ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1981

Seria: ELEKTRYKA z. 76 Nr kol. 689

Zbigniew BARTOŃ

Instytut Elektroenergetyki
i Sterowania Układów

Politechniki Śląskiej

STEROWANIE PRACĄ SYSTEMU ELEKTROENERGETYCZNEGO W STANACH ZAKŁÓCENIOWYCH

Streszczenie. Artykuł podejmuje problematykę sterowania pracą systemu elektroenergetycznego w warunkach zakłóceniowych. Rozważanie przeprowadzono dla modelu n-maszynowego systemu elektroenergetycznego opisanego w (2n-1) wymiarowej przestrzeni stanu. Dla takiego systemu określono funkcję V (Lapunowa). Na podstawie warunków, jakie powinna spełniać wyznaczona pochodna przyjętej funkcji V zaproponowano prosty algorytm sterowania mocą mechaniczną turbin.

1. WSTĘP

Bezpośrednia metoda Lapunowa znana od wielu lat w teorii sterowania znalazła zastosowanie w elektroenergetyce stosunkowo niedawno. Główną tego przyczyną były trudności związane zarówno ze znalezieniem odpowiedniej funkcji V, jak i z koniecznością rozwiązania szeregu dodatkowych skomplikowanych problemów w celu określenia obszarów stabilności.

W zdecydowanej większości przypadków metoda Lapunowa wykorzystywana jest przez elektroenergetyków do oceny równowagi dynamicznej połączonych systemów. Obliczenia w takich przypadkach wykonywane są najczęściej dla zachowawczych modeli systemu, bez uwzględnienia układów regulacji. Ale metoda oferuje znacznie szersze i równie atrakcyjne możliwości. Jedną z nich jest sterowanie w zakłóceniowym stanie pracy, będące tematem niniejszego artykułu.

2. MODEL STANU WIELOMASZYNOWEGO SYSTEMU ELEKTROENERGETYCZNEGO

Model wielomaszynowego systemu elektroenergetycznego opisuje, za pomocą układu nieliniowych równań różniczkowych, kołysania wirników generatorów synchronicznych. W celu ułatwienia analizy stabilności stosowane są odwzorowania w przestrzeni stanów. Przyjmując jako zmienne δ różnice kątów między wektorami SEM i-tej i n-tej maszyny i definiując $\underline{\delta} \triangleq \mathrm{col}\left\{\delta_i : i = 1,2,\ldots,n-1\right\}$ oraz jako zmienne X odchylenia prędkości od prędkości synchronicznej i definiując $\underline{X} \triangleq \mathrm{col}\left\{X_i : i = 1,2,\ldots,n\right\}$ model n-maszynowego systemu elektroenergetycznego można zapisać w następującej postaci [3]:

$$
\begin{aligned}
\dot{\underline{Y}} &= \underline{C}\,\underline{X} \\
\dot{\underline{X}} &= \underline{A}\,\underline{X} - \underline{B}\,\underline{F}(\underline{Y})
\end{aligned}
\tag{1}
$$

Model matematyczny opisany relacją (1) odwzorowuje n równań różniczkowych drugiego rzędu w 2n-1 wymiarowej przestrzeni stanów. Wektory $\underline{Y}$ i $\underline{F}(\underline{Y})$ wprowadzają transformację początku układu współrzędnych do pozakłóceniowego stanu pracy G^o, i można je przedstawić w postaci:

$$
\begin{aligned}
\underline{Y} &= \underline{G} - \underline{G}^o, \\
\underline{F}(\underline{Y}) &= \underline{f}(\underline{Y} + \underline{G}^o) - \underline{f}(\underline{G}^o),
\end{aligned}
\tag{2}
$$

gdzie:

$\underline{F}(\underline{Y})$ - funkcja różnic mocy elektrycznych oraz mechanicznych i strat na konduktancjach węzłów.

W modelu (1) stałe macierze $\underline{A}$, $\underline{B}$ i $\underline{C}$ mają postać:

$$
\underline{C} = \underline{T}, \quad \underline{T} \triangleq [\underline{I}_{n-1} \vdots \underline{e}] \tag{3}
$$

$$
\underline{A} = \begin{bmatrix} -M_1^{-1}D_1 & 0 \ldots\ldots & 0 \\ 0 & -M_2^{-1}D_2 \ldots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 \ldots\ldots\ldots & & -M_n^{-1}D_n \end{bmatrix}, \quad \underline{B} = \begin{bmatrix} M_1^{-1} & 0 \ldots\ldots & 0 \\ 0 & M_2^{-1} \ldots\ldots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 \ldots\ldots\ldots & & M_n^{-1} \end{bmatrix} \times [\underline{T}]^T,
$$

$$
\underline{T} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \ldots & 0 & -1 \\ 0 & 1 \ldots & 0 & -1 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & \ldots\ldots & 1 & -1 \end{bmatrix}
$$

gdzie:

M - momenty bezwładności,

D - współczynniki tłumienia.

Rozwiązaniem układu równań (1) są wektory $(\underline{Y},\underline{X}) = (\underline{0},\underline{0})$. Wyznaczają one w przypadku niejednorodnego tłumienia, odosobnione punkty równowagi w przestrzeni $R^{n-1} \times R^n$, co odpowiada ustalonemu stanowi pracy systemu elektroenergetycznego.

3. TEORETYCZNE PODSTAWY I ALGORYTM STEROWANIA

Dla określonego relacją (1) modelu możliwe jest skonstruowanie funkcji Lapunowa. Spełniająo warunki minimalnej realizaoji oraz całkowitej sterowalnośoi i całkowitej obserwowalności funkoją V można przedstawić w następująoej postaci [1,4]:

$$V = \frac{1}{2}\underline{X}^T \underline{P}\, \underline{X} + \int_{\underline{0}}^{\underline{Y}} \underline{F}^T(\underline{Y})\underline{Q}\, d\underline{Y}, \tag{4}$$

gdzie:

$\underline{P} = \mathrm{diag}\left\{M_i:\ i=1,2,\dots,n\right\}$

$\underline{Q} \triangleq \mathrm{diag}\left\{Q_i:\ i=1,2,\dots,n-1\right\}$, $0 < Q_i < 1$, macierz współozynników wagowyoh

Stabilność modelu, a tym samym systemu elektroenergetycznego będzie zachowana, jeżeli skalarna funkoja V będzie spełniała następująoe warunki:

$$\wedge\left[\underline{X},\ \underline{Y}\right]\in(\Omega - \left\{0\right\})\ \vee\quad \underline{V}(\underline{X},\underline{Y}) > 0 \tag{5a}$$

$$V(\underline{0},\underline{0}) = 0 \tag{5b}$$

$$\wedge\left[\underline{X},\underline{Y}\right]\in \Omega\ \vee\qquad \dot{V}(\underline{X},\underline{Y}) = \frac{dV}{dt} < 0 \tag{5c}$$

Poohodną funkoji V dla modelu (1) można wyznaozyć z zależności:

$$\dot{V}(\underline{X},\underline{Y}) = \frac{dV}{dX}\cdot\frac{dX}{dt} + \frac{dV}{dY}\cdot\frac{dY}{dt} = \frac{1}{2}\underline{X}^T(\underline{A}'^T\underline{P} + \underline{PA})\underline{X} - \frac{1}{2}\underline{F}^T\underline{B}^T\underline{PX} - \frac{1}{2}\underline{X}^T\underline{PBF} + \underline{F}^T\underline{QCX} \tag{6a}$$

Porządkująo wyrażenia otrzymuje się relację:

$$\dot{\underline{V}}(\underline{X},\underline{Y}) = -\underline{X}^T\underline{D}\underline{X} - \underline{F}^T\underline{B}^T\underline{PX} + \underline{F}^T\underline{QCX} \tag{6b}$$

Zachowanie warunku (5c) wymaga więc spełnienia nierówności:

$$\underline{F}^T(\underline{B}^T\underline{P} - \underline{Q}\ \underline{C})\ \underline{X} > 0$$

Podstawienie (3) do (7) determinuje następująoe warunki, umożliwiająoe spełnienie nierówności (5c):

$$F^T > 0 \quad \text{gdy} \quad \underline{T}\ \underline{X} > 0 \tag{8a}$$

$$F^T < 0 \quad \text{gdy} \quad \underline{T}\ \underline{X} < 0 \tag{8b}$$

Relacja (7), jak wynika z powyższych rozważań, może być wykorzystana do sterowania systemem w jego zakłóceniowym stanie pracy, w którym zarówno $\underline{F}^T$, jak i $\underline{X}$ są różne od zera.

Warunki (8a) i (8b) dają bowiem jednoznaczną interpretację prawa sterowania. Nieliniowa funkcja F^T zgodnie ze wzorem (2) w stanie ustalonym jest równa 0, czyli:

$$F^T = P_{el} - P_{mech} = 0 \tag{9}$$

Jeżeli w stanie zakłóceniowym wystąpiło odchylenie prędkości od prędkości generatora odniesienia, czyli $\omega_i - \omega_n \neq 0$ (co odpowiada $\underline{\underline{TX}} \neq \underline{0}$), wtedy działać powinna regulacja prędkości obrotowej a relacja (9) przyjmie postać:

$$F^T_{zakł} \doteq P_{el} - (P_{mech.ust} + \Delta P_m) \tag{10}$$

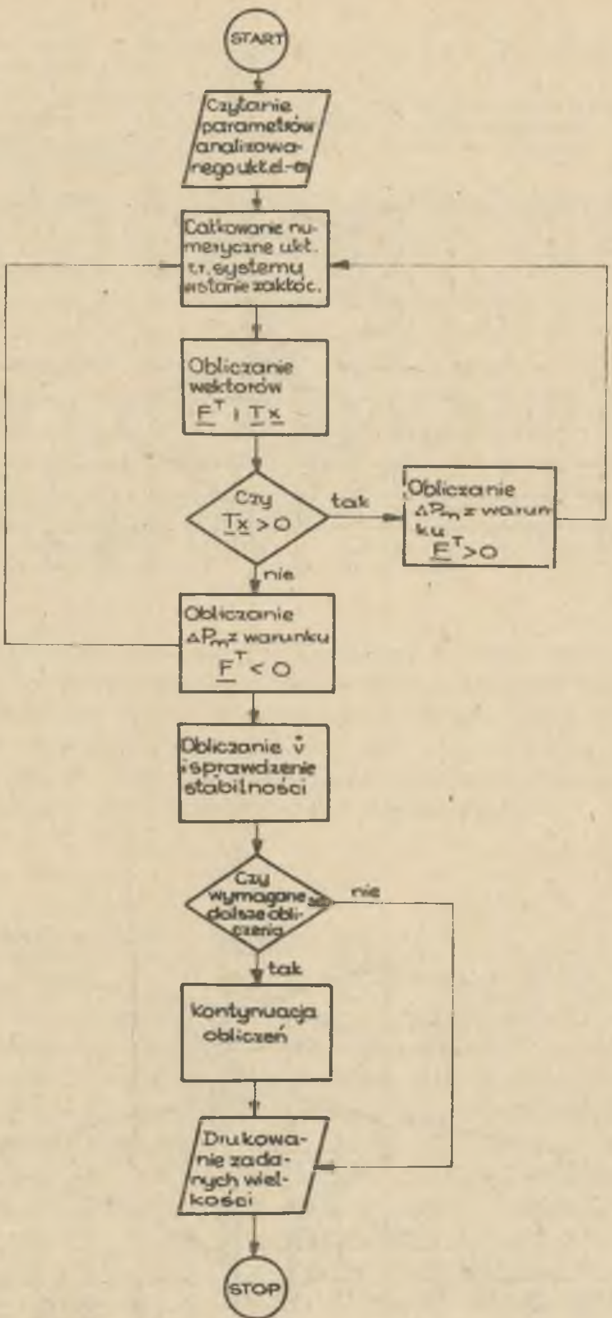
Gdy $\underline{\underline{TX}} > \underline{0}$ (czyli $\omega_i - \omega_n > 0$), wtedy przyrost mocy mechanicznej ΔP_m musi spowodować obniżenie wartości tej mocy, tak, ażeby różnica $\underline{F}^T$ stała się większa od 0. W przypadku $\underline{\underline{TX}} < \underline{0}$ regulacja powinna oddziaływać tak, aby $F^T < 0$, czyli ΔP_m powinno mieć znak dodatni (p.r. (10)). Należy podkreślić, że możliwe jest sterowanie mocą mechaniczną wszystkich generatorów, tak jak to ma miejsce w prezentowanych poniżej wynikach badań oraz w ogólnym przypadku mocą jedynie wybranych generatorów ale pod warunkiem, że możliwe będzie spełnienie nierówności (5c).

Określone relacją (8) wyniki rozważań umożliwiają skonstruowanie algorytmu obliczeń. Algorytm ten przedstawiono na rys. 1. Wykorzystano go w prowadzonych obliczeniach do sterowania mocą turbin w zakłóceniowym stanie pracy. Badania, których wyniki zaprezentowano poniżej przeprowadzono dla wybranego czteromaszynowego systemu elektroenergetycznego o parametrach podanych w pracy [2].

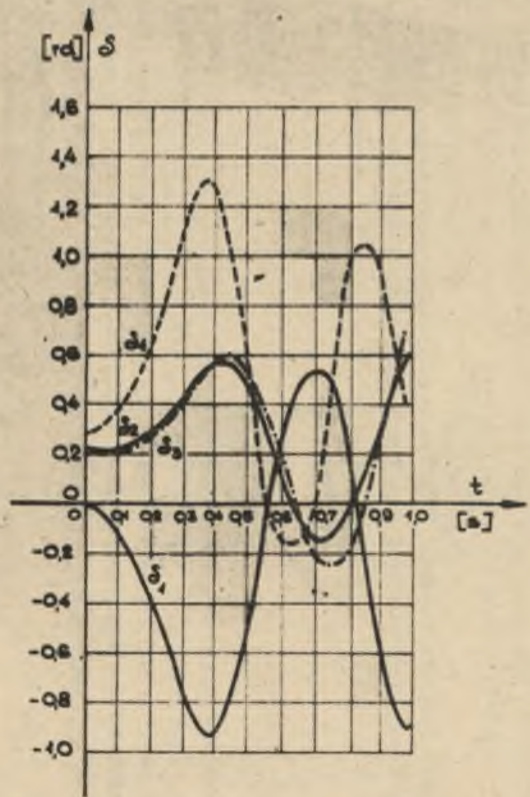
Na rys. 2 przedstawiono przebiegi kątów δ generatorów bez uwzględnienia regulacji, natomiast na rys. 3 przebiegi przy regulacji według proponowanego algorytmu.

4. WNIOSKI

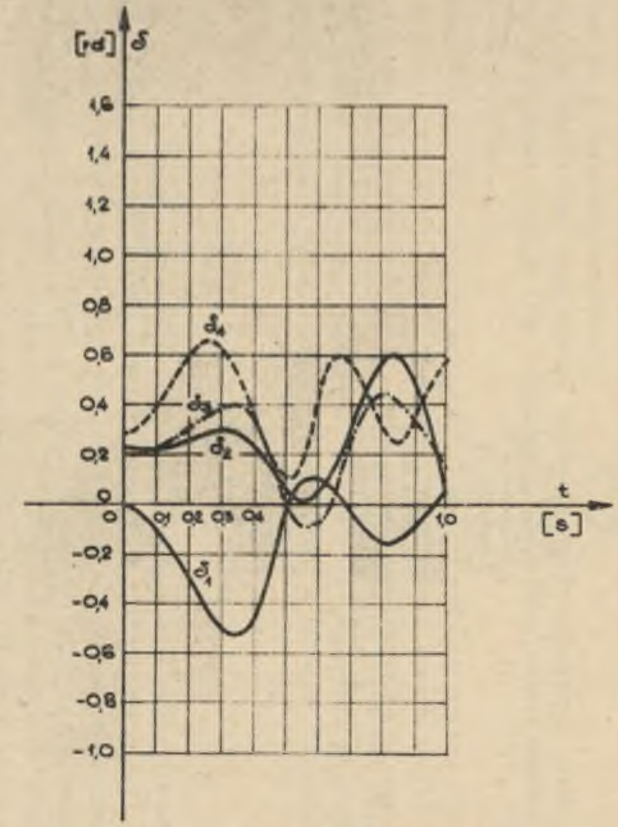
W artykule przedstawiono rozważania umożliwiające wykorzystanie bezpośredniej metody Lapunowa do utrzymania stabilnej pracy systemu elektroenergetycznego w warunkach zakłóceniowych. Wykorzystanie do sterowania wyprowadzonych zależności pozwala określić znak i wielkość przyrostów mocy mechanicznych turbin, niezbędnych do zachowania stabilności, w zależności od wektora stanu systemu.



Rys. 1. Algorytm obliczeń



Rys. 2. Dynamiczne zmiany kątów przy braku regulacji (P_m = const)



Rys. 3. Dynamiczne zmiany kątów przy istnieniu regulacji (P_m = variab)

LITERATURA

[1] Anderson B.D.: A system theory criterion for positive real matrices. J.SIAM control, Vol. 5, N° 2, 1967.

[2] Bartoń Z.: Zastosowanie wskaźnika identyfikacji do wyznaczania granicznych obszarów stabilności badanych metodą Lapunowa. Materiały III Międzynarodowej Konf. Naukowej nt. "Aktualne problemy automatyki w energetyce", Gliwice 1979.

[3] Gros G., Bergen A.R.: Computation of regions of transient stability of multimachine power systems. IEEE Trans. on AC, Vol. AC-19, April 1974.

[4] Willems J.L.: Direct method for transient stability studies in power system analysis. IEEE, Vol. AC N° 4, 1971.

Wpłynęło do Redakcji dnia 20.VI.1980 r.

Ostateczną wersję dostarczono dnia 15.XII.1980 r.

Recenzent:

Doc. dr inż. Zygmunt Maciejewski

УПРАВЛЕНИЕ РАБОТОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ В СОСТОЯНИЯХ НАРУШЕНИЯ

Р е з ю м е

Статья занимается проблематикой управления работой электроэнергетической системы в условиях нарушения. Обдуман вопрос, касающийся описанной в 2n-1 фазовом пространстве модели n-машинной электроэнергетической системы. Для такой системы определена функция V Ляпунова . На основании условий,которые должна выполнить определенная производная принятой функции V, предложен простой алгоритм управления механической мощностью турбин.

CONTROL OF POWER SYSTEM IN EMERGENCY CONDITIONS

S u m m a r y

In this paper a power control algorithm based on the Laypunov stability theory has been suggested. A n-machine power system in (2n-1) dimensional state space has been described. The Lyapunov function for that multimachine model has been constructed.
The easy control law based on the derivative of the Lyapunov function along the faulted system has been developed. Applications of this las lead to the determination of the value and sign of the mechanical power input. Conclusions are presented as a result of performed stability analysis illustrating the influence of control system on variations of phase angle δ of the generators.