

# 論文の内容の要旨

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

## 1. 緒論

本研究では、電気鉄道における商用周波単相交流き電方式を研究対象としている。これは、鉄車輪鉄レール方式の鉄道において、沿線に配置されたき電用変電所から標準電圧 25kV の特別高圧で商用周波数 (50Hz または 60Hz) の単相交流電源を電車線 (架線) に供給し、車両がパンタグラフで集電して駆動力として利用する電力供給方式である。特に新幹線のような大容量車両負荷が単相であるために、三相電力系統に引き起こす電圧不平衡問題を主な課題としている。

## 2. 交流電気鉄道が電源系統に与える影響

本章では、交流電気鉄道のき電設備が持つ諸問題を定量的に示した。

### (1) 単相負荷に伴う三相不平衡問題

新幹線に代表される商用周波単相交流き電方式の電気鉄道は、単相負荷である。そのため、列車走行に伴う負荷変動によって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。電気設備技術基準および解釈では三相電圧不平衡率は二時間平均で 3% 以下と規定されており、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 3% 程度以下に抑制する場合がある。本章では、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。

### (2) 負荷が発生する高調波電流

東北新幹線を走行していた 200 系車両に代表される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だけでなく、電源周波数を基準として 3 次から 15 程度の低次高調波電流が大きい特徴を持っている。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。本章では、実測に基づく高調波電流の値を示した。

## 3. 三相二相変換時の電源系統と交流き電鉄道の協調

本章では、前章で指摘した交流電気鉄道のき電設備が持つ問題への対策として、き電用変圧器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し、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を持つ電圧変動補償装置 (Railway Static Power Conditioner: 以下、RPC) を提案・開発した。

### (1) RPC の構成と補償原理

RPC の基本構成は、き電用変電所に設置されたスコット結線変圧器二次側の M 座と T 座の各き電母線に 2 台の単相自励式電力変換器を接続し、BTB (Back to Back) 構成として直流側を接続したものである。2 台の自励式電力変換器は、接続されたき電母線電圧に対する出力電圧位相と振幅を制御することによって、相互に有効電力および無効電力をやりとりできる。また BTB 構成のため、M 座と T 座の間で直流コンデンサを介した有効電力の融通が可能である。

そこで RPC は、M 座と T 座の負荷電力が不平衡かつ無効電力を含んでいても、各座において自励式電力変換器を用いて無効電力を補償し、さらに有効電力を M 座 T 座間で均等化することによって、結果的に三相側の不平衡及び電圧変動を補償できる。また、自励式電力変換器の余裕分容量を用いた高調波補償機能を持たせることができる。

一方、RPC 設置変電所が受電を停止してき電回路末端となる場合には、自励式無効電力補償装置 (自励式 SVC) として動作することが可能である。この場合、き電回路末端における負荷電力に伴う電圧降下に対して、無効電力制御によって補償することができる。

## (2) RPC と三相 STATCOM の比較

ここで、自励式電力変換器を用い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(または三相 SVG 装置)と、提案した RPC 装置を比較する。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、装置全体容量を 5%程度節約して経済的な構成が可能であること、高調波補償機能を有すること、さらに変電所動作停止時にはき電末端での電圧降下に対応可能であることが有利である。

## (3) ミニモデルを用いた原理検証

RPC 装置の構成を提案してその補償原理を定式化し、さらに 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た。その結果、有効電力の融通と無効電力補償によって三相電圧不平衡は 6%以上から 1%以下に抑制され、また 9%に及んでいた三相相間電圧変動率は 1%以下に抑制されたことから、RPC 補償原理の有効性を定量的に確認した。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。

## (4) RPC の実用化

この研究成果に基づき、東北新幹線の盛岡・八戸間 96.6km の延伸に伴い、超高圧系統から送電線を延伸する受電方法と比較して大幅なコストダウンとなるよう、2 箇所の変電所を特別高圧受電として建設する際の負荷に伴う電圧不平衡率及び電圧変動率の計算結果を基にして、総容量 20MVA の RPC を提案し、同新幹線の 2 箇所の変電所それぞれへの設置に至った。スイッチング素子として一箇所では IGBT、もう一箇所では GCT を採用した。

試験列車走行時に現地で測定した結果、RPC が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、それぞれ所定の性能を満たすことを確認した。2002 年から RPC 装置は営業中の運用を開始しており、その後の東北新幹線の安定輸送に大きく貢献している。

このように、大きな電圧変動が予測される弱電源地域に交流電気鉄道を建設する場合には、変電所への RPC 設置が有効な電圧変動対策となり得ることが確認された。その後、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、順調に稼働している。

## 4. 三相単相変換時の電源系統と交流き電鉄道の協調

本章では、三相単相変換を行う場合の平衡化補償条件の定式化と、補償装置の提案及び原理確認を行った。

### (1) 三相単相き電の必要性

通常の交流き電鉄道は変電所で三相二相変換を行い、変電所から上下方面別にき電している。これに対して車両基地等では、線路配線が単純となる三相単相変換の単相き電に運用上の利点が生ずる。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%となってしまうため、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った。

そこで東北新幹線等で実績のあった三相受電単相き電方式である、スコット結線変圧器の M 座と T 座を連結して斜辺にあたる電圧を単相き電し、T 座方にコンデンサを挿入して無効電圧補償を行う不等辺スコット結線変圧器の適用を検討した。

### (2) SFC の構成と補償原理

既存の不等辺スコット結線変圧器は前述のサイリスタ位相制御を行う 200 系車両を想定し、負荷力率 0.8 に対して最適化されていた。これに対して、力率 0.95 以上の自励変換式車両を想定する場合には、変圧器のき電回線(S 座)と M 座の電圧ベクトル角度を既存の  $2/3\pi$  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。さらに、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によって、三相側の電圧変動補償を実現可能となる。

このような不平衡補償単相き電装置(Single Phase Feeding Power Conditioner: 以下、SFC)を提案し、各種負荷に対する補償原理を定式化した。

さらに、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 座側での電力変換器リアクトル動作、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する構成を提案した。

### (3) ミニモデルによる原理検証と実用化

次いで SFC の 200V 級のミニモデルを構成し、各種負荷に対する SFC 装置の補償効果を試験によって確認した。サイリスタ位相制御模擬負荷と自励変換式車両を模擬した抵抗負荷のそれぞれに対して SFC が補償動作することによって、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た。また、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、装置動作に以上が無いことを確認した。

その後、本研究に基づいて 1997 年開業の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、開業前の性能確認試験において所定の性能を確認した。

なお、SFC 装置の三相不平衡補償および電圧変動補償は、前項の RPC 装置の開発で検討した基本原理を単相き電方式用として応用したものであり、実用化に関しては SFC が先行したものである。

## 5. 結論

本論文では商用周波単相交流き電方式について、その技術的課題を示し、自励式電力変換器を用いた課題への対策を研究した。

### (1) 交流電気鉄道が電源系統に与える影響

商用周波単相交流き電方式の概要を述べ、三相不平衡問題と高調波問題を解決すべき技術的課題として指摘した。

### (2) 三相二相変換時の電源系統と交流き電鉄道の協調

三相二相変換と単相負荷に伴う不平衡問題対策として自励式電力変換器を用いた RPC 装置を提案し、補償原理の定式化、ミニモデル検証を経て、新幹線での実用化とフィールド試験を行った。新幹線での RPC は、規定値以内に三相受電電圧変動を抑制しており、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た。

### (3) 三相単相変換時の電源系統と交流き電鉄道の協調

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電力変換器を組み合わせた不平衡補償単相き電装置 SFC を提案した。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、補償効果を確認した。本研究に基づき、新幹線において SFC が実用化され、所定の性能を確認した。