

Kryteria regulacji nadążnej kompensacji ziemnozwarciowej w sieciach średniego napięcia

Streszczenie. W artykule przedstawiono kryteria sterowania nadążną kompensacją ziemnozwarciową w sieciach średniego napięcia przy wykorzystaniu cewek Petersena o płynnej regulacji reaktancji. Skuteczna i efektywna kompensacja nadążna ma znaczący udział w poprawianiu współczynników SAIDI i SAIFI określających jakość i pewność zasilania odbiorców w energię elektryczną.

Abstract. In this paper the criteria for controlling the follow-up earth fault compensation in medium voltage networks using Petersen coils with fluid reactance regulation are presented. Effective follow-up compensation has a significant share in improving SAIDI and SAIFI coefficients that determine the quality and reliability of electricity supply to customers. (Criteria for the regulation of follow-up earth fault compensation in medium voltage networks).

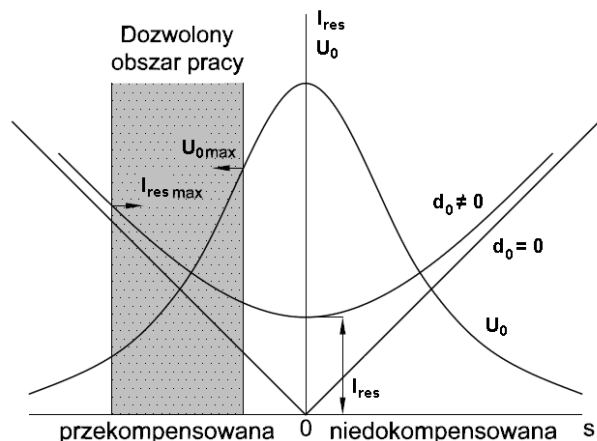
Słowa kluczowe: pewność zasilania, sieci dystrybucyjne, cewka Petersena, kompensacja ziemnozwarciowa.

Keywords: reliability of the power, distribution network, Peterson coil, earth fault compensation.

Wstęp

Z rejestrowanych wszystkich zakłóceń występujących w sieciach SN wynika, że około 70% to zwarcia doziemne. Ich intensywność jest relatywnie duża i z przeprowadzonych analiz wynika, że w ciągu roku na 100 km linii SN przypada od kilku do kilkunastu a nawet kilkadziesiąt doziemień [1, 2]. Znaczna ich liczba to zwarcie nietrwale, którym towarzyszy łuk elektryczny podtrzymywany napięciem sieci i istotnym czynnikiem wpływającym na możliwości samoistnego ich wygaszenie jest stosowanie dławików kompensujących (cewki Petersena) w punkcie neutralnym. Podkreślają to raporty różnych krajów (np. Francja, Słowenia, Finlandia [3, 4, 5, 6]), w których prezentowane są działania w kierunku poprawy wskaźników pewności zasilania (SAIDI, SAIFI, MAIFI). Poza tym działanie takich urządzeń zmniejsza poziom zagrożenia w miejscu doziemienia oraz może mieć również korzystny wpływ na pracę zabezpieczeń ziemnozwarciowych [1,7].

Kompensacja ziemnozwarciowa spełni oczekiwania tylko wtedy, gdy reaktancja cewki Petersena jest porównywalna z reaktancją pojemnościową sieci. Pełny efekt kompensacji następuje wtedy, gdy reaktancje te są równe. Ze względu na występowanie zjawiska naturalnej asymetrii doziemnej (tzw. przepięcia rezonansowe) uznaje się, że sieć powinna pracować trwale z lekkim przekompensowaniem. Taki zalecany przedział strojenia cewki zaznaczono na rysunku 1.



Rys.1. Zalecany zakres pracy dławika kompensującego w sieci SN

Wyboru odpowiedniej wartości reaktancji cewki można dokonywać według dwóch następujących kryteriów: wartości współczynnika kompensacji ziemnozwarciowej K i dopuszczalnej wartości składowej biernej prądu resztkowego I_{res} . Na rysunku 1 przedstawiono krzywe wartości składowej zerowej napięcia sieci U_0 oraz prądu I_{res} w zależności od współczynnika rozstrojenia kompensacji ziemnozwarciowej s dla wyidealizowanego przypadku sieci o współczynniku tłumienia d_0 równym 0 oraz dla sieci rzeczywistych ($d_0 > 0$). Relację między współczynnikami K i s określa wzór (1).

$$(1) \quad K = 1 + s.$$

W praktyce eksploatacyjnej często przyjmuje się, że stan przekompensowania sieci oznacza się znakiem dodatnim a stan niedokompensowania znakiem ujemnym i wtedy wartość współczynnika rozstrojenia kompensacji s należy przemnożyć przez -1.

W sieciach o relatywnie dużej asymetrii doziemnej możliwe jest stosowanie kryterium ograniczenia skutków napięciowych tej asymetrii.

Poniżej zaprezentowano kryteria regulacji dławików kompensujących (cewek Petersena), które opracowano i zaimplementowano w sterownikach przeznaczonych do współpracy z dławikami produkcji firmy Bezpól [8].

Kryterium wartości współczynnika kompensacji

Zgodnie z potrzebami eksploatacyjnymi sieci SN zalecane wartości współczynnika K dla tego kryterium dotyczą przedziału od 1,05 do 1,2. Wartości mniejsze i relatywnie dużej pojemności doziemnej, natomiast wartości większe (bliżej $K = 1,2$) stosuje się dla sieci o mniejszych pojemnościach i większej asymetrii naturalnej. W praktyce eksploatacyjnej sterownik regulatora korzysta z warunku opisanego poniżej:

$$(2) \quad \frac{X_{cs}}{K_{max}} - X_{Tpw} \leq X_L \leq \frac{X_{cs}}{K_{min}} - X_{Tpw},$$

gdzie: X_L – wymagana wartość reaktancji cewki Petersena, X_{CS} – wypadkowa pojemnościowa reaktancja doziemna sieci (wartości tej reaktancji są obliczane na podstawie prądów i napięć zarejestrowanych podczas działania układu pomiarowego, X_{Tpw} – reaktancja dla składowej zerowej transformatora potrzeb własnych, do którego przyłączona

jest cewka Petersena, K_{min} i K_{max} – współczynniki określające zalecany przedział kompensacji ziemnozwarciowej (wartości graniczne tego przedziału to $K_{min} = 1,05$ oraz $K_{max} = 1,2$).

We wzorze (1) wyraźnie podkreślono wpływ składowej zerowej impedancji transformatora uziemiającego na właściwy dobór reaktancji dławika. Nie uwzględnianie jej może prowadzić do znacznych odchyłań rzeczywistej kompensacji od wartości założonej.

Strojenie cewki Petersena według kryterium założonej wartości współczynnika K jest relatywnie proste i łatwe w realizacji. Po wykonaniu pomiarów pojawia się informacja o aktualnym poziomie kompensacji i weryfikacja wartości reaktancji dławika zgodnie ze wzorem (2). Po stwierdzeniu, że współczynnik K ma wartość poza założonym przedziałem następuje uruchomienie automatyki sterującej i regulacja dławika do pożądanego wartości reaktancji. Kryterium to wymaga jednak wprowadzenia korekty w sytuacji, gdy w głębi sieci są zainstalowane dławiki statyczne, które dokonują w sposób ciągły częściowej kompensacji ziemnozwarciowej. Warunek (2) w takiej sytuacji zmienić należy do postaci:

$$(3) \quad X_L \geq \frac{X_{cs}}{K_{max} + \frac{X_{cs}}{X_{dz}}(K_{max} - 1)} - X_{Tpw}$$

oraz

$$(4) \quad X_L \leq \frac{X_{cs}}{K_{min} + \frac{X_{cs}}{X_{dz}}(K_{min} - 1)} - X_{Tpw},$$

gdzie: X_L – oznacza reaktancję dławika pracującego w głębi sieci.

Kryterium dopuszczalnej wartości składowej biernej prądu resztkowego

To kryterium można uznać za najbardziej efektywne i zrozumiałe. W algorytmie takiego kryterium należy reaktancję dławika wyznaczać z zależności poniżej:

$$(5) \quad \frac{1}{X_L + X_{Tpw}} = \sqrt{3} \frac{\Delta I}{U_n} + \frac{1}{X_{cs}},$$

gdzie: ΔI – wartość nastawcza składowej biernej prądu resztkowego, U_n – wartość znamionowego napięcia sieci (np. 15 kV).

Wybór nastawy prądu ΔI powinien dotyczyć przedziału wartości od kilku do kilkunastu amperów i ograniczać prąd zwarcia z ziemią do pożądanego poziomu np. wynikającego z potrzeb właściwej ochrony porażeniowej. Algorytm regulacji reaktancji dławika powinien uwzględnić zasadę kompensacji, w której w prądzie resztkowym powinna pojawiać się wyłącznie składowa bierna indukcyjna. W związku z tym regulator reaktancji cewki powinien działać zgodnie z zależnością poniżej:

$$(6) \quad X_L = \frac{U_n}{\sqrt{3}(\Delta I + I_{CS})} - X_{Tpw},$$

gdzie: I_{CS} – jest aktualnym pojemnościowym prądem doziemnym sieci.

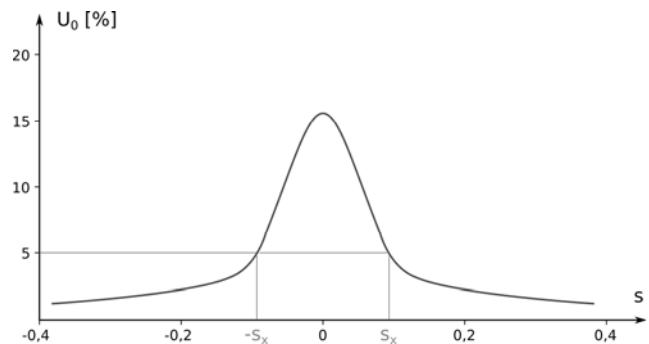
Stosowanie tego kryterium pozwala jednoznacznie wyznaczać poziom prądu zwarciovego w miejscu doziemienia niezależnie od konfiguracji sieci. Wartości

składowej biernej prądu resztkowego są utrzymywane na zadanym poziomie bez względu na oddziaływanie urządzeń kompensujących pracujących w głębi sieci. Stała wartość prądu ΔI powoduje, że podczas zmian konfiguracji sieci (np. łączenie sekcji lub wyłączanie linii lub jej fragmentu) współczynnik kompensacji K ulega zmianie zgodnie ze wzorem poniżej:

$$(7) \quad K = \frac{\Delta I}{I_{CS}}.$$

Kryterium ograniczenia skutków asymetrii napięć doziemnych

W tym kryterium poziom dostrojenia cewki jest wynikiem analizy napięcia w punkcie neutralnym sieci. Jak wynika z krzywej na rysunku 2 założona wartość dopuszczalna tego napięcia ogranicza możliwość kompensacji tylko do poziomu wyznaczonego przez wartości S_x .



Rys.2. Krzywa wartości składowej zerowej napięcia sieci w zależności od stopnia rozstrojenia kompensacji

Korzystanie z tego kryterium wymaga analizy krzywej rezonansowej i wyznaczenia współczynnika S_x z następującej zależności:

$$(8) \quad S_x = \pm \sqrt{(A)^2 [d_0^2 + B^2] - d_0^2},$$

$$(9) \quad A = \frac{I_L (X_L + X_{Tpw})}{U_{d(\%)} U_f},$$

$$(10) \quad B = 1 - \frac{X_{cs}}{X_L},$$

gdzie: U_f – napięcie fazowe (znamionowe) sieci, $U_{d(\%)}$ – dopuszczalna procentowa wartość napięcia składowej zerowej wywołana zjawiskiem rezonansowym, X_L i X_{CS} – aktualne wartości reaktancji wyznaczone w czasie pomiaru (przed regulacją), I_L – bieżąca wartość prądu dławika wynikająca z asymetrii doziemnej sieci.

W przykładzie przedstawionym na rysunku 2 wyznaczono wartość współczynnika S_x dla stanu zestrojenia przy ograniczeniu napięcia U_0 do poziomu 5% napięcia fazowego sieci. Analiza dotyczy sieci o współczynniku tłumienia d_0 równym 2,5% oraz wartości względnej asymetrii naturalnej wynoszącej 0,5%.

Tego typu kryterium jest często wykorzystywane przez dyspozytorów w sieciach terenowych o dużym udziale linii napowietrznych i dużej asymetrii doziemnej. Jednak skutki takiego rozstrajania zmniejszają zdolności dławika do wygaszania zwarć łukowych. Łatwo znaleźć przykłady sieci, w których stosowanie takiego kryterium powoduje rozstrojenie kompensacji nawet do poziomu K równego 1,3 lub więcej. Dodatkowym utrudnieniem w procesie regulacji cewki może być wzrost asymetrii napięć podczas

przechodzenia ze stanu niedokompensowania w wymagany stan przekompensowania. Rozwiązaniem w tym wypadku jest chwilowe (na czas regulacji) włączenie do obwodu ziemnozwarciowego odpowiednio dobranej rezystancji zwiększającej tłumienność obwodu.

Realizacja metody pomiarowej

W procesie nadążnej regulacji cewki Petersena decydujące znaczenie ma informacja o aktualnych parametrach obwodu doziemnego sieci, w tym szczególnie informacja o pojemnościowym prądzie doziemnym. Dla pozyskania takich informacji można między innymi bazować na:

- pomiarze wartości składowej zerowej napięcia wywołanej asymetrią naturalną sieci,
- pomiarach kątów fazowych między wektorami napięć składowej zerowej a napięciem asymetrii doziemnej,
- porównaniu napięcia składowej zerowej z napięciem fazy doziemionej podczas zwarć oporowych,
- pomiarze prądów składowej zerowej linii podczas rzeczywistych zwarć doziemnych,
- pomiarze prądów i napięć podczas włączania w obwody doziemne sieci zewnętrznych źródeł niskonapięciowych.

Prace prowadzone w ciągu ostatnich lat przez Instytut Elektroenergetyki Politechniki Poznańskiej skupiły się na opracowaniu rozwiązań wykorzystujących skutki chwilowego włączenia w punkcie neutralnym sieci zewnętrznego źródła niskonapięciowego. W wyniku prowadzonych prac opracowano i zbudowano miernik MPZ (Miernik Parametrów Ziemnozwarciowych) pozwalający na określenie parametrów ziemnozwarciowych w skompensowanej sieci SN [9]. Zaletą tego rozwiązania jest prostota oraz możliwość częstego przeprowadzenia pomiarów w czasie normalnej eksploatacji sieci. Poza prądem pojemnościowym sieci za pomocą układu MPZ określone są wartości takie, jak:

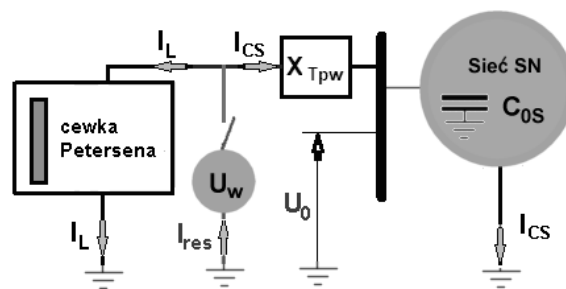
- współczynnik rozstrojenia kompensacji ziemnozwarciowej s ,
- współczynnik tłumienia sieci d_0 ,
- prąd resztkowy I_{res} .

Do wyznaczania wartości współczynników d_0 i s w mierniku MPZ zaimplementowano metody waromierzową oraz susceptancyjną [10], a ponadto metodę *drgań własnych*, wykorzystującą wartości składowej zerowej napięcia zarejestrowane przed i po wyłączeniu dodatkowego źródła napięcia. Do określenia wartości współczynnika s wykorzystuje się pomiar częstotliwości rezonansowej sieci. Przybliżona wartość tego współczynnika wynosi:

$$(11) \quad s \cong 1 - \frac{1}{\omega^2 L_N C_{0S}} \cong 1 - \frac{\omega_0^2}{\omega^2},$$

gdzie: L_N – indukcyjność dławika, C_{0S} – pojemność doziemna sieci, ω – pulsacja robocza sieci, ω_0 – pulsacja wyznaczona przy zanikaniu przebiegu napięcia U_0 .

Na rysunkach 3 i 4 przedstawiono dwa sposoby wprowadzenia do sieci dodatkowego źródła napięcia wymuszania U_w . Pierwszy polega na bezpośrednim ulokowaniu go pomiędzy cewkę Petersena a transformatorem uzemiającym, natomiast drugi wykorzystuje dodatkowe niskonapięciowe uzwojenie dławika. Metoda bezpośrednia daje najlepsze wyniki, ale jest dość trudna w realizacji i wymaga zastosowania urządzeń wysokonapięciowych. Metoda pośrednia nawiązuje w sposób jednoznaczny do miernika typu MPZ.



Rys.3. Metoda bezpośrednia włączania dodatkowego napięcia źródła U_w

Ze schematu pomiarowego przedstawionego na rysunku 3 wynikają zależności określające poszczególne wielkości. Reaktancję pojemnościową sieci można wyznaczyć z ze wzoru przedstawionego poniżej:

$$(12) \quad X_{CS} = \frac{U_0}{I_{CS}}.$$

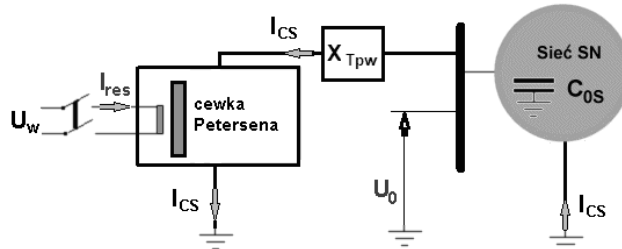
Reaktancja dławika i transformatora uzemiającego opisane są zależnościami (13) i (14).

$$(13) \quad X_L = \frac{U_w}{I_L},$$

$$(14) \quad X_{Tpw} = \frac{U_0 - U_w}{I_{CS}}.$$

Zasada regulacji oparta na kryterium współczynnika kompensacji ziemnozwarciowej sprowadza się do spełnienia relacji opisanej wzorem (2).

W metodzie pośredniej wykorzystywane jest niskonapięciowe uzwojenie wymuszające dławika.



Rys.4. Metoda pośrednia włączania dodatkowego napięcia źródła U_w

W tej metodzie bezpośrednio ocenia się reaktancję sieci, natomiast w sposób pośredni reaktancję dławika (poprzez pomiar prądu I_{res}).

Układ automatycznej kompensacji prądów ziemnozwarciowych BS KKZ

Przykładem rozwiązania, które wykorzystuje opisane metody pomiaru i regulacji kompensacji nadążnej jest urządzenie BS KKZ [11]. Na rysunku 5 pokazano dławik z regulacją szczelinową oraz dobudowanym układem pierwotnej automatyki wymuszania składowej czynnej prądu ziemnozwarciowego.

Urządzeniem steruje regulator (rys.6) oparty sprzętowo na przekaźniku CZIP-PRO ze zmodyfikowanymi wejściami. Zaimplementowane w nim oprogramowanie umożliwia wykonywanie pomiarów parametrów sieci SN i procedur regulacyjnych.

Regulator współpracuje z systemami nadrzędnymi w protokołach DNP 3.0 oraz IEC 60870-5-103.



Rys.5. Dławik gaszący olejowy regulowany szczelinowy BDGORS [11]



Rys.6. Regulator BS KKZ [11]

Układ jest przygotowany do pracy grupowej dwóch lub więcej dławików. W grupie mogą występować dławiki nadążne lub o regulacji zaczepowej.

Podsumowanie

Wymagania jakości i ciągłości zasilania odbiorców w energię elektryczną skłaniają operatorów sieci dystrybucyjnych do stosowania nowych rozwiązań technicznych również w zakresie kompensacji doziemnych prądów pojemnościowych w sieciach średnich napięć. Urządzenia takie w postaci nadążnie i automatycznie

sterowanych dławików (cewek Petersena) znacznie poprawiają efektywność w gaszeniu zwarć łukowych, ułatwiają realizację ochrony przeciwporażeniowej przez ograniczanie prądu zwarcia z ziemią oraz mogą mieć korzystny wpływ na warunki pracy zabezpieczeń ziemnozwarciowych. Algorytmy działania realizować mogą kompensację według co najmniej trzech kryteriów: wartości współczynnika kompensacji, ograniczenia poziomu napięć rezonansowych oraz wartości składowej biernej resztkowego prądu doziemienia. Ostatnie kryterium wydaje się szczególnie atrakcyjne i łatwe w realizacji. W sieciach o relatywnie dużej doziemnej asymetrii naturalnej kompensację dokładną powinna być prowadzona przy zwiększonej dodatkowo tłumienności sieci.

Autorzy: prof. dr hab. inż. Józef Lorenc, Politechnika Poznańska, Instytut Elektroenergetyki, ul. Piotrowo 3a, 60-965 Poznań, E-mail: jozef.lorenc@put.poznan.pl; dr inż. Bogdan Staszak, Politechnika Poznańska, Instytut Elektroenergetyki, ul. Piotrowo 3a, 60-965 Poznań, E-mail: bogdan.staszak@put.poznan.pl; dr inż. Ryszard Borucki, E-mail: ryszard.borucki@konekt.com.pl, mgr inż. Michał Torbus, Bezpól, ul. Partyzantów 21, 42-300 Myszków, E-mail: torbus.michal@gmail.com

LITERATURA

- [1] Lorenc J., Admitancyjne zabezpieczenia ziemnozwarciowe. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, (2007)
- [2] Skomudek W., Pomiary i analiza przebiegów oraz ocena ich skutków w sieciach średniego napięcia, SEP, Centralny Ośr. Szkolenia i Wydawnictw, Warszawa, (2011)
- [3] CEER Benchmarking Report 5.2 on the Continuity of Electricity Supply, Data up-date, Ref: C14-EQS-62-03 (2015)
- [4] Mohar T., Valenčič L., Batič D., Reliability impact factors analysis for distribution in Slovenia, 22nd International Conference on Electricity Distribution Stockholm (2013), Paper 1153
- [5] Siirto O., Loukkahti M., Hyvärinen M., Heine P., Lehtonen M., Neutral Point Treatment and Earth Fault Suppression, 8th International Conference - 2012 Electric Power Quality and Supply Reliability, PQ 2012, Tartu, (2012), 193-198
- [6] Juston P., Griffel D., Mise a la terre du neuter dans les reseaux ruraux. EDF Direction des etudes et recherches, Service des etudes des reseaux. REE No 2, (1996), 38-43
- [7] Dolnik B., Kurimsky J., Contribution to earth fault current compensation in middle voltage distribution networks, *Przegląd Elektrotechniczny*, nr 2 (2011)
- [8] Lorenc J., Torbus M., Staszak B., Automatyczne sterowanie kompensacją ziemnozwarciową w sieciach SN przy wykorzystaniu miernika parametrów ziemnozwarciowych, *Wiadomości Elektrotechniczne*, nr 12 (2013)
- [9] Handke J., Lorenc J., Staszak B., Określenie doziemnych prądów pojemnościowych sieci SN za pomocą miernika MPZ, *Komitet Automatyki Elektroenergetycznej SEP, XVI Ogólnopolska Konferencja, Zabezpieczenia Przekaznikowe w Energetyce*, Licheń Stary (2013), 117-122
- [10] Lorenc J., Staszak B., Kwapisz A., Handke J., The modern solutions applicable in determination of earth-fault parameters in the MV network, MEPS'10 Symposium, Modern Electric Power Systems, Wrocław (2010)
- [11] Urządzenia do pomiaru i kompensacji prądów ziemnozwarciowych, <http://www.bezpol.pl>, 2018-04-01