

	学位記	文科省報告
2007	4771	甲 2612

早稲田大学大学院 理工学研究科

内合27-67

博士論文審査報告書

論文題目

電気鉄道における次世代車両駆動システムの
設計手法に関する研究

Design Method for Advanced Traction
System of Electric Railway

申請者

小川 知行

Tomoyuki Ogawa

電気・情報生命専攻 コンピュータ援用電磁工学研究

2008年 2月

鉄道車両を動力システムの観点から考えると、大別して、電化区間において架線から集電し電気運転を行う鉄道車両と、非電化区間において主として内燃機関の動力源を利用する鉄道車両の2種類に分類される。前者は、効率も高く、都市通勤輸送・幹線輸送・高速輸送などに広く用いられているが、そこで用いられるインバータ駆動システムは、スイッチング動作による高調波が発生するという問題を有している。このため、車両からレールを通じて変電所に流れる帰線電流の高調波が信号システムに悪影響を及ぼす可能性があり、その対策が大きな課題となっている。一方、後者は、架線を用いないため、帰線電流の高調波問題は生じないが、効率の高い電気システムの適用が限られることや、回生ブレーキによる省エネルギー化が困難であることなどの課題がある。これに対して、近年の蓄電技術の進歩により、蓄電装置を用いて電力貯蔵を行う車両駆動システムの適用が検討され始めている。これは、ディーゼル発電機や燃料電池などの発電装置と、電気二重層キャパシタやリチウムイオン蓄電池などの蓄電装置とを組み合わせたハイブリッド電源鉄道車両である。ハイブリッド電源鉄道車両は、複数の電源を有し、かつ実用上様々な制約が存在することから、車両駆動システムの設計は容易ではなく、設計・評価手法の確立が望まれている。本論文では、上述の課題に焦点を当て、電気鉄道の次世代における車両駆動システムの設計・評価手法を開発することを目的としている。

本論文は全4章により構成され、各章の概要は以下の通りである。

第1章「緒論」においては、本研究の背景と目的および本論文の概要について示している。

第2章「帰線電流高調波の理論解析」においては、架線から集電し電気運転を行う鉄道車両に焦点を当て、インバータによる車両駆動システムの新たな設計手法の提示を目的とし、帰線電流高調波の理論解析手法を開発している。鉄道車両駆動に用いられるインバータ制御は、その原理上高調波が発生する。インバータの直流側電流は、レールを通じて変電所に流れる帰線電流となり、その高調波が、軌道回路の鉄道信号電流に基づく列車検知機能に障害を及ぼす可能性がある。また、車両から発生する高調波は様々な周波数成分を含んでおり、信号設備に用いられる周波数も多岐にわたる。しかしながら、これまで帰線電流高調波の発生メカニズムは、定量的には明らかになっていない。その結果、新たな主回路設計の際には、その都度、帰線電流高調波の測定・確認が行われ、必要に応じて車両側あるいは信号側で試行錯誤的に対策がとられているのが現状である。本論文では、車両駆動用インバータによる高調波発生量を理論解析に基づき明らかにする方法を提案している。

開発手法は、相電流の正弦波近似とともにスイッチング素子の動作を表現するスイッチング関数を導入することにより、直流側電流高調波の周波数成

分だけでなく、その振幅値も明確に示す理論式の導出を可能とした。また検証として、実験結果および微分方程式に基づく数値解析結果と提案手法の理論解析結果の三者を比較し、理論解析による値は、実験と数値解析で得られた主な高調波成分と周波数が一致するだけでなく振幅も実用上十分な精度で合致することを明らかにした。これにより、本章において開発した理論解析手法の妥当性を示している。開発手法により、変調波周波数、搬送波周波数、変調率などのパラメータが、発生する高調波に及ぼす影響を理論式に基づき把握することが可能となった。さらに本章では、開発した理論解析手法を用いて、高調波低減の一手法としてPWM搬送波の位相差運転の効果について分析・評価している。位相差運転は、交流鉄道車両においては架線のゼロ電位検出による同期が可能のため広く用いられている。一方、直流鉄道車両においては、同期電源を持たないため位相差運転の適用が困難であった。しかしながら近年の鉄道車両においては、補助電源の同期電源化により、位相差運転の適用の可能性が出てきている。本章では、開発手法により、直流鉄道車両への位相差運転の効果インバータ台数、位相差角度などのパラメータに基づき算出する理論式の導出に成功している。

本章で開発した理論解析手法により、車両と信号システムとが協調した高調波対策の実現に向けた検討が可能となった。これは、従来の設計や試験時の調整における試行錯誤的なアプローチを回避し、車両駆動システムの設計の大きな効率化を実現し、インバータによる車両駆動システムの設計に有益な情報をもたらすものであり高く評価できる。

第3章「ハイブリッド電源鉄道車両の最適化設計手法」においては、はじめに、将来の車両駆動システムとして研究開発が進められているハイブリッド電源鉄道車両の設計・評価手法について提案している。ハイブリッド電源鉄道車両は、発電装置と蓄電装置を有することから、従来の鉄道車両に比べて設計の自由度が極めて高いシステムである。また、評価項目の1つである消費エネルギーは、路線条件や機器容量が同一でも、採用する電力制御法に依存して大きく変動する。これらの背景から、ハイブリッド電源鉄道車両の設計は、電力制御法も含む様々な設計変数と多岐にわたる目的関数が存在することが特徴であり、適切な設計指針を得るには広範な探索を行う必要がある。その対策として開発手法においては、多目的最適化を適用すると同時に、そのプロセスにおいて電力制御パターンの決定に動的計画法を取り入れたネスト化された最適化手法を提案し、さらに効果的な並列化計算を実現している。これにより、種々の路線条件や蓄電装置、機器容量の下、消費エネルギーを最小にする最適な電力制御を保証した上で、発電装置容量、蓄電装置の種類や容量、消費エネルギー、路線条件の相関を広範な探索空間の中から明らかにしている。以上の詳細な分析結果に基づき、最終的には、蓄電媒体を有さない鉄道車両に比べて電源システムのハイブリッド化がもたらす効果の

大きい機器構成・電力制御パターン・適用路線に関するいくつかの設計思想を提示している。これらは、現実的に設計可能な選択肢を網羅した広範な探索空間から抽出されており、ハイブリッド電源鉄道車両の基本設計において有用な指針となり得るものである。

以上の検討では、動的計画法により最適化された電力制御に基づき、ハイブリッド電源鉄道車両の基本設計を議論している。したがって、設計結果を実際のハイブリッド電源鉄道車両に展開するには、動的計画法により得られた結果と遜色ない程度のエネルギー消費を実現できる現実的な電力制御法が求められる。そこで、本論文では、車両の総エネルギー保存の考え方を基本とする制御関数を提案し、それに基づく新たな電力制御法を開発している。本制御法は、蓄電媒体が保持する蓄電エネルギー、列車の走行による運動エネルギー、および列車の標高により決まる位置エネルギーの総和が一定に保たれるように、発電装置の簡便な出力制御関数を導入したものであり、実車両へ容易に実装可能なものである。また検証として、提案の関数による電力制御法と動的計画法による電力制御の結果を比較し、様々な路線条件や機器容量配分の条件下でほぼ同等のエネルギー消費を実現可能であることを明らかにしている。このことにより、多目的最適化と動的計画法をネスト化した本章の設計・評価手法に基づく設計指針は、開発した電力制御法を用いることで容易に実現可能なものであることが示されている。

これまでは限定的な条件下での検討が行われていたハイブリッド電源鉄道車両の設計問題に対して、本章で提案した設計・評価手法により、一般性のある有益な設計指針が明らかとなり、その有用性は高く評価できる。

第4章「結論」においては、本研究の結論を述べ、今後の課題について言及している。

以上述べたように本研究は、次世代の車両駆動システムの設計手法を開発し、その過程において種々の問題点を明らかにして巧みな解決策を見出し、多くの新しい知見を得ている。本研究の成果は、車両駆動システムの設計において、工数低減など効率向上に貢献するとともに、数値解析や最適化計算の導入により鉄道分野における設計技術の高度化に大きく寄与するものと評価できる。したがって、本論文は博士（工学）の学位論文としての価値があると認められる。

2008年2月

審査員（主査）	早稲田大学教授	博士（工学）早稲田大学	若尾 真治
	早稲田大学教授	工学博士（早稲田大学）	岩本 伸一
	早稲田大学教授	工学博士（早稲田大学）	内田 健康
	早稲田大学教授	工学博士（早稲田大学）	石山 敦士