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

道　上　　勉*

The Development of New Adaptive PSS System for Automatic parametric Modeling Techniques of Power System Oscillation Waveforms

Tsutomu Michigami

In Japan,since the development of large power system,there have been spontaneouse low-frequency oscillation and local mode oscillation. The conventional PSS has been applied to generators in trank power system as a measure to improve the damping power oscillation. However,it is difficult for this PSS to improve the damping power system oscillation because of the hardware and the design of fixed PSS control constants.It has therefore become necessary to develop a new adaptive PSS system. This paper explains the development of new adaptive PSS system and the simulation of low-frequency and local mode oscillation for this new PSS system.

1．まえがき

現在の電力系統は大容量送電系統、大規模揚水系統、大規模ケーブル系統の出現ならびに大容量長距離の連系系統で構成され、大規模高密度で複雑化してきている。このような電力系統の系統動揺モードには、単一系統内でのローカル動揺、連系系統間又は多重ループ系統のルート事故などの長周期動揺など種々の動揺モードが存在し、しかも、送電電力の増加や動揺周期の長周期化につれてダンピングが低下する傾向にある。これらの電力動揺を抑制する系統制御面の抑制策として発電機に複数入力形（ΔP形+Δω（Δｆ）形）ＰＳＳを設置する方法が一般に適用されている。しかしながら、これらの従来形ＰＳＳはある動揺モードの抑制に焦点を当て制御定数を固定設定する方式が取られ、対象とする動揺周期の近傍領域ではロバスト性を有しているものの抑制動揺モードが複数あったり動揺周期が大幅に変化する場合は十分な抑制効果が期待できないと言える。この解決策として電力系統で事故などの外乱が発生した場合の発電機動揺波形などをオンラインで自動検出し、それに基づきＰＳＳ設計を行う適応形ＰＳＳが有効であると考える。これまでの適応形ＰＳＳは適応制御の手法を用いて制御対象を時々刻々同定したり、物理的な意味合いを持たせた動揺周波数や励磁系の位相遅れを同定し、制御定数を設定する方式などが提案されている。これらの方式は想定したモデルのパラメータ

* 電気工学科

を最小二乗法やprony 解析法などの手法で同定するものであるが、パラメータの物理的意味が理解しにくいものや同定に長い時間（５秒程度）を要するのがその実態であると考える。

そこで著者らは電力系統で事故などの外乱が発生した場合、物理的意味が明確な発電機出力の動揺波形を系統制御面で許される短時間のオンラインで自動検出し、その動揺特性に基づきＰＳＳ設計を行う適応形ＰＳＳの開発研究を行ってきた。本稿は懸案であった電力動揺波形を短時間で自動検出しその動揺特性（固有値など）を得る多項式近似と特性方程式変換を組み合せた方法を新たに確立したことから今までの研究成果を加えこれらを集大成した適応形ＰＳＳシステムを構築したので報告する。

２．適応形ＰＳＳのシステム構成

電力系統の事故時に発電機の動揺を自動検出し、その動揺特性に基づきＰＳＳ制御を行ない発電機の安定度を維持させる適応形ＰＳＳのシステム機能としては発電機の動揺波形を自動検出し、ＰＳＳを設計・制御するまでの時間は極力、短いことが要求される。一方、長周期動揺を検出するには所要の時間が掛かるので、この双方を考慮し、システムとしては動揺波形の半波でモデリングが可能な検出手法を採用することとした。その適応形ＰＳＳのシステム構成は図１に示すとおり、①の発電機動揺波形の自動検出部、②の動揺モードを実現する系統モデル部、③の固有値法による適応形ＰＳＳの設計部、④の適応形ＰＳＳの検証解析部の４つで構成される。システム構成の各部の具体的機能については３章以降で述べる。

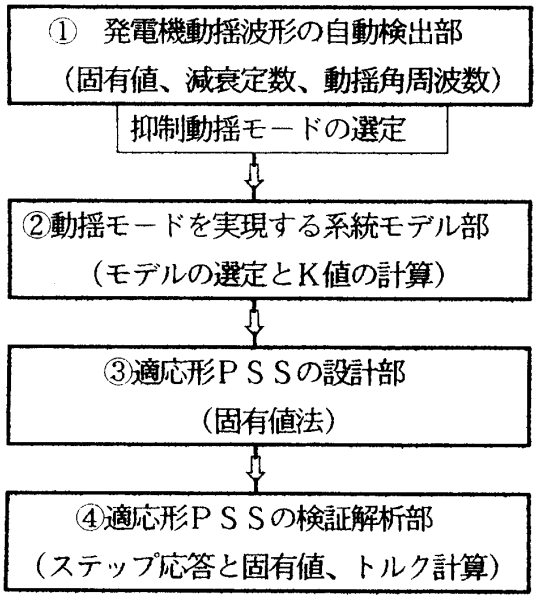


図１　適応形ＰＳＳのシステム構成

Fig. 1. System structure of new adaptivePSS

３．電力系統の動揺波形の自動検出方式

電力系統で発生した動揺波形を自動検出し、その固有値を制御面から許される短時間で精度よく実現するモデリング手法として多項式近似とSteiglitz-McBride 反復法[1] による特性方程式変換を組み合せた方法を確立したので述べる。

<3.1>モデリング手法と手順　**<1>モデリング手法の考え方；**電力系統で発生した時間領域の電力動揺モードを制御面で許される短時間で時間変数の多項式に近似し、それをラプラス変換し零極形特性方程式に変換した後、Steiglitz-McBride 反復法で分数形に変換し、適応形ＰＳＳ設計に必要な動揺モードの固有値、減衰定数、動揺角周波数を求める。

<2>モデリングの手順；モデリングの具体的手順は図２に示すとおりで

(1) 電力系統で発生した時間領域の短時間(2秒程度）の動揺波形を多項式近似法により時間関数の多項式に近似し、原波形に一致するようパラメータを設定する（図２①）。パラメータとしては時間波形のサンプリング間隔、多項式次数があり精度よい近似には、この最適設定が必要となる。

(2) 近似多項式をラプラス変換し、零極形特性方程式を作り、その特性方程式の時間領域応答が精度良く、原波形に一致することを確認する（図２②）。

(3) Steiglitz-McBride反復法で零極形特性方程式を分数形に変換するとともに、かつ、その分数形

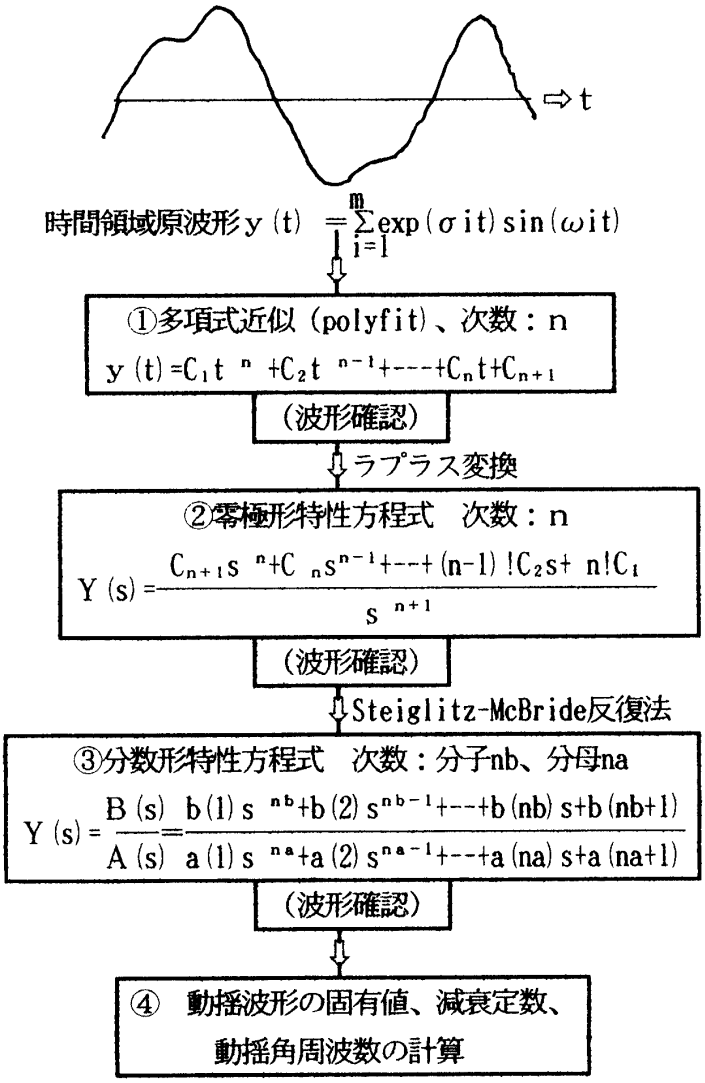


図2　動揺波形を実現するモデリング手順

Fig. 2. Procedure of waveform modeling

特性方程式の時間領域応答が精度良く、原波形に一致するよう総合的にパラメータを設定する（図2③）。

この際の総合的なパラメータとしては波形のサンプリング間隔、多項式次数及び分数形特性方程式次数があり零極形特性方程式を分数形とするためにはこのパラメータの最適設定が必要となる。特に、Steiglitz-McBride反復法の特性方程式の次数設定が不適切であると分数形特性方程式に変換できないので注意を要する。

(4) (3)で波形の同定が終了すれば分数形特性方程式の極より固有値、減衰定数、動揺角周波数を求める（図2④）。

前記により時間領域の動揺モードの固有値、減衰定数、動揺角周波数が得られ適応形ＰＳＳの設計に反映できる。

<3.2> 動揺波形のモデリング結果

前節のモデング手法による動揺波形の実証結果について述べる。

<1>解析条件；(1) 原波形；

a. Case-1 2 モードの動揺波形

$y(t)=\exp(-0.5*t)\sin(2\pi t/2)$
$+\exp(-1.0*t)\sin(2\pi t/1)$

b. Case-2 3 モードの動揺波形

$y(t)=\exp(-0.5*t)\sin(2\pi t/2)+\exp(-1.0*t)\sin(2\pi t/1)+\exp(0.5*t)\sin(2\pi t/4)$

(2) サンプル時間；2秒間（この時間設定は長周期動揺検出に時間を要し、これを短縮するため半波の時間でモデリングを可能とし、かつ我が国の長周期動揺モードの最大周期が4秒程度から定めた）

(3) パラメータ；多項式次数、サンプリング時間間隔、分数形特性方程式次数、特性方程式変換法

<2>解析結果　(1) Case-1の2モード波形の場合；①近似多項式次数の変化；次数変化時の最終モデリングの誤差（二乗）結果が表1(a)で、最小値はn=25のときである。

②サンプリング時間間隔の変化；結果が表1(b)で、最小誤差は$\Delta t=0.05$sのときである。

③分数形特性方程式の次数変化；結果が表1(c)で、最小誤差はb(n)/a(n)=9/10のときである。

④特性方程式変換法の種類；同機能のSteiglitz-McBride法とProny法の結果が表1(d)で前者は後者の約1/3 の誤差である。

以上から2モード波形の場合のモデリング精度は多項式次数n=25、サンプル間隔$\Delta t=0.05$s 、分数形特性方程式次数b(n)/a(n)=9/10のときが最も良いことが分かる。このときの原波形とモデリング波形の時間領域波形を図3(a)に、固有値を表2に示すが、共に原波形を精度よくモデリングしている。

また、Steiglitz-McBride法とProny法では前者の方がモデリング誤差が少なく優れていた。

表1　モデリングのパラメータ変化時の解析結果（Case-1）

Table1. Analysis results to parameters change of modeling (Case-1)

(a) 多項式近似次数の変化

次数n	20	25	30
誤差（二乗）	0.52×10^{-4}	0.11×10^{-10}	0.55×10^{-8}

(b) サンプリング時間間隔の変化

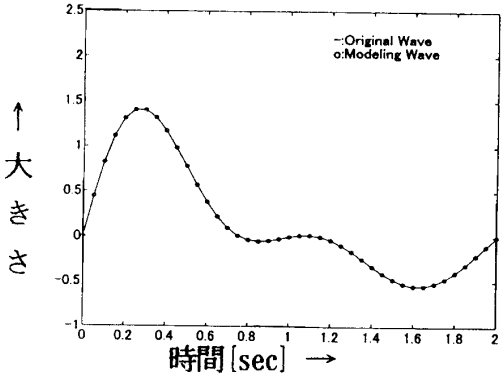
Δt	0.04	0.05	0.06
誤差	0.50×10^{-9}	0.11×10^{-10}	0.57×10^{-9}

(c) 分数形特性方程式の次数変化

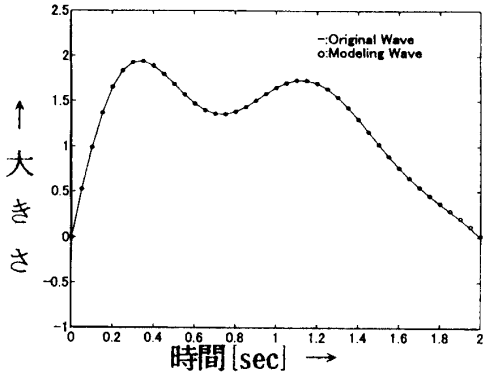
b(n)/a(n)次数	8／9	9／10	10／11
誤差	8.48×10^{3}	0.11×10^{-10}	8.48×10^{3}

(d) 特性方程式変換法の種類

変換法	Steiglitz-McBride法	Prony法
誤差	0.11×10^{-10}	0.28×10^{-10}



(a) 2モード波形の場合(Case-1)



(b) 3モード波形の場合(Case-2)

図3　原波形とモデリング波形の比較

Fig. 3. Comparison of original and modeling waveforms

表2　モデリング波形の固有値（Case-1）

Table2. Eigen values of modeling waveform (Case-1)

モデリング	-0.500±j3.142, -1.000±j6.283
原波形	-0.500±j3.142, -1.000±j6.283

(2) Case-2　3モード波形の場合；その結果が表3で、この場合の精度はモード数が1つ増えたこともあり低下するがCase-1と同様、多項式次数n=25, サンプリング時間間隔Δt=0.05s, 分数形特性方程式次数b(n)/a(n)=9/10のときが最も良い。その時の時間領域の原波形とモデリング波形を図3(b)に、また固有値を表4に示すが動揺波形の半波のサンプリング時間で原波形を精度よくモデリングしている。

表3　モデリングのパラメータ変化時の解析結果（Case-2）

Table3. Analysis results to parameters change of modeling (Case-2)

(a) 多項式近似次数の変化

次数n	20	25	30
誤差（二乗）	4.15×10^{-1}	5.59×10^{-4}	2.92×10^{-1}

(b) サンプリング時間間隔の変化

Δt	0.04	0.05	0.06
誤差	6.26×10^{-1}	5.59×10^{-4}	1.37×10^{-2}

(c) 分数形特性方程式の次数変化

b(n)/a(n)次数	8/9, 10/11	9／10
誤差	1.28×10^{2}	5.59×10^{-4}

表4　モデリング波形の固有値(Case-2)

Table4. Eigen values of modeling waveform (Case-2)

モデリング：	0.445±j1.582, -0.486±j3.180, -1.000±j6.283
原波形　：	0.500±j1.571, -0.500±j3.142, -1.000±j6.283

以上により電力系統で発生する動揺波形を半波の短時間サンプリングでモデリングする手法を確立することができた。この検出方法を適応形ＰＳＳの自動検出部に適用した上で重要なＰＳＳの抑制対

象動揺モードの選定は振動性で減衰が最も悪い動揺モードを抽出する方法を採用することとした。

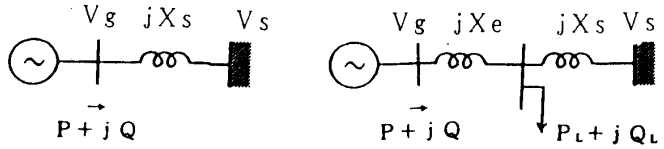
4．動揺モードを実現する系統モデル

3章で得られた抑制動揺モードを実現する系統モデルはモードの特性により異なり、それに合致する系統モデルの選択が必要となる。そこで、動揺の特性として周期に注目し、周期の短いローカル動揺モードと周期の長い長周期動揺モードの2つに分け、これを動揺モードを実現する系統モデルとしては図4(a)，(b)のような系統モデルを採用した。つまり

(1) ローカル動揺モードを実現する一機無限大母線系統

(2) 長周期動揺モードを実現する一機中間負荷系統

の各モデルを用いることとした。次に2つの系統モデルの選別方法は動揺周期Tが設定値To(1．5秒程度）より小さい場合は前者を大きい場合は後者を採用することとした。周期Tの動揺モードの実現は図4の外部リアクタンスXs の調整によりでき事例として大容量揚水発電機（東京電力今市1号機（350MW-サイリスタ励磁方式））のXs とTの関係図を図5(a)，(b) に示す。

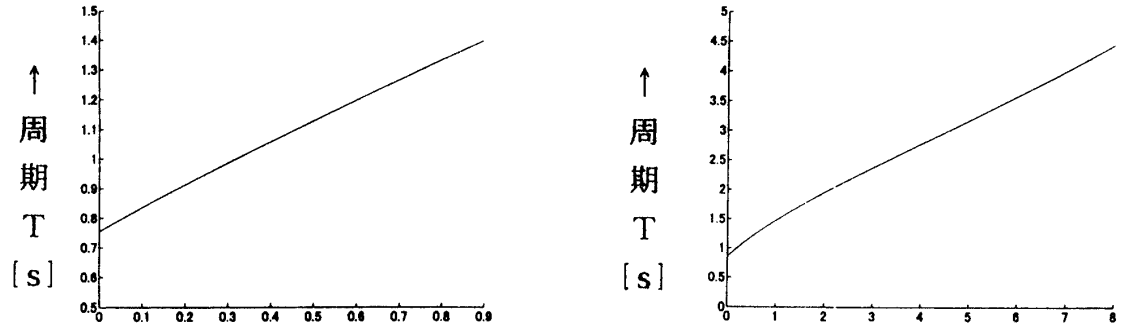


(a) ローカル動揺モード　(b) 長周期動揺モード

図4　動揺モードを実現する系統モデル

Fig. 4. System model of power system oscillation

また、この部分では選別した系統モデルと発電機定数、運転状態を使用し、DeMello-Concordia 動態ブロック図モデルのK値を計算し、最終的な系統モデルを構成する。



(a) ローカル動揺モード　(b) 長周期動揺モード

図5　動揺周期Tと外部リアクタンスXs の関係図

Fig. 5. Diagram of period T vs system reactance Xs

5．適応形ＰＳＳの設計手法と検証方法

<5.1>適応形ＰＳＳの設計手法　3,4 章で選定した対象動揺抑制モードの固有値とそれを実現する系統モデルを用い動揺モードを抑制する適応形ＰＳＳ設計の固有値法の具体的な設計手順は次の通り。

手順①：3章で検出した動揺抑制対象モードの固有値 $s=\sigma+j\omega$ から系統モデルのK値を計算する。

手順②：ＡＶＲの伝達関数をGa(s)としてＡＶＲと界磁回路の伝達関数Ge(s)の位相遅れ∠Ge は

$$Ge(\sigma+j\omega)=\frac{Ga(\sigma+j\omega)K3}{(1+(\sigma+j\omega)Tdo'K3)+Ga(\sigma+j\omega)K3K6}\cdots\cdots(1)\quad \therefore \angle Ge=\tan^{-1}(imag(Ge)/real(Ge))\ \cdots(2)$$

手順③：検出が発電機の電気出力であるから設計ＰＳＳは△Ｐ形となり、このＰＳＳでは$Ms+Do=Gm(s)$とおけば$-\Delta Te=Gm(s)\Delta\omega$の関係があるから、ＡＶＲと界磁回路の電気系ループの位相遅れ$\angle Ge$と発電機慣性系の進み位相$\angle Gm$を補償するＰＳＳの位相補償$\angle Gc$を求める。いま、ＰＳＳの位相補償関数$Gc(s)$を$sTp/(1+sTp)\ (1+sTp1)/(1+sTp2)$とすれば制動トルクは$\Delta\omega$と同位相成分であるので$\angle Ge+\angle Gc+\angle Gm=0$とすればよい。故にＰＳＳの位相補償$\angle Gc$は次式となる。

$$\angle Gc=\angle\frac{sTp}{(1+sTp)}\cdot\frac{(1+sTp1)}{(1+sTp2)}=-\angle Ge-\angle Gm \quad\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\ (3)$$

ただし、$Tp1<Tp2$

(3)式でＰＳＳの進み時定数$Tp1$を固定設定（0.05～0.2s）とすれば、求める遅れ補償回路の位相角$\angle(1+sTp2)=\phi 2$は$\phi 2=\phi e+\phi pr-\phi p+\phi 1+\phi m$である。この式で$\phi e$は(2)式で、$\phi pr$, ϕp, $\phi 1$, ϕmはそれぞれ$pr=\tan^{-1}(\omega/\sigma)$, $\phi p=\tan^{-1}(\omega Tp/(1+\sigma Tp))$, $\phi 1=\tan^{-1}(\omega Tp1/(1+\sigma Tp1))$, $\phi m=\tan^{-1}(\omega M/(\sigma M+Do))$で、求める遅れ時定数$Tp2$は$\tan\phi 2=\omega Tp2/(1+\sigma Tp2)$から次式となる。

$$Tp2=\frac{\tan\phi 2}{\omega-\sigma\tan\phi 2}=\frac{\tan(\phi e+\phi pr-\phi p+\phi 1+\phi m)}{\omega-\sigma\tan(\phi e+\phi pr-\phi p+\phi 1+\phi m)}\quad\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\ (4)$$

手順④：動揺を抑制する所要の減衰定数ζからＰＳＳのゲインKcを求める。振動系の減衰定数ζと制動トルクDeの関係はＭを単位慣性定数、ωnを動揺角周波数とすれば制御理論から次式となる。

$$De=2\zeta\omega n\ M\cdots\cdots\ (5)\qquad De=KcK2\,|Gc(s')||Ge(s')||Gm(s')|\cdots\cdots\cdots(6)$$

ただし、$\omega n=abs(s')=\sqrt{\sigma'^2+\omega'^2}$（$s'$：ＰＳＳ設置後の予想固有値）

よつて、求めるＰＳＳのゲインKcは(5)＝(6)から

$$Kc=\frac{2\zeta\omega n\ M}{KcK2\,|Gc(s')||Ge(s')||Gm(s')|}\quad\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\ (7)$$

以上が適応形ＰＳＳの設計法（固有値法）で、ＰＳＳ設計に際して減衰定数ζは0.1～0.3で選択。

<5.2>適応形ＰＳＳの検証方法　前節で設計した適応形ＰＳＳの制御定数の動揺抑制効果が所定の値となっているかをＰＳＳ有無でのステップ応答（発電機入力トルク変化）、固有値、減衰定数、動揺角周波数、制動トルク及び同期化トルクで検証する。

6．適応形ＰＳＳの動作シミュレーション

<6.1>動作解析条件　**<1>解析ケース**；Ａ．ローカル動揺モード、Ｂ．長周期動揺モード（ケースＡは系統内で発生する周期の短い動揺モードで１機無限大母線系統モデルを用いＰＳＳを設計するケースで周期を１秒に設定、ケースＢは連系系統間で発生する周期の長い動揺モードで１機中間負荷系統モデルを用いＰＳＳを設計するケースで周期を３秒に設定）

<2> 発電機・系統定数と運転状態；表５（東京電力今市１号機）、表６

<3> 供試動揺波形；表５の発電機のインパルス応答（入力トルク変化）時の発電機電気出力

<4> ＰＳＳ設計条件；減衰定数ζ=0.3、シグナルリセット定数Tp=3s、進み補償時定数$Tp1$=0.05s

表5　発電機定数と運転状態

Table 5. Parameters of generator

定数	P[MVA], M, Xd, Xd', Xq, Xd", Tdo', Tdo", Tqo"
	390, 10, 1.14, 0.25, 0.78, 0.15, 11.2, 0.10, 0.35
AVR	ゲインKa=50, 時定数Ta=0.05(一次遅れ)
運転状態	Pg=0.897[pu], Qg=0.15[pu], Vg=1.00[pu]

〔単位〕リアクタンス p.u., 慣性・時定数 s

表6　系統定数と負荷状態

Table 6. Parameters of power system

ケース	Xs	Xe	Vs	P_L	Q_L
A	0.320,	——	0.994,	—,	—
B	4.556,	0.126	0.782	0.897,	0.000

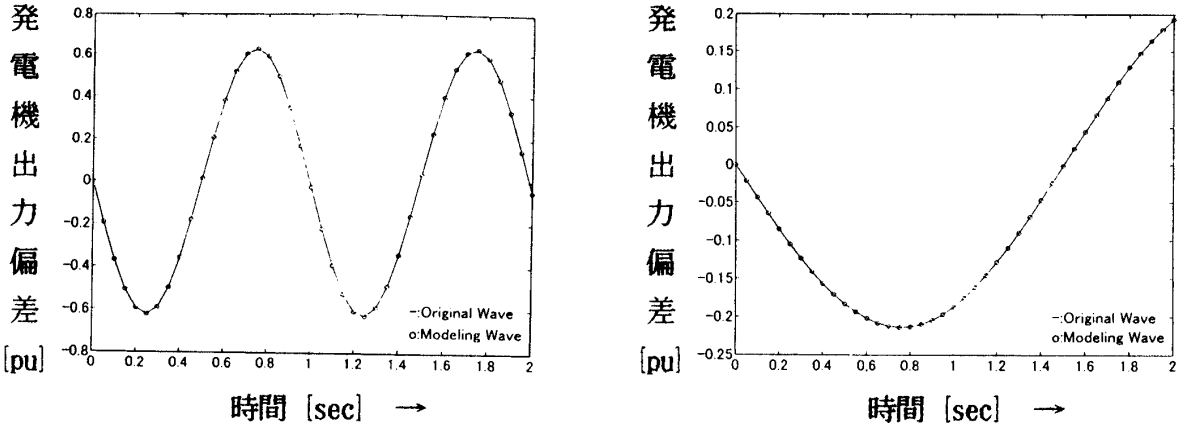
〔単位〕 p.u.

<6.2>動作シミュレーション結果　**<1> 発電機動揺波形の自動検出**；両ケースの動揺波形のモデリング結果が図6(a), (b) で、この波形の固有値、減衰定数および動揺角周波数（ωn）が表7で、動揺波形が精度良く同定されている。抑制動揺モードとしては表7で振動性で減衰が最も悪い固有値（ローカル動揺、長周期動揺とも①番）を選定する。

<2>抑制動揺モードを実現する系統モデル；表7より選定した動揺モードから動揺周期T＝2π/ωnを求めると、ケースAはT=1.00sとなりローカル動揺で一機無限大母線系統を、ケースBはT=3.01sとなり長周期動揺で一機中間負荷系統の各モデルを選別し、それぞれのK値を計算する。

<3>適応形ＰＳＳの設計；抑制動揺モードの固有値と系統モデルから設計したＰＳＳ制御定数

a. ケースA　$G(s)=\dfrac{0.514\times 3s}{1+3s}\cdot\dfrac{1+0.05s}{1+0.071s}$　b. ケースB　$G(s)=\dfrac{1.52\times 3s}{1+3s}\cdot\dfrac{1+0.05s}{1+2.35s}$ …… (8)



(a) ケースA（ローカルモードの動揺波形）　(b) ケースB（長周期モードの動揺波形）

図6　自動検出したモデリング波形

Fig. 6. Automatic parametric modeling waveforms

表7　動揺モードの特性定数

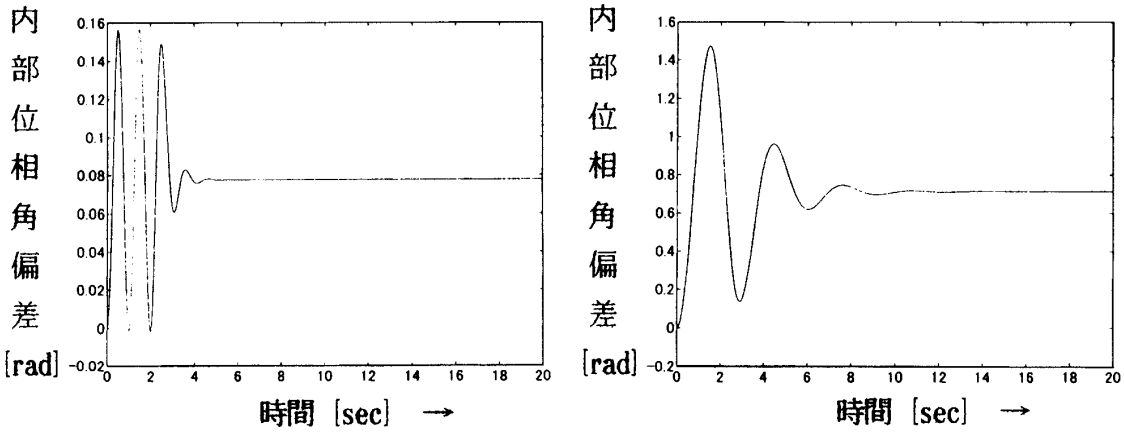
Table 7. Eigen values of modeling waveform 〔注〕＿＿抑制対象モード

ケース	固有値(σ+jω), 減衰定数ζ		ωn
A	①0.0113±j6.28	-0.0018	6.28
	②-7.60 ±j15.00	0.452	16.8
	③-12.10±j10.10	0.768	15.7
	④-14.00±j4.75	0.947	14.8
	⑤-2.78, ⑥-14.1		

ケース	固有値(σ+jω), 減衰定数ζ		ωn
B	①0.039 ±j2.09	-0.0187	2.09
	②-7.20 ±j15.2	0.429	16.8
	③-11.4 ±j10.1	0.749	15.2
	④-12.8 ±j4.50	0.944	13.6
	⑤-6.56, ⑥-12.2		

<4>適応形ＰＳＳの検証解析；適応形ＰＳＳで設計した制御定数の(8) 式を用いたステップ応答が図7(a), (b) である。同図からＰＳＳの制御開始時間はローカル動揺が検出後2.11s(波形サンプリング

2s+PSS設計時間0.11s)で、長周期動揺が2.17s となっており、その時間以降、速やかに動揺を抑制しており十分な効果が確認できる。また、そのときの動揺モードの特性定数（固有値など）と制動トルクの値が表８で、ＰＳＳによる増分の減衰定数は0.3 程度で、制動トルクも実系統で使用しているローカル動揺で30p.u.以上、長周期動揺で10p.u 程度を満たしており、妥当な設計結果といえる。



(a) ケースＡ（ローカルモードの動揺波形）　(b) ケースＢ（長周期モードの動揺波形）

図７　適応形ＰＳＳ設計後のステップ応答

Fig.7.　Step responce with new adaptive PSS design

表８　ＰＳＳ設計後の動揺モード特性定数、制動トルク

Table 8.　Eigen values and Damping torques with new adaptive PSS design

ケース	固有値($\sigma+j\omega$)	減衰定数ζ	ωn[rad/s]	制動トルク（同期化トルクTs）[p.u.]
A	-1.88±j6.00	0.299	6.29	37.7(Ts=1.033)(設計前 -0.234(Ts=1.255))
B	-0.57±j2.02	0.271	2.09	10.9(Ts=0.119)(設計前 -0.757(Ts=0.139))

７．あとがき

(1)電力系統で発生した電力動揺波形を系統制御面で許される短い時間(2秒程度）で自動検出し、モデリングする手法として多項式近似と特性方程式変換の組み合せ方式を提案し、この検出手法で２モードと３モードの時間領域波形をモデリングしたところ動揺波形の半波のサンプリング時間で精度良く同定可能な結果が得られ同手法を検証することができた。

(2)上記の自動検出機能を適応形ＰＳＳに組入みオンラインで発電機動揺を自動検出し動揺特性を求め減衰の悪い動揺モードを選定し、それを実現する系統モデルから設計を行うシステムを構築できた。

(3)構築した適応形ＰＳＳシステムを用い周期の短いローカル動揺モード(1秒)と周期の長い長周期動揺モード(3秒)の動作シミュレーションを行ったところ動揺波形の検出とＰＳＳ設計の経過時間以降、短時間に制御が開始され対象動揺モードを速やかに抑制していることが確認できた。

今後は多機系統での抑制効果の検証を行い、実系統への適用性の評価を含め進めることとしたい。

文　　献

(1) Steiglitz, K. and L. E. McBride, "A Technique for the Identification of Linear Systems", IEEE Transaction Automatic Control. Vol. AC-10(1965), Psg. 461-464.

(2)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Ｂ論文誌　Vol 120-B, No. 1 (2000), p1542-1549.

（平成12年10月18日受理）