

doi:10.15199/48.2015.05.30

Współzależność nastawień przekładni poprzecznych przesuwników fazowych wpływająca na stany pracy systemu elektroenergetycznego składającego się z wielu podsystemów

Streszczenie. Przedstawiono zarys modelowania matematycznego przesuwników fazowych (stosowanych w systemach elektroenergetycznych, składających się często z wielu podsystemów) a następnie przedstawiono wybrane wyniki serii symulacji różnych stanów pracy systemu testowego przy pełnym zakresie regulacji (w tym przypadku dwóch) przesuwników fazowych (pracujących w dwóch podsystemach testowego systemu elektroenergetycznego). Przedstawiono spostrzeżenia i wnioski.

Abstract. An outline of mathematical modeling of phase shifters (used in power systems, often composed of many subsystems) and then presents some results of a series simulate different operating conditions of the test system with the full range of control (in this case two) phase shifters (working in the two subsystems of the test power system). Presents the findings and conclusions. (Interdependence transmission settings transverse phase shifters affecting the operating states of the power system consisting of several subsystems).

Słowa kluczowe: transformator, przesuwnik fazowy, model matematyczny, stany pracy.

Keywords: transformer, phase shifting transformer, mathematical model, steady states.

Wstęp

We współczesnych systemach elektroenergetycznych (SEE) często stosowane są zespoły transformatorowe z regulacją przekładni zespolonej. Urządzenia takie, zwane przesuwnikami fazowymi (PF), pozwalają skutecznie wpływać na kształtowanie pożądanych przepływów głównie mocy czynnej [11]. Idea stosowania PF nabiera szczególnego znaczenia w warunkach konkurencji w energetyce oraz możliwości planowania handlu energią elektryczną, tranzytów mocy itp.

W niniejszym artykule autor skupił się na przedstawieniu wpływu nastaw przekładni poprzecznych (PP) PF na pracę SEE, ukazując ich pozytywne oraz negatywne strony.

Zasada działania PF

PF jest transformatorem (TR), który wprowadza kąt przesunięcia fazowego, wyprzedzający lub opóźniający, pomiędzy napięcie wyjściowe a napięcie wejściowe. Uzyskanie takiego zjawiska możliwe jest w wyniku dodania do występującego w węźle napięcia dodatkowej siły elektromotorycznej (SEM) [2, 5].

Zasadę działania PF przedstawiono na przykładzie PF dwurdzeniowego, symetrycznego [2, 5]. W wyniku wprowadzenia przesunięcia fazowego pomiędzy zacisk źródłowy S i zacisk strony obciążenia L dla jednej fazy (L1) napięcie źródłowe wzbudza transformator regulacyjny. Na skutek tego powstaje napięcie faz sąsiednich L2 – L3 z odczepu. Jest to napięcie przesunięte w fazie o 90° w stosunku do napięcia wzbudzającego. Następnie to napięcie jest transformowane przez transformator dodawczy pomiędzy zacisk źródłowy S, a zacisk strony obciążenia L dla fazy L1. Do napięcia źródłowego V_S dodaje się wektorowo napięcie ΔU . Uzyskuje się napięcie V_L przesunięte w fazie w stosunku do napięcia V_S . Poprzez podzielenie uzwojenia dodawczego na połowę i zasilenie transformatora regulacyjnego ze środkowego odczepu następuje równoczesna (symetryczna) zmiana napięcia odniesienia i wyjściowego. W efekcie zmiana SEM dodawanej ΔU powoduje tylko zmianę fazy napięcia nie powodując zmiany wartości modułu napięcia [5].

Przepływ mocy

W celu określenia przepływu mocy czynnej przez gałąź ij sieci, której model matematyczny w najprostszym przypadku może być sprowadzony do reaktancji linii X_{ij}

łączącej szyny zbiorcze i (wysyłające moc czynną) do szyn zbiorczych j (odbierających moc) – należy posłużyć się przedstawionymi poniżej równaniami (1) do (5) (opisanymi szerzej np. w [8, 9]). Występująca w równaniach (1) i (2) przekładnia poprzeczna θ_{ij} występuje w modelu (5) w sposób jawny oraz jest uwzględniana w argumentach funkcji $\sin(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij})$ oraz $\cos(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij})$. PF włączony jest szeregowo w linię łączącą węzeł wysyłający moc z węzłem odbierającym moc, co powoduje zmianę wypadkowego kąta δ pomiędzy napięciami tych węzłów i w ten sposób oddziałuje na przepływ mocy czynnej. Przepływ mocy czynnej między węzłami można opisać przy użyciu równań:

$$(1) \quad P_{ij} = g_{ij}^e V_i^2 + V_i V_j \left(g_{ij}^e \cos(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) + b_{ij}^e \sin(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) \right)$$

$$(2) \quad P_{ji} = g_{ij}^e g_{ij}^2 V_j^2 + V_j V_i \left(g_{ji}^e g_{ij} \cos(\delta_j - \delta_i + \theta_{ij}) + b_{ji}^e g_{ij} \sin(\delta_j - \delta_i + \theta_{ij}) \right)$$

które w przybliżeniu można zapisać w postaci [2, 5, 6]:

$$(3) \quad P_{ij} \approx \frac{V_i \cdot V_j}{X_{ij} + X_{PST}} \cdot \sin(\delta_j - \delta_i + \theta_{ij})$$

gdzie: P_{ij} – moc czynna wpływająca do gałęzi ij od strony szyn i , P_{ji} – moc czynna wpływająca do gałęzi ij od strony szyn j , V_i – moduł napięcia szyn i , V_j – moduł napięcia szyn j , X_{ij} – reaktancja zastępcza wzdłużna linii ij , (między szynami ij), X_{PST} – reaktancja przesuwnika fazowego, pracującego szeregowo z linią ij , y_{ij} – element ij macierzy Y_{ij} , g_{ij} – część rzeczywista elementu y_{ij} , b_{ij} – część urojona elementu y_{ij} , g_{ij} – przekładnia wzdłużna transformatora ij , θ_{ij} – przekładnia poprzeczna transformatora ij , δ_i – argument napięcia węzłowego (zespolonego) U_i , Y_{ij} – macierz admitancyjna węzłowa zgodna gałęzi ij .

Macierz węzłowa opisana jest wzorem:

$$(4) \quad Y_{ij} = \begin{bmatrix} y_{ii} & y_{ij} \\ y_{ji} & y_{jj} \end{bmatrix}$$

W przypadku opisu systemu z PF macierz admittancejna przybiera postać:

$$(5) \quad Y_{ij} = \begin{bmatrix} y_{ii}^e & y_{ij}^e g_{ij} e^{j\theta_{ij}} \\ y_{ji}^e g_{ij} e^{-j\theta_{ij}} & y_{jj}^e g_{ij}^2 \end{bmatrix}$$

Powstawanie przepływów kołowych mocy czynnej

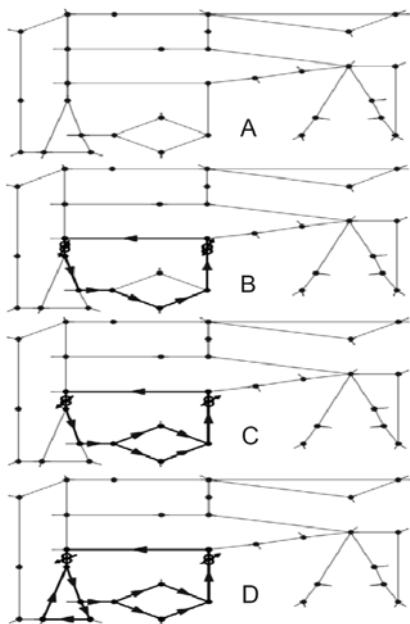
PF pełnią istotną funkcję w kształtowaniu przepływów kołowych mocy czynnej. W przypadku Krajowego Systemu Elektroenergetycznego szczególnie istotna jest instalacja tego typu urządzeń na liniach połączeń transgranicznych zlokalizowanych na zachodniej granicy państwa. W opracowaniach [3, 4] przedstawiono przepływy kołowe mocy przez linie elektroenergetyczne państw europejskich:

- a) środkowo-wschodnich:
 - i) Niemcy→Polska→Czechy→Austria→Niemcy,
 - ii) Niemcy→Czechy→Niemcy,
- b) środkowo-zachodnich:
 - Niemcy→Holandia→Belgia→Francja→Niemcy.

Wpływ PF na kształtowanie przepływów kołowych (wzmocnienie oraz ograniczanie) przedstawiono na przykładzie symulacji stanów pracy testowego systemu elektroenergetycznego New England (NE) [9]. System ten zawierał 31 węzłów z czego ok. 95% o napięciu znamionowym 400 kV i ok. 5,5 GW mocy zainstalowanej. W omawianym przykładzie przedstawiono sytuację, gdzie w wyniku zmiany przekładni poprzecznej PF powstały przepływy kołowe. W odwrotnej sytuacji poprzez regulację PP PF można doprowadzić do eliminacji niepożądanych przepływów mocy czynnej.

Wyniki symulacji przedstawiają cztery stany pracy systemu NE:

- a) bez PF – w systemie nie występują przepływy kołowe mocy (rys. 1A)
- b) zainstalowano dwa przesuwники fazowe:
 - i) przy nastawie kąta 10° PP obu PF pojawił się przepływ kołowy mocy czynnej w sześciu gałęziach (rys. 1B),
 - ii) w wyniku zwiększania nastawy kąta PP PF (rys. 1C i rys. 1D) „włączane” zostały następne gałęzie do obszaru przepływów kołowych mocy czynnej.



Rys. 1. System New England (A) wraz z zainstalowanymi PF powodującymi przepływ kołowy mocy czynnej w sześciu (B), ośmiu (C) i jedenastu gałęziach (D).

Model matematyczny

Przeprowadzono symulację, której celem była analiza wpływu PF na SEE. Do obliczeń wykorzystano metodę macierzy wrażliwości wyznaczanych metodą przyrostową [1, 7, 8, 9, 10]. Zdefiniowano wektor sterowań E , wektor wymuszeń D i wektor zmiennych zależnych X . Przyjęto funkcję niezbilansowań węzłowych F (przekładnie wzdłużne (PW) i PP PF uwzględnione zostały w macierzy Y).

$$(6) \quad E = [P_{g2} P_{g3} \dots P_{gG} | V_1 \dots V_G | \mathcal{G}_1 \dots \mathcal{G}_T | \theta_1 \dots \theta_{T\theta}]^T$$

$$(7) \quad X = [P_{g1} | \delta_2 \delta_3 \dots \delta_N | Q_{g1} \dots Q_{gG} | V_{G+1} \dots V_N]^T$$

$$(8) \quad D = [P_{d1} \dots P_{dN} | Q_{d1} \dots Q_{dN}]^T$$

gdzie: G – zbiór węzłów generatorowych sieci, T – zbiór transformatorów z regulacją przekładni wzdłużnej, T_θ – zbiór transformatorów z regulacją przekładni poprzecznej, P_{gi} – moc czynna generowana w węźle i , P_{di} – moc czynna odbierana w węźle i , Q_{gi} – moc bierna indukcyjna generowana w węźle i , Q_{di} – moc bierna indukcyjna odbierana w węźle i , N – zbiór węzłów sieci, N_i – zbiór węzłów połączonych bezpośrednio z węzłem i .

Wektory E , D , X występują w funkcji niezbilansowań węzłowych F o następujących elementach:

$$(9) \quad F_{Pi} = P_{gi} - P_{di} - V_i^2 g_{ii} - + V_i \sum_{j \in N_i} V_j (g_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) + b_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j)) \quad \wedge i \in N$$

$$(10) \quad F_{Qi} = Q_{gi} - Q_{di} + + V_i^2 b_{ii} - V_i \sum_{j \in N_i} V_j (g_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) - b_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j)) \quad \wedge i \in N$$

(przy czym zazwyczaj $P_{gi} = 0$ dla $i > G$)

Wektor mocy gałęziowych W przyjęto jako wektor, o elementach zespolonych, którymi są moce gałęziowe:

$$(11) \quad S_{ij} = V_i^2 (g_{ii}^e - j b_{ii}^e) + + V_i V_j ((g_{ij}^e - j b_{ij}^e) \cos(\delta_i - \delta_j) + (g_{ij}^e + j b_{ij}^e) \sin(\delta_i - \delta_j)) \quad \wedge i \in N$$

Należy zauważyć, że $X = X(E, D)$ oraz $W = W(E, D)$. W ustalonym stanie bazowym pracy systemu znane są E^0 , D^0 i odpowiadające im $X = X^0$ oraz $W = W^0$. Funkcja niezbilansowań węzłowych jest równa zeru

$$(12) \quad F(E^0, X^0, D^0) = 0.$$

W przypadku, gdy wektor sterowań E i/lub wektor wymuszeń D doznają niewielkich przyrostów, może zostać osiągnięty nowy stan ustalony opisany wektorami:

$$(13) \quad E^0 + \Delta E, \quad X^0 + \Delta X, \quad D^0 + \Delta D, \quad W^0 + \Delta W$$

przy czym:

$$(14) \quad F(E^0 + \Delta E, X^0 + \Delta X, D^0 + \Delta D) = 0.$$

W bliskim otoczeniu stanu bazowego można skorzystać z rozwinięcia funkcji $F(E, X, D)$ w szereg Taylora. Otrzymuje się w ten sposób:

$$(15) \quad F(E^0, X^0, D^0) = 0$$

$$(16) \quad F(E^0 + \Delta E, X^0 + \Delta X, D^0 + \Delta D) = 0$$

$$(17) \quad \begin{aligned} F(E^{\circ}+\Delta E, X^{\circ}+\Delta X, D^{\circ}+\Delta D) &\approx \\ &\approx F(E^{\circ}, X^{\circ}, D^{\circ})+F_E\Delta E+ F_X\Delta X+F_D\Delta D \end{aligned}$$

gdzie macierze Jacobiego:

$$(18) \quad \begin{aligned} F_E &= \left. \frac{\partial F(E, X, D)}{\partial E} \right|_{E^{\circ}, X^{\circ}, D^{\circ}} \\ F_X &= \left. \frac{\partial F(E, X, D)}{\partial X} \right|_{E^{\circ}, X^{\circ}, D^{\circ}} \\ F_D &= \left. \frac{\partial F(E, X, D)}{\partial D} \right|_{E^{\circ}, X^{\circ}, D^{\circ}} \end{aligned}$$

Prowadzi to do określenia macierzy wrażliwości opisanych następującymi zależnościami:

$$(19) \quad \Delta X \approx -F_X^{-1} (F_E \Delta E + F_D \Delta D)$$

$$(20) \quad \Delta X \approx S_{XE} \Delta E + S_{XD} \Delta D$$

gdzie:

$$(21) \quad S_{XE} = -F_X^{-1} F_E$$

$$(22) \quad S_{XD} = -F_X^{-1} F_D$$

W analogiczny sposób postępuje się z przyrostami mocy gałęziowych:

$$(23) \quad \Delta W \approx W_X \Delta X + W_E \Delta E$$

$$(24) \quad \Delta W \approx W_X (S_{XE} \Delta E + S_{XD} \Delta D) + W_E \Delta E$$

$$(25) \quad \Delta W \approx S_{WE} \Delta E + S_{WD} \Delta D$$

gdzie:

$$(26) \quad S_{WE} = W_X S_{XE} + W_E$$

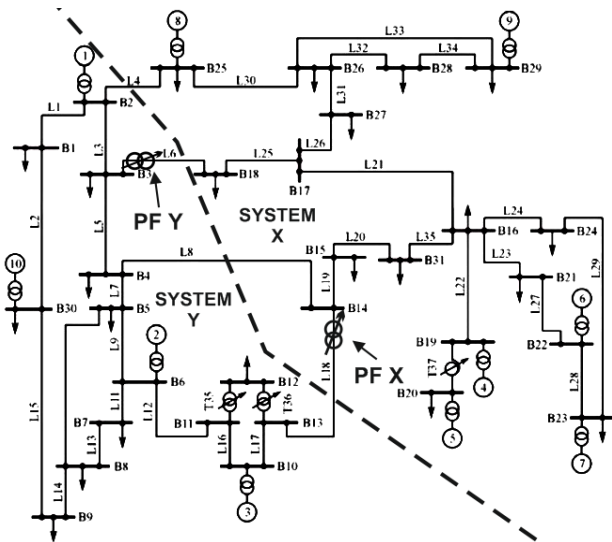
$$(27) \quad S_{WD} = W_X S_{XD}$$

W powyższych równaniach (najczęściej) moc czynna jednego z węzłów (arbitralnie wybranego węzła bilansowego) jest zmienną zależną. Jest to moc czynna P_{gl} z wektora zmiennych zależnych X . Argument napięcia węzła bilansowego jest ustalony i nie występuje w żadnym z wektorów.

Zdefiniowane powyżej kluczowe macierze wrażliwości można wykorzystywać do analizy stanów pracy systemu z bliskiego otoczenia stanu bazowego, a nawet – stosując tzw. metodę kompensacji [7] – analizować skutki awaryjnego wyłączenia wybranych elementów sieciowych.

Model symulacyjny

Symulacje przeprowadzono na SEE New England. Obliczenia wykonano przy wykorzystaniu programu TRACE (rozbudowanego o dodatkowe moduły).



Rys.2. Schemat system testowego New England

Na potrzeby symulacji, w testowanym SEE wyodrębniono dwa podsystemy (ozn. jako X i Y). W każdym z podsystemów w gałęzi międzysystemowej umieszczono PF, z czego jeden w gałęzi 18 (węzeł 13 – węzeł 14) będącej własnością systemu X zaś drugi w gałęzi 6 (węzeł 3 – węzeł 18) stanowiącej własność systemu Y. Zastosowano idealne PF. Limit przepustowości linii elektroenergetycznych ustalono na ok. 600 MW.

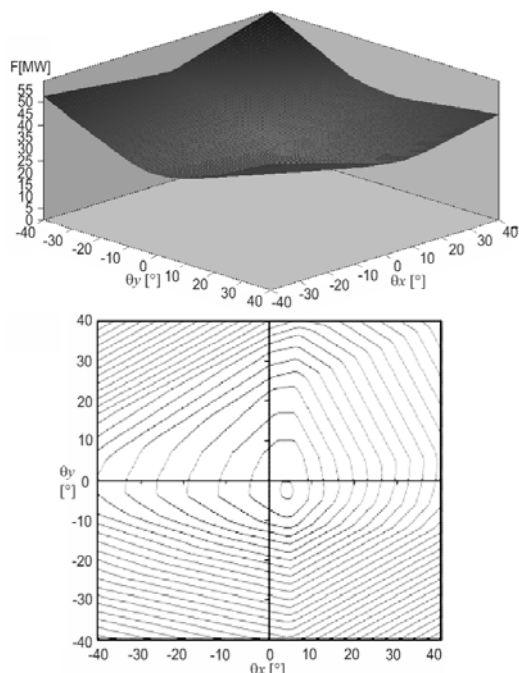
Wyniki symulacji

W trakcie symulacji zmieniano nastawy PP PF X i Y w zakresie $\pm 40^\circ$. Wyniki badań, w postaci zamieszczonych poniżej wykresów, przedstawiają jak PF oddziałują na parametry i stany pracy systemu(ów). Celem wykresów jest wskazanie:

- najmniej i najbardziej korzystnych nastaw PP PF,
- wpływu regulacji PP PF zainstalowanego w jednym SEE na drugi system,
- scenariuszy zachowania systemu w przypadku zdarzeń losowych (np. wyłączenia linii) i skutków regulacji przepływu mocy przy użyciu PF.

Przykład 1. Wpływ nastawień PP PF na straty mocy w systemie X.

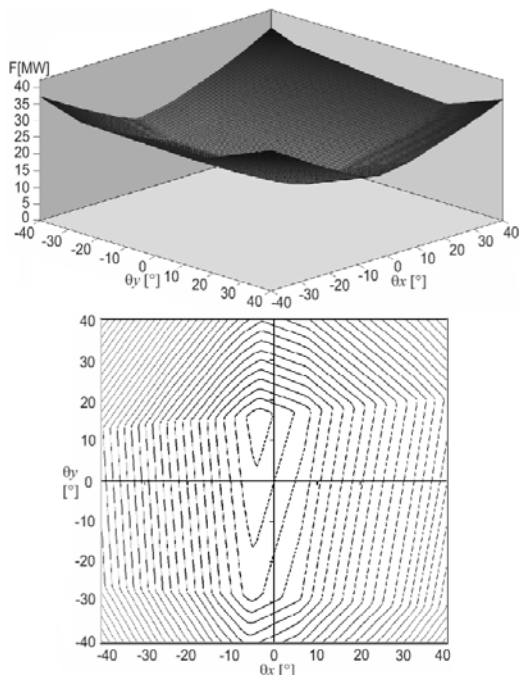
Niezależnie od nastaw kąta PP obu PF powstają w systemie X straty o wartości powyżej 25 MW. Na podstawie wykresów można odczytać, że najmniejsze straty występują przy nastawie PP PF X w zakresie od 3° do 6° zaś w PP PF Y w zakresie od -5° do 0° .



Rys. 3. Wykres zależności strat mocy w systemie X od kąta przekładni poprzecznych obu PF

Przykład 2. Wpływ nastawień PP PF na straty mocy w systemie Y.

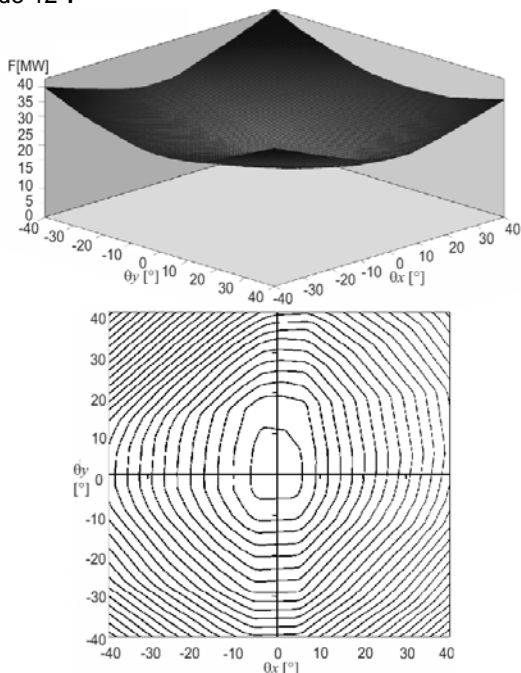
Niezależnie od nastaw kąta PP obu PF powstają w systemie Y straty mocy o wartości powyżej 15 MW. Na podstawie wykresów można odczytać, że najmniejsze straty występują przy nastawie kąta PP PF X w zakresie od -1° , zaś PP PF Y w zakresie od 3° do 18° .



Rys. 4. Wykres zależności strat mocy w systemie Y od nastawień kąta przekładni poprzecznej PF

Przykład 3. Wpływ nastawień PP PF na sumę strat mocy w systemie X i Y.

Łączne straty w systemie X i Y niezależnie od nastaw kątów PP obu PF osiągają wartość co najmniej 30 MW. Najmniejsze straty mocy występują przy nastawie kąta PP PF X w zakresie od -6° do 6° zaś PP PF Y w zakresie od -7° do 12° .

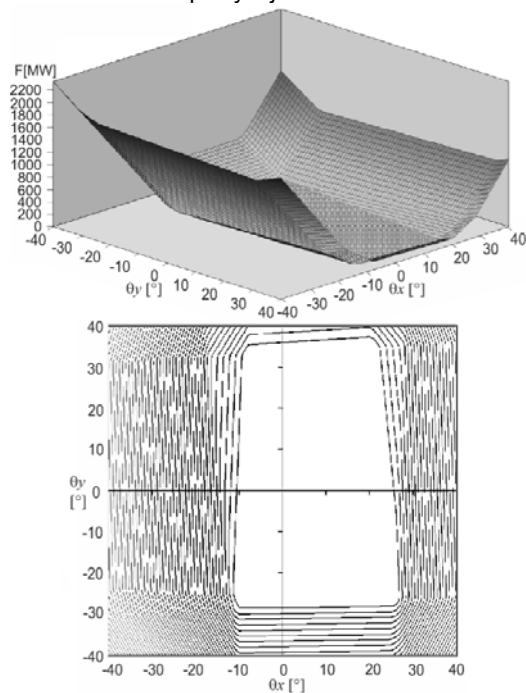


Rys. 5. Wykres zależności strat mocy w systemie X i Y od nastawień kąta przekładni poprzecznej PF

Przykład 4. Wpływ nastawień PP PF na sumę przekroczeń limitów mocy w gałęziach transgranicznych.

Suma przekroczeń limitów mocy w gałęziach międzysystemowych jest bliska zera w zakresie nastawy kątów PP PF X od -28° do 35° zaś PF Y w zakresie od -11° do 36° . Regulacja PP PF X ma niewielki wpływ na przekroczenia limitów mocy. W przypadku regulacji PP PF Y wpływ na przekroczenia limitów mocy jest duży i

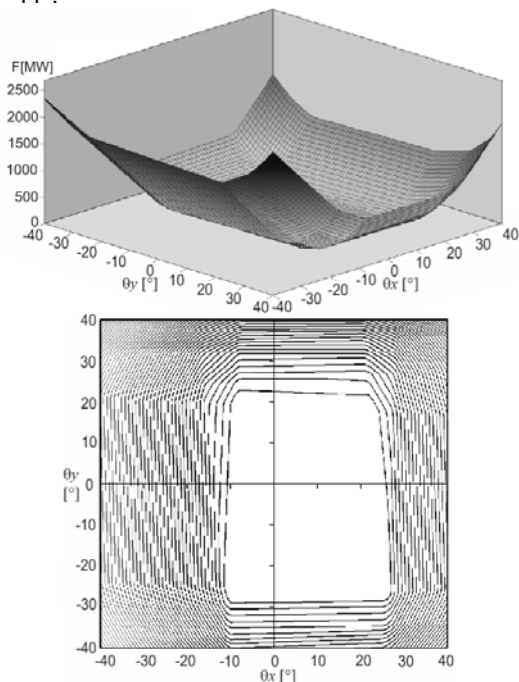
gwałtownie wzrasta dla wartości PP w zakresie poniżej -10° oraz w zakresie powyżej 26° .



Rys. 6. Wykres zależności sumy przekroczeń limitów mocy w gałęziach transgranicznych od nastawień kąta przekładni poprzecznej PF

Przykład 5. Wpływ nastawień PP PF na sumę przekroczeń limitów mocy gałęziowych (wszystkich). Spojrzenie na system Y.

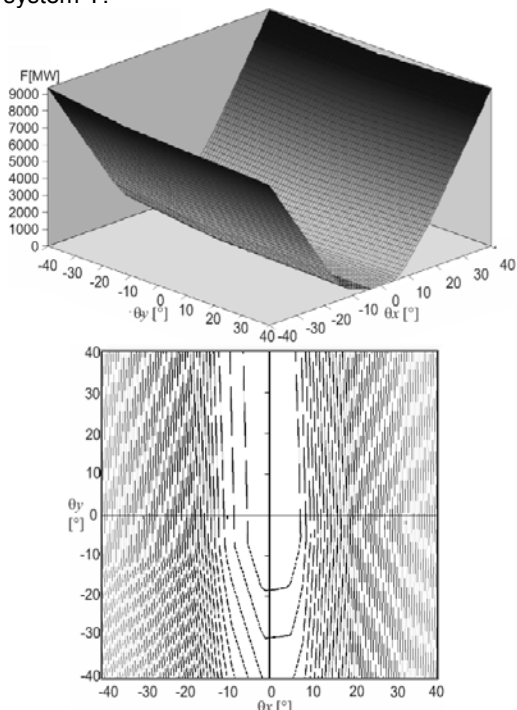
Suma przekroczeń limitów mocy gałęziowych systemu Y przekracza wartość zera przy nastawach kątów PP PF X w zakresie poniżej -11° oraz powyżej 26° zaś PP PF Y w zakresie kątów nastaw poniżej -28° oraz powyżej 36° . Gwałtowny wzrost sumy przekroczeń mocy systemu Y występuje w przypadku zmniejszenia przekładni PF X poniżej -11° .



Rys. 7. Wykres zależności sumy przekroczeń limitów mocy w gałęziach systemu Y od nastawień kąta przekładni poprzecznej PF

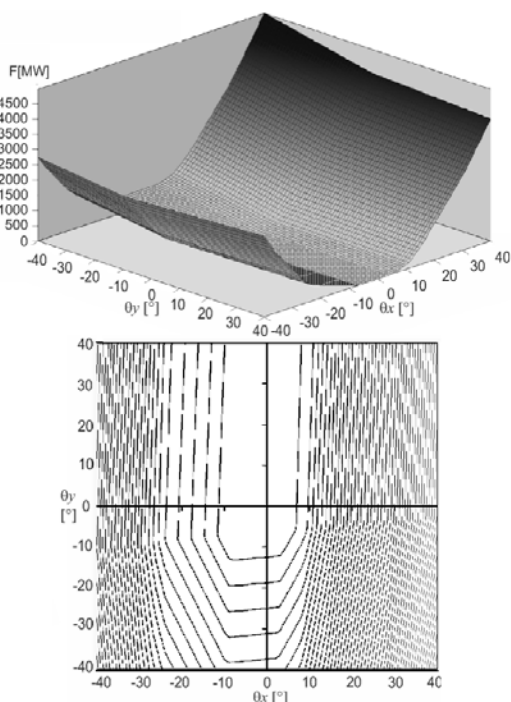
Przykład 6. Wpływ nastawień PP PF na sumę przekroczeń limitów mocy gałęziowych (wszystkich), w przypadku wyłączenia jednej gałęzi. Spojrzenie na system Y.

W przypadku wyłączenia jednej z gałęzi (nr 8) zauważalne jest, że znaczny zakres regulacji PP PF X ma niekorzystny wpływ na sumę przekroczeń limitów mocy gałęziowych systemu Y. W przypadku regulacji PP PF X niekorzystny wpływ na system Y występuje poniżej -6° oraz powyżej 7° . Zakres regulacji PP PF Y ma niewielki wpływ na system Y.



Rys. 8. Wykres zależności sumy przekroczeń limitów mocy w gałęziowych systemu Y w przypadku wyłączenia gałęzi nr 8

Przykład 7. Wpływ nastawień PP PF na sumę przekroczeń limitów mocy gałęziowych (wszystkich) w systemie X.



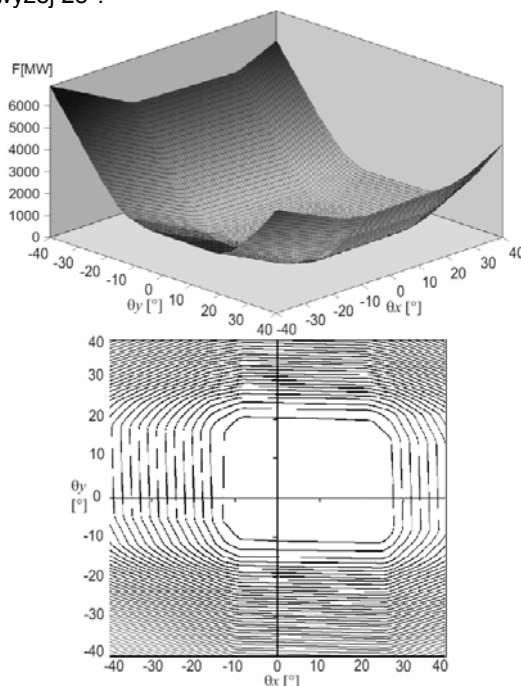
Rys. 9. Wykres zależności sumy przekroczeń limitów mocy gałęziach w systemie X od nastawień kąta PP PF

Suma przekroczeń limitów mocy gałęziowych systemu X jest większa od zera przy nastawach PP PF X w zakresie poniżej -12° oraz powyżej 7° .

Regulacja PP PF Y ma niewielki wpływ na system X. Gwałtowny wzrost sumy przekroczeń mocy systemu X występuje w przypadku zwiększenia nastawy kąta PP PF X powyżej 10° .

Przykład 8. Wpływ nastawień PP PF na sumę przekroczeń limitów mocy gałęziowych (wszystkich), w przypadku wyłączenia jednej gałęzi. Spojrzenie na system X.

W przypadku wyłączenia jednej z gałęzi (nr 4) zauważalne jest, że regulacja PP PF Y ma niekorzystny wpływ na sumę przekroczeń limitów mocy gałęziowych systemu Y przy nastawie kąta PP w zakresie poniżej -10° oraz powyżej 20° . Niekorzystny zakres regulacji PP PF X na system X występuje w zakresie poniżej -13° oraz powyżej 28° .



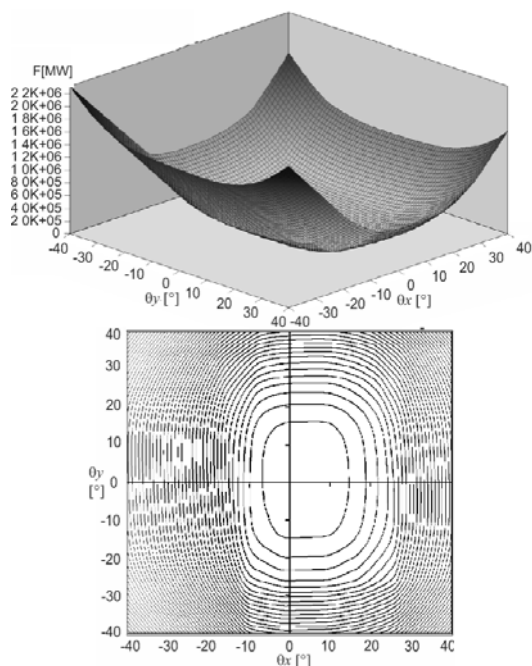
Rys. 10. Wykres zależności sumy przekroczeń limitów mocy gałęziowych systemu X w przypadku wyłączenia gałęzi nr 4

Przykład 9. Wpływ nastawień PP PF na sumę przekroczeń limitów mocy gałęziowych (wszystkich) systemu X i Y w przypadku wyłączenia kolejno jednej z trzydziestu ośmiu gałęzi (N-1).

Na podstawie analizy przekroczeń limitów gałęziowych systemów X i Y należy zauważyć (Rys. 11), że najkorzystniejszy zakres regulacji PP PF X występuje w przedziale od -7° do 14° zaś w przypadku PP PF Y występuje w przedziale od -14° do 16° . Najmniej korzystne nastawy PP PF występują przy maksymalnych wartościach nastaw kątów PP obu PF a szczególnie PF Y.

Podsumowanie

Przedstawione w niniejszym artykule możliwości regulacji nastaw kątów PP PF wskazują istotny wpływ urządzeń tego typu na SEE. PF zwiększają straty w SEE lecz w zależności od wysterowania mogą przeciwdziałać lub wywoływać przepływy kołowe mocy czynnej. Stosowanie PF w sieciach oczkowych jest powszechnie ugruntowanym sposobem wpływania na proporcje mocy czynnych w gałęziach.



Rys. 11. Wykres zależności sumy przekroczeń limitów mocy gałęziowych w systemie X i Y, w przypadku wyłączenia jednej gałęzi (N-1) z (kolejno) trzydziestu ośmiu gałęzi

Z przedstawionych dziewięciu przykładów wynika, iż oddziaływanie PF ma charakter globalny tzn. nie ogranicza się do obszaru danego SEE i może wywoływać różnorodne oddziaływania promieniujące na sąsiednie systemy. Regulacja korzystna z punktu widzenia systemu własnego może mieć niekorzystny wpływ i być trudna do korygowania przez system sąsiedni. W przypadku kilku PF należy wyodrębnić zakresy regulacji korzystne wzajemnie, korzystne tylko dla jednej strony (jednego podsystemu) ale też (i wtedy należałoby minimalizować rozległość tych zakresów) niekorzystne dla wszystkich stron. Wszystko to może być podstawą do właściwego kształtowania obszarów regulacji (z szacowaniem kosztów wzajemnych ustępstw lub kompromisowego podziału korzyści). Autor prowadzi

prace nad tak widzianymi metodami określania (i kształtowania) współzależności nastawień PP PF.

LITERATURA

- [1] Bernas S., Systemy elektroenergetyczne. *Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa* (1982)
- [2] Guide for the Application, Specification, and Testing of Phase-Shifting Transformers, IEC 62032, *IEEE Std. C57.135.2001*
- [3] Joint study by CEPS, MAVIR, PSE and SEPS regarding the issue of unplanned flow in the CEE region, www.pse.pl (02.2013)
- [4] Korab R., Owczarek R., Kształtowanie transgranicznych przepływów mocy z wykorzystaniem przesuwników fazowych, *Rynek Energii*, X(2012)
- [5] Klimpel A., Lubicki W., Wybrane zagadnienia doboru przesuwników fazowych, *Konferencja NOT Aktualne problemy budowy, rozwoju i eksploatacji sieci energetycznych w Polsce Warszawa* (2010)
- [6] Verboomen J., D. Van Hertem, Schavemaker P.H., Kling W.L., Belmans R., Phase Shifting Transformers: Principles and Applications. Future Power System, *International Conference*, (2005)
- [7] Wood A.J., Wollenberg B.F., Power generation, operations and control. *John Wiley&Sons, Second Ed.*, (1996)
- [8] Ziemianek S., Metody śledzenia przepływów w sieciach elektroenergetycznych w zastosowaniu do analiz techniczno-ekonomicznych, *Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa* (2008)
- [9] Ziemianek S., Śledzenie przepływów mocy w sieciach elektroenergetycznych jako mechanizm na drodze ewolucji opisu SEE, *Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa* (2013)
- [10] Ziemianek S., Wybrane zastosowania metody śledzenia przepływów mocy czynnej w analizach stanów pracy ustalonej systemu elektroenergetycznego, *Konferencja Aktualne Problemy w Elektroenergetyce, Jurata* (2007)
- [11] Ziemianek S., Zespoły transformatorowe z regulacją przekładni poprzecznej w optymalizacji stanów pracy, *Konferencja OPE'05, Jachranka* (2005)

Autorzy: mgr inż. Mariusz Radwański, Politechnika Warszawska, Instytut Elektroenergetyki, Zakład Sieci i Systemów Elektroenergetycznych, ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa, E-mail: mariusz.radwanski@jen.pw.edu.pl