部分パラメータ同定に基づく電力系統安定化装置の設計

学生員 崔 実 根 (名古屋工大)
 正 員 鶴 飼 裕 之 (名古屋工大)
 正 員 神 藤 久 (名古屋工大)
 正 員 中 村 光 一 (名古屋工大)
 正 員 藤 田 秀 紀 (中部電力)

Design of Power System Stabilizer based on Partial Parameter Identification

Shigen Cui, Student Member, Hiroyuki Ukai, Member, Hisashi Kando, Member, Koichi Nakamura, Member (Nagoya Institute of Technology), Hideki Fujita, Member (Chubu Electric Power Company, Inc.)

In this paper a design method of the robust PSS(Power system Stabilizer) is presented on the basis of the identified model. The basic idea is to partially identify each generator, which connects with a large-scale power system, as a single-machine infinity-bus system. Whereas the structure of mathematical model and parameters of each generator are regarded as already known, the only unknown parameters are equivalent reactance of transmission lines, the voltage and the phase angle of infinity bus system. The novel idea is that known and unknown parameters are coded in one system matrix, and the guessed values of unknown parameters are estimated by identification process. The controller is designed by applying H^∞ control theory to the identified model and the obtained controller is reduced to the reasonable order. It is found that the time response of identified model closely resemble the simulated response, and the controller are almost not degraded by order reduction. Effectiveness of the proposed method is verified through some nonlinear simulations for the three machine system of radial type.

キーワード：安定化制御，システム同定，部分空間法，多入力形 PSS，低次元化

1. ま え が き

電力需要の拡大，電源の遠隔化，偏在化が進み，電力融通の広域連係強化や FACTS 機器の導入などにより，電力系統はますます大規模，複雑化する傾向にある。また，規制緩和などにより電力事業への IPP (Independent Power Producer) の参入，風力，太陽エネルギー，コージェネレーションシステムなどの増加に伴う逆潮流などにより電源の構成も複雑化する傾向がある。このような複雑化する電力系統に対して高い信頼性を維持するためには制御装置に不確実性へ対応する技術が要求される。一方，現有の電力設備を有効に活用して安定化を向上するには現有の制御装置の制御性能を改善することも必要である。電力系統の安定度を向上するために系統制御装置 PSS (Power System Stabilizer) が現在運用されているが，潮流条件，電源の構成，系統状態の変化にも対応できるような PSS を設計する

ことが要求される。

従来の古典制御に基づく PSS の設計法は多機電力系統を一機無限大系統に縮約して設計しているが，位相進み遅れの定数のチューニングは設計者の経験に頼る部分が多い。制御性能の向上だけでなくコスト低減の観点から設計時間，能率などを考慮すると，数学モデルと仕様さえ与えられれば設計者の能力にそれほど依存することなく高性能の PSS が設計できるアルゴリズムの開発が期待されている。

安定化制御を向上するためには二つの方策が考えられる。一つは，制御器にロバスト性を持たせて運転状態の変化に対応すること，もう一つは，未知の電力系統をシステム同定により正確に同定して PSS の制御性能を向上する方法である。前者の観点に立って，著者らは分散型 H^∞ 制御理論を適用したロバストな PSS の設計法について報告した⁽¹⁾⁽²⁾。分散制御に基づく PSS の設計法は系統全体の安定性と制御性能を保証することが出来るが，一方，コントローラが保

守的になり易いことや大規模な系統では必ずしも解が得られるとは限らないという問題を抱えている。

一方、後者の観点からモデリング、システム同定の重要性が再認識されているが、実際には、同定を行う技術者のノウハウに頼る部分が多い。そこで近年システム同定によるPSSの設計手法が提案されている⁽³⁾⁽⁴⁾。しかし、提案されている方法では、制御対象は一般的な伝達関数として同定されるため、発電機、系統の物理的な構造や変化する系統のパラメータとの関係が明確にはなっていない。例えば、古典制御に基づいて、 ΔP 形PSSを設計する場合に、一般的には、有効電力偏差 ΔP を操作角 $\Delta\delta$ と同相の信号とみなし、 $-\Delta P$ を 90° 遅れらせて $\Delta\omega$ と同相に成分を作るなどの方法がとられている⁽⁵⁾。従ってパラメータの物理的な意味が明確でない場合にはこうした直観的な方法をとることができない。一方、現代制御理論に基づいて設計する場合においても、物理的構造や、パラメータの各状態の物理的意味が明確であれば、制御量と観測量を区別して設計するなど、より高機能な制御器の設計が可能となる⁽²⁾。

こうした背景のもとで、本論文では、多機電力系統につながる各発電機に対して、部分空間法といわれる4SID(SubSpace-based State Space model Identification)法⁽⁶⁾を適用して、一機無限大系統モデルとして同定する方法を提案する。すなわち、各発電機のパラメータを既知、各発電機につながる系統全体を無限大母線系統の未知パラメータとして、自由パラメータをもつ状態空間モデルを同定する。また、発電機パラメータ自体の不確かさや近隣の発電機との干渉に起因するローカル動揺に対応出来るように、 H^∞ 制御に基づいたロバストな多入力形PSSを設計する。

2. 一機無限大母線系統モデル

〈2・1〉 一機無限大母線系統への縮約 多機電力系統を一機無限大母線系統に縮約するとき、図1に示すように、縮約する発電機から眺めた各発電機を含む系統を無限大母線系統として縮約する。従来、縮約系統は、あらかじめ与えられた系統定数に基づいて、潮流計算などを行うことで得られていた。したがって、実系統との間に誤差が生じた

り、系統の変化に対して適応することが困難であった。そこで、本論文では、系統構成、系統定数に依らず、直接各発電機の入出力データを用いることで、一機無限大系統モデルとして同定する。すなわち、一機無限大系統に縮約するとき、発電機部分のパラメータは既知として、無限大母線系統を未知パラメータとして自由パラメータをもつ状態空間モデルを同定する。以下に一機無限大系統モデルについて記す。

〈2・2〉 発電機モデル 等価固定子巻線を d, q 軸に配置したParkの電圧方程式⁽⁷⁾において、回転子の d 軸上に制動巻線 kd と励磁巻線 f を、 q 軸上に二つの制動巻線 g, kq を想定し、諸量をp.u./s化すると次式が得られる。但し、 v, i, R, ϕ, ω はそれぞれ電圧、電流、抵抗、磁束鎖交数、角速度である。添字の d, q, f, kd, g, kq はそれぞれの巻線を示す。 ω_B は基準角速度である。

【Parkの式】

$$\left. \begin{aligned} v_d &= \frac{1}{\omega_B} \frac{d}{dt} \phi_d - \phi_q \omega - R_a i_d \\ v_q &= \frac{1}{\omega_B} \frac{d}{dt} \phi_q + \phi_d \omega - R_a i_q \\ v_f &= \frac{1}{\omega_B} \frac{d}{dt} \phi_f + R_f i_f \\ 0 &= \frac{1}{\omega_B} \frac{d}{dt} \phi_{kd} + R_{kd} i_{kd} \\ 0 &= \frac{1}{\omega_B} \frac{d}{dt} \phi_g + R_g i_g \\ 0 &= \frac{1}{\omega_B} \frac{d}{dt} \phi_{kq} + R_{kq} i_{kq} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

鎖交磁束数と電流の関係は、次式で与えられるとする。

$$\left. \begin{aligned} \phi_d &= -L_d i_d + L_{afm} i_f + L_{akdm} i_{kd} \\ \phi_q &= -L_q i_q + L_{agm} i_g + L_{akqm} i_{kq} \\ \phi_f &= -L_{afm} i_d + L_{ff} i_f + L_{fkd} i_{kd} \\ \phi_{kd} &= -L_{akdm} i_d + L_{fkd} i_f + L_{kdkd} i_{kd} \\ \phi_g &= -L_{agm} i_q + L_{gg} i_g + L_{gkq} i_{kq} \\ \phi_{kq} &= -L_{akqm} i_q + L_{gkq} i_g + L_{kqkq} i_{kq} \end{aligned} \right\} (2)$$

【動揺方程式】

$$\frac{d}{dt} \delta = \omega_B (\omega - 1) \dots\dots\dots (3)$$

$$\frac{d}{dt} \omega = \frac{1}{2H} [T_m - T_e - D(\omega - 1)] \dots\dots\dots (4)$$

- H : 単位慣性定数 [sec]
- D : 制動係数 [p.u]
- T_m : 機械入力トルク [p.u]
- T_e : 電気出力トルク [p.u]
- ω : 角速度 [rad/sec]
- δ : 回転子位相角 [rad]

【ガバナ系】

ガバナ系は図2のような3次の伝達関数モデルで表す。調速機は2次遅れ、タービンによる伝達遅れを1次で表している。

図1 一機無限大母線系統への縮約
Fig. 1. Agregation to a single-machine infinite-bus system

図2 ガバナ系のブロック線図
Fig. 2. Block diagram of governor

図3 励磁系のブロック線図
Fig. 3. Block diagram of AVR

図4 一機無限大母線系統
Fig. 4. Single-machine infinite-bus system

【AVR 励磁系】

図3に示すように励磁系は AVR と励磁機からなる 2 次
のモデルで表されるものとし、PSS からの補助入力を u_{ex}
とする。

【一機無限大母線系統モデル】

図4で示すように、同期発電機が並行二回線を介して無限
大母線につながっているシステムとしてモデリングを行う。

$$v_d = Ri_d - X_i q + V_b \sin \delta \quad (5)$$

$$v_q = Xi_d + Ri_q + V_b \cos \delta \quad (6)$$

$$X = X_t + \frac{1}{2}X_e + X_s \quad (7)$$

ここで、 δ , R , X はそれぞれ、発電機と無限大母線間の
位相角、発電機と無限大母線の間の等価抵抗と等価リアク
タンスを表す。

〈2・3〉線形化モデルの導出 上記の非線形方程式を
初期潮流計算をもとに、定常運転点の周りで線形化する。
(1)～(4)式およびガバナ系、AVR 励磁系を線形化して次式
を得る。

$$\dot{x} = Ax + B_1 v + B_2 u \quad (8)$$

$$y = Cx + D_1 v + D_2 u \quad (9)$$

を構成する。ここで状態ベクトル x は

$$x = \begin{bmatrix} \Delta i_d & \Delta i_q & \Delta i_f & \Delta i_{kd} & \Delta i_g & \Delta i_{kq} & \Delta \delta \\ \Delta \omega & \Delta P_m & \Delta y & \Delta Y & \Delta v_f & \Delta v_R \end{bmatrix}^T$$

端子電圧 v , 制御入力 u , および観測出力 y 次式で定義さ
れる。

$$\begin{aligned} v &= [\Delta v_d \quad \Delta v_q]^T \\ u &= [\Delta u_{ex}] \\ y &= [\Delta \omega \quad \Delta P_e]^T \end{aligned}$$

(5), (6) を線形化し, (8), (9) に代入することにより各
発電機の一機無限大系統の線形モデルは以下のようになる。

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + B_1 Zx + B_2 u \\ &= (A + A_C)x + B_2 u \\ &= \hat{A}x + B_2 u \quad (10) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} y &= Cx + C_1 Zx \\ &= (C + C_C)x \\ &= \hat{C}x \quad (11) \end{aligned}$$

ここで

$$\begin{aligned} A_C = B_1 Z &= \begin{bmatrix} B(6 \times 2) \\ 0(5 \times 2) \\ B_{1ex}(2 \times 2) \end{bmatrix} \times \\ &= \begin{bmatrix} R & -X & 0(1 \times 4) & V_b \cos \delta_0 & 0(1 \times 6) \\ X & R & 0(1 \times 4) & V_b \sin \delta_0 & 0(1 \times 6) \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \theta_{11} & \theta_{12} & 0(1 \times 4) & \theta_{17} & 0(1 \times 6) \\ \theta_{21} & \theta_{22} & 0(1 \times 4) & \theta_{27} & 0(1 \times 6) \\ \theta_{31} & \theta_{32} & 0(1 \times 4) & \theta_{37} & 0(1 \times 6) \\ \theta_{41} & \theta_{42} & 0(1 \times 4) & \theta_{47} & 0(1 \times 6) \\ \theta_{51} & \theta_{52} & 0(1 \times 4) & \theta_{57} & 0(1 \times 6) \\ \theta_{61} & \theta_{62} & 0(1 \times 4) & \theta_{67} & 0(1 \times 6) \\ 0 & 0 & 0(1 \times 4) & 0 & 0(1 \times 6) \\ 0 & 0 & 0(1 \times 4) & 0 & 0(1 \times 6) \\ 0 & 0 & 0(1 \times 4) & 0 & 0(1 \times 6) \\ 0 & 0 & 0(1 \times 4) & 0 & 0(1 \times 6) \\ 0 & 0 & 0(1 \times 4) & 0 & 0(1 \times 6) \\ \theta_{131} & \theta_{132} & 0(1 \times 4) & \theta_{137} & 0(1 \times 6) \end{bmatrix} \end{aligned}$$

ただし、各行列の添え字の $m \times n$ は次数を示す、 $\hat{A}$ 行列
の中で未知のパラメータは A_C 行列の θ_{ij} の部分であり、他
の部分は既知である。この未知のパラメータは系統のパラ
メータに対応している。

$$\begin{aligned} C_C = C_1 Z &= \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ i_{d0} & i_{q0} \end{bmatrix} \times \\ &= \begin{bmatrix} R & -X & 0(1 \times 4) & V_B \cos \delta_0 & 0(1 \times 6) \\ X & R & 0(1 \times 4) & V_B \sin \delta_0 & 0(1 \times 6) \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0(1 \times 4) & 0 & 0(1 \times 6) \\ \theta_{21C} & \theta_{22C} & 0(1 \times 4) & \theta_{27C} & 0(1 \times 6) \end{bmatrix} \end{aligned}$$

同様に $\hat{C}$ 行列の未知のパラメータは C_C 行列の θ_{ijC} の部分
であり、系統のパラメータに対応している。

この未知の変数のみを同定するに当たり、本論文では部分
空間 (4SID) 法を適用する。

3. システム同定

〈3・1〉 同定における留意点 システム同定は異常診断や故障検出、モデルに基づいた計測、適応信号処理、画像解析などさまざまな分野で用いられている。システムモデルは、モデルがどのような目的のために作られ使用されるかにより異なる。複雑なシステムのさまざまな要因をすべて含むようなモデルを作るのは不可能であり、またその必要もない。モデルは実システムの本質的な部分に関する知識を有用な形に縮約して表現したものと考えられる⁽⁸⁾。しかし、複雑さの低いモデルを利用することにより生じるシステムティック誤差は、データ数の増加にともない影響が減少する雑音に起因する誤差と異なり、本質的にデータ数に依存しないという特徴を有する⁽⁹⁾。

そのため本論文では同定するモデルの次数を2章で表した詳細なモデルとして同定することより、システムティック誤差をなるべく小さくするように試みた。同定モデルの次数が高くなることによる計算機時間増大などの諸問題は、システム行列で既知のパラメータと未知のパラメータをコード化し、未知の部分だけを同定することから解決できる。

システム同定を行うとき、「1. 何を目的とするか、2. 同定したモデルが実対象と同一であるか、3. 数学モデルとして目的に適しているか」という三つのことを念頭におかなければならない⁽¹⁰⁾。そこで本論文では以下のように対処した。

- 1 同定目的は発電機の制御であることから、同定のための入力信号はPSSの出力信号である u_{ex} 、出力信号はPSSの入力である P_e 、 ω をとる。さらに、発電機状態量の可制御モードや可観測モードを励起できる入力信号を選ぶ。
- 2 同定のための数学モデルは一機無限大システムとしているが、同定に用いる信号は系統に連結した発電機の応答であることから、同定モデルと実対象は同一であるといえる。
- 3 部分空間法を適用して状態空間モデルを同定することにより、多変数制御系の設計に適している。

〈3・2〉 システム同定の基本手順 MATLAB/SIMULINKで構築された図5示す串型3機系統の非線形シミュレータにおいて、図6に示したように各発電機のPSS出力端で適切な入力信号 u を入力し、発電機からPSSの入力信号（ここでは回転子の角速度 ω 、有効電力 P_e とする）を検出する。同定入力とはシステム同定精度に大きく影響するので入力の選定は非常に重要である。一般的にシステム同定には同定対象のもつすべてのモードを励起することができる白色雑音などが望ましいとされている。しかし、本論文での目的が発電機の動揺の抑制であることから、各発電機の支配的な動揺モードが励起されるような入力信号が望ましい。従って、高周波となる白色雑音は今回の目的には適していないと考える。

同定入力の振幅を決定するにはトレードオフ関係を考慮

図5 串型3機系統

Fig. 5. Three machines system of radial type

図6 一機無限大系統の同定

Fig. 6. Identification of single-machine infinite-bus system

しなければならない。すなわち、発電機の磁界の飽和特性、AVR 励磁系やガバナーのリミッタによる不感帯などの非線形性と出力端における SN 比の間におけるトレードオフなどである。また、実際のオンライン同定を考えると PSS からの出力の箇所に直流外乱を長く入れることは端子電圧の変動を起こすので望ましくない。

以上を考慮して入力信号として本論文では図7のような方形波信号を用いた。具体的に入力振幅の小さいものから少しずつ大きい信号を入れて、出力信号が飽和しない領域で振幅を決定した。同定の基本的な手順は以下のようなのである。

- Step 1** 同定入力、サンプリング周期などの選定。
- Step 2** 入出力データの前処理：直流成分を除去し、デシメーション (decimation) とインターポレーション (interpolation) を組み合わせることにより高周波雑音の除去とリサンプリングを行う (図8)。さらに、プリフィルタリング (prefiltering) により電力動揺帯域だけを通過させる。

Step 3 モデル構造の選定：モデルの構造は現代制御理論を適用するために状態空間モデルとした。

Step 4 システム同定：部分空間法⁽⁶⁾⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾による状態空間モデルの同定。

本提案同定法のメリットは以下のとおりである。

- 1 同定するパラメータの中で発電機部分のパラメータを既知とするので未知のパラメータ量が少なく、同定の精度を向上させることが出来る。
- 2 発電機の構造を先に決めてから同定を行うので同定されたパラメータの物理的な意味が明確となる。
- 3 部分空間法による状態空間モデルの同定を行うこと

図7 同定の入出力信号
Fig. 7. Input and output signals of identification

図8 デシメーション処理結果
Fig. 8. Result after decimation

により、容易にMIMOシステムに拡張でき、現代制御理論による状態空間領域での制御器の設計が容易になる。

〈3・3〉 システム同定結果 例題システムとして図5の3機串列システムに対する結果を示す。各発電機について同定結果を図9～図14に表す。シミュレーション出力と同定モデルの出力を比較してみるとシステムの両サイドにある発電機で良好な同定結果が得られている。一方、図11～図12で示したように発電機2では若干同定精度が他の発電機に比べて

図9 発電機1の $\Delta\omega$ の同定結果
Fig. 9. Result of identification $\Delta\omega$ of G1

図10 発電機1の ΔP_e の同定結果
Fig. 10. Result of identification ΔP of G1

図11 発電機2の $\Delta\omega$ の同定結果
Fig. 11. Result of identification $\Delta\omega$ of G2

図12 発電機2の ΔP_e の同定結果
Fig. 12. Result of identification ΔP of G2

図13 発電機3の $\Delta\omega$ の同定結果
Fig. 13. Result of identification $\Delta\omega$ of G3

図14 発電機3の ΔP_e の同定結果
Fig. 14. Result of identification ΔP of G3

落ちているが、これは、他の二つの発電機との干渉により、複数の動揺モードを有するためと考える。すなわち、一機無限大システムとしてモデル化した場合、支配的なモードのみ

を反映し、ローカル動揺に対応する振動は同定モデルでは再現できないための誤差である。これに対して本論文では、後述するように、コントローラにロバスト性を持たせることで対処している。

4. 例題系統でのシミュレーション

〈4・1〉コントローラの設計 電力系統のローカル動揺と広域動揺のトレードオフ関係を克服するために、 $\Delta\omega + \Delta P_e$ 形 PSS 定数の最適設計手法が提案されている⁽¹²⁾。一方、著者らはコントローラのパラメータを H^∞ ノルムの下で最適化する多入力型 H^∞ 型 PSS を提案した⁽²⁾⁽¹³⁾。そこで本論文でも、パラメータ誤差、複数の動揺モードに対応するため、電力系統部分を未知として同定されたシステムに H^∞ 制御理論を適用して、 $\Delta\omega + \Delta P_e$ 型の PSS を設計する。図 15 に設計した制御系 AMPSS (Advanced type of Multi-input Power System Stabilizer) のブロック線図を示す。

本論文では系統における外乱として三相地絡などの事故を想定する。三相地絡事故が起こった場合、発電機側には端子電圧の変動となって影響が現われることから、これを外乱とみなす。すなわち、事故などによる系統変化を電圧変動としてとらえ、その変動が制御量 z に与える影響を小さくするという外乱抑制問題として定式化する⁽¹³⁾。ここで制御量 z は、通常電力系統で評価される量を選び次のよう定めた。

$$z = \begin{bmatrix} [q_1^{1/2} \Delta\delta \ q_2^{1/2} \Delta\omega]^T \\ r^{1/2} u_{ex} \end{bmatrix}$$

ただし、重み r は従来型 PSS の出力の大きさと同程度の大きさになるように、また、 q_1, q_2 は各状態量の過渡応答をみながら試行錯誤により調整した。 H^∞ 制御問題を解くにあたっては線形行列不等式 (LMI) によるアルゴリズムを用いた⁽¹⁴⁾。

〈4・2〉コントローラの低次元化 H^∞ 制御などの現代制御理論を適用してコントローラを設計するとき、求められたコントローラの次数は一般化モデルの次数と同じになる。計算機の演算時間、丸め誤差と打ち切り誤差、コン

トローラのコストなどを考えると低次元のコントローラが望ましい。このためには、システムモデルを低次元化する方法と求められたコントローラの次元を低次元化する方法がある。前者は電力系統を発電機、ガバナー、AVRなどを部分的低次元化したモデルに対して設計を行う立場である⁽²⁾。しかし、各部分ごとに低次元して組み合わせることで誤差の累積を引き起こすという問題を抱えている。そこで、本論文では後者の立場に立ち、内部平衡実現 (Internal Balanced Realization) に基づいてコントローラを低次元化した⁽¹⁵⁾。発電機 1 のコントローラの u/ω の周波数応答を図 16 に、 u/P_e の周波数応答を図 17 に示す。

図 16、図 17 より電力の動揺周波数領域ではゲイン、位相ともに低次元化した 5 次のコントローラは 13 次のコントローラの特性を保持していることがわかる。従来型 PSS

図 16 コントローラ 1 の ω から u までの周波数応答

Fig. 16. Bode diagrams of AMPSS1 from $\Delta\omega$ to u

図 17 コントローラ 1 の P_e から u までの周波数応答

Fig. 17. Bode diagrams of AMPSS1 from ΔP_e to u

図 15 AMPSS のブロック線図
Fig. 15. Block Diagram of AMPSS

図 18 PSS のブロック線図
Fig. 18. Bode diagram of PSS

のブロック線図を図 18 に示す。PSS の諸定数は、 $T = 2.9$ ， $T_1 = 0.683$ ， $T_2 = 0.1$ ， $K_c = 6.8$ である。

〈4・3〉 過渡動揺シミュレーション結果 図 5 に示した串型 3 機系統のノード # 7-# 8 間の # 8 至近端において三相地絡事故が生じ、0.1[sec] 後に平衡 2 回線のうち 1 回線を遮断し、1[sec] 後に再投入した場合の非線形シミュレーションを行った。各発電機の位相角の過渡応答を図 19～図 21 に示す。比較のため、主として広域動揺に対して抑制効果が働くように設計された ω 型 PSS の結果をあわせて示す。なお、従来型 PSS と AMPSS との比較に関する定性的説明は文献⁽²⁾⁽¹³⁾において明らかにされている。過渡応答に

図 19 発電機 1 の位相角 δ の時間応答
Fig. 19. Transient responses of δ of G1

図 20 発電機 2 の位相角 δ の時間応答
Fig. 20. Transient responses of δ of G2

図 21 発電機 3 の位相角 δ の時間応答
Fig. 21. Transient responses of δ of G3

図 22 発電機 1 の角速度 ω の時間応答
Fig. 22. Transient responses of ω of G1

より従来型の PSS(ω 型) は安定はしているものの位相のズレは大きい、それに対して提案したコントローラは良好な安定性を示している。しかも低次元コントローラの制御性能はほとんど劣化していないことが分かる。

図 22 に発電機 1 の角速度の時間応答を示す。位相角と同様に提案コントローラは良好な結果を与えていることが分かる。発電機 2 と発電機 3 でも角速度に対して同様な時間応答が得られた。

5. ま と め

本論文では、システム同定により多機系統につながる発電機を一機無限大母線系統として縮約化し、系統安定化装置を設計する手法を提案した。

本提案手法の主な特長は以下のとおりである。

- (1) 発電機部分のパラメータを既知とし、発電機から見た系統部分を未知のパラメータとして同定を行うことにより、同定パラメータの物理的な意味を明確にした。
- (2) 系統の構成が変化した場合でも同定により容易に発電機の自端情報のみで制御系を設計し、系統全体の安定性を保つことができる。
- (3) ループ状系統ならびに多数の発電機を有する系統においては、同定精度が劣化する可能性がある。しかし、本論文では同定モデルに対して H^∞ 制御を適用することで、同定誤差に起因するパラメータ誤差、縮約化モデルの次元の誤差に対するロバスト性を補償している。
- (4) コントローラは平衡型実現による低次元化手法により実装レベルまで低次元化されるが、制御性能は同程度であることが確認できた。

今後の課題としては、同定したパラメータから一機無限大系統の等価リアクタンス、母線電圧、位相角などの系統パラメータ自体の推定法、および逐次同定法によるオンライン同定の確立などが挙げられる。

(平成 12 年 03 月 23 日受付，同 12 年 07 月 31 日再受付)

文 献

- (1) 牧野 他：「分散 H^∞ 制御による多機電力系統安定化」、電学論 B，

118 巻 1 号, 23-30 (1998)

(2) S.Cui et al: "Decentralized Control of Large Power System by H^∞ Control Based Excitation Control System", IFAC'99 Vol.O, 255-260 (1999)

(3) 岡本 他: 「システム同定とロバスト安定度指定法を組み合わせた電力動揺抑制制御系の設計手法」電学論B, Vol. 118, No. 1, 52-61 (1998)

(4) 野尻 他: 「28 機モデル系統の非線形分散制御 -システム同定と補助制御入力-」電力技術研究会資料, Pe-97-2, 7-12 (1997)

(5) 天野 他: 「ブローニー解析に基づく励磁系の同定と比率加算形PSSの自動設計方法」電学論B, Vol. 118, No. 7/8, 892-898 (1998)

(6) P.Van Overschee and B.De Moor: "N4SID-Subspace Algorithms for the Identification of combined Deterministic-stochastic Systems", Automatica, Vol.30, No 1, 75-93 (1994)

(7) 関根: 「電力系統過渡解析論」, オーム社 (1984)

(8) 相良 他: 「システム同定」計測自動制御学会 (1995)

(9) L.Ljung and B. Wahlberg "Influence of Model Order on Change Detection in Noise-Free Complex System", Proc. ACC, 2388-2393 (1990)

(10) 足立: 「MATLAB による 制御のためのシステム同定」東京電機大学出版局 (1996)

(11) L.Ljung: "System Identification Toolbox", The MathWorks, Inc.(1995)

(12) 吉村 他: 「多機系統ロバスト安定化のための $P + \omega$ 形PSS 定数最適設計手法」電学論B, Vol. 118, No. 11, pp. 1312-1320 (1998)

(13) 崔 他: 「 H^∞ 制御理論に基づいた多入力発電機励磁制御系による系統安定化」電力技術研究会資料, PE-98-38, 33-38 (1998)

(14) "LMI Control Toolbox" The Math Works inc.(1995)

(15) B. C. Moore: "Principal Component Analysis in Linear Systems: Controllability, Observability, and Model Reduction" IEEE Trans. Automatic Contr., AC-26-1, 17-32 (1982)

付 録

付表 1 各発電機の機器定数

	機器定数	発電機 1	発電機 2	発電機 3
発電機 リアク タンス [p.u]	L_d	1.569	1.651	1.220
	L_q	1.548	1.590	1.160
	L_{afm}	1.365	1.549	1.142
	L_{akdm}	1.365	1.549	1.142
	L_{agm}	1.344	1.488	1.082
	L_{akqm}	1.344	1.488	1.082
	L_{ff}	1.4966	1.6909	1.2468
	L_{qq}	2.8672	1.8299	1.2865
	L_{kqkq}	1.3906	1.5604	1.1411
	L_{gkq}	1.3906	1.5604	1.1411
発電機 抵抗 [p.u]	L_{kdkd}	1.4115	1.6212	1.2009
	$L_{fk d}$	1.4115	1.6212	1.2009
	R_a	0.0016	0.0026	0.004
	R_f	0.0045	0.0005	0.0031
	R_y	0.0307	0.0455	0.0127
慣性系 定数	R_{kd}	0.0075	0.0089	0.0056
	R_{kq}	0.1140	0.0366	0.0205
	D	5.0[p.u]	2.0[p.u]	2.0[p.u]
調速系	H	5.0[sec]	2.0[sec]	3.0[sec]
	τ_1	0.1[sec]	0.1[sec]	0.1[sec]
	τ_2	0.1[sec]	0.1[sec]	0.1[sec]
	τ_3	2.0[sec]	2.0[sec]	2.0[sec]
	K_2	10	10	10
	K_3	1.0	1.0	1.0
AVR 励磁系	T_A	0.01[sec]	0.01[sec]	0.01[sec]
	T_E	0.002[sec]	0.002[sec]	0.002[sec]
	K_A	50	50	50
	K_E	0.0033	0.0042	0.0027
	E_{FDmin}	-8[p.u]	-8[p.u]	-8[p.u]
	E_{FDmax}	8[p.u]	8[p.u]	8[p.u]

崔 実 根 (学生員) 1964 年 7 月 5 日生。1986 年 8 月天津
軽工業学院卒業。1998 年名古屋工業大学大学院
電気情報工学科専攻博士前期課程終了。同年 4 月
同大学大学院博士後期課程に進学、現在に至る。
主にロバスト制御の電力系統安定化への応用、電
力系統のシステム同定に関する研究に従事。

鶴 飼 裕 之 (正員) 1954 年 3 月 5 日生。1979 年名古屋工業
大学大学院計測工学専攻修士課程修了。1980 年
名古屋工業大学電気工学科助手。1996 年同大学
電気情報工学科講師。1998 年同大学システムマ
ネジメント工学科助教授。工学博士。分布定数系
の理論と応用、電力系統、原子炉の制御に関する
研究に従事。計測自動制御学会、日本原子力学会、
IEEE の各会員。

神 藤 久 (正員) 1945 年 4 月 9 日生。1970 年京都大学大
学院電気工学専攻修士課程修了。1974 年名古屋
工業大学共通講座教室助手。1988 年同大学電気
情報工学科助教授。1998 年同大学電気情報工学
科教授。工学博士。ディジタル制御、多次元ディ
ジタル信号処理、電力制御、大規模システム理論
などに関する研究に従事。計測自動制御学会、シ
ステム制御情報学会、IEEE の各会員。

中 村 光 一 (正員) 1942 年 3 月 7 日生。1965 年名古屋工業
大学電気工学部卒業。1966 同助手。1988 年同
助教授、1997 年同システムマネジメント工学科
教授、現在に至る。1983~84 年クラークソン大
学客員研究員。工学博士。電力系統解析、高温超
電導の電力応用、ロケット誘雷に関する研究に従
事。1982 年電気学会論文賞、1989 年電気学会進
歩賞。日本大気電気学会、電気設備学会、低温工
学協会、高速信号処理応用技術学会、IEEE の各会員。

藤 田 秀 紀 (正員) 1951 年 3 月 28 日生。1973 年 3 月名古屋
大学工学部電気学科卒業。同年 4 月中部電力(株)
入社。電力系統の運用に関する実務後、パワエレ・
超電導技術の系統適用研究に従事。工学博士。現
在、同社電力技術研究所研究主幹。1990 年電気
学会進歩賞受賞。IEEE 会員。