ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 198

Seria: ELEKTRYKA z. 105 Nr kol. 915

Antoni BOGUCKI,
Zbigniew BARTOŃ

Instytut Elektroenergetyki
i Sterowania Układów
Politechniki Śląskiej

OCENA DOPUSZCZALNEGO CZASU TRWANIA ZAKŁÓCENIA DLA POTRZEB AUTOMATYKI PREWENCYJNEJ

Streszczenie. W artykule podjęto problematykę praktycznego zastosowania drugiej metody Lapunowa do określenia nastawień automatyki prewencyjnej. Zwrócono uwagę na wpływ uwzględnienia jawnobiegunowości maszyn synchronicznych na obszar stabilności oraz na wartości kryterialne funkcji Lapunowa. Zaproponowano uproszczenie procedury określania dopuszczalnego czasu trwania zakłócenia. Wykazano, że możliwe jest to na podstawie znajomości krytycznego poślizgu wypadu oraz wartości kryterialnej funkcji Lapunowa. Podkreślono, że wykorzystanie metody pozwala na stosunkowo proste i szybkie oszacowanie wspomnianego czasu, który ma decydujący wpływ na zachowanie stabilności dynamicznej maszyn synchronicznych, bez konieczności całkowania równań modelu jak i badań symulacyjnych.

Wyniki badań symulacyjnych oraz obliczeń przedstawiono w postaci graficznej; przyjęty do rozważań model maszyny synchronicznej był nieliniowy.

1. Wstęp

Zakłócenia zwarciowe w liniach przesyłowych łączących system elektroenergetyczny (SE) z rozdzielniami zasilającymi bezpośrednio odbiory synchroniczne są likwidowane przez automatykę SPZ oraz SZR (automatykę prewencyjną). Działanie wspomnianych automatyk powoduje wystąpienie krótkotrwałych przerw w zasilaniu. Dopuszczalny czas trwania zakłócenia, z uwagi na zachowanie stabilności dynamicznej maszyn synchronicznych, stanowi podstawę dla doboru nastaw automatyki prewencyjnej. W większości przypadków czas ten określany jest przez całkowanie równań różniczkowych opisujących model matematyczny rozważanego systemu elektroenergetycznego lub przez badanie symulacyjne.

W artykule proponowane jest uproszczenie procedury określania tego czasu.

W rozdziale 2 zmierza się do wykazania, że jest możliwe określenie krytycznego poślizgu wypadu [2] oraz dopuszczalnego czasu trwania zakłócenia na podstawie znajomości kryterialnej wartości funkcji Lapunowa.

2. Model matematyczny i metoda oceny

Zakładając, że równanie opisujące procesy przejściowe w SE ma postać:

$$M\frac{d^2\delta}{dt^2} + D\frac{d\delta}{dt} = P_m - P_e = \Delta P, \tag{1}$$

gdzie oznaczenia zgodne są z [4] oraz

$$P_e = \frac{E_q' U}{X_d'+X_z}\sin\delta \quad \text{dla} \quad X_d' = X_q' \tag{2a}$$

$$P_e = \frac{E_q' U}{X_d'+X_z}\sin\delta + \frac{U^2(-X_q+X_d')}{2(X_q+X_z)(X_d'+X_z)}\sin 2\delta \quad \text{dla} \quad X_d' \neq X_q' \tag{2b}$$

można, wprowadzając zmienne stanu:

$$x_1 = \delta - \delta_o \quad \text{i} \quad \dot{x}_1 = x_2, \tag{3}$$

równanie (1) przekształcić do postaci:

$$\dot{x}_1 = x_2$$

$$M\dot{x}_2 = -ax_2 - b\left[\sin(x_1+\delta_o) - \sin\delta_o\right] + c\left[\sin(2x_1+2\delta_o) - \sin 2\delta_o\right]. \tag{4}$$

Układ równań (4) w uogólnionym zapisie można przedstawić następująco:

$$\dot{x}_1 = x_2$$

$$\dot{x}_2 = Ax_2 - BF(x_1). \tag{5}$$

Funkcja Lapunowa dla układu (5) może być wyznaczona w zależności ([1],[5]):

$$V(x_1,x_2) = x_2^T P x_2 + \int_0^{x_1} F^T(x_1)dx_1 . \tag{6}$$

Po scałkowaniu, w rozwiniętej postaci otrzymuje się:

a) w przypadku $X_d' = X_q'$ (wirnik cylindryczny)

$$V_1(x_1,x_2) = \frac{1}{2}M x_2^2 + b\left[\cos\delta_o - \cos(x_1+\delta_o) - x_1\sin\delta_o\right], \tag{7}$$

b) gdy $X'_d \neq X'_q$ (wirnik jednobiegunowy)

$$V_2(x_1,x_2) = \frac{1}{2} M x_2^2 + b\left[\cos\delta_o - \cos(x_1+\delta_o) - x_1\sin\delta_o\right] -$$

$$- \frac{c}{2}\left[\cos 2\delta_o - \cos(2x_1+2\delta_o) - 2x_1\sin 2\delta_o\right] = V_1(x_1,x_2) + \Delta V. \quad (8)$$

Zgodnie z drugą metodą Lapunova stabilność dynamiczna w stanie pozakłóceniowym zostanie zachowana, jeżeli spełniona będzie nierówność:

$$V(t_d) \leqslant V_{cr} \quad (9)$$

gdzie:

t_d - dopuszczalny czas trwania zakłócenia,

V_{cr} - kryterialna wartość funkcji Lapunova.

Wyznaczenie minimalnej wartości wyrażenia określającego energię potencjalną systemu w kryterialnym siodle (punkt stabilności nietrwałej δ'_u) determinuje V_{cr}.

W obszarze stabilnościi możliwe jest do oceny stanu systemu posługiwanie się relacją:

$$x_2 \leqslant (2\,V_{cr})^{\frac{1}{2}} M^{-1}, \quad (10)$$

przy czym znak "=" odpowiada x_{2cr} maksymalnemu, dopuszczalnemu odchyleniu prędkości obrotowej od prędkości synchronicznej, nie powodującemu utraty stabilności (krytyczny poślizg wypadu [2]).

Scałkowanie równania (5), przy zerowych warunkach początkowych (punkt pracy stabilnej przeniesiony do początku układu współrzędnych $x_1 = 0$, $x_2=0$) i pominięcie tłumienia umożliwia określenie przybliżonego czasu trwania zakłócenia z relacji:

$$t \leqslant B^{-1}\, F^{-1}(x_1)x_2\,. \quad (11)$$

Najostrzejsze warunki wystąpią, gdy relacje (2) będą równe 0. Wtedy, uwzględniając relacje (10) i (11), dopuszczalny czas trwania zakłócenia określa zależność:

$$t_d = (2MV_{cr})^{+\frac{1}{2}}\, p_m^{-1}. \quad (12)$$

3. Wyniki obliczeń i symulacji

Relacje (7) i (8) umożliwiają wykreślenie obszarów stabilności na płaszczyźnie fazowej jako funkcji zmiennych stanu x_1 i x_2 oraz funkcji $V(x_1)$. Obliczenia wykonano dla SE składającego się z maszyny synchronicznej przyłączonej przez transformator i linię przesyłową do systemu o napięciu "sztywnym" równym 1,0 j.w. Parametry wykorzystane do obliczeń miały następujące wartości: E = 1,05 j.w., X_q = 0,95 j.w., X_d = 0,20 j.w., M = 1,0 s^2, D = 0,2 s, δ_o = 0 rad oraz $\pi/6$ rad, X_{tr} = 0,1 j.w. (j.w. - jednostki względne). Wyniki obliczeń zaprezentowano na rys. 1 i 2. Przedstawione na rysunkach wyniki wykazują charakterystyczne właściwości, jakimi są zwiększenie obszaru stabilności, będące efektem uwzględnienia jawnobiegunowości maszyny (wydatnej biegunowości wirnika) oraz jednoczesne zwiększenie wartości kryterialnej funkcji V (krzywe V_{2cr}). W efekcie uzyskiwane są większe wartości dopuszczalnego czasu trwania zakłócenia, niewiele różniące się od wartości uzyskiwanych za pomocą badań symulacyjnych.

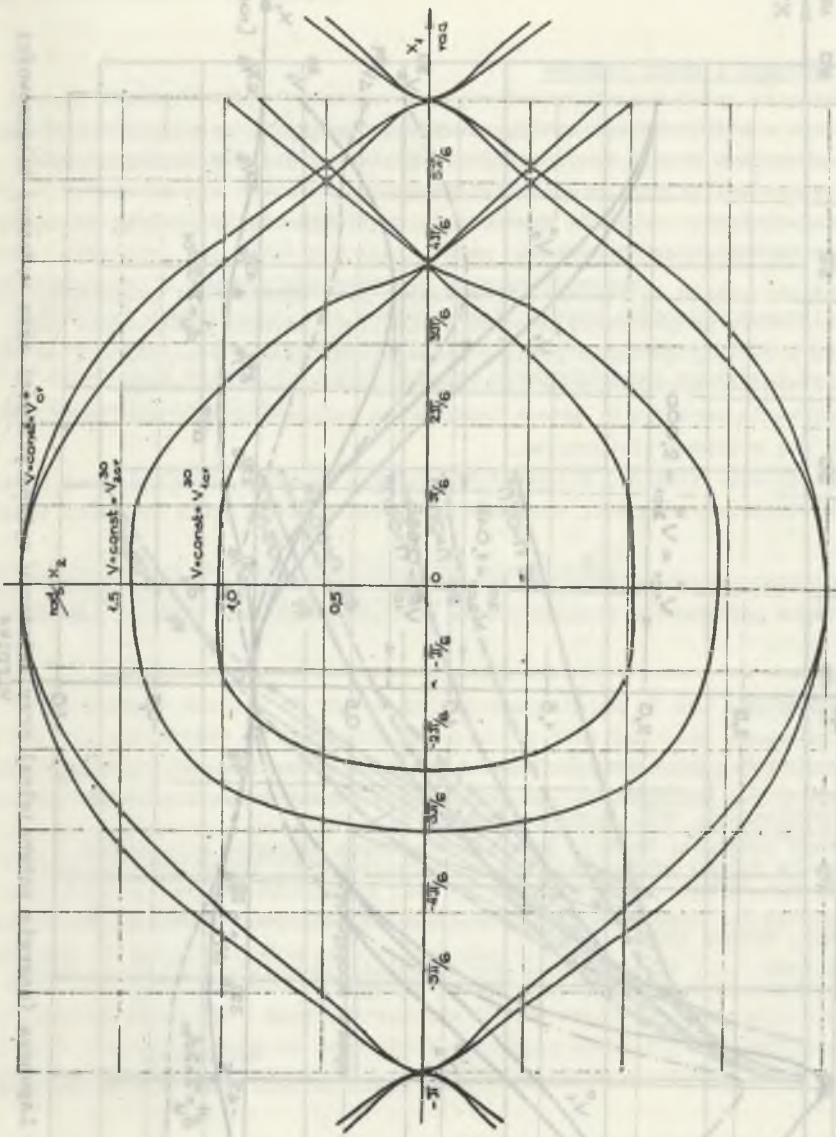
W celu weryfikacji wyprowadzonych w p. 2 relacji teoretycznych przeprowadzono porównanie wyników badań symulacyjnych, wykonanych na maszynie cyfrowej, z wynikami obliczeń uzyskanych przy wykorzystaniu metody Lapunowa. Do analizy przyjęto trzy silniki synchroniczne o mocach S3 - 3,15 MV A, S2 - 2,5 MV A oraz S1 - 0,94 MV A, których parametry i model matematyczny zawiera [3].

W wyniku przeprowadzonych obliczeń stwierdzono, że przy U_{zas} = 0,0 U_N silniki S2 i S3 powracały do synchronizmu po maksymalnym czasie zakłócenia nie przekraczającym 0,5 s. Natomiast silnik S1 o prawie trzykrotnie mniejszej mocy i ponad sześciokrotnie mniejszym momencie bezwładności osiągał powtórnie prędkość synchroniczną, jeżeli czas zakłócenia nie przekraczał 0,3 s. Czasom tym odpowiadały następujące wartości krytycznego poślizgu wypadu x_{2max} odpowiednio: dla S3, S2 i S1 - (4,7; 2,23 i 5,0) rad/s. Uzyskane wyniki badań pozwoliły na wykreślenie na płaszczyźnie fazowej (x_2, x_1) obszarów pracy stabilnej. Obszary te zaznaczono jako zakreskowane na rys. 3.

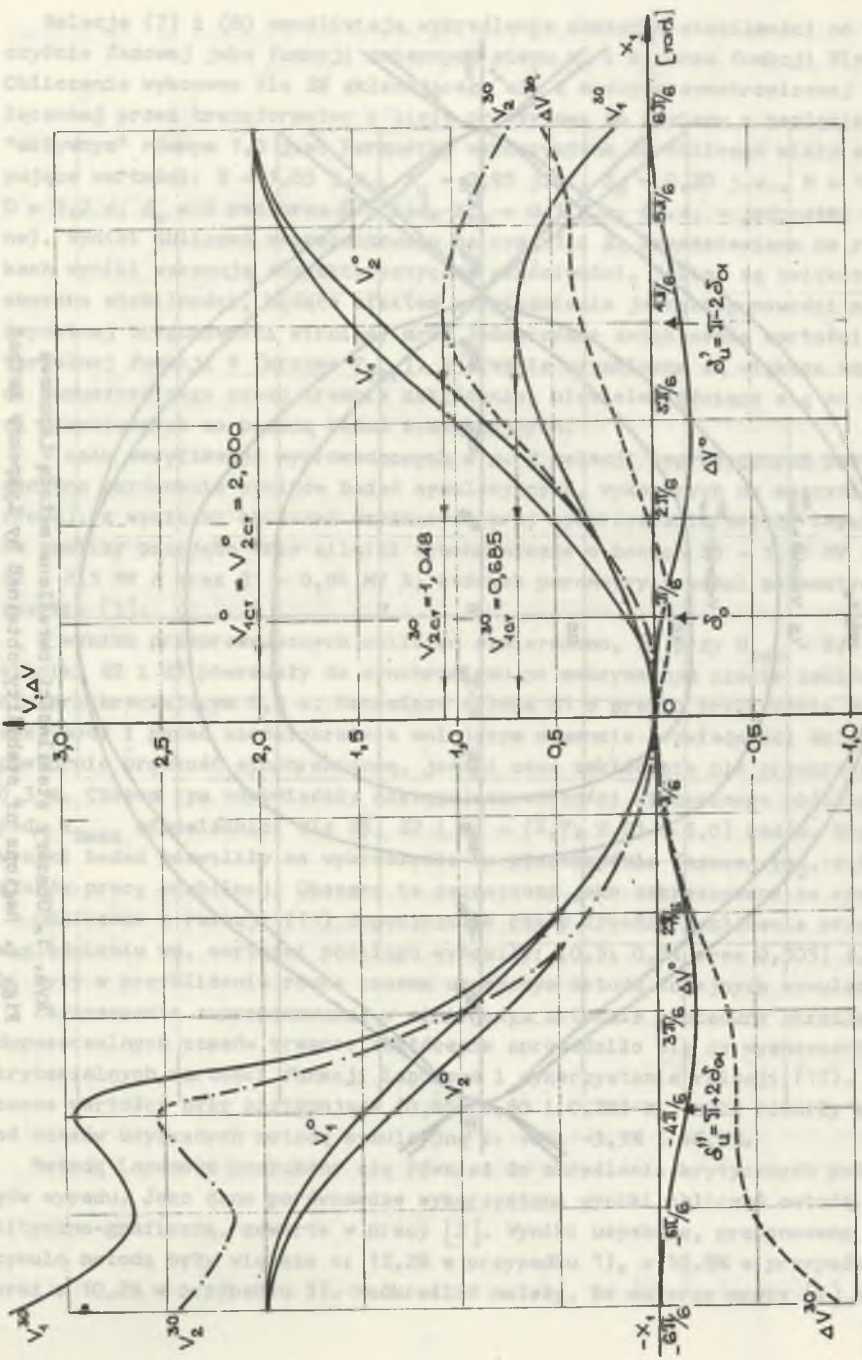
Obliczone z relacji (11) dopuszczalne czasy trwania zakłócenia przy uwzględnieniu ww. wartości poślizgu wynosiły: (0,5; 0,51 oraz 0,305) s, czyli były w przybliżeniu równe czasom uzyskanym metodą kolejnych symulacji.

Zastosowanie zaproponowanej w niniejszym artykule procedury określania dopuszczalnych czasów trwania zakłócenia sprowadziło się do wyznaczenia kryterialnych wartości funkcji Lapunowa i wykorzystania relacji (12). Obliczone wartości były następujące (0,46; 0,60 i 0,28) s, czyli różniły się od czasów uzyskanych metodą symulcyjną o: +8%, -3,3% i +6,7%.

Metodą Lapunowa posłużono się również do określenia krytycznych poślizgów wypadu. Jako dane porównawcze wykorzystano wyniki obliczeń metodą analityczno-graficzną, zawarte w pracy [2]. Wyniki uzyskane, proponowaną w artykule metodą były większe o: 12,2% w przypadku 1), o 10.8% w przypadku 2) oraz o 10,2% w przypadku 3). Podkreślić należy, że autorzy pracy [2] zazna-

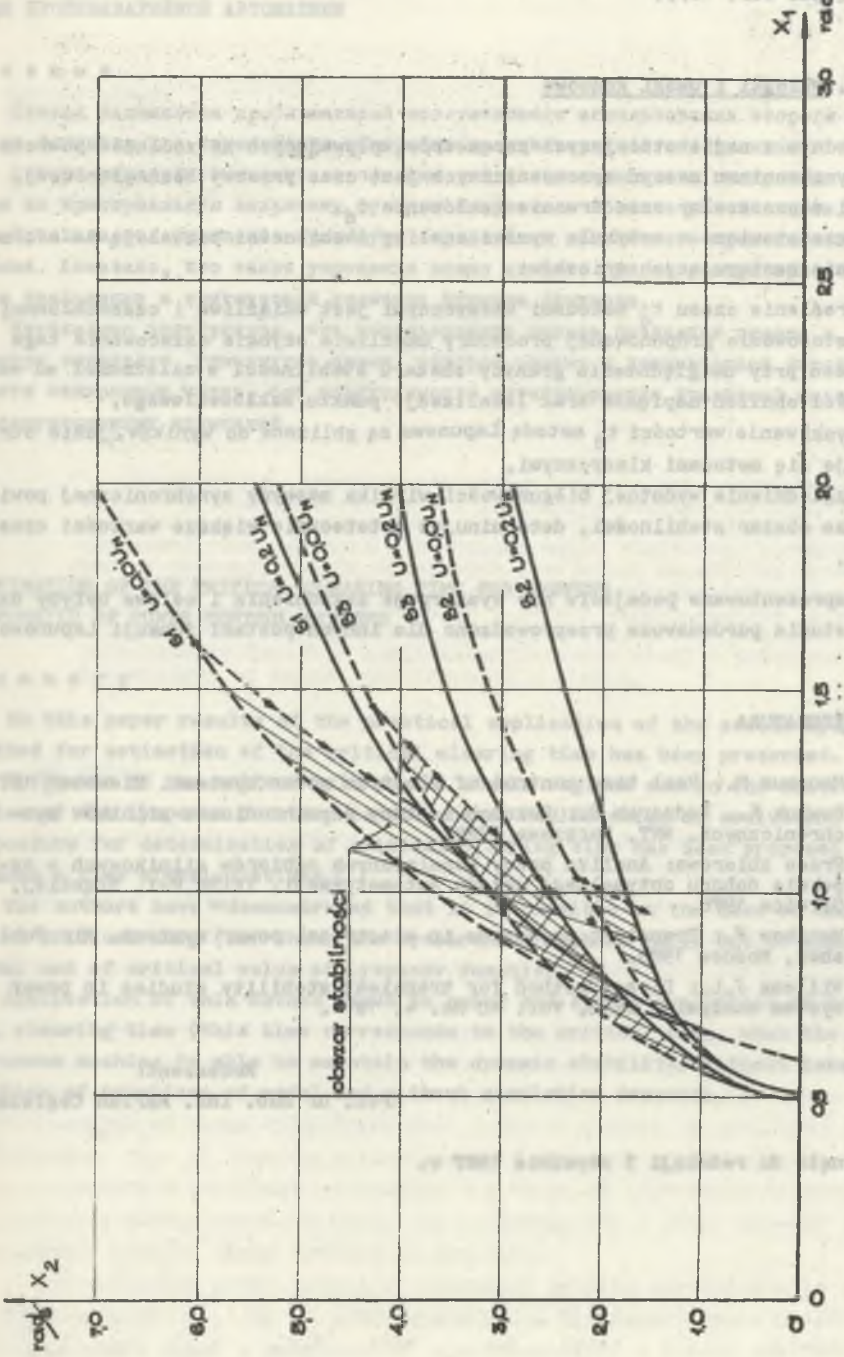


Rys. 1. Obszary stabilności określone metodą Lapunowa
Fig. 1. Regions of stability obtained by Lyaponov method



Rys. 2. Funkcja Lapunowa (energia potencjalna) przy założeniu cylindryczności oraz wydatnej biegunowości wirnika

Fig. 2. Lyapunov's function (potential energy) for a round and no - round - rotor machine



Rys. 3. Obszary stabilności odbiorów silnikowych wyznaczone metodą symulacji cyfrowej

Fig. 3. Regions of stability of synchronous motors obtained by digital simulation method

czają, iż ich wyniki "dają wartości zaniżone dla krytycznego poślizgu wypadu" (vide str. 167).

4. Wnioski i uwagi końcowe

Jednym z najistotniejszych parametrów wpływających na zdolność powrotu do synchronizmu maszyn synchronicznych jest czas przerwy beznapięciowej, czyli dopuszczalny czas trwania zakłócenia t_d.

Przedstawione w artykule wyniki analizy stabilności pozwalają na sformułowanie następujących wniosków:

- określenie czasu t_d metodami klasycznymi jest uciążliwe i czasochłonne;
- zastosowanie proponowanej procedury umożliwia szybkie oszacowanie tego czasu przy uwzględnieniu granicy obszaru stabilności w zależności od wartości obniżeń napięcia oraz lokalizacji punktu zakłóceniowego,
- uzyskiwanie wartości t_d metodą Lapunowa są zbliżone do wyników, jakie otrzymuje się metodami klasycznymi,
- uwzględnienie wydatnej biegunowości wirnika maszyny synchronicznej powiększa obszar stabilności, determinując ostatecznie większe wartości czasów t_d.

Zaprezentowane podejście nie wyczerpuje zagadnienia i celowe byłyby dalsze studia porównawcze przeprowadzono dla innych postaci funkcji Lapunowa.

LITERATURA

[1] Mansour M.: Real time control of electric power systems. Elsebier 1972.
[2] Pawluk K., Bednarek S.: Rozruch i stany asynchroniczne silników synchronicznych. WNT, Warszawa 1968.
[3] Praca zbiorowa: Analiza pracy kopalnianych odbiorów silnikowych w aspekcie doboru optymalnego układu automatyzacji. IEiSU Pol. Śląskiej, Gliwice 1978.
[4] Wenikow V.: Transient processes in electrical power systems. Mir Publisher, Moscow 1980.
[5] Willems J.L.: Direct method for transient stability studies in power system analysis. IEEE, Vol. AC No. 4, 1971.

Recenzent:
Prof. dr hab. inż. Marian Cegielski

Wpłynęło do redakcji 5 stycznia 1987 r.

ОЦЕНКА ВРЕМЕНИ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ АВАРИИ
ДЛЯ ПРОТИВАВАРИЙНОЙ АВТОМАТИКИ

Р е з ю м е

Статья занимается проблематикой практического использования второго метода Ляпунова для определения настройки противаварийной автоматики.

Авторы обратили внимание на влияние учёта явнополюсности синхронных машин на критериальную величину функции Ляпунова и область устойчивости.

Предлагается упрощение процедуры определения допустимого времени повреждения. Доказано, что такое упрощение можно сделать при известном критическом скольжении и критической величине функции Ляпунова.

Необходимо подчеркнуть, что использование метода позволяет просто и быстро определит упомянутое время, которое решает о динамической устойчивости синхронных машин, без необходимости интегрирования уравнений модели и симуляционных испытаний.

ESTIMATION OF THE CRITICAL CLEARING TIME FOR PREVENT
AUTOMATIC OF POWER CONTROL SYSTEMS

S u m m a r y

In this paper results of the practical application of the second Lyaponov method for estimation of the critical clearing time has been presented.

Influence of the salient pole on the stable regions and on the critical value of the Lyaponov function is discussed. Modification of evaluation procedure for determination of critical clearing time has been proposed to reduce a time of calculations.

The authors have demonstrated that it is possible on the base of knowlege of critical slip (for which the synchronous machine falls out of synchronizm) and of critical value of Lyaponov function.

Application of this method leads to quick and simple evaluation of critical clearing time (this time corresponds to the critical case, when the synchronous machine is able to maintain the dynamic stability) without integration of equations of model and without simulation research.