

電力システムの系統安定化とロバスト制御を迫及した 発電機適応形 H_{∞} 制御システムの構築

道上 勉*

The Development of Adaptive Generator H_{∞} Control System for Stability and Robust Control of Power Systems

Tsutomu Michigami

In Japan, since the development of high density and large-scale power system, the multimode oscillations occurs in the generator connected with this the modern electric power system. There have been mixed mode between the power systems and many others oscillations, such as the SSR and cross-compound machine oscillations, which is specific mode oscillations of generator. To date, most major generators in trunk power system are equipped with supplementary excitation control, commonly referred to as the conventional PSS. However, low frequency oscillations still occur in system. In this paper, first the development of adaptive H_{∞} control system for stability and robust control is explained. Then, a goal for control design is verified by simulation on the actual model with new adaptive H_{∞} control system.

キーワード：多数モード動揺、全モード検出方式、ロバスト制御、適応形 H_{∞} 制御システム、シミュレーション

Keywords : multimode oscillations, full-mode detecting system, robust control, adaptive H_{∞} control system, simulation

1. まえがき

わが国の電力システムは大容量送電システムや長距離大電力連系システムなどに加え各種の多様な発電機で構成され大規模高密度で複雑化している。このような発電機の動揺モードには、系統内のローカル動揺、連系系統間の長周期動揺などの系統間モードや軸ねじれ、クロス機間など発電機特有モードなど多数の動揺モードが混在している。系統事故時などの系統安定化にはこれら多数モード動揺の内、抑制対象の系統間モードを抑制し、その他動揺モードのロバスト安定化を図る制御が発電機に要求される。これに対し現行の制御設計法は抑制対象モードのみを実現する一機無限大母線系統モデル⁽¹⁾⁽²⁾を用い設計し、その他動揺モードのロバスト安定化は膨大な多機系のシミュレーションを行い特定する手法が多く用いられている。しかし、この方法では抑制対象モードの抑制とロバスト安定化を妥協した制御設計となり十分な抑制効果が得られなく、かつ、ロバスト安定化も理論的手法でないため必要なロバスト性が確保できない。この解決策として発電機励磁制御系の技術進展によるデジタル化を利用し、系統事故時などの多数モード動揺を自動検出して、系統安定化とロバスト制御を迫及した発電機適応制御システムの構築が有効となる。そこで本稿では系統事故時などの多

数モード動揺を含んだ発電機動揺波形のオンライン自動検出方式を確立し、この多数モードを実現する

実モデルと抑制対象モードのみの制御設計用公称モデルを形成する。その後、この両モデルを用いて H_{∞} 制御設計を行い系統安定化とロバスト制御を迫及した発電機適応形 H_{∞} 制御システムを構築させ、最後に同システムのシミュレーション結果を述べる。

2. 適応形 H_{∞} 制御システムの構成⁽³⁾

系統事故時などの発電機多数モードをオンラインで自動検出し、その動揺特性に基づいた系統安定化とロバスト制御を行う適応形 H_{∞} 制御システムの機能は次の通りである。発電機多数モード波形のオンライン検出は動揺モードの周期比（最大周期と最小周期の比）に応じた自動検出方式を、また、系統安定化とロバスト制御は現代制御理論による H_{∞} 制御設計法を採用することとした。その適応形 H_{∞} 制御システムの構成は図 1 で①発電機多数モード動揺波形の自動検出部、②多数モード動揺を実現する実モデルと制御設計用の公称モデル形成部、③適応形 H_{∞} 制御設計部並びに制動力改善部、④適応形制御システムの検証解析部の 4 部門で構成される。

* 電気電子工学科

3. 発電機多数モード波形の自動検出方式⁽⁴⁾⁽⁵⁾

大規模高密度系統に接続する発電機動揺モードには系統間モードや発電機特有モードなど多くの動揺モードが混在している。このような電力系統の系統安定化とロバスト制御を迫及した発電機適応制御を実施する場合、多数モードを自動検出し、動揺特性

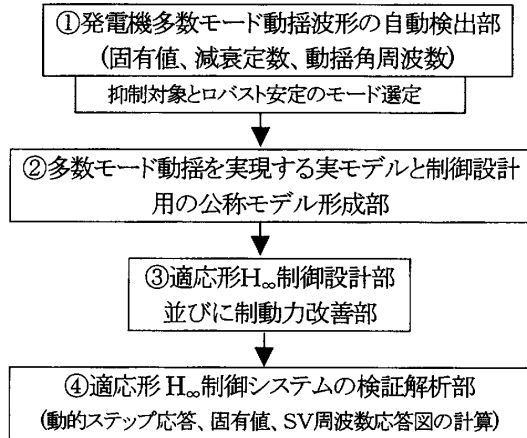


図1 適応形H_∞制御システムの構成

Fig.1. Structure of adaptive H_∞ control system

に応じた制御設計を行う必要がある。ここでは発電機多数モードを先に開発した多項式近似と特性方程式変換⁽⁶⁾を用い自動検出する方式について述べる。

<3.1> 発電機多数モードと自動検出方式の同時検出特性

(1) 発電機の多数モード動揺の性質 発電機が有する制御対象の主な多数モード動揺は次の2つに分けられる。

- a. 系統間モード（ローカルと長周期モードの混在）のみの水力機や系統間モードと低周波のクロスモードを有する火力機などモードの周期が接近し周期比Rが小さいモード群（aモード群）
- b. 系統間モードと高周波の軸ねじれモードを有する原子力機など周期比Rが大きいモード群（bモード群）

(2) 自動検出方式の同時検出特性 最初に実機の全モード群を自動検出方式で同時一括サンプリング解析しその検出特性を確認する。

- a. 対象モード; A 系統間モードのみ(周期T=1,2,3,4s,R=4, 図3(a)) B 火力クロス機(系統間モード 2(T=1,3s)+クロスモード(3Hz), R=9, 図3(b)), C 原子力機(系統間モード 2(T=1,3s)+軸ねじれモード(8Hz), R=24, 図3(c))
- b. 検出方式; 多項式近似と特性方程式変換での検出方式(付録1)

上記の検出結果が表1で、検出の判定として検出固有値の誤差を±10%程度とすれば各ケースとも全モードを同時一括検出できないがケースAは2~3モードを、ケースB,Cは系統間モードと発電機特有モードの各1つを同時検出可能となっている。ここで着目したいのは各ケースとも最高周波成分を高精度で検出していることである。

<3.2> 多数モードの全モード自動検出方式

(1) 多数の全モード自動検出の考え方 発電機の多数モードには前節で述べた周期比が小さいaモード群と周期

比が大きいbモード群がある。これら多数の全モードを検出するにはモード群の動揺特性に応じてaモード群は最初に最高周波モードを検出し、次にそれを除いて残りを検出する方式（モード分割方式）を、bモード群は最初に検出した最高周波モードの周期と同期する刻み時間で残りモードを検出する方式（高周波同期方式）を適用する。両検出方式のR値の使い分けは最初に検出した最高周波モードの周期と次に検出するモード群の刻み時間から定まるがR=20程度となる。なお、理論的にはbモード群もモード分割方式で検出可能であるが減算モードの大きさと位相調整が不要となる高周波同期方式を適用することとした。

(2) 多数の全モード自動検出方式の手順 具体的検出手順は

- a. 周期比が小さいaモード群の検出（モード分割方式）; 図2(a)のように①全モード群を自動検出方式にかけ検出精度の高い最高周波モードを検出、②全モード群から①で検出した最高周波モードを減算して残りモードを自動検出方式にかけ検出する。
- b. 周期比が大きいbモード群の検出（高周波同期方式）; 図2(b)のように①全モード群を自動検出方式にかけ最高周波モードを検出、②全モード群を①で検出した最高周波モードの周期と同期する刻み時間で自動検出方式にかけ残りモードを検出する。

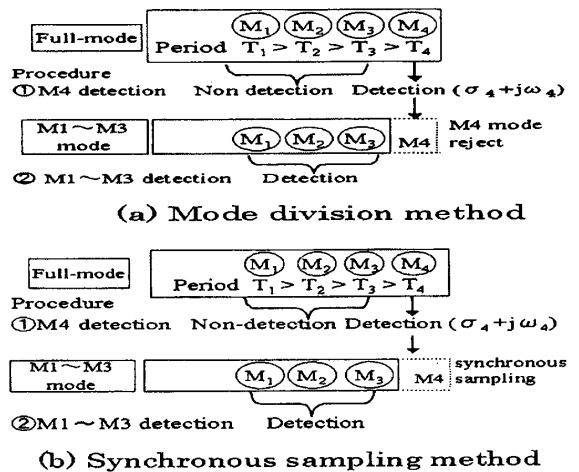


図2 全モード自動検出方式の検出手順

Fig.2. Procedure of full-mode automatic detecting system

<3.3> 全モード自動検出方式のシミュレーション

(1) 検出条件 a. 検出対象モード; 3.1節(2)の対象モード(A:系統間モード,B:火力クロス機,C:原子力機の各ケース、図3)

b. 検出方式; A,Bはモード分割方式、Cは高周波同期方式適用

(2) シミュレーションの検出結果 全モードの検出結果が表2で、同表から周期比が小さい4つの系統間モードのみのケースAと系統間モード2つと低周波のクロスモードを有する火力機のケースBはモード分割

方式で、周期比が大きい系統間モード2つと高周波の軸ねじれを有する原子力機のケースCは高周波同期方式でそれぞれ全モードを検出可能であることが分かる。

以上の結果をまとめたのが表3で、この全モード自動検出方式を発電機適応形H ∞ 制御システムに適用し、その設定定数として表3の値を採用することとする。

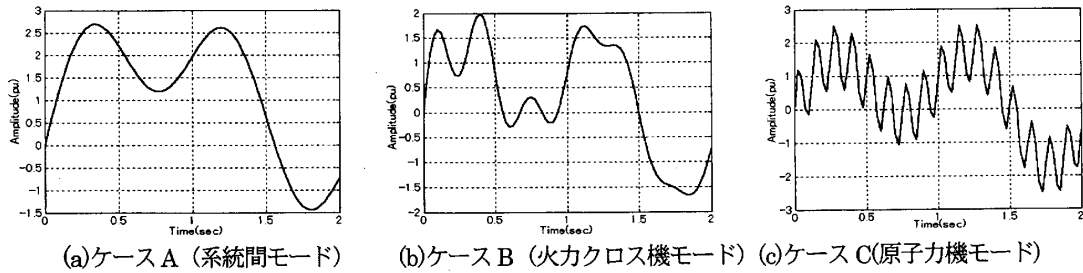


図3 多数モード動揺のモデリング波形

Fig.3. Modeling waveform of multimode oscillations

表1 多数モード動揺の自動検出方式による一括検出結果

Table 1. Results of a package detection of automatic detecting system for multimode oscillations

解析ケース	T ₀	ΔT	n	ΔE^2	検出固有値	原波形	判定		
A 系統 モード	周期T	2	0.05	25	0.058	0.149±j6.28, -0.93±j2.70, 0.467±j1.44	周期比R=4 0.148±j6.28	不可	
	=1+2+3+4s	2	0.025	25	0.50e-2	0.149±j6.28, -0.96±j2.99, 0.061±j1.70		不可	
	(全モード)	2	0.025	30	0.032	0.145±j6.28, -1.37±j3.49, -0.312±j1.75		不可	
	T=3+4s	2	0.025	25	0.11e-11	-0.087±j2.09, 0.148±j1.57		-0.944±j3.14	可
	1+4s	2	0.05	25	0.48e-7	0.148±j6.28, 0.148±j1.57		-0.087±j2.09	可
	1+2+4s	2	0.025	25	0.72e-2	0.148±j6.28, -0.934±j3.04, 0.345±j1.55		0.148±j1.57	不可
	2+3+4s	2.5	0.025	25	0.47e-6	-0.943±j3.14, -0.080±j2.13, 0.132±j1.60			可
1+2+3s	2	0.025	25	0.40e-2	0.149±j6.28, -0.928±j2.99, 0.101±j1.95		可		
B 火力 機 モード	T=1+3+1/3s	1	0.01	30	7.28	-0.101±j5.87, -0.943±j18.9	周期比R=9	不可	
	(全モード)	1	0.005	30	110	-0.038±j5.68, -0.945±j18.9	0.148±j6.28	不可	
	T=1+3s	2	0.025	30	0.35e-7	0.148±j6.28, -0.087±j2.09	-0.087±j2.09	可	
	1+1/3s	1	0.01	30	0.18e-7	0.148±j6.28, -0.944±j18.8	-0.944±j18.8	可	
	3+1/3s	1	0.01	30	0.39e-6	-0.087±j2.09, -0.944±j18.8		可	
C 原子 力機 モード	T=1+3+1/8s	1/4	0.01/3	30	0.68e-5	0.079±j5.57, -0.050±j50.3	周期比R=24	不可	
	T=1+3s	2	0.025	30	0.35e-7	0.148±j6.28, -0.087±j2.09	0.148±j6.28	可	
	1+1/8s	1/4	0.01/3	30	0.92e-9	0.148±j6.28, -0.050±j50.3	-0.087±j2.09	可	
	3+1/8s	1/4	0.01/3	30	0.92e-9	-0.087±j2.09, -0.050±j50.3	-0.050±j50.3	可	

[注] 分数形特性方程式次数: nb/na=9/10; T₀; サンプリング時間[s]; ΔT ; 刻み時間[s] n; 多項式次数、 ΔE^2 ; モデリング誤差

表2 多数モード動揺の全モード自動検出方式による検出結果 (モード分割検出、高周波同期検出の各方式)

Table 2. Results of full-mode automatic detecting system for multimode oscillations.

解析ケース	T ₀	ΔT	n	ΔE^2	検出固有値	判定	
A	[検出手順]				[原波形] 周期比R=4, ①0.148±j6.28, ②-0.944±j3.14, ③-0.087±j2.09, ④0.148±j1.57	可	
	①同時検出	2	0.025	25	0.50e-2		①0.149±j6.28, -0.96±j2.99, 0.061±j1.70(最高周波成分の固有値①を抽出)
	②モード分割	2.5	0.025	25	0.47e-6	②-0.943±j3.14, ③-0.080±j2.13, ④0.132±j1.60 (原波形から①を減算検出)	
B	[検出手順]				[原波形] 周期比R=9, ①-0.944±j18.8, ②0.148±j6.28, ③-0.087±j2.09	可	
	①同時検出	1	0.01	30	7.28		①-0.943±j18.9, -0.101±j5.87(最高周波成分の固有値①を抽出)
	②モード分割	2	0.025	30	0.35e-7	②0.148±j6.28, ③-0.087±j2.09 (原波形から①を減算し残りモード検出)	
C	[検出手順]				[原波形] 周期比R=24, ①-0.050±j50.3, ②0.148±j6.28, ③-0.087±j2.09	可	
	①同時検出	1/4	0.01/3	30	0.68e-5		①-0.050±j50.3, 0.079±j5.57(最高周波成分の固有値①を抽出)
	②高周波同期	2	$\pi/50.3$	30	0.66e-5	②0.148±j6.28, ③-0.087±j2.09 (①の周期の刻み時間で残りモード検出)	

[注] 分数形特性方程式次数; nb/na=9/10; T₀; サンプリング時間[s]; ΔT ; 刻み時間[s] n; 多項式次数、 ΔE^2 ; モデリング誤差

表3 全モード自動検出方式の設定定数

Table 3. Parameters of full-mode detecting system

Case	検出特性の結論	To	ΔT	n	nb/na
A 系統 モード	2つ同時検出可能	2	0.025	25	9/10
	全4モードをモード分割方式で検出	2 2.5	①0.025 ②0.025	25 25	9/10 9/10
B 火力 機 モード	系統間1+クロスモード同時検出可能	1	0.01	30	9/10
	全3モードを分割検出方式で検出	1 2	①0.01 ②0.025	30 30	9/10 9/10
C 原子 力機 モード	系統間1+軸ねじれモード同時検出可能	1/4	10/3	30	9/10
	全3モードを高周波同期方式で検出	1/4 2	①0.01/3 ②π/50.3	30 30	9/10 9/10

4. 実モデルと制御設計用公称モデルの形成部 (7)

<4.1>実モデルと公称モデルの形成 発電機が保有する多数の n モード動揺の内、系統安定化させる系統間モードをローカル動揺と長周期動揺(1,2 次モード)の2つのモード動揺と仮定する。このとき制御設計上は多数の動揺モードを実現する実モデルの必要はなく、2つの系統間モードのみを低次元化した公称モデルを定義して設計すればよい。そこで、最初に実モデルを形成するが3章で検出したモードの固有値から運動方程式の制動係数及び同期化係数を求め、運動方程式を定式化する。いま、M f を慣性定数対角行列、D を制動係数行列、Kf を同期化又はパネ係数行列、Ff を入力信号行列、I を単位行列、内部位相角微小変化分を x としモード座標を $\eta = [\eta_1, \eta_2, \eta_3, \dots, \eta_n]^T$ で定義し運動方程式をつくる。その運動方程式を $x = \Phi \eta$ で座標変換し、 $\Phi^T M_f \Phi = I$ が成立するように Φ を正規化すれば多数モードの運動方程式は次式となる。

$$\dot{\eta} + D \eta + K \eta = F u \dots \dots \dots (1)$$

ただし、 $D = \Phi^T D_f \Phi = \text{diag}[d_{11}, d_{22}, \dots, d_{nn}]$
 $K = \Phi^T K_f \Phi = \text{diag}[k_1^2, k_2^2, \dots, k_n^2]$
 $F = \Phi^T F_f = [f_1, f_2, \dots, f_n]^T, (k_1 < k_2 < \dots < k_n)$

次に制御設計用公称モデルを形成するが2つの系統モード(1,2 モード)のみを低次元化した公称モデルの運動方程式は(1)式と同様に $\eta_r = [\eta_1, \eta_2]^T$ を定義すれば次式で表される。

$$\dot{\eta}_r + D_r \eta_r + K_r \eta_r = F_r u \dots \dots \dots (2)$$

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

ここで $x = \Phi_{12} \eta_r$ で $\Phi = [\Phi_{12}, \Phi_{34}]$ の分割行列。

<4.2>公称モデルの状態空間伝達関数 (2)式の運動方程式から得られる系統安定化とロバスト制御設計に用いる公称モデルの状態空間伝達関数 Pr(s)は

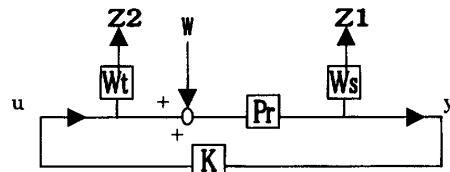
次式で表される。

$$Pr(s) = \begin{bmatrix} Ar & Br \\ Cr & Er \end{bmatrix} \dots \dots \dots (3)$$

ただし、 $Ar = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -Kr - Dr \end{bmatrix}$ $Br = \begin{bmatrix} 0 \\ -Fr \end{bmatrix}$
 $Cr = [\Phi_y \ 0]$, $\Phi_y = C_y \Phi_{12}$, $C_y = [1, 0, \dots, 0]$
 $Er = [0]$

5. 発電機ロバスト制御の設計部 (8)(9)

<5.1>ロバスト制御方式の適用方針 発電機ロバスト制御方式としてリカッチ方程式に基づく H_∞ 制御法(10)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図4の制御ブロック図で系統間モード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、動揺抑制の制動力不足の場合は H_∞ 制御のロバスト性を維持しつつ制動力改善策(PSS付加)を図る。



Pr(s): 伝達関数(公称モデル)、K(s): H_∞ 制御器
 $W_t(s)$: 入力端ロバスト安定化する重み関数
 $W_s(s)$: 出力端外乱抑圧の重み関数、u: 制御量
w: 入力端の仮想外乱、y, z1, z2 : 出力量

図4 H_∞ 制御設計用のブロック図
Fig.4. Block diagram of H_∞ control design

<5.2>発電機 H_∞ 制御部の設計手順 系統間モードを抑制しつつ、他の動揺モードのロバスト安定化を図る発電機 H_∞ 制御の設計手順は以下の通り。

- ①制御対象発電機の状態空間行列と周波数応答特性の計算、
- ② H_∞ 制御の重み関数と周波数応答特性の計算、
- ③ H_∞ 制御の制御ブロック図の構成、
- ④ H_∞ 制御設計と制御定数の周波数応答特性の計算、
- ⑤ H_∞ 制御器の制御定数の評価。なお、実モデルと公称モデル差がロバスト安定化の制御誤差。

6. 適応形 H_∞ 制御システムの検証部 (11)

動揺抑制効果とロバスト安定化の検証を次の方法で行う。

- (1)動的インパルス応答(発電機入力トルク変化)
- (2)周波数応答図(SV^(1,2)), H_∞ ノルム, 固有値, 減衰定数等。

以上により電力動揺の系統安定化とロバスト制御を追求した適応形H ∞ 制御システムを構築できた。次に実機による同システムの有効性検証の動作シミュレーションを行う。

7. 適応形H ∞ 制御システム動作シミュレーション
 <7.1>解析条件 (1)制御対象発電機；大容量クロスコンパウンド形火力発電機(定格出力 1,000MW, 袖ヶ浦 2G)

- (2)発電機定数・AVR関数・運転状態；表4、
- (3)ケースA ローカル動揺(周期 1s)不安定・長周期動揺(周期 3s) 安定、B ローカ・長周期動揺不安定
- (4)波形検出方式；全モード自動検出方式(設定定数：表3)
- (5)供試動揺波形；系統モード(ローカル,長周期)とクロスモードを含んだ表4の発電機ステップ応答発電機出力。

表4 発電機定数と運転状態
 Table 4. Parameters of generator

発電機定数	P, M, Xd, Xd', Xq, Xq', Tdo', Tdo'', Tqo'
	P635, 2.18, 1.62, 0.26, 1.520, 0.19, 4.2, 0.034, 0.082
	S520, 12.4, 1.62, 0.30, 1.60, 0.19, 7.8, 0.038, 0.082
AVR関数	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, Qg=0.00, Vg=1.00, fo=50

[単位] P:MVA X, リミット, Pg, Qg, Vg:pu M, T:s, fo:Hz

<7.2>動作シミュレーション結果 (1)発電機動揺波形の検出：両ケースの検出波形のモデリング結果が図5(a), (b), 固有値、減衰定数 ζ 及び動揺角周波数 ω_n が表5で、モデリング波形は原波形を精度よく同定していることが確認できる。同表の固有値の内、実モデルに反映するのは全振動モードを公称モデルは抑制対象の系統モード2つである。

表5 検出動揺モードの特性定数
 Table 5. Eigenvalues of modeling waveforms

固有値	ζ [pu]	ω_n [rad/s]
ケースA：検出モード		
手順①-4.06±j97.6	① 0.042	① 97.6
手順②-1.11±j20.4	② 0.054	② 20.5
③-0.040±j1.98, 0.116±j5.76	③0.020, -0.020	②1.98, 5.76
-1.26±j1.35, -47.0, -101	0.681, —	1.85, —
ケースB：検出モード		
手順①-4.05±j97.6	① 0.042	① 97.6,
手順②-1.09±j20.4	② 0.053	② 20.5
③0.056±j1.98, 0.261±j5.78	③-0.028, -0.045	②1.98, 5.79
-1.26±j1.35, -47.0, -101	0.682, —	1.85, —

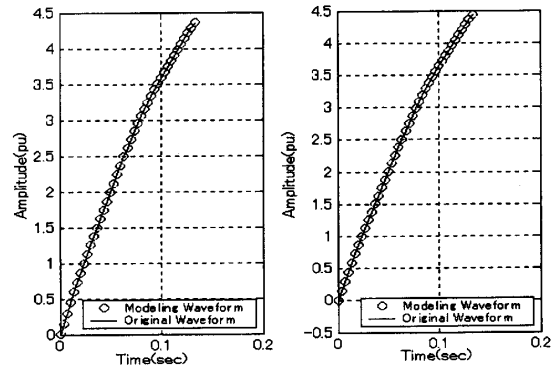


図5 自動検出したモデリング波形(手順①)
 Fig.5. Automatic parametric modeling waveforms

(2)実モデルと公称モデルの形成：前記で選定した固有値を用い形成した各動揺モードを実現する実モデルPf(s)と公称モデルPr(s)の特異値(SV)周波数応答図が図6である。同図より制御設計用公称モデルPr(s)は動揺抑制の系統間モードのみを忠実に低次元化していることが確認できる。

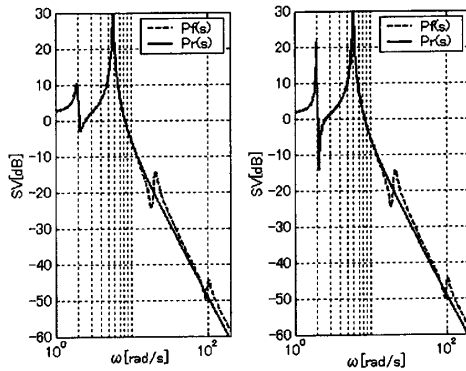


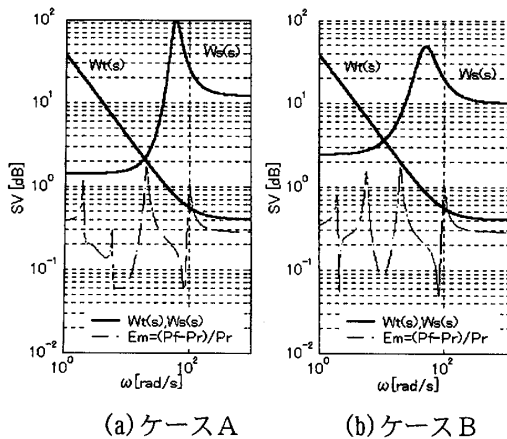
図6 実、公称モデルのSV周波数応答図
 Fig.6. SV frequency responses of model

(3)H ∞ 制御設計：前記の公称モデルを用いてH ∞ 制御設計したケースA、Bの重み関数Wt(s), Ws(s)が次式で、そのSV周波数応答図が図7である。

$$A \quad W_t(s) = \frac{s^2 + 2 \times 0.8 \times 35s + 35^2}{s^2 + 2 \times 0.2 \times 60s + 60^2} 12, W_s(s) = \frac{1 + 0.01s}{1 + 100s} 4000 \dots (4)$$

$$B \quad W_t(s) = \frac{s^2 + 2 \times 1.2 \times 35s + 35^2}{s^2 + 2 \times 0.4 \times 50s + 50^2} 10, W_s(s) = \frac{1 + 0.01s}{1 + 100s} 4000 \dots (5)$$

また、最小 γ 値はそれぞれ2.81, 7.23で、そのH ∞ 制御器の制御定数が表6である。



(a) ケース A (b) ケース B

図7 重み関数のSV周波数応答図

Fig.7. SV frequency responses of weighting function

<7.3>適応形 H_{∞} システムの検証 実モデルに H_{∞} 制御器を組み込んだ制御ブロックが図8で、同図上のA, Bの特性定数が表7の制御後① (PSS 無) である。同表より両ケースとも全動揺モードは安定化されているが、長周期モードは弱制動となっている。そこで、 H_{∞} 制御のロバスト特性を極力維持しつつ、長周期モードの制動力改善策として先に検討⁽⁷⁾した $\Delta \omega$ 形 PSS を図8の長周期モードの M-2 ブロックに追加することとした。制動力向上度合いとして $\Delta \omega$ 形 PSS の増分減衰定数を 0.5pu で設計した制御関数が次式である。

$$PSS \text{ 制御関数 } G(s) = \frac{0.05 \times 5s}{1+5s} \dots\dots\dots (6)$$

制動力増加策として $\Delta \omega$ 形 PSS を追加した特性定数が表7の制御後② (PSS 有) で、PSS 有無の長周期モード M 2 のステップ応答が図9である。これらから長周期モード以外の特性をほとんど変化させずに長周期モードの制動力を改善していることが確認できる。この改善策を施した H_{∞} 制御有無のステップ応答 (M 2) と全モードの SV 周波数応答図がそれぞれ図 10, 11 で、両図からも系統間モードの良好

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。

以上の動作シミュレーションにより発電機適応形 H_{∞} 制御システムの有効性が検証できた。

8. あとがき

本論文を要約すると次の通り。

(1) 電力システムの事故時などに発生する多数モードの発電機動揺波形を自動検出する手法として動揺モードの周期比に基づく全モード自動検出方式 (モード分割、高周波同期の各方式) を確立し、解析でその良好な検出機能を確認した。

(2) 上記の検出方式とその検出动揺モードより形成したモデルを用い電力システムの系統安定化とロバスト制御を迫及したりリカッチ方程式に基づく H_{∞} 制御設計法を発電機励磁系に組み込んだ適応形 H_{∞} 制御システムを構築した。

(3) 構築した適応形 H_{∞} 制御システムを大容量クロス機に適用しローカル動揺 (1 秒) とローカル・長周期動揺 (3 秒) が不安定となるケースの動作シミュレーションを行った。その結果、動揺波形検出と H_{∞} 設計の所要時間以降、制御が開始され各モードの安定化は得られたが長周期動揺モードに弱ダンピングが残った。その制動力改善策として $\Delta \omega$ 形 PSS を追加することにより良好な抑制効果とロバスト安定化が確認できた。

以上により電力システムの系統安定化とロバスト制御を迫及する発電機適応形 H_{∞} 制御システムを構築することができた。今後は種々の発電機並びに多機系統での抑制効果を検証し、実系統への適用性の評価を含め進める。

表6 発電機 H_{∞} 制御器の制御関数
Table 6. Transfer function of H_{∞} controller

ケース	発電機 H_{∞} 制御器の制御関数
A	$\frac{-8.81e04s^8 - 4.79e06s^7 - 7.16e10s^6 - 1.97e10s^5 - 1.27e12s^4 - 7.85e12s^3 - 4.66e13s^2 - 4.28e13s - 1.73e14}{s^9 + 7.65e02s^8 + 2.21e05s^7 + 3.15e07s^6 + 2.53e09s^5 + 9.52e10s^4 + 2.43e12s^3 + 9.43e11s^2 + 1.06e13s + 1.06e11}$
B	$\frac{-1.18e05s^8 - 9.93e06s^7 - 8.23e08s^6 - 2.73e10s^5 - 8.71e11s^4 - 4.17e12s^3 - 3.50e13s^2 - 5.69e13s - 6.97e13}{s^9 + 6.06e02s^8 + 1.66e05s^7 + 2.06e07s^6 + 1.67e09s^5 + 5.97e10s^4 + 1.06e12s^3 - 6.82e12s^2 + 1.18e13s + 1.19e11}$

表7 適応形 H_∞ 制御後(PSS有無)動揺モード特性定数

Table7.Eigenvalues with adaptive H_∞ design

固有値	ζ [pu]	ω_n [rad/s]
A : 制御後① (PSS無)		
-0.103 ± j2.09, -4.80 ± j6.43	0.049, 0.598	2.09, 8.02
-4.81 ± j19.4, -4.56 ± j101	0.241, 0.045	20.0, 101
-0.981 ± j1.14, -10.3 ± j22.2	0.653, 0.421	1.50, 24.5
-37.6 ± j34.9, -0.112 ± j2.10	0.733, 0.053	51.3, 2.10
-131.0 ± j147.0	0.666	197.0
-47.1, -101, -389	H_∞ ノルム	0.670
A : 制御後② (PSS有)		
-1.07 ± j1.69, -4.78 ± j6.34	0.536, 0.602	2.00, 7.94
-4.78 ± j19.4, -4.56 ± j101	0.240, 0.045	20.0, 101
-0.981 ± j1.14, -10.3 ± j22.2	0.653, 0.422	1.50, 24.5
-37.6 ± j34.9, -0.126 ± j2.10	0.733, 0.060	51.3, 2.10
-131.0 ± j147.0	0.666	197.0
-0.222, -47.1, -101, -389	H_∞ ノルム	0.167
B : 制御後① (PSS無)		
-0.025 ± j2.10, -2.48 ± j7.43	0.012, 0.317	2.10, 7.84
-3.39 ± j20.5, -5.07 ± j99.8	0.163, 0.051	20.8, 99.9
-1.36 ± j0.76, -12.5 ± j10.9	0.872, 0.752	1.56, 16.6
-52.0 ± j33.9, -1.02 ± j1.75	0.838, 0.505	62.1, 2.03
-114.0 ± j157.0	0.587	194.0
-47.1, -101, -235	H_∞ ノルム	0.176
B : 制御後② (PSS有)		
-0.779 ± j1.64, -2.43 ± j7.26	0.429, 0.317	1.81, 7.66
-3.40 ± j20.5, -5.07 ± j99.8	0.163, 0.049	20.8, 96.6
-1.40 ± j0.80, -12.3 ± j11.0	0.869, 0.748	1.61, 16.5
-52.0 ± j33.9, -1.38 ± j1.73	0.838, 0.624	62.1, 2.22
-114.0 ± j157.0	0.587	194.0
-0.222, -47.1, -101, -235	H_∞ ノルム	0.145

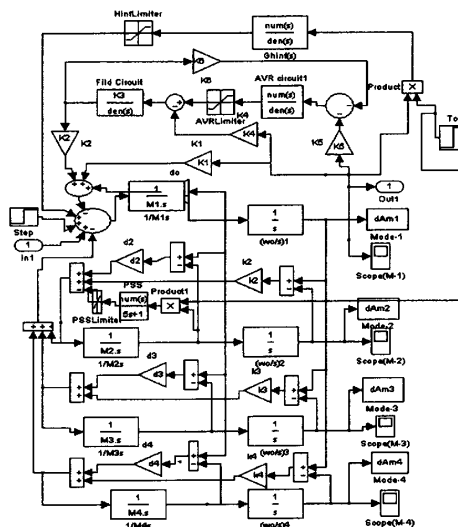
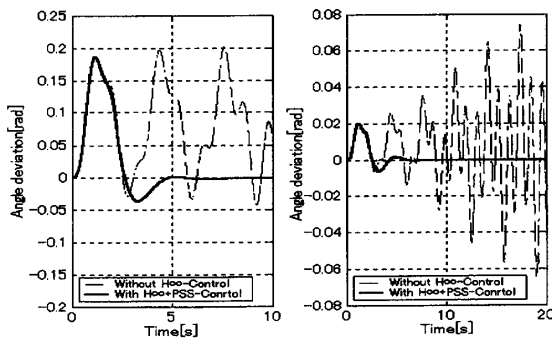
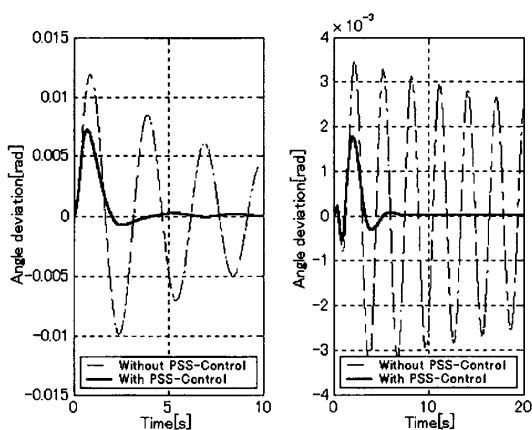


図8 適応形 H_∞ 制御システムの制御ブロック図
Fig.8.Block diagram of adaptive H_∞ control system



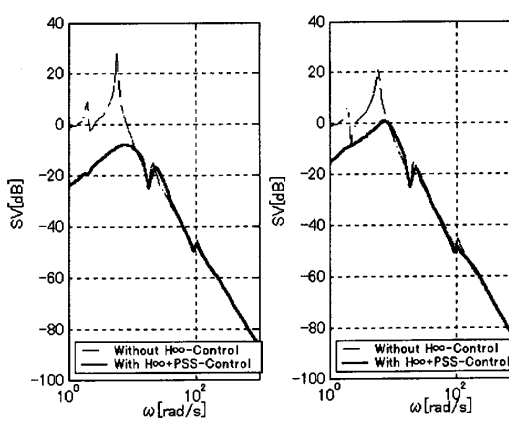
(a) ケースA (b) ケースB

図10 適応形 H_∞ 制御システムのステップ応答(M2)
Fig.10.Step responses of adaptive H_∞ control system



(a) ケースA (b) ケースB

図9 PSS有無のステップ応答(M2)
Fig.9. Step responses of with and without PSS



(a) ケースA (b) ケースB

図11 適応形 H_∞ 制御システムのSV周波数応答図
Fig.11.SV Frequency responses of adaptive H_∞ system

文 献

(1)P.deMello and C.Concordia, "Concepts of Synchronous Machine Stability as Affected by Excitation Control",IEEE,Trans.Power,App.Sys.Apr(1969),Pgs.316-329

(2)道上勉:連系系統の長周期動揺を抑制する複数 PSS の開発と動揺モデルに関する研究;電学誌、 Vol.115-B, No1(1995), p42-51

(3)道上勉、奈良一慶、日吉栄、岡本高志:電力動揺のロバスト制御を追求した適応形発電機 H ∞ 制御システムの構築検討、H14 電学電・工部大、A23-274,p761,762

(4)道上勉、奈良一慶、小俣人士:発電機の多数モード動揺と自動検出方式の提案、H14 電気関係学会北陸支部連大、A-11,p17

(5)道上勉、奈良一慶、小俣人士:発電機の多数モード動揺と自動検出方式の検討、H15 電学全大、投稿中

(6) 道上勉、林邦誉、日吉栄、岡本高志:電力系統動揺波形の自動検出方式による適応形 PSS システムの構築について;電学誌、Vol.120-B,No12(2000),p1542-1549

(7)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迫及した発電機 H ∞ 制御設計の検討;電学誌、Vol.122-B,No12(2002),p1262-1269

(8)I.R.Petersen, V.A.Ugrinovskii, A.V.Savkin, "Robust control Design Using H ∞ control", Springer, 2000

(9)B.M.Chen, "Robust and H ∞ control", Springer, 2000

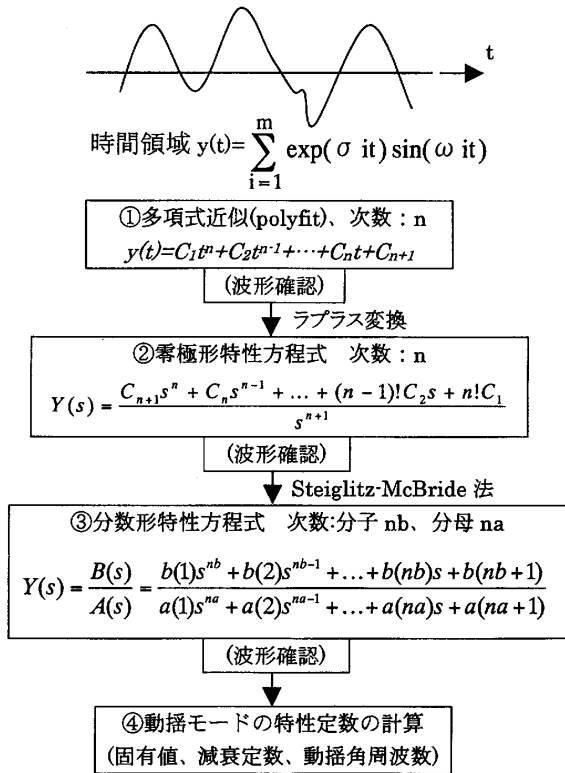
(10)M.G.Safonov,"Stability Margins of Diagonally Perturbed Multivariable Feedback", IEEE, Proc. 129 (Pt.D), Nov.(1982), Pgs.252-255

(11) 道上勉、寺崎勝、笹島一祥、林邦誉、岡本高志:電力動揺高速抑制を迫及した発電機適応形LQGシステムの構築について;電学誌、Vol.122-B,No2(2002),p287-294

(12)K.Glover,J.C.Doyle,"State-space Formula for All Stabilizing Controllers that Satisfy an H ∞ -norm Bound and Relations to Risk Sensitivity ", Systems and Control Letters,No.11,(1988), Pgs.167-172

付 録

1. 発電機動揺検出方式のモデリング手順⁽⁶⁾



付図 1 動揺波形を実現するモデリング手順
 App.Fig.1. Procedure of waveform modeling

(平成 15 年 10 月 5 日 受理)