

外96-9

早稲田大学大学院理工学研究科

博士論文概要

論文題目

鉄道車両用電力変換装置の
制御性能向上に関する研究

申請者

高 原 英 明
EIMEI TAKAHARA

1996年 7月

1. 本研究の背景

世界的傾向として鉄道輸送の需要が見直されており、特に長距離高速列車では過去には 200 km/h であった最高速度が 300 km/h を越えようとしている。鉄道の高速化では、使用電力増大に伴う電力供給設備の増強、また、従来使用されてきた直流電動機に代わって軽量で大出力、かつ高回転数の交流電動機の導入が不可欠である。電力供給面からは、高電圧、小電流での系統構成が可能な交流き電方式が適しているが、車両ではこの交流電力を電力変換装置により直流電力変換し、更に電圧と周波数を任意に変化させる別の電力変換装置により、三相交流電力として電動機の回転制御を行う。

電気鉄道の電源の特異性は、単相大電力を長距離に亘って給電するために安定性が悪いこと、また、車両の電力変換装置により電力系統に高調波電流が流れ、通信系統や信号系統と競合することが挙げられる。また、力率の値も電力系統の安定性に影響するため、極力高い値を保持することが必要である。新幹線電車などの大電力を消費する高速鉄道では、車両用電力変換装置として、半導体素子を用いて大きな出力を処理しながら、かつ高調波の低減、高い力率値の確保が必要であり、高周波 PWM 制御の適用は不可欠である。本研究は新幹線電車システムに代表される交流電源方式の高速車両への高性能 PWM 制御電力変換装置の適用を背景としたものである。

2. 本研究の目的

電力用 GTO (Gate Turn Off) サイリスタを用いた電力変換装置による鉄道車両用誘導電動機駆動方式は、直流を電源とする鉄道車両にて一步先んじて実用化されたが、単相交流電力を GTO サイリスタによる高周波 PWM 制御で交流-直流変換する技術の車両への適用は未実施の分野であり、鉄道用として本方式を実用化することを目的とする。本研究では、鉄道車両の必要な電力に適合した高周波 PWM 制御電力変換装置を実現することは勿論であるが、先に述べた外部環境への影響、すなわち高調波電流の低減、高い力率値の確保などを具現化する。また、電動機制御面においては、単相 PWM 制御電力変換装置の直流出力部の電力変動と電動機周波数との干渉問題の解決、高速度領域での車輪空転に起因する性能低下防止のための電力変換装置制御方法など鉄道車両として完成度の高いシステムの実現を図る。

3. 本研究の概要

本研究では、GTO サイリスタに代表される半導体スイッチ素子の適用を前提として、新幹線電車規模の鉄道車両に適用する、最大処理電力で 3000 kW 出力の高周波 PWM 制御電力変換装置を研究対象とする。

本論文は 6 章で構成し、第 1 章は序章、第 2 章は電力変換装置の議論に先立って、鉄道車両の高調波、力率などの解析に不可欠な多巻線変圧器の高精度特性解析手法について述べる。第 3 章は鉄道車両用としての PWM 変換装置の制御方式、試作のステップを含む実車両規模の装置開発と実証結果を記す。第 4 章以降は各論とし、第 4 章では変圧器偏磁に対する制御、停電検知方法、高調波低減方法など電源側の交流直流変換装置の研究内容を、また第 5 章では負荷側直流交流電力変換装置の電動機ビートトルク低減、車輪空転に対する高速応答制御について論じる。

第 2 章では鉄道車両システムへ新方式電力変換装置を導入するにあたり、高調波電流、力率などを高精度で予測する方法の研究について述べる。特に交流電源系統の解析にあたっては、車両変圧器の内部特性を精度良く模擬することが重要となる。交流電力を電源とする車両では、PWM 制御適用以前の電力変換装置はサイリスタ位相制御方式などであり、高調波電流低減、力率値改善はいずれにしても重要課題であるため、対応策として二次巻線を多分割した変圧器を用いている。PWM 制御電力変換装置においても二次巻線を多分割し、搬送波位相に差を持たせることは高調波電流低減に有効であり、多分割変圧器の高精度な模擬は不可欠である。この手法として、変圧器の複数巻線を理論的に解析可能な 3 巻線単位の相互結合としたマトリクスにて表現し、コンピュータシミュレーションによって解析可能であることを、サイリスタ位相制御方式の新幹線電車の高調波実測値との対比により明らかにした。

第 3 章では、新幹線電車の高速度化、安定した電力回生ブレーキ実現の利点と必要性、更に高速度化のための装置軽量化要求などを述べ、GTO サイリスタ PWM 電力変換装置適用の必要性と妥当性を述べる。単相 PWM 電力変換装置の機能は、単に交流-直流変換器としてのみでなく、交流電流波形制御機能、交流電流位相制御、すなわち力率制御機能、直流電圧制御機能を有し、これらの機能が鉄道車両用電力変換装置として必要かつ十分であることを示す。

新幹線電車駆動規模装置の試作に先立ち、段階的に 14 kW 出力、560 kW 出力、3000 kW 出力モデル装置の試作を実施し、電力変換装置としての機能確認ならびに、技術課題の抽出と解決方策について示した。ここで、電源側電力変換装置は、目的により電圧、電流の位相、すなわち力率制御を重視する電圧ベクトル制御と、電流波形の高速演算による応答性を重視する電流パターン制御の二方式の可能性を述べ、小出力電力モデル装置にて鉄道車両への適合能力を検証した。

14 kW モデル装置では、電圧ベクトル制御を適用して電流波形、電流位相、直流電圧制御の基本機能の実証、ならびに PWM 制御インバータと誘導電動機をシステムとしての組合せによる基礎動作の実証を行った。次いで 560 kW モデル装置は、電力用 GTO サイリスタを適用して実際の電力供給系統に相当する 20 kV 電源での運転を行い、また制御方式としては電流パターン制御の実用性を明らかにした。第 1 次 3000 kW モデル装置では、新幹線電車への搭載を前提として、等価模擬負荷装置による鉄道車両の加速、減速など全体動作の確認を行った後、実際の新幹線車両に装置一式を仮搭載し、実路線と同一のき電系統での確認運転を実施した。これらの段階的試作装置による検証内容を反映し、16 両編成からなる新幹線試作電車とこれに搭載して実路線にて 270 km/h の高速走行を行い、長期的に実用性を検証する PWM 制御電力変換装置を構成した。本装置は新幹線電車 3 両を 1 電力単位として、1 台の変圧器に 4 回路の二次巻線を有し、それぞれ 2 巻線単位に PWM 制御交流直流変換器と PWM 制御インバータ回路を設けたもので、変圧器 2 巻線に相当する回路で 1 車両内 4 台の誘導電動機を運転するシステムとした。

第4章では、回路上電源側に位置する交流直流変換器の研究内容について述べる。第1次3000kWモデル装置は電圧ベクトル制御方式を用いたが、本方式は電源周波数の1サイクル毎のサンプルにてデータ処理を行うものである。実際の電気系統では直流分の重量による変圧器の偏磁が高頻度で発生し、電圧波形歪みに対して電流波形制御の応答性が不十分であることが明らかになったため、その後の試作装置ではこの点を改良してデジタル高速演算機能による電流パターン制御を導入して電流制御補償定数が適正に設定でき、安定した制御特性が得られることを明らかにした。

新幹線鉄道では、地震など緊急の場合に、電源を停電させて車両を停止させる方策を用いているが、自励方式変換器を用いて電力回生ブレーキを行うと、同一電源系統内の車両間で電源停電時にも電力融通を行い、停止に時間を要する不都合が生じる。双方がPWM制御方式の車両間および、PWM制御とサイリスタ位相制御の車両間の場合で理論的なベクトルによる解析を行い、交流電圧、直流電圧による停電検知、交流電源の高周波分を検出する方法、また、制御回路に常に電源周波数より低い周波数を注入し、電源周波数による復帰力が無くなった場合に周波数変化を検知する方法等を組合せて停電を短時間で検出する方法を構築した。実証は実際の新幹線電車編成により条件を設定して電源をしゃ断し、1秒以内の停電検知が可能であることを示した。

また、高調波電流低減に関しては、搬送波位相差の変圧器二次巻線単位での設定に加えて、搬送波不均一位相差設定による特定帯域高調波の低減、更に車両編成全体での位相差設定による高次高調波の低減効果をシミュレーションと実測により示した。

第5章では負荷に位置する直流交流電力変換装置の研究について述べる。一般産業用の応用分野では多くの研究が成されているが、鉄道車両応用では電動機のビートトルクと車輪空転に対する制御の課題がある。

電源の単相電力を直流電力に変換すると平滑コンデンサ容量値の物理的な限度により直流電力変動周波数と電動機周波数の干渉で、電動機トルクに脈動現象が生じる。この対応として、PWM制御インバータのすべり周波数を直流回路電力変動に同期させて適正なゲインで補正することで、電動機周波数とのビート現象を低減できることを実証した。

加えて、新幹線電車高速度走行時は、車輪とレール間の滑りが生じやすいため、車輪が滑って空転した場合のトルク低下防止制御が必要である。この点に関する空転の迅速な検出と滑り状態を回復させる制御方法の実証試験結果についても述べた。なお、ここで実証試験に用いた新幹線電車は電動機を個別のインバータ回路で制御する方式の試験車両で、特に空転に対する制御改善を意図したものである。

第6章では以上の研究結果をまとめ、新幹線に代表される高速度車両への高周波PWM制御電力変換装置の適用による制御性能向上を明らかにし、実用化への目処をつけた。