

最近の鉄道車両駆動システムに関する研究動向

山本 貴光*

The Trends of Recent Researches on Main Circuit and Traction System for Railway Vehicles

Takamitsu YAMAMOTO

The progress of electrical railway vehicles traction system has been made mainly in the field of main electric circuit, the system has been developed to AVAF (Adjustable Voltage Adjustable Frequency) inverter method from the resistor control method via the field added excitation control method. On the other hand, in the 2000s, the study of battery technology applied to railway vehicles as the energy saving technology has started. This report introduces what kinds of researches and developments have been carried out relating to this progress and the trends of the recent researches on the main circuit and traction system for railway vehicles.

キーワード：インバータ装置，主電動機，誘導障害低減手法，歯車装置低騒音化，バッテリー容量減少推定法

1. はじめに

電気車駆動システムの進歩は主に主回路方式においてなされ、抵抗制御方式からチョップ制御、添加励磁制御を経て、VVVF インバータ+誘導電動機を採用した方式に発展してきた。VVVF インバータに使用される素子においてもサイリスタから GTO 素子、GTR、IGBT を経て、最近では SiC が使われるようになってきており、スイッチング周波数上昇による制御性の向上や効率向上が図られてきている。

一方で、省エネルギーに対する関心が高まり、2000 年頃から回生電力有効利用の研究が進められ、そのアイテムの一つとしてバッテリー適用技術についての研究が始まった。

これらの進歩において主電動機も直流電動機から交流電動機に変化を遂げ、ブラシが不要なかご型誘導電動機、更には励磁電流が不要で高効率な永久磁石同期電動機の開発へと進化を遂げてきた。この過程においてどのような研究開発が行われきたか、さらに最近の研究開発の話題について以下に記述する。

2. 鉄道総研における鉄道車両駆動システムに関するこれまでの研究テーマ

鉄道総研がこれまでに実施してきた鉄道車両駆動システムに関する研究対象のシステムと、主な研究テーマの一覧を表 1 に示す。これらの研究テーマを大きく、インバータ装置、主電動機、ハイブリッド車両、その他に分類してその動向について紹介する。

表 1 鉄道総研における鉄道車両駆動システムに関するこれまでの主な研究テーマ一覧

対象システム	主な研究テーマ
インバータ装置	空転再粘着制御の向上手法
	鉄道車両主回路からの誘導障害低減手法
	パワー半導体モジュールの熱特性評価
主電動機	永久磁石同期電動機の開発
	全閉式主電動機の開発
	高効率主電動機等の開発
主変圧器	車両用超電導主変圧器
リアクトル	リアクトルの小型・軽量・低損失化
歯車装置	歯車装置の騒音・振動対策
ハイブリッド車両	鉄道車両用燃料電池システムの開発
	リチウムイオン二次電池の寿命予測法
	汎用ハイブリッド車両走行シミュレータ
エンジン	ディーゼル排ガス低減手法
	振動による状態監視手法

2.1 インバータ装置に関する研究

鉄道車両は固いレールの上を固い車輪で走行するため走行抵抗が低く省エネルギーに貢献しているが、その反面、レール・車輪間の摩擦力が小さく、加速時に空転を発生し易い。この空転に対する研究は抵抗制御+直流電動機の駆動システム時代から取り組まれているが、最近の VVVF インバータ+誘導電動機の組み合わせでは更にきめ細かい制御が可能となってきており、制御性能が向上してきた。本研究の詳細は本号「速度センサレス電車の主電動機電流情報を用いた空転抑制方法」を参照頂きたい。

インバータ装置に使用される素子の変遷に伴い、スイッチング周波数の上昇が図られ、制御性が向上してきた一方で信号設備に対する誘導障害の課題が共通的な話題となってきている。これに対する取組みについては 3.1 節で紹介する。

* 車両制御技術研究部 部長

特集：車両技術

抵抗制御の時代は大きな労力をかけて単位スイッチやカム軸制御部分のメンテナンスを行っていたのに対して、チョップ制御やインバータ制御の時代になると制御装置はメンテナンスフリー化されてきたが、その反面、ある日突然、前兆が無いまま故障が発生する事象が増えてきた。インバータ装置に使用されているパワー半導体モジュールの健全性は比較的測定が容易な電気的特性を指標として評価しても劣化状況を把握することが困難であった。そこで「パワー半導体モジュールの熱特性評価」¹⁾を行うことにより劣化状態の進行状況を評価する研究が進められている。

2.2 主電動機に関する研究

1980年頃からVVVFインバータ+誘導電動機の組合せが採用され始めたが、この頃、永久磁石同期電動機はまだ小型のものしか実用化されておらず、鉄道車両に適用するためには高温環境下で長期間使用可能な特性と、高い磁束密度を実現する必要がある。このような背景の中、1982年にNd-Fe-B（ネオジム-鉄-ボロン）磁石の発明により同方式は急速な進歩を遂げ、大出力化が実現した。鉄道総研では1991年に狭軌在来線を250km/hで走行する高速電車の研究を行い、独立車輪に直接駆動式主電動機を取り付けるシステムとして永久磁石同期電動機の適用を提案した。この小型・高効率であるという特徴は従来の歯車駆動式においても有効であり、発熱が小さく冷却の負担が小さい特徴を生かして全閉構造とすることにより内部の清掃を省力化し、低騒音化も期待できるものとなった²⁾。この結果、近年新製される通勤電車の一部にも永久磁石同期電動機が採用されている。しかし、VVVFインバータ装置と1対1で使用するためコスト高であること、メンテナンス時に強力な磁石に対して注意が必要なこと、などの理由から新製車両においても誘導電動機を採用する事業者は多い。誘導電動機においても低損失材料の適用、固定子巻線の巻数の最適化、新構造回転子の適用などによる「高効率誘導電動機」の開発³⁾を行い、損失低減化を図ることで全閉構造が採用されつつある。

2.3 ハイブリッド車両に関する研究

ハイブリッド車両としてはディーゼルハイブリッド車両、架線バッテリーハイブリッド車両、燃料電池ハイブリッド車両などが実用化あるいは研究対象となっているが、共通する技術としてはエネルギーを車両に貯蔵する媒体を搭載しており、その媒体としてリチウムイオン二次電池が広く採用されていることが挙げられる。このリチウムイオン二次電池は近年、小型・軽量化、長寿命化、低コスト化などが図られてきており、鉄道車両にも採用されつつあるが、使用年数の経過に伴い、劣化していくことが知られている。したがって、設計時において寿命

を考慮する必要があるが、寿命予測法が確立してきたことが採用が増えている重要な要因と考えられる。リチウムイオン二次電池が広く採用されていくに伴い、劣化状況について精度が高い推定手法が期待されており、これに関する研究については3.2節で紹介する。

また、将来のエネルギー持続可能型社会に向けて水素エネルギーを活用する「燃料電池鉄道車両」に関する研究開発も実施しており、鉄道総研ではR291試験電車で100kW級燃料電池とリチウムイオン二次電池のハイブリッド構成で約10年に亘り走行試験を実施してきた。さらに、これらのハイブリッド車両の消費エネルギー削減効果を検証することを目的とした「ハイブリッド車両用走行シミュレータ」の開発も行ってきた。なお、ハイブリッド車両の開発状況については本誌2016年4月号に「ハイブリッド鉄道車両に関する動向と最近の研究開発」⁴⁾に詳しく展望を述べているので参照されたい。

2.4 その他のシステムの研究

交流電車で搭載されているトランスの小型軽量・高効率化を目的として、浮上式鉄道で培った超電導技術の在来鉄道への応用として車両用超電導主変圧器（25kV、4MVA）の開発を行った。実用化に向けては交流損失低減が課題であり、これまでのビスマス系超電導テープ材に代わるイットリウム（Y）系超電導線材の開発など新たな技術が期待される。

リアクトルはインバータ装置を適用した主回路に使用される他、近年のハイブリッド車両で直流-直流変換装置の採用に伴い使用されるようになってきており、この用途に向けて小型・軽量・低損失化が期待されている。これらのリアクトルについては損失発生メカニズムの解明と電磁結合度向上による損失低減について研究開発を行っている⁵⁾。

主電動機的全閉化などによる静音化が進んだ結果、床下からの騒音として歯車装置からの騒音も無視できない状況となってきており、歯車装置の低騒音・軽量・低コスト化に向けて騒音現象の解明について研究開発が行われている。これについては3.3節で紹介する。

ディーゼルエンジンについては排ガスの規制に関する今後の動向が気になるところであり、排ガスを評価するための運転パターンの提案を行った。また、異常を検出する手法として「振動のオクターブバンド分析による状態監視手法」の研究開発⁶⁾を行っている。

3. 鉄道車両駆動システムに関する最近の話題

3.1 誘導障害に関する取り組み

鉄道車両が発する電氣的ノイズが地上の通信設備や信号設備に与える影響を誘導障害と呼ぶ。最近の通信設備

は光ファイバーの採用などにより誘導障害は殆ど無いことから、誘導障害は信号設備への影響を対象として検討されている。

鉄道車両は車種も多く、地上設備も種類が多いため全ての組み合わせで試験・確認することが困難であり、また、近年の直通運転の増加により、状況はさらに複雑になってきている。このような中、JR7社（旅客・貨物）と鉄道総研の信号と車両の担当者では誘導障害に関する情報を交換する「誘導障害に関する信号・車両合同会議」を2008年に発足させている。この会議において、「信号装置開発ガイドラインの制定」や「誘導障害試験手順書の作成」（図1）が行われた。最近の話題としては、「試験の簡素化に関する検討」が行われており、「踏切制御子の直達ノイズ一括測定」や「帰線電流試験の最高試験速度の低減の検討」などへの取り組みがなされている⁷⁾。

誘導障害試験（帰線電流）測定解析手順書（目次） 1.はじめに 2.総則 3.試験要否の判断 4.判定の対象となる信号設備と限度値 5.車両条件 6.試験仮設 7.測定器の要件と推奨品 8.試験 9.測定 10.解析 11.判定方法 12.走行可否の判断
--

図1 帰線電流試験の手順書（目次）

3.2 リチウムイオン二次電池の長期容量減少率推定

リチウムイオン二次電池は他の電気品と異なり、長期使用によって劣化が発生する。したがって、その採用に当たっては、交換頻度や寿命が重要な要素であり、それらを算出するにあたっては容量の減少率を精度良く推定する手法が求められている。鉄道総研ではこれまで温度変化を与えた環境下で4年以上の長期にわたる保管を行ったリチウムイオン二次電池を対象として劣化推定を行い、推定結果と実際の劣化状況との比較評価を行った。

推定手法について以下に示す。まず、カレンダー劣化係数 K_f をアレニウスプロット上で直線に近似するため、式(1)と仮定し、約11カ月による実験結果から a 、 b のパラメータを同定する。本研究ではこの K_f を用いて式(2)による容量減少率 L_f の推定手法を提案した。

$$K_f = \exp\left(a - \frac{b}{273.15 + T_b}\right) \quad (1)$$

$$L_f = \sqrt{\int_0^t K_f^2 dt} \quad (2)$$

ただし、 t = 新製後の保管日数、 T_b = 電池温度 [°C] である。

4年3カ月間における保管劣化状況と式(2)による推定値との比較の例を図2に示す。試験結果の容量減少率が20%程度であるのに対して推定値の誤差は1.3%であった。誤差を拡大する要因は主として50°C以上の高温状態での保管と考えられる。本提案手法は保管温度の変動があっても4年以上の長期保管における容量減少率の推定に使用可能であると考えられる⁸⁾。

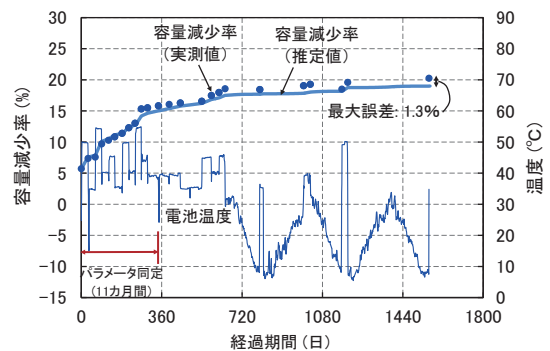


図2 保管劣化試験後の容量減少率評価

3.3 歯車装置騒音現象の解明

新幹線の高速化が進むにつれ、駆動系から発生する振動及び騒音は増加する傾向にあり、その低減対策が求められている。新幹線の各走行条件別に歯車装置からの振動及び騒音発生状況についての実験を行った結果、高速域（300km/h超）では歯車かみ合い振動と近傍騒音の相関性が高くなり、騒音レベルO.Aは速度上昇に伴って高くなることや、240km/h付近の速度域でかみ合い1次振動のピークをもつことなどがこれまでの検討により明らかとなっている。しかし、実際の走行による測定では台車周りに複数の振動及び騒音要因が混在し、特に歯車箱の主要な振動モードに近い1kHz付近では転動音の発生しやすい周波数帯域に近いことから歯車装置単体の音響発生部位を高精度に測定することは困難である。そこで新幹線用歯車装置の回転試験を定置で行い、ビームフォーミング法などにより実歯車装置から発生する振動と騒音の特性解明を行った⁹⁾。ビームフォーミング法とは複数のマイクロフォン（今回は4本）を用いて入射波の到達時間差（位相差）を利用して特定方向の音源を探索する手法である。今回の回転試験では大歯車及び歯車箱の振動伝搬特性の評価等を行っているが、ここではこれらの評価の内、かみ合い振動と近傍騒音の相関と騒音発生部位の探索について報告する。

かみ合いの振動と近傍騒音について高速域（315km/h）で定速回転を行った場合の相関性を全点で平均したもの

特集：車両技術

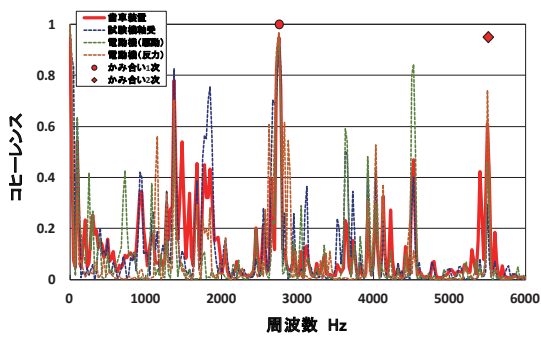


図3 噛み合い振動と近傍騒音との相関の例 (315km/h)

を図3に示す。噛み合い1次周波数 (2800Hz 付近, ●) ではコヒーレンスが0.9以上であり、高い値を示している。また噛み合い2次周波数 (5600Hz 付近, ◆) についても0.8程度の比較的高いコヒーレンスを示した。

騒音発生部位についてはビームフォーミング法により算出した音源中心について図4に示す。力行中においては噛み合い1次振動の音源中心は大歯車軸受近傍付近であるが、だ行中では音源中心が小歯車付近の歯車箱板部の広い範囲に移動し、音のレベルも高くなるという結果が得られた。

4. おわりに

近年の省エネルギー化の推進により鉄道車両に使用される機器の効率化が進められている。また、これまで長い期間に渡って、非電化区間を走行する車両はディーゼルカーが、電化区間のみを走行する車両は電気車が適用されてきたが、近年の車載蓄電技術を応用したバッテリーハイブリッド車両などの実現により、これらの役割分担にも変化がもたらされつつある。さらに、前後振動を抑制して乗り心地を改善する研究や騒音低減化の技術開発も進めつつあり、鉄道車両が環境にマッチした、快適

な交通機関として発展していくことに貢献していきたい。

そして、近年ではかなり成熟したと言われている鉄道車両駆動システムにおいても更なる発展を実現していき、多くの皆様にご利用頂ける鉄道車両の品質を向上し続けることにより、将来に亘って公共交通機関として継続可能な鉄道システムの実現に貢献していきたい。

文献

- 1) 福田典子：高電圧・大電流パワー半導体モジュールの総合的な劣化評価，鉄道総研報告，Vol.27，No.12，pp.41-46，2013
- 2) 近藤 他：永久磁石同期電動機の開発の経緯と技術概要，鉄道車両と技術，No.117，pp.17-23，2006
- 3) 近藤 他：走行シミュレーションによる高効率誘導電動機の消費電力量評価，鉄道総研報告，Vol.27，No.12，pp.47-51，2013
- 4) 山本貴光：ハイブリッド鉄道車両に関する動向と最近の研究開発，鉄道総研報告，Vol.30，No.4，pp.1-4，2016
- 5) 仲村孝行：直流-直流変換機に存在する無負荷損失の解明と電磁結合による低減，電気学会論文誌D，Vol.135，No.3，pp.258-267，2015
- 6) 近藤 他：振動のオクターブバンド分析を用いた車両用ディーゼル機関の異常検知手法，鉄道総研報告，Vol.29，No.9，pp.17-22，2015
- 7) 廿日出悟 他：誘導障害に関する車両・信号合同会議の取り組み，J-rail，S7-5-2，2014
- 8) 田口義晃 他：温度変動環境で保管したリチウムイオン電池の長期的な容量減少率推定結果，第56回電池討論会，2M03 (p.28)，2015
- 9) 笹倉実 他：実験的測定手法を用いた鉄道歯車装置の振動及び騒音現象の解明，Dynamics and Design Conference 2016，OS3-2-5 (334)，2016

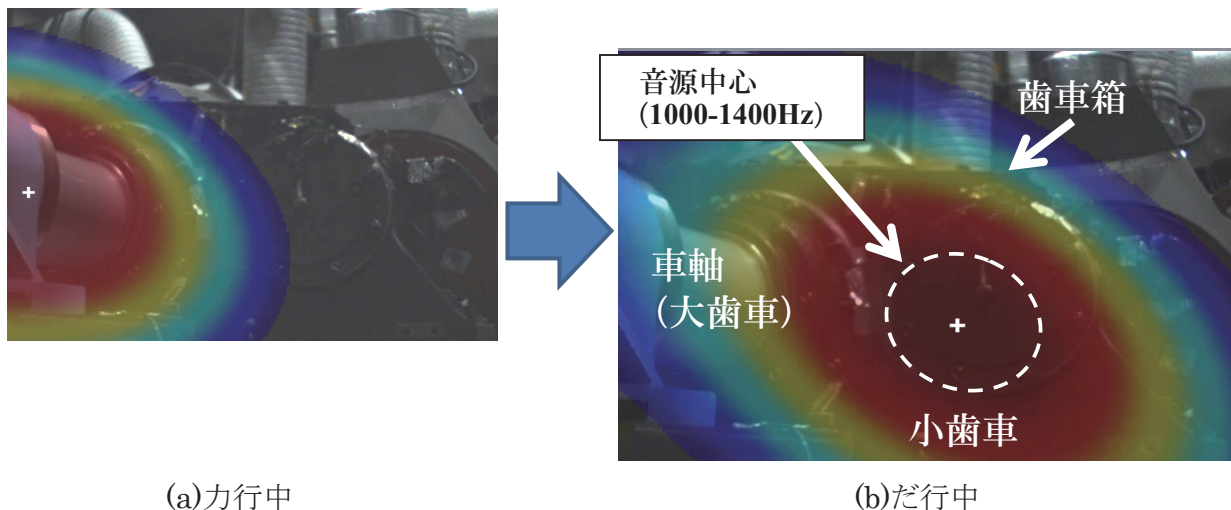


図4 ビームフォーミング法による騒音発生音源評価例 (315km/h)