



Title	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に関する研究
Author(s)	三谷, 康範
Citation	大阪大学, 1986, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/2158
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

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に関する研究

三 谷 康 範

内容 梗概

本論文は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に関する研究の成果をまとめたものである。

電力系統において安定性の維持は極めて重要な課題である。従来、種々の系統安定化対策が開発され、その結果、現在のように大規模で信頼性の高いシステムが実現された。一方、近年、大容量発電所が局所に偏在化し電力消費中心と長距離送電線で連系される傾向が強まり、その結果、減衰の悪い電力動揺の発生あるいは直列コンデンサ補償に伴う自己励磁振動現象や軸ねじれ共振現象の発生といった新たな問題が顕在化してきた。電力系統を安定度の限界まで利用しようという動きが強まる中で、このような問題をいかに解決するかは非常に重要な課題である。本論文では、こうした電力系統の安定化の新しい手法として超電導エネルギー貯蔵装置(Superconducting Magnet Energy Storage, S M E S)を導入する効果について検討を行っている。

S M E Sは超電導マグネットとサイリスタ電力変換装置で構成され、電力変換装置の制御により高効率で迅速かつ頻繁なエネルギーの吸収・放出が可能である。また、貯蔵電力の充放電において有効電力と無効電力を同時に制御できる。そのために、系統の動特性の改善に顕著な効果を期待できる。

本論文では、このようなS M E Sの制御特性に着目し、電力系統における種々の安定度問題に対してS M E Sを用いた安定化制御を提案している。まず、想定した各安定度問題を記述する系統を定式化し、安定化のためのS M E Sの制御アルゴリズムを導くとともに、計算機シミュレーションにより、それらの効果を確認した。その結果、系統内におけるS M E Sの効果的な設置箇所と制御に必要な電力貯蔵容量や電力変換装置の容量が推定できるようになった。こ

これらの成果は、系統安定化装置としてのSME Sについて適切な評価を行うための基準となり得るものである。

本論文は以下のように構成される。

第1章の緒論で、電力系統の安定度に関する考え方を述べ、現在ならびに将来にわたる安定度上の問題点を明らかにするとともに解析上の観点からそれらを分類する。すなわち、まず、電力動揺に関する安定度問題をその解析時間領域により、事故後第一波に対する過渡電力動揺の安定度の問題と事故後数秒ないし数十秒後の電力動揺の発散・収束の問題（中間領域の電力動揺の安定度問題）に分類する。さらに、直列コンデンサ補償系統では、電力動揺の他に電気系と機械系との共振による不安定振動現象をともしうことを述べる。以上のように、電力系統の安定度問題を整理し、これに関連して、安定化制御装置としてのSME Sの特性およびSME S導入の意義を述べる。

第2章では、過渡電力動揺の安定化に対してSME Sを導入した場合の効果を評価し、その結果より、与えられた系統内でのSME Sの設置箇所、設置数、さらには電力貯蔵容量や交直変換器の容量をいかに選ぶべきかについて検討する。そのために、システムの可制御性の概念を用いてSME Sの効果的な設置箇所および設置数を系統的に求めるための一手法を提案する。モデル系統について本手法の有効性を確認するとともに、SME Sによる過渡電力動揺の抑制効果について得られた知見を述べる。

第3章では、中間領域の電力動揺の安定度が問題になっている一つの特徴的な系統である長距離大容量送電系統を対象に解析を行う。ここでは、SME Sを設置して、有効電力ならびに無効電力の制御を行うことにより、電力動揺と同時に電圧の安定化をはかる場合の安定化効果を考察している。モデル系統について制御アルゴリズムを提案するとともに、シミュレーションによりその効果を確認した結果、無効電力のみ制御可能なSVC（静止形無効電力補償装置）と比較して、本制御は格段に安定化効果が大きく、安定に送電可能な容量が顕

著に増加することを明らかにしている。また、制御に必要なSME Sの貯蔵エネルギーおよび出力電力の大きさならびに効果的なSME Sの設置箇所を検討している。

第4章では、中間領域の電力動揺の安定度問題として、とくに系統全体に拡がる長周期で減衰の悪い電力動揺の発生が問題になっている広域連系系統を対象にSME Sの安定化特性を検討する。SME Sの系統動揺に対する制御効果の大きさを可制御性および可観測性の概念を応用して定義し、この指標によって問題となる長周期電力動揺に対して効果的なSME Sの設置箇所を求める。シミュレーションにより安定化特性を確認するとともに、SVCに比べて本制御特性が極めてすぐれていることを明らかにする。また、シミュレーションの結果より、制御に必要なSME Sの貯蔵エネルギーおよび出力電力の大きさを評価する。以上の成果にもとづき、制御を行うために必要な電力貯蔵容量、交直変換器の容量あるいはコイルの磁束密度変化率といった系統安定化装置としてのSME Sの諸元を検討する。

第5章では、直列コンデンサ補償系統の不安定振動現象の安定化制御へのSME Sの応用例を示す。本章では、前章までに取り扱ってきた電力動揺と、自己励磁振動現象や軸ねじれ共振現象を統一的なモデルで表現する。このとき、電力動揺と自己励磁振動や軸ねじれ共振の発生周波数領域が大きく異なることに着目し、このような応答速度の異なるモードの混在システムに対して特異摂動法を適用して制御系の構成法を導く。構成された制御系についてシミュレーションを行い、SME Sにより電力動揺の安定化と同時に、自己励磁振動や軸ねじれ共振の安定化を行えることを示す。

第6章の結論で、第2章から第5章で述べた研究成果を総括する。

目 次

第 1 章	結 論	1
	参考文献	5
第 2 章	過渡電力動揺の安定化	7
2-1	緒 言	7
2-2	S M E S（超電導エネルギー貯蔵装置）を含む電力系統 の過渡電力動揺解析モデル	8
2-3	S M E Sを用いた過渡電力動揺の安定化制御	9
2-4	S M E Sの設置箇所および容量の決定	13
2-4-1	可制御性に着目した設置箇所決定手順	13
2-4-2	シミュレーションによる必要容量の決定	17
2-4-3	4 機モデル系統への適用	19
2-4-4	10機モデル系統への適用	23
2-5	結 言	25
付録 2-1	S M E Sの構成と電力制御機能	27
付録 2-2	過渡電力動揺の安定度解析におけるリアプノフ関数 の臨界値	28
付録 2-3	モデル系統の定数と初期潮流状態	30
	参考文献	33
第 3 章	長距離大容量送電系統における電力動揺ならびに電 圧の安定化	35
3-1	緒 言	35

3-2	S M E S を含む長距離大容量送電系統の定式化	36
3-3	S M E S を用いた電力動揺ならびに電圧の安定化制御	38
3-3-1	S M E S の有効・無効電力同時制御機能	38
3-3-2	安定化制御系の構成	39
3-4	潮流感度に基づく S M E S の設置箇所に関する検討	42
3-5	モデル系統における安定化制御効果の検討	44
3-5-1	静止形無効電力補償装置との比較検討	44
3-5-2	送電可能容量の改善	47
3-6	結言	49
付録 3-1	S M E S の構成と有効・無効電力同時制御機能	50
付録 3-2	静止形無効電力補償装置 (S V C) を用いた電力動 揺ならびに電圧の安定化制御	51
参考文献		53
第 4 章	広域連系系統における電力動揺の安定化	55
4-1	緒言	55
4-2	広域連系系統の線形化モデル	56
4-3	S M E S を用いた長周期電力動揺の安定化制御系の構成	61
4-3-1	連系線潮流のフィードバック制御	61
4-3-2	可制御性・可観測性に着目した安定化の評価指標によ る設置箇所の決定	64
4-4	くし形連系モデル系統の安定化制御	65
4-4-1	安定化評価指標による設置箇所の決定	65
4-4-2	制御パラメータの決定	68
4-4-3	評価指標の初期潮流に対する依存性	70
4-4-4	シミュレーションモデルによる検証	74

4-4-5	安定化制御に必要な S M E S の諸容量の検討	74
4-5	7 機連系モデル系統の安定化制御例	78
4-6	結言	80
付録 4-1	S M E S のフィードバック信号と状態方程式の解の 関係	82
参考文献		84

第 5 章 直列コンデンサ補償系統における不安定振動現象の

	安定化	86
5-1	緒言	86
5-2	直列コンデンサ補償系統の不安定振動現象の解析モデル	87
5-2-1	S M E S を含む系統モデルの記述	87
5-2-2	線形化状態方程式による表現	90
5-3	固有値計算による系統の不安定振動現象の解析	90
5-4	特異摂動法による応答速度の異なるサブシステム への分割	92
5-5	S M E S を用いた安定化制御系の設計	95
5-5-1	サブシステムに基づくフィードバック制御系の設計	95
5-5-2	状態観測器の設計	97
5-6	モデル系統への適用	99
5-6-1	安定化制御系の設計	99
5-6-2	シミュレーションによる安定化効果の検討	101
5-6-3	送電可能容量の改善	104
5-7	結言	104
付録 5-1	S M E S による $d \cdot q$ 軸電流の同時制御	106
付録 5-2	特異摂動法によるシステムの分割	107

参考文献	109
第 6 章 結論	111
謝辭	113
研究業績目錄	114

電力系統を構成、運用する場合の基本原理は、定常的に、安価でかつ高品質な電力供給を行うことにある¹⁾。こうした要求は社会、産業の発展とともに増々厳しいものになっている。このような経済性および信頼性を追求する上で、電力系統の安定性向上の問題は極めて重要な課題の一つである²⁾。

従来、電力系統の安定度問題は定常状態において継続的に送電し得る能力を対象とした定態安定度と、大じょう乱に対して同期を失うことなく平衡状態に回復し得る能力を対象とした過渡安定度の二種に大別され解析されてきた³⁾。この考えに基づき、種々の対策が開発され、その結果、系統の安定性は格段に高いものとなり、今日のような大規模で信頼性の高いシステムが実現された。

一方、近年の電力系統の特徴として、原子力発電所に代表される大容量電源の局所への偏在化および大消費地の大都市への集中に伴い送電線が長距離大容量化する傾向にある。これに加えて、経済性や信頼性の向上のために系統間の連系が強化され、系統が大規模かつ複雑化するのに伴い、いくつかの新たな安定度問題が顕在化してきた。その一つに、系統全体に拡がる数秒あるいは数十秒にも及ぶ長周期で減衰の悪い電力動揺の発生が挙げられる⁴⁾⁵⁾。このため、大じょう乱発生後第1波の同期は保たれたとしても、その後の電力動揺が継続あるいは発散するといったケースが生じてきた。さらに、送電距離の等価的な縮小のために送電線と直列にコンデンサを挿入した系統において、電氣的な共振現象である自己励磁振動現象⁶⁾あるいは電気系と機械系の干渉に伴う共振現象である軸ねじれ共振現象⁷⁾といった不安定振動現象をとまなうことが報告されている。電力系統をその能力の限界まで利用しようという動きが強まる中で、こうした安定度の問題をいかに解決するかは今後増々重要な課題となってくるであろう。

本研究では、こうした電力系統の安定化の新しい手法として超電導エネルギー

一貯蔵装置 (Superconducting Magnet Energy Storage、以下ではSME Sと略称する) を導入する効果について検討を行っている。

SME Sは超電導マグネットとサイリスタ電力変換装置で構成される。この電力変換装置の制御により高効率で迅速かつ頻繁なエネルギーの吸収・放出が可能である⁸⁾。また、このような電力変換装置を2台直列に接続し、それぞれ適切な制御を施すことにより貯蔵電力の充放電において有効電力と無効電力がある範囲内で同時に制御できる⁹⁾。とくに、最近のゲート・ターン・オフ (GTO) サイリスタ電力変換装置の開発により、遅れ力率から進み力率に至る広範囲での同時制御が可能になった¹⁰⁾。電力系統において有効電力と無効電力を同時にかつ高速に制御できることの意義は大きく、そのため、電力系統の動特性の改善に顕著な効果が期待される。本論文では、このようなSME Sの制御特性に着目し、SME Sを用いた電力系統の安定化制御を提案している。

ここで、電力系統で安定度上重要視されている、前述のいくつかの問題を解析上の観点から分類し、本論文の各章で取り上げる主題を整理する。

まず、不安定現象の発生機構に着目すると、不安定現象の問題は発電機の機械的入力と出力電力の不均衡に起因する電力動揺の問題と直列コンデンサ補償系統におけるコンデンサと送電線のリアクタンス間の共振に起因する自己励磁振動現象や軸ねじれ共振現象の問題に大別できる。さらに、電力動揺に関しては、解析時間領域により、じょう乱発生後第一波を対象とした過渡領域の電力動揺 (過渡電力動揺) の安定度問題とじょう乱発生後数秒以降における電力動揺の発散・収束の問題 (中間領域の電力動揺の安定度問題) に細分できる。

以下に、それぞれの問題の特徴とこれまでに提案されている制御方式を簡単に述べ、SME Sの制御機能との対比によりSME Sの導入の可能性をまとめ、本論文の各章の主題を述べる。

(1) 過渡電力動揺の安定度問題：突発的な大じょう乱に対して、発電機が同期運転を維持できるかどうかを対象とした安定度問題である。

この問題では、いかに迅速に発電機の加速を抑制するかが重要になる。このため、制御方式としては、制動抵抗や並列コンデンサのオン・オフ制御、超速応励磁方式あるいはタービン発電機における高速バルブ制御方式があり、それぞれにおいて安定化の効果が確認されている¹¹⁾。したがって、S M E S のエネルギー吸放出の速応性を利用すれば十分に効果的な安定化が期待され、その効果は、すでに、特定の場所に S M E S を設置した場合について、シミュレーションおよび模擬電力系統を使った実験により確認されている^{12),13)}。

本論文では、第2章において、S M E S による過渡電力動揺の安定化に関してこれまで検討が不十分であった、S M E S の効果的な設置箇所あるいは制御に必要な S M E S の容量といった観点から、その効果を評価する。

(2) 中間領域の電力動揺の安定度問題：平衡点の回りの電力動揺の発散・収束の問題である。

この問題は、線形化された微分方程式によりその特性を把握できる。その制御には高速の連続量の制御が要求され、励磁制御系への安定化補助信号の付加¹⁴⁾あるいは静止形無効電力補償装置による制御¹⁵⁾など主に無効電力発生源を用いた制御が提案されている。しかしながら、これらの制御では無効電力を電力動揺の制御に用いるため、電圧の安定性が犠牲にされているともいえる。これに対して、S M E S は有効電力と無効電力を同時に制御できるため、有効電力を電力動揺の安定化に、無効電力を電圧の安定化に用いることにより、系統に不用なじょう乱を与えることなく顕著な安定化効果を期待できる。

本論文では、この問題がとくに発生しやすい系統として、第3章において長距離大容量送電系統を、第4章において広域連系系統を対象に、それぞれ S M E S を用いた安定化制御を提案し、それらの効果を評価する。

(3) 自己励磁振動現象・軸ねじれ共振現象の問題：直列コンデンサ補償系統における、系統のリアクタンスとコンデンサの L C 共振に起因する振動現象（自己励磁振動現象）および、このような電氣的振動とタービン—発電機軸の機

械的振動の干渉による共振現象（軸ねじれ共振現象）の問題である。

これらの問題も線形化された微分方程式により特性の把握が可能で、線形制御理論を応用して安定化制御系が検討されているが、振動周波数が10～40 Hzと高いため制御の速応性が要求される。このため、発電機の励磁系を用いた制御¹⁶⁾、サイリスタとリアクトルを組み合わせた制御装置¹⁷⁾、サイクロコンバータを用いた電流補償制御¹⁸⁾などが提案されている。SMESは電力変換装置にサイリスタを用いているため、十分に応答良くその出力電流を制御できるものと考えられ、SMESを用いた安定化の効果が期待できる。

本論文では、第5章において、前述の電力動揺の問題と同時に自己励磁振動や軸ねじれ共振を安定化するためのSMESを用いた制御を提案し、その効果を評価する。

以下の各章では、上に述べたそれぞれの安定度問題に対して、まず、問題を的確に記述するための系統の定式化を行い、これに基づき、SMESを用いた安定化のための制御アルゴリズムを導いている。さらに、各種の数値解析によりそれらの制御の効果を評価している。その結果、SMESを用いた制御の有効性を確認するとともに、系統内におけるSMESの効果的な設置箇所と制御に必要な電力貯蔵容量や電力変換装置の容量が推定できるようになった。これらの成果は、系統安定化装置としてのSMESの機能について適切な評価を行うための基準となり得るものである。

【第1章 参考文献】

- 1) 関根・林・芹沢・豊田・長谷川：「電力系統工学」コロナ社、昭54。
- 2) 田中：「特集：電力システム技術の新しい動向、II. 電力輸送力の増強、第3章 安定度向上技術」電気学会雑誌、104 巻 11号 昭59年。
- 3) 上之蘭・植田：「小特集：最近における電力系統解析技術、III. 電力系統の安定度解析」電気学会雑誌、100 巻 1 号 昭55年。
- 4) Yao-nan Yu "Electric Power System Dynamics", ACADEMIC PRESS INC., New York, 1983.
- 5) V. Arcidiacono, E. Ferrari, F. Saccomanno "Studies on Damping of Electromechanical Oscillations in Multimachine Systems with Longitudinal Structure", IEEE Trans. on PAS-95, No.2, 1976.
- 6) L. A. Kilgore, L. C. Elliott, E. R. Taylor "The Prediction and Control of Self-Excited Oscillations due to Series Capacitors in Power Systems", IEEE Trans. on PAS-90 No.3, 1971.
- 7) D. N. Walker, C. E. J. Bowler, R. L. Jackson, D. A. Hodges "Results of Subsynchronous Resonance Test at Mohave", IEEE Trans. on PAS-94, No.5, 1975.
- 8) 仁田・小嶋・岡田：「超電導エネルギー貯蔵装置の電力吸収放出実験」電気学会静止器研究会、SA-80-19、 昭55。
- 9) 伊瀬・辻・村上：「0.5 MJ 超電導エネルギー貯蔵装置による有効・無効電力同時制御」電気学会論文誌B 104 巻 9 号 昭59。
- 10) T. Ise, Y. Murakami, K. Tsuji "Simultaneous Active and Reactive Power Control of Superconducting Magnet Energy Storage Using GTO Converter", IEEE paper No. 85 SM 354-6, presented at the Power Engineering Society Summer Meeting, 1985.

- 11) 電気協同研究会編：「電力系統の安定度」電気協同研究 34巻 5号 昭54.
- 12) 大沢・宮内・林：「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 PE-81-16 昭56.
- 13) H. Kaminosono, T. Tanaka, T. Ishikawa, M. Masuda, T. Shintomi
"Power System Stabilization by Superconducting Magnet Energy Storage", US- Japan SMES Workshop, Madison, 1981.
- 14) F. P. de Mello, C. Concordia "Concepts of Synchronous Machine Stability as Affected by Excitation Control", IEEE Trans. on PAS -88 No.4, 1969.
- 15) S. C. Kapoor "Dynamic Stability of Long Transmission Systems with Static Var Compensators and Synchronous Machines", IEEE Trans. on PAS-98, 1979.
- 16) 室谷・浅野：「直列コンデンサ補償系統における同期機の軸ねじれ共振現象とその抑制」電気学会論文誌B 96巻12号 昭51.
- 17) 藤原・武田・野村・瀬里・小寺：「状態フィードバックによるリアクトル形SSR安定化装置の設計法と抑制効果の解析」電気学会論文誌B 102巻 3号 昭57.
- 18) 小竹・渡部・武田・鈴木・藤原：「ダイナミックコンペンセイタによるSSR現象の抑制」電気学会論文誌B 100巻 9号 昭55.

第 2 章 過渡電力動揺の安定化

2-1 緒言

S M E S によりエネルギーを高効率かつ迅速に吸収、放出できる¹⁾点を利用すれば過渡電力動揺の安定化制御への応用が考えられる。すでに、特定の場所に S M E S を設置した場合について、シミュレーションおよび模擬電力系統を使った実験などにより、その効果は確認されている^{2),3)}。しかしながら、過渡電力動揺を安定化するために、与えられた系統のうちどこにどれだけの S M E S を設置すべきであるか、その貯蔵容量や電力変換装置の容量をいかに選ぶべきかといった検討はあまり行われていない。したがって、S M E S による過渡電力動揺の安定化の有効性に関する評価は十分には行われていないといっている。

一方、S M E S は現状では建設コストが高く、系統内の外乱発生に備えて常に低温を維持する必要があるなど、単に過渡電力動揺の安定化のために S M E S を用いることは現実的ではないとも考えられている。こうした中で、将来、系統への導入が有望視されている大容量電力貯蔵用 S M E S ⁴⁾の付加的機能としての系統安定化効果が期待されている⁵⁾。

S M E S を電力貯蔵装置として用いる場合、最適運用の観点から S M E S の容量ならびに設置箇所に関する議論がなされ、導入の効果が容量や設置箇所により大幅に異なることが指摘されている⁶⁾。また、地盤の強度や漏洩磁界の環境への影響など物理的制約を考慮した設置点の検討も重要な課題となっている^{7),8)}。したがって、上述の設置箇所などに関する検討は電力貯蔵用 S M E S の電力系統への導入効果を評価するうえでも非常に重要であると考えられる。

本章では、以上の観点にもとづき過渡電力動揺の安定化の効果を系統的に評価するための一手法を提案する⁹⁾。本手法は動作点の近傍で線形化した方程式の可制御性を評価するもので、その評価過程は行列要素の比較演算により構成

されているため、大規模システムについても効率よく評価できる。本手法をモデルシステムに適用し、過渡電力動揺の安定化に効果的なSME Sの設置箇所を求め、シミュレーションによりその有効性を確認した。更に、この手法により電力系統におけるSME Sの過渡電力動揺の安定化効果についての評価を行ったのでその結果を述べる。

2-2 SME Sを含む電力系統の過渡電力動揺解析モデル

図2.1 に示すように、 n 機の発電機により構成される電力系統を考え、その中の任意の m 箇所の母線にSME Sが設置されているものと仮定する。発電機は過渡リアクタンス背後電圧一定のモデルで表

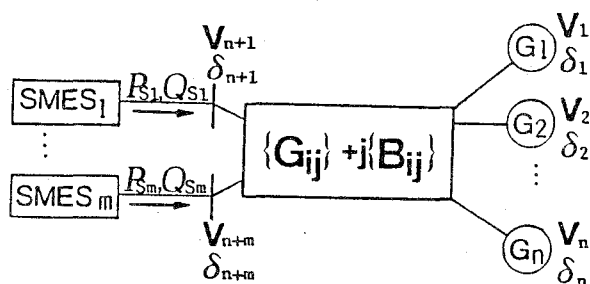


図2.1 複数基のSME Sを含む系統のモデル

現する。いま、背後電圧およびその位相をそれぞれ V_i 、 δ_i ($i=1, \dots, n$)、SME Sを設置する母線の電圧および位相角をそれぞれ V_{n+k} 、 δ_{n+k} ($k=1, \dots, m$) とする。これらより見た $n+m$ 次のアドミタンス行列を

$$\{G_{ij}\} + j\{B_{ij}\} \quad i, j=1, \dots, n+m \quad \dots\dots\dots (2.1)$$

とし、発電機の運動を

$$\left. \begin{aligned} M_i \ddot{\delta}_i &= P_{mi} - P_i \\ P_i &= V_i \sum_{j=1}^{n+m} V_j \{G_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) \\ &\quad + B_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j)\} \quad i=1, \dots, n \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2.2)$$

で表現する。ただし、 M_i および P_{mi} はそれぞれ慣性定数および機械入力で、両者とも一定とする。 $SME S$ から放出される有効電力および遅れ無効電力を正にとり、それぞれ P_{sk} 、 Q_{sk} ($k=1, \dots, m$) とする。このとき、 $SME S$ を設置する母線においては

$$\left. \begin{aligned} P_{sk} &= V_{n+k} \sum_{j=1}^{n+m} V_j \left\{ G_{n+k \ j} \cos(\delta_{n+k} - \delta_j) \right. \\ &\quad \left. + B_{n+k \ j} \sin(\delta_{n+k} - \delta_j) \right\} \\ Q_{sk} &= V_{n+k} \sum_{j=1}^{n+m} V_j \left\{ G_{n+k \ j} \sin(\delta_{n+k} - \delta_j) \right. \\ &\quad \left. - B_{n+k \ j} \cos(\delta_{n+k} - \delta_j) \right\} \end{aligned} \right\} \dots \dots (2.3)$$

が成り立つ。

以上により表現されたモデルを用いて解析を行う。

2-3 $SME S$ を用いた過渡電力動揺の安定化制御

過渡電力動揺の安定化をはかるには、設置した $SME S$ の有効電力を適切に制御することが必要となる。文献2)および3)では $SME S$ を発電端に設置し、その発電機の角速度偏差をフィードバック信号として用いることにより $SME S$ の有効電力を制御している。ここでは、負荷端も $SME S$ を設置する候補点として考えるため、動作点の近傍で線形化された状態方程式において二次形式の評価関数を最小化する最適制御系を構成する。

$SME S$ においては1台の6パルスサイリスタ電力変換装置が用いられ、この変換装置において有効電力の制御を行うものとする（付録2-1参照）。変換装置の初期運転状態としては有効電力の出力を零とし、無効電力はコンデンサにより補償されているものとする。また、変換装置から出力される有効電力 P_{sk} および無効電力 Q_{sk} は次式の制約がかかっているものとする。

$$P_{sk}^2 + Q_{sk}'^2 = (I_{dk} V_{n+k})^2, \quad Q_{sk}' < 0 \quad k=1, \dots, m$$

..... (2.4)

ただし、コンデンサによる補償分を $Q_{ck} (>0)$ とし、これを含めて $SME S$ の無効電力出力 $Q_{sk} (= Q_{sk}' + Q_{ck})$ とする。 Q_{sk} の初期値は零である。また、 I_{dk} は超電導マグネットの電流で、簡単のため、以下の解析ではコイルのインダクタンスを十分大きいものとして I_{dk} を一定と考える。

ここで、系統モデルを動作点の近傍で線形化する。いま、(2.4) 式で、動作点において有効電力の変化分に対して無効電力の変化分は小さいのでこれを無視すると、

$$\left. \begin{aligned} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta \omega \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & I \\ A_1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ B_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_s \\ \Delta V_s \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} \Delta P_s \\ 0 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} C_1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta \omega \end{bmatrix} + D_1 \begin{bmatrix} \Delta \delta_s \\ \Delta V_s \end{bmatrix} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2.5)$$

を得る。ただし、

$$\begin{aligned} \Delta \delta &= [\Delta \delta_2' \dots \Delta \delta_n']^t \\ \Delta \omega &= [\Delta \omega_2' \dots \Delta \omega_n']^t \\ \Delta \delta_s &= [\Delta \delta_{n+1}' \dots \Delta \delta_{n+m}']^t \\ \Delta V_s &= [\Delta V_{n+1} \dots \Delta V_{n+m}]^t \\ \Delta P_s &= [\Delta P_{s1} \dots \Delta P_{sm}]^t \\ \Delta \delta_i' &= \Delta \delta_i - \Delta \delta_1, \quad i=2, \dots, n+m \\ \Delta \omega_i' &= \Delta \omega_i - \Delta \omega_1, \quad i=2, \dots, n \end{aligned}$$

A_1, B_1, C_1, D_1 : 動作点におけるヤコビアン

I : 単位行列

O : 零行列

である。 Δ は動作点からの変化分を、 t は転置を表す。

ここで、行列 D_1 は(2.3)式で表される潮流条件式において、発電機の過渡リアクタンス背後電圧の位相を一定としたときの、ヤコビアン行列である。このとき、一般に、限界潮流（ノード電力の極限、いまの場合、母線に注入できるSME Sの電力の限界）の状態の母線があるとき、 D_1 の逆行列は存在しないことが知られている¹⁰⁾。しかし、通常の運転状態ではこのような限界潮流状態の母線は存在しないものと考えられ、以下では行列 D_1 は正則であるとして議論を進める。

このとき、(2.5)式より

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{\delta} \\ \Delta \dot{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} O & I \\ A_1 - B_1 D_1^{-1} C_1 & O \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} O \\ B \end{bmatrix} \Delta P_s$$

..... (2.6)

を得る。ただし、行列 B ($B \in R^{(n-1) \times m}$)は次式により表されるように、行列 $B_1 D_1^{-1}$ から行列 B' ($B' \in R^{(n-1) \times m}$)を除いた行列である。

$$B_1 D_1^{-1} = [B \quad B']$$

ΔP_s を入力とした線形化状態方程式である(2.6)式に基づいて、安定化のための制御則として、評価関数

$$J = \int_0^{\infty} \{ [\Delta \delta \quad \Delta \omega] W_x \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta \omega \end{bmatrix} + \Delta P_s^t W_u \Delta P_s \} dt \dots\dots\dots (2.7)$$

を最小にする最適制御を用いるものとする。ただし、 W_x 、 W_u は重み行列で、それぞれ正定である。このとき、最適制御となる ΔP_s は

$$\Delta P_s = -K \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta \omega \end{bmatrix} = -W_u^{-1} B_o H \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta \omega \end{bmatrix} \dots\dots\dots (2.8)$$

により与えられる。ただし、 H はリカッチ方程式

$$A_o^t H + H A_o - H B_o W_u^{-1} B_o^t H + W_x = 0$$

の解で、行列 A_o および B_o はそれぞれ (2.6) 式の状態方程式の係数行列である¹¹⁾。

実際の制御は、(2.8) 式に S M E S の制御の遅れを近似した一次遅れ $1 / (1 + T_a s)$ が付いているものとする。ただし、制御の遅れは主として電力トランスデューサによる電力検出の遅れを考慮したものである。以上の制御のブロック図を図 2.2 に示す。なお、図中のリミッタは (2.4) 式を考慮して、 P_{sk} の制約である

$$P_{sk}^2 \leq (I_{dk} V_{sk})^2, \quad k=1, \dots, m$$

V_{sk} : S M E S 設置点の電圧

を表現したものである。

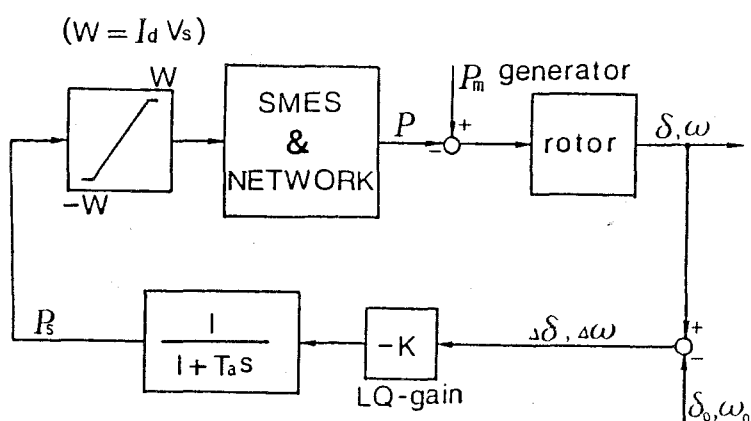


図2.2 制御ブロック図

2-4 SMESの設置箇所および容量の決定

2-4-1 可制御性に着目した設置箇所決定手順

ここでは、前節で構成した線形化状態方程式を用いて、与えられた運転状態に対して効果的なSMESの設置箇所を系統的に決定するためのアルゴリズムを構成する。

対象とする系統において、過渡電力動揺の安定度が問題となる運転状態が与えられたものとして、その運転状態の下で(2.6)式を求め、これを二階の微分方程式で表現すると

$$\Delta \ddot{\delta} = A \Delta \delta + B \Delta P_s \quad \dots \dots \dots (2.9)$$

とすることが出来る。ただし

$$A = A_1 - B_1 D_1^{-1} C_1$$

である。このとき、行列Aのn-1個の固有ベクトルにより構成される行列T

を用いて、変換

$$\Delta \delta = T x \quad \dots\dots\dots (2.10)$$

により行列Aを対角化する。ただし、実系統において行列Aの固有値が重複するのは、極めて特殊な場合と考えられ、ここでは、固有値はすべて異なっているものとする。このとき、(2.9) 式および(2.10)式より

$$\ddot{x} = \Lambda x + T^{-1} B \Delta P_s \quad \dots\dots\dots (2.11)$$

を得る。ただし、行列 Λ は行列Aの固有値 λ_i ($i=1, \dots, n-1$) を対角に持つ対角行列である。

(2.11)式において、ある x_i (モード*i*と呼ぶことにする) に着目すると

$$\ddot{x}_i = \lambda_i x_i + b_{i1}' \Delta P_{s1} + \dots + b_{im}' \Delta P_{sm} \quad \dots\dots (2.12)$$

と表すことができる。ただし b_{ij}' は $T^{-1} B$ の*i*, *j*要素である。(2.12) 式において、 b_{ij}' はモード*i*に対する ΔP_{sj} の可制御性の大きさを表しているものと考えることができる。そこで、この $T^{-1} B$ の各要素の情報を用いて*j*番目のSME Sのモード*i*に対する可制御性を評価することにより、効果的なSME Sの設置箇所を求めるアルゴリズムを構成しよう。ただし、ここで効果的な設置箇所とは、できるだけ少数のSME Sで全モードの制御が可能な設置箇所を意図している。

まず、固有ベクトルによって構成された行列Tの逆行列 T^{-1} は各行ベクトルごとにスカラ倍の任意性を持つので、これを考慮して $T^{-1} B$ を各行ベクトルごとに正規化した後、全要素の絶対値をとったものを可制御性の評価行列 B^* と

する。すなわち B^* の要素 b_{ij}^* は次の性質を有する。

$$b_{i1}^* + \dots + b_{im}^* = 1, \quad b_{ij}^* \geq 0$$

$$i=1, \dots, n-1, \quad j=1, \dots, m$$

B^* を用いて効果的な設置箇所を決定する方法は種々考えられる。最も単純な方法として、各モードについて可制御性を一つのパラメータ ε で表し、SME S の設置箇所に関して b_{ij}^* を加えたものが ε より大になるように設置箇所を選定する方法が考えられる。しかし、この方法は、モードの評価順序により設置箇所の選定結果が異なるため、モードの評価順序をすべて考えなければならず、選定作業の実行は困難である。

ここでは二つのパラメータ ε_x および ε_y を導入し選定が容易に、しかも妥当に行えるようなアルゴリズムを考案した。図2.3 にそのフローチャートを示す。ここでは、モード i について、次の条件 (i), (ii) のいずれかが成立するとき、モード i は制御可能であるとし、すべてのモードについて制御可能性を満足するように SME S の設置箇所が決定される。

$$(i) \quad b_{ij}^* / \sum_{j \in I_s} b_{ij}^* < \varepsilon_x, \quad \forall j \in \bar{I}_s$$

$$(ii) \quad \text{すくなくとも一つの } j \in I_s \text{ について } b_{ij}^* > \varepsilon_y$$

ただし、 I_s , $\bar{I}_s$ はそれぞれ SME S が設置された箇所、されない箇所の集合、 I_m , $\bar{I}_m$ はそれぞれ制御可能性を満足されたモード、されないモードの集合で、 I_s , I_m の初期値は $\{\phi\}$ である。明らかに制御可能性はパラメータ ε_x および ε_y に依存するが、全箇所に SME S を設置すれば (i) の条件により制御可能性は必ず満たされる。

ステップ1では、設置箇所をできるだけ少なくする意図から、まず安定化に

特に必要な（ここに設置しなければあるモードの安定化がはかれない）設置箇所を(i)の条件を用いて選定する。ステップ2では、ステップ1で設置されたSMESが他のモードの制御にも有効であるかどうかを(ii)を用いて評価する。ステップ3では、ステップ1および2で制御可能でなかったモードのうち、SMESを設置することにより制御可能となるモードの数が最も多くなるような箇所から順次SMESを設置する。ただし、このときの制御可能性は(ii)で判定する。ステップ4では、ステップ3終了後未だ制御可能性の満足されていないモードがあればそのモードが、既に設置されているすべてのSMESにより制御可能か否かを(i)を用いて評価する。もし、そのモードが制御可能でない場合は設置されていない箇所の中で最も効果的な（す

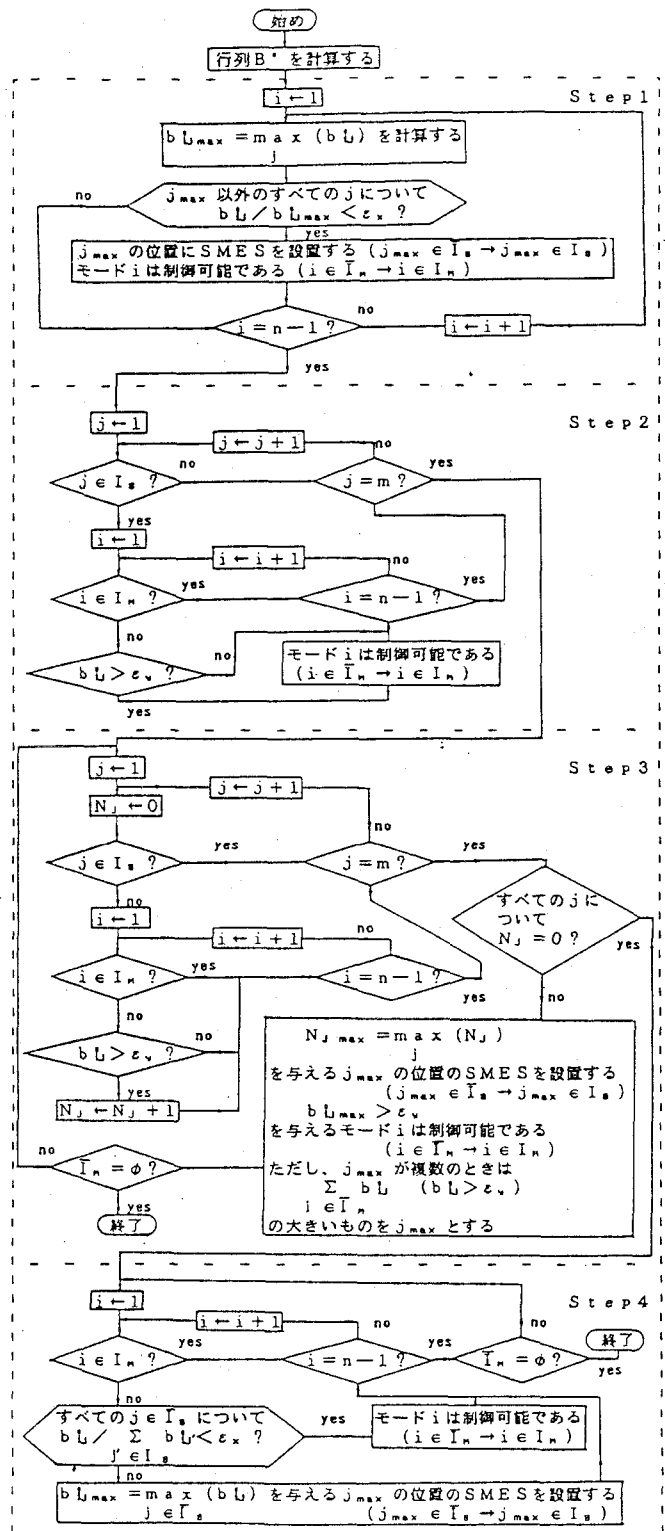


図2.3 設置箇所決定のためのアルゴリズム

なわち、これらの中で最も b_{ij}^* の大きい) 箇所 $SME S$ を追加する。このステップをすべてのモードの制御可能性が満足されるまで繰り返す

ステップ 1 で ε_x は安定化に特に必要な設置箇所を選定するパラメータである。 ε_x を大きい値に設定すると、特に必要でない $SME S$ が必要であると判断され、逆に小さい値に設定すると必要な $SME S$ が選定されない場合が生じる。 ε_y は設置された $SME S$ により制御可能なモードの基準を表すパラメータである。このため、 ε_y を小さい値に設定したとき選定された設置箇所では、十分な安定化がはかれない場合が生じる。 ε_x および ε_y は適当な値に設定する必要があるが、それらは後の数値計算により検討することにする。

2-4-2 シミュレーションによる必要容量の決定

シミュレーションにより系統の安定化効果を評価して、上述のアルゴリズムの有効性を確認するとともに、その結果を元に制御に必要な $SME S$ の容量を決定する。このためには、適切な方法でシミュレーションを行う必要がある。ここでは、シミュレーションのために設定する各種の条件および制御効果の評価方法を述べるとともに、シミュレーションの結果を用いた $SME S$ の必要容量の決定方法を示す。

- (i) 制御パラメータの設定：フィードバック利得を決定するために必要な (2.7) 式の評価関数の重み行列は、 $SME S$ の設置数 m_s に依らず系統を操作する総エネルギーがほぼ同じになるように

$$W_x = I_x, \quad W_u = m_s w_u I_u \quad \cdots \cdots \cdots (2.13)$$

I_x, I_u : 単位行列

とする。ただし、 w_u は対象とする系統で適当に選定するものとする。

- (ii) 故障の設定：故障の種類は三相短絡とし、故障点は系統内で数箇所適当に選ぶものとする。故障継続時間は臨界値近くに設定する。

(iii) 制御効果の評価：故障発生後の2秒後のリアプノフ関数値を用いて制御効果を評価する。制御結果の良し悪しは、波形を描いて見る方法もあるが、定量的に評価できることが望ましい。最も簡単な方法としては、 $\Delta \delta$ および $\Delta \omega$ の自乗積分が考えられるが、この値は安定性に直接結びつかない。これに対し、動揺曲線に沿ったリアプノフ関数値は系統に貯えられるエネルギーを表していると見ることができる。ここで設定した臨界に近い故障に対しては、無制御のときのリアプノフ関数は、故障に依らずいずれもほぼ同じ値を示す。これに対し、制御を施すことにより系統がより安定な状態になったとき、リアプノフ関数は小さくなることが数値的に確かめられている（付録2—2参照）。ここではこれを利用して制御効果を評価する。

(iv) S M E S の電力変換装置の設定：予め電力変換装置の容量を大きめに設定し、シミュレーションを行った結果より、制御に必要な変換装置の容量を決定できると考えられるが、このとき、無効電力補償用のコンデンサの容量も大きくする必要があり、とくに母線電圧への影響が懸念される。ここでは、母線での潮流状態を考慮して以下のように電力変換装置の容量を設定する。発電機端に設置する場合はその発電機の容量と同じ値とする。負荷端に設置する場合は S M E S の無効電力が母線電圧に与える影響が大きいと考えられるので、その負荷の容量の80%の値に設定する。同一の母線に発電機と負荷が接続されているときは上記設定の和とする。発電機端でも負荷端でもない母線の場合は隣接母線について上述の設定値を求め、その最大値を設定する。

以上に基づいてシミュレーションを行い、その結果を用いて以下の方法で制御に必要な S M E S の容量を決定する。まず、各 S M E S についての吸収エネルギー量あるいは放出エネルギー量のうちの最大値（この値を最大エネルギーと呼ぶことにする）を求め、この値をそのときの制御に必要な貯蔵エネルギーとする。また、有効電力出力の最大振幅を求め、この値をそのときの制御に必要な電力変換装置の容量とする。

2-4-3 4機モデル系統への適用

図2.4 に示す4機モデル系統を用いて数値計算を行った。系統の定数は付録2-3に示す。初めに、設置箇所決定のためのアルゴリズムを用いて、 ε_x および ε_y をパラメータとしてSME Sの設置箇所を選定した。SME Sを設置する候補となる母線として母線1～6を選んだときの結果を表2.1 に示す。

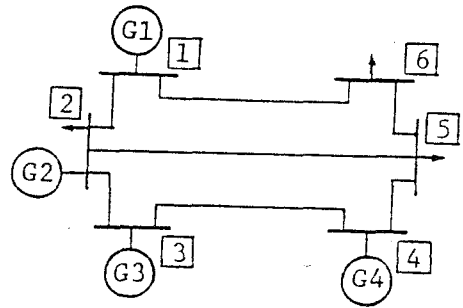


図2.4 4機モデル系統

表2.1 の結果は次のように見ることができる。前節でも述べたように、 ε_x が大きいときには、モードの個数に等しい3基のSME Sを必要としている($\varepsilon_x = 0.7$ のとき参照)。 ε_x を0.5に設定し、 ε_y を変えたときの結果から、SME Sは母線2、3、4に設置すれば最も効果的で、次いで母線2、3に設置すれば効果的と考えられる。

次に、上記の結果の有効性を確認するためにシミュレーションを行った。想定したSME Sの設置箇所は、設置する候補とした母線1～6に対してすべての設置の組み合わせ(まったく設置しない場合を除いて、63通り)である。制御パラメータは(2.13)式で $w_u = 50$ に定めて決定した。この値

表2.1 SME Sの設置箇所の選定結果(4機モデル系統)

(a) $\varepsilon_x = 0.7$						
ε_y \ Bus	1	2	3	4	5	6
-1.0	0	1	1	1	0	0
(b) $\varepsilon_x = 0.5$						
ε_y \ Bus	1	2	3	4	5	6
0.6-1.0	0	1	1	1	0	0
-0.5	0	1	0	1	0	0
(c) $\varepsilon_x = 0.3$						
ε_y \ Bus	1	2	3	4	5	6
0.6-1.0	0	1	1	1	0	0
0.4-0.5	0	1	0	1	0	0
-0.3	0	0	0	1	0	0

(0: 設置しない 1: 設置する)

表2.2 故障の設定(4機モデル系統)

故障点 (三相短絡)	故障時間 (sec)	無制御時の リアブノフ関数値
A: Bus 2	0.14	0.7872
B: Bus 3	0.15	0.7673
C: Bus 4	0.15	0.8618

は、S M E S を母線 2、3、4 に設置したときの線形化状態方程式から求めた固有値の減衰時定数がすべて 2 秒以下になるようにしたものである。故障は表 2.2 に示す設定を行った。それぞれに対する無制御時の発電機の位相角および出力電力の動揺を図 2.5 に示す。

シミュレーションの結果を表 2.3 に示す。同表は各故障別にリアプノフ関数値の小さい順、すなわちより安定化されている順に制御結果をならべたもののうち主なものをいくつか挙げたものである。

これらの結果より次のことがわかった。設置箇所決定のためのアルゴリズムを適用した結果(表 2.1)から考察したように、母線 2、3、4 に S M E S を設置したときは故障点によらず常に安定化効果が高い(シミュレーション波形の一例を図 2.6 に示す)。

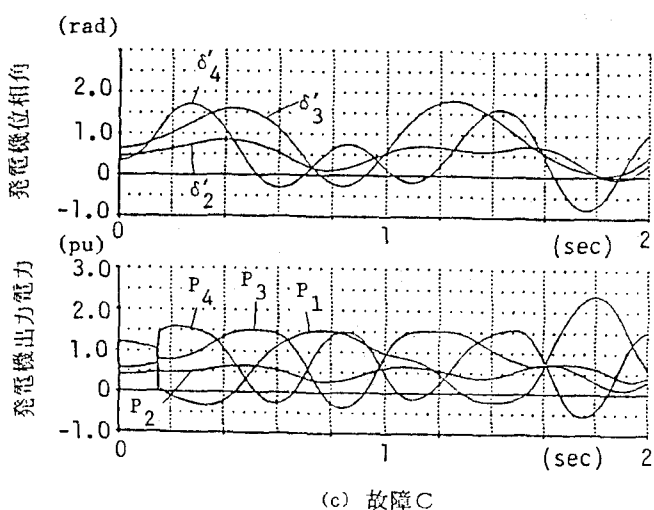
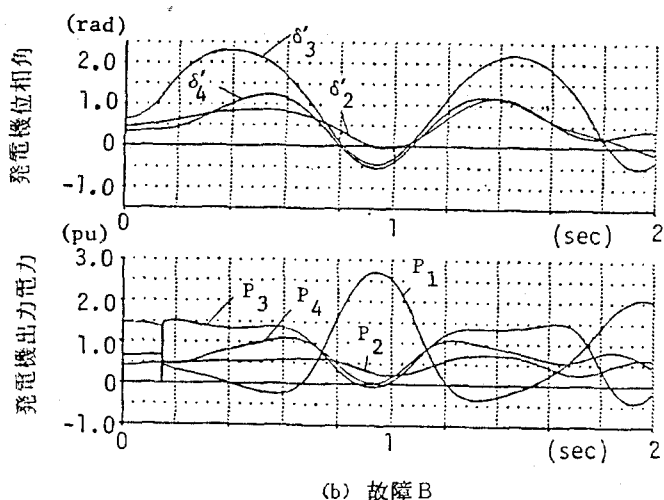
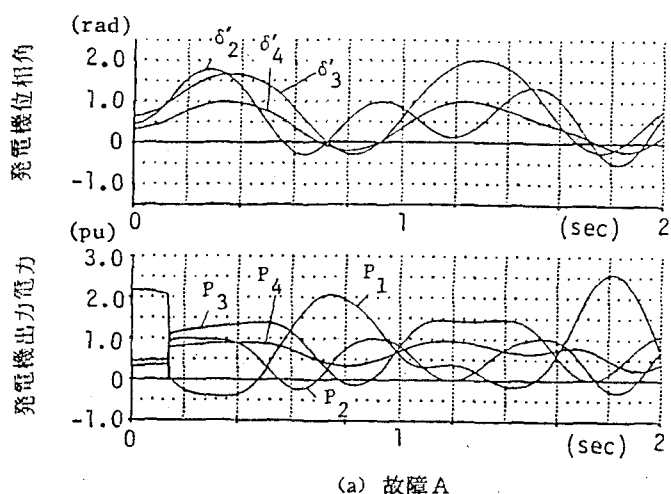


図 2.5 無制御時のシミュレーション波形

表2.3 制御効果の評価結果（4機モデル系統）

(a) 故障A

順位	リアブノフ 関数値	設置母線（最大エネルギー（MJ））
1	0.0684	2(13.1) 3(11.9) 4(9.17)
2	0.0760	2(13.5) 3(14.1) 5(3.17)
3	0.0797	2(18.5) 4(20.0)
4	0.0813	2(17.2) 3(15.5)
5	0.0844	2(13.7) 3(13.6) 6(2.66)
⋮	⋮	⋮
32	0.1939	3(18.9) 4(15.9)
⋮	⋮	⋮
56	0.5072	4(31.5)
⋮	⋮	⋮
62	0.8044	5(29.1) 6(5.58)

(b) 故障B

順位	リアブノフ 関数値	設置母線（最大エネルギー（MJ））
1	0.0107	2(3.62) 3(16.4) 4(9.33)
2	0.0152	3(19.2) 4(9.60)
3	0.0183	1(0.94) 2(3.09) 3(15.3) 4(8.74)
4	0.0184	2(3.11) 3(15.3) 4(8.80) 6(0.37)
5	0.0201	3(16.1) 4(9.43) 5(3.16)
⋮	⋮	⋮
26	0.0593	4(24.4)
27	0.0630	2(10.1) 4(24.3)
⋮	⋮	⋮
60	0.6233	5(27.0) 6(4.60)

(c) 故障C

順位	リアブノフ 関数値	設置母線（最大エネルギー（MJ））
1	0.0023	3(11.1) 4(13.9)
2	0.0030	2(2.78) 3(9.54) 4(12.8)
3	0.0040	1(0.84) 3(9.65) 4(13.0)
4	0.0041	3(9.69) 4(13.0) 6(0.67)
5	0.0042	3(9.91) 4(12.9) 5(4.29)
⋮	⋮	⋮
17	0.0168	2(6.53) 4(15.8)
⋮	⋮	⋮
20	0.0270	4(17.2)
⋮	⋮	⋮
53	0.5128	5(23.5) 6(4.91)

母線 2、4 に設置すれば効果は少し小さくなるが、設置箇所を二箇所に限定するならばこの設置方法が適しているといえよう。母線 4 にのみ設置したときは、とくに故障 A に対してほとんど効果がない。これは、パラメータ ε_u が小さいときに決定された設置方法では十分な安定化がはかれないことを示すものである。

また、同アルゴリズムで効果があると判定されなかった設置方法の一例として、母線 5、6 に設置したときには、想定したどの故障に対してもほとんど効果がない（シミュレーション波形の一例を図 2.7 に示す）。

以上のように、本アルゴリズムが有効であることが確認

された。さらに、シミュレーションの結果より、動揺抑制に必要な貯蔵エネルギーは母線 2、3、4 に設置したときそれぞれ 15 MJ 程度であった。この値は無制御時における各発電機の電力動揺の第一波を積分したエネルギーに相当している。また、制御に必要な電力変換装置の容量はそれぞれ SMES を設置した発電機の無制御時の電力動揺の振幅程度で 40～80 MVA であった。

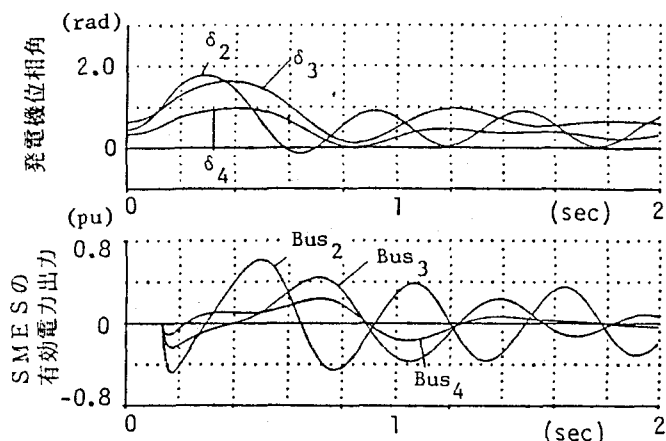


図2.6 制御結果の一例（故障A：SMESを母線 2，3，4 に設置した場合）

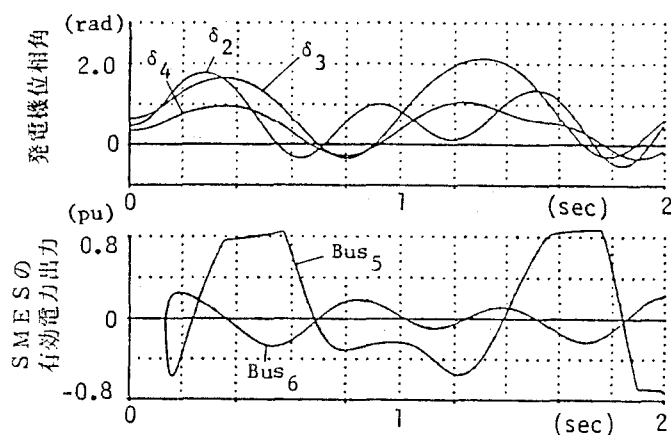


図2.7 制御結果の一例（故障A：SMESを母線 5，6 に設置した場合）

2-4-4 10機モデル系統への適用

数値計算に用いた実規模10機モデル系統を図2.8 に示す。系統の定数は付録2-3に示す。初めに、設置箇所決定のためのアルゴリズムを用いて効果的なSME Sの設置箇所を求めた。SME Sを設置する候補として母線1～21を選び、 ε_x を0.5、 ε_y をパラメータとしたときの結果を表2.4 に示す。

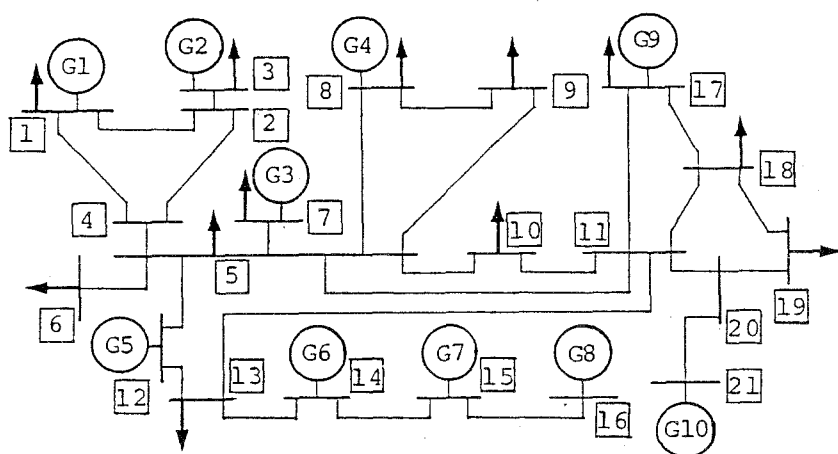


図2.8 10機モデル系統

表2.4 SME Sの設置箇所の選定結果 (10機モデル系統)

$\varepsilon_x = 0.5$		Bus																				
ε_y	Bus	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
0.5-1.0		0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	1	1	1	0	0	0	1
0.45		0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	0	0	0	1
0.35		0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	0	0	0	0
0.3		0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0
0.15		0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0
0.1		0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1
0.05		0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
0.01		0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

(0: 設置しない 1: 設置する)

次に、シミュレーションを行った。

想定したSME Sの設置箇所は、表

2.4 で得た8種類の設置方法、同表

で $\varepsilon_u = 0.3$ のときに設置されない

発電端（母線1、7、12、15、

21）に設置した場合および発電機

端以外から任意に選んだ母線2、5、11、13、19に設置した場合の10

種類である。制御パラメータは(2.13)式で $w_u = 0.01$ として決定した。この値

は、表2.4 で ε_u が0.5～1.0のときの設置方法に対して、線形化状態方程式

から求めた固有値の減衰時定数がすべて3秒以下になるようにしたものである。

故障は表2.5 に示す設定を行った。

このときの、シミュレーション結果を表2.6 に示す。表2.4 において ε_u が

大きいときに選定された方法でSME Sを設置すれば、任意に選んだ他の設置

方法と比較して、つねに安定化の効果が大きいことがわかる。このモデルにお

いても、本アルゴリズムの有効性が確認された。

表2.5 故障の設定（10機モデル系統）

故障点 (三相短絡)	故障時間 (sec)	無制御時の リアプノフ関数値
A : Bus 8	0.12	43.620
B : Bus 2	0.20	40.235
C : Bus 5	0.10	45.174

表2.6 制御効果の評価結果（10機モデル系統）

(a) 故障 A

順位	リアプノフ 関数値	設置母線（最大エネルギー (MJ)）
1	0.453	3(23.1) 7(25.4) 12(20.9) 14(18.4) 16(15.9) 17(41.3)
2	0.612	3(21.2) 7(23.7) 12(21.5) 14(22.1) 16(15.6) 17(34.5) 21(28.8)
3	0.630	3(17.1) 7(22.8) 12(20.2) 14(15.0) 15(25.5) 16(14.7) 17(44.0) 21(27.9)
4	0.677	3(32.0) 8(35.3) 14(16.3) 17(80.7)
5	0.718	3(27.2) 8(32.0) 14(19.6) 16(15.0) 17(69.3)
6	1.569	1(16.8) 7(64.4) 12(30.4) 15(33.1) 21(30.7)
7	1.616	2(19.3) 5(29.9) 11(28.7) 13(63.1) 19(35.7)
8	5.854	3(45.7) 17(191.2)
9	6.249	3(45.5) 13(91.7) 21(33.8)
10	26.309	3(131.8)

(b) 故障 B

順位	リアプノフ 関数値	設置母線 (最大エネルギー (MJ))									
1	0.298	3(74.8)	8(56.4)	14(20.2)	17(67.1)						
2	0.373	3(72.4)	8(46.4)	14(18.2)	16(19.1)	17(54.0)					
3	0.378	3(69.4)	7(39.6)	12(20.5)	14(17.9)	16(19.2)	17(48.2)				
4	0.565	3(66.9)	7(35.1)	12(21.2)	14(18.6)	16(19.6)	17(36.8)	21(23.5)			
5	0.535	3(65.5)	7(18.1)	12(20.7)	14(17.1)	15(28.3)	16(17.8)	17(28.3)	21(23.5)		
6	1.265	3(94.9)	17(122.9)								
7	1.324	3(84.7)	13(110.5)	21(27.8)							
8	5.016	2(60.4)	5(53.0)	11(38.1)	13(65.2)	19(50.3)					
9	9.873	1(43.3)	7(106.5)	12(20.0)	15(34.4)	21(18.5)					
10	13.785	3(122.0)									

(c) 故障 C

順位	リアプノフ 関数値	設置母線 (最大エネルギー (MJ))									
1	3.168	3(28.6)	7(46.5)	12(14.8)	14(11.4)	15(23.3)	16(14.3)	17(63.4)	21(19.3)		
2	3.892	3(37.0)	8(64.3)	14(11.1)	16(11.7)	17(91.9)					
3	3.980	3(35.0)	7(61.5)	12(16.5)	14(13.2)	16(12.8)	17(93.3)				
4	4.486	3(31.4)	7(53.5)	12(27.1)	14(13.6)	16(12.8)	17(75.1)	21(19.7)			
5	4.725	3(44.1)	8(77.9)	14(13.2)	17(121.6)						
6	5.298	1(27.9)	7(100.7)	12(17.3)	15(26.0)	21(18.0)					
7	7.442	2(58.4)	5(75.6)	11(41.6)	13(74.5)	19(61.9)					
8	11.966	3(88.9)	13(77.0)	21(18.2)							
9	22.206	3(73.7)									
10	*****	3(****)	17(****)	脱調した							

設置箇所については、前例と同様に発電端に分散して設置すれば効果が大きい。また、動揺抑制に必要な貯蔵エネルギーは設置数や故障条件により異なるが、それぞれ20～数十MJで、無制御時の各発電機の電力動揺の第一波を積分したエネルギーにほぼ相当する量であった。また、制御に必要な電力変換装置の容量はそれぞれSME Sを設置した発電機の無制御時の電力動揺の振幅程度であった。

2-5 結言

本章では、SME Sによる過渡電力動揺の安定化効果を系統的に評価するための一手法を提案した。モデル系統に本手法を適用して、SME Sの設置箇所

を定め、数値計算により本手法が過渡電力動揺の安定化に効果的なSME Sの配置に関するおよその見当を付けるのに有効であることを確認した。

更に、シミュレーションを行った結果より、効果的なSME Sの設置箇所、SME Sの容量について次のことがいえる。

(1) SME Sは発電機端に分散して、複数基設置すれば安定化効果は増大する。単独箇所への設置は、その設置母線の近くの発電機動揺を抑制する効果は大きいが、最適制御を用いても、他の発電機の動揺抑制効果は薄い。負荷端への設置は安定化に対する効果が薄い。

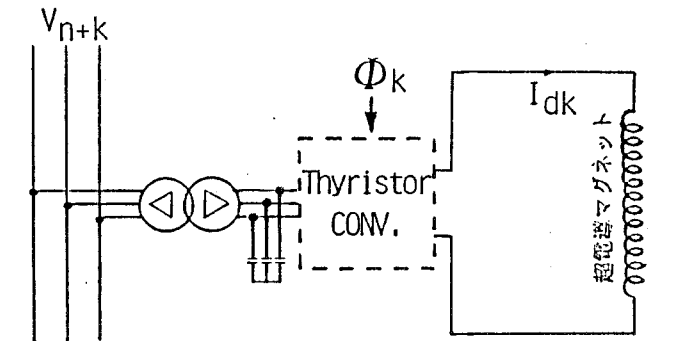
(2) 動揺抑制に必要なSME Sの貯蔵エネルギーおよび電力変換装置の容量は、SME Sを設置した発電機の無制御時の出力電力動揺の第一波を積分したエネルギーおよび振幅に相当する量であった。

付録 2-1 S M E S の構成と電力制御機能

本章で想定した S M E S の

構成を付図 2.1 に示す。

同図において、電力変換装置から系統へ出力される有効電力 (P_{sk}) および遅れ無効電力 (Q_{sk}') ($k=1, \dots, m$) は、転流リアクタンスを無視して単純化すれば、近似的に次のように表現できる¹⁾。



付図 2.1 S M E S の構成 (超電導マグネット + 1 台のサイリスタ電力変換装置)

$$P_{sk} = -I_{dk} V_{n+k} \cos \phi_k \quad \dots\dots\dots (\text{付 2.1})$$

$$Q_{sk}' = -I_{dk} V_{n+k} \sin \phi_k \quad \dots\dots\dots (\text{付 2.2})$$

ϕ_k : サイリスタ点弧角 ($0^\circ \leq \phi_k \leq 180^\circ$)

ただし、マグネット電流 I_{dk} は適当なベース値の下で p u 表現されているものとする。以上の各式より、 P_{sk} 、 Q_{sk}' の制約条件は

$$P_{sk}^2 + Q_{sk}'^2 = (I_{dk} V_{n+k})^2, \quad Q_{sk}' < 0 \quad \dots\dots\dots (\text{付 2.3})$$

で表される。ここで、変換装置の無効電力補償のためのコンデンサ容量 Q_{ck} (> 0) を考慮すると、S M E S の無効電力出力 Q_{sk} は

$$Q_{sk} = Q_{sk}' + Q_{ck} \quad \dots\dots\dots (\text{付 2.4})$$

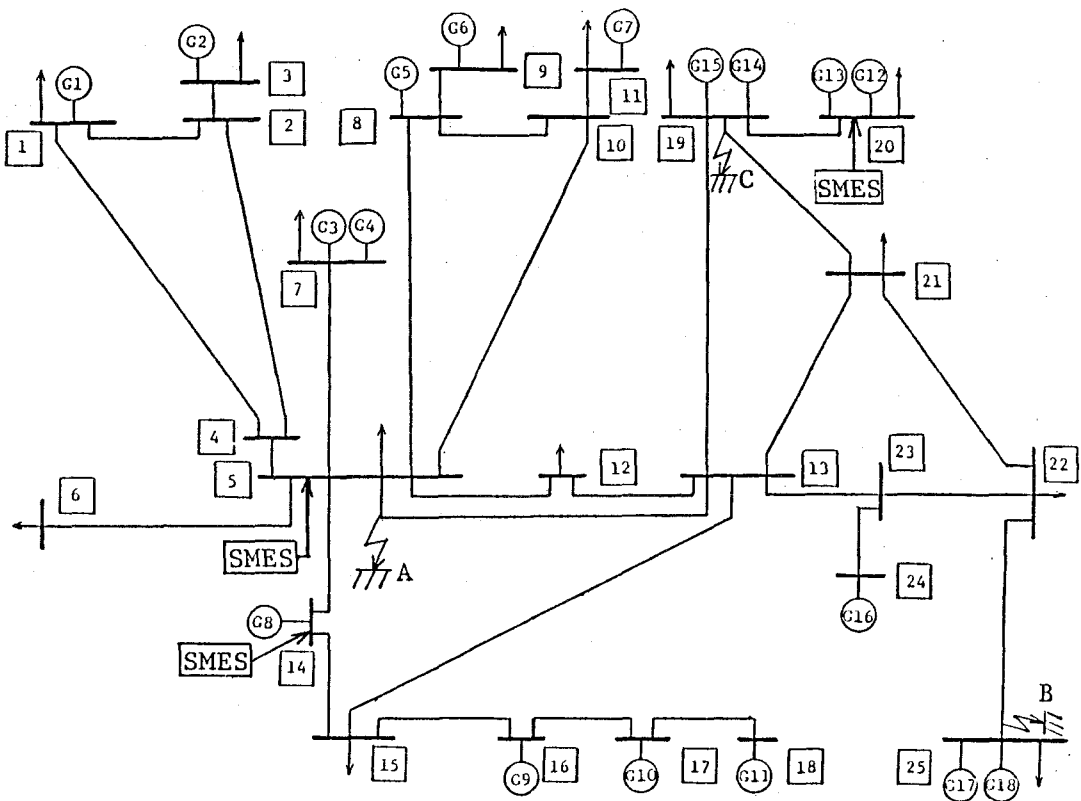
以上の設定の下で、適切な ϕ_k を与えることにより、有効電力出力 P_{sk} が指

定された値に追従するように制御されるものとする。このとき、無効電力 Q_{sk} は (付2.3) および (付2.4) 式で決まる量が出力されるものとする。

付録 2-2 過渡電力動揺の安定度解析におけるリアプノフ関数の臨界値¹²⁾

本章で過渡電力動揺の安定化効果の評価指標として用いたリアプノフ関数 V は次式に示すルーリエ型の関数で表される¹³⁾。

$$\begin{aligned}
 V = & \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n M_k M_j (\omega_k - \omega_j) / 2 \sum_{i=1}^n M_i \\
 & + \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n E_k E_j B_{kj} \{ \cos(\delta_{ko} - \delta_{jo}) - \cos(\delta_k - \delta_j) \\
 & - (\delta_k - \delta_j - \delta_{ko} + \delta_{jo}) \} \sin(\delta_{ko} - \delta_{jo}) \quad \cdots \cdots \text{(付2.5)}
 \end{aligned}$$

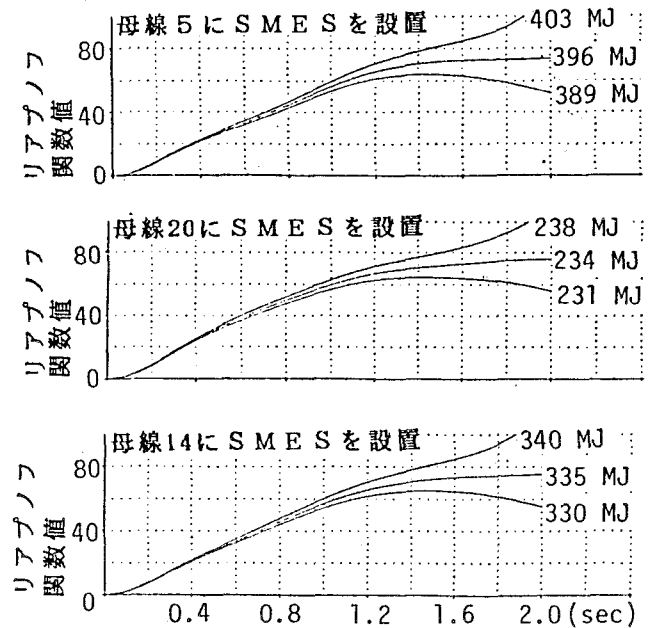


付図2.2 実規模18機モデル系統

ただし、添字 $\circ$ は平衡点における値を示す。

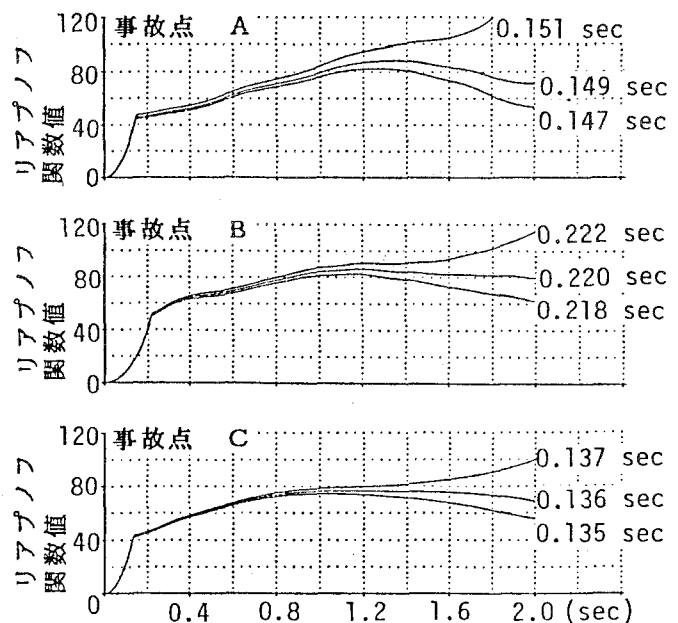
以下では、シミュレーションにより動揺曲線に沿ったリアプノフ関数を計算し、その結果より明らかになった、過渡電力動揺の解析におけるリアプノフ関数値の性質を述べる。

付図2.2 に示す実規模18機モデル系統を用いて解析した。系統へのじょう乱として、SMESからの電力放出（付録2-1の（付2.1）、（付2.2）式で $\phi_k = 180^\circ$ の場合を想定）と三相短絡を仮定し、それぞれじょう乱発生場所を数ヶ所選定し、シミュレーションを行った。SMESの電力放出量あるいは三相短絡の除去時間をパラメータとして、安定限界付近の例について動揺曲線に沿ったリアプノフ関数を求めた結果を付図2.3に示す。同図の各ケースにおける三本の曲線は、リアプノフ



(a) SMESからの電力放出：

図中の数字はSMESの電力放出量を示す



(b) 三相短絡（いずれも時刻0.667秒に再閉路）：

図中の数字は故障除去時刻を示す

付図2.3 動揺曲線に沿ったリアプノフ関数

関数値の小さいものから順に、安定、安定限界、不安定の場合の結果である。

これらの結果より、安定限界に対応するリアプノフ関数の臨界値は、故障の種類によらずつねにほぼ一定であることがわかる。すなわち、リアプノフ関数の値を見れば臨界値に対してどれだけ安定であるかを定量的に評価することができる。

付録 2-3 モデル系統の定数と初期潮流状態

4機モデル系統（100 MVA ベース）の定数および初期潮流状態を付表2.1～付表2.3 に、10機モデル系統（10 MVA ベース）の定数および初期潮流状態を付表2.4～付表2.6 に示す。

付表2.1 線路定数（ π 型等価回路）

No.	接続母線	抵抗 (pu)	リアクタンス (pu)	静電容量 (pu)
1	1 ～ 2	0.05	0.20	0.00
2	1 ～ 6	0.10	0.15	0.00
3	1 ～ 3	0.10	0.50	0.00
4	2 ～ 5	0.20	0.50	0.00
5	2 ～ 4	0.20	0.80	0.00
6	4 ～ 5	0.10	0.30	0.00
7	5 ～ 6	0.20	0.40	0.00

付表2.2 発電機の定数と初期潮流状態

No.	発電量		背後電圧		x_d' (pu)	M_i (pu)
	有効分 (pu)	無効分 (pu)	大きさ (pu)	位相 (rad)		
1	0.86	-0.08	1.00	0.00	0.004	0.5300
2	0.50	0.10	1.21	0.45	1.00	0.0080
3	0.90	0.15	1.23	0.65	0.50	0.0159
4	0.70	0.20	1.16	0.35	0.40	0.0106

付表2.3 母線の初期潮流状態

No.	負 有効分 (pu)	荷 無効分 (pu)	電 大 小 (pu)	圧 位 相 (rad)
1	0.00	0.00	1.00	0.00
2	0.60	0.08	1.01	0.03
3	0.00	0.00	1.09	0.31
4	0.00	0.00	1.05	0.12
5	1.15	-0.20	0.95	-0.16
6	0.95	-0.20	0.93	-0.17

付表2.4 線路定数 (π 型等価回路)

No.	接 続 母 線	抵 抗 (pu)	リアクタンス (pu)	静電容量 (pu)
1	1 ~ 2	0.00063	0.00473	0.708
2	1 ~ 4	0.00193	0.01353	1.998
3	2 ~ 3	0.00000	0.00584	0.000
4	2 ~ 4	0.00133	0.00907	1.330
5	4 ~ 5	0.00000	0.00168	0.000
6	5 ~ 6	0.00067	0.00383	1.246
7	5 ~ 7	0.00006	0.00045	0.272
8	5 ~ 8	0.00019	0.00109	0.103
9	5 ~ 9	0.00047	0.00270	0.267
10	5 ~ 10	0.00094	0.00539	0.415
11	5 ~ 11	0.00181	0.01032	0.822
12	5 ~ 12	0.00107	0.00571	0.420
13	8 ~ 9	0.00061	0.00327	0.328
14	10 ~ 11	0.00088	0.00503	0.388
15	11 ~ 13	0.00136	0.00745	0.629
16	11 ~ 17	0.00054	0.00286	0.930
17	11 ~ 18	0.00034	0.00183	0.604
18	11 ~ 20	0.00108	0.00611	0.491
19	12 ~ 13	0.00058	0.00310	0.200
20	13 ~ 14	0.00106	0.00565	0.450
21	14 ~ 15	0.00030	0.00159	0.126
22	15 ~ 16	0.00026	0.00130	0.106
23	17 ~ 18	0.00035	0.00185	0.606
24	18 ~ 19	0.00139	0.00790	0.627
25	19 ~ 20	0.00062	0.00353	0.283
26	20 ~ 21	0.00041	0.00219	0.188

付表2.5 発電機の定数と初期潮流状態

No.	発電量		背後電圧		$x d'$ (pu)	M i (pu)
	有効分 (pu)	無効分 (pu)	大きさ (pu)	位相 (rad)		
1	-3.18	-3.2	0.99	-0.00	0.0026	63.7
2	24.0	2.4	1.10	0.46	0.0148	0.594
3	38.9	9.0	1.14	0.35	0.0085	0.468
4	16.0	4.7	1.17	0.35	0.0218	0.456
5	4.2	0.3	1.17	0.53	0.1260	0.0796
6	3.8	0.6	1.15	0.48	0.1040	0.0891
7	7.2	1.0	1.18	0.55	0.0648	0.170
8	3.6	0.2	1.12	0.51	0.1110	0.117
9	77.7	7.6	1.11	0.50	0.0045	0.958
10	4.3	0.2	1.10	0.48	0.0956	0.0894

付表2.6 母線の初期潮流状態

No.	負荷		電圧 大きさ (pu)	位相 (rad)
	有効分 (pu)	無効分 (pu)		
1	13.0	0.00	1.00	0.000
2	0.00	0.00	1.01	0.058
3	10.0	2.00	1.01	0.138
4	0.00	0.00	1.02	0.045
5	3.60	0.50	1.01	0.049
6	22.8	0.00	1.00	-0.038
7	17.2	5.00	1.02	0.058
8	14.4	1.12	1.02	0.049
9	3.00	0.657	1.01	0.045
10	12.8	3.70	0.99	0.052
11	0.00	0.00	1.00	0.116
12	0.00	0.00	1.01	0.066
13	22.9	2.30	1.00	0.062
14	0.00	0.00	1.03	0.140
15	0.00	0.00	1.03	0.156
16	0.00	0.00	1.03	0.160
17	15.8	1.61	1.02	0.187
18	23.4	6.80	1.00	0.124
19	15.6	0.433	1.00	0.064
20	0.00	0.00	1.00	0.092
21	0.00	0.00	1.00	0.102

【第2章 参考文献】

- 1) 仁田・小嶋・岡田：「超電導エネルギー貯蔵装置の電力吸収放出実験」電気学会静止器研究会 SA-80-19 昭55.
- 2) 大沢・宮内・林：「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 PE-81-16 昭56.
- 3) H. Kaminosono, T. Tanaka, T. Ishikawa, M. Masuda, T. Shintomi "Power System Stabilization by Superconducting Magnet Energy Storage", US- Japan SMES Workshop, Madison, 1981.
- 4) 増田編：超電導エネルギー入門、オーム社、昭56.
- 5) 大沢・宮内・林：「超電導エネルギー貯蔵装置による長距離くし形系統の安定化」電気学会電力技術研究会 PE-85-59 昭60.
- 6) 諸住・西谷・長谷川・藤原：「電力系統における分散形電力貯蔵装置の最適運用」電気学会論文誌B 103 巻 7 号 昭57.
- 7) 中丸・中山、他：「超電導電力貯蔵システムの概念設計研究」電気学会新省エネルギー研究会 ESC-82-5 昭57.
- 8) 清水、他：「10GWHトロイダル型超電導電力貯蔵システム概念設計(I),(II),(III)」低温工学協会発表会資料 B3-12,13,14 昭58.
- 9) 三谷・辻・村上：「超電導エネルギー貯蔵装置による電力系統の安定化効果の評価の一方法」電気学会論文誌B分冊、104 巻 9 号、昭59.
- 10) 武田・土井：「限界潮流付近で効果的な新潮流計算法」電気学会論文誌B分冊、100 巻 9 号 昭55.
- 11) 高橋：システムと制御 下、第2版、p.320、岩波書店 昭53.
- 12) Y. Mitani, K. Tsuji "On the Critical Value of Lyapunov Function in Power System Transient Stability Analysis", Technol. Repts. of the Osaka Univ. Vol.32 No.1660 (October, 1982).

- 13) J. L. Willems, J. C. Willens " Direct Method for Transient Stability Studies in Power System Analysis", IEEE Trans. on AC Vol. AC-16, No.4, 1971.

第 3 章 長距離大容量送電系統における電力動揺ならびに電圧の安定化

3-1 緒言

本章では、中間領域の電力動揺の安定度が問題となる一つの特徴的な系統である長距離大容量送電系統を対象に解析を行う。この系統では送電線上の潮流が重くなるにつれて、同期化力の低下あるいは電力動揺の減衰が悪くなるといった現象が見られ、送電容量を制限する大きな要因になっている。電力動揺の減衰の悪化は、過渡電力動揺の安定化のために応動の速い自動電圧調整器 (A V R) を用いた場合にも起こりやすい。この対策として、発電機励磁系の制御^{1),2)}あるいは静止形無効電力補償装置 (S V C) を用いた制御^{3)~6)}など、主として無効電力を用いた制御が行われている。

無効電力を用いた電力系統の制御では、通常、電圧の動的安定性の強化のために、電圧偏差をフィードバック信号に用いる定電圧制御が行われる⁷⁾。電力動揺を安定化するには、これとは異なった制御、すなわち電力動揺を減衰させるための制御が必要になる。このため、定電圧制御に補助的に Power System Stabilizer (P S S) の信号を付加した制御系^{1),3)~5)}、あるいは固有値指定を利用して設計した制御系^{2),6)}などが提案されている。しかしながら、いずれも制動を大幅に改善しようとする、従来の定電圧制御の機能は明確でなくなり、電圧の動的安定性が損なわれる恐れがある。

一方、S M E S は 6 パルスサイリスタグレースブリッジを 2 台直列に接続して構成した電力変換装置を用いることにより、有効電力と無効電力をある範囲内で同時に制御できる⁸⁾。このため、S M E S を用いた電力動揺の安定化制御に関する研究が進められている^{9)~11)}。こうした S M E S の制御機能に着目し、有効電力を電力動揺の安定化に無効電力を電圧の制御に用いることにより、定電圧特性を損なうことなく同時に効果的な制動の改善が期待できる。

本章では、以上の観点に基づき、一機無限大母線系統により構成された長距

離大容量送電システムのモデルをもとに、SMESの有効・無効電力同時制御機能を利用した制御系を構成した¹²⁾。更に、この制御をモデル系統に適用して固有値計算ならびにシミュレーションを行った。その結果、有効電力の制御により電力動揺の制動が改善されるのと同時に無効電力の制御により電圧変動が抑制され、さらに、送電可能な容量が効果的に改善されることが明らかになった。以下では、これらの結果について詳しく論ずる。

3-2 SMESを含む長距離大容量送電システムの定式化

図3.1 に示す一機無限大母線系統によりモデル化された長距離大容量送電システムを対象に解析を行う。発電機の電氣的な振る舞いはパークモデルにおいて制動巻

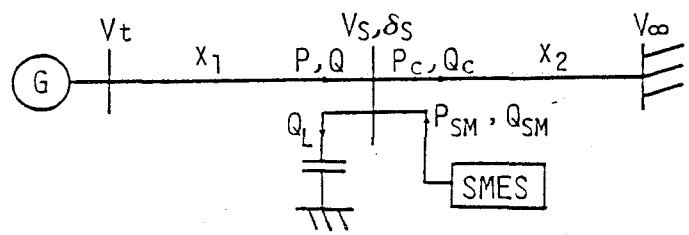


図3.1 長距離大容量送電モデル系統

線、電機子巻線の過渡現象および抵抗を無視した界磁巻線モデルで表し、次式のように定式化する。

$$-V_d + x_q I_q = 0 \quad \dots\dots\dots (3.1)$$

$$-V_q - x_d' I_d + \psi_{fd} = 0 \quad \dots\dots\dots (3.2)$$

$$T_{do}' \dot{\psi}_{fd} = E_{fd} - \psi_{fd} - (x_d - x_d') I_d \quad \dots\dots\dots (3.3)$$

発電機の運動方程式は

$$M \ddot{\delta} = P_m - P - D \Delta \omega \quad \dots\dots\dots (3.4)$$

が成立する。また、発電機端での潮流条件より

$$P = V_d I_d + V_q I_q \quad \dots\dots\dots (3.5)$$

$$Q = V_q I_d - V_d I_q - x_1 (I_d^2 + I_q^2) \quad \dots\dots\dots (3.6)$$

$$V_t^2 = V_d^2 + V_q^2 \quad \dots\dots\dots (3.7)$$

発電機端と S M E S 設置母線との間の電圧、電流の関係より

$$V_q - V_s \cos(\delta - \delta_s) = x_1 I_d \quad \dots\dots\dots (3.8)$$

$$-V_d + V_s \sin(\delta - \delta_s) = x_1 I_q \quad \dots\dots\dots (3.9)$$

S M E S 設置母線での潮流条件より

$$P + P_{SM} = P_c \quad \dots\dots\dots (3.10)$$

$$Q + Q_{SM} = Q_c + Q_L \quad \dots\dots\dots (3.11)$$

である。さらに、S M E S 設置点と無限大母線との間の潮流の関係より

$$P_c = V_s V_\infty \sin \delta_s / x_2 \quad \dots\dots\dots (3.12)$$

$$Q_c = (V_s^2 - V_s V_\infty \cos \delta_s) / x_2 \quad \dots\dots\dots (3.13)$$

が成立する。

A V R は図 3.2 のブロック図で表現されるものとし、調速機は無視して P_m を一定と考える。

ただし、 M : 慣性定数、 D : 制動係数、 P_m : 機械的入力、 T_{do}' : 開路時定数、 $P \cdot Q$:

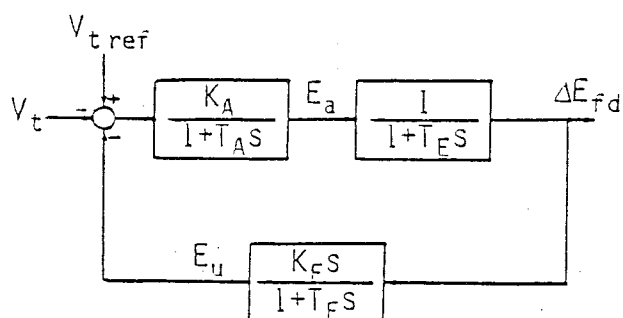


図 3.2 A V R の特性

発電機から S M E S 設置点へ流入する有効・無効電力、 V_t : 発電機端子電圧、 $V_d \cdot V_q$: 発電機端子電圧の d・q 軸成分、 $I_d \cdot I_q$: 電機子電流の d・q 軸成分、 Ψ_{fd} : 界磁巻線の鎖交磁束、 E_{fd} : 界磁電圧、 $x_d \cdot x_q$: d・q 軸の同期リアクタンス、 x_d' : 過渡リアクタンス、 δ : 発電機 q 軸と無限大母線の相差角、 ω : 発電機ロータの角速度、 $V_s \cdot \delta_s$: S M E S 設置母線の電圧の大きさと位相角、 Q_L : 調相設備の容量（ただし、電圧特性を $Q_L = K_q V_s^2$ とする）、 $P_{SM} \cdot Q_{SM}$: S M E S の有効・無効電力出力（有効電力の放出、遅れ無効電力を正とする）、 $P_c \cdot Q_c$: S M E S 設置点から無限大母線へ流出する有効・無効電力、 $x_1 \cdot x_2$: 送電線のリアクタンス、 V_∞ : 無限大母線の電圧、 Δ : 動作点からの変化分、 $\dot{}$: 時間微分、 s : ラプラス演算子。

3-3 S M E S を用いた電力動揺ならびに電圧の安定化制御

3-3-1 S M E S の有効・無効電力同時制御機能

S M E S は、付録 3-1 に示すように、電力変換装置として 2 台直列に接続したゲート・ターン・オフ (G T O) サイリスタ・グレート・ブリッジを用いることにより有効電力の吸収・放出と無効電力の遅れ・進みがある範囲内で同時に制御できる¹³⁾。

本章では、このような制御特性を応用して、



S M E S を用いたとき

図3.3 S M E S の制御特性

の有効電力と無効電力

の指定値 (ΔP_{SI} 、 ΔQ_{SI}) に対する出力 (ΔP_{SM} 、 ΔQ_{SM}) の特性を図3.3に示す独立な一次遅れで表現することにする。ただし、実際には、それらの制御可能範囲は電力変換装置の容量、マグネット電流あるいは系統の電圧により制限されるが、ここではそれらの制限が無いものと仮定し、後のシミュレーションの結果から必要な容量に関する検討を行うことにする。

3-3-2 安定化制御系の構成

系統のモデルを動作点の近傍で線形化し、その方程式を用いて制御系を構成する。(3.3)式における時定数 T_{do}' は一般の大容量発電機では6秒程度であり、通常1Hz程度の電力動揺の周波数と比較した場合、界磁磁束の応答は無視し得る。そこで、 $\Delta \Psi_{fd} \simeq 0$ で近似すると、(3.1), (3.2), (3.5), (3.6), (3.8)および(3.9)式より

$$\Delta P = a \Delta \delta + b_1 \Delta V_s + b_2 \Delta \delta_s \quad \dots\dots\dots (3.14)$$

$$\Delta Q = \alpha \Delta \delta + \beta_1 \Delta V_s + \beta_2 \Delta \delta_s \quad \dots\dots\dots (3.15)$$

を得る。ただし

$$\begin{bmatrix} a & \alpha \\ b_1 & \beta_1 \\ b_2 & \beta_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_s \cos(\delta - \delta_s) & V_s \sin(\delta - \delta_s) \\ \sin(\delta - \delta_s) & -\cos(\delta - \delta_s) \\ -V_s \cos(\delta - \delta_s) & -V_s \sin(\delta - \delta_s) \end{bmatrix}$$

$$\times \begin{bmatrix} 1 / (x_1 + x_q) & 0 \\ 0 & 1 / (x_1 + x_{d'}) \end{bmatrix}$$

$$\times \begin{bmatrix} V_q + x_q I_d & -(V_d + 2x_1 I_q + x_q I_q) \\ V_d - x_{d'} I_q & V_q - 2x_1 I_d - x_{d'} I_d \end{bmatrix} \dots\dots (3.16)$$

これらの式と(3.10)～(3.13)式を線形化した式から

$$\Delta P_{SM} = -a \Delta \delta + d_1 \Delta V_s + d_2 \Delta \delta_s \quad \dots\dots\dots (3.17)$$

$$\Delta Q_{SM} = -\alpha \Delta \delta + d_3 \Delta V_s + d_4 \Delta \delta_s \quad \dots\dots\dots (3.18)$$

を得る。ただし、

$$d_1 = -b_1 + V_\infty \sin \delta_s / x_2 \quad \dots\dots\dots (3.19)$$

$$d_2 = -b_2 + V_s V_\infty \cos \delta_s / x_2 \quad \dots\dots\dots (3.20)$$

$$d_3 = -\beta_1 + (2 V_s - V_\infty \cos \delta_s) / x_2 + 2 K_q V_s \quad \dots\dots\dots (3.21)$$

$$d_4 = -\beta_2 + V_s V_\infty \sin \delta_s / x_2 \quad \dots\dots\dots (3.22)$$

更に、(3.4) 式を線形化して次式を得る。

$$M s^2 \Delta \delta = -D s \Delta \delta - \Delta P \quad \dots\dots\dots (3.23)$$

いま、S M E S の無効電力を定電圧制御に用いて

$$\begin{aligned} \Delta Q_{SM} &= \Delta Q_{SI} / (1 + T a s) \\ &= -K_v \Delta V_s / (1 + T a s) \\ &\simeq -K_v \Delta V_s \quad \dots\dots\dots (3.24) \end{aligned}$$

のフィードバック制御を行うものとする。ただし、S M E S の制御特性は十分速いものとし、 $T a \simeq 0$ で近似した。このとき、(3.14), (3.17), (3.18), (3.23), (3.24) の各式より

$$M s^2 \Delta \delta + D s \Delta \delta + a' \Delta \delta = b' \Delta P_{SM} \quad \dots\dots\dots (3.25)$$

を得る。ただし

$$a' = a + \{K_V a b_2 + a (b_2 d_3 - b_1 d_4) + \alpha (b_1 d_2 - b_2 d_1)\} / (K_V d_2 + d_2 d_3 - d_1 d_4) \quad (3.26)$$

$$b' = - (K_V b_2 - b_2 d_3 + b_1 d_4) / (K_V d_2 + d_2 d_3 - d_1 d_4) \quad (3.27)$$

(3.25)式から明らかなように制動を得る、すなわちDを等価的に大にするには

$$\begin{aligned} \Delta P_{SM} &= -K_D s \Delta \delta \\ &\simeq -K_D s \Delta \delta / (1 + T a s) \end{aligned} \quad (3.28)$$

のフィードバック制御を行えばよい。

ここで、SMESから見て局所的な信号である ΔP を検出して、これと等価な制御を実現することを考える。いま、(3.23)式でDを無視すると

$$s \Delta \delta \simeq -\Delta P / M s \quad (3.29)$$

であるから、(3.28)式は

$$\begin{aligned} \Delta P_{SM} &\simeq K_D (\Delta P / M s) / (1 + T a s) \\ &\simeq \{s / (s + \omega_R)\} \{\Delta P / M (s + 1)\} \\ &\quad \cdot \{K_D / (1 + T a s)\} \end{aligned} \quad (3.30)$$

と表すことができる。ただし、(3.30)式の下側の式は直流分除去のためにリセットフィルタ $s / (s + \omega_R)$ を追加し、さらに ΔP の動揺、すなわち電力動

揺の角周波数が通常約 2π (rad/s) であることを考慮して、積分 $1/s$ を一次遅れ $1/(s+1)$ で置き換えたものである。

以上で S M E S の有効電力による電力動揺の安定化と無効電力による定電圧制御を行うための制御系が構成された。

3-4 潮流感度に基づく S M E S の設置箇所に関する検討

S M E S の有効電力あるいは無効電力を微小変化させたときの潮流感度を利用して、以下の要領で送電線上の効果的な S M E S の設置箇所を検討する。

まず、S M E S が無い場合に対して潮流計算を行う。次に、送電線上の一点に設置された S M E S の有効電力を ΔP_{SM} だけ微小変化させ、発電機背後電圧を固定させた状態で再度潮流計算を行い、そのときの発電機出力の変化分 $\Delta \tilde{P}$ を求める。同じ要領で、S M E S の無効電力を ΔQ_{SM} だけ変化させ、S M E S 設置母線の電圧変化分 $\Delta \tilde{V}_s$ を求める。このとき、次の感度係数を定義した。

$$C_p = \Delta \tilde{P} / \Delta P_{SM} \dots\dots\dots (3.31)$$

$$C_q = \Delta \tilde{V}_s / \Delta Q_{SM} \dots\dots\dots (3.32)$$

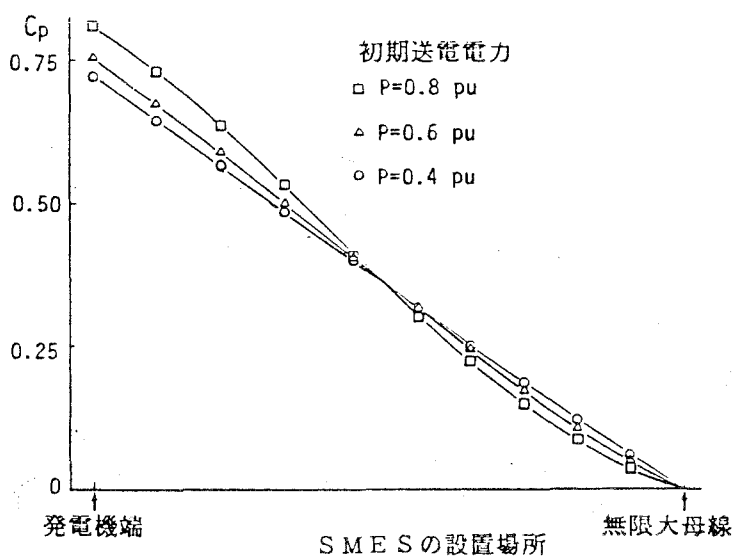
C_p は S M E S の有効電力がどれだけ発電機出力に影響を与えるかを表した係数で、これが大きいほど電力動揺の安定化に効果的であるといえる。また、 C_q は S M E S の無効電力がどれだけ電圧に影響を与えるかを表した係数で、これが大きいほど電圧の制御に効果的であると

表3.1 系統の諸定数

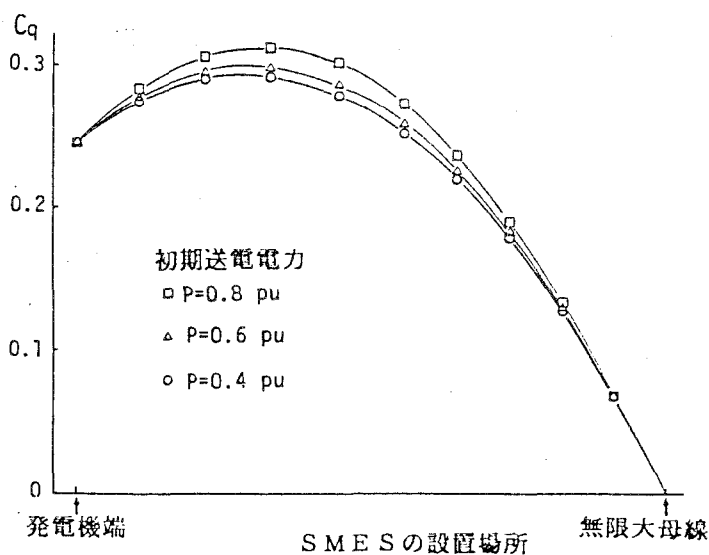
発電機 (700 MVA	自己容量 base) : 10機
$x_d = 1.6$	$M = 8.0$ s
$x_d' = 0.33$	$T_{do}' = 6.0$ s
$x_q = 1.6$	$D = 0.0$
A V R 定数	
$T_A = 0.100$ s	$K_A = 101$
$T_E = 0.164$ s	
$T_F = 0.500$ s	$K_F = 0.073$
系統 (10,000 MVA base)	
$x_1 = 0.565$	$x_2 = 0.452$
$Q_L = -0.137$	
S M E S	
$T_a = 0.02$ s	$\omega_R = 0.3$ rad/s

いえる。

送電線上において S M E S の設置箇所を変えて C_p と C_q を計算した結果を図3.4 に示す。このとき用いた系統の定数を表3.1 に示す。図3.4 の結果から有効電力の制御は発電機に近い程、無効電力の制御は送電線の間中点付近から発電端にかけて効果が大きいことがわかる。両者を考慮すると S M E S の設置点は送電線の間中点と発電端の間に最適な箇所があると考えられる。



(a) 有効電力制御の検討



(b) 無効電力制御の検討

図3.4 S M E S の設置箇所の検討

3-5 モデル系統における安定化制御効果の検討

3-5-1 静止形無効電力補償装置との比較検討

表3.1 に示す系統定数を用いて、はじめに、固有値計算により解析する。ここではモデルを線形化して得た状態方程式の固有値のうち電力動揺に対応する固有値を用いて制御効果を評価する。電力動揺に対応する固有値は、(3.25)式の固有値に対応し、通常その振動角周波数は 2π (rad/s) 程度で、他の固有値と容易に区別できる。本制御において、有効電力による制御の効果は同固有値を複素平面上でどれだけ左に移動したかによって評価できる。無効電力による制御では電圧変動を抑制することにより主に同期化力が向上する。この効果は同固有値の虚数部絶対値をどれだけ大きくしたかによって評価できる。このとき、電力動揺に対応する固有値以外の固有値の移動は小さく、ここでの安定性の議論にも無関係である。以下では、電力動揺に対応する固有値（以後、単に固有値と呼べばこれを指すものとする）に着目してSMESによる制御の効果を検討する。

図3.5 はSMESによる制御で、有効電力による電力動揺安定化の利得 K_D と無効電力による定電圧制御の利得 K_V をパラメータとして固有値をプロットした結果である（共役なペアは省略する）。 K_D を大きくすると固有値は左に移動し、制動が改善される。 K_V を大きくすると固有値は上方に移動し、同期化力が強化される。両者を共に大きくするとそれぞれの効果により、固有値は左上方向に移動する。

ここで比較のために、付録3-2に示す静止形無効電力補償装置（SVC）を用いた制御を想定し、この制御において、定電圧制御の利得 K_V' と電力動揺安定化の利得 K_D' をパラメータとして図3.5と同様に固有値をプロットした。この結果を図3.6に示す。 K_V' を大きくすると同期化力が強化される。また、 K_D' を大きくすると制動が改善される。しかし、両者を大きくしても同期化力の強化と同時に制動を改善するのは困難である。

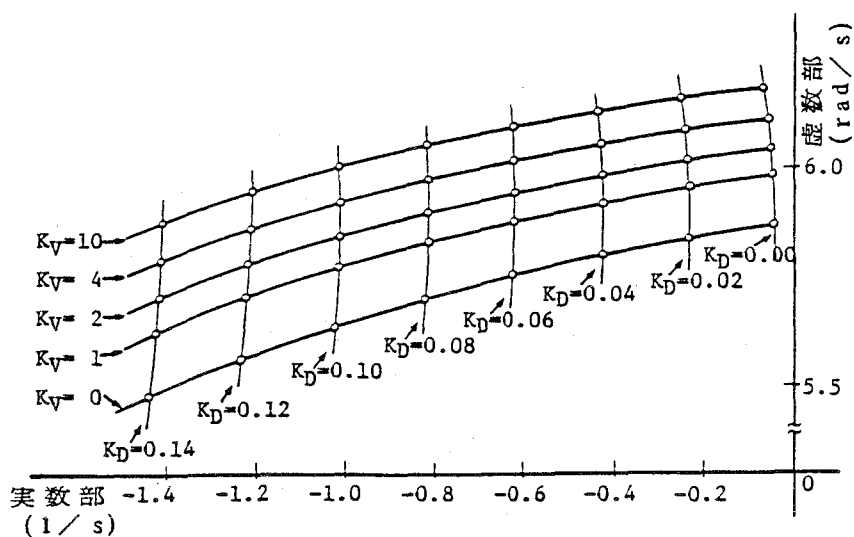


図3.5 制御利得に対する固有値の変化
(S M E Sによる制御の場合)

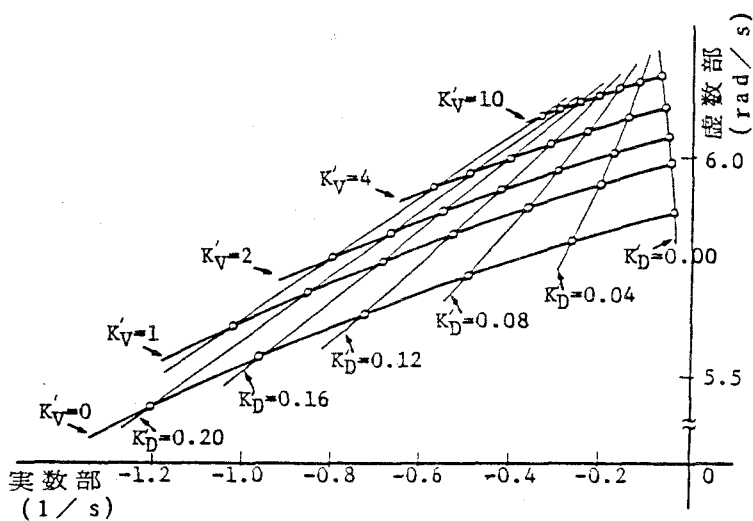


図3.6 制御利得に対する固有値の変化
(S V Cによる制御の場合)

次にシミュレーションによる検討を行う。じょう乱としては、時刻 $t = 0 \text{ s}$ に S M E S 設置母線での三相短絡 (0.01 s 継続) を想定し、S M E S は事故後直ちに制御を開始するものとした。以上の設定の下で、インパルス的な外乱による定常点のまわりの電力動揺に対する S M E S の効果を検討する。このときのシミュレーションの結果を図3.7 に示す。

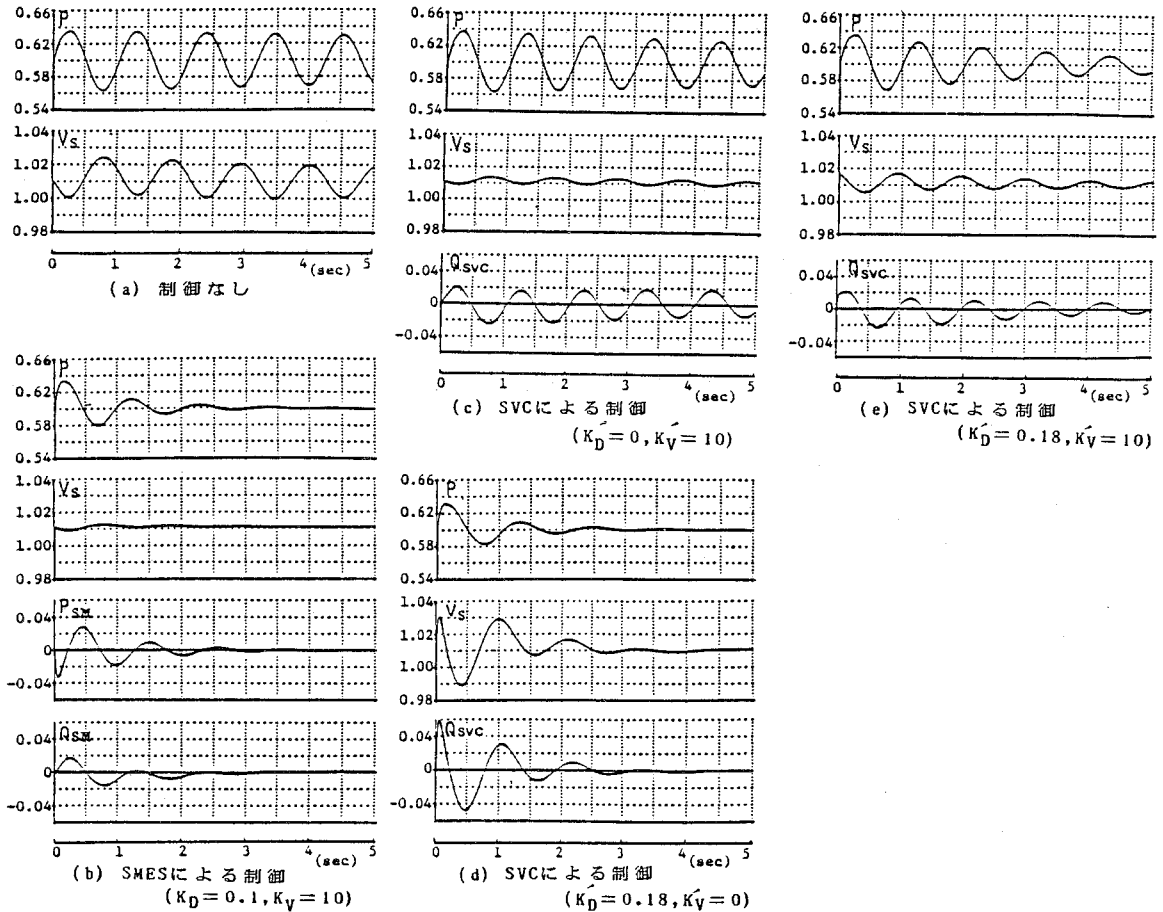


図3.7 シミュレーションの結果

S V C による制御では定電圧制御のみを行うと、電圧 V_s の変動は抑制されるが、電力動揺の制動はあまり改善されていない (同図(c) 参照)。電力動揺の安定化制御のみ行くと、制動は大きく改善されるが電圧 V_s の変動が非常に大きい (同図(d) 参照)。両者共考慮したのが同図(e) であるが、結局、定電

圧特性を維持して同時に制動を効果的に改善するのは困難と考えられる。これに対して、S M E S による制御を行うと、電圧変動が抑制されるとともに電力動揺も十分に安定化されている（同図(b) 参照）。以上の結果は固有値計算により得られた結果とよく一致している。

また、シミュレーションの結果より、制御時の S M E S の出力電力の大きさ（ $\sqrt{P_{SM}^2 + Q_{SM}^2}$ の最大値で定義する）は約 400 M V A、安定化に用いられたエネルギー（S M E S のエネルギーレベルの最大値と最小値の差で定義する）は約 100 M J であった。これらの値は、それぞれ無制御時の電力動揺の変動分の振幅ならびに半周期分を積分したエネルギーにほぼ相当する量である。

なお、与えられた潮流状態・故障条件に対して、このような安定化制御を実現するのに必要なマグネットの貯蔵容量、磁束密度の最大変化率、電力変換装置の容量といった安定化制御用 S M E S の設計に必要な情報に関しては、次章における安定化制御結果に基づき、その検討法を示す。

3-5-2 送電可能容量の改善

図 3.1 の長距離大容量送電モデル系統において、表 3.1 に示した 1 機 700 M V A の発電機数を変化させたときの発電機の出力総和に対する固有値実数部の動きを計算し、系統の送電限界を求めた。この結果を図 3.8 に示す。ただし、各ケースの潮流条件としては母線電圧（ $V_{\infty} = 1.00$, $V_s = 1.01$, $V_t = 1.01$ ）と発電機の出力電力（1 機につき 700 M W）を指定値とし、この条件に従って中間点には適当な容量の調相設備が設置されるものとした。

無制御のとき、発電機数を増加すると系統は次第に不安定になり、総出力が約 7 G W で安定限界となる。S V C を用いて定電圧制御を行うと安定限界は約 9 G W になり、更に、電力動揺の安定化のための信号（付録 3-2 で定義される P S S 信号 ΔQ_0 ）を付加すると安定限界を広げることができるが、前節でも検討したように、このとき電圧の動的安定性が悪化していることに注意しなければならない。これに対して S M E S による制御を行うと、総出力約 14.3 G

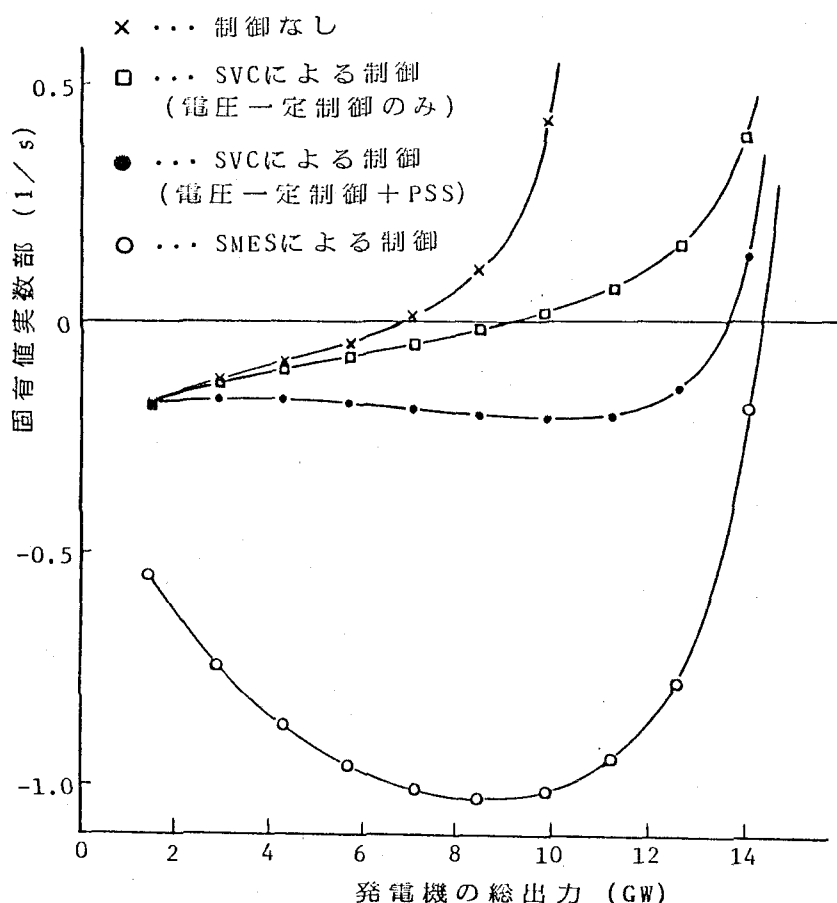


図3.8 発電機出力の変化に対する固有値実数部の動き

Wまで安定限界が広がるとともに、つねに十分な制動を得ることができる。この出力電力の値は、SMESの設置母線を無限大母線に仮定して計算した固有定態安定度限界の電力に相当する¹⁴⁾。したがって、SMESにより電圧がほとんど一定に制御される（これにより無限大母線の仮定ができる）とともに、もし送電線の電流容量が十分であれば固有定態安定度限界まで十分に安定な送電が可能となる。

以上のように、電流容量は十分であるが安定度の面から送電容量に制限を受けるような系統にSMESを設置すれば極めて効果的である。また、将来超高压送電が導入されて系統はますます長距離大容量化することが予想されているが¹⁵⁾、電圧の動的安定性の観点からもSMESの導入が効果的であろう。

3-6 結言

長距離大容量送電系統における中間領域の電力動揺の安定化、とくに電力動揺の制動の改善とともに電圧の動的安定性の強化を目的として、S M E Sを用いた安定化制御を提案し、その制御特性を種々の数値解析により評価した。得られた結果を要約すると以下のとおりである。

(1) S M E Sの有効電力を電力動揺の安定化に、無効電力を定電圧制御に用いる制御系を提案した。

(2) モデル系統を用いて、S V Cによる安定化制御と比較し、S M E Sによる制御がより効果的であることをシミュレーションおよび固有値計算により確認した。

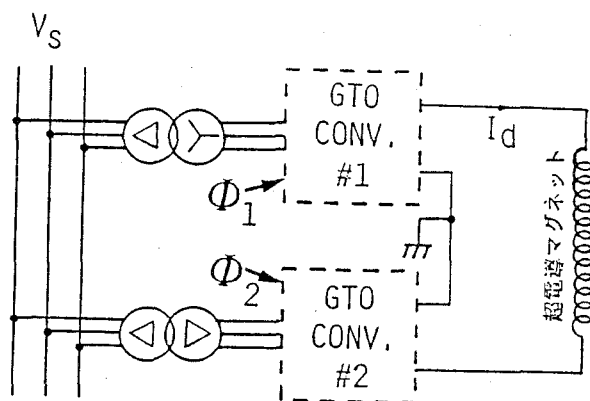
(3) 安定化に用いられたエネルギーおよび出力電力の大きさは、それぞれ無制御時における電力動揺の変動分の半周期を積分したエネルギーおよび振幅に相当する量である。

(4) S M E Sによる送電可能容量の改善効果がほかの制御に比べて著しいことを具体的な例で示した。

実系統では、電流容量は十分であっても安定度の面から送電容量が制限されるような場合にS M E Sの設置が効果的と考えられる。また、超高压送電系統に対しても、S M E Sの設置効果が大きいものと期待される。

付録 3-1 S M E S の構成と有効・無効電力同時制御機能¹³⁾

本章で想定した S M E S の構成を付図 3.1 に示す。同図に示すように、6 パルス・ゲート・ターン・オフ (G T O) サイリスタブリッジを 2 台直列に接続して構成された電力変換装置が用いられているものとする。このとき、電力変換装置から系統へ流入する有効電力 (P_{SM}) および遅れ無効電力 (Q_{SM}) は次式のように表現できる。



付図 3.1 S M E S の構成 (超電導マグネット + 2 台直列の G T O 電力変換装置)

$$P_{SM} = -I_d (V_s / 2) (\cos \phi_1 + \cos \phi_2) \quad \cdots \cdots \cdots \text{(付 3.1)}$$

$$Q_{SM} = -I_d (V_s / 2) (\sin \phi_1 + \sin \phi_2) \quad \cdots \cdots \cdots \text{(付 3.2)}$$

ϕ_1, ϕ_2 : G T O サイリスタの点弧角

$$0^\circ \leq \phi_1, \phi_2 \leq 360^\circ \quad \cdots \cdots \cdots \text{(付 3.3)}$$

ただし、マグネット電流 I_d は適当なベースの下で p u 表現されているものとする。(付 3.1) ~ (付 3.3) 式より、適切な ϕ_1 および ϕ_2 を与えれば

$$P_{SM}^2 + Q_{SM}^2 \leq (I_d V_s)^2 \quad \cdots \cdots \cdots \text{(付 3.4)}$$

で示される円内で、有効電力と無効電力を同時に制御し得ることがわかる。

付録 3-2 静止形無効電力補償装置 (SVC) を用いた電力動揺ならびに 電圧の安定化制御

本章における S M E S を用いた制御との比較のために、S V C を用いた制御を想定して、無効電力のみにより定電圧制御ならびに電力動揺の安定化を行うための制御系を構成する。

いま、S V C の無効電力 Q_{svc} を用いた制御として、次式のように定電圧制御に電力動揺の安定化信号 ΔQ_D (P S S 信号) を加えた形を考える。ただし、制御特性として S M E S と同じ一次遅れを仮定する。

$$\begin{aligned}\Delta Q_{svc} &= (-K_v' \Delta V_s + \Delta Q_D) / (1 + T_a s) \\ &\simeq -K_v' \Delta V_s + \Delta Q_D \quad \cdots \cdots \cdots \text{(付3.5)}\end{aligned}$$

(3.17) 式で $\Delta P_{SM} = 0$ とし、(3.18) 式の ΔQ_{SM} と (付3.5) 式の ΔQ_{svc} を置き換え、更に、(3.14) 式および (3.23) 式より

$$M s^2 \Delta \delta + D s \Delta \delta + a'' \Delta \delta = b'' \Delta Q_D \quad \cdots \cdots \cdots \text{(付3.6)}$$

を得る。ただし

$$\begin{aligned}a'' &= a + \{ K_v' a b_2 + a (b_2 d_3 - b_1 d_4) \\ &\quad + \alpha (b_1 d_2 - b_2 d_1) \} / (K_v' d_2 \\ &\quad + d_2 d_3 - d_1 d_4) \quad \cdots \cdots \cdots \text{(付3.7)}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}b'' &= - (b_2 d_1 - b_1 d_2) / (K_v' d_2 + d_2 d_3 \\ &\quad - d_1 d_4) \quad \cdots \cdots \cdots \text{(付3.8)}\end{aligned}$$

したがって、制動を得るには

$$\begin{aligned}
 \Delta Q_D &= K_D' s \Delta \delta \\
 &\simeq K_D' s \Delta \delta / (1 + T_a s) \\
 &\simeq - \{ s / (s + \omega_R) \} \{ \Delta P / M (s + 1) \} \\
 &\quad \cdot \{ K_D' / (1 + T_a s) \} \dots\dots\dots (\text{付3.9})
 \end{aligned}$$

のフィードバック制御を行えばよい。(付3.5)および(付3.9)式より

$$\begin{aligned}
 \Delta Q_{svc} &= - \{ 1 / (1 + T_a s) \} [K_v' \Delta V_s + \\
 &\quad K_D' \{ s / (s + \omega_R) \} \{ \Delta P / M (s + 1) \}] \\
 &\dots\dots\dots (\text{付3.10})
 \end{aligned}$$

【第3章 参考文献】

- 1) F. P. de Mello, C. Concordia "Concepts of Synchronous Machine Stability as Affected by Excitation Control", IEEE Trans. on PAS-88 No. 4, 1969.
- 2) 阿部・武田：「状態フィードバックによるPower System Stabilizer の設計」電気学会論文誌B 100 巻 5 号 昭55.
- 3) R. T. Byerly, D. T. Poznaniak, E. R. Taylor "Static Reactive Compensation for Power Transmission Systems", IEEE Trans. on PAS-101 No. 10, 1982.
- 4) S. C. Kapoor "Dynamic Stability of Long Transmission Systems with Static Var Compensators and Synchronous Machines", IEEE Trans. on PAS-98, 1979.
- 5) 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」電気学会論文誌B 99巻 12号 昭54.
- 6) 藤原・阿部・武田・小畑：「静止形無効電力制御装置による電力系統の安定化制御」電気学会論文誌B 101 巻 2 号 昭56.
- 7) 春本・矢野：「無効電力制御技術」昭和57年電気学会全国大会 S. 7-3.
- 8) 伊瀬・辻・村上：「0.5 MJ 超電導エネルギー貯蔵装置による有効・無効電力同時制御」電気学会論文誌B 104 巻 9 号 昭59.
- 9) 大沢・宮内・林：「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」電気学会論文誌B 105 巻 1 号 昭60.
- 10) 石川・秋田・上之菌・田中・増田・新富・林：「超電導エネルギー貯蔵による電力系統の安定化（その1）」電力中央研究所報告 181044 昭57.
- 11) H. J. Boenig, J. F. Hauer "Commissioning Tests of the Bonneville Power Administration 30 MJ Superconducting Magnetic Energy Storage

Unit", IEEE Power Engineering Society Summer Meeting in Seattle
84 SM 540-1, 1984.

- 12) 三谷・辻・村上：「超電導エネルギー貯蔵装置による電力系統の動態安定度の改善」電気学会論文誌B分冊、104 巻 11号 昭59.
- 13) T. Ise, Y. Murakami, K. Tsuji "Simultaneous Active and Reactive Power Control of Superconducting Magnet Energy Storage Using GTO Converter", IEEE paper No. 85 SM 354-6, presented at the Power Engineering Society Summer Meeting, 1985.
- 14) 関根・林・芹沢・豊田・長谷川：電力系統工学、p.134、コロナ社 昭54.
- 15) 山田、他：「特集：UHV交流送電」電気学会雑誌 102 巻 11号 昭57.

第 4 章 広域連系系統における電力動揺の安定化

4-1 緒言

電力系統において系統間の連系は信頼性や経済性の向上に極めて効果的であり大規模な連系が進められている。一方、系統の大規模化とともに、中間領域の電力動揺の安定度問題として、とくに、系統全体に拡がる長周期で減衰の悪い電力動揺の発生が問題になっている¹⁾²⁾。本章では、このような問題を有する広域連系系統の安定化に S M E S を用いた場合の制御特性を検討する。

電力系統の安定化制御の問題は、従来、主として一機無限大母線系統を対象とした議論がなされてきた³⁾が、上述の長周期の電力動揺のように多くの発電機が関与する動揺に対しては十分議論されていなかった。このため、近年、多機系統を対象とした制御系の設計に関する研究が進められ、とくに系統安定化装置 (P S S) の協調設計に関する研究が盛んに行われている⁴⁾⁵⁾。静止形無効電力補償装置 (S V C) に関しては、無効電力が制御でき、その設置箇所に自由度があるため、制御アルゴリズムとともに適切な設置箇所の検討^{6)~8)}が行われている。これに対して S M E S は、S V C と同様、系統内の設置箇所に自由度があり、しかも有効電力と無効電力を同時に制御できる⁹⁾。本章では、この有効・無効電力同時制御機能を利用した制御系を構成するとともに、S M E S から見た各電力動揺モードの可制御性ならびに可観測性の観点から S M E S の効果的な設置箇所を検討している。

多機系統には多くの電力動揺モードが存在するが、それらのモードに関する可制御性と可観測性は、制御あるいは観測を行う位置に依存する。すなわち、ある位置でフィードバック制御を行ったとき可制御かつ可観測なモードが制御の対象となる。もし、この位置において、減衰の悪いモードに対してのみ可制御かつ可観測であるとすれば、この位置は、他のモードに影響を及ぼすことなく減衰の悪いモードだけを安定化するのに適している、すなわち適切な S M E

S の設置箇所であるといえる。

本章では、以上の観点に基づき、くし形に連系された系統でしばしば問題になる長周期で減衰の悪い電力動揺の安定化の一方法として S M E S を用いた制御を提案する¹⁰⁾。はじめに、連系線の潮流の変化分を用いた、電力動揺を安定化するためのフィードバック制御系を構成する。つぎに、S M E S の系統動揺に対する制御効果の大きさを可制御性および可観測性の概念を応用して定義し、この指標によって問題となる長周期電力動揺に対して効果的な S M E S の設置箇所の決定法を導く。さらに、シミュレーションにより制御の効果を確認するとともにそれらの結果に基づいて、マグネットの貯蔵容量、磁束密度の最大変化率、電力変換装置の容量といった安定化制御用 S M E S の設計に必要な情報に関する検討法を示す。

4-2 広域連系系統の線形化モデル

S M E S の制御系を検討するための広域連系系統の定式化を行う。

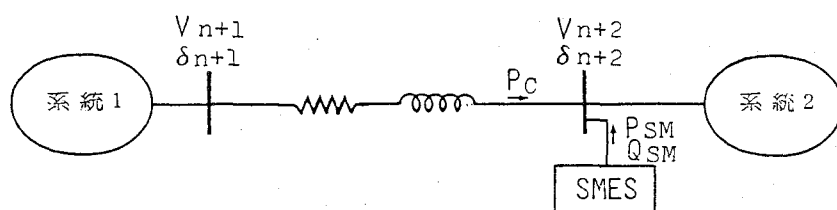


図4.1 連系系統に設置された S M E S

図4.1 に示すように、二系統間が連系され、連系線上に S M E S が設置されている場合を想定する。発電機モデルは電力動揺の特徴を簡単な形で捉えることができる過渡リアクタンス x_d' 背後電圧一定のモデルで表現する。

いま、発電機総数を n とし、背後電圧およびその位相を V_i, δ_i ($i=1, \dots, n$)、連系線上に二母線を想定しそれらの電圧および位相を V_{n+k}, δ_{n+k} ($k=1, 2$) で表現する。S M E S は $n+2$ 番目の母線に設置されているものとする。これらから見たアドミタンス行列を

$$\{G_{ij}\} + j \{B_{ij}\} \quad i, j=1, \dots, n+2 \quad \dots\dots\dots (4.1)$$

で表現したとき、図4.1 の系統は以下のように定式化できる。

発電機の運動

$$M_i \ddot{\delta}_i = P_{mi} - P_i \quad \dots\dots\dots (4.2)$$

$$P_i = V_i \sum_{j=1}^{n+2} V_j \{G_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) + B_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j)\} \quad i=1, \dots, n \quad \dots\dots\dots (4.3)$$

母線 $n+k$ ($k=1, 2$) における潮流条件

$$0 = V_{n+1} \sum_{j=1}^{n+2} V_j \{G_{n+1j} \cos(\delta_{n+1} - \delta_j) + B_{n+1j} \sin(\delta_{n+1} - \delta_j)\} \quad \dots\dots\dots (4.4)$$

$$0 = V_{n+1} \sum_{j=1}^{n+2} V_j \{G_{n+1j} \sin(\delta_{n+1} - \delta_j) - B_{n+1j} \cos(\delta_{n+1} - \delta_j)\} \quad \dots\dots\dots (4.5)$$

$$P_{SM} = V_{n+2} \sum_{j=1}^{n+2} V_j \{G_{n+2j} \cos(\delta_{n+2} - \delta_j) + B_{n+2j} \sin(\delta_{n+2} - \delta_j)\} \quad \dots\dots\dots (4.6)$$

$$Q_{SM} = V_{n+2} \sum_{j=1}^{n+2} V_j \{G_{n+2j} \sin(\delta_{n+2} - \delta_j) - B_{n+2j} \cos(\delta_{n+2} - \delta_j)\} \quad \dots\dots\dots (4.7)$$

連系線潮流 P_c について

$$P_c = G_{n+1n+2} V_{n+2}^2 - V_{n+1} V_{n+2} \{G_{n+1n+2} \cos(\delta_{n+1} - \delta_{n+2}) - B_{n+1n+2} \sin(\delta_{n+1} - \delta_{n+2})\} \quad \dots\dots\dots (4.8)$$

ただし、 M_i : 慣性定数、 P_{mi} : 機械的入力、 P_i : 発電機出力、 P_{SM} 、 Q_{SM} : $SME S$ の有効電力、無効電力を表す。 M_i 、 P_{mi} は一定とする。なお、 P_c は後に制御のための検出信号として用いる。

次に系統のモデルを動作点の近傍で線形化する。まず、(4.2) および(4.3) 式を線形化して

$$\Delta \ddot{\delta} = A_1 \Delta \delta + B_1 \Delta w \quad \cdots \cdots \cdots (4.9)$$

(4.4) ~ (4.7) 式を線形化して

$$\Delta u = C_1 \Delta \delta + D_1 \Delta w \quad \cdots \cdots \cdots (4.10)$$

さらに、(4.8) 式を線形化して

$$\Delta P_c = E_1 \Delta w \quad \cdots \cdots \cdots (4.11)$$

を得る。ただし

A_1, B_1, C_1, D_1, E_1 : 動作点でのヤコビアン

$$\Delta \delta = [\Delta \delta_1, \Delta \delta_2, \cdots, \Delta \delta_n]^t$$

$$\Delta w = [\Delta \delta_{n+1}, \Delta \delta_{n+2}, \Delta V_{n+1}, \Delta V_{n+2}]^t$$

$$\Delta u = [0, 0, \Delta P_{SM}, \Delta Q_{SM}]^t$$

いま、 $SME S$ は有効電力と無効電力を同時に制御できる¹¹⁾ものとし、まず、無効電力を定電圧制御に用いるものとする。この制御は静止形無効電力補償装置($SV C$)を用いた制御に対応するもので、同期化力を強化する効果が期待

できる⁶⁾。この制御により、 V_{n+2} が一定（すなわち $\Delta V_{n+2} = 0$ ）であると
 考えて、 ΔQ_{SM} および ΔV_{n+2} を消去すると

$$\Delta \delta = A_1 \Delta \delta + B_1' \Delta w' \quad \dots\dots\dots (4.12)$$

$$\Delta u' = C_1' \Delta \delta + D_1' \Delta w' \quad \dots\dots\dots (4.13)$$

$$\Delta P_c = E_1' \Delta w' \quad \dots\dots\dots (4.14)$$

と表すことができる。ただし

$$\Delta w' = [\Delta \delta_{n+1}, \Delta \delta_{n+2}, \Delta V_{n+1}]^t$$

$$\Delta u' = [0, 0, \Delta P_{SM}]^t$$

ここで、(4.13)式を用いて $\Delta w'$ を消去すると

$$\Delta \delta = (A_1 - B_1' D_1'^{-1} C_1') \Delta \delta + B_1' D_1'^{-1} \Delta u' \quad \dots\dots (4.15)$$

$$\Delta P_c = -E_1' D_1'^{-1} C_1' \Delta \delta + E_1' D_1'^{-1} \Delta u' \quad \dots\dots\dots (4.16)$$

を得る。なお、行列 D_1' は (4.13) 式で $\Delta \delta = 0$ としたとき、母線 $n+1$ および
 $n+2$ における潮流条件式のヤコビアン行列である（いまの場合 $\Delta V_{n+2} = 0$
 の制約がある）。したがって、限界潮流のような特殊な潮流時以外には D_1' は
 正則であり、ここでは逆行列は存在するものとして議論を進める。

(4.15) および (4.16) 式を整理すると

$$\Delta \delta = A \Delta \delta + B \Delta P_{SM} \quad \dots\dots\dots (4.17)$$

$$\Delta P_c = C \Delta \delta + d \Delta P_{SM} \quad \dots\dots\dots (4.18)$$

を得る。ここで、系統の性質として、すべての δi ($i=1, \dots, n$) を一様に変化させても系統の状態は元と変わらないので、行列 A および C の要素には

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} = 0 \quad i=1, \dots, n \quad \dots\dots\dots (4.19)$$

$$\sum_{j=1}^n c_j = 0 \quad \dots\dots\dots (4.20)$$

の関係が成り立つ。また、 d は ΔP_{SM} に対する ΔP_c の感度を表し

$$-1 < d < 0 \quad \dots\dots\dots (4.21)$$

である。

いま、行列 A の n 個の固有ベクトルにより構成される行列 T を用いて、変換

$$\Delta \delta = T x \quad \dots\dots\dots (4.22)$$

により行列 A を対角化すると

$$\ddot{x} = \Lambda x + T^{-1} B \Delta P_{SM} \quad \dots\dots\dots (4.23)$$

$$\Delta P_c = C T x + d \Delta P_{SM} \quad \dots\dots\dots (4.24)$$

を得る。ただし、行列 Λ は行列 A の固有値 $-\lambda_i$ ($i=1, \dots, n$) を対角に有する対角行列で、固有値は重複しないものとして議論を進める。

本章では、(4.23) および (4.24) 式を用いて S M E S の制御系の構成ならびにその制御を効果的に行うための S M E S の設置箇所を検討する。

なお、ここで (4.19) 式を考慮すると

$$A [1, 1, \dots, 1]^t = 0$$

すなわち、零固有値が存在する。しかし、(4.20)式より

$$C [1, 1, \dots, 1]^t = 0$$

であり、零固有値は観測されない。このため、一般にこのような観測量を用いたフィードバック制御では零固有値は制御の対象外で、しかもここで問題にしている安定性の議論には無関係である。このため、以下では零固有値は議論の対象としない。なお、零固有値以外のモードは一般に振動系で、 λ_i ($i=1, \dots, n-1$ とする) は正である。

4-3 S M E S を用いた長周期電力動揺の安定化制御系の構成

ここでは、系統内の連系線上の適当な一地点に S M E S を設置し、設置点における連系線潮流の変化分 ΔP_c に適当な位相補償要素を付加して S M E S の有効電力制御へのフィードバック信号として用いることにより安定化制御を実現する。この制御により、問題となる長周期電力動揺の安定化をはかる、すなわち同期化力を強化し同時に制動を改善する。以下では S M E S の設置箇所と付加すべき位相補償の決定法について述べる。

4-3-1 連系線潮流のフィードバック制御

はじめに、 x の一つの成分 x_i に着目して、S M E S のフィードバック信号を検討する。いま、S M E S はある一地点に設置されているものとし、このとき、(4.23)式において x_i に着目すると次式のようにかくことができる。

$$\ddot{x}_i = -\lambda_i x_i + b_i^* \Delta P_{SM} \dots\dots\dots (4.25)$$

ここで、 x_i と位相が ϕ (rad) 異なる信号をフィードバックして

$$\Delta P_{SM} = k_i \exp(j\phi) x_i \quad \dots\dots\dots (4.26)$$

の制御を行ったと仮定する。このときの x_i の解の形を

$$x_i = x_{i0} \exp\{(\sigma_i + j\omega_i)t\} \quad , \quad \omega_i > 0 \quad \dots\dots\dots (4.27)$$

とすると、 σ_i (1/s) および ω_i (rad/s) は以下の形で求めることができる。この詳細は付録4-1を参照されたい。

$$\sigma_i \simeq \{b_i^* k_i / (2 \sqrt{\lambda_i - b_i^* k_i})\} \phi \quad \dots\dots\dots (4.28)$$

$$\omega_i \simeq \sqrt{\lambda_i - b_i^* k_i} \quad \dots\dots\dots (4.29)$$

ただし、 $|\phi|$ を十分小さいとして近似計算を行った。

(4.29)式より、ある地点にSMESを設置したとき

$$b_i^* k_i < 0 \quad \dots\dots\dots (4.30)$$

であればモード i の同期化力は強化される (ω_i が $\sqrt{\lambda_i}$ より大になる)。さらに、同時にこのモードの制動を改善する (σ_i を負にする) には、(4.28)式で(4.30)式を考慮して

$$\phi > 0 \quad \dots\dots\dots (4.31)$$

であればよいことがわかる。

つぎに、連系線潮流の変化分 ΔP_c を検出信号として選んだ場合について考察する。いま、 ΔP_c の位相を一様に ϕ_p だけ進めた信号をフィードバック信号として用い

$$\Delta P_{SM} = -\exp(j \phi_p) \Delta P_c \quad \dots\dots\dots (4.32)$$

なる制御が行われるものとする。ただし、右辺の負の符号は S M E S の有効電力が連系線潮流の動揺分を補償する形ではたらくことを示している。

(4.24)式および(4.32)式より次式を得る。

$$\Delta P_{SM} = -\exp(j \phi_p) C T x_i / \{1 + d \exp(j \phi_p)\} \quad \dots\dots\dots (4.33)$$

このようなフィードバック制御を行った場合、モード間の相互の影響のため、一つのモードに対する制御の効果を簡単な形で表現するのは困難である。そこで、制御の効果の一つの目安となる指標を得るために、簡単に(4.26)式の制御が(4.33)式の右辺の x_i に関する制御項と等しいと考えると

$$k_i \simeq -c_i^* / (1 + d) \quad \dots\dots\dots (4.34)$$

$$\tan \phi = \sin \phi_p / (\cos \phi_p + d) \quad \dots\dots\dots (4.35)$$

ただし、 c_i^* は C T の第 i 成分である。また、 $|\phi_p|$ を小さいとして近似計算を行った。このとき、(4.30)および(4.31)式は

$$b_i^* c_i^* / (1 + d) > 0 : \text{同期化力の強化条件} \quad \dots\dots\dots (4.36)$$

$$\phi_p > 0 \quad (\text{位相進み}) : \text{制動の改善条件} \quad \dots\dots\dots (4.37)$$

で表すことができる。すなわち、(4.36)式を満たす場所にSME Sを設置し、その場所における連系線の潮流の変化分に位相進みを付加してフィードバック制御を行えばモード*i*の効果的な安定化を期待できる。

4-3-2 可制御性・可観測性に着目した安定化の評価指標による設置箇所の決定

まず、SME Sを設置したときの制御効果、すなわち同期化力を強化する効果と制動を改善する効果を同時に評価できる指標を定義する。

(4.34)式を(4.28)式に代入すると

$$\sigma_i \cong - [b_i^* c_i^* / \{2(1+d) \cdot \sqrt{\lambda_i + b_i^* c_i^* / (1+d)}\}] \phi \dots\dots\dots (4.38)$$

となる。ここで、右辺の ϕ の係数を

$$\gamma_i = b_i^* c_i^* / \{2(1+d) \sqrt{\lambda_i + b_i^* c_i^* / (1+d)}\} \dots\dots\dots (4.39)$$

により定義する。このとき γ_i は次の性質を有する。

(i) $\gamma_i > 0$ と(4.36)式は等価である。すなわち、ある地点にSME Sを設置したときモード*i*の同期化力が強化される条件は $\gamma_i > 0$ で表される。

(ii) (4.38)式から明らかなように、 γ_i が大きい程、同じ位相進みに対してモード*i*の制動の改善効果が大きい。

したがって、 γ_i が正で大きい場所にSME Sを設置して制御を行うことにより、モード*i*の安定化効果が期待される。

なお、(4.22)式の変換行列Tは固有ベクトルにより構成されているため列ベクトルごとにスカラ倍の任意性を有する。これに伴い b_i^* および c_i^* はそれぞれ

れ任意性を有するが、両者の積 $b_i^* c_i^*$ はこの任意性が相殺され、その結果 γ_i は一意に決まる。また、 b_i^* および c_i^* はそれぞれモード i の可制御性および可観測性に依存しており、したがって、 γ_i はモード i の可制御性と可観測性を同時に加味した指標であるといえる。本章では、この γ_i をモード i に対する S M E S の設置効果の評価指標として用い、S M E S の設置場所を変えてすべてのモードに対する γ_i を計算し、その結果より、安定化に効果的な S M E S の設置箇所を決定する。

4-4 くし形連系モデル系統の安定化制御

4-4-1 安定化評価指標による設置箇所の決定

図4.2 に示す6機くし形モデル系統を用いて解析する。このモデルは表4.1 に示される6機の同じ発電機と送電線を連系したものである。

表4.1 系統の定数
(過渡リアクタンス背後電圧一定のモデル)

発電機	(8,000 MVA 自己容量ベース)
	$M=7.0\text{sec}$ $x_d'=0.38\text{pu}$
系統	(10,000 MVA ベース)
電源線	$r_1=0.0167\text{pu}$ $x_1=0.300\text{pu}$
連系統	$r_2=0.0250\text{pu}$ $x_2=0.600\text{pu}$
負荷	$P_L=0.789\text{pu}$ $Q_L=-0.141\text{pu}$

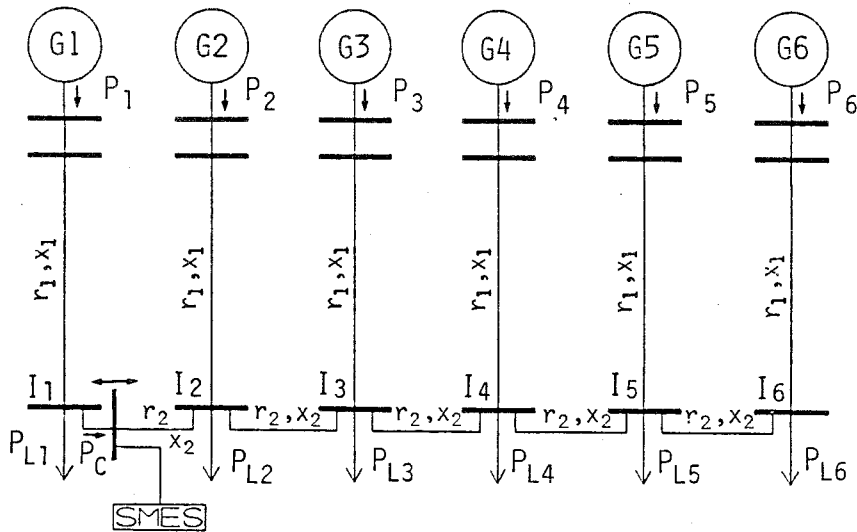


図4.2 6機くし形モデル系統

まず、(4.23)式で表される固有値 λ_i ($i=1, \dots, 5$) およびそれぞれに対応する左固有ベクトルを図4.3に示す。図中の番号は発電機番号に対応する。

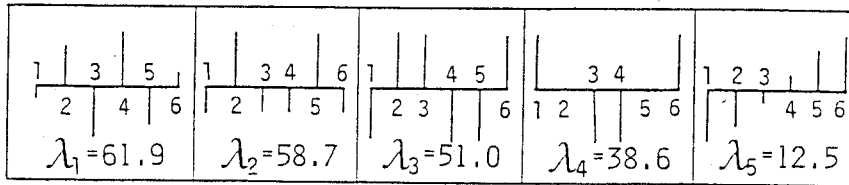


図4.3 固有値と固有ベクトル

固有ベクトルを見れば各モードの動揺の仕方がわかる。第1～第3モードは、主に隣接した発電機間の同期化力による動揺（すなわち、隣接した発電機が互いに逆方向に揺れる）で、その動揺周期は比較的短い。第4モードはG1—G3間およびG4—G6間のやや広域的な動揺である。第5モードは系統の両端で逆方向に揺れる広域的な動揺で、その周期は長い。

ここで、各連系線上でSMESの設置場所を変えて、各モードについて τ_i ($i=1, \dots, 5$) を求めた結果を図4.4に示す。図中の $I_1 \sim I_6$ は図4.2に示した各連系点に対応し、横軸は連系点を基準にした連系線のリアクタンスに対応する。この結果では、SMESから見て左側からの連系線潮流の変化分をフィードバック制御のための検出信号として用いたが、逆方向からの信号を用いた場合については対称な点にSMESを設置したものとして議論できる。

図4.4の結果から、各モードの動揺の仕方と対応する τ_i には次の関係があることがわかる。

(i) SMESを設置した連系線の両端の発電機が逆方向に揺れるモードの場合、その連系線の中央付近で $\tau_i = 0$ となる点がある。これは、その点に設置した場合、(4.23), (4.24)式で表されるシステムにおいてモード i の可制御性が失われる ($b_{i*} = 0$) ためである。例えば、各連系線上での第1モード、 $I_1 - I_2$ 間での第2モードにおいて $\tau_i = 0$ となる点が見られる。

(ii) SMESを設置した連系線の両端の発電機が同方向に同程度揺れるモー

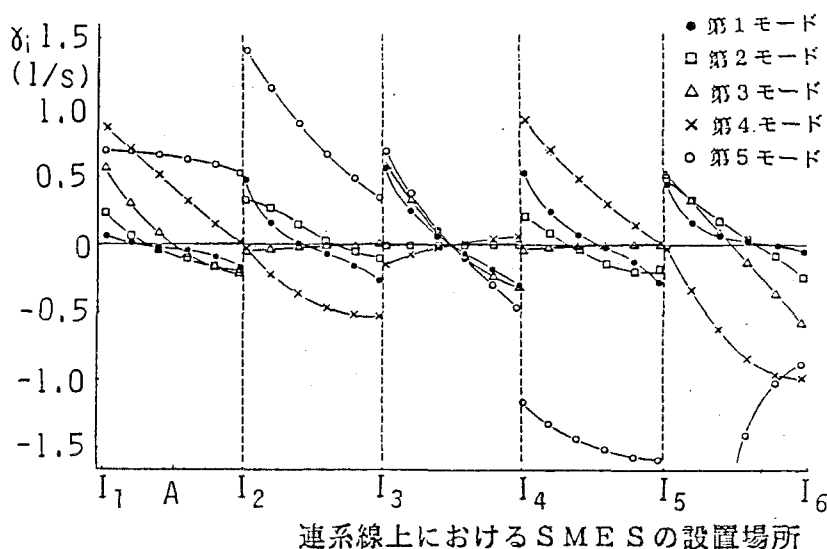


図4.4 SMESの設置場所と γ_i の関係

ドの場合、その連系線上ではつねに $\gamma_i \approx 0$ である。これは、その連系線上に設置した場合、同システムにおいてモード i の可観測性に欠ける($c_i^* \approx 0$)ためである。例えば、 $I_3 - I_4$ 間での第2および第4モード、 $I_2 - I_3$ 間での第3モードはつねに $\gamma_i \approx 0$ である。

以上の関係は、主として短周期の第1～第3モードに見られる。長周期の第4および第5モードの γ_i は、中央の連系線上を除いて各連系線ごとに同符号でその絶対値は大きい。これは、長周期のモードが系統全体にわたる動揺であり、このため系統の広い範囲で可制御かつ可観測であるためと考えられる。

これらの結果を考慮して図4.4を見ると、A点(I_1 と I_2 の midpoint)付近およびその左側において、長周期モードの γ_i は大きく、短周期モードの γ_i は零に近いことがわかる。SMESから見て右側からの連系線潮流の変化分を検出信号として用いる場合を考慮すれば、 $I_5 - I_6$ 間でも全く同様の点を見出せることになる。くし形の連系系統でしばしば安定度上問題となる長周期の電力動揺を安定化するには、このような箇所にSMESを設置すれば、その効果が期待できる。

4-4-2 制御パラメータの決定

以下の数値計算では、発電機を表4.2に示す定数を持つ界磁巻線モデルで表現し、図4.5に示すAVRを考慮する。ただし、ガバナの効果は無視する。SMESの有効電力と無効電力の制御特性は前章と同じく一次遅れで表す。これらのモデルを動作点の近傍で線形化して得られる状態方程式を用いて固有値計算を行い、全固有値の中で電力動揺に対応

する（すなわち、4-4-1節での各モードに対応する）固有値を対象として議論を進める。なお、以下で単に固有値と呼べば電力動揺に対応する固有値を指すものとする。

ここで、具体的な形でSMESの制御系を構成する。前節で検討したように、有効電力の制御のフィードバック信号には(4.37)式で述べた ϕ_p に相当する位相進みが必要である。これを実現するために、リセットフィルタ $s/(s + \omega_R)$ を付加して、 ω_R を適当に選ぶことにより、第5モードの周波数帯域である3 rad/s 付近の信号の位相を進めることにする。無効電力の制御はSMES設置点の電圧 (V_s とする) に適当な利得をつけてそれをフィードバック信号として用いる。このときのSMESの有効・無効電力の制御則は

表4.2 発電機の定数（界磁巻線モデル）

発電機	(8,000 MVA 自己容量ベース)
M	=7.0sec $T_{do} = 6.0\text{sec}$
D	=2.5sec $x_d = 1.8\text{pu}$
x_q	=1.8pu $x'_d = 0.38\text{pu}$

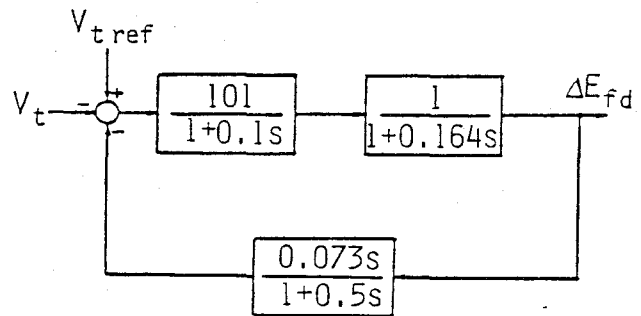
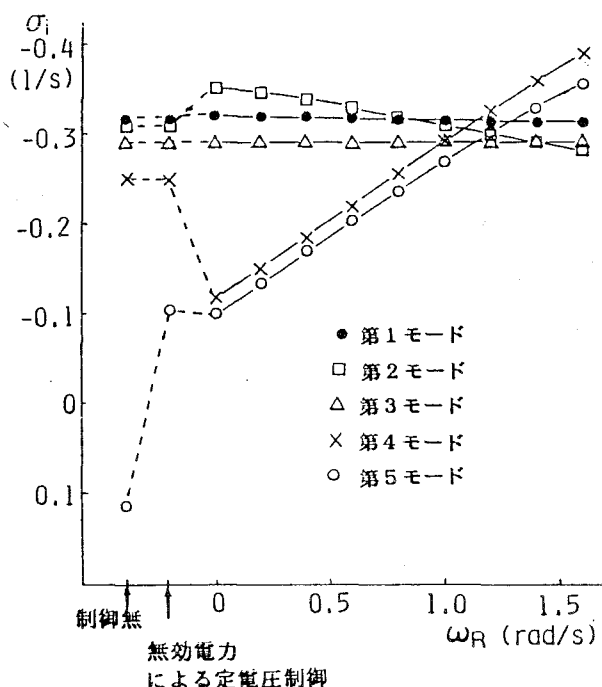


図4.5 AVRのブロック図

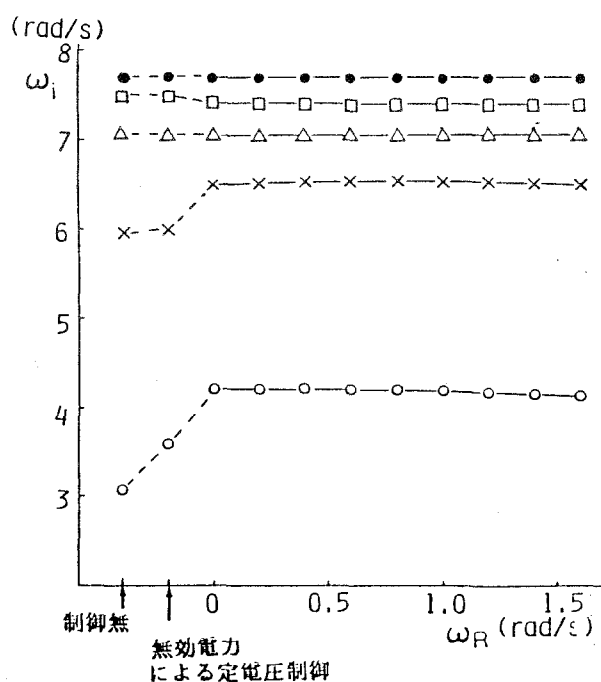
で表される。ただし、短絡容量を考慮して $K_v = 10.0$ に設定した。以下では、A 点（図 4.4 参照）に SMES を設置した場合を想定し、制御パラメータ ω_R を決定する。

図 4.6 は、無制御のとき、無効電力を用いた定電圧制御（(4.41) 式で表される制御）のみ行ったとき、および有効・無効電力を同時に制御し ω_R の値を変えたときの各場合について固有値の実数部（同図 (a)）ならびに虚数部（同図 (b)）をプロットした結果である。ここで、固有値の実数部は各モードの制動の大きさに対応し、虚数部は各モードの同期化力の大きさに対応する。

同図 (a) を見ると、無制御のときには最も長周期の第 5 モードが不安定であることがわかる。無効電力による定電圧制御のみを行った場合、第 5 モードの同期化力が強化され、同時に制動も改善されている。A 点は無効



(a) 固有値実数部



(b) 固有値虚数部

図 4.6 ω_R に対する固有値の動き

電力を用いた定電圧制御（SVCを用いた制御に対応する）によっても系統安定化の効果が大きい地点である⁶⁾。つぎに、有効電力の制御も加えると、 γ_i の値が大きい第4および第5モードの同期化力が強化されるが、 $\omega_R = 0 \text{ rad/s}$ のときには、とくに第4モードの制動は逆に悪くなる。これはSME Sの制御の遅れにより位相が遅れるためである。そこで、 ω_R の値を大きくして位相進みの補償度を増すと γ_i の値が大きい第4、第5モードの制動は効果的に改善される。他のモードは ω_R の値を変えてもほとんど影響を受けない。また、各モードの虚数部は ω_R の値を変化させてもほとんど変化しない。以上の結果は γ_i の値から期待される結果と定性的によく一致する。ただし、第5モードは第4モードより γ_i の値が大きいにもかかわらず両者の制動改善効果がほとんど同じであるなど、定量的には必ずしも一致しない。これは、 γ_i の値には複数のモードの相互的な影響が考慮されていないためと考えられる。

以上のように、 γ_i を用いて制御の効果を評価することが妥当であることを確認するとともに、リセットフィルタにより実現された位相進み補償において、 ω_R を適切な値（この例の場合 1.2 rad/s 程度）に設定することによりA点に設置したSME Sを用いて効果的な制御を行えることがわかった

4-4-3 評価指標の初期潮流に対する依存性

一般に、大規模な連系系統では、発電機出力の増大あるいは連系線を流れる潮流の増大に伴い、電力動揺の安定度が低下する傾向があることが知られている。これを考慮して、図4.2の系統において次の3ケースを想定し、初期潮流に対する評価指標 γ_i の依存性を調べた。

(a) 全発電機および全負荷（ P_i および P_{Li} 、 $i=1, \dots, 6$ ）を一様に増加した場合（このとき連系線には潮流はのっていない）

(b) 負荷 P_{L6} を増加し、この電力増加分を発電機1から供給し、連系線の潮流を増加した場合（他の発電機および負荷は 0.7 pu に固定）

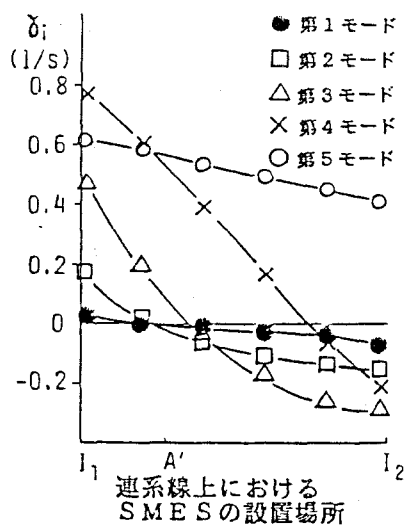
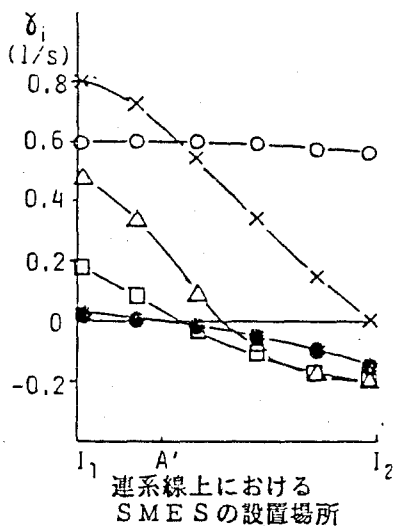
(c) 負荷 P_{L1} を増加し、この電力増加分を発電機6から供給し、連系線

の潮流を増加した場合（連系線潮流の向きが(b)の逆）

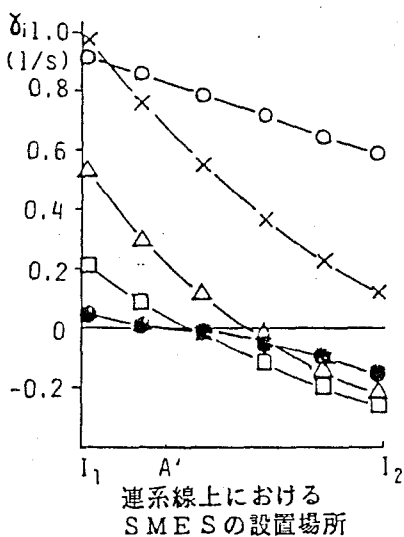
各ケースのそれぞれ一つの潮流状態について $I_1 - I_2$ 間における γ_1 の値を求めた結果を図4.7に示す。いずれの場合も図4.4で求めた結果とよく似ていることがわかる。 γ_1 の値は対応する固有ベクトルの分布の仕方との関係が大きく、ここで対象としているくし形の連系系統では、系統の構成が変わらなければ初期潮流状態が変更されても γ_1 の値はあまり影響を受けないと考えられる。

ここで、SME Sの設置点として、図4.7の各ケースで第4、第5モードの γ_1 のみが正で他は零に近いA'点を選び、安定化制御を行ったときの固有値計算の結果を表4.3に示す。ただし、いずれも ω_R の値は1.2 (rad/s) に設定した。なお、比較のため、SVCによる制御を想定して、(4.41)式で表される無効電力による定電圧制御を施した場合についても解析した。

無制御の場合には各ケースとも重潮流になるに従って不安定になっている。SVCを用いて制御した場合にも安定化効果は大きいが、とくに、表4.3(c)のケースでは、逆に安定度が若干悪化している。これに対して、SME Sを用いた制御を行えば同ケースにおいても安定化が可能で、いずれのケースにおいても安定に送電できる容量を改善できる。このように、 γ_1 を用いて決定した場所にSME Sを設置すれば、種々の初期潮流状態に対して安定化の効果が高いことを確認できた。



(a) $P_i, P_{Li} : 0.9 \text{ pu}$ (b) $P_1, P_{L6} : 0.85 \text{ pu}$
 $i=1, 2, \dots, 6$ (他は 0.7 pu)



(c) $P_6, P_{L1} : 0.85 \text{ pu}$
(他は 0.7 pu)

図4.7 潮流状態を変えたときの γ_i の値 ($I_1 - I_2$ 間)

表4.3 種々の潮流状態におけるSME Sの安定化効果

(a) 全発電機出力、全負荷を一樣に変化させた場合 ($i=1, \dots, 6$)

$P_i (\approx P_{Li})$ (pu) 制御方式	0.75	0.80	0.85	0.90	0.95	1.00
無制御	○	×	×	×	×	×
SVC	○	○	△	×	×	×
SME S	○	○	○	○	△	×

(b) P_1 および P_{L6} を一樣に変化させた場合 (他は0.70pu)

$P_1 (\approx P_{L6})$ (pu) 制御方式	0.80	0.85	0.90	...	1.10	1.15	1.20	1.25
無制御	○	△	×	...	×	×	×	×
SVC	○	○	○	...	○	△	×	×
SME S	○	○	○	...	○	○	○	×

(c) P_6 および P_{L1} を一樣に変化させた場合 (他は0.70pu)

$P_6 (\approx P_{L1})$ (pu) 制御方式	0.80	0.85	0.90	0.95
無制御	○	△	×	×
SVC	○	×	×	×
SME S	○	○	○	×

○ : 安定 ($\sigma_{\max} < -0.05$)

△ : 安定限界 ($|\sigma_{\max}| \leq 0.05$)

×

$\sigma_{\max}$ は固有値実数部の最大値

4-4-4 シミュレーションモデルによる検証

界磁巻線モデルを用いてシミュレーションを行った。潮流状態としては、表 4.3 のケース(c) で P_e と P_{L1} を 0.85 pu とした場合を想定した。外乱としては、時刻 $t = 0 \text{ s}$ に G1 端での三相短絡 (3 cycle 継続) を想定し、事故からの復帰後直ちに制御を開始するものとした。ここで SMES は A' 点に設置されているものとした。

シミュレーションの結果を図 4.8 に示す。無制御のとき、電力動揺は発散傾向にある。SVC を用いた制御を行うと電圧の変動は抑制されるが、電力動揺の安定性は無制御のときよりも少し悪くなる。これに対して SMES を用いた制御を行うと電圧変動の抑制とともに電力動揺が効果的に安定化されている。

また、制御の結果より、出力電力の大きさおよび安定化に用いられたエネルギーはそれぞれ、

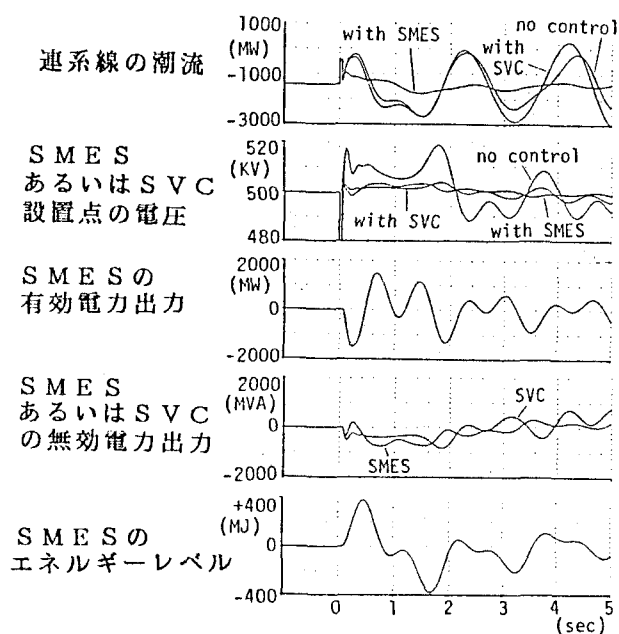


図4.8 シミュレーションの結果

無制御時における連系線潮流の動揺分の振幅およびそれを積分して求めたエネルギーと同程度であることがわかった。ここで想定した故障に対しては、それぞれ 1600 MVA および 800 MJ 程度であった。ただし、出力電力の大きさは $\sqrt{P_{SM}^2 + Q_{SM}^2}$ の最大値で、安定化に用いられたエネルギーは SMES のエネルギーレベルの最大値と最小値の差で定義した。

4-4-5 制御に必要な SMES の諸容量の検討¹²⁾

安定化制御に用いられたエネルギーや出力電力の大きさは、前節でもみたよ

うに、シミュレーションにより得た有効・無効電力の波形から算出することができる。しかしながら、このような安定化制御用SME Sを設計するために必要な情報を得るには、さらにいくつかの検討を行う必要がある。以下に順を追って、制御に必要なSME Sの諸容量を決定するための一方法を示す。

まず、制御に必要な諸容量は外乱の大きさ、すなわち故障の種類、初期潮流状態あるいは故障の継続時間に依存する。これを検討するために、潮流状態として次の3つのケースを設定し、三相短絡の故障継続時間を変えてシミュレーションを行った。

(a) ケース1: $P_i, P_{Li} = 0.85 \text{ pu}$ $i=1, \dots, 6$

(b) ケース2: $P_1, P_{L6} = 0.85 \text{ pu}$, 他はすべて 0.70 pu

(c) ケース3: $P_{L6}, P_1 = 0.85 \text{ pu}$, 他はすべて 0.70 pu

シミュレーションの結果より、安定化に用いられたエネルギーおよび出力電力の大きさを求めた結果を図4.9に示す。両者共故障継続時間にほぼ比例して大きくなることがわかる。

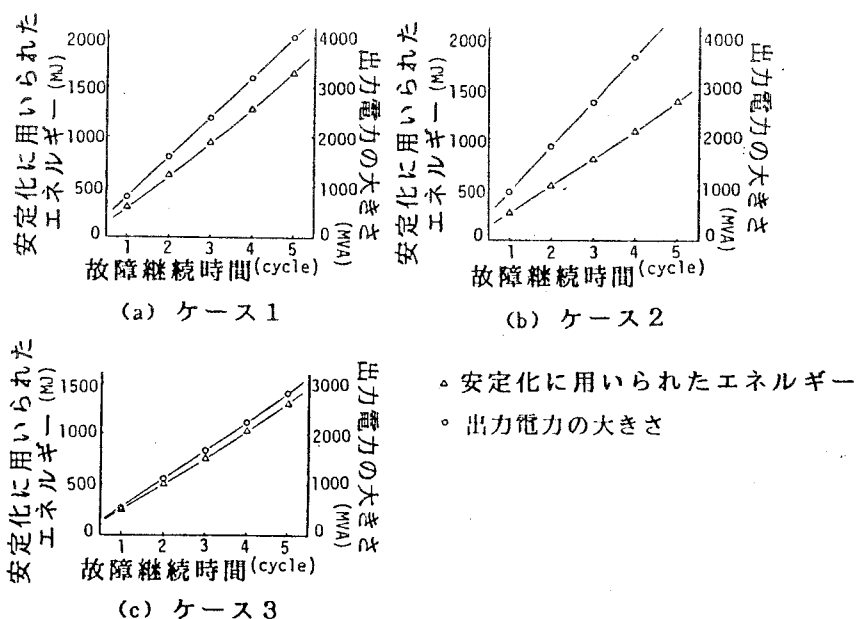


図4.9 故障継続時間の変化に対する安定化に用いられた貯蔵エネルギーと出力電力の大きさ

つぎに、故障継続時間を 3 cycle に固定して、電力変換装置の出力の容量に対する安定化の効果を評価した。ここで、出力電力の大きさに次の制限を仮定した。

$$\sqrt{P_{SM}^2 + Q_{SM}^2} \leq W \quad (W = V_s I_o, I_o : \text{一定})$$

ただし、出力電力の大きさが W を越える場合は、 W に等しくなるように P_{SM} 、 Q_{SM} を同比率で縮小するものとした。 W の初期設定値を変えて次式の評価指標により定義された安定化の効果をシミュレーションにより求めた。

$$J = \sum_{i=2}^6 \int_0^{\infty} \{ \delta_{i1}(t) - \delta_{i1}(0) \}^2 dt$$

ただし、 $\delta_{i1}(t)$ は時刻 t における G_i と G_1 の相差角である。この結果を図 4.10 に示す。

いずれの場合にも出力電力の大きさの制限が約 1000 MVA より小さくならなければ、安定化の効果はあまり低下していない。また、制御波形の例として、ケース 3 において出力電力の大きさの制限を 1000 MVA にしたときの SMES の有効電力、

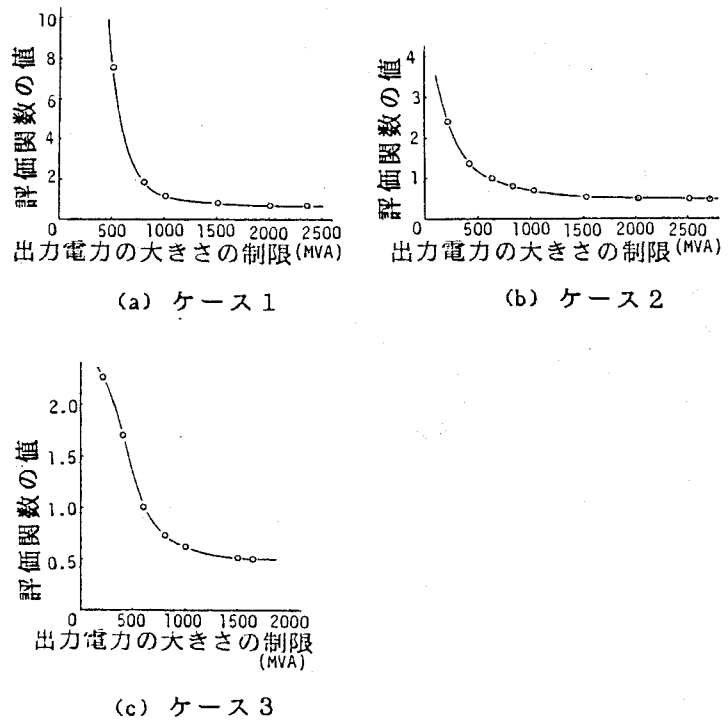


図 4.10 出力電力の大きさに制限を設けたときの制御効果

無効電力およびエネルギーレベルを図4.11に示す。有効電力および無効電力の波形を見ると、故障後3～4波までは制限にかかっている部分があるが、全体として図4.9の波形とあまり変わらないことがわかる。

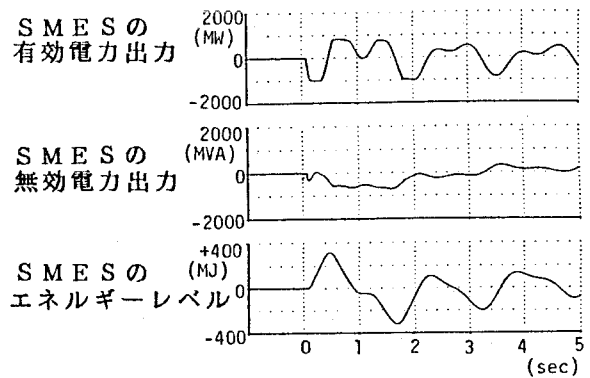


図4.11 出力電力の大きさに制限を設けたときのSMESの制御波形

最後に、安定化に効果的な有効電力および無効電力の波形を実現

するのに必要な超電導マグネットの貯蔵容量、電力変換装置の容量ならびにマグネット設計の重要な要因となる磁束密度の変化率(dB/dt)の最大値の相互の関係を求めた。このとき、次の設定を行った。

(i) 安定化に効果的な有効・無効電力の波形は、各ケースで出力電力の大きさの制限を1000MVAとしたときの制御結果(ケース3については図4.9に示す波形)を用いた。

(ii) 磁束密度はマグネット電流が最大(すなわち貯蔵量が最大)のとき5(T)であるものとした。

(iii) 電力変換装置の必要容量は制御中の最大電圧と最大電流の積で定義した。

超電導マグネットの貯蔵容量(MJ容量)をパラメータとして dB/dt の最大値および電力変換装置の必要容量をプロットした結果を図4.12に示す。ただし、これらの結果は、上記(ii)の設定により、マグネットのインダクタンス値には関係しない。

図4.12の結果より、以下のことがわかる。貯蔵エネルギー容量を小さくしようとすると、制御中にマグネット電流が大きく変化するため、非常に大きい磁束密度変化率および変換装置の容量が必要になる。逆に、磁束密度変化率およ

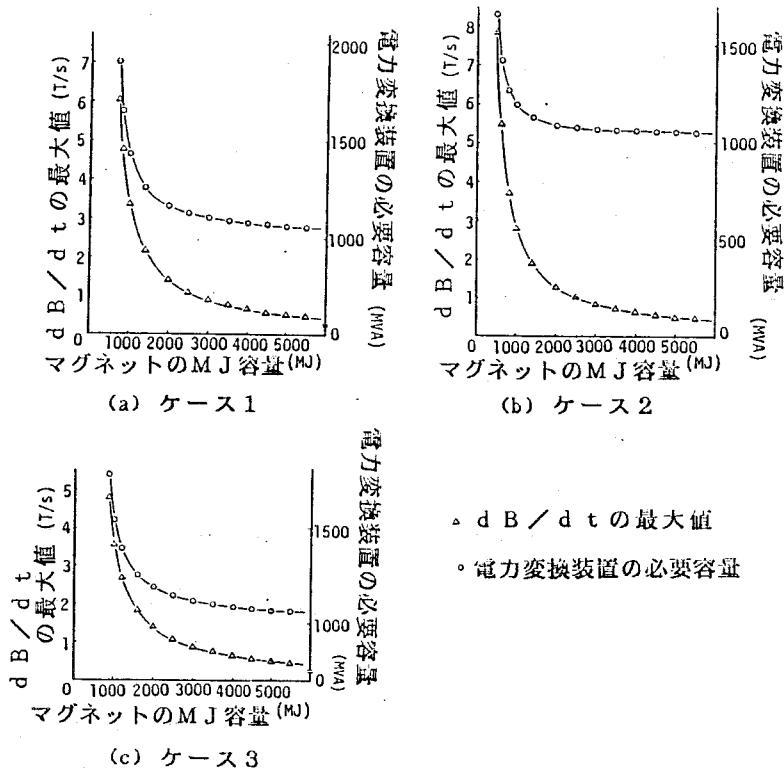


図4.12 貯蔵エネルギー容量に対する磁束密度の最大変化率と電力変換装置の容量

び変換装置の容量を小さくしようとするとき非常に大きい貯蔵エネルギーが必要になる。これらのケースでは1500MVAの電力変換装置と1000MJ、5T/sのマグネット（パルス的なマグネットの場合）と1100MVAの電力変換装置と5000MJ、0.5T/sのマグネット（DC的なマグネットの場合）の間で選択が可能と考えられる。ここで、各設備のコストが与えられれば最適な設計仕様を決定することができる。

4-5 7機連系モデル系統の安定化制御例

前節では6機と同じ発電機を連系した単純な構成をしたモデルを対象に解析を行った。本節では、より一般的な構成をした連系系統として、図4.13に示す

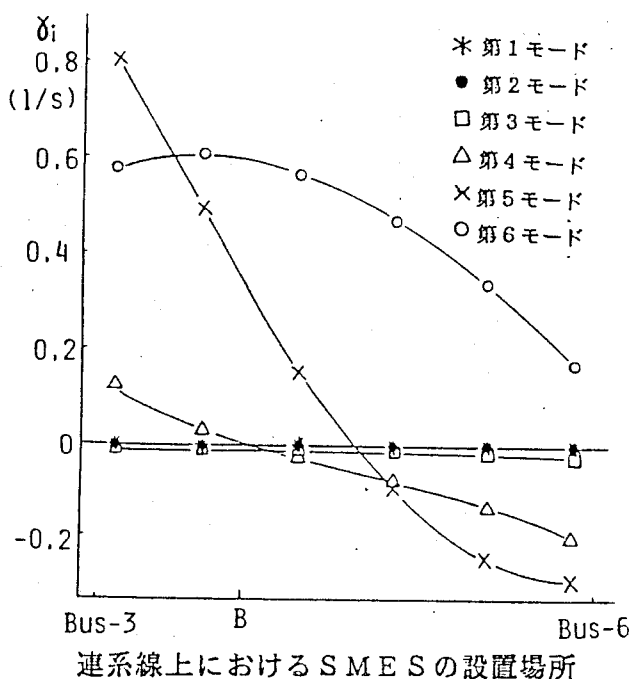


図4.14 γ_i の値 (母線 3—6 間)

表4.5 制御時の固有値
(7機モデル系統)

No.	固有値
1	$-0.288 \pm j9.80$
2	$-0.257 \pm j9.53$
3	$-0.255 \pm j8.56$
4	$-0.236 \pm j5.68$
5	$-0.262 \pm j5.32$
6	$-0.229 \pm j3.47$

($\omega_R = 1.2 \text{ rad/s}$)

果的に安定化されている。ここでの結果でも、長周期の電力動揺の安定化には、系統端部の連系線上にSMESを設置して制御すれば有効であることがわかった。

4-6 結言

本章では、SMESを用いて有効電力ならびに無効電力を制御することにより、くし形連系系統に発生する減衰の悪い長周期の電力動揺を安定化する方法について検討した。その結果、次のことが明らかになった。

(1) SMESの無効電力による定電圧制御と同時に有効電力による連系線潮流の位相進み制御を行えば顕著な安定化効果が得られる。

(2) 提案した制御の安定化の評価指標を定義し、これを用いて広域連系系統におけるSMESの効果的な設置箇所を決定する方法を示した。

(3) くし形連系モデル系統および7機連系モデル系統を用いた解析により、

本手法によって効果的に電力動揺を抑制する設置箇所を適切に選び得ることを確認できた。

(4) 広域連系系統を安定化するには系統端部の連系線上にSME Sを設置すれば有効である。また、このように設置すれば各種の初期潮流に対して安定化の効果が期待できる。

(5) 安定化に用いられたSME Sのエネルギーおよび出力電力の大きさは、それぞれ無制御時における連系線潮流の動揺分を積分したエネルギーおよび振幅に相当する。

(6) 与えられた潮流状態・故障条件に対して、安定化制御を実現するために必要な超電導マグネットの貯蔵容量、磁束密度の最大変化率および電力変換装置の容量の間のトレードオフを一連の数値計算により検討する方法を示した。

付録4-1 S M E S のフィードバック信号と状態方程式の解の関係

S M E S の有効電力 ΔP_{SM} を入力とした二階微分方程式

$$\ddot{x}_i = -\lambda_i x_i + b_i^* \Delta P_{SM} \quad \dots\dots\dots (\text{付4.1})$$

において、 x_i と位相が ϕ (rad) 異なる信号をフィードバックして

$$\Delta P_{SM} = k_i \exp(j\phi) x_i \quad \dots\dots\dots (\text{付4.2})$$

の制御を行った場合を考える。

このとき、 x_i の解の形を

$$x_i = x_{i0} \exp\{(\sigma_i + j\omega_i)t\}, \quad \omega_i > 0 \quad \dots\dots\dots (\text{付4.3})$$

として (付4.1) 式に代入して、 ω_i および σ_i を求めると次式を得る。

$$\omega_i = \frac{\sqrt{\{\lambda_i - b_i^* k_i \cos \phi + \sqrt{\lambda_i^2 + (b_i^* k_i)^2 - 2\lambda_i b_i^* k_i \cos \phi}\} / 2}}{\dots\dots\dots} \quad \dots\dots\dots (\text{付4.4})$$

$$\sigma_i = \pm \frac{\sqrt{\{-\lambda_i + b_i^* k_i \cos \phi + \sqrt{\lambda_i^2 + (b_i^* k_i)^2 - 2\lambda_i b_i^* k_i \cos \phi}\} / 2}}{\dots\dots\dots} \quad \dots\dots\dots (\text{付4.5})$$

ただし、複号は $b_i^* k_i \sin \phi$ の符号に一致する。

ここで、 $|\phi|$ が小さいとして近似計算を行うと

$$\begin{aligned} & \sqrt{\lambda_i^2 + (b_i^* k_i)^2 - 2\lambda_i b_i^* k_i \cos \phi} \\ &= \sqrt{(\lambda_i - b_i^* k_i)^2 + 2\lambda_i b_i^* k_i (1 - \cos \phi)} \end{aligned}$$

$$\simeq (\lambda_i - b_i^* k_i) \{ 1 + \lambda_i b_i^* k_i (1 - \cos \phi) / (\lambda_i - b_i^* k_i)^2 \} \dots\dots\dots (付4.6)$$

ただし、 $\lambda_i - b_i^* k_i > 0$ とする。(付4.6)式を(付4.5)式に代入すると

$$\begin{aligned} \sigma_i &\simeq \pm \sqrt{(1 - \cos \phi) (b_i^* k_i)^2} \\ &\quad / \{ 2 (\lambda_i - b_i^* k_i) \} \\ &= b_i^* k_i \sin(\phi / 2) / \sqrt{\lambda_i - b_i^* k_i} \\ &\simeq \{ b_i^* k_i / (2 \sqrt{\lambda_i - b_i^* k_i}) \} \phi \dots\dots\dots (付4.7) \end{aligned}$$

さらに、(付4.4)式で、 $\cos \phi \simeq 1$ とすると

$$\omega_i \simeq \sqrt{\lambda_i - b_i^* k_i} \dots\dots\dots (付4.8)$$

【第4章 参考文献】

- 1) Yao-nan Yu "Electric Power System Dynamics", ACADEMIC PRESS INC., New York, pp.65-94 1983.
- 2) V. Arcidiacono, E. Ferrari, F. Saccomanno "Studies on Damping of Electromechanical Oscillations in Multimachine Systems with Longitudinal Structure", IEEE Trans. on PAS-95, No.2, 1976.
- 3) F. P. de Mello, C. Concordia "Concepts of Synchronous Machine Stability as Affected by Excitation Control", IEEE Trans. on PAS -88 No.4, 1969.
- 4) F. P. de Mello, P. J. Nolan, T. F. Laskowski, J. M. Undrill "Coordinated Application of Stabilizers in Multimachine Power Systems", IEEE Trans. on PAS Vol. PAS-99 No. 3, 1980.
- 5) 土井・阿部：「多機系におけるPSSの協調設計法」電気学会論文誌B 103 巻 10号 昭58.
- 6) 難波・匂坂・水上・吉田・室谷・浅野・荻原：「静止形無効電力補償装置（SVC）による電力系統の安定度向上効果」電気学会論文誌B 104 巻 5号 昭59.
- 7) 藤原・阿部・武田・小畑：「静止形無効電力制御装置による電力系統の安定化制御」電気学会論文誌B 101 巻 2号 昭56.
- 8) F. Aboytes, G. Arroyo, G. Villa "Application of Static Var Compensators in Longitudinal Power Systems", IEEE Trans. on PAS Vol. PAS-102 No. 10, 1983.
- 9) 大沢・宮内・林：「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」電気学会論文誌B 105 巻 1号 昭60.
- 10) 三谷・辻・村上：「超電導エネルギー貯蔵装置による広域連系系統の安定

化制御」電気学会論文誌B分冊、105 巻 12号 昭60.

- 11) T. Ise, Y. Murakami, K. Tsuji "Simultaneous Active and Reactive Power Control of Superconducting Magnet Energy Storage Using GTO Converter", IEEE paper No. 85 SM 354-6, presented at the Power Engineering Society Summer Meeting, 1985.
- 12) Y. Mitani, K. Tsuji, Y. Murakami "Fundamental Study on Electrical Power System Stabilization Using Superconducting Magnet Energy Storage", submitted to 9-th International Conference on Magnet Technology in Zurich 1985.

第 5 章 直列コンデンサ補償系統における不安定振動現象の安定化

5-1 緒言

直列コンデンサ補償は、長距離化する送電線のリアクタンス分を減少して等価的に送電距離を短くできるため、送電容量増大対策の一つとして非常に効果的である。しかしながら、このような系統では自己励磁振動現象^{1),2)}や軸ねじれ共振現象 (Subsynchronous Resonance, SSR)^{3)~8)} といった不安定現象が発生しやすくなり、重要な問題になっている。本章では、第3章および第4章で考察した電力動揺の安定化と同時に、これらの不安定振動現象を安定化するための S M E S を用いた制御を提案し、その制御特性を検討している⁹⁾。

これまで、軸ねじれ共振と電力動揺を対象として安定化制御を行った例としては、Yan らの最適制御理論を使って励磁制御の設計を行ったもの¹⁰⁾や駒井らの固有値感度解析により励磁制御のフィードバックパラメータを設計したもの¹¹⁾がある。しかしながら、一般に、自己励磁振動や軸ねじれ共振の安定化と同時に電力動揺の安定化を論じたものはほとんどない。これは、自己励磁振動や軸ねじれ共振の振動周波数が10~40 Hz 程度であるのに対して、電力動揺は1 Hz 程度で、両者の周波数領域が大きく異なることが原因として挙げられる。本章では、このような応答速度の異なるモードの混在システムに対して特異摂動法¹²⁾を適用して制御系の構成法を導く。

まず、解析に用いる系統のモデルでは、電力動揺と自己励磁振動や軸ねじれ共振を統一的に表現する。このシステムに特異摂動法を適用して、電力動揺を表現する応答の遅いサブシステムと自己励磁振動や軸ねじれ共振を含む応答の速いサブシステムに分割する。制御系の設計にはこれらのサブシステムを用いる。このとき、電力動揺の安定化については、応答の遅いサブシステムにおいて、第3章や第4章での考え方と同様、制動および同期化力といった観点から設計仕様を与えることができる。自己励磁振動や軸ねじれ共振については、応

答の速いサブシステムにおいて二次形式の評価関数を与え、これを最小にする最適制御を適用することにより不安定モードを安定化する。最適制御のフィードバック信号のうち、計測が困難な変数については状態観測器を設計し、それらを推定する。

以上により構成された制御系をモデル系統に適用し、固有値計算およびシミュレーションを行い、SMESにより電力動揺の安定化と同時に自己励磁振動や軸ねじれ共振の安定化が行えることを示す。また、この制御により安定に送電可能な容量の改善効果が著しいことを示す。

5-2 直列コンデンサ補償系統の不安定振動現象の解析モデル

5-2-1 SMESを含む系統モデルの記述

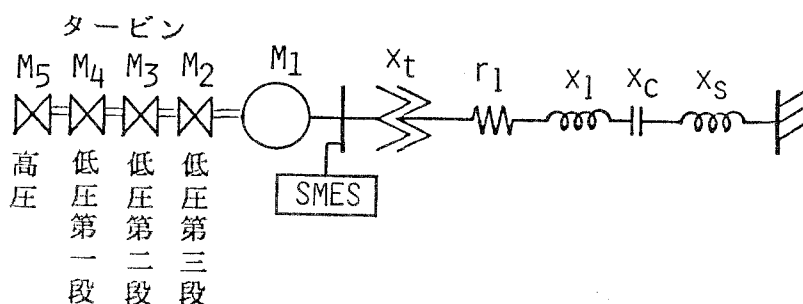


図5.1 直列コンデンサ補償された長距離大容量送電系統のモデル

図5.1 に示す一機無限大母線系統を用いて解析する。系統定数を表5.1 に示す。このモデルは、1000MW級タービン発電機5台を備えた発電所から、500KV 2回線の送電線を介して約400 Km離れた負荷地域へ送電する長距離大容量送電系統の一例である。SMESは発電機端に設置されているものとする。系統を以下のように定式化する。

発電機の電氣的な振るまいはパークモデルで表現する。

$$V_d = p \Psi_d - \omega \Psi_q - r_a i_d$$

$$V_q = p \Psi_q + \omega \Psi_d - r_a i_q$$

$$e_{fd} = p \Psi_{fd} + r_{fd} i_{fd}$$

$$0 = p \Psi_{kd} + r_{kd} i_{kd}$$

$$0 = p \Psi_{kq} + r_{kq} i_{kq}$$

$$\Psi_d = -x_d i_d + x_{ad} i_{fd}$$

$$+ x_{ad} i_{kd}$$

$$\Psi_q = -x_q i_q + x_{aq} i_{kq}$$

$$\Psi_{fd} = -x_{ad} i_d + x_{ffd} i_{fd}$$

$$+ x_{ad} i_{kd}$$

$$\Psi_{kd} = -x_{ad} i_d + x_{ad} i_{fd}$$

$$+ x_{kkd} i_{kd}$$

$$\Psi_{kq} = -x_{aq} i_q + x_{kkq} i_{kq}$$

表5.1 系統の定数

Generator (1,170 MVA self base)					
x_d	1.6	M_1	1.81 s	K_{12}	23.4
x_{ad}	1.35	M_2	1.90 s	K_{23}	15.5
x_{ffd}	1.44	M_3	1.86 s	K_{34}	13.3
x_{kkd}	1.38	M_4	1.81 s	K_{45}	11.9
x_q	1.6	M_5	0.40 s		
x_{aq}	1.35	D_{11}	0.00	D_{12}	1.20
x_{kkq}	1.373	D_{22}	0.25	D_{23}	0.60
r_a	0.00181	D_{33}	0.25	D_{34}	0.60
r_{kd}	0.0062	D_{44}	0.25	D_{45}	0.60
r_{kq}	0.0124	D_{55}	0.25		
r_{fd}	0.0006				
AVR					
K_A	400			K_F	0.06
T_A	0.02 s	T_E	1.0 s	T_F	1.0 s
Transmission line (5,850 MVA base)					
x_t	0.197	x_s	0.193		
r_l	0.0463	x_l	1.400		

タービン・発電機軸の運動方程式は、バネ・質点モデルで表す。

$$M_1 \dot{\omega}_1 + D_{11} \omega_1 + D_{12} (\omega_1 - \omega_2) + K_{12} (\theta_1 - \theta_2) = -T_e$$

$$M_2 \dot{\omega}_2 + D_{22} \omega_2 + D_{12} (\omega_2 - \omega_1) + D_{23} (\omega_2 - \omega_3)$$

$$+ K_{12} (\theta_2 - \theta_1) + K_{23} (\theta_2 - \theta_3) = T_{m2}$$

↓

$$M_5 \dot{\omega}_5 + D_{55} \omega_5 + D_{45} (\omega_5 - \omega_4) + K_{45} (\theta_5 - \theta_4) = T_{m5}$$

$$T_e = \Psi_d i_q - \Psi_q i_d$$

発電機励磁系の制御器として図5.2に示すAVRを考慮する。調速機の効果は無視して機械的入力トルク

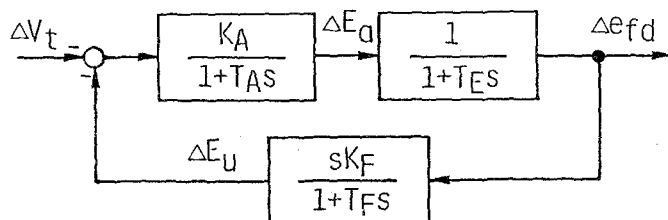


図5.2 AVRのモデル

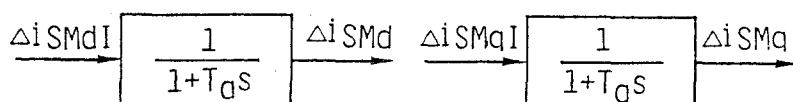


図5.3 SMESの制御特性

を一定とする。

SMESは付録5-1に示すように、有効・無効電力の同時制御¹³⁾を少し変更して、出力電流のd・q軸成分 i_{smd} および i_{smq} を同時に制御可能であるものとし、この特性を図5.3のブロック図で表現する。なお、以下の解析では、一次遅れの時定数 T_a を0.02sに設定している。

送電系はLC共振を考慮した微分方程式で表現する。

$$\begin{aligned}
 v_d &= (r_\lambda + x_\lambda p) (i_d + i_{smd}) - \omega x_\lambda (i_q + i_{smq}) \\
 &\quad + v_{cd} + v_\infty \sin \theta_1 \\
 v_q &= \omega x_\lambda (i_d + i_{smd}) + (r_\lambda + x_\lambda p) (i_q + i_{smq}) \\
 &\quad + v_{cq} + v_\infty \cos \theta_1 \\
 p v_{cd} - \omega v_{cq} &= x_c (i_d + i_{smd}) \\
 \omega v_{cd} + p v_{cq} &= x_c (i_q + i_{smq})
 \end{aligned}$$

ただし、 v 、 e ：電圧、 Ψ ：磁束、 i ：電流、 θ ：位相角、 ω ：角速度、 T_e ：電氣的トルク、 T_m ：機械的トルク、 x ：リアクタンス、 r ：抵抗、 M ：慣性定数、 D ：制動係数、 K ：バネ定数、 p ：微分演算子（ $p = d/d(\omega r t)$ ）、 $\omega r = 120 \pi$ ）、 $\cdot$ ：時間微分、 Δ ：動作点からの変化分を表す。添字は、 d ・ q ：d・q軸成分、 c ：コンデンサ、 λ ：送電線、 sm ：SMES、 a ：電機子巻線、 f ：界磁巻線、 k ：制動巻線、 1 ：発電機、 $2 \sim 5$ ：タービン（発電機に近い順に番号を付す）、 ∞ ：無限大母線を表す。

5-2-2 線形化状態方程式による表現

モデルを動作点の近傍で線形化して、状態方程式

$$p \mathbf{x} = \mathbf{A} \mathbf{x} + \mathbf{B} \mathbf{u} \quad \dots\dots\dots (5.1)$$

を構成する。状態変数としては、一般に、電流を選ぶ方法と鎖交磁束を選ぶ方法がある¹⁴⁾。ここでは、基本的には、検出が容易な電流を用い、後に述べるシステムの低次元化のために、界磁磁束についてのみ鎖交磁束を用い

$$\begin{aligned} \mathbf{x} = & [\Delta \omega_1 \Delta \theta_1 \dots \Delta \omega_s \Delta \theta_s \Delta i_{smd} \Delta i_{smq} \Delta i_d \Delta i_{kd} \\ & \Delta i_q \Delta i_{kq} \Delta v_{cd} \Delta v_{cq} \Delta \psi_{fd} \Delta e_{fd} \Delta E_a \Delta E_u]^t \\ \mathbf{u} = & [\Delta i_{smd} \Delta i_{smq}]^t \end{aligned}$$

とした。ただし、^t は転置を表す。以後、これを原システムと呼ぶことにする。

5-3 固有値計算による系統の不安定振動現象の解析

(5.1) 式の係数行列 $\mathbf{A}$ の固有値を計算し、モデル系統の不安定現象について考察する。

本モデルにおける主な固有モードとその振動周波数を表5.2 に示す。これらは、直列コンデンサ補償された長距離大容量送電系統において不安定要因となりやすい代表的な振動モードである¹⁵⁾。図5.4 は発電機の出力 P_e (p_u) と直列コンデンサの補償度 x_c / x_d (%) を変えたときの安定領域を

表5.2 系統の主な固有モードとその振動周波数

固有モード	振動周波数 (Hz)
LC共振高周波分	60~110
" 低周波分	10~60
軸ねじれ第1	7
" 第2	13
" 第3	18
" 第4	19
電力動揺	0.3~1.5

求めた結果である。ただし、潮流計算の指定値としてつねに $v_t = v_\infty = 1.0$ (p u) を与えた。

直列コンデンサ補償度に応じて、第3および第2の軸ねじれモードが不安定になる。さらに、108 % 以上の高補償度といった実際的ではない領域であるが、自己励磁振動 (LC 共振低周波分の不安定現象) が発生している。また、発電機出力を増加すると電力動揺が不安定になる。このとき、直列コンデンサの補償度

を上げると、送電線のリアクタンス分が等価的に減じられ、電力動揺の安定領域は少し広がる。このモデルの場合、軸ねじれ共振を避けるには60 % 程度の直列コンデンサ補償度が最大であり、このとき送電電力の限界は0.6 p u 程度である。

以上のように、直列コンデンサ補償された長距離大容量送電系統は、周波数が低い電力動揺と周波数が高い自己励磁振動や軸ねじれ共振が混在しているシステムになっていることがわかる。しかも、両者の不安定性により送電可能な容量が制限される。本章では、このような混在システムの解析法である特異摂動法を利用して、システムを応答の遅い電力動揺を表すサブシステムと応

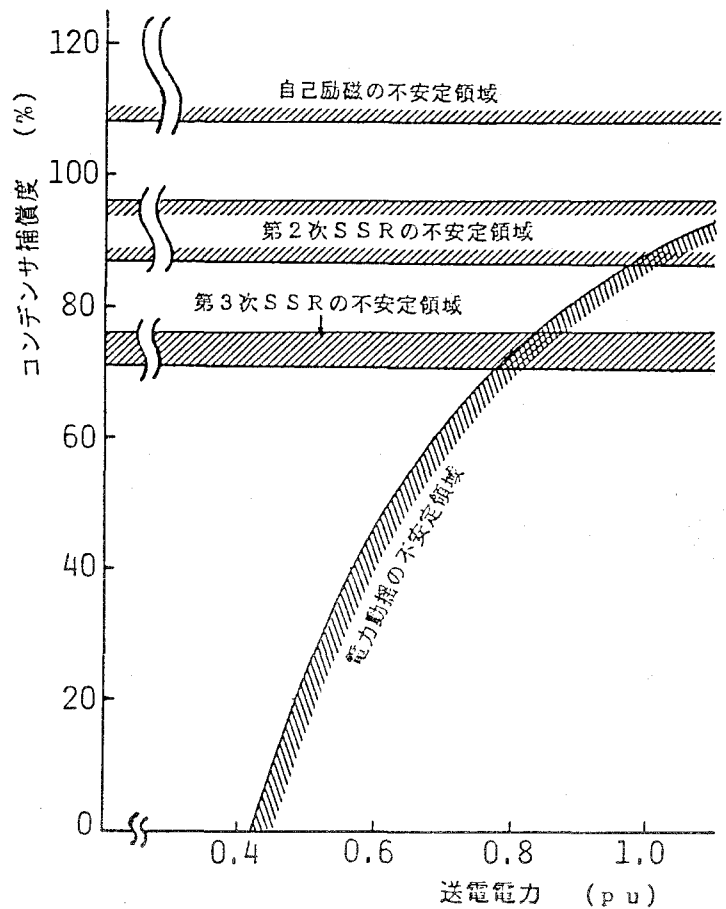


図5.4 系統の安定領域 (制御無)

答の速い自己励磁振動や軸ねじれ共振を含むサブシステムに分割する。この結果得たそれぞれのサブシステムを用いて、各不安定現象を一括して効果的に安定化するためのSME Sを用いた制御系を構成する。

5-4 特異摂動法による応答速度の異なるサブシステムへの分割

原システムの固有値は、表5.2に示した振動モードの他に、制動巻線回路の応答モード、界磁巻線回路の応答モード、SME S電流の応答モード、AVRに関するモードがある。これらを電力動揺モードと比較すると、一般に、界磁巻線回路の応答は遅く、制動巻線回路の応答は速い¹⁶⁾。SME Sの電流制御の応答は十分に速いものを想定する。以下では、これらを、最も応答の遅い界磁巻線回路の応答モード、次に応答の遅い電力動揺モード、応答の速い他のモードの3グループに別けて考える。このうち、界磁巻線回路の応答モードは縮約の対象となり、残る2つのグループは特異摂動法を用いて分割して考察する。なお、AVRに関するモードは界磁巻線回路を縮約するとき共に無視される。

まず、原システムにおいて、制御系の構成を簡略化するために次数を低減する。いま、最も応答の遅い変数である界磁磁束を

$$\Delta \Psi_{fd} \simeq 0 \quad \dots\dots\dots (5.2)$$

で近似する。なお、AVRの効果は直接的には、 e_{fd} を通じて Ψ_{fd} にしか反映されないので、このときAVRの効果も無視される。この結果、システムは

$$p \mathbf{x}_r = \mathbf{A}_r \mathbf{x}_r + \mathbf{B}_r \mathbf{u} \quad \dots\dots\dots (5.3)$$

$$\mathbf{x}_r = [\Delta \omega_1 \Delta \theta_1 \dots \Delta \omega_5 \Delta \theta_5 \Delta i_{smd} \Delta i_{smq} \Delta i_d \Delta i_{kd} \\ \Delta i_q \Delta i_{kq} \Delta v_{cd} \Delta v_{cq}]^t$$

により表現される。以後、これを縮約システムと呼ぶことにする。

縮約システムにおいて、 $\Delta \theta_i$, $\Delta \omega_i$ ($i=1, \dots, 5$) は主として電力動揺モードと軸ねじれモードを含む変数である。いま、変数変換

$$\Delta \alpha_i = \Delta \theta_{i+1} - \Delta \theta_i, \Delta \beta_i = \Delta \omega_{i+1} - \Delta \omega_i \quad (i=1, \dots, 4) \\ \dots\dots\dots (5.4)$$

を考えると、 $\Delta \alpha_i$, $\Delta \beta_i$ は軸間のねじれの位相および角速度を表し、変換の結果、応答の遅い電力動揺モードは主に $\Delta \theta_1$, $\Delta \omega_1$ にのみ含まれる。

このとき、(5.4) 式による変換後のシステムは次式で表される。

$$p \, x \, t = A \, t \, x \, t + B \, t \, u \quad \dots\dots\dots (5.5)$$

$$A \, t = T^{-1} A \, r \, T, \quad B \, t = T^{-1} B \, r$$

$$x \, t = [\Delta \omega_1 \, \Delta \theta_1 \, \Delta \beta_1 \, \Delta \alpha_1 \, \dots \, \Delta \beta_4 \, \Delta \alpha_4 \, \Delta i \, s \, m \, d \, \Delta i \, s \, m \, q \\ \Delta i \, d \, \Delta i \, k \, d \, \Delta i \, q \, \Delta i \, k \, q \, \Delta v \, c \, d \, \Delta v \, c \, q]^t$$

ただし、行列Tは(5.4) 式の変換を表す。以後、このシステムを変換システムと呼ぶことにする。

変換システムにおいて、 $\Delta \omega_1$, $\Delta \theta_1$ は他と比較して応答が遅い変数であるので

$$\left. \begin{aligned} p \, x \, t_1 &= A \, t_{11} \, x \, t_1 + A \, t_{12} \, x \, t_2 + B \, t_1 \, u \\ \mu \, p \, x \, t_2 &= A \, t_{21} \, x \, t_1 + A \, t_{22} \, x \, t_2 + B \, t_2 \, u \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5.6)$$

と表現できる。ただし

$$x_{t1} = [\Delta \omega_1 \ \Delta \theta_1]^t$$

$$x_{t2} = [\Delta \beta_1 \ \Delta \alpha_1 \ \cdots \ \Delta \beta_4 \ \Delta \alpha_4 \ \Delta i_{smd} \ \Delta i_{smq} \ \Delta i_d \ \Delta i_{kd} \\ \Delta i_q \ \Delta i_{kq} \ \Delta v_{cd} \ \Delta v_{cq}]^t$$

μ : 正の小さい実数

(5.6) 式に特異摂動法を適用すると、以下のように、応答の遅い slow subsystem と応答の速い fast subsystem に分割することができる。詳細は付録 5-2 を参照されたい。

slow subsystem

$$p x_{t1} = A_s x_{t1} + B_s u_s \quad \cdots \cdots \cdots (5.7)$$

$$A_s = A_{t11} - A_{t12} A_{t22}^{-1} A_{t21}$$

$$B_s = B_{t1} - A_{t12} A_{t22}^{-1} B_{t2}$$

fast subsystem

$$\mu p x_f = A_{t22} x_f + B_{t2} u_f \quad \cdots \cdots \cdots (5.8)$$

$$x_f = x_{t2} - x_{t2s}$$

$$\left. \begin{aligned} x_{t2s} &= -A_{t22}^{-1} A_{t21} x_{t1} - A_{t22}^{-1} B_{t2} u_s \\ u &= u_s + u_f \end{aligned} \right\} \cdots \cdots (5.9)$$

ここで、各サブシステムの固有モードが原システムの固有モードをどれくらい保存しているかを調べてみよう。表 5.3 は発電機出力が 1.0 p u, コンデンサ補償度が 72% の場合の各システムの主な固有値を示している。この運転状態では電力動揺モードならびに軸ねじれ第 3 モードが同時に不安定である。各固有値の実数部を見ると、サブシステムを安定性の判別に用いるのは適当ではないが、虚数部は原システムの値とよく一致しており、各振動モードがよく保存

表5.3 各システムにおける主な固有値

システム 固有モード	原システム	縮約システム	fast subsystem	slow subsystem
LC共振高周波分	-0.0124 ± j1.70	-0.0124 ± j1.70	-0.0124 ± j1.70	—
” 低周波分	-0.0132 ± j0.297	-0.0131 ± j0.297	-0.0074 ± j0.301	—
軸ねじれ第1	-0.0004 ± j0.111	-0.0004 ± j0.111	-0.0006 ± j0.110	—
” 第2	-0.0011 ± j0.212	-0.0012 ± j0.212	-0.0012 ± j0.211	—
” 第3	+0.0033 ± j0.295	+0.0033 ± j0.295	-0.0023 ± j0.293	—
” 第4	-0.0032 ± j0.320	-0.0032 ± j0.320	-0.0031 ± j0.320	—
電力動揺	+0.0008 ± j.0126	-0.0003 ± j.0126	—	+0.0003 ± j.0127

されているといえる。

次節では、これらのfast subsystemとslow subsystemを用いて、電力動揺を安定化するための制御系および自己励磁振動あるいは軸ねじれ共振を安定化するための制御系を設計する。

5-5 S M E Sを用いた安定化制御系の設計

5-5-1 サブシステムに基づくフィードバック制御系の設計

slow subsystem における制御系の設計

このシステムは電力動揺モードを表現する振動系で

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} p \Delta \omega_1 \\ p \Delta \theta_1 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} a_{s11} & a_{s12} \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \omega_1 \\ \Delta \theta_1 \end{bmatrix} \\
 &+ \begin{bmatrix} b_{s11} & b_{s12} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta i_{sm d Is} \\ \Delta i_{sm q Is} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (5.10)
 \end{aligned}$$

の形をしている。制御としては、次の状態変数フィードバックを考える。

$$\begin{bmatrix} \Delta i_{sm d Is} \\ \Delta i_{sm q Is} \end{bmatrix} = -K_s \begin{bmatrix} \Delta \omega_1 \\ \Delta \theta_1 \end{bmatrix} = -\begin{bmatrix} k_{s11} & k_{s12} \\ k_{s21} & k_{s22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \omega_1 \\ \Delta \theta_1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (5.11)$$

この制御の設計仕様としては、第3章および第4章において行った電力動揺の

安定化と同じ考え方で、次の2点を与えることにする。

$$(i) \text{制動の改善} \quad : \quad \Delta \sigma = \sigma_c - \sigma_o < 0$$

$$(ii) \text{同期化力の強化} \quad : \quad k_{sy} = \omega_c / \omega_o > 1$$

ただし、 $\sigma_o \pm j\omega_o$ 、 $\sigma_c \pm j\omega_c$ はそれぞれ制御前および制御後の固有値である。

さらに、SME S の出力電流の大きさを制限するために、(5.11)式において

$$I = g k_{s11}^2 + k_{s12}^2 + g k_{s21}^2 + k_{s22}^2 \rightarrow \min.$$

なる制約条件を設けることにする。ただし、 g は適当な正の重みである。

以上により K_s は一意に決まり、

$$K_s = 1 / (b_{s11}^2 + b_{s12}^2) \times \begin{bmatrix} -2\Delta\sigma b_{s11} & h b_{s11} \\ -2\Delta\sigma b_{s12} & h b_{s12} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (5.12)$$

$$h = a_{s12} + \{(a_{s11} + 2\Delta\sigma)^2 - k_{sy}^2 (a_{s11}^2 + 4a_{s12})\} / 4$$

なお、上式に見られるように、 K_s の値は重み g には依存しない。

fast subsystemにおける制御系の設計

このシステムにおいては、2次形式の評価関数を最小にする最適制御を適用して制御系を設計する。このとき、観測が困難な変数については、後で状態観測器を設計して、それらを観測する。いま、評価関数を

$$J_f = \int_0^\infty (x_f^t W x_f + u_f^t W u_f) dt \dots\dots\dots (5.13)$$

とする。ただし、 W_x は半正定、 W_u は正定である。このとき、 J_f を最小に

する最適制御は

$$u_f = \begin{bmatrix} \Delta i_{sm d} I_f \\ \Delta i_{sm q} I_f \end{bmatrix} = -K_f x_f = -W u^{-1} B^t H x_f \quad \dots\dots (5.14)$$

で与えられる。ここで、 H は次のリッカチ方程式の解である¹⁷⁾。

$$H A t_{22} + A t_{22}^* H - H B t_2 W u^{-1} B^t t_2^* H + W x = 0$$

5-5-2 状態観測器の設計

fast subsystemの制御系は、すべての状態変数を検出できるものとして設計した。しかし、状態変数のうち、制動巻線の電流は検出が困難であり、さらに、直列コンデンサの電圧はS M E Sから見て遠方の情報であるため利用し難い。そこで、状態観測器を設計してこれらを推定する。

いま、(5.5)式で表される変換システムで、A V Rの効果および界磁回路の応答を考慮するために、 $\Delta \Psi_{fd}$ を入力変数として新たに加えた状態方程式

$$p x_t = A t x_t + \widehat{B} t \widehat{U} \quad \dots\dots\dots (5.15)$$

$$\widehat{B} t = [B t \ b_p] , \quad \widehat{U} = [\Delta i_{sm d} I \ \Delta i_{sm q} I \ \Delta \Psi_{fd}]^t$$

を用いて観測器を設計する。ここで、 b_p は原システムの係数行列Aにおいて $\Delta \Psi_{fd}$ に対応する列ベクトルである。ただし、(5.4)式の変換を考慮してベクトルの成分の順番を入れ替えるものとする。

ここで、計測可能な変数の観測方程式を

$$y = C x_t , \quad C \in R^{14 \times 18} \quad \dots\dots\dots (5.16)$$

として、次式を満たす $W_1 \in R^{4 \times 18}$ が選ばれたとする。

$$Q = \begin{bmatrix} W_1 \\ C \end{bmatrix}, \quad \text{rank } Q = 18$$

このとき、最小次数オブザーバは

$$\left. \begin{aligned} p \dot{z} &= F z + G y + W \hat{x} t \hat{u} \\ \hat{x} t &= H z + J y \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5.17)$$

により与えられる¹⁸⁾。ただし

$$\begin{aligned} Q^{-1} &= [H \quad J_1], \quad Q A t Q^{-1} = \begin{bmatrix} F_1 & G_1 \\ A_{q21} & A_{q22} \end{bmatrix} \\ F &= F_1 + K A_{q21}, \quad W = W_1 + K C \\ G &= G_1 + K A_{q22} - F_1 K - K A_{q21} K \\ J &= J_1 - H K \end{aligned}$$

$\hat{x} t$ は変数が推定値であることを示し

$$\hat{x} t = [\Delta \omega_1 \Delta \theta_1 \Delta \beta_1 \Delta \alpha_1 \dots \Delta \beta_4 \Delta \alpha_4 \Delta i_{smd} \Delta i_{smq} \\ \Delta i_d \Delta \hat{i}_{kd} \Delta i_q \Delta \hat{i}_{kq} \Delta \hat{v}_{cd} \Delta \hat{v}_{cq}]^t$$

また、行列 K は行列 F_1 の固有値の安定性が悪いとき、行列 F の固有値が十分に安定になるように選ばれるものとする (F_1 の固有値が十分に安定なときは $K = 0$)。

この状態観測器を用いた制御系の構成を図5.5 に示す。

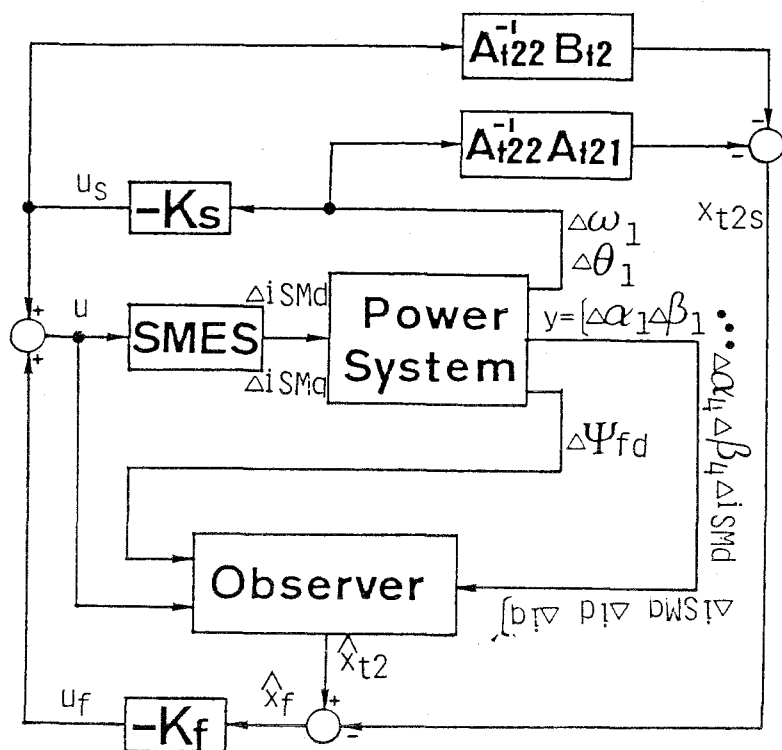


図5.5 状態観測器を含む制御系の構成

5-6 モデル系統への適用

5-6-1 安定化制御系の設計

電力動揺モードと軸ねじれ第3モードが同時に不安定となる潮流状態である、送電電力が1.0 p u，直列コンデンサ補償度が72%のときについて前節に示した手順で制御系を設計する。

まず、slow subsystemの設計仕様として

(i) 制動の改善 : $\Delta \sigma = -2.65 \times 10^{-3}$ ($= -1.00$ 1/s)

(ii) 同期化力の強化 : $k_{sy} = 1.10$

を与えることにする。

つぎに、fast subsystemに対する最適制御の評価関数として、軸ねじれに対応する変数 $\Delta \alpha_{1f}, \dots, \Delta \alpha_{4f}$ に重みを付けて、次式を与えることにする。

$$J_f = \int_0^{\infty} (10\Delta \alpha_{1f}^2 + 10\Delta \alpha_{2f}^2 + 10\Delta \alpha_{3f}^2 + 10\Delta \alpha_{4f}^2 + \Delta i_{sm} dI_f^2 + \Delta i_{sm} qI_f^2) dt$$

状態観測器の設計手順は次の通りである。まず、想定した運転状態において求めた行列 F_1 の固有値は $-0.0376 \pm j0.137$, $\pm j1.00$ であり1組の永久振動モードがあった。このままでは初期誤差が永久振動として残るので、行列 F の固有値において $\pm j1.00$ が $-0.00531 \pm j1.00$ （減衰時定数0.5 秒）になるように極配置の手法¹⁹⁾を用いて K を定め、状態観測器を構成した。

以上により構成した状態観測器を含む制御を適用したときの主な固有値を表5.4に示す。表5.3との比較により、電力動揺モードと軸ねじれ第3モードが期待通り効果的に安定化されていることがわかる。

さらに、自己励磁振動に対する効果を調べるために、実際的ではない高いコンデンサ補償度であるが、数値計算例として、送電電力を1.0 p u, コンデンサ補償度を110 %に設定して、前例と全く同じ手順で制御系を設計した。このときの固有値計算結果を表5.5に示す。

表5.4 制御時の主な固有値

固有モード	固有値
LC共振高周波分	-0.0124 ± j1.70
" 低周波分	-0.0108 ± j0.301
軸ねじれ第1	-0.0076 ± j0.113
" 第2	-0.0037 ± j0.213
" 第3	-0.0061 ± j0.294
" 第4	-0.0034 ± j0.321
電力動揺	-0.0020 ± j.0136
状態観測器	-0.0376 ± j0.137
状態観測器	-0.0053 ± j1.00

表5.5 自己励磁振動の安定化制御例

固有モード	固有値	
	制御無	制御有
LC共振高周波分	-0.0125 ± j1.86	-0.0125 ± j1.86
" 低周波分	+0.0069 ± j0.124	-0.0114 ± j0.137
軸ねじれ第1	-0.0084 ± j0.125	-0.0079 ± j0.116
" 第2	-0.0013 ± j0.211	-0.0067 ± j0.214
" 第3	-0.0022 ± j0.293	-0.0049 ± j0.295
" 第4	-0.0032 ± j0.320	-0.0032 ± j0.321
電力動揺	-0.0011 ± j.0227	-0.0033 ± j.0250

自己励磁振動に対しても安定化の効果が高いことがわかる。

5-6-2 シミュレーションによる安定化効果の検討

S M E Sを用いた制御系の安定化効果をシミュレーションにより検討した。この結果を図5.6 および図5.7 に示す。想定した外乱は、遠方での三相短絡を仮定して、時刻0秒から4サイクル間(0.0667秒間)無限大母線電圧を1.0 p uから0.8 p uに低下させた。系統の運転状態は、電力動揺モードと軸ねじれ第3モードが同時に不安定になる、送電電力が1.0 p u、直列コンデンサ補償度が72%に設定した。

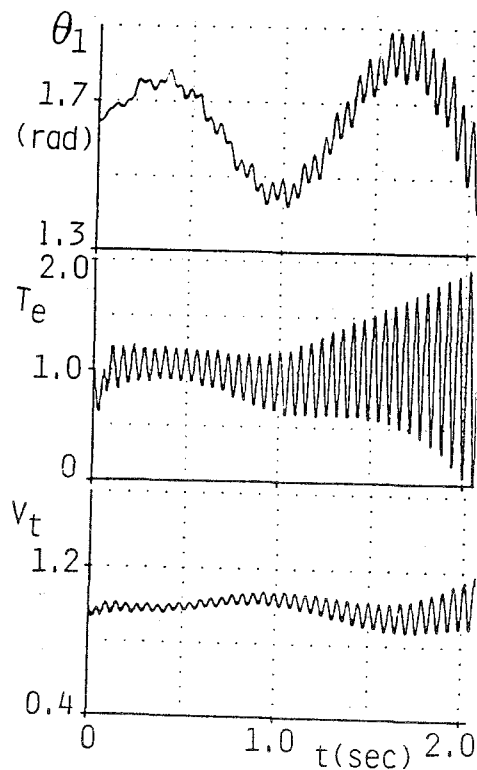


図5.6 シミュレーション波形(制御無)

制御が無いときの発電機位相角を見ると、0.8 H z程度のゆっくりとした電力動揺の上に、約18H zの軸ねじれ振動が重畳し、両者共不安定であることがわかる。これに対して、S M E Sを用いた安定化制御を行うことにより、両者共速やかに安定化されている。

つぎに、制御中の状態観測器の推定波形を図5.8 に示す。事故中に生じた誤差が速やかに減衰し、良好な推定値が得られている。なお、 $\hat{v}_{cd}$ 、 $\hat{v}_{cq}$ は初期誤差が小さく、ほとんど完全に v_{cd} 、 v_{cq} の波形に一致した。

最後に、制御に必要なS M E Sの容量について考察する。図5.9 は制御時のS M E Sの出力電流($i_{sm d}$ 、 $i_{sm q}$)とS M E S設置点の電圧(v_d 、 v_q)の値から、有効電力と無効電力を計算した結果である。同図よりわかるように、有効・無効電力波形は電力動揺安定化のためのゆっくりとした成分と軸ねじれ

振動安定化のための速い成分が重畳している。このとき、制御に用いられたエネルギーおよび出力電力の大きさはそれぞれ数十MJおよび500MVA程度であった。とくに、速い成分により出力電力のピーク値が大きくなるので、電力動揺の安定化のみ行う場合と比較して、電力変換装置の容量は少し大きいものが必要である。

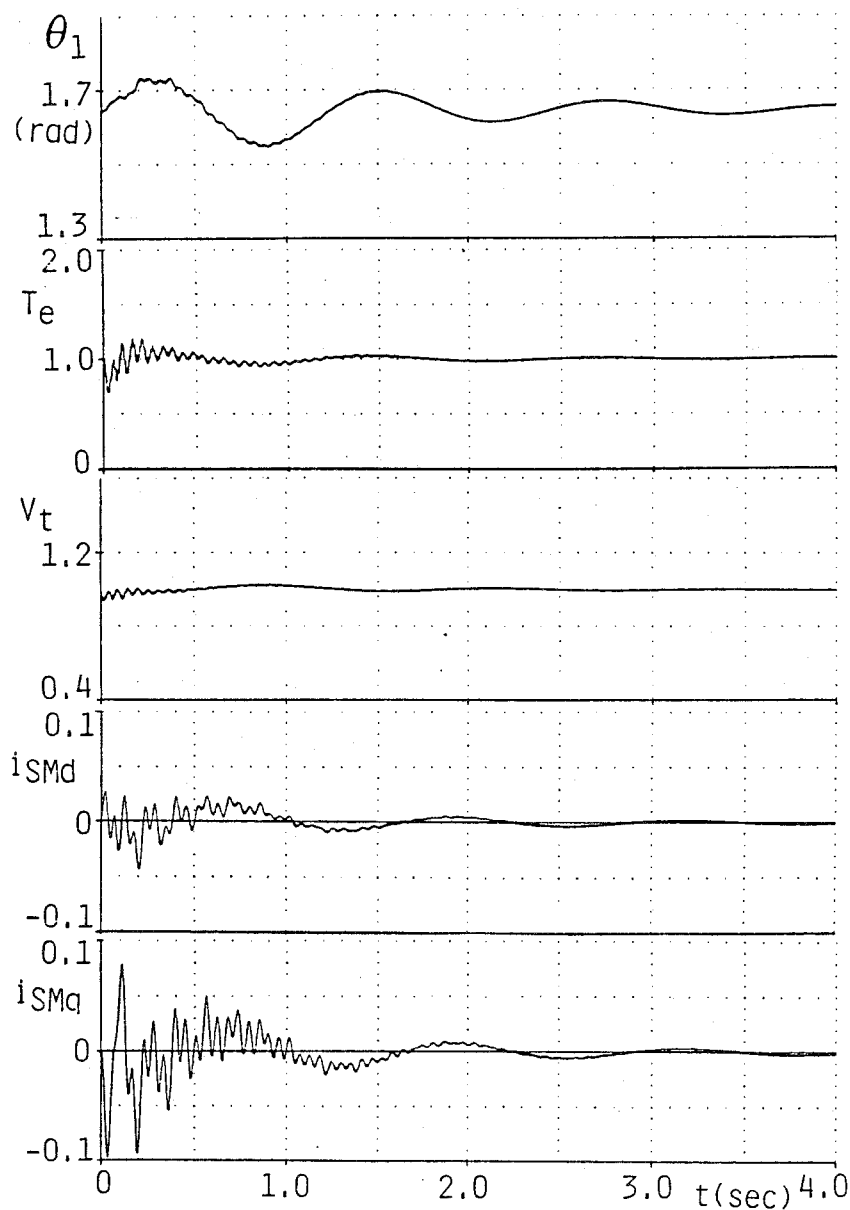


図5.7 シミュレーション波形（制御有）

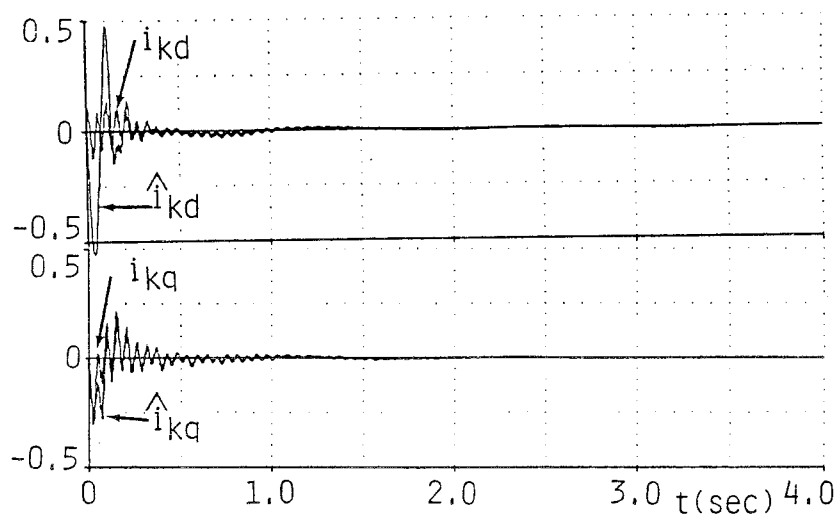


図5.8 状態観測器による推定値の波形

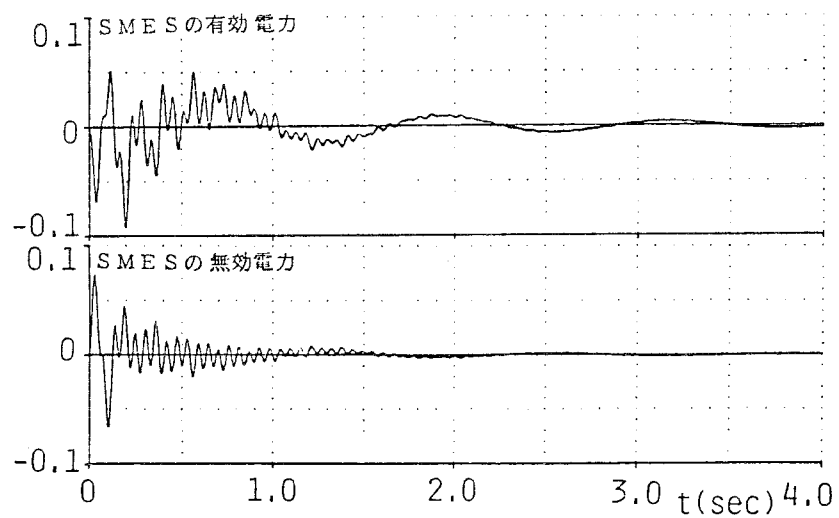


図5.9 SMESの有効・無効電力の波形

5-6-3 送電可能容量の改善

本制御を施したときの安定領域を求めた結果を図5.10に示す。同図で電力動揺の安定限界は、送電電力が1.0 p u、コンデンサ補償度が72%のときに設計したslow subsystemの制御利得 K_s を用いて制御を行ったときの結果である。また、fast subsystemの制御利得および状態観測器は、それぞれの軸ねじれ共振の不安定領域内の一運転点で設計を行い、その結果、軸ねじれ共振は完全に安定化することができた。同図からわかるように、S M E Sを用いた制御を行うことにより安定領域は大幅に広くなり、80%程度のコンデンサ補償を行えば、制御無のときの約2倍の送電が可能になる。

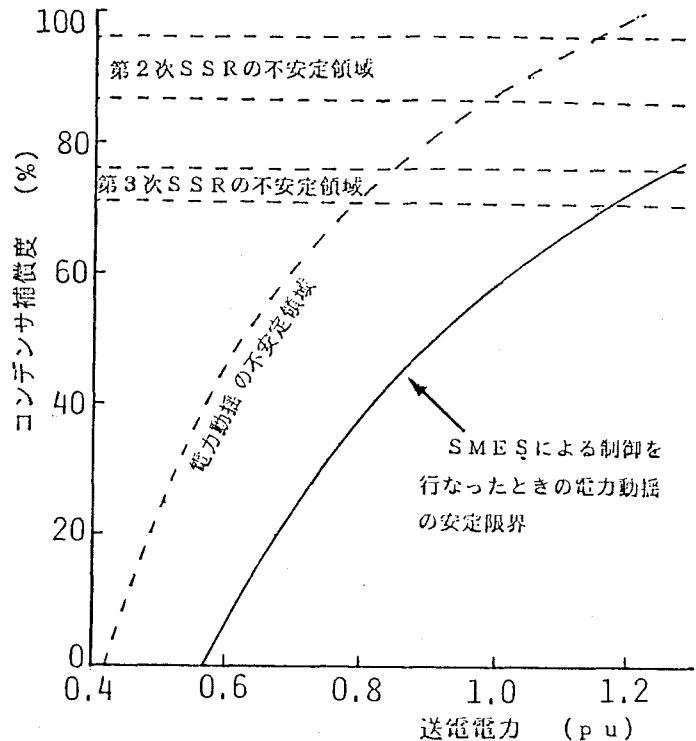


図5.10 制御時の安定限界

れ共振は完全に安定化することができた。同図からわかるように、S M E Sを用いた制御を行うことにより安定領域は大幅に広くなり、80%程度のコンデンサ補償を行えば、制御無のときの約2倍の送電が可能になる。

5-7 結言

直列コンデンサ補償された長距離大容量送電系統にS M E Sを設置して、電力動揺の安定化と同時に自己励磁振動現象や軸ねじれ共振現象を安定化するための制御系を提案した。本章で得た結果を以下にまとめる。

(1) S M E Sの制御方式として、有効・無効電力の同時制御を少し変更すればd・q軸電流を同時に制御できることを利用して制御系を設計した。

(2) S M E Sを含む系統モデルに特異摂動法を適用して、電力動揺を表現す

る応答の遅いサブシステムと自己励磁振動や軸ねじれ共振を含む応答の速いサブシステムに分割した。

(3) 応答の遅いサブシステムにおいて、電力動揺の制動および同期化力の観点から設計仕様を与え、電力動揺を安定化する制御系を構成した。

(4) 応答の速いサブシステムにおいて、二次形式の評価関数を与え、これを最小にする最適制御を適用することにより、自己励磁振動および軸ねじれ共振を安定化する制御系を構成した。

(5) 計測が困難な状態変数は状態観測器を設計し、それらを推定した。

(6) 本制御をモデル系統に適用し、固有値計算およびシミュレーションを行った結果、電力動揺と自己励磁振動や軸ねじれ共振を同時に効果的に安定化することができた。

(7) S M E S の有効電力と無効電力の波形を求めた結果、電力動揺安定化のためのゆっくりとした成分と自己励磁振動や軸ねじれ共振の安定化のための速い成分が重畳したものであった。速い成分により出力電力のピーク値が大きくなるので、電力動揺の安定化のみ行う場合と比較して、電力変換装置の容量は少し大きいものが必要である。

(8) 直列コンデンサ補償と S M E S を用いた制御の組み合わせにより、安定に送電可能な容量の増大効果が極めて大きいことが明らかになった。

付録5-1 S M E S による d・q 軸電流の同時制御

S M E S の電力変換装置の構成は付図3.1 と同じで、G T O グレーツブリッジを2台直列に接続した装置を想定する。マグネット電流を適当なベース値の下に p u 表現し、変換装置の出力としての有効・無効電力と電力系統側から見た有効・無効電力を等置すると

$$(V_t / 2 I_d) (\cos \phi_1 + \cos \phi_2) = - (V_t \sin \delta i_{SMd} + V_t \cos \delta i_{SMq}) \quad \cdots \cdots \cdots \text{(付5.1)}$$

$$(V_t / 2 I_d) (\sin \phi_1 + \sin \phi_2) = - (V_t \cos \delta i_{SMd} - V_t \sin \delta i_{SMq}) \quad \cdots \cdots \cdots \text{(付5.2)}$$

ただし、 V_t : S M E S 設置母線（発電機端）の電圧、 I_d : マグネット電流、 ϕ_1, ϕ_2 : 電力変換装置の点弧角 ($0^\circ \leq \phi_1, \phi_2 \leq 360^\circ$)、 δ : S M E S 設置母線電圧と発電機ロータ角の相差角である。

(付5.1)式と(付5.2)式より

$$\begin{bmatrix} i_{SMd} \\ i_{SMq} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \sin \delta & \cos \delta \\ \cos \delta & -\sin \delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (I_d / 2) (\cos \phi_1 + \cos \phi_2) \\ (I_d / 2) (\sin \phi_1 + \sin \phi_2) \end{bmatrix} \quad \cdots \cdots \cdots \text{(付5.3)}$$

となり、 ϕ_1 と ϕ_2 を適切に制御すれば i_{SMd} と i_{SMq} を同時に制御可能である。また、制御可能な範囲は

$$i_{SMd}^2 + i_{SMq}^2 = I_d^2 \cos^2 \{(\phi_1 - \phi_2) / 2\} \leq I_d^2 \quad \cdots \cdots \cdots \text{(付5.4)}$$

より、マグネット電流により決まる円内であることがわかる。

付録5-2 特異摂動法によるシステムの分割¹²⁾

次式に示すシステム（特異摂動システム）が与えられたとする。

$$p \mathbf{x}_1 = A_{11} \mathbf{x}_1 + A_{12} \mathbf{x}_2 + B_1 u \quad \cdots \cdots \cdots \text{(付5.5)}$$

$$\mu p \mathbf{x}_2 = A_{21} \mathbf{x}_1 + A_{22} \mathbf{x}_2 + B_2 u \quad \cdots \cdots \cdots \text{(付5.6)}$$

μ : 正の小実数

(i) slow subsystem

$\mu \rightarrow 0$ で近似し、このとき $\mathbf{x}_2 \rightarrow \mathbf{x}_{2s}$ 、 $u \rightarrow u_s$ とすると (付5.6)式より

$$\mathbf{x}_{2s} = -A_{22}^{-1} A_{21} \mathbf{x}_1 - A_{22}^{-1} B_2 u_s \quad \cdots \cdots \cdots \text{(付5.7)}$$

ただし、 A_{22} は正則とする。

(付5.7)式を (付5.5)式に代入すると

$$p \mathbf{x}_1 = A_s \mathbf{x}_1 + B_s u_s \quad \cdots \cdots \cdots \text{(付5.8)}$$

$$A_s = A_{11} - A_{12} A_{22}^{-1} A_{21}, \quad B_s = B_1 - A_{12} A_{22}^{-1} B_2$$

(ii) fast subsystem

(付5.6)式および (付5.7)式より

$$\begin{aligned} \mu p (\mathbf{x}_2 - \mathbf{x}_{2s}) &= A_{22} (\mathbf{x}_2 - \mathbf{x}_{2s}) + B_2 (u - u_s) \\ &\cdots \cdots \cdots \text{(付5.9)} \end{aligned}$$

ここで、 $x_f = x_2 - x_{2s}$, $u_f = u - u_s$ において

$$\mu_p x_f = A_{22} x_f + B_2 u_f \quad \dots\dots\dots (付5.10)$$

【第5章 参考文献】

- 1) H. M. Rustbekke, C. Concordia "Self-Excited Oscillation in a Transmission System Using Series Capacitors", IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-89, 1970.
- 2) L. A. Kilgore, L. C. Elliott, E. R. Taylor "The Prediction and Control of Self-Excited Oscillations due to Series Capacitors in Power Systems", IEEE Trans. on PAS-90 No.3, 1971.
- 3) D. N. Walker, C. E. J. Bowler, R. L. Jackson, D. A. Hodges "Results of Subsynchronous Resonance Test at Mohave", IEEE Trans. on PAS-94, No.5, 1975.
- 4) 小竹・渡部・小向・小柳：「直列コンデンサ補償系統における同期発電機の軸ねじれ共振現象の解析」電気学会論文誌B 99巻 7号 昭54。
- 5) 室谷・浅野：「直列コンデンサ補償系統における同期機の軸ねじれ共振現象とその抑制」電気学会論文誌B 96巻 12号 昭51。
- 6) 藤原・武田・野村・禰里・小寺：「状態フィードバックによるリアクトル形SSR安定化装置の設計法と抑制効果の解析」電気学会論文誌B 102巻 3号 昭57。
- 7) 小竹・渡部・武田・鈴木・藤原：「ダイナミックコンペンセイタによるSSR現象の抑制」電気学会論文誌B 100巻 9号 昭55。
- 8) A. E. Hammad, M. El-Sadek "Application of a Thyristor Controlled Compensator for Damping Subsynchronous Oscillations in Power Systems", IEEE Trans. on PAS Vol. PAS-103, NO.1, 1984.
- 9) 三谷・辻・村上：「特異振動法による電力系統安定化用超電導エネルギー貯蔵装置の制御系の設計」電気学会電力技術研究会 PE-85-61 昭60。
- 10) Andrew Yan, Yao-nan Yu "Multi-Mode Stabilization of Torsional

Oscillations Using Output Feedback Excitation Control", IEEE
Trans. on PAS Vol. PAS-101, No. 5, 1982.

- 11) 駒井・金・関根：「固有値制御による電力系統の安定化 —— 直列コンデンサ補償系統の安定化」電気学会論文誌B 104 巻 11号 昭59.
- 12) J. H. Chow, P. V. Kokotovic "A Decomposition of Near-Optimum Regulators for Systems with Slow and Fast Modes", IEEE Trans. on AC Vol. AC-21, 1976.
- 13) T. Ise, Y. Murakami, K. Tsuji "Simultaneous Active and Reactive Power Control of Superconducting Magnet Energy Storage Using GTO Converter", IEEE paper No. 85 SM 354-6, presented at the Power Engineering Society Summer Meeting, 1985.
- 14) P. M. Anderson, A. A. Foud "Power System Control and Stability" Iowa State University Press, 1977.
- 15) 藤原：「状態フィードバックによる極配置法の電力系統への応用 —— 弱干渉系における共振現象の安定化 ——」システムと制御 27巻5号 1983.
- 16) Yao-nan Yu "Electric Power System Dynamics", ACADEMIC PRESS INC., New York, 1983.
- 17) 高橋：システムと制御 下、第2版、p.320、岩波書店 昭53.
- 18) 木村：「多変数制御系の理論と応用—V」システムと制御 22巻 9号 1978.
- 19) 木村：「多変数系と極配置」システムと制御 27巻 5号 1983.

第 6 章 結 論

電力系統における安定度にかかわる重要な問題をいくつか挙げ、それらを解析上の観点から、過渡電力動揺の安定度問題、中間領域の電力動揺の安定度問題および自己励磁振動現象や軸ねじれ共振現象の安定度問題に分類し、それぞれに対して超電導エネルギー貯蔵装置 (S M E S) を用いた安定化制御を検討した。得られた主要な結果を要約すると以下のとおりである。

〔過渡電力動揺の安定化に関して〕

- (1) S M E S による過渡電力動揺の安定化の効果を系統的に評価するための手法を提案し、これをモデル系統に適用して、安定化に効果的な設置箇所を求めた。その結果、S M E S は発電端に分散して複数基設置すれば効果的で、単独箇所への設置あるいは負荷端への設置は効果が小さいことが明らかになった。
- (2) 動揺抑制に使われる S M E S のエネルギーおよび電力変換装置の容量は、S M E S を設置した発電機の無制御時の出力電力の動揺の第一波を積分したエネルギーおよび振幅に相当する値であった。

〔中間領域の電力動揺の安定化に関して〕

- (3) 中間領域の電力動揺の安定度がとくに問題である長距離大容量送電系統および広域連系系統を対象に S M E S の制御特性を検討した。
- (4) S M E S により有効電力と無効電力を同時に制御できることを利用して、有効電力を電力動揺の安定化に、無効電力を定電圧制御に用いる制御を提案した。それぞれの系統に対して制御系の構成法を導き、いくつかの数値解析によりそれらの効果を確認した。
- (5) S M E S による送電可能容量の改善効果が極めてすぐれていることを確認できた。

(6) S M E S の効果的な設置箇所を検討した。その結果、次のような場所が適していることがわかった。

- ・長距離送電線の間中点と発電端の間
- ・連系系統の端部の連系線上

(7) 安定化に用いられた S M E S のエネルギーおよび出力電力の大きさは、それぞれ S M E S を設置した送電線における無制御時の電力動揺の変動分を積算したエネルギーおよび振幅に相当する。

(8) 与えられた潮流状態・故障条件に対して、安定化制御を実現するために必要な超電導マグネットの貯蔵容量、磁束密度の最大変化率および電力変換装置の容量の間のトレードオフを一連の数値計算により検討する方法を示した。

〔自己励磁振動現象・軸ねじれ共振現象の安定化に関して〕

(9) S M E S の有効・無効電力の同時制御を少し変更すれば $d \cdot q$ 軸電流を同時に制御できることを利用して制御系を構成した。

(10) S M E S を含むモデルに特異摂動法を適用して分割したサブシステムを用いて電力動揺の安定化と同時に自己励磁振動や軸ねじれ共振を安定化するための制御系を設計する方法を提案した。

(11) 本制御をモデル系統に適用し、固有値計算およびシミュレーションを行った結果、期待どおりの安定化効果を得ることができた。

(12) S M E S の有効電力と無効電力の波形を求めた結果、電力動揺安定化のためのゆっくりとした成分と自己励磁振動や軸ねじれ共振の安定化のための速い成分が重畳したものであった。速い成分により出力電力のピーク値が大きくなるので、電力動揺の安定化のみ行う場合と比較して、電力変換装置の容量は少し大きいものが必要と考えられる。

(13) 直列コンデンサ補償と S M E S を用いた制御の組み合わせにより、安定に送電可能な容量の増大効果が極めて大きいことが明らかになった。

謝 辞

本研究の遂行にあたり、終始変わらぬ御懇切な御指導を賜りました大阪大学・藤井克彦教授に深く感謝の意を表します。

また、本研究をまとめるにあたり、終始変わらぬ御懇切な御指導と御教示を賜りました大阪大学・鈴木胖教授に深く感謝の意を表します。

更に、本論文について、貴重な御指摘を賜った大阪大学・山中千代衛教授、横山昌弘教授、平木昭夫教授の方々ならびに吉野勝美助教授、佐々木孝友助教授に厚く御礼申し上げます。また、大学院在学中に御指導を賜った大阪大学・黒田英三教授、加藤義章教授、三間罔興教授、中井貞雄教授、井澤靖和教授、望月孝晏教授、山中龍彦教授、西原功修教授に厚く御礼申し上げます。

本研究の遂行に際し、大阪大学・村上吉繁助教授、辻毅一郎助教授ならびに山本純也助手には、終始変わらぬ適切な御教示を賜るとともに細部にわたり御討論頂いた。ここに厚く御礼申し上げます。

また、本研究の遂行に多大の御協力・御援助を頂いた大阪大学・三石明善教授をはじめとする大阪大学工学部超電導工学実験センターの関係各位に御礼申し上げます。さらに、広く一般的な立場から御教示頂いた京都大学・林宗明教授、高エネルギー物理学研究所・増田正美教授、京都大学・岡田隆夫教授をはじめとする文部省科学研究費補助金エネルギー特別研究「電気エネルギーの有効利用と高密度化に関する研究」の関係各位に深く感謝の意を表します。

なお、本研究は、大阪大学大学院後期課程・伊瀬敏史氏をはじめとする大阪大学電気工学科・超電導実験センターおよび旧西村研究室の関係諸氏の多大なる御援助・御協力の元に遂行することができた。ここに厚く御礼申し上げます。

最後に、西村正太郎・元大阪大学教授、犬石嘉雄・元大阪大学教授ならびに木下仁志・元大阪大学教授には、大阪大学御在籍中、ひとかたならぬ御指導、御鞭撻を頂いた。ここに、深甚なる感謝の意と御礼の言葉を申し上げます。

研究業績目録

1. 学会論文誌

- 1) 「超電導エネルギー貯蔵装置による電力系統の安定化効果の評価の一方法」
電気学会論文誌B分冊、104巻9号、1984年9月.
- 2) 「超電導エネルギー貯蔵装置による電力系統の動態安定度の改善」電気学
会論文誌B分冊、104巻11号、1984年11月.
- 3) 「超電導エネルギー貯蔵装置による広域連系系統の安定化制御」電気学会
論文誌B分冊、105巻12号、1985年12月.
- 4) " Fundamental Study on Electrical Power System Stabilization Using
Superconducting Magnet Energy Storage", submitted to 9-th Inter-
national Conference on Magnet Technology (accepted to be published
in Proc. of MT-9 or IEEE Trans. on MAG).
- 5) 「特異摂動法による電力系統安定化用超電導エネルギー貯蔵装置の制御系
の設計」電気学会論文誌B分冊 (投稿中) .

2. 研究会論文

- 1) 「超電導エネルギー貯蔵装置を含む電力系統の動揺解析」電気学会電力技術研究会 PE-82-30, 1982年9月.
- 2) 「超電導エネルギー貯蔵装置による電力系統の安定化効果の評価の一方法」電気学会情報処理研究会 IP-83-19, 1983年5月.
- 3) 「超電導エネルギー貯蔵装置による連系系統の安定化制御」電気学会電力技術研究会 PE-83-40, 1983年7月.
- 4) 「超電導エネルギー貯蔵装置による広域連系系統の安定化」電気学会電力技術研究会 PE-84-82, 1984年7月.
- 5) 「特異摂動法による電力系統安定化用超電導エネルギー貯蔵装置の制御系の設計」電気学会電力技術研究会 PE-85-61, 1985年7月.
- 6) 「超電導電力貯蔵装置による系統安定化効果の模擬電力系統における実験的研究」電気学会電力技術研究会 PE-85-60, 1985年7月.

3. 大阪大学工学報告、大阪大学超電導工学実験センター報告

- 1) "On the Critical Value of Lyapunov Function in Power System Transient Stability Analysis", Technol. Repts. of the Osaka Univ. Vol.32 No.1660 (October, 1982).
- 2) 「超電導エネルギー貯蔵装置を含む電力系統の動揺解析」大阪大学超電導工学実験センター報告、第2巻、1982年8月。
- 3) 「超電導エネルギー貯蔵装置による連系系統の安定化制御」大阪大学超電導工学実験センター報告、第3巻、1983年9月。
- 4) 「超電導エネルギー貯蔵装置による広域連系系統の安定化」大阪大学超電導工学実験センター報告、第4巻、1985年3月。
- 5) 「系統安定化用超電導エネルギー貯蔵装置の設置箇所に関する検討 —— 長距離大容量送電系統の場合 ——」大阪大学超電導工学実験センター報告、第4巻、1985年3月。
- 6) 「超電導電力貯蔵装置による系統安定化効果の模擬電力系統における実験的研究」大阪大学超電導工学実験センター報告、第4巻、1985年3月。

4. 学会口頭発表

- 1) 「超電導エネルギー貯蔵装置からのエネルギー放出に伴う系統過渡安定度の解析」電気関係学会関西支部連合大会、神戸、1981年11月。
- 2) 「超電導エネルギー貯蔵装置を含んだ系統の動揺解析の一手法」電気学会全国大会、東京、1982年4月。
- 3) 「超電導エネルギー貯蔵装置による電力系統の過渡動揺の安定化」電気関係学会関西支部連合大会、京都、1982年12月。
- 4) 「超電導エネルギー貯蔵装置による連系系統の安定化」電気学会全国大会、岡山、1983年4月。
- 5) 「超電導エネルギー貯蔵装置による長距離大容量送電系統の安定化」電気関係学会関西支部連合大会、大阪、1983年11月。
- 6) 「超電導エネルギー貯蔵装置による連系線潮流の安定化」電気学会全国大会、東京、1984年4月。
- 7) 「電力系統安定化用SME Sの設置箇所に関する検討」電気学会全国大会、東京、1984年4月。

- 8) 「超電導エネルギー貯蔵装置による広域連系系統の安定化効果の検討」電気関係学会関西支部連合大会、姫路、1984年10月。
- 9) 「特異摂動法による電力系統安定化用超電導エネルギー貯蔵装置の制御系の設計」電気学会全国大会、名古屋、1985年4月。
- 10) 「超電導エネルギー貯蔵装置による系統安定化効果の模擬電力系統における実験的研究」電気学会全国大会、名古屋、1985年4月。
- 11) 「電力系統安定化用超電導エネルギー貯蔵装置の制御に必要な容量に関する一考察」電気関係学会関西支部連合大会、大阪、1985年11月。