

## Ograniczanie skutków oddziaływania pojemnościowej asymetrii doziemnej w kompensowanych sieciach SN

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono możliwości ograniczenia skutków oddziaływań asymetrii doziemnej w kompensowanych sieciach SN poprzez ograniczenie zjawisk napięć rezonansowych. Zwiększenie konduktancji obwodu ziemnozwarciowego sieci znacząco wpływa na ograniczenie przepięć rezonansowych sieci SN, co zapewnia poprawę współczynników SAIDI i SAIFI określających jakość i pewność zasilania.

**Abstract.** The article presents the possibilities of limiting the effects of earth asymmetry in compensated MV networks by limiting the phenomena of resonance voltages. Increasing the conductance of the network's earth-fault circuit significantly reduces the resonant overvoltages of the MV network, which improves the SAIDI and SAIFI coefficients determining the quality and reliability of the power supply. (Limiting the effects of capacitive earth asymmetry in compensated MV networks).

**Słowa kluczowe:** asymetria sieci SN, cewka Petersena, kompensacja ziemnozwarciowa, ograniczenie skutków asymetrii sieci SN.

**Keywords:** MV network asymmetry, Petersen coil, earth fault compensation, limiting the effects of MV network asymmetry.

### Wprowadzenie

Z rejestrowanych wszystkich zakłóceń występujących w sieciach SN wynika, że około 70% to zwarcia doziemne. Znaczna ich liczba to zwarcia nietrwale, którym towarzyszy łuk elektryczny podtrzymywany napięciem sieci. Zakłócenia takie dość łatwo ulegają samoistnemu wygaszeniu w sieciach, w których punkt neutralny uziemiony jest cewką Petersena. Jak podkreślają raporty różnych krajów (np. Słowenia, Finlandia [1, 2]), efekt ten jest zauważalny podczas strojenia tej cewki w sposób nadążny i dokładny. Wtedy uzyskuje się wyraźną poprawę wskaźników pewności zasilania (SAIDI, SAIFI, MAIFI) oraz zmniejszenie poziomu zagrożenia w miejscu doziemienia.

Ze względu na zjawisko naturalnej asymetrii pojemności doziemnej sieci i możliwości wystąpienia przepięć rezonansowych, dokładna kompensacja nie zawsze jest możliwa. Maleje wtedy skuteczność gaszenia zwarć łukowych i pogorszone zostają warunki pracy zabezpieczeń ziemnozwarciowych.

Poniżej przedstawiono możliwości techniczne, które w relatywnie prosty sposób rozwiązują takie problemy.

### Skutki rozstrojenia kompensacji ziemnozwarciowej.

Asymetria pojemności doziemnych poszczególnych faz w sieci kompensowanych powoduje trwałą asymetrię napięć fazowych względem ziemi. Jest to efekt pojawienia się w sieci napięcia składowej zerowej, której wartości wynikają z zależności:

$$(1) \quad U_0 = \left| \frac{(G_{0S} + G_d) U_{ASG} + j\omega C_{0S} U_{ASC}}{\omega C_{0S} (d_0 + js)} \right|$$

$$(2) \quad d_0 = \frac{G_{0S} + G_d}{\omega C_{0S}}$$

$$(3) \quad s = 1 - \frac{1}{\omega^2 C_{0S} L_d}$$

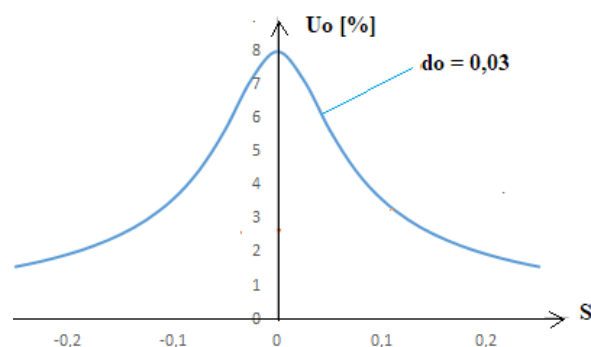
gdzie:  $U_0$  – napięcie wywołane naturalną asymetrią doziemioną pojemności sieci,  $U_{ASG}$  – napięcie wywołane naturalną asymetrią doziemnej konduktancji sieci,  $G_{0S}$  – konduktancja doziemna sieci,  $G_d$  – konduktancja cewki Petersena,  $C_{0S}$  – pojemność doziemna sieci,  $L_d$  – indukcyjność cewki Petersena,  $\omega$  – pulsacja,  $s$  – współczynnik rozstrojenia

kompensacji,  $d_0$  – współczynnik tłumienia obwodu doziemnego.

Ze względu na fakt, że  $\omega C_{0S} \gg (G_{0S} + G_d)$  wzór (1) upraszcza się do postaci:

$$(4) \quad U_0 = \frac{U_{ASC}}{\sqrt{d_0^2 + s^2}}$$

Z powyższego wzoru wynika, że poziom napięcia  $U_0$  silnie zależy od stopnia zestrojenia kompensacji ziemnozwarciowej i dla typowych wartości współczynnika  $d_0 = 0,025 - 0,04$  oraz pełnym dostrojeniu cewki Petersena ( $s = 0$ ) w sieci 15 kV, w której występuje relatywnie mała asymetria, o wartości  $U_{ASC} = 20$  V ( $U_{ASC} = 0,23$  % napięcia fazowego), może osiągać wartości od 400 V do 800 V. Pokazano to na rysunku 1.



Rys.1. Krzywe wartości napięcia składowej zerowej sieci  $U_0$  w sieci kompensowanej z asymetrią doziemną na poziomie 0,23% w zależności od stopnia rozstrojenia kompensacji

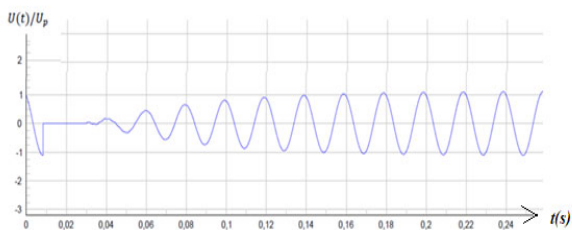
W sieciach kompensowanych z wyraźnym udziałem linii napowietrznych poziom napięcia  $U_{ASC}$  często przekracza 30 V powodując zagrożenia wzrostem napięcia  $U_0$  do wartości ponad 10% napięcia fazowego.

Dla ograniczenia tych napięć zalecana jest kompensacja ziemnozwarciowa ze znacznym rozstrojeniem, nierzadko współczynnik  $s$  przyjmuje wtedy wartości 0,2 lub większe. Jednak takie wymuszone działania znacząco wpływają na:

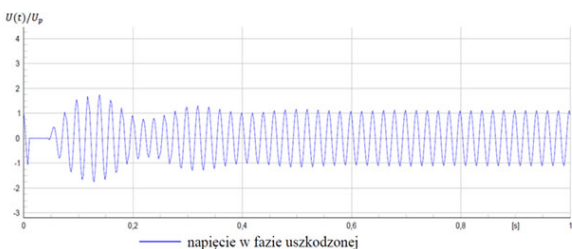
- zmniejszenie zdolności cewki Petersena do wygaszania zwarć, którym towarzyszy łuk elektryczny,
- tworzenie warunków do wystąpienia ponownych zapłonów w miejscu zakłócenia.

Poza tym trwałe rozstrajanie kompensacji nie likwiduje możliwości wystąpienia chwilowych wzrostów napięć rezonansowych. W sytuacji kompensacji nadążnej zachodzą przypadki, w których uzyskanie pożądanego stanu kompensacji wymaga przejścia regulowanej reaktancji dławika przez punkt pełnego rezonansu.

Kompensowanie pojemnościowego prądu zwarcia doziemnego w sieciach SN ułatwia realizację ochrony przeciwporażeniowej oraz umożliwia samoistne wygaszanie łuku elektrycznego w miejscu zakłócenia. Skuteczność tego wygaszania zależy silnie od przebiegu procesu odbudowy napięcia fazy po zaniku doziemienia [3, 4, 5]. Na rysunku 2 i rysunku 3 przedstawiono przebiegi obwodowy napięcia w fazie, w której wystąpił zanik zwarcia z ziemią.



Rys.2. Przebieg napięcia fazy uszkodzonej po zaniku zwarcia w sieci skompensowanej ( $s = 0,05$ ) i współczynnika tłumienia  $d_0 = 0,04$

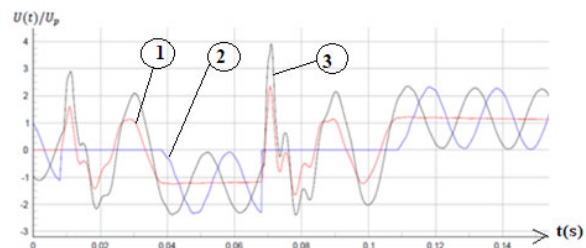


Rys.3. Przebieg napięcia fazy uszkodzonej sieci SN po zaniku doziemienia w sieci z rozstrojoną kompensacją ( $s = -0,2$ ) i naturalnej tłumienności  $d_0 = 0,04$

Łatwo zauważyć, że w przypadku dokładniejszej kompensacji (rys.2) napięcie fazy wzrasta relatywnie wolno ułatwiając szybką odbudowę izolacji w miejscu przerwane-go prądu doziemienia. Inaczej jest, gdy sieć pracowała z wyraźnym rozstrojeniem kompensacji ziemnozwarciowej (rys.3). Wtedy szybka odbudowa napięcia oraz wystąpienie w nim zjawiska dudnienia może tworzyć warunki do ponownych zapłonów, którym mogą towarzyszyć przepięcia większe niż podczas zakłócenia pierwotnego. Potwierdzeniem takich zdarzeń są wyniki badań symulacyjnych zamieszczonych w [6], w których wykazano, że w sieciach ze znacznie rozstrojoną kompensacją ziemnozwarciową wielokrotne zapłony zwarć doziemnych generują przepięcia zbliżone do wartości przepięć w sieci o izolowanym punkcie neutralnym. Jak pokazano na rysunku 4 współczynnik przepięć wywołanych ponownym zapłonem łuku może osiągać wartości zbliżone do 4.

Zjawisko napięć rezonansowych wywołanych napięciem  $U_{ASC}$  niekorzystnie wpływa również na warunki pracy zabezpieczeń ziemnozwarciowych o rozruchu napięciowym [7, 8]. Wartości nastawcze takiego członu rozruchowego muszą uwzględniać poziom napięcia rezonansowego wyznaczanego wzorem (4). W polskiej praktyce eksploatacyj-

nej najczęściej przyjmuje się nastawy od 12% do 15% napięcia fazowego sieci. Powoduje to, że po zadziałaniu typowych urządzeń AWSCz zakresu wykrywanych rezystancji przejścia w miejscu przez zabezpieczenia z rozruchem napięciowym nie przekracza 2,5 kΩ.



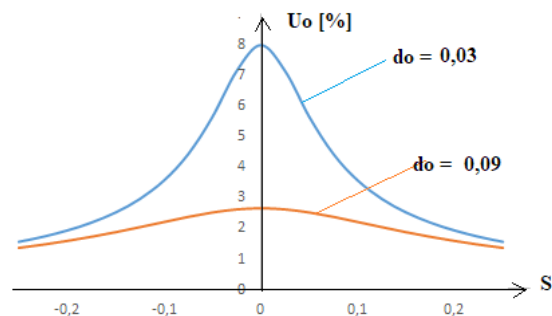
Rys.4. Przebiegi napięć chwilowych w przypadku ponownego wystąpienia zwarcia po jego wygaszeniu w sieci SN o izolowanym punkcie neutralnym. (1 – napięcie punktu neutralnego, 2 – napięcie fazy doziemionej, 3 – napięcie fazy zdrowej)

### Możliwości ograniczenia oddziaływania doziemnej asymetrii napięciowej w kompensowanych sieciach SN

Ze wzoru (1) wynika, że zjawisko napięć rezonansowych można znacznie ograniczyć przez zwiększenie wartości tłumienia obwodu ziemnozwarciowego. Wpływ ten jest maksymalnie ograniczony w sieciach z punktem neutralnym uziemionym przez rezystor, w których współczynnik tłumienia  $d_0$  najczęściej przyjmuje wartości większe niż 1 ( $d_0 > 1$ ).

W sieciach kompensowanych tłumienność tę można wzmocnić przez trwałe zwiększenie konduktancji obwodu ziemnozwarciowego sieci. W praktycznym rozwiązaniu może to polegać na zainstalowaniu w punkcie neutralnym dodatkowej rezystancji  $R_{PN}$  lub na trwałym włączeniu urządzeń wymuszających dodatkowy czynny prąd zwarcia z ziemią (AWSCz).

Jak pokazano na rysunku 5 już trzykrotne zwiększenie wartości współczynnika  $d_0$  w stosunku do wartości naturalnej pozwala znacznie ograniczyć przepięcia rezonansowe i umożliwić prowadzenie dokładniejszej kompensacji prądów pojemnościowych (np.  $s = 0,05$ ).

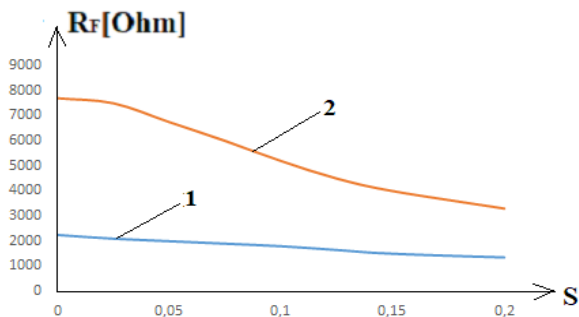


Rys.5. Krzywe wartości napięcia składowej zerowej sieci  $U_0$  w sieci kompensowanej z asymetrią doziemną na poziomie 0,23% w zależności od stopnia rozstrojenia kompensacji i wartości współczynnika tłumienia  $d_0$

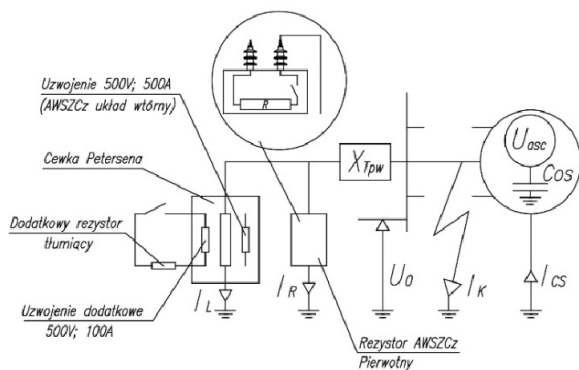
Tak znaczne ograniczenie poziomu napięć rezonansowych pozwala na prowadzenie kompensacji bardziej dokładnej i utrzymanie współczynnika rozstrojenia na poziomie mniejszym niż 0,1. Algorytm realizujący dobór reaktancji dławika [7] może wtedy ograniczyć składową bierną prądu resztkowego do wartości relatywnie małych (np.  $\Delta I < 15$  A lub nawet  $\Delta I < 10$  A). Takie ograniczenie składowej biernej w prądzie doziemienia poprawia znacząco efekty samoistnego wygaszania zwarć podtrzymywanych łukiem

elektrycznym. Badania symulacyjne [6] wykazały, że wskaźnik przepięć ziemnozwarciowych w takich warunkach nie przekracza wartości 2,8 a powtórny zapłon łuku w miejscu zwarcia są silnie ograniczone i praktycznie nie występują.

Zwiększenie tłumienności obwodu ziemnozwarciowego poprawia znacznie skuteczność działania zabezpieczeń ziemnozwarciowych. Wynika to, przede wszystkim z możliwości obniżenia wartości nastawczych członu rozruchowego w torze napięciowym  $U_0 >$ . Na rysunku 6 pokazano przyrost wykrywanych rezystancji przejścia w miejscu doziemienia przez zabezpieczenia admitancyjne po trwałym zwiększeniu współczynnika tłumienności i dwukrotnym obniżeniu wartości nastawczej członu  $U_0 >$ .



Rys.6. Porównanie wartości wykrywanych rezystancji przejścia w miejscu doziemienia w kompensowanej sieci o doziemnym prądzie pojemnościowym 200 A ( $U_{as} = 30$  V,  $d_o = 0,03$ ) dla stanu przed (1) i po trwałym zwiększeniu tłumienności obwodu ziemnozwarciowego (2). 1. Stan pracy sieci z tradycyjnym układem AWSCz,  $U_{on} = 12$  V, 2. Stan pracy sieci z trwałą tłumiennością  $d_{ow} = 0,09$ ,  $U_{on} = 6$  V.



Rys.7. Układ tradycyjny AWSCz i trwałe zwiększenie tłumienności obwodu doziemnego kompensowanej sieci SN zrealizowane w obwodzie wtórnym uzziemienia punktu neutralnego (uzwojenie 500 V, 100 A)

### Praktyczne rozwiązanie techniczne proponowane przez firmę Bezpól

Jak wspomniano wcześniej tłumienność w obwodach ziemnozwarciowych można zwiększyć przez włączenie w punkcie neutralnym sieci dodatkowej rezystancji lub wykorzystać w tym celu urządzenia AWSCz o zmienionym programie działania. Oba rozwiązania można realizować wykorzystując obwody niskonapięciowe dodatkowego uzwojenia cewki lub wprowadzając rezystory wysokonapięciowe bez-

pośrednio do obwodu uzziemienia punktu neutralnego. Rozwiązanie zaproponowane przez firmę Bezpól przedstawiono na rysunku 7. Polega ono na zainstalowaniu w dławiku dodatkowego rezystora, wpiętego do specjalnego uzwojenia (500 V; 100 A), które współpracuje z cewką Petersena. Natomiast urządzenia AWSCzCz ulokowane są tradycyjnie w układzie pierwotnym lub w uzwojeniu wtórnym dławika (500 V; 500 A). Podczas normalnej pracy cewki Petersena dodatkowa rezystancja może zwiększyć tłumienność obwodu ziemnozwarciowego do poziomu około 0,1 (np. dla sieci o doziemnym prądzie pojemnościowym na poziomie 200 A) lub nawet do około 0,14 (np. dla sieci o prądzie  $I_{cs} = 100$  A). Są to już wartości na tyle duże, że podczas zwarcia doziemnych, o relatywnie małych rezystancjach przejścia, mogą stwarzać wystarczające warunki do zadziałania ziemnozwarciowych zabezpieczeń konduktancyjnych. Nie zachodzi wtedy potrzeba uruchamiania urządzeń AWSCz.

Dzięki zastosowaniu rezystora zwiększającego tłumienność w niezależnej konstrukcji przymocowanej do dławika mamy możliwość montażu rezystora już w działających urządzeniach. Dodatkowo olej zapewnia odpowiednią izolację rezystorów i elementów łączeniowych oraz umożliwia dobre warunki ich eksploatacji. Rezystory (w tym urządzenie AWSCzCz realizowane w układzie pierwotnym lub wtórnym) są niezależnie chronione zabezpieczeniami od skutków termicznych.

**Autorzy:** dr inż. Jerzy Andruszkiewicz, Politechnika Poznańska, Instytut Elektroenergetyki, ul. Piotrowo 3a, 60-965 Poznań, E-mail: jerzy.andruszkiewicz@put.poznan.pl; prof. dr hab. inż. Józef Lorenc Politechnika Poznańska, Instytut Elektroenergetyki, ul. Piotrowo 3a, 60-965 Poznań, E-mail: jozef.lorenc@put.poznan.pl; mgr inż. Michał Torbus, Bezpól, ul. Partyzantów 21, 42-300 Myszków, E-mail: torbus.michal@gmail.com; dr inż. Jacek Dziura, Traffa, ul. 1-go Maja 152, 42-300 Myszków, E-mail: jacek.dziura@traffa.pl; mgr inż. Mateusz Skowron, Traffa, ul. 1-go Maja 152, 42-300 Myszków, E-mail: mateusz.skowron@traffa.pl.

### LITERATURA

- [1] Lorenc J., Rakowska A., Limitation of Interruptions in Service of MV Distribution Systems by Improvement of Lines Insulation and Fast Localising of Earth Fault. *CIGRE 18th International Conference on Electricity Distribution Stockholm, 10-13 June 2013*, Paper 1153
- [2] Mohar T., Valenčič L., Bati D., Reliability impact factors analysis for distribution in Slovenia, *22nd International Conference on Electricity Distribution Stockholm, 10-13 June 2013*, Paper 1153
- [3] Jakubowski J., Podstawy teorii przepięć w układach elektroenergetycznych (Fundamentals of overvoltage theory in power systems), PWN, Warszawa, 1968
- [4] Oramus P., Furgał J., Ground fault overvoltage analysis in distribution networks, *Przegląd Elektrotechniczny 2015*, nr 6, s. 149-152
- [5] Verschoore J., Choix du regime de neutre d'un reseau industriel haute tension 1 à 36 kV. *RGE, 1980*, Nr 11, s. 727 - 736.
- [6] Andruszkiewicz J., Lorenc J., Olejnik B., Weychan A., Staszak B., Metod of Reducing the Effects of Repeated Ignition during Earth Faults in Compensated Medium Voltage Networks. *Energies - 2024*, vol. 17, iss. 1, s. 1-14
- [7] Lorenc J., Staszak B., Borucki R., Torbus M., Kryteria regulacji nadążnej kompensacji ziemnozwarciowej w sieciach średniego napięcia. *Przegląd Elektrotechniczny 2018*, nr 10, s. 29-32
- [8] Lorenc J., Admitancyjne zabezpieczenia ziemnozwarciowe. *Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej*, ISBN 978-83-7143-342-9, 2007