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

正員 岡本 浩 (東京電力)

正員 多田 泰之 (東京電力)

正員 三ツ間 均 (東京電力)

A Method for Damping Controller Design Using Transfer Function Identification Technique and Robust Stability Degree Assignment Method

Hiroshi Okamoto, Member, Yasuyuki Tada, Member, Hitoshi Mitsuma, Member (Tokyo Electric Power Co.)

This paper presents a method for power system damping controller design using a transfer function identification and robust stability degree assignment method.

The identification procedure used in the proposed method is based on an iterative scheme introduced by K. Steiglitz and L. E. McBride. Steiglitz-McBride's algorithm provides the low order linear system models of power systems without deriving linearized state space realization from physical modelling of the power systems. By combining robust stability degree assignment method with the Steiglitz-McBride's identification technique, power system damping controllers can be designed straightforwardly. The advantage of the proposed method is as follows,

- The damping controller can be designed easily even in the large scale and complicated power systems.
- Real power system dynamics can be taken in to account in the controller design procedures by using measured signals.

The proposed method is applied to measured signals in TEPCO real-time power system simulator as well as time domain digital simulation results. The present paper demonstrates the feasibility of synthesizing equivalent linear systems from measured data and designing effective controller using synthesized linear systems.

キーワード：電力動揺抑制制御，ロバスト制御，ロバスト安定度指定法，システム同定，インディシアル応答

1. はじめに

電力系統内には様々な振動現象（電力動揺，軸ねじれ振動など）が存在しているが，このような現象を解析したり，その抑制制御系を設計する際には，系統の動特性を支配する物理法則（例えば，運動方程式や，回路方程式など）に基づいてモデリングを行い（以下ではこれを物理モデリングと呼ぶ），これを系統の解析モデルとすることが殆どである。例えば，発電機のParkモデル等から，系統の線形化状態方程式を導出し，これを基に固有値解析などを行って制御系を設計する方法が利用されることが多い。

このアプローチはすでに多くの実績を残している反面，以下のような問題点も有していると考えられる。まず第一に，FACTSやHVDC等に代表されるパワーエレクトロニクス

機器などそれ自体がかなり複雑な要素を含む系統を扱う際に，線形化状態方程式の導出が容易ではない。一方，これらの機器のデジタルシミュレーションモデルの作成は，これに比べれば容易である。

また，系統が大きくなると，物理モデリングによって得られる状態方程式の次数は大変大きなものとなる。実規模系統の状態方程式の次数は，実効値領域のモデル化でも数100～数1000次元に達するので，これをそのまま制御系の設計に用いるのは難しい。実際には，ある発電機の励磁制御系を設計する場合には，その発電機からの可制御性が大きいモードや，その発電機の有効電力出力偏差や回転子角速度偏差などの検出信号からの可観測性が大きいモードのみを考慮した低次の伝達関数を利用すれば十分である。しかし，S法等のように弱制動のモードのみをいくつか求め

る手法からは、このような縮約モデルを構成することができない。

以上のような場合には、デジタルシミュレーション結果から、系統の動特性を表現する低次元の伝達関数を同定できれば（言い換えれば、システムの入出力の時系列データから、システムに等価なモデルを得られれば）、これを用いて容易に制御系設計が行えるようになると考えられる。この方法では、可制御性の小さいモードは励起されず、また応答波形には可観測性の小さいモードは現れないので、本来のシステムに比してかなり次元の小さな同定モデルが得られるというメリットがある。

物理モデリングの第2の問題は、得られた解析モデルと現実の系統との間に、ある程度のモデル化誤差があると考えられることである。特に負荷の動特性などは、これを精度良くモデル化することが難しい。また、発電機のParkモデルについても、連続媒体の電磁界方程式を集中定数回路で模擬したものであり、かなりの精度で実測値と一致することが確認されているものの、あらゆる周波数領域で完全なものであるとは言えない。解析に用いられる機器の定数にしても、実際にはある程度の測定誤差が含まれていると考えるのが妥当である。このような場合には、実測により得られた時系列データから、システムの動特性を同定できれば、実際の系統の動特性をより忠実に模擬できるものと考えられる。

以上のような背景から、筆者らは実測やシミュレーションによって得られた時系列データから、システムの動特性を同定する手法について検討を加え^{(1)~(4)}、同定結果を基に制御系を設計する手法を提案してきた⁽⁵⁾。このようなアプローチは、振動制御の分野では一般的に用いられてきたものである。例えば、文献(6)では、人工衛星の姿勢制御について、軌道上でのシステム同定実験結果に基づいてロバスト安定度指定法によって制御系設計を行った例が報告されている。また文献(7)は、ロボットアームの振動制御手法を提案しているが、これはProny解析法⁽⁸⁾と呼ばれる同定法を利用して制御対象モデルを導出し、進み遅れ補償要素を設計するものである。

電力分野においても、BPAなどを中心にProny解析法の適用が検討されてきており^{(9)~(11)}、国内でもPSS整定への適用の検討例などが見られる⁽¹²⁾。しかしこれらの検討で同定手法として利用しているProny解析法には、

- 同定されたモデルの次数を相当に高くする必要がある。また、これに伴い計算時間もかなり必要とする。
- 入力信号としてインパルスかそれに近いものを用いる必要がある。

などの問題がある。また、同定結果に基づく制御系設計法も古典制御の範囲に留まっている。

そこで、本稿ではシステム同定にSteiglitz-McBride法⁽¹³⁾を用い、同定された伝達関数モデルにロバスト安定度指定法⁽¹⁴⁾を適用して、電力動揺抑制制御系を設計する手法を提案する。この方法を利用する利点は以下の通りである。

- ロバスト安定度指定法では、制御系設計のために安定化したい長周期動揺などについての比較的低次元の伝達関数モデルを必要とする⁽¹⁵⁾が、Steiglitz-McBride法によって極めて容易にこのようなモデルが得られる。
- 対象系統が大規模かつ複雑であっても、容易な手順で制御系の設計が可能である。
- 実系統において実測した波形も利用できるのも、より現実に近いモデルを用いての制御系設計ができるようになる可能性がある。

本稿の構成は以下の通りである。まず、2章において、本稿において提案する手法の概要を述べる。3章においては、デジタルシミュレーション波形への適用を行い、本提案手法の有効性を示す。また、本手法の実測波形への適用の可能性を確認するために、当社が保有する電力系統シミュレータを利用して、提案手法による制御系設計と効果の検証を行った。4章ではこの試験結果について報告する。

2. システム同定に基づく制御系の設計法

〈2・1〉 提案する手法の概要 本節では、筆者らが提案する制御系設計手法の概略を説明する。図1は、提案手法による制御系設計の流れを示したものである。

まず(Step 1)では、系統に入力信号を印加して系統の応答を観測する。またサンプリングした入出力信号データに、前処理をほどこして、観測雑音の影響を低減する。これは、同定精度を高めるために必要である。

(Step 2)では、前処理後の系統への入出力信号から、Steiglitz-McBride法により、系統の伝達関数表現(z 領域)を得る。また、得られた伝達関数モデルを連続時間域(s 領域)に変換する。

(Step 3)では、ロバスト安定度指定法の適用の準備として、平衡実現による縮約法を利用してノミナルモデルを導出するとともに、モデル化誤差の評価を行う。

最後に(Step 4)においてロバスト安定度指定法に基づき、制御系の設計を行い、その評価を行う。

これらの一連の手順は、すべて制御系のCADであるMATLABにより実現されており、特にシステム同定を行う(Step 1)および(Step 2)については、筆者らが開発した支援システム⁽³⁾を利用して、GUIにより対話的に行うことができる。以下ではそれぞれのステップの処理について説明する。

〈2・2〉 入出力データのサンプリングと前処理 このステップでは、図2に示した通り、系統に入力信号を印加して系統の応答を観測し、得られた入出力データにSteiglitz-McBride法を適用するための準備を行う。

具体的には、PSSを設計する場合には、設計するPSSからの補助信号が加わる箇所に適当な大きさの入力信号 u を印加する（例えば0.5秒間だけ u として0.1[pu]を加えるなど）。その上で、PSSにおいて利用する検出信号（例えば回転子角速度偏差 $\Delta\omega$ など）の応答 y を観測するのである。基本的には、この入出力信号から、制御系設計に必要な系

図1 提案手法による制御系設計の流れ
Fig. 1. Flowchart of the proposed method.

統モデルを同定することになる。

また、入出力信号 u および y のサンプリングとともに信号の前処理を行う。特に実測波形への適用を考慮する場合には、測定値に含まれる高域の観測雑音の影響を除去するための処理を行い、注目している周波数領域での同定の精度を向上させることが必要である。この目的のために、デシメーション⁽¹⁶⁾と呼ばれる信号処理を利用する。

デシメーションとは、対象とする信号（サンプリング周期 T ）に低域通過フィルタを作用させた後に、より粗いサンプリング周期（ $T' = RT$ （ $R \geq 2$ ））でサンプリングする操作のことである。この時、同定対象の主要なダイナミクス（振動モードなど）が含まれるような周波数帯域を考慮して、新たなサンプリング周期 T' を決定する。この処理を行うことで、高周波雑音の影響を除去して、対象としている周波数領域での同定精度を高めることができる。

なお、本稿で提案する手法は、系統の動特性を線形系の伝達関数として模擬するものであることに注意を要する。印加する入力信号が大きすぎる場合には、非線形な応答波形が得られることになるので、あらかじめ線形性のチェックを行う必要がある。具体的には、入力波形の高さを半分にした場合の出力波形を2倍して、もとの出力波形と十分に一致していることを確認すればよい。波形が変化しているようであれば、入力信号が大きすぎると考えられるため、より小さい信号を印加する必要がある。

図2 システム同定の基本的考え方
Fig. 2. Flowchart of the identification procedures.

図3 システムと同定モデルの出力誤差
Fig. 3. The actual vs. identified model error.

〈2・3〉 伝達関数の同定法 前述の通り、伝達関数の同定法にはProny解析、Steiglitz-McBride法などがある。筆者らも EMTP による瞬時値解析結果の処理にProny解析法を適用して良好な結果を得ているが⁽²⁾、その後の検討で、Prony解析の代わりに繰り返し型のアルゴリズムであるSteiglitz-McBride法と呼ばれる手法を利用した方が、より低次元の精度の良いモデルが得られることがわかってきた^{(1) (4)}。そこで本稿で提案する制御系の設計法では、伝達関数の同定にSteiglitz-McBride法を利用することとする。

さて以下では、離散時間表現での系統の伝達関数を $G(z)$ とし、前処理後の入力信号と検出信号の時系列データ（それぞれ $u_1, u_2, \dots, u_N$ および $y_1, y_2, \dots, y_N$ ）から $G(z)$ の n 次の有理関数表現 $N(z)/D(z)$ を同定することを考える。これは図3において、系統と $N(z)/D(z)$ の出力誤差 e の二乗和を以下のように最小化するように $N(z)$ と $D(z)$ の係数を決定する問題となる。

$$\sum_{i=1}^N |e(i)|^2 \rightarrow \min \quad \dots \dots \dots (1)$$

これはきわめて複雑な非線形最適化問題となり、このまま解くのは容易でない。

Prony解析はこれを2ステップの線形回帰問題に変換することで同定を行う。具体的には、まず最初のステップで、入力信号 u が0となった後のデータを用いて自己回帰 (AR) モデルにより分母多項式 $D(z)$ を決定し、次のステップで全データを用いて分子多項式 $N(z)$ を決定する。この場合、

図4 Steiglitz-McBride法の繰り返し計算

Fig. 4. The iterative scheme of Steiglitz-McBride algorithm.

同定に N 個の時系列データを利用する場合には、伝達関数 $N(z)/D(z)$ の次数を $N/3$ から $N/2$ 程度とすると良い結果が得られることが知られている⁽⁹⁾。例えば、10秒間のデータを10ms毎にサンプリングした場合には、伝達関数の次元を300から500程度の間に選ぶ必要がある。

これに対して、Steiglitz-McBride法では、繰り返し計算を行いながら、出力誤差の二乗和を最小にするように $N(z)$ と $D(z)$ の係数を同時に決定する。この繰り返しアルゴリズムの計算ステップは以下ようになる。ただし i 回目の繰り返し計算の結果得られた $N(z)$ および $D(z)$ をそれぞれ N_i および D_i と書くことにする。まず、図4に示したように、入力信号、出力信号を $1/D_{i-1}$ によってフィルタリングし、フィルタ通過後の信号 $\hat{u}$ および $\hat{y}$ について、誤差 e' の二乗和が次式のように最小となるように、 N_i および D_i の係数を決定する。

$$\sum_{i=1}^N |e'(i)|^2 \rightarrow \min \quad \dots \quad (2)$$

各ステップで解くべき問題はいわゆる線形回帰問題となるので、簡単に解くことができる。このステップを繰り返して収束した断面では、図3の誤差と図4の誤差が一致して、出力誤差を最小にするような同定モデルが得られたことになる。

筆者らの経験によれば、電力動揺と軸ねじれ振動など多くの振動モードからなる時系列データを解析の対象とした場合でも、Steiglitz-McBride法では伝達関数モデルの次数は、ほぼ20次元程度とすれば良い結果が得られる⁽⁴⁾。軸ねじれ振動が重畳していないような場合には、さらに低い次元で十分の場合が多い。また、繰り返し計算はほぼ5回程度で収束する。したがって、高次のモデルを用いなければならないProny解析法に比べて、より低次元のモデルを高速に得られるという特長がある。

ここまでで得られた伝達関数は離散系 (z 領域) の表現と

なっている。この後の処理では、連続系での伝達関数表現 (s 領域) が必要になるので、 z 領域から s 領域への変換が必要となる。様々な手法が提案されているが、本稿では次式を用いた。

$$z^{-1} \cong \frac{1 - (\Delta t/2)s}{1 + (\Delta t/2)s} \quad \dots \quad (3)$$

ただし Δt は離散系でのサンプリング周期である。

〈2・4〉 システムの低次元化とモデル化誤差の評価 ロバスト安定度指定法を電力動揺抑制制御系の設計に適用する場合には、制御系設計のために安定化したい電力動揺モードなどの特性を保存した比較的低次元の伝達関数モデル（以下ではノミナルモデルと呼ぶ）を必要とする⁽¹⁵⁾。このため文献(15)では、系統の伝達関数モデルをモード分解し、安定化したい長周期動揺モードと直流分を抽出することで、系統のノミナルモデルを得ていた。しかし、複数の電力動揺を安定化したいような場合には、この方法で適切なノミナルモデルを得るのが難しい。

そこで本稿では、平衡実現による方法⁽¹⁷⁾を用いて、システムの低次元化モデルを得ることにする。この方法ではまず元の状態方程式に変数変換を施すことによって、可制御性および可観測性が高い順番にオーダリングされるような状態方程式表現に変換する（数学的には可制御グラミアンと可観測グラミアンを平衡化することにより計算できる）。変換された状態方程式モデル（平衡実現モデル）を適当な次数で打ち切ることにより、低次元化モデルが得られる。なお、この方法は本来不安定系を扱えないが、文献(18)の方法や、不安定部分を分離・保存して安定部分のみ低次元化を行うことにより、不安定系にも適用が可能である。

ノミナルモデルの次元は、低次元化前の伝達関数モデルの周波数応答を見ながら決定する。例えば、安定化したい動揺モードが2つある場合（ローカルモードと長周期モード）には、これらのモードに対応する4次のモデルを用いれば十分である。また、文献(15)に示した通り、長周期動揺のみの安定化を行い、ローカルモードには制御による影響を与えないように設計する場合には、2次のモデルを用いれば良い。モデルの低次元化によって、無視された高次のモード（モデル化誤差）については、これをノミナルモデルへの摂動とみなして、その上界値を重み関数 $r(s)$ により評価する⁽¹⁵⁾。

〈2・5〉 ロバスト安定度指定法の適用 ここまでで、系統のノミナルモデルとモデル化誤差の評価が得られたので、これを利用してロバスト制御系を設計することができる。ロバスト制御系の設計法については、 H_∞ 制御理論を中心として電力分野でもかなりの検討がなされているが、ここでは筆者らが先に提案したロバスト安定度指定法を適用することにする。この方法の長所は、設計時に調整するパラメータの数が少なく（一つの重み関数とロバスト安定度のみ）、設計が簡便である点にある。

系統のノミナルモデルを $P_0(s)$ 、摂動の上界を与える重

図5 乗法的摂動を含む閉ループ

Fig. 5. Closed loop with multiplicative perturbation.

み関数を $r(s)$ とする。ロバスト安定度指定法とは、図5において、

$$\|\tilde{\Delta}(s)\|_{\infty} < 1 \quad (4)$$

なる摂動が加わっても、閉ループの極が $\text{Re}(s) < -\beta$ を満たすように、制御系 $K(s)$ を求める手法である。具体的には、通常のロバスト安定化を、虚軸を仮想的に β だけ左にシフトした複素平面上で行えばよい。その制御系設計の手順は以下の通りである。

Step 1 まず、

$$\bar{T}_{zw}(s) = T_{zw}(s - \beta) \quad (5)$$

に対して、次の H_{∞} 制御問題を解く。

$$\|\bar{T}_{zw}\|_{\infty} < 1 \quad (6)$$

この解を $\bar{K}(s)$ とする。

Step 2 求める安定度 β のロバスト安定化器は

$$K(s) = \bar{K}(s + \beta) \quad (7)$$

で与えられる。

設計された制御系 $K(s)$ の次数が高すぎる場合には、平衡実現による方法を使って、低次元化を行えばよい。

3. デジタルシミュレーション結果への適用

本章では、提案する制御系設計手法を、8機くし形系統のデジタルシミュレーション結果に適用した結果を述べる。

〈3・1〉 モデル系統 モデル系統としては、8機串形系統(図6)を用いる。この系統では発電機G1~G8には、 ΔP 入力のパッシブが設置されている。ここではG1に $\Delta\omega$ 入力のPSSを付加することで、弱制動長周期電力動揺を抑制することを考える。

〈3・2〉 伝達関数の同定と低次元化 発電機G1の励磁系に、入力信号として $t=0.0\sim 0.1[\text{sec}]$ の間だけ $0.1[\text{pu}]$ の信号を印加した場合の、 $\Delta\omega$ の応答を計算した(図7)。この

発電機

G1 - G7 : 2200MVA, G8 : 11000MVA
M=8sec, 変圧器X=14%(機器容量ベース)

送電線インピーダンス(1000MVAベース)

L1 - L8 : $0.003 + j0.0335$ (Y/2=0.055)

L101 - L107 : $0.0077 + j0.137$ (Y/2=0.22)

負荷

A : 1000MW, B - G : 2000MW, H : 3000MW

図6 8機モデル系統

Fig. 6. An eight-machine power system model.

波形(実線)に Steiglitz-McBride 法を適用して、10 次の伝達関数を得た。ただし同定には、サンプリング周期 50msec で10秒間の時系列データを用いた。また、この場合には観測雑音が含まれないので、デシメーションによる信号処理は行っていない。同定された伝達関数の応答は、図7上に $\times$ によりプロットした通りとなり、もとの波形とほとんど一致している。

また、比較のために、物理モデリングによって得られた線形化状態方程式モデル(94次元)と、同定の結果得られたモデル(10次元)の周波数応答を図8に示した。両者が非常に良く一致しており、提案する方法で十分な精度のモデルを得られることがわかる。

得られた伝達関数は、設計に用いるにはまだ高次であるので、平衡実現による方法を利用して、これを4次まで低次元化した。低次元化前後の伝達関数の周波数応答は、電力動揺領域($1\sim 10[\text{rad/sec}]$)において、かなりよく一致しており(図9(a))、電力動揺領域(0.5Hz から 2Hz まで)の周波数領域において、ゲインおよび位相特性が保存されていることがわかる。また低次元化前のモデル(10次元)と低次元化モデル(4次元)の時間応答(入力信号は図7と同じとした)を比較したところ、図9(b)に示すように比較的良く一致している。なお時刻1.5秒から4秒までの間に両者が若干相違しているのは、低次元化前のシステムの周波数特性において顕著な2つのローカルモード(約 0.9Hz および 1.3Hz)を、低次元化することによって1つのモード(約 1.1Hz)にまとめてしまったためであると思われる。

〈3・3〉 ロバスト制御系の設計 前項で得られた4次の伝達関数を利用して、ロバスト安定度指定法により制御系を

図7 同定に用いた過渡応答波形
Fig. 7. Time response comparison.

図8 周波数応答の比較

Fig. 8. Frequency response of the physical model and the identified models.

設計した。ノミナルモデルに加わる摂動の大きさの上限は、

$$|\Delta(j\omega)| < |r(j\omega)|, \quad r(s) = 0.25 \frac{s^2 + 4.5s + 4.5^2}{s^2 + 9.0s + 9.0^2} \quad (8)$$

として見積もった。図10に、低次元化によるモデル化誤差と重み関数の周波数応答を示した。

システムの固有値が $\text{Re}(s) < -0.18$ を満たすように、制御系を設計したところ、6次の制御系が得られた。また、この制御系を3次まで低次元化した、低次元化前後の周波数応答はよく一致している(図11)。

〈3・4〉適用結果 設計した3次の $\Delta\omega$ 入力PSSを設置した場合の、システムの過渡応答を計算した(2回線連系線の3LGO故障)。また、比較のために従来型の $\Delta\omega$ 入力のPSS⁽²⁸⁾を設置したケースについても検討を行った。従来型の $\Delta\omega$ 入力のPSSの伝達関数は

$$PSS(s) = K \cdot \frac{5s}{1+5s} \cdot \frac{(1+T_1s)^2}{(1+T_2s)^2} \quad \dots\dots\dots (9)$$

とし、その定数はシステムの過渡応答ができるだけ良くなるように試行錯誤により調整した ($K = 10, T_1 = 0.1[s], T_2 = 0.02[s]$)。

図9 低次元化した伝達関数の周波数応答および時間応答

Fig. 9. Frequency response and time response of the identified and reduced systems.

図12(a)に示した通り、提案手法により設計したPSSの設置によりシステムのダンピングは格段に向上している。また、連系線潮流を増加させて、さらに動揺が長周期化、弱制動化した場合でも、システムが安定に保たれることがわかった(図12(b))。これは、ロバスト安定度指定法の適用によって、システムの動特性の変化(摂動)に対する感度を最小化するように制御系を設計したため、結果として潮流変化に対してもロバストな制御系となったためと考えられる。なおいずれのケースでも、従来型の $\Delta\omega$ 入力PSSを付加するよりも、提案手法によるPSSを付加した方が、若干ダンピングが良好であることが見て取れる。

4. 電力システムシミュレータ試験結果への適用

〈4・1〉シミュレータによる検証 実測波形を利用した制御系設計が可能であるかどうかを評価するために、電力システムシミュレータによる試験を行った。前節では発電機の $\Delta\omega$ 入力PSSの設計を対象としたが、ここでは例題としてSVCの電力動揺抑制制御系(制御入力として送電線の有効電力潮流偏差を利用)の設計を取り上げることとする。

試験に用いたシステムの概要は図13に示した通りである。SVCについては電流源として模擬し、電流アンプ(周波数特性10kHz)を介してシミュレータに電流を注入する(このような方法はSMESのシミュレータ試験でも利用されている⁽²⁹⁾)。また、SVCの動特性と制御系の動作はDSPで

図 10 モデル化誤差と重み関数 $r(s)$ の周波数応答
Fig. 10. Frequency responses of multiplicative error and weighting function.

図 11 制御系の周波数応答
Fig. 11. Frequency response of the controller.

図 12 設計した PSS (3 次) の適用結果
Fig. 12. Time response with designed PSS.

リアルタイム演算することにより模擬している。

SVC の電圧設定時を 0.5 秒間のみ 0.1 [pu] だけ上昇させ、

図 13 シミュレータ試験に用いたシステムの概要
Fig. 13. Schematic diagram of real-time simulator tests.

これを SVC への入力信号とした。また、同定および制御に用いる観測信号は、系統内の注目送電線の有効電力潮流偏差とした。

実測波形には観測雑音などが含まれるため、〈2・2〉節に示した通り、デシメーションによる信号の前処理が不可欠である。以下の方法で、入出力信号を収集した。

- サンプル周期 1msec で入出力信号をサンプリング
- デシメーション操作を施し、10msec のサンプリング周期でサンプリングを行う

なおデシメーション実施時には、カットオフ周波数 40Hz の低域通過フィルタ (8 次のデジタル Chebychev フィルタ (Type 1)) を利用している。

今回試験に利用した多目的試験装置は、

- MATLAB/SIMULINK でブロック図としてモデル化した装置の動特性を、自動的に C 言語に変換、コンパイルして DSP に実装できる。
- 収集したデータもそのまま MATLAB に取り込み、2 節で説明した信号処理、同定、制御系設計を行うことができる。

• 設計した制御系をすぐに DSP に実装して評価できる。という特長を持っており、これを利用することで対話的に制御系設計を行うことが可能となっている。以下で説明するいずれの試験においても、事前のデジタルシミュレーション等の予備検討を行うことなく、データの収集から、動特性の同定、制御系の設計、制御系の効果の検証までの一連の作業が、ほぼ 1, 2 時間程度で終了した。

〈4・2〉一機無限大母線系統での試験結果 本節では図 14 の一機無限大母線系統による試験を行った結果を示す。Steiglitz-McBride 法を適用するために、健全時の系統にお

図14 試験系統
Fig. 14. Model system.

図15 実測信号
Fig. 15. Measured signal.

いて、SVCに入力信号を加え、有効電力偏差を実測した。図15に、この時の入出力信号の実測値を示した。実測値には観測雑音の他、送電線の不平衡に起因する商用周波数の2倍の周波数(100Hz)での脈動が加わっている。

入出力信号にデシメーションを施した結果を図16に示す。出力波形から観測雑音や100Hzの脈動が取り除かれていることがわかる。デシメーションを行った後にSteiglitz-McBride法を適用した結果を図17に示す。実測波形と、同定により得られた伝達関数モデル(12次)の出力波形が、ほとんど一致していることが見て取れる。また、得られた伝達関数モデルの周波数応答を調べたところ、約1Hz程度の周期の電力動揺に対応するピークが現れていることがわかる。

前章で述べたのと全く同様の方法で、ロバスト安定度指定法を適用した。ただしここでは、ノミナルモデルとして2次のモデルを用いた。設計された制御系(6次)の周波数応答を図19に示す。この制御系をDSPに実装して、図14に示した箇所で行線開放故障についてシミュレータ試験を行った。試験結果(図20)から明らかな通り、設計した制御系により電力動揺のダンピングが向上している。

〈4・3〉4機系統での試験結果 本節ではより長い動揺周期での電力動揺が現れる4機系統で、前節と同様の試験を

図16 デシメーション処理結果
Fig. 16. Filtered measurement signal.

図17 同定結果
Fig. 17. Result of system identification.

図18 同定したモデルの周波数応答
Fig. 18. Frequency response of identified model.

行った結果を述べる。まず、前節と同様の方法により、インディシアル応答波形を実測し、入出力波形にデシメーションを施した。デシメーションを行った後の波形に、Steiglitz-McBride法を適用した結果を、図21に示す。系統には約1.6

図20 シミュレータ試験結果

Fig. 20. Simulator test results.

図19 設計された制御系の周波数応答

Fig. 19. Frequency response of desined PSS.

秒周期の弱制動の長周期動揺が存在しているが、同定された伝達関数モデル（12次）の出力波形は、実測波形の電力動揺を良い精度で再現していることがわかる。

同定された伝達関数モデルにロバスト安定度指定法を適用して、電力動揺抑制制御系（6次）を設計した。前節と同様に、設計した制御系をDSPに実装して、シミュレータ試験（重負荷送電線の一回線開放故障）を行った（図22）。電力動揺抑制制御系なしの場合では、重負荷送電線の一回線開放に伴って同期化力が減少して、電力動揺周期が長くなり（約2秒以上）持続振動状態となっている。設計した制御系を適用した場合には、長周期動揺のダンピングが明らかに向上していることが見て取れる。

図21 同定結果（4機系）

Fig. 21. Result of system identification in a four-machine system.

5. 結 言

本論文においては、システム同定結果に基づく電力動揺抑制制御系の設計法の一手法を提案した。デジタルシミュレーション結果および電力系統解析シミュレータによる解析結果に本手法を適用した結果、以下の結論が得られた。

- Steiglitz-McBride法により同定した低次元の伝達関数モデルを利用して、電力動揺抑制制御系の設計を行うことができる。
- 実測波形の場合のように観測雑音を含むケースでも、デシメーションを施すことでシステムの同定が可能となった。

これらの結果より、実測波形を利用することにより、より現実に近いモデルを用いての制御系設計ができる可能性があることが明らかになったと考える。

今後検討すべき課題としては、以下があげられるであろう。

- 本稿では発電機軸ねじれ振動について考慮しなかった

図22 シミュレータ試験結果 (4機系)

Fig. 22. Simulator test results in the four-machine system.

(1 慣性系としてしか模擬していない)。軸ねじれ振動があるようなケースに本手法を適用して、電力動揺と軸ねじれ振動を同時に抑制するような制御系を設計できないかを検討する必要がある。

- 本稿では1入力1出力の制御系設計のみを対象とした。多入力制御系への適用も今後の課題である。また、複数の制御系の協調を取る方法なども考慮する必要がある。
- 今回は設計した制御系を高速のDSPに実装したので問題とならなかったが、今後適用が予想されるデジタルAVRなどではサンプリング周波数がそれほど高くない。ゆっくりしたサンプリング周波数のコントローラにも実装できるように、LMI(線形行列不等式)などの手法を使って、制御系の時定数に制約を設けるなどの検討が必要になると考える。

最後に、本研究を実施するに当たり、システム同定手法の開発でお世話になったDr. J. J. Sanchez-GascaをはじめとするGE社の各氏およびProf. J. H. Chow (Rensselaer Polytechnic Institute)、電力系統シミュレータ試験の実施に当たってご協力いただいた当社系統解析グループの各氏と東電設計(株)の吉村氏、斎藤氏に謝意を表します。

(平成9年4月30日受付, 同9年9月30日再受付)

文 献

- (1) 岡本, 栗田:「時間域データを利用した電力系統の伝達関数の同定に関する基礎的検討」, 平成7年電気学会電力・エネルギー部門大会, 論文II, No.265
- (2) H. Okamoto, A. Kurita, J.J. Sanchez-Gasca, K. Clark, N. W. Miller, J.H. Chow: "Identification of Equivalent Linear Power System Models from Electromagnetic Transient Time Domain Simulations Using Prony's Method," in *Proc. 35th IEEE Conf. Decision and Control (CDC'96)*, Kobe, Dec. 1996.
- (3) J.J. Sanchez-Gasca, K. Clark, N. W. Miller, H. Okamoto, A. Kurita, J.H. Chow: "Interactive Identification of Linear Power System Models from Time Domain Simulations," *IEEE Computer Applications in Power*, Vol. 9, No. 2, April, 1997.
- (4) H. Okamoto, A. Kurita, J.J. Sanchez-Gasca, K. Clark, N. W. Miller, J.H. Chow: "Efficient Identification of Equivalent Linear Power System Models from Electromagnetic Transient Time Domain Simulations," to be presented at *IEEE PES Summer Meeting*, Berlin, Aug. 1997.
- (5) 岡本, 栗田:「システム同定とロバスト安定度指定法を組み合わせたPSSの設計法」, 平成8年電気学会全国大会, No.1363.
- (6) 千田, 山口, 曾我, 木田, 山口, 関口:「 H_∞ 制御と2自由度制御によるETS-VIの軌道上制御実験」, 計測自動制御学会論文集, **32**, pp.1620-1628 (平8-12)
- (7) J. Y. Lew, D. J. Trudnowski: "Vibration Control of a Micro/Macro-Manipulator System," *IEEE Control Systems Magazine*, Vol. 16, No. 1, 1996.
- (8) G. R. B. Prony: "Essai expérimental et analytique sur les lois de la dilatabilité de fluides élastiques et sur celles de la force expansion de la vapeur de l'alcool, à différentes températures," *Journal de l'Ecole Polytechnique* (Paris), Vol. 1, No. 2, 1795.
- (9) J. F. Hauer, C. J. Demeure, L. L. Scharf: "Initial Results in Prony Analysis of Power System Response Signals," *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol. 5, No. 1, Feb. 1990.
- (10) J. R. Smith, J. F. Hauer, D. J. Trudnowski: "Transfer Function Identification in Power System Applications," *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol. 8, No. 3, Aug. 1993.
- (11) D. J. Trudnowski: "Order Reduction of Large-Scale Oscillatory System Models," *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol. 9, No. 1, 1994.
- (12) 天野, 渡辺, 萬城:「Prony解析に基づく比率加算型PSSの自動整定」, 電気学会電力技術研資, PE-96-79 (平8)
- (13) K. Steiglitz, L. E. McBride: "A Technique for the Identification of Linear Systems," *IEEE Trans. Automatic Control*, Vol. 10, pp.461-464, 1965.
- (14) 木村:「ロバスト安定度指定法とその柔軟アーム制御への応用」, システム/制御/情報, Vol. 34, No. 1, pp44-49 (平2)
- (15) 岡本, 栗田:「ロバスト安定度指定法によるSVCの電力動揺抑制制御系設計手法」, 電学論B, **117**, 578 (平9-4)
- (16) 足立, 須永:「デシメーションを用いたロバスト同定法——大型柔軟衛星への適用——」, 計測自動制御学会論文集, **31**, pp.8-13 (平7-1)
- (17) B. C. Moore: "Principal Component Analysis in Linear Systems: Controllability, Observability, and Model Reduction,"

- IEEE Trans. Automatic Control*, Vol. 26, pp.17-32, 1981.
- (18) 松下, 石黒, 大松:「低次元化手法を用いた大規模系統安定化のための発電機励磁制御」, 電学論B, 116, 104 (平8-1)
 - (19) 瓜生, 大橋, 小柳:「 H^∞ 制御を用いた分散型発電機制御による多機電力系統安定化」, 電学論B, 116, 7 (平8-1)
 - (20) N. Yorino *etal.*: "Robust Power System Stabilizer Design Based on the H_∞ Approach", 平成7年電気学会全国大会, No. 1368 (平7)
 - (21) M. Klein *etal.*: " H_∞ Damping Controller Design in Large Power Systems", *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 10, No. 1, pp.158-166 (1995)
 - (22) M. Vidyasagar: *Control System Synthesis: A Factorization Approach*, The MIT Press (1985)
 - (23) 前田, 杉江: アドバンスト制御のためのシステム制御理論, 朝倉書店 (平2)
 - (24) 美多: H_∞ 制御, 昭晃堂 (平6)
 - (25) 細江, 荒木監修: 制御系設計— H_∞ 制御とその応用—, 朝倉書店 (平6)
 - (26) 岡本, 栗田, 小林, 関根:「電力動揺抑制のための静止形無効電力補償装置の設置箇所の選定方法について」, 電学論B, 115, 1054 (平7-9)
 - (27) G. Balas *etal.*: *μ -Analysis and Synthesis TOOLBOX User's Guide*, The MathWorks, Inc. (1994)
 - (28) 道上:「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」, 電学論B, 115, 42 (平7-1)
 - (29) 白井, 秋田, 仁田, 西垣内:「電力系統シミュレータを用いたSMESによるくし形系統の固有周波数測定実験」, 平成8年電気学会B部門大会論文I, No. 7 (平8)
 - (30) 多田, 岡本, 三ツ間, 鳥塚:「電力系統シミュレータ用高機能多目的試験装置の開発とその可視化インターフェースについて」, 平成9年電気学会B部門大会論文II (発表予定)

岡 本 浩 (正員) 平成5年3月東京大学大学院工学系研究科電気工学専攻博士課程修了。博士(工学)。同年4月東京電力(株)入社。現在, 同社電力技術研究所系統技術グループにて, 電力系統の解析および制御に関する研究に従事。平成5年, 7年, 9年電気学会優秀論文発表賞, 平成8年同論文賞受賞。計測自動制御学会およびIEEEの会員。

多 田 泰 之 (正員) 昭和56年3月埼玉県立川越工業高等学校電気科卒業。同年4月東京電力(株)入社。63年東電学園大学部卒業。平成元年4月より, 同社電力技術研究所系統技術グループで, 電力系統の研究, 解析業務に従事。この間, 平成元年4月より1年間東京大学工学部電気工学科受託研究員。平成8年電気学会論文賞受賞。IEEE会員。

三ツ間 均 (正員) 昭和55年3月東京電機大学電気工学科卒業。同年4月東京電力(株)入社。現在, 同社電力技術研究所系統技術グループ主管研究員。主として電力系統の解析および制御に関する研究に従事。