

NOWA METODA WYZNACZANIA IMPEDANCJI ZWARCIOWEJ SYSTEMU ELEKTROENERGE- TYCZNEGO

W artykule przedstawiono metodę wyznaczania impedancji systemu elektroenergetycznego w warunkach ruchowych. Proponowana metoda jest rozwinięciem znanej metody wyznaczania impedancji systemu bazującej na wykorzystaniu zmian prądu i napięcia w węźle pomiarowym spowodowanym przez losowe zmiany obciążenia. W przedstawionej metodzie oprócz pomiaru prądu i napięcia należy jeszcze pomierzyć moc czynną oraz sumę wykładników Lapunowa. Tak zmodyfikowana metoda umożliwia wyznaczenie rezystancji i reaktancji systemu w warunkach ruchowych.

1 WSTĘP

Impedancja zwarciowa Z_s jest jednym z ważniejszych parametrów systemu elektroenergetycznego (SEE). Od jej wielkości zależy poziom mocy zwarciowej a także wartości prądów zwarciowych. Z kolei te wielkości są podstawą do prawidłowego doboru urządzeń w fazie projektowania systemu a także ewentualnej modernizacji stacji lub linii elektroenergetycznych. Wartości prądów zwarciowych są również niezbędne do prawidłowego doboru nastaw elektroenergetycznej automatyki zabezpieczeniowej. Impedancja ta może również służyć do określenia efektywności regulacji napięcia w węźle odbiorczym. Efektywnością regulacji napięcia nazywa się stosunek faktycznej zmiany napięcia ΔU do wartości wprowadzonego napięcia dodatkowego δU [5, 5]. W sieci wysokiego napięcia największy wpływ na poziom napięcia ma przepływ mocy biernej i reaktancja wypadkowa SEE. Znajomość efektywności regulacji napięcia ułatwia prawidłową gospodarkę mocą bierną w węzłach odbiorczych oraz utrzymanie odpowiedniego poziomu napięcia. Znajomość impedancji SEE umożliwia też badanie stabilności napięciowej.

Wartość impedancji zwarciowej zależy od liczby generatorów, transformatorów, linii elektroenergetycznych oraz ich mocy, impedancji i układu połączeń między nimi. Wartość impedancji Z_s , a tym samym poziom mocy zwarciowej oraz prądów zwarciowych, nie jest wielkością stałą w czasie. Zmiany mogą wynikać zarówno ze zmiany układu połączeń w systemie (zmiany krótkookresowe) jak również z rozwoju systemu elektroenergetycznego (zmiany długookresowe).

¹ Politechnika Szczecińska, Instytut Elektrotechniki, 70-313 Szczecin, ul. Sikorskiego 37, tel. 091 4494117, e-mail: malyszko@ps.pl

Z przedstawionych rozważań wynika, że znajomość rzeczywistej impedancji SEE jest ważna dla zapewnienia optymalnej i niezawodnej pracy systemu elektroenergetycznego.

W artykule przedstawiono koncepcję wyznaczania impedancji SEE (zarówno rezystancji jak i reaktancji) w warunkach ruchowych. Przedstawiona metoda bazuje na zmienności poziomu napięcia w węzłach pomiarowych systemu elektroenergetycznego spowodowanej przez losowe zmiany prądu obciążenia wynikające z losowej zmiany obciążenia. Zgodnie z proponowaną metodą do wyznaczenia impedancji systemu konieczny jest pomiar wartości skutecznej prądu, napięcia i mocy czynnej oraz dodatkowo wyznaczenie sumy wykładników Lapunowa.

2 WYKŁADNIKI LAPUNOWA

Wykładniki Lapunowa są stosunkowo nowym i mało znanym narzędziem matematycznym umożliwiającym scharakteryzowanie układów dynamicznych [5, 5, 5, 5]. Na potrzeby niniejszej pracy istotne jest to, że jeśli układ dynamiczny opisany jest następującym równaniem różniczkowym:

$$L \frac{di}{dt} + Ri = E \sin \omega t \quad (1)$$

to suma wykładników Lapunowa jest równa 5, 5:

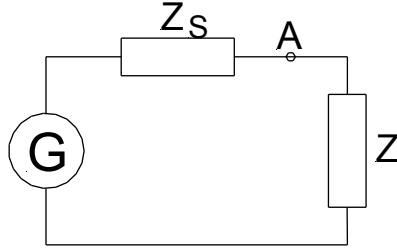
$$\lambda_{\Sigma} = \sum_i \lambda_i = -\frac{R}{L} \quad (2)$$

Opracowane są metody numeryczne wyznaczania wykładników Lapunowa z danych doświadczalnych np. [5, 5] jak również z wyrażeń funkcyjnych. Dokładny opis algorytmu dla układów wielowymiarowych wraz z gotowym programem w Fortranie można znaleźć w pracy [5] a także w takich pozycjach jak [5, 5].

3 METODA POMIARU

W literaturze przedmiotu znane są różne metody wyznaczania impedancji systemu na przykład [5, 5, 5, 5]. Do analizy wykorzystano metodę przedstawioną w [5, 5, 5]. Metoda ta korzysta z niewielkich zmian prądu i napięcia w węzle pomiarowym spowodowanych przez niewielkie losowe zmiany obciążenia. Rejestracja stochastycznych zmian prądu i napięcia odbywa się w czasie normalnej pracy systemu. Można założyć, że w krótkich odcinkach czasu pomiaru, procesy zachodzące w systemie elektroenergetycznym są stacjonarne a w czasie stabilnej pracy system jest liniowy. Zakłada się ponadto, że w czasie trwania pomiarów impedancja systemu jest stała a zmiany napięcia w węzle pomiarowym wynikają ze zmian prądu obciążenia.

Na rysunku 1. przedstawiono model systemu elektroenergetycznego przyjęty do dalszej analizy.



Rys. 1. Model systemu elektroenergetycznego, G – źródło SEM, Z_s – impedancja systemu, Z – impedancja odbiorów, A – punkt pomiarowy.

Dla dwóch różnych odbiorów Z_1 i Z_2 , w punkcie pomiarowym A , dokonuje się pomiaru prądu i napięcia. Można wówczas zapisać następujące równania:

$$\begin{aligned} \underline{U}_1 &= \underline{E} \frac{Z_1}{Z_s + Z_1}, & \underline{I}_1 &= \frac{\underline{E}}{Z_s + Z_1}, \\ \underline{U}_2 &= \underline{E} \frac{Z_2}{Z_s + Z_2}, & \underline{I}_2 &= \frac{\underline{E}}{Z_s + Z_2}. \end{aligned} \quad (3)$$

Stąd, przy założeniu niezmiennych w czasie pomiarów parametrów sieci i napięcia źródłowego \underline{E} , można wyznaczyć wartość impedancji systemu:

$$\underline{Z}_s = \frac{\underline{U}_1 - \underline{U}_2}{\underline{I}_2 - \underline{I}_1} \quad (4)$$

Ponieważ w czasie pomiarów może dojść do zmiany parametrów sieci, w celu zmniejszenia prawdopodobieństwa otrzymania błędnych wyników, należy wykonać nie jeden a serię pomiarów. Tak otrzymane serie pomiarów prądów i napięć należy poddać obróbce statystycznej w celu wyznaczenia wartości impedancji SEE. Można do tego użyć metody korelacyjnej [5, 5, 5]. Korzystając z (4) oraz metody najmniejszych kwadratów można napisać następujące zależności:

$$\sum_{i=1}^n (\Delta U_i - Z_{SI} \cdot \Delta I_i)^2 = \min \quad \text{lub} \quad \sum_{i=1}^n (\Delta I_i - Z_{SU}^{-1} \cdot \Delta U_i)^2 = \min \quad (5)$$

Z tych warunków można już wyznaczyć impedancję SEE:

$$Z_{SI} = \frac{\text{cov}(U, I)}{\sigma^2(I)} \quad \text{lub} \quad Z_{SU} = \frac{\sigma^2(U)}{\text{cov}(U, I)} \quad (6)$$

gdzie: $\sigma^2(U) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (U_i - U_{sr})^2$, $\sigma^2(I) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (I_i - I_{sr})^2$ - wariancja napięcia i prądu,

$$\text{cov}(U, I) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (U_i - U_{sr})(I_i - I_{sr}) \text{ - kowariancja.}$$

Indeksy Z_{SI} oraz Z_{SU} wprowadzono w celu odróżnienia metody obliczania impedancji.

Jeśli współczynnik korelacji zdefiniowany jako:

$$\rho(U, I) = \frac{\text{cov}(U, I)}{\sigma(U) \cdot \sigma(I)} \quad (7)$$

jest w przybliżeniu równy $\rho(U, I) \approx -1$, to obie metody obliczeń dają zbliżony wynik.

Metoda daje dobre wyniki jeśli tylko impedancja systemu i odbiorników przyjmuje wartość czystej rezystancji lub reaktancji. W przeciwnym wypadku wynik obarczony jest błędem.

W przypadku, kiedy mamy do czynienia z impedancją SEE lub odbiorów o charakterze rezystancyjno-indukcyjnym proponuje się modyfikację powyższej metody. Mianowicie, oprócz pomiaru prądu i napięcia, należy dokonać również pomiaru mocy czynnej oraz sumy wykładników Lapunowa. Metoda obliczeń jest następująca.

W punkcie pomiarowym A (rys. 1), dla różnych odbiorów $Z_i = R_i + jX_i$, dokonuje się pomiarów wartości skutecznej prądu (I_i), napięcia (U_i) oraz mocy czynnej (P_i). Można teraz napisać następujące zależności:

$$R_i = \frac{P_i}{I_i^2}, \quad L_i = \frac{1}{2\pi f} \frac{\sqrt{U_i^2 I_i^2 - P_i^2}}{I_i^2} \quad (8)$$

Dodatkowo, dla każdego odbioru, wyznaczana jest również suma wykładników Lapunowa ($\lambda_\Sigma = \Sigma \lambda_i$). Model systemu (rys. 1) opisuje równanie różniczkowe:

$$(L_s + L) \frac{di}{dt} + (R_s + R)i = E \sin \omega t \quad (9)$$

Zgodnie z (2), dla dowolnej pary (j, k) odbiorów, można napisać następujący układ równań:

$$\begin{cases} \lambda_{\Sigma j} = -\frac{R_s + R_j}{L_s + L_j} \\ \lambda_{\Sigma k} = -\frac{R_s + R_k}{L_s + L_k} \end{cases} \quad (10)$$

Po jego rozwiązaniu otrzymuje się następujące zależności:

$$\begin{cases} R_s = -\frac{\frac{R_j}{\lambda_{\Sigma j}} - \frac{R_k}{\lambda_{\Sigma k}} + L_j - L_k}{\frac{1}{\lambda_{\Sigma j}} - \frac{1}{\lambda_{\Sigma k}}} \\ L_s = -\frac{\lambda_{\Sigma j} L_j - \lambda_{\Sigma k} L_k + R_j - R_k}{\lambda_{\Sigma j} - \lambda_{\Sigma k}} \end{cases} \quad (11)$$

gdzie R_i, L_i opisują równania (8).

Korzystając następnie z metody najmniejszych kwadratów można pokazać, że dla serii n pomiarów rezystancja i reaktancja SEE wynosi:

$$R_S = - \frac{\text{cov}\left(\frac{R}{\lambda_\Sigma}, \frac{1}{\lambda_\Sigma}\right) + \text{cov}\left(L, \frac{1}{\lambda_\Sigma}\right)}{\sigma^2\left(\frac{1}{\lambda_\Sigma}\right)} \quad (12)$$

$$X_S = -2\pi f \cdot \frac{\text{cov}(\lambda_\Sigma L, \lambda_\Sigma) + \text{cov}(R, \lambda_\Sigma)}{\sigma^2(\lambda_\Sigma)}$$

Powyższe zależności (12) będą poprawnie opisywać impedancję SEE jeśli zmiany prądu i napięcia będą ze sobą skorelowane, czyli jeśli współczynnik korelacji (8) będzie wynosił $\rho(U, I) \approx -1$. W przeciwnym przypadku, czyli jeśli $\rho(U, I) \gg -1$, rejestrowane zmiany napięcia wynikają nie tylko ze zmiany obciążenia ale i z innych przyczyn (np. regulacja napięcia w systemie elektroenergetycznym) a otrzymane wyniki obarczone są błędem.

4 WNIOSKI

W artykule przedstawiono metodę wyznaczania on-line impedancji systemu elektroenergetycznego. Przedstawiona metoda umożliwia wyznaczanie rezystancji i reaktancji systemu elektroenergetycznego patrząc z węzła pomiarowego w stronę źródła napięcia. Metoda bazuje na zmianach prądu i napięcia w węzle pomiarowym spowodowanych losową zmianą obciążenia. Konieczne jest, aby w czasie pomiarów parametry systemu (impedancja, napięcie źródłowe) były niezmiennie. Dlatego też, w celu zwiększenia pewności co do otrzymanych wyników, należy przeprowadzać serie pomiarów a otrzymane wyniki poddać przedstawionej analizie statystycznej.

Artykuł ma również na celu zwrócenie uwagi na możliwość zastosowania mała znanych wykładników Lapunowa do praktycznych pomiarów i obliczeń w systemie elektroenergetycznym. W przedstawionej metodzie wykładniki Lapunowa umożliwiają wyznaczenie rezystancji i reaktancji systemu. Inne zastosowanie wykładników zaprezentowano w artykule 5 gdzie pokazano, że można je użyć również jako kryterium stabilności systemu elektroenergetycznego.

5 SPIS LITERATURY

- [1] Baker L.G., Gollub J.P., Wstęp do dynamiki układów chaotycznych, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1998.
- [2] Bryant P., Computation of Lyapunov Exponents from Experimental Data, Proceedings of the 1st Experimental Chaos Conference, Arlington, Virginia, October 1-3, 1991.
- [3] Cegielski M., Wyznaczanie impedancji zastępczej systemu elektroenergetycznego w warunkach ruchowych, Prace Instytutu Automatyki Systemów Energetycznych, vol. 14, pp. 45-169, Wrocław 1969.

- [4] Czapp S., Wyznaczanie impedancji pętli zwarciowej metodą wektorową w sieci z obciążeniami roboczymi, XI Międzynarodowa Konferencja Naukowa Aktualne Problemy w Elektroenergetyce, Jurata, 11-13 czerwca 2003.
- [5] Darbyshire A. G., Calculating Liapunov Exponents from a Time Series, IEE, Savoy Place, London, 1994.
- [6] Guckenheimer J., Holmes P., Non-linear Oscillations, Dynamical Systems, and Bifurcation of Vector Fields, Springer-Verlag, New York, 1983.
- [7] Kacejko P., Jędrychowski R., Zastosowanie techniki ANN do szybkiej identyfikacji zastępczej impedancji zwarciowej w węźle sieci elektroenergetycznej, XII Międzynarodowa Konferencja Naukowa Aktualne Problemy w Elektroenergetyce, Gdańsk-Jurata, 8-10 czerwca 2005.
- [8] Kuźma W., Małyżko O., Zeńczak M., Wyznaczanie impedancji systemu elektroenergetycznego w warunkach normalnych i warunkach zwarciowych, XI Międzynarodowa Konferencja Naukowa Aktualne Problemy w Elektroenergetyce, Jurata, 11-13 czerwca 2003.
- [9] Małyżko O., Zastosowanie wykładników Lapunowa do kontroli stabilności systemu elektroenergetycznego, XII Międzynarodowa Konferencja Naukowa Aktualne Problemy w Elektroenergetyce, Gdańsk-Jurata, 8-10 czerwca 2005.
- [10] Micek L., Nowakowski R., Zeńczak M., Efektywność regulacji napięcia w węźle odbiorczym, Przegląd Elektrotechniczny, nr 10, 1992, s. 221-223.
- [11] Nowakowski R., Małyżko O., Zeńczak M., Probability estimation of short-circuit power measurements, Proc. of 6-th International Conference Short-Circuit Currents in Power Systems, Liege, 6-8.09.1994.
- [12] Ott E., Chaos w układach dynamicznych, WNT, Warszawa 1997.
- [13] Parker T.S., Chua L.O., Chaos: A Tutorial for Engineers, Proceedings of the IEEE, Special issue on chaotic systems, pp. 982-999, 09.1987.
- [14] Wolf A., Swift J., Swinney H., Vastano J., Determining Lyapunov Exponents from a Time Series, Physica D, vol. 16, 1985, pp. 285-317.

A NEW METHOD OF ESTIMATION OF POWER SYSTEM IMPEDANCE

The paper presents method of estimation on-line of power system impedance. The method based on the known correlation method which basing on natural variability of the voltage level in the network nodes. To find the value of power system resistance and reactance the Lyapunov exponents were used. Impedance of power system is the base to determinate the short-circuit currents and short-circuit power. On-line control over the short-circuit power in key nodes of power system might provide system dispatchers with an important piece of information.