

車上搭載蓄電池を利用した 駆動システムの省エネルギー化技術

Energy-saving Technology for Railway Traction Systems Using Onboard Batteries

嶋田 基巳

Shimada Motomi

金子 貴志

Kaneko Takashi

宮路 佳浩

Miyaji Yoshihiro

鈴木 啓太

Suzuki Keita

車上搭載蓄電池の応用は、気動車の消費燃料を低減する「シリーズハイブリッド駆動システム」の製品化からスタートし、蓄電池制御の応用で「回生吸収」と「高速域回生拡大」の機能を実現して、電力を有効に活用する「高効率回生システム」の開発へと進んできた。今回、「高速域回生拡大機能」について、実路線で走行試験を実施し、インバータの入力直流部電圧を蓄電池で昇圧することにより、回生電力が最大12.5%（300V昇圧時）向上することを確認した。今後、投資対効果をバランスよく実現し、顧客ニーズに的確に応える省エネルギー技術提案を進め、車上搭載蓄電池応用の普及をめざす。

1. はじめに

日立製作所は、省エネルギーとCO₂削減のため、蓄電池制御技術を適用した鉄道システムの開発を進めている。

車上搭載蓄電池の応用は、非電化路線において気動車の消費燃料を低減する「シリーズハイブリッド駆動システム」の製品化から始まった。実フィールドでデータを積み上げる一方、電車の省エネルギー性向上を実現する「高効率回生システム」を開発し、実路線試験で効果検証を重ねてきた。

ここでは、鉄道向け蓄電池技術の概要と高効率回生システムについて、特にインバータ装置の直流部電圧を蓄電池で昇圧し、回生ブレーキの動作速度域を拡大する高速域回生拡大制御について述べる。

2. 鉄道向け蓄電池技術¹⁾

2.1 ハイブリッド駆動システムの開発

日立製作所は、非電化区間を走行する気動車の燃料消費量低減、有害排出物低減を目的に、2001年から東日本旅客鉄道株式会社と共同でディーゼルエンジンとリチウムイオン電池を組み合わせたシリーズハイブリッド駆動システムの開発を進めてきた（図1参照）。蓄電池搭載により、

従来の液体式気動車では実現できなかった、回生ブレーキ、エンジンのアイドルストップ、エンジンの定回転運転を可能にし、燃料消費量の削減や騒音低減を図った。

2.2 ハイブリッド駆動システムの実用化

東日本旅客鉄道株式会社のキハE200形向けにハイブリッド駆動システムを実用化している。主蓄電池には、ハイブリッド自動車向けに設計された高出力タイプのリチウムイオン電池を採用した。

このキハE200形は、2007年7月に小海線で、ハイブリッド鉄道車両として世界初の営業運転を開始している。また、2010年には、リゾートトレインHB-E300系向けハイブリッド駆動システムを開発した。HB-E300系は、青

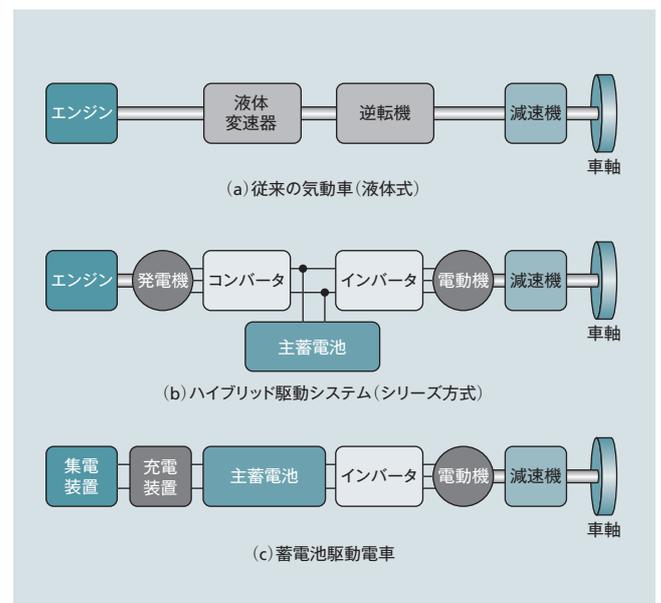


図1 | 非電化線区向け動力システム

ハイブリッド駆動システム、蓄電池駆動電車は、従来の気動車に比べ機械部品を削減し、主要機器の電車との共通化により、メンテナンスの手間を大幅に低減できる。



図2 | リポートレインHB-E300系

キハE200形で実用化したシリーズハイブリッド方式を踏襲した。高出力タイプのリチウムイオン電池 (15.2 kW) を搭載している。

森県 (津軽線, 大湊線), 秋田県 (五能線), 長野県 (篠ノ井線, 大糸線) で運用され, 省エネルギー化や静粛性の向上など環境負荷低減に貢献している (図2参照)。このシステムは, キハE200形で実用化したシリーズハイブリッド方式を踏襲したもので, 補助電源の冗長性確保 (容量増大, 電源誘導への対応), 耐寒・耐雪構造の強化, 力行性能追加など, リポートレインの仕様に対応した。

2.3 蓄電池駆動電車

蓄電池駆動電車は, 車両に大容量の蓄電池を搭載し, 電化区間などであらかじめ蓄電池を充電しておき, 蓄電電力のみで走行, 補機への給電を行うものである。内燃機関が不要となるため, 気動車に対して大幅な省エネルギー化, 環境性向上, 保守の省力化が期待できる。近年, 自動車や産業分野での蓄電池市場の急速な拡大に伴い, 蓄電池の性能 (容量・出力) 向上, コスト低減が進んでおり, 起伏が少なく非電化部分が短い路線向けに蓄電池駆動電車実現の可能性が出てきた。主蓄電池の特性としては出力よりも容量が重要であり, 電気自動車や産業分野向けの高エネルギー密度のリチウムイオン電池が適している。日立製作所はハイブリッド駆動システムで培ったリチウムイオン電池の大容量化, 高電圧化, 制御・監視技術を応用し, 蓄電池駆動電車の早期実用化をめざした開発を進めている。

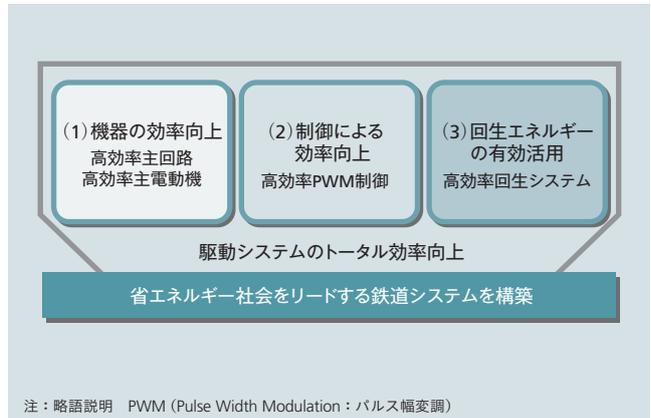
3. 高効率回生システム²⁾

3.1 省エネルギー実現のコンセプト

電車システムでは, 駆動系のトータル効率を向上し, 省エネルギー社会をリードする鉄道システムを構築している (図3参照)。

具体的には次の三つの技術により実現する。

- (1) 機器の効率向上
- (2) 制御による効率向上



注: 略語説明 PWM (Pulse Width Modulation: パルス幅変調)

図3 | 省エネルギー実現のコンセプト

駆動システムのトータル効率向上により, 省エネルギー社会をリードする鉄道システムの構築をめざしている。

(3) 回生エネルギーの有効活用

ここでは, 回生エネルギーの有効活用を実現する「高効率回生システム」の技術について紹介する。

3.2 回生ブレーキの効率向上

回生ブレーキは減速時に駆動用モータを発電機として使用する。発生した回生エネルギーは架線に戻され, 周囲の列車がこれを加速エネルギーとして再利用する。しかし, 閑散時間帯など周囲の列車が少ない時間帯は, 回生エネルギーを消費できない。課題になるのは「軽負荷回生状態」である。このときフィルタコンデンサ電圧の上昇を抑えるため, インバータ装置の軽負荷回生制御によって回生電流を絞る。軽負荷回生制御によりフィルタコンデンサ電圧の上昇は抑えられるが, 回生ブレーキ力は減少する。ブレーキ力の不足分は空気ブレーキで補足できるが, 回生エネルギーは低下する。

走行速度から停止まで必要なブレーキ力をすべて回生ブレーキで負担できれば, 省エネルギー効果は最大となる。しかし, 回生ブレーキ力は高速域でモータ出力特性により制限される。高速域では, 必要ブレーキ力に対して回生ブレーキで負担できない分を空気ブレーキで補うため, 省エネルギー効果は低下する。そのため「モータ特性の性能限界」が課題となる。

高効率回生システムでは, これら二つの課題を次のような方法で解決する。

(1) 軽負荷回生状態の解決策

「回生吸収機能」により, 回生エネルギーを消費する列車がほかにいないとき, その回生エネルギーを蓄電池で吸収して, 加速エネルギーとして再利用する (図4参照)。蓄電池の設置場所としては, 車上に設置する方式と地上に設置する方式の二とおりが考えられる。

(2) モータ特性の性能限界の解決策

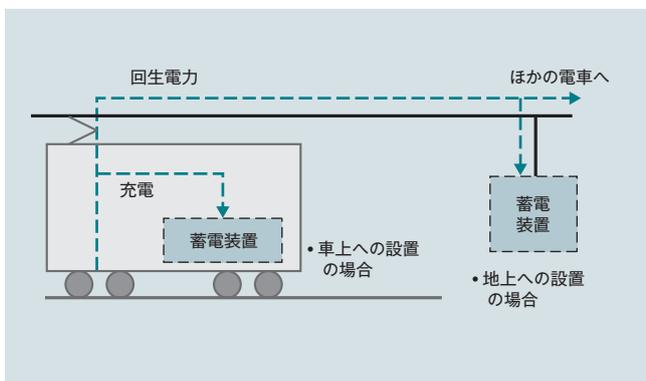


図4 | 回生吸収機能
架線へ戻せない回生電力を蓄電池で吸収する。吸収した回生電力は、次の加速時に再利用することで、インバータ装置の消費電力を低減する。

「高速域回生拡大機能」により、蓄電池でインバータ装置の直流部電圧を昇圧して、各機器を流れる電流量は変えずに電動機やインバータの出力を増強させ、回生ブレーキの動作速度域を高速側に拡大する。すなわち、図5に示すようにV/f(電圧/周波数)終端速度を高速域側へシフト

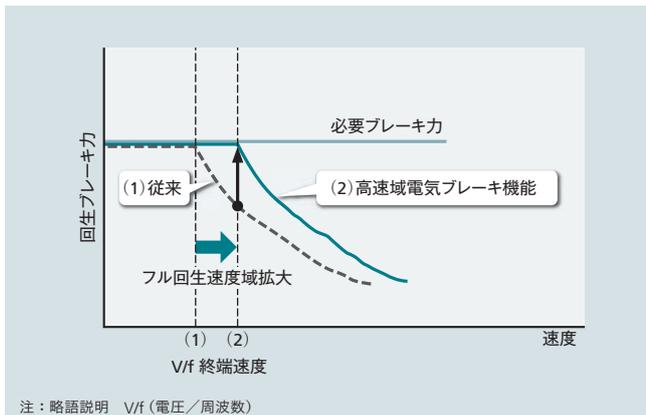


図5 | 回生ブレーキ特性
蓄電池でインバータ装置の直流部電圧を昇圧して、電動機やインバータの出力を増強させ、回生ブレーキの動作速度域を高速側に拡大する。

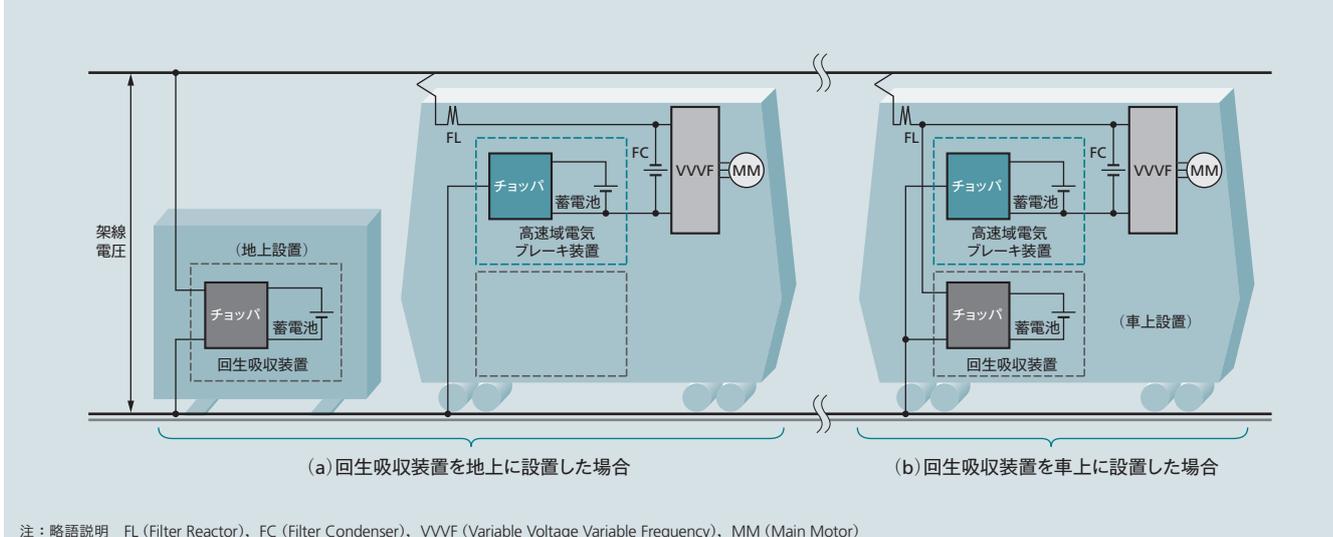


図6 | 高効率回生システムの機器構成
高速域回生拡大機能動作時は、インバータ装置負側入力端子側に蓄電装置を直列挿入し、回生吸収動作時は昇降圧チョップバを介してインバータ装置に蓄電装置を並列挿入する。

させる。
高効率回生システムは、「回生吸収機能」と「高速域回生拡大機能」を適切に動作させて実現する。動作概略の機器イメージを図6に示す。

4. 高速域回生拡大制御³⁾

4.1 概要

高効率回生システムの二つの機能のうち、「回生吸収機能」についてはすでに実路線での走行試験を実施している。

今回、「高速域回生拡大機能」について、実路線で走行試験を実施した。以下に、試験内容とその結果を紹介する。

4.2 原理

鉄道車両における回生ブレーキは、高速域においてモータ出力特性による制約(最大電圧に達した後、制動力は速度の2乗に反比例)を受けて低下する。

そこで、架線電圧で決定されていたインバータの入力直流部電圧を電池電圧で昇圧すると、モータへの印加電圧が上昇し、従来の制約を越えた回生ブレーキの出力が可能となる。高速域回生拡大の動作原理を図7に示す。

4.3 機能実現のための回路構成

システムの回路構成、制御の概略を図8に示す。このシステムでは、接地点とインバータ負側入力端子の間に蓄電池を直列に挿入する。これにより、負側入力端子の電位を接地点電位から電池電圧分(ΔV)だけ下げて、インバータへの印加電圧をΔVだけ加算する。この加算電圧をチョップパで0からΔVまで連続的に変化させて、フィルタコンデンサ電圧を自在に昇圧する。

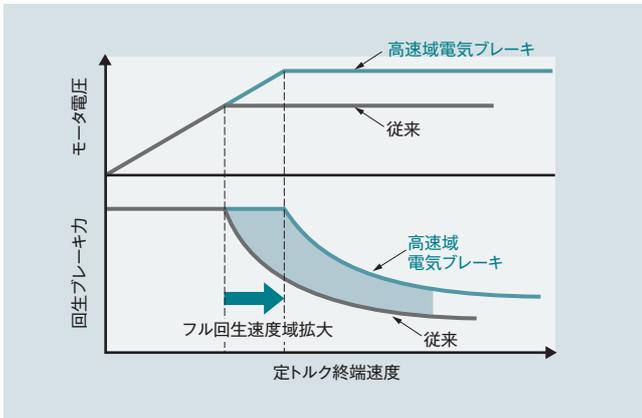


図7 | 高速域回生拡大の動作原理

直流部の電圧を電池電圧により昇圧することで、昇圧量に比例して回生ブレーキパワーが増加するため、フル回生速度域が高速側にシフトする。

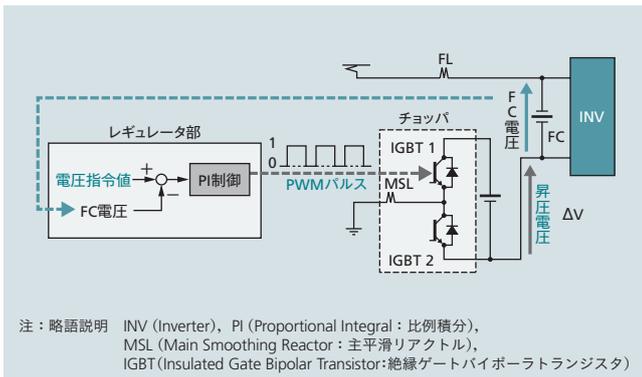


図8 | システムの回路構成、制御を示す概略図

直流電圧部フィルタコンデンサ電圧が電圧指令に追従するように蓄電池加算電圧を調整する。

4.4 試作機によるフィールド試験

東京急行電鉄株式会社5050系車両にこのシステムの試作機を搭載し、田園都市線つくし野駅〜つきみ野駅間において走行試験を実施した。主回路ツナギ図を図9に示す。試作機は、現車搭載の容易さから1C4M×2群VVVF (Variable Voltage Variable Frequency) インバータの2群側にチョッパを接続する構成とした。

蓄電池にはエネルギー密度・出力密度の大きいリチウムイオン二次電池を採用した。蓄電池1モジュール当たりの最大電圧は170Vで、これを2直列接続として最大340Vまで昇圧可能とした(図10参照)。

4.5 走行試験における省エネルギー効果確認

インバータ入力電圧を、昇圧なし1,600Vを基本に1,750V, 1,850V, 1,900Vの3パターンに対し、速度約100km/hから停止までのブレーキ操作による回生電力量の比較を図11に示す。昇圧電圧が高いほど回生有効領域の拡大幅が大きく、回生電力量が増加することを実機確認した。

営業車両への適用に向けて、さらなる機器の小型・軽量化、エネルギー管理制御の高機能化を進めている。

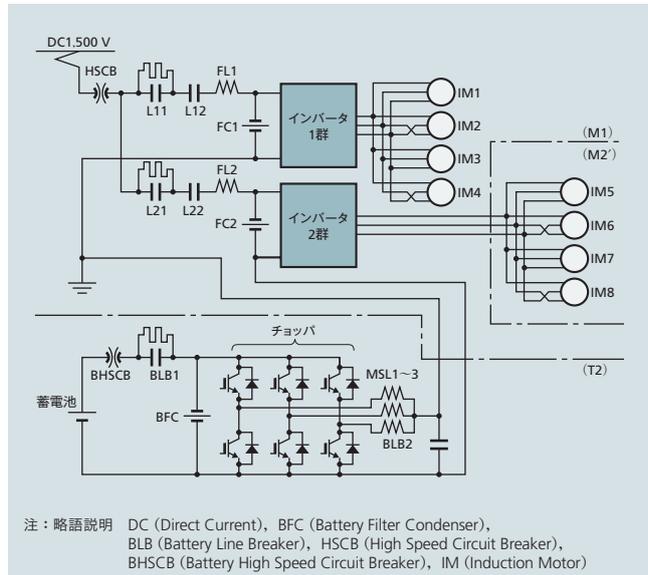


図9 | 主回路ツナギ図

1C4M×2群VVVFインバータの2群側にチョッパを接続し昇圧を可能とした。

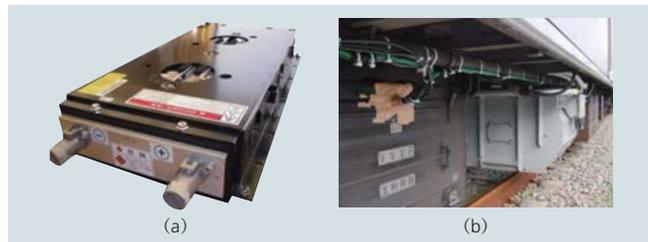


図10 | 高速域回生拡大制御における搭載機器

リチウムイオン電池モジュール(a)を16モジュール搭載した。写真(b)の手前にチョッパ装置、奥にMSL(主平滑リアクトル)を示す。

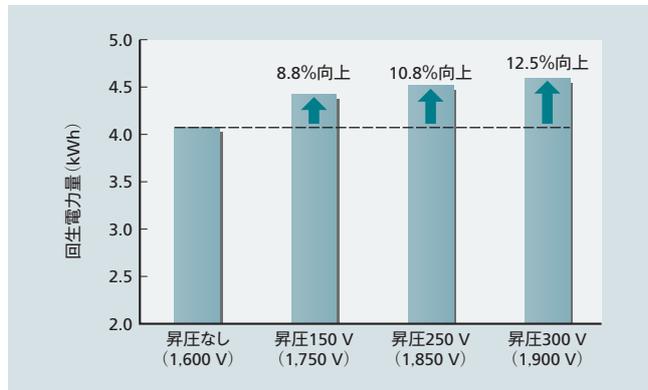


図11 | 昇圧電圧による回生電力量の比較結果

昇圧電圧の増加によってフルに回生ブレーキが動作する速度域が拡大する。今回、同一速度(100km/h)から停止ブレーキ試験により、昇圧電圧が高いほど回生電力量が向上していることを確認した。

5. 蓄電池を利用した省エネルギー技術の将来

実際の電車システムでは、同一き電区間を走行する列車は、架線を介して一つの変電所から電力が供給される。近い将来、すべての列車に蓄電池が搭載されると、1列車の省エネルギー効果だけでなく、蓄電された電力を架線経由によって近隣の列車間で相互に融通するなど、架線ネットワークを活用した車上搭載蓄電池システムの最適化も可能である。

このように、同一き電区間に蓄電池搭載車両が複数走行

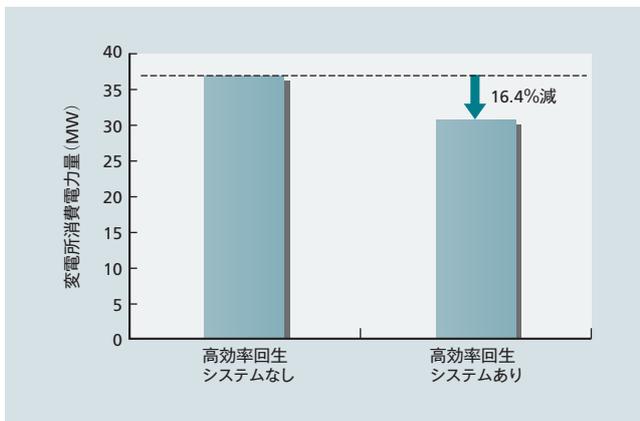


図12 | 高効率回生システム導入時の効果

高効率回生システムを導入することで、導入前に比べて省エネルギー効果が期待できる。

した場合におけるシステム最適化検討も可能とする「鉄道統合評価システム」を開発した。

都市部の通勤路線を想定した車両諸元、平均駅間距離1.7 kmの仮想路線で、高効率回生システムを導入した場合の効果をシミュレーション評価した。

変電所間隔を5 km、5分間隔ダイヤ、全列車各駅停車とした。このときの高効率回生システム導入における効果を図12に示す。従来のインバータ駆動システムに対し、高効率回生システムの導入によって16.4%の省エネルギー効果が得られており、高効率回生システムの導入による省エネルギー効果が確認できる。

6. おわりに

ここでは、鉄道向け蓄電池技術の概要と高効率回生システムについて、特にインバータ装置の高速域回生拡大制御について述べた。

車上搭載蓄電池による省エネルギー化技術は、非電化区間を走行する気動車の消費燃料を低減する「シリーズハイブリッド駆動システム」の製品化から始まった。実フィールドでのデータを積み上げるとともに、電車の省エネルギー性能のさらなる向上をめざし、「高効率回生システム」を開発し、実路線での試験で「回生吸収」、「高速域回生拡大機能」の省エネルギー効果を実証した。今後、投資対効果をバランスよく実現して、顧客ニーズに的確に応える省エネルギー技術提案を進め、車上搭載蓄電池応用の普及を促進する所存である。

参考文献

- 1) 徳山, 外: 環境負荷を低減するハイブリッド駆動システムの実用化, 日立評論, 89, 11, 830~833 (2007.11)
- 2) 嶋田, 外: 電化区間で回生電力を有効利用する省エネルギー蓄電システム, 日立評論, 92, 2, 164~167 (2010.2)
- 3) 真鍋, 外: インバータ電車における高速域での回生ブレーキ有効領域拡大に関する技術開発, 第48回鉄道サイバネ・シンポジウム論文集, 526, 日本鉄道サイバネティクス協議会 (2011)

執筆者紹介



嶋田 基巳

1995年日立製作所入社、交通システム社 水戸交通システム本部 プロセス設計部 所属
現在、鉄道車両駆動制御システムの開発に従事
電気学会会員



宮路 佳浩

1989年日立製作所入社、交通システム社 水戸交通システム本部 車両電気システム設計部 所属
現在、鉄道車両駆動用インバータの設計に従事



金子 貴志

1993年日立製作所入社、交通システム社 水戸交通システム本部 車両電気システム設計部 所属
現在、鉄道車両駆動用インバータの設計に従事



鈴木 啓太

1999年日立製作所入社、交通システム社 水戸交通システム本部 車両電気システム設計部 所属
現在、鉄道車両駆動用インバータの設計に従事