UDC 621.311.1.011.716 : 681.3.022 : 519.614

論文

60-B118

固有値制御法による SVC 設置系統の オンライン安定化

正員 大山 力 (横浜国立大)

正員 芹澤 康夫 (横浜国立大)

正員 関根 泰次 (東京大)

1. ま え が き

電力系統が大規模化して、電力輸送密度が大きくなるに従って、「安定度」の問題は、ますます重要になってくるものと考えられる。系統の安定度を向上させるために、様々な系統安定化対策が行なわれているが、今後は、更に応答の速い安定化装置が導入されることが予想される。このような安定化装置は、制御系が適切に設計された場合には大きな威力を発揮するものである。しかし、その反面、系統内の機器定数や制御系のパラメータ、動作点などの組み合わせが不適切である場合には、ダンピングの悪化、更には、不安定現象を生じやすくなることも考えられる。

系統を安定化する手法として、系統の固有値を観測し、それに基づいて、系統の動作点や制御系パラメータ等を調整すること(固有値制御法)が提案されている^{(2)~(6)}。固有値制御法は、線形領域の理論を用いたものであるため、動態安定度、中間領域安定度⁽¹⁾を改善するために特に有効な手法である。しかし、事故等の系統状態急変による過渡時には、動作点の変動や非線形性の影響があらわれるため、固有値制御法がどの程度有効であるかは明らかでない。そこで、ここでは変動する動作点を推定して、オンラインで固有値制御法を適用することにより、過渡的な安定度がどの程度改善できるかを検討した。

対象とした系統は、簡単な1機無限大系統であるが

応答の速い安定化装置の一例として、SVC(静止形無効電力補償装置)を中間地点に設置した場合および設置しない場合の双方についてシミュレーションによる検討を行なった。その結果、SVCを設置した場合に安定度の改善効果が大きいことが明らかになったので報告する。

2. 固有値制御法

あるシステムが与えられたとき、そのシステムが微小外乱に対して安定であるか不安定であるかは、動作点のまわりで線形化した状態方程式

$$\dot{x} = Ax \dots \dots \dots (1)$$

における行列[A]の固有値 λ_i を調べることによってわかる。固有値 λ_i の実部がより負であれば、システムはよりよい応答を示すわけである。

(1)式における行列[A]は、制御系などを含む全システムを動作点のまわりで線形化することによって得られるものである。そのため、制御系の利得を変化させたり、動作点を変化させたりすれば、当然、行列[A]も変化することになる。すなわち、行列[A]は、様々なパラメータ α_j (制御系利得、動作点など)の関数になっている。

パラメータ α_j が変化すれば、行列[A]の固有値 λ_i も変化するが、その感度は次式によって与えられる。

$$\frac{\partial \lambda_i}{\partial \alpha_j} = \frac{y_i^T \frac{\partial A}{\partial \alpha_j} v_i}{y_i^T v_i} \dots \dots \dots (2)$$

但し、 y_i は行列[A]の左固有ベクトル、 v_i

は行列[A]の右固有ベクトル

そこで、この固有値感度に基づいて、行列[A]の固有値 λ_i の実部がより小さくなるように、パラメー

On-line Stabilization of the Power System with SVC using Eigenvalue Control Method. By Tsutomu Oyama, Member, Yasuo Serizawa, Member (Yokohama National University) & Yasuji Sekine, Member (University of Tokyo).

大山 力: 正員, 横浜国立大学
芹澤康夫: 正員, 横浜国立大学
関根泰次: 正員, 東京大学

タ α_j を調整すれば、システムの応答は改善されることになる（このような方法を固有値制御法と呼ぶ）。

すべての固有値の実部を十分小さくすることができれば、最もよいわけであるが、一般にはそのようなことは実現が難しい。そこで、ここでは、システムの動特性に最も大きな影響を与えると思われる支配固有値（実部の最も大きい固有値）に着目し、その実部を減少させるようにパラメータ α_j を変化させることにする。パラメータ α_j の変化量は、以下に述べるように、線形計画法（LP）を応用して求めるものとする（この方法を「支配固有値最小化 LP」と呼ぶことにする）。

パラメータ α_j を変化させたときの固有値 λ_i の推定値 $\hat{\lambda}_i$ は、固有値の感度（(2)式）を使うと、

$$\hat{\lambda}_i = \lambda_i^0 + \sum_j \Delta\alpha_j \left(\frac{\partial \lambda_i}{\partial \alpha_j} \right)_{\lambda_i = \lambda_i^0} \dots\dots\dots (3)$$

但し、 $\Delta\alpha_j$ ：パラメータ α_j の変化量、 λ_i^0 ：

パラメータを変化させる前の固有値

となる。この推定値 $\hat{\lambda}_i$ の中で実部が最大となるものに注目し、その実部を小さくしようとするのが、支配固有値最小化 LP である。但し、固有値 λ_i の推定値 $\hat{\lambda}_i$ を求める式（(3)式）は、線形化した近似式であるので、パラメータの変化量 $\Delta\alpha_j$ が大きくなると成り立たなくなってしまう。そこで、パラメータの変化量 $\Delta\alpha_j$ があまり大きくならないように、制約をつける必要がある。

以上のことから、支配固有値最小化 LP は、次のように定式化される。

$$\text{Max}[Re(\hat{\lambda}_i)] \rightarrow \min \dots\dots\dots (4)$$

subject to

$$|\Delta\alpha_j| \leq d_{\max j} \text{ (all } j) \dots\dots\dots (5)$$

$$\hat{\lambda}_i = \lambda_i^0 + \sum_j \Delta\alpha_j \frac{\partial \lambda_i}{\partial \alpha_j} \text{ (all } i) \dots\dots\dots (6)$$

これによって求められた新しい α_j を使って、行列 [A] を修正し、その固有値 λ_i^{new} を算出してみて、修正前より支配固有値の実部が小さくなっていればよいわけである。

しかし、固有値の推定値を求める式（(3)式、(6)式）は、前述のように、近似式であるため、新しい固有値 λ_i^{new} を調べてみると、かえって支配固有値実部が大きくなっているような場合も考えられる。そのような場合には、パラメータの変化量 $\Delta\alpha_j$ が大きすぎるため、固有値の推定値を求める近似式が成立しなくなっているわけである。そこで、パラメータ変化量に対する制約（(5)式の $d_{\max j}$ ）を厳しくして、もう一度線形計画問題を解きなおす必要がある。

図 1 固有値制御のフローチャート

Fig. 1. Flow chart of eigenvalue control.

以上のことをまとめると、支配固有値最小化 LP による固有値制御のフローチャートは、図 1 のようになる。

このような固有値制御法は、以下のような特徴を持っている。

(1) 制御系の設計にあたっては、制御系の方式を与えて、利得、時定数などのパラメータの調整を行なうことになる。そのため、制御入力として使えるものが限られている場合（特に、大規模系では、すべての状態ベクトルを観測することは難しい）にも、容易に設計が行なえる。

(2) 固有値および固有値感度の算出には、かなりの計算時間を必要とするが、特に支配固有値に着目した場合には、高速計算法の適用が可能である。

(3) 繰返し計算一回ごとに、必ず特性が改善されていく手法である。そのため、計算時間に制約のあるオンライン制御などへの適用が可能である。但し、必ず真の最適解が得られるという保証はない。

3. オンライン固有値制御

固有値制御法を実際のシステムに適用する方法は、いくつか考えられる。例えば、代表的な動作状態を仮定して、固有値制御法によって制御系を設計することが考えられる。この場合は、運転中のパラメータ変更は行なわれないことになる。また、いくつかの動作状態に対して、(オフラインで)固有値制御法によるパラメータ計算を行なってテーブルを作成し、運転中にテ

一ブルを参照することによってパラメータ変更を行なう方法も考えられる。更には、時々刻々変化するシステムの動作状態に対応するため、オンラインで固有値制御法による計算を行ない、運転中にパラメータの変更を行なうことも考えられる。

ここでは、不測の事態にも対処できるという点を重視して、オンラインで固有値制御法による計算を行なう方法（オンライン固有値制御）を取り上げることにする。

オンライン固有値制御を、システム（ここでは電力系統）に適用するにあたって、次のような点に注意する必要がある。

〈3・1〉 動作点 固有値制御法は、システムの固有値を調べることによって、安定化をはかる手法である。固有値を用いているため、扱える対象は動作点のまわりで線形化したシステムだけになってしまう。そのため、動作点が求められないと、線形化ができず、固有値制御法を用いることはできない。しかし、外乱が大きい場合には、動作点（一般には最終的な平衡点）を求めることが難しい。

現実にはオンライン固有値制御を行なおうとすると、系統事故などの大きな外乱が起きたときでも、制御を続行する必要が生じてくる。系統動揺時のオンライン固有値制御では、まず最初に、動作点を仮定し、そのまわりで線形化を行なって固有値を求めるといった手順が必要となるわけである。

動作点を仮定する方法としては、例えば、(1)各発電機の機械的入力が一一定であるものとして（ガバナの効果を無視して）、最終的な平衡点を求める、(2)各発電機の内部相差角を基準にして動作点を決める、などが考えられる。

(1)の発電機の機械的入力を一定とするやり方はシステムの動作状態と線形化のための動作点がかかなり異なってしまう可能性があるため、非線形性の影響が大きく出る恐れがある。また、平衡点を求めるための計算時間がかかなりかかるものと考えられる。

(2)の内部相差角を一定にするやり方は、具体的には以下のような手順で行なう。

- ①：動揺中の各時点における各発電機の内部相差角を求める。（シミュレーション計算ですぐ求められるが、実際には電氣的出力などから推定する必要がある）
- ②：各発電機の内部相差角は、以後変動しないものとして（動揺中の一時点のまま固定されてしまうものと考えて）、他の状態変数の平衡点を求める。

この方法では、動揺中における各発電機の機械的入力と電氣的出力のアンバランスが無視され（機械的入力は電氣的出力と等しくなるように調整されるものと考えている）、また、相差角動揺中の各発電機の世界偏差 $\Delta\omega$ の影響も考慮されないことになる。

〈3・2〉 固有値制御の時間間隔 オンライン固有値制御を行なうためには、以下のような手順が必要である。

- (1) 系統の状態を測定する。もし、必要があれば、測定できない状態変数の推定を行なう。
- (2) 動作点を推定し、それに基づいてシステムの線形化を行なう。
- (3) 各固有値のパラメータに対する感度を計算する。
- (4) 線形計画法などによって、各パラメータの操作量を決定する。
- (5) パラメータを操作する。

このような手順には、ある程度の時間が必要である。そのため、必要な制御時間（固有値制御計算時間＋制御操作時間）を ΔT_c とすると、オンライン固有値制御のタイムチャートは、図2のようになる。

事故などによる系統の変化が起る時点としては、図からも明らかなように、系統データの取り込みの直後が最も厳しいことになる。このような場合には、系統の変化に対応した制御が行なわれるまでに、制御時間 ΔT_c の約2倍の時間がかかるわけである。シミュレーションなどによって、固有値制御の有効性を調べる場合には、上述の最も厳しい時点における事故を扱うのが望ましい。

〈3・3〉 常時制御 事故などが起きていず、系統が準定常状態にあるような場合にも、小さな外乱に対するダンピングの最大化をはかるために、常にオンライン固有値制御を行なうものとする。このような制御を行なえば、大きな外乱が与えられたときを除いて、系統内の各パラメータは、支配固有値の実部極小の状態に、常時調整されていることになる。

図2 オンライン固有値制御のタイムチャート
Fig. 2. Time chart of on-line eigenvalue control.

図 3 モデル系統

Fig. 3. Model system.

表 1 系統の各種定数 (p. u., sec.)
Table 1. Constants in model system.

発 電 機	X_d	1.5	X_d'	0.2
	X_d''	0.15	X_q	1.5
	X_q'	0.4	X_q''	0.15
	X_l	0.12	r	0.001
	τ_{d0}'	4.3	τ_d''	0.035
	τ_q''	0.035		
	H	3.0	D	4.0
送 電 線	X_e	1.2	r_e	0.04

4. 一機無限大系統のシミュレーション

まず最初に、固有値制御法を一機無限大系統に適用した場合について、シミュレーションによって検討を行なう。

〈4.1〉 モデル系統 ここで扱うモデル系統は、図3のような一機無限大系統とする。各種定数は、表1に示すとおりである。

制御系としては、次式に示すような一次遅れの簡単な発電機 AVR を考えることにする。

$$\Delta V_f = \frac{K_a}{1 + T_a S} \Delta V_t \dots \dots \dots (7)$$

そして、固有値制御法によって、AVR の時定数 T_a および利得 K_a が決められるものとする (但し、 $T_a \geq 0.2$ 秒とする)。固有値制御に必要な線形化のための

動作点の推定方法は、発電機の機械的入力が一であるものとして最終的な平衡点を計算し、それを動作点とする方法を採用した。制御法としては、オンライン固有値制御が系統の変化に対応して瞬時に行なわれ、時定数、利得が変化するような理想の場合 (制御時間 $\Delta T_e = 0$ に相当する (ケース 1)), および事故前の常時は固有値制御によってパラメータが設定されているが、事故後は有効な時間内には固有値制御によるパラメータ変更が行なわれない場合 ($\Delta T_e = \infty$ に相当 (ケース 2)) の両極端を考えることにする。

〈4.2〉 シミュレーション結果 ここでは事故の例として、 $t=0$ において送電線が一回線開放された場合のシミュレーションを行なった。

事故前の発電機内部相差角 δ を変化させて、一回線開放後も脱調に至らないような安定限界相差角 δ_c を調べてみると、

$$\delta_c = 1.21 \text{ rad (ケース 2)} \dots \dots \dots (8)$$

$$\delta_c = 1.22 \text{ rad (ケース 1)} \dots \dots \dots (9)$$

となり、1 回線開放後のオンライン固有値制御の有無による安定限界相差角 δ_c の差は、ほとんどなかった。事故前の発電機内部相差角 δ が、1.21 rad および 1.22 rad の場合の相差角動揺の様子を図4および図5に示す。なお、それぞれの場合の AVR の時定数、利得は、固有値制御法によって、表2に示すように設定

表 2 固有値制御法による AVR パラメータ
Table 2. Obtained AVR parameters using eigenvalue control method.

初期内部相差角 (rad)	事 故 前		事故後 (ケース 1)	
	T_a	K_a	T_a	K_a
1.21	0.25	-0.19	0.20	-0.38
1.22	0.26	-0.20	0.20	-0.39

図 4 シミュレーション結果 ($\delta_0 = 1.21$ rad)

Fig. 4. Simulation result.

図 5 シミュレーション結果 ($\delta_0=1.22$ rad)

Fig. 5. Simulation result.

されている。

この例では制御系などのパラメータの設定が不適切であるため生ずるような不安定現象（いわゆる中間領域不安定現象⁽¹⁾）に関連する）はあらわれにくく、第一波の電力動揺による脱調現象によって安定限界が定まってしまう（図 5 参照）。そのため、オンライン固有値制御による安定領域の拡大効果がほとんどないものと考えられる。しかし、安定領域内で比較してみれば（図 4 参照）、明らかにダンピングが改善されていることがわかる。

5. SVC 設置システムのシミュレーション

次に応答の速い安定化装置として、SVC を、送電線中間地点に設置した場合について検討を行なう。

SVC は、制御性がよく、応答が速いため、定態安定極限電力の増大効果だけでなく、動態および過渡安定度の改善にも役立つものと期待されている。しかし、その反面、制御方法を誤ると、かえって安定度が悪化してしまうような場合も考えられ、また、システムの運用状態（動作点など）の影響もうけやすいものと思われる。

〈5・1〉 モデル系統 ここで扱うモデル系統は、図 6 のような中間地点に SVC を設置した一機無限大系統である。発電機および送電線の各種定数は、表 3 に示すとおりである。

制御系としては、発電機 AVR（図 7）および SVC 制御系（図 8）の二つを考慮した。それぞれの入力には、その設置場所の電圧（発電機端子電圧 V_t 、または中間地点電圧 V_c ）と角周波数 ω である。入力に角周波数 ω を用いたのは、制御系によるダンピング改善効果を期待したためである（位相補償量も固有値制御法

図 6 SVC 設置系統

Fig. 6. Model system with SVC.

表 3 SVC 設置システムの各種定数 (p. u., s.)

Table 3. Constants in model system with SVC.

発電機	X_d	1.5	X_d'	0.2
	X_d''	0.15	X_q	1.5
	X_q''	0.15	X_l	0.12
	τ_{d0}'	4.3	τ_{d0}''	0.04
	τ_{q0}''	0.1		
	H	3.0	D	2.0
送電線	X_s	0.6	X_R	0.6

図 7 AVR ブロック図

Fig. 7. Block diagram of AVR.

によって決定すれば、更に有効な制御が行なえるものと考えられるが、簡単のため、ここでは省略した）。なお、制御系の各時定数は、それぞれ、

$$\begin{aligned} \text{AVR} \quad & \begin{cases} T_a=0.3 \text{ s} \\ T_F=1.0 \text{ s} \end{cases} \dots\dots\dots (10) \\ \text{SVC} \quad & T_c=0.1 \text{ s} \end{aligned}$$

図 8 SVC 制御系ブロック図

Fig. 8. Block diagram of SVC controller.

とする。

〈5・2〉 固有値制御法による制御系の設計 まず、動作点が様々に変化した場合の固有値制御法の効果を調べてみることにする。固有値制御法によって変化させるパラメータは、ここでは、AVR および SVC 制御系の利得 K_{av} , K_{aw} , K_F , K_{cv} , K_{cw} (図7, 図8参照) の5つである。

送電電力を変化させ、それぞれの定常状態において固有値制御法で各利得を決定すると、図9のようになった。また、そのときの支配固有値実部を図10に示す。図10には参考のため、固有値制御を行わない場合 (ケースIおよびケースII—表4参照) の支配固有値実部の変化も示してある。

図10を見ると、固有値制御を行わない場合には送電電力の小さいところ (軽負荷時) と大きいところ (重負荷時) で支配固有値実部が0に近づき、ダンピングが悪化していることがわかる。

〈5・3〉 オンライン固有値制御の効果 次に事故時のシミュレーションによって、オンライン固有値制御による安定度の改善効果について検討する。

想定する事故は以下のようなものである。

- (1) $t=0$ s で、送端側2回線のうち1回線が SVC に近い地点で3線地絡
- (2) $t=0.08$ s で、故障回線の三相遮断
- (3) 無電圧時間 1.5 s (厳しい故障条件とするため、長めにしている) の後、 $t=1.58$ s で三相再閉路

このような事故条件では、固有値制御を行わない場合 (表4のケースIIの場合) の脱調に至らないための限界送電電力 P_c は、シミュレーション結果より、

$$P_c = 0.89 \text{ p.u.} \quad (11)$$

である (図11)。

また、事故前に、〈5・2〉節で述べたように、固有値制御法によって制御系利得を設定した場合 (但し、事故後にオンライン固有値制御は行わない) には、限界送電電力 P_c は、

図 9 制御系利得変化

Fig. 9. Change of controller gains.

図 10 支配固有値実部変化

Fig. 10. Change of the real part of the dominant eigenvalue.

表 4 固有値制御なしの場合の制御系利得

Table 4. Controller gains without eigenvalue control.

	K_{av}	K_{aw}	K_F	K_{cv}	K_{cw}
ケースI	-5.0	0	0	-5.0	0
ケースII	-10.0	0	0	-10.0	0

$$P_c = 0.91 \text{ p.u.} \quad (12)$$

と、約2%増大する (図12)。

オンライン固有値制御を行なうにあたって必要となる動作点の推定方法として、ここでは、発電機の内部差角を基準とするものを採用する。この方法では〈3・1〉節で述べたように発電機の機械的入力と電氣的出力のアンバランスが無視されることになってしまい、相差角動揺の影響も考慮されることになる。しかし、現実のシステムへの適用を考えると、動作点の推定のための計算時間があまりかからず、比較的やりや

図 11 シミュレーション結果
(固有値制御なし—ケースⅡ)

Fig. 11. Simulation result (without eigenvalue control—case II).

図 12 シミュレーション結果
(オフライン固有値制御)

Fig. 12. Simulation result (Off-line eigenvalue control).

すい方法だということができる。

また、事故時点とシステムデータの取込み時点の関係としては、〈3・2〉節で述べた最も厳しい状況を考えることにする。すなわち、システムデータの取込みの直後に事故が起るような場合を想定するわけである。この場合にはオンライン固有値制御による有効なパラメータ変化は、事故発生から制御間隔 ΔT_e の2倍だけ時間が経過しないと行なわれないことになる。

制御間隔 ΔT_e を変化させて、それぞれの場合の限界送電電力 P_c を調べてみると、次のようになった。

$$\left. \begin{aligned} P_c &= 0.91 \text{ p.u. } (\Delta T_e = 1.0 \text{ s}) \\ P_c &= 0.95 \text{ p.u. } (\Delta T_e = 0.5 \text{ s}) \\ P_c &= 1.02 \text{ p.u. } (\Delta T_e = 0.2 \text{ s}) \end{aligned} \right\} \dots\dots (13)$$

これを図示したものが図13である。また、制御間隔 ΔT_e が0.2秒で、送電電力が限界 (P_c) となっている場合のシミュレーション結果を図14に示す。

図14をみると、第1回目の有効なパラメータ変化

図 13 限界送電電力

Fig. 13. Limit of transmission power.

図 14 シミュレーション結果
(オンライン固有値制御— $\Delta T_e = 0.2$ 秒)

Fig. 14. Simulation result (On-line eigenvalue control— $\Delta T_e = 0.2$ s).

が行なわれる ($\Delta T_e \times 2 = 0.4$ s) までは発電機は急速に加速されているが、それ以後は加速が鈍り、再閉路が行なわれてからは減速に転じて安定が保たれていることがわかる。

以上のことより、制御間隔 ΔT_e と限界送電電力 P_c の関係について、次のことがわかる。

(1) 制御間隔 ΔT_e が短いほど、限界送電電力 P_c が大きくなる。特に制御間隔 ΔT_e が0.2秒である場合には、限界送電電力 P_c が、固有値制御を行なわない場合と比べて約15%、事故前に固有値制御を行なう場合 (但し、オンライン固有値制御は行なわない) と比べても約12%だけ増加している。

(2) 制御間隔 ΔT_e が1秒以上になると、オンライン制御の効果がなくなる。これは、想定している事故条件が、事故発生から2秒弱で正常に復帰するものであること、および、最初に有効なパラメータ変化が行なわれるのは制御間隔 ΔT_e の2倍の時間が経過してからとなっていることを考えれば、理解しやすい結果である。事故時点とシステムデータ取込み時点の関係を

少し緩くしたり、また、想定事故として異なるものを考えれば、オンライン制御が有効となるような制御間隔 ΔT も変化するものと考えられる。

〈5・4〉 固有値制御に要する計算時間 本シミュレーションにおいて、固有値制御の一回の繰返し計算に要した時間は、東京大学大型計算機センターの HITAC S-810 を用いて、約 0.15 秒であった。ここで使用しているプログラムは、計算時間の短縮についてあまり考慮していない冗長なものであり、固有値、固有ベクトルの算出なども汎用のライブラリ・プログラムを利用している。そのため、まだ数割から数倍程度の計算の高速化は可能であるものと考えられる。しかし、今後、更に大規模な系統へ適用することを考えると、より高速な計算手法（例えば固有値計算において、支配固有値のみを算出する手法など）を開発する必要がある。

6. ま と め

オンライン固有値制御法の適用による安定度の改善効果を、2 種類のモデル（一機無限大系統および SVC 設置系統）で検討した。それによって、以下のことがわかった。

（1）一機無限大系統のような簡単な系統で、しかも即応制御を行なわない場合には、オンライン固有値制御による安定度（特に過渡安定度）の改善効果はほとんどない。しかし、系統動揺時のダンピングの改善効果は大きい。

（2）SVC のような応答の速い機器を導入すると、

制御系のパラメータなどの設定によって、系統に不安定現象が発生する可能性が大きくなる。そのような場合には、オンライン固有値制御による安定度の改善が望める。

（3）オンライン固有値制御による安定度の改善効果は、制御間隔が短いほど大きい。但し、計算時間との関係から、制御間隔はいくらでも短くできるわけではない。

より大規模で、多数の安定化機器が設置されているような系統を対象とすれば、更にオンライン固有値制御による安定度の改善効果は大きくなるものと考えられる。しかし、大規模になればなるほど、制御に要する計算時間が長くなってしまう。そこで、今後は、系統の適切な縮約法、分割法、更には、固有値の高速計算法などにより、計算時間の短縮をはかっていく必要がある。なお、本研究は、文部省科学研究費の援助を受けて行なったものである。

（昭和59年12月20日受付，同60年4月25日再受付）

文 献

- （1）関根，他：「電力系統の安定度」電気協同研究 34, 5 (昭 54)
- （2）駒井・関根：「固有値制御による直列コンデンサ補償系統の安定化」電気学会電力技術研究会資料 PE-83-41 (昭 58)
- （3）金・関根：「固有値感度解析と固有値制御」電気学会電力技術研究会資料 PE-83-46 (昭 58)
- （4）駒井・関根：「固有値制御による中間領域安定度の安定化」電気学会電力技術研究会資料 PE-84-76 (昭 59)
- （5）大山・芹澤・関根：「固有値制御法による電力系統のオンライン安定化」電気学会電力技術研究会資料 PE-84-77 (昭 59)
- （6）駒井・金・関根：「固有値制御による電力系統の安定化」電学論 B, B 104, 741 (昭 59-11)