UDC 621.311.15.016.352: 621.316.728.016.25

論文

56-B13

静止形無効電力制御装置による 電力系統の安定化制御

正員 藤原良一 (三菱電機)

正員 阿部茂 (三菱電機)

正員 武田捷一 (三菱電機)

正員 小畑嘉造 (関西電力)

1. ま え が き

系統連系などにより系統が大規模化すると共に、動態安定度が低下するという問題が生じてきた。このため、主要な発電機に Power System Stabilizer (PSS) を付ける⁽¹⁾。あるいは、直流送電によって系統を分割する、といった対策が考えられている。筆者らは連系地点の無効電力を制御することによって、系統を安定化する方法について、その設計手法を示すと共に、安定化の効果を検証し、良い結果を得たので以下に報告する⁽²⁾。

無効電力を制御するには、同期調相機や飽和リアクトルなどいろいろな方法がある⁽³⁾が、ここでは応答速度、慣性などの点から、静止形無効電力制御装置(Static Var System, 略して、SVS と呼ぶ)を考えることにする。現在、SVS は主として、受電端電圧の維持、UHV 送電線の無効電力源、長距離送電線の間電圧保持による広位相差角送電といった、定電圧制御装置⁽⁴⁾としての研究がなされており、一部は実用化されている。しかしながら、動態安定度を改善するために、SVS を用いる場合には、これらと異なる制御方式が必要となる。すなわち、前者では電圧をできるだけ速く一定に保つ制御が要求されるのに対し、後者では電力動揺を抑える制御が必要となる。連系線潮流の動揺を抑制するのに SVS を適用した例としては、文献(5)、(6)などがあるが、適切な SVS の設計法は示されていない。

そこで、本論文では代表的な連系系統の一つであるくし形系統の基本単位として、一機一連系線のモデルを考え、このモデルを例に SVS 制御系の設計法を紹介する。ここでは、周波数応答法を用いる方法と、状態フィードバックを用いる方法の二法について検討した。どちらの方法によっても一定の手順で簡単に制御系を設計することができる。

また、SVS の効果的な設置場所についても検討を行なった。潮流計算プログラムを用いれば、設備容量が最小となる設置場所を求めることができる。また、固有値計算プログラムでは、同じ制御回路をもつ SVS を用いる場合、電力動揺のダンピングが最大となる設置場所を求めることができる⁽¹⁾。

最後に、3 機くし形系統モデルにおいて、上記の手法を用いて設計した SVS が期待通りの効果を発揮することを、シミュレーションによって確認する。

2. SVS 制御回路の設計法

〈2.1〉モデル系統 我が国における 60 Hz 系統は 500 kV 送電線で連系された第 1 図のようなくし形系統であることは良く知られているが、このようなくし形系統を構成する基本単位として、第 2 図の一機一連系線モデルを考えることにする。

このモデルでは、常時は発電機出力と負荷がつり合っており、連系線潮流は 0 になっている。事故などにより需給に不平衡が生じると、連系線を通じて電力が行き来し、電力動揺が発生する。同図の例では電源は 700 MW×10 台、電源線は 500 kV、95 km、2 回線、

第 1 図 くし形系統

Fig. 1. Longitudinal power system.

A New Design Technique for SVS Improving Dynamic Stability. By Ryoichi Fujiwara, Member, Shigeru Abe, Member, Shoichi Takeda, Member (Mitsubishi Electric Corporation) & Yoshizo Obata, Member (The Kansai Electric Power Co., Inc.)

藤原良一: 正員, 三菱電機株式会社

阿部 茂: 正員, 三菱電機株式会社

武田捷一: 正員, 三菱電機株式会社

小畑嘉造: 正員, 関西電力株式会社

第2図 一機一連系線モデル

Fig. 2. Power system with a generator and an interconnected tie line.

第3図 AVR-励磁機のブロック図

Fig. 3. Block diagram of AVR-exciter system.

第1表 発電機定数

Table 1. Generator constants.

$X_d = 1.6$ pu	$M = 8.0$ s
$X_d' = 0.33$	$T_{d0}' = 6.0$
$X_d'' = 0.27$	$T_d'' = 0.05$
$X_q = 1.6$	$T_q'' = 0.05$
$X_q' = 0.27$	
$X_f = 0.27$	

容量 700 MVA 自己容量 base

連系線は同じく 80 km を想定している。発電機定数を第1表に、直流励磁式の AVR-励磁機のブロック図を第3図に示す。

〈2.2〉 周波数応答による方法

(1) 連系々統の安定度解析法 第4図の連系々統において、連系点から見た各システムの伝達関数行列を次のようにして求める。

発電機をオペレーショナルなアドミッタンスを使って次式で表わす。

$$\left. \begin{aligned} I_d &= -Y_d(s)V_q + Y_{fd}(s)E_{fd} \\ I_q &= Y_q(s)V_d \\ P &= I_d V_d + I_q V_q \\ Q &= I_d V_q - I_q V_d \\ V_d &= V \sin(\delta - \theta) \\ V_q &= V \cos(\delta - \theta) \\ (Ms^2 + Ds)\delta &= P_m - P \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (I)$$

但し、

第4図 連系々統

Fig. 4. Interconnected power system.

$$Y_d(s) = \frac{T_{d0}' T_{d0}'' s^2 + (T_{d0}')}{x_d'' T_{d0}' T_{d0}'' s^2 + (x_d' T_{d0}')} \times \frac{+ \frac{x_d - x_d''}{x_d' - x_d''} T_{d0}'' s + 1}{+ \frac{x_d''(x_d - x_d'')}{x_d' - x_d''} T_{d0}'' s + x_d} \\ Y_q(s) = \frac{T_{q0}'' s + 1}{x_q'' T_{q0}'' s + x_q} \\ Y_{fd}(s) = \frac{\left(1 - \frac{x_{ad}}{x_{kd}}\right) \frac{x_d - x_d''}{x_d' - x_d''} T_{d0}'' s + 1}{x_d'' T_{d0}' T_{d0}'' s^2 + (x_d' T_{d0}')} \times \frac{+ \frac{x_d''(x_d - x_d'')}{x_d' - x_d''} T_{d0}'' s + x_d}{+ \frac{x_d''(x_d - x_d'')}{x_d' - x_d''} T_{d0}'' s + x_d}$$

また、AVR、調速器系は

$$\left. \begin{aligned} \Delta E_{fd} &= -G_{AVR}(s) \Delta V \\ \Delta P_m &= -G_{GOV}(s) s \Delta \delta \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (II)$$

I : 電機子電流, V : 発電機端子電圧, E_{fd} : 界磁電圧, P, Q : 発電機出力の有効, 無効電力成分, δ : q 軸位相角, θ : 端子電圧位相角, P_m : タービン入力, d, q : d, q 軸成分, s : 微分演算子

(I)式を平衡点のまわりで線形化し、(II)式と共に $\Delta I_d, \Delta I_q$ そのほかの変数を消去して整理すると、発電機端子電圧から出力への伝達関数行列が求まる。

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = Y(s) \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \dots\dots\dots (1)$$

次に、 n 台の発電機端子および連系点について、ヤコビアン行列 (J) を求める。

$$P = J_{11} V + J_{12} V_c \dots\dots\dots (2)$$

$$P_c = J_{21} V + J_{22} V_c \dots\dots\dots (3)$$

但し、 $P = (\Delta P_1, \Delta Q_1, \dots, \Delta P_i, \Delta Q_i, \dots, \Delta P_n, \Delta Q_n)^t$

$$V = (\Delta \theta_1, \Delta V_1, \dots, \Delta \theta_i, \Delta V_i, \dots, \Delta \theta_n, \Delta V_n)^t$$

$$P_c = (\Delta P_c, \Delta Q_c)^t$$

$$V_c = (\Delta \theta_c, \Delta V_c)^t$$

各発電機について(1)式が成立するので、(1)、(2)、(3)式を総合すると、連系点から、一方の電力シ

システムを見たときの伝達関数である(4)式が求まる。

$$\begin{bmatrix} \Delta P_c \\ \Delta Q_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A(s) & B(s) \\ C(s) & D(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_c \\ \Delta V_c \end{bmatrix} \dots\dots\dots(4)$$

第4図に示したシステム1,2を見たときの変数にそれぞれ1,2という添字をつけ, SVS の無効電力出力を ΔQ_s と表わすと, 連系点の潮流について, 次式の関係が成り立つ。

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} 0 \\ \Delta Q_s \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \Delta P_1 \\ \Delta Q_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta P_2 \\ \Delta Q_2 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} A_1(s) + A_2(s) & B_1(s) + B_2(s) \\ C_1(s) + C_2(s) & D_1(s) + D_2(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_c \\ \Delta V_c \end{bmatrix} \\ &\dots\dots\dots(5) \end{aligned}$$

従って, SVS の出力から連系線潮流 (ΔP_2) への伝達関数は,

$$\begin{aligned} \frac{\Delta P_2}{\Delta Q_s} &= \frac{B_2(s)A_1(s)}{(A_1(s) + A_2(s))(D_1(s) + D_2(s))} \times \\ &\times \frac{-B_1(s)A_2(s)}{-(B_1(s) + B_2(s))(C_1(s) + C_2(s))} \\ &= F(s)^{-1} \dots\dots\dots(6) \end{aligned}$$

となり, 連系々統の安定性は $F(s)$ の根の位置によって決まる。

(2) 周波数応答による制御系の設計 前節の第(6)式をもとに, SVS の制御系を設計する。SVS の伝達関数を $G(s)$ とすると, 系統のブロック図は第5図のようになり, SVS を含む全系の安定性は

$$F(s) + G(s) = 0 \dots\dots\dots(7)$$

の根の位置によって決まる。すなわち, $F(j\omega) + G(j\omega)$ のベクトル軌跡が, 原点を囲むか否かによって安定性を判別できる。

(7)式は全系のベクトル軌跡が, SVS のない原系の伝達関数の逆数の軌跡 $F(j\omega)$ と, SVS のベクトル軌跡 $G(j\omega)$ の和で与えられることを示している。従って, $F(j\omega)$ の軌跡から適切な $G(j\omega)$ を決めることができる。

(3) 設計例 第2図の一機一連系線モデルで SVS を設計する。系統のベクトル軌跡 $F(j\omega)$ を求めた結果が第6図である。これより, 0.25 Hz 付近に電圧モードの根が, 0.75 Hz 付近に減衰の遅い電力動揺

第5図 安定化制御のブロック図

Fig. 5. Block diagram of interconnected power system with SVS.

第6図 周波数応答による制御系の設計

Fig. 6. Vector loci of power and/or control system.

の根があることがわかる。

電圧モードの特性を損うことなく, 電力動揺の減衰を速めるには, 0.75 Hz 付近で左下向きのベクトルを持つ $G(j\omega)$ が必要となる。そこで,

$$\frac{\Delta Q_s}{\Delta P_2} = -G(j\omega) = \frac{0.2s}{1 + 0.1s} \dots\dots\dots(8)$$

の不完全微分形のフィードバック制御を行なうことにする。第6図に示すように, この制御により電力動揺のダンピングは大幅に改善されると考えられる。

さて, (7)式の s を $s = \sigma + j\omega$ とし, σ も変えてベクトル軌跡を描けば, ベクトル軌跡が原点を通るときの σ と ω から, この系統の固有値を知ることができる。また, 同様に $F(\sigma + j\omega)$ の軌跡から SVS がない場合の固有値がわかり, これらの結果から SVS の効果を検証できる。実際に, 固有値を求めた結果を第2表に示す。SVS を設置することによって電圧モードの減衰は若干悪くなるが, 電力動揺の減衰は大幅に改善されている。

更に, 第7図は(8)式の制御効果をシミュレーションによって調べたものである。SVS によって電力動揺は急速に減衰しており, 動態安定度改善に有効であることが良くわかる。

〈2.3〉 状態フィードバックによる方法

(1) 系の状態変数表示⁽²⁾ 発電機は制動巻線を無視して, 界磁巻線モデルとし, AVR, SVS の特性

第2表 周波数応答より求めた系の固有値

Table 2. Eigen values from frequency response curve.

SVS	電圧モード	電力動揺モード
SVS なし	-0.4 $\pm j2\pi \times 0.21$	-0.1 $\pm j2\pi \times 0.75$
SVS あり	-0.3 $\pm j2\pi \times 0.23$	-1.3 $\pm j2\pi \times 0.85$

第 7 図 シミュレーションによる SVS の効果の検討

Fig. 7. Simulated curves with or without SVS. をそれぞれ第 8 図 (a), (b) のブロックで表わせば, AVR, SVS を含めた第 2 図の一機一連系線モデルは次式の様に表現できる。

$$\dot{\mathbf{X}}_1 = \mathbf{A}_1 \mathbf{X}_1 + \mathbf{B}_1 \mathbf{U} + \mathbf{C}_1 \mathbf{Z} \dots \dots \dots (9)$$

$$\mathbf{D}_1 \mathbf{Z} = \mathbf{E}_1 \mathbf{X}_1 \dots \dots \dots (10)$$

$$\mathbf{X}_1 = (\Delta \delta, \Delta \omega, \Delta \psi_{fd}, \Delta V_{tb}, \Delta Q_s)^t$$

$$\mathbf{U} = (\Delta E_{fd}, \Delta Q_{sl})^t$$

$$\mathbf{Z} = (\Delta V_d, \Delta V_q, \Delta I_d, \Delta I_q, \Delta V_{ta}, \Delta P, \Delta Q, \Delta P_c, \Delta Q_c, \Delta V_c, \Delta \delta_b)^t$$

ω : 回転子角速度, ψ_{fd} : 界磁鎖交磁束, V_{ta} : 発電機端子電圧, V_{tb} : AVR 内部状態変数, δ_b : 連系点-無限大母線電圧相差角, E_q : X_q 背後電圧

係数行列を第 3 表, 各電圧と位相角の関係を第 9 図にそれぞれ示した。

また, AVR の内部状態変数 (V_{tb}) を次式で定義したので,

第 8 図 AVR と SVS のブロック図

Fig. 8. Block diagram of AVR and SVS.

第 9 図 電圧間の関係

Fig. 9. Relation between voltages.

第 3 表 状態方程式の係数行列

Table 3. Coefficient matrices of state equation.

$A_1 = \left(\begin{array}{ccc ccc} \omega_0 & & & & & \\ & -\frac{D}{M} & & & & \\ & & -\frac{1}{T_{d0'}} & & & \\ \hline & & & -\frac{1}{T_1} & & \\ & & & & -\frac{1}{T_2} & \end{array} \right)$	$B_1 = \left(\begin{array}{ccc ccc} & & & & & \\ & & & & & \\ & & \frac{1}{T_{d0'}} & & & \\ \hline & & & & & \\ & & & & & \\ & & & & \frac{1}{T_2} & \end{array} \right)$
$C_1 = \left(\begin{array}{ccc ccc} & & & & -\frac{1}{M} & \\ & & & & & \\ & & -\frac{X_d - X_{d'}}{T_{d0'}} & & & \\ \hline & & & \frac{1}{T_1} & & \\ & & & & & \end{array} \right)$	
$D_1 = \left(\begin{array}{cccc cccc cc} -1 & \dots & \dots & X_q & \dots & \dots & \dots & \dots & & \\ \dots & -1 & -X_{d'} & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & & \\ \dots & -1 & X_1 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \textcircled{1} & \textcircled{2} \\ \dots & -1 & \dots & -X_1 & \dots & \dots & \dots & \dots & \textcircled{3} & \textcircled{4} \\ \frac{V_d}{V_t} & \frac{V_q}{V_t} & \dots & \dots & -1 & \dots & \dots & \dots & & \\ i_d & i_q & V_d & V_q & \dots & -1 & \dots & \dots & & \\ -i_q & i_d & \frac{V_q}{-2X_1 i_d} & \frac{-V_d}{-2X_1 i_q} & \dots & -1 & \dots & \dots & & \\ \hline \dots & \dots & \dots & \dots & 1 & \dots & -1 & \dots & -\frac{dP}{dV} & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & 1 & \dots & -1 & \dots & -\frac{dQ}{dV} & \dots \\ \hline & & & & & & -1 & \dots & \textcircled{5} & \textcircled{6} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & -1 & \dots & \textcircled{7} & \textcircled{8} \end{array} \right)$	
$E_1 = \left(\begin{array}{cccc c} \dots & \dots & \dots & \dots & \textcircled{1} = \cos(\delta - \delta_b) \\ \dots & \dots & -1 & \dots & \textcircled{2} = V_c \sin(\delta - \delta_b) \\ \textcircled{9} & \dots & \dots & \dots & \textcircled{3} = \sin(\delta - \delta_b) \\ \textcircled{10} & \dots & \dots & \dots & \textcircled{4} = -V_c \cos(\delta - \delta_b) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \textcircled{5} = \frac{V_b}{X_b} \sin \delta b \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \textcircled{6} = \frac{1}{X_b} V_b V_c \cos \delta b \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \textcircled{7} = \frac{1}{X_b} (2V_c - V_b \cos \delta b) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \textcircled{8} = \frac{1}{X_b} V_b V_c \sin \delta b \\ \dots & \dots & \dots & -1 & \textcircled{9} = V_c \sin(\delta - \delta_b) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \textcircled{10} = -V_c \cos(\delta - \delta_b) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \end{array} \right)$	

$$\Delta V_{tb} = \frac{a}{s+a} \Delta V_{ta} \dots \dots \dots (11)$$

界磁電圧は,

$$\Delta E_{fd} = -\alpha \Delta V_{ta} - \beta \Delta V_{tb} \dots \dots \dots (12)$$

と表わせる。従って, (9), (10), (12)式から, z および ΔE_{fd} を消去すれば次式のようなになる。

$$\dot{\mathbf{X}}_1 = \mathbf{A}_2 \mathbf{X}_1 + \mathbf{B}_1 \mathbf{u} \dots \dots \dots (13)$$

$$\mathbf{u} = \Delta Q_{sl}$$

ここで状態変数を、主として測定が容易な変数に変換する。

$$\mathbf{X}_2 = (\Delta V_c, \Delta \omega, \Delta P_c, \Delta V_{tb}, \Delta Q_s)^T \dots (14)$$

とすると(15)式の状態方程式が得られる。なお、変換行列 $\mathbf{T}$ は(10)式より容易に得られる。

$$\dot{\mathbf{X}}_2 = \mathbf{A}_3 \mathbf{X}_2 + \mathbf{B}_3 \mathbf{u} \dots (15)$$

$$\text{但し, } \mathbf{X}_2 = \mathbf{T} \mathbf{X}_1, \mathbf{A}_3 = \mathbf{T} \mathbf{A}_2 \mathbf{T}^{-1}, \mathbf{B}_3 = \mathbf{T} \mathbf{B}_1$$

(2) 状態フィードバックによる制御系の設計

系が状態変数表示できたならば、状態変数の定数フィードバックにより、系の固有値を任意に変えることができ、逆に、系が希望の固有値を持つための状態フィードバックゲイン $K(u = -K\mathbf{X})$ は、 u がスカラー入力するとき一意に決まる⁽⁷⁾。

(15)式の系は、電力動揺モード、電圧モード、SVSの時定数に対応する第10図のような固有値を持つ。いま、電力動揺のダンピングを増すため、電力動揺の固有値を希望の値 P_1', P_2' に、他の固有値はそのまの値にして、 K を求めると次式の制御が得られる。

$$\Delta Q_{sI} = -k_1 \Delta V_c - k_2 \Delta \omega - k_3 \Delta P_c - k_4 V_{tb} - k_5 \Delta Q_s \dots (16)$$

一方、(15)式の第3行より次式が得られる。

$$s \Delta P_c = a_{31} \Delta V_c + a_{32} \Delta \omega + a_{33} \Delta P_c + a_{34} \Delta V_{tb} + a_{35} \Delta Q_s + b_3 \Delta Q_{sI} \dots (17)$$

(16)、(17)式より、 $\Delta \omega$ を消去し、影響の少ない ΔV_{tb} 項は無視すると、SVSの入力信号は次式のように求まる。

$$\Delta Q_{sI} = -k_1' \Delta V_c - (k_3' + k_3'' s) \Delta P_c - k_5' \Delta Q_s \dots (18)$$

更に、(15)式の第5行より、次の関係がある

$$s \Delta Q_s = -\frac{1}{T_2} \Delta Q_s + \frac{1}{T_2} \Delta Q_{sI} \dots (19)$$

ので、(18)式から ΔQ_{sI} を消去し、電力動揺や電圧モード以外の時定数を省略することにする。

$$P_1, P_2 = 0.065 \pm j2\pi \times 0.73 \text{ Hz}$$

$$P_1', P_2' = -1.0 \pm j2\pi \times 0.73 \text{ Hz}$$

$$P_3, P_4 = -0.579 \pm j2\pi \times 0.21 \text{ Hz}$$

$$P_5 = -30.$$

P_1, P_2, P_3, P_4, P_5 を固有値指定する

第10図 固有値の分布

Fig. 10. Distribution of eigen values.

$T_2 = 1/30$ 秒にして、第2図の系統で電力動揺の減衰時定数が1秒となるよう第10図の固有値を指定すると、上記の手順により(20)式の制御が得られる。このとき(16)式の $k_1 = 0.543$, $k_2 = -35.3$, $k_3 = 0.099$, $k_4 = 3.44$, $k_5 = -0.134$ となる。(20)式の制御を、周波数応答から求めた(8)式の制御と比べてみると、 ΔP_c の微分利得がそれぞれ 0.17, 0.2 と極めて近く、良く似た制御であることがわかる。なお実際には、雑音の影響を抑えるために微分制御を $s = 30 \text{ rad/s}$ 程度電力動揺の5倍位)で制限する必要がある。

$$\Delta Q_s = -0.33 \Delta V_c + 0.17 s \Delta P_c$$

$$\simeq -0.33 \Delta V_c + 0.17 s \frac{30}{s+30} \Delta P_c \dots (20)$$

ところで、電源電力 ΔP を制御入力として用いる場

(a) SVS なし

(b) SVS あり (点線: (20)式の制御
実線: (23)式の制御)

第11図 シミュレーションによる SVS の効果の検討

Fig. 11. Simulated curves with or without SVS.

合には、状態変数を

$$\mathbf{X}_3 = (\Delta V_{ta}, \Delta \omega, \Delta P, \Delta V_{tb}, \Delta Q_s)^T \dots (21)$$

に変換し、(17)式の代りに

$$s \Delta \omega = a_{23} \Delta P \dots (22)$$

なる関係を利用すれば、上と同様にして次式の積分形制御が得られる。

$$\begin{aligned} \Delta Q_s &= -\frac{6.34}{s} \cdot \frac{30}{s+30} \Delta P \\ &\approx -\frac{s}{s+0.3} \cdot \frac{6.34}{s+1} \cdot \frac{30}{s+30} \Delta P \dots (23) \end{aligned}$$

なお、リセットフィルタ ($s=0.3$) をつけ、積分を一次遅れで近似すると上記下側の制御となる。

さて、電力動揺と同時に電圧モードのダンピングも改善できないものであろうか。一般に、上の方法で電圧モードのダンピングも良くしようとすると、 ΔV_{ta} 、 ΔV_{tb} のフィードバックゲインが大きくなる。 ΔV_{tb} を連系点の情報から推定しようとすると非常に sensitive な制御系となり、実際には用いることができないであろう。

第 11 図は (20) 式および (23) 式の制御効果をシミュレーションによって調べたものである。どちらの制御によっても電力動揺のダンピングが良くなることがわかる。

3. SVS の設置場所についての検討

〈3・1〉 潮流計算による方法 発電機の動揺は次式で表わされる。

$$M\ddot{\theta} = P_m - P_e \dots (24)$$

従って、SVS で負荷点や送電線の間接点などの電圧を制御して発電機の出力 P_e を適当に変化させれば、PSS やガバナと同様にして、ダンピングを強めることができる。この様な観点から見ると、系統の中で動揺の大きい発電機の出力に対して、SVS の出力 Q_i が最も大きな感度を持つ場所、すなわち、 $\partial P_e / \partial Q_i$ が最大になる点を求めれば、これが最小容量の SVS で系統を安定化できる設置場所であると考えられる。

インピーダンス負荷や、発電機電圧などが一定であると仮定すると、発電機出力は複数の SVS 出力の関数として次式のように表わすことができる。

$$P_{ei} = f_i(Q_{sj}) \dots (25)$$

変化分に対しては、

$$\Delta P_{ei} = \frac{\partial f_i}{\partial Q_{s1}} \Delta Q_{s1} + \dots + \frac{\partial f_i}{\partial Q_{sn}} \Delta Q_{sn} \dots (26)$$

複数の発電機の出力と各 SVS の出力に関して (26) 式の関係をまとめると、

$$\begin{pmatrix} \Delta P_{e1} \\ \vdots \\ \Delta P_{em} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial Q_{s1}} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial Q_{sn}} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial f_m}{\partial Q_{s1}} & \dots & \frac{\partial f_m}{\partial Q_{sn}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta Q_{s1} \\ \vdots \\ \Delta Q_{sn} \end{pmatrix} \dots (27)$$

(27) 式より、例えば第 1 番目の発電機を安定化するのに最適な SVS 設置場所は、 $\partial f_1 / \partial Q_{s1} \dots \partial f_1 / \partial Q_{sn}$ の中で最大値をもつ地点として決定される。

このような最適配置の指標となる感度係数行列は、次のような潮流計算によって求める。

まず、ベースになる潮流条件で潮流計算を行なった後発電機の背後電圧を固定した状態で、SVS の各設置候補場所に微量量の ΔQ_{si} を順次注入して、再び潮流計算を行なう。このときの各発電機出力の変化 ΔP_{ei} と ΔQ_{si} の比から感度係数が求まる。

また、複数台の発電機のうち、どの発電機の出力を制御すれば良いかは、系の固有ベクトルの形から知ることができる。 m 機系では $(m-1)$ の動揺モードがあるが、安定度の悪いのは多くの場合、低次のモードである。この低次モードの固有ベクトルが大きな値をもつ発電機をまず求めた後、この発電機の出力を制御するのに最適な地点を上記の潮流計算で決める。

第 12 図の 3 機くし形系を例に三つの負荷端を SVS の設置候補場所として感度係数を求めた結果が第 4 表

第 12 図 3 機くし形系の SVS

Fig. 12. SVS in the longitudinal power system with 3 generators.

第 13 図 3 機くし形系の固有ベクトル

Fig. 13. Eigen vectors of the longitudinal power system with 3 generators.

第 4 表 感度係数行列

Table 4. Sensitivity coefficient matrix.

$\begin{pmatrix} \Delta P_{e1} \\ \Delta P_{e2} \\ \Delta P_{e3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.51 & 0.27 & 0.16 \\ 0.27 & 0.40 & 0.27 \\ 0.16 & 0.27 & 0.51 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta Q_{s1} \\ \Delta Q_{s2} \\ \Delta Q_{s3} \end{pmatrix}$
$P_{e1} = P_{e2} = P_{e3} = 10,000 \text{ MW}$

である。また、各モードの固有ベクトルは第13図のようになる。これらの結果から、第1次モードを安定化するには、端の系統の発電機出力に対して大きな感度をもつ両端系統の負荷端に SVS を置くのが良いことがわかる。

〈3・2〉 固有値計算による方法 くし形連系々統の基本的な形態である第2図の一機一連系線モデルで設計した SVS を使って、最適な設置場所を固有値計算から決める。まず、SVS がいない場合の系統の固有値を計算し、次に、各設置候補点に順次 SVS を配置した場合の固有値も求める。これらの各ケースの固有値実部を比較すれば、設置点によるダンピング効果の違いがわかるので、不安定な動揺モードに対して、ダンピング作用の大きな設置点を選ぶことができる⁽¹⁾。

第12図の3機くし形系を例にとって説明を進める。第2図の一機一連系線モデルは、第12図の3機くし形系モデルとよく似た線路定数をもつので、〈2・2〉節で設計した(8)式の SVS を使うものとして、SVS がいない場合、および各候補点(負荷端)に SVS を配置した場合の固有値(第5表)を求める。同表より SVS がなければ1次モードが不安定であること、2次モードは安定ではあるが減衰が悪いことがわかる。また、1次モードには両端系統の負荷端、2次モードには中央系統の負荷端に SVS を設置すれば効果のあることがわかる。固有値の微小変化分については線形性が仮定できるので、1次モードの減衰時定数を1～2秒に

するには、両端系統の負荷端に各1台の SVS を配置すれば良いと考えられる。実際に両端系統に SVS を設置して、系統の固有値を計算した結果が第6表である。期待通りの効果が得られている。更に、2次モードの減衰も改善するために、中央系統にも SVS を設置したときの固有値が第7表である。これを見ると3台の SVS を設置すれば、全系が十分安定になることがわかる。

なお、中央系統の SVS は両端系統につながる2本の連系線潮流の和を検出するものとした。

4. 3機くし形系におけるシミュレーション検討

第12図の3機くし形系における SVS の効果を、シミュレーションによって検討したのが第14図である。各ケースは前節の第5表～第7表のケースと対応している。

まず、SVS のない場合、系統は安定限界付近にあり、よく見るとほんのわずかな不安定である〔第14図(a)〕。SVS を両端系統に設置すると系統は安定になるが、4秒以降の発電機出力波形から二次モードの振動が残ることがわかる〔(b)図〕。更に、SVS を中央系統にも設置すると、2次モードの減衰も改善され、系統は十分安定になる〔(c)図〕。これらの結果は当然のことながら、固有値計算結果と良く一致している。

(d)図は次式の電圧一定制御の SVS を、各連系点

第5表 3機くし形系の固有値

Table 5. Eigen values of the longitudinal power system with 3 generators.

固有値 設置場所	第1次モード		第2次モード	
	固有値	実部変化分	固有値	実部変化分
—	$0.1(1/\text{sec}) + j2\pi \times 0.88 \text{ (Hz)}$	—	$-0.1(1/\text{sec}) + j1.02 \text{ (Hz)}$	—
Q_{s1}	$-0.3 + j2\pi \times 0.91$	-0.4	$-0.1 + j1.02$	0.0
Q_{s2}	$0.1 + j2\pi \times 0.88$	0.0	$-0.3 + j1.03$	-0.2
Q_{s3}	$-0.3 + j2\pi \times 0.91$	-0.4	$-0.1 + j1.02$	0.0

但し、 $P_{s1}=P_{s2}=P_{s3}=6,000 \text{ MW}$

第6表 両端系統に SVS 配置

Table 6. SVS allocated to both edge subsystems.

固有値 設置場所	第1次モード		第2次モード	
	固有値	実部変化分	固有値	実部変化分
Q_{s1} と Q_{s3}	$-0.7(1/\text{sec}) + j2\pi \times 0.95 \text{ (Hz)}$	-0.8	$-0.2(1/\text{sec}) + j1.02 \text{ (Hz)}$	-0.1

第7表 全負荷端に SVS 配置

Table 7. SVS allocated to all subsystems.

固有値 設置場所	第1次モード		第2次モード	
	固有値	実部変化分	固有値	実部変化分
Q_{s1}, Q_{s2} と Q_{s3}	$-0.7(1/\text{sec}) + j2\pi \times 0.95 \text{ (Hz)}$	-0.8	$-0.4(1/\text{sec}) + j2\pi \times 1.03 \text{ (Hz)}$	-0.3

第 14 図 3 機くし形系の動揺波形

Fig. 14. Simulated curves of the longitudinal power system with 3 generators.

の悪い長周期の電力動揺に関与する発電機数も増大する。従って、PSS による電源側からの安定化だけでなく、本論文で述べた様な SVS により、連系点ないしは負荷側からこの動揺を抑制できれば、系統を安定に運用するうえで、より多くの選択が可能になり、有利である。

静止形無効電力供給装置そのものは、カナダ⁽⁸⁾その他の系統において、比較的大容量のものが開発されており、制御系を変更するだけで、電力動揺の抑制装置として利用できるで、今後の新たな系統安定化対策として広く利用されることが期待できるであろう。

(昭和 55 年 6 月 28 日受付)

文 献

- (1) F.P. de Mello, et al: "Coordinated Application of Stabilizers in Multimachine Power Systems" *IEEE PES Winter Meeting* F 79-175-1 (1979)
- (2) 藤原, 他: 「静止無効電力制御装置 (SVS) による電力系統の安定化制御」電気学会 システム制御研究会資料 SC-79-21 (1979)
- (3) 系統安定化専門委員会: 電気協同研究 34, 5, 248 (昭 54-1)
- (4) CIGRE Working Group: "Static Shunt Devices For Reactive Power Control" *CIGRE* 31-08 (1974)
- (5) A. Olwegard, et al: "Thyristor-Controlled Shunt Capacitors for Improving System Stability" *CIGRE* 32-20 (1976. 8~10)
- (6) 木下: 「静止形無効電力供給装置による 電力系統の動態安定度向上効果」電学論 B 99, 789 (昭 54-12)
- (7) 阿部, 他: 「状態フィードバックによる Power System Stabilizer の設計」電学論 B 100, 273 (昭 55-5)
- (8) P.Czech, et al: "Hydro-Quebec's Experience in Planning, Designing and Implementing Static Compensation Systems" *EPRI Transmission Static Var Systems Seminar* (1978)
- (9) 熊野, 他: 「無効電力補償装置による連系系統の安定化」電気学会論文 PCC-79-29 (昭 54)

に設置した場合である。連系点電圧の変動は抑えられるが、電力動揺のダンピングは改善されない。

$$\Delta Q_s = -\{20/(1+0.1s)\} \Delta V$$

5. む す び

連系々統に生じる減衰の悪い電力動揺を、無効電力制御装置 (SVS) を用いて安定化する方法について検討した。この結果、制御系は周波数応答法あるいは状態フィードバック法を用いて容易に設計でき、くし形系統の安定化のためには、(1)連系線電力微分形制御、(2)電源線電力積分形制御が有効であることが明らかになった。

また、SVS の電力系統内の配置については、(1)潮流計算および(2)固有値計算によって検討する方法を示した。

以上の成果は 3 機くし形系のシミュレーションによって、総合的に確認することができた。

電力動揺の安定化対策としては、既に PSS が実用化されて久しく、新設の発電所では常備されつつある。しかし、広域連系された系統にあっては、安定度