

路線全体の回生エネルギー有効活用

松村 寧*
葛山利幸*
藤田敬喜**

Effective Usage of Regenerative Power in Traction Power Supply System

Yasushi Matsumura, Toshiyuki Katurayama, Keiki Fujita

要 旨

従来のき電システムは変電所に回生インバータを設置し回生エネルギーの有効利用を行ってきたが、整流器との循環電流に関する制約、新旧車両の回生ブレーキの制御特性の違い等の理由によって、路線全体で見ると必ずしも回生エネルギーを有効に利用できていなかった。

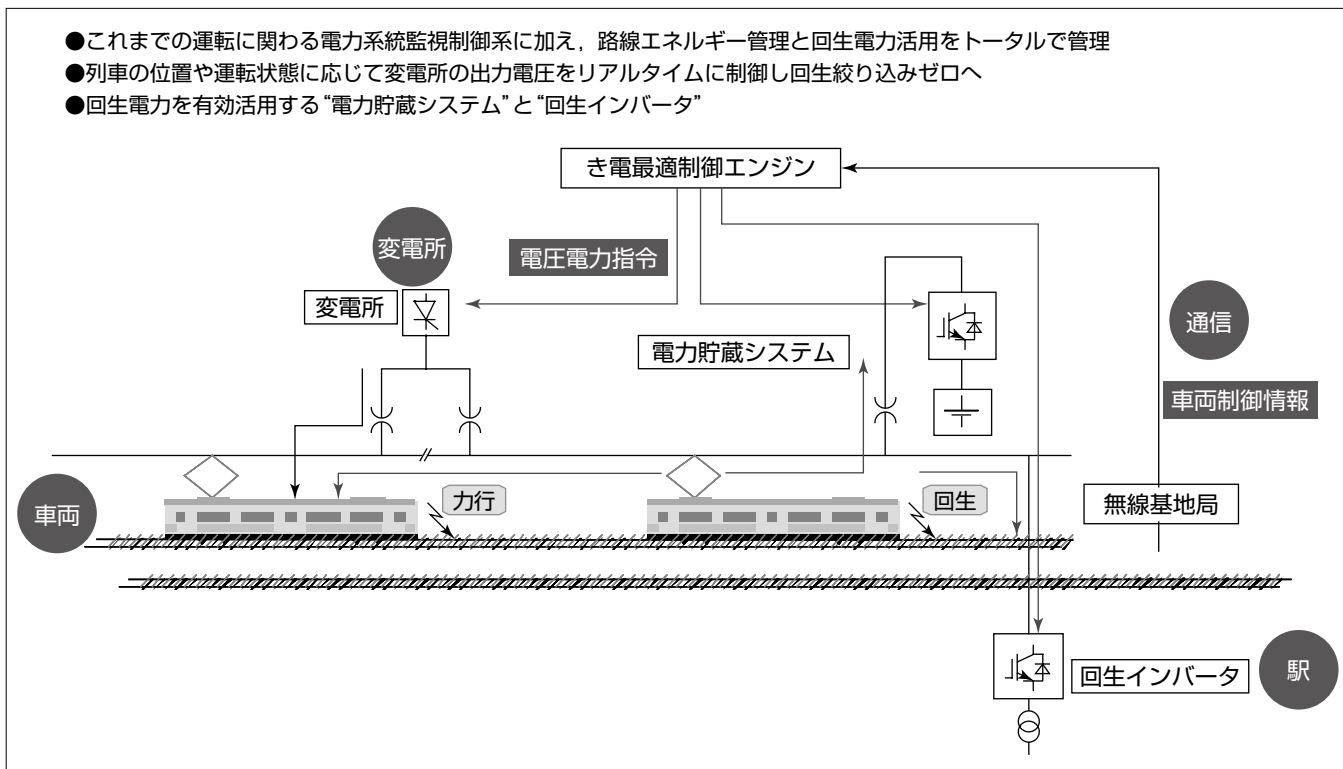
この課題を解決するためには、情報通信技術 (ICT) を活用し、車両の運転状態に基づいて架線電圧を制御することが必要であり、その具体的な取組みとして、“き電最適制御システム (TRaction Energy Control System : TRECS) の開発を進めている。

TRECSとは、三菱電機が考えるき電システム全体で消費するエネルギーを最小化するシステム概念であり、路線エネルギー管理システム (REMS) のうち、列車の運転エネルギーを供給するき電システムにおけるエネルギー最適化・最小化を目指すものである。TRECSでは、車両が消費する電力

の情報を無線ネットワークを通じてリアルタイムに地上に配信し、地上に設けたき電最適制御エンジンが、変電所出力電圧、電力貯蔵システムの充放電量を制御し、地上通信ネットワークによって、車両のパンタ点電圧を決定する。その結果、車両回生絞り込みゼロと送電線ロスの最小化を同時に実現することが可能となる。

本稿では、現状の省エネルギー対策と課題をまず示し、当社が取り組んでいるTRECSを使ったき電システム全体のエネルギー最適化について、さらには制御の中核を担うき電最適制御エンジンについて述べる。次にき電システム最適化に向けたサポートツールである、電力の見える化や電力シミュレーション技術について述べる。最後にTRECSを構成する、駅舎補助電源装置、自励式変換器、電力貯蔵システムといった変電機器、車両から地上へ情報を伝送する地車間連携システムについて述べる。

特集 II



き電最適制御システム (TRECS) への取組み

き電最適制御システムはREMSのき電系統部のエネルギー管理を行うもので、無線ネットワークを通じて車両情報を配信し、地上の管理システムが変電所出力、電力貯蔵システム等を有機的に制御し、路線全体で消費するエネルギーを最小化する。地上管理システムの中心となるのがき電最適制御エンジンで、リアルタイムに変電所の自励式変換器によって出力を制御し、同時に電力貯蔵システム、回生インバータの動作も制御する。

1. ま え が き

地球温暖化に加え、東日本大震災以降のエネルギー問題によって、地球環境保全を図りつつ経済成長を進展させるために、エネルギー需要と供給を見直すことがますます求められるようになってきている。

鉄道事業分野では、車両でのエネルギー管理、駅でのエネルギー管理として各単位での省エネルギーも図られているが、鉄道システム全体でのエネルギー管理による省エネルギー化が求められている。

当社ではエネルギーの管理及び有効活用のために、ICT技術を活用して、き電システムにおける車両回生エネルギーの有効活用に取り組んでいる。

本稿では、現状の省エネルギーの方法、課題を述べるとともに、当社が目指すエネルギーの有効活用のシステム(全体最適化)及び現状の具体的な取組みについて述べる。

2. 現状の省エネルギー対策と課題

2.1 現状の省エネルギー対策

近年の鉄道車両の制御方式はVVVF(Variable Voltage Variable Frequency)インバータ方式を多く採用しており、直流のき電電力を車両内で任意の電圧、周波数に変換し駆動用交流モータに供給することで、車両の走行を制御している。

車両が駅などで停車する場合、通常は電気(回生)ブレーキを使用し、モータを発電機として制動エネルギーを直流変換してき電システムに回生する。

現状の省エネルギー対策としては、変電所における整流器、変圧器等機器単体の高効率化による使用電力の削減が図られてきた。それに加えて車両の回生エネルギー活用として①変電所に設置する電力回生インバータによって回生エネルギーを変電所の空調、付帯設備等の高圧配電システムで消費する方法、②変電所のき電電圧低減による車両間融通の促進等が実施されている例がある。

2.2 現状の省エネルギー対策の課題

現状の省エネルギー対策は上記のように機器個別での対策を中心に行ってきたが、機器単体の取組みでは回生エネルギーを有効活用しきれない課題があり、それについて述べる。

まず車両の回生エネルギーが有効活用しきれない車両回生システムのメカニズムについて簡単に述べる。回生エネルギーを使用する車両がない場合では、回生車両からの回生エネルギーによってき電電圧が上昇し、車両に過電圧などの問題が発生する。このき電電圧の上昇に対し、車両側では一定の電圧値以上に上昇した場合、電気(回生)ブレーキの使用を減少させ(絞り込み)、空気ブレーキを併用することで、き電への回生エネルギーの供給を絞り込んでいる。

(1) 回生絞り込み特性差による絞り込み

車両の回生絞り込み特性は、機器特性に依存するため、

厳密には列車ごとに異なり、同一運用でも同一の回生エネルギー放出とはならない。複数の回生車両が存在する場合は他車両の回生電圧によって一方の車両が回生絞り込みを行うなど、回生エネルギーを効率よくき電システムに変換することができない課題がある。

(2) ダイヤ乱れによる車両間融通の障害

列車の運行は通常一定のダイヤに沿って運用されているが、雨風などの自然条件、旅客集中等によってダイヤの乱れが生じることがある。

ダイヤの乱れによって、車両間の力行、回生のタイミングが乱れ、変電所の電力供給を調整しないかぎり回生エネルギーの融通が低下する課題がある。

(3) 回生電力の交流システムでの逆潮流

電力回生インバータを変電所に設置し、車両回生エネルギーを変電所高配系で使用する方法は、大電力の回生エネルギーの吸収に適しており、効果的であるが、回生車両が重なるなど、高配負荷容量をオーバーする場合は、電力会社からの受電システムへの逆潮流の可能性が生じる。

き電線路には分散的に変電所が設置されているため、1変電所に集中した回生エネルギーの分散、遠方車両間融通が可能となれば逆潮流も減少する。

3. 全体最適化

2章で述べたき電システムにおける現状の省エネルギー対策、及び課題は、機器単体の省エネルギー化を適用してきたが、更なるき電システムの省エネルギー化には全体最適化を行うことが必要となる。全体最適化とは、情報通信ネットワークを使用し、車両の状態、位置等をリアルタイムに地上側で認識し、地車間を連携してき電全体に配置された車両に対して、最適なき電条件を与えることであり、そのために変電所などの電力機器をリアルタイムに制御する必要がある。

当社では上記き電システム全体を最適に制御するシステム概念をき電最適制御システム(TRECS)と称し、各変電所群機器を有機的に制御するアルゴリズムをき電最適制御エンジンと称している。

また、き電最適制御システム(TRECS)を構築するため、既存技術の適合化を図るとともに、個別機器開発、通信技術、ネットワーク技術の応用開発を順次進めている。地車間連携とき電最適制御システムを図1に示す。

き電システムの最適化を行う主要機器・サブシステムとしては、5章で述べる、地車間連携のための地上-車間通信(情報通信ネットワーク)、変電所間ネットワーク、変電所自励式変換器、電力貯蔵システム、駅舎補助電源装置がある。これら主要機器・サブシステムを有機的に制御することで2.2節の課題である車両回生エネルギーの絞り込みを極小化することが可能となり、送電におけるロスも最小化することが可能となる。

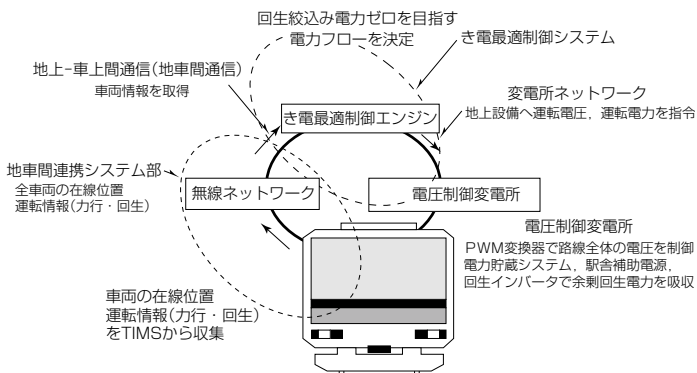


図1. 地車間連携とき電最適制御システム

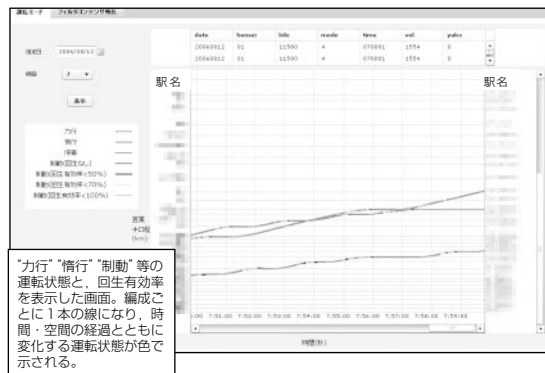


図3. き電電圧の“見える化”例

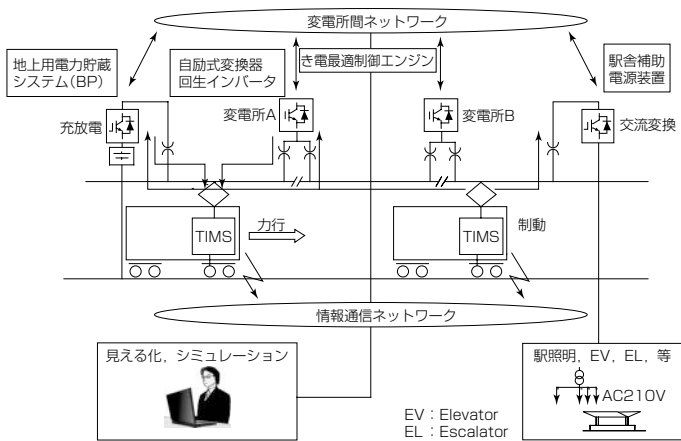


図2. き電システム最適化の構成要素

き電最適制御エンジンは、変電所群内の機器(自励式変換器, 回生インバータ, 電力貯蔵システム等々)を, 車両情報を基に有機的にかつリアルタイムで制御するアルゴリズムである。このアルゴリズムは, 変電所内の機器特性を数式化し, 多変数の数学的な最適化問題に置き換え, き電全体に配置される車両情報に基づき, き電エネルギーの最小化を行うため変電所群の各機器の動作を制御するものとなっている。

また, 全体最適化のためには, 現状のき電状態の把握“見える化”が必要であり, かつあるべき状態を確認・検討するための電力シミュレーションが必要である。き電システム全体最適化の構成要素を図2に示す。

4. “見える化”と電力シミュレーション

現状把握のための“見える化”, き電システムを解析して対策の検討・立案を行うための電力シミュレーションについて次に述べる。

4.1 見える化の取組み

鉄道のき電システムにおける電力フローは, 実際には分かっているようで分からないのが実情である。

車両の力行, 回生状態, 電力の入出力等の状態は, 車両単独では計測可能で, 確認することもできるが, 路線全体の中で, 時刻, 各車両の位置, 他車両と関連付けた状態で

の把握はできていなかった。

き電システムの最適化を行う上で, このき電全体での車両の状態, 電力フローを把握することは重要で, 回生・力行・回生絞り込み等の実態を時刻と位置の二次元で“見える化”することで, 回生絞り込みがいつ・どこで・なぜ発生するかを把握することができる。

当社では, この“見える化”に取り組んでおり, 車両に搭載される車両情報統合管理装置(TIMs)から取得した膨大なデータを環境統合データベースに格納し, 刻々と変化する運転状態やパンタ点電圧(き電電圧)を素早く描画, 一目で見渡すことが可能なシステムを構築している。これによって車両回生エネルギーの状況が“見える化”され, 省エネルギー化の目標が明らかとなるとともに, 対策後の状態も視覚的に確認することができる。“見える化”の例を図3に示す。

4.2 電力シミュレーション

き電の電力シミュレーションは, 従来き電システムの電力フローを解析し, 変電所の整流器, 回生インバータ等の設備容量や地上/車上に置く電力貯蔵システムの最適配置を検討する手段として利用されてきた。

当社では, 従来の電流源モデルの電力シミュレータに対し, VVVF車両, 電力貯蔵システム等電力源として動作する機器に対してもより精度よく解析可能な電力源モデルを開発し, き電システムの解析に取り組んでいる⁽¹⁾。

電力シミュレーションに用いる入力データは, 車両の力行, 回生特性, 運転曲線, 乗車率, 車両質量等の設計値又は仮想データを基にして行うのが通常で, 実際には運転曲線にしても運転によって偏差が生じており, 実情を把握するのが難しい状況にある。

当社では, 車両情報統合管理装置の情報を電力シミュレータに取り込み, 実運用の車両データからき電の電力シミュレーション可能なシミュレータの機能拡張も行っている。

この電力シミュレータは, 3章のき電最適制御エンジンのアルゴリズムとリンクして, き電の電力フローをシミュレーションすることで, 単に現状のき電状態を確認するだけでなく, き電最適制御を行った場合の電力フローの省エネ

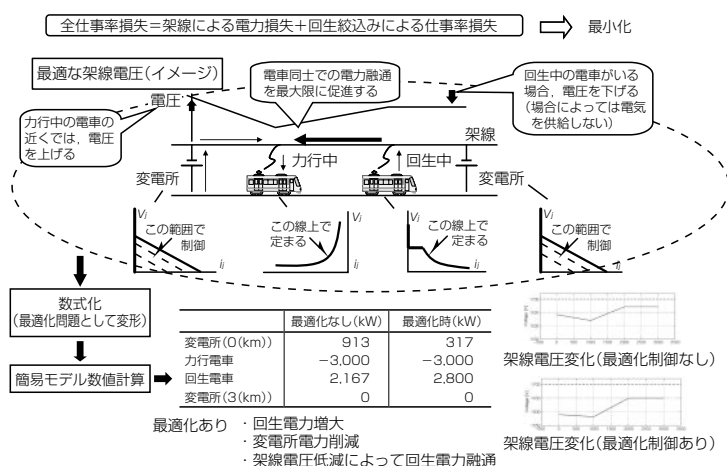


図4. 最適制御による電力削減計算例

ギー効果を確認することが可能であり、図4に一例を示す。

図4のように変電所の出力を、車両状態によって制御することで、き電電力の最小化が可能となることが分かる。

き電最適制御を行うことによって、力行電車の使用エネルギーは同一であるが、変電所出力を低減し、架線電圧を低く抑え、回生電車のエネルギーの融通が増加している。

5. 主な機器, サブシステム

き電システムの最適制御を行うためのキーとなる機器, サブシステムについて次に述べる。

5.1 駅舎補助電源

車両回生エネルギーは駅停止時の回生ブレーキによって発生するものがほとんどであり、発生場所の直近での利用が最も効果的と言える。

駅舎に設置し、駅での車両停止時に発生する直流回生エネルギーの余剰分を、駅舎の交流配電系統へ逆変換して駅舎で使用するためには小型の駅舎補助電源装置がある。

駅舎補助電源装置は車両の補助電源装置(SIV)を応用し、単独運転防止機能など、系統連系に必要な種々の機能を持たせている。

駅舎の低圧系への連系によって、駅舎での負荷容量に合わせて回生エネルギーの余剰分を逆変換するため、小容量(200kVA程度)でも多頻度で回生エネルギーを活用でき、十分省エネルギーに貢献できる。

5.2 自励式変換器

自励式変換器は、整流器出力機能と回生電力吸収機能を併せ持つ変換器であり、力行電圧、回生電圧ともに任意に制御できる特徴を持っている。

自励式変換器によって車両状態に応じてき電電圧を制御して、車両間融通をアシストしたり、さらには整流器出力と回生電力吸収機能の切り換え制御をすることで、車両回生エネルギーを最大限利用することが可能となる。

当社では、自励式変換器の納入実績があるが、更に小型化に向けて取り組んでいる。

5.3 電力貯蔵システム(BP)

自励式変換器は、き電電圧を制御することで、回生エネルギーの活用には非常に有効であるが、回生吸収機能の場合、交流系統へエネルギーを返すため、交流系統の負荷によっては、回生エネルギーを消費しきれない課題がある。

そのために回生エネルギーを交流系統に返すのではなく、蓄電池に一旦貯蔵し、車両の力行時に力行エネルギーとして放出する電力貯蔵システム(BP)がある。

BPは直流き電電圧を蓄電池電圧に変換するチョップ装置(DC-DCコンバータ)とエネルギーを蓄える蓄電池で構成している。

回生エネルギーの電流立上り応答、間欠大電力の充放電に対応する必要から、蓄電池としてはリチウムイオン電池が用いられる。

当社では、蓄電池を充放電制御するチョップ装置を製作しており、き電システムで十分機能することを確認している。

5.4 地車間連携システム

き電システムの最適制御に重要な要素は、車上情報と地上設備との連携であり、その連携を担うのが、車両情報統合管理装置と地上-車上間通信(情報通信ネットワーク)である。

当社では、この特集の論文にもあるように、車両情報統合管理装置(TIM)及び車両情報制御装置(TIS)によって列車全体の制御を行うとともに、各種車両情報を計測して運転支援などを行う技術を持っている。

また、地車間通信でも、アナログ無線からデジタル無線まで技術を持っている。

上記TIM, TISによる車両情報はデジタル無線などによって、地上の基地局に集められ、さらに地上の変換機器などを制御するサーバなどに情報が伝達され、き電最適制御エンジンによって車両状態に連携したき電最適制御が行われる。

6. むすび

鉄道システム全体、特にき電システムの省エネルギー化に対する当社の取組みの一端について述べた。

情報・通信ネットワークの発達によって、き電システム全体での省エネルギー化は、社会全体での省エネルギー化の機運の中ですますます期待されるものであり、継続的な取り組みが必要である。

当社では今後更にシステム開発, 要素開発を着実に進めることで、鉄道システムの省エネルギー化に貢献していく所存である。

参考文献

- (1) 長門秀一, ほか: 電力貯蔵システムを考慮した直流き電回路計算の一考察, 電気学会産業応用部門大会講演論文集, No.3-22 (2010)