

マイクロSME Sの分散配置による
電力系統の統合的制御方策に関する研究

(課題番号 15560241)

平成 15 年度～平成 16 年度科学研究費補助金
(基盤研究(C)(2)) 研究成果報告書

平成 17 年 5 月

研究代表者 大澤 靖治

(京都大学工学研究科教授)

京 都 大 学 図 書



1050578376

大澤靖治氏寄贈

附 属 図 書 館

マイクロSME Sの分散配置による
電力系統の統合的制御方策に関する研究

(課題番号 15560241)

平成15年度～平成16年度科学研究費補助金
(基盤研究(C)(2))研究成果報告書

平成17年5月

研究代表者 大澤 靖治
(京都大学工学研究科教授)

はしがき

本報告書は、科学研究費補助金基盤研究(C)(2)の補助を受けて、京都大学工学研究科において平成15年度より平成16年度まで2年間にわたって行った「マイクロ SMES の分散配置による電力系統の統合的制御方策に関する研究」の成果をまとめたものである。

化石燃料の枯渇や二酸化炭素の増加による地球温暖化などの環境問題が深刻化する現在、再生可能で利用に際しても環境に悪影響を与える廃棄物を放出しない自然エネルギー発電に対する期待が高まっている。特に風力発電や太陽光発電は技術的・経済的に実用段階に入っているが、その出力は気象の変化とともに大きく変動するという欠点をもっている。また電力市場の規制緩和・自由化の進展により、IPP(Independent Power Producer)の参入や電力託送が今後増加することが予想される。その結果、系統混雑の発生や同期安定性、電圧安定性の悪化が懸念されている。さらに高度情報化社会の進展、生活環境の向上に伴い電力利用の形態は多様化・高度化が進んでいる。そのため、社会における電力への依存度はますます増大しており、電力の安定供給を維持することが不可欠である。このような状況の下で、系統安定化のための様々な制御機器の導入が検討されている。超電導エネルギー貯蔵装置(SMES: Superconducting Magnetic Energy Storage)は、有効電力と無効電力を高速かつ独立に制御することが可能で、高頻度の充放電に耐えられるため、電力系統の安定化や電力品質の改善が有望な用途として期待されている。最近は同一の小規模 SMES(マイクロ SMES)を複数設置(D-SMES: Distributed SMES)することにより電圧問題を解決しようとする試みがおこなわれている。さらに、これらの SMES を情報通信網を介して有機的に結びつけ、IT 技術による統合制御をおこなえば、SMES をより有効に活用できるものと考えられる。

本研究では、SMES により過渡安定度を向上させるための統合的な手法を計算機シミュレーションによって検討する。検討においては、系統の各母線に故障が生じた場合を仮定し、それらの故障を総合的に考慮した評価指標を定義する。その評価指標を用いて最適化手法の一つであるタブーサーチ(TS: Tabu Search)により、SMES の適切な配置、ゲインを決定する。また SMES の制御信号としてローカル信号のみを用いた場合、遠隔地信号を用いた場合を比較し、どのような制御が効果的であるかを検討した。

科学研究費補助金としての研究支援の他に、関連研究を行っている大学や電力会社等の研究者の方々から、有益な討論、助言などをいただいた。また、計算機シミュレーションに関しては、研究代表者が併任教授(平成14年12月～平成15年9月)および非常勤講師(平成15年10月～平成16年3月)を勤めた神戸大学における大学院自然科学研究科博士課程前期課程電気電子工学専攻の学生、ならびに京都大学工学部電気電子工学科の学生諸君から、修士論文、卒業論文のための研究の一環として協力を得ることができた。さらに、研究代表者の所属する研究室のメンバーからも多くの示唆、討論を得た。ここに記して感謝の意を表する次第である。

研究組織

研究代表者： 大澤 靖 治 (京都大学工学研究科教授)

交付決定額(配分額)

(金額単位：千円)

	直接経費	間接経費	合計
平成15年度	2,300	0	2,300
平成16年度	900	0	900
総計	3,200	0	3,200

研究発表

(1) 学会誌等

H. Takeuchi, Y. Ohsawa, S. Ueda and H. Takeno: Optimal Allocation of Micro SMES Units for Power System Stabilization by Means of Tabu Search Algorithm, Proc. of Int. Conf. on Electrical Eng., pp.585-589, 2004.

(2) 口頭発表

和田, 植田, 大澤: 風力発電を含む電力系統の発電機動揺抑制用マイクロ SMES の最適配置に関する検討, 平成17年電気関係学会関西支部連合大会(発表予定).

(3) 出版物

なし

研究成果による工業所有権の出願・取得状況

なし

要約

化石燃料の枯渇問題、地球環境問題等が深刻化する現在、自然エネルギー発電の導入が急速に進められているが、その出力は気象の変化とともに大きく変動するという欠点をもっている。また、高度情報化社会の進展による電力利用の多様化・高度化のため、過渡安定性や電圧安定性の向上はますますその重要性を高めている。このような状況の下で、パワーエレクトロニクス機器をはじめとする種々を系統安定化のための制御機器の導入が検討されている。パワーエレクトロニクス機器の一つである超電導エネルギー貯蔵装置(SMES)は、有効電力と無効電力を高速かつ独立に制御することが可能で、高頻度の充放電に耐えられるため、系統安定化のための装置として実用化が期待されている。

本研究では、3機9母線系統を対象とし、三相地絡故障に対する過渡安定性の向上を目的としてSMESを導入する場合において、最適なSMESの配置、ダイナミックタブーサーチにより求める手法の検討をおこなった。検討においては位相角偏差、角速度偏差を考慮した評価指標を定義した。また、効果的なSMESの制御を行うために遮断地信号を用いた制御系を提案し、ローカル信号のみを用いた制御系と比較をおこなった。

その結果、角速度偏差を評価指標として適切に用いれば、効果的なSMESの配置、ダイナミックタブーサーチにより得られることが判明した。また、遮断地信号を用いたSMESの制御系はローカル信号のみを用いた制御系よりも、過渡安定性の向上効果が高いことが明らかになった。

要約

化石燃料の枯渇問題、地球環境問題等が深刻化する現在、自然エネルギー発電の導入が急速に進められているが、その出力は気象の変化とともに大きく変動するという欠点をもっている。また、高度情報化社会の進展による電力利用の多様化・高度化のため、過渡安定度や電圧安定性の向上はますますその重要性を高めている。このような状況の下で、パワーエレクトロニクス機器をはじめとする様々な系統安定化のための制御機器の導入が検討されている。パワーエレクトロニクス機器の一つである超電導エネルギー貯蔵装置 (SMES) は、有効電力と無効電力を高速かつ独立に制御することが可能で、高頻度の充放電に耐えられるため、系統安定化のための装置として実用化が期待されている。

本研究では、3機9母線系統を対象とし、三相地絡故障に対する過渡安定度の向上を目的としてSMESを導入する場合において、最適なSMESの配置、ゲインをタブーサーチにより求める手法の検討をおこなった。検討においては位相角偏差、角速度偏差を考慮した評価指標を定義した。また、効果的なSMESの制御を行うために遠隔地信号を用いた制御系を提案し、ローカル信号のみを用いた制御系と比較をおこなった。

その結果、角速度偏差を評価指標として適切に用いれば、効果的なSMESの配置、ゲインをタブーサーチにより得られることが判明した。また、遠隔地信号を用いたSMESの制御系はローカル信号のみを用いた制御系よりも、過渡安定度の向上効果が高いことが明らかになった。

目次

第1章 序論	1
第2章 超電導エネルギー貯蔵装置 (SMES)	3
2.1 SMES の原理と構成	3
2.2 SMES のモデル	5
第3章 電力系統の数式モデル	6
3.1 系統モデル	6
3.2 同期発電機モデル	6
3.3 過渡動揺の数値計算	10
第4章 タブーサーチ	13
4.1 タブーサーチのアルゴリズム	13
4.2 タブー制約	14
4.3 アスピレーション基準	14
第5章 位相角動揺を評価指標として用いた最適化による SMES の安定化効果の検討	16
5.1 故障条件	16
5.2 評価指標	16
5.3 SMES の制御	17
5.4 SMES の初期配置決定法	17
5.5 SMES の配置, ゲインの最適化手法	18
5.6 ローカル信号を用いた SMES 制御によるシミュレーション結果	20
5.7 遠隔地信号を用いた SMES 制御によるシミュレーション結果	22

第6章	位相角偏差, 角速度偏差を評価指標として用いた最適化による SMES の安定化効果の検討	25
6.1	評価指標	25
6.2	ローカル信号を用いた SMES 制御によるシミュレーション結果	25
6.3	遠隔地信号を用いた SMES 制御によるシミュレーション結果	28
第7章	結論	31
参考文献		32

発生や周波数変動, 電圧変動, 電圧安定性の悪化が懸念されている。さらに高度情報化社会の進展, 生活環境の向上に伴い電力利用の形態は多様化・高度化が進んでいる。そのため, 社会における電力への依存度はますます増大しており, 電力の安定供給を維持することが不可欠である。このような状況の下で, 系統安定化のための様々な制御機器の導入が検討されている。例えば, 揚水機および長距離送電線を含む負荷系統を対象として, TCSC(Thyristor Controlled Series Compensator)や可変速FWG(FlyWheel Generator)等のパワーエレクトロニクス機器を導入することにより電圧安定性を向上させる研究がなされてきた [1][2]。一方, 超電導エネルギー貯蔵装置 (SMES : Superconducting Magnetic Energy Storage) は, 有効電力と無効電力を高速かつ独立に制御することが可能で, 高頻度の充放電に耐えられるため, 電力系統の安定化や電力品質の改善が有望な用途として期待されている [3][4]。最近は一連の小規模 SMES(マイクロ SMES)を複数設置 (D-SMES : Distributed SMES) することにより電圧問題を解決しようとする試みがおこなわれている [5]。さらに, これらの SMES を情報通信網を介して有機的に結びつけ, IT 技術による統合制御をおこなえば, SMES をより有効に活用できるものと考えられる。

本研究では文献 [6] と同様の系統を対象として, SMES により過渡安定度を向上させる手法を計算機シミュレーションによって検討する。検討においては, 系統の各母線に故障が生じた場合を仮定し, それらの故障を総合的に考慮した評価指標を定義する。その評価指標を用いて最適化手法の一つであるタブーサーチ (TS : Tabu Search) により, SMES の妥当な配置, ゲインを決定する。また SMES の制御信号としてローカル信号のみを用いた場合, 遠隔地信号を用いた場合を比較し, どのような制御が効果的であるかを検討した。

第1章 序論

化石燃料の枯渇や二酸化炭素の増加による地球温暖化などの環境問題が深刻化する現在、再生可能で利用に際しても環境に悪影響を与えない自然エネルギー発電に対する期待が高まっている。特に風力発電や太陽光発電は技術的・経済的に実用段階に入っているが、その出力は気象の変化とともに大きく変動するという欠点をもっている。また電力市場の規制緩和・自由化の進展により、IPP(Independent Power Producer)の参入や電力託送が今後増加することが予想される。その結果、系統混雑の発生や同期安定性、電圧安定性の悪化が懸念されている。さらに高度情報化社会の進展、生活環境の向上に伴い電力利用の形態は多様化・高度化が進んでいる。そのため、社会における電力への依存度はますます増大しており、電力の安定供給を維持することが不可欠である。このような状況の下で、系統安定化のための様々な制御機器の導入が検討されている。例えば、揚水機および長距離送電線を含む負荷系統を対象として、TCSC(Thyristor Controlled Series Compensator)や可変速FWG(FlyWheel Generator)等のパワーエレクトロニクス機器を導入することにより電圧安定性を向上させる研究がなされてきた [1][2]。一方、超電導エネルギー貯蔵装置 (SMES : Superconducting Magnetic Energy Storage) は、有効電力と無効電力を高速かつ独立に制御することが可能で、高頻度の充放電に耐えられるため、電力系統の安定化や電力品質の改善が有望な用途として期待されている [3][4]。最近は同一の小規模 SMES(マイクロ SMES)を複数設置 (D-SMES : Distributed SMES) することにより電圧問題を解決しようとする試みがおこなわれている [5]。さらに、これらの SMES を情報通信網を介して有機的に結びつけ、IT 技術による統合制御をおこなえば、SMES をより有効に活用できるものと考えられる。

本研究では文献 [6] と同様の系統を対象として、SMES により過渡安定度を向上させる手法を計算機シミュレーションによって検討する。検討においては、系統の各母線に故障が生じた場合を仮定し、それらの故障を総合的に考慮した評価指標を定義する。その評価指標を用いて最適化手法の一つであるタブーサーチ (TS : Tabu Search) により、SMES の妥当な配置、ゲインを決定する。また SMES の制御信号としてローカル信号のみを用いた場合、遠隔地信号を用いた場合を比較し、どのような制御が効果的であるかを検討した。

本報告書の構成は以下の通りである。

第2章ではSMESの基本的な原理・構成とそのモデルについて述べる。第3章では研究対象とする系統のモデルを示し、計算機シミュレーションで用いる発電機モデルについて述べる。第4章ではSMESの配置、ゲインの最適化で用いるタブーサーチについて述べる。第5章では発電機の位相角偏差を評価指標として、タブーサーチによりSMESの配置、ゲインの最適化をおこない、SMESの安定化効果について考察をおこなう。第6章では第5章で用いた評価指標に角速度偏差を考慮したものを定義し、SMESの配置、ゲインの最適化をおこなう。そして指標が変化した場合の安定化効果の比較、考察をおこなう。第7章では第5、6章で得られた結果の要約をおこない、結論としている。

2.1. SMESの原理と構成

インダクタンス L の超電導コイルに直流電流 i を流すと、 $W = \frac{1}{2} Li^2$ のエネルギーが磁気エネルギーの形で貯蔵される。この原理自体は常電導のコイルでも成立するが、その場合コイルの抵抗が無視できないためジュール熱が発生し、エネルギーは失われる。

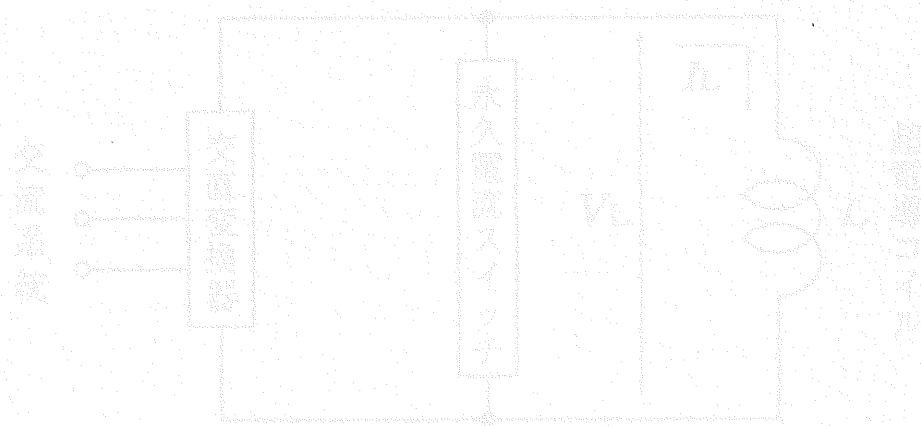


図 2.1: SMES の概念図

図 2.1 に SMES の概念図を示す。交流系統から電力を貯蔵するために、超電導コイルは交流変換器を介して交流系統に接続される。コイルの印加電圧 V_L とコイル電流 i

第2章 超電導エネルギー貯蔵装置 (SMES)

超電導エネルギー貯蔵装置 (SMES: Superconducting Magnetic Energy Storage) は超電導コイルに直流電流を流して磁気エネルギーとしてエネルギーを貯蔵する装置で、超電導現象を利用することによってはじめて成立する新しい機能を持つ電力機器である。SMES は超電導コイルによってエネルギーを貯蔵するためにエネルギー形態の本質的な変換を伴わないので、大規模なものでは 90 % 以上のエネルギー貯蔵効率が期待でき、有効電力と無効電力が独立に高速で制御できる特徴を持つ。また、MW 容量と MWh 容量の設定が比較的幅広くとれるので、系統安定化用、負荷変動補償用、負荷平準化用など小規模から大規模まで多用途への適応が期待されている [3][4]。

2.1. SMES の原理と構成

インダクタンス L の超電導コイルに直流電流 I_L を流すと、 $W = \frac{1}{2} L I_L^2$ のエネルギーが磁気エネルギーの形で貯蔵される。この原理自体は常電導のコイルでも成立するが、その場合コイルの抵抗が無視できないためジュール熱が発生し、エネルギーは失われる。

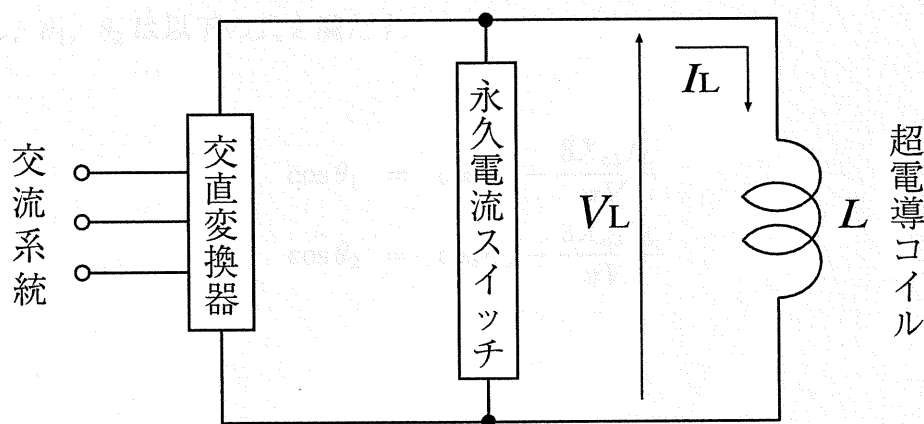


図 2.1: SMES の概念図

図 2.1 に SMES の概念図を示す。交流系統から電力を貯蔵するために、超電導コイルは交直変換器を介して交流系統に接続される。コイルの印加電圧 V_L とコイル電流 I_L

の間には $V_L = L \cdot (dI_L/dt)$ の関係があり、コイル電流すなわち貯蔵エネルギーの増減は印加電圧の極性と大きさにより決まる。電力を吸収する場合には印加電圧を正にしてコイル電流を増加させ、逆に放出する場合には印加電圧を負にし、コイル電流を減少させる。充放電電力 P_{SMES} は $P_{SMES} = V_L I_L$ で決まるため、コイル電流に応じて印加電圧を制御することにより任意の電力の吸収・放出が可能となる。また、電力を貯蔵しておく場合には永久電流スイッチをオンにする。これによって超電導コイルに電流が永久に流れ続け、電力を貯蔵できる。SMES による電力の吸収・放出は、交直変換器の電圧の極性を変えるだけで切り替えることができるので、その応答速度は数十 ms となる。系統安定化への応用を考える場合、その応答速度は十分速いといえる。

交直変換器にサイリスタダブルブリッジを用いた SMES の構成を、図 2.2 に示す。ダブルブリッジを用いたものは、高調波を抑制できる点と、有効電力と無効電力の設定にある程度の自由度が存在する点でシングルブリッジを用いたものよりも有利である。SMES の電力は交直変換器の点弧角で決定され、図 2.2 のようなダブルブリッジ構成の場合式 (2.1), (2.2) で表される。

$$P_{SMES} = I_L \left\{ V_t (\cos \alpha_1 + \cos \alpha_2) - \frac{3(X_{c1} + X_{c2})I_L}{\pi} \right\} \quad (2.1)$$

$$Q_{SMES} = I_L V_t (\sin \theta_1 + \sin \theta_2) \quad (2.2)$$

ただし、 θ_1, θ_2 は以下の式を満たす。

$$\cos \theta_1 = \cos \alpha_1 - \frac{3X_{c1}I_L}{\pi V_t} \quad (2.3)$$

$$\cos \theta_2 = \cos \alpha_2 - \frac{3X_{c2}I_L}{\pi V_t} \quad (2.4)$$

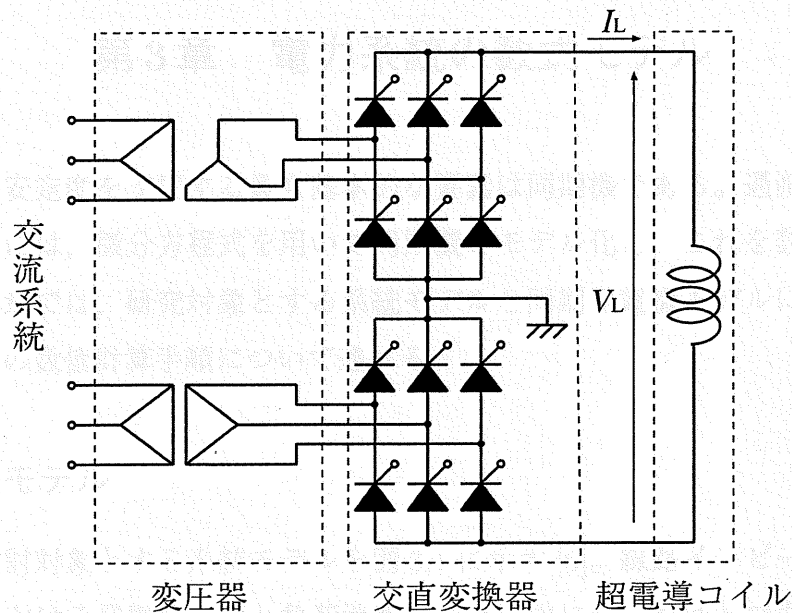


図 2.2: ダブルブリッジ SMES

2.2. SMES のモデル

計算機シミュレーションでは、SMES の電力 $\dot{S} = P_{\text{SMES}} + jQ_{\text{SMES}}$ を式 (2.5) で示す等価なアドミタンス $\dot{Y}_{\text{SMES}}$ に置き換えて表現する。ここで $P_{\text{SMES}}, Q_{\text{SMES}}$ は、SMES が有効電力・遅れ無効電力の吸収を行う場合を正に、放出を行う場合を負に定義している。

$$\dot{Y}_{\text{SMES}} = G_{\text{SMES}} + jB_{\text{SMES}} = \frac{\dot{S}^*}{V_t^2} = \frac{P_{\text{SMES}}}{V_t^2} - j \frac{Q_{\text{SMES}}}{V_t^2} \quad (2.5)$$

ここで、 V_t は SMES が設置されている母線の端子電圧である。

第3章 電力系統の数式モデル

電力系統の安定度を支配する最も基本的な要素は同期機である。過渡安定度問題を解析するためには、微分方程式を用いて同期機をモデル化し、これを数値的に解く必要がある。本章では、研究対象とする系統モデルと同期発電機モデルについて述べた後、過渡動揺の数値計算手順について述べる。

3.1. 系統モデル

本論文で検討対象とする系統モデルを図 3.1 に示す [6]。線路インピーダンス、および定常状態における発電機出力と負荷消費電力は図中に記した通りである。過渡状態において、各負荷は定インピーダンス負荷として計算を行う。

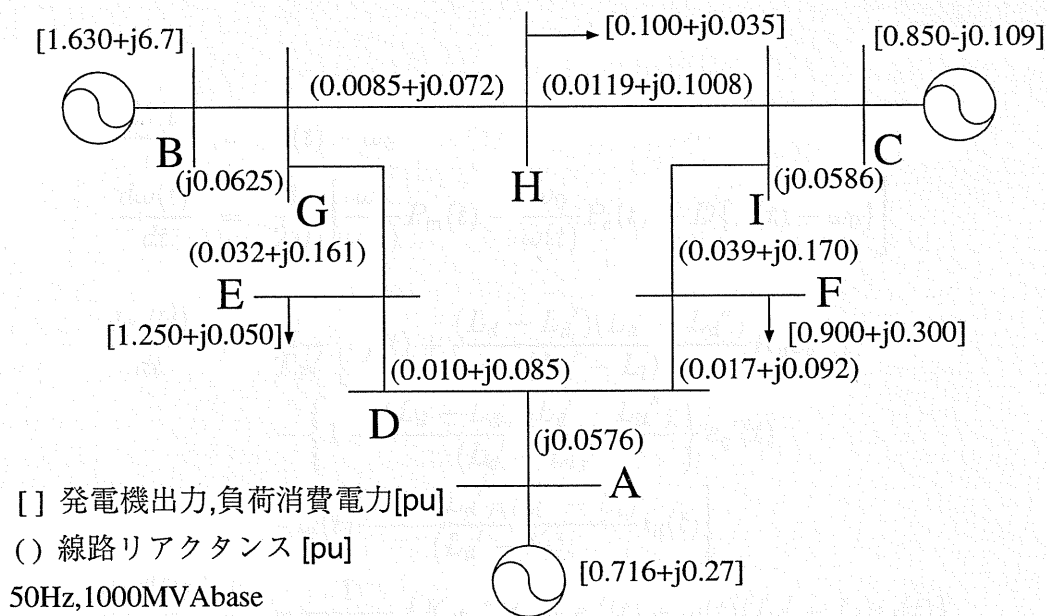


図 3.1: 系統モデル

3.2. 同期発電機モデル

同期発電機の種々の表現方法を表 3.1 に示す。最も簡略な表現方法は回転子の運動方程式のみで表した 2 次モデルであり、より高次になるにつれて発電機の特性をよく近

似できるが表現式が複雑になってくる。本論文では、励磁巻線、 d 軸制動巻線、および q 軸制動巻線の動特性を考慮した 5 次モデルを用いる。5 次モデルの微分方程式を式 (3.1)~(3.6) に示す [6]。

表 3.1: 発電機の表現法

2 次モデル	回転子の運動方程式のみ
3 次モデル	2 次モデル + 励磁巻線
4 次モデル	3 次モデル + q 軸制動巻線
5 次モデル	4 次モデル + d 軸制動巻線
6 次モデル	5 次モデル + q 軸第 2 制動巻線
7 次モデル	5 次モデル + d 軸, q 軸電機子巻線
9 次モデル	7 次モデル + d 軸, q 軸第 2 制動巻線

$$\frac{d\delta(t)}{dt} = \omega(t) - \omega_0 \quad (3.1)$$

$$\frac{d\omega(t)}{dt} = \frac{1}{2H} \left[\frac{\omega_0}{\omega(t)} P_m(t) - \frac{\omega_0}{\omega(t)} P_e(t) - D\{\omega(t) - \omega_0\} \right] \quad (3.2)$$

$$\frac{de_q'(t)}{dt} = \frac{1}{T_{d0}'} \left[e_f(t) + \frac{(L_d - L_d')(L_d' - L_d'')}{(L_d' - L_l)^2} K_d e_q''(t) \right. \quad (3.3)$$

$$\left. - \left\{ 1 + \frac{(L_d - L_d')(L_d' - L_d'')}{(L_d' - L_l)^2} \right\} e_q'(t) - \omega(t) \frac{(L_d - L_d')(L_d'' - L_l)}{(L_d' - L_l)} i_d(t) \right] \quad (3.4)$$

$$\frac{de_q''(t)}{dt} = -\frac{1}{T_{d0}'' K_d} \{ K_d e_q''(t) - e_q'(t) + \omega(t)(L_d' - L_l) i_d(t) \} \quad (3.5)$$

$$\frac{de_d''(t)}{dt} = -\frac{1}{T_{q0}'' K_q} \{ K_q e_d''(t) - \omega(t)(L_q - L_l) i_q(t) \} \quad (3.6)$$

ただし,

$$K_d = 1 + \frac{(L_d' - L_l)(L_d'' - L_l)}{(L_d' - L_d'')(L_d - L_l)} \quad (3.7)$$

$$K_q = 1 + \frac{(L_q'' - L_l)}{(L_q - L_q'')} \quad (3.8)$$

である。式中に用いた記号の意味を表 3.2 に示す。

表 3.2: 同期発電機モデルで用いた記号の定義

記号	変数名・定数名
$\delta(t)$	発電機回転子の位相角
$\omega(t)$	発電機回転子の角速度
ω_0	定格角速度
$P_m(t)$	発電機への機械的入力
$P_e(t)$	発電機の電氣的出力
M	発電機の単位慣性定数
D	発電機の制動係数
$e_f(t)$	励磁電圧
L_d	d 軸同期リアクタンス
L_d'	d 軸過渡リアクタンス
L_d''	d 軸初期過渡リアクタンス
L_q	q 軸同期リアクタンス
L_q''	q 軸初期過渡リアクタンス
L_l	固定子巻線漏れリアクタンス
T_{d0}'	d 軸開路時定数
T_{d0}''	d 軸開路初期時定数
T_{q0}''	q 軸開路初期時定数

各発電機の定数を表 3.3 に示す。

表 3.3: 同期発電機定数 (1000 MVA ベース)

記号	G1	G2	G3	記号	G1	G2	G3
ω_d [pu]	1.569	1.651	1.220	T_{d0}' [s]	5.140	5.900	8.970
$\omega L_d'$ [pu]	0.324	0.232	0.174	T_{d0}'' [s]	0.0437	0.033	0.033
$\omega L_d''$ [pu]	0.249	0.171	0.134	T_{q0}'' [s]	0.070	0.078	0.141
ωL_q [pu]	1.548	1.590	1160	H [s]	50	9	6
$\omega L_q''$ [pu]	0.248	0.171	0.134	D [pu]	2.0	2.0	2.0
ωL_l [pu]	0.204	0.102	0.078				

全ての発電機には、図 3.2, 図 3.3 に示す AVR (自動電圧調整器) と調速機が設置されている。図中に用いた記号の意味を表 3.4 に示す。

表 3.4: AVR・調速機モデルで用いた記号の定義

記号	変数名・定数名
ΔV_t	発電機端子の電圧偏差
Δe_f	励磁電圧の増分値
$\Delta \omega$	発電機回転子の角速度偏差
ΔP_m	発電機の機械的出力の増分値

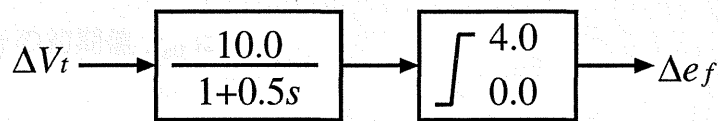


図 3.2: AVR のブロック図

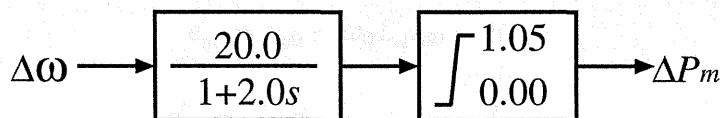


図 3.3: 調速機のブロック図

3.3. 過渡動揺の数値計算

前節で示した基本方程式を用いて電力系統の過渡動揺の数値計算を次の手順で行う。

step1 初期潮流の計算

過渡動揺の計算を行うために、まず系統に外乱が加わる前の初期状態を潮流計算により求める。得られた発電機の端子電圧 $\dot{V}_G$ 、発電機電流 $\dot{I}_G$ により、基準軸となる D 軸から測った回転子位置の初期値 δ_0 を次式から求める。

$$\dot{E}_q = \dot{V}_G + (R + j\omega_0 L_q) \dot{I}_G \quad (3.9)$$

$$\delta_0 = \angle \dot{E}_q \quad (3.10)$$

step2 発電機諸量の初期値

式 (3.10) で求めた回転子の初期位置角 δ_0 を用いて、以下の式により d - q 座標における諸量が得られる。

$$i_{d0} = \operatorname{Re}\{\dot{I}_G \varepsilon^{j(\frac{\pi}{2} - \delta_0)}\} \quad (3.11)$$

$$i_{q0} = \operatorname{Im}\{\dot{I}_G \varepsilon^{j(\frac{\pi}{2} - \delta_0)}\} \quad (3.12)$$

$$v_{d0} = \operatorname{Re}\{\dot{V}_G \varepsilon^{j(\frac{\pi}{2} - \delta_0)}\} \quad (3.13)$$

$$v_{q0} = \operatorname{Im}\{\dot{V}_G \varepsilon^{j(\frac{\pi}{2} - \delta_0)}\} \quad (3.14)$$

上記の発電機諸量により、 e_{f0} は次式で得られる。

$$e_{f0} = v_{q0} + \omega_0 L_d i_{d0} + R i_{q0} \quad (3.15)$$

発電機出力 $P_e(t)$ の初期値 P_{e0} は

$$P_{e0} = v_{d0} i_{d0} + v_{q0} i_{q0} + R(i_{d0}^2 + i_{q0}^2) \quad (3.16)$$

で与えられる。また、各巻線の磁束鎖交数をあらわす電圧 $e'_q(t)$, $e''_q(t)$, $e''_d(t)$ の初期値については、次の式で得られる。

$$e'_{q0} = v_{q0} + \omega_0 L'_d i_{d0} + R i_{q0} \quad (3.17)$$

$$e''_{q0} = \frac{1}{K_d} e'_{q0} - \omega_0 (L'_d - L_l) i_{d0} \quad (3.18)$$

$$e''_{d0} = \frac{1}{K_q} \omega_0 (L_q - L_l) i_{q0} \quad (3.19)$$

step3 系統状態変化

短絡，線路開放など系統に状態変化が起きたときは，それにあわせてインピーダンス行列，アドミタンス行列を修正する。

step4 系統計算

D - Q 座標で表現した発電機の内部起電力 $\dot{E}_G$ を d - q 座標軸における内部誘起電圧 e_{gd} , e_{gq} から計算する。

$$e_{gd} = K_q + \frac{L'_q - L''_q}{L'_q - L_l} e''_d \quad (3.20)$$

$$e_{gq} = K_d + \frac{L'_d - L''_d}{L'_d - L_l} e''_q + \frac{L''_d - L_l}{L'_d - L_l} e'_q \quad (3.21)$$

$$\dot{E}_G = E_{GD} + jE_{GQ} \quad (3.22)$$

$$E_{GD} = e_{gd} \sin \delta + e_{gq} \cos \delta \quad (3.23)$$

$$E_{GQ} = -e_{gd} \cos \delta + e_{gq} \sin \delta \quad (3.24)$$

時刻 $t = k\Delta t$ の場合も同様に計算ができ， $\dot{E}_G^{(k)}$ を用いて，各発電機の端子電圧 $\dot{V}_G^K$ ，発電機電流 $\dot{I}_G^K$ のほか，系統各部の電圧，電流を求めることができる。

step5 微分方程式の解法

step4 で求めた $\dot{E}_G^{(k)}$ ， $\dot{V}_G^{(k)}$ ， $\dot{I}_G^{(k)}$ ， $\delta^{(k)}$ により，式 (3.1) ~ (3.6) の微分方程式を解くために必要な右辺の各定数の値を計算することができる。

以上により，微分方程式から時刻 $t + \Delta t$ のつぎの発電機の各諸量を計算することができる。

$$\delta^{k+1}, \omega^{k+1}, e_q^{(k+1)}, e_q''^{(k+1)}, e_d''^{(k+1)} \quad (3.25)$$

微分方程式を解くには RungeKutta 法などが用いられる。

step6 $k+1$ における内部誘起電圧の計算

式 (3.25) で求めた $e_q^{(k+1)}$, $e_q''^{(k+1)}$, $e_d''^{(k+1)}$ より $e_{gd}^{(k+1)}$, $e_{gq}^{(k+1)}$ の値を求めることができ，さらに $\delta^{(k+1)}$ を用いれば，次式から $\dot{E}_G^{(k+1)}$ を計算することができる。

$$E_{GD}^{(k+1)} = e_{gd}^{(k+1)} \sin \delta^{(k+1)} + e_{gq}^{(k+1)} \cos \delta^{(k+1)} \quad (3.26)$$

$$E_{GQ}^{(k+1)} = -e_{gd}^{(k+1)} \cos \delta^{(k+1)} + e_{gq}^{(k+1)} \sin \delta^{(k+1)} \quad (3.27)$$

$$\dot{E}_G^{(k+1)} = E_{GD}^{(k+1)} + jE_{GQ}^{(k+1)} \quad (3.28)$$

得られた $\dot{E}_G^{(k+1)}$ を使って step4 に戻り、次の系統状態変化があるまで step4 ~ step6 の計算を繰り返す。

1989年に Glover によって開発されたメタヒューリスティクスであり、大規模な組み合わせ最適化問題に対しても比較的容易に良好な解を発見する手法である [7]。TS の特徴を以下に示す。

- (1) タブーリストの機能による局所解からの脱出
- (2) 山登り法を改良した近傍探索型アルゴリズム

本章ではタブーサーチのアルゴリズム、使用する各パラメータについて述べる。

4.1. タブーサーチのアルゴリズム

タブーサーチは以下に述べる近傍探索の 1 手法と考えることができる。

step1

- (A) 初期解 $x^{init} \in X$ を選択する。
- (B) 現状で知りえる最善の解を $x^{best} \leftarrow x^{init}$ として記録し、 $best_cost \leftarrow c(x^{init})$ とする。

step2 $x^{move} \in N(x^{best})$ を選択する。選択基準を満たすものが $N(x^{best})$ の要素中になく x^{best} が選択できない場合、また他の終了条件が成立した場合手順を終了する。

step3 $x^{best} = x^{move}$ とし、もし $c(x^{move}) < best_cost$ である場合は、step1 の (B) を実行し、step2 に戻る。

ここで X は対象となる問題の解空間を表す集合、 $N(x^{best})$ は解 x からある一定の操作 (move) で到達できる解、 $c(x)$ は解 x により得られる評価値である。

上記の近傍探索の手順では、move を選択する選択条件、探索を終了する終了条件を指定する必要がある。近傍探索の step2 に特別な制約を付け加えると、降下法やモンテカルロ法などの様々な古典的手法となる。タブーサーチも同様に step2 に制約を付け加えたものと考えることができる。

タブーサーチの基本的な発想は、探索手順を制御するためにフレキシブルメモリを用いることである。タブーサーチにおけるこのメモリの機能は、探索の過程で遭遇した

第4章 タブーサーチ

タブーサーチは1989年にGloverによって開発されたメタヒューリスティクスであり、大規模な組み合わせ最適化問題に対しても比較的容易に良好な解を発見する手法である[7]。TSの特徴を以下に示す。

(1) タブーリストの機能による局所解からの脱出

(2) 山登り法を改良した近傍探索型アルゴリズム

本章ではタブーサーチのアルゴリズム、使用する各パラメータについて述べる。

4.1. タブーサーチのアルゴリズム

タブーサーチは以下に述べる近傍探索の1手法と考えることができる。

step1

(A) 初期解 $x^{\text{now}} \in X$ を選択する。

(B) 現状で知りえる最善の解を $x^{\text{best}} = x^{\text{now}}$ として記録し、 $\text{best_cost} = c(x^{\text{best}})$ とする。

step2 $x^{\text{next}} \in N(x^{\text{now}})$ を選択する。選択基準を満たすものが $N(x^{\text{now}})$ の要素になく x^{next} が選択できない場合、また他の終了条件が成立した場合手順を終了する。

step3 $x^{\text{now}} = x^{\text{next}}$ とし、もし $c(x^{\text{now}}) < \text{best_cost}$ である場合は、step1の(B)を実行し、step2に戻る。

ここで X は対象となる問題の解空間を表す集合、 $N(x^{\text{now}})$ は解 x からある一つの操作 (move) で到達できる解、 $c(x)$ は解 x により得られる評価値である。

上記の近傍探索の手順では、moveを選択する選択条件、探索を終了する終了条件を仮定する必要がある。近傍探索のstep2に特別な制約を付け加えると、降下法やモンテカルロ法などの様々な古典的手法となる。タブーサーチも同様にstep2に制約を付け加えたものと考えることができる。

タブーサーチの基本的な発想は、探索手順を制御するためにフレキシブルメモリを用いることである。タブーサーチにおけるこのメモリの機能は、探索の過程で遭遇した

状況に関する履歴 H を記憶し、近傍 $N(x^{\text{now}})$ を H の内容を反映させた近傍 $N(H, x^{\text{now}})$ に修正することである。

タブーサーチでは、探索の履歴を用いて目的関数 $c(x)$ を $c(H, x)$ にすることにより、現時点で到達可能な解の評価の修正、相対的評価を行う。 $N(H, x^{\text{now}})$ が多数の要素をもつ大規模問題や、各要素の評価に手間のかかる問題にタブーサーチを適用する場合、近傍から候補となる部分集合を分離し、近傍全体の代わりにこの候補集合を評価することが重要となる。候補集合の重要性から、これを以下 $CN(x^{\text{now}})$ と記すと、タブーサーチは以下のとおりとなる。

step1 履歴 H を空として近傍探索と同じ初期化を実行する。

step2 $N(H, x^{\text{now}})$ の部分集合として $CN(x^{\text{now}})$ を決定する。 $CN(x^{\text{now}})$ の要素から $c(H, x^{\text{now}})$ を最小化する x^{next} を選択する。設定された繰り返し終了条件を満たせば終了する。

step3 近傍探索と同じ更新を行い、さらに履歴 H を更新する。

4.2. タブー制約

move 属性とは move により発生する変化を特徴づけたものである。この move 属性をタブーリストに記録して、それに逆行する move を選択しないようにすることができる。例えば属性 e を持つ $x^{\text{now}} \rightarrow x^{\text{next}}$ の move が行われると、 e の逆属性をもつ move である $x^{\text{next}} \rightarrow x^{\text{now}}$ を禁止する。この制約をタブー制約という。タブー制約は、制約を定義する属性の逆行を制約するものであり、循環的な move の防止を目的とする。タブー制約は一般に、その属性がある決められた回数の繰り返しの途中で発生したか（至近性による制約）、ある繰り返し期間内にある頻度で繰り返し発生したか（頻度による制約）によって活性化される。

4.3. アスピレーション基準

タブーサーチでは、タブー制約を解除して本来であれば実行できない move を実行するために、アスピレーション基準が導入されている。このアスピレーション基準を利用して、タブーサーチの効果を最大限に発揮することができる。

アスピレーションには move アスピレーションと属性アスピレーションの2種類があ

る。move アスピレーションは move に関するタブー制約を解除し、属性アスピレーションは属性のタブー制約を解除する。

5. SMES の安定化効果の検討

1 ユニット当たり 20 MVA の容量をもつ中規模 SMES を、図 5.1 に示すモデル系統に接続配置することによって、過渡安定度を向上させる手法について本章では検討する。検討においては、系統の各母線に故障が生じた場合を仮定し、それらの故障を総合的に考慮した評価指標を定義する。その評価指標を用いて、タブーサーチにより最適な SMES の配置、サイズを決定する。また SMES を効果的に制御するために、遠隔地信号を用いた制御手法を検討する。そして、SMES 制御にローカル信号のみを用いた場合、遠隔地信号を用いた場合とを比較して計算結果を示す。

5.1. 故障条件

本研究では、系統へのじょう度として全ての母線の至近端における三相地絡故障を想定する。故障はいずれも 0.15 秒間継続し、その後元の状態に戻るものとする。系統に SMES が設置されている場合、故障から復旧した時点で SMES が投入される。過渡計算によって、故障発生から 7 秒間の過渡電圧の過渡応答を求める。

5.2. 評価指標

母線 X (X は全ての母線) での故障に対して J_X を式 (5.1) のように定義する。

$$J_X = \sum_{i=1}^G \int_{0.0}^{1.0} (\Delta\delta_i - \Delta\delta_{i0})^2 dt \quad (5.1)$$

$$\Delta\delta_i = \delta_i - \delta_{\text{cm}} \quad (5.2)$$

$$\Delta\delta_{i0} = \delta_{i0} - \delta_{\text{cm}} \quad (5.3)$$

$$\delta_{\text{cm}} = \frac{\sum_{i=1}^G \delta_{i0} H_i}{\sum_{i=1}^G H_i} \quad (5.4)$$

ここで、 A_i は発電機 i の回転子位相角 (i は母線 A, B, C のいずれか)、 δ_{i0} は発電機 i の回転子位相角の初期値、 δ_{cm} は式 (5.4) で与えられる重心中心、 H_i は発電機 i の単

第5章 位相角動揺を評価指標として用いた最適化による SMESの安定化効果の検討

1ユニット当たり20 MVAの容量をもつ中規模SMESを、図3.1に示すモデル系統に複数台配置することによって、過渡安定度を向上させる手法について本章では検討する。検討においては、系統の各母線に故障が生じた場合を仮定し、それらの故障を総合的に考慮した評価指標を定義する。その評価指標を用いて、タブーサーチにより最適なSMESの配置、ゲインを決定する。またSMESを効果的に制御するために、遠隔地信号を用いた制御手法を検討する。そして、SMES制御にローカル信号のみを用いた場合、遠隔地信号を用いた場合とを比較して計算結果を示す。

5.1. 故障条件

本研究では、系統へのじょう乱として全ての母線の至近端における三相地絡故障を想定する。故障はいずれも0.15秒間継続し、その後元の状態に戻るものとする。系統にSMESが設置されている場合、故障から復旧した時点でSMESが投入される。過渡計算によって、故障発生から7秒間の発電機の過渡応答を求める。

5.2. 評価指標

母線 X (X は全ての母線) での故障に対して J_X を式 (5.1) のように定義する。

$$J_X = \sum_{i=A}^C \int_{0.0}^{7.0} (\Delta\delta_i - \Delta\delta_{i0})^2 dt \quad (5.1)$$

$$\Delta\delta_i = \delta_i - \delta_{\text{cent}} \quad (5.2)$$

$$\Delta\delta_{i0} = \delta_{i0} - \delta_{\text{cent}} \quad (5.3)$$

$$\delta_{\text{cent}} = \frac{\sum_{i=A}^C \delta_i H_i}{\sum_{i=A}^C H_i} \quad (5.4)$$

ここで、 δ_i は発電機 i の回転子位相角 (i は母線 A, B, C のいずれか), δ_{i0} は発電機 i の回転子位相角の初期値, δ_{cent} は式 (5.4) で与えられる慣性中心, H_i は発電機 i の単

位発電機慣性定数である。式 (5.1) で求めた J_X を用いて評価指標 J を式 (5.5) のように定義する。

$$J = \sum_{X=A}^I J_X \quad (5.5)$$

J が小さいほど各発電機の動揺が小さい，すなわち SMES による系統安定化効果が大きいといえることができる。

5.3. SMES の制御

発電機の動揺を抑制するため，SMES は発電機の回転子が加速したときに電力を吸収，減速したときに放出するように制御される。本研究では SMES の制御系の動特性は 1 次遅れでモデル化できるものとし，電力変換装置を含む SMES 自体の遅れは無視できるものとする。SMES の制御系を図 5.1 に示す。

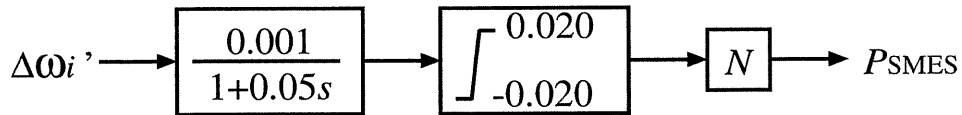


図 5.1: SMES の制御

ここで $\Delta\omega_i'$ は式 (5.6) で表されるように，発電機 j (j は母線 A,B,C のいずれか) の角速度偏差 ($\Delta\omega_j = \omega_j(t) - \omega_0$) に重み α_{ij} を掛けた値の和である。 N は SMES のユニット数， P_{SMES} は SMES の吸収する電力である。SMES1 ユニットあたりの設備容量は 20MVA (0.020 pu) とする。

$$\Delta\omega_i' = \sum_{j=A}^C \alpha_{ij} \Delta\omega_j \quad (5.6)$$

なお，前述のように SMES は有効電力と無効電力を独立に制御可能であるが，本研究では有効電力の制御のみを考える。

5.4. SMES の初期配置決定法

SMES の設置台数の決定には，位相角偏差 $\Delta\delta_{th}$ を閾値として設定し，各発電機の位相角偏差 ($\Delta\delta_i - \Delta\delta_{i0}$) がその閾値を超えないように SMES を配置する。今回は $\Delta\delta_{th}$

を 1[rad] とした。以下にアルゴリズムを示す。

- step1 SMES の配置を $(N_A, N_B, N_C) = (0, 0, 0)$ として系統の初期潮流を計算する。 N_i は母線 i に設置される SMES のユニット数である。
- step2 (N_A, N_B, N_C) に対して過渡計算を行い, $\Delta\delta_i$ を求める。
- step3 $\Delta\delta_i - \Delta\delta_{i0} > \Delta\delta_{th}$ となった場合, $N_i = N_i + 1$ として step2 に戻る。
- step4 各母線の故障を対象にして step1, 2, 3 を行う。

5.5. SMES の配置, ゲインの最適化手法

前節で述べたアルゴリズムにより得られた SMES の配置 (N_{A0}, N_{B0}, N_{C0}) をもとに, SMES の配置 (N_A, N_B, N_C) とゲイン α_{ij} の最適化を以下のアルゴリズムにより行う。

$$\text{ただし } \alpha_{ij0} = \begin{cases} 1 & (i = j) \\ 0 & (i \neq j) \end{cases}$$

- step1 初期配置に対して TABU_α (ゲインの最適化) を行う。
- step2 $\alpha_{ij} = \alpha_{ij0}$ として TABU_SMES (SMES の配置の最適化) を行う。
- step3 step2 で得られた配置に対して TABU_α を行う。
- step4 設定された繰り返し回数に達するまで step2 に戻り, 処理を繰り返す。

ここで TABU_α は以下に示すアルゴリズムである。

- step1** α_{ij} に対して近傍解として $\alpha_{ij} + \Delta\alpha$, $\alpha_{ij} - \Delta\alpha$ を生成し、それぞれ評価値 J を算出する。
- step2** step1 で求めた J を比較し、小さい値をもつ近傍解がタブーリストで禁止されていないならば、その近傍解を選択する。禁止されている場合はもう一方の近傍解に対して同様の処理を行う。どちらの近傍解も禁止されている場合は解を大きく変化させ探索範囲を広げる。
- step3** step2 で採用された近傍解の値をタブーレングスの期間タブー状態とする。
- step4** 各 α_{ij} に対して step1, step2, step3 を行う。
- step5** step4 で得られた解を次の繰り返しの初期解として設定する。
- step6** 設定された繰り返し回数に達するまで step1 に戻り、処理を繰り返す。

ここで $\Delta\alpha$ は動的に変化する値であり、最大値は 1.0、最小値は 0.1 をとり、探索が進むにつれて指数関数的に小さくする。これにより探索初期は広範囲の探索を行い、解が収束を始める探索後期にはより詳細な解の探索が行える。TABU_SMES は以下に示すアルゴリズムである。

- step1** 与えられた配置に対して $\text{move}(i, j)$ で得られる全ての解を近傍解として各評価値を算出する。
- step2** step1 で求めた評価値を比較し、最小のものを与える move がタブーリストで禁止されていないならば選択する。禁止されている場合は次に小さな値を与える move に対して同様の処理を行う。
- step3** step2 で採用した move を $\text{move}(i, j)$ とした場合、 $\text{move}(j, i)$ をタブーレングスの期間禁止する。
- step4** step2 で得られた解を次の繰り返しの初期解として設定する。
- step5** 設定された繰り返し回数に達するまで step1 に戻り、処理を繰り返す。

ここで $\text{move}(i, j)$ は母線 i の SMES を 1 台増やし、母線 j の SMES を 1 台減らす処理である (i, j は母線 A, B, C のいずれかであり、 $i \neq j$)。アスピレーション基準は過去に得られた最小の J より小さな場合とした。

5.6. ローカル信号を用いた SMES 制御によるシミュレーション結果

SMES の配置, ゲインの最適化をするために, まず 5.4 節で述べたアルゴリズムにより, 必要な SMES の台数を求めた。その結果, $(0, 26, 0)$ の配置が得られた。

$(0, 26, 0)$ を初期配置として前節のアルゴリズムでローカル信号のみでの制御 ($i \neq j$ の時, $\alpha_{ij} = 0$) を用いて SMES の配置, ゲインの最適化を行った。その結果を表 5.1 に示す。また各母線故障時の J_X を表 5.2 に示す。

表 5.1: SMES の配置, ゲインの最適化結果

利用信号	(N_A, N_B, N_C)	制御入力
ローカル信号	$(0, 26, 0)$	$\omega'_B = 0.7\omega_B$
遠隔地信号	$(0, 26, 0)$	$\omega'_B = -1.4\omega_A + 0.1\omega_B + 1.1\omega_C$

表 5.2: 各故障点における評価値

故障母線 X	SMES 非設置	J_X (ローカル信号)	J_X (遠隔地信号)
A	1.866	0.545	0.421
B	3.186	1.111	0.995
C	2.104	0.658	0.593
D	2.204	0.606	0.487
E	1.941	0.576	0.460
F	1.766	0.510	0.392
G	3.034	1.038	0.933
H	2.397	0.764	0.658
I	2.330	0.744	0.670
J	20.649	6.551	5.609

表 5.1 からわかるように、母線 B に SMES を集中配置する結果となった。これは他の母線故障時と比較して母線 B、G 故障時に動揺が大きくなるため、これらの故障を効果的に抑制できる母線 B に SMES が配置されたと考えられる。

次に SMES による過渡安定度の向上効果を見るために、SMES 非設置時、表 5.1 のローカル信号のパラメータを用いた場合について、母線 B での故障に対する各発電機の過渡応答を図 5.2 に示す。図 5.2 の位相角は $\Delta\delta_i - \Delta\delta_{\text{cent}}$ を表す。故障箇所に母線 B を選んだのは、表 5.2 からわかるようにその他の母線故障時と比較して最も大きな動揺が生じるためである。グラフから SMES の配置により、振動の第一波を抑制し、その後の振動の減衰も大きく改善できていることがわかる。

次に母線 B の故障に対して、SMES の応答を図 5.3 に示す。SMES は発電機が加速したときに電力を吸収、減速したときに電力を放出することにより発電機の動揺を抑制している。このとき SMES の出力は、そのユニット数に応じて定められた最大電力によって制限されていることがわかる。

5.7. 遠端地信号を用いた SMES 制御によるシミュレーション結果

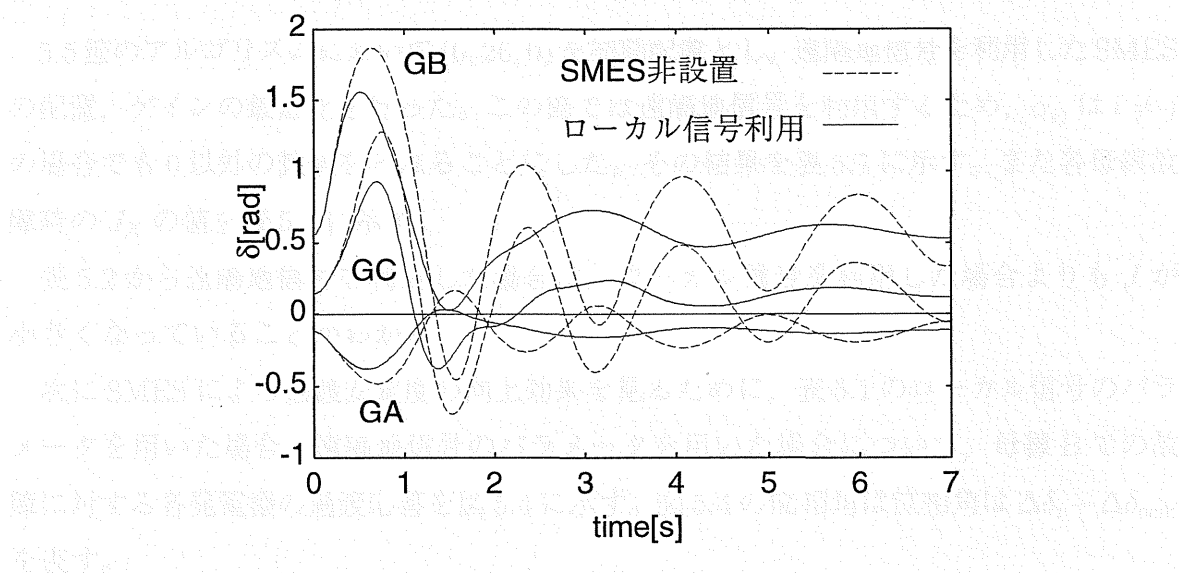


図 5.2: ローカル信号による制御時の発電機の過渡応答

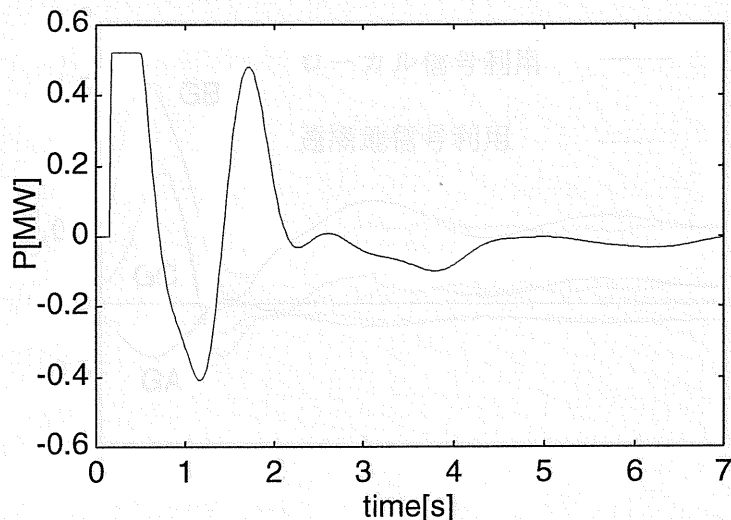


図 5.3: ローカル信号による制御時の母線 B の SMES の吸収する電力

5.7. 遠隔地信号を用いた SMES 制御によるシミュレーション結果

5.5 節のアルゴリズムにおいて $(0, 26, 0)$ を初期配置とし、遠隔地信号を利用した SMES の配置、ゲインの最適化を行った。この節では遠隔地信号を利用するため、 α_{ij} は $i \neq j$ の場合でも 0 以外の数値をとれることにした。その結果を表 5.1 に示す。また各母線故障時の J_X の値を表 5.2 に示す。

表 5.2 から遠隔地信号を利用した場合は、ローカル信号を利用した場合よりも J が小さくなっていることがわかる。

次に SMES による過渡安定度の向上効果を見るために、表 5.1 のローカル信号のパラメータを用いた場合、遠隔地信号のパラメータを用いた場合について、母線 B での故障に対する各発電機の過渡応答を図 5.4 に示す。図 5.4 の位相角は位相角は $\Delta\delta_i - \Delta\delta_{\text{cent}}$ を表す。



図 5.4: 遠隔地信号による制御時の SMES の吸収する電力

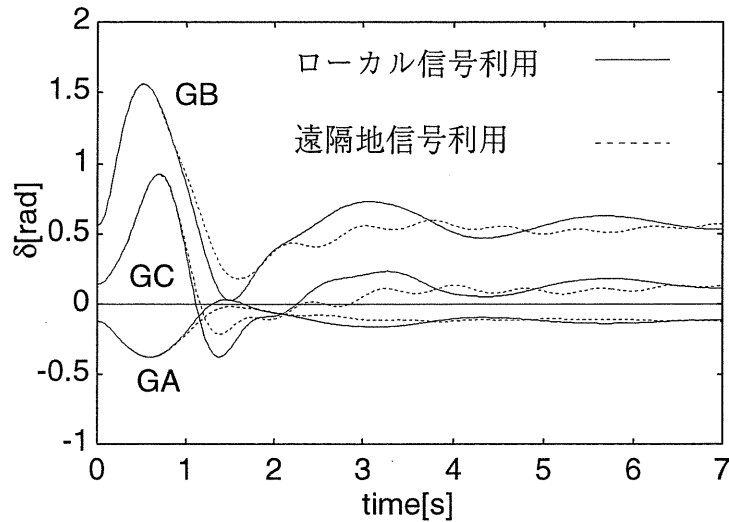


図 5.4: 遠隔地信号による制御時の発電機の過渡応答

グラフからわかるように遠隔地信号を利用した場合はローカル信号のみを用いて制御した場合より、位相角動揺が早く初期値に収束することがわかる。このため J が小さくなったと考えられる。しかし遠隔地信号を用いた場合、第一波動揺後に周期の短い動揺が生じていることがわかる。これは式 (5.5) で定義した評価指標では位相角偏差が小さくなれば、上記のような動揺が生じた場合でも評価が高くなるためである。

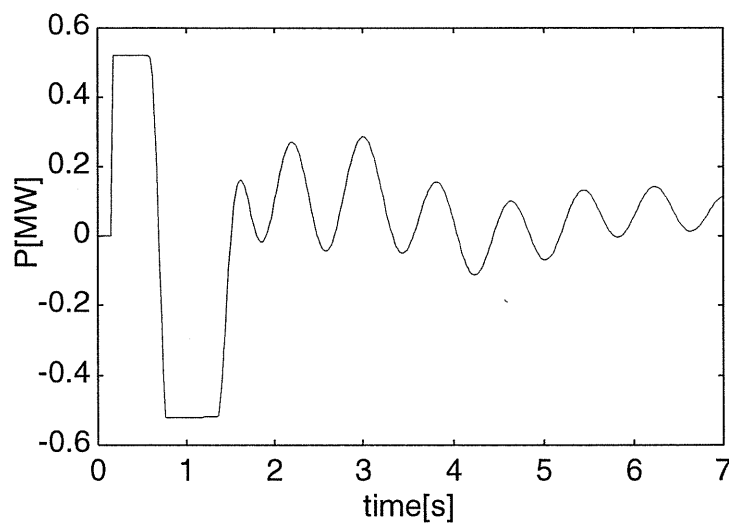


図 5.5: 遠隔地信号による制御時の SMES の吸収する電力

母線 B の故障に対して、SMES の応答を図 5.5 に示す。図 5.5 は 図 5.3 と比較して、2 秒以降に SMES が電力を吸収する傾向にあることがわかる。これは図 5.2 からわかるように、発電機 B、C では 2 秒付近で過渡動揺第二波が発生し、発電機が加速を始めるため位相角の 2 乗偏差が増加する。この第一波以降の振動のピーク値を減少させることができれば、評価値が改善できることがわかる。このため母線 B に設置された SMES は発電機 C の加速により生じる電力も吸収することで、発電機 B、C の第一波後の動揺を抑制していると考えられる。

第6章 位相角偏差，角速度偏差を評価指標として用いた 最適化による SMES の安定化効果の検討

位相角偏差を評価指標としてゲインの最適化を行った場合，周期の短い動揺が生じている場合でも良好な解として認識される場合があることが前章で判明した。本章では上記の動揺を抑制するため，角速度動揺を考慮に入れた評価指標を定義する。そして最適化手法により適切な SMES 制御のパラメータを探索し，SMES による過渡安定度向上効果について検討を行う。

6.1. 評価指標

位相角動揺が生じている場合，位相角の微分値である角速度は大きく変動している。そこで角速度の変動を小さくすれば，位相角の動揺を抑制できると考えられる。しかし角速度の変動を大幅に抑制した場合，位相角が初期値に収束しない場合がある。そこで母線 X (X は全ての母線) での故障に対して K_X を式 (6.1) のように定義する。

$$K_X = \sum_{i=A}^C \int_{0.0}^{7.0} (\Delta\omega_i)^2 dt \quad (6.1)$$

$$K = \sum_{X=A}^I K_X \quad (6.2)$$

ここで， $\Delta\omega_i$ は発電機 i の角速度偏差である。式 (5.5)，式 (6.2) を用いて新たな評価指標 L を次のように定義する。

$$L = J + \beta K \quad (6.3)$$

J ， K は次元が異なるため， β により調整を行う。 L が小さいほど各発電機の動揺が小さい，すなわち SMES による系統安定化効果が大であるといえることができる。

6.2. ローカル信号を用いた SMES 制御によるシミュレーション結果

式 (6.3) 中の β の値を変化させ，故障条件，SMES の制御法，初期設置台数，最適化手法は前章と同様のものを使用し，ローカル信号を用いた SMES 制御 ($i \neq j$ の時，

$\alpha_{ij} = 0$) を行ったシミュレーション結果を示す。

表 6.1: ローカル信号による制御時の各 β における評価値

β	SMES の配置	制御入力	J	K	L
0.00	(0,26,0)	$\omega'_B = 0.8\omega_B$	6.560	88.217	6.560
0.01	(0,26,0)	$\omega'_B = 0.8\omega_B$	6.560	88.217	7.442
0.05	(0,26,0)	$\omega'_B = 1.1\omega_B$	6.649	84.992	10.899
0.10	(0,25,1)	$\omega'_B = 1.4\omega_B$ $\omega'_C = 1.4\omega_C$	6.782	83.015	15.0832
0.15	(0,25,1)	$\omega'_B = 1.6\omega_B$ $\omega'_C = 2.1\omega_C$	6.866	82.526	19.245
0.50	(0,25,1)	$\omega'_B = 2.3\omega_B$ $\omega'_C = 4.3\omega_C$	7.137	82.188	48.231
1.00	(0,25,1)	$\omega'_B = 2.5\omega_B$ $\omega'_C = 4.6\omega_C$	7.206	82.249	89.451
5.00	(0,25,1)	$\omega'_B = 2.9\omega_B$ $\omega'_B = 5.3\omega_C$	7.333	82.439	419.527

表 6.1 からわかるように、全般的に母線 B に SMES が集中する結果となった。これは母線 B, G 故障時に位相角、角速度ともに動揺が大きくなるためであると考えられる。また β が増加するに従い、 K の改善が高く評価されるため、逆に J の値が悪化していることがわかる。

次に SMES による過渡安定度の向上効果を見るために、 $\beta = 0, 0.15, 0.5, 5.0$ に対して、表 6.1 のパラメータを用いた場合について、母線 B での故障に対する発電機 B の応答をシミュレーションした。結果を図 6.1, 図 6.2 に示す。図 6.1, 図 6.2 中の位相角、角速度偏差はそれぞれ $\Delta\delta_i - \Delta\delta_{\text{cent}}$, $\Delta\omega_i$ をあらわす。

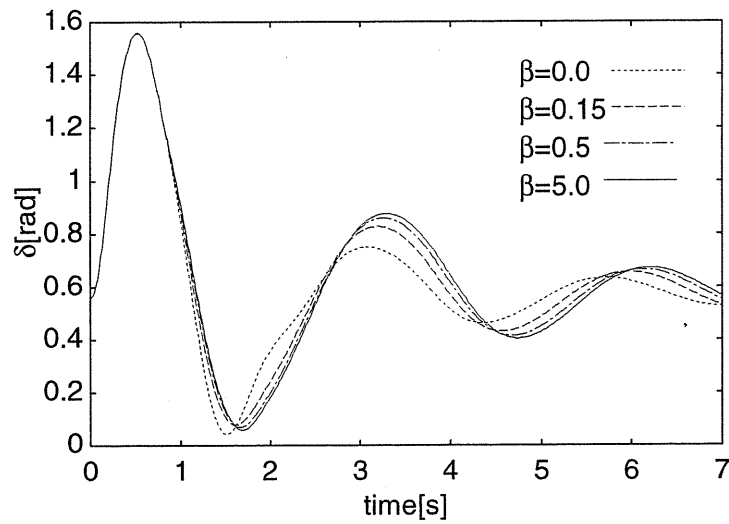


図 6.1: ローカル信号制御を行った場合の β 変化時の発電機 B の位相角

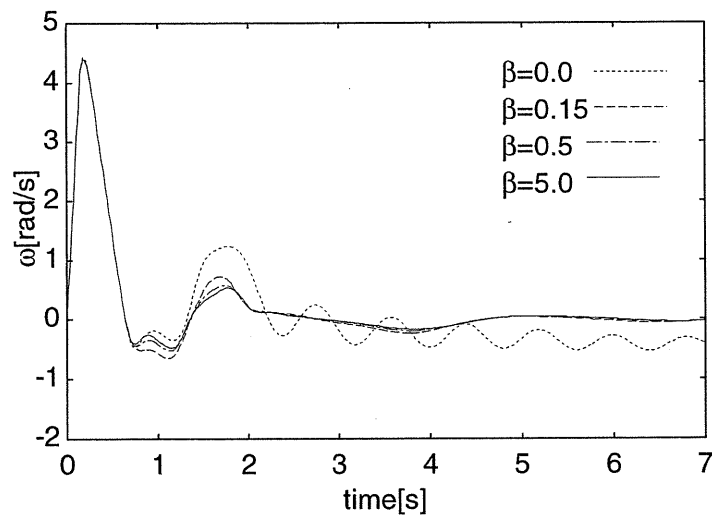


図 6.2: ローカル信号制御を行った場合の β 変化時の発電機 B の角速度偏差

図 6.1 のグラフから、 β が増加するにつれ、第二波以降の動揺が大きくなっていることがわかる。図 6.1 と図 6.2 のグラフを併せて考察すると、 β の値が増加するに従って、位相角偏差が生じている場合でも角速度偏差が抑制されるため、位相角の収束性が悪化したと考えられる。

上記より、ローカル信号を用いた SMES 制御では、評価指標 J のみを用いて最適化を行った場合、位相角に周期の短い動揺が生じていなかったため、角速度偏差を考慮にいれると解が悪化したことがわかる。

6.3. 遠隔地信号を用いた SMES 制御によるシミュレーション結果

式 (6.3) 中の β の値を変化させ、故障条件、SMES の制御法、初期設置台数、最適化手法は前章と同様のものを使用し、遠隔地信号を用いた SMES 制御を行ったシミュレーション結果を表 6.2 に示す。

表 6.2 に示すように、全般的に母線 B に SMES が集中する結果となった。これは前節で述べたように母線 B、G 故障時に位相角、角速度ともに動揺が大きくなるためである。また β が増加するに従い、 K の改善が高く評価されるため、逆に J の値が悪化していることがわかる。

次に SMES による過渡安定度の向上効果を見るために、 $\beta = 0, 0.15, 0.5, 5.0$ に対して、表 6.2 のパラメータを用いた場合について、母線 B での故障に対する各発電機のシミュレーションを行った。結果を図 6.3，図 6.4 に示す。図 6.3，図 6.4 はそれぞれ $\Delta\delta_i - \Delta\delta_{\text{cent}}$ ， $\Delta\omega_i$ を表す。

図 6.3 のグラフから、 β が小さいと周期の短い動揺が生じているが、 β が増加するにつれ動揺が抑制されていることがわかる。これは図 6.4 のグラフからわかるように、角速度の動揺が抑制されているためであると考えられる。

上記より、遠隔地信号を用いた SMES 制御では、角速度偏差を考慮にいれた最適化をおこなった場合、位相角の短周期的な動揺を抑制できることがわかった。しかし、角速度偏差を大きく抑制すると、位相角が初期値に収束するために要する時間が増加するため、 β の適切な設定が必要であることがわかった。この制御系統においては $\beta = 0.15$ の程度の値が適切であると考えられる。

表 6.2: 遠隔地信号による制御時の各 β における評価値

β	SMES の配置	制御入力	J	K	L
0.00	(0,26,0)	$\omega'_B = -1.4\omega_A + 0.1\omega_B + 1.1\omega_C$	5.604	100.189	5.604
0.01	(0,26,0)	$\omega'_B = -1.3\omega_A + 0.3\omega_B + 1.1\omega_C$	5.662	90.445	6.566
0.10	(0,25,1)	$\omega'_B = -0.7\omega_A + 0.6\omega_B + 0.7\omega_C$ $\omega'_C = -2.9\omega_A - 3.2\omega_B + 8.1\omega_C$	5.691	83.162	14.293
0.15	(0,25,1)	$\omega'_B = -0.8\omega_A + 0.4\omega_C + 0.9\omega_C$ $\omega'_C = -2.0\omega_A - 3.8\omega_B + 10.9\omega_C$	5.927	83.450	18.445
0.50	(0,23,3)	$\omega'_B = -0.6\omega_A + 0.7\omega_B + 0.7\omega_C$ $\omega'_C = -0.4\omega_A - 3.8\omega_B + 11.2\omega_C$	6.296	81.484	47.038
1.00	(0,23,3)	$\omega'_B = -3.3\omega_A + 2.0\omega_B + 1.2\omega_C$ $\omega'_C = -1.2\omega_A - 5.6\omega_B + 14.7\omega_C$	6.430	81.253	87.682
5.00	(0,23,3)	$\omega'_B = -0.4\omega_A + 1.2\omega_B + 0.5\omega_C$ $\omega'_C = -0.6\omega_A - 5.6\omega_B + 14.3\omega_C$	6.972	46.845	241.196

しかし β が 0.15 より増加するにつれ、位相角の初期値への収束に要する時間が増加傾向にあることがわかる。これは前節で述べたように、角速度偏差の抑制効果が高いと、位相角偏差が生じている場合でも角速度が変化しないため、位相角が初期値に収束しにくくなったからであると考えられる。

上記より、遠隔地信号を用いた SMES 制御では、角速度偏差を考慮にいたした最適化をおこなった場合、位相角の短期的な動揺を抑制できることがわかった。しかし、角速度偏差を大きく抑制すると、位相角が初期値に収束するために要する時間が増加するため、 β の適切な設定が必要であることがわかった。この例題系統においては $\beta = 0.15$ 程度の値が適切であると考えられる。

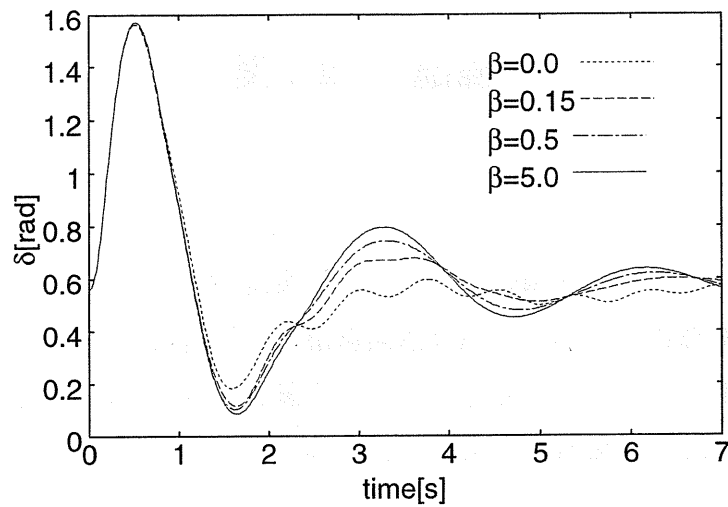


図 6.3: 遠隔地信号制御を行った場合の β 変化時の発電機 B の位相角

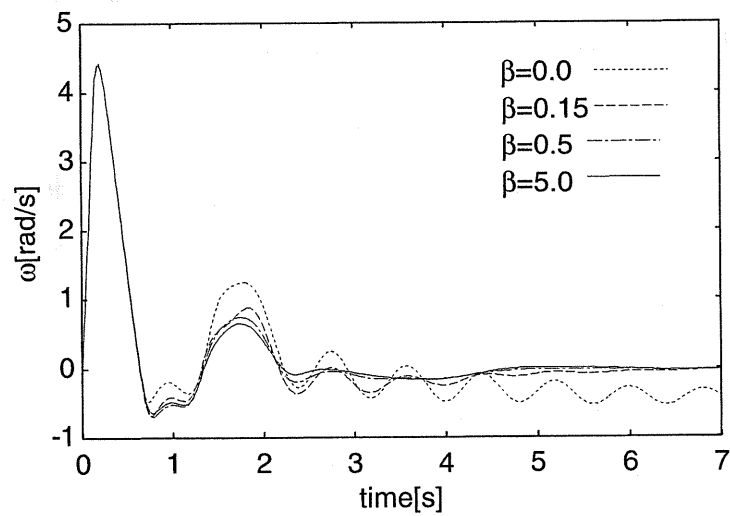


図 6.4: 遠隔地信号制御を行った場合の β 変化時の発電機 B の角速度偏差

第7章 結論

本研究では、3機9母線系統を対象として、SMESを導入することにより過渡安定度向上を効率的におこなう手法を提案した。SMESの配置、ゲインの最適化はタブーサーチによりおこない、評価指標に位相角偏差を用いた場合、角速度偏差に重み β を乗じた値と位相角偏差の和を用いた場合について検討した。また、遠隔地信号を用いたSMESの制御系を提案し、ローカル信号のみを用いた制御系と比較をおこなった。結果を以下に要約する。

1. 例題系統において、SMESの設置により位相角の第一波動揺のピーク値の抑制、第一波動揺後の振動の減衰の改善がおこなえた。
2. 位相角偏差を評価指標として最適化をおこなった場合、遠隔地信号を用いたSMESの制御系では位相角の2乗偏差は減少するが、第一波動揺後に周期の短い動揺が生じることが判明した。
3. 角速度偏差に重み β を乗じた値と位相角偏差の和を評価指標として最適化をおこなった場合、ローカル信号を用いたSMESの制御系では β を増加するにつれ、位相角偏差が悪化する結果を得た。また遠隔地信号を用いたSMESの制御系では β が増加するにつれ、第一波後の位相角動揺が抑制されることが明らかになった。しかし、 β が大きくなりすぎると位相角が初期値に収束する時間が増加した。このため、例題系統では $\beta = 0.15$ 程度が適切であった。
4. β の値を適切に設定して最適化をおこなった場合、ローカル信号のみを用いたSMES制御よりも、遠隔地信号を用いたSMES制御の方が、位相角動揺を改善する効果が高いことが判明した。

参考文献

- [1] 寺田治, 世永茂, 長野俊幸, 渡辺雅浩, 小西博雄:「揚水機と負荷系統の安定化を考慮したパワエレ機器導入効果の検討」,
平成9年電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会, PE-97-163, PSE-97-163,
pp.25-30 (1997).
- [2] 寺田治, 世永茂, 長野俊幸, 渡辺雅浩, 小西博雄:「揚水機の動揺抑制と負荷系の電圧安定化を考慮したパワエレ機器導入効果の評価」,
平成9年電気学会電力・エネルギー部門大会, No.162 (1997).
- [3] 入江富士男:「超電導エネルギー貯蔵 (SMES) の開発状況と課題」,
電学論 B, Vol.116-B, No.9, pp.1029-1032 (1996).
- [4] 根尾定紀:「超電導電力貯蔵システム (SMES) の開発状況と将来展望」,
電気評論, pp.49-54 (1997).
- [5] J. B. Howe, L. T. Borgard: "Industrial Power Quality Solution Adapted to Address
Transmission Grid Problems,"
Power Value, November/December, pp.42-45 (1999).
- [6] 関根泰次: 電力系統過渡解析論,
オーム社, pp.377-404 (1984).
- [7] Colin R. Reeves: モダンヒューリスティックス (組合せ最適化の先端手法),
日刊工業新聞社, pp.73-106 (1997).