

Władysław PASZEK, Jerzy KUDŁA  
Instytut Maszyn i Urządzeń Elektrycznych  
Stefan PASZEK  
Instytut Elektrotechniki Teoretycznej i Przemysłowej

### DOBÓR PARAMETRÓW STABILIZATORÓW SYSTEMOWYCH DLA UKŁADU JEDNOMASZYNOWEGO TYPU GENERATOR-SIEĆ SZTYWNA

Streszczenie. Na podstawie zlinearyzowanych wokół ustalonego punktu pracy równań generatora synchronicznego, wyposażonego w regulator napięcia, stabilizator systemowy i współpracującego z siecią sztywną za pośrednictwem linii przesyłowej, przedstawiono sposób doboru parametrów stabilizatora oraz przeprowadzono przykładowe obliczenia jego parametrów dla generatora o mocy 360 MW.

### ADJUSTMENT OF POWER SYSTEM STABILIZER PARAMETERS IN SINGLE MACHINE - INFINITE BUS SYSTEM

Summary. The paper presents an adjustment of power system stabilizer parameters methodology based on the linearized differential equations of a synchronous generator connected to an infinite - bus system. The presented methodology is applied for selection of power system stabilizer parameters of the 360 MW synchronous generator.

### НАСТРОЙКА СИСТЕМНЫХ СТАБИЛИЗАТОРОВ В ОДНОМАШИННОЙ СИСТЕМЕ ТИПА ГЕНЕРАТОР-ШИНЫ БЕСКОНЕЧНОЙ МОЩНОСТИ

Резюме. На основе линеаризованных вокруг рабочей точки уравнений синхронного генератора, снабженного регулятором напряжения, системным стабилизатором и соединенного с шинами бесконечной мощности через линию передачи, представлен способ настройки системного стабилизатора. Выполнены примерные расчёты параметров стабилизатора для генератора мощностью 360 Мвт.

## 1. WPROWADZENIE

Podczas eksploatacji systemów elektroenergetycznych rejestrowane są słabo tłumione, długotrwałe kołysania generatorów synchronicznych o częstotliwościach zawierających się w granicach (0,2÷2,5) Hz, [1], [4]. Kołysania te pogarszają warunki przesyłu energii elektrycznej w systemie i często są przyczyną rozwijania się awarii w systemie w wyniku utraty stabilności generatorów. Tendencja do pojawiania się słabo tłumionych kołysań zwiększa się w wyniku coraz powszechniejszego stosowania:

- generatorów synchronicznych o największych mocach znamionowych charakteryzujących się dużą reaktancją synchroniczną,
- statycznych źródeł wzbudzenia sterowanych za pośrednictwem szybkich regulatorów napięcia o dużym wzmocnieniu,
- linii przesyłowych najwyższych napięć o znacznych długościach.

Jednym ze środków zapewniających skuteczne tłumienie kołysań jest wyposażenie generatorów synchronicznych w stabilizatory systemowe (PSS), wchodzące w skład regulatorów napięcia. Podstawowym zadaniem stabilizatorów systemowych jest wysterowanie dodatkowego momentu elektromagnetycznego w generatorach, który w zakresie częstotliwości kołysań ma charakter momentu tłumiącego, proporcjonalnego do prędkości poślizgowej wirnika [1], [4], [5].

Naturalnym sygnałem wejściowym stabilizatora jest sygnał proporcjonalny do prędkości kątowej wirnika oraz ściśle z nią związany sygnał proporcjonalny do mocy przyspieszającej generatora, określonej w postaci operatorowej dla wielkości przyrostowych (w jednostkach wzgl.)

$$sT_m \Delta \omega (s) = \Delta M_p(s) = \Delta M_m(s) - \Delta M_e(s),$$

gdzie:  $\Delta M_p(s) \approx \Delta P_p(s)$ ;  $\Delta M_m(s) \approx \Delta P_m(s)$ ;  $\Delta M_e(s) \approx \Delta P_e(s)$ . (1.1)

Przy pomiarze prędkości kątowej wirnika wymagane jest zainstalowanie czujników pomiarowych w ściśle określonych miejscach wzdłuż wału turbozespołu (dla uniknięcia błędu spowodowanego zjawiskiem wzbudzenia się drgań skrętnych wału). Jeśli jest to niemożliwe do wykonania, jedynym stojącym do dyspozycji sygnałem wejściowym stabilizatora jest moc przyspieszająca, określona na podstawie pomiaru przyrostu mocy elektrycznej i mechanicznej generatora, bądź tylko moc elektryczna w przypadku stałej mocy mechanicznej. W celu prawidłowego działania stabilizatorów systemowych trzeba określić optymalną ich lokalizację w systemie elektroenergetycznym, zapewniającą skuteczne tłumienie kołysań oraz skoordynować ich nastawienia. Do określenia optymalnej lokalizacji stabilizatorów i koordynacji ich

parametrów potrzebna jest analiza zachowania się systemu elektroenergetycznego rozpatrywanego jako układ wielomaszynowy. Podstawowe nastawienia stabilizatorów mogą być dobrane dla systemu elektroenergetycznego, uproszczonego do modelu "generator - sieć sztywna".

W artykule podano zasady doboru parametrów stabilizatorów systemowych oraz wyznaczono parametry dla przykładowego układu, opierając się na programie komputerowym PSS v.S, opracowanym dla Polskich Sieci Elektroenergetycznych S.A.

## 2. WYZNACZENIE TRANSMITANCJI OPERATOROWEJ STABILIZATORÓW SYSTEMOWYCH

Dobór nastawień stabilizatorów systemowych polega na wyznaczeniu parametrów wchodzących w skład transmitancji stabilizatora. Biorąc pod uwagę różne rozwiązania techniczne stabilizatorów, można wyróżnić dwa zasadnicze typy ich transmitancji:

- transmitancję stabilizatorów  $G_{sm}(s)$ , których sygnałem wejściowym jest prędkość kątowna wirnika,
- transmitancję stabilizatorów  $G_{sp}(s)$ , których sygnałem wejściowym jest moc przyspieszająca lub tylko moc elektryczna  $G_{spe}(s)$ .

Obie transmitancje są ze sobą powiązane, co wynika z zależności (1.1). Dlatego też dalsze rozważania można ograniczyć do wyznaczenia transmitancji operatorowej stabilizatora systemowego  $G_{sm}(s)$ , którego sygnałem wejściowym jest prędkość kątowna wirnika. Postać transmitancji operatorowej stabilizatora systemowego wynika z analizy wyrażenia na moment elektromagnetyczny generatora [1], [4].

Podstawą do wyznaczenia momentu elektromagnetycznego generatora są zlinearyzowane równania analizowanego układu elektroenergetycznego, składającego się z generatora synchronicznego, wyposażonego w regulator napięcia i stabilizator systemowy, współpracującego z siecią sztywną za pośrednictwem linii przesyłowej. Działanie poszczególnych elementów składowych układu elektroenergetycznego, w operatorowych relacjach przyrostowych, zapisane w jednostkach względnych (z wyjątkiem kąta  $\delta$  i czasu  $t$ ), opisują równania:

- dla generatora synchronicznego

$$\begin{bmatrix} \Delta U_d(s) \\ \Delta U_q(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R & L_q(s) \\ -L_d(s) & -R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta I_d(s) \\ \Delta I_q(s) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ G(s) \end{bmatrix} \Delta \dot{U}_f(s),$$

$$s \Delta \omega(s) = -\frac{1}{T_m} (\Delta M_m(s) - \Delta M_e(s)), \quad s \Delta \delta(s) = \omega_N \Delta \omega(s), \quad (2.1)$$

$$\Delta M_e = [(-\Psi_{q0} - I_{q0} L_d(s)) \quad (\Psi_{d0} + I_{d0} L_q(s))] \begin{bmatrix} \Delta I_d(s) \\ \Delta I_q(s) \end{bmatrix} + I_{q0} G(s) \Delta U_f(s),$$

- dla zewnętrznego układu elektroenergetycznego

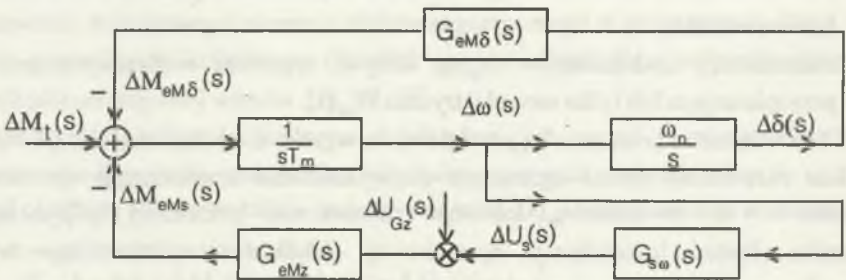
$$\begin{bmatrix} \Delta U_d(s) \\ \Delta U_q(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_L & -L_L \\ L_L & R_L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta I_d(s) \\ \Delta I_q(s) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} U_{qs} \\ -U_{ds} \end{bmatrix} \Delta \delta(s), \quad (2.2)$$

- dla układu wzbudzenia wraz z regulatorem napięcia i stabilizatorem systemowym

$$\Delta \dot{U}_f(s) = G_R(s) [(\Delta U_{gz}(s) - \Delta U_g(s)) + G_{sw}(s) \Delta \omega(s)], \quad (2.3)$$

gdzie: 
$$\Delta U_g(s) = \left( \frac{U_{d0}}{U_{g0}} \right) \Delta U_d(s) + \left( \frac{U_{q0}}{U_{g0}} \right) \Delta U_q(s), \quad U_{g0} = \sqrt{U_{d0}^2 + U_{q0}^2}.$$

Uwzględniając powyższe równania można sporządzić schemat blokowy generatora synchronicznego z wyróżnieniem składników tworzących jego moment elektromagnetyczny (rys.2.1).



Rys. 2.1. Schemat blokowy, określający składowe momentu elektromagnetycznego generatora synchronicznego

Fig. 2.1. The signal flow diagram of electromagnetic torque components of the synchronous generator

Wynika z niego, że moment elektromagnetyczny ma dwie składowe uzależnione od zmiany prędkości kątowej wirnika  $\Delta \omega(s)$ :

- składową  $\Delta M_{eM\delta}(s)$ , związaną ze zmianą kąta obciążenia generatora  $\Delta \delta(s)$  i opisaną przez transmitancję  $G_{eM\delta}(s)$ ,
- składową  $\Delta M_{eMz}(s)$ , związaną z działaniem stabilizatora systemowego poprzez regulator napięcia, opisaną przez transmitancję  $G_{eMz}(s) = G_{eMz}(s) G_{sw}(s)$ .

Przyjmując, że dla częstotliwości kołysań składowa momentu elektromagnetycznego wystereowanego przez idealny stabilizator systemowy ma charakter momentu tłumiącego

$$\Delta M_{eM\omega}(s) = G_{eMz}(s) G_{s\omega}(s) \Delta\omega(s) = D \Delta\omega(s), \quad (2.4)$$

otrzymuje się wyrażenia na transmitancje operatorowe idealnych stabilizatorów systemowych

$$\begin{aligned} G_{s\omega}(s) &= \frac{D}{G_{eMz}(s)}, & G_{sp}(s) &= \frac{D}{sT_m G_{eMz}(s)}, \\ G_{spe}(s) &= \frac{D}{-sT_m G_{eMz}(s)}, & G_{eMz}(s) &\cong \frac{k}{as^2 + bs + 1}, \end{aligned} \quad (2.5)$$

które zależą od transmitancji  $G_{eMz}(s)$ , określającej wpływ sygnału wejściowego regulatora napięcia na moment elektromagnetyczny generatora. Z zależności (2.5) wynika, że transmitancje operatorowe idealnych stabilizatorów winny zawierać idealne człony różniczkujące, które w praktyce są niemożliwe do zrealizowania. W konsekwencji transmitancje te przybliża się za pomocą kaskadowo połączonych członów korekcyjnych i członu różniczkującego o postaci odpowiednio:  $\frac{1+sT_1}{1+sT_2}$  i  $\frac{sT}{1+sT}$ .

Dobór nastawień stabilizatora o powyższej strukturze polega tu na określeniu współczynnika wzmocnienia, stałych czasowych członu korekcyjnego oraz stałej czasowej członu różniczkującego.

Wykaz niektórych oznaczeń:

- $\Delta U_d, \Delta U_q, \Delta I_d, \Delta I_q$  - napięcia i prądy osiowe generatora,
- $\Delta U_g, \Delta U_{gz}, \Delta \dot{U}_f, \Delta U_s$  - moduł napięcia generatora, napięcie zadane regulatora napięcia, napięcie wzbudzenia, napięcie wyjściowe stabilizatora,
- $\Delta M_e, \Delta M_m$  - moment elektromagnetyczny, moment mechaniczny turbiny,
- $\Delta\omega, \Delta\delta$  - prędkość kątowna elektryczna, kąt obciążenia,
- $L_d(s), L_q(s), G(s)$  - indukcyjności operatorowe generatora w osiach d i q, transmitancja między napięciem wzbudzenia a napięciem twornika w osi q,
- $R, R_L, L_L$  - rezystancja twornika, rezystancja i indukcyjność linii przesyłowej,
- $\Delta P_m, \Delta P_p, \Delta P_e$  - przyrostowe wartości mocy mechanicznej, mocy przyspieszającej, mocy elektrycznej generatora,
- $T_m, D$  - stała elektromechaniczna generatora, współczynnik momentu tłumiącego,
- $G_R, G_{s\omega}, G_{sp}, G_{spe}$  - transmitancje regulatora napięcia i stabilizatorów systemowych,
- $U_{d0}, U_{q0}, I_{d0}, I_{q0}, \Psi_{d0}, \Psi_{q0}$  - wartości ustalone napięć, prądów, strumieni sprzężonych generatora w osiach d i q,
- $U_{ds}, U_{qs}$  - napięcia sieci sztywnej, odnoszące się do osi d bądź q.

### 3. ZASADY DOBORU PARAMETRÓW ELEMENTÓW SKŁADOWYCH STABILIZATORÓW SYSTEMOWYCH

#### 3.1. Dobór stałych czasowych członu korekcyjnego

Dobór stałych czasowych członu korekcyjnego przeprowadza się, opierając się na charakterystyce fazowej transmitancji widmowej  $G_{eMz}(j\omega)$ . Charakterystyki fazowe transmitancji widmowych stabilizatorów  $G_{sw}(j\omega)$ ,  $G_{sp}(j\omega)$ ,  $G_{spe}(j\omega)$ , określone przez zależność (2.5), powinny dla częstotliwości kołysań spełniać następujące związki:

$$- \text{ dla } G_{sw}(j\omega) \quad \arg\{G_{sw}(j\omega)\} + \arg\{G_{eMz}(j\omega)\} = 0, \quad (3.1)$$

$$- \text{ dla } G_{sp}(j\omega) \quad \arg\{G_{sp}(j\omega)\} + \arg\{G_{eMz}(j\omega)\} + \frac{\pi}{2} = 0, \quad (3.2)$$

$$- \text{ dla } G_{spe}(j\omega) \quad \arg\{G_{spe}(j\omega)\} + \arg\{G_{eMz}(j\omega)\} + \frac{3}{2}\pi = 0 \quad (3.3)$$

lub, zmieniając na przeciwny znak sygnału wyjściowego

$$\arg\{G_{spe}(j\omega)\} + \arg\{G_{eMz}(j\omega)\} + \frac{\pi}{2} = 0. \quad (3.4)$$

Przyjmując, że charakterystyka fazowa transmitancji widmowych stabilizatorów systemowych zdeterminowana jest w dominujący sposób przez korektor, przedstawione wyżej warunki pozwalają wyznaczyć wartości stałych czasowych korektora. W programie doboru parametrów stabilizatorów systemowych PSS v.S stałe czasowe członu korekcyjnego wyznacza się w dwóch etapach:

- w etapie "DOBÓR WSTĘPNY" dobiera się na podstawie zależności analitycznych ilość  $n$  kaskadowo połączonych członów korektora oraz ich stałe czasowe, przyjmując wstępnie transmitancję widmową korektora w postaci:

$$\left( \frac{1 + j\omega T_{1s}}{1 + j\omega T_{2s}} \right)^n \quad (3.5)$$

przy czym podstawą doboru wymienionych wielkości jest spełnienie zależności (3.1÷3.3) dla częstotliwości kołysań wynikającej z badania układu generator-sieć sztywna,

- w etapie "APROKSYMACJA", korzystając z metod minimalizacji, przeprowadza się korektę stałych czasowych, zapewniającą spełnienie warunków (3.1÷3.3) z minimalnym błędem średniokwadratowym w zakresie kołysań lokalnych (0,2÷2) Hz.

### 3.2. Dobór stałej czasowej członu różniczkującego

Po ustaleniu parametrów korektora dobiera się stałą czasową członu różniczkującego, obserwując zmieniające się charakterystyki fazowe transmitancji  $G_{eMz}(j\omega)$  i transmitancji stabilizatorów systemowych  $G_{sw}(j\omega)$ ,  $G_{sp}(j\omega)$ ,  $G_{spe}(j\omega)$ , zawierających dobrany człon korekcyjny i dobierany w tym etapie człon różniczkujący. Stałą czasową członu różniczkującego dobiera się metodą prób z przedziału  $(1+20)$  s [3], dążąc do możliwie maksymalnego spełnienia warunków kompensacji  $(3.1+3.3)$  w pożądanym zakresie częstotliwości kołysań. Zwykle dla stabilizatorów systemowych, przeznaczonych do tłumienia kołysań lokalnych  $(0,8+2)$  Hz stała czasowa członu różniczkującego powinna się zawierać w granicach  $(1+6)$  s, a dla stabilizatorów przeznaczonych do tłumienia kołysań lokalnych i międzypoobzarowych  $(0,2+0,6)$  Hz powinna być zbliżona do 10 s.

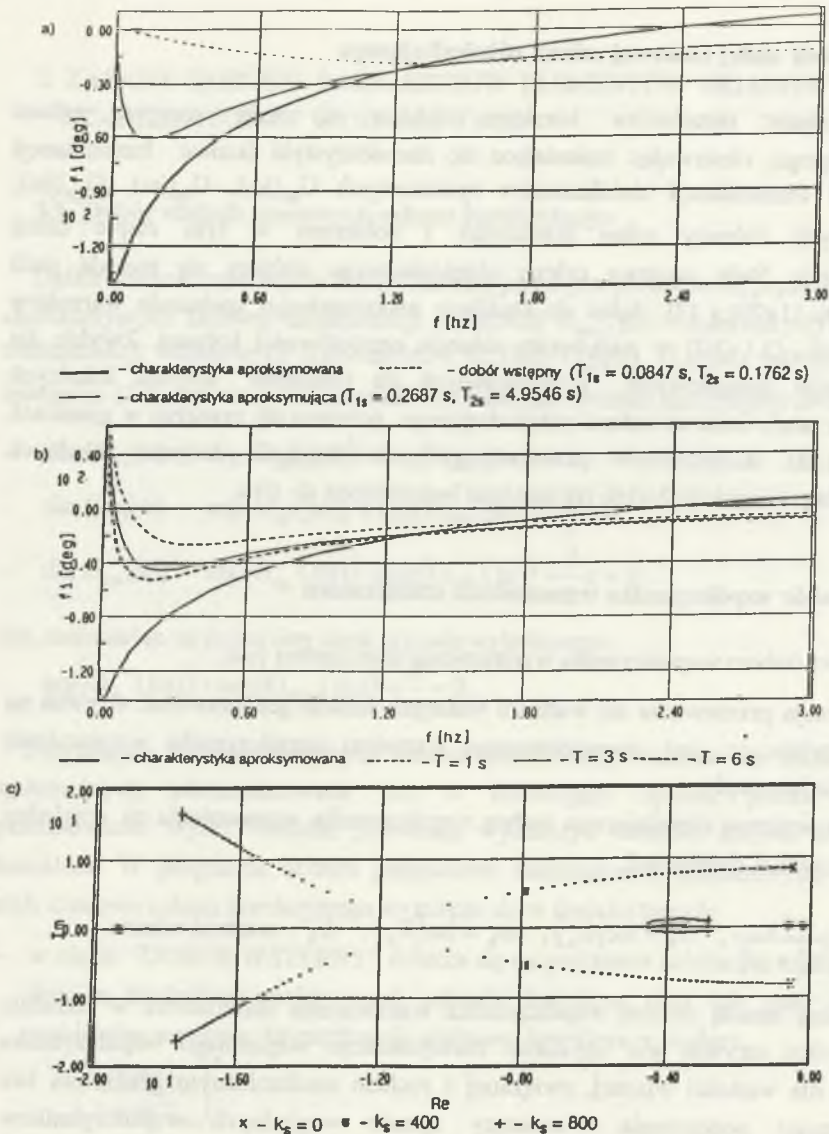
### 3.3. Dobór współczynnika wzmocnienia stabilizatora

Podstawą doboru współczynnika wzmocnienia stabilizatora jest:

- obserwacja przesuwania się wartości własnych układu generator-sieć sztywna na płaszczyźnie  $(\sigma, j\omega)$ , spowodowanego wzrostem współczynnika wzmocnienia i wynikająca stąd
- analiza wykresu określającego wpływ współczynnika wzmocnienia na względny współczynnik tłumienia  $\xi_h$

$$\xi_h = \frac{-\sigma_h}{\sqrt{\sigma_h^2 + \omega_h^2}}, \quad \sigma_h = \operatorname{Re}\{\lambda_h\}, \quad \omega_h = \operatorname{Im}\{\lambda_h\}, \quad \lambda_h - \text{wartość własna.}$$

Generalną zasadą doboru współczynnika wzmocnienia stabilizatora w układzie generator-sieć sztywna jest uzyskanie maksymalnego względnego współczynnika tłumienia dla wartości własnej, związanej z ruchem mechanicznym generatora bez jednoczesnego pogorszenia w znaczący sposób względnych współczynników tłumienia pozostałych wartości własnych oraz bez pogorszenia jakości procesu regulacji napięcia (ocenionej za pomocą dodatkowych badań symulacyjnych).



Rys. 4.1. Wyznaczenie parametrów stabilizatora systemowego:  
 a) wyznaczenie stałych czasowych członu korekcyjnego,  
 b) wyznaczenie stałej czasowej członu różniczkującego,  
 c) wyznaczenie współczynnika wzmacnienia

Fig.4.1. Determination of the power system stabilizer parameters:  
 a) determination of the compensation block time constants,  
 b) determination of the differential element time constant,  
 c) determination of the stabilizer gain



#### 4. WYNIKI PRZYKŁADOWYCH OBLICZEŃ

Dla generatora synchronicznego o mocy 360 MW, wyposażonego w układ wzbudzenia i regulator napięcia typu WGSY-3, przeprowadzono obliczenia parametrów stabilizatora systemowego, którego sygnałem wejściowym jest moc czynna generatora. W obliczeniach uwzględniono, że sygnał wyjściowy stabilizatora podawany jest na węzeł sumacyjny w regulatorze napięcia. Obliczenia przeprowadzono dla generatora pracującego w stanie znamionowego obciążenia. Wyniki obliczeń zestawiono na rys. 4.1.

#### 5. UWAGI KOŃCOWE

Przedstawiony sposób obliczeń nastawień parametrów stabilizatorów systemowych umożliwia określenie parametrów typowych stabilizatorów systemowych stosowanych w energetyce. Opracowany na jej podstawie program komputerowy PSS v.S umożliwia uwzględnienie w obliczeniach różnych modeli matematycznych generatorów ( do 6 rzędu włącznie) różniących się liczbą obwodów tłumiących w wirniku oraz różnych rodzajów układów wzbudzenia i regulatorów napięcia określonych w zaleceniach Komitetu IEEE oraz Instytutu Energetyki w Gdańsku [2]. Program ten jest wdrażany do użytkowania w Polskich Sieciach Elektroenergetycznych S.A.

#### LITERATURA

- [1] Demello F.P., Concordia Ch.: Concepts of synchronous machine stability as affected by excitation control. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-88, No 4, April 1969, pp. 316-328.
- [2] Grabowski A: Wpływ układów wzbudzenia na stabilność pracy generatorów synchronicznych. Prace Instytutu Energetyki, Zeszyt 21, Warszawa 1991.
- [3] Kundur P., Klein M., Rogers G.J., Żywno M.S.: Application of power system stabilizers for enhancement of overall system stability, IEEE Transaction, Vol. PWRS-4, No 3, May 1989, pp. 614-626.

- [4] Larsen E.V., Swann D.A.: Applying power system stabilizers, part I, II, III, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100, No 6, June 1981, pp. 3017-3044.
- [5] Paszek W., Boboń A., Kudła J.: Influence of the solid rotor on the electromagnetic damping properties of the alternator operating parallelly with a rigid network. Int. Conf. on the Evolution and Modern Aspects of Synchronous Machines, Zurich 1991.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Ernest Mendrela

Wpłynęło do Redakcji dnia 25 marca 1994.

### Abstract

The paper presents differential equations linearized at an operating point of a synchronous generator connected to an infinite-bus system through a transmission line and equipped with an automatic voltage regulator and a power system stabilizer (PSS). The ideal transfer function of PSS for speed, accelerating power and electrical power as input signals has been evaluated basing on the concept of the damping torque introduced by the PSS into the system.

The elaborated methodology concerns the parameter adjustment of the power system stabilizer model consisting of a compensation block, a signal differential block and a gain block. The selection of the compensation block time constant and the time constant of the differential block is based on the phase response of the "voltage regulator input - electromagnetic torque" frequency transfer function. The stabilizer gain is chosen by observing a dominant eigenvalue shift on the complex plane and changes of damping factors of other eigenvalues. The presented methodology is applied for the selection of the power system stabilizer parameters of a 360 MW synchronous generator.