

WSPÓLPRACA PRZYGRANICZNYCH SIECI 110 kV – SKUTECZNIE UZIEMIONEJ I SKOMPENSOWANEJ

Wilhelm ROJEWSKI¹, Marian SOBIERAJSKI²

1. Politechnika Wrocławska, Wydział Elektryczny, Wyb. Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław
tel.: 71 320 37 24; e-mail: wilhelm.rojewski@pwr.edu.pl
2. Politechnika Wrocławska, Wydział Elektryczny, Wyb. Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław
tel.: 71 320 44 22; e-mail: marian.sobierajski@pwr.edu.pl

Streszczenie: W pracy rozważane są wybrane problemy współpracy skompensowanej sieci 110 kV z siecią 110 kV skutecznie uziemioną. Zakłada się, że w celu takiej współpracy tworzone będą układy, w których wyizolowany od własnego systemu elektroenergetycznego obszar jednej sieci będzie promieniowo (jednostronnie) zasilany z drugiej sieci, pracującej w tym czasie w układzie normalnym. Wskazuje się na zagrożenia jakie wystąpią w połączonych sieciach podczas zwarcń jednofazowych.

Słowa kluczowe: sieć skompensowana, sieć skutecznie uziemiona, punkt neutralny sieci, zwarcie 1-fazowe

1. WPROWADZENIE

Lokalna współpraca operatorów przygranicznych sieci 110 kV może przyczynić się do poprawy bezpieczeństwa zasilania odbiorców, a nierzadko ma też sens komercyjny. Organizując taką współpracę należy w każdej z tych sieci zaplanować obszar, który zostanie wyizolowany od własnego systemu elektroenergetycznego i będzie przejściowo zasilany z pracującej w normalnym układzie (połączonej z własnym systemem elektroenergetycznym) drugiej sieci. Role sieci zasilanej i zasilającej będą zamienne.

Stosunkowo łatwo można zorganizować taką współpracę w przypadku sieci 110 kV o takim samym sposobie pracy punktu neutralnego, natomiast inaczej jest gdy jedna z sieci pracuje ze skutecznie uziemionym punktem neutralnym, a druga jest siecią skompensowaną. Taka sytuacja ma miejsce np. w przypadku sieci 110 kV polskiej i niemieckiej.

Niezależnie od tego, która z sieci jest siecią zasilaną, a która zasilającą, w stanie bezzakłóceniovym praca połączonych sieci nie stwarza zagrożeń. Mając jednak na uwadze możliwość wystąpienia zwarcń 1-fazowych w takim układzie należy rozróżnić te dwa przypadki. Jeśli siecią zasilającą jest skompensowana sieć niemiecka, to żaden transformator w wydzielonej sieci polskiej nie może mieć uziemionego punktu neutralnego po stronie 110 kV. W tej sytuacji zwarcia 1-fazowe (w sieci polskiej lub niemieckiej) będą stwarzać zagrożenia dla sieci polskiej z następujących powodów:

- wystąpią ustalone przepięcia ziemnozwarciowe w fazach zdrowych o współczynniku $k_u = 1,73$, podczas gdy izolacja i aparatura sieci skutecznie uziemionej dostosowana jest do przepięć o współczynniku $k_u \leq 1,4$.
- automatyka zabezpieczeniowa polskiej sieci 110 kV nie jest przystosowana do wykrywania i eliminacji zwarcń doziemnych (słaboprądowych) w rozważanych warunkach, a zabezpieczenia ziemnozwarciowe w skompensowanej sieci niemieckiej często działają jedynie na sygnał.

Jeśli siecią zasilającą jest skutecznie uziemiona polska sieć 110 kV, to w razie wystąpienia zwarcia 1-fazowego w skompensowanej sieci niemieckiej uziemienia w tej sieci mogą okazać się niedostosowane do dużych prądów ziemnozwarciowych.

Problemy bezpiecznej współpracy sieci 110 kV skutecznie uziemionej z siecią skompensowaną daje się radykalnie rozwiązać za pomocą specjalnego transformatora sprzęgającego 110 kV/110 kV. To rozwiązanie ma jednak bardzo istotną wadę – jest drogie. Szacuje się, że w przypadku transformatora o mocy rzędu 160 MVA całkowity koszt zabudowy i wyposażenia może wynosić ok. 10 mln. zł.

W pracy rozpatruje się możliwość alternatywnego rozwiązania problemu, nie wymagającego ponoszenia takich kosztów. W kontekście zjawisk przepięciowych towarzyszących zwarciom doziemnym omówiono zasady doboru przekładników napięciowych i ograniczników przepięć dla sieci 110 kV. Następnie przedstawiono wyniki symulacji zwarcia 1-fazowego w układzie, w którym wydzielony obszar polskiej sieci 110 kV, pozbawiony uziemienia punktu neutralnego transformatorów, zasilany jest ze skompensowanej sieci niemieckiej. Wyniki symulacji ilustrują zagrożenia dla ograniczników przepięć oraz wpływ działania ograniczników na napięcia i prądy w układzie. Wskazano niezbędne działania w celu wyeliminowania lub ograniczenia tych zagrożeń.

Z uwagi na ograniczoną ilość miejsca w artykule nie poruszono innych ważnych kwestii, jak np. sposobu przeprowadzenia operacji bezprzerwowego przejścia od zasilania z własnego systemu do zasilania z sieci obcego operatora, a także automatycznego powrotu do zasilania z własnego systemu elektroenergetycznego w razie automatycznego rozłączenia połączenia.

2. KORDYNACJA IZOLACJI W SKUTECZNIE UZIEMIONEJ SIECI 110 kV

Uwzględniając czynniki zakłóceniovowe, dopuszczalną długotrwale wartość napięcia roboczego sieci oraz kwestię koordynacji izolacji sieci i urządzeń regulują normy [1], [2]. Wartości skuteczne wielkości charakterystycznych, zdefiniowanych przez ww. normy, dla sieci o napięciu znamionowym 110 kV są następujące:

- nominalne napięcie sieci: $U_n = 110$ kV,
- najwyższe napięcie sieci: $U_s = 123$ kV,
- najwyższe napięcie urządzeń: $U_m = 123$ kV,

- znamionowe wytrzymałwane krótkotrwałe napięcia częstotliwości sieciowej: (185) 230 kV.

Przytoczone tu wartości napięcia są wartościami skutecznymi napięcia międzyfazowego i odpowiadają im, po podzieleniu przez $\sqrt{3}$, wartości skuteczne napięcia fazowego.

W sieciach 110 kV ze skutecznie uziemionym punktem neutralnym nakłada się określone ograniczenia na dopuszczalne wartości współczynnika przebiegów ustalonych podczas zwarć 1-fazowych [9]. Wartość graniczna współczynnika ustalonych przebiegów ziemnozwarciowych w przewodach roboczych takich sieci wynosi $k_u = 1,4$, a warunki konieczne dla uzyskania takiej wartości określają relacje: $1 \leq X_0/X_1 \leq 3$ oraz $R_0/X_1 \leq 1$. Przyjmując z warunków skutecznego uziemienia wartości graniczne ilorazu X_0/X_1 można oszacować największą wartość napięcia w nieuziemionym punkcie gwiazdowym transformatorów $U_0 = 0,6U_f$.

W sieci nieuziemionej skutecznie (izolowanej, skompensowanej lub uziemionej przez rezystancję) współczynnik ustalonych przebiegów ziemnozwarciowych w fazach zdrowych wynosi $k_u = \sqrt{3}$. I taki współczynnik należy przyjąć dla skompensowanej niemieckiej sieci 110 kV. Konsekwentnie, napięcie w punkcie gwiazdowym transformatorów podczas zwarcia 1-fazowego wyniesie w takiej sieci $U_0 = U_f$.

Uwzględniając warunki napięciowe podczas pracy normalnej i zakłóceń dokonuje się doboru elektrycznych parametrów przekładników napięciowych [3] oraz ograniczników przebiegów [4]. W zależności od sposobu pracy punktu neutralnego sieci i czasu eliminacji zwarć doziemnych wybiera się przekładnik o odpowiednim współczynniku zwarcia doziemnego k_n i dopuszczalnym czasie trwania przebiegu. Współczynnik k_n określa największą krotność pierwotnego napięcia roboczego, przy którym przekładnik ma wymaganą wytrzymałość termiczną w odpowiednim czasie oraz wymaganą dokładność. Znormalizowane wartości znamionowych współczynników napięciowych k_n dla przekładników włączonych między przewodem fazowym a ziemią są następujące:

- w sieci skutecznie uziemionej:
 - $k_n = 1,2$ bez ograniczenia czasu trwania przebiegu,
 - $k_n = 1,5$ w czasie 30s,
 - $k_n = 1,9$ w czasie 30s.
- w sieci z izolowanym punktem neutralnym bez automatycznego wyłączenia zwarć doziemnych:
 - $k_n = 1,2$ bez ograniczenia czasu trwania przebiegu,
 - $k_n = 1,9$ w czasie 8h.

W przypadku polskiej sieci 110 kV pracującej ze skutecznie uziemionym punktem neutralnym współczynnik przebiegów ziemnozwarciowych $k_u = 1,4$, a uwzględniając działanie zabezpieczeń na wyłączenie zwarć 1-fazowych standardowo przekładniki włączone między przewody fazowe a ziemię mają współczynnik napięciowy $k_n = 1,5/30$ s. Oznacza to, że mogą podlegać fazowym przebiegom o wartości skutecznej nie większej niż $1,5 \times 110 / \sqrt{3} = 95$ kV przez czas nie przekraczający 30 s.

W sieci nieuziemionej skutecznie, np. w niemieckiej skompensowanej sieci 110 kV, w której zwarcia 1-fazowe nie są wyłączane automatycznie przekładniki napięciowe będą miały współczynnik napięciowy $k_n = 1,9/8h$.

Wymagane parametry i właściwości ograniczników przebiegów opisuje norma [5]. W polskiej sieci 110 kV ograniczniki przebiegów instalowane są w polach liniowych, w polach transformatorów oraz w nieuziemionych punktach neutralnych transformatorów. Zalecane w [6] wybrane wartości

parametrów ograniczników przebiegów dla skutecznie uziemionej sieci 110 kV są następujące:

- Ogranicznik przyłączany do przewodów roboczych sieci:
 - napięcie trwałej pracy $U_c \geq 77$ kV,
 - napięcie znamionowe $U_r \geq 96$ kV.
- Ogranicznik przyłączany do punktu gwiazdowego transformatora:
 - napięcie trwałej pracy $U_c \geq 48$ kV,
 - napięcie znamionowe $U_r \geq 60$ kV.

Napięcie trwałej pracy jest wartością o ok. 5% większą od napięcia fazowego odpowiadającego największej wartości międzyfazowego napięcia w sieci, tzn. $1,05 \times U_f / \sqrt{3}$. Napięcie znamionowe ogranicznika jest większe od napięcia trwałej pracy wg relacji $U_r = 1,25U_c$. Oznacza to, że wartości chwilowe fali przebiegiowej będą ograniczane do poziomu nieco wyższego od amplitudy $\sqrt{2}U_r$. W przypadku przebiegów dorywczych dopuszcza się przekroczenie napięcia znamionowego ogranicznika, np. w czasie do 0,5 s możliwe jest przekroczenie napięcia znamionowego o ok. 10% [7].

W niemieckiej sieci 110 kV, pracującej z kompensacją prądu ziemnozwarciowego, ograniczniki przebiegów mają następujące parametry:

- ogranicznik przyłączany do przewodów roboczych sieci:
 - napięcie trwałej pracy $U_c \geq 123$ kV,
 - napięcie znamionowe $U_r \geq 154$ kV,
- ogranicznik przyłączany do punktu gwiazdowego transformatora:
 - napięcie trwałej pracy $U_c \geq 72$ kV
 - napięcie znamionowe $U_r \geq 90$ kV.

3. SYMULACJA ZWARCIA 1-FAZOWEGO

Rozpatrywany jest układ, przedstawiony na rys. 1, gdzie wydzielony obszar polskiej sieci 110 kV zasilany jest z sieci niemieckiej. Transformatory w wydzielonej polskiej sieci mają izolowany punkt gwiazdowy po stronie 110 kV, natomiast skompensowana sieć niemiecka pracuje w swoim normalnym układzie. Ograniczniki przebiegów i przekładniki napięciowe w polskiej sieci dobrane są zgodnie z zasadami obowiązującymi w sieci skutecznie uziemionej.

Wykonano symulacje zwarcia 1-fazowego w układzie i badano warunki napięciowe oraz prądowe w obydwu sieciach z uwzględnieniem działania ograniczników przebiegów zainstalowanych w wydzielonej sieci polskiej. Badania wykonano przy użyciu pakietu MATLAB/Simulink, wykorzystując standardowy model ogranicznika przebiegów.

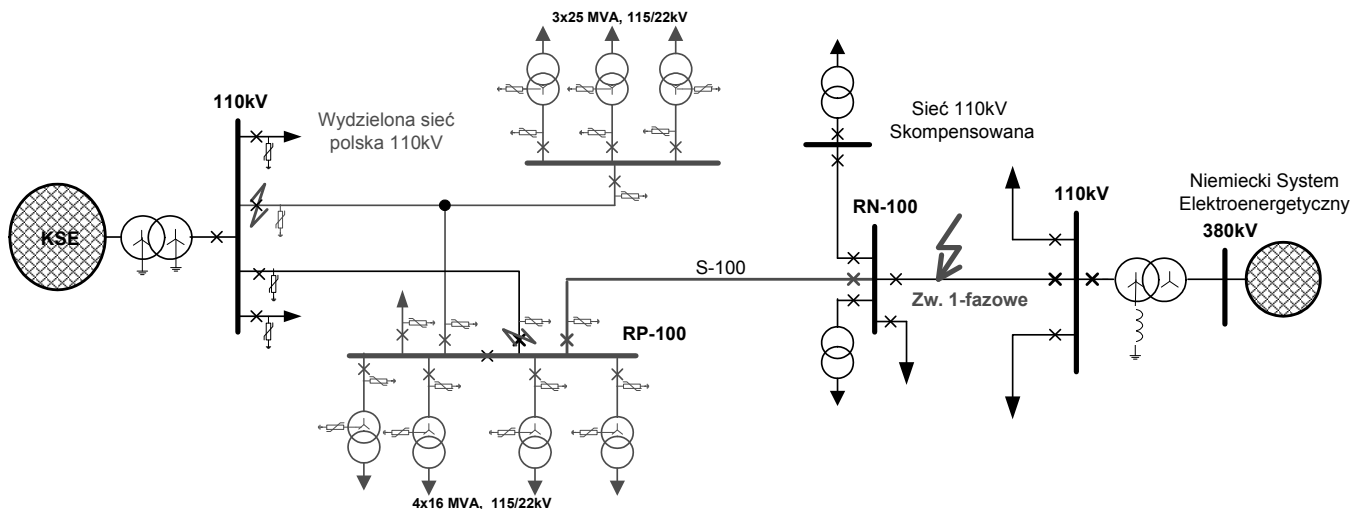
Symulacje wykonano wg następującego scenariusza:

- 1) w chwili $t = 0,2$ s powstaje zwarcie 1-fazowe w niemieckiej sieci 110 kV,
- 2) w chwili $t = 0,5$ s następuje otwarcie wyłącznika w linii łączącej S-100 w rozdzielni RP-100,
- 3) w chwili $t = 0,6$ s następuje otwarcie wyłącznika w linii łączącej S-100 w rozdzielni RN-100.

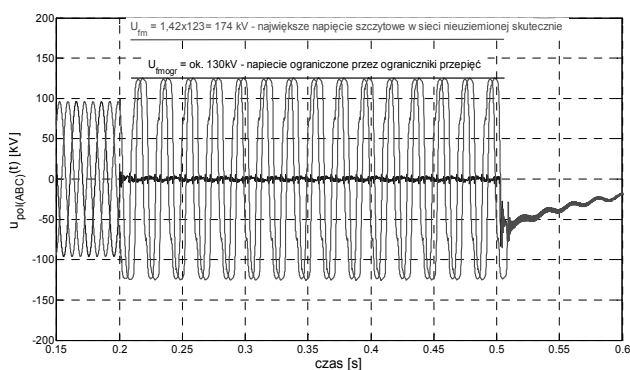
Obserwowane są:

- 3) napięcia i prądy w linii łączącej po stronie polskiej i niemieckiej,
- 4) napięcia w punkcie neutralnym transformatorów w sieci polskiej i niemieckiej,
- 5) prąd ogranicznika przebiegów,
- 6) prąd w miejscu zwarcia,
- 7) prąd urządzenia kompensującego (cewki gasikowej) w sieci niemieckiej.

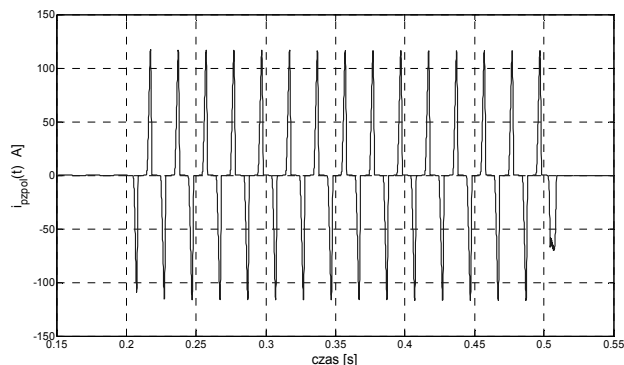
Wybrane wyniki symulacji zamieszczono na rys. 2. do 6.



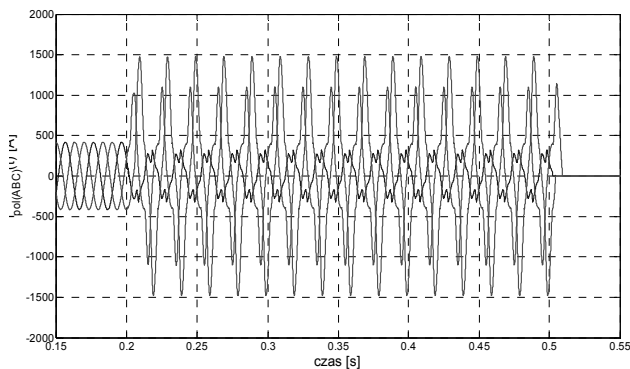
Rys. 1. Uproszczony schemat układu przyjętego do badań symulacyjnych.



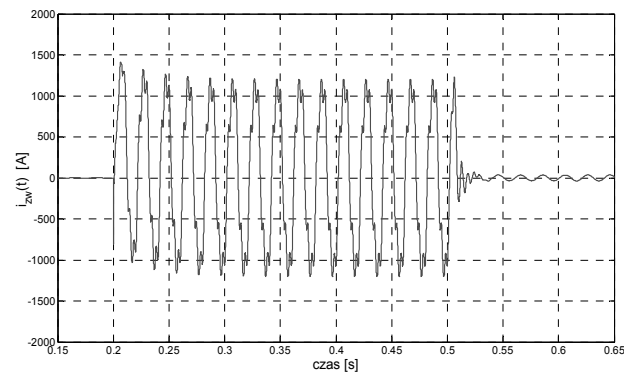
Rys. 2. Przebiegi napięć fazowych w polskiej sieci 110 kV podczas zwarcia 1-fazowego



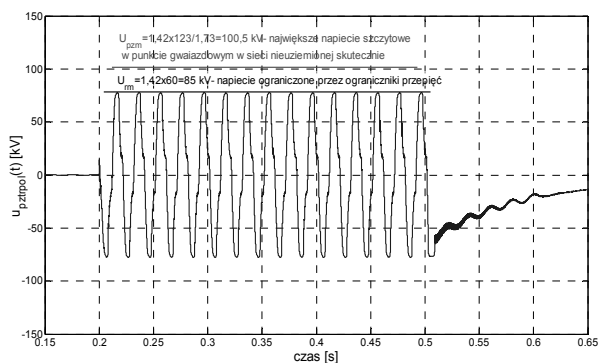
Rys. 5. Przebieg prądu ogranicznika przepięć w punkcie gwiazdowym transformatora



Rys.3. Przebiegi prądów fazowych w linii łączącej podczas zwarcia 1-fazowego w sieci niemieckiej



Rys. 6. Przebieg prądu w miejscu zwarcia



Rys. 4. Przebieg napięcia w punkcie gwiazdowym transformatora w sieci polskiej

Analiza wyników symulacji pozwala sformułować następujące wnioski:

- 1) Zasilanie wydzielonego obszaru polskiej sieci 110 kV ze skompensowanej sieci 110 kV operatora niemieckiego, podobnie jak sytuacja odwrotna, nie stwarza zagrożenia w bezzakłóceńowych warunkach pracy takiego układu.
- 2) W razie wystąpienia zwarcia 1-fazowego dojdzie do zadziałania w polskiej sieci ograniczników przepięć w przewodach roboczych i punktach gwiazdowych transformatorów. Napięcia faz zdrowych oraz w punkcie neutralnym transformatorów zostaną ograniczone do poziomu wynikającego z napięcia znamionowego ograniczników i ich charakterystyki.

- 3) Działanie ograniczników spowoduje silne odkształcenie napięć i prądów, a także wzrost prądów fazowych oraz prądu w miejscu zwarcia.
- 4) Praca ww. układu ze zwarcie 1-fazowym w sieci niemieckiej wiąże się ze wzrostem zagrożenia porażeniowego w tej sieci. Natomiast zwarcie 1-fazowe w sieci polskiej lub niemieckiej zagraża ogranicznikom przepięć, które są dostosowane do sieci skutecznie uziemionej. Po wystąpieniu zwarcia 1-fazowego praca takiego układu powinna być przerwana w czasie krótszym od 1 s.

4. WNIOSKI KOŃCOWE

- 1) Zastosowanie specjalnego izolującego transformatora 110 kV/110 kV w torze łączącym skutecznie uziemioną sieć polską ze skompensowaną siecią niemiecką może całkowicie wyeliminować problemy wynikające z różnych sposobów pracy punktu neutralnego tych sieci. Wadą tego rozwiązania jest jego duży koszt.
- 2) Alternatywą w stosunku do transformatora izolującego jest zastosowanie odpowiedniej automatyki rozcinającej połączenie sieci w razie wystąpienia zwarcia 1-fazowego.
- 3) W celu uniknięcia konieczności szybkiego rozcinania połączonych sieci wszystkie ograniczniki przepięć i wszystkie przekładniki napięciowe w wydzielonej polskiej sieci powinny mieć parametry odpowiednie do pracy w sieci z izolowanym punktem neutralnym lub skompensowanej. Wtedy jednak przy utrzymującym się zwarcie 1-fazowym w układzie powinno się dążyć do operacyjnego powrotu do układu normalnego, tj. zasilania polskiej sieci z KSE.
- 4) Wymiana samych ograniczników przepięć w polskiej sieci przeniesie zagrożenie na przekładniki napięciowe. Podczas zwarcia 1-fazowego dojdzie do nasycenia

rdzeni i wzrostu prądu magnesowania, a w konsekwencji do przeciążenia cieplnego uzwojeń pierwotnych przekładników. W tej sytuacji konieczne będzie rozcięcie połączenia współpracujących sieci z możliwie najkrótszym czasem zwłoki.

- 5) W referacie nie poruszono innych problemów, których rozwiązanie jest niezbędne dla realizacji ww. współpracy. Dotyczy to m.in. wyposażenia sieci w układy EAZ rozcinające oraz przywracające połączenie z własnym systemem (SZR), jak również rozwiązania układów kontroli synchronizmu podczas bezprzerwowego łączenia sieci.

5. BIBLIOGRAFIA

1. PN-EN 60071-1:2008P Koordynacja izolacji – Część 1: Definicje, zasady i reguły
2. PN-EN 60071-2:2000P Koordynacja izolacji. Przewodnik stosowania
3. PN-EN 61869-3:2011 – wersja angielska. Przekładniki – Przekładniki napięciowe indukcyjne
4. PN-EN 60099-5:2014-01 – wersja angielska. Ograniczniki przepięć – Część 5: Zalecenia wyboru i stosowania.
5. PN-EN 60099-4:2009 – wersja polska. Ograniczniki przepięć – Część 4: Beziskiernikowe ograniczniki przepięć z tlenków metali do sieci prądu przemiennego
6. Sowa A.: Ochrona odgromowa i przepięciowa. Ochrona odgromowa linii i stacji elektroenergetycznych wysokiego napięcia. Ochrona Odgromowa. Internet: www.elektroda.pl
7. BEZPOL: Beziskiernikowe ograniczniki przepięć w osłonie silikonowej. Karta katalogowa.
8. Instrukcja Ruchu i Eksploatacji Sieci Dystrybucyjnej (IRiESD), Turon Dystrybucja, 1 stycznia 2014.

THE COOPERATION OF THE NEIGHBOURING 110 kV NETWORKS – SOLIDLY GROUNDED AND COMPENSATED

Some problems of the cooperation of the compensated 110 kV network and the solidly grounded 110 kV network are discussed in the paper. It is assumed that, in order to prepare such cooperation the special area network, isolated from its power system should be created. And next, this subsystem in a radial configuration will be supplied from the second power system, working at this time at normal conditions. Reference is made to the risks that occur in the interconnected networks when single phase fault.

Keywords: compensated network, solidly grounded network, 1-phase to ground fault