



Title	高速移相器による電力動揺線形化に基づく電力系統のロバスト安定化制御に関する研究
Author(s)	北條, 昌秀
Citation	大阪大学, 1999, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.11501/3155401
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

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

The University of Osaka

高速移相器による電力動揺線形化に基づく
電力システムのロバスト安定化制御に関する研究

1999 年

北 條 昌 秀

内容梗概

本論文は、著者が大阪大学大学院工学研究科博士後期課程在学中に行ってきた、高速移相器を用いた電力動揺の線形化による電力系統の安定化制御のロバスト性向上に関する研究成果をまとめたものである。

近年、電力系統においては、高機能・大容量化の進む電力変換器を応用した制御により諸問題の解決を図るといった機運が高まってきている。系統安定化制御についても、安定度向上に寄与すると期待されながらも従来技術的に困難とされていた制御方式が見直されてきている。とりわけ、電力系統の非線形性を考慮に入れたロバスト性の高い系統安定化制御方式が求められている。本研究は、高速移相器を用いて発電機の出力電力を直接的に制御し電力動揺を線形化することによって電力系統の安定化制御のロバスト性向上を図ったものであり、以下の7章より構成される。

第1章では、電力系統の安定化制御に関して、問題点と現在の技術動向について述べ、本研究の目的を明らかにしている。

第2章では、本研究で電力系統の制御機器として用いる高速移相器について説明し、その容量に対する制御能力を電力相差角曲線上において制御可能領域として定義している。また、定義した制御可能領域を用いて過渡安定度の向上効果の評価を行っている。さらに、制御可能領域を有効に利用できる系統安定化制御方式についての検討を加えている。

第3章では、高速移相器の制御可能領域を有効に利用できる制御の一つとして、厳密な空間線形化手法に基づき、電力動揺を線形化する制御方式の導出を行っている。また、電力相差角曲線上において電力動揺線形化の概念を解説し、ロバストな系統安定化制御の設計指針を与えている。

第4章では、電力動揺線形化に基づく系統安定化制御系を高速移相器を用いて構成する方法について詳しく述べている。シミュレーション解析に基づき制御系の制御特性並びにロバスト性の評価を行っている。

第5章では、発電機出力の制御機器として超伝導エネルギー貯蔵装置を用いた場合の電力動揺線形化による系統安定化制御系を構成し、シミュレーション解析に基づいて制御特性並びにロバスト性の評価を行っている。さらに、高速移相器による同制御との比較検討を行っている。

第6章では、高速移相器を含む模擬電力系統に対して電力動揺線形化による系統安定化制御を実装し、系統安定化実験を行った結果について述べている。実験結果に基づき制御系の特性評価を行い、提案する制御系の有効性について述べている。

第7章では、本研究により得られた結果を総括している。

目次

第1章 緒論	1
参考文献	3
第2章 高速移相器による電力系統の制御可能領域の定義と系統安定化の評価	7
2.1 緒言	7
2.2 高速移相器の制御可能領域の定式化	7
2.3 電力相差角曲線における高速移相器の制御可能領域	10
2.4 瞬時値解析による制御可能領域の検証	11
2.5 制御可能領域に基づく過渡安定度向上効果の評価	15
2.6 制御可能領域に基づく電力系統の安定化制御の検討	16
2.7 結言	17
参考文献	17
第3章 電力動揺線形化制御の概念と系統安定化制御への応用	19
3.1 緒言	19
3.2 厳密空間線形化による電力動揺線形化	19
3.3 電力動揺線形化制御の概念	23
3.4 電力動揺線形化制御を用いた電力系統のロバスト安定化制御	25
3.5 結言	27
参考文献	27
第4章 高速移相器を用いた電力動揺線形化制御の構成と評価	29
4.1 緒言	29
4.2 高速移相器を含む電力系統モデル	29
4.3 高速移相器による電力動揺線形化制御の有効性	32
4.4 高速移相器による発電機電力制御	33
4.5 実系統への応用を考慮した電力動揺線形化制御系の構成	34
4.6 シミュレーション解析に基づく制御特性とロバスト性の評価	36
4.7 結言	39
参考文献	39
第5章 超伝導エネルギー貯蔵装置による電力動揺線形化制御との比較	41
5.1 緒言	41
5.2 超伝導エネルギー貯蔵装置による発電機電力制御	41

5.3	超伝導エネルギー貯蔵装置による電力動揺線形化制御システムの構成	42
5.4	シミュレーション解析に基づく制御特性とロバスト性の評価	43
5.5	高速移相器を用いた系統安定化制御との比較検討	48
5.6	結言	49
	参考文献	49
第 6 章	高速移相器を含む模擬電力系統における系統安定化実験に基づく検討	51
6.1	緒言	51
6.2	高速移相器を含む模擬電力系統の構成	51
6.3	電力動揺線形化に基づく模擬電力系統の安定化制御系の構築	53
6.4	高速移相器による発電機電力の制御実験	56
6.5	系統安定化実験による制御特性の評価	57
6.6	結言	62
	参考文献	63
第 7 章	結論	65
	謝辞	67
	研究業績目録	69

第1章 緒論

近年の電力需要の増大に伴い、技術革新による発送電設備の大容量化と経済性・信頼性などの利点から地域間連系が進められた結果、電力系統は常時莫大なエネルギーを扱う大規模なシステムとして成長してきた [1]。しかし、現代の社会では、用地の確保や燃料の輸送などの問題から、電力需要の集中する大都市近辺に大規模な発電設備を設けることは困難となっている。このため、こうした大容量発電設備は、必然的に電力の大消費地である都市部から遠隔地に置かざるを得なくなり、これに伴って送電線も長距離化する傾向にある。需要地の近傍での新しい電気エネルギー源として、分散型電源とその周辺技術についても研究開発が進められているが、依然として電力需要の大部分は大容量発電設備からの長距離送電に頼っているのが現状である。こうした長距離大容量送電系統は、重負荷時に送電線の両端の位相差が開くことなどの理由から安定度が問題となりやすい。安定度の改善のためには送電線の増設による送電容量の拡充が最も直接的で有効な対策と考えられるが、送電線増設により電流容量からみた設備利用率が低下するため経済的でないという理由や環境あるいは立地上の制約から、現在では送電線の新設は困難となっている。長距離送電系統においては、安定度によって決まる送電容量が熱容量を下回るため、系統安定化制御によって安定度を向上させ、熱容量から決まる送電容量まで既設送電線の送電能力を最大限活用することが重要な課題となっている。

電力系統が安定に運転されている状態とは、系統内のいかなる場所においても電圧及び周波数がほぼ既定値に維持され、かつ有効・無効電力のバランスがとまれている状態をいう [2]。通常、電力系統の安定性を議論する場合には、この安定な状態にある系統になんらかの外乱、例えば負荷の急変や落雷事故等による故障などが生じた場合に、その後の系統の運転が継続可能か否かを問題にする。

想定する外乱の程度によって、電力系統が平衡状態を回復する能力には差が生じる。すなわち、安定度の議論は外乱の程度によって区別され、一般には、微小な擾乱に対して平衡状態を維持しうる能力を定態安定度とし、短絡故障などによってこの平衡状態が大きく崩れた場合に再び平衡状態に回復しうる能力を過渡安定度として大別される。微小な外乱に対して安定性を考慮する場合のうち、自動電圧調整器（AVR: Automatic Voltage Regulator）や調速機等の制御系の動特性も考慮に含める場合は動態安定度として区別されることもある。動態安定度は、平衡点近傍での線形近似モデルの固有値により議論することができる。従って、この場合の系統安定化制御の設計は、線形制御理論の適用により十分対応できる。しかし、過渡安定度の領域となる大きな擾乱に対しては、電力系統の非線形性が無視できなくなり、平衡点での線形近似は成り立たなくなる。そのため、平衡点近傍での近似線形化モデルに対して設計された線形制御系では、十分な制御効果が得られない場合が生じる。

また、系統構成の変更や発電機の運転状態の変更などによって平衡点が変化すると、非線

形性に起因して平衡点の近傍の動特性も変化する。電力系統では負荷や構成が常に変化するため、ある平衡点における近似線形化モデルに基づいて設計された線形制御系では、最適な制御効果を維持するために常時チューニングが必要となる場合も考えられる。

以上のような安定度の観点から、電力系統の安定化制御には、非線形性に起因して系統の動特性が変化するなかにあっても常に安定な運転状態を維持することが要求される。こういった要求に応えるため、非線形制御理論や適応制御理論などの新しい制御理論 [3] の系統安定化制御における有効性が評価されてきた。AVR に設置される電力系統安定化回路 (PSS: Power System Stabilizer) への応用としては、例えば、平衡点近傍のみならず状態空間全体にわたってシステムを線形化する厳密な空間線形化に基づく設計 [4, 5] やセルフチューニング型の適応 PSS [6] などの例が報告されている。このように非線形性を考慮に入れた系統安定化制御では、その制御装置に対して高速性や連続性などが要求されることから、従来は AVR, PSS といった励磁系や調速機のような発電機制御系への適用が主流であった。

一方で、近年のパワーエレクトロニクス関連技術の発展により、電力変換装置の高速・大容量化が急速に進んでいる。こういった新しいパワーエレクトロニクス機器を電力系統の制御に応用して交流送電系統の諸量の制御性を高めることにより、既設の送電線の持つ送電能力を最大限に活用しようという動きが活発になっている。いわゆる、米国 EPRI の Hingorani 氏により提唱された Flexible AC Transmission Systems (FACTS) 構想である [7]。FACTS 構想に基づく新しい系統制御機器（以下では単に FACTS 機器, FACTS Apparatus [8] と呼ぶ）には、送電線潮流のような電力系統の諸量を高速かつ自由に制御することを目的とした様々な機器構成が提案されており [9]、電力系統における諸問題の解決のための新たな選択肢として大きな期待が寄せられている [10]。

FACTS 機器は、系統への接続形態によって直列機器と並列機器に大別される [9]。

直列機器に分類される機器のひとつに高速移相器が挙げられる。高速移相器は送電線に直列に接続された移相変圧器を介して電圧を印加することにより、その両側のノード電圧間の位相差を制御し、結果として送電線の潮流を制御することが可能なパワーエレクトロニクス機器である。高速移相器の構成及び制御系には、位相制御のための電圧を供給する直列変換器の背後電圧の供給方法によって様々な方式が提案されている。例えば、並列変圧器を介して系統電圧を変圧した交流電圧を利用するもの [11]、直列変換器の背後電圧を直流側に設置したコンデンサで供給し、装置内の損失についても直列変圧器を介してインバータ自身で補償する、Static Synchronous Series Compensator (SSSC) [12] の構成のもの、さらには SSSC に並列変換器を加えて制御の自由度をさらに高めた、Unified Power Flow Controller (UPFC) [13] の構成のもの [14, 15] など高速移相器に分類される。その他、直列機器に属する FACTS 機器としては、Thyristor Controlled Series Capacitor (TCSC) [16, 17]、Thyristor Switched Series Capacitor (TSSC) [18] などが挙げられる。

一方、並列機器には、Static Var Compensator (SVC) の他、自励式 SVC (SVG: Static Var Generator) [19] の他、Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES) [20]、Thyristor Controlled Braking Resistor (TCBR) [21] などがこれに分類される。

さらに直列機器と並列機器の組み合わせ機器として、UPFC にエネルギー貯蔵として SMES を組み合わせた SuperSMES についてはその優れた制御効果がシミュレーション並びに実験により報告されている [22, 23]。

現況では、並列型 FACTS 機器に関しては SVC や自励式 SVC などには既に実運用に供されている [24]。SMES についてもいくつかの機関においてフィールド試験が実施されている。一方、直列機器に関してもサイリスタ制御型の直列コンデンサが実用化されており、UPFC のように移相機能を持つ機器もフィールド試験を行う段階に達している。このように、FACTS 機器の実用化への取り組みが続けられており、その応用としては、ループ潮流制御への応用や送電損失の低減化、安定度向上による送電能力の向上などが考えられている [25]。このような系統制御機器の高機能化を受けて、系統安定化制御において、これまでは実現が困難とされてきた高度な制御系が再び注目を浴びている。例えば、制御系の構造を変えることでシステムを所望の特性に拘束するといったスライディングモード制御 [26] を直列可変インピーダンスに適用した例 [27] や、フィードバックによる線形化に基づいた SVC と高速移相器による系統安定化制御 [28] などが挙げられる。

こうした系統安定化制御に関する研究の新潮流のなかで、本研究では、FACTS 機器のなかでもその高速かつ滑らかな潮流制御機能が評価されている高速移相器を用いて、発電機出力を直接制御して電力動揺を線形化する制御方式を提案している。以下ではこの提案制御を電力動揺線形化制御と呼ぶことにする。電力動揺線形化制御は、設計時に系統の同期化力と制動を制御系の仕様として与え、発電機出力を直接制御して常にこの仕様を実現するというものである。従って、系統の運用状態が変更されるような場合にも、制御系の再設計を必要とせず、一定の制御効果が得られるといった、ロバストな系統安定化の実現が期待される。

本論文では、以下の各章で、高速移相器の発電機制御における制御可能領域の定義を行い、その領域を有効に利用する制御として電力動揺線形化制御を提案し、その原理から制御系構成、さらに模擬実験装置への実装例までを詳述する。

参考文献

- [1] 芹澤：「電力システム工学」，丸善，1996.
- [2] 関根，林，芹澤，豊田，長谷川：「電力系統工学」，コロナ社，1979.
- [3] 新世代の制御理論応用調査専門委員会：「新世代の制御理論応用」，電気学会技術報告，第 648 号，1998.
- [4] 高木，曾我部，平山，重政：「空間線形化を用いた電力系統安定化系の設計」，計測自動制御学会論文集，29 巻，2 号，pp.194-200，1993.
- [5] 南部，大澤：「発電所内情報を利用した非線形補償形系統安定化制御方式の開発」，電気学会論文誌 B，116 巻，6 号，pp.662-670，1996.
- [6] S. J. Chen. *et al.*, "Damping of Multi-Modal Oscillations in Power Systems Using a Dual-Rate Adaptive Stabilizer", IEEE Trans. on Power Systems, Vol.3, No.1, pp.101-108, 1988.

- [7] N. G. Hingorani: "High Power Electronics and Flexible AC Transmission System", IEEE Power Engineering Review, pp.3-4, July 1988.
- [8] A. A. Edris *et al.*, "Proposed Terms and Definitions for Flexible AC Transmission System (FACTS)", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 12, No. 4, pp.1848-1853, 1997.
- [9] IEEE FACTS Working Group and CIGRE FACTS Working Group, "FACTS Overview", IEEE 95 TP 108, 1995.
- [10] IEEE Power Engineering Society, "FACTS Applications", IEEE 96 TP 116-0, 1996.
- [11] M. R. Iravani, P. L. Dandeno, K. H. Nguyen, D. Zhu, D. Maratukulam, "Applications of Static Phase Shifters in Power Systems", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 9, No. 3, pp.1600-1607, July 1994.
- [12] K. K. Sen, "SSSC - Static Synchronous Series Compensator: Theory, Modeling, and Applications", IEEE Trans. on Power, Vol. 13, No. 1, pp.241-246, January 1998.
- [13] L. Gyugi, C. D. Schauder, S. L. Williams, T. R. Rietman, D. R. Torgerson and A. Edris: "The Unified Power Flow Controller: A New Approach to Power Transmission Control", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 10, No. 2, pp.1085-1097, April 1995
- [14] 渡辺, 藤田, 赤木:「電力系統の潮流制御を目的とした高速移相器の制御法と過渡特性」, 電気学会論文誌 D, 117 巻, 11 号, pp.1327-1333, 1997.
- [15] 江口, 徳田, 上村, 平山, 嶋田:「半導体化高速移相器による可変リアクタンス装置 (電圧変動の補償)」, 電気学会論文誌 B, 116 巻, 8 号, pp.1007-1014, 1996.
- [16] S. G. Jalali, R. H. Lasseter, I. Dobson, "Dynamic Response of a Thyristor Controlled Switched Capacitor", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.9, No.3, pp.1609-1615, 1994.
- [17] 加藤, 森岡, 三島, 中地, 浅田, 渡辺, 小西:「サイリスタ制御直列コンデンサの制御方式の検討および縮小モデルの開発」, 電気学会論文誌 B, 117 巻, 7 号, pp.1016-1023, 1997.
- [18] 例えば, 原, 小林, 武井, 田能村, 小柳, 小向:「直列コンデンサのオンオフ離散制御による系統安定度向上」, 電気学会論文誌 B, 115 巻, 11 号, pp.1314-1323, 1995.
- [19] 例えば, 常盤, 市川, 色川, 北原:「電力系統用自励式 SVC の開発」, 電気学会論文誌 B, 113 巻, 2 号, pp.198-176, 1993.
- [20] Y. Mitani, K. Tsuji and Y. Murakami, "Application of Superconducting Magnetic Energy Storage to Improve Power System Dynamic Performance", IEEE Trans. on Power Systems, Vol.3, No.4, pp.1418-1425, 1988.

-
- [21] Y. L. Tan. and T. Wang, "Transient Stabilization Using Adaptive Excitation and Dynamic Brake Control", Control Eng. Practice, Vol.5, No.3, pp.337-346, 1997.
 - [22] 浦中, 三谷, 辻:「高速移相器を付加した SMES による電力系統の安定化制御」, 電気学会論文誌 B, 115 巻, 8 号, pp.883-889, 1995.
 - [23] D. Kamolyabutra, 北條, 三谷, 伊瀬, 辻:「局地情報を用いて構成した SuperSMES による系統安定化実験」平成 10 年電力技術・電力系統技術合同研究会資料, PE-98-106, PE-98-96, pp.27-32, 1998.
 - [24] 林, 桜井:「パワーエレクトロニクス応用技術の現状と展望」電気学会論文誌 B, 117 巻, 7 号, pp.901-904, 1997.
 - [25] 加藤:「電力分野におけるパワーエレクトロニクス応用機器の動向 III. FACTS 機器」, 電気学会論文誌 D, 115 巻, 4 号, pp.370-372, 1995.
 - [26] 野波, 田:「スライディングモード制御」, コロナ社, 1994.
 - [27] 千住, 上里:「直列可変インピーダンス機器による電力系統の安定化制御法」, 電気学会論文誌 B, 114 巻, 2 号, pp.161-166, 1994.
 - [28] Y. L. Tan and Y. Wang, "Design of Series and Shunt FACTS Controller Using Adaptive Nonlinear Coordinated Design Techniques", IEEE Trans. on Power Systems, Vol.12, No.3, pp.1374-1379, 1997.

第2章 高速移相器による電力系統の制御可能領域の定義と系統安定化の評価

2.1 緒言

米国 EPRI の Hingorani 氏により提唱された FACTS(Flexible AC Transmission System) 構想 [1] を受けて、系統安定化制御への最新のパワーエレクトロニクス機器 [2] の応用に関する研究が盛んに行われている。そのなかで、例えば、大容量化の進む自己消弧素子を応用した自励式変換器を用いて送電線に直列に任意の振幅の電圧を挿入するといった、直列型の制御機器が提案されている [3]。これは、挿入電圧によって送電線の両端の電圧の位相差を制御するところから高速移相器として分類することができ、実験あるいは瞬時値解析等に基づきその有効性を示した報告が多くなされている。例えば、高速移相器の優れた潮流制御機能を評価した報告 [4, 5]、さらにはループ系統の潮流制御への適用例 [6]、電圧変動の補償に応用した例 [7] の他、系統安定化制御に適用した報告 [8, 9, 10, 11, 12] などがなされている。

高速移相器は、送電線に直列に設置されるため、FACTS 機器のなかでも直列機器に分類される。同じ半導体化制御機器である SVC などの母線に並列に接続される並列機器に比べて、直列機器は系統への導入実績も少なく、そのモデリングや電力系統における制御効果の評価も研究者によって種々のものが用いられているのが現状である

本章では発電機動揺制御における高速移相器の効果を定量的に評価できる指標を得るために、電力相边角曲線上で高速移相器の制御可能領域を定義する方法を提案している [13]。同種の研究として、UPFC の制御機能を説明するために送電線を挟んだノード電圧間の関係として電力相边角曲線を用いて定性的にその動作モードを説明した例 [14] がある。これに対して、本章では定量的に制御可能領域を定め、それを用いて制御効果の大きさを判断するための指標を導出する。制御可能領域は、実効値レベルにおいて電圧源と電流源で表現した高速移相器を含む系統モデルを用いて定義したもので、代数方程式の求解により数値的に簡単に値を得ることができる。この定義の妥当性は、詳細な系統モデルを用いた瞬時値解析によって確認する。さらに、その応用例として過渡安定度解析における減速エネルギーを評価した結果ならびに制御可能領域を有効に利用した系統安定化制御方式について検討を加える。

2.2 高速移相器の制御可能領域の定式化

一般に、高速移相器は送電線に直列に接続された移相変圧器を介して電圧を印加することにより、その両側のノード電圧間の位相差を制御し、結果として送電線の潮流を制御す

ることが可能なパワーエレクトロニクス機器である。近年サイリスタ制御型の高速移相器の高速・大容量化が進んでおり、大容量系統においても滑らかで高速な潮流制御が可能となりつつある。高速移相器の構成及び制御系には、第1章で述べたように、位相制御のための直列変換器のみのものから並列変換器を組み合わせた構成のものまで提案されている。ここでは、高速移相器に分類されるこれらの機器を統一的に表現するために、直列変換器の効果を模擬した直列電圧源 $\dot{V}_s$ と並列変換器の効果を模擬した並列電流源 $\dot{I}_p$ 、及び回路内の抵抗と漏れリアクタンスを模擬した r_s, x_s を用いて、図 2.1 に示すように高速移相器をモデル化することにする [15]。

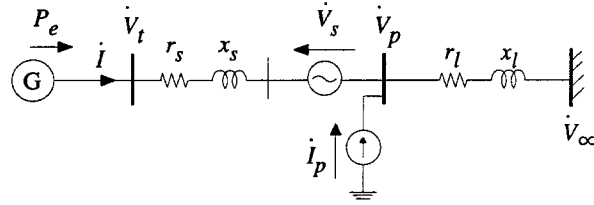


図 2.1: 高速移相器のモデルを含む系統モデル

以下では、図 2.1 の系統モデルを用いて、高速移相器により制御可能な発電機出力の領域について定式化を行う。ただし、 $\dot{V}_t$ は発電機端子電圧、 $\dot{V}_\infty$ は無限大母線電圧、 r_l 及び x_l は、それぞれ送電線の抵抗とリアクタンスとする。

発電機は界磁巻線の効果まで考慮した Park のモデルを用いることにすると、発電機の d-q 軸基準における系統の電圧・電流の関係式は次のように表される。

$$v_d = v_{pd} + v_{sd} + r_s i_d - x_s i_q \quad (2.1)$$

$$v_q = v_{pq} + v_{sq} + x_s i_d + r_s i_q \quad (2.2)$$

$$v_d = -r i_d + x_q i_q \quad (2.3)$$

$$v_q = -r i_q - x'_d i_d + e'_q \quad (2.4)$$

$$v_{pd} = r_l (i_d + i_{pd}) - x_l (i_q + i_{pq}) + v_\infty \sin \delta \quad (2.5)$$

$$v_{pq} = x_l (i_d + i_{pd}) + r_l (i_q + i_{pq}) + v_\infty \cos \delta \quad (2.6)$$

ただし、 r, x'_d, x_q は発電機定数、 $\dot{V}_s = (v_{sd}, v_{sq})$ は直列電圧源の出力電圧、 $\dot{V}_p = (v_{pd}, v_{pq})$ は並列電流源の設置端電圧、 $\dot{I}_p = (i_{pd}, i_{pq})$ は並列電流源の出力電流、 $\dot{I} = (i_d, i_q)$ は発電機から送電線に流れる電流であり、 $\dot{V}_t = (v_d, v_q)$ 、 $\dot{V}_\infty = (v_\infty \sin \delta, v_\infty \cos \delta)$ である。

いま、高速移相器の電圧制御は十分に高速であって、慣性によって決まる発電機の回転子の運動に対して十分速く動作できるものとする。さらには、 e'_q は時定数 T'_{do} によって決まる応答速度を持っており、 T'_{do} が 5~10[s] と大きい値であるため、やはり高速移相器の電圧制御の応答に対しては一定値とみなすことができる。そこで、以下では $\dot{V}_s$ や $\dot{I}_p$ の制御に対し δ 及び e'_q が変化しない速い時間領域を考えて、 δ と e'_q を一定値として扱うことにする。

また、直列電圧源が消費する有効・無効電力を P_s, Q_s 、及び並列電流源が供給する有効・無効電力を P_p, Q_p とすると、

$$P_s = v_{sd} i_d + v_{sq} i_q \quad (2.7)$$

$$Q_s = v_{sq}i_d - v_{sd}i_q \quad (2.8)$$

$$P_p = v_{pd}i_{pd} + v_{pq}i_{pq} \quad (2.9)$$

$$Q_p = v_{pq}i_{pd} - v_{pd}i_{pq} \quad (2.10)$$

が得られる。無効電力は電圧に対して電流が遅れているときを正としている。

以上の非線形連立方程式において、 P_s , Q_s , P_p , Q_p は高速移相器の構成あるいは制御系により高速移相器の操作量として決定される量である。

高速移相器は系統との間で有効電力の授受を行うための十分なエネルギー蓄積を持たないことから、式 (2.7) と式 (2.9) の間には、

$$P_s = P_p \quad (2.11)$$

が常に成り立つ。ただし、簡単のために損失分は無視している。

これに対して、式 (2.10) の Q_p は、並列変換器の構成に依存してその制御性が決まる。例えば、自励式変換器を用いると、 Q_p は独立に制御可能な量となる。

さらに、式 (2.8) の Q_s は自励式インバータを用いることにより独立に制御可能な量となるが、高速移相器の場合は通常、直列変換器の出力電圧 $\dot{V}_s$ の位相と大きさが直接の制御量となるため、 $\dot{V}_s$ の制御則を規定することにより Q_s は従属的に定まる量となる。 $\dot{V}_s$ の位相については、例えば $\dot{V}_s$ が高速移相器設置端の電圧 $\dot{V}_p$ に直交するように制御される場合には、

$$v_{sd}v_{pd} + v_{sq}v_{pq} = 0 \quad (2.12)$$

の関係を追加すればよい。また、 $\dot{V}_s$ が送電線電流に直交するように制御されるような場合には、直列電圧源によって有効電力の授受がないため、次式を追加すればよい。

$$P_s = 0 \quad (2.13)$$

以上により、 $\dot{V}_s$ の位相が定まった。一方、系統の制御のためには $\dot{V}_s$ の大きさ V_s が制御されることになる。いま、

$$V_s = \sqrt{v_{sd}^2 + v_{sq}^2} \quad (2.14)$$

の関係があり、電力系統における移相量の制御は V_s の値を決められた制御則に従って操作することに相当する。

以上により決定された P_s , Q_s , P_p , Q_p を用いて、式 (2.1) から式 (2.10) の非線形連立方程式を数値的に解くことにより、与えられた V_s , δ と e'_q に対する各未知数の値を求めることができる。このとき計算された i_d , i_q , e'_q を用いれば、

$$P_e = \{(x_q - x'_d)i_d + e'_q\}i_q \quad (2.15)$$

によって発電機出力値を計算できる。その結果、 δ の値を変えて P_e を計算することにより、電力相差角曲線を得る。

2.3 電力相差角曲線における高速移相器の制御可能領域

前節の結果に基づき、本節では以下の数値例に対して高速移相器の制御可能領域の検討を行う。

以下では、直列電圧源は送電線電流に対して常に直交する電圧を出力するよう動作させることにし、並列電流源を省略することとする。これは、高速移相器に SSSC の動作をさせることに対応する。すなわち、式 (2.1) から式 (2.11) 及び式 (2.13) を

$$P_p = Q_p = 0 \quad (2.16)$$

の条件のもとで数値的に解く問題として定式化できる。さらに、高速移相器の容量については、 U を高速移相器の出力電圧の大きさ V_s の最大値、すなわち、

$$0 \leq V_s \leq U \quad (2.17)$$

とし、高速移相器の電圧容量と定義することにする。ここで、式 (2.17) の範囲において、 $V_s = 0$ のときには P_e が一意に決まるが、 $V_s > 0$ を与えたときには大小 2 値の P_e が得られる。これらはそれぞれ、 V_s が送電線電流に対して 90° 遅相の場合と進相の場合に対応している。式 (2.17) の V_s の範囲に対する P_e の範囲を、 δ をパラメータとして図示することにより、電力相差角曲線上において、高速移相器によって制御可能な発電機出力の領域を定義することができる。

図 2.1 の長距離大容量送電系統を例として、発電機出力における高速移相器の制御可能領域を求める。表 2.1 に系統定数を示す。発電機は、表 2.1 に示した 1,000 [MVA] の発電機 4 機を 1 機に縮約した、Park の 3 次モデルを用いる。送電線の抵抗は無視しており、計算の初期条件は $V_s = 0$ [p.u.], $P_e = 0.9$ [p.u.], $V_t = 1.0$ [p.u.] とし、 e'_q はこのときの潮流計算の結果得られる値を設定した。

高速移相器の出力 V_s を 0 [p.u.] ($V_s = 0$)、送電線電流に対し 90° 遅相及び進相の最大出力 0.1 [p.u.] ($V_s = U$) の 3 通りに設定し、式 (2.15) の P_e と δ の関係を数値的に求めた。結果を図 2.2 に示す。同図において高速移相器は点線と一点鎖線によって囲まれる範囲内で発電機出力を自由に制御できると考えられる。

表 2.1: システムの定数

発電機 (Park の 3 次モデル, 1,000 MVA ベース)	
直軸同期リアクタンス	$x_d = 1.79$ p.u.
直軸過渡リアクタンス	$x'_d = 0.355$ p.u.
横軸同期リアクタンス	$x_q = 1.66$ p.u.
直軸開路時定数	$T'_{do} = 7.90$ s
慣性定数	$M = 7.7527$ s
制動係数	$D = 2.0$ p.u.
送電線 (500 kV, 4,000 MVA base)	
送電線リアクタンス	$x_l = 0.5352$ p.u.

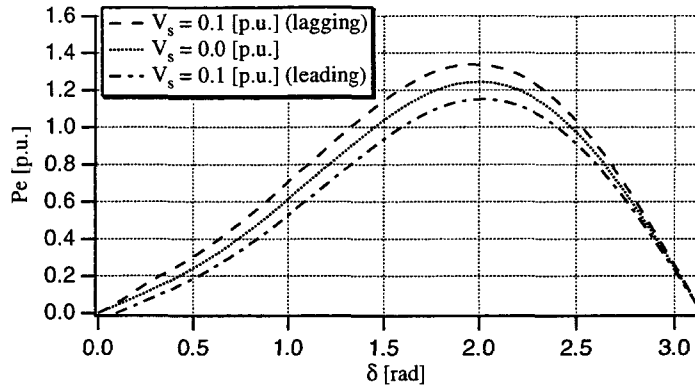


図 2.2: 電圧源モデルから求めた電力相差角曲線

次に，高速移相器の電圧容量 U を $0.05[\text{p.u.}]$ きざみで $0.2[\text{p.u.}]$ まで変えた場合の制御可能領域の変化を示したものが図 2.3 である。同図をみると， $\delta = 0.5 [\text{rad}]$ 近傍から電力相差角曲線の頂点付近までの領域においては，高速移相器の容量に対し制御可能な電力値はほぼ比例の関係にあり，また高速移相器の出力電圧に対する発電機出力の応答の感度がほぼ一定であることがわかる。これに対し， δ が $0[\text{rad}]$ または $\pi [\text{rad}]$ に近づくと制御可能領域が狭くなることがわかる。

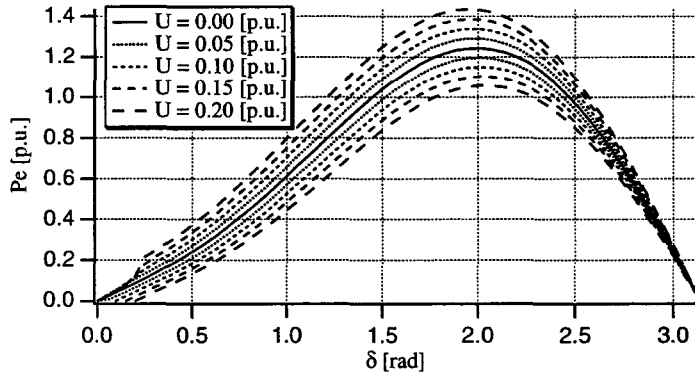


図 2.3: 高速移相器の容量と制御可能領域

2.4 瞬時値解析による制御可能領域の検証

本節では，前節において図 2.2 の形で求めた高速移相器の制御可能領域について，PSCAD-/EMTDC [16] を用いた瞬時値解析による検証を行う。図 2.4 に示す系統モデルは，高速移相器を用いた系統安定化制御に関する研究 [8] で得られた実験結果に対応したモデルであり，その詳しい構成と実験結果の再現性については文献 [9] に述べられている。

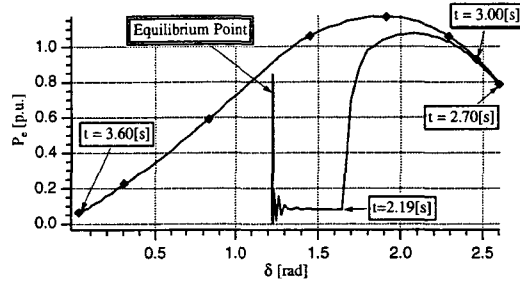


図 2.7: 電力-相差角平面上の軌跡

制御効果を確認めた例として、 $t_a=3.0[s]$ のときに、高速移相器に送電線電流に対して 90° 遅れ位相の最大出力電圧をステップ状に出力させた場合の制御結果を図 2.8 及び図 2.9 に示す。

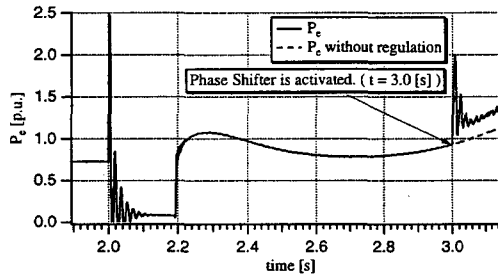


図 2.8: 発電機出力の応答

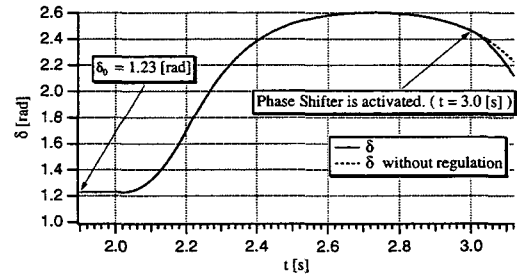


図 2.9: 回転子角の応答

図 2.10 及び図 2.11 は、図 2.8 及び図 2.9 の高速移相器が制御された部分をそれぞれ拡大したものである。

図 2.10 からわかるように、高速移相器の制御によって発電機出力は行き過ぎ量を持つものの、約 $50[ms]$ で点線で表した曲線上の値に収束する。点線は、高速移相器の制御を行わないときの波形を ΔP_e だけ平行移動して得た曲線である。そこで、この $\Delta P_e=0.25 [p.u.]$ を高速移相器により制御された発電機出力量として考えることにする。高速移相器の制御

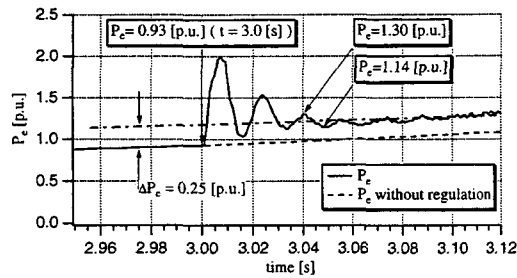


図 2.10: 発電機出力の応答 (拡大図)

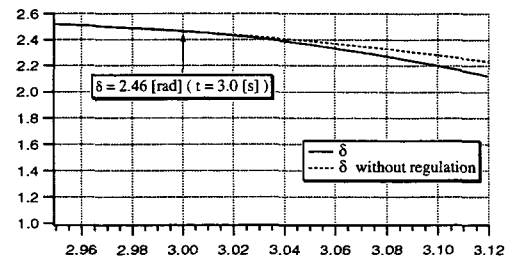


図 2.11: 回転子角の応答 (拡大図)

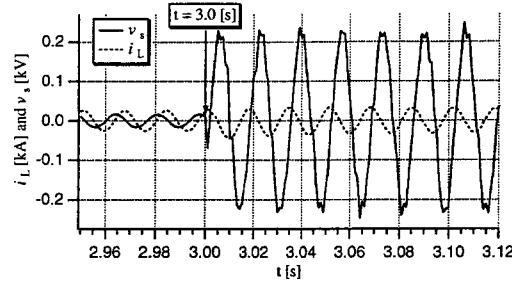


図 2.12: 高速移相器の出力電圧（拡大図）

を行う直前の発電機出力が 0.93 [p.u.] であったことから、高速移相器の制御によって実現できる最大電力は 1.18 [p.u.] と考えることができる。また、図 2.11 の回転子角の応答をみると、高速移相器の制御に対する過渡応答はみられず、前節で仮定したように、回転子角の応答よりも発電機出力の制御が速く実現されていることがわかる。図 2.11 から $t = 3.0$ [s] において $\delta = 2.46$ [rad] である。なお、図 2.12 は高速移相器の出力電圧 v_s が送電線電流 i_L に対して 90° 遅れ位相動作していることを確認した結果である。以上の結果から、電力相边角曲線のなかで、 $(\delta, P_e) = (2.46, 1.18)$ の点を、瞬時値解析によって求めた高速移相器の制御効果としてプロットすることができる。（図 2.13 参照）

以上の手順に従って、高速移相器の電圧制御の時刻 t_a を変えることによって電力相边角曲線を求めた結果が図 2.13 である。ただし、 $\delta > 2.6$ [rad] の部分の検証を行うために故障継続時間を 0.19 [s] 以上とすると、故障によって発電機が脱調するため δ の変化速度が速く、図 2.10 のようには行き過ぎ量が整定しないので、高速移相器の出力電圧に対する発電機出力のステップ応答を観察することができなかった。図 2.13 の曲線は、高速移相器の直列変圧器の漏れリアクタンスも含む回路定数を用いて、前節の手順に従って非線形連立方程式を解いた結果である。ただし、回路の抵抗分については、簡単のために無視している。図 2.13 より前節において提案した制御可能領域の妥当性が確認できる。

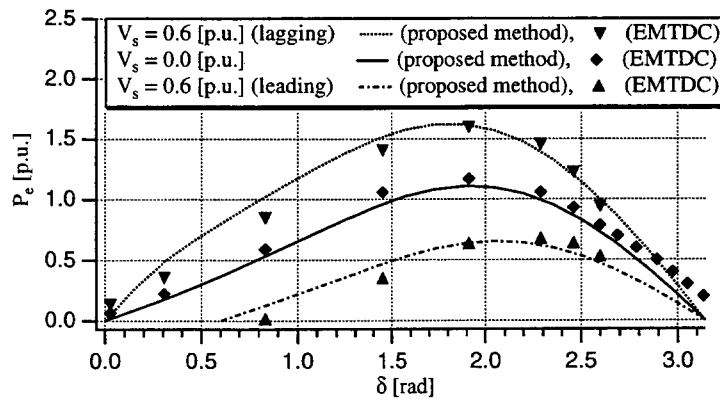


図 2.13: 電力相边角曲線（瞬時値解析）

2.5 制御可能領域に基づく過渡安定度向上効果の評価

高速移相器による系統安定化制御を行うにあたり，高速移相器自体が本来有している制御効果の上限を知ることは重要である。第3節で得られた制御可能領域を用いると，等面積法に基づき，高速移相器による過渡安定度の向上効果を簡単に評価することができる。以下では，再び第3節で用いた，図 2.1 の系統モデルと表 2.1 の定数を用いて検討を行う。

図 2.14 で示す面積 S_1 が故障によって発電機に与えられる加速エネルギーであり，面積 S_2 と面積 $S_2 + S_2'$ はそれぞれ高速移相器の出力電圧がゼロの場合と電流に対して 90° 遅相の最大値の場合に，理論上得ることができる最大限の減速エネルギーである。過渡安定度の改善のために高速移相器を用いる場合，図 2.14 で考えると，故障消滅 ($\delta = \delta_f$ のとき) と同時に V_s を U (電流に対して 90° 位相遅れ) に設定することが望ましい。このとき与えられた高速移相器による最大の減速エネルギー $S_2 + S_2'$ を確保でき， $S_1 < S_2 + S_2'$ である限りこの系統は過渡的に安定である。

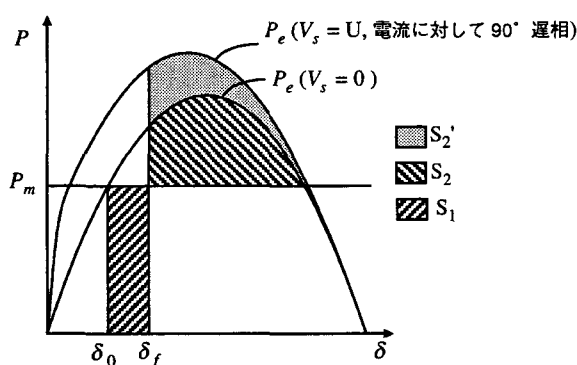


図 2.14: 等面積法に基づく臨界故障継続時間の算定

このように，図 2.14 において高速移相器の制御効果を含めた最大限確保可能な減速エネルギーは，与えられた高速移相器の容量 U に対応する面積 $S_2 + S_2'$ として与えられ， S_2' の分だけ高速移相器によって増加されることがわかる。そこで，発電機端での三相短絡故障に対する臨界故障継続時間 [s] と高速移相器の容量 U [p.u.] の関係を求めたものが図 2.15 である。図 2.15 の臨界故障継続時間は，高速移相器のない場合 (0.110[s]) から，10 サイ

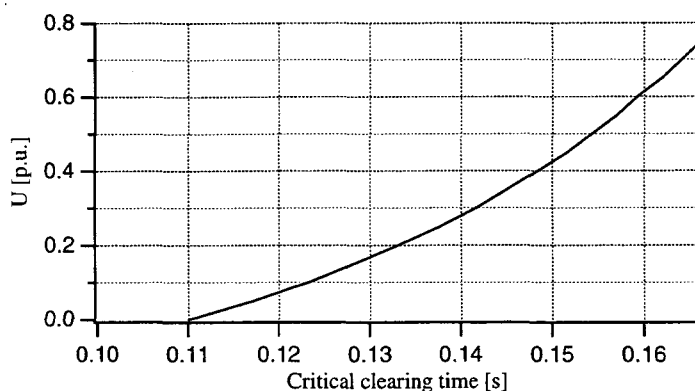


図 2.15: 臨界故障継続時間と高速移相器の容量の関係

クル (0.167[s]) まで延長する場合に対応している。これは、期待する臨界故障継続時間を得るために最小限必要な高速移相器の容量を表すものと考えることができる。ただし、実際には制御系によっては必ずしも S'_2 の減速エネルギーを増加することができるとは限らないため、これより若干大きい容量の高速移相器が必要となる。

2.6 制御可能領域に基づく電力系統の安定化制御の検討

図 2.2 は系統動揺時に δ が変化したとき、 V_s の制御によって設定可能な P_e の領域を表したものであった。従って、系統安定化制御系を設計するときにはこの制御可能範囲をいかに有効に利用するかが問題となる。

過渡安定度を最優先に考えた場合には、前節で述べたように、故障除去後は速やかにステップ状に電圧を変化させることが望ましい。しかし、故障の程度が小さいときには、このようなステップ状の制御はかえって系統に不要な擾乱を与えてしまうことになる。従って、運転点近傍では同期化力と制動力を持たせて速やかに動揺を平衡点に収束させ、大擾乱に対してはできる限り大きい減速エネルギーを確保できる制御が実現できれば、定態から過渡にわたって広範囲の安定化が達成される。

以上の検討から、制御可能領域を有効に利用した系統安定化制御として、図 2.16 に示すような制御方式が考えられる。平衡点 A の近傍における微小外乱に対しては、線分 BC の方向に沿うように制御することで、系統に対して線分 BC の傾きで定義される同期化力を持たせることができる。さらに、これと同時に制動を持たせるような制御を組み合わせることで、定態安定度の向上効果が期待できる。一方、大外乱に対しては、 P_e を A → B とさせた後、制御可能領域の上限に達すると D → E のように可能な限り減速エネルギーを確保するように制御すれば、高速移相器が本来持つ過渡安定度向上効果を十分に発揮することができると考えられる。すなわち、図 2.16 に示したような制御を設計することにより、高速移相器の持つ制御能力を有効に活用した、定態安定度と過渡安定度の向上を同時に実現できるような系統安定化制御系を実現できると考えられる。このような系統安定化制御の一方式として、次章においては電力動揺を線形化する系統安定化制御の導出を行う。

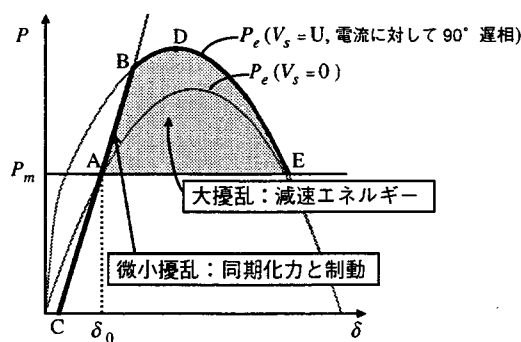


図 2.16: 制御可能領域を有効に利用した一制御方式

2.7 結言

本章では、直列型 FACTS 機器の一つである高速移相器を対象とし、発電機出力の制御に主眼をおいてその制御能力の評価を行った。本章で得られた結果を要約すると以下のとおりである。

- 高速移相器を実効値レベルで直列電圧源と並列電流源を用いてモデル化し、発電機出力と高速移相器の制御量の関係について定式化を行った。
- 電力相差角曲線上で高速移相器により制御可能な発電機出力を領域として定義する方法について述べた。
- 詳細なモデルを用いた瞬時値解析により、定義した制御可能領域の妥当性が確かめられた。
- 制御可能領域を用いて、等面積法に基づき臨界故障除去時間と最低限必要な高速移相器の容量との関係を明らかにし、高速移相器自身が有する過渡安定度向上効果を評価した。
- 制御可能領域を有効に利用して、定態安定度と過渡安定度の両方を同時に向上させることのできる系統安定化制御の一方式についての見解を得た。

以上、本章の結果は、電力系統における高速移相器の制御能力の評価方法として位置づけられる。

参考文献

- [1] N. G. Hingorani, "High Power Electronics and Flexible AC Transmission System", IEEE Power Engineering Review, pp.3-4, July 1988.
- [2] IEEE FACTS Working Group and CIGRE FACTS Working Group, "FACTS Overview", IEEE 95 TP 108, 1995.
- [3] Boon Teck Ooi, Shu Zu Dai and Francisco D. Galiana, "A Solid-State Phase-Shifter", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 8, No. 2, pp.573-579, 1993.
- [4] 千田, 佐藤, 菅原, 森川, 田村, 色川, 「自励式位相調整器の瞬時値解析による検討」, 電気学会論文誌 B, Vol.117-B, No. 7, pp.960-965, 1997.
- [5] 渡辺, 藤田, 赤木: 「電力系統の潮流制御を目的とした高速移相器の制御法と過渡特性」, 電気学会論文誌 D, Vol. 117-D, No.11, pp.1327-1333, 1997.
- [6] 藤田, 紅林, 野原, 後藤, 鬼頭: 「高速移相器によるループ系統制御」, 電気学会論文誌 B, 114 巻, 5 号, pp.475-482, 1994.

- [7] 江口, 徳田, 上村, 平山, 嶋田:「半導体化高速移相器による可変リアクタンス装置 (電圧変動の補償)」, 電気学会論文誌 B, 116 巻, 8 号, pp.1007-1014, 1996.
- [8] 林, 石井, 伊瀬, 熊谷:「高速移相器による系統安定化制御」, 電気学会半導体電力変換研究会資料, SPC-97-29, pp.21-26, 1997.
- [9] 石井, 林, 伊瀬, 熊谷:「高速移相器を導入した模擬電力システムのデジタルシミュレーション」, 電気学会半導体電力変換研究会資料, SPC-97-28, pp.15-20, 1997.
- [10] F. Jiang, S. S. Choi and G. Shrestha, "Power System Stability Enhancement Using Static Phase Shifter", IEEE Trans. on Power Systems, Vol.12, No.1, pp.207-214, 1997.
- [11] A. A. Edris, "Enhancement of First-Swing Stability Using a High-Speed Phase Shifter", IEEE Trans. on Power Systems, Vol.6, No.3, pp.1113-1118, 1991.
- [12] 力石, 嶋田:「半導体化高速移相器による同期機のフライホイール効果を利用した電力制御とその応用」, 電気学会論文誌 B, 111 巻, 11 号, pp.1192-1198, 1991.
- [13] 北條, 三谷, 石井, 伊瀬, 辻:「発電機制御における移相器の制御可能領域の定式化と評価」, 平成 10 電気学会電力・エネルギー部門大会論文 I, 24, pp.147-152, 1998.
- [14] 加藤, 森岡, 中東, 三島, 中地, 浅田, 徳原, 赤松, 古田:「UPFC 縮小モデル開発と送電機能向上効果の検証」, 電気学会論文誌 B, 118 巻, 10 号, pp.1194-1200, 1998.
- [15] M. Noroozian, L. Ångquist, M. Ghandhari, and G. Andersson, "Improving Power System Dynamics by Series-Connected FACTS Devices", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.12, No.4, pp.1635-1641, 1997.
- [16] O. Nayak, G. Irwin and A. Neufeld, "GUI Enhances Electromagnetic Transients Simulation Tools", IEEE Computer Applications in Power, Vol.8, No.1, pp.17-22, 1995.

第3章 電力動揺線形化制御の概念と系統安定化制御への応用

3.1 緒言

電力系統は負荷や構成が絶えず変化する大規模なシステムである。近年益々複雑かつ巨大化する傾向にあるなかで、システムのパラメータ変動に対してロバストな系統安定化制御が要求されている。しかし、同期発電機を含む電力系統が非線形なシステムであることがしばしば問題となる。このため、非線形制御理論や適応制御理論などにに基づき、系統の非線形性に対応し得る系統安定化制御が提案されてきた。例えば、状態空間全体にわたって線形化する厳密な空間線形化に基づく PSS の設計 [1, 2] やセルフチューニング型の適応 PSS[3] などの例のほか、フィードバックによる線形化制御を励磁系に適用した例 [4, 5] や調速機制御系への適用例 [6] が挙げられる。

しかし、このような非線形性を考慮に入れた系統安定化制御は、制御装置に対して高速性をはじめとして高度な機能を要求することから、従来は AVR, PSS といった励磁系や調速機のような発電機制御系への適用が主流であった。これに対して、FACTS 構想に基づく近年の系統制御機器の進歩によって系統の制御の自由度が高まるなか、これまで理論的には魅力的であっても、電力系統への実用化は困難と考えられていた高度な制御の新しい応用が注目を集めている。例えば、スライディングモード制御を直列可変インピーダンスに適用した例 [7] や、フィードバックによる線形化に基づいた SVC と高速移相器による系統安定化制御 [8] などが挙げられる。

本章では、第2章で得た高速移相器の制御可能領域を有効に利用するための制御方式の一つとして、電力動揺を線形化する制御方式の導出を行う。以下では、発電機出力を直接制御できると仮定して、厳密な空間線形化手法に基づいて電力動揺方程式の線形化を行い、発電機出力の直接制御による電力動揺線形化制御の設計指針を与える [9]。また、導出した制御系が第2章で検討したような制御可能領域を有効に利用する制御となりうることを電力相差角曲線上で検討する。さらに、電力動揺線形化制御によってロバストな系統安定化の実現が期待できることを電力相差角曲線を用いて説明する。

3.2 厳密空間線形化による電力動揺線形化

厳密な空間線形化手法は、非線形制御において体系化された設計手法の一つである [10, 11, 12, 13]。本節では、厳密な空間線形化手法に従って電力動揺の線形化のための制御系の導出を行う。

厳密な空間線形化手法は、以下のように説明される。 n 次の非線形状態方程式

$$\dot{x} = f(x) + g(x)u \quad (3.1)$$

を考える。ただし、 $\mathbf{x}$ は状態ベクトル、 u は制御入力、 $\mathbf{f}$ 及び $\mathbf{g}$ は適当な非線形関数ベクトルである。式 (3.1) のシステムが厳密に空間線形化可能であるための必要十分条件は、Su [14] らによって既に得られており、次の2つである。

- (i) $\{ad_f^0 \mathbf{g}, ad_f^1 \mathbf{g}, \dots, ad_f^{n-1} \mathbf{g}\}$ が線形独立
- (ii) $\{ad_f^0 \mathbf{g}, ad_f^1 \mathbf{g}, \dots, ad_f^{n-2} \mathbf{g}\}$ が involutive

ただし、記号 ad は Lie product の繰り返し適用を表現するために導入されたもので、

$$ad_f^0 \mathbf{g} = \mathbf{g} \quad (3.2)$$

$$ad_f^i \mathbf{g} = [\mathbf{f}, ad_f^{i-1} \mathbf{g}] \quad (3.3)$$

である。ただし $[\mathbf{f}, \mathbf{g}]$ は、ベクトル変数 $\mathbf{x}$ によるベクトル関数 $\mathbf{f}(\mathbf{x})$, $\mathbf{g}(\mathbf{x})$ の Lie product を意味し、 $\mathbf{x}$ の関数として、

$$[\mathbf{f}, \mathbf{g}](\mathbf{x}) = \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial \mathbf{x}} \mathbf{f}(\mathbf{x}) - \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{x}} \mathbf{g}(\mathbf{x}) \quad (3.4)$$

で定義される。また、ここで involutive とは、ベクトル場の集合

$$\mathbf{H}(\mathbf{x}) = \{\mathbf{h}_1(\mathbf{x}), \mathbf{h}_2(\mathbf{x}), \dots, \mathbf{h}_m(\mathbf{x})\}$$

について、任意のベクトル場 $\mathbf{h}_i(\mathbf{x})$, $\mathbf{h}_j(\mathbf{x})$ の Lie product が任意の点 $\mathbf{x}$ において $\mathbf{H}(\mathbf{x})$ の要素の1次結合で表されるということである。上記の2つの条件を対象システムが満たす場合には、Frobenius の定理から

$$L_{ad_f^i} \mathbf{g} T(\mathbf{x}) = 0 \quad (i = 0, 1, 2, \dots, n-2) \quad (3.5)$$

を満たし、かつ定数ではないスカラー関数 $T(\mathbf{x})$ が求められる。この $T(\mathbf{x})$ を用いて、

$$\xi = [T(\mathbf{x}) \quad L_f T(\mathbf{x}) \quad \dots \quad L_f^{n-1} T(\mathbf{x})]^T \quad (3.6)$$

によって定義される座標変換により、非線形システム (3.1) は以下のように変換される。

$$\dot{\xi} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \ddots & 1 & \ddots & \vdots \\ \vdots & & & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & \dots & 0 & 1 \\ 0 & \dots & \dots & 0 & 0 \end{bmatrix} \xi + \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ \vdots \\ 0 \\ L_f^n T(\mathbf{x}) + L_g L_f^{n-1} T(\mathbf{x}) u \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

ただし、 $L_f T(\mathbf{x})$ は、ベクトル場 $\mathbf{f}(\mathbf{x})$ によるスカラー関数 $T(\mathbf{x})$ の Lie derivative を意味し、

$$L_f T(\mathbf{x}) = \frac{\partial T}{\partial \mathbf{x}} \mathbf{f}(\mathbf{x}) \quad (3.8)$$

で定義され、Lie derivative の繰り返し適用を

$$L_f^0 T = L_f T \quad (3.9)$$

$$L_f^{m+1} T = L_f(L_f^m T) \quad (m = 0, 1, 2, \dots, n-2) \quad (3.10)$$

で定義する。ここで、新しい制御入力 ν を導入して

$$u = -\frac{L_f^n T(\mathbf{x})}{L_g L_f^{n-1} T(\mathbf{x})} + \frac{1}{L_g L_f^{n-1} T(\mathbf{x})} \nu \quad (3.11)$$

とすることにより、可制御正準形の線形システム

$$\dot{\xi} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \ddots & 1 & \ddots & \vdots \\ \vdots & & & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & \dots & 0 & 1 \\ 0 & \dots & \dots & 0 & 0 \end{bmatrix} \xi + \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ \vdots \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \nu \quad (3.12)$$

が得られる。このとき新しい制御入力 ν は可制御であり、設計者が目的に応じて自由に設定することができる。このように、空間線形化による制御系設計は、非線形性を内包した線形化システムに対して設計者が設定した応答を実現できるという特徴を持っている。

次に、以上の厳密な空間線形化手法を電力動揺の線形化に応用する。電力システムのモデルとして、図 3.1 に示すような、一機の同期発電機が無限大母線に接続されたモデルを用いる。ここでは何らかのパワーエレクトロニクス機器によって発電機の出力を直接制御可能である場合を想定し、仮想的な有効電力制御量 P_c を想定して以下の議論を進めることにする。

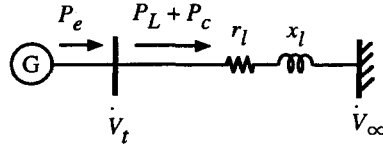


図 3.1: 仮想的制御量 P_c を含む系統モデル

発電機の電力動揺方程式は、発電機出力電力 P_e を用いて、一般に次のように表される。

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega - \omega_0 \quad (3.13)$$

$$\frac{M}{\omega_0} \frac{d\omega}{dt} + \frac{D}{\omega_0} (\omega - \omega_0) = P_m - P_e \quad (3.14)$$

$$(3.15)$$

ただし、 δ : 無限大母線を基準とした発電機の位相角 [rad], ω : 発電機の角速度 [rad/s], ω_0 : 定格角周波数 [rad/s], M : 慣性定数 [s], D : 制動係数 [p.u.], P_m : 発電機への機械入力 [p.u.] とする。

また、図 3.1 の発電機端子における有効電力の関係は

$$P_e = P_L + P_c \quad (3.16)$$

で表される。ここに、 P_L は無限大母線側へ流れる電力である。この P_L は δ および $\Delta\omega$ の非線形関数であり、AVR, 調速機の効果や負荷側の系統の影響も P_L の関数形に集約されて表現されているものとする。

仮想的制御量 P_c を用いて、動揺方程式を式 (3.17), (3.18) で表す。

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega - \omega_0 \quad (3.17)$$

$$\frac{M}{\omega_0} \frac{d\omega}{dt} + \frac{D}{\omega_0} (\omega - \omega_0) = P_m - P_L - P_c \quad (3.18)$$

$$(3.19)$$

いま, $\Delta\omega = \omega - \omega_0$ として, 状態ベクトルを $\mathbf{x} = [\delta \ \Delta\omega]^T$ と選べば, このシステムは,

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}) + \mathbf{g}(\mathbf{x})u \quad (3.20)$$

ただし,

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta\omega \\ \frac{\omega_0}{M} \left(-\frac{D}{\omega_0} \Delta\omega - P_L \right) \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

$$\mathbf{g}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} g_1 \\ g_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{\omega_0}{M} \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

$$u = P_m - P_c \quad (3.23)$$

と表現できる。以上により, 電力動揺方程式は2次の非線形状態方程式により定式化された。ここで, 上で述べた理論に従って厳密な空間線形化の可能性の判定を行う。まず,

$$ad^0_{\mathbf{f}} \mathbf{g} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{\omega_0}{M} \end{bmatrix}^T \quad (3.24)$$

$$ad^1_{\mathbf{f}} \mathbf{g} = \begin{bmatrix} -\frac{\omega_0}{M} & \frac{\omega_0^2}{M^2} \left(\frac{D}{\omega_0} + \frac{\partial P_L}{\partial(\Delta\omega)} \right) \end{bmatrix}^T \quad (3.25)$$

である。ここで, 明らかに $-\frac{\omega_0}{M} \neq 0$ であるから, 式 (3.24), (3.25) は線形独立である。従って, 条件 (i) は満たされている。また, 対象システムの次数が2次であるので, 条件 (ii) は $\{ad^0_{\mathbf{f}} \mathbf{g}\}$ が involutive であることと等価である。ここで Lie product の定義より,

$$[ad^0_{\mathbf{f}} \mathbf{g}, ad^0_{\mathbf{f}} \mathbf{g}] = 0 \quad (3.26)$$

が成り立つため, 結局, 条件 (ii) も満たされている。

以上より厳密な空間線形化が可能であるための必要十分条件が満たされていることが明らかとなった。そこで, Frobenius の定理から,

$$L_{ad^0_{\mathbf{f}} \mathbf{g}} T(\mathbf{x}) = 0 \quad (3.27)$$

即ち,

$$\frac{\partial T}{\partial(\Delta\omega)} = 0 \quad (3.28)$$

であるような, 定数でない適当な座標変換 $T(\mathbf{x})$ として,

$$T(\mathbf{x}) = \delta - \delta_0 \triangleq \Delta\delta \quad (3.29)$$

を選ぶことにする。ただし、 δ_0 は動作点での δ の値である。このとき、

$$L_f T = \Delta\omega \quad (3.30)$$

$$L_f^2 T = f_2 \quad (3.31)$$

$$L_g L_f T = \frac{\omega_0}{M} \quad (3.32)$$

ただし、 f_2 は式 (3.21) で与えられている。

従って、新しい状態ベクトル ξ は

$$\xi = [\Delta\delta \quad \Delta\omega] \quad (3.33)$$

となり、また、非線形制御入力 u と新しい状態変数 ξ の 1 次結合による線形制御入力 ν の関係は、

$$u = -\frac{M}{\omega_0} f_2 + \frac{M}{\omega_0} \nu \quad (3.34)$$

で与えられる。式 (3.34) の結果を非線形システム (3.20)～(3.23) の状態方程式の入力 u に適用すれば、

$$\dot{\xi} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \xi + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \nu \quad (3.35)$$

であり、ここに厳密な空間線形化が実現される。状態変数 $\Delta\delta$ 及び $\Delta\omega$ が検出可能であるとすれば、適当なパラメータ β_i ($i = 1, 2$) を用いて

$$\nu = \beta_1 \Delta\delta + \beta_2 \Delta\omega \quad (3.36)$$

と状態フィードバックを行うことにより、式 (3.35) のシステムの固有値を任意の値に指定できる。安定なシステムとなるように適切な固有値指定を行うことにより、安定化制御が実現する。式 (3.36) より ν が決定されれば、式 (3.34) から非線形フィードバック量 u が決まる。結局、空間線形化のための仮想的な制御量 P_c は、式 (3.36) の ν を式 (3.34) に代入して求めた u を式 (3.23) に代入して

$$P_c = P_m - \frac{D}{\omega_0} \Delta\omega - P_L - \frac{M}{\omega_0} (\beta_1 \Delta\delta + \beta_2 \Delta\omega) \quad (3.37)$$

となる。以上より、式 (3.37) で表される仮想的な操作量 P_c を用いることにより、厳密な空間線形化による系統安定化制御が実現する。

3.3 電力動揺線形化制御の概念

本節では、発電機の電力を直接制御するという観点から電力動揺の線形化の方法について検討を行う。前節の結果は次のように考えることができる。式 (3.37) より、

$$P_c + P_L = P_m - \frac{D}{\omega_0} \Delta\omega - \frac{M}{\omega_0} (\beta_1 \Delta\delta + \beta_2 \Delta\omega) \quad (3.38)$$

であるから、式 (3.16) を用いると、結局

$$P_e = P_m - \frac{D}{\omega_0} \Delta\omega - \frac{M}{\omega_0} (\beta_1 \Delta\delta + \beta_2 \Delta\omega) \quad (3.39)$$

である。ここで、式 (3.39) で表される P_e を発電機に出力させるような制御ができれば、空間線形化が実現し、非線形状態方程式 (3.20) は、式 (3.35) の線形システムとして表現される。すなわち、仮想的入力 P_e を用いて定式化した厳密な空間線形化による系統安定化制御の導出は、式 (3.39) に従って発電機出力を直接制御する問題に帰着させることができる。そこで、発電機出力を制御可能な何らかのパワーエレクトロニクス機器を使用し、例えば発電機出力を検出量としたフィードバック制御を構成することにより、電力動揺の線形化が実現可能であると考えられる。また、界磁巻線や制動巻線の応答を考慮し、さらには AVR や調速機の動特性を含めて考えるときにも、発電機出力 P_e を直接の操作量としているため、上述の手順をそのまま適用することができる。

電力動揺の線形化による系統の定態安定度の向上効果は、電力相差角曲線において同期化力の観点から定性的に説明できる。簡単のために、一機無限大母線系統で考える。発電機の電力動揺方程式は次式で表される。

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega - \omega_0 \quad (3.40)$$

$$\frac{M}{\omega_0} \frac{d\omega}{dt} + \frac{D}{\omega_0} (\omega - \omega_0) = P_m - P_e \quad (3.41)$$

まず、制御を行わない場合には、外乱に対する電力動揺は図 3.2 のように電力相差角曲線に沿った応答を示す。同期化力係数は電力相差角曲線の接線の傾きとして、次式の K で定義される [15]。

$$K = \frac{\partial P_e}{\partial \delta} \quad (3.42)$$

平衡点近傍の定態安定度を考える場合、系統が安定であるためには、 $K > 0$ であればよいことが知られている。このように、運用点における電力相差角曲線の接線の傾きは重要な意味を持っている。

これに対して、電力動揺線形化制御は発電機の出力電力 P_e が (3.39) 式となるように制御するというものであった。以下では、これを発電機の出力電力 P_e の指令値として P_e^* とおき、

$$P_e^* = P_m - \frac{D}{\omega_0} \Delta\omega - \frac{M}{\omega_0} (\beta_1 \Delta\delta + \beta_2 \Delta\omega) \quad (3.43)$$

とする。この P_e^* を電力相差角曲線の平衡点において描くと、図 3.3 の直線になる。このとき、直線 P_e^* の傾きは電力動揺線形化制御のもとでの同期化力を表しており、その大きさは制御系設計時に β_1 を用いて設定することができる。すなわち、直線 P_e^* の傾きを電力相差角曲線の傾きよりも大きく設計することで、電力動揺線形化制御によって系統の同期化力を増強することができる。

一方で、制御系設計時に β_2 を用いて系統に制動を持たせることができる。このとき、軌跡は直線 P_e^* の周りに時計回りの渦をまくことになる。

このように、電力動揺線形化制御では、同期化力および制動といった観点から設計仕様を与えることができる。このときには電力-相差角平面においては図 3.3 のように直線 P_e^* に沿って時計周りの渦を描きながら平衡点へと収束させることができる。

さらにこの特徴は、第 2 章第 6 節で考察したような、微小外乱に対して適切な同期化力および制動を持たせる制御となっている。すなわち、高速移相器に電力動揺線形化制御を適用するような場合には、第 2 章で求めた電力相差角曲線上での制御可能領域内で直線 P_e^* を描いて制御の仕様を決定することができる。このとき、電力動揺線形化制御は、第 2 章で考えたような発電機出力の制御可能領域を有効に活用する系統安定化制御となることが期待される。

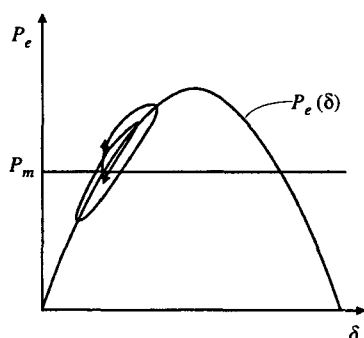


図 3.2: 無制御時の電力相差角曲線上の軌跡

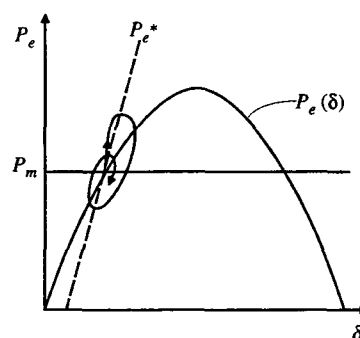


図 3.3: 電力動揺線形化制御の概念図

3.4 電力動揺線形化制御を用いた電力系統のロバスト安定化制御

本節では、電力動揺線形化制御を応用した、系統安定化制御のロバスト性の向上について述べる。ここでいうロバスト性とは、次の事項を指す。

- 系統構成の変更や負荷の大幅な変動などによって平衡点が変わるような場合にも、制御系の再設計を必要とせず一定の制御効果が得られること。
- 系統のモデル化誤差に対して制御系が頑健であること。

従来、系統安定化制御の設計においては、平衡点近傍において線形近似を行い、その結果得られた近似線形化システムに対して制御系設計を行う場合が多かった。しかし、図 3.2 に示すように、電力相差角曲線が正弦関数で表されることから、平衡点により接線の傾きが変わるとともに系統本来の同期化力も変化する。特に、重潮流状態では同期化力の低下が著しくなるという特徴を持っている。従って、近似線形化モデルに対して系統安定化制御を構成した場合、運転状態の変更や事故後の回線開放のように、系統の平衡点が変わるような場合に制御効果が少なからず悪影響を受ける [16]。このために制御系の再構成が必要となる場合もある。

これに対し上で述べたように、厳密な空間線形化手法によって導出された電力動揺線形化制御は、系統の非線形性を保存したままで、極めて簡単な制御系構成により一定の制御効果を実現するものである。これは、平衡点における系統の動特性に関係なく、制御系設計時に指定した一定の直線に沿った応答で安定化を行うものである。このため、運用状態

の変更にも際しても制御系の再設計をすることなく一定の制御効果が得られるロバストな系統安定化制御系となっている。

上で述べた電力動揺線形化制御の制御特性とロバスト性は、電力相差点曲線において同期化力の観点から定性的に説明できる。

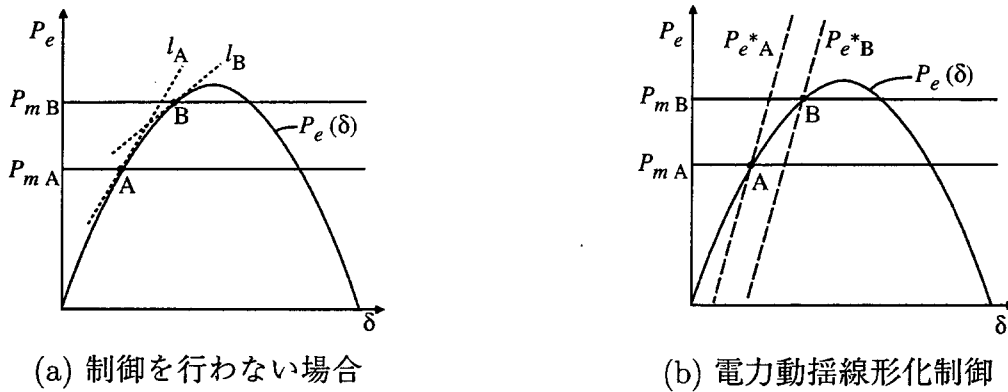


図 3.4: 電力相差点曲線上での線形化の概念

図 3.4 は、電力動揺線形化制御を行わない場合と行う場合について、それぞれ平衡点 A 及び B におけるシステムの特性を電力相差点曲線上に表したものである。図 3.4 (a) 及び (b) の直線の傾きは、それぞれの平衡点における同期化力を表している。

制御を行わない場合には、図 3.4 (a) からわかるように、平衡点 A から B へ運用点が変更されると、電力相差点曲線の接線の傾きの変化とともに系統固有の同期化力も変化し、特に重潮流状態では同期化力の低下が著しくなることがわかる。

これに対し電力動揺線形化制御は、系統の状態に関わらず、発電機出力 P_e が常に (3.43) 式の P_e^* と一致するように制御するものである。電力相差点平面の平衡点において P_e^* は直線となり、図 3.4 (a) と同様に図示すると、同図 (b) の直線 P_{eA}^* 及び P_{eB}^* のようになる。電力動揺線形化制御は動揺の軌跡をこの直線に沿うように制御することに相当するため、このときの系統の同期化力は直線 P_e^* の傾きで表わされる。従って、電力動揺線形化制御は、その設計段階で同期化力を指定することができる。また、この設計仕様は、系統状態の変更によって平衡点が変わるような場合においても一定に保たれることから、電力動揺線形化制御はロバストな制御であるといえる。

次に、電力動揺線形化制御のモデル化誤差に対するロバスト性について検討する。

系統のモデル化誤差には、送電線や発電機など、系統の構成要素の定数値に含まれる誤差などが考えられる。誤差を含む定数を用いた制御系は、一般にその制御効果も誤差に対応して一定の影響を受けると考えられている。これに対し、電力動揺線形化制御は、発電機出力電力そのものを直接の操作量とするため、モデル化誤差を補償するように動作すると考えられる。このように、電力動揺線形化制御は、モデル化誤差に強い、ロバストな安定化制御となっている。

3.5 結言

本章では、厳密な空間線形化手法に基づき、発電機出力を直接制御して電力動揺を線形化する方式のロバストな系統安定化制御系を導いた。本章で得られた結果を以下に要約する。

- 厳密な空間線形化手法に従い、発電機出力を直接制御して発電機の動揺方程式を線形化する方法を導いた。
- 線形化後のシステムの同期化力および制動といった観点から、電力動揺線形化制御の設計仕様を与える方法を示した。
- 電力動揺線形化制御は、制御機器の持つ発電機出力の制御可能領域を有効に活用する制御となりうることを示した。
- 電力動揺線形化制御は、系統の運用状態に依らず一定の制御効果を持つ、ロバストな系統安定化制御系であることを示した。

参考文献

- [1] 高木，曾我部，平山，重政：「空間線形化を用いた電力系統安定化系の設計」，計測自動制御学会論文集，29巻，2号，pp.194-200，1993.
- [2] M. Nambu, Y. Ohsawa, "Development of an Advanced Power System Stabilizer Using a Strict Linearization Approach", IEEE Trans. on Power Systems, Vol.11, No.2, 1996.
- [3] S. J. Chen. *et al.*, "Damping of Multi-Modal Oscillations in Power Systems Using a Dual-Rate Adaptive Stabilizer", IEEE Trans. on Power Systems, Vol.3, No.1, pp.101-108, 1988.
- [4] J. W. Chapman, M. D. Ilic, C. A. King, L. Eng, H. Kaufman, "Stabilizing a Multimachine Power System via Decentralized Feedback Linearizing Excitation Control", IEEE Trans. on Power Systems, Vol.8, No.3, 1993.
- [5] Y. Wang, D. J. Hill, R. H. Middleton, L. Gao, "Transient Stability Enhancement and Voltage Regulation of Power Systems", IEEE Trans. on Power Systems, Vol.8, No.2, 1993.
- [6] H. Boursès, F. Colledani, M. P. Houry, "Robust Continuous Governor Control for Small-signal and Transient Stability", IEEE Trans. on Power Systems, Vol.12, No.1, 1997.
- [7] 千住，上里：「直列可変インピーダンス機器による電力系統の安定化制御法」，電気学会論文誌 B，114巻，2号，pp.161-166，1994.
- [8] Y. L. Tan and Y. Wang, "Design of Series and Shunt FACTS Controller Using Adaptive Nonlinear Coordinated Design Techniques", IEEE Trans. on Power Systems, 1996.

- [9] 北條, 三谷, 辻:「直列可変インピーダンスを用いた発電機電力の直接制御によるロバスト系統安定化制御」, 電気学会論文誌 B, 117 巻, 7 号, pp.985-990, 1997.
- [10] H. Nijmeijer, A. J. van der Schaft, “Nonlinear Dynamical Control Systems”, Springer-Verlag, New York, 1990.
- [11] A. Ishidori, “Nonlinear Control Systems”, Springer-Verlag, 1989.
- [12] 石島, 石動, 三平, 島, 山下, 渡辺:「非線形システム論」, 計測自動制御学会編, コロナ社, 1993.
- [13] 増淵, 川田:「システムのモデリングと非線形制御」, コロナ社, 1996.
- [14] R. Su, “On the linear equivalents of nonlinear systems”, Systems & Control Letters, Vol.2, No.1, pp.48-52, 1982.
- [15] 木下, 石原, 松浦:「電力伝送工学」, コロナ社, 1983.
- [16] A. R. Daniels, D. H. Davis, M. K. Pal, “Linear and Nonlinear Optimization of Power System Performance”, IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, Vol.94, No.3, pp.810-818, 1975.

第4章 高速移相器を用いた電力動揺線形化制御の構成と評価

4.1 緒言

第2章において、高速移相器により制御可能な発電機の出力の領域を電力相差角曲線上で定義することができた。また、第3章においては、過渡動揺中の発電機出力を直接制御することができれば、電力動揺を線形化する制御方式によりロバストな系統安定化が達成できることがわかった。

これらの結果に基づいて、本章では、送電線に直列に設置した高速移相器を用いて、電力動揺線形化制御によるロバストな系統安定化制御を構成するための具体的な方法を検討し、得られた制御系について制御効果の評価を行う。

まず、高速移相器を含む長距離大容量送電系統のモデル化を行い、第2章の手法に従って高速移相器の制御可能領域を求める。次に、得られた制御可能領域の有効利用という観点から、第3章で述べた電力動揺線形化制御の高速移相器への適用により期待される効果について詳細に検討する。さらに、高速移相器を用いて電力動揺よりも速く発電機出力を制御する方法を検討し [1]、その発電機出力制御の応用として電力動揺線形化による系統安定化制御を構成する。このとき、制御に必要な信号のなかで計測が困難と考えられる変数については、他の計測可能な信号から近似生成する方法を検討する。以上により構成された制御系をモデル系統に適用して計算機シミュレーションを行い、高速移相器による電力動揺線形化制御の制御特性とロバスト性の評価を行う [2, 3, 4]。

4.2 高速移相器を含む電力系統モデル

本章では、図 4.1 に示す一機無限大母線系統を用いてシミュレーション解析を行う。このモデルは、送電線に直列に高速移相器が設置された長距離大容量送電系統の一例であり、1,170 [MVA] の発電機5機を有する発電所から、変圧器を介して、500 kV、2回線の送電線に接続され、約 100 km 離れた大規模系統へ送電を行っている場合を想定している。ただし、 x_s は送電線の負荷側系統の短絡インピーダンスを表している。また、高速移相器は送電線の発電機端に設置されるものとし、第2章で使用した SSSC 動作モード、すなわち、その出力電圧 $\hat{V}_s$ が送電線電流 $\hat{I}$ に常に直交するように制御された電圧源モデルで表している。各系統定数を表 4.1 に示す。なお、図 4.1 のモデルにおける無限大母線は、大規模系統への連系点に相当する。

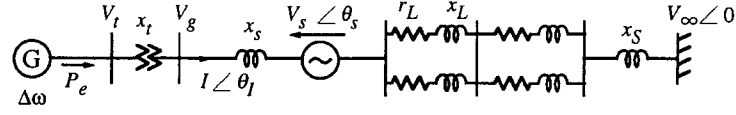


図 4.1: 高速移相器モデルを含む一機無限大母線系統

表 4.1: 電力系統の定数

発電機（Park の 5 次モデル, 1,170 MVA ベース）			
$x_d = 1.60$	$x_q = 1.6$	$r_a = 0.00181$	$M = 7.78 \text{ s}$
$x_{ad} = 1.35$	$x_{aq} = 1.35$	$r_{kd} = 0.0062$	$D = 2.0$
$x_{ffd} = 1.44$	$x_{kkq} = 1.37$	$r_{fd} = 0.0006$	
$x_{kkd} = 1.38$	$\omega_0 = 120 \pi [\text{rad/s}]$	$r_{kq} = 0.0124$	
送電系統（5,850 MVA ベース）			
$x_t = 0.197$	$x_L = 0.449$	$r_L = 0.0463$	$x_S = 0.193$

上の系統モデルを次のように定式化する。

まず、発電機 5 機は 5,850 [MVA] 1 機に縮約した Park の 5 次モデル [5] で記述すると、その電氣的な振舞いは次のように表される。

$$v_d = \frac{d\psi_d}{dt} - \omega\psi_q - r_a i_d \quad (4.1)$$

$$v_q = \frac{d\psi_q}{dt} + \omega\psi_d - r_a i_q \quad (4.2)$$

$$e_{fd} = \frac{d\psi_{fd}}{dt} + r_{fd} i_{fd} \quad (4.3)$$

$$0 = \frac{d\psi_{kd}}{dt} + r_{kd} i_{kd} \quad (4.4)$$

$$0 = \frac{d\psi_{kq}}{dt} + r_{kq} i_{kq} \quad (4.5)$$

$$\omega_0 \psi_d = -x_d i_d + x_{ad} i_{fd} + x_{ad} i_{kd} \quad (4.6)$$

$$\omega_0 \psi_q = -x_q i_q + x_{aq} i_{kq} \quad (4.7)$$

$$\omega_0 \psi_{fd} = -x_{ad} i_d + x_{ffd} i_{fd} + x_{ad} i_{kd} \quad (4.8)$$

$$\omega_0 \psi_{kd} = -x_{ad} i_d + x_{ad} i_{fd} + x_{kkd} i_{kd} \quad (4.9)$$

$$\omega_0 \psi_{kq} = -x_{aq} i_q + x_{kkq} i_{kq} \quad (4.10)$$

$$P_e = \psi_d i_q - \psi_q i_d \quad (4.11)$$

一方、発電機の動揺方程式は次式で表される。

$$\frac{M}{\omega_0} \frac{d}{dt} \omega + \frac{D}{\omega_0} (\omega - \omega_0) = P_m - P_e \quad (4.12)$$

発電機の励磁系には、図 4.2 に示す自動電圧調整器 (AVR) が設置されているものとし、調速機は高速移相器の制御に比べて十分遅いとして、その効果を見捨てて機械入力トルク T_m を一定とする。

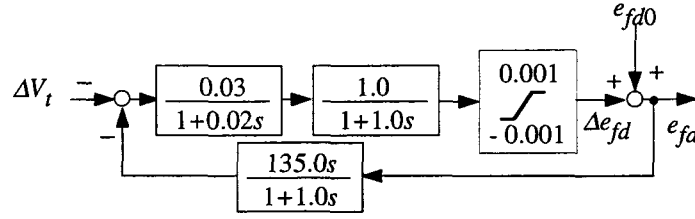


図 4.2: AVR のブロック図

高速移相器は送電線の発電機端に設置されるものとし、その動特性を図 4.3 に、定数を表 4.2 に示す。ただし、 ξ は高速移相器の出力電圧指令値で、実際の操作量 $\hat{V}_s$ に基づき、高速移相器の出力電圧 $\dot{V}_s$ が次式で与えられる。ただし、 V_s は出力電圧 $\dot{V}_s$ の大きさで、 $V_s = |\hat{V}_s|$ で与えられるものとし、 θ_I は図 4.1 に示したように送電線電流の位相である。

$$\dot{V}_s = \begin{cases} V_s \angle(\theta_I + 90^\circ) & (\hat{V}_s \geq 0) \\ V_s \angle(\theta_I - 90^\circ) & (\hat{V}_s < 0) \end{cases} \quad (4.13)$$

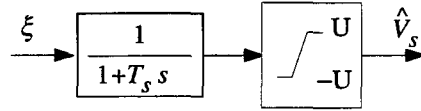


図 4.3: 高速移相器の制御特性

表 4.2: 高速移相器の定数 (5,850 MVA ベース)

直列変圧器漏れリアクタンス	$x_s = 0.01$
電圧容量	$U = 0.05$
時定数	$T_s = 0.05$

このとき、系統の動特性は次の微分方程式で表される。

$$v_d = (r_L + \frac{x_L}{\omega_0} \frac{d}{dt}) i_d - \omega \frac{x_L}{\omega_0} i_q + v_{sd} + v_\infty \sin \delta \quad (4.14)$$

$$v_q = (r_L + \frac{x_L}{\omega_0} \frac{d}{dt}) i_q + \omega \frac{x_L}{\omega_0} i_d + v_{sq} + v_\infty \cos \delta \quad (4.15)$$

ただし、

$$v_{sd} = -\hat{V}_s \frac{i_q}{\sqrt{i_d^2 + i_q^2}} \quad (4.16)$$

$$v_{sq} = \hat{V}_s \frac{i_d}{\sqrt{i_d^2 + i_q^2}} \quad (4.17)$$

また、上記の方程式に使われた各記号ならびに添字の意味は表 4.3 に示す通りとする。

表 4.3: 記号および添字の一覧

記号	
v, e : 電圧	r : 抵抗
i : 電流	x : リアクタンス
ψ : 磁束	T_m : 機械的トルク
δ : 回転子角	T_e : 電氣的トルク
ω : 回転子角速度	M : 慣性定数
ω_0 : 定格角速度 ($\omega_0 = 120\pi$)	D : 制動係数
添字	
d : d 軸	f : 界磁巻線
q : q 軸	l : 送電線
a : 電機子巻線	s : 移相器
k : 制動巻線	∞ : 無限大母線

以上の電力系統モデルでは、第2章の手順に従って高速移相器の制御可能領域を求めることができる。その結果を図4.4に示す。ただし、この場合、発電機モデルは簡略化したParkの3次モデルを用い、抵抗分、AVRの効果も無視している。以下で検討を行う制御系は、図4.4の制御可能領域内を有効に利用する制御を検討するものである。

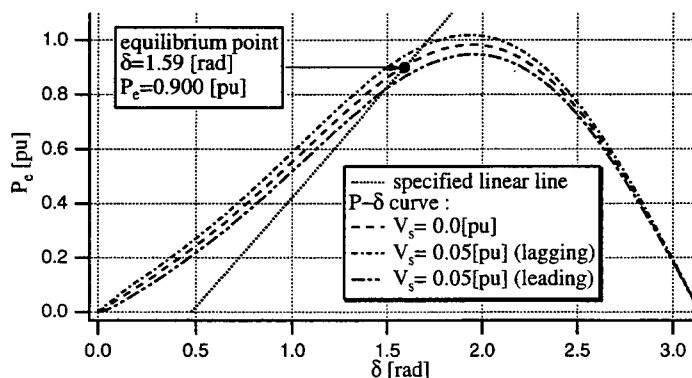


図 4.4: 解析対象モデルにおける高速移相器の制御可能領域

4.3 高速移相器による電力動揺線形化制御の有効性

前節では、第2章の手法に従い、解析対象モデルに対して高速移相器の制御可能領域を得ることができた。図4.4は系統動揺時に δ が変化したとき、 V_s の制御によって設定可能な P_e の領域を表している。系統安定化制御系を設計するときにはこの制御可能範囲をいかに有効に利用するかが問題となる。

過渡安定度を最優先に考えた場合、できる限り大きい減速エネルギーを速やかに確保する制御が望ましい。そのためには、高速移相器は、故障除去後には速やかにステップ状に最大電圧を出力するよう制御するべきである。しかし、動態安定度の観点からは、このようなステップ状の制御はかえって系統に不要な擾乱を与えてしまうことになる。

従って、動作点近傍では適切な同期化力と制動力を持たせて速やかに動揺を平衡点に収束させ、大擾乱に対してはできる限り大きい減速エネルギーを確保できる制御が実現できれば、高速移相器の持つ制御可能領域を十分に活用した定態から過渡にわたる広範囲の安定化が達成される。以上の要求に対して、第3章で述べた発電機出力電力の直接制御による電力動揺線形化制御は極めて有効な制御である。

このことは、以下のように説明される。図 4.5 及び図 4.6 は、電力動揺線形化制御のもとでインパルス状の外乱に対するシステムの応答を、前節で求めた高速移相器による制御可能領域内の軌跡として図示したものである。

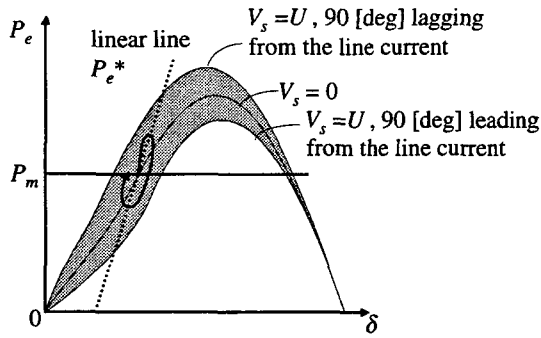


図 4.5: システムの応答（小外乱）

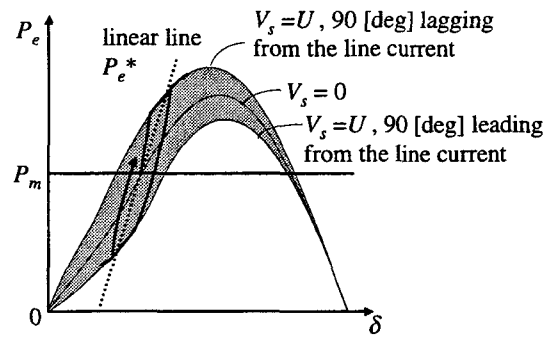


図 4.6: システムの応答（大外乱）

図 4.5 は小外乱に対する平衡点の近傍での応答であり、系統の動態安定度を問題にしている。この場合は、制御可能領域内で電力動揺の線形化が実現している例であり、第3章で述べた電力動揺線形化制御の優れた特徴が表れている。すなわち、設計者は制御可能領域内で直線 P_e^* を描いて同期化力および制動といった観点から制御の仕様を決めることができるうえ、この設計仕様は、系統状態の変更によって平衡点が変わるような場合においても常に一定に保たれるロバスト性が期待される。

一方、図 4.6 は大外乱に対する応答であり、過渡安定度の問題となる領域を考えている。制御系は、電力動揺の線形化を実現するために動作するが、図 4.6 に示すように高速移相器の制御限界に達する。制御限界に達した後に軌跡は制御領域の上限に沿って動き、高速移相器によって投入可能な最大の減速エネルギーが系統に投入される。このことから、電力動揺線形化制御は過渡安定度の向上にも大きな効果があると考えられる。

以上より、電力動揺線形化制御は、高速移相器の制御可能領域を有効に活用して定態から過渡までの広範囲にわたる安定度の向上に効果がある、ロバスト性の高い系統安定化制御であると考えられる。

4.4 高速移相器による発電機電力制御

これまでの検討で、電力動揺方程式

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega - \omega_0 \quad (4.18)$$

$$\frac{M}{\omega_0} \frac{d\omega}{dt} + \frac{D}{\omega_0} (\omega - \omega_0) = P_m - P_e \quad (4.19)$$

について、発電機出力 P_e を直接制御することにより指令値

$$P_e^* = P_m - \frac{D}{\omega_0} \Delta\omega - \frac{M}{\omega_0} (\beta_1 \Delta\delta + \beta_2 \Delta\omega) \quad (4.20)$$

に追従させる制御，すなわち電力動揺線形化制御の有効性について議論を行ってきた。電力動揺線形化制御を実現するためには，発電機出力 P_e の指令値 P_e^* への追従制御が重要な課題となる。本節では，高速移相器の直列変換器の出力電圧 $\dot{V}_s$ の位相を送電線電流に直交するように制御する一方で $\dot{V}_s$ の大きさを制御することにより，発電機出力の制御を行う方法について述べる。図 4.7 (a) に示す簡単なシステムモデルで検討する。

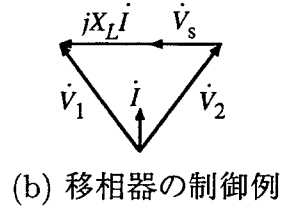
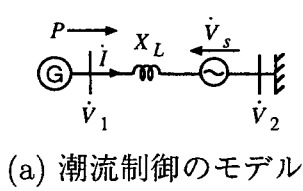


図 4.7: 移相器による潮流制御

システムモデルには送電線に直列に，移相器の直列変換器の出力電圧をモデル化した電圧源が挿入されている。通常，送受電端電圧と送電線電流の位相の関係は，図 (b) のようになっている。図 (b) は直列変換器が電流に対して 90° 進相の電圧 $\dot{V}_s$ を出力した場合を示している。このような $\dot{V}_s$ をステップ状に出力した場合を考えると，このときの効果は送電線にリアクタンスを挿入する操作に類似し，過渡的に送電電力を減少させる効果を持つ。逆に， 90° 遅相の電圧を出力した場合には，送電線にキャパシタンスを挿入する操作に類似し，この場合は過渡的に送電電力を増加させる効果を持つ。このような電力の制御が可能なのは，第2章で行った瞬時値解析の結果からもわかる。

ただし，この効果は一時的なものであり，時間が経つと発電機位相角が新しい平衡点へ移動し送電電力の値は元の値に復帰する。本論文の発電機出力制御は発電機が動揺中に動揺よりも十分速い制御で所望の電力値に制御するものである。

このように， $\dot{V}_s$ の大きさ V_s と位相 θ_s を制御することにより，発電機出力 P_e を制御することが可能である。これを追従制御に応用すれば， $\dot{V}_s$ の大きさ V_s を誤差信号 $\tilde{P}_e = P_e^* - P_e$ の大きさに従って制御し，誤差信号の符号によって $\dot{V}_s$ の位相 θ_s を電流に対して 90° 遅相または進相として設定することにより，追従制御が実現可能と考えられる。

4.5 実システムへの応用を考慮した電力動揺線形化制御系の構成

電力動揺線形化制御は，回転子角偏差並びに発電機の機械入力といった情報を制御信号として必要としている。しかし，一般にこれらの信号を検出することは困難であると考えられている。従って，電力動揺線形化制御を実システムへ応用するにあたっては，制御信号の処理において何らかの対策を必要とする。本節では，その信号処理の方法について述べる。

まず第一に，回転子角偏差 $\Delta\delta$ をリアルタイムに正確に検出することは困難である。実システムにおいて， δ の正確な検出は困難であり，また，1回線開放などのように，システムの構成

が変更され平衡点が移動するような場合、 $\Delta\delta$ には定常的な偏差が含まれることになる。そこで、回転子角偏差 $\Delta\delta$ については角速度偏差 $\Delta\omega$ を用いて近似的に得ることとする。定義上、 $\Delta\delta$ は $\Delta\omega$ の積分であるが、ここでは上で述べた δ_0 の定常的な変化分や雑音による直流偏差の除去を考慮して (4.21) 式に基づき近似信号 $\Delta\tilde{\delta}$ を生成し、 $\Delta\delta$ の代用とする。

$$\Delta\tilde{\delta} = \frac{1}{0.025 + s} \frac{1.59s}{1 + 1.59s} \Delta\omega \quad (4.21)$$

ここで、(4.21) 式において $1.59s/(1 + 1.59s)$ はリセットフィルタとして定常的な変化分を除去するためのものであり、 $1/(0.025 + s)$ は積分 $1/s$ とリセットフィルタの分子 s との極-零点消去を避けるための処置である。電力動揺に伴う回転子動揺の周波数が 1[Hz] 付近であることから、この 1[Hz] 付近で積分器の特性を持つように設定されている。この結果、(4.20) 式で示されていた発電機電力の指令値 P_e^* は次のように与えられる。

$$P_e^* = P_m - \frac{D}{\omega_0} \Delta\omega - \frac{M}{\omega_0} \left(\beta_1 \frac{1}{0.025 + s} \frac{1.59s}{1 + 1.59s} \Delta\omega + \beta_2 \Delta\omega \right) \quad (4.22)$$

第二に、発電機の機械入力 P_m の正確な検出も困難であるとされている。しかし、外乱発生後の比較的短い期間の安定化制御を検討するので、調速機の応答は電力動揺に比べて十分に遅いとし、発電機の機械入力 P_m を一定と考えることにする。そこで、次のような方法を考える。検出した発電機出力 P_e の代わりに

$$P_a = P_m - P_e \quad (4.23)$$

で定義される加速電力 P_a を制御信号として用いることにする。(4.23) 式より $P_e = P_m - P_a$ であるから、発電機出力 P_e を検出し、1 [Hz] 付近を十分に通過させる帯域通過フィルタに通して P_m を除去して得た信号を P_a の近似値 $\tilde{P}_a$ として利用することにする。すなわち、

$$\tilde{P}_a = - \frac{1}{1 + 0.0265s} \frac{1.59s}{1 + 1.59s} P_e \quad (4.24)$$

とする。これに対して加速電力の指令値 P_a^* は、(4.22) 式で $P_a^* = P_m - P_e^*$ として

$$P_a^* = \frac{D}{\omega_0} \Delta\omega + \frac{M}{\omega_0} \left(\beta_1 \frac{1}{0.025 + s} \frac{1.59s}{1 + 1.59s} \Delta\omega + \beta_2 \Delta\omega \right) \quad (4.25)$$

で与えられる。すなわち、電力動揺線形化制御のための追従制御の問題は、加速電力の指令値への追従制御の問題へと帰着された。ここで制御に必要な信号は、発電機出力 P_e と (4.25) 式のフィードバック制御の指令値において必要な $\Delta\omega$ のみである。

図 4.8 の制御系の構成にこれらの信号の流れを詳細に示す。

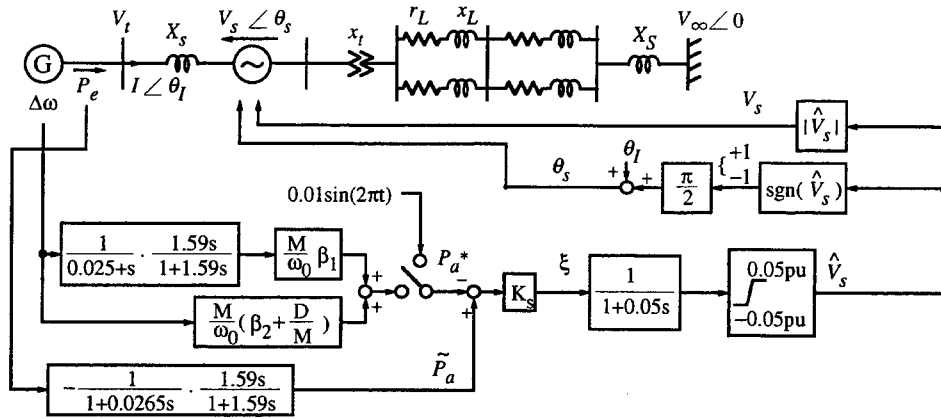


図 4.8: 電力動揺線形化制御を適用した高速移相器を含む系統モデル

4.6 シミュレーション解析に基づく制御特性とロバスト性の評価

本節では、まず第一に高速移相器を用いた発電機電力の制御特性について検討を行う。加速電力のフィードバック制御の比例ゲイン K_s は $K_s = -3.0$ とした。加速電力の制御指令値 P_a^* に (4.26) 式で表されるように正弦波状の動揺信号を与えて、発電機出力の応答を調べる。

$$P_a^* = 0.01 \sin(2\pi t) \quad (4.26)$$

(4.26) 式の周波数 1 [Hz] は電力動揺の固有周波数に近い周波数である。結果を図 4.9 に示す。

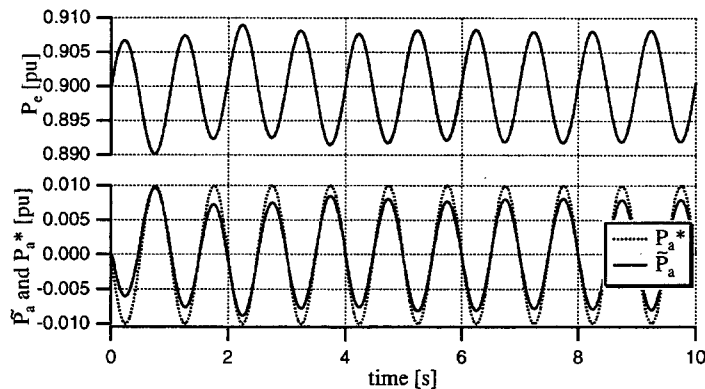


図 4.9: 高速移相器による発電機出力の制御特性

図 4.9 をみると、 $\tilde{P}_a \approx P_a^*$ となるようにほぼ制御できていることから、高速移相器によって発電機出力が制御可能であるといえる。そこで、以下ではこの制御性を利用した電力動揺線形化制御の制御効果について、図 4.8 のモデルを用いた実効値解析による計算機シミュレーションに基づいて検証を行う。電気出力の定常値は 0.9pu とし、系統に与える外乱については、連系系統において発生した故障を想定して、これを模擬するために連系点の母線電圧の大きさを変化させることにした。

電力動揺線形化制御の定数 β_1 及び β_2 は線形化後のシステムの固有値が $-1.0[1/s] \pm j2\pi[rad/s]$ となるように、それぞれ -40.5 , -2.0 とする。図 4.10 に、解析対象システムにおける高速移相器の制御可能領域と平衡状態における電力動揺線形化制御の指令値を表す直線を示す。

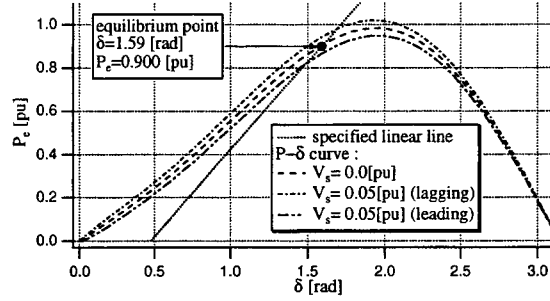


図 4.10: 高速移相器の制御可能領域と線形化の特性直線

以下に 3 通りの解析例を示す。いずれの解析においても、 $t \leq 0$ において図 4.10 に示した平衡点 $(\delta, P_e) = (1.59, 0.900)$ で運用されていたものとする。

比較的小さい外乱として、遠方での故障を想定して連系点の母線電圧を 3 サイクルの間、 $1.0 [p.u.]$ から $0.8 [p.u.]$ へ低下させた場合の解析を行った。図 4.11 から図 4.13 は、電力動揺線形化制御を行った場合と行わなかった場合のシステムの応答を比較して示したものである。図 4.11 から加速電力の近似値 $\tilde{P}_a$ の、指令値 P_a^* への追従が実現していること、またこの結果、電力 P_e の動揺が効果的に抑制されていることがわかる。

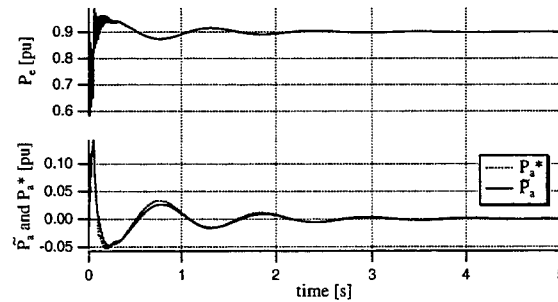


図 4.11: 発電機電力の応答（小外乱）

電力動揺線形化制御によって同期化力と制動を仕様として与えているため、図 4.12 に示すように、このときの δ の動揺の第 1 波が効果的に抑制されていることがわかる。また、図 4.13 から、設計時に仕様として与えた同期化力が実現されていることが確認できる。

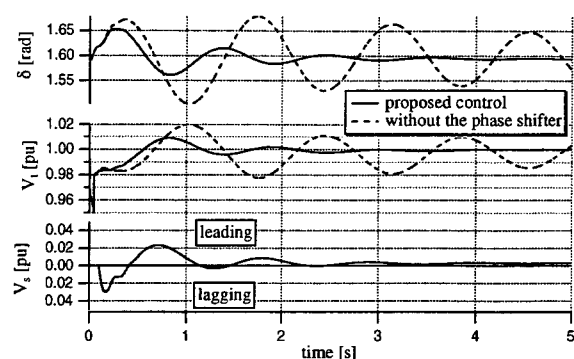
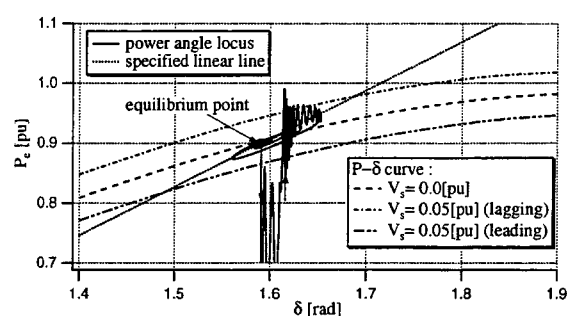


図 4.12: システム各部の応答 (小外乱)

図 4.13: $P-\delta$ 軌跡 (小外乱)

次に、大外乱として連系点近くで故障が発生したような場合を模擬して、連系点の母線電圧を3サイクルの間、1.0 [p.u.] から 0.0 [p.u.] へ低下させた場合の解析を行った。このとき、高速移相器による制御を行わない場合には、図 4.14 に示すように系統は脱調してしまっている。一方、電力動揺線形化制御のもとでは、動揺が効果的に抑制されていることがわかる。図 4.15 は電力相差角曲線上の軌跡として描いたものである。図 4.15 から故障除去直後に P_e が上限まで出力され、減速エネルギーを最大限確保する動作をしていることがわかる。ここで、制御可能領域と軌跡のずれは AVR の効果を表している。

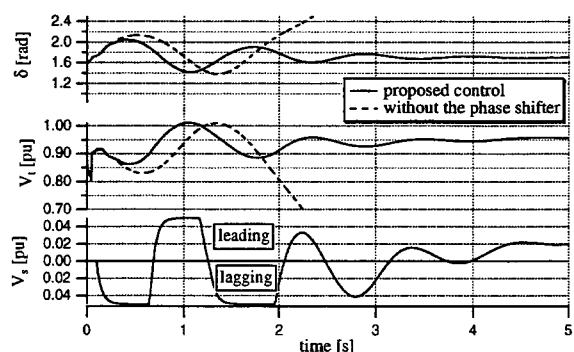
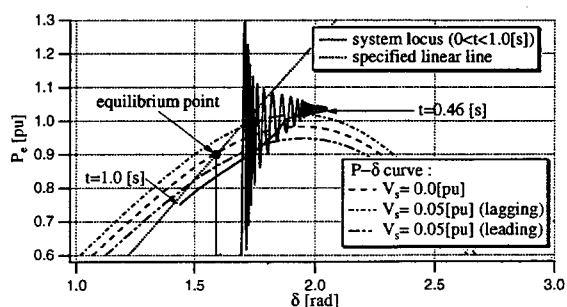


図 4.14: システム各部の応答 (大外乱)

図 4.15: $P-\delta$ 軌跡 (大外乱)

さらに、制御系のロバスト性を確かめるために、故障の前後で平衡点が変わるような場合の解析を行った。外乱として連系点の母線電圧を3サイクルの間 1.0 [p.u.] から 0.8 [p.u.] へ低下させた後、故障消滅直後に x_S を 20% 増加させた。これは、遠方において発生した故障の除去に際して開放された線路が再投入されなかったために、遠方の系統構成が変わったような場合に相当する。このときの結果を図 4.16 及び図 4.17 に示す。高速移相器の制御を行わない場合には、動揺の減衰が悪く、また、動揺の周期が長くなっていることから系統の同期化力も低下していることがわかる。しかし、電力動揺線形化制御を行った場合には、図 4.17 より、新しい平衡点においても一定の同期化力を持たせることができています。

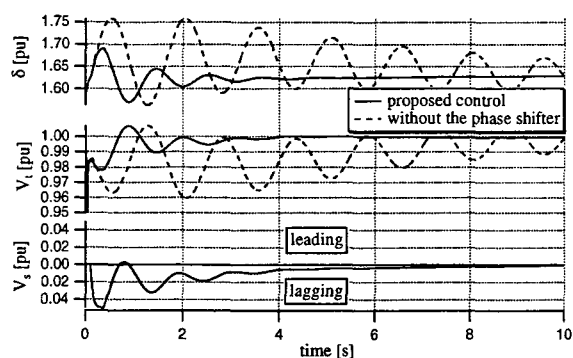
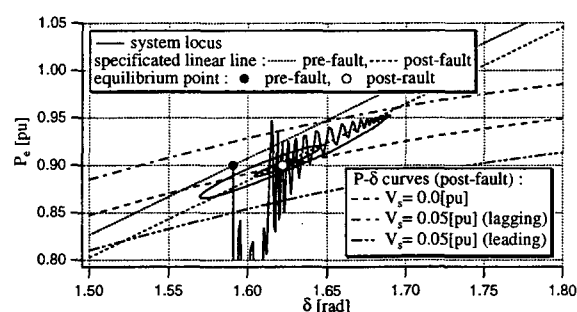


図 4.16: システム各部の応答 (平衡点移動)

図 4.17: $P - \delta$ 軌跡 (平衡点移動)

4.7 結言

本章では、発電機出力の制御可能領域が定義された高速移相器を用いて、電力動揺線形化制御による系統安定化制御系を構成し、計算機シミュレーションによってその制御特性とロバスト性の評価を行った。得られた結果を以下に示す。

- 電力動揺線形化に基づくロバスト系統安定化制御は、高速移相器の持つ制御可能領域を十分に活用しうる制御方式であることがわかった。
- 高速移相器による潮流制御を応用して、発電機の電力を直接制御可能であることがわかった。
- 実系統への適用を考慮して、回転子角速度偏差と発電機出力の2つの情報で電力動揺線形化制御系を構築した。
- シミュレーション解析により、電力動揺線形化制御の制御特性並びにロバスト性を検証した結果、微小外乱に対しては一定の同期化力と制動で安定化される一方で、大外乱に対しては減速エネルギーを最大限投入するように切り替わる制御であること、さらに事故後に系統の運用状態が変わるような場合にも一定の制御効果が得られることを示した。

参考文献

- [1] M. Hojo, Y. Mitani and K. Tsuji, "Robust Control for Power System Stabilization based on the Direct Control of Power Flow by Phase Shifter", Proceedings of the International Association of Science and Technology for Development (IASTED), pp.157-162, October 1997.
- [2] M. Hojo, Y. Mitani and K. Tsuji, "Voltage and Power Swing Stabilization by Decoupled Control with AVR and Phase Shifter", Proceedings of the International Conference on Energy Management and Power Delivery (EMPD), Vol.1, pp.183-188, March 1998.

- [3] 北條, 三谷, 辻:「FACTS 機器を用いた発電機電力直接制御によるロバスト系統安定化」, 平成 9 年電力技術・電力系統技術合同研究会資料, PE(PSE)-97-164, pp.31-36, 1997.
- [4] 北條, 三谷, 辻:「移相器を用いた発電機電力直接制御による過渡安定度向上効果の評価」, 平成 10 年電気学会全国大会講演論文集, No.1421, 1998.
- [5] Y. N. Yu, “Electric Power System Dynamics”, Academic Press, New York, 1983.

第5章 超伝導エネルギー貯蔵装置による電力動揺線形化制御との比較

5.1 緒言

超伝導エネルギー貯蔵装置 (Superconducting Magnetic Energy Storage, 以下では単に SMES と呼ぶ) は, 有効・無効電力を同時かつ高速に吸収・放出が可能である特徴を持つ並列型の FACTS 機器であり, その特徴を活かした系統安定化制御系が提案されている [1, 2, 3]。例えば, Y. L. Tan らは, 電力系統の非線形性を考慮した適応制御を SMES を用いて実現する方法を提案している [1]。

前章まで直列型 FACTS 機器である高速移相器による電力動揺線形化制御について, その概念から設計方法, ならびに制御効果を詳述してきた。これに対して本章では, 並列型 FACTS 機器に属し, 有効電力を高速に制御可能な SMES を用いて電力動揺線形化制御を実現する方法について述べる。まず, 電力相差角曲線を用いて SMES による制御可能領域を定義し, その領域を有効に活用する系統安定化制御として電力動揺線形化制御を考える。次に, 発電機出力の制御方法ならびに制御信号の近似について検討し, SMES による電力動揺線形化制御系を構築する。また, 計算機シミュレーションに基づいて, SMES の有効電力制御による電力動揺線形化制御について, 制御特性とロバスト性の評価を行う。さらに, 高速移相器による電力動揺線形化制御との比較を行う。

5.2 超伝導エネルギー貯蔵装置による発電機電力制御

SMES を適用した電力系統モデルとして, 図 5.1 に示すような, 発電機端に SMES を持つ一機無限大母線系統を考える。SMES の効果を含んだ動揺方程式は (5.1), (5.2) 及び (5.3) 式で表される。簡単のために抵抗は無視している。ここで, 非線形性は (5.3) 式の三角関数にのみ含まれている。

$$\frac{M}{\omega_0} \frac{d^2\delta}{dt^2} + \frac{D}{\omega_0} \frac{d\delta}{dt} = P_m - P_e \quad (5.1)$$

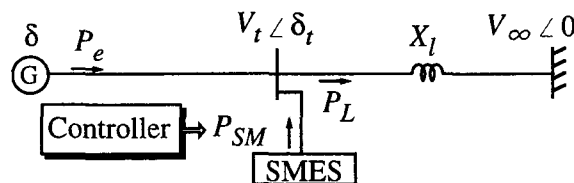


図 5.1: SMES を含む電力系統モデル

$$P_e = P_L - P_{SM} \quad (5.2)$$

$$P_L = \frac{V_t V_\infty}{X_l} \sin \delta_t \quad (5.3)$$

SMESの制御効果を電力相差角曲線上で検討する。図5.2はSMESの有効電力制御量 P_{SM} の電力相差角曲線への制御効果を表している。ただし、有効電力制御量の範囲は $-P_{SMmax} \leq P_{SM} \leq P_{SMmax}$ であるとする。SMESの電力制御は、過渡動揺中においても δ の変化速度よりも十分速いとする、発電機出力 P_e は図5.2の斜線部内を自由に制御することができる。これにより、何らかの外乱に対する動揺中に発電機電力を直接制御することにより、系統安定化制御を実現することができる。

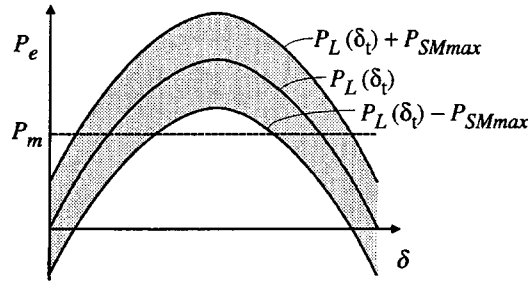


図 5.2: 電力相差角曲線における SMES の有効電力制御の効果

5.3 超伝導エネルギー貯蔵装置による電力動揺線形化制御システムの構成

(5.1) 式の電力動揺方程式は、加速電力 P_a ，すなわち $P_a = P_m - P_e$ を用いて次のように表すことができる。

$$\frac{M}{\omega_0} \frac{d^2 \delta}{dt^2} + \frac{D}{\omega_0} \frac{d\delta}{dt} = P_a \quad (5.4)$$

ここで、(5.4) 式において、非線形性は P_a にのみ含まれることに注意してこれを P_a を SMES により直接制御し、(5.5) 式の指令値 P_a^* に追従させることが可能であると仮定する。

$$P_a^* = \frac{M}{\omega_0} \beta_1 (\delta - \delta_0) + \frac{M}{\omega_0} \left(\beta_2 + \frac{D}{M} \right) \frac{d\delta}{dt} \quad (5.5)$$

ただし、 δ_0 は、回転子角 δ の初期値である。

P_a^* に対する P_a の追従に時間遅れがないと仮定して $P_a = P_a^*$ とおくと、動揺方程式 (5.4) は次式のように線形化される。

$$\frac{d^2 \delta}{dt^2} - \beta_2 \frac{d\delta}{dt} - \beta_1 (\delta - \delta_0) = 0 \quad (5.6)$$

ここで、制御定数 β_1 及び β_2 は、(5.6) 式で表される線形化後のシステムの固有値を指定することで決定される。

ここで、第4章の高速移相器を用いた制御系構成で述べたような制御信号の検出方法を、SMESによる制御系にも応用する。すなわち、発電機出力 P_e を検出し、電力動揺の周波数

の存在する 1 [Hz] 付近を十分に通過する帯域通過フィルタを用いて得た信号を加速電力 P_a の近似値として用いることにする。この処理により、調速機によって制御される P_m の応答や系統の動作点の変更等によって生じることのある直流成分、さらに電機子巻線および制動巻線の電氣的な応答を P_e から除去することができる。すなわち、直接制御の制御対象となる状態量 P_a は、次式で与えられる $\tilde{P}_a$ で近似される。

$$\tilde{P}_a = -\frac{1}{1 + 0.0265s} \frac{1.59s}{1 + 1.59s} P_e \quad (5.7)$$

こうして得た $\tilde{P}_a$ を P_a^* に追従させるための、発電機出力を直接制御する方法として発電機の電気出力 P_e を次式の比例フィードバックに基づいて制御する方法が考えられる。

$$P_{SM} = -K_{PL}(\tilde{P}_a - P_a^*) \quad (5.8)$$

SMES の有効電力出力 P_{SM} を (5.8) 式のように行うとき、電力相差角曲線は図 5.2 のように制御され、発電機出力 P_e の制御を行うことができる。

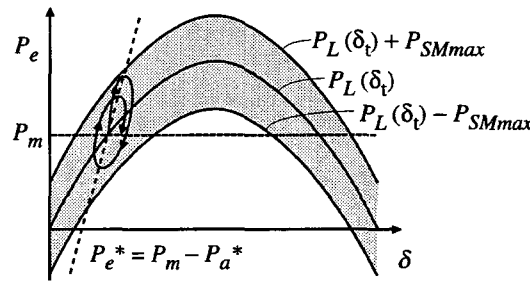


図 5.3: 電力相差角曲線で表した SMES の有効電力制御の効果

図 5.3 に電力相差角曲線における電力動揺線形化制御の効果を示す。電力動揺線形化制御では、発電機出力は P_e^* で表された直線に沿って制御されることになり、 P_e と δ は線形な関係が保たれる。このとき線形化された電力系統は、(5.6) 式で β_1 と β_2 で指定される同期化力と制動をもつシステムとなっている。その結果、電力相差角曲線上の軌跡は直線 P_e^* に沿って時計回りの渦を描いて平衡点へ収束し、そのダイナミクスは指定した固有値の通りになることが期待される。また、平衡点での P_e の傾きより P_e^* の傾きを大きく設定しておくことで、過渡安定度の問題となるような大きな外乱に対しても系統に対して速やかに十分な減速エネルギーを投入することができ、過渡安定度の向上も図られる制御となっている。以上のように、電力動揺線形化制御は、定態から過渡安定度までの広範囲の安定度向上に寄与するものである。

また、このとき SMES の無効電力出力 Q_{SM} を用いて (5.9) 式で与えられる電圧制御を行うこととしている。

$$Q_{SM} = -K_V \Delta V_t \quad (5.9)$$

5.4 シミュレーション解析に基づく制御特性とロバスト性の評価

図 5.4 に示す電力系統モデルのもとで計算機シミュレーションによる実効値解析を行い、SMES による電力動揺線形化制御の制御特性とロバスト性の評価を行う。発電機は、1,170

[MVA] の同期発電機 5 機を 1 機に縮約した 5,850 [MVA] の発電機で AVR が設置されたモデルを用いており、電機子巻線及び制動巻線の応答まで含んだ Park のモデルで表されている。発電機は 500 [kV], 100 [km] の二回線送電線に接続されている。系統の定数は表 2.1 と同じである。

電力動揺線形化制御を適用した SMES は発電機端に設置されており、その制御特性は (5.10), (5.10) 式で表される 1 次遅れの動特性をもつ有効・無効電力源としてモデル化している。

$$P_{SMo} = 1/(1 + 0.01s)P_{SM} \quad (5.10)$$

$$Q_{SMo} = 1/(1 + 0.01s)Q_{SM} \quad (5.11)$$

ただし、 P_{SM} 及び Q_{SM} はそれぞれ (5.8) 式及び (5.9) 式で与えられる SMES の有効・無効電力の制御量であり、 P_{SMo} 及び Q_{SMo} は実際に制御される量である。

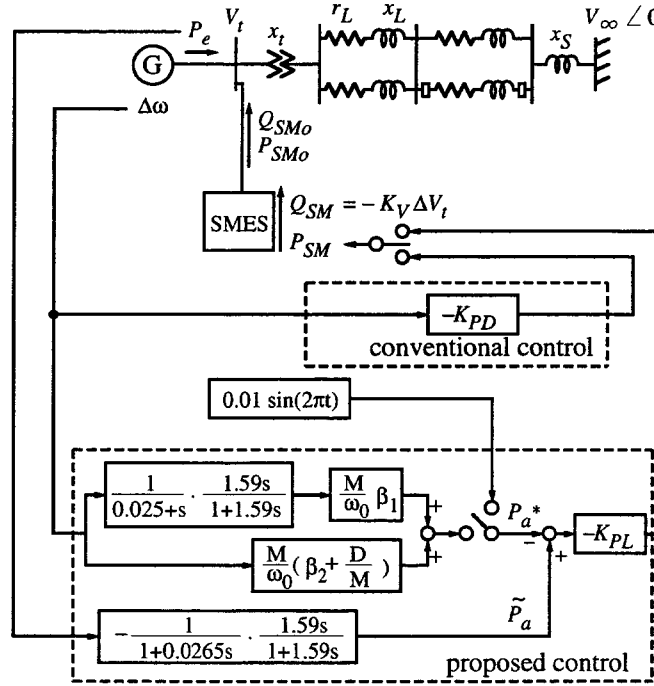


図 5.4: 電力動揺線形化制御を適用した SMES を含む長距離送電系統モデル

はじめに、SMES の有効電力制御による発電機出力の定常動揺信号への追従特性について、計算機シミュレーションに基づく検討を行う。例として加速電力の指令信号 P_a^* に次式で表される正弦波信号を与えてみる。

$$P_a^* = 0.01 \sin(2\pi t) \quad (5.12)$$

ここで (5.12) 式の周波数は、系統の固有周波数にほぼ近い値となっている。このような追従制御に対する発電機の応答を解析した結果を図 5.5 に示す。 $K_{PL} = 3.0$ とし、SMES の無効電力制御による電圧制御のゲイン K_V は 2.0 としている。

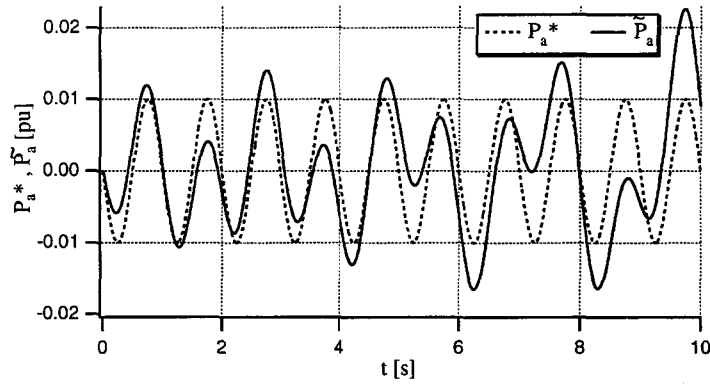


図 5.5: SMES による加速電力の追従制御

図 5.5 では、追従制御が成功していない。これは、SMES の有効電力制御により系統が動揺を始めていることが理由と考えられる。しかし、以下で述べる電力動揺の線形化による系統安定化制御では、系統の制動を高める制御が施されるため、ここでは安定化制御後の状態を想定し、一時的に制動係数を大きく設定 ($D = 20.0[\text{p.u.}]$) して解析を行った。この場合の解析結果が図 5.6 である。

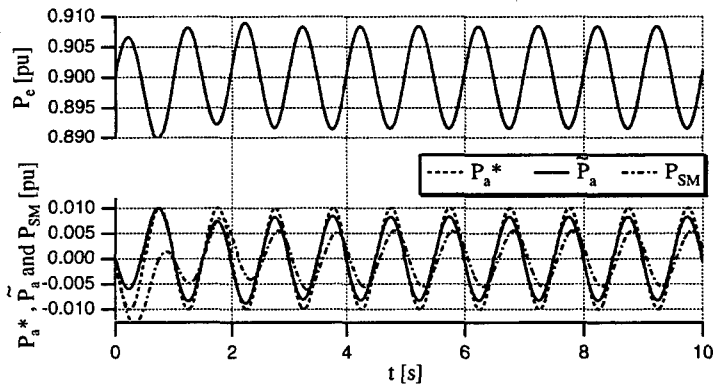


図 5.6: SMES による発電機出力制御の結果

図 5.6 をみると、発電機の出力が効果的に制御されており、指定した定常動揺信号に対して追従しているようすがわかる。以上より、SMES を用いて $\tilde{P}_a \approx P_a^*$ となるように制御可能であることがわかった。そこで、正弦波信号に代えて (5.5) 式で与えられる P_a^* を与え、電力動揺線形化制御を適用する。以下では、制動係数を再び表 2.1 の値 ($D = 2.0[\text{p.u.}]$) に戻して解析を行う。

ここで、(5.5) 式の $(\delta - \delta_0)$ は、直流分の除去も考慮して、

$$\delta - \delta_0 = \frac{1}{0.025 + s} \frac{1.59s}{1 + 1.59s} \Delta\omega \quad (5.13)$$

を用いて $\Delta\omega$ から近似的に得ることにし、 P_a^* は (5.14) 式を用いる。

$$P_a^* = \frac{M}{\omega_0} \beta_1 \frac{1}{0.025 + s} \frac{1.59s}{1 + 1.59s} \Delta\omega + \frac{M}{\omega_0} \left(\beta_2 + \frac{D}{M} \right) \Delta\omega \quad (5.14)$$

制御ゲイン β_1 及び β_2 は (5.6) 式で線形化後のシステムの固有値指定によって決定される。ここでは、固有値として $-1.0[1/s] \pm j2\pi[rad/s]$ を指定することにする。虚数部は同期化力の増強を意味する。このとき、 β_1 および β_2 は、それぞれ -40.5 、 -2.0 で与えられる。

この条件のもとで、遠方で故障が発生した場合を想定して連系点の母線電圧を 4 サイクルの間、 1.0 [pu] から 0.8 [pu] に低下させて解析を行った。また、SMES の制御は故障除去から行うものとする。図 5.7 において $\tilde{P}_a$ と P_a^* を比較すると、故障後の過渡動揺中においても、加速電力の追従制御が実現していることがわかる。

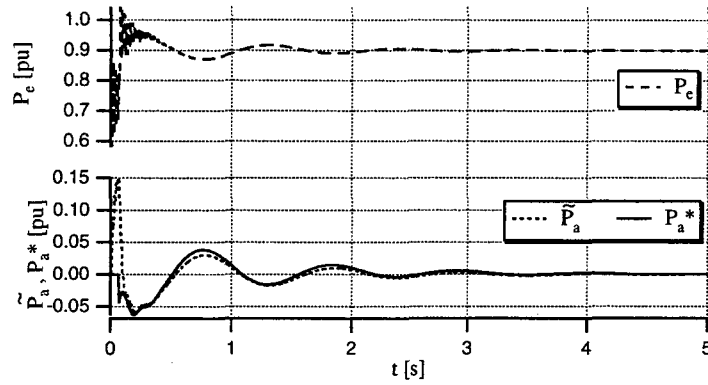


図 5.7: 過渡状態における加速電力の追従制御

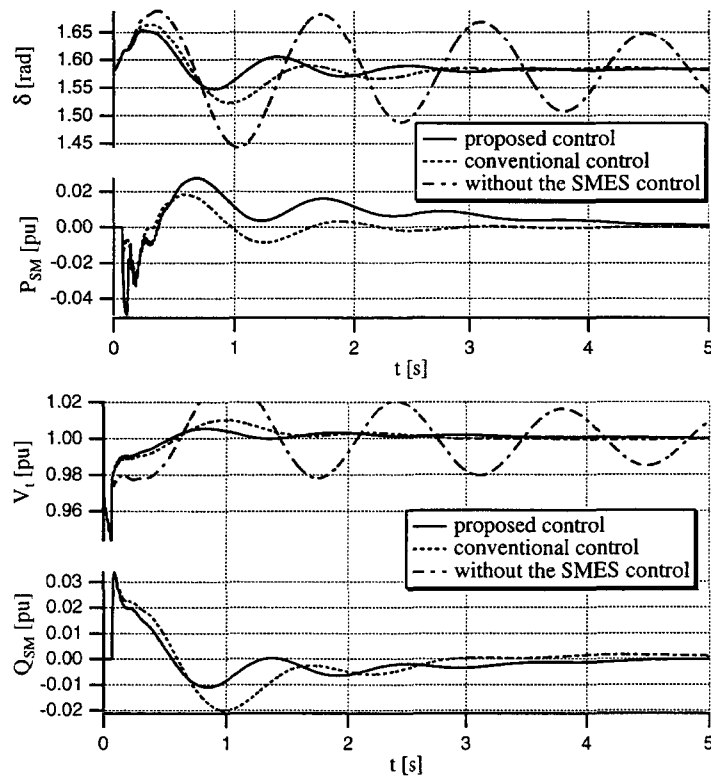


図 5.8: システムの過渡応答

図 5.8 は SMES による電力動揺線形化制御の効果を示している。比較のために、従来型

の制御方式の一例として角速度偏差のフィードバック制御

$$P_{SM} = -K_{PD}\Delta\omega, \quad K_{PD} = 20.0 \quad (5.15)$$

$$Q_{SM} = -K_V\Delta V_t, \quad K_V = 2.0 \quad (5.16)$$

を行った場合の応答を示す。

電力動揺線形化制御の結果をみると、固有値指定に従って電力動揺が効果的に抑制されていることがわかる。同期化力と制動が固有値によって指定されているため、 δ の第 1 波動揺のピーク値が従来型フィードバック制御に比べて小さく抑えられていることがわかる。電力動揺線形化制御を適用した SMES は、図 5.3 で説明したように、線形化のために指定した直線 P_e^* に沿うように制御されるために故障直後に十分な有効電力を出力し、この結果十分な減速エネルギーが系統に導入されるためであると考えられる。また、このとき発電機端子電圧も SMES の無効電力制御によって効果的に抑制されていることがわかる。

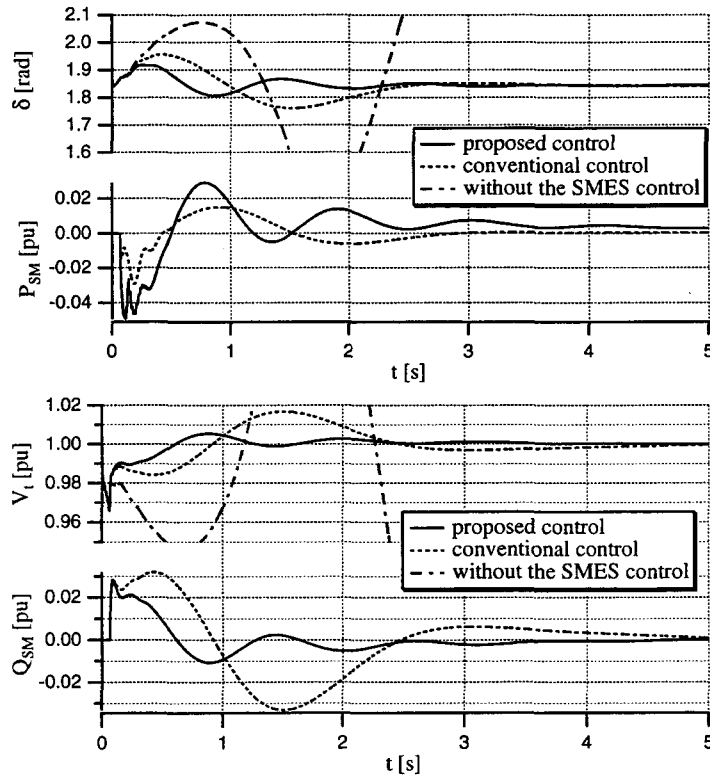


図 5.9: 重潮流時のシステムの応答

さらに、SMES による電力動揺線形化制御のロバスト性を確かめるために、送電線のリアクタンスと抵抗値をそれぞれ 50 % 増加して平衡点を変更した場合の解析を行った。これは送電線の一部区間を開放したような場合を想定している。そこで、図 5.8 の場合と同じく連系点の母線電圧を 4 サイクルの間、1.0 [pu] から 0.8 [pu] に低下させて解析を行った。結果を図 5.9 に示す。SMES による制御を行わない場合には、外乱によって脱調しており、このときの電力動揺の周波数が小さくなっていることから、同期化力が低下していることがわかる。一方で、従来型の角速度フィードバック制御を適用した場合の結果は、ダンピ

ングは効いているものの、同期化力は確保できていないため、第1波動揺が大きくなっている。これに対し、電力動揺線形化制御を適用した場合には、平衡点が変わったような場合にも設計時に指定した制動と同期化力が確保され、効果的に安定化されていることがわかる。

5.5 高速移相器を用いた系統安定化制御との比較検討

第3章の図3.1で想定した発電機出力の制御量 P_c の実現方法として、直列型 FACTS 機器である高速移相器を用いた場合を図5.10 (a)に、並列型 FACTS 機器である SMES を用いた場合を図5.10 (b)に比較して示す。

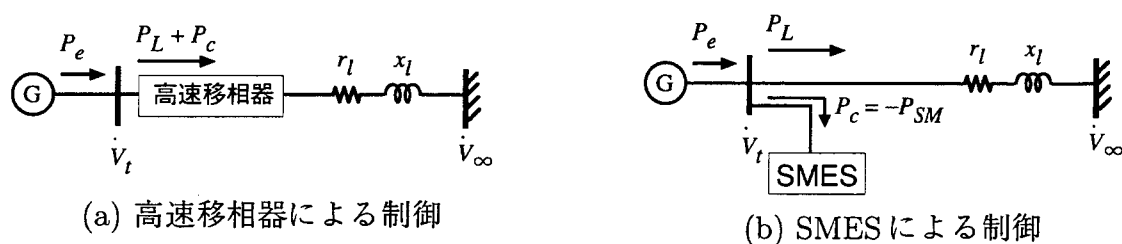


図 5.10: FACTS 機器による発電機出力制御

第4章の結果より、高速移相器により送電線の潮流を制御することで、図4.9のように発電機出力の追従制御が実現し、図4.11でみたように電力動揺を固有値指定に従って線形化することが可能であることがわかった。

一方、SMESにより発電機端の有効電力を制御することで、図5.6のように発電機出力の追従制御が実現し、さらに、図5.7のように電力動揺の固有値指定に従った線形化が可能であることが確かめられた。

以上の結果より、高速移相器とSMESのいずれを用いた場合にも、電力動揺線形化制御が実現することが示された。

電力動揺線形化制御を適用する制御機器として、高速移相器とSMESのいずれを選択するかについては次のように考えることができる。電力動揺線形化制御では発電機出力を直接制御するが、直列型のFACTS機器を用いる場合には、電力変換装置と移相変圧器によって構成され、発電機制御のためのエネルギーは負荷側に繋がる大規模系統から供給される。一方、並列型のFACTS機器を用いる場合には、発電機制御のための電力変換装置と変圧器に加えて百数十MJ程度のエネルギー貯蔵要素が必要となる。電力動揺線形化制御の目的のみでFACTS機器を選択する場合には、エネルギー蓄積要素を必要としない直列機器として高速移相器が装置構成上簡便であると考えられる。

また、高速移相器の場合には、発電機と系統の間に直列に機器が設置されるため、発電機と系統との間の固有の動特性の影響を受けにくい利点がある。これに対して、SMESによる電力制御において図5.5にみられたように、系統固有の制動を考慮しないときに電力制御が良好に動作しないという問題点を生じたことから両者の差がわかる。

5.6 結言

本章では、電力動揺線形化に基づくロバスト系統安定化制御を、並列型の FACTS 機器である超伝導エネルギー貯蔵装置 (SMES) を用いて構成した。本章で得られた知見を以下にまとめる。

- 発電機の出力電力を検出して SMES により直接制御することで、発電機の加速電力の指令値への追従制御を実現するための制御系構成を行った。
- シミュレーション解析により、SMES を用いた電力動揺線形化制御が実現可能であることを示し、その制御特性並びにロバスト性の点から高速移相器を用いた場合と同等の制御結果を得た。
- 電力動揺線形化制御の目的で FACTS 機器を導入する場合には、系統固有の動揺特性の影響を受けにくく、かつエネルギー貯蔵要素を使わずに制御が実現できる高速移相器が有利であると考えられる。

参考文献

- [1] Y. L. Tan and Y. Wang, "Augmentation of transient stability using a superconducting coil and adaptive nonlinear control", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 13, No. 2, May 1998, pp. 361–366.
- [2] S. D. Feak, "Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES) utility application studies", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 12, No. 3, August 1997, pp. 1094–1102.
- [3] Y. Mitani, K. Tsuji and Y. Murakami, "Application of Superconducting Magnetic Energy Storage to improve power system dynamic performance", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 3, No. 4, November 1988, pp. 1418–1425.

第6章 高速移相器を含む模擬電力系統における系統安定化実験に基づく検討

6.1 緒言

本章では，高速移相器が設置された長距離大容量送電系統を模擬した実験装置 [1] に対して電力動揺線形化制御系の具体的な構成方法を提案して系統安定化実験を行い，その効果を検証した結果について述べる [2]。以下では，まず電力動揺線形化制御を模擬実験装置へ実装した制御系の構成法について説明する。次に，電力動揺線形化制御では高速移相器による発電機出力の制御を実現する必要があるため，発電機出力の指令信号への追従制御特性の試験を行った結果について述べる。そのうえで高速移相器を用いた電力動揺線形化制御による系統安定化実験を行った結果に基づいて制御特性ならびに制御系のロバスト性を検証し，電力動揺線形化制御の有効性を示す。

6.2 高速移相器を含む模擬電力系統の構成

図 6.1 に実験システムの構成を示す。本実験システムは模擬電力系統と送電線に設置された高速移相器により構成される。

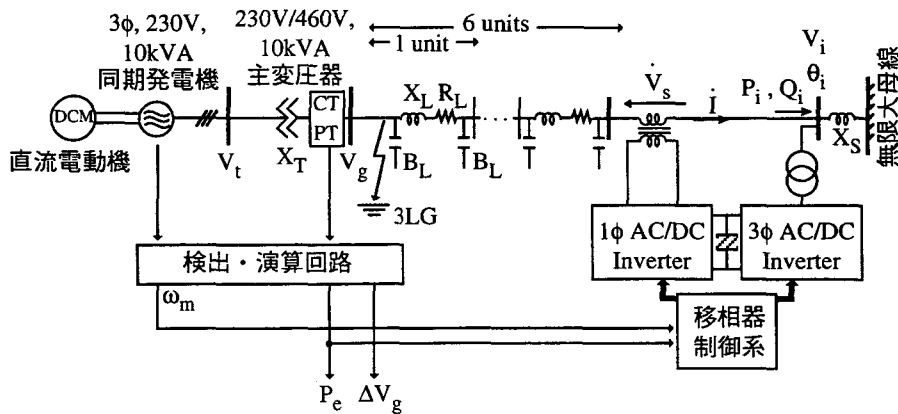


図 6.1: 実験システムの構成

模擬電力系統は長距離大容量送電系統を想定した一機無限大母線系統となっており，1,000 [MW] 級の原子力発電機 2 台を有する発電所から，500 [kV] で約 200 [km] の送電線を介して大容量の系統に送電している場合を模擬している [1]。発電機の定格は 10kVA/230V/1800rpm

表 6.1: 系統の定数

発電機 (10kVA, 230V ベース値)	
慣性定数	$M = 8.0 \text{ s}$
直軸同期リアクタンス	$x_d = 1.35$
直軸過渡リアクタンス	$x'_d = 0.48$
横軸同期リアクタンス	$x_q = 1.31$
直軸開路時定数	$T'_{do} = 0.21 \text{ s}$
定格角速度	$\omega_r = 120\pi \text{ rad/s}$
送電系統 (10kVA, 460V ベース値)	
変圧器のリアクタンス	$X_T = 0.15$
送電線のリアクタンス (1ユニット)	$X_L = 0.046$
送電線の抵抗 (1ユニット)	$R_L = 0.005$
送電線の静電容量 (1ユニット)	$B_L = 0.027 \times 2$
里側の短絡リアクタンス	$X_S = 0.14$

で直流電動機により駆動されており、それぞれの制御系によって AVR, 調速機の動作が模擬されている。送電線は 1 ユニットが 500 [kV], 二回線 40 [km] に相当する RLC の π 形構成 (線間電圧 460 [V]) である。本実験システムの定数は表 6.1 に示す通りである。

図 6.1 の本実験装置に設置されている高速移相器とその制御系を含む部分の構成を, 図 6.2 に詳細に示す。高速移相器は, 系統に直列に接続された 3 台の単相インバータと並列に接

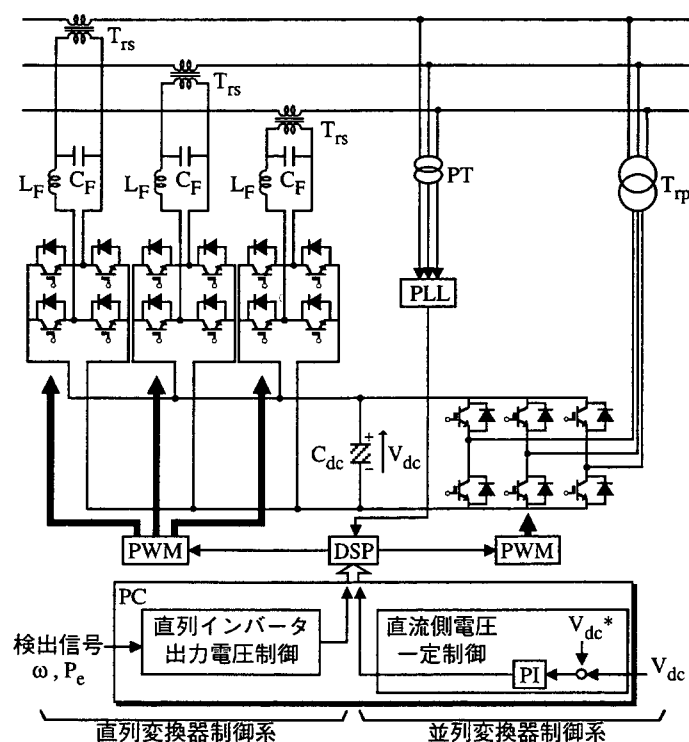


図 6.2: 高速移相器の構成

表 6.2: 高速移相器の仕様

直列インバータ (単相 PWM インバータ 3 台)		
変圧器 T_{rs}	容量	6 kVA $\times$ 3
	1 次側電圧	460V
	2 次側電圧	115V
インバータ	容量	2.6 kVA $\times$ 3
	直流側電圧	70V
	使用素子	IGBT
並列インバータ (三相 PWM インバータ)		
変圧器 T_{rp}	容量	10 kVA
	1 次側電圧	460V
	2 次側電圧	31.3V
インバータ	容量	8.0 kVA
	直流側電圧	70V
	使用素子	IGBT
直流側		
コンデンサ C_{dc}	電解コンデンサ	12000 μ F $\times$ 12 並列

続された三相インバータを直流側で接続しており、UPFCと同じ構成となっている。高速移相器の並列インバータは実験装置内での損失分を補償して直流コンデンサ電圧を一定に保つだけで電力系統に対して積極的な制御は行わないとし、一方で直列インバータは送電線電流に対して直交する電圧のみを出力することで系統の制御を行うものとする。

6.3 電力動揺線形化に基づく模擬電力系統の安定化制御系の構築

電力動揺線形化制御の原理は次のように説明される。電力動揺方程式

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega - \omega_0 \quad (6.1)$$

$$\frac{M}{\omega_0} W_0 \frac{d\omega}{dt} + \frac{D}{\omega_0} W_0 (\omega - \omega_0) = P_m - P_e \quad (6.2)$$

においては、加速電力 P_a

$$P_a = P_m - P_e \quad (6.3)$$

にのみ非線形性が含まれていることから、 P_a を次の指令値 P_a^*

$$P_a^* = \frac{MW_0}{\omega_0} \left\{ \beta_1 \Delta\delta + \left(\beta_2 + \frac{D}{M} \right) \Delta\omega \right\} \quad (6.4)$$

に追従させるとき、動揺方程式は次式のように線形化される。

$$\frac{d\delta}{dt} = \Delta\omega \quad (6.5)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \beta_1 \Delta\delta + \beta_2 \Delta\omega \quad (6.6)$$

(6.5), (6.6) 式の固有値 $-\sigma \pm j2\pi/T_e$ は (6.7) 式で与えられる。

$$-\sigma \pm j2\pi/T_e = \beta_2/2 \pm j\sqrt{\beta_2^2 + 4\beta_1}/2 \quad (6.7)$$

線形化後のシステムの仕様として固有値を指定すれば, (6.7) 式より β_1, β_2 を求めて制御系を設計することができる。

ここで, 各変数及び定数の意味は次に示す通りである。

- δ : 回転子角 [rad]
- ω : 回転子角速度 [rad/s]
- ω_0 : 定格角速度 [rad/s] ($\omega_0 = 120\pi$)
- M : 慣性定数 [s]
- D : 制動係数 [p.u.]
- W_0 : 基準容量 [kW]
- P_e : 電気出力 [kW]
- P_m : 機械入力 [kW]
- $\Delta\omega$: 回転子角速度偏差 [rad/s] ($\Delta\omega = \omega - \omega_0$)
- $\Delta\delta$: 回転子角偏差 [rad]

ただし, $\beta_1[1/s^2], \beta_2[1/s]$ は制御のための定数である。

加速電力の指令値 P_a^* 及び加速電力の近似値 $\tilde{P}_a$ を生成するために必要な近似手法や直流分除去等の処理については, 第4章で述べた方法を本実験装置の制御系にも適用し, 図 6.3 の電力動揺線形化制御の指令値作成部および加速電力検出部に示すように実装した。なお, 実装にあたっては, ω の検出に伴うノイズを除去する回路, ならびに偏差分を抽出し, 増幅する回路も追加している。

次に, 文献 [1] において構築された高速移相器の直列インバータの有効・無効電力制御系を用いて発電機の出力を制御し, 加速電力の追従制御を行う方法について検討する。直列インバータの有効電力 $P_s = 0$ とし, 追従制御の誤差信号 $\tilde{P}_a - P_a^*$ をフィードバックして, 高速移相器の直列インバータ三相分の無効電力 Q_s を制御することにより, 直列インバータにリアクタンス挿入あるいはキャパシタンス挿入と等価的な動作をさせることができる。このように設定することで, これまで述べてきた高速移相器による電力動揺線形化制御と本質的には変わらない制御となる。一方, 並列インバータは実験装置内での損失分を補償して直流コンデンサ電圧を一定に保つだけで電力系統に対して積極的な制御は行わないとした。

そこで, 上述の発電機制御を実現する方法を考える。すなわち,

$$Q_s = K_v(\tilde{P}_a - P_a^*) \quad (6.8)$$

とする。いま, 高速移相器設置端での電圧とその位相, 有効電力, 無効電力及び高速移相器の直流側電圧 V_{dc} , すなわち図 6.1 の V_i, θ_i, P_i, Q_i 及び V_{dc} が測定可能である。 $\dot{V}_s$ の位相は送電線電流 $\dot{I}$ に直交するように制御されるので, $\dot{V}_s$ の大きさ V_s は $|Q_s| = 3V_s I$ より,

$$V_s = \frac{|K_v(\tilde{P}_a - P_a^*)|}{3I} \quad (6.9)$$

直列インバータの変調率を M_s 、移相用直列変圧器の変圧比を n_s とすると、

$$V_s = \frac{1}{\sqrt{2}} n_s M_s V_{dc} \quad (6.10)$$

であるから、変調率 M_s は

$$M_s = K_s |K_v(\tilde{P}_a - P_a^*)|, \quad K_s = \frac{\sqrt{2}}{3n_s I V_{dc}} > 0 \quad (6.11)$$

で与えられる。ここに、 I は

$$I = \frac{\sqrt{P_i^2 + Q_i^2}}{\sqrt{3}V_i} \quad (6.12)$$

で求められる。

一方で $\dot{V}_s$ と $\dot{V}_i$ の位相差、すなわち制御角 θ_c は、(6.12) 式より得られる $\dot{V}_i$ と $\dot{I}$ の位相差 θ_I を用いて、

$$\theta_c = \begin{cases} \theta_I + 90^\circ & (Q_s \geq 0) \\ \theta_I - 90^\circ & (Q_s < 0) \end{cases} \quad (6.13)$$

とし、 V_i に対する制御角 θ_c を得ることができる。

以上、図 6.2 の直列インバータ出力制御部に電力動揺線形化制御を適用した場合の制御系構成を図 6.3 にまとめて示す。

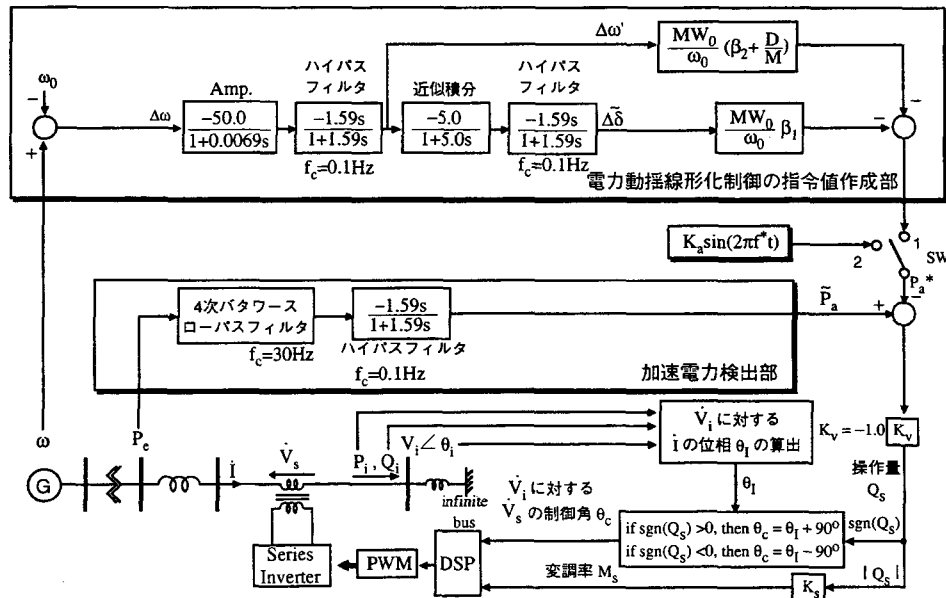


図 6.3: 制御系の構成

6.4 高速移相器による発電機電力の制御実験

電力動揺線形化制御の実現のためには、高速移相器を用いて発電機出力を直接、自由に制御することが要求される。そこで、系統安定化制御実験に先だって、高速移相器による発電機出力の制御特性として、以下の実験を行った。模擬電力系統の平常運転条件として、 $P_e = 8.0$ [kW]、 $V_t = 240$ [V]を選んだ。図 6.3 の SW で 2 を選択し、 $K_a = 1.0$ [kW]として

$$P_a^* = \sin(2\pi f^* t) \quad [\text{kW}] \quad (6.14)$$

で表される一定振幅の動揺信号を与え、定常状態にある発電機出力の追従制御実験を行った。周波数 f^* [Hz] をパラメータとして、その追従制御の結果を、 $\tilde{P}_a$ と P_a^* の比較により示したものが図 6.4 である。ただし、高速移相器の制御は時刻 0.1 [s] より行った。

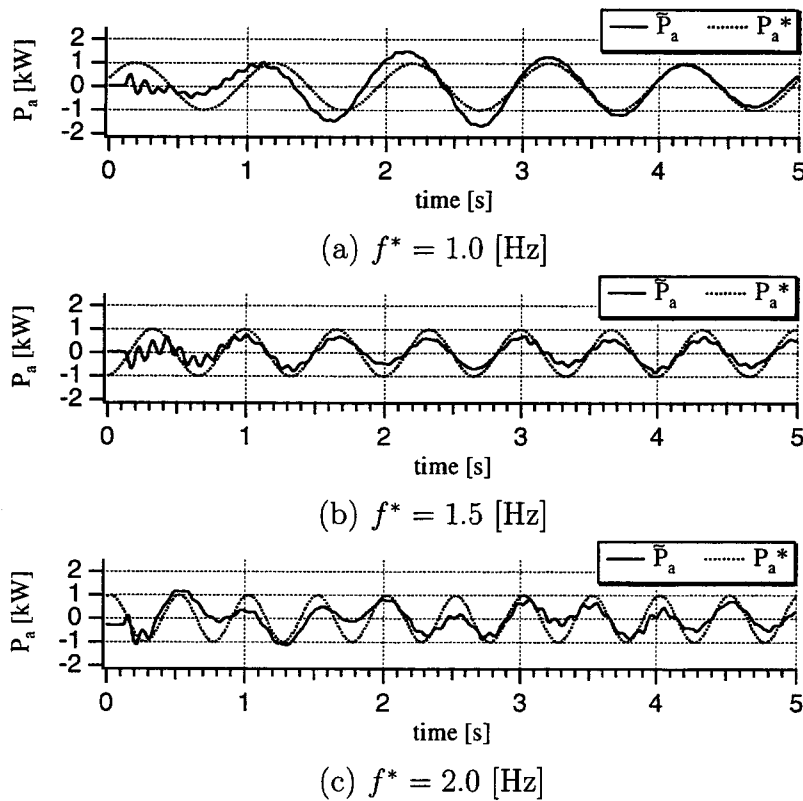


図 6.4: 高速移相器による発電機出力の追従制御

図 6.4 では、(a) の $f^* = 1.0$ [Hz] のときの追従制御の結果が最も良好であると考えられる。さらに、(b)、(c) と周波数が高くなるにつれて、追従精度は悪くなっている。(a) $f^* = 1.0$ [Hz] と (b) $f^* = 1.5$ [Hz] のときの結果が比較的良好である理由として、模擬電力系統の固有周波数が 1.0 [Hz] 付近にあることが考えられる。

これらに対して、図 6.5 の $f^* = 0.1$ [Hz] の場合には、電力が小さく振動的になるのみで追従制御が実現していない。この実験結果は、発電機の位相角がより速く新しい平衡点に移動して発電機出力は変化しないケースに相当する。

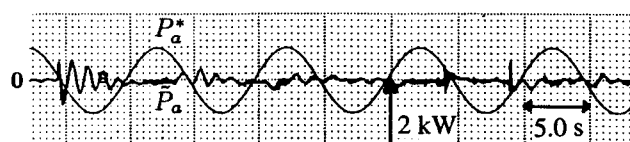


図 6.5: 高速移相器による発電機出力の追従制御 ($f^* = 0.1$ [Hz])

以上より、系統固有の動揺周波数を極端に大きく変化させる設計仕様を与えない限り、発電機出力制御が実現できることがわかった。

6.5 系統安定化実験による制御特性の評価

本節では、図 6.3 の SW で 1 を選択して電力動揺線形化制御による系統安定化実験を行った結果について考察を行う。模擬電力系統の初期実験条件を表 6.3 のように設定した。発電機出力、発電機端子電圧は前節と同じ値を選んでいる。(6.4) 式のように制御系で用いる定数として、慣性定数 M は表 6.1 の値を用いた。また、系統固有の制動係数の算出が困難であるため、制動係数 D は 0 とした。(6.4) 式をみるとわかるように、 β_2 の値を十分大きく設定すれば、 D の設定誤差が制御効果に与える影響は小さい [3]。また、制御定数 β_1 、 β_2 については、(6.7) 式の固有値指定において、外乱による動揺の減衰時定数が 1[s]、動揺周期が 1[s] となるように $\sigma = 1.0$ [1/s]、 $T_e = 1.0$ [s] と設定し、 $\beta_1 = -40.5$ 、 $\beta_2 = -2.0$ とした。

表 6.3: 初期実験条件

系統運転条件	発電機出力 $P_e = 8.0$ kW 発電機端子電圧 $V_t = 240$ V
故障条件	場所 送電線発電機端 故障 三相短絡故障 継続時間 時刻 0.5s より 5 サイクル
固有値指定	減衰時定数 $1/\sigma = 1.0$ 動揺周期 $T_e = 1.0$

また、系統の過渡応答を実験する場合には、時刻 0.5[s] において図 6.1 に示した送電線の発電機端における 5 サイクルの 3 相短絡故障を外乱として与えた。ただし、故障継続中は直列変圧器の 2 次側を短絡し、高速移相器の制御は故障消滅直後から行った。

これらを初期実験条件として、以下の実験を行った。測定した系統の諸量は、図 6.1 あるいは図 6.3 で示した変数に対応する。ただし、高速移相器の出力電圧については、電流に対して 90 度進む場合を正、遅れる場合を負として符号を付けた電圧の実効値 V'_s を図示した。

まず、初期運転条件下での故障に続く過渡動揺に対する電力動揺線形化制御の安定化効果を検証した結果について述べる。比較のために、高速移相器による制御を行わない場合の応答を図 6.6 に示す。図 6.6 では、長距離大容量送電系統によく見られる、減衰の悪い振動が持続していることがわかる。

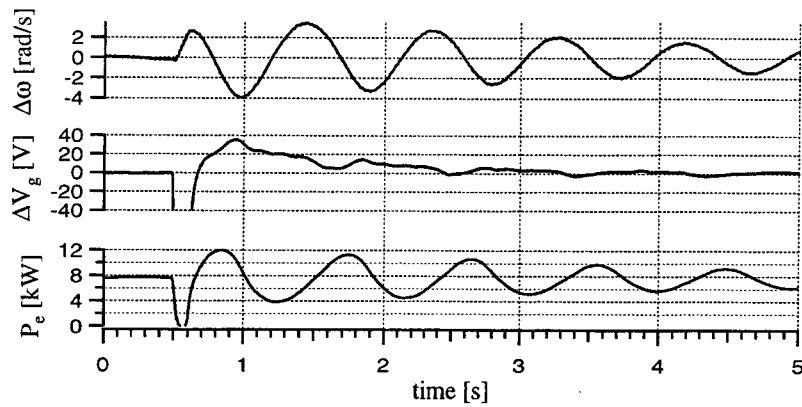


図 6.6: 高速移相器制御を行わない場合の応答

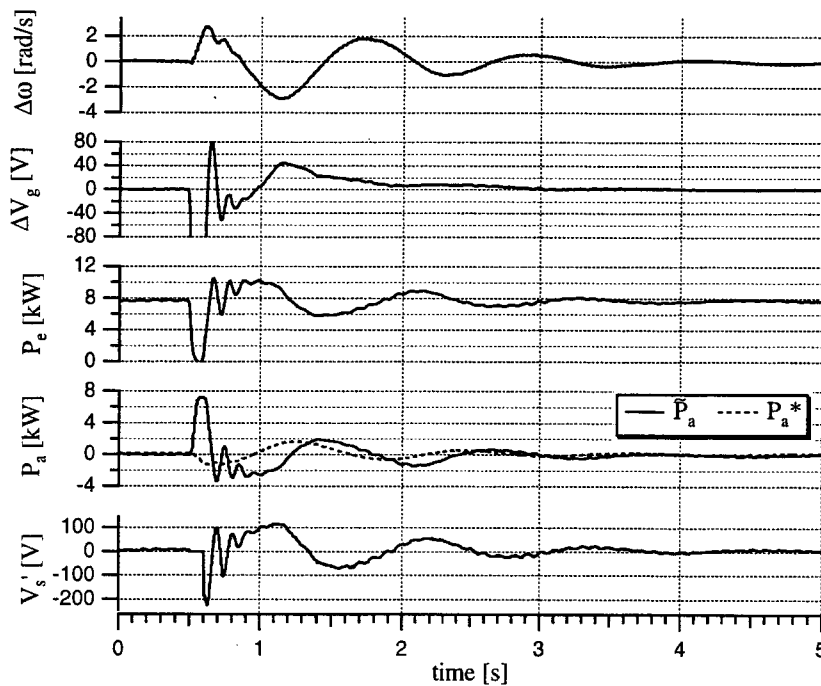


図 6.7: 電力動揺線形化制御の効果

これに対して、電力動揺線形化制御を適用した場合の実験結果が図 6.7 である。図 6.7 の加速電力 P'_a と安定化指令信号 P_a^* の追従の様子をみると、故障消滅後の過渡的な応答において指令値からの逸脱が大きく、その後も若干の位相遅れがあるが、制御の効果としてはほぼ期待通りの結果が得られている。

ここで、図 6.7 の加速電力の応答に 10 [Hz] 程度の減衰振動現象がみられる。これについて、模擬電力系統の既知のパラメータを用いた詳細なシミュレーションモデル [4] で実験条件を再現して瞬時値解析 [5] を行い、振動現象の原因の検討を試みた。振動の速さから考えて励磁系と移相器制御系の干渉と考えられるが、パラメータを変化させながら瞬時値解析を行った結果をみても、図 6.8 に示すように振動現象は確認されなかった。ただし、この振動現象が過渡的な減衰振動であることから、以下では特別な対策を立てずに実験を行った。

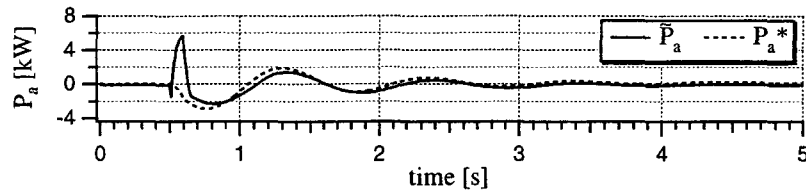


図 6.8: 瞬時値解析による加速電力追従制御の検証

次に、制御系の設計仕様を変えて実験を行った。電力動揺線形化制御においては、線形化後のシステムの特性を制御ゲイン β_1 , β_2 を用いて指定することができる。(6.5), (6.6) 式より, β_1 は同期化力に, β_2 は制動に関係する。そこで、この制御性を確認するために、初期実験条件で行った固有値指定に対して、表 6.4 に示すように、さらに 2 つのケースの固有値指定を行った場合の実験結果を図 6.9 及び図 6.10 に示す。

表 6.4: 固有値指定の例

ケース	σ [1/s]	T_e [s]	β_1	β_2
初期実験条件	1.0	1.0	-40.5	-2.0
1	2.0	1.0	-43.5	-4.0
2	1.0	0.6	-109	-2.0

まず、電力動揺の減衰を速くする目的で、減衰時定数を 0.5[s] とした場合の制御結果を図 6.9 に示す。図 6.9 の結果と図 6.7 の結果を比較すると、制動が大きくなっており、減衰時定数を小さくした効果が表れている。

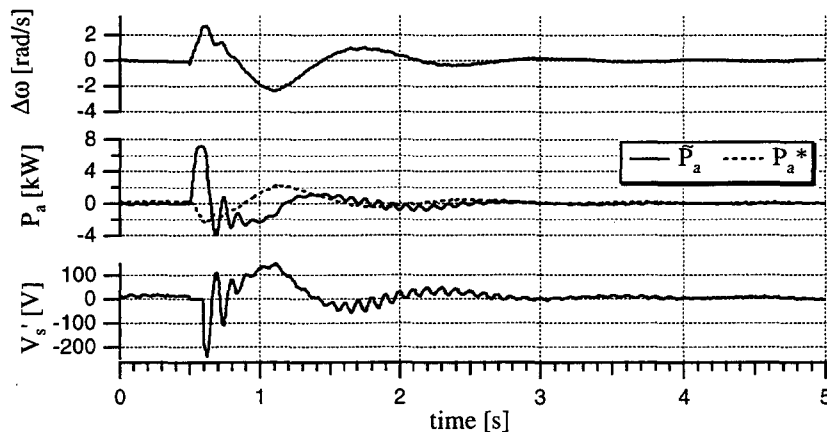


図 6.9: 電力動揺線形化制御の効果 (ケース 1)

また、電力動揺の周期を短くすることを目的として、動揺周期を 0.6[s] としたケース 2 の場合の制御結果を図 6.10 に示す。図 6.10 の結果より、指定した動揺周期までにはならなかったものの、図 6.7 の結果に比べて動揺周期を短くした効果が表れている。

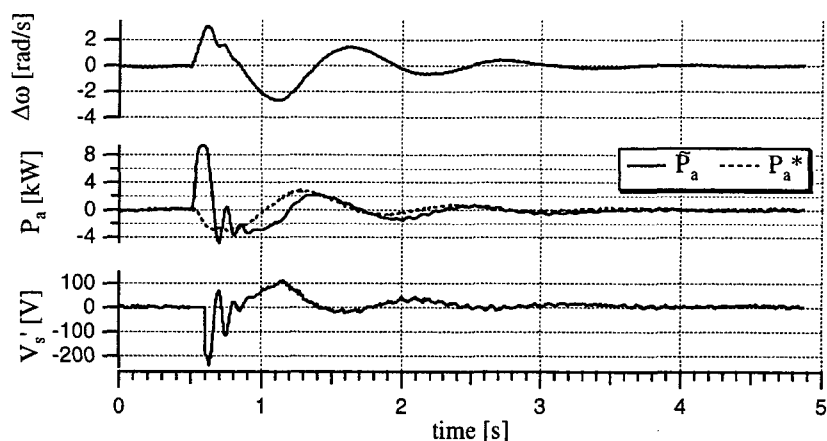


図 6.10: 電力動揺線形化制御の効果 (ケース 2)

以上のように、電力動揺線形化制御は固有値指定によって線形化後のシステムを希望する過渡特性に近づけることが可能であることがわかった。

次に、電力動揺線形化制御の、動態安定度向上効果について検討を行う。初期運転状態より発電機出力の指定値を増加していくと、9.5 [kW] 付近から図 6.11 のように持続的な動揺を始め、不安定な状態になる。

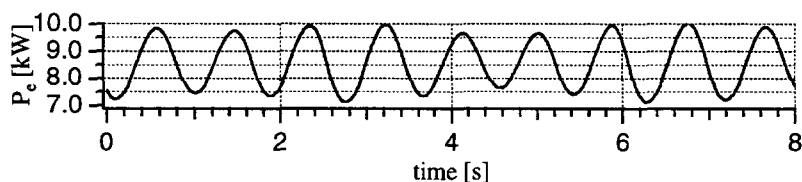


図 6.11: 不安定な発電機出力

この状態で、高速移相器による制御を行った場合には、図 6.12 に示すように発電機出力の動揺は安定化される。ただし、制御は同図の時刻 1.5 [s] に開始している。

次に、そのまま安定化制御を行った状態で発電機出力を増加していくと、10 [kW] まで増加しても系統は安定であった。このとき、ゲート信号をブロックし高速移相器による制御

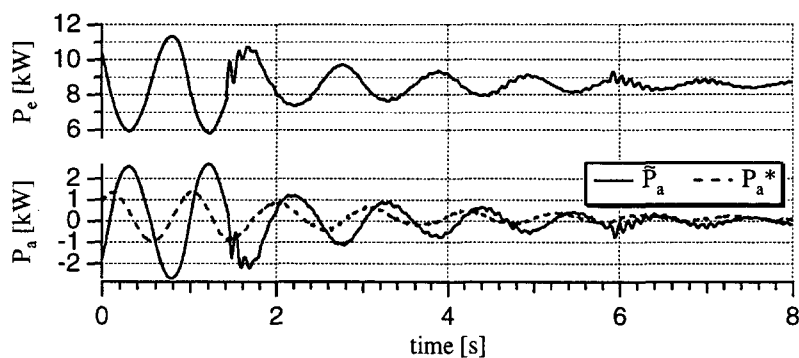


図 6.12: 発電機出力動揺の安定化

を停止すると、図 6.13 のように再び動揺を始めるようになる。この結果から、電力動揺線形化制御は系統の動態安定度の向上に寄与しており、送電容量の増大が期待できる。

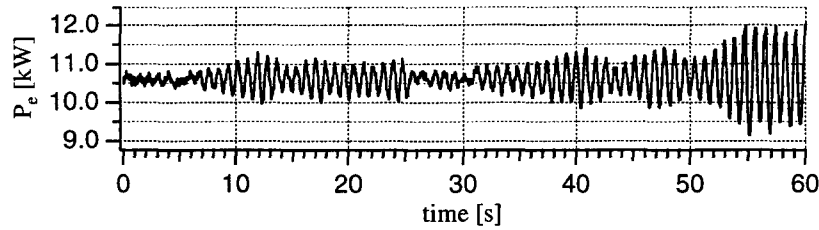
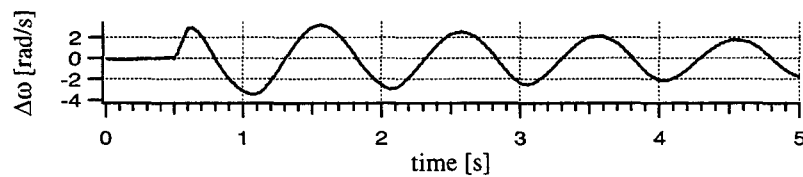


図 6.13: 制御を停止した場合の結果

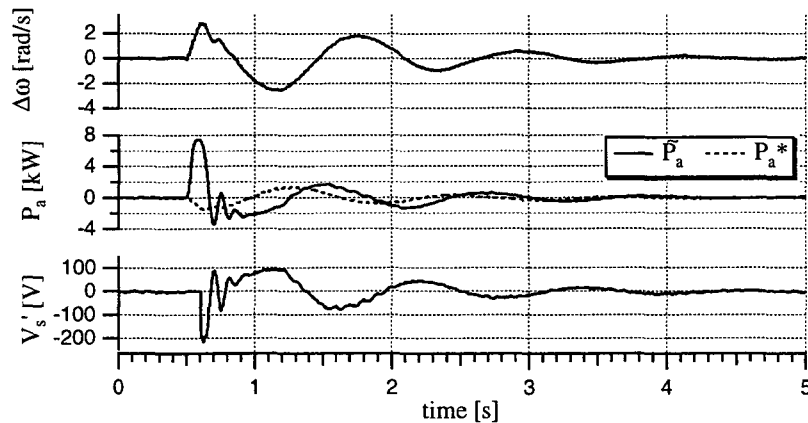
さらに、系統の運用状態が変更された場合の制御系の効果の検討を行った。発電機出力の指定値を $P_e = 9.0$ [kW] として系統の動作点を変更した場合に、外乱に対する制御系の系統安定化効果を確認した実験結果が図 6.14 である。

制御を行わない場合には、発電機出力の増加により、動揺の減衰が悪くなっている。これは、動作点が変わることによる同期化力の低下によると考えられる。しかし、電力動揺線形化制御を適用することで、この新しい動作点においても、ほぼ一定の制御結果を得ることができている。

さらに、発電機出力 $P_e = 9.0$ [kW] で端子電圧の基準値を 230 [V] に下げて同じ実験を行った結果を図 6.15 に示す。図 6.15 (a) を見ると、基準電圧を下げたために系統がより不



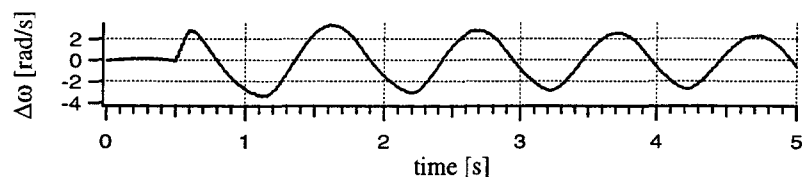
(a) 制御を行わない場合



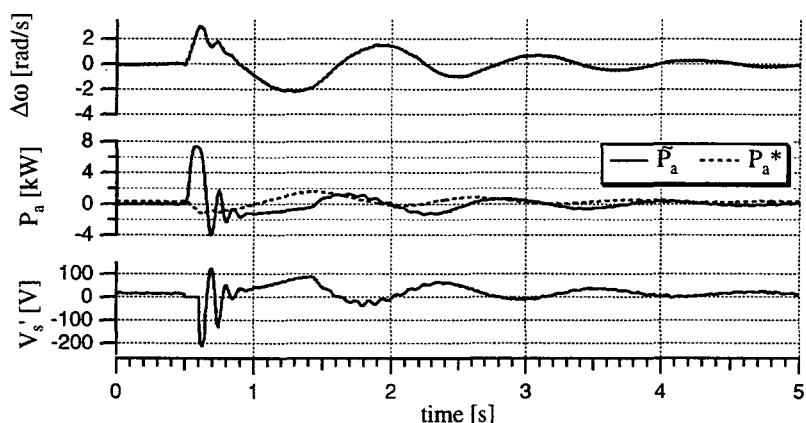
(b) 制御を行った場合

図 6.14: 各部の応答波形 ($P_e = 9.0$ [kW])

安定になっているようすがわかる。しかし、このような場合であっても、図 6.15 (b) から、電力動揺線形化制御によって、ほぼ一定の制御特性を実現できることがわかる。



(a) 制御を行わない場合



(b) 制御を行った場合

図 6.15: 各部の応答波形 ($P_e = 9.0$ [kW], $V_g = 230$ [V])

以上のように、電力動揺線形化制御は系統の動作点変更に対して制御効果が一定であるという意味でロバストであることが確かめられた。

6.6 結言

本章では、調速機、AVRといった発電機制御系まで含めた模擬電力系統に対して、高速移相器による電力動揺線形化制御を適用し、実験を行った結果に基づいて、電力動揺線形化制御の有効性を検討した。本章で得られた結論を以下に要約する。

- 高速移相器の直列インバータの出力電圧を送電線電流に直交するように制御することで、発電機の出力を高速に直接制御する方法について述べた。
- 測定可能な信号を用いて制御に必要な信号をすべて生成し、電力動揺線形化制御系の模擬実験装置への実装を行った。
- 高速移相器によって発電機の出力が直接制御可能であることを実験により確認した。
- 電力動揺線形化制御による系統安定化実験を行い、効果的な安定化が達成できること、線形化後のシステムの特性を設計時に指定できること、動態安定度向上に寄与するこ

とで送電容量の増大が見込まれること、さらには系統の運用状態が変更されても一定の制御効果が得られることを確かめた。

以上より、電力動揺線形化制御の有効性が実験的に確認された。

参考文献

- [1] 林, 石井, 伊瀬, 熊谷:「高速移相器による系統安定化制御」電気学会半導体電力変換研究会資料, SPC-97-29, pp.21-26, 1997.
- [2] 北條, D. Kamolyabutra, 三谷, 伊瀬, 辻:「移相器を用いた電力動揺線形化制御の実験的考察」, 平成 10 年電力技術・電力系統技術合同研究会, PE-98-160, PSE-98-150, pp.63-68, 1998.
- [3] 北條, 三谷, 辻:「FACTS 機器を用いた発電機電力直接制御によるロバスト系統安定化」, 平成 9 年電力技術・電力系統技術合同研究会, PE(PSE)-97-164, pp.31-36, 1997.
- [4] 石井, 林, 伊瀬, 熊谷:「高速移相器を導入した模擬電力系統のデジタルシミュレーション」電気学会半導体電力変換研究会資料, SPC-97-28, pp.15-20, 1997.
- [5] O. Nayak, G. Irwin and A. Neufeld: “GUI Enhances Electromagnetic Transients Simulation Tools”, IEEE Computer Applications in Power, Vol. 8, No. 1, pp.17-22, January 1995.

第7章 結論

本論文では、電力系統に求められているロバスト性の高い安定化制御を実現することを目的として、高速移相器により発電機出力を直接制御して電力動揺を線形化する系統安定化制御方式を提案し、原理から設計、構成方法に至るまで詳しく述べ、その有効性について計算機シミュレーション及び実験結果に基づき多角的な評価を行った。本研究により得られた結果を要約すると以下の通りである。

- 電力系統における安定度に関する問題点を整理し、電力系統安定化制御に高いロバスト性が要求されていることを述べた。また、系統制御機器の高機能化を背景として、系統安定化制御の自由度が増していることに触れ、本研究の立場を明確にした。
- 高速移相器の有する制御能力を電力相差角曲線上における制御可能領域として一般的に定式化し、発電機出力制御における制御効果の評価方法を確立した。その結果、過渡安定度向上効果を定量的に評価できるようになったとともに、制御可能領域を有効に利用する系統安定化制御の方式についての見解を得た。
- 新しい系統制御機器を応用して、発電機出力を直接制御することにより電力動揺を線形化する制御方式を提案した。電力動揺線形化制御と称する提案制御方式は、厳密な空間線形化理論に基づいて導出されることを示し、その特徴として、制御系設計段階で制御の仕様として制動と同期化力を与えることができることを述べた。さらにその仕様は系統の運用状態が変更されるような場合にも一定に維持されることから、提案制御方式が優れたロバスト性を持つことを示した。
- 送電線の潮流制御機能が強く評価されている高速移相器を用いて発電機の出力を過渡的に制御する方法について述べ、その発電機出力制御の上に電力動揺線形化制御を構成した。制御信号のうち検出が困難と考えられるものについては近似的に生成する方法をとった。さらに計算機シミュレーションによって、高速移相器による電力動揺線形化制御が期待されたとおりの制御効果を持つことが確認された。まず微小外乱に対しては、設計仕様通りの制動と同期化力で平衡点へと収束され、一方で大外乱に対しては、可能な限りの減速エネルギーを系統に投入するように働くことが確認された。これらは高速移相器の制御可能領域のなかで示されるとともに、外乱の程度によって制御を切り換えることなく、定態から過渡にいたるまでの広範囲の安定度向上を実現できることがわかった。さらに、事故後の回線開放によって平衡点が変わるような場合にも、新しい平衡点において同じ制御効果が得られることが確認された。これらのシミュレーション結果から、高速移相器による電力動揺線形化制御は、外乱の程度に応じて制御機器の持つ能力を有効に活用できるとともに、平衡点の変化に対しても一定の制御効果が得られるといった、高いロバスト性を持つことが示された。

- 並列型 FACTS 機器の一つである SMES によっても電力動揺線形化制御が実現できることを、高速移相器の場合と同じ手法で導いた。その結果、高速移相器による潮流制御を SMES の有効電力の制御によって代用することで、同様の制御効果を得ることが出来た。
- 模擬電力系統に設置された高速移相器に対して電力動揺線形化制御を実装し、実験に基づく制御効果の検証を行った。まず、高速移相器の出力電圧制御により、発電機出力を高速かつ直接制御することができた。また、系統安定化実験により、制御の仕様をほぼ実現できることが確かめられた他、動態安定度の向上により送電電力の増大が図られたこと、系統の運用状態を変えた場合にもほぼ一定の制御効果が得られることが確認された。これらの結果により、電力動揺線形化制御系の制御効果の高いことが実験的に示された。

以上により得られた本研究の成果は、電力系統の安定度向上のための制御系設計指針が明確にされたことにある。

安定度に問題のある系統に対してある容量の高速移相器が与えられた場合には、まずその制御効果を電力相差角曲線に一定の領域として定義し、さらに制御可能領域に基づいて設計仕様を与えた電力動揺線形化制御を高速移相器に適用する。これにより、定態から過渡にわたる広範囲の安定度向上に効果があるだけでなく、系統の運用状態が変更されるような場合にあっては制御系の再設計をすることなく一定の制御効果を得ることができるロバストな系統安定化制御が実現される。

今後、建設用地確保の面から送電線の新設が益々困難になることが予想されるのに対し、自己消弧素子の高速・高耐圧化につれて FACTS 機器の高速・大容量・小型化が進むと考えられる。以上のような提案制御方式による系統の安定度向上によって、FACTS 構想の主たる目的である既設送電線を熱容量限界まで利用できることが期待される。

謝辞

本研究の全過程を通じて、終始御懇切な御指導と御鞭撻を賜りました、大阪大学大学院工学研究科・辻毅一郎教授に謹んで深く感謝の意を表します。

本研究を遂行するにあたり、適切な御教示を賜るとともに細部にわたり御討論頂きました大阪大学大学院工学研究科・三谷康範助教授に深く感謝の意を表します。

また、本研究の遂行に際し、終始変わらぬ適切な御教示と御協力を頂きました大阪大学大学院工学研究科・伊瀬敏史助教授に厚く御礼申し上げます。

本論文の作成にあたり、貴重な時間を割いて直接の御指導を賜りました大阪大学大学院工学研究科・松浦虔士教授、熊谷貞俊教授、前田肇教授に衷心より感謝の意を表します。

本研究について貴重な御指摘を賜った大阪大学大学院工学研究科・佐々木孝友教授、平尾孝教授、山中龍彦教授、中塚正大教授、谷野哲三教授、黒田英三教授に厚く御礼申し上げます。

大阪大学大学院工学研究科・佐伯修助手には本研究の過程において細部に渡り貴重な御助言を頂きました。ここに深く感謝申し上げます。

また、本研究では、大阪大学工学部超伝導エレクトロニクス研究センターの模擬電力系統実験装置を使用させて頂きました。同実験センター関係各位に御礼申し上げます。

神戸大学大学院博士前期課程在籍中よりお世話になりました神戸大学大学院自然科学研究科・大澤靖治教授に厚く御礼申し上げます。

さらに、広く一般的な立場から御教示頂いた徳島大学工学部電気電子工学科・大西徳生教授に深く感謝の意を表します。

なお、本研究は、大阪大学大学院工学研究科博士前期課程熊谷研究室御在籍中に多大な御協力を頂いた富士電機・石井潤一氏、ならびに大阪大学大学院工学研究科博士後期課程・Issarachai Ngamroo 氏、大阪大学大学院工学研究科博士前期課程・Duangkamol Kamolyabutra 氏をはじめとする、辻研究室の関係諸氏の御援助・御協力のもとに遂行することができました。ここに厚く御礼申し上げます。

本研究の過程において、幾度となく激励、御援助下さった、神戸市立工業高等専門学校電気工学科・道平雅一助手に厚く御礼申し上げます。

また、学位論文執筆の苦楽を共にした葉玉牽氏、部谷学氏、吉村政志氏、全炯敏氏、莊司洋三氏に深く感謝いたします。

最後に、寛大なる理解をもって研究活動を支援頂いた妻をはじめ、父母、弟、親族に心から感謝申し上げます。

1999 年 1 月

北 條 昌 秀

研究業績目録

学術論文（査読有り）

1. 北條昌秀, 三谷康範, 辻毅一郎
「直列可変インピーダンスを用いた発電機電力の直接制御によるロバスト系統安定化制御」
電気学会論文誌 B 分冊, 117 巻, 7 号, pp.985-990, 1997.
Masahide Hojo, Yasunori Mitani and Kiichiro Tsuji,
"Robust Stabilization of Power System Based on the Direct Control of Generator Power by Series Variable Impedance Unit",
Electrical Engineering in Japan, Vol. 123, No. 4, 1998.
2. 北條昌秀, 三谷康範, 石井潤一, 伊瀬敏史, 辻毅一郎
「発電機制御における移相器の制御可能領域の定式化と評価」
電気学会論文誌 B 分冊（部門大会特集号）掲載候補論文として投稿中
3. Masahide Hojo, Yasunori Mitani and Kiichiro Tsuji,
"Robust Control for Power System Stabilization Based on the Direct Control of Power Flow by Phase Shifter",
Accepted to be published in International Journal of Power & Energy Systems.
4. Masahide Hojo, Yasunori Mitani and Kiichiro Tsuji,
"Linearization of Generator Power Swing Property by Controlling Power Output of SMES for Enhancement of Power System Stability",
Accepted to be published in IEEE Transactions on Applied Superconductivity.
5. 北條昌秀, Duangkamol Kamolyabutra, 三谷康範, 伊瀬敏史, 辻毅一郎
「移相器を用いた電力動揺線形化に基づく系統安定化制御の実験による検討」
電気学会論文誌 B 分冊（投稿中）

国際会議論文（査読有り）

1. Masahide Hojo, Yasunori Mitani and Kiichiro Tsuji,
"Voltage and Power Swing Stabilization by Decoupled Control with AVR and Phase Shifter",
Proceedings of the International Conference on Energy Management and Power Delivery (EMPDP), Vol.1, pp.183-188, March 1998.

2. Yasuharu Ohsawa, Masahide Hojo, Akira Yoneda and Hiroaki Sugihara,
"Studies on Stability of Power Systems Consisting of Many Dispersed Power Sources"
Proceedings of International Symposium on Bulk Power Systems Dynamics and Control
-IV Restructuring, August 1998.
3. Masahide Hojo, Yasunori Mitani and Kiichiro Tsuji,
"Robust Control for Power System Stabilization by Solid-State Phase Shifter",
Submitted to the Power System Computation Conference (PSCC), 1999.

研究会資料

1. 北條昌秀, 三谷康範, 辻毅一郎
「空間線形化に基づく直列可変インピーダンスによる電力系統安定化制御」
平成 8 年電力技術・電力系統技術合同研究会, PE(PSE)-96-112, pp.51-59, 1996.
2. 北條昌秀, 三谷康範, 辻毅一郎
「FACTS 機器を用いた発電機電力直接制御によるロバスト系統安定化」
平成 9 年電力技術・電力系統技術合同研究会, PE(PSE)-97-164, pp.31-36, 1997.
3. 北條昌秀, Duangkamol Kamolyabutra, 三谷康範, 伊瀬敏史, 辻毅一郎
「移相器を用いた電力動揺線形化制御の実験的考察」
平成 10 年電力技術・電力系統技術合同研究会, PE-98-160, PSE-98-150, pp.63-68,
1998.
4. Duangkamol Kamolyabutra, 北條昌秀, 三谷康範, 伊瀬敏史, 辻毅一郎
「局地情報を用いて構成した SuperSMES による系統安定化実験」
平成 10 年電力技術・電力系統技術合同研究会, PE-98-106, PSE-98-96, pp.27-32, 1998.

講演報告

1. 北條昌秀, 三谷康範, 辻毅一郎
「超電導—電力系統制御装置による系統安定化制御への厳密空間線形化法の適用」
平成 9 年電気学会全国大会講演論文集, No.1523, 1997
2. 北條昌秀, 三谷康範, 辻毅一郎
「電力系統の安定化制御系設計における厳密空間線形化法の適用」
第 41 回システム制御情報学会研究発表講演会論文集, No.1304, 1997
3. 北條昌秀, 三谷康範, 辻毅一郎
「高速移相器を用いた発電機電力直接制御によるロバスト系統安定化」
平成 9 年, 電気学会電力・エネルギー部門大会 (論文 II), No.158, 1997
4. 北條昌秀, 三谷康範, 辻毅一郎
「高速移相器と AVR の協調制御による系統安定化」
平成 9 年電気関係学会関西支部連合大会予稿集, G5-15, 1997
5. Duangkamol Kamolyabutra, 北條昌秀, 三谷康範, 辻毅一郎
「局地情報を用いて構成した SuperSMES による系統安定化制御」

平成 9 年電気関係学会関西支部連合大会予稿集 , G5-14, 1997

6. 北條昌秀, 三谷康範, 辻毅一郎

「移相器を用いた発電機電力直接制御による過渡安定度向上効果の評価」

平成 10 年電気学会全国大会講演論文集, No.1421, 1998

7. Duangkamol Kamolyabutra, 北條昌秀, 三谷康範, 辻毅一郎

「局地情報を用いた SuperSMES による系統安定化制御効果の評価」

平成 10 年電気学会全国大会講演論文集 , No.1432, 1998

以上