

SVC を用いた電力系統の最適安定化制御

日高良和* 宮内真人**

Optimal Stabilization of Electric Power Systems Using A Static Var Compensator

Yoshikazu HITAKA* Makoto MIYAUCHI**

Abstract :

Static reactive-power (Var) compensators (SVCs) are finding wider use in both industrial and transmission system applications. In higher power industrial applications, static reactive-power compensators are a well established means of reactive-power control, especially for the reduction of voltage fluctuations caused by arc furnace loads. These systems are being applied to transmission systems to provide voltage regulation, reactive-power support, improved damping and an increase in system stability. This paper presents simulation results of a typical power system with a static reactive-power compensator of the thyristor-controlled reactor type. This static reactive-power compensator has linear optimal controller for the system stability. When the principle of linear optimal control is first applied to a power system, the main difficulty in design is the selection of the weighting matrices. This paper, therefore, presents the weighting matrices are decided automatically by an eigenvalue sensitivity.

Keywords : static var compensator, power system, linear optimal control

1. まえがき

わが国では、最近の電力需要増加や、社会の高度情報化にともない電力の安定供給に対する要望がますます増大してきた。電力の安定供給には、電力需要に見合った容量の発電設備の所有がもっと有効であるが発電設備立地の困難な情勢から、その実現化は難しい。そこで、現有の電力設備にうまく付加して電力の安定供給を行うための補助設備が必要となってきた。今回は、この補助設備として電力系統の動揺抑制や系統電圧安定維持などに効果がある静止形無効電力補償装置（SVC : Static Var Compensator）を考える¹⁾。SVCは、逆並列接続されたサイリスタ回路を有したリアクトルと固定または、スイッチを有したコンデンサにより構成されており、その無効電力容量をサイリスタの点弧角制御により進相から遅相まで高速かつ連続的に制御する装置である。

本研究では、発電機に自動電圧調整器（AVR : Automatic Voltage Regulator）を備えた一機無限大母線系統²⁾にSVCを設置した系統を考え、この系統の所望の安定度を得るために、この系の不安定領域または、その

近傍に存在する固有値を安定領域に移動させるような制御を線形最適制御³⁾を用いて行う。この線形最適制御と従来のPI（比例+積分）制御との比較により電力系統の安定度向上効果についてシミュレーションを行い検討する。また、線形最適制御において評価関数にあらわれる重み関数行列は、試行錯誤して制御対象の要求を満たす値を求めるのであるが、ここでは固有値を移動させる際に固有値感度行列を求めて重み関数行列を決定する方法を用いる。

2. 対象モデル

本研究では、図1に示すような一機無限大母線系統で、発電機の励磁電圧調整にAVRを、そして系統のほぼ中間にSVCを設置した系を考える。

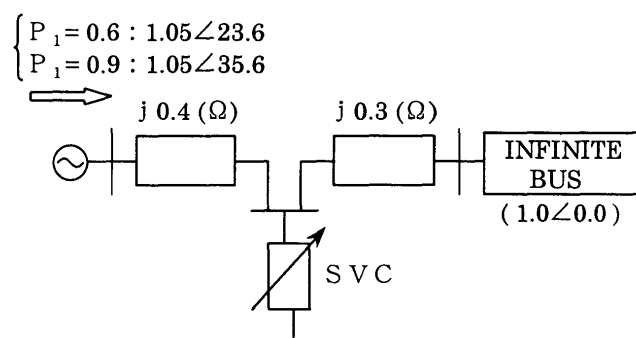


図1 系統構成

(2000年12月22日受理)

* 宇部工業高等専門学校電気工学科

** 北九州工業高等専門学校

2.1 発電機モデル

発電機の微分方程式は、次のような仮定の下で Park の方程式から 3 次元の発電機モデルが得られる。

仮定 1 : 電機子側の変圧器起電力を無視する。

仮定 2 : 回転子速度変化に伴う電圧変化を無視する。

仮定 3 : 制動巻線効果を無視する。

仮定 4 : 電機子巻線の抵抗を無視する。

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{\omega_0}{M} \left\{ T_m - \frac{eq' \cdot \sin \delta}{X_1 + X_2 + X_d' - (X_1 + X_d') \cdot X_2 \cdot B_s} - \frac{(X_q - X_d') \sin \delta \cdot \cos \delta}{X_1 + X_2 + X_d' - (X_1 + X_d') \cdot X_2 \cdot B_s} \cdot \frac{1}{X_1 + X_2 + X_q' - (X_1 + X_q') \cdot X_2 \cdot B_s} \right\} \quad (1)$$

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega - \omega_0 \quad (2)$$

$$\frac{deq'}{dt} = \frac{1}{T_{do'}} \left\{ E_{fd} - \frac{X_1 + X_2 + X_d - (X_1 + X_d) \cdot X_2 \cdot B_s}{X_1 + X_2 + X_d' - (X_1 + X_d') \cdot X_2 \cdot B_s} \cdot eq' - \frac{(X_1 - X_d') \cdot \cos \delta}{X_1 + X_2 + X_d' - (X_1 + X_d') \cdot X_2 \cdot B_s} \right\} \quad (3)$$

2.2 AVRモデル

AVRは、図2のような補助信号 U_{AVR} を持った1次遅れのもの考えると微分方程式は次のようになる。

$$\frac{dE_{fd}}{dt} = -\frac{1}{T_a} \cdot \{ E_{fd} - E_{fdo} + K_a \cdot (V_t - V_{to}) \} + \frac{K_a}{T_a} U_{AVR} \quad (4)$$

2.3 SVCモデル

SVCは、サイリスタ制御リアクトル型を考え、補助信号 U_{SVC} を考慮するとブロック図は、図3のようになり微分方程式は次のようになる。

$$\frac{dB_s}{dt} = -\frac{1}{T_f} \cdot \{ B_s - B_{s0} + K_f \cdot (V_{SVC} - V_{REF}) \} + \frac{K_f}{T_f} U_{SVC} \quad (5)$$

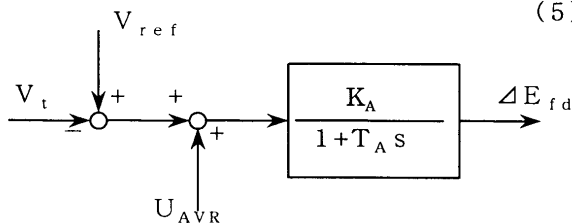


図2 AVRモデル

ここで、各記号の意味は次の通りである。

- ω : 角速度 δ : 位相角 M : 慣性定数 T_m : 機械的入力
- $T_{do'}$: 直軸開路時定数 E_{fd} : 界磁電圧
- eq' : 過渡リアクタンス背後電圧 X_q : 横軸リアクタンス
- X_d : 直軸リアクタンス X_d' : 直軸過渡リアクタンス
- X_1, X_2 : 送電線リアクタンス B_s : SVC容量
- V_{ref} : 設定電圧 V_t : 発電機端子電圧
- T_a : AVR時定数 K_a : AVRゲイン
- V_{SVC} : SVC端子電圧 T_f : SVC時定数
- K_f : SVCゲイン

3. 制御方法

3.1 線形最適制御則

前項で示した電力システムのモデル式は、

$$\dot{x} = f(x, u, t) \quad (6)$$

と表され、このモデル式に対しある運転状態において線形化すると、次の系統状態方程式が得られる。

$$\dot{x} = A \cdot x + B \cdot u \quad (7)$$

但し、 $x = [\Delta \delta, \Delta \omega, \Delta eq', \Delta E_{fd}, \Delta B_s]^T$

$$u = [\Delta U_{AVR}, \Delta U_{SVC}]^T$$

このときの評価関数 J は、

$$J = \int_0^{\infty} \frac{1}{2} (x^T \cdot Q \cdot x + u^T \cdot R \cdot u) dt \quad (8)$$

であり、この評価関数 J を最小にする u が最適制御入力として得られる。ここで随伴変数ベクトル p を導入すると、ハミルトニアン H は、

$$H = \frac{1}{2} (x^T \cdot Q \cdot x + u^T \cdot R \cdot u) + p^T \cdot (A \cdot x + B \cdot u) \quad (9)$$

となり、(7)式は次のように書き換えできる。

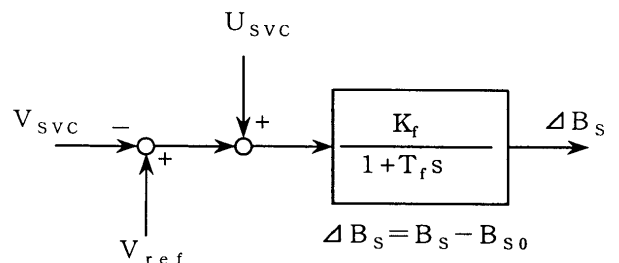


図3 SVCモデル

$$\dot{x} = M \cdot X \quad (10)$$

$$\text{但し、} M = \begin{bmatrix} A & -B \cdot R^{-1} \cdot B^T \\ -Q & -A^T \end{bmatrix} \quad X = \begin{bmatrix} x \\ p \end{bmatrix}$$

線形最適制御則 u を求めるためには、随伴変数ベクトル p の解を求める必要がある。この随伴変数ベクトルは、状態変数ベクトル x と線形関係にあるので、

$$p = K \cdot x \quad (11)$$

と表される。ここで、 K はリカッチ行列方程式から得られるリカッチ行列である。

$$K \cdot A + A^T \cdot K - K \cdot B \cdot R^{-1} \cdot B^T \cdot K + Q = 0 \quad (12)$$

以上のことから、線形最適制御則 u は次式ようになる。

$$u = -R^{-1} \cdot B^T \cdot K \cdot x \quad (13)$$

3.2 重み関数行列の決定法

線形最適制御則を決定するためには、リカッチ行列と重み関数行列を求めなければならない。リカッチ行列は (10) 式の状態・共状態システム行列 M の固有ベクトル κ から計算できるので、重み関数行列の決定について述べる。またここでは、系統の安定性を問題としているので評価関数 (8) 式の過渡特性を表す第 1 項に含まれる重み行列 Q に注目してこの重み関数行列を決定する方法を述べる。

(10) 式の状態・共状態システム行列 M の固有値行列 Λ の中で複素平面の左半平面上の任意の位置へ $\Delta \lambda$ 移動させたい固有値 λ に注目する。

$$\lambda = \lambda + \Delta \lambda \quad \Delta \lambda < 0 \quad (14)$$

固有値 λ の移動量 $\Delta \lambda$ と、この移動による重み関数行列 Q の変動量 ΔQ との関係は、固有値に関する重み関数 q の

固有値感度 $\frac{\partial \lambda}{\partial q}$ を用いて次のように表せる。

$$\Delta Q = \alpha^{-1} \cdot \Delta \lambda \quad (15)$$

$$\text{ただし} \quad \alpha = \frac{\partial \lambda}{\partial q}$$

また、固有値感度は、システム行列 M と M^{-1} のそれぞれの固有ベクトル κ 、 μ を用いて次のように求められる。

$$\frac{\partial \lambda}{\partial q} = \frac{\mu^T \cdot \frac{\partial M}{\partial q} \cdot \kappa}{\mu^T \cdot \kappa} \quad (16)$$

以上のことから、所望の安定性を得るための重み関数行列 Q が求められる。

このアルゴリズムを図 4 に示す。

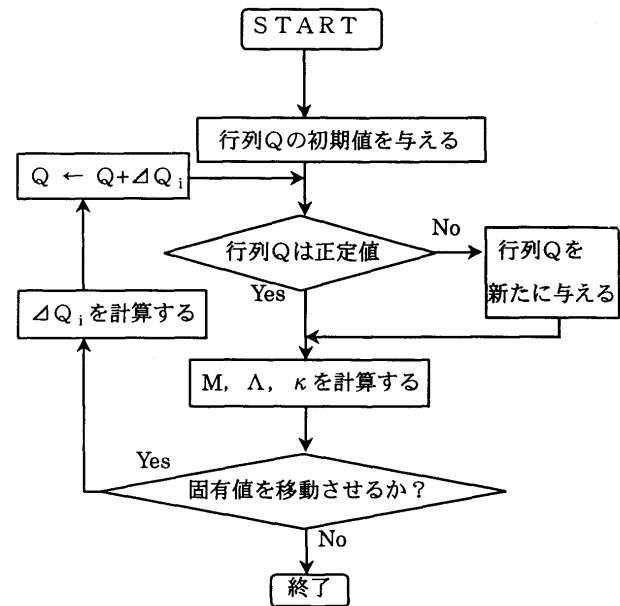


図 4 固有値移動のアルゴリズム

4. シミュレーション結果

機械的入力 T_m のステップ変化に対する応答と 3 相短絡事故を想定したシミュレーションを行った。発電機出力 P_1 は、0.6 [p.u.] と 0.9 [p.u.] とし、系統定数は表 1 に示す値を用いた。

表 1 各定数値

発電機定数	AVR定数	SVC定数
$X_d = 1.14$ [p.u.]	$K_a = 10.0$ [p.u.]	$K_f = 50.0$ [p.u.]
$X_d' = 0.24$ [p.u.]	$T_a = 0.50$ [p.u.]	$T_f = 0.01$ [sec]
$X_q = 0.66$ [p.u.]		$V_{ref} = 1.00$ [p.u.]
$T_{do}' = 12.0$ [sec]		
$M = 10.0$ [sec]		

4.1 固有値移動の影響

ここでは、固有値移動による系統安定度に対する効果を検証する。外乱として機械的入力 T_m を -0.02 [p.u.] だけステップ変化させた場合を考える。

1) $P_1=0.6$ [p.u.] の場合

PI 制御方式での固有値は次のようになる。

$$\begin{aligned} & -1160.1540 + j(0.000) \\ & -1.0780 \pm j(0.4306) \\ & -0.0152 \pm j(5.6770) \end{aligned}$$

いま、この固有値の中で最も不安定領域に近い

$-0.0152 \pm j(5.6770)$ に注目し、この固有値を複素平面左半平面上の安定領域へ移動させる。今回のシミュレーションでは固有値の実部を -0.5 , -1.5 , -3.0 へ移動した。そのときの各固有値と重み関数行列を以下に示す。

但し、評価関数の制御エネルギーの項に含まれる重み関数行列 R は、 $R=DIAG[1, 1]$ とした。

○固有値実部 -0.5 へ移動

$$Q = \begin{pmatrix} 2.89 \times 10^{-3} & & & & \\ & 7.22 \times 10^{-2} & & & \\ & & 5.10 \times 10^{-4} & & \\ & & & 1.30 \times 10^{-5} & \\ & & & & 2.17 \times 10^{-8} \end{pmatrix}$$

固有値

$$\begin{aligned} & -1160.1540 + j(0.000) \\ & -1.0881 \pm j(0.4381) \\ & -0.5077 \pm j(5.6771) \end{aligned}$$

○固有値実部 -1.5 へ移動

$$Q = \begin{pmatrix} 2.51 \times 10^{-2} & & & & \\ & 6.87 \times 10^{-1} & & & \\ & & 1.19 & & \\ & & & 4.40 \times 10^{-3} & \\ & & & & 1.99 \times 10^{-7} \end{pmatrix}$$

固有値

$$\begin{aligned} & -1160.1540 + j(0.000) \\ & -1.5049 \pm j(0.4263) \\ & -1.5020 \pm j(5.6770) \end{aligned}$$

○固有値実部 -3.0 へ移動

$$Q = \begin{pmatrix} 9.68 \times 10^{-2} & & & & \\ & 3.51 & & & \\ & & 2.68 \times 10^1 & & \\ & & & 3.41 \times 10^{-2} & \\ & & & & 8.11 \times 10^{-7} \end{pmatrix}$$

固有値

$$\begin{aligned} & -1160.1540 + j(0.000) \\ & -3.0082 \pm j(0.4104) \\ & -3.0076 \pm j(5.6767) \end{aligned}$$

2) $P_1=0.9$ [p.u.] の場合

前項と同様に最も不安定領域に近い固有値に注目して、その固有値の実部を -0.5 , -1.5 , -3.0 へ移動し安定度への効果をみる。PI 制御方式での固有値は次のようになる。

$$\begin{aligned} & -1242.5680 + j(0.000) \\ & -1.0623 \pm j(0.4114) \\ & -0.0256 \pm j(5.7372) \end{aligned}$$

○固有値実部 -0.5 へ移動

$$Q = \begin{pmatrix} 9.66 \times 10^{-4} & & & & \\ & 2.58 \times 10^{-2} & & & \\ & & 4.90 \times 10^{-4} & & \\ & & & 3.90 \times 10^{-6} & \\ & & & & 2.08 \times 10^{-8} \end{pmatrix}$$

固有値

$$\begin{aligned} & -1242.5680 + j(0.000) \\ & -1.0692 \pm j(0.4137) \\ & -0.5007 \pm j(5.7372) \end{aligned}$$

○固有値実部 -1.5 へ移動

$$Q = \begin{pmatrix} 8.75 \times 10^{-3} & & & & \\ & 2.51 \times 10^{-1} & & & \\ & & 1.30 & & \\ & & & 4.56 \times 10^{-3} & \\ & & & & 2.01 \times 10^{-7} \end{pmatrix}$$

固有値

$$\begin{aligned} & -1242.5680 + j(0.000) \\ & -1.5089 \pm j(0.4066) \\ & -1.5063 \pm j(5.7372) \end{aligned}$$

○固有値実部 -3.0 へ移動

$$Q = \begin{pmatrix} 3.38 \times 10^{-2} & & & & \\ & 1.25 & & & \\ & & 2.64 \times 10^1 & & \\ & & & 3.35 \times 10^{-2} & \\ & & & & 8.18 \times 10^{-7} \end{pmatrix}$$

固有値

$$\begin{aligned} & -1242.5680 + j(0.000) \\ & -3.0023 \pm j(0.3900) \\ & -3.0019 \pm j(5.7368) \end{aligned}$$

以上のステップ変化に対する位相角の応答を図5に示す。図からわかるように当然のことながら固有値実部を複素平面左半平面上の安定領域へ大きく移動させるほど、外乱に対する応答はすばやく定常状態に落ちついており安定性と応答性は良くなっている。

4.2 制御方式の比較

次に、①PI制御 (PIと呼ぶ)、②固有値固定 (重み関数行列固定) の線形最適制御 (Q_{SET} と呼ぶ)、③固有値移動の線形最適制御 (λ_{SET} と呼ぶ) の3方式の比較を行う。外乱として機械的入力 T_m を -0.02 [p.u.] だけステップ変化させた場合と3相短絡事故 (0.1秒間) を想定した。制御条件としては、次のように設定した。

・ Q_{SET} の場合

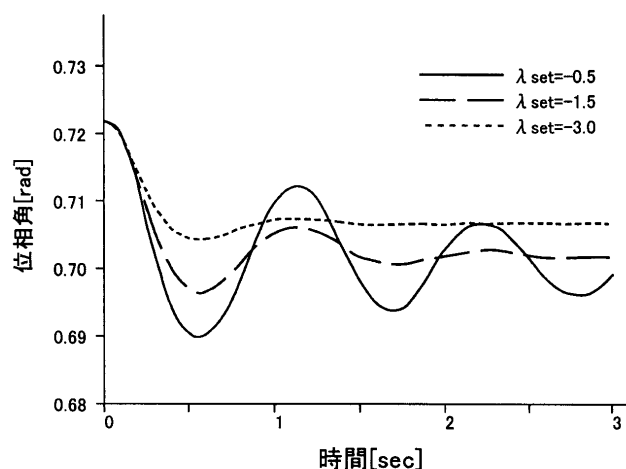
$$Q = \text{DIAG} [1, 1, 1, 1, 1], \quad R = \text{DIAG} [1, 1]$$

・ λ_{SET} の場合

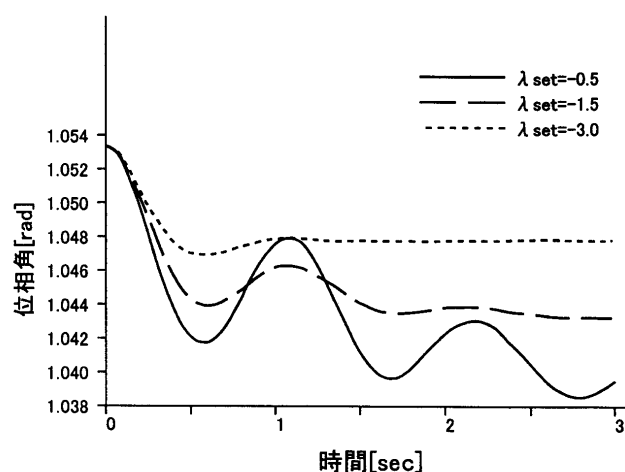
初期状態での固有値の中で最も不安定領域に近い固有値に注目して、その固有値実部を -1.5 の安定領域へ移動するように重み関数行列 Q を決定する。

但し、 $R = \text{DIAG} [1, 1]$ とする。

各制御方式による機械的入力 T_m のステップ変化に対する位相角の応答を図6に、3相短絡事故を想定した場合の位相角の応答を図7に示す。

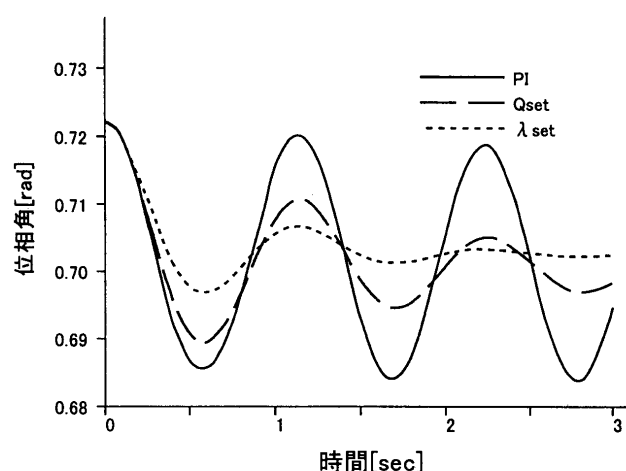


(a) $P_1 = 0.6$ [p.u.] の場合

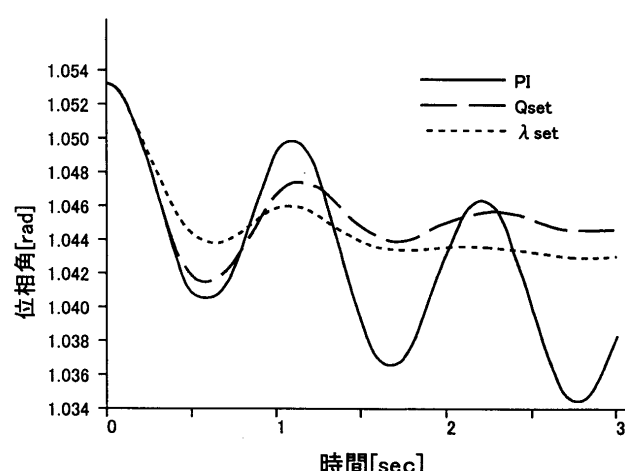


(b) $P_1 = 0.9$ [p.u.] の場合

図5 固有値移動による安定効果 (T_m ステップ変化)



(a) $P_1 = 0.6$ [p.u.] の場合



(b) $P_1 = 0.9$ [p.u.] の場合

図6 各制御方式による安定効果 (T_m ステップ変化)

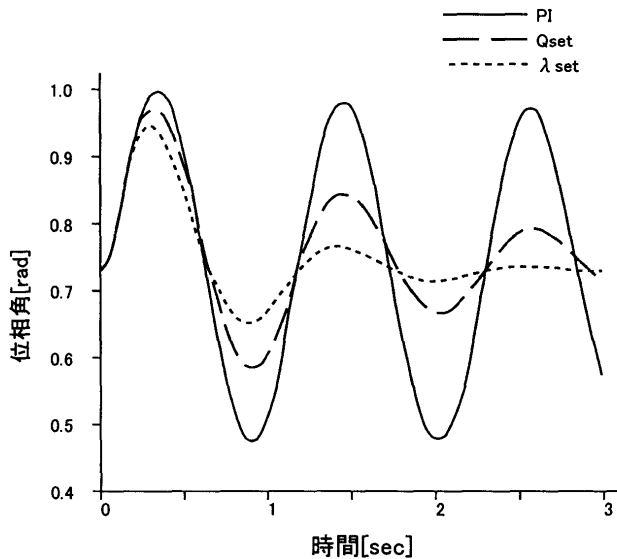
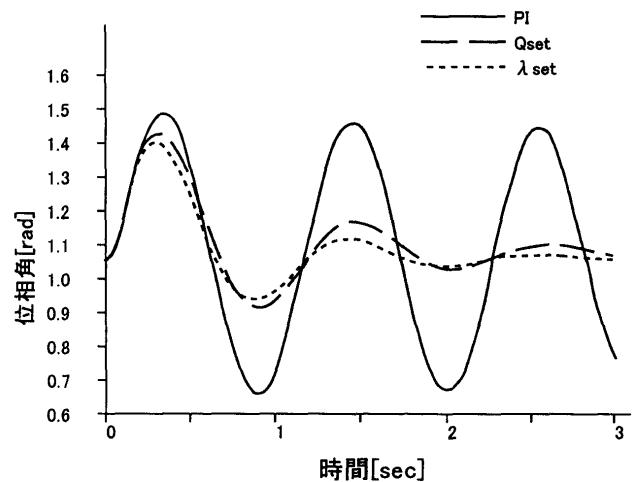
(a) $P_1 = 0.6$ [p.u.] の場合(b) $P_1 = 0.9$ [p.u.] の場合

図7 各制御方式による安定効果 (3相短絡事故)

図から今回の機械的入力のステップ変化のような小さい外乱や、3相短絡事故のような比較的大きな外乱に対しても固有値移動の線形最適制御 (λ_{SET}) が最もはやく定常状態に落ちついており固有値移動の線形最適制御の有効性がわかる。

5. まとめ

本稿では、発電機にAVRを備えた一機無限大母線系統の中間点付近にSVCを設置した系統を考え、制御方式にはこの系統が所望の安定度を得るために固有値実部を複素平面左半平面上の安定領域へ移動させるように評価関数の重み関数行列Qを決定する線形最適制御方式の有効性について報告を行った。シミュレーションの結果からこの制御方式により系統の安定度は従来のPI制御方式より効果的であることがわかった。

また、試行錯誤的に選定されていた重み関数行列Qも固有値移動の際に固有値感度を利用して比較的容易に決定できることが確認できた。

参考文献

- (1) 望月,他:「静止形無効電力補償による電力系統の安定向上」,電気学会電力技研資料,PE-87-150,1987
- (2) Y. N. Yu:「Electric Power System Dynamics」, Academic Press, 1983
- (3) Y. N. Yu, et al.:「Application of an Optimal Control Theory to a Power System Dynamics」, IEEE Trans.Power Apparatus System,PAS-89,55, 1970