

WPLYW UKŁADU POŁĄCZEŃ NA ESTYMACJĘ STANU SYSTEMU ELEKTROENERGETYCZNEGO – REFERAT KONFERENCYJNY

Tomasz OKOŃ¹, Kazimierz WILKOSZ²

Instytut Energoelektryki Politechniki Wrocławskiej, Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław

1. Tel: 71 320 39 20 fax: 71 320 26 56 e-mail: tomasz.okon@pwr.wroc.pl

2. Tel: 71 320 35 88 fax: 71 320 26 56 e-mail: kazimierz.wilkosz@pwr.wroc.pl

Streszczenie: Praca dotyczy estymacji stanu systemu elektroenergetycznego. Oprócz niezawodności, estymacja stanu powinna posiadać takie cechy, jak: wysoka dokładność wyników, krótki czas realizacji w każdej możliwej sytuacji, tj. winna zapewnić równie korzystne wyniki dla różnych stanów, jak również dla różnych układów połączeń w systemie. W pracy rozpatrywany jest wpływ układu połączeń w systemie na właściwości estymacji stanu. W celu pokazania różnic właściwości estymacji stanu dla różnych układów połączeń przedstawiane są wyniki analiz dla 14-węzłowego systemu testowego IEEE. W analizach zwracana jest uwaga na uwarunkowanie procesu obliczeniowego, dokładność wyników estymacji oraz liczbę iteracji, po której otrzymywany jest wynik. Na zakończenie pracy, z punktu widzenia estymacji stanu systemu elektroenergetycznego, zwracana jest uwaga na najważniejsze konsekwencje zmiany układu połączeń systemu.

Słowa kluczowe: system elektroenergetyczny, estymacja stanu, wektor stanu.

1. WPROWADZENIE

We współczesnych systemach komputerowych dyspozycji mocy estymacja stanu systemu elektroenergetycznego odgrywa istotną rolę [1], [2]. Na podstawie gromadzonego w wykorzystaniu układów teletransmisji nadmiarowego zbioru informacji pomiarowej pozwala ona wyznaczyć najbardziej wiarygodne oszacowanie wektora stanu systemu elektroenergetycznego. Znajomość tego wektora jest wykorzystywana dla potrzeb monitorowania systemu elektroenergetycznego oraz do kolejnych obliczeń wspomagających dyspozytora mocy. Obliczeniom estymacyjnym stawiane są wymagania wysokiej dokładności wyników otrzymywanych w możliwie najkrótszym czasie w każdej możliwej sytuacji. Estymacja stanu winna zapewnić równie korzystne wyniki dla różnych stanów, jak również dla różnych układów połączeń.

W wielu pracach podawane są wyniki analizy własności estymacji stanu systemu elektroenergetycznego, np. [3]-[6]. Jednak nie ma pracy, w której rozpatrywany byłby wpływ zmiany układu połączeń systemu na własności tej estymacji. Celem pracy jest przedstawienie wyników badań dotyczących właściwości estymacji stanu systemu elektroenergetycznego realizowanej dla różnych układów połączeń.

Analiza przeprowadzana jest dla 14-węzłowego systemu testowego IEEE. Rozpatrywana jest praca tego systemu w układzie zamkniętym oraz po takich wyłączeniach, że nie ma w nim żadnego oczka. Przejście rzeczywistego systemu od pracy w układzie zamkniętym do pracy w układzie połączeń, w którym nie ma oczek, jest stosunkowo mało prawdopodobne. Niemniej uwzględnienie takiego przejścia pozwala łatwiej zauważyć wpływ układu połączeń w systemie na wyniki estymacji stanu. Wskazane przejście jest bowiem przejściem pomiędzy skrajnymi przypadkami połączeń, tj. pomiędzy wyjściowym układem połączeń, w którym występują wszystkie istniejące w systemie oczka, oraz układem połączeń, w którym nie ma żadnego oczka.

Analizy porównawcze estymacji stanu dla różnych układów połączeń obejmują uwarunkowanie procesu obliczeniowego, dokładność wyników estymacji oraz liczbę iteracji, po której otrzymywany jest wynik.

2. SFORMUŁOWANIE PROBLEMU

W pracy rozpatrywany jest wpływ zmiany układu połączeń systemu elektroenergetycznego na wyniki estymacji stanu tego systemu realizowanej z wykorzystaniem metody najmniejszych ważonych kwadratów, tj. przy założeniu, że minimalizowana funkcja celu ma postać [1], [7]:

$$J(x) = \frac{1}{2} [z - h(x)]^T R^{-1} [z - h(x)], \quad (1)$$

gdzie: z jest m -wymiarowym wektorem pomiarów; $h(x)$ jest wektorem nieliniowych funkcji wiążących wielkości mierzone z n -wymiarowym wektorem stanu x ; R jest macierzą diagonalną z elementami $R_{ii} = \sigma_{ii}^2$, σ_{ii}^2 jest wariancją i -tego pomiaru.

Znajdowanie rozwiązania estymacji stanu wiąże się z iteracyjnym rozwiązywaniem równań normalnych:

$$G(x^k)(x^{k+1} - x^k) = H^T(x^k)R^{-1}[z - h(x^k)], \quad (2)$$

gdzie: k oznacza numer iteracji, $G(x)$ jest macierzą wzmocnienia, $H(x)$ jest macierzą Jacobiego.

Macierze $\mathbf{G}(\mathbf{x})$ oraz $\mathbf{H}(\mathbf{x})$ obliczane są ze wzorów:

$$\mathbf{G}(\mathbf{x}^k) = \mathbf{H}^T(\mathbf{x}^k)\mathbf{R}^{-1}\mathbf{H}(\mathbf{x}^k), \quad (3)$$

$$\mathbf{H}(\mathbf{x}^k) = \frac{\partial \mathbf{h}(\mathbf{x}^k)}{\partial \mathbf{x}^k}. \quad (4)$$

Przyjmowane jest, że wektor stanu systemu elektroenergetycznego jest w prostokątnym układzie współrzędnych, tzn. elementami tego wektora są części rzeczywiste i urojone napięć w węzłach systemu.

W badaniach oceniane są właściwości estymacji stanu z punktu widzenia uwarunkowania procesu obliczeniowego, dokładności wyników estymacji stanu oraz liczby iteracji. Dla oceny uwarunkowania procesu obliczeniowego wykorzystany jest wskaźnik uwarunkowania, który jest definiowany następująco:

$$\text{cond}(\mathbf{G}) = \lambda_M/\lambda_m, \quad (5)$$

gdzie: λ_m , λ_M są minimalnym i maksymalnym modulem wartości własnych macierzy \mathbf{G} .

Dokładność estymacji stanu systemu elektroenergetycznego jest oceniana za pomocą wskaźników: J_e/J_m [8] oraz SEE (State Estimation Error). Do obliczania wielkości J_e oraz J_m wykorzystywane są wzory:

$$J_m = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{(z_i - z_i^r)^2}{\sigma_i^2}, \quad (6)$$

$$J_e = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{(\hat{z}_i - z_i^r)^2}{\sigma_i^2}, \quad (7)$$

gdzie: z_i , \hat{z}_i , z_i^r są, odpowiednio, wartością mierzoną, estymowaną i rzeczywistą i -tej wielkości mierzonej.

Wskaźnik SEE jest śladem macierzy kowariancji błędów obciążających wyznaczone zmienne stanu (tj. odwrotności macierzy \mathbf{G}) [9].

3. WYNIKI ANALIZ

W celu zbadania na drodze obliczeniowej wielkości zmian właściwości estymacji stanu systemu elektroenergetycznego ($\text{cond}(\mathbf{G})$, J_e/J_m , SEE) pracującego w układzie oczkowym przy przejściu do pracy w układzie promieniowym brany jest pod uwagę zmodyfikowany 14-węzłowy system testowy IEEE [10]. Modyfikacje systemu testowego polegały na zwiększeniu mocy czynnej generowanej w węźle 2 z 0,4 na 1,4 jw oraz na dwukrotnym zwiększeniu granicznych węzłowych mocy biernych w węzłach typu PV, za wyjątkiem węzła 2, dla którego przyjmowane jest:

$$Q_{\min} = -1 \text{ jw} \text{ oraz } Q_{\max} = 1 \text{ jw}.$$

Zmiana układu połączeń w systemie testowym z układu oczkowego na promieniowy jest osiągana poprzez wyłączenie gałęzi: 1-2, 2-3, 2-5, 4-9, 10-11, 12-13, 13-14.

Dla każdego rozpatrywanego układu połączeń systemu testowego znajdowanych jest 9 rozpliwów mocy poprzez pomnożenie mocy węzłowych przypadku bazowego przez współczynnik, zmieniający się z krokiem 0,1 w granicach od 0,5 do 1,3. Dla danego rozpliwu mocy generowanych jest 1000 zestawów pomiarów obciążonych losowymi błędami o rozkładach normalnych z zerowymi wartościami oczekiwa-

nymi i odchyleniami standardowymi wyznaczanymi ze wzorów:

- dla mocy czynnej

$$\sigma = 1/3[(0.001 + 0.0025)FS + 0.02M], \quad (8)$$

- dla mocy biernej

$$\sigma = 1/3[(0.001 + 0.005)FS + 0.02M], \quad (9)$$

- dla modułu napięcia

$$\sigma = 1/3[(0.0005 + 0.0025)FS + 0.003M], \quad (10)$$

gdzie: FS jest zakresem pomiarowym, M jest modulem zmierzonej wartości [11], [12].

Dla pomiarów mocy węzłowej w węźle 7 systemu testowego, będącego węzłem o zerowej mocy węzłowej, przyjmowane jest, że $\sigma = 0,0001$. Zakresy pomiarowe mierzonej mocy węzłowej oraz przepływów mocy w gałęziach są równe 1 za wyjątkiem: a) mocy węzłowych w węźle 7, dla których $FS = 0$; b) czynnych mocy węzłowych w węzłach 2 oraz 3 i także przepływów mocy czynnych w gałęziach 2-4, 3-4, 4-5, dla których $FS = 2$; c) węzłowej mocy czynnej w węźle 1 i przepływów mocy czynnej w gałęzi 1-2, dla których $FS = 3$. Gałąź i - j jest gałęzią pomiędzy węzłami i oraz j .

W czasie analiz rozważane są następujące warianty lokalizacji pomiarów: *Wariant 1* – są mierzone tylko napięcia i moce węzłowe; *Wariant 2* – są mierzone napięcia i moce węzłowe oraz przepływy mocy na obu końcach gałęzi, które są włączone w obu rozważanych wersjach układu połączeń systemu testowego; *Wariant 3* (tylko dla systemu testowego pracującego w układzie bazowym) – są mierzone napięcia i moce węzłowe oraz przepływy mocy na obu końcach wszystkich gałęzi. *Wariant 3* układu połączeń traktowany jest jako wariant odniesienia.

Wyniki obliczeń przeprowadzonych dla *Wariantu 1* i *Wariantu 2* lokalizacji pomiarów przedstawione są na rysunkach 1 – 6. Na rysunkach tych podawane są względne różnice pomiędzy wartościami analizowanego wskaźnika dla rozpatrywanego wariantu i *Wariantu 3* lokalizacji pomiarów, definiowane za pomocą wzoru:

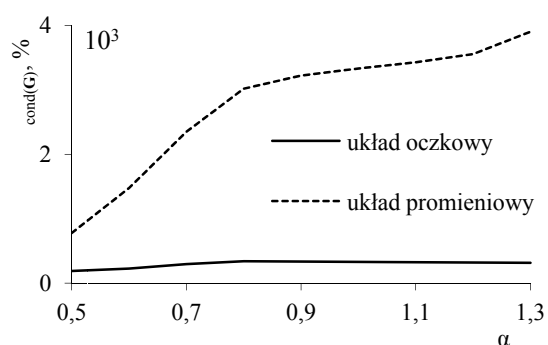
$$\delta_w = \frac{w - w_{\text{wariant3}}}{w_{\text{wariant3}}} \cdot 100\%, \quad (11)$$

gdzie: w jest rozpatrywanym wskaźnikiem dla *Wariantu 1* i *Wariantu 2* ($\text{cond}(\mathbf{G})$, J_e/J_m , SEE), w_{wariant3} jest odpowiednim ze wskaźników $\text{cond}(\mathbf{G})$, J_e/J_m , SEE dla *Wariantu 3*.

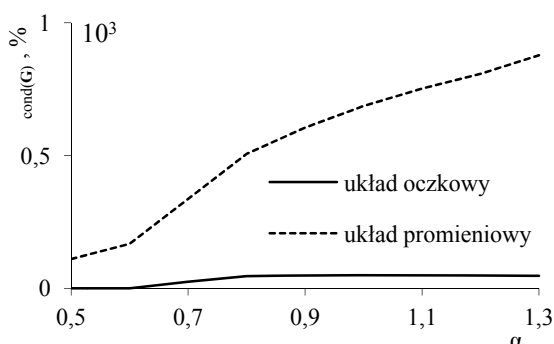
Na rysunkach 1 oraz 2. przedstawione są wyniki obliczeń wskaźnika uwarunkowania, na rysunkach 3 oraz 4 - wyniki obliczeń wskaźnika J_e/J_m , a na rysunkach 5 oraz 6 - wyniki obliczeń wskaźnika SEE .

Można zauważyć, iż w stosunku do wariantu odniesienia (*Wariantu 3*) wskaźnik uwarunkowania estymacji stanu, jak również wskaźnik SEE dla oczkowego układu połączeń pogarsza się w znacznie mniejszym stopniu aniżeli dla układu promieniowego. Jest to niezależne od nadmiaru danych pomiarowych, a więc zarówno dla *Wariantu 1* jak i *Wariantu 2*. Należy zauważyć, że dla mniejszego nadmiaru danych, tj. dla *Wariantu 1*, wskaźnik $\delta_{\text{cond}(\mathbf{G})}$ i także wskaźnik δ_{SEE} mają

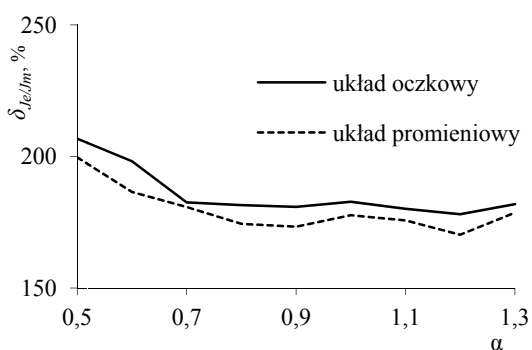
większe wartości (co oznacza gorsze uwarunkowanie i dokładność obliczeń) aniżeli dla *Wariantu 2*, niezależnie od układu połączeń.



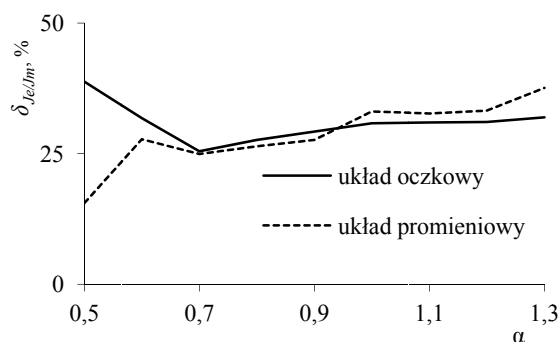
Rys.1. Względna różnica wskaźnika uwarunkowania dla *Wariantu 1* i *Wariantu 3* ($\text{cond}(G)$) w funkcji obciążenia systemu.



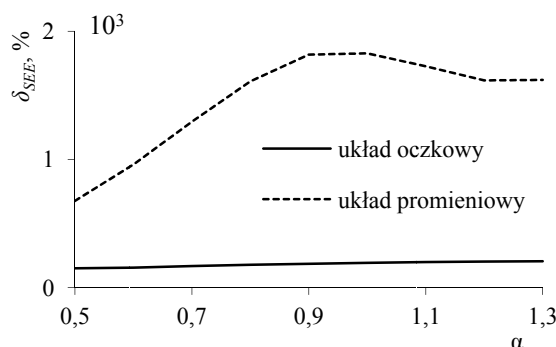
Rys.2. Względna różnica wskaźnika uwarunkowania dla *Wariantu 2* i *Wariantu 3* ($\text{cond}(G)$) w funkcji obciążenia systemu.



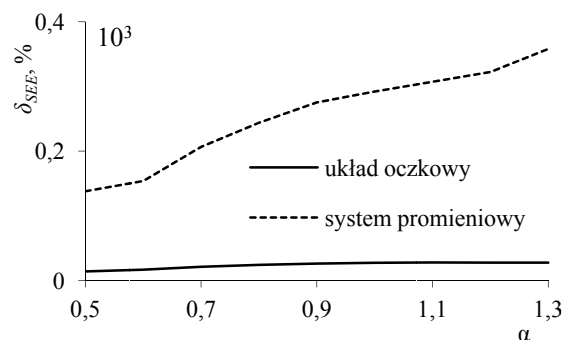
Rys.3. Względna różnica wskaźnika J_e/J_m dla *Wariantu 1* i *Wariantu 3* (J_e/J_m) w funkcji obciążenia systemu.



Rys.4. Względna różnica wskaźnika J_e/J_m dla *Wariantu 2* i *Wariantu 3* (J_e/J_m) w funkcji obciążenia systemu.



Rys.5. Względna różnica wskaźnika SEE dla *Wariantu 1* i *Wariantu 3* (SEE) w funkcji obciążenia systemu.



Rys.6. Względna różnica wskaźnika SEE dla *Wariantu 2* i *Wariantu 3* (SEE) w funkcji obciążenia systemu.

Analizując wyniki obliczeń wskaźnika J_e/J_m , można zauważyć, że według tego wskaźnika dla *Wariantu 1* dokładniejsze wyniki estymacji uzyskiwane są dla promieniowego układu połączeń.

Dla *Wariantu 2*, dla odpowiednio dużych obciążeń (współczynnik $\alpha > 0,9$), dokładniejsze wyniki estymacji uzyskiwane są dla układu oczkowego. Należy dodać, że w omawianych obliczeniach różnice pomiędzy układem promieniowym a oczkowym nie są duże.

Dokładność wyników estymacji określana za pomocą wskaźnika J_e/J_m dla *Wariantu 1* w odniesieniu do *Wariantu 3* jest gorsza o około 150-200%, natomiast dla *Wariantu 2* o około 20-30%.

4. WNIOSKI KOŃCOWE

Przedstawione w pracy analizy wyraźnie wskazują na to, że korzystniejsze wyniki estymacji stanu systemu elektroenergetycznego otrzymywane są dla oczkowego układu pracy. Dla tego układu pracy, jest większa liczba powiązań pomiędzy węzłami systemu, aniżeli dla promieniowego układu pracy.

Jedynie wskaźnik J_e/J_m ma w pewnych przypadkach korzystniejsze wartości dla układu promieniowego aniżeli dla układu oczkowego. Jest to konsekwencją tego, iż zakresy pomiarowe układów pomiarowych są jednakowe dla obu układów połączeń podczas, gdy przepływy mocy są znacznie mniejsze dla układu oczkowego. Błędy względne pomiarów dla układu oczkowego są więc większe aniżeli dla układu promieniowego. Należy zauważyć, że różnice pomiędzy wartościami wskaźnika J_e/J_m dla branych pod uwagę układów połączeń systemu nie są duże. Stosunkowo duże różnice obserwowane są pomiędzy wartościami wskaźników $\text{cond}(G)$ oraz SEE . Wartości tych wskaźników są znacznie mniejsze dla estymacji stanu systemu elektroenergetycznego pracującego w układzie oczkowym aniżeli dla systemu elektroenergetycznego pracującego w układzie promieniowym. Ponadto w tym ostatnim przypadku, estymacja stanu wymaga średnio około 5 iteracji podczas, gdy dla pracy systemu w układzie oczkowym - około 4.

5. BIBLIOGRAFIA

1. Monticelli A.: Electric Power System State Estimation, Proceedings of the IEEE, Nr. 2 (88), 2000, s. 262–282.
2. Wu F.F., Moslehi K., Bose A.: Power System Control Centers: Past, Present, and Future. Proceedings of the IEEE, Nr. 11 (93), 2005, s. 1890–1908.
3. Okoń T., Wilkosz K.: WLS state estimation in polar and rectangular coordinate systems for power system with UPFC: significance of types of measurements, Modern Electric Power Systems, MEPS, September 2010, s. 1-6.
4. Okoń T., Wilkosz K.: Weighted-least-squares power system state estimation in different coordinate systems, Przegląd Elektrotechniczny, Nr. 11 (86), 2010, s. 54-58.
5. Okoń T., Wilkosz K.: Influence of UPFC device on power system state estimation, IEEE PES Trondheim PowerTech, June 2011, 1-8.
6. Gu J.W., Clements K.A., Krumpholz G.R., Davis P. W.: The Solution of Ill-Conditioned Power System State Estimation Problems Via the Method of Peters and Wilkinson. IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Nr. 10 (102), 1983, s. 3473–3480.
7. Schweppe F.C., Wildes J.: Power System Static State Estimation. Part I–III. Trans. on Power Apparatus and Systems, Nr. 1 (89), 1970, s. 120–135.
8. Jegatheesan R., Duraiswamy K.: AC:Multi-terminal DC power system state estimation - a sequential approach, Elec. Machines and Power Systems, Nr. 12, 1987, s. 27-42.
9. Larson R.E., Tinney W.F., Peschon J.: State Estimation in Power Systems. Part I: Theory and Feasibility. IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Nr. 3 (89), 1970, s. 345–352.
10. www.ee.washington.edu/research/pstca/index.html.
11. Dopazo J.F., Klitin O.A., Stagg G.W., Van Slyck L.S.: State Calculation of Power Systems From Line Flow Measurements. IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Nr. 7 (89), 1970, s. 1698–1708.
12. Dopazo J.F., Klitin O.A., Van Slyck L.S.: State Calculation of Power Systems from Line Flow Measurements, Part II. IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Nr. 1 (91), 1972, s. 145–151.

IMPACT OF CONNECTIONS ON POWER SYSTEM STATE ESTIMATION – CONFERENCE PAPER

Key-words: power system, state estimation, state vector

The paper deals with power system state estimation. Apart from reliability, power system state estimation should have such features as: high accuracy of results, short performance time in each possible situation, i.e. it should ensure equally beneficial results for different states as well as for different connections in a power system. In the paper, impact of power system topology on properties of state estimation is considered. To show differences of properties of state estimation for different power system topology, results of analysis for the IEEE 14-bus test system are presented. In the analysis, one takes into account the condition of calculation process, the accuracy of estimation results and the number of iterations. At the end, from the view-point of the power system state estimation, attention is paid for the most important consequences of change of power system topology.