

省エネ最適車両システムへの取組み

○ 山下 良範 金子 健太 (三菱電機株式会社)

生方 伸幸 深澤 真吾 (東京地下鉄株式会社)

Investigation on energy-saving and ideal system for railroad vehicles

○Yoshinori Yamashita, Kenta Kaneko, (Mitsubishi Electric Co., Ltd)

Nobuyuki Ubukata, Shingo Hukazawa (Tokyo Metro Co., Ltd)

This paper describes investigation on still more energy-saving system for existing vehicles in cooperation. Analyzing power consumption of each vehicle on normal operation, we reduce amount power on powering mode and increase power on regenerative braking mode. Also, we introduce ideal adjustment extends over each electrical equipment on the vehicles.

キーワード：省エネ，回生ブレーキ，軽負荷回生，滑走制御

Key Words：energy-saving, regenerative brake, low load brake control, slip-slide control

1. まえがき

昨今の電力事情を始め、省エネルギー化の動きは益々盛んになっている。鉄道システムは省エネルギーで環境に配慮した交通システムであるが、更なる環境優位性の向上を図っていくことが必要である。

本論文では、最適な省エネ鉄道車両の構築のため、営業線データの収集と分析を始めとし、消費電力シミュレーション、各機器個別の設計仕様見直し、機器間にわたる機能や情報共有の最適化を検討し、車両システムとして総合的に検討を行い、東京地下鉄と三菱電機が共同で検討・検証を実施した内容について紹介する。

また、それら省エネ・最適車両アイテムを組合せ新造車両に適用した結果について紹介する。

2. 検証項目

省エネ・最適車両システムを目指して、主回路機器に関わる項目として以下の取り組みを実施した。

- (1) 営業線でのデータ収集と発生ロス分析
- (2) 主回路機器の省エネ設計
- (3) 架線電圧リミッタの高電圧化
- (4) ブレーキ性能安定化（最適滑走制御および編成配置を考慮した編成ブレーキ制御）
- (5) 粘着リミッタの解除
- (6) 新軽負荷回生制御
- (7) PMSM駆動システム

3. 現車での原単位と発生ロスの分析

3.1 現車の営業線実績での原単位分析

現車での電力消費の評価指標として、「原単位」を用いる。これは、1両の車両が1km進む際にどれだけの電力量(kWh)を消費するかを表したものである。原単位を用いる事で、走行線区や編成形態が異なっても、相対的に比較評価が可能となる。東西線を例にとり、既存車での原単位分析を実施した結果を表1に示す。

表1 東西線既存車の原単位分析結果

車種	自重 (t)	回生率 (%)	原単位 (kWh・km)	力行 原単位	回生 原単位
CH車 (5M5T)	291.5	33.0	1.18	1.75	0.57
VVVF車 (4M6T)	266.7	40.3	0.94	1.59	0.65
VVVF車 (5M5T)	275.9	39.3	1.04	1.67	0.63

3.2 現車データの収集・分析

現車にデータロガーを搭載し、電力ロスの現状を測定した。東西線 05 系における営業運転中の車両データを収集する事で下記の実績データが得られた。

(1) 力行電力量に対する回生電力量の把握

図1に示すように、力行電力に占める軽負荷回生による絞込分が約5%あり、軽負荷回生制御の改善により絞込分を低減する取組みが可能であることが判明した。

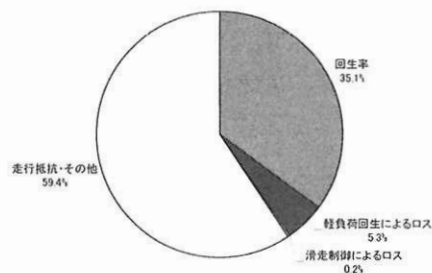


図1 05系11次車における電力ロス測定結果

(2) 運転方法の違いによる回生率の差

ほぼ同一の時間帯、同一乗車率及び同一駅間走行の消費電力量データにおいて、運転方法の違いにより回生率が大幅に変動する結果が得られた。例として、落合→高田馬場間について図2、図3に示す。運転時分を満たす範囲において、消費電力量が少なくなるよう運転曲線を精査することが省エネに繋がると確認された。

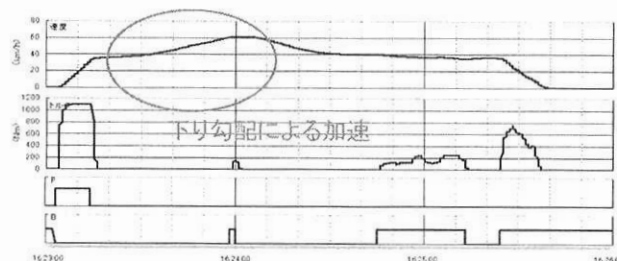


図2 高回生率の運転 (回生率: 102%、乗車率 30.4%)

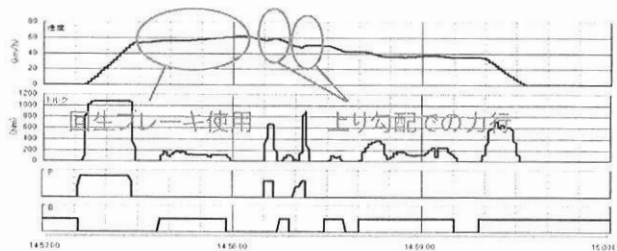


図3 低回生率の運転 (回生率: 54.9%、乗車率 30.4%)

3.3 シミュレーションによる発生ロス分析

実測データを元にランカーブシミュレーションを行い、詳細な発生ロス分析を実施した結果を図4に示す。力行入力電力量比で、走行抵抗が約30%、主回路機器損失約20%、空制ブレーキ約10%との結果であり、走行抵抗の低減と、主回路損失と空制ブレーキ動作の低減が重要である事が確認された。その中でもフィルタリアクトルとモータに着目し新造車両では、これらについて最適設計を行う事で、更なる原単位の向上を目指した。

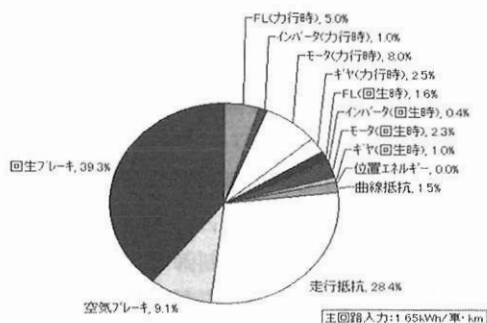


図4 入力電力量に対する発生ロスの構成

4. 主回路機器の省エネ設計と試験結果

新造車である15000系において、FLの銅コイル化や主電動機の高効率設計等を実施する事で、主回路機器そのもののロス低減による省エネ化を推進した。以下に個別項目毎の適用内容と結果を示す。

4.1 FLの銅コイル化

コイル巻線に銅を用いる事で、内部抵抗を42%低減し、損失の低減を図った。従来のアルミコイルに比べてFL単体の重量は増加するが、重量増に勝る損失低減効果がある事を確認して適用となった。

4.2 主電動機の高効率設計

これまで、満車条件を元にした主電動機設計としていたが、新造車である15000系では平均乗車率として70%の時に最も効率の良くなるポイントに合わせた主電動機設計とする事で、高効率での使用可能領域を拡大を図った。

4.3 力行性能曲線の変更による高効率運用

モータの効率設計検討の中で、力行性能曲線にて中速域の効率が低下しており、原因として定トルク制御で電流を持ち上げている影響が考えられた。(図5に示す)

従来、空車・定員等で定トルク制御を実施した理由は、ATCブレーキ動作後の再加速を早くする事や遅延に対する回復余力を持たせるなど、中速域からの高加速性能を重視したためであるが、ダイヤ確保の観点からは、満車性能まで必要十分と考えられるため、満車未満における定トルク域および特性域についても、満車と同一の性能となるよう変更した。

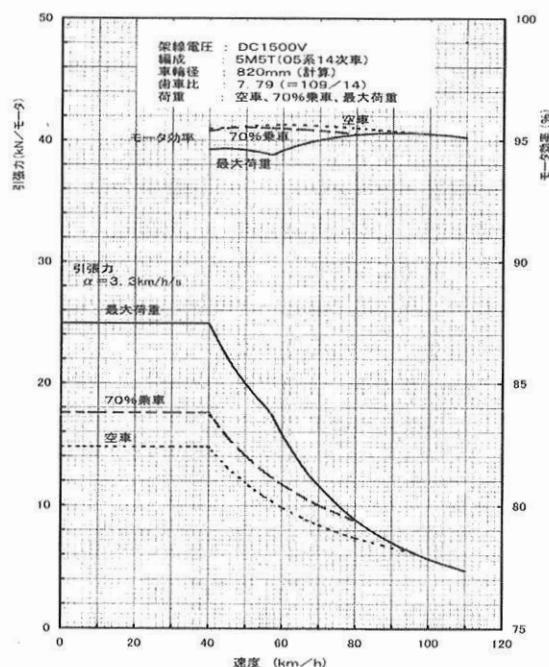


図5 変更後の力行性能曲線

4.4 誘導電動機最適励磁制御

従来では一定としていたV/f領域での磁束電流を可変とする事で、入力電力最小となる最適点での動作を行い、荷重条件に関わらず最適な効率での制御を実現した。

最適励磁制御導入にて、入力電力が約2ポイント低減し、制御の有効性を確認した。

表 2 最適励磁制御の有無による入力電力比較

	入力電力	比較
最適励磁非適用	644.1kW	100%
最適励磁適用	629.1kW	97.7%

(速度 15km/h における比較)

5. 回生電力増加による回生率向上の取り組み

回生時の軽負荷状態における架線電圧の過度な上昇を防ぎ、回生トルクを絞る事で機器を保護している。しかし、従来車への影響を考慮して積極的な見直しを行っていなかったものであるが、図 1 の発生ロス分析により入力電力の約 5% を占めるもので、不要な回生絞込み削減による回生率向上策として下記の取り組みを行なった。

5.1 架線電圧リミッタの高電圧化

架線電圧上昇による回生絞込頻度を減らすために、可能な範囲で架線電圧リミッタの設定を高電圧化した。

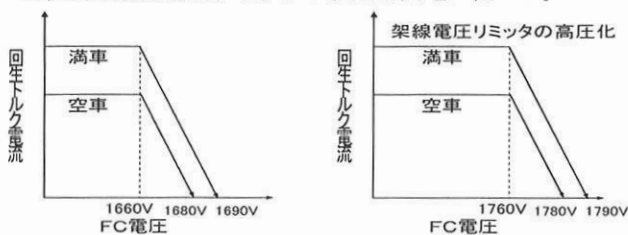


図 6 架線電圧リミッタの高電圧化

本変更を現車に適用し、回生率が 35.1%→45.1%と約 10% 上昇し、効果が確認された。この変更は 1 編成のみであったが、架線電圧全体が高い事でより遠くの負荷まで回生が可能となり、線区トータルで見て、電力量の削減効果が得られると考えられる。

5.2 新軽負荷回生制御

回生電力を監視する事で電圧が高い領域でも回生可能な制御の開発を行なった。従来のフィルタコンデンサ電圧による回生絞込制御に加えて、回生電力演算によるトルク負担とする事で、従来制御と比較して更に回生トルク負担を可能とする制御を構成した。

架線電流から回生電力を推定演算することで、架線電圧が高い状態でも回生負荷が存在する際には、回生トルクを負担するように制御を行う。また、従来のフィルタコンデンサ電圧による制御を合わせ持つ事で、架線電圧の急激な変動に対して安定したトルク絞込みを確保している。

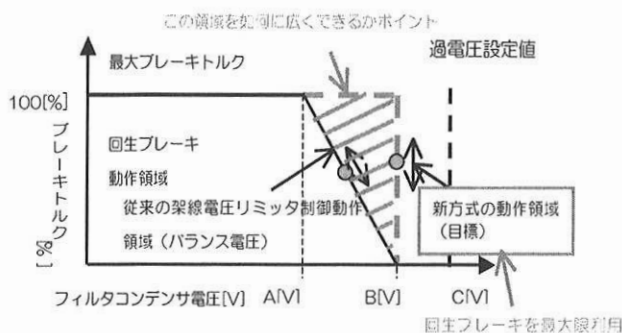


図 7 回生ブレーキ動作領域の拡大

本制御の現車への適用により、営業運用で回生率の推移を確認した結果、従来制御では回生率は 28%～35% 程度であったが、新軽負荷回生制御の適用後は、回生率は 44% 程度となっており、改善効果が確認された。

6. ブレーキ性能の安定化

編成全体における関連機器の情報共有により、不要な絞込の抑制や雨天時の滑走防止による乗り心地の向上並びに車両性能の向上に取り組んだ。

実施項目として、編成内で号車・天候に応じてブレーキ力配分や空転・滑走制御のパラメータを変える事で不要な絞込みを抑えるものである。

現車へ適用した結果、散水時も不要な絞込みが抑制され、安定的なブレーキ性能が得られることを確認した。

7. 回生粘着リミッタの解除

従来より設定されている回生粘着リミッタは雨天時の滑走防止などを目的に、粘着係数が一定値以上で回生ブレーキの動作を抑制するものである。

この粘着係数の上限リミッタを解除し、可能な限り回生ブレーキを利用する事とした。同時に、滑走制御の最適化や摩擦係数変動の少ない制輪子と組み合わせる事で、解除した際の雨天時の滑走防止を図った。

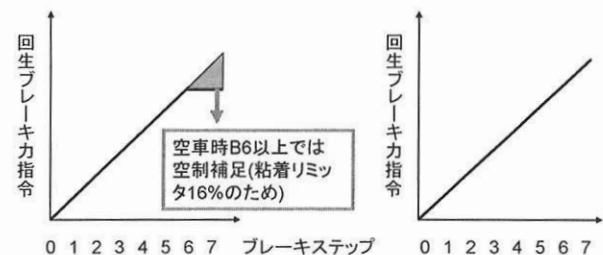


図 8 粘着リミッタの解除

8. PMSM 駆動システム

15000 系の 1 ユニットに試験的に PMSM（永久磁石同期電動機）システムを適用し、営業線におけるシステム評価を実施している。

表 3 に主電動機の諸元を示す。1500V 架線用として、既存の誘導電動機と同一出力を確保しつつ、全閉外扇式の冷却構造を取ることでメンテナンスの軽減を実現した。永久磁石を回転子に使用するため、回転子における損失が少ない特徴を有している。

表 4 に制御装置の諸元を示す。主電動機との間に開放接触器を搭載する構成を取る事で、万一の際に主電動機に発生する誘起電圧を遮断する。回路方式は 4 群構成として、主電動機とインバータを 1 対 1 としているが、既存装置との互換から開放は 4 群一括の開放としている。本システムを搭載して営業線で使用し、既存システムとの省エネ効果の比較・評価を実施した。測定結果を次項に示す。

表 3 主電動機の諸元

定格容量	225kW
定格電圧	800V
定格電流	200A
極数	6 極
定格速度	2300r/min
冷却方式	全閉外扇式
質量	585kg

表 4 主制御装置の諸元

電源電圧	1500V
出力周波数	0~300Hz
容量	1481kVA
回路方式	4 群構成 (但し開放は 4 群一括)
保護協調	出力に開放接触器を設置
冷却方式	走行風自冷式
質量	840kg

9. 試験結果の評価

9.1 試験条件

前項までの項目を東西線 15000 系に適用し、既存車との比較評価試験を実施した。15000 系車両仕様を表 5 に示す。

表 5 東西線 15000 系車両の仕様

MT 比	5M5T
軌間	1067mm
電気方式	DC1500V (架空電車線方式)
設計最高速度	110km/h
加速度	3.3km/h/s
減速度	3.5km/h/s (常用) 5.0km/h/s (非常)

9.2 誘導電動機と同期電動機のシステム比較

走行試験における誘導電動機(IM)と同期電動機(PMSM)の原単位および回生率の比較を表 6 に示す。

IM に比べて、PMSM の方が原単位比で 3~4%低い結果となった。また、荷重条件を変えて測定を実施したところ、70%乗車条件では空車条件に比べて、両システム共に約 0.1kWh/C・km 程低い結果となった。このことから、荷重により原単位が大きく異なってくる事が判る。(空車条件では最も原単位が向上する。)

表 6 試験走行におけるシステム比較

項目	荷重条件	PMSM	IM	PMSM/IM 原単位比
回生率 [%]	70%乗車	50.4	48.3	—
全走行原単位 [kWh/C・km]		0.974	1.003	97.2%
回生率 [%]	空車	45.7	46.4	—
全走行原単位 [kWh/C・km]		0.855	0.891	96.0%

また、走行区間を地下/地上で分けて評価すると、IM においては、地上・地下の差が原単位で約 0.04 程であるのに対し、PMSM においては、約 0.13 程であり、IM に比べて PMSM は走行区間による原単位への変動影響が大きいことがわかる。これは、PMSM は低速~中速域で IM に比

表 7 走行区間によるシステムの差異

項目	荷重条件	原単位測定結果		地下/地上の原単位比	
		PMSM	IM	PMSM	IM
地上区間・原単位 [kWh/C・km]	70%乗車	1.043	1.022	87.5%	96.5%
地下区間・原単位 [kWh/C・km]		0.913	0.986		

べて効率が向上する事から、低速を多用する地下区間では、この効果が大きく現れたためと推測される。

9.3 既存車と 15000 系のシステム比較

既存車 05 系と、省エネ施策を適用した 15000 系との比較評価の結果を表 8 に示す。

表 8 既存車と 15000 系の比較結果

形式	重量条件	運転パターン	[編成原単位 kWh/C・km]			回生率
			力行	回生	総合	
15000系	現車空車重量	従来線	1.35	0.58	0.78	42.6%
	通常運用平均	通常運用平均	1.87	0.84	1.03	44.9%
05系	通常運用平均	通常運用平均	2.04	0.83	1.21	40.7%

05系は15000系に換算した重量で算出

当初の評価との差異が見られたが、これは 3.2 項で示した走行パターンの違いによる影響が大きく、運転曲線に比べ、実際の走行パターンの方が原単位が高くなる事が判明した。これは、シミュレーションでの減速度一定に対して、ノッチの扱いが一括でない事や、実走行では中高速域での再ノッチを多用する事などが要因として考えられる。

また、表 6 での評価結果より、荷重条件の差が原単位に大きく影響を与える事から、乗車率を確認した結果、測定期間での平均乗車率が約 109%であり、当初想定された 70%を上回っている事が判明した。これら要因を考慮した再計算値においては、実車測定値と精度よく一致することを確認した。15000 系は車体強化等の影響による車体重量増加分を考慮すると、05 系従来車に比べて約 15%の改善効果が得られ、省エネ化に向けて取り入れた施策の効果を確認することができた。

10. まとめ

各省エネアイテムを積み上げる事で、既存車に対して十分な省エネ効果が得られる事が判明した。主電動機単体で高効率である PMSM システムとの比較においては、制御単位の違いや、路線条件や運転曲線を考慮し、ランニングコストを含めた評価が今後益々重要になると考える。

今後も、機器個別での技術開発はもとより、車載機器の連携や低損失素子を生かす車両特性の設定等、車両システム全体で総合的な改善を実現する省エネ・最適車両システムをより一層、追求し続けたいと考える。

また、事業者と製造メーカーのそれぞれの優位性を生かし、積極的なコミュニケーションを図ることで、更に最適・省エネな車両の開発を目指して行きたいと考える。

最後になりましたが、本研究に際してご指導・ご協力を頂いた関係各位に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 大橋, 田口, 生方, 上村, 下村, 草野, 山下, 板野:「営業線環境を考慮した既存車両での省エネ性能向上と最適ブレーキ性能調整」, 平成 19 年鉄道技術・政策連合シンポジウム (J-RAIL2009), pp.113-116 (2009.12)
- 2) 大橋, 岩本, 生方, 深澤, 出井, 山下, 藤崎:「東京メトロの最省エネ車両と最適車両性能の研究と成果」, 電気学会産業応用部門交通・電気鉄道研究会, pp.17-22 (2010.5)