

博士論文概要

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

Study on Design Methods 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

2007年 11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、架線から集電を行う電気運転による鉄道車両と、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、架線による電力融通ができないため、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、回生システムによる電力の融通が困難であることなどの課題がある。これに対して、近年の蓄電技術の高まりにより、蓄電装置を用いて電力貯蔵を行う電気エネルギーによる車両駆動システムの適用が検討され始めている。これは、ディーゼルエンジン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り、多様な路線条件を有する鉄道分野において設計・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、次世代における車両駆動システムの設計手法を開発することを目的とする。

はじめに、電気運転を行うインバータによる車両駆動システムに対して新たな設計指針を示すことを目指して、帰線電流高調波の理論解析手法を提案する。現状のインバータによる車両駆動システムにおいては、高調波対策として、フィルタ回路の設置やスイッチングパターンの工夫などの方策が採られている。しかしながら、高調波の発生原理は明確に整理されているとは言い難く、過剰な高調波対策がなされている可能性がある。また逆に、高調波対策が不十分なために、車両の走行試験において追加対策を迫られることも少なくない。さらに、高調波を発生させる車両側のみならず、高調波の影響を受ける信号設備側においても、車両からの高調波を明確に定量化できないため、必要以上の高調波対策が施されている可能性がある。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する。これにより、車両と信号システムとが協調した高調波対策を実現の実現に向けた検討が可能となり、従来の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効率化が期待できる。

続いて、本論文では、導入に向けて研究開発が現在進められている段階であるハイブリッド電源鉄道車両の車両駆動システムの設計手法を提案する。ハイブリッド車両は、発電装置と蓄電装置のバランスにより機器の様々な容量配分が有り得る上、路線条件も多岐にわたり、それに応じて電力制御法にも種々の手法が考えられるなど、設計の自由度が高い。その結果、これまでに一般化された設計手法に関する議論はほとんど行われていない。そこで、本論文では、電力制御法の決定には動的計画法を取り入れ、機器容量の決定には多目的最適化手法を取り入れた設計・評価手法を提案し、異なる特徴を有する多数のハイブリッド構成を導

出する。本手法により、ハイブリッド車両の基本設計の段階において、広範な探索空間から有益な情報抽出を行うことが可能となる。

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述べる。

第2章においては、架線から集電を行う電気運転による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提案する。鉄道車両駆動に用いられるインバータ制御は、その原理上高調波を発生する。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、新たな主回路設計を行う際には、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。

このような背景のもと、本章では、車両駆動システムにおける高調波対策への応用を目的とした帰線電流高調波の理論解析手法の開発に取り組んだ。本章における開発手法は、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用いることにより、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を導出する。さらに、実験結果、微分方程式に基づく数値解析結果、および提案手法の理論解析結果の3者を比較した。この結果、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比較して、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した。これにより、本章において開発した理論解析の妥当性を示した。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。これにより、高調波抑制対策など、今後の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提示することが期待できる。

さらに、本章では、高調波低減の一手法として、位相差運転の効果について、開発した理論解析により分析・評価する。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、車両引き通し線の活用により、位相差運転の適用の可能性はある。ここでは、開発した理論解析の応用事例として、直流鉄道車両への位相差運転の効果を定量的に明らかにし、その有効性を示した。

第3章においては、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する。ハイブリッド車両の設計においては、発電装置の種類や容量、蓄電装置の種類や容量、消費エネルギー、路線条件など考慮すべき項目が多岐にわたり、問題が複雑化する。そこで、提案の設計手法ではこれらの評価項目を整理する手段として、多目的最適化を取り入れる。一方、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。換言すれば、路線条件や機器容量などに応じて、消費エネルギーの観点から適切な電力制御法は異なってくる。そこで、提案手法においては、電力制御法の決定に動的計画法を取り入れることにより、種々の路線条件や機器容量の下で消費エネルギーを最小にする最適な電力制御を実現する。これにより、電力制御法の善し悪しが及ぼす影響を除外した上で、発電装置容量・蓄電装置容量・消費エネルギー・路線条件の相関を広範な探索空間にわたり把握することが可能となる。このような詳細な分析結果に基づき、最終的に、電源システムをハイブリッド化することで得られる効果が大きい機器容量構成をパレート最適解として抽出した。同時に、路線特性の観点からも分析することで、ハイブリッド化の効果が大きい対象路線の特徴を明らかにした。

以上の議論では、動的計画法により最適化された電力制御に基づき、ハイブリッド車両の基本設計を行っている。したがって、設計結果を実際のハイブリッド車両に適用するには、動的計画法により得られた消費エネルギー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検討した。提案の電力制御法は、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である。先に述べた設計プロセスにおいて採用した動的計画法の部分を、提案の関数による電力制御法に置き換え、再度、多目的最適化計算を実施した。その結果、様々な路線条件や機器容量配分の条件下で、ほぼ同等のパレート最適解を得ることができることを示した。このことにより、多目的最適化と動的計画法を組み合わせた本章の設計・評価手法は、その設計結果が電力制御の観点からも容易に実現可能なものであることが示され、ハイブリッド車両の基本設計において、実用上有益な設計情報を与えるものと言える。

第4章においては、本研究の結論および今後の課題を明らかにする。

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

氏名 小川 知行 印

(2007年10月 現在)

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
○論文	<p>“Design Estimation of the Hybrid Power Source Railway Vehicle based on the Multiobjective Optimization by the Dynamic Programming” IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering Vol. 3 (2008), No. 1, Jan. 2008 (掲載決定) <u>Tomoyuki Ogawa</u>, Hiroaki Yoshihara, Shinji Wakao, Keiichiro Kondo, Minoru Kondo</p>
○論文	<p>「鉄道車両への導入を想定したハイブリッド電源システムの多目的最適化設計」 電気学会論文誌D Vol. 126 (2006), No. 12 pp.1690-1698, 2006年12月 <u>小川知行</u>, 若尾真治, 近藤圭一郎</p>
○論文	<p>鉄道車両駆動用インバータにおける直流側電流の側帯高調波の理論解析 電気学会論文誌D Vol. 126 (2006), No. 7 pp.1049-1057, 2006年7月 <u>小川知行</u>, 若尾真治, Jat Taufiq, 近藤圭一郎, 寺内伸雄</p>
講演	<p>“A Theoretical Calculation Method of the Return Current Harmonics caused by the PWM Converters of AC EMU” The Third International Conference on Railway Traction Systems, Nov. 2007 (accepted 発表予定) <u>Tomoyuki Ogawa</u>, Yoshio Son, Shinji Wakao, Tamio Okutani, Satoru Hatsukade, Tomoki Watanabe, Syuetsu Kojima</p>
講演	<p>“Theoretical analysis of cancellation of DC-link current harmonics in the inverter-controlled DC electric railcar” 12th European Conference on Power Electronics and Applications 420, Sep. 2007 <u>Tomoyuki Ogawa</u>, Shinji Wakao, Jat Taufiq, Keiichiro Kondo, Nobuo Terauchi</p>
講演	<p>“Energy Consumption Analysis of FC-EDLC Hybrid Railway Vehicle by Dynamic Programming” 12th European Conference on Power Electronics and Applications 498, Sep. 2007 <u>Tomoyuki Ogawa</u>, Hiroaki Yoshihara, Shinji Wakao, Keiichiro Kondo, Minoru Kondo</p>
講演	<p>「動的計画法を用いた多目的最適化によるハイブリッド電源鉄道車両の設計評価手法」 平成19年電気学会産業応用部門大会 No. 3-36 2007年8月 <u>小川知行</u>, 吉原博昭, 若尾真治, 近藤圭一郎, 近藤稔</p>
講演	<p>「動的計画法によるディーゼルハイブリッド鉄道車両の燃料消費量特性」 電気学会交通・電気鉄道／リニアドライブ合同研究会 TER-07-27/LD-07-23 2007年7月 吉原博昭, <u>小川知行</u>, 若尾真治, 近藤圭一郎, 近藤稔</p>

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
講演	「新幹線高架橋での電磁誘導測定試験と解析」 電気学会交通・電気鉄道／リニアドライブ合同研究会 TER-07-26/LD-07-22 2007年7月 孫佳男, <u>小川知行</u> , 若尾真治, 奥谷民雄, 中村信幸, 寺田夏樹, 館裕, 稲田聡
講演	「交流鉄道車両用コンバータによる帰線電流高調波の理論計算手法の検討」 電気学会交通・電気鉄道研究会 TER-07-20 2007年5月 <u>小川知行</u> , 若尾真治, 奥谷民雄, 廿日出悟, 渡邊朝紀
講演	「動的計画法を用いたハイブリッド電源鉄道車両の消費エネルギー削減効果に関する検討」 平成19年電気学会全国大会 No. 5-156 2007年3月 <u>小川知行</u> , 吉原博昭, 若尾真治, 近藤圭一郎, 近藤稔
講演	「ハイブリッド電源鉄道車両における動的計画法を用いた最適電力制御法の検討」 電気学会交通・電気鉄道／フィジカルセンサ合同研究会 TER-07-3/PHS-07-3 2007年2月 <u>小川知行</u> , 吉原博昭, 若尾真治, 近藤圭一郎, 近藤稔
講演	“A Multiobjective Optimal Design of a Hybrid Power Source Railway Vehicle” The 2006 International Conference on Electrical Machines and Systems DSIF3-09, Nov. 2006 <u>T Ogawa</u> , H Yoshihara, S Wakao, K Kondo
講演	「高架橋の電磁遮蔽効果を考慮した誘導予測計算法の提案(2)」 電気学会交通・電気鉄道／ITS合同研究会 TER-06-87/ITS-06-44 2006年11月 三枝雄一郎, <u>小川知行</u> , 孫佳男, 若尾真治, 奥谷民雄, 中村信幸, 寺田夏樹, 館裕, 稲田聡
講演	「高架橋の電磁遮蔽効果を考慮した誘導予測計算法の提案」 電気学会交通・電気鉄道研究会 TER-06-72 2006年9月 <u>小川知行</u> , 三枝雄一郎, 若尾真治, 奥谷民雄, 中村信幸, 寺田夏樹, 館裕, 稲田聡
講演	「燃料電池ハイブリッド電源鉄道車両における多目的最適化手法を用いた所要時間短縮効果と消費電力量削減効果の検討」 平成18年電気学会産業応用部門大会 No. 3-63 2006年8月 <u>小川知行</u> , 吉原博昭, 若尾真治, 近藤圭一郎
講演	「ハイブリッド鉄道車両による所要時間短縮効果と消費電力量低減効果のトレードオフ関係に関する検討」 電気学会交通・電気鉄道／リニアドライブ合同研究会 TER-06-56/LD-06-34 2006年7月 吉原博昭, <u>小川知行</u> , 若尾真治, 近藤圭一郎

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
講演	「ディーゼルハイブリッド鉄道車両による加速性能向上効果の検討」 平成 18 年電気学会全国大会 No. 5-158 2006 年 3 月 吉原博昭, <u>小川知行</u> , 若尾真治, 近藤圭一郎
講演	「燃料電池ハイブリッド電源鉄道車両の多目的最適設計手法の提案」 電気学会交通・電気鉄道／半導体電力変換合同研究会 TER-06-29/SPC-06-76 2006 年 3 月 <u>小川知行</u> , 若尾真治, 近藤圭一郎
講演	「燃料電池ハイブリッド鉄道車両導入に向けた機器容量の検討」 電気学会交通・電気鉄道／リニアドライブ合同研究会 TER-05-38/LD-05-41 2005 年 7 月 <u>小川知行</u> , 金子晴郎, 若尾真治, 近藤圭一郎
講演	「鉄道車両駆動用インバータにおける直流側電流の側帯高調波の理論解析」 電気学会半導体電力変換／産業電力電気応用合同研究会 SPC-05-55/IEA-05-10 2005 年 6 月 <u>小川知行</u> , 若尾真治, Jat Taufiq, 近藤圭一郎, 寺内伸雄
講演	「インバータ直流側電流の側帯高調波の理論解析」 平成 17 年電気学会全国大会 No. 5-170 2005 年 3 月 <u>小川知行</u> , 若尾真治, Jat Taufiq, 近藤圭一郎, 寺内伸雄
講演	“Theoretical analysis of return current harmonics in the inverter-controlled DC electric railcar” 2004 35th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference pp.711-716, Jun. 2004 <u>T Ogawa</u> , S Wakao, K Kondo, N Terauchi
講演	「鉄道車両駆動用インバータにおける直流側電流高調波の理論解析」 電気学会半導体電力変換／産業電力電気応用合同研究会 SPC-04-100/IEA-04-27 2004 年 6 月 <u>小川知行</u> , 若尾真治, 近藤圭一郎, 寺内伸雄
講演	「シミュレーションによる直流インバータ車の帰線電流高調波の検討」 電気学会交通・電気鉄道／リニアドライブ合同研究会 TER-03-47/LD-03-72 2003 年 7 月 <u>小川知行</u> , 若尾真治, 近藤圭一郎