

## 論文審査の結果の要旨

氏名： 兎 東 哲 夫

博士の専攻分野の名称： 博士（工学）

論文題名： 自励式電力変換器を用いた交流電気鉄道の三相不平衡補償に関する研究

審査委員： （主査） 教授 中 村 英 夫  
                  （副査） 教授 泉          隆                  教授 小 野          隆  
                                  教授 塩 野 光 弘

交流電気鉄道は、三相電力系統から受電した電力を単相電力に変換して車両負荷に供給している。この形態を実現する上では、単相大容量の負荷が三相電力系統に電圧不平衡を引き起こす問題、交流電気車両での整流方式に伴う単相交流側の力率遅れ対策といったものが必要になる。今日の交流電気鉄道はいずれもこれらの問題を現実的な範囲に軽減することで実現しているが、その効率向上に対する研究が申請者の研究である。論文は、緒論から結論までの5章からなる。以下、論文の章立てに沿って、研究の意義や審査判断の内容を報告し、論文審査の結果の要旨とする。

第1章は緒論として研究の対象や課題について論じている。交流電気鉄道は、三相電力系統から受電した電力を単相電力に変換して車両負荷に供給している。その際の課題として、新幹線のような大容量車両負荷をき電する場合、単相負荷が三相電力系統に電圧不平衡を引き起こす問題があり、本論文の主テーマとしている。このほか、車両における電力の力率問題、整流時に発生する固有の高調波電流がき電回路の共振周波数との関係により生じる共振問題、さらに、本論文の研究の対象外としているが、誘導障害問題を挙げている。

第2章では、交流電気鉄道が電源系統に与える影響について詳細な解析を行っている。まず、新幹線のような大容量単相負荷の変動により変電所両側のき電回線電力が不平衡となる場合、三相電力系統の受電側も三相電圧不平衡となって電圧変動が大きくなる問題がある。このため、実際の受電にあたっては電力会社との協議によって相間電圧変動率を規定している。申請者は負荷条件に対する三相不平衡率及び三相電圧変動率の計算方法を示した。

また、サイリスタ位相制御車では、力行時力率が0.8程度であり、無効電力に伴う走行時の三相側電圧不平衡が大きくなるほか、電源周波数の3次から15次程度の低次高調波電流が大きい特徴を持っている。このため、電力系統において、高調波電流も高調波ガイドラインに基づいて抑制する必要があるが、申請者は、実測に基づく高調波電流の値を示した。

第3章では、三相二相変換時の電源系統と交流き電鉄道の協調問題として、申請者が提案・開発した電圧変動補償装置(Railway Static Power Conditioner: 以下、RPC)についてその原理と意義について論じている。RPCは、き電側において単相2回線の母線にそれぞれ自励式電力変換器を接続し、回路間の有効電力融通と、き電の無効電力補償を同時に行うことによって三相不平衡補償と電圧変動補償を実施するものである。RPCは、さらに列車から発生する特別高圧の高調波電流を補償する機能も持つ。

また三相不平衡問題対応策として既に実用化されていた三相STATCOM装置とRPC装置との比較を行っている。RPC装置では、き電回路の無効電力が、き電用変圧器を通過しないため電圧不平衡の解消が容易となることや、高調波補償機能を有すること、経済性の利点があることを論じている。

さらに申請者は、原理検証のために200Vで動作するミニモデルを試作して、各種負荷に対する補償状況を試験し、RPC補償原理の有効性を定量的に確認している。この他、き電回路末端電圧降下補償機能と高調波補償機能も確認した。

この研究成果に基づき、東北新幹線の延伸時に総容量20MVAのRPCを提案し、同新幹線の2箇所の変電所に対し、IGBTをスイッチング素子としたRPCとGCTを用いたRPCをそれぞれ設置した。この効果は、試験列車走行時に現地で測定され、三相受電電圧不平衡率抑制、三相受電電圧変動抑制、高調波

補償、き電電圧補償に関してそれぞれRPCが所定の性能を満たすことを確認した。

この成果は、RPC設置が有効な電圧変動対策となり得ることを示しており、整備新幹線だけでなく、東海道新幹線にも多数のRPC設備が建設され、新幹線の安定輸送に大きく貢献している。このことは申請者の研究の社会的意義の大きさを示すものでもある。

第4章では、申請者が提案した不平衡補償単相き電装置(Single Phase Feeding Power Conditioner:以下、SFC)について、その目的と原理及びミニモデルを用いた検証結果、そして実用後の実績等について論じている。

日本の交流電気鉄道は商用周波単相交流方式を採用しており、三相電力系統から大容量の単相電力を受電すると、三相側に電圧不平衡や特定相に電圧変動を発生する。そのため、スコット結線変圧器等によって三相を2組の単相に変換し、方面別に異なるき電を行って、不平衡や電圧変動を軽減している。

一方、新幹線の車両基地においては配線が複雑なため、車両基地全体を同相でき電することが有利な場合が考えられる。しかし、単相き電においては受電側の三相電流不平衡率が常に100%となるため、受電点での系統短絡容量が小さい場合は、大きな三相電圧不平衡が生ずるおそれがあり何らかの対策が求められていた。このため、三相電力を直接単相に変換してき電する装置として、不等辺スコット結線変圧器と自励式インバータを組み合わせて、斜辺の単相負荷を二相側で電力が等しい直角の成分に変換して、三相側の不平衡を補償する不平衡補償単相き電装置(SFC)を提案した。

力率0.95以上の自励変換式車両を想定した不等辺スコット結線変圧器の場合には、変圧器のき電回線(S座)とM座の電圧ベクトル角度をこれまでの $2/3\pi$ から $\pi/4$ と変更した方が、有効電力がM座とT座に均等に配分され、三相電圧不平衡の抑制が可能となる。また、M座とT座に自励式電力変換器を付加して両座の無効電力を補償すると共に、両変換器間をBTB構成で直流接続して有効電力の融通と均等化を図ることで、三相側の電圧変動補償が実現できる。

実際のSFCから車両をき電する場合には、力行負荷を補償するためにM座側での電力変換リアクトル動作、T座側で電力変換器コンデンサ動作が多くなることから、装置容量を詳細に検討した。そしてM座に固定リアクトル、T座に固定コンデンサを設備することによって自励式電力変換器の容量を節約できる。この考え方について200V級のミニモデルを試作し原理検証を行った。車両としては、サイリスタ位相制御模擬負荷のものと自励変換式のものを模擬した抵抗負荷のそれぞれに対してSFCがどの程度補償動作するかを計測した。その結果、4~5%以上生じていた受電側三相電圧不平衡が3%程度以下に抑制されることと、変圧器を用いた無負荷励磁突入電流への補償試験によって、装置動作に異常が無いことを確認した。

この研究成果に基づき1997年に開業された新幹線長野車両基地変電所では負荷容量に適応した固定容量と自意識電力変換器容量を合計した総容量20MVAのSFC装置が設備され、所定の性能を満足することが確認されている。

第5章は申請者の研究成果をまとめ、結論として整理している。

申請者は、三相二相変換に伴う不平衡問題対策として自励式変換器を用いたRPC装置を提案し、ミニモデル検証を経て、フィールド試験、実用化に至った。現在、新幹線のき電用変電所に設置したRPCが、規定値以内に三相受電電圧変動を抑制しているほか、高調波補償機能、き電電圧補償機能も所定の性能を満たしている。このことは、弱電源地域に大きな電圧変動が予測される新幹線を建設する場合の有効な処方箋を明らかにしたことにもなり、今後、新幹線が導入される個所の電力事情を考慮すると、申請者が開発したRPCの社会的貢献は大きい。

また、車両基地においては配線が複雑なため、車両基地全体を同じ相でき電することが有利な場合が考えられる。申請者は、三相単相変換時の電源系統と交流き電鉄道の協調問題として、三相不平衡対策を検討し、三相側の不平衡を補償する不平衡補償単相き電装置(SFC)を提案した。申請者は、SFCについて、理論解析および模擬装置による検証試験を行い、有効性を実証した。SFCは北陸新幹線長野車両基地変電所において実用化され、所定の性能を発揮している。

これらの研究の成果は、交流電気鉄道の三相不平衡補償という種々の問題に対し、申請者が真摯に

取り組んだ結果として得られたもので、今日の新幹線の安定輸送に大きく貢献している。

このことは、本論文の提出者が自立して研究活動を行い、又はその他の高度な専門的業務に従事するに必要な能力及びその基礎となる豊かな学識を有していることを示すものである。

よって本論文は、博士（工学）の学位を授与されるに値するものと認められる。

以 上

平成28年2月18日