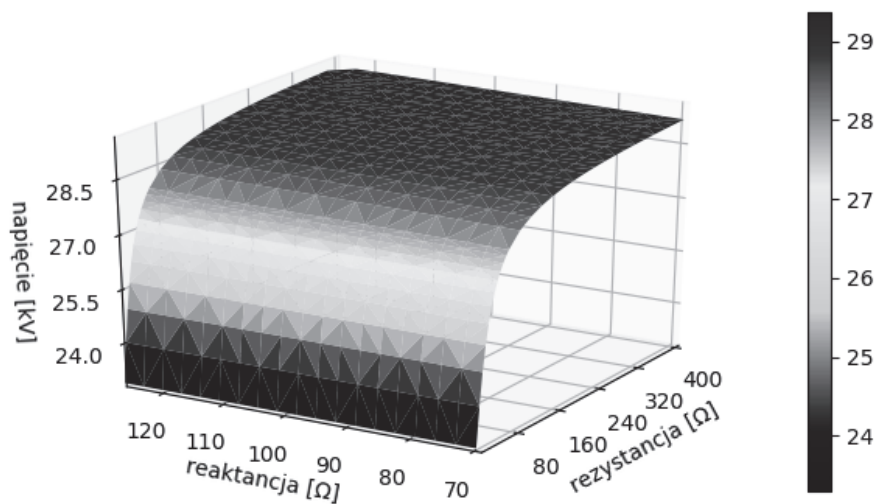
Rys. 6. Wpływ poziomu napięcia w sieci SN na wartość szczytową przepięć

Impedancja przyłączona do punktu neutralnego ma duży wpływ na wartości prądów i napięć podczas zwarć doziemnych. Rys. 7 przedstawia maksymalną wartość szczytową przepięć oraz ustalony prąd zwarcia w fazie, w której wystąpiło zwarcie. Jak można zauważyć duże zmiany w zakresie szczytowej wartości przepięć obserwuje się w zakresie rezystancji do około 40Ω . Dalsze zwiększenie wartości rezystancji ma ograniczony wpływ na wymienione parametry.

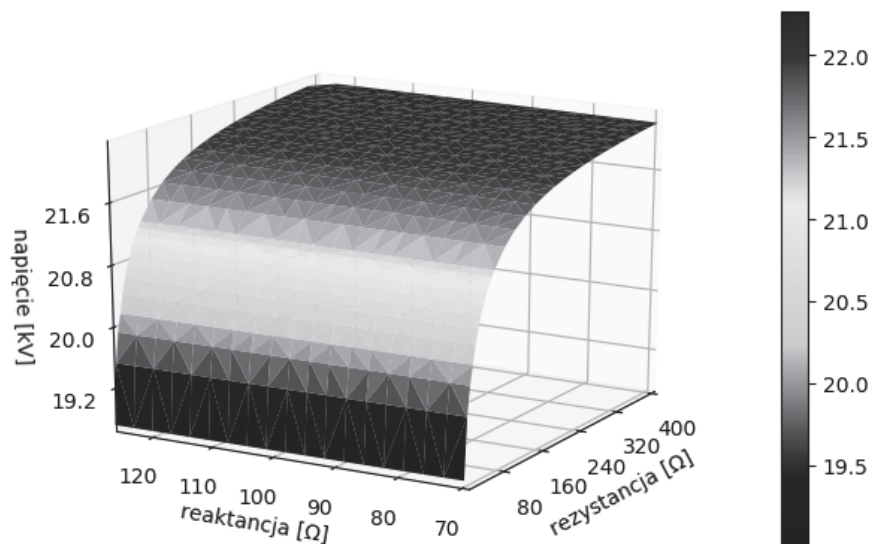


Rys. 7. Wpływ rezystancji na prąd (linia przerywana) oraz przepięcia ziemnozwarciowe (linia ciągła)

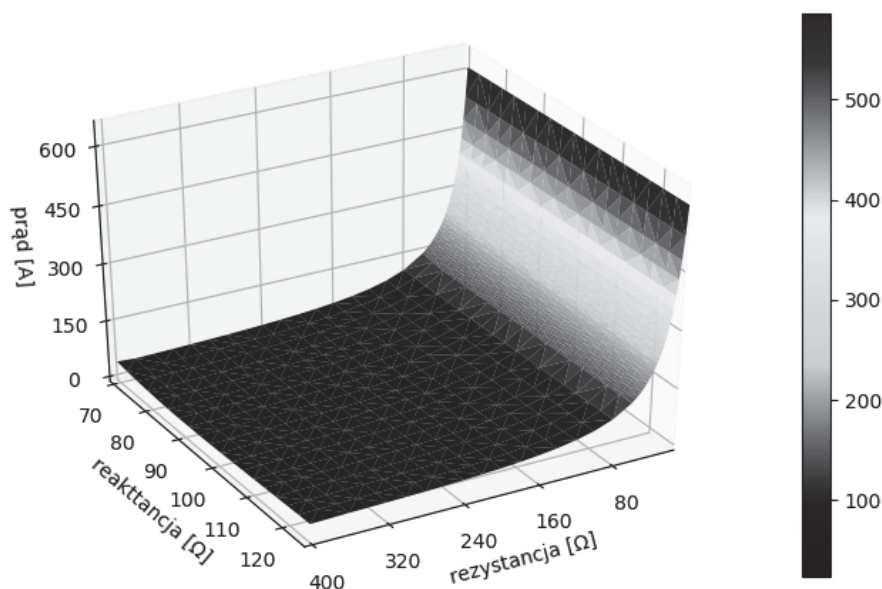
Na rys. 8 przedstawiono wpływ rezystancji i reaktancji przyłączonych równolegle do punktu neutralnego. Jak można zauważyć wartość szczytowa przepięć zależy przede wszystkim od rezystancji. Niezależnie od wartości reaktancji dławika rezystancja włączona równolegle może skutecznie ograniczać przepięcia. Im mniejsza wartość rezystancji tym mniejsza jest wartość szczytowa przepięć. Dla badanego zakresu reaktancja tylko w minimalnym stopniu wpływa na wartość szczytową przepięć ziemnozwarciowych. Można zaobserwować, że ze wzrostem reaktancji wartość szczytowa przepięć rośnie. Rys. 9 przedstawia taką samą zależność dla 2 fazy nieuczestniczącej w zwarcie – fazy B. Jak można zaobserwować wartość szczytowa przepięć jest o kilka kV mniejsza niż dla fazy C przedstawionej na rys. 8.



Rys. 8. Wpływ rezystancji i reaktancji włączonych równoległe między punktem neutralnym, a ziemią na wartość szczytową przepięcia ziemnozwarciowego w fazie C podczas zwarcia w fazie A



Rys. 9. Wpływ rezystancji i reaktancji włączonych równoległe między punktem neutralnym, a ziemią na wartość szczytową przepięcia ziemnozwarciowego w fazie B podczas zwarcia w fazie A



Rys. 10. Wpływ rezystancji i reaktancji włączonych równoległe między punktem neutralnym, a ziemią na wartość skuteczną prądu ziemnozwarciowego

Rys. 10 przedstawia wpływ rezystancji i reaktancji punktu neutralnego na prąd zwarcia w fazie A. Jak można zaobserwować dla badanego zakresu parametrów kluczowy wpływ na prąd zwarcia ma wartość rezystancji. Prąd zwarcia może być skutecznie ograniczony poprzez odpowiedni dobór rezystancji, niestety ograniczanie prądu wiąże się ze wzrostem wartości szczytowej przepięć. W celu dobrania odpowiednich parametrów konieczne jest uwzględnienie parametrów sieci np. długości linii. Układ równoległy pozwala na dostosowanie parametrów ziemnozwarciowych do warunków pracy sieci.

3. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

W artykule wykazano, że sposób pracy punktu neutralnego ma bardzo istotny wpływ na prace sieci elektroenergetycznej. Przedstawione zależności są podstawą do prawidłowego doboru sposobu pracy punktu neutralnego. Zwrócono uwagę, że w przypadku równoległego połączenia kluczowy wpływ na wartość prądu zwarcia doziemnego oraz wartość szczytową przepięć ma wartość rezystancji.

W celu optymalnego doboru należy określić wagi poszczególnych parametrów dla konkretnej sieci elektroenergetycznej, do czego konieczna jest znajomość struktury sieci np. długości i rodzaju linii elektroenergetycznych zainsta-

lowanych w GPZ, sumarycznej wartości prądu pojemnościowego sieci, a także statystyk na temat awaryjności poszczególnych linii i urządzeń.

Układ równoległy pozwala na sterowanie przepięciami ziemnozwarciowymi oraz prądem, co pozwala na dostosowanie parametrów punktu neutralnego do konkretnej stacji elektroenergetycznej. Zasadniczą wadą układu równoległego jest brak możliwości gaszenia zwarć, co jednak nie ma znaczenia w sieciach złożonych wyłącznie z linii kablowych.

LITERATURA

- [1] Lorenc J., Admitancyjne zabezpieczenia ziemnozwarciowe dla sieci średnich napięć, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, 2008.
- [2] Masa A. V., Maun J.-C., Werben S., Characterization of High Impedance Faults in Solidly Grounded Distribution Networks, 17th Power Systems Computation Conference, Stockholm, 2011.
- [3] Hänninen S., Single phase earth faults in high impedance grounded networks Characteristics, indication and location, Technical Research Centre of Finland, 2001.
- [4] Swedish Neutral, Ground Fault Neutralizer, Catalogue, 2018.
- [5] Schossig W., 100 Jahre Petersenspule, ETG-Fachbericht, 2017.
- [6] Andruszkiewicz J., Lorenc J., Staszak B., Kompensacja nadążna pojemnościowych prądów ziemnozwarciowych w sieciach SN, Konferencja SEP - Stacje Elektroenergetyczne, 2016.
- [7] Skomudek W., Analiza i ocena skutków przepięć w elektroenergetycznych sieciach średniego i wysokiego napięcia, Politechnika Opolska, 2008.
- [8] Hansen J. Z., Results from Danish failure statistics for medium voltage XLPE, 22nd International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIRED), 2013.
- [9] Colella P., Napoli R., Pons E., Tommasini R., Barresi A., Cafaro G., Simone A. D., Silvestre M. L. D., Martirano L., Montegiglio P., Morozova E. R., Parise G., Parise L., Sanse E. R., Currents Distribution During a Fault in an MV Network: Methods and Measurements, IEEE Transactions on Industry Applications, 2016.
- [10] Fabryka Transformatorów w Żychlinie, Transformatory Uziemiające Olejowe z Regulacją Napięcia w Stanie Beznapięciowym 100-4000 kVA, Katalog producenta, 2018.
- [11] Python Software Foundation, What's New In Python 3.7, 1 2018. [Online]. Available: <https://docs.python.org/3.7/whatsnew/3.7.html>
- [12] Shirkovets A., Vasilyeva A., Telegin A., Sarin L., Transient Processes at Single Phase-to-Ground Faults in Combined Grounded Networks, Proceedings of the 2011 3rd International Youth Conference on Energetics, 2011.
- [13] Andruszkiewicz J., Lorenc J., Staszak B., Wykrywanie Zwarć Wysokooporowych w skompensowanych sieciach SN, Przegląd Naukowo-Metodyczny, Edukacja dla bezpieczeństwa, Numer 1, Część 6, ISSN: 1899-3524, 2016.

**SIMULATION OF AN EARTH FAULT PHENOMENON
IN MEDIUM VOLTAGE NETWORKS**

Paper present different neutral point treatment. Moreover chosen parameters and relations, which have impact on zero-sequence current and transient overvoltage are presented. Simulation model and results are shortly described

(Received: 30.01.2018, revised: 09.03.2018)

