

SYMULACJA DEFICYTÓW MOCY BIERNEJ W SIECI PRZESYŁOWEJ ZAGROŻONEJ NIESTABILNOŚCIĄ NAPIĘCIOWĄ – REFERAT KONFERENCYJNY

Robert LIS¹, Mirosław ŁABUZEK²

1. Politechnika Wrocławska, Instytut Energoelektryki
tel: 713204423 fax: 713202656 e-mail: Robert.Lis@pwr.wroc.pl
2. Politechnika Wrocławska, Instytut Energoelektryki
tel: 713202135 fax: 713202656 e-mail: Mirosław.Labuzek@pwr.wroc.pl

Streszczenie: W sieci przesyłowej bilans mocy biernej zależy od wartości mocy biernych wytwarzanych w elektrowniach oraz od wartości mocy pojemnościowej generowanej przez linie i statyczne kompensatory. Przy obniżających się napięciach rosną straty przesyłowe mocy biernej i maleją moce ładowania linii. W referacie przedstawiono podstawowe zależności bilansu mocy biernej od wzrostu zapotrzebowania mocy, które następnie wykorzystano do oszacowania punktu pracy sieci przesyłowej, w którym straty przesyłowe mocy biernej przewyższają sumaryczną moc bierną wytwarzaną przez poprzeczne pojemności.

Słowa kluczowe: sieć przesyłowa, stabilność napięciowa, deficyt mocy biernej

1. WPROWADZENIE

1.1. Stabilność napięciowa sieci przesyłowej

Obliczenia rozpyływu mocy są podstawą do wszystkich analiz pracy SEE. Przy coraz bardziej rozbudowanym systemie wymaga się od metod obliczeniowych szybkiej i pewnej zbieżności, natomiast program obliczeniowy powinien umożliwić uwzględnienie dużego systemu przy krótkim czasie obliczeń. Najczęściej obecnie używana metoda Newtona-Raphsona, zaliczana jest do grupy metod gradientowych. Wykorzystuje ona model admitancyjny SEE. Zastosowanie technik macierzy rzadkich pozwala na uwzględnienie dużych systemów, dla których stopień wypełnienia tej macierzy wynosi poniżej 1%. W [1] pokazano zastosowanie podstaw teoretycznych, zaś w [2] praktyczne zastosowania do wielkich SEE.

Jednym z zagadnień istotnych dla normalnej pracy systemu staje się stabilność napięciowa, jak pokazała awaria w krajowym systemie 26.06.2006 roku [3]. Zastosowanie metod rozpyływowych jest często spotykanym podejściem do badania stabilności napięciowej, poprzez określenie granicy stabilności na podstawie wartości otrzymanych w procesie iteracyjnym (zerowanie jakobianu) [4]. Publikacje [3, 5] zwracają uwagę na możliwość zastosowania do praktycznych badań tzw. rozwiązań bliskich z podstawowymi. Wiąże się to z wielokrotnymi rozwiązaniami rozpyływu mocy. Wada metody Newtona-

Raphsona staje się w tym przypadku jej zaletą. Start do obliczeń z punktu znacznie odległego od rozwiązania prowadzi do drugiego rozwiązania. Dla stanów ustalonych jest ono nieprzydatne jako niestabilne i nie istnieje praktycznie. Jednak zbliżanie się tegoż punktu do właściwego punktu pracy świadczy o zbliżaniu się stanu pracy SEE do granicy stabilności, określanej przez jedno rozwiązanie podwójne. Przedstawiane na płaszczyźnie współrzędnych prostokątnych napięć węzłowych w postaci okręgów mocy czynnej i biernej lub mocy czynnej i modułu napięcia. Okręgi te przecinające się w dwóch punktach dla stanów odległych od granicznego stają się styczne dla stanu granicznego [6].

1.2. Badanie stabilności napięciowej sieci przesyłowej

W ośrodkach operatorów większości SEE na świecie od lat prowadzi się systematyczne analizy stabilności napięciowej sieci przesyłowych, wykorzystując do tego celu głównie programy rozpyływu mocy. Analizy te wykonywane są dla sieci przesyłowych w cyklu rocznym, miesięcznym, tygodniowym i dobowym [7].

Związek stabilności napięciowej ze stabilnością kątową jest niewielki, dlatego w dużych połączonych systemach utrata stabilności napięciowej w wydzielonych obszarach sieci może nastąpić bez utraty synchronizmu [8]. Stabilność napięciowa jest związana ze zmianami napięć w węzłach sieci przesyłowej w kolejnych stanach ustalonych, występujących po zmianie zapotrzebowania mocy w SEE. Utrata stabilności napięciowej może być spowodowana bądź to zbyt dużym wzrostem zapotrzebowania mocy w systemie, bądź awaryjnym wyłączeniem silnie obciążonej linii przesyłowej lub generatorów.

Podczas wzrostu obciążenia, wskutek istniejących ograniczeń wytwarzania mocy biernej przez generatory synchroniczne, w danej części SEE może wystąpić jej deficyt. Wywoła to obniżenie napięcia i w konsekwencji zmniejszenie generacji mocy biernej przez linie przesyłowe oraz dalsze ograniczenie zdolności jej wytwarzania przez generatory. Moc bierna popłynie do obszaru deficytowego ze źródeł dalej położonych, powodując wzrost obciążenia linii przesyłowych, a tym samym strat mocy biernej. W takiej sytuacji, awaryjne wyłączenie w obsza-

rze deficytowym mocno obciążonej (przeciążonej) linii przesyłowej lub istotnego źródła mocy biernej, może spowodować systematyczne obniżanie się napięć, aż do wystąpienia lawiny napięć. Na warunki napięciowe istotny wpływ mają także układy regulacji napięcia generatorów synchronicznych oraz transformatorów. W tych ostatnich układy regulacji przekładni pod obciążeniem starają się utrzymać zadany poziom napięcia po stronie sieci rozdzielczej i tym samym mogą się przyczynić się do pogłębienia deficytu mocy biernej.

Deficyt mocy biernej w systemie uruchamia proces utraty stabilności napięciowej, rozwijającej się zwykle przez kilka, kilkanaście, a czasami kilkadziesiąt minut. Zwykle deficyt mocy biernej występuje w dającym się wydzielić obszarze SEE. W kolejnych etapach tego procesu mamy do czynienia z odmiennymi zjawiskami i stosownie do etapu mogą być stosowane różne środki w celu zapobiegania awarii. W dużych połączonych SEE utrata stabilności napięciowej rozwija się zwykle przy częstotliwości niewiele odbiegającej od znamionowej.

2. BILANS STRAT MOCY BIERNEJ

2.1. Straty przesyłowe mocy biernej

Problemem znacznie trudniejszym od wyznaczenia teoretycznego punktu utraty stabilności napięciowej jest oszacowanie punktu pracy sieci przesyłowej, w którym pojawią się symptomy zagrożenia stabilności napięciowej. Zwłaszcza, jeśli to dotyczy sieci przesyłowej, w której generatory pracują w pobliżu granicznych mocy biernych. Wówczas bardzo ważną rolę spełnia szybkość wzrostu bilansu strat przesyłowych mocy biernej i mocy ładowania w odniesieniu do wzrostu poboru mocy biernej przez odbiory węzłowe sieci przesyłowej. Straty przesyłowe mocy biernej Q_{str} są wprost proporcjonalne do kwadratu przesyłanych mocy i odwrotnie proporcjonalnie do kwadratu napięcia. Wzrost przesyłanych mocy powoduje wzrost strat biernych i obniżenie napięcia, a obniżenia napięcia mocy pogłębia wzrost tych strat:

$$Q_{str} = X \frac{P^2 + Q^2}{U^2} \quad (1)$$

gdzie: P, Q – przesyłana moc czynna i bierna od węzła początkowego do węzła końcowego gałęzi, U – napięcie w węźle początkowym gałęzi. X – reaktancja podłużnej gałęzi.

Obniżenie się napięcia w sieci przesyłowej powoduje zmniejszenie wytwarzania mocy biernej Q_{lad} przez poprzeczne pojemności linii i baterii kondensatorów oraz innych statycznych kompensatorów zgodnie z zależnością

$$Q_{lad} = -BU^2 \quad (2)$$

gdzie: B jest susceptancją pojemnościową poprzeczną linii, baterii kondensatorów oraz statycznych kompensatorów.

Wraz z dalszym wzrostem zapotrzebowania mocy w stacjach GPZ 110/SN napięcia w sieci przesyłowej obniżają się i straty przesyłowe mocy biernej znacznie przewyższają moc ładowania. Ponadto, część generatorów zaczyna pracować ze stałą mocą bierną, gdyż nie może ona przekroczyć ściśle określonych wartości minimalnej $Q_{g \min}$ i maksymalnej $Q_{g \max}$ - wynikających z wykresu kołowego generatora [9]. W przypadku osiągnięcia jednej

z tych granicznych wartości mocy biernej generator staje się węzłem typu PQ, czyli węzeł o zadanej mocy czynnej i biernej, zamiast węzłem typu PU o zadanej mocy czynnej i napięciu. Z chwilą osiągnięcia granicznych wartości mocy biernej generowanej dalszy wymagany przyrost mocy generowanej jest pokrywany przez odległy węzeł bilansujący. Wówczas wzrost mocy biernej wytwarzanej przez generatory jest wykorzystywany głównie na pokrycie strat przesyłowych, a nie na podwyższanie napięć.

2.2. Krytyczny punkt pracy sieci przesyłowej

Na szczególną uwagę zasługuje punkt pracy sieci przesyłowej, w którym bierne straty przesyłowe przewyższają sumaryczną moc ładowania [10].

$$Q_{str} > Q_{lad} \quad (3)$$

Wówczas generatory pokrywają tylko wzrost mocy biernej pobieranej ze stacji GPZ 110/SN. Punkt zrównania się strat przesyłowych z mocą ładowania w sieci przesyłowej nazwany został krytycznym punktem pracy (KPP) sieci przesyłowej. Pojawienie się punktu przelomowego jest jedynie symptomem pogarszania się stabilności napięciowej, a nie punktem niestabilności napięciowej. Przekroczenie tego punktu powoduje dalsze obniżanie napięć węzłowych mimo wzrostu wytwarzania mocy biernej generowanej w elektrowniach. Obniżanie się napięć jest gwałtownie przyśpieszane z chwilą, gdy wytwarzanie mocy biernej w elektrowniach dochodzi do technicznych ograniczeń. Przykładowo, pojawienie się punktu KPP w sieci przesyłowej, w której wszystkie generatory pracują w trybie PU nie jest informacją o zagrożeniu stabilności napięciowej, a jedynie o przesyłaniu mocy biernej na duże odległości. Operator sieci przesyłowej, w oparciu o aktualne sumaryczne wartości mocy czynnej i biernej wytwarzanej przez elektrownie, powinien móc oszacować punkt pracy sieci, w którym wystąpi zrównanie biernych strat przesyłowych z bierną mocą generowaną przez poprzeczne pojemności. Punkt KPP może być wykryty tylko w takim modelu sieci przesyłowej, w którym wszystkie baterie kondensatorów są zamodelowane jako poprzeczna susceptancja pojemnościowa w węzłach sieci.

3. MODELE SIECI PRZESYŁOWEJ

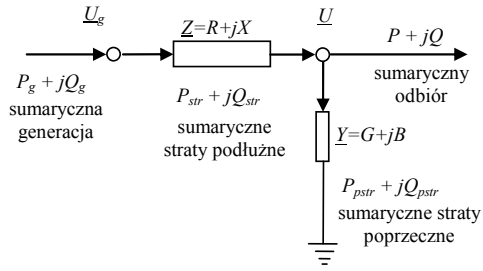
3.1. Model testowy sieci przesyłowej

Do testowania uwzględniono 12 węzłowy system przesyłowy o napięciu znamionowym 110 kV (5 węzłów, pozostałe to węzły rozdzielcze średniego napięcia). Współpracuje on z systemem napięcia sztywnego na poziomie 220 kV. Odbiory te posiadają tg φ nie większy niż 0,4. Cztery generatory lokalne pokrywają w większości zapotrzebowanie na moc czynną i bierną, brakująca część pobierana jest z napięcia wyższego. Generatory pracują z transformatorem blokowym bezpośrednio na poziom napięcia 110 kV. Przyjęto układ elementów równoległych, pozwala to na sprawdzenie zachowania się systemu przy wyłączeniach połączeń równoległych. Rozważany SEE składa się z 12 węzłów, 12 linii oraz 10 transformatorów.

3.2. Model zastępczy sieci przesyłowej

W celu szybkiego oszacowania przelomowego punktu pracy sieci przesyłowej wykorzystano uproszczony

system zastępczy, który został przedstawiony na rysunku 1.



Rys. 1. Zastępczy model systemu elektroenergetycznego

Parametry podłużne R , X modelu obliczane są w oparciu o wyniki planowanego rozplywu mocy. Wymaga to wyliczenia sumarycznej (całkowitej) generacji, sumarycznego odbioru, całkowitych strat podłużnych i całkowitych strat poprzecznych:

$$P_g = \sum_{i=1}^N P_{gi}, \quad Q_g = \sum_{i=1}^N Q_{gi} \quad (4)$$

sumaryczny odbiór:

$$P = \sum_{i=1}^N P_i, \quad Q = \sum_{i=1}^N Q_i \quad (5)$$

sumaryczne straty podłużne:

$$P_{str} = \sum_{j=1}^M P_{strj}, \quad Q_{str} = \sum_{j=1}^M Q_{strj} \quad (6)$$

oraz sumaryczne straty poprzeczne:

$$P_{pstr} = \sum_{j=1}^M P_{pstrj} + \sum_{i=1}^N P_{shi}, \quad Q_{pstr} = \sum_{j=1}^M Q_{pstrj} + \sum_{i=1}^N Q_{shi} \quad (7)$$

gdzie: P_{gi} , Q_{gi} – moc czynna i bierna wytwarzana w i -tym węźle, P_i , Q_i – moc czynna i bierna odbierana w i -tym węźle, P_{shi} , Q_{shi} – moc czynna i bierna poprzecznego kompensatora w i -tym węźle, P_{strj} , Q_{strj} – straty podłużne mocy czynnej i biernej w j -tej gałęzi, P_{pstrj} , Q_{pstrj} – straty poprzeczne mocy czynnej i biernej w j -tej gałęzi, N – liczba węzłów w systemie łącznie z węzłem bilansującym, M – liczba gałęzi (linii i transformatorów) w systemie.

Parametry R , X , G , B zastępczego modelu systemu przesyłowego wynikają z przyjęcia założenia, że napięcia w węzłach elektrownianych są wyrażone w jednostkach względnych i mają wartości równe 1,05. Z wartości strat podłużnych:

$$P_{str} = R \frac{P_g^2 + Q_g^2}{U_g^2}, \quad Q_{str} = X \frac{P_g^2 + Q_g^2}{U_g^2} \quad (8)$$

wyliczyć można odpowiednio podłużną rezystancję i reaktancję obwodu zastępczego

$$R = \frac{U_g^2}{P_g^2 + Q_g^2} P_{str}, \quad X = \frac{U_g^2}{P_g^2 + Q_g^2} Q_{str} \quad (9)$$

Moduł napięcia w węźle zastępczego odbioru wynosi

$$U = \sqrt{\left(U_g - \frac{P_g R + Q_g X}{U_g} \right)^2 + \left(-\frac{P_g X - Q_g R}{U_g} \right)^2} \quad (10)$$

Znając moduł napięcia zastępczego odbioru oraz wartości strat poprzecznych mocy czynnej i biernej

$$P_{pstr} = GU^2, \quad Q_{pstr} = -BU^2 \quad (11)$$

można wyznaczyć odpowiednio zastępczą poprzeczną konduktancję i susceptancję obwodu zastępczego:

$$G = \frac{P_{pstr}}{U^2}, \quad B = -\frac{Q_{pstr}}{U^2} \quad (12)$$

3.3. Wielokrotne rozwiązania rozplywu mocy

Równania mocy węzłowych w prostokątnym układzie współrzędnych napięcia węzłowego mają następującą postać:

$$\underline{S}_i = P_i + jQ_i = (e_i + jf_i) \sum_{j=1}^N (g_{ij} - jb_{ij})(e_j + jf_j) \quad (13)$$

gdzie: \underline{S}_i – moc zespolona węzłowa, $\underline{U}_i = e_i + jf_i$ – napięcie węzłowe w i -tym węźle, $Y_{ij} = g_{ij} + jb_{ij}$ – konduktancja i susceptancja wzajemna, $Y_{ii} = g_{ii} + jb_{ii}$ to konduktancja i susceptancja własna węzła i .

Jeżeli przyjmijemy założenie, że w określonym węźle i zmieniają się jedynie składowe napięcia, a wszystkie pozostałe składowe są stałe, to otrzymujemy z równania (13) następującą nową postać dla mocy P oraz Q

$$P_i = (e_i^2 + f_i^2)g_{ii} + K_i e_i + L_i f_i \quad (14)$$

$$Q_i = -(e_i^2 + f_i^2)b_{ii} - L_i e_i + K_i f_i \quad (15)$$

gdzie: $K_i = \sum_{j=1, j \neq i}^N (g_{ij} e_j - b_{ij} f_j)$ oraz $L_i = \sum_{j=1, j \neq i}^N (b_{ij} e_j + g_{ij} f_j)$

Po przekształceniu wyrażenia (14) i (15) otrzymujemy równania okręgu mocy czynnej

$$\frac{P_i}{g_{ii}} + \frac{K_i^2 + L_i^2}{4g_{ii}^2} = \left(e_i + \frac{K_i}{2g_{ii}} \right)^2 + \left(f_i + \frac{L_i}{2g_{ii}} \right)^2 = r_P^2 \quad (16)$$

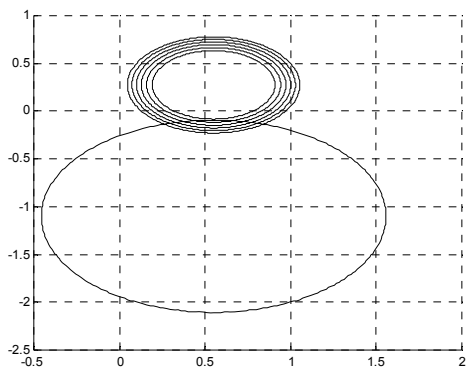
oraz równanie okręgu mocy biernej

$$-\frac{Q_i}{b_{ii}} + \frac{K_i^2 + L_i^2}{4b_{ii}^2} = \left(e_i + \frac{L_i}{2b_{ii}} \right)^2 + \left(f_i - \frac{K_i}{2b_{ii}} \right)^2 = r_Q^2 \quad (17)$$

Dla węzłów generacyjnych, dla których zadany jest moduł napięcia równanie (17) zostaje zastąpione równaniem

$$U_{gi}^2 = e_{gi}^2 + f_{gi}^2 \quad (18)$$

Przy zastosowaniu pewnych ograniczeń, punkty odpowiadające zerowej wartości jakobianu J równań rozpliwowych można traktować jako granicę stabilności lokalnej systemu [8].



Rys. 2. Graficzna ilustracja rozwiązań bliskich w prostokątnym układzie napięć węzłowych - zmiana mocy biernej

4. WNIOSKI KOŃCOWE

Teoretyczny punkt utraty stabilności napięciowej sieci przesyłowej jest powszechnie w literaturze rozumiany jako utrata zbieżności procesu iteracyjnego rozwiązywania równań węzłowych. Jest to punkt, w którym zbiegają się dwa bliskie rozwiązania, czyli wyznacznik macierzy Jacobiego jest bliski zeru. W praktyce operatorskiej znacznie ważniejsze jest oszacowanie punktu pracy sieci przesyłowej, w którym pojawią się symptomy zagrożenia stabilności napięciowej. W referacie przedstawiono sposób szacowania krytycznego punktu pracy sieci przesyłowej w oparciu o krzywe bilansu biernych strat przesyłowych i mocy ładowania dla uproszczonego, zastępczego systemu przesyłowego. Przedstawiono sposób szacowania krytycznego punktu pracy w oparciu o zastępczy 2-węzłowy model sieci przesyłowej. Pojawienie się krytycznego punktu jest tylko symptomem pogarszania się stabilności napięciowej, a nie jej utratą. Następnie po wyznaczeniu zastępczej podłużnej rezystancji i reaktancji oraz zastępczej poprzecznej konduktancji i susceptancji oszacowano, w oparciu o sumaryczną wartość mocy czynnej i biernej wytwarzanych przez elektrownie w danej chwili, zapas przesyłu mocy pozornej. Dokonano

tego przez wielokrotne obliczanie rozpliwu mocy w dociążanym systemie.

5. BIBLIOGRAFIA

1. Taylor C.W., Power system voltage stability, McGraw-Hill, 1994, ISBN 0- 07-063184- 0
2. Morison K, Practical methods of voltage stability analysis, IEEE 2002 Summer Meeting, Chicago, IL, USA, 3, 1504-1509
3. Sobierajski M. Rojewski W.: Po czerwcowej awarii 2006, czyli warunki bezpiecznego przesyłania energii elektrycznej, Automatyka Elektroenergetyczna Nr 3/2007, ISSN 7230-7815
4. Łabuzek M., Lis R., Projekt Badawczy Zamawiany Nr PBZ- MEiN-1/2/2006 Bezpieczeństwo elektroenergetyczne kraju, Modele matematyczne systemu przesyłowego i rozdzielczego. Zadanie: 3.2.1, SPR 41/08, Politechnika Wroclawska, Instytut Energoelektryki, Wrocław, 2008
5. Łabuzek M., Lis R., Stabilność napięciowa dużego systemu elektroenergetycznego, Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review), str. 188-191, r. 85 nr 12/2009, ISSN 0033-2097
6. Łabuzek M., Lis R., Wielokrotne rozwiązania równań rozpliwu mocy. Transactions on computer applications in electrical engineering : XIV Conference ZKwE '09, Poznań, April 20-22, 2009
7. Sobierajski M., Rojewski W., Praktyczne sposoby zapobiegania lawinie napięć na przykładzie awarii krajowego systemu elektroenergetycznego 26 czerwca 2006 roku, APE 2007, Jurata, 13-15 czerwca 2007
8. Kremens Z., Sobierajski M., Analiza systemów elektroenergetycznych. WNT, Warszawa 1996, ISBN 83-204-2060-1
9. Machowski J., Generator synchroniczny jako źródło mocy biernej przy dużych zmianach napięcia w systemie elektroenergetycznym, Przegląd Elektrotechniczny, r. 84, nr 2, s. 41-47, 2008, ISSN 0033-2097
10. Sobierajski M., Rojewski W., Wpływ strat mocy biernej na wystąpienie lawiny napięcia w sieci przesyłowej, Archiwum Energetyki, T. 39, nr 1, s. 77-89, 2009, ISSN: 0066-684X

SIMULATION OF REACTIVE POWER IMBALANCES IN THE TRANSMISSION POWER GRID THREATENED BY THE PROBLEM OF VOLTAGE INSTABILITY – CONFERENCE PAPER

Key-words: transmission grid, voltage stability, reactive power balance

The reactive power balance in the transmission power grid depends on the reactive power produced by the power stations and the value generated by the capacitive power lines and static compensators. Reactive transmission losses become greater than shunt capacitive generation at the turning-point of voltage stability. Then lowering bus voltages drive EPS into voltage collapse point. The paper presents the balance of reactive power depending on the power demand growth, which are then used to estimate the operating point of the transmission network, in which the reactive power transmission losses are greater than the total reactive power generated by the shunt capacity.