

電力系統の確率的過渡安定度評価

—— 安定度向上対策の定量的比較 ——

佐藤 義 則*・村 井 国 昭**
西 谷 健 一***・長谷川 淳****

Probabilistic Evaluation of Transient Stability of Electric Power Systems.
—— Quantitative Comparison between Stability Improving Counter-measures ——

Yoshinori SATO and Kuniaki MURAI
Kenichi NISHIYA and Jun HASEGAWA

要 旨

確率的過渡安定度モデルに基づいた安定度指標によって様々な過渡安定度向上対策を評価すると同時に、それらの安定化対策が導入されたことによる系統内の他の部分への影響を全域的効果と局所的効果という観点から把握し、 Γ 平面という新しい概念を導入して定量的に評価することを試みている。これにより、従来の臨界故障除去時間という安定化の大きさのみの指標に加えて安定化対策の系統内での平面的な波及効果をも定量的に把握することが可能となった。

Synopsis

In this paper, We attempted to evaluate the globality and the locality of stabilizing effect of power system transient stability enhancing equipments such as the switched series capacitors (Sr. C), the power system stabilizers (PSS), the static Var compensators (SVC) and the super-conducting magnetic energy storage systems (SMES).

In order to evaluate the effect of these stabilizing equipment, We defined the variance of the probabilistic stability indices σ_p^2 which evaluates the uniformity of stabilizing effects on power systems and the index Γ_x , Γ_y for the extent of stabilizing effects in power systems which evaluates the two-dimensional influences on power systems by introducing these equipments. Numerical examples on model power system shows the simplicity and the effectiveness of this proposed methods.

1. ま え が き

近年の電力系統の大規模・複雑化や、将来の電源の大形化・遠隔化の傾向に伴って、安定度向上対策の果たす役割は益々重要になってきている。特に、原子力比率の増大に伴い、系統運用面から

の安定化対策と同時に、系統計画段階での総合的な安定化対策が極めて重要な検討課題である。

電力系統の安定度向上対策としては様々な手法が挙げられるが、これまで検討され、既の実施されてきたものとして超速応励磁形安定化回路付 AVR (PSS)、直列コンデンサ (SrC)、制動抵抗器 (SDR)、タービンの高速バルブ制御 (EVA)、発電機制御の総合最適化 (TAGEC)、また今後の導入が期待されているものに静止形無効電力補償装置 (SVC)、超電導エネルギー貯蔵装置 (SMES)

* 助教授 電気工学科
** 教 授 電気工学科
*** 講 師 北海道大学工学部
**** 教 授 北海道大学工学部

などがある。これらの安定度向上対策の安定化効果の評価については、従来、比較的発生頻度の高い特定の想定事故に対する信頼度目標を設定した実系統試験を行い、相差角動揺の減衰の程度や、過渡安定極限電力を評価指標として用いてシミュレーションと対比・確認する方法で行われてきており、稀頻度事故に対しては運用面での対策に委ねられていた。しかし、これらの方法では系統全体の総合的安定度評価の観点から見て安定化効果の定量的比較や他の想定事故ケースに対する考慮などの点で不満があった。

著者等は既に文献(2)、(3)において故障地点、故障の種類と故障除去時間を確率変数とした過渡安定度評価手法に基づいて、既に実用化されている安定度向上対策の評価を行っている。この確率的過渡安定度評価法は従来の決定論的モデルを拡張したものと考えられるが、(1)系統内の各送電線別の過渡安定度の大小の比較が可能であり、(2)安定度向上効果の系統全体に対する相対的比較が可能である、などの特徴があった。本研究ではさらに、安定度向上効果のより適切な把握を目指し、次の2点を考慮した評価アルゴリズムを開発している。

- (1) 過渡安定度確率の分散を導入し、この値によって、向上対策による安定化効果の均一化の度合を評価する。
- (2) 安定化効果の広範さの指標を提案し、この指標により安定化対策の面的な波及効果や、局所性を評価する。

また、これらの観点から従来の安定化対策の特徴を総合的に把握することが可能であり、そこで本稿では、SrC、PSS、SVC、SMESの4種類の安定化装置の過渡安定度向上効果について、提案する手法のモデル系統への適用例を示す。

2. 確率的過渡安定度評価

2.1 確率的過渡安定度評価の概要

R. Billinton 氏らは従来の決定論的な安定度評価に対して、各送電線の事故発生確率、事故発生地点、保護リレーの動作確率等を考慮に入れたスカラー指標である過渡安定度確率を提案した。これにより系統の過渡安定度に関して次のような有効な情報が得られる。

- (1) 各送電線毎の過渡安定度確率と共に全系統の過渡安定度が1に正規化された値として得られる。このため詳細な解析、検討を必要とする系統

内の過渡安定度の弱点とその相対的な値を知ることができる。

- (2) 安定化装置などによる安定度向上効果もまた各送電線毎に数値として評価することが出来る。この手法は事故の模擬に詳細直接法を用いているため、複雑な動特性を持つ各種の安定化装置を考慮することが出来る反面、系統規模の増大に従って多大な計算時間を要する弱点がある。このため、系統計画段階での安定化装置の効果の確認などオフラインでの適用が考えられる。

P.M. Anderson 氏らは確率的過渡安定度評価手法に Athay 氏のエネルギー関数を導入し、その高速性を生かしてモンテカルロシミュレーションの適用が有効であることを明らかにした⁽⁵⁾。さらに岩本氏らは、確率変数として負荷変動をも考慮した過渡安定度計算法を提案している⁽⁶⁾。

エネルギー関数の導入によりシミュレーションに要する計算時間は大幅に削減出来るが、使用する発電機モデルや安定化装置などのモデル化に対する制約が厳しい難点がある。このため系統条件に対する大まかなスクリーニングや、負荷の変動を考慮した安定度監視など高速性が必要とされるオンラインでの適用が考えられている。

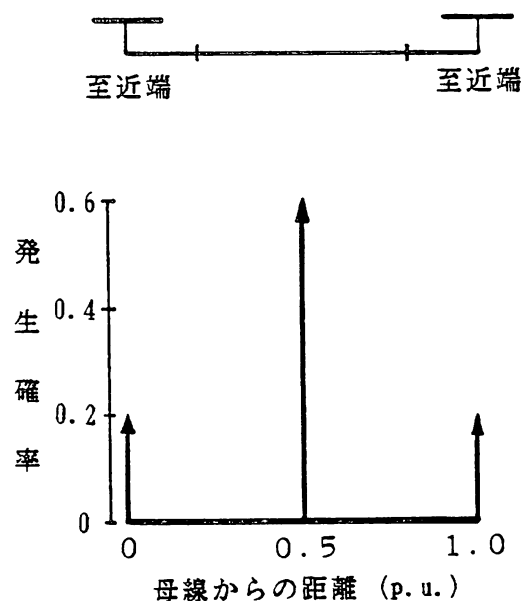


図1 送電線上の事故発生確率

2.2 過渡安定度確率の計算

安定度確率の計算の際、送電線の事故発生確率は母線至近端と線路中間部分で図1のように分布

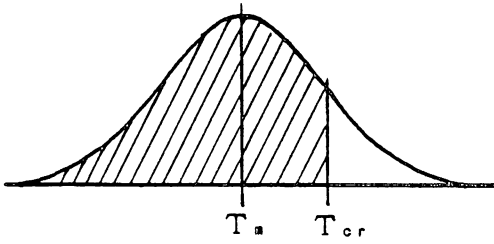


図2 事故除去時間の確率密度分布

し、各送電線における事故発生確率は等しいものと仮定する。また、保護リレーによる事故除去時間の確率密度は、図2に示すように指定された平均値の10%の分散で正規分布していると仮定する。

詳細直接法によって個々の事故に対する臨界故障除去時間 T_{or} が求められると、ある事故 K に対する過渡安定度確率 $Pr(K)$ は次式で示される。

$$Pr(K) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{T_{or}} \exp\left\{-\frac{(t-T_m)^2}{2\sigma^2}\right\} dt \quad (1)$$

ただし、 T_m は事故除去時間の平均値、 σ は分散を表す。

ある送電線 L の過渡安定度確率、 $Pr(L)$ は母線 i, j の至近端事故に対する過渡安定度確率と i, j 間の線路上で発生した事故の過渡安定度確率に、図1のそれぞれの確率密度を考慮して求められる。

こうして求めた $Pr(L)$ を要素とする過渡安定度確率ベクトル P_L を次式のように定義する。

$$P_L = \{Pr(1), Pr(2), \dots, Pr(m)\} \quad (2)$$

ただし、 $0 \leq Pr(n) \leq 1$

($n = 1, 2, \dots, m$)

m は送電線の総数を表す。

次に、送電線 L の事故発生比 $\beta(L)$ が既知の場合、これを要素とするベクトル B を次式で定義する。

$$B = \{\beta(1), \beta(2), \dots, \beta(m)\} \quad (3)$$

ただし、 $\left[\begin{array}{l} 0 \leq \beta(n) \leq 1 \quad (n=1, 2, \dots, m) \\ \sum_{n=1}^m \beta(n) = 1 \end{array} \right.$

従って、ある特定の事故 K に対する系統全体の過渡安定度確率 $P_{sys}(K)$ は次式のような条件付確率として表すことが出来る。

$$P_{sys}(K) = P_L \cdot B^T = \sum_{i=1}^m [Pr(i) \cdot \beta(i)] \quad (4)$$

全ての事故に対して(3)式を評価した値は系統全体の過渡安定度確率 P_{SYS} を表し、次式となる。

$$P_{SYS} = \sum [P_{sys}(K)] \quad (5)$$

ただし、 $0 \leq P_{SYS} \leq 1$

K は事故の種類を表す

このようにして、各送電線別、事故種別、系統全体の過渡安定度確率が正規化された直感的に理解し易いスカラー値として求めることが出来る。

3. 安定度向上効果の評価指標

系統内で安定度対策上着目すべき送電線は、無対策時に過渡安定度確率が最も小さな送電線であろう。以下の議論では、この着目する送電線をターゲットラインと呼び、その番号を tar で表す。

$$Pr^0(tar) = \min\{Pr^0(1), Pr^0(2), \dots, Pr^0(m)\} \quad (6)$$

ただし、肩文字の0は無対策時の値を表す。

前節までの過渡安定度確率の定義に基づいて、安定度向上効果をより適切に把握するため、次のような評価指標を導入する。

3.1 過渡安定度確率の分散

安定化装置により各送電線の過渡安定度確率が、どの程度向上したかを系統全体の立場から把握するため、過渡安定度確率 $Pr(n)$ の分散を次式で計算する。すなわち、

$$\sigma_p^2 = \sum_{i=1}^m [Pr(i) - P_{mean}]^2 / m \quad (7)$$

ただし、 P_{mean} : $Pr(n)$ の平均値

この指標は系統全体の安定度確率 P_{SYS} が相対的に高くても、特定の送電線の安定度確率が低い場合や、ある送電線の安定度を向上しても他の送電線の安定度を逆に悪化させるという場合を検出するのに有効であろうと考えられ、系統全体として安定化効果が均一化されるほど小さな値となる。

3.2 安定化効果の広範さの指標

従来の安定化対策は実施上、電源側設備、送電設備、変電設備に分類され、その安定化効果は実系統試験等により動揺モードや過渡安定極限電力を主な評価指標としてその有効性が議論されてきた。ここでは、ある安定化装置が系統に設置された場合、その安定化効果がどの範囲まで波及するかという観点からこれを評価する指標 Γ_x と Γ_y を次式により定義する。

$$\Gamma_x = \Delta P(L) = Pr(L) - Pr(L)^0 \quad (8)$$

ただし、 $Pr(L)^*$: 安定化装置設置後の $Pr(L)$

$$\Gamma_y = \sum_{\substack{L=1 \\ L \neq tar}}^m \Delta P(L) / (m-1) \quad (9)$$

指標 Γ_x はターゲットラインのみに着目した安定化装置による過渡安定度向上効果の大きさを表しており、局所的な安定化効果を評価する指標と考えられる。また、指標 Γ_y はその安定化装置が平均してどの程度、ターゲットライン以外の送電線の安定度向上に寄与したかを表しており、いわば広域的な安定化効果を評価するものと考えることができる。従って、ある安定化装置に対して評価した (Γ_x, Γ_y) の値は、対応する2次元平面上で安定化効果の大小と同時に、その効果が局所的か広域的かという観点から安定化対策の特徴を示しており、多機系統における過渡安定度向上対策の効果を把握するために有効な情報となる。

4. モデル系統における適用例

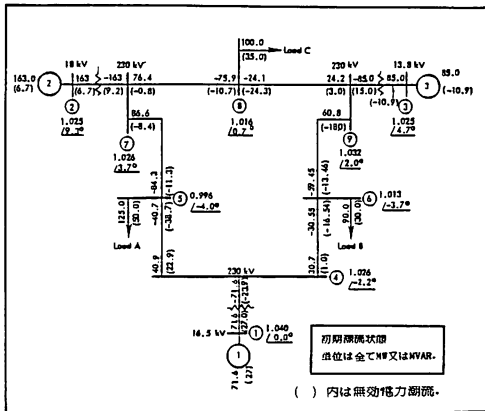


図3 モデル系統と初期潮流状態

前節までに定義した過渡安定度向上効果の評価指標を図3の3機9母線系統に適用した数値例を示す。数値計算に際して以下の仮定を置く。

- (1) 全ての発電機に AVR とガバナーが組み込まれているが、これは安定化装置には含めない。
- (2) 事故は2回線送電線中の1回線で発生し、事故除去後1回線で運用する。
- (3) リレーの事故除去時間は平均値0.35(sec)

で、分散がその10%の正規分布と仮定する。

以上の仮定の下で確率的過渡安定度に基づいた評価指標の計算アルゴリズムを図4に示す。図3の初期潮流状態の下で、安定化装置設置前のシ

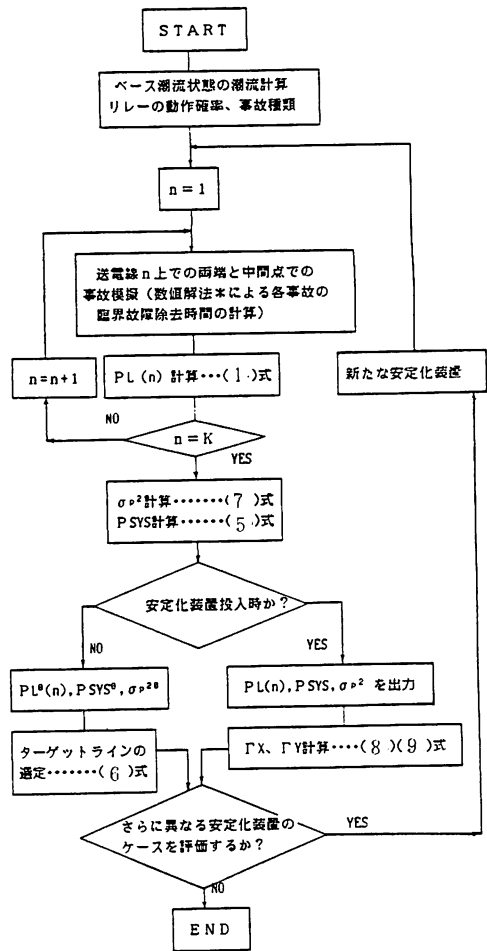


図4 概略計算アルゴリズム

表1 無対策時の各指標値

送電線番号 n	送電線過渡安定度確率 PL (n)
1	0.99304
2	0.99771
3	0.80392
4	0.92243
5	0.47612
6	0.81581
P sys	0.83484
σ _p ² (× 0.01)	3.15378

ミュレーションにより条送電線と系統全体の過渡安定度確率を求めたのが表1であり、同表よりこの系統のターゲットラインは送電線5と確認できる。また、図5には各事故種別の $Pr(L)$ を示す。

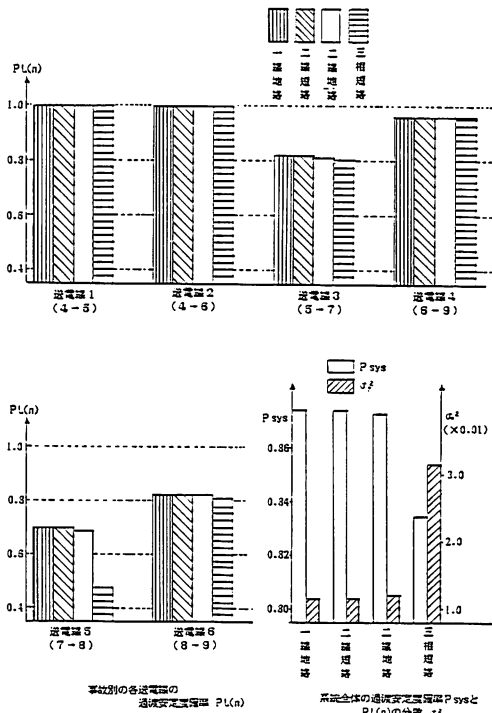


図5 各事故種別の過渡安定度確率

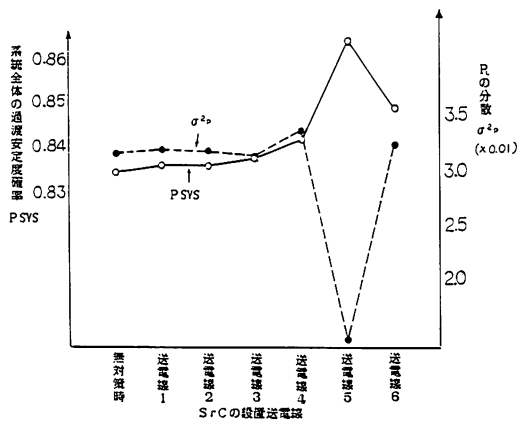


図6

4.1 各種安定化装置の過渡安定度向上効果

過渡安定度向上を目的としたスイッチド・キャパシタについて、ターゲットラインに設置した場合の P SYS および分散がどの程度改善されるかを、他の送電線に設置した場合と比較したのが図6である。同図から送電線5に設置した場合、無対策時に比べて P SYS が約3%向上し分散も0.32から0.015と減少し系統全体の安定化と送電線間の過渡安定度の均一化が図られることがわかる。

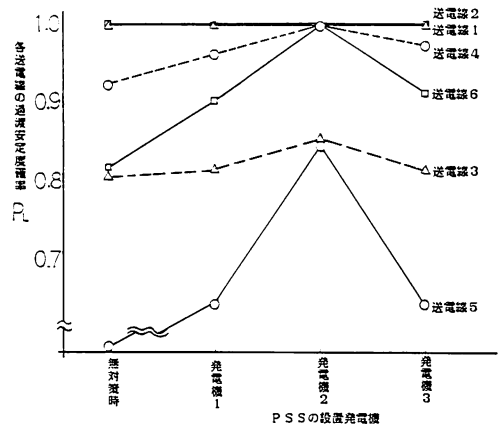


図7

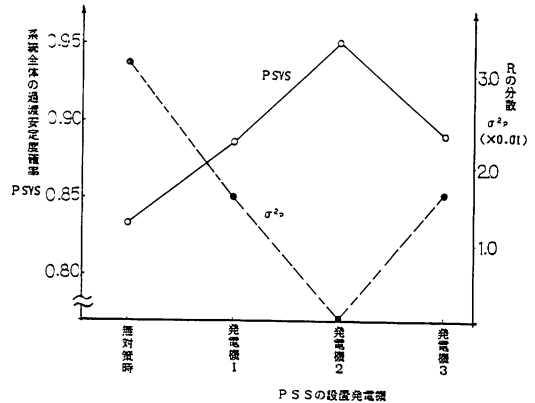
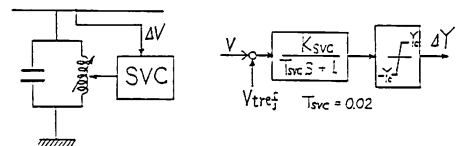


図8

次に、図7には PSS 設置発電機と $Pr(L)$ 、図8には P SYS と分散の変化を示す。ターゲットラインに接続する発電機2に PSS を設置すると P SYS が最も増加し分散が減少して安定化効果が最大であることがわかる。特に、ターゲットラインの $Pr(tar)$ は47.6%から84.9%まで改善される。



SVC の構成

図9

無効電力を制御することにより系統の電圧変動抑制、安定度向上を目的とする静止型無効電力補償装置 SVC は、その応答速度の速さのために今

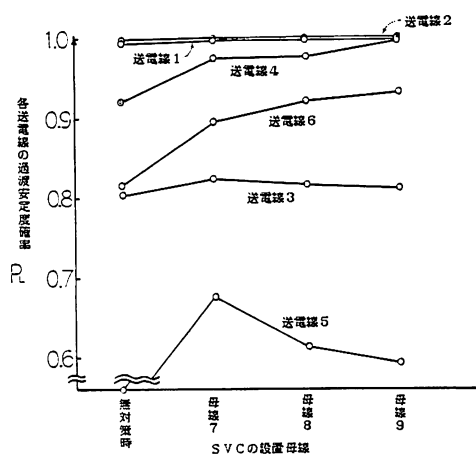


図10

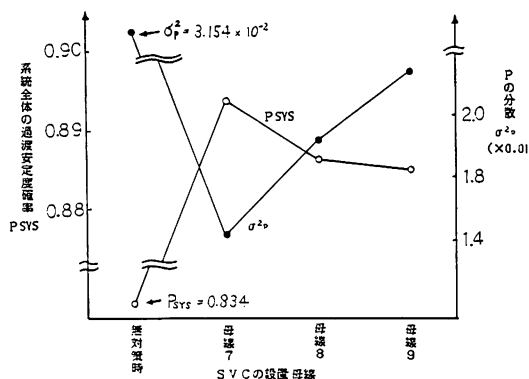


図11

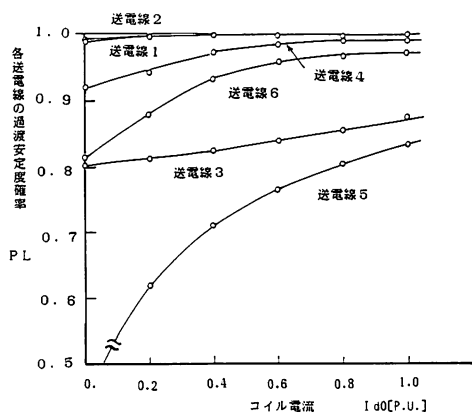


図12

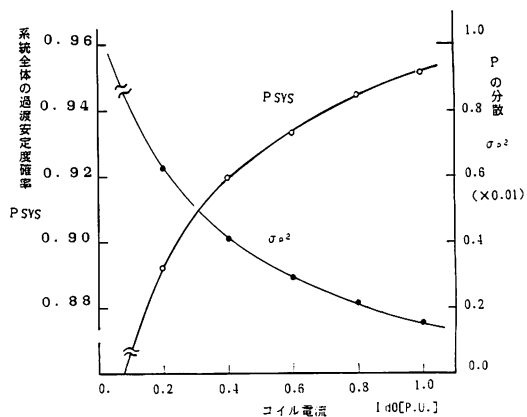


図13

母線 7, 8, 9 の 3 地点を設置点候補とし、同一容量、同一利得の SVC で評価した。 $K_{suc} = 20.0$ [P. U.], $Y_c = \pm 2.0$ [P. U.] とした場合の $Pr(L)$ を図 10 に、 P_{SYS} と分散を図 11 に示す。同図から母線 7 に SVC を設置するとターゲットラインの $Pr(tar)$ が無対策時の 47.6% から 20% 向上し、その結果 P_{SYS} も約 6% 向上し安定化効果が最大であることがわかる。文献(1)によれば、一機無限大母線系統では系統のインピーダンス中心に SVC を設置すると安定化効果が最大とされている。ここで用いたモデル系統はループ系統であり、母線 7 が発電機 2 と $Pr(L)$ の小さい送電線 5 と 3 に接続しているのでこの地点での設置が有効であろう。SMES は高効率で高速制御が可能という特徴を持ち、PQ 同時制御を生かした系統安定化用のほか、LFC 機能を持った大容量エネルギー貯蔵装置、フリッカの抑制や調相設備など、系統運用上多くのメリットを有している。ここでは制御角のフィードバック制御による P 制御のみを実施した場合の過渡安定度向上効果について評価した。SMES をターゲットラインに最も近い母線 2 の高圧側に設置した場合の $Pr(L)$ と P_{SYS} の変化を図 12、図 13 に示す。

4.2 指標 Γ による安定化効果の比較

以上の 4 種類の安定化装置を先に定義した指標 Γ によって評価する。各装置の 1 台設置の場合に対し、補償率 (SrC)、ゲイン (SVC, PSS)、初期コイル電流 (SMES) をそれぞれパラメータとして (Γ_X, Γ_Y) をプロットしたものが図 14 である。この時の各安定化装置の過渡安定度指標値を表 2 に示す。同図からシミュレーションに用いたパラメータの範囲では、スイッチド・キャパシタは安

後の導入が期待されており、使用目的に応じて電源側 (安定度向上)、負荷側 (フリッカ抑制) または線路中央 (電圧維持) にそれぞれ設置される。その概略の構成を図 9 に示す。ここではターゲットラインの安定化を目的として、これに接続する

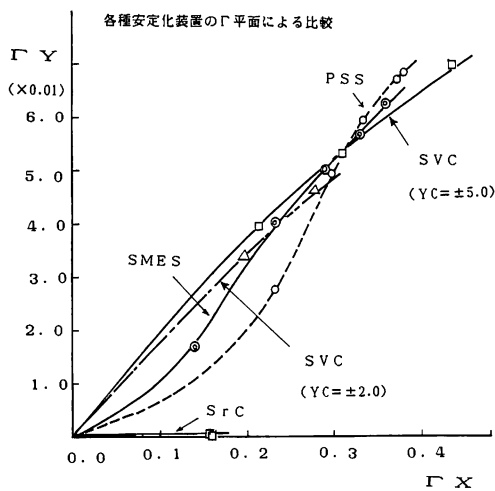


図14

表 2 各種安定化装置の過渡安定度指標値

ケース	安定化装置	パラメータ	設置地点
ケースC-1	直列コンデンサ	補償率 75% (投入時間0.05秒)	ターゲットライン
ケースC-2	直列コンデンサ	補償率100% (投入時間0.05秒)	ターゲットライン
ケースM-1	SMES	$I_{d0}=0.20[P.U.]$	母線2
ケースM-2	SMES	$I_{d0}=1.0[P.U.]$	母線2
ケースP-1	PSS	$K_{pss}=0.5$	発電機2
ケースP-2	PSS	$K_{pss}=1.5$	発電機2
ケースS-1	SVC	$K_{svc}=20$ ($Y_c=\pm 2.0$)	母線7
ケースS-2	SVC	$K_{svc}=40$ ($Y_c=\pm 2.0$)	母線7

ケース	PL (TAR)	PSYS	$\sigma_P^2(\times 0.01)$	(Γ_X, Γ_Y)
無対策時	0.4761	0.8348	3.1538	(0, 0)
C-1	0.6301	0.8555	1.8855	(0.1540, 0)
C-2	0.6385	0.8640	1.4852	(0.1624, 0)
M-1	0.6204	0.8919	0.6245	(0.1443, 0.0171)
M-2	0.8363	0.9509	0.1531	(0.3601, 0.0624)
P-1	0.8158	0.9411	0.6298	(0.3397, 0.0596)
P-2	0.8561	0.9677	0.2130	(0.3800, 0.0674)
S-1	0.8732	0.8936	1.4269	(0.1971, 0.0344)
S-2	0.7592	0.9206	0.8397	(0.2831, 0.0464)

定化効果が極めて局所的であるのに比べて、PSS、SVC、SMESはΓ平面で類似した傾向を示し、安定化効果が広域的でターゲットライン以外にも波及効果が大い。

5. ま と め

安定化装置の設置による電力系統の過渡安定度向上効果を定量的、総合的に評価するため、従来の決定論的手法に対して確率的評価法を適用した。

系統全体の過渡安定度の均一化を評価するためにPLの分散 σ_P^2 を、また安定化装置の効果の広域性を評価するために指標Γを提案した。さらにこの手法を用いて、直列コンデンサ、PSS、SVC、SMESの4種類の安定化装置について安定度向上効果を評価した。主な点をまとめると次のようになる。

- (1) 安定化装置の評価では特定の事故のみならず、系統全体の立場から総合的な安定度向上効果の把握が必要であり、PSS、 σ_P^2 はこれらの評価指標として有効であると考えられる。
- (2) スイッチド・キャパシタの安定化効果が局所的であるのに比べて、PSS、SVC、SMESなど動揺に応じた高速制御動作をする安定化装置は広い範囲の事故に対して安定化効果があることが確認できた。この場合、安定化装置のパラメータ決定の問題が残されているが、系統計画段階などで、安定化装置の設置候補点がいくつかある場合などに、提案した指標は有益なデータを与えるものと思われる。

さらに、本手法の有効性を高めるためには計算の高速化が不可欠であり、今回取り上げた安定化装置以外の評価も含めて今後の課題としたい。

参 考 文 献

- (1) 電気学会技術報告 (II部) 第238号 電力系統の安定化技術, 電気学会 昭和61年12月
- (2) 佐藤, 長谷川 「超電導エネルギー貯蔵装置を含む電力系統の確率的過渡安定度評価」 昭和60年電気学会全国大会講演論文集 No.958.
- (3) 芦崎, 佐藤, 田中, 長谷川 「電力系統に対する確率的過渡安定度評価について」 昭和61年電気学会電力技術研究会 PE-86-47.
- (4) R. Billinton, P.R.S. Kuruganty 「Probabilistic Assessment of Transient Stability in a Practical Multimachine System」 IEEE Trans, VOL. PAS-100 No. 7 July 1981.
- (5) P.M. Anderson, A. Bose 「A Probabilistic Approach to Power System Stability Analysis」 IEEE Trans, VOL. PAS-102 No. 8, August

1983.

- (6) 岩本, 安藤, 中野 「負荷変動に対する確率的過渡安定度計算法」 昭和 61 年電気学会全国大会講演論文集 No.978.
- (7) 佐藤, 芦崎, 西谷, 長谷川 「確率的過渡安定度指標による安定度向上対策の定量的評価について」 昭和 62 年電気学会電力技術研究会 PE-87-64.
- (8) 佐藤, 村井, 西谷, 長谷川 「過渡安定度向上対策の評価における PEBS 法の適用について」 昭和 62 年電気関係学会道支部連合大会講演論文集 NO.227.
- (9) 関根泰次 「電力系統過渡解析論」 オーム社 昭和 59 年.
- (10) 電気学会雑誌 NO.106-7 特集「電力系統の安定化制御技術の現状」.

(昭和 62 年 11 月 28 日受理)