

鉄道車両のエネルギー効率を高めるシステム技術

System Technology for Rolling Stock Offering Smart Operation and High Energy Efficiency

鴨 雄史

■KAMO Yushi

鉄道システムにおける省エネソリューションは、機器そのものの高効率化とともに、各機器やサブシステム間を接続して、相乗効果でエネルギー消費を削減する取組みが行われている。鉄道車両のエネルギー マネジメント システム (EMS: Energy Management System) につながる各種方式が階層的に構成されている。今後、最適運転パターンによる自動運転や運転支援による省エネ車両システムが走り始める。

Energy-saving approaches to railway systems are being offered not only through the development of high-efficiency equipment, but also the reduction of total energy consumption by the integrated optimal operation of each item of equipment and subsystem.

In order to realize smart operation and high efficiency of rolling stock systems, Toshiba has been developing a rolling stock energy management system (EMS) based on collaboration between equipment installed in the rolling stock and the railway system. We are also engaged in the research and development of practical applications including an automatic train operation (ATO) system using the optimal operation pattern, and an energy-saving rolling stock system based on operation supported by the rolling stock EMS and feedback from the railway system.

1 まえがき

鉄道システムは、旅客や貨物を安全確実に輸送することが使命であり、その実現に向けて多くの技術開発や複合的システムの構築がなされている。以前から鉄道システムは、飛行機や自動車に比べてエネルギー効率の高い輸送システムとして位置づけられてきたが、より高効率で省エネ性に優れたシステムの開発は続けられている。

また、近年、地球温暖化抑制のための温室効果ガス排出削減や、東日本大震災をきっかけとした電力安定供給のためのリスク対応及び電力コストの増加に伴い、よりエネルギー効率の高い鉄道システムの運用が重要課題となっている。各種サブシステムや機器ごとの高効率化の努力は当然としても、車両内のサブシステム間連携や鉄道システムでの連携によるエネルギー効率を向上させるソリューションが必要になっている。

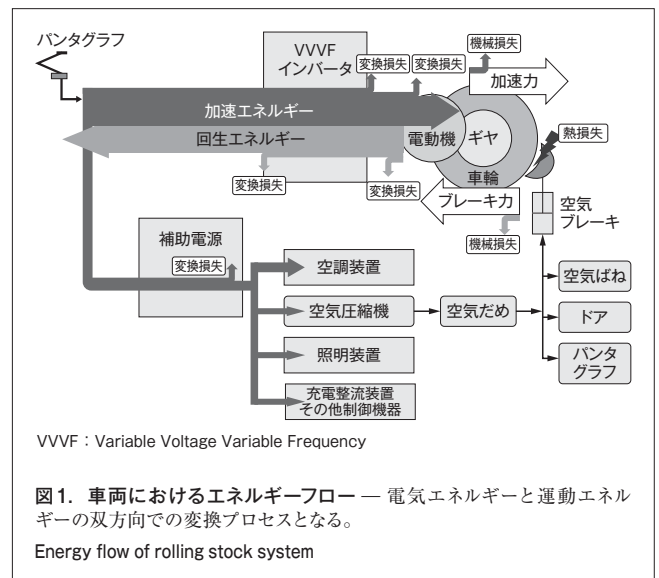
2 車両におけるエネルギーフロー

2.1 エネルギーフロー

電気鉄道車両を例に、概略のエネルギーフローを図1に示す。電気エネルギーと運動エネルギーを双方向で変換するプロセスが含まれている。

2.2 エネルギー消費の内訳

エネルギーフローに出てくるエネルギー消費の内訳を、駆動系システムと補機系システムに分けて示すと図2のようになる。両者の割合は、対象の車種によって大きく変動するため定性

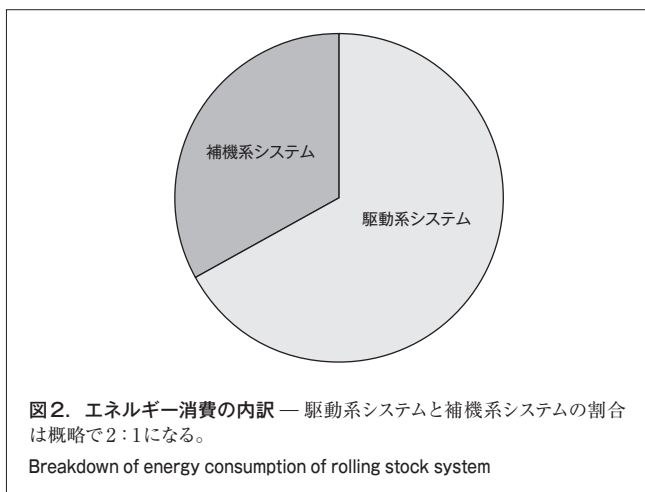


的な表現としたが、相対的な関係は大きく変わらないと考える。駆動系が大きな割合を占めるため、その消費量を低減することが全体的には効果的である。ただ、そのためには、駆動系を構成する機器自体の効率アップだけでなく、サブシステムどうしを連携させるソリューションを考える必要がある。

3 駆動系システムに対する省エネソリューション

3.1 駆動系システム自体の高効率化

駆動系システムでは、インバータによる交流電動機駆動方式



が主流になって久しいが、東芝は、より高い効率を目指して、永久磁石同期電動機 (PMSM: Permanent Magnet Synchronous Motor) による駆動方式をいち早く製品化した。効率を比較すると、従来の誘導電動機の91%に対し、PMSMでは97%を実現した。これにより、加速時は少ない電力で駆動し、減速時はより多くの回生電力を発生させることができる。また、低損失化によって全密閉方式の主電動機にすることができ、省メンテナンス性も実現している。

3.2 回生ブレーキの最大活用

列車の編成では、駆動システムを搭載している電動車 (M車) と搭載していない付随車 (T車) が連結されている。列車を安全に停止させるため、全車に空気ブレーキシステムが搭載されているが、電動機の発電動作によるブレーキ作用を利用して架線側に電力を返す回生ブレーキを用い、できるだけ空気ブレーキを使用しないように工夫されている。

回生ブレーキは、初期においてはM車自身のブレーキ分だけを負担していたが、近年ではT車分も負担できるようになった。TCMS (Train Control and Monitoring System) を活用し、編成全体で必要なブレーキ力を複数の駆動システムに分担させ、できるだけ回生ブレーキで止める編成ブレーキ力制御が確立している。現在では高速域の運動エネルギーの吸収を全て回生ブレーキで賄うことができないため、空気ブレーキを補助的に使用しており、その分が発熱によるエネルギーロスを発生させている。しかし、パワー素子の大容量化や低ロス化で、それも解消することになると考えられる。

3.3 回生エネルギーの吸収と再利用

回生ブレーキの能力が向上しても、それを消費する負荷がないと結局は架線電圧を上げてしまい、保護動作により空気ブレーキに切り替わってしまう。したがって、回生エネルギーの吸収手段がないと、回生ブレーキを十分に活用できない。通常は、同一き電区間内に加速している他の列車 (負荷車) が存在することが多く、回生エネルギーをその列車で有効に再

利用できることで省エネとなる。しかし、運用によっては負荷車がなく、回生率が思うように上がらない可能性がある。現在では、そのような状況においては事前にシミュレーションを行って実効回生率を求め、その有効性を検証してから導入している。一方、従来から回生失効対策として発電抵抗器を搭載しエネルギーを消費させる方式があるが、これでは省エネにはならない。

ここでは、もっと積極的に回生エネルギーを吸収し、再利用する方策について述べる。

3.3.1 電力吸収用蓄電装置の搭載

電気二重層キャパシタやバッテリーを車両に搭載して回生エネルギーを吸収させ、加速時に再利用する。鉄道車両の駆動エネルギーは非常に大きく、それを吸収できる蓄電装置は、その外形重量、コストの面で、発展途上にある。しかし、入換用ハイブリッド機関車では既に実用化しており、今後の発展に期待が高まっている。

3.3.2 地上用電力吸収設備

車両側で吸収するのではなく、地上の変電設備や駅設備に蓄電装置を配置し、エネルギーの吸収を行う方式である。また、回生エネルギーを電力会社に返す回生インバータ装置を設置する案もある。長い下り勾配で回生失効が許されない区間には、回生インバータ装置が導入されている例がある。これらは、鉄道システム全体のエネルギー マネジメント システム (EMS: Energy Management System) として構成されることになる。

4 補機系システムに対する省エネソリューション

補機系システムは、主に補助電源の負荷機器が該当し、それらの高効率化や運転効率向上が必要になる。電力消費量の大きい順に、空調装置、空気圧縮機、照明装置、及び制御機器などが挙げられる。

4.1 空調装置

冷凍サイクル自体の効率や温度制御性によって消費電力が影響される。また、営業運転以外の動作をセーブし、むだな運転をなくす工夫が必要になる。これらは、手動で実施されていたが、ダイヤ情報を元にサービス機器の自動運転を行うことで、省エネに寄与させることができる。また、空調負荷は車体の断熱性にも大きく影響されるため、断熱性の高い車体設計が求められる。更に、停車時の扉開閉の影響も大きく、半自動開閉など、利用者の理解を得たうえで、時間帯で運用を変えるなどの配慮が必要になる。

4.2 空気圧縮機

この装置は鉄道車両の空気供給源であり、これによって空気ブレーキや、空気ばね、空気式ドア、パンタグラフ回路などに空気が供給されている。前述の回生ブレーキの活用において、空気ブレーキの使用頻度が低くなれば空気圧縮機の稼働

率が下がり、補機系システムの電力消費量が下がることになる。最近では、ドアにも電気式が採用されるようになり、空気の使用量は減る方向にある。小型の車両やLRV (Light Rail Vehicle) では空気を使わない方式も登場している。

4.3 照明装置

既に実用化されているLED (発光ダイオード) 方式の照明により、格段に省エネ化が進んでいる。また、回送時には照明を消している車両が多く、営業運転中でも、日中帯は省エネ施策の一環で消灯して運用する事業者が増えている。

4.4 制御機器

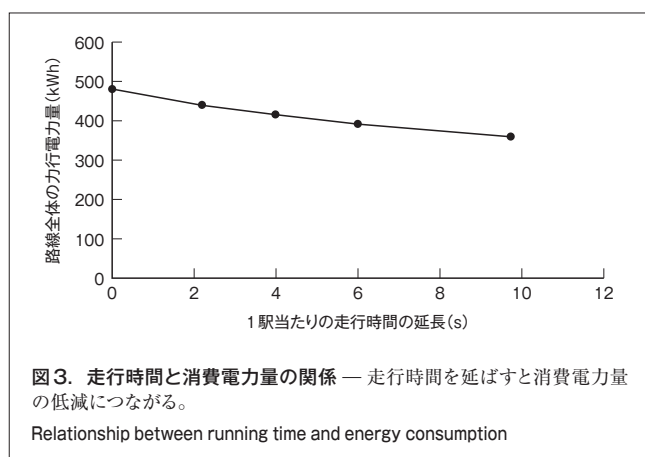
充電整流装置と制御用バッテリーの負荷になる機器を指す。最近の車両は電子化が進み、それ自体の消費電力は少ないが、機器そのものの数量は増加している。ネットワークを活用して省エネで制御するためには、必要不可欠な機器となる。

5 運転方式による省エネソリューション

いままで述べた方式は、そのシステム自体の効率向上と有効活用に焦点を絞っているが、それとは別に、運用時の方式による省エネソリューションがある。つまり、運転パターン の最適化による省エネである。

当社は従来から、省エネ走行パターンに基づく自動運転装置を製品化し、納入している。これらには基本的に、惰行を最大限に活用してむだな加速、減速を抑えるアルゴリズムを適用している。このアルゴリズムを適用すると、図2に示したエネルギー消費量の2/3を占める駆動系システムの運転に直接関係することになる。運転パターンを最適化することで駆動系システムのエネルギー総量を減らすというアプローチである。

鉄道車両を運転する乗務員にとっては、ダイヤを厳守し、絶対に遅延しないことを目標に日々乗務することになるため、どうしてもできるだけ早く到着するように運転操縦する。その反面、走行時間を10秒程度長くすることで比較的大きな電力消費量の低下が見込まれることもあり、検討がなされている(図3)。



したがって、遅延のリスクを回避しながらも、運転時間に適正な余裕を活用して運転支援又は自動運転ができれば、消費電力量の実際の低減につながる。

省エネ運転パターンは、車両性能や路線条件など多くのパラメータによって決定されるが、各鉄道事業者の路線と運用形態ごとに特徴のあるパターンが想定される。理想的には、下り勾配で加速し、上り勾配で減速するのが省エネ効果をもっとも大きくするが、こういう条件はまれであり、シミュレーションツールで決定していくことになる。いままでは、電気エネルギーと運動エネルギーで省エネを議論していたが、路線条件が入ってくると、位置エネルギーも有効活用するという概念が加わる。

6 車両EMSへの要求

車両EMSは、車両全体のエネルギー消費を最適化するシステムであり、主に駆動系システムと補機系システムの効率的な運用を制御し支援する(図4)。

ただし、現実には、システムを一斉に導入できることはまれであり、以下のようなプロセスを経ることになる。

6.1 エネルギー モニタリング (energy monitoring)

従来は、電力会社から変電所の電力量計でグロスの電力量を算定しており、列車単位では注目していなかったが、時代のすう勢から、各列車ごとの電力量を把握しようという鉄道事業者が増加している。駆動制御装置とモニタ装置のインタフェースに電力量のデータが含まれている例もあったが、体系的に採取する仕組みがなかった。

現状は、駆動制御装置の電力量をモニタ装置で積算し、運転状況を記録するとともに記録媒体に書き込む機能が装備されつつある。また、乗務員の運転指導という面から、乗務区間の消費電力量を表示して確認してもらいたい、という要求も出ている。エネルギーの見える化である。

6.2 エネルギーメータ (energy meter)

前述のエネルギー モニタリングとの違いは、専用の電力量計測装置を設置し、正確に記録することを目的としている。これは、欧州など国際列車や上下分離(線路保有会社と車両運用会社が別)のケースで、正確に走行電力量を計測し、電力料金の精算に使用する場合があり、モニタと厳密に区別して呼んでいる。この方式は、従来の車両に搭載されている、マイコンを使用していない駆動制御装置の電力量を計測する場合にも適用できる。

6.3 エネルギーセーブ (energy save)

エネルギーを把握する手段を装備したうえで、各サブシステムを高効率化タイプに変更したり、運転パターンを最適制御して省エネを図る。駆動系システムと補機系システムに対し、運転方式による支援機能を実現していく。

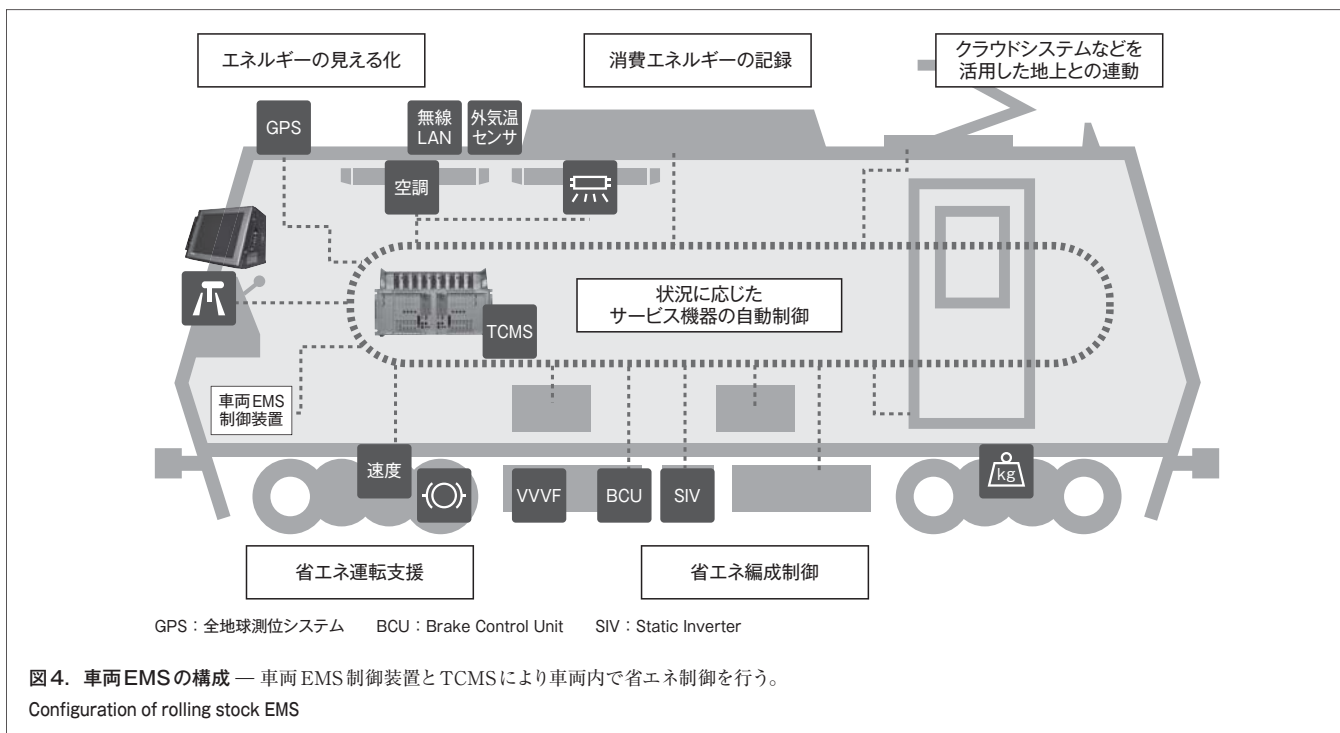


図4. 車両EMSの構成 — 車両EMS制御装置とTCMSにより車両内で省エネ制御を行う。
Configuration of rolling stock EMS

6.4 エネルギー マネジメント (energy management)

車両全体をエネルギーの観点で統括制御する。TCMSと車両EMS制御装置は、無線通信を介して地上のEMSと連携し、システム全体の節電要求や再生負荷状態などによって動作する。

文 献

- (1) 三吉 京 他. “鉄道におけるエネルギー管理と制御 (その2: 省エネ型列車運行制御)”. 平成24年電気学会全国大会. 広島, 2012-03, 電気学会, 5-083.
- (2) 木下裕安 他. 省エネルギー車両を実現するシステム. サイバネティクス, 17, 4, 2012, p.19 - 24.

7 車両EMSの構成

各制御装置と伝送接続し、電力量を監視しながら運転方式を制御していく。各装置との接続はTCMSが統括し、車両EMS制御装置はエネルギー管理に基づき、TCMS又は乗務員支援のための出力を行う。また、地上との無線通信システムを備えており、鉄道システム側の状況をフィードバックしながら、運転支援の内容に反映する。無線通信は、EMSに関する情報以外に、装置の状況を地上に転送し、列車の位置や電力量、及び保守に関する情報などをやり取りして、O&M (Operation and Maintenance) 支援システムとして機能する。

8 あとがき

地球の資源は有限であり、省エネ性能の高いシステムの開発は重要なテーマである。装置やシステム、及び運用それぞれのソリューションによって、省エネが実現する。それらのシステム技術をブラッシュアップして製品化につなげていく。



鴨 雄史 KAMO Yushi

社会インフラシステム社 鉄道・自動車システム事業部 車両システム技術部担当部長。鉄道及び車両情報システムの技術開発に従事。

Railway & Automotive Systems Div.