

電力系統過渡安定度向上対策のパラメータ感度解析

佐藤 義則*・村井 国昭*・長谷川 淳**

Parameter Sensitivity Analysis of the Improvements of Power System Transient Stability

Yoshinori SATO, Kuniaki MURAI and Jun HASEGAWA

要 旨

電力系統の過渡安定度向上対策として用いられる制動抵抗、直列コンデンサの投入による効果を、リアプノフ関数を用いた過渡安定度指標のパラメータ感度変化として評価した。投入による安定度の向上は感度係数の減少と対応していることがわかった。

Synopsis

Effectiveness of improving power system transient stability by means of braking registers and switched series capacitors are evaluated by the method of parameter sensitivity analysis proposed by the authors in the previous papers.

Numerical results of the one-machine infinite bus power system model shows good correspondence between stability indices and parameter sensitivity coefficients.

1. 緒 言

長距離、大容量化する電力系統の過渡安定度向上対策として、制動抵抗、直列コンデンサが注目され、実用に供されて既に久しい。制動抵抗は中部電力尾鷲三田火力、275 kV 2 回線の安定度向上対策として、又直列コンデンサは関西電力の北陸幹線 275 kV 系統、米国 B・P・A 社主幹系統等において送電容量増加対策を兼ねて設置され、効果をあげている。

このような安定度向上対策の効果を定量的に評価する方法として、筆者等はリアプノフ関数に基づく安定度指標を用いた評価方法を提案してきた。⁽¹⁾⁽²⁾本来、リアプノフ関数を用いた安定度解析手法は、故障除去時間をパラメータとした状態空間における安定領域の決定、或いは安定判別に用いられてきたが、⁽³⁾⁽⁴⁾指標化することによって、より定量的な把握が可能になったと考える。

前報において、システム中のパラメータ群の変動の影響を、安定度指標に対する感度として解析した結果を報告したが、⁽⁵⁾⁽⁶⁾⁽⁷⁾今回、安定度向上対策をシステム＝パラメータの変動として捉え、投入による影響を安定度指標に対して感度解析したので報告する。尚、解析方法は概ね前報と同様であるが、向上対策投入時に系の運動を評価するかどうかの相違がある。

2. 解 析 方 法

2. 1 安定度向上対策

考察した安定度向上対策は上に述べた制動抵抗と直列コンデンサである。各方式の説明は前報に述べたので、ここでは定式化に必要な線路定数と送電端有効電力のみを示す。

2. 1. 1 並列制動抵抗方式

故障除去後、コンダクタンス G なる制動抵抗を投入した場合の四端子定数は次式となる。

* 助教授 電気工学科

** 助教授 北海道大学工学部電気工学科

$$\begin{bmatrix} A, B \\ C, D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1+jGX_s, -G \cdot X_L \cdot X_s + j(X_L + X_s) \\ G, 1+jG \cdot X_L \end{bmatrix} \dots\dots\dots(1)$$

従って送電端有効電力 P_s は次式で与えられる。

Fig-1 参照。

$$P_s = \frac{GX_L(X_L + X_s)}{G^2 X_L^2 X_s^2 + (X_L + X_s)^2} E_s^2 - \frac{E_s \cdot E_R}{\sqrt{G^2 X_L^2 X_s^2 + (X_L + X_s)^2}} \cos(\theta + \theta_b) \dots(2)$$

$$\text{ただし、} \theta_b = \tan^{-1} \left(\frac{X_L + X_s}{GX_L X_s} \right)$$

2. 1. 2 直列制動抵抗方式

故障時或いは故障除去後、制動抵抗 R を主回路中に投入すると四端子定数有効電力はそれぞれ次式で与えられる。

$$\begin{bmatrix} A, B \\ C, D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1, R+j(X_L + X_s) \\ 0, 1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots(3)$$

$$P_s = \frac{R}{R^2 + (X_L + X_s)^2} E_s^2 + \frac{E_s E_R}{\sqrt{R^2 + (X_L + X_s)^2}} \sin(\theta - \theta_s) \dots(4)$$

$$\text{ただし、} \theta_s = \tan^{-1} \left(\frac{X_L + X_s}{R} \right)$$

2. 1. 3 直列コンデンサ方式

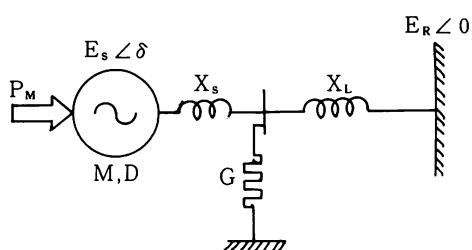
故障除去後に X_c の大きさの容量性リアクタンスを投入した時の四端子定数、送電端有効電力は次式で与えられる。

$$\begin{bmatrix} A, B \\ C, D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1, j(X_L + X_s - X_c) \\ 0, 1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots(5)$$

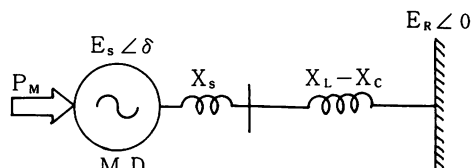
$$P_s = \frac{E_s E_R}{X_L + X_s - X_c} \sin \theta \dots\dots\dots(6)$$

2. 2 モデル系統と感度解析

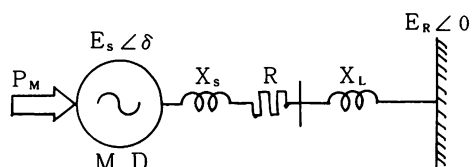
モデル系統として Fig-1 の一機無限大母線系統を考える。この系の運動方程式は、通常の過渡安



(a) 並列制動抵抗



(b) 直列コンデンサ



(c) 直列制動抵抗

Fig-1 Model Power System

定度解析において行われる諸仮定の下で次式により表わされる。

$$M\ddot{X} + D\dot{X} = P_M - P_s \dots\dots\dots(7)$$

$$X = \theta - \theta_s \dots\dots\dots(8)$$

ここで

M : 発電機慣性定数 (p.u. 値)

D : " 制動係数 (")

P_M : " 機械的入力 (")

P_s : " 電気出力 (= 送電端有効電力)

E_s : " 内部誘起電圧 (p.u. 値)

E_R : 無限大母線電圧 (")

X_s : 発電機過渡リアクタンス (")

X_L : 送電線リアクタンス (")

X^c : 直列コンデンサ容量 (")

G : 並列制動抵抗容量 (")

R : 直列 " " (")

θ : E_s, E_R 間の相差角

θ_s : 安定平衡点における相差角の値

$\dot{X} = d\theta/dt, \ddot{X} = d^2\theta/dt^2$ t は時間

また、この系に対するリアプノフ関数と過渡安

定度指標は、それぞれ次式で表わされた。⁽⁴⁾

$$V(X, \dot{X}) = \frac{\dot{X}^2}{2} + \frac{1}{M} [P_M(\sin X - X) + \sqrt{P_{em}^2 - P_M^2} \cdot (1 - \cos X)] \quad \cdots(9)$$

$$\xi = 1 - \frac{V(X, \dot{X})}{[2\sqrt{P_{em}^2 - P_M^2} - P_M(\pi - 2\delta_s)]/M} \quad \cdots(10)$$

ただし、 $P_{em} = E_s \cdot E_R \cdot Y_{SR}$ であり、 Y_{SR} は発電機と無限大母線間の等価伝達アドミタンスである。

(7)式で表わされる系の独立な4個のパラメータに関する感度方程式は、前報⁽⁵⁾と同様であり、以下のようになる。

$$M\ddot{U}_M + D\dot{U}_M + P_{em}U_M \cos(X + \theta_s) = -\dot{X} \quad \cdots(11)$$

$$M\ddot{U}_D + D\dot{U}_D + P_{em}U_D \cos(X + \theta_s) = -\dot{X} \quad \cdots(12)$$

$$M\ddot{U}_{P_{em}} + D\dot{U}_{P_{em}} + P_{em}U_{P_{em}} \cos(X + \theta_s) = -\sin(X + \theta_s) \quad \cdots(13)$$

$$M\ddot{U}_{P_M} + D\dot{U}_{P_M} + P_{em}U_{P_M} \cos(X + \theta_s) = 1 \quad \cdots(14)$$

リアプノフ関数に基づく過渡安定度指標(10)式の、4個のパラメータに対する感度係数は前報(5)より、それぞれ次式となる。

$$\xi_M = \frac{-1}{V_{MAX}} \left\{ \frac{\dot{X}^2}{2} + M\dot{X}\dot{U}_M + p_{em} \cdot u_M [\sin(X + \theta_s) - \sin \theta_s] \right\} \quad \cdots(15)$$

$$\xi_D = \frac{-1}{V_{MAX}} \left\{ M\dot{X}\dot{U}_D + p_{em} \cdot u_D [\sin(X + \theta_s) - \sin \theta_s] \right\} \quad \cdots(16)$$

$$\xi_{P_{em}} = \frac{-1}{V_{MAX}} \left\{ M\dot{X}\dot{U}_{P_{em}} + p_{em} \cdot u_{P_{em}} [\sin(X + \theta_s) - \sin \theta_s] + \frac{1 - \cos X}{\cos \theta_s} \right\} + \frac{2 \cdot V(X, \dot{X})}{\cos \theta_s \cdot V_{MAX}^2} \quad \cdots(17)$$

$$\xi_{P_M} = \frac{-1}{V_{MAX}} \left\{ M\dot{X}\dot{U}_{P_M} + p_{em} \cdot u_{P_M} [\sin(X + \theta_s) - \sin \theta_s] + (\sin X - X) - \tan \theta_s (1 - \cos X) \right\} - \frac{V(X, \dot{X})}{V_{MAX}^2} [2 \tan \theta_s + (\pi - 2\theta_s)] \quad \cdots(18)$$

ただし、 $V_{MAX} = 2\sqrt{p_{em}^2 - p_M^2} - p_M(\pi - 2\theta_s)$

以上より、解析方法は(7)式で与えられる系の運動方程式と、(11)~(14)式で与えられる感度微分方程式を連立して解き、各安定度向上対策投入時毎に(2)式、(4)式、(6)式が組み込まれて(10)式及び(15)~(18)式の安定度指標、感度係数が評価されることになる。したがって、各向上対策の投入量をパラメータにとれば、投入による効果が最終的に(15)~(18)式の各パラメータ感度係数の変化として評価することが可能である。その結果、安定度指標と感度係数は各方式ごとに、同時に評価される訳である。

3. 数 値 例

前述の解析方法に従って計算機シミュレーションを行った。モデル系統はFig-1の一機無限大母線系統であり、故障として送電端の3相短絡接地($E_s = 0$)を考え、一定の故障継続時間の後、故障除去、各方式の投入、というシーケンスで行った。計算の概略をFig-2に示す。又、使用したデータは前報のものと同じである。各方式の投入量としては、 X_c が0~1.2 [p.u.]で最大値が線路リアクタンスを完全補償する値までとした。 G は0 (=短絡接地状態)~10 [p.u.]まで、 R は0~1.0 [p.u.]までの範囲でシミュレーションを行った。

Fig.3は、各方式を投入しない場合の安定度指標の感度係数 ξ_M である。この系の臨界故障除去時間、 $T_{sw} = 0.21$ 秒である。0.21秒以内の故障除去に対して ξ_M はほとんど一定であるが、これを過ぎた故障除去に対して ξ_M は大きく変化しているこ

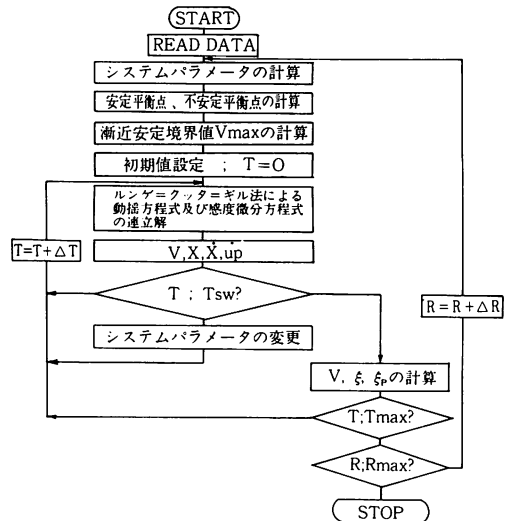


Fig-2 Flow Chant for Analysis

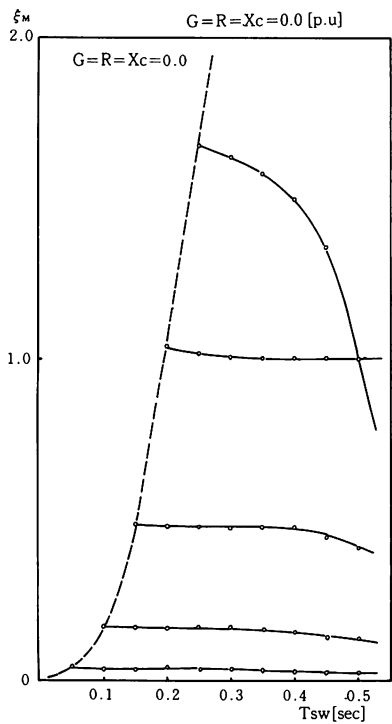


Fig-3

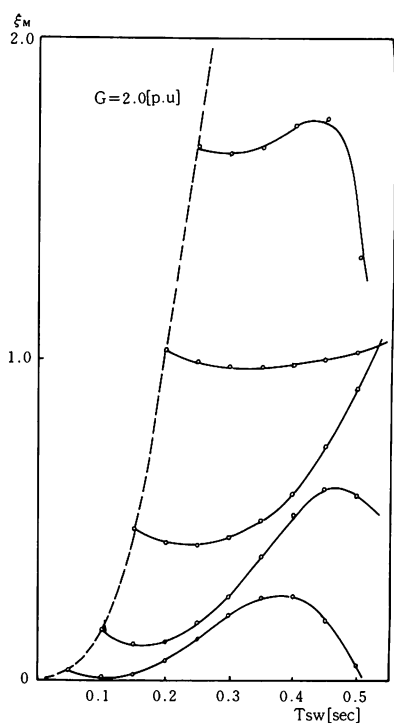


Fig-4

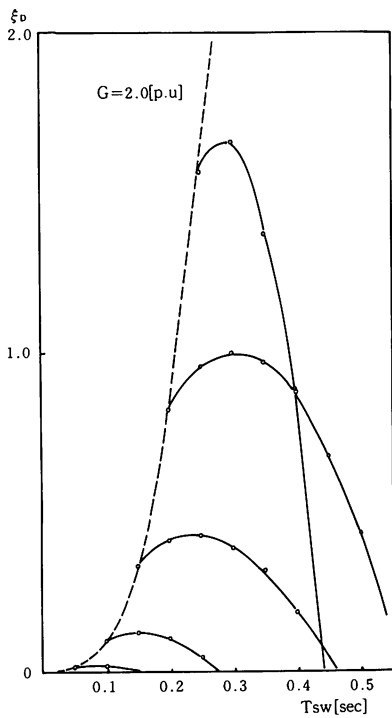


Fig-5

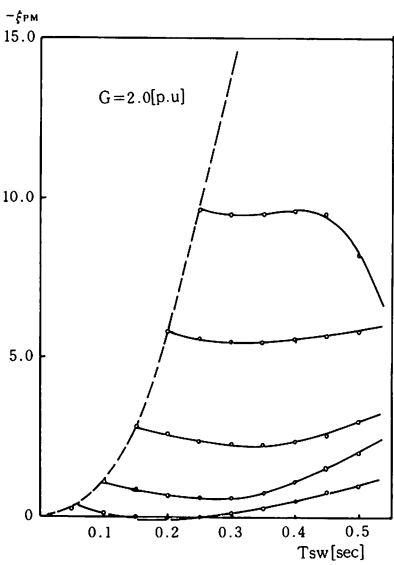


Fig-6

とがわかる。

Fig-4～Fig-7には並列制動抵抗 $G=2.0$ [p.u.] 投入時の、パラメータ M, D, P_M, P_{EM} の感度係数の時間変化をそれぞれ示す。また、Fig-8～Fig-11には直列制動抵抗 $R=0.4$ [p.u.] 投入時の感度係数の時間変化を、Fig-12～Fig-15には直列コンデンサ $X_C=0.15$ [p.u.] 投入時の感度係数の時間変化をそれぞれ示す。

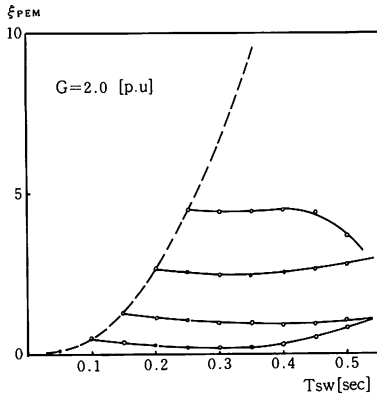


Fig-7

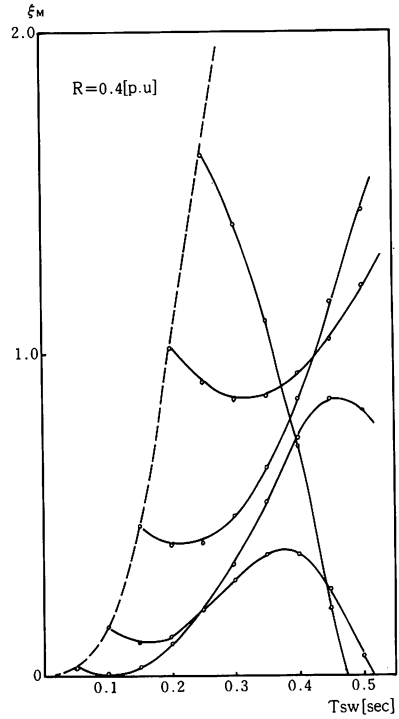


Fig-8

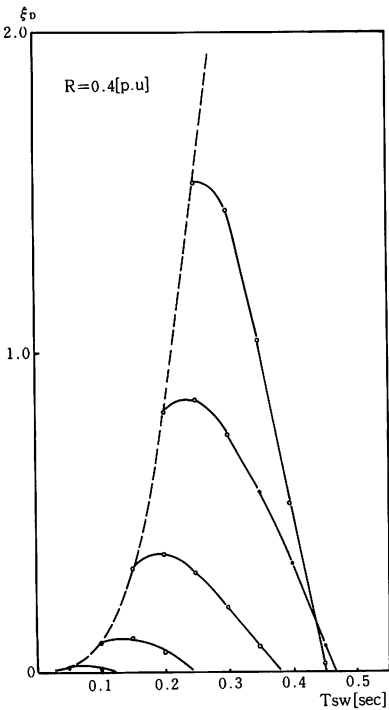


Fig-9

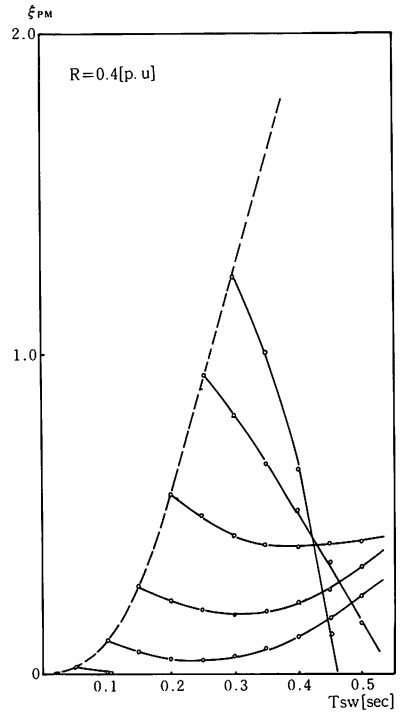


Fig-10

Fig-16~Fig-18はそれぞれ、 $G=2.0(p.u.)$, $R=0.2(p.u.)$, $X_c=0.15(p.u.)$ 投入時の故障除去時間 $T_{sw}=0.21$ 秒の場合の感度係数の時間変化と、安定度指標 ξ の時間変化を各方式別に対比してある。また、Fig-19は、 $G=2.0(p.u.)$ の場合の ξ と各パラメータ感度係数の変化の大きさを比較したものである。

以上の図より、それぞれの安定度向上対策が安

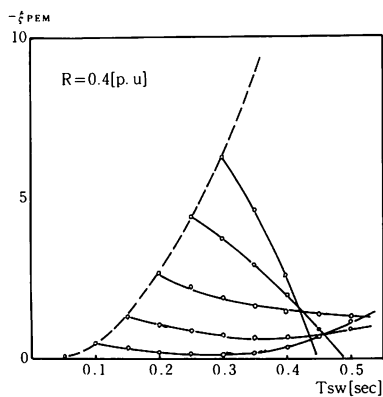


Fig-11

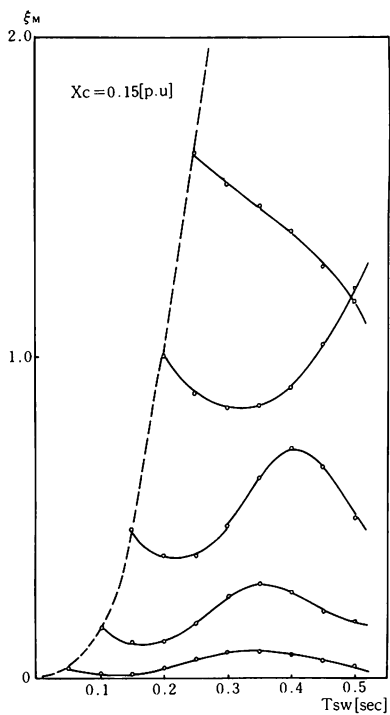


Fig-12

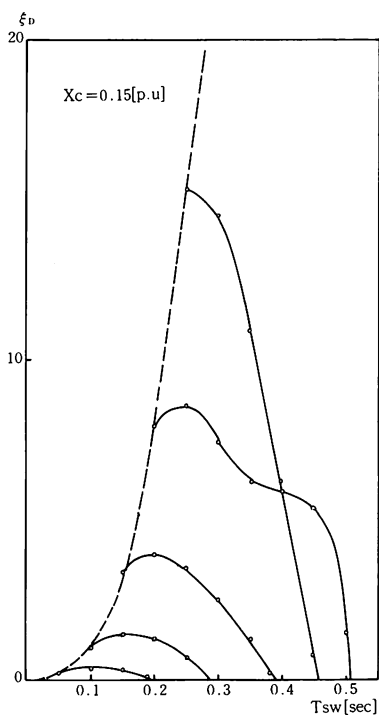


Fig-13

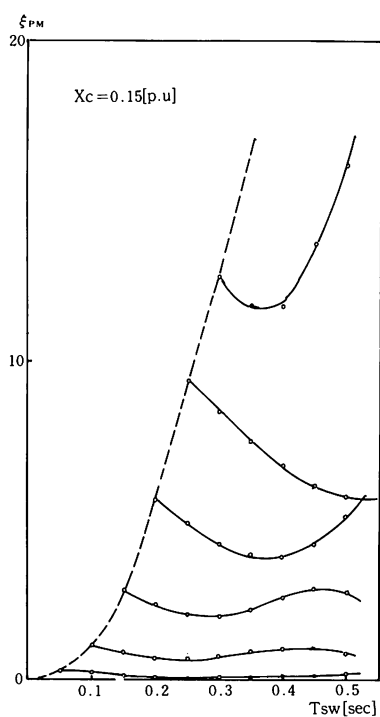


Fig-14

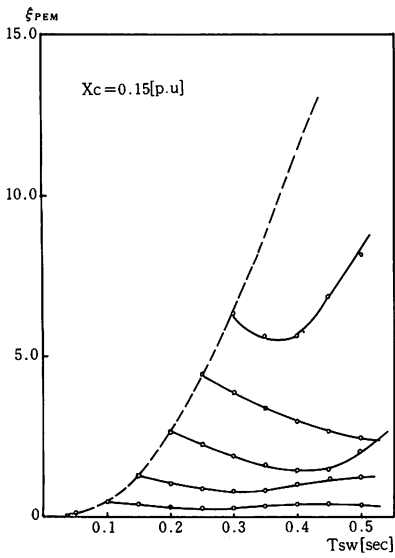


Fig-15

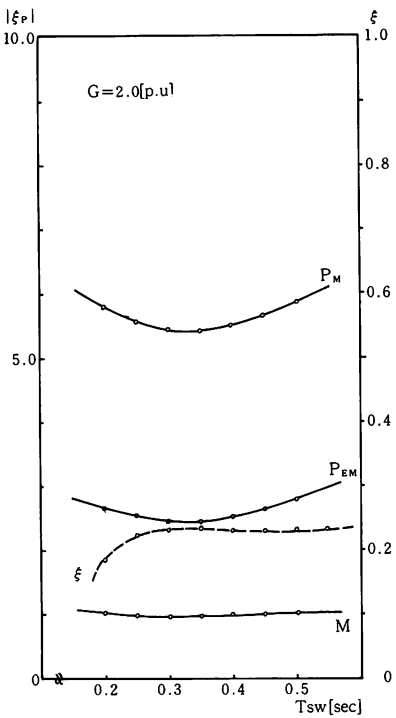


Fig-16

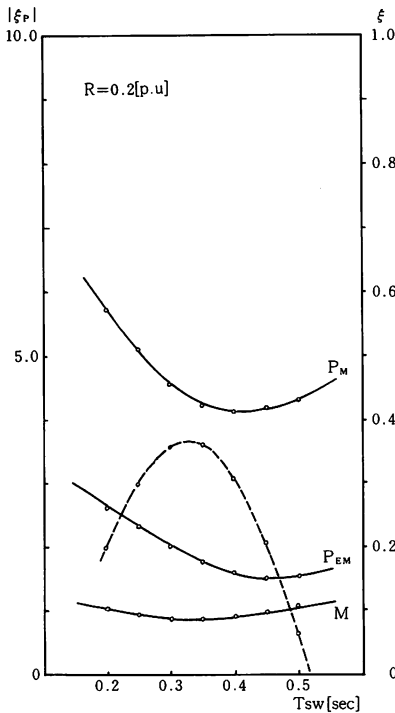


Fig-17

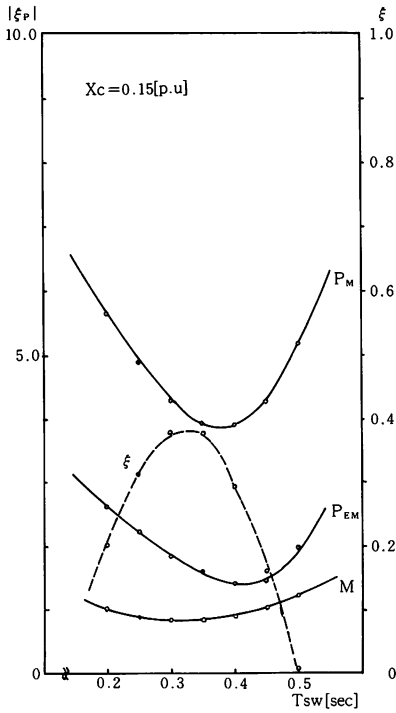


Fig-18

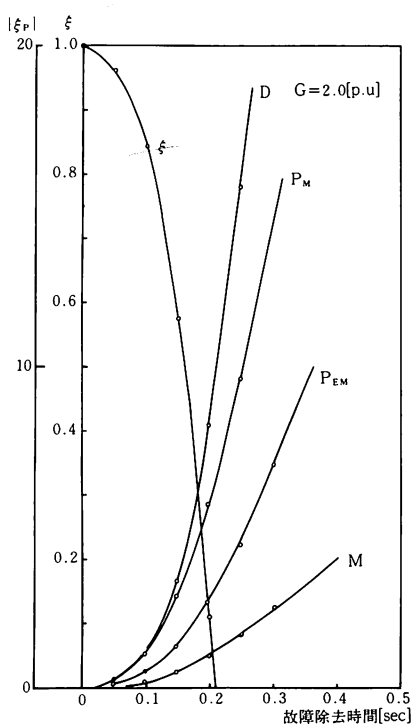


Fig-19

定度指標の感度係数に及ぼす影響、各方式毎の影響の相違等が視察される。

4. 結果と結言

電力系統の過渡安定度向上対策をパラメータ感度解析の手法によりシミュレーションを行った。その結果一機無限大母線系統において、事故等で状態急変時に大きなパラメータ変化を生じた際、オープンループの制御を加えた場合、つまり、制動抵抗、直列コンデンサ等の投入によって、安定度指標の感度係数がどのように変化するか把握できた。

すなわち、無対策時には ξ は単調減少するが任意のパラメータ P に関する感度係数 ξ_P は単調増

加する。また、各方式の投入によって、 ξ はその系の状態によって極値を持つが⁽¹⁾、 ξ_P もまたその系の状態（相差角と角速度）に応じて極値をもつことがわかった。

今後はさらに、各方式ごとの投入効果を考慮して、最も感度の大きいパラメータを制御変数として、閉ループの最小感度制御系の構成等について考察を進めて行きたい。

最後に、日頃御指導いただく北海道大学工学部西谷健一助手に深く感謝致します。

参 考 文 献

- (1) 佐藤他, Lyapunov 関数による過渡安定度向上効果の定量的評価
苫小牧高専紀要, 第 12 号, 1977
- (2) 佐藤他, 電気学会北海道支部連合大会論文集No.78, 1976
- (3) A・H・El-Abiad et al. IEEE Trans. PAS-85, No. 2 pp169.1966
- (4) 村井他, 段々法とリアプノフ関数法による過渡安定度解析の比較
苫小牧高専紀要, 第 15 号, 1980
- (5) 佐藤他, 電力系統のパラメータ感度解析
苫小牧高専紀要, 第 14 号, 1979
- (6) 佐藤他, 電力系統安定度のマルチパラメータ感度解析
苫小牧高専紀要, 第 15 号, 1980
- (7) 佐藤他, 電気学会北海道支部連合大会論文集No.53, 1979
- (8) R. Tomovic; Sensitivity Analysis of Dynamical Systems. (McGraw-Hill), 1963
- (9) E.W..Kimbark, IEEE. Trans. PAS-85, No. 2 pp 180.1966
- (10) O.J.M.Smith, IEEE. Trans. PAS-88, No. 1 pp28. 1969
- (11) 佐藤他, 電気学会北海道支部連合大会論文集No.50, 1980

(昭和 55 年 12 月 1 日受理)