

学位論文題名

電力系統の安定度向上に関する研究

学位論文内容の要旨

電力系統の規模の拡大、電力会社間の広域運営及び発電機単機容量の増加から電力系統の安定度が益々厳しくなっている。また、負荷中心から遠隔地に建設される発電所からの電力を安定に送電するための安定度向上の検討が必要である。

安定度の評価を正確に行うためには、電力系統を構成する最も重要な機器である発電機の正確なモデル化が必要不可欠である。発電機のモデルとしてパークの式が使用されている。しかし、この式は線形範囲では発電機の挙動を正確に表現しているが、発電機の磁気飽和が問題となるような発電機電圧が大幅に変化する事象に適用すると誤差が大きくなるという欠点がある。

発電機の励磁制御には、各種の励磁システム構成がある。励磁システムと発電機、電力系統を組み合わせた励磁制御特性を検討するためには、各種の励磁システムのモデルとそのモデルが実機に適用されるハードの特性と一致する事が必要である。この励磁制御に、アナログハードが使用されてきた。近年、マイコンとゲートアレイ等のデジタル素子技術の発展により、励磁システムのハードとしてアナログ素子からマイコン応用のデジタル素子(D-AVR)へ移行してきている。D-AVRは、サンプル/ホールドがあり、サイリスタ励磁方式、交流励磁機方式等の励磁システムの応答速度が違う場合にどの様に設定すべきであるかの理論的な提案がなされていなかった。また、D-AVRの信頼度向上のために、冗長化構成の信頼度比較をベースにした検討が必要である。

発電機は、核融合の電源等各種の電源として使用される。核融合のプラズマと閉じこめるコイルは短時間定格であり、コイル電流の仕様が台形波状であることと、発電機も短時間定格であり、界磁電流の最大値が厳しく制限されている。そのため、通常のフィードバック制御で仕様を実現する事が困難である。

安定度を向上させる経済的な方法として、動態安定度の向上を目的として回転速度変化や有効電力変化を制御信号としてAVRへ入力する系統安定化装置(PSS)がIEEEに提案された。この安定化装置はゲイン、進み/遅れ関数から構成されているので対象とする励磁システム、発電機及び系統インピーダンスから所望の制動トルクを得られるような定数を選択しなければならない。しかし、これらの論文には進み/遅れをどう設計すれば良いかが示されておらず、進み/遅れを決定するために過渡安定度シミュレーションに

よる試行錯誤が必要であった。国土の広い国や最近の国内電力会社間の広域運用の結果、1 Hz前後の通常の電力動揺周波数から0.2 Hz程度の低周波の電力動揺が発生してきた。これは、従来のPSSでは対策が困難であるか、対策できても系統構成が変化するとPSSの進み/遅れの再調整が必要となる。そこで、従来のPSSよりも制動トルクの周波数特性の広いPSSとしてリカッチ方程式を適用する事により、制動トルク特性を改善させる研究がされてきた。これらの研究では全ての状態変数に対応するフィードバックが必要なために実際に検出できない相差角信号等が使用され、また評価関数をどの様に設定すれば所望の制動トルクが得られるかが示されていなかった。

800 Km程度の長距離、10 GWの大電力を安定に送電する必要性が議論されている。送電システムとして直流送電が必要であり、交流系統と直流系統のハイブリッド送電が有効であることが示された。しかし、実際にハイブリッド送電するために、交流系統と直流系統の送電電力の分担、直流送電の起動方法、交流系統に送電事故等が発生時の直流系統制御等の技術が確立しなければ、実用化ができない。

本論文では、発電機の非線形モデル、D-AVRを含む各種励磁システム構成、PSSの設計理論と系統試験結果、直流送電制御に関する実用化研究の成果を示している。本論文は6章より構成されており、その概要を以下に示す。

第1章は緒言であり、本研究の背景、目的、概要及び特徴を述べている。また、論文の構成を示している。

第2章では、同期発電機のモデルとしてパークの式に基づく、磁束の飽和を含まないd, q軸モデルを示した後に、発電機の電圧が大幅に変化するような磁気飽和が問題となる事象の整理と磁気飽和を正確に、実用的に取り扱うことができる理論式を示した。この中で、提案した非線形モデルが正しい事を検証する目的で、系統事故時には発電機電圧が大幅に変化するがこの種のデータがないので、発電機の試験として必ず実施される発電機負荷遮断試験に注目した。この負荷遮断試験データに対して、従来のパークの式を使用したモデルでは、解析の精度に問題がある事を具体的に示した。この問題を解決するために、発電機の磁気飽和を界磁電流の関数として表現し、d, q軸の相互リアクタンスの係数として扱う方法を提案した。この係数をパークの式に組み込み、負荷遮断試験データと同じ条件で解析して両者が一致する事を示した。

第3章では、D-AVRの冗長構成、サンプル/ホールド時間の理論的な設定根拠及び核融合電源に適用される励磁制御へ状態変数に制約を持たせた条件におけるポントリアギンの最大原理を適用した結果を示す。この中で、AVRの応答仕様や励磁システムを構成する各種の制御装置の機能の整理を行った。また、安定度解析に必要な各種励磁システムのブロック図とそれらのブロック図が励磁システムの動特性を正確に表現している事を検証するために、実機試験データとシミュレーション解析結果の比較を示した。

第4章では、励磁制御による電力系統安定度向上を図るために適用されるPSSの設計理論について、従来の問題点の整理と解決手法について示している。その中で、PSSに実用化可能な $\Delta\omega$, ΔP , ΔF の3種類信号に対して、安定化関数をボード線図を利用し

て作図的に設計する設計手法を提案した。上記の3種類の信号を実機に装備して、各種の実機特性試験を実施した。その結果、提案した設計手法は実機試験結果と良く一致し、シミュレーションと併せて、今後は実機適用前にも十分な精度で机上検討が可能である事を示した。

広範囲の電力動揺周波数に有効な制動トルクを与えることのできるPSSとしてリカッチ方程式を適用し、制動トルクに対応した評価関数を設定することで所望の制動トルクを得る事のできる多変数制御PSSを提案した。この多変数制御PSSを800MVAの発電機へ適用し、設計の目標通りの安定度向上効果を持つ事を実機試験で検証した事を示した。

第5章では、原子力発電所で発電した電力を長距離、大電力送電するために、直流送電システムを適用する検討結果を示した。この中で、電力系統の過渡事象が原子炉へ与える影響を整理した。また、直流送電制御は通常の運転であるハイブリッド送電時の直流と交流の送電比率制御、系統事故時の過渡制御及び直流単独送電時の制御が必要であるが、系統の運用状態の変化が現在行われている原子力発電所の運転手順の変更をさせないような制御方式である事が必要である。同時に、過渡時においても原子力発電所の運転に影響を与えないことが要求される。これらについての検討結果を示した。次に、原子炉シミュレータ、直流送電制御装置を試作し、120KVAの発電機を使用した模擬送電試験を行い、検討結果が正しい事を確認した。

第6章は、本研究の結論であり、得られた成果の概要を記述している。

以上により、電力系統安定度向上を図る事ができた。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 長谷川 淳
副 査 教 授 土 谷 武 士
副 査 教 授 大 西 利 只

学 位 論 文 題 名

電力系統の安定度向上に関する研究

電力系統においては、近年、個々の系統における規模の拡大とともに、電力会社間の関係の強化、電源の大容量化・遠隔化による大容量長距離送電の必要性などにより、安定な電力輸送を確保すること、すなわち安定度を維持することが益々厳しくなっている。

電力系統の安定度に最も中心的な役割を担うのは、発電機とその各種の制御系の動特性であり、発電機の正確なモデル化と適切な制御系の設計原理の確立が、安定度の解析および安定度向上に関して極めて重要な事項である。また特に原子力発電所などの大電源からの大容量長距離送電に伴う安定度問題に関しては、直流送電システムの導入による直流・交流ハイブリッド送電技術と其中での直流送電制御が安定度向上に貢献できる有望技術として期待されており、その解析と制御技術の確立が強く望まれている。

本論文において著者は、まず、発電機の電圧が大幅に変化して発電機の磁気回路中での磁気飽和が問題となるような場合に対して、それを正確かつ実用的に取り扱うことのできる発電機非線形モデルを新しく提示している。従来のパークの式を用いた磁気飽和を考慮しない発電機モデルに対し、この新しいモデルでは、発電機の磁気飽和を界磁電流の関数として表現して、 d 、 q 軸の相互リアクタンスの係数として取り扱っている。結果の検証には、電圧が大幅に変化する事象である発電機負荷遮断試験のデータを用いており、従来のモデルでは解析精度において問題があるのに対し、新モデルを用いて解析すれば実試験データと極めて良く一致する結果が得られることを明らかにしている。

つぎに著者は、発電機励磁制御系の設計に関して、AVRが従来のアナログAVRからデジタルAVRに移行してきている現状を踏まえて、これまでデジタルAVRに対して検討が不十分であった諸点、すなわち信頼性を確保するためのデジタルAVRの冗長構成の在り方、サンプル/ホールド時間の理論的な設定根拠などについて検討し、実用的な設計指針を明らかにしている。また、安定度の解析に用いられている各種励磁システムのブロック図を整理し、実機試験データとシミュレーション解析結果との比較から、それらのブロック図が励磁システムの動特性を正確に表現していることを明らかにしている。これらの結果は大容量発電機の制御系設計に活かされ、実用的な成果を上げている。

さらに著者は、励磁制御による電力系統安定度向上のために用いられる系統安定化装置(PSS)の設計理論に関して、従来の考え方の問題点を明らかにし、その解決法を提示するとともに、ボード線図を用いて作図的に安定化関数を設計する実用的設計手法を提案している。実機による各種の試験結果は、この方法が極めて有効なことを立証している。また著者は、多変数制御PSSを新しく提案し、その設計理論を確立するとともに、この

多変数PSSを800MVAの発電機に初めて適用し、良好な安定度向上効果を有することを立証している。このPSSは、今後広く適用されるものと期待される。

著者はさらに、原子力発電所からの大電力長距離送電に、直流送電システムと交流送電とのハイブリッド送電を適用する場合の課題について詳細に検討し、通常の運転状況であるハイブリッド送電時の直流と交流の送電比率制御、系統事故時の過渡制御および直流単独運転時の制御などの直流送電制御を、原子力発電所の運転に影響を与えずに行う方法を確立した。この直流制御方式は、原子炉シミュレータおよび直流送電制御装置を試作するとともに、120kVAの発電機を使用した模擬送電試験により実証されている。わが国では、将来の大電力長距離送電として、10GW程度の大電力を800km程度の長距離にわたり安定に送電することが検討されており、著者の検討成果は、その実用化に向けて重要なブレークスルーとなっている。

これを要するに、著者は、正確かつ実用的な発電機モデル、AVRおよびPSSを含む励磁制御系の設計手法、直流・交流ハイブリッド大電力長距離送電について、電力システムの安定度向上の面から多くの新知見を与えており、電力工学、電力系統工学の進歩に貢献するところ極めて大なるものがある。

よって著者は、北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格あるものと認める。