

電力動揺の高速抑制を追求した発電機 適応形 LQG システムの構築について

道 上 勉*・寺 崎 勝**・笹 島 一 祥**

The Development of New Adaptive LQG System of Generator for High Speed Damping Control Techniques of Power System Oscillation

Tsutomu Michigami, Masaru Terasaki, Nobuyoshi Sasazima

With the advent of interconnection of large-scale electric power systems, many new dynamics power system problems have emerged, which include low-frequency intersystem oscillations and many others. To date, most major generators in trunk electric power system in Japan are equipped with supplementary excitation control, commonly referred to as the conventional single and two input PSS. However, low-frequency oscillations still occur. It is difficult for these conventional PSS to improve the additional damping of power system oscillation, because of the hardware and design of fixed PSS control constants from a one-machine infinite-bus model. It has therefore become necessary to develop a new adaptive LQG system of generator. This paper explains the development of new adaptive LQG system and the simulation of low-frequency and local mode oscillation for this new adaptive LQG system.

1. まえがき

近年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統で構成され、大規模高密度で複雑化している。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、連系統間の長周期動揺など種々の動揺モードが存在し、系統事故時の系統安定化にはこれら多様な動揺モードを抑制するロバスト制御が要求される。一方、発電機励磁系は技術の進展によりデジタル化し、高度な制御に対応可能となってきた。これらの両面を考慮し、多様な電力動揺を高速抑制するロバスト性のある系統制御策として系統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、それに基づき発電機適応制御を行う LQG (Linear Quadratic Gaussian) 設計の適応形 LQG が有効であると考えられる。従来の適応形システム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 PSS 制御定数のパラメータを最小二乗法や prony 解析法などの手法で求めている。しかし、これらは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時間 (5 秒程度) を要するので、著者らは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 (2 秒程度) にオンラインで検出する適応形 PSS の開発を行った。この適応形 PSS は動揺波形の検出機能は優れているが制御として従来形 PSS を用いており制御の安定性から設計上、制動力

* 電気電子工学科 ** 電気工学専攻大学院生

トルクの上限が減衰定数0.3程度となり、動揺抑制に時間がかかる。特に最近の系統技術課題である長周期動揺抑制を例にとれば周期3秒程度の動揺モードで約10秒かかり周期が長くなるとそれに比例した時間を要し、これ以上の抑制時間の短縮は困難となる。そこで本稿では発電機動揺を高速に抑制する方法として現代制御理論を用いたLQG設計法を採用し、長周期動揺の抑制に効果的な適応形LQGシステムを構築し、その動作シミュレーションを行い効果を検証したので報告する。

2. 適応形LQGのシステム構成

適応形LQGシステムは系統事故時の発電機動揺(ΔP又はΔωなど)を自動検出し、その動揺特性に基づき発電機の高速度抑制制御を行ない安定度向上を図るもので、このシステムの機能としては発電機動揺の検出時間とその後のLQGの設計・制御に要する時間の双方を考慮し、動揺波形の1サイクル以内のサンプリング時間でモデリングが可能な検出手法を採用した。システムの構成は図1に示す①発電機動揺波形の自動検出部、②動揺モードを実現する系統モデル部、③最適レギュレータとカルマンフィルタを組合せた発電機LQG設計部、④適応形LQGシステムの検証解析部で構成される。

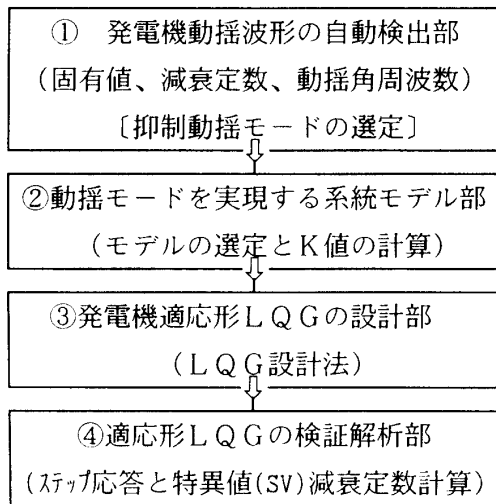


図1 適応形LQGシステムの構成
Fig.1. Structure of new adaptive LQG system

3. 発電機動揺波形の自動検出部と系統モデル作成部

この両部の機能の詳細は文献1によるが概要は次の通り。

3.1> 発電機動揺波形の自動検出部 自動検出した動揺波形のモデリング手順に次の方式を採用した。

- ①電力系統で発生した時間領域の電力動揺波形(ΔP又はΔωなど)を制御上の許容時間(2秒程度)で検出する。
- ②その検出波形を時間変数の多項式に近似する。
- ③その時間多項式をラプラス変換とSteiglitz-McBride反復法で分数形特性方程式に変換する。

④特性方程式から固有値、減衰定数、動揺角速度を得る。この際の調整パラメータには波形のサンプリング時間・間隔、多項式と分数形特性方程式の次数及び変換法があり、この適切な設定、選択が重要となる。

3.2> 動揺モードを実現する系統モデル部 前節で得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、それに合致するモデルの選択が必要となる。その特性として動揺周期に注目し、①周期の短いローカ動揺モード、2周期の長い長周期動揺モードに分け、そのモデルとして図6に示す一機無限大母線系統を前者に、中間負荷系統を後者に採用した。系統モデル1と2の選別法は動揺周期Tが設定値T。(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用いることとした。また、系統モデルでの動揺周期Tの実現は発電機の機器定数・運転状態と周期Tの高次関数で表される系統の外部リアクタンスXsからDeMello-Concordia動態ブロック図のK1~K6の値(K値)を計算して行う方法とした。

4. 適応形LQGの設計法と検証手法

4.1> 適応形LQGの設計法 抑制対象の動揺モードを高速抑制し、安定化させる制御設計法は3.2で構成した系統モデルを用い、最適レギュレータとカルマンフィルタを組合せた線形2次ガウス法(LQG法)で行う。この際の状態・観測方程式は次式で表される。

$$\dot{x} = Ax + Bu + Gw \quad \dots\dots(1) \quad y_v = Cx + Du + Hw + v \quad \dots\dots\dots(2)$$

ただし、 x :状態変数, y :出力量, $w \cdot v$:白色ノイズ, u : 操作量, A, B, C, D, G, H : 状態空間マトリクス

このLQG法の設計手順は以下の通り。手順①最初に最適レギュレータの設計を行うが、その方法は次の重み付き出力 y をもつ2次評価関数 $J(u)$ を最小化する全状態フィードバック $u = -Kx$ の最適ゲイン K を求める。ただし、次式において Q は非負定、 R は正定な重み対称マトリクスである。

$$J(u) = \int_0^{\infty} \{y^T Q y + u^T R u\} dt \dots\dots\dots(3)$$

上記の最適ゲイン K は状態変数 x のフィードバック誤差の共分散を最小にする代数リカッチ方程式を解き求める。

手順② 最適レギュレータは状態変数 x のフィードバックで、そのまま使用できないのでカルマンフィルタゲイン L を用いて入力 u と出力 y_v から状態変数 x を推定する。

$$\dot{\hat{x}} = A \hat{x} + B u + L(y_v - C \hat{x} - D u) \dots\dots\dots(4)$$

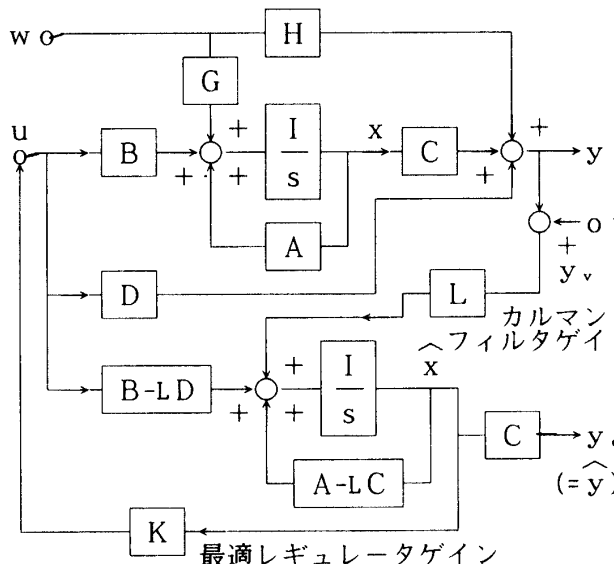


図2 LQG制御の状態変数線図

ここで、フィルタゲイン L はノイズの共分散 Q_n, R_n を与え、状態変数偏差 $(x - \hat{x})$ の共分散を最小にする代数リカッチ方程式を解き求める。

手順③最終的に求めるLQGの出力フィードバック制御は最適レギュレータゲイン K とカルマンフィルタゲイン L を組合せて得られ、その状態変数線図が図2である。同図で y が真の出力量、 y_v がフィルタの推定出力量となる。上記の2つを組合せた最終的な出力フィードバック制御関数 $F(s)$ と状態・制御方程式は次式となる。

$$F(s) = K[sI - (A - LC - (B - LD)K)]^{-1} L \dots\dots(5)$$

$$\dot{\hat{x}} = [A - LC - (B - LD)K] \hat{x} + L y_v \dots\dots(6)$$

$$u = -F(s) y_v \dots\dots\dots(7)$$

Fig.2. State-space block diagram of LQG control <4.2>適応形LQGの方式 LQG制御には表1に示す励磁制御とガバナ制御が、検出信号には

$\Delta P, \Delta \omega(\Delta f), \Delta V(\Delta \delta)$ 及びこれらの組合せがある。本稿では従来形PSSで使用実績がある ΔP と $\Delta \omega$ 検出の励磁制御を取上げLQG設計を行いその特性により適用方式を特定する。

表1 適応形LQGの方式

Table 1. Types of adaptive LQG system

励磁制御	検出 $\Delta P, \Delta \omega(\Delta f), \Delta P + \omega(\Delta f)$
ガバナ制御	検出 $\Delta \omega, \Delta V(\Delta \delta), \Delta \omega + \Delta V(\Delta \delta)$

<4.3>適応形LQGの検証手法 設計制御定数の検証は次の制御器リミットを含む非線形の総合動的解析、動揺周波数変化に対するロバスト性及び線形領域の定量的解析の手法で行うこととした。

- (1)ステップ応答(発電機入力トルク変化)
- (2)特異値(SV:Singular Value)の周波数応答図
- (3)定量的評価:固有値、減衰定数 ζ 、固有角速度 ω_n など

現代制御理論で設計した制御系のロバスト性評価として特異値(SV)の周波数応答図などが国内外で多く使用されている。この方法は動揺角速度 ω の変化に対して系の特異値が小さく、フラットな特性を有するときロバスト性があると評価する方法である。この特異値は従来のゲインと位相角による

方法で系の安定性を正確に評価できない場合も的確に評価する特性を有している。なお、特異値の定義は制御系の伝達関数 $G(j\omega)$ の共役転置が $G(j\omega)^*$ のとき $G(j\omega)^* \times G(j\omega)$ の固有値の平方根で表される。また、動揺波形の減衰度 σ と系の固有振動を示す減衰定数 ζ 、固有角速度 ω_n と固有値 $s = \sigma + j\omega$ には次の関係がある。

$$\zeta = -\frac{\sigma}{\sqrt{\sigma^2 + \omega^2}} \dots\dots\dots(9) \quad \omega_n = \sqrt{\sigma^2 + \omega^2} \dots\dots\dots(10)$$

5. 適応形 LQG の設計例 <5.1>設計条件 (1)設計ケース A : ローカル動揺(周期 1 秒)、B : 長周期動揺 (周期 3、5 秒) (2) 発電機定数と運転状態 ; 表 2 (大容量揚水式水力機) (3) LQG の方式 ; ① ΔP 形検出、② $\Delta\omega$ 形検出の励磁制御とし、その LQG 制御を含めた発電機動態ブロック図例 ($\Delta\omega$ 形検出) を図 3 に示す。同図で LQG リミットは ± 0.2 p.u.、 T_o は LQG の制御開始時間 ($T_o = 2.1$ s (波形サンプリング 2s + 設計時間 0.1s) 設定) であり、LQG と AVR の制御関数は汎用性を考慮し、高次の入力が可能としてある。

表 2 発電機定数と運転状態

Table 2. Parameters of generator

P[MVA], M, $X_d, X_d', X_q, X_d'', T_{do}', T_{do}'', T_{qo}''$	
390, 10, 1.14, 0.25, 0.78, 0.15, 11.2, 0.10, 0.35	
AVR	ゲイン $K_a=50$, 時定数 $T_a=0.05$, リミット $+7.5, -5$
運転状態	$P_g=0.897$ [pu], $Q_g=0.00$ [pu], $V_g=1.00$ [pu]
〔単位〕リアクタンス・リミット:p.u., 慣性・時定数:s	

表 3 LQG の制御パラメータ変化

Table 3. Weighting parameters of LQG control

種類	T [s]	ΔP 形検出	$\Delta\omega$ 形検出
		R(Rn), Q(Qn)	R(Rn), Q(Qn)
重み	1	0.4~0.6, 1	0.0001~0.0003, 1
共分散	3	0.2~1.0, 1	0.002~0.004, 1
	5	0.5~2.0, 1	0.005~0.007, 1

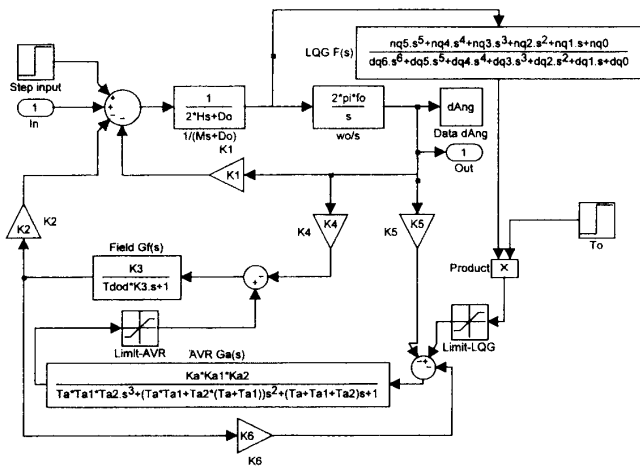
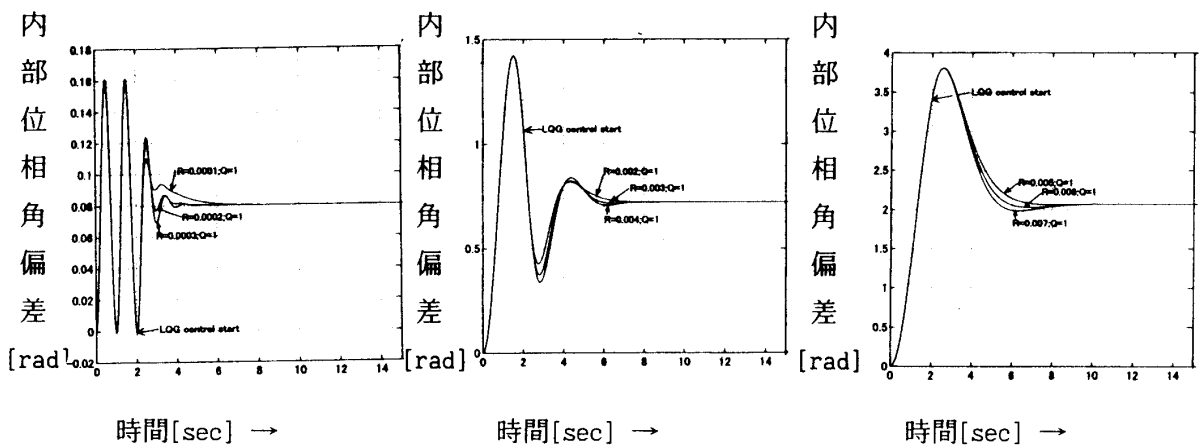


図 3 LQG 制御を含めた発電機動態ブロック図

Fig.3. Generator block diagram with adaptive LQG



(a) ケース A (ローカルモード) (b) ケース B (長周期モード $T=3$ s) (c) ケース B ($T=5$ s)

図 4 最適レギュレータの重み変化時のステップ応答 ($\Delta\omega$ 形検出)

Fig.4. Step response of optimal state-feedback for weighting parameters

(4) LQGの制御パラメータ(重みと共分散)変化;表3((3)式でQ(Qn)とR(Rn)は相対的重みのため片方(Q)を固定)

<5.2>設計結果;<1>重みと共分散の選定 表3の重みを適用したときの最適レギュレータの発電機入力トルク変化ステップ応答例($\Delta\omega$ 形検出, 図3のStep inputを入力)が図4(a)~(c)である。同図から制御性能が最も良好な重みRは周期1で0.0002、3sで0.003、5sで0.006となる。 ΔP 形検出も同じ方法で求め両方式の制御特性(固有値は抑制対象のメカニカルモードのみ抽出)をまとめたのが表4である。同表からローカル動揺抑制には ΔP 形が、長周期動揺抑制には $\Delta\omega$ 形が優れた制御特性を有し、検出方式を選定する指針となる。また、カルマンフィルタの共分散と動揺周期を変化した時の制御特性例($\Delta\omega$ 形検出、固有値の扱いは表4と同じ)が表5である。状態変数の推定が良好な共分散は各周期とも最適レギュレータのみの固有値とカルマンフィルタを組合せた固有値が一致する $Q_n=Q$ 、 $R_n=R$ が最適な値となる。なお、 ΔP 形検出も同様な結果であり、それにより共分散を定めた。

表4 最適レギュレータの最適重みと制御特性

Table 4. Optimal weighting parameters of state-feedback

検出方式	周期 [s]	重み		固有値	減衰定数 ζ [pu]	動揺角速度 ω_n [rad/s]
		R	Q			
$\Delta\omega$ 形	1	0.0002	1	-3.21 ± j7.08	0.413	7.77
	3	0.003	1	-1.72 ± j1.47	0.759	2.26
	5	0.006	1	-1.23 ± j0.39	0.954	1.29
ΔP 形	1	0.5	1	-4.68 ± j2.74	0.862	5.42
	3	0.5	1	-0.73 ± j1.07	0.564	1.29
	5	1.0	1	-0.45 ± j0.75	0.511	0.87

表5 カルマンフィルタの共分散、周期変化時の制御特性

Table 5. Characteristic values of Kalman estimator

検出方式	周期 [s]	共分散		固有値	減衰定数 ζ [pu]	動揺角速度 ω_n [rad/s]
		R_n	Q_n			
$\Delta\omega$ 形	1	0.0001	1	-3.21 ± j7.08	0.413	7.77
				-4.18 ± j7.73	0.476	8.79
				-3.21 ± j7.08	0.413	7.77
	3	0.002	1	-3.21 ± j7.08	0.413	7.77
				-3.21 ± j7.08	0.413	7.77
				-2.71 ± j6.82	0.369	7.33
	3	0.003	1	-1.72 ± j1.47	0.759	2.26
				-2.49 ± j3.30	0.991	2.52
				-1.72 ± j1.47	0.759	2.26
	3	0.004	1	-1.72 ± j1.47	0.759	2.26
				-1.72 ± j1.47	0.759	2.26
				-1.42 ± j1.69	0.645	2.21
	5	0.005	1	-1.23 ± j0.39	0.954	1.29
				-1.23 ± j0.39	0.954	1.29
				-1.81 ± j0.39	1.00	1.81
5	0.006	1	-1.23 ± j0.39	0.954	1.29	
			-1.23 ± j0.39	0.954	1.29	
			-1.23 ± j0.39	0.954	1.29	
5	0.007	1	-1.23 ± j0.39	0.954	1.29	
			-1.23 ± j0.39	0.954	1.29	
			-1.13 ± j0.61	0.878	1.29	

[注] 最適レギュレータの重みQ、Rは表4を使用

表6 カルマンフィルタの推定誤差分散($\Delta\omega$ 形検出)

Table 6. Error covariance of Kalman estimator

入力周期[s]	1	3	5
真の誤差	2.00×10^{-4}	3.00×10^{-4}	6.01×10^{-4}
推定誤差分散	4.98×10^{-6}	2.66×10^{-5}	4.19×10^{-5}

<2>カルマンフィルタの推定精度 前節で求めた重みと分散を用いてカルマンフィルタの状態変数の推定精度を観るため入力uとして正弦波、ノイズw、vとして平均値零の白色ノイズを与えたときの真の出力yと推定出力y。の時系列解析を行なった。この解析の真の誤差分散と推定誤差分散が表6で同表から真の出力yと推定出力y。は良く符合しており推定の精度が良好であることが確認できる。

<5.3>適用するLQG方式 5.2節の検出方式の特性を踏まえ初期の制御方式は頻度の多いローカル動揺抑制の ΔP 形LQGを適用する。また、長周期動揺の抑制にはその動揺がローカル動揺面で厳しい系統条件下で発生することも考慮し、 ΔP 形定数を使用状態での $\Delta\omega$ 形LQGを適用する。この適用方式により長周期動揺抑制後のローカル動揺でのロバスト性が確保できハンチングを防止できる。

以上により電力動揺波形を自動検出するモデリング手法を用い電力系統事故時の発電機動揺波形の動揺特性をオンラインで求め減衰の悪い動揺モードを選定し、その系統モデルを構成してLQGを設計し、高速で動揺抑制する適応形LQGシステムを構築できた。

6. 適応形LQGシステムの動作シミュレーション

<6.1>解析条件 (1)解析ケース；Aローカル動揺モード(周期1秒)、B長周期動揺モード(周期3、5秒) (2)発電機定数と運転状態；表2(大容量揚水式水力機) (3)波形自動検出条件；サンプリング時間2秒、サンプリング間隔時間0.05秒、多項式次数25、分数形特性方程式次数分子9・分母10、変換法：Steiglitz-McBride 反復法 (4)供試動揺波形；表2の発電機のステップ応答(入力トルク変化($T=1, 3, 5s$ で0.1, 0.02, 0.01, pu))時の発電機出力 (5)LQG方式と重み；5.3節の検出方式を採用。レギュレータの重みRは $T=1, 3, 5s$ それぞれ0.5, 0.0007, 0.002(3, 5sは ΔP 形関数含で見直し)フィルタの共分散は $R_n=R, Q=Q_n=1$ (6)従来形PSS定数；比較するPSS定数($T=3(5)s$)は次の通り。

$$\text{従来形PSS制御関数 } G(s) = \frac{5.80(3.78) \times 5s(1+0.385(0.275)s)}{(1+5s)(1+0.20s)}, \text{リミッタ} \pm 0.20\text{pu}$$

<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；両ケースの検出波形のモデリング結果が図6(a), (b)で、原波形とモデリング波形が精度良く同定されている。また、この検出波形の固有値、減衰定数および動揺角周波数が表8である。系統モデル構成に反映する抑制動揺モードは表8で減衰が最も悪い振動性の固有値(ローカル動揺、長周期動揺とも①番)を選定する。

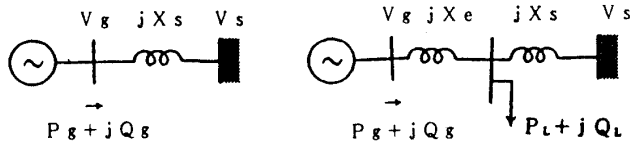
<2>抑制動揺モードを実現する系統モデル；表8より選定した動揺モードから動揺周期 $T(=2\pi/\omega_n)$ を求めるとケースAは $T=1.00s$ 、ケースBは $T=3.00s, 5.02s$ となり前者は図5(a)の一機無限大母線系統を、後者は同図(b)の中間負荷系統モデルを選別し、それぞれ表7の定数でモデルを構成する。

<3>LQGの設計；上記の系統モデルを用いて設計した最適ギュータゲインK, カルマンフィルタゲインL及びLQG制御関数 $F(s)$ の結果は表9の通り。

<6.3>適応形LQGの検証 設計した表9の出力フィードバック制御関数 $F(s)$ を用いたステップ応答が図7(a)~(c)で、従来形PSSの長周期動揺モード($T=3, 5s$)の応答が図8である。このときの動揺モードの特性定数(線形設計値)が表10, LQGの特異値(SV)の周波数応答図が図10である。LQGと従来形PSSの抑制時間を観ると図7(b), 図8より両方式とも制御開始は動揺検出後 $T_0=2.10s$ であるがLQGは6秒以内の短時間の動揺抑制に対し、従来形PSSは10秒程度を要している。また表10よりLQGの減衰定数は周期3sで0.583, 周期5sで0.644 に対し従来形PSSでは周期3sで0.310, 周期5sで0.366 となっており、これらから長周期動揺でのLQGの優位性が確認できる。次に、図9より動揺周波数変化(ω)に対し ΔP 形と $\Delta \omega$ 形LQG使用時の特異値(SV)の大きさは各周期とも異なるが平坦な山形の特性であり制御定数のロバスト性を確認できる。一方、適応形の必要性を観るため各動揺断面で設計したLQG制御関数を固定し、他の動揺モードで運用した減衰定数が表11である。同表よりローカル動揺断面(A)で設計したLQG定数は長周期動揺($T=3s, 5s$)で不安定となり適応形が不可欠となる。また、長周期動揺断面の設計値は他の長周期動揺領域で減衰定数が1/3以下に低下するのに対し、ローカル動揺では5割以上と従来形PSS並みの制動力を保持している。これはLQG設計がローカル動揺の ΔP 形設計定数を含んだ状態で行れるロバスト効果と考えられ、5.3節のLQG適用方式の妥当性を示唆している。

表7 系統定数と負荷状態
Table7. Parameters of power system [単位]p.u.

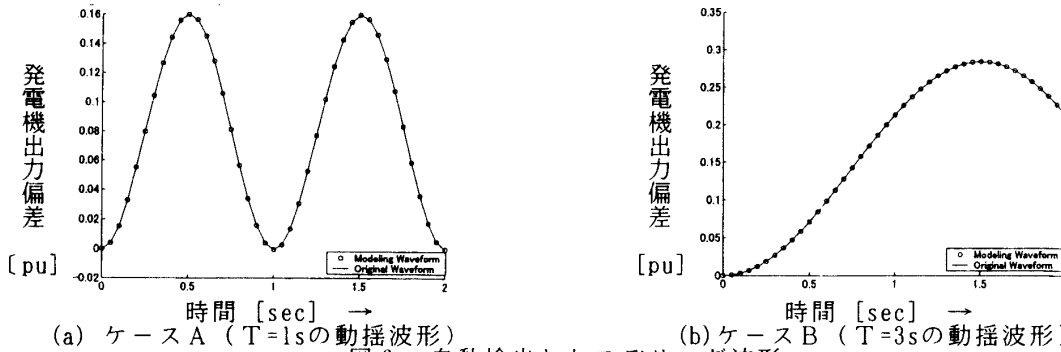
ケース	X_s	X_e	V_s	P_L	Q_L
A ローカル動揺	0.346	—	1.047	—	—
B 長周期 動揺	3 s	2.945, 0.250	0.994, 0.897, 0.204		
	5 s	12.09, 0.250	1.016, 0.897, 0.204		



(a) ローカル動揺 (b) 長周期動揺
図5 動揺モードを実現するシステムモデル
Fig.5. System model of power system oscillation

表8 検出動揺モードの特性定数
Table8. Eigenvalues of modeling waveforms

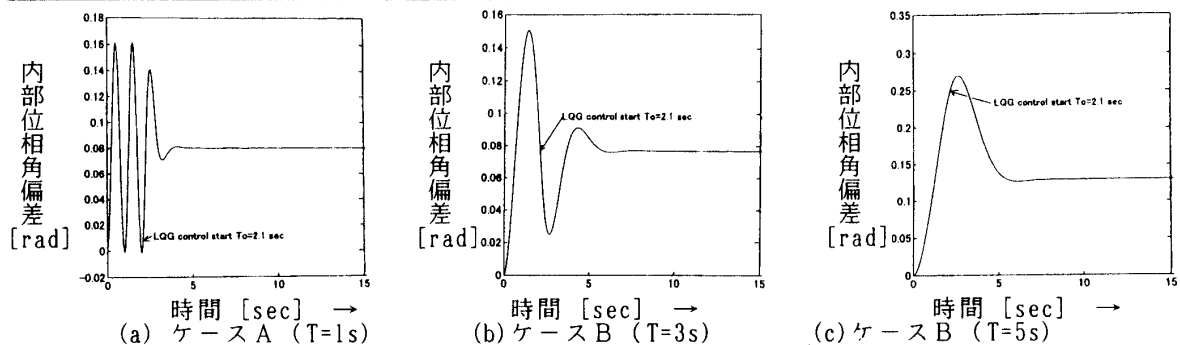
ケース	T	固有値 ($\sigma + j\omega$)	ζ	ω_n
A	1s	① $-0.0007 \pm j6.26$	0.0001	6.26
		② $-7.80 \pm j12.84$	0.519	15.0
		③ $-11.6 \pm j7.72$	0.832	13.9
		④ $-12.6 \pm j2.53$	0.980	12.9
		⑤ -0.000 , ⑥ -1.10		
B	3s	① $-0.0171 \pm j2.09$	0.0081	2.09
		② $-7.07 \pm j13.11$	0.409	17.0
		③ $-10.5 \pm j7.824$	0.739	15.0
		④ $-10.8 \pm j2.63$	0.942	13.8
		⑤ -0.00 , ⑥ -6.11		
B	5s	① $-0.0711 \pm j1.25$	0.0572	1.25
		② $-7.05 \pm j13.14$	0.407	17.0
		③ $-10.5 \pm j7.824$	0.761	16.0
		④ $-10.7 \pm j2.61$	0.945	14.9
		⑤ -0.00 , ⑥ -5.95		



(a) ケース A (T=1sの動揺波形) (b) ケース B (T=3s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9 適応形LQGのK, L及びF(s)の設計結果
Table9. Design results of K, L and F(s) of adaptive LQG

ケース	方式	K	L	LQG制御関数 F(s)
A	1s ΔP 形 検出	0.175, -0.429	-1.455 0.002	$12.1s^3 + 252.9s^2 + 627.2s + 127.4$
		548.5, 7.396	-0.019 0.227	$\frac{s^4 + 35.02s^3 + 495.2s^2 + 1473s + 1859}{s^4 + 61s^3 + 1634s^2 + 2.5e04s + 2.4e05s + 1.2e06s^2 + 2.9e06s^2 + 3.7e06s + 1.3e06}$
B	3s $\Delta \omega$ 形 検出	-3.426, 1.44	29.13, -0.753	$\frac{119s^7 + 6499s^6 + 1.5e05s^5 + 1.9e06s^4 + 1.3e07s^3 + 3.0e07s^2 + 1.9e07s - 1.7e07}{s^7 + 61s^6 + 1634s^5 + 2.5e04s^4 + 2.4e05s^3 + 1.2e06s^2 + 2.9e06s^2 + 3.7e06s + 1.3e06}$
		33.358, 17.24	0.000, 0.019	
B	5s ΔP 形 関数含	2.913, -36.0	1.669, 0.032	
		0.063, -391.	-287.8, 0.010	$\frac{54.8s^7 + 3025s^6 + 7.1e04s^5 + 9.3e05s^4 + 6.7e06s^3 + 1.7e07s^2 + 1.2e07s - 3.1e06}{s^7 + 59s^6 + 1535s^5 + 2.3e04s^4 + 2.0e05s^3 + 9.1e05s^2 + 2.0e06s^2 + 2.0e06s + 4.3e05}$
B	5s ΔP 形 関数含	-2.175, 0.85	20.70, -0.285	
		7.749, 5.34	0.000, 0.000	
B	5s ΔP 形 関数含	2.070, -118.	0.762, 0.013	
		0.044, -495.	-128.9, 0.008	



(a) ケース A (T=1s) (b) ケース B (T=3s) (c) ケース B (T=5s)

図7 適応形LQG制御のステップ応答
Fig.7. Step response with adaptive LQG

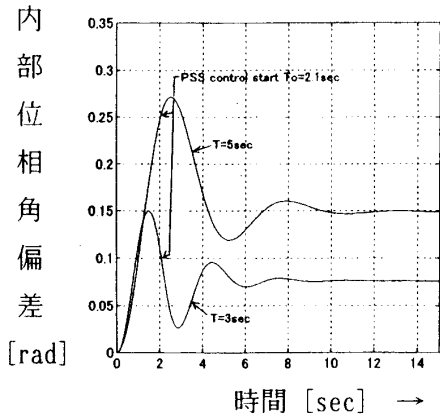


図8 従来形PSSのステップ応答(T=3, 5s)

Fig. 8. Step response with conventional PSS

特異値 (SV) [db]

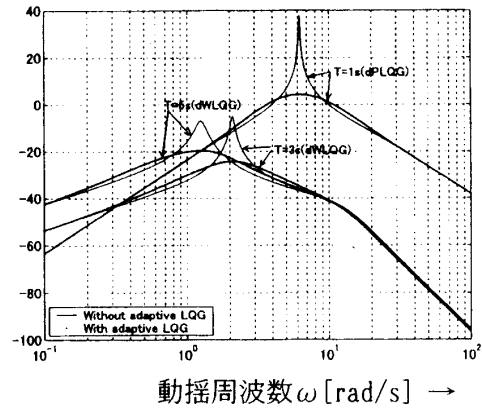


図9 適応形LQGの周波数応答図

Fig. 9. Frequency response bode plots of adaptive LQG

表10 LQG設計後の動揺モードの特性定数

Table 10. Characteristic values with adaptive LQG design

ケース	適応形LQG		従来形PSS (ΔP)	
	ζ [pu]	固有値	ζ [pu]	固有値
A	1s	0.862, -4.68 ± j2.74	0.301, -1.88 ± j5.96	
B ΔP 形 関数含	3s	0.583, -1.26 ± j1.76	0.310, -0.65 ± j1.99	
	5s	0.644, -1.09 ± j1.29	0.366, -0.46 ± j1.17	

表11 LQG関数固定時の減衰定数

Table 11. Damping factor with non-adaptive LQG

設計断面	周期1s, 周期3s, 周期5s		
	1s	3s	5s
A	0.862, -0.073, -0.072		
B ΔP 形 関数含	3s	0.304, 0.583, 0.195	
	5s	0.374, 0.193, 0.644	

7. あとがき

(1) 電力動揺波形を自動検出するモデリング手法を用いて電力系統事故時の発電機動揺波形を検出して動揺特性をオンラインで求め、減衰の悪い抑制対象の動揺モードを選定する。次にその動揺モードを実現するシステムモデルを構成し、それを用いてLQG設計して高速で動揺を抑制する制御性能が優れた適応形LQGシステムを構築できた。

(2) 適応形LQGシステムの設計部に最適レギュレータとカルマンフィルタを組合せたLQG法を採用した。前者の重みは検出方式と動揺周期により最適な値があり、後者の共分散は前者の重みと同一の値とすることにより、高精度の状態変数の推定と良好な制御性能が得られた。また、LQGの検出方式は制御特性からローカル動揺抑制に ΔP 形が、長周期動揺抑制に $\Delta \omega$ 形が有利であることを確認でき、この特性を踏まえた方式を適用することとした。

(3) 構築した適応形LQGシステムを用いローカル動揺モード(1秒)と長周期動揺モード(3秒と5秒)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LQG設計の所要時間以降、制御が開始され対象動揺モードを高速に抑制することが確認できた。また、長周期動揺抑制面の従来形PSSに対するLQGの優位性、並びに動揺モードに応じLQG制御定数を適応化させる必要性も確認できた。以上により電力動揺を高速抑制する適応形LQGシステムを達成することができ、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こととしたい。

文 献

(1) 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, No12(2000), p1542-1549

(平成13年10月24日受理)