

多数の動揺モードを実現する発電機モデルの構築と ロバスト制御を追求した発電機 H^∞ 制御設計の検討

道上 勉*・奈良 一 慶**

The Development of Generator Modeling Techniques for Multimode Oscillations and Study of Generator H^∞ Control Design Method for Robust Control

Tsutomu Michigami, Kazunori Nara

The modern electric power system of our country is high density, large-scale and complication. The multimode oscillations occurs in the generator connected with this system. It is being mixed to high- and low-frequency oscillations between the power systems and many other oscillations, such as the SSR and cross-compound machine oscillations, which is specific mode oscillations of generator. In this paper, first the generator actual model that realizes the multimode oscillations is constructed. Next, model reduction of this actual model is done, and design model to use for the control design is composed. Then, the H^∞ control design in modern control theory is presented by using this design model which derives damping of power system oscillations and robust stabilization of other multimodes. Finally, a goal for control design is verified by simulation on the actual model with H^∞ controller.

1. まえがき

我が国の電力系統は高密度で大規模複雑化してきておりこの系統に接続される発電機の動揺には系統事故等の系統間のローカル動揺や長周期動揺モードに加え発電機特有のクロス機間動揺や軸ねじれ動揺モードなど多数の動揺モードが混在している。この電力系統の発電機において系統間動揺モードを抑制して大電力長距離送電の系統安定化を図る制御設計が要請される場合には、従来は抑制対象の単一動揺モードを実現する系統モデル(一機無限大母線系統、中間負荷系統モデル)を用い、その動揺の抑制力確保を主体とし、この他の動揺モードのロバスト性は周波数応答法などにより補充する制御設計が多く採用されている。この単一動揺モードによる系統モデルでの制御設計は発電機が保有する多数の動揺モードの内、設計上考慮した対象動揺モードの抑制は果たせる。しかし、この他の多くの動揺モードのロバスト安定化はその動揺モードを実現するモデルが確立していないこともあり、理論的手法で得ることは不可能で、実系統に適用するにはその制御定数を膨大な試行錯誤の多機系の解析で検証する必要性があった。本稿ではこれを解決するため、まず、発電機が保有している多数の動揺モードを実現する発電機モデル(実モデル)を構築し、ついでこの実モデルの内、動揺抑制する特定モードの低次元化を行い制御設計に反映する公称モデルを構成する。その後、この公称モデルを用い抑制対象の動揺抑制とその他動揺モードのロバスト安定化を図る手法として H^∞ 制御設計法を活用して

* 電気電子工学科 ** 電気工学専攻大学院生

制御設計し、最後に、その制御定数を実モデルのシミュレーションで検証したので報告する。

2. 多数の動揺モードを実現する発電機実モデルの構築

〈2.1〉多数の動揺モードを実現する発電機の運動方程式 多数の動揺モードを実現する発電機の運動方程式の定式化を発電機が図1に示すように n 個の動揺モード（系統間のローカル動揺、長周期動揺や発電機特有のクロス間、軸ねじれなどの各動揺モード）を有するものと仮定して求める。この発電機モデルで制御入力 ΔP を M_1 に挿入したときの運動方程式は M を慣性定数、 D を制動係数、 K を同期化又はバネ係数、 δ を内部位相角、 s を微分演算子とすれば次式で表される。

$$\begin{aligned} (M_1 s^2 + D_1 s + K_1) \Delta \delta_1 + D_{12} s (\Delta \delta_1 - \Delta \delta_2) + K_{12} (\Delta \delta_1 - \Delta \delta_2) + \dots + D_{1j} s (\Delta \delta_1 - \Delta \delta_j) + \\ K_{1j} (\Delta \delta_1 - \Delta \delta_j) + \dots + D_{1n} s (\Delta \delta_1 - \Delta \delta_n) + K_{1n} (\Delta \delta_1 - \Delta \delta_n) = \Delta P, \\ M_2 s^2 \Delta \delta_2 + D_{12} s (\Delta \delta_2 - \Delta \delta_1) + K_{12} (\Delta \delta_2 - \Delta \delta_1) = 0 \\ M_j s^2 \Delta \delta_j + D_{1j} s (\Delta \delta_j - \Delta \delta_1) + K_{1j} (\Delta \delta_j - \Delta \delta_1) = 0 \\ M_n s^2 \Delta \delta_n + D_{1n} s (\Delta \delta_n - \Delta \delta_1) + K_{1n} (\Delta \delta_n - \Delta \delta_1) = 0 \quad \dots\dots\dots(1) \end{aligned}$$

(1)式を $\Delta \delta = x$, $\Delta P = u$ として整理すると次式となる。

$$M_f \ddot{x} + D_f \dot{x} + K_f x = F_f u \quad \dots\dots\dots(2)$$

ただし、 $M_f = \text{diag}[M_1, M_2, \dots, M_j, \dots, M_n]$

$$D_f = \begin{bmatrix} D_1 + D_{12} + \dots + D_{1n} & -D_{12} & \dots & -D_{1j} & \dots & -D_{1n} \\ -D_{12} & D_{12} & \dots & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -D_{1j} & 0 & \dots & D_{1j} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -D_{1n} & 0 & \dots & 0 & \dots & D_{1n} \end{bmatrix}, F_f = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$K_f = \begin{bmatrix} K_1 + K_{12} + \dots + K_{1n} & -K_{12} & \dots & -K_{1j} & \dots & -K_{1n} \\ -K_{12} & K_{12} & \dots & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -K_{1j} & 0 & \dots & K_{1j} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -K_{1n} & 0 & \dots & 0 & \dots & K_{1n} \end{bmatrix}, x = \begin{bmatrix} \Delta \delta_1 \\ \Delta \delta_2 \\ \vdots \\ \Delta \delta_j \\ \vdots \\ \Delta \delta_n \end{bmatrix}$$

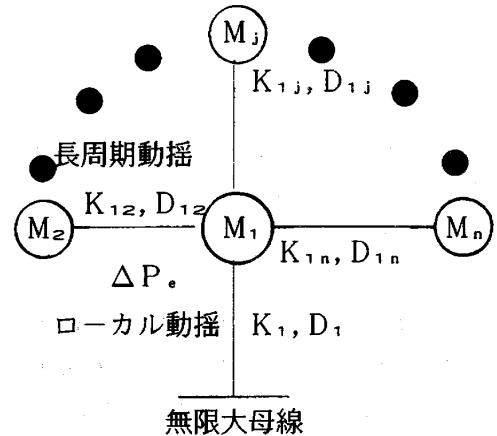


図1 多数の動揺モードの概念図

Fig.1. Concept diagram of multimode oscillations

〈2.2〉実モデルの状態空間伝達関数 (2)式の実モデルの状態空間伝達関数 $P_f(s)$ は次式となる。

$$P_f(s) = \left[\begin{array}{c|c} A_f & B_f \\ \hline C_f & E_f \end{array} \right] \quad \dots\dots\dots(3)$$

ただし $A_f = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -K_f/M_f & -D_f/M_f \end{bmatrix}$, $B_f = \begin{bmatrix} 0 \\ -F_f/M_f \end{bmatrix}$, $C_f = [C_v \ 0]$, $C_v = [1, 0, \dots, 0]$, $E_f = [0]$

3. 動揺抑制する制御用公称モデルの構築

〈3.1〉低次元モードの定式化 上記 n モードの内、系統間動揺モード（①ローカル動揺、②長周期動揺;1,2次モード）の2モード動揺波形のみを抑制する制御を考えると設計上は実モデルは必要なく系統間動揺モードのみを低次元化した公称モデルを定義して設計に用いればよい。いま、モード座標を $\eta = [\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_n]^T$ で定義し、(2)式を $x = \Phi \eta$ で座標変換して $\Phi^T M_f \Phi = I$ が成り立つように Φ を正規化すれば実モデルの運動方程式は次式で表される。

$$\ddot{\eta} + D \dot{\eta} + K \eta = F u \quad \dots\dots\dots(4)$$

ただし、 $D = \Phi^T D_f \Phi = \text{diag}[d_{11}, d_{22}, \dots, d_{nn}]$, $K = \Phi^T K_f \Phi = \text{diag}[k_1^2, k_2^2, \dots, k_n^2]$

$$F = \Phi^T F_r = [f_1, f_2, \dots, f_n]^T, (k_1 < k_2 < \dots < k_n)$$

そこで、系統間動揺モード(第1,2 モード)のみからなる制御用の低次元化した公称モデルの運動方程式は(4) 式と同様に $\eta_r = [\eta_1, \eta_2]^T$ を定義すれば次式となる。

$$\ddot{\eta}_r + D_r \dot{\eta}_r + K_r \eta_r = F_r u \quad \dots\dots\dots(5)$$

$$\text{ただし、} D_r = \text{diag}[d_{11}, d_{22}], F_r = [f_1, f_2]^T, K_r = \text{diag}[k_1^2, k_2^2], (k_1 < k_2)$$

なお、 x は $\Phi = [\Phi_{12}, \Phi_{3n}]$ と分割し、 $x = \Phi_{12} \eta_r$ で得られる。

<3.2>公称モデルの状態空間伝達関数 発電機のロバスト制御設計に用いる(5)式で表される系統間動揺モード(1, 2モード)のみの公称モデルの状態空間伝達関数 $P_r(s)$ は次式となる。

$$P_r(s) = \left(\begin{array}{c|c} A_r & B_r \\ \hline C_r & E_r \end{array} \right) \quad \dots\dots\dots(6)$$

$$\text{ただし} \quad A_r = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -K_r & -D_r \end{bmatrix}, B_r = \begin{bmatrix} 0 \\ -F_r \end{bmatrix}, C_r = [\Phi_y, 0], \Phi_y = C_y \Phi_{12}, E_r = [0]$$

4. 多数の動揺モードと特定モードのモデル設計例

- <4.1>モデルの設計条件 (1) 対象発電機; クロスコンパウンド形大容量火力発電機(定格出力 1,000MW, 50Hz 系), (2) 解析ケース; A ローカルモード($T=1s$)不安定、B 長周期モード($T=3s$)不安定
(3) 実現する動揺モード; 系統間の①ローカル動揺($T=1s$)、②長周期動揺($T=3s$)と発電機特有の③クロス機間動揺3Hz 程度, ④軸ねじれ15Hz程度の4つの実モデルの構築、
(4) 設計用公称モード; 系統間の①ローカル動揺($T=1s$)、②長周期動揺($T=3s$)の公称モデルの構築
<4.2>モデルの設定定数 (1) 商用角周波数; $\omega_o = 100\pi$, (2) モードの設定定数; 表1、(3) 制御入力; $\Delta P_o = 1.0pu$ (M1)

表1 解析モードの設定定数

Table 1. Parameters of analysis mode

モード種別		系統間モード		発電機特有モード	
周期 $T[s]$		1	3	1/3	1/15
減衰定数	A	-0.05	0.05	0.05	0.04
	B	0.10	-0.05	0.05	0.04
$\zeta [pu]$					
慣性定数 $m[s]$		15	8	1	0.5

モデルの設定定数と解析定数の関連式
慣性定数 $M = m / \omega_o$ 、制動係数 $D = 2M \zeta \omega_n$
固有角周波数 $\omega_n = 2\pi / T$
同期化・バネ係数 $K = M \omega_n^2$

<4.3>実現モデルの設計結果 上記

条件で構築した実モデル並びに公称モデル

(系統間動揺モード)のケースA(ローカルモード不安定)のSV(特異値; ボード線図のゲインに相当)の周波数応答図とインパルス応答が図2(a)である。同図より実モデルでは4つ動揺モードが、公称モデルでは2つの系統間動揺(ローカル動揺、長周期動揺)モードが忠実に実現しており、ローカルモード不安定が確認できる。また、ケースB(長周期モード不安定)のSVの周波数応答図とインパルス応答が図2(b)で、同図より系統間動揺のうちローカルモードは5s程度で振動収束しているが長周期モード($T=3s$)はそれ以降で振動発散が良く現れている。一方、各ケースの実モデルと公称モデルの固有値、減衰定数、固有角周波数および H_∞ ノルム(伝達関数ゲイン(SV)の最大値)が表2で同表から実モデルで4つの動揺モードがあり、この中の系統間動揺モード2つが公称モデルに正確に反映されていることが確認できる。また、ケースAとBは系統間動揺モードの特性と H_∞ ノルム値は異なるが発電機特有モードの特性はほぼ同値となっていることが分かる。

表2 実モデルと公称モデルの特性定数

Table 2. Eigenvalues of real and reduction model

ケース		固有値	減衰定数 ζ [pu]	ω_n [rad/s]	H ∞ ノルム
A	実 モデル	$0.215 \pm j6.16$ $-0.089 \pm j2.03$ $-0.98 \pm j19.5$ $-3.89 \pm j95.7$	-0.035 0.044 0.050 0.041	6.16 2.03 19.5 95.8	7.02
	公称 モデル	$0.215 \pm j6.16$ $-0.089 \pm j2.03$	-0.035 0.044	6.16 2.03	7.04
B	実 モデル	$-0.496 \pm j6.14$ $0.087 \pm j2.03$ $-1.04 \pm j19.5$ $-3.92 \pm j95.7$	0.081 -0.043 0.054 0.041	6.16 2.03 19.5 95.8	3.06
	公称 モデル	$-0.496 \pm j6.14$ $0.087 \pm j2.03$	0.081 -0.043	6.16 2.03	3.05

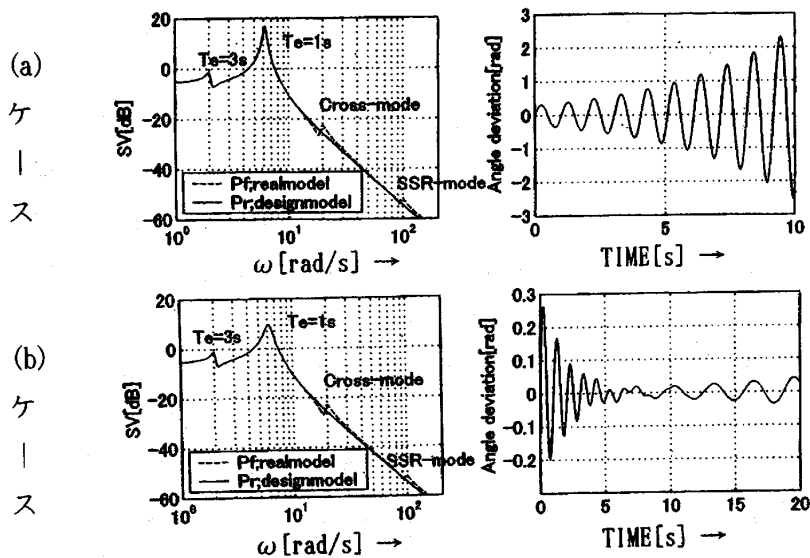


図2 構築モデルの周波数応答図、インパルス応答図

Fig.2. Analysis results of generator model

5. ロバスト制御を追求した発電機H ∞ 制御設計法

〈5.1〉発電機ロバスト制御適用の考え方 電力動揺抑制のロバスト制御としてH ∞ 制御法を採用する。具体的には多数の動揺モードを実現した実モデルの中で、系統間動揺モード（ローカル動揺と長周期動揺）のみを実現する公称モデルを用いて図3の制御ブロック図で系統間動揺を抑制しつつロバスト安定化を図る発電機H ∞ 制御設計を行う。その結果、動揺抑制が不十分な場合はH ∞ 制御特性（ロバスト安定化）を維持しつつ制動力の改善策（PSS追加等）を図る。

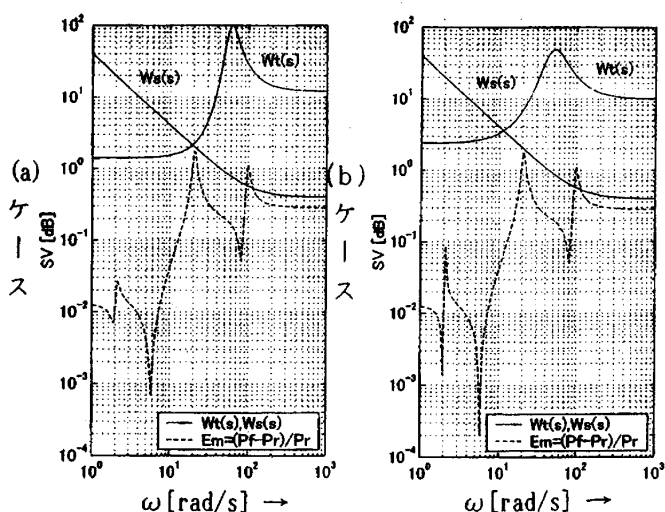
〈5.2〉ロバスト制御の設計手順 系統間動揺モードを抑制し、ロバスト制御する発電機H ∞ 制御の設計は図3の制御ブロック図を用いて次の手順で行うこととした。

①制御対象の状態空間行列と周波数応答特性の計算、②H ∞ 制御の重み関数と周波数応答特性の計算、③H ∞ 制御の制御ブロック図の構成、④H ∞ 制御設計と周波数応答特性の計算、⑤H ∞ 制御器の設計定数の評価。なお、実モデルと公称モデルの差がロバスト安定化させる制御誤差となる。

〈5.3〉ロバスト制御の評価手法 評価方法としては①動揺の抑制効果は固有値などと動的ステップ応答、②ロバスト安定は①に加えSV（特異値）周波数応答法で行う。

u : 制御入力、 y : 観測出力、 z_1, z_2 制御量

＜6.1＞ロバスト制御の設計条件 a対象発電機；クロス
形火力発電機(定格出力1,000MW, 袖ヶ浦2G) b. 解析
ケース；Aローカル動揺($T=1s$)不安定, Bローカル・長
周期動揺($T=3s$)不安定、c. 制御入力； $\Delta P_o=1.00pu$ (M1)
d. 設計モデルと設定定数；設計モデルは系統間の①
ローカルモード、②長周期モードの公称モデルを採用。
発電機定数・運転状態とモード設定定数は表3の通り。



定数	P [MVA], M, Xd, Xd', Xq, Xd'', Tdo', Tdo'', Tqo''
	P 635, 2.18, 1.62, 0.26, 1.62, 0.19, 4.2, 0.034, 0.082 S 520, 12.4, 1.62, 0.30, 1.60, 0.19, 7.8, 0.038, 0.082
A V R	G (s)=400 (1+0.7s)/(1+0.02s) (1+10s) (1+0.01s) リミット；上限5.5, 下限4.0
運転状態	Pg=0.857 [pu], Qg=0.00 [pu], Vg=1.00, fo=50 [Hz]
モード	ローカル:mは上記, T, とは一機無限大母線系統モデル (T=1s実現)の固有値より算出(7式)
設定定数	長周期:m=8.0, T=3, と; A=0.05, B=-0.01 クロス;mは上記, T=1/3, と=0.05, 軸ねじれ; 表1

$$\left. \begin{aligned} \xi &= \frac{-\sigma}{\sqrt{\sigma^2 + \omega^2}} \\ T &= \frac{2\pi}{\sqrt{\sigma^2 + \omega^2}} \end{aligned} \right\} \dots\dots (7)$$
$$|\Delta_m(j\omega)| \leq |W_t(j\omega)|, \quad \forall \omega \dots\dots\dots (8)$$

そこでロバスト安定化を得るため制御（乗法）誤差 $\Delta_m(s)$ を見積り、それをカバーする入力端重み関数 $W_t(s)$ を定義し、高周波数域で高ゲインとなり極力、低次数の選定が重要となる。一方、系統間動揺モードを抑制する出力端重み関数 $W_s(s)$ は低周波数域で高ゲインで、かつ、低次元の選定が重要となる。各ケースの重み関数は $W_t(s)$ を2次、 $W_s(s)$ を1次関数の(9)、(10)式で定義し、 $W_t(s)$ の定数は図5のように $\Delta_m(s)$ を完全にカバーしてロバスト安定化が得られるよう、また、 $W_s(s)$ の定数は系統間動揺モードの固有値が安定になるように求めた。その設定定数が表4で、 $W_t(s)$ 、 $W_s(s)$ 及び $\Delta_m(s)$ のSV周波数応答図が図5である。

$$W_t(s) = K_t \frac{s^2 + 2\zeta_n \omega_n s + \omega_n^2}{s^2 + 2\zeta_d \omega_d s + \omega_d^2} \dots\dots\dots (9)$$

$$W_s(s) = K_s \frac{s + T_n}{s + T_d} \dots\dots\dots (10)$$

表4 重み関数 $W_t(s)$ $W_s(s)$ の設定定数

Table 4. Parameters of weighting function

ケース	K_t	K_n	ω_n	ζ_d	ω_d	K_s	T_n	T_d
A	12	0.8	35	0.2	60	4,000	0.01	100
B	10	1.2	35	0.4	50	4,000	0.01	10

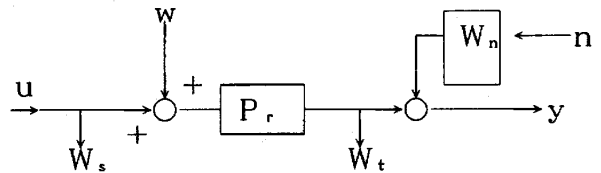


図6 制御ブロック図の追加

Fig.6. Addition of control block diagram

手順③ 発電機ブロック図の伝達関数 P_r の直達項(E_r)は零のため図3の w から y の伝達関数の直達項も零となり H^∞ 制御設計の仮定条件が満たされないため同図に図6のような観測ノイズ n を加えて設計用の制御ブロック図を構成した。なお、 $W_n(s)=0.001$ とした。

手順④ ロバスト制御を実施する H^∞ 制御器 K の制御設計には多くの手法があるが、ここではリカッチ方程式に基づく方法を採用する。具体的には H^∞ 制御の設計定数 γ が最小時の制御定数として得られ、今回の例ではケースA、Bの最小 γ 値がそれぞれ2.76, 7.34で H^∞ 制御器の制御定数は表5のような高次の伝達関数となった。

手順⑤ 設計した H^∞ 制御器 K (制御リミット ± 0.2 pu)を評価するための実モデルに K 並びに PSS (後述)を含んだMATLABのSIMULINK制御ブロック図が図7である。同図より各ケースの制御前後の特性定数を求めたのが表6の制御前、制御後①(PSS 無)である。同表より両ケースとも各動揺モードは安定化されているが長周期動揺モード(下線固有値)は弱ダンピングとなっている。この弱制動は両ケースとも現れ、重み関数を種々変化しても残り、同関数の調整では改善し得ない現象である。そこで H^∞ 制御特性を極力、温存しつつ、この動揺モードの制動力を改善するた現行発電機で多く用いている $\Delta\omega$ 形 PSS を図7の制御ブロックのM-2に追加することとした。この PSS の制動力を減衰定数0.5[pu]程度増加するよう設計し、その制御関数 $G_p(s)$ (制御リミット ± 0.2 pu)を(11)式に示す。 PSS を追加した実モデルの特性定数が表6の制御後②(PSS 有)で、 PSS 有無の入力外乱

表5 発電機 H^∞ 制御器の伝達関数

Table 5. Transfer function of H^∞ controller

ケース	H^∞ 制御器の伝達関数
A	$\frac{-8.95e04s^8 - 4.86e06s^7 - 7.27e08s^6 - 2.01e10s^5 - 1.29e12s^4 - 7.98e12s^3 - 4.73e13s^2 - 4.35e13s - 1.75e14}{s^9 + 7.71e02s^8 + 2.24e05s^7 + 3.19e07s^6 + 2.56e09s^5 + 9.66e10s^4 + 2.47e12s^3 + 9.57e11s^2 + 1.07e13s + 1.07e11}$
B	$\frac{-1.15e05s^8 - 9.66e06s^7 - 8.01e08s^6 - 2.64e10s^5 - 8.42e11s^4 - 3.81e12s^3 - 3.20e13s^2 - 5.26e13s - 6.44e13}{s^9 + 6.01e02s^8 + 1.64e05s^7 + 2.02e07s^6 + 1.64e09s^5 + 5.85e10s^4 + 1.05e12s^3 - 6.25e12s^2 + 1.11e13s + 1.12e11}$

wのステップ応答(M1~M3内部位相角偏差)が図8で、これから長周期動揺モード以外の特性(固有値)をほとんど変化させずにPSSによる長周期動揺モードの抑制改善効果が得られている。この改善策を施した H^∞ 制御有無のステップ応答とSV周波数応答図がそれぞれ図9,10で、両図より系統間動揺モードの良好な抑制効果と発電機特有モードのロバスト安定化が確認できる。

PSS制御関数

$$G(s) = \frac{0.05 \times 5s}{1+5s} \dots\dots (11)$$

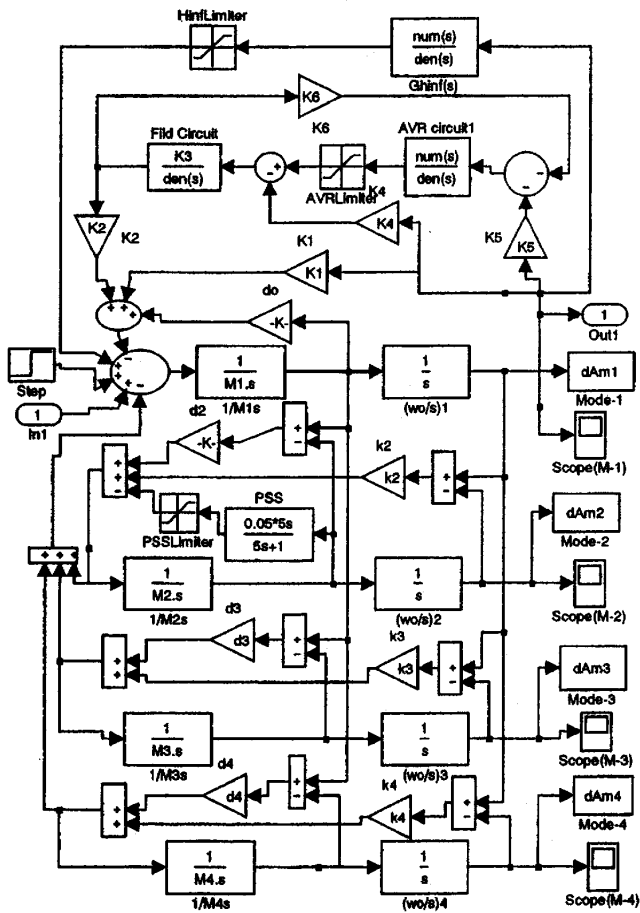


図7 発電機 H^∞ 制御システムの制御ブロック図

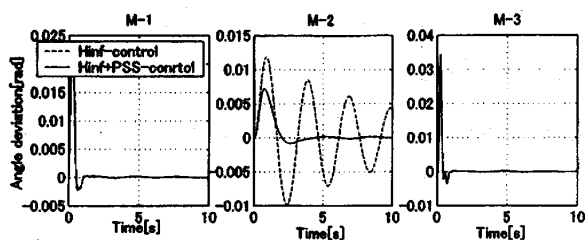
Fig.7. Block diagram of H^∞ control system

表6 発電機 H^∞ 制御前後の特性定数

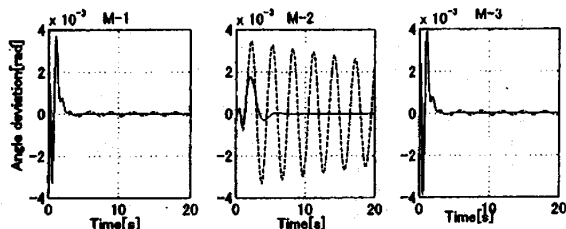
Table 6. Eigenvalues of H^∞ controller

ケース	固有値	減衰定数 ζ [pu]	ω_n [rad/s]	H^∞ /MVA
A 制御前	$-0.040 \pm j1.98$	0.020	1.98	26.0
	$0.116 \pm j5.76$	-0.020	5.76	
	$-1.11 \pm j20.4$	0.054	20.5	
	$-4.06 \pm j97.6$	0.042	97.6	
	$-1.26 \pm j1.35$	0.681	1.85	
A 制御後 ① (PSS無)	$-0.103 \pm j2.09$	0.049	2.09	0.30
	$-4.81 \pm j6.42$	0.600	8.03	
	$-4.81 \pm j19.4$	0.241	20.0	
	$-4.21 \pm j97.2$	0.043	97.3	
	$-0.981 \pm j1.14$	0.653	1.50	
	$-10.3 \pm j22.2$	0.421	24.4	
	$-37.6 \pm j34.9$	0.733	51.3	
	$-131.0 \pm j147.0$	0.666	197.0	
	$-0.112 \pm j2.10$	0.053	2.10	
	$-47.1, -101, -395$			
A 制御後 ② (PSS有)	$-1.07 \pm j1.69$	0.536	2.00	0.07
	$-4.79 \pm j6.33$	0.603	7.94	
	$-4.78 \pm j19.4$	0.240	20.0	
	$-4.21 \pm j97.2$	0.043	97.3	
	$-0.981 \pm j1.14$	0.653	1.50	
	$-10.3 \pm j22.2$	0.421	24.4	
	$-37.6 \pm j34.9$	0.733	51.3	
	$-131.0 \pm j147.0$	0.666	197.0	
	$-0.126 \pm j2.10$	0.060	2.10	
	$-0.222, -47.1, -101, -395$			
B 制御前	$0.055 \pm j1.97$	-0.028	1.97	11.5
	$0.262 \pm j5.78$	-0.045	5.78	
	$-1.09 \pm j20.4$	0.053	20.5	
	$-4.05 \pm j97.6$	0.042	97.6	
	$-1.26 \pm j1.35$	0.682	1.85	
B 制御後 ① (PSS無)	$-0.024 \pm j2.09$	0.011	2.09	0.23
	$-2.21 \pm j6.72$	0.312	7.08	
	$-3.38 \pm j20.4$	0.164	20.7	
	$-4.69 \pm j96.5$	0.049	96.6	
	$-1.38 \pm j0.75$	0.878	1.57	
	$-12.5 \pm j12.5$	0.707	17.7	
	$-51.7 \pm j34.4$	0.833	62.1	
	$-114.0 \pm j156.0$	0.588	193.0	
	$-1.05 \pm j1.74$	0.515	2.03	
	$-47.1, -101, -231$			
B 制御後 ② (PSS有)	$-0.784 \pm j1.64$	0.432	1.82	0.25
	$-2.11 \pm j6.58$	0.305	6.91	
	$-3.39 \pm j20.4$	0.164	20.6	
	$-4.69 \pm j96.5$	0.049	96.6	
	$-1.38 \pm j0.75$	0.878	1.57	
	$-12.5 \pm j12.5$	0.707	17.7	
	$-51.7 \pm j34.4$	0.833	62.1	
	$-114.0 \pm j156.0$	0.588	193.0	
	$-1.40 \pm j1.70$	0.636	2.20	
	$-0.222, -47.1, -101, -231$			

〔注〕 下線はPSS追加で改善した固有値

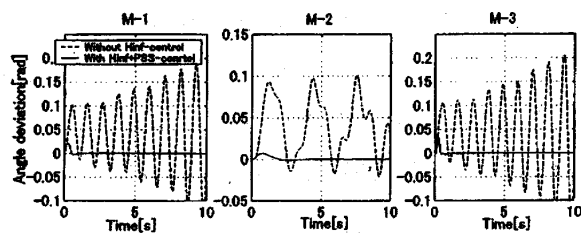


(a) ケースA

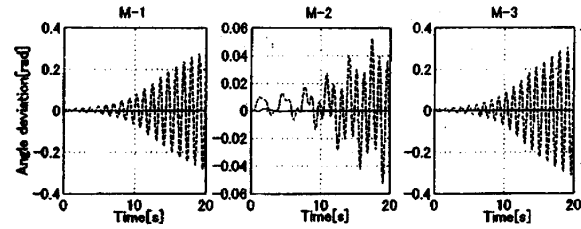


(b) ケースB

図8 PSS有無のステップ応答
Fig.8. Step responses of with and without PSS

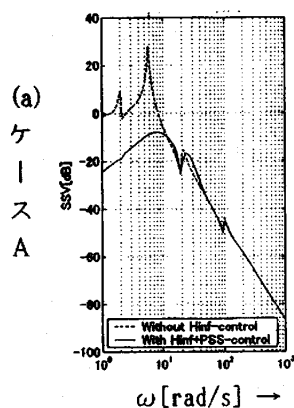


(a) ケースA

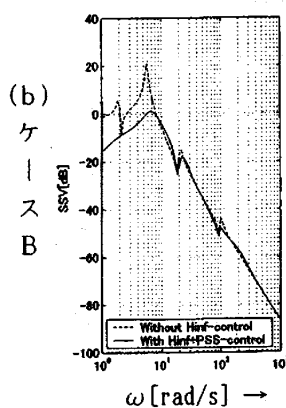


(b) ケースB

図9 発電機H ∞ 制御器のステップ応答
Fig.9. Step responses of H ∞ controller



(a)
ケ
ー
ス
A



(b)
ケ
ー
ス
B

図10 H ∞ 制御のSV周波数応答図

Fig.10. SV frequency responses of H ∞ controller

7. あとがき

- (1) 高密度大規模化した電力系統の発電機が保有している多数の動揺モードを実現する発電機実モデルとロバスト制御設計に反映する低次元化した公称モデルの構築を運動方程式に基づき確立した。
- (2) 1の実モデルと公称モデルの有効性を4つの動揺モードを有する発電機でローカル動揺又は長周期動揺モードが不安定となるケースの解析により検証することができた。
- (3) 系統間動揺モードを抑制し、かつ、ロバスト安定化する発電機制御法としてはリカッチ方程式に基づくH ∞ 制御設計を採用し、公称モデルを用いた設計手順と設計定数の評価手法を提案した。
- (4) 3の手順で大容量火力機定数の設定パラメータを用いローカル動揺並びにローカル・長周期動揺モードの不安定ケースを設計した。その結果、H ∞ 制御設計の重み関数の適切な選定により各動揺モードの安定化は得られたが長周期動揺モードの弱制動が残った。その改善策として $\Delta\omega$ 形PSSの組合せにより実モデルの解析で良好な抑制効果とロバスト安定化を確認できた。今後は水力や原子力など種々の発電機モデルでの制御設計や多機系モデルでの検討を実システムの適用性を含め進める。

<文 献>

- (2) 道上勉、奈良一慶、小俣人士；「多数の動揺モードを実現する発電機モデルの構築とロバスト制御を追求した発電機H ∞ 制御設計の検討」, H14電学電・エ部門大I, No. 52, p358-364

(平成14年9月27日受理)