

博 士 論 文 概 要

論 文 題 目

長距離大電力送電システムの安定度向上のための
発電機励磁制御方式に関する研究

Studies on the Generator Excitation Control System
to Improve the Power System Stability
for Long Distance and Huge Power Transmission

氏 名	申 請 者	
	北 内	義 弘
	Yoshihiro	Kitauchi

専攻・研究指導
(課程内のみ)

--

電力系統は多数の発電機が並列運転されており、発電機からの送電電力が大きくなると、落雷などの系統擾乱発生時に電力系統の安定度、すなわち発電機の安定な並列運転が維持できなくなることがある。経済成長の停滞により、電力需要の大きな増加は見込めないものの、今後もゆっくりと増加していくものと予想されており、特に長距離大電力送電系統の重大事故時に発生する長周期動揺を安定に抑制することは、電力系統の信頼性を確保してより経済的な運用を行うために不可欠である。

現状の安定度向上対策としては、最も経済的に安価である電力系統安定化装置(PSS)付き超速応励磁制御が主に利用されている。PSSは、定常状態および系統擾乱後の電力動揺を速やかにダンピングさせるために設置され、その出力は、発電機の端子電圧を一定に保つために設置されている自動電圧調整器(AVR)の補助入力として追加される。

一方、電力系統は、時々刻々変化している大規模かつ複雑なシステムであり、かつ、個々の機器が密に連係していることから、その数値モデル化や制御系の定数設定が難しいことが知られている。このため、本論文では、専門家の知識や操作技術を生かし、かつ、モデル化を必要としないファジィ発電機励磁制御方式を提案し、その安定度向上効果を複雑な動揺を有する4機系統において実験的に検証した。しかしながら、その制御系設計に関して試行錯誤が必要となることや、安定性の保証が無いため、実機への導入は難しい。

近年、電源の偏在化による長距離大電力送電をその主な理由として、周期2秒程度以上の長周期動揺が発生するため、周期1秒程度のローカル動揺とともにこれらの動揺を効率よく抑制するために、有効電力偏差(ΔP)と発電機回転数偏差($\Delta \omega$)をPSS入力とした、 $\Delta P + \Delta \omega$ 形PSSが開発された。この $\Delta P + \Delta \omega$ 形PSSは、電源の偏在化による長距離大電力送電をその主な理由とする系統の広域に影響する弱制動な長周期動揺の抑制に対して効果があり、大規模系統における設計手法も実用レベルに達してきていることから、現在、電力会社の大容量発電機への導入実績がある。しかしながら、より一層の長距離・大電力送電により発電機の内部相差角 δ が拡大するにつれ、この $\Delta P + \Delta \omega$ 形PSSの効果にも限界があり、相差角 δ が90度以上となる振幅の大きな動揺時には安定度の維持がより難しくなっていくことが懸念されている。一方、無効電力 Q は、このような大きな動揺時にも、 δ に対してほぼ線形で同相に動揺し、その大きさが小さくなることもない。本論文では、この無効電力 Q を入力としたPSSを従来の $\Delta P + \Delta \omega$ 形PSSに付加することで、よりロバスト性が高く、大きな動揺に対してもその抑制効果の高い多入力PSSを開発した。

経済成長の鈍化、電力自由化の進展にともない、より一層の現有設備の有効活用とさらなるコストの低減が要求されている。多入力PSSは、現在実用化されている $\Delta P + \Delta \omega$ 形の制御定数を一切変更せずに、ソフトウェア的に ΔQ 入力などをPSS入力に追加するだけで移行できるため、経済的で実用性の高い方式である。多入力PSSは、平成14年6月に60万kWの大容量火力発電機に導入さ

れ，現在，商用運転中である。

本研究は，電力系統の特に長距離大電力送電時の安定度向上対策として，経済性が高く，実用性の高い発電機励磁制御方式を提案する事を目的とするものである。

以下に，本論文の各章の概要を述べる。

第 1 章 序論

本研究における背景と発電機励磁制御方式による電力系統安定度向上効果の有効性について述べ，本論文の位置付けを明確化する。

第 2 章 ファジィ理論による発電機励磁制御システムの開発

本章では，ファジィ理論を発電機励磁制御系に適用したファジィ励磁制御方式を提案した。この方式は，電力系統の変化に対して安定運転が維持でき，特に大擾乱時に対する安定度の一層の向上を目的として，発電機励磁制御系(AVR)の端子電圧維持機能とダンピング向上(PSS)機能を一体化したものである。この方式を，電力中央研究所の交・直流電力系統シミュレータ（以下，シミュレータ）の回転形模擬発電機に適用し，その効果を 1 機および 2 機無限大母線系統において実験的に検証した。また，発電機励磁制御系の位相余裕不足を起因とする 10Hz 程度の周波数成分が顕著となるため，これを抑制するための論理を開発した。さらに，発電機の至近端事故時に発電機励磁系の能力を最大限に引き出すため，端子電圧の低下現象を捉え，有効電力の積分値より発電機の加速エネルギー相当値を算出し，発電機界磁電圧をシーリング電圧まで突き上げることにより励磁系の能力を最大限に活用する，過渡安定度向上論理（ v 回路）を提案し，この効果を検証した。

第 3 章 ファジィ発電機励磁制御システムの長距離串形系統における安定度向上効果

本章では，系統擾乱後に複雑な動揺モードが混在し，非常に長い動揺周期を持つ長距離串形 4 機無限大系統において，改良したファジィ励磁制御方式を 4 機の発電機に適用し，その安定度向上効果について実験的に検証した。ここでは，ファジィ励磁制御方式の 4 個の主要パラメータを調整することにより系統構成や発電機特性の違いに対応できるよう，時定数の大きさをオンラインで変更する回路を開発し，第 2 章で提案した制御方式に改良を加えた。また，主要パラメータの設定の考え方を明らかとし，シミュレータの原子力機と特性の異なる火力機にも同様な考え方が適用できることを確認した。固有値感度を用いて 4 機同時に最適化したシミュレータ既設の PSS 付超速応励磁制御方式と性能比較した結果，本制御システムは発電機台数や負荷の大きさなどが大幅に変化しても，パラメータの変更無しで大幅に限界送電電力を向上させることを明らかとした。

第 4 章 長周期動揺抑制用多入力 PSS の開発

本章では，より一層の長距離・大電力送電により発電機の内部相差角 δ が 90

度以上になる場合に、従来形の $\Delta P + \Delta \omega$ 形 PSS より高い長周期動揺抑制能力を持つ多入力 PSS を提案した。現用方式との適合性および現用方式からの移行性を高めるため、 $\Delta P + \Delta \omega$ 形 PSS に新たに入力を加える形で、多入力 PSS を構成している。長周期の電力動揺に対するダンピング性能に加え、電力系統の構成や潮流条件の変化に対するロバスト性をさらに高めるため、多入力 PSS には、現用の $\Delta P + \Delta \omega$ 形 PSS の入力として無効電力 (ΔQ) と端子電圧および有効電力の変化速度 (dE_a , dP) を新たに追加した。さらに、系統事故後の過渡動揺第 1 波の安定性を高めるため、前章で提案したファジィ励磁制御方式に組み込んだ v 回路を多入力 PSS にも追加した。送電線亘長の異なる 3 つの 1 機無限大母線系統に対し、多入力 PSS を含む 3 種類の PSS 方式を適用した場合の安定度向上効果を、線形モデルによる解析および電力系統安定度解析プログラム (Y 法) によるシミュレーション計算により比較した。その結果、多入力 PSS は検討したすべての系統、特に内部相差角差が大きな、長周期動揺が発生しやすい系統条件において、優れたダンピング性能を維持し、高いロバスト性を有していることを明らかとした。また、1 機無限大母線系統における多入力 PSS の定数設計の考え方を示した。

第 5 章 長周期動揺抑制用多入力 PSS の 1 機および 2 機系における実験的検証

本章では、多入力 PSS をシミュレータの原子力 2 号機に導入し、1 機および 2 機無限大母線系統における多入力 PSS の効果を $\Delta P + \Delta \omega$ 形 PSS と比較した。また、1 機無限大母線系統における多入力 PSS の制御系パラメータの設計手法の検証を行なった。さらに、Y 法によるシミュレーション結果との比較を行い、Y 法における多入力 PSS のモデルの妥当性を確認した。

第 6 章 長周期動揺抑制用多入力 PSS の 4 機系における実験的検証

本章では、多機系統における多入力 PSS の定数設定方法を示し、その効果を検証した。まず、 Q を PSS の入力とする意義を述べ、定数設定方法とその根拠を示し、その手順および推奨値を示した。実機相当のハードおよびソフトを持つ多入力 PSS の試作機を、交・直電力系統シミュレータの発電機に適用し、定数設定法の妥当性および系統安定度向上効果を、複雑な動揺モードを含む長距離串形 4 機系統において確認した。さらに、系統安定度およびダンピング向上、系統構成や系統条件の変化に対するロバスト性について検証した。その結果、限界送電電力は $\Delta P + \Delta \omega$ 形 PSS より 5～10 % 程度増加し、ダンピングについても系統構成の変化などに対して多入力 PSS が $\Delta P + \Delta \omega$ 形 PSS より優れていることを確認した。

第 7 章 結論

本章は、結論であり、本論文の成果を総括する。

以上、本論文は長距離大電力送電系統の安定度向上のための発電機励磁制御方式を開発し、その効果を検証したものである。