

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について

佐 藤 義 則*・村 井 国 昭**・長谷川 淳***

Probabilistic Evaluation of Transient stability
in a multi-machine power system including a Superconductive Magnetic Energy
Storage system.

Yoshinori SATO, Kuniaki MURAI and Jun HASEGAWA

要 旨

故障の種類, 故障発生地点, 故障除去時間を確率変数とした確率的安定度モデルを用いることによって, 系統全体の安定度指標と同時に安定度の弱い部分をも定量的に把握することができる。

この安定度評価法を用いて, 超電導エネルギー貯蔵装置の過渡安定度向上効果を評価している。

Abstract

It has been recognized that there is a need for indices of transient stability which reflect all the factors that influences the system stability. Most of the work in this area is based on deterministic models.

This paper proposes the inclusion of probabilistic factors such as the type, location and clearanc of faults in transient stability analysis of multi-machine power system and demonstrates the efficiencies of simple probabilistic indices showing the system stability margins and the weakest part in the system stability quantitatively.

This paper also shows the effectiveness of the Super Conducting Magnetic Energy Storage System to improve the system transient stability and evaluates it in terms of probabilistic stability indices proposed above.

1. ま え が き

従来の電力系統の安定度評価では, ある運転条件の下で特定の地点に発生した最大苛酷故障に対しても安定度が維持されるよう, 系統構成や運用レベル, 制御対策を決める決定論的モデルを用いて来た。(通常, 2 回線送電線中 1 回線における 2 線地絡故障時の過渡安定極限電力を保証する。)

しかし, このような苛酷故障は発生確率が小さいので, 安定度は十分であっても設備利用率が下

がるため, 実運用上はオペレータの経験によりこの差を解消していた。このため, 系統のセキュリティ監視の面から系統の確率的要因を考慮した安定度のモデル化と, より簡単明瞭な安定度指標の開発が切望されてきた。

従来より筆者等は, 安定度の定量的指標に関する研究を報告してきたが,⁽¹⁾⁽²⁾ それらはいずれも決定論的な電力系統モデルに基づくものであった。本論文では, 過渡安定度に影響する要因として故障発生地点, 故障の種類, 故障除去時間を確率変数とした, より現実的な確率的安定度モデルを構成し, これを用いた計算機シミュレーションによって従来の決定論的安定度モデルでは評価できなかった定量的な確率指標が求められ, 全系統

* 苫小牧高専 電気工学科 助教授

** 苫小牧高専 電気工学科 教授

*** 北海道大学 工学部 教授

の安定度状態と同時に安定度の最も弱い部分をも定量的に把握できることを示す。

さらに、現在、電力系統にもたらす様々な効果が検討され、実現に向けて動き出した超電導エネルギー貯蔵装置^{(3)~(7)}の過渡安定度向上効果を、この確率指標を用いて評価したので報告する。

2. 確率的安定度評価の定式化

(1) 確率的安定度

電力系統の安定度は制御系の影響を考慮して過渡領域、中間領域及び定態領域に分類され、それぞれ影響する要因が異なるため解析方法や定式化も違ってくる。このうち、過渡領域安定度の解析ではモデルの精度に応じて X_d 法や X_d' 法 (Park モデル) などの直接法が用いられている。

本論文では、過渡安定度に影響し、本来確率的な要因である故障発生地点と故障の種類を確率変数とした X_d' 法を用いた安定度モデルを構成した上、故障除去時間をも確率変数として扱うため安定度確率を次のように定義する。

〔安定度確率〕=〔ある故障が臨界故障除去時間以内に除去される確率〕(1)

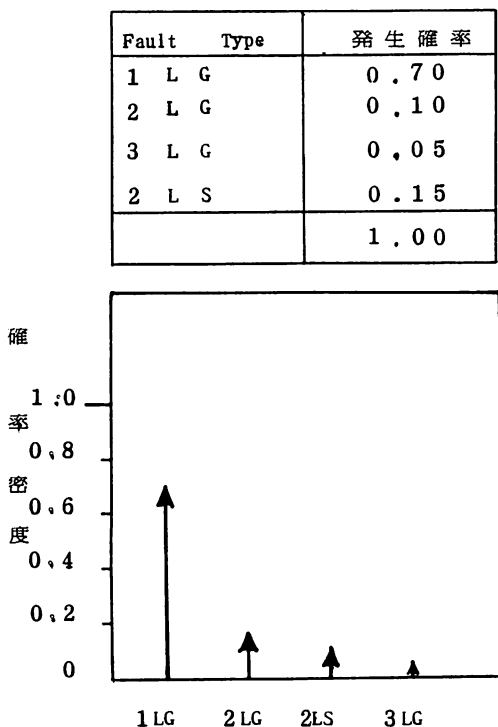


図1

(a) 故障の種類

電力系統に発生する故障のうち過渡安定度に影響するものは通常、次のような種類である。

1. 1線地絡故障 (1 LG)
2. 2線地絡故障 (2 LG)
3. 3線地絡故障 (3 LG)
4. 2相短絡故障 (2 LS)

この他、断線故障などがあるが安定度に対する影響は比較的小さいので無視し、上記4種類の故障が系統に発生する確率は過去の実系統における故障統計に基づいた様分布として扱う。シミュレーションにおいては同時に異なる種類の故障が発生する確率はゼロとし、

$$\Pr(1LG) + \Pr(2LG) + \Pr(3LG) + \Pr(2LS) = 1.0$$

である。図-1 参照。

(b) 故障発生地点

系統内で故障が発生する地点は、過去の故障統計によれば送電線中間で発生する確率が高く、ノード故障の確率は変圧器、ブッシングなどの故障を除けば比較的小さい。このため、ある送電線上で特定の故障の発生確率を図-2のように、ノード至近端とノード中間で一様な確率分布とする。さらに、系統内である故障の発生確率が一樣に分布すると考えるのは妥当であるから、特定の送電線 l 上で故障 i が発生する確率は送電線総数を M とすると、 $\Pr(i)/M$ で与えられる。

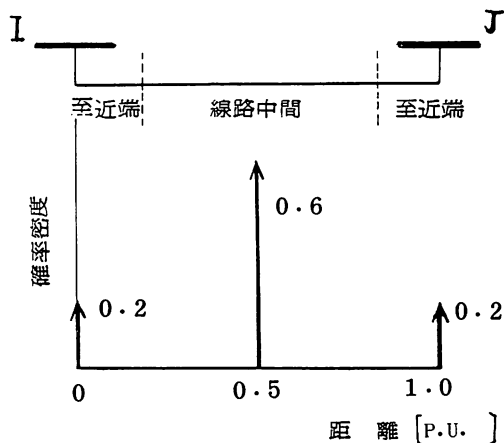


図2

(c) 故障除去時間

故障の除去は、故障発生を検知してからしゃ断器が動作するまでの信号伝送、しゃ断器機械的部分の駆動などに対する時間的遅れを伴うため、高速度形では、2~8サイクルの標準的なしゃ断時

間が採用されている。本論文では除去時間を確率変数として扱うため、ある標準しゃ断時間を期待値とし、その10%の分散を持つような正規分布として扱う。図-3参照。

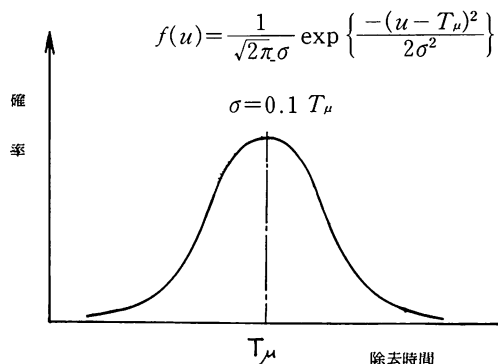


図 3

従って、(1)式で定義される安定度確率は次式のように表わされる。

$$\begin{aligned} \text{安定度確率} &= Pr(X \leq t_\mu) = \\ &= \int_{-\infty}^{t_\mu} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left\{-\frac{(u-t_\mu)^2}{2\sigma^2}\right\} du \end{aligned} \quad \dots\dots(2)$$

ただし、

t_μ : 指定された標準しゃ断時間

δ : 分散 ($\delta=0.1 t_\mu$)

(2) 確率的安定度指標

以上のように故障の種類、故障発生地点、故障除去時間を確率変数として扱うと、ある特定の故障 i に対する安定度確率 $Pr(i)$ は次式のように条件付確率で表わすことができる。

$$\begin{aligned} Pr(i) &= \sum_{l=1}^M [\text{線路 } l \text{ の故障 } i \text{ に対する安定度確率}] \\ &\quad \times [\text{線路 } l \text{ で故障 } i \text{ が発生する確率}] \end{aligned} \quad \dots\dots(3)$$

線路 l の故障 i に対する安定度確率は、前節(b)の定義からノード至近端と線路中央における安定度確率の和として計算される。従って、系統全体の確率的安定度指標は(3)式の全ての故障に対する安定度確率の和で求められ、次式となる。

$$\text{確率的安定度指標} = \sum_i [Pr(i)] \quad \dots\dots(4)$$

3. 超電導エネルギー貯蔵装置

(1) 超電導エネルギー貯蔵装置の概要

新エネルギー総合開発機構 (NEDO) が検討を

進めて来た超電導エネルギー貯蔵装置 (以下 SMES と略記) は技術的、経済的に可能であるとの最終報告をまとめたことにより実現に向けて動き出した⁽⁵⁾。

超電導コイルを利用した、この電力貯蔵装置は従来から実用化されている揚水発電と比較して、高効率、大容量で高速制御が可能であるなどの優れた特徴を有しており、系統運用の観点から以下のような多様な効果が期待されている。

- (i) ピークシェーヴ・ボトムアップのための大容量エネルギー貯蔵用。
- (ii) 定態、過渡を含む電力系統安定化用。
- (iii) フリッカー対策など負荷変動抑制用。
- (iv) 定常時の調相設備 (無効電力供給) 用。
- (v) 負荷周波数制御など電気の質の向上用。

本論文は、これらの中で SMES の過渡安定度向上効果を定量的に評価しようとするものである。

(2) 超電導エネルギー貯蔵装置のモデル化

SMES はサイリスタ変換装置を介して電力系統に連系されたインダクタンスから成る定電流源として表現される。変換装置をサイリスタ・ダブルブリッジとすれば有効電力と同時に無効電力も制御できるが、過渡安定度には有効電力が寄与するため、本論文では変換装置は 6 パルス・シングルブリッジとしてモデル化した。損失を無視すると SMES の端子電圧 E_d は次式で表わされる。

$$E_d = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} V_G \cos \alpha - \frac{3X_c}{\pi} I_d \quad \dots\dots(5)$$

ただし、

$$\begin{cases} V_G : \text{SMES の交流側端子電圧} \\ X_c : \text{転流リアクタンス} \\ I_d : \text{SMES コイル電流} \\ \alpha : \text{サイリスタ制御角} \end{cases}$$

また、 $E_d = L \cdot dI_d/dt$ 、貯蔵エネルギー W_L は $W_L = \frac{1}{2} L I_d^2$ より SMES の有効電力 P_d は次式で表わされる。

$$P_d = \frac{dW_L}{dt} = L \cdot I_d \frac{dI_d}{dt} = E_d \cdot I_d \quad \dots\dots(6)$$

従って交流側端子における皮相電力 W と無効電力 Q_d は次式で与えられる。

$$W = V_G \cdot I_d \quad \dots\dots(7)$$

$$Q_d = \sqrt{W^2 - P_d^2} \quad \dots\dots(8)$$

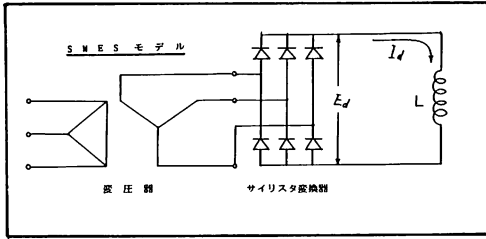


図 4

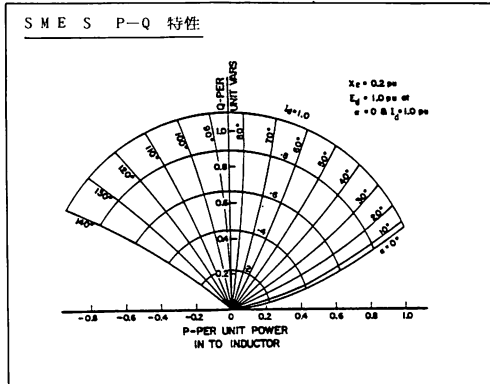


図 5

SMESのP-Q特性を I_d と α をパラメータとして示すと図-5のようになる。SMESが直流側に P_d のみを供給するのに Q_d を消費する理由は、制御角 α で制御した場合、変圧器に流れる電流と各相電圧の間に位相差を生じるためである。交流系統側から眺めたSMESの等価アドミタンス Y_{eq} は次式で与えられる。

$$Y_{eq} = \frac{Pd - jQd}{V_c^2} = G_{eq} + jB_{eq} \quad \dots\dots\dots(9)$$

また、(5)式中の制御角 α は、
 $0 < \alpha < \pi/2$ の時、 $P_d = E_d I_d > 0$ ：順変換モード
 $\pi/2 < \alpha < \pi$ の時、 $P_d = E_d I_d < 0$ ：逆変換モード
 となるので、 $0 < \alpha < \pi$ の範囲で α を制御することにより電力の貯蔵・放出の制御が数〔msec〕のオーダーで可能である。⁽⁶⁾⁽⁷⁾

(3) 超電導エネルギー貯蔵装置を含む系統の潮流計算と過渡計算

SMESの初期運転状態として電流値 I_d と制御角 α を指定すると、(5)～(9)式より等価アドミタンスが求められる。潮流計算や過渡計算においては、SMES接続側ノードの交流電圧が変化する毎にSMESの等価アドミタンスを計算し直して、系統側アドミタンス行列に組み込む必要がある。

4. 数 値 例

(1) モデル系統

前節で定義した確率的安定度評価とSMESの定式化に基づいて、図-6のAnderson & Fouadの9ノード3機系統⁽⁸⁾でシミュレーションを行った。この系統の故障前の潮流状態を図-7に示す。発電機2が最も重負荷状態で、系統内のどの故障に対しても最も早く脱調しているため、SMESをノード2に接続してその過渡安定度向上効果を確認することとした。

発電機は表-1に示すような諸定数を持つParkモデルを用い、AVRとカバナーは1次遅れで表現している。

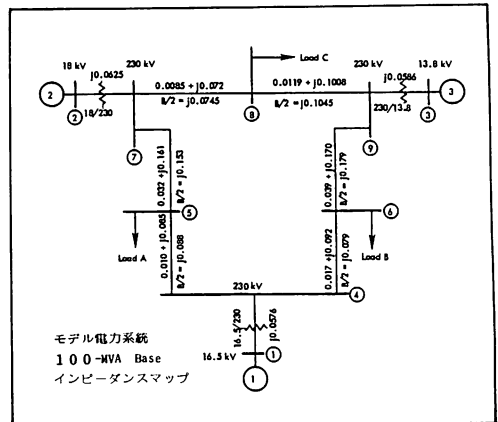


図 6

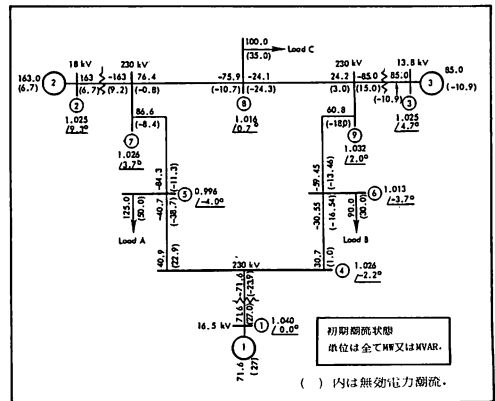


図 7

過渡安定度向上のためのSMESの機能はサイリスタGTOによる順変換または逆変換動作モードの高速反転によって、発電機の過渡動揺中の加速時にSMESで電力を吸収し、減速時に電力を放出することにより動揺を抑制できる点にある。

機 器 定 数 表

	発電機 1	発電機 2	発電機 3		発電機 1	発電機 2	発電機 3
ωL_s [p. u.]	1.569	1.651	1.220	T_{d0}'' [s]	0.0437	0.033	0.033
$\omega L_s'$ [p. u.]	0.324	0.232	0.174	T_{d0}' [s]	0.500	0.535	1.500
$\omega L_s''$ [p. u.]	0.249	0.171	0.134	T_{d0}'' [s]	0.070	0.078	0.141
ωL_q [p. u.]	1.548	1.590	1.160	T_A [s]	0.5	0.5	0.5
$\omega L_q'$ [p. u.]	0.918	0.380	0.250	K_A [p. u.]	25	25	25
$\omega L_q''$ [p. u.]	0.248	0.171	0.134	T_G [s]	2.0	2.0	2.0
ωL_t [p. u.]	0.204	0.102	0.078	K_G [p. u.]	20	20	20
K_s	1.05275	1.09493	1.11769	D [p. u.]	2.0	2.0	2.0
K_q	1.03489	1.06168	1.07674	$\omega_0 = 2\pi f$ [rad/s]	100π	100π	100π
T_{d0}' [s]	5.140	5.900	8.970	H [s]	50	9	6

表 1

このため、SMES制御角 α の Bang-Bang 制御や、回転子角速度偏差 $\Delta\omega$ をフィードバック信号として SMES のサイリスタ・ブリッジの制御角を制御する方法などが提案されている。⁽⁶⁾

ここでは、SMES 接続発電機の $\Delta\omega$ を用いて制御角 α を、次式のように 1 次遅れでフィードバック制御するモデルとして定式化した。

$$\Delta\alpha = -\frac{K_s}{1+sT_s}\Delta\omega \quad \dots\dots\dots (10)$$

または

$$\frac{d\Delta\alpha}{dt} = -\frac{1}{T_s}(\Delta\alpha + K_s\Delta\omega) \quad \dots\dots\dots (11)$$

ただし、
 K_s : α 制御系ゲイン
 T_s : α 制御系時定数

(2) シミュレーションの概要

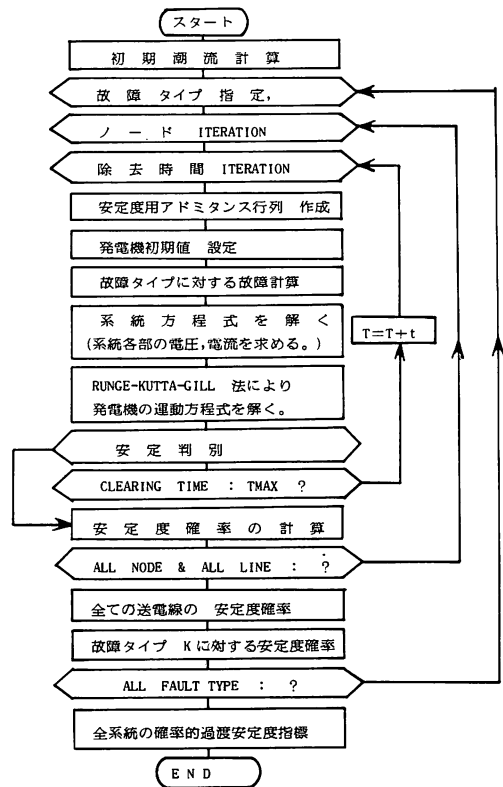
全体のシミュレーションの概要を図-8 のフローチャートに示す。Park モデルによる詳細直接法を用いているため臨界故障除去時間を求める安定判別は、基準発電機 (No.1) との位相角偏差が π (rad) を越えた時点で不安定と見なしている。

3 相不平衡故障時の安定度計算は、各故障の等価対称分回路を含む正相回路についての電力相差角方程式により行なっている。特に、故障時の等価対称分インピーダンスの計算では、逆相分は正相分に等しく、零相分は 1 回線で $Z_0 = 4 Z_1$ 、2 回線 $Z_0 = 7 Z_1$ としている。

故障中は SMES は動作せず、故障除去と同時に SMES による安定化制御を行なっている。

(3) シミュレーションの結果

SMES を含まない基準状態の臨界故障除去時間の分布と、これを基にして計算された各線路の安定度確率の例を 3 LG 故障について図-9 に示す。臨界故障除去時間が求められてから各ノード至近端とノード中間の安定度確率を求め、その後、



概 略 フ ロ ー チャ ー ト

図 8

線 路	安 定 度 確 率 (故障除去時間 0.35 秒)			
	1 LG	2 LG	3 LG	2 L S
4-5	0.9932229	0.9932229	0.9930408	0.9932229
4-6	0.9977122	0.9977122	0.9977119	0.9977122
5-7	0.8040976	0.8040976	0.8039156	0.8040976
6-9	0.9224296	0.9224296	0.9224296	0.9224296
7-8	0.7019663	0.6949975	0.4761185	0.7019666
8-9	0.8224903	0.8224902	0.8158090	0.8224902
全系統	0.6115572	0.08724917	0.04174188	0.1310480
全故障	0.8715962			

表 2

れるに従って安定度確率も小さくなり、特に重負荷の送電線ほど変化の割合が大きいことがわかる。

次に、SME Sの安定化制御を実施した場合の確率的安定度評価の例を表－4、表－5に示す。

※※ SME S による 安 定 度 向 上 効 果 ※※

線 路	安 定 度 確 率 (3 L G 故 障)		
	SME S な し	$I_{do} = 0.30$	$I_{do} = 0.60$ p.u.
4-5	0.9930408	0.9993998	0.9999733
4-6	0.9977119	0.9998309	0.9999937
5-7	0.8039156	0.8248769	0.8391162
6-9	0.9224296	0.9608616	0.9846873
7-8	0.4761185	0.6511291	0.7678886
8-9	0.8158090	0.9028101	0.9593163
全系統	0.04174188	0.04449090	0.04625813
全故障	0.8715962	0.9085007	0.9324361

表 4

故 障 種 別	安 定 度 確 率		
	SME S な し	$I_{do} = 0.30$ p.u.	$I_{do} = 0.60$ p.u.
1 LG	0.6115572	0.6366628	0.6529732
2 LG	0.08724917	0.09093882	0.09328189
3 LG	0.04174188	0.04449090	0.04625813
2 LS	0.1310480	0.1364082	0.1399228
全系統	0.8715962	0.9085007	0.9324361

表 5

表－4は3LG故障に対する各送電線毎の安定度確率の向上の様子を示しており、特にSME Sが接続されたノード2に連結する、重負荷潮流状態にあった送電線⑦－⑧の向上効果が他の送電線に比較して著しいことが把握できる。

このことは、SME S設置ノードが故障点から遠い場合は安定化効果が少ないという他の研究の結果とも一致しており、⁽⁶⁾ 本手法の有効性を示していると考えられる。

表－5は、同様にして故障タイプ別のSME Sの安定度向上効果の例であるが、系統全体としては安定度確率が向上しているにもかかわらず、故障タイプ毎の安定度確率はあまり顕著に向上していない。これは、SME Sの効果が、表－4の結果からわかるように、設置ノード又はそれに接続する送電線部分の安定度を向上させるという、いわばローカルな安定度向上効果を示すためであると考えられる。

5. 結 果 と 結 言

以上のように、確率的過渡安定度評価手法を用いることによってSME Sの安定度向上効果とその特徴を把握することができた。本手法の特徴をまとめると次のようになる。

- (i) 系統全体の安定度指標と同時に、部分的な送電線の安定度、即ち安定度の相対的な大きが数値的に評価できる。
- (ii) 安定度向上対策によって、全体及び各部分の安定度がどの程度改善されるかが把握できる。

これらの特徴は、従来の決定論的安定度モデルでは得られない点であり、本手法の有効性を示すものである。

本手法では詳細直接法によるシミュレーションを行なっているため、1回のジョブに北大大形計算機センターのHITAC-M280HのCPU時間で10分以上を要している。このため、モデル系統の簡単化や、エネルギー法を用いた間接法によるシミュレーションの採用など、全体の高速計算手法の開発を今後の課題としたい。

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；電力系統過渡安定度向上対策のパラメータ感度解析。昭和55年電気学会道支部連大講演論文集。No.50, (1980)

(3) Boom, R. W et al ; Wisconsin Superconductive Energy Storage Project, Feasibility Study Report. Vol. 1 (1974)

(4) 山田他；エネルギー貯蔵用超電導マグネット。電気学会静止器研究会資料。SA-80-18(1980)

(5) 朝日新聞、1985年11月5日(火)

(6) 大沢他；超電導エネルギー貯蔵装置による電力系統の安定化制御。電気学会電力技術研究会資料。PE-81-16 (1981)

(7) 石川他；超電導エネルギー貯蔵装置による電力系統の安定化(その1)。電力中央研究所研究報告。No.181044 (1982)

(8) P. M. Anderson, A. A. Fouad ; Power System Control and Stability. Book. ISWA STATE Univ. Press (1977)

(9) R. C. Burchett et al ; Probabilistic Methods

for Power System Dynamic Stability. IEEE
VOL. PAS-97. No. 3 (1978)

(10) R. Billinton, et al ; Transient Security Assessment of a Power System. IFAC. VOL. 3
(1979)

(11) 佐藤他；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（対称事故の場合）。
昭和60年電気学会全国大会講演集。No.
958 (1985)

(12) 佐藤他；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年電気関係
学会道支部大会講演集。No.142, (1985)

(昭和60年11月30日受理)