交直変換器を含む電力システムの解析および 制御に関する研究

学位論文内容の要旨

我が国の電力系統は、電力需要の増加に伴い大規模化・複雑化の一途をたどってきた。一方、電力を供給する発電所は、立地・環境上の制約のために、大きな需要地からますます遠隔地に立地されている。このような状況で電力の安定供給と予備力の確保のために、大容量長距離送電や電力系統間を連系して電力を融通することが行われてきた。また、電力の自由化の進展に伴い、種々の電源が市場の中で経済性を優先して電力系統に連系され運用を行うようになると、今後は電源の偏在化や変動要因がさらに顕著になると予想される。しかしながら送変電設備の効率的運用の観点から、新規の設備投資は抑制され、既存の設備をより容量の限界に近い大容量で運用したり、電源の偏在や変動に応じてより柔軟に設備を運用する必要が生じている。

以上の電力系統の背景により、大容量の交流送電では、基幹系統の拡大と重潮流化に加え、大きな不平衡負荷などにより、不平衡の要因が拡大の傾向にあり、これらに起因する逆相分が機器に与える影響についても懸念されるようになってきた。そこで、近年顕在化してきた三相不平衡現象を解明することが課題となっている。

一方、大容量長距離送電と電力系統間の連系、柔軟な運用に対して、直流送電の適用も考えられる。直流送電では、相差角安定度の問題がない、非同期で交流系統間を連系できる、送電電力を高速に制御できる等の利点があるため、系統間の連系への適用が進んでいるが、その反面、交流系統へ与える影響・相互作用が強いため、従来からシステムの適用に当たっては、過電圧解析、高調波解析、安定度解析など様々な観点からの解析を行い、システムの仕様や制御・保護方法を決めている。直流送電の適用拡大と大容量化、および、系統設備容量を極力有効に活用しようとする傾向に伴い、直流送電システムと交流系統との相互作用を従来以上に把握し、対策を検討する必要が出てきている。具体的には、直流送電システムの非整数次高調波不安定の問題、多変数制御方式の周波数制御を適用するに際して発生したシステム構成に起因する課題、直流送電の極制御の制御性能とロバスト性を向上させるという課題があげられるが、これまで十分に検討されていなかった。

本研究はこれらの課題をふまえ、大容量化する交流送電、適用の拡大する直流送電に関連して、三相不平衡の解析手法の提案と現象解明、および、直流送電用の電力変換器を含む電力システムの解析方法および制御方法を提案することを目的として行ったものである。

第2章では、電力系統の不平衡電流発生メカニズム解明のため、基幹系統で一般的に用いられる2回線送電線で誘起される不平衡電圧を零相分や逆相分に分離し、いくつかの代表的な不平衡発生パターンに分けて分析する手法を提案し、以下を明らかにした。

- (1) 送電線で発生する不平衡の要因として、リアクタンスの不平衡による影響が大きいこと、2回線運用時には回線内の相互誘導分による影響が大きいことを示した。
- (2) 提案する手法により、放射状系統やループ状系統等の系統内で発生する不平衡電圧、電流の分布が決るメカニズムを明らかにできることを示した。

(3) ある程度規模の大きなモデルシステムを用いて三相不平衡潮流計算を行い、発生する不平衡電圧、電流の分布は上記メカニズムの組み合わせで説明できることを確認した。これらの成果は、送電線の新設/更新計画時や通常の系統運用時に、不平衡分の増大の有無を予測し、不平衡を抑制する対策として反映させることができるものと期待する。

第3章では、交直変換装置の高調波不安定現象の解析を行い、直流送電に用いられる交直変換器の非整数次高調波不安定現象の発生をアナログシミュレータとデジタルシミュレーションで確認し、また、交直変換器の等価インピーダンス Z_m を周波数走査法によって求め、交流系統のインピーダンス Z_s とで構成されるシステムの開ループ伝達関数のベクトル軌跡に着目して安定判別する手法を提案し、この手法の検討結果として以下を示した。

(1) 提案する手法は安定限界を定量的に把握できることを示し、シミュレータや EMTP シミュレーションとの比較で妥当性を検証した。

(2) 交流系統のインピーダンスの周波数特性において、並列共振周波数が低くなると、非整数次の高調波不安定現象が発生しやすくなることを示した。

(3) この対策として、進相コンデンサの投入量を抑制して並列共振周波数を上げる方法と、電流制御系(ACR)の進み時定数を小さくする方法が有効であることを確認した。本研究成果は紀伊水道直流送電システムに適用され、システムの安定運用に寄与している。

第4章では、直流連系設備の周波数安定化制御装置の開発を行い、対象システムの構成上の特徴に着目しルート断などによる単独系統時に AFC が有効に動作するように起動方式を含めて制御システムを構築した。さらに、多変数制御方式 AFC を適用するにあたりシステム構成に起因する課題と対策を検討し、実系統での系統試験により性能を検証した。

(1) 中間電圧母線方式の場合の周波数検出点は、500kV 側とする方が良いこと、および、位相補償を併用する方が安定性向上効果が大きいことを示した。

(2) 設計時に省略する検出系や制御系の遅れを考慮したシステムの安定判別が必要であり、本研究で示した周波数応答解析モデルは定量的に評価するために有用である。

(3) 単独系統に周波数偏差を生じさせる外乱が発生した場合、AFC により速やかに周波数変動を抑制できることを系統連系試験により検証した。同時に、デジタルシミュレーションによる解析結果との比較によりその有効性も検証した。

(4) 交流遮断器による単独系統の同期並入を迅速に行えるよう、揃速制御機能を設け、その有効性を系統試験で確認した。

本論文で検討した内容は、南福光 BTB システムに適用されたと同時に、システム構成あるいは運用方法が類似の今後のシステムにも活かすことができるものと考えられる。

第5章では、直流送電システムへの最適制御手法適用について研究を行い、LQG 方式の制御方法をベースに、直流送電システムに固有の制約を考慮しつつ新しい制御方法を提案した。新しい制御装置の性能を、直流送電に適用されている従来型の PI 制御のシミュレーション結果と比較し、LQG 方式の制御装置の主な利点は以下であることを示した。

(1) 直流電流基準のステップ応答時に、PI 制御を用いた場合に現れる直流電流の振動は LQG 制御では著しく小さい。

(2) 短絡容量比の変化に伴う直流電流応答の変化は従来型の制御に比べて小さい。

(3) 直流送電システムの潮流反転時間は非常に短時間である。

(4) 交流系統の故障が発生してもシステムは不安定にならず、故障除去後速やかに初期状態に復旧する。

以上の結果は、提案する LQG 制御装置は良好な性能を有することを示している。

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
副査	教授	本間	利久
副査	助教授	北	裕幸

学位論文題名

交直変換器を含む電力システムの解析および 制御に関する研究

電力システムは、これまで、電力需要の増加に伴い大規模化・複雑化してきた。一方、電源立地は種々の制約から遠隔化するとともに電源の大容量化が進み、送電線の大容量長距離化をもたらすと共に、電力システム間の連系による電力融通を必要不可欠なものとしてきた。また、近年の電力事業の自由化に伴い、種々の電源が市場経済性を優先して導入されるであろうことから、電源の偏在化や運用に対する不確定要因・変動要因の増加が、今後一層顕著になるであろうと予想される。他方、自由化に伴う競争環境下では、設備投資が抑制傾向とならざるを得ず、既存設備の能力を最大限に引き出す得る設備運用、効率的な設備運用、不確定要因・変動要因にも対処できる柔軟な設備運用が必要となる。

このような背景の下で、大容量の交流送電においては、基幹システムの拡大と重潮流化に加えて、不平衡負荷の増加等に伴う不平衡要因の拡大が顕在化してきており、三相不平衡現象の解明が焦眉の急となっている。また、大容量長距離送電や柔軟な電力システム連系においては、直流送電・非同期連系の適用が重要な選択肢となるが、その適用拡大と大容量化にあたっては、系統設備要領を最大限に有効に活用しようとする傾向の増大とも相俟って、交流システムへ与える影響や相互作用について一層踏み込んだ解明が必要となっている。

本論文は、これらを踏まえて、大容量化する交流送電、適用が拡大している直流送電に関連して、三相不平衡の解析手法の開発と現象の解明、直流送電用の電力変換器を含む電力システムの解析手法の開発、直流送電用電力変換器に対する新しい制御手法の開発・実用化について実施された研究の成果をまとめたものであり、以下のような顕著な成果が認められる。

第一に、電力システムの不平衡電流発生メカニズムを解明するために、基幹システムで一般的に用いられる2回線送電線で誘起される不平衡電圧を零相分や逆相分に分離し、いくつかの代表的な不平衡発生パターンに分けて分析する新手法を開発するとともに、その有効性を立証している。この成果は、送電線の新設・

更新計画時や通常の系統運用時に、不平衡分の増大の有無を予測し、不平衡を抑制する対策を立案する際に、極めて有用である。

第二に、交直変換装置の高調波不安定現象の解析を行い、直流送電に用いられる交直変換器の非整数次高調波不安定現象の発生を確認した。また、周波数走査法により求めた交直変換器の等価インピーダンスと交流系統のインピーダンスとで構成されるシステムの開ループ伝達関数のベクトル軌跡に着目して安定判別する手法を開発し、その有効性を立証している。この成果は、紀伊水道直流送電システムに活かされ、システムの安定運用に寄与している。

第三に、直流連系設備の周波数安定化制御装置の開発を行い、対象システムの構成上の特徴に着目し、ルート断などによる単独系統時に AFC（自動周波数制御）が有効に動作するように、起動方式を含めて制御システムを構築している。さらに、多変数制御方式 AFC を適用するにあたってシステム構成に起因する課題と対策を詳細に検討し、実系統での検討試験によって性能を検証している。この成果は、南福光 BTB システムに適用され、期待された性能を十分に達成している。また、システム構成あるいは運用方法が類似であるような、今後計画される可能性のあるシステムにも活かされることが期待できる。

第四に、直流送電システムへの最適制御手法の適用について検討し、LQG 方式の制御方法をベースに、直流送電システムに固有の制約を考慮した新しい制御方法を提案している。また、新制御方法を適用した新しい制御装置の性能を、直流送電に適用されている従来型の PI 制御とシミュレーション解析により比較し、LQG 方式の制御装置が多くの面で優れた性能を有することを立証している。この成果は、今後、新設・更新の計画がなされるであろう直流送電システムの制御装置に活かされ、実用化されるものと期待できる。

これを要するに、著者は、大容量化する交流送電および適用が拡大している直流送電に着目して、特に交直変換器を含む電力システムの解析および制御に関して、顕在化しその解明が求められている現象の解明、新しい解析手法の開発、新しい制御手法の開発とその実用化、について多くの新知見を得たものであり、電力工学、電力系統工学、電気機器学に対して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。