

- 鉄道一般
- 車両
- 施設
- 電気
- 運転・輸送
- 防災
- 環境
- 人間科学
- 浮上式鉄道

エネルギーネットワークによる省エネルギー化



池田 充
Mitsuru Ikeda

前 電力技術研究部 部長
(現 企画室 室長)

[専門分野] 架線・パンタグラフ系の動的相互作用

鉄道のさらなる省エネルギー化(省エネ化)を実現するため、デジタル技術を活用して列車運行、車両、電力供給設備の相互連携を実現する「エネルギーネットワーク」を提唱し、電力制御が可能な新しい電力供給設備を開発するとともに、エネルギーネットワークを活用した各種電力設備の制御手法を提案しました。さらに、各種省エネ技術の導入効果の評価に欠かせないシミュレーション技術の高度化を行いました。これにより、導入対象線区の個別条件をふまえたうえで、どの省エネ技術をどこに配置すれば高い省エネ効果が得られるのか、事前に予測・評価することが可能となりました。

はじめに

地球温暖化は人類に深刻な影響を与えることが予測されるため、温暖化効果ガス、なかでも二酸化炭素の排出量削減が喫緊の課題となっています。二酸化炭素排出量の削減にはエネルギー使用量の削減、すなわち省エネが不可欠です。しかし、鉄道はもともとエネルギー効率の高い輸送機関ですので、鉄道の運行に関わるエネルギー消費量のさらなる削減は難しい課題であり、従来技術の延長・改良ではなく、新しい発想に基づく技術開発が必要です。

そこで鉄道総研では、鉄道の運転エネルギーを10%低減することを目標に、2015年から5年間にわたり研究課題「エネルギーネットワークによる省エネルギー化」に取り組みました。本研究では電気鉄道(☞参照)における省エネ技術に的を絞って、デジタル技術を活用して列車運行、車両、電力供給設備の連携を実現するエネルギーネッ

☞ 電気鉄道

動力源として車両の外部から電力を供給して運転を行う鉄道のことを、電気鉄道といいます。

トワークを提唱し、電力制御が可能な新しい電力供給設備を開発するとともに、エネルギーネットワークを活用した各種電力制御手法を提案しました。さらに各種省エネ技術導入による省エネ効果の評価に欠かせないシミュレーション技術の高度化も行いました。

エネルギーネットワーク

電気鉄道では、車両の走行エネルギーは全て変電所から電車線路を経て車両へと供給されます。このとき、列車群と電力供給設備とは、電力の流れ

に関してひとつの大きなネットワークを形成しています。これは、他の輸送機関と比較したときの電気鉄道の大きな特徴の一つであり、鉄道システム全体としてのエネルギーマネジメントが可能であることを意味します。現状ではそれぞれ独立に行われている電力供給設備の運用と各列車の運行との連携を図ることにより、鉄道のさらなる省エネ化の余地が生まれると考えられます。そこで鉄道総研では、図1に示すエネルギーネットワークの構築を提唱しています。エネルギーネットワーク

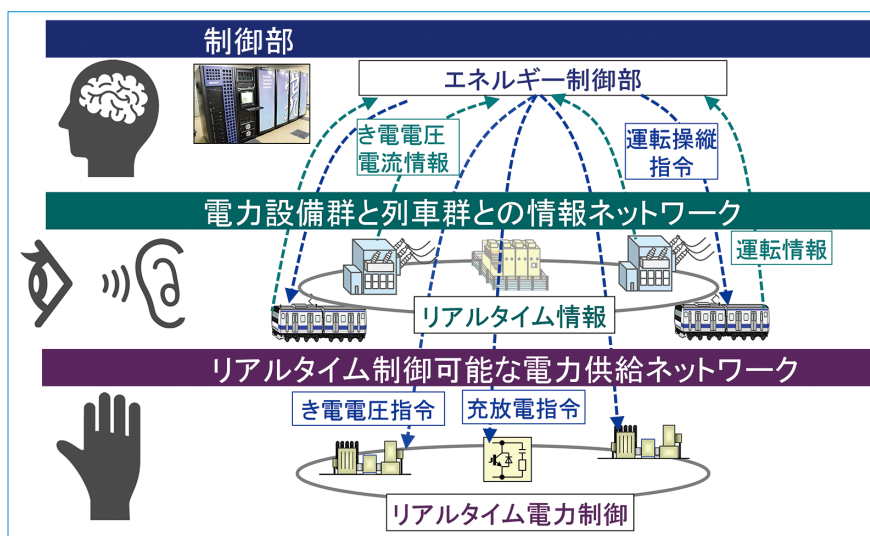


図1 エネルギーネットワーク

は、情報ネットワーク、電力供給ネットワーク、および制御部から構成されます。情報ネットワークは各変電所や各列車の情報をリアルタイムに共有するためのネットワークであり、エネルギーネットワークにおける目や耳の役割を担います。電力供給ネットワークは、電力の流れをリアルタイムに制御可能な電力供給のためのネットワークであり、エネルギーネットワークにおける手や足の役割を担います。そして、情報ネットワークによりもたらされるリアルタイム情報に基づき列車運行と電力の制御を行う制御部は、エネルギーネットワークにおける頭脳の役割を担います。

このうち情報ネットワークについては本号の「情報ネットワークを利用した列車運行」に詳述されているため、ここでは電力供給ネットワークと制御部とについて詳しく紹介します。

電力供給ネットワーク

(1) 高性能整流器

電気鉄道の省エネ化方策の一つは、車両の走行エネルギーを電力回生ブレーキ(☞参照)により回収し、これを別の加速中の車両(力行車)で消費させることです。しかし、直流電化区間では、電力回生ブレーキが動作中の車両(回生車)と力行車との間に変電

☞ 電力回生ブレーキと回生絞込み

電気車はモーターによって駆動力を得ます。このモーターを発電機として用いてブレーキ力を得て、発電した電力を集電装置を介して電車線に戻し、他の列車の加速で消費させるものが電力回生ブレーキです。ただし、回生電力を消費する列車が近くに存在しないと電車線の電圧を大きく上昇させてしまうため、これが一定値を超えないように回生電力の発電量を抑制して車両の機器を保護します。これを回生絞込みといいます。

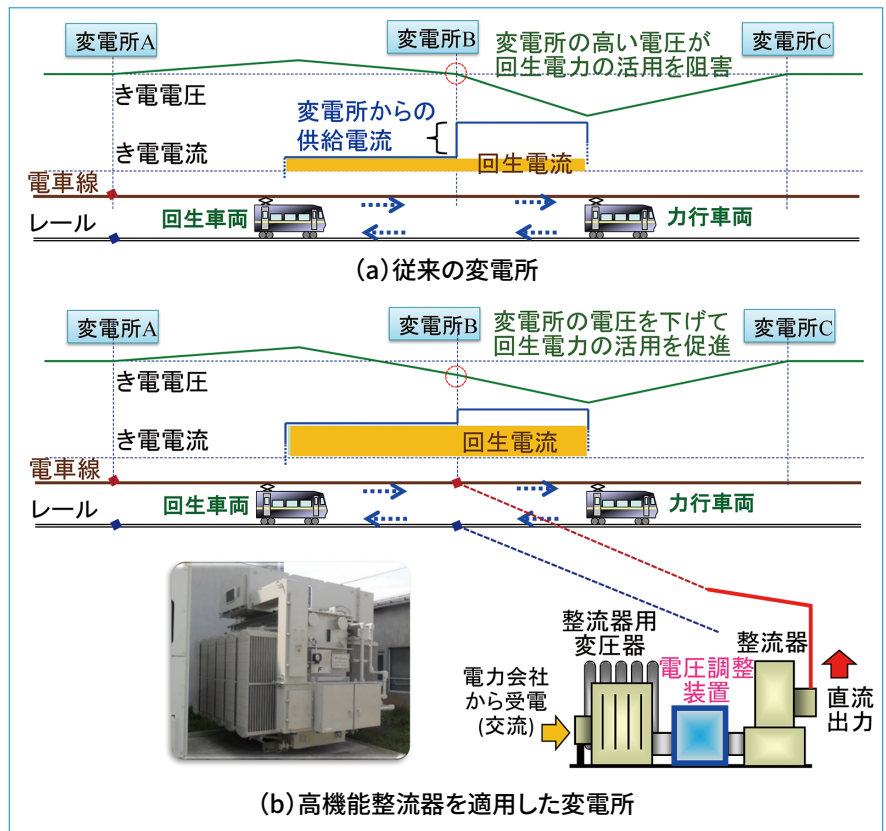


図2 変電所の出力電圧制御が可能な高性能整流器

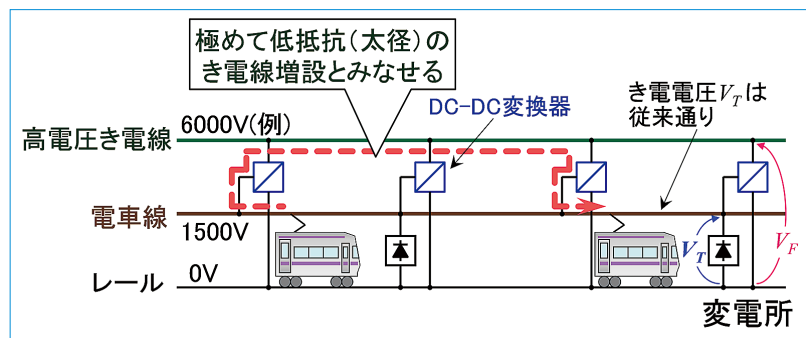


図3 高電圧き電線を有する高電圧き電システム

所があると、回生電力の活用が阻害される場合があります(図2(a))。なぜなら、変電所の高い電圧のために回生車では回生絞込み(☞参照)が動作して、電車線に戻す回生電力を抑制するためです。

この問題を解決するため、変電所の整流器(交流電力から直流電力に変換する装置)と整流器用変圧器との間に特殊なコイルからなる電圧調整装置を挿入して整流器の直流出力電圧を可変とした、高性能整流器¹⁾を開発しました(図2(b))。すでに実用化されている自励式整流器と比べると電力を交流

電源側に戻す機能がないという制約はありますが、出力電圧の制御機能を安価(自励式整流器の約1/5)に実現したことが特徴です。

(2) 高電圧き電システム

電気鉄道におけるもう一つの省エネ化方策は、き電回路における損失(き電損失)の低減です。直流電化区間では電車線電圧が低い(日本では1500V以下)ため、抵抗損が大きいという問題があります。そこで、き電線の電圧を高電圧化して電流を小さくすることにより抵抗損を減らす、高電圧き電システムが提案されています。ただし、

そのために電車線を昇圧すると車両改造が必要となり、膨大なコストと長い移行期間を要するため、現実的な施策とはいえません。

そこで、高電圧き電線を別途設け、電力変換器を介して電車線との間で電力を授受するシステム(図3)について検討しました。このシステムは従来の直流き電回路に対して極めて低抵抗のき電線を増設したことで等価であり、抵抗損の低減のみならず、回生電力をより遠方の列車で活用したり、変電所間隔を拡大して設備を削減する、などが期待できます。そこで、高電圧き電線と電車線の電圧比をほぼ一定に保つように電力変換器を制御する新しい制御手法(DC-AT制御²⁾)を開発しました。

(3) 超電導き電システム

超電導き電システム(図4)³⁾は、高温超電導線材とこれを冷却する液体窒素の流路を一本のケーブルとして構成した超電導き電ケーブル、電流の取り出し口となる端末部、および液体窒素の循環ポンプと冷凍機などからなる電力送電システムです。超電導き電ケーブルの電気抵抗はほぼゼロですので、超電導き電ケーブルと従来のき電線との接続点を疑似的な変電所と見なすことができます(図4左下図)。言い換えれば、き電回路の長さを見かけ上短くすることができ、その分だけ抵抗損を低減できます。さらに、隣接列車との電氣的距離が短くなるため、回生電力を効率よく活用することができます。

鉄道事業者のご協力の下、営業線のき電回路の一部に超電導き電システムを接続し、実車両を走行させて超電導き電ケーブル経由で数千アンペアの電流を車両に供給する試験を実施し、良好な結果を得ています。本システムのケーブル長はいまのところ400m程度ですが、早期にキロメートル級のケーブルを実現して実用化につなげる予定です。

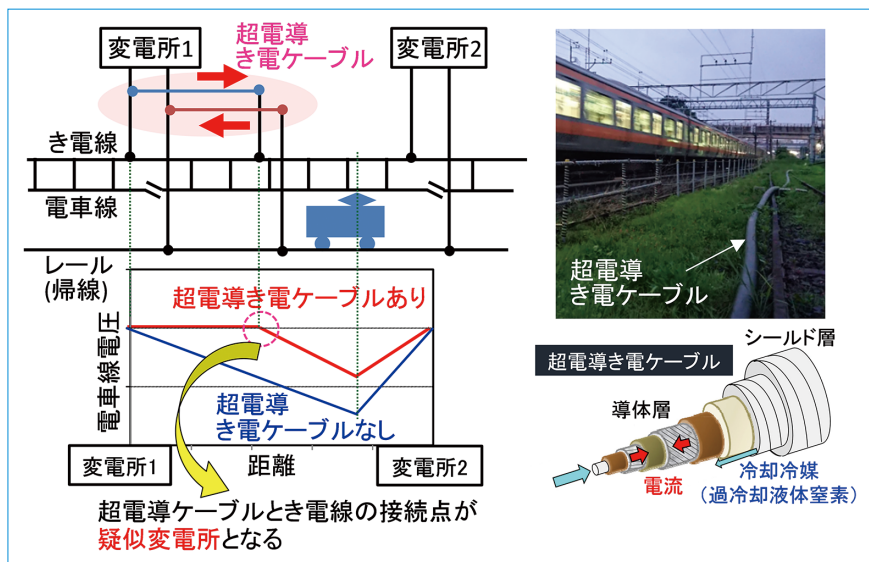


図4 超電導き電システム

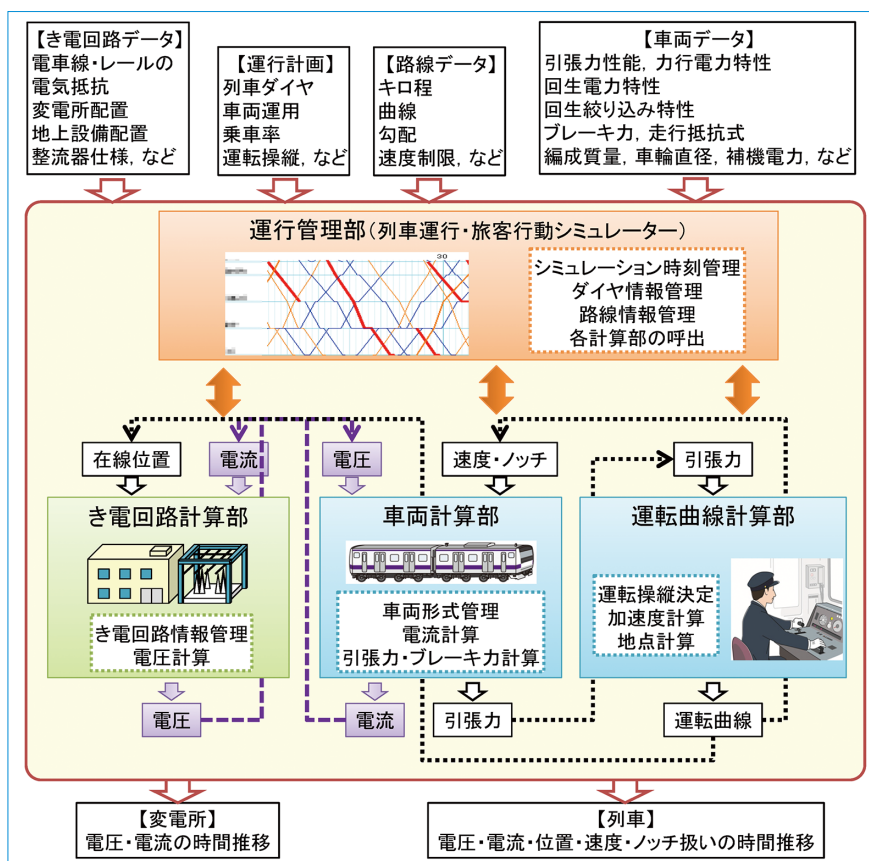


図5 列車運行電力シミュレーター

制御部

エネルギーネットワークの頭脳に相当する制御部は、情報ネットワークによりもたらされるリアルタイム情報をもとに列車運行ならびに電力供給機器の適切な制御を行います(図1)。ただし、もっとも高い省エネ効果を得ることができる省エネ技術とは何か、という

問いに対する一律な答えはありません。なぜなら、同じ省エネ技術を導入したとしても、線区固有の条件や列車ダイヤ、車両条件などによってその省エネ効果には大きな差異が生じるためです。そこで、さまざまな条件下において列車運行による電力消費を正確に評価し、各種省エネ技術の効果を定量的に

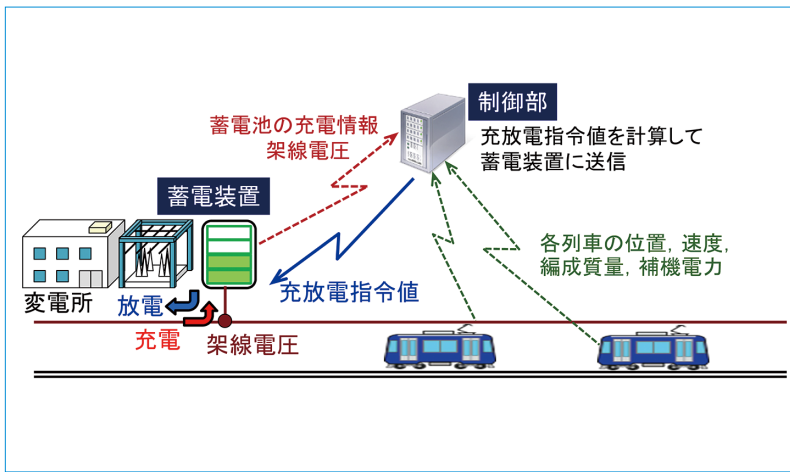


図6 エネルギーネットワークを活用した地上蓄電装置の充放電制御

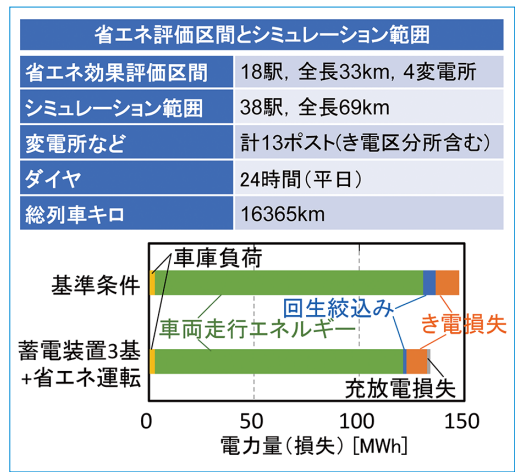


図7 エネルギーネットワークによる省エネ効果の予測例

評価することが重要です。そのプラットフォームとして、列車運行電力シミュレーター⁴⁾を構築しました(図5)。本シミュレーターは、各列車の消費電力や回生電力、各変電所の供給電力を列車ダイヤに応じて評価することができます。

このシミュレーターを活用して、地上蓄電装置の充放電制御手法、高性能整流器の制御手法などを提案しました。地上蓄電装置は、直流き電区間において主として回生電力の回収・再利用を目的に導入されています。現在は蓄電装置と架線との接続点の電圧に応じて蓄電装置の充放電を行う制御が一般的ですが、受電電圧の変動などにより不要な充放電を行う場合があります。そこで、列車の位置や速度などのリアルタイム情報をもとに各列車の力学的エネルギーを計算し、それを基に充放電指令値を決定する制御手法を従来手法と併用する、新しい充放電制御手法⁵⁾を提案しました(図6)。高性能整流器に関しても、列車の運行状況に応じてき電電圧を制御することで回生絞込みによる損失を低減可能な制御アルゴリズムを提案しています。

各種省エネ技術の効果予測例

先述した列車運行電力シミュレーターを用いて、エネルギーネットワークの活用による省エネ効果を予測した

例を紹介します。

図7は、上述した新しい制御方法を適用した地上蓄電装置を3箇所に導入するとともに、各駅間ごとにもっとも省エネとなる運転曲線を設定する省エネ運転を実施したときの省エネ効果を、平日1日分の全列車の電力消費電力を計算することにより評価したものです。この例ではおおむね10%程度の省エネが実現できることがわかります。このうち車両走行エネルギーの低減は省エネ運転の効果であり、回生絞込みによる損失の低減は地上蓄電装置の導入による効果です。このように、各種省エネ技術の導入効果を詳細に評価することにより、線区に適したエネルギーネットワークの構築が実現できます。

おわりに

本研究では、電気鉄道のさらなる省エネ化を実現するため、エネルギーネットワークの構築とその制御手法の提案を行い、省エネ化に対して一定の見通しを得ることができました。しかし、電気鉄道の省エネ化には限界があることもまた事実です。そこで今年度より研究課題「電力ネットワークの電力協調制御による低炭素化」に取り組み、省エネ化をさらに追求するとともに鉄道における再生可能エネルギーの積極的利活用を促進する技術開発を行い、鉄

道の低炭素化の実現を目指します。

なお、本研究の一部は国土交通省の鉄道技術開発費補助金を受けて実施しました。また、超電導き電ケーブルに関わる研究の一部は、(国研) 科学技術振興機構研究成果展開事業「戦略的イノベーション創出推進プログラム(JPMJSV0921)」, 「未来社会創造事業(JPMJMI17A2)」, および(国研) 新エネルギー・産業技術総合開発機構の委託・助成事業を受けて実施しました。**RRR**

文献

- 1) 森田岳, 彦坂知行, 林田広和, 加藤昌史: 整流器用可変リアクトルの設計手法, 鉄道総研報告, Vol.32, No.4, pp.11-16, 2018
- 2) 吉井剣, 石山琢麻, 川原敬治: 高電圧き電システムにおけるDC-DC変換器のDC-AT制御法: 2019年電気学会産業応用部門大会講演論文集, No.5-19, pp.219-222, 2019
- 3) 富田優: 超電導き電ケーブル開発の現状, JREA, Vol.61, No.9, pp.42482-42485, 2018
- 4) 武内陽子, 小川知行, 森本大観, 今村洋一, 美濃部吾吾, 杉本祥一: 列車運行電力シミュレータの開発, 鉄道総研報告, Vol.30, No.8, pp.5-10, 2016
- 5) 齋藤達仁, 生出珠之助, 小川知行, 武内陽子, 森本大観: 列車の力学的エネルギーと架線電圧を用いた地上蓄電装置の充放電制御方式, 2019年電気学会産業応用部門大会講演論文集, No.5-58, pp.353-356, 2019