

東京メトロにおける省エネ・最適車両性能の取り組み

世木 智博* 岩本 厚 生方 伸幸

深澤 真吾 大橋 聡 鮫島 博 (東京メトロ)

Technical topics on energy-saving electric railway vehicles of Tokyo Metro

Tomohiro Seki*, Atsushi Iwamoto, Nobuyuki Ubukata,

Shingo Fukasawa, Satoru Ohashi, Hiroshi Sameshima (Tokyo Metro Co., Ltd)

Tokyo Metro Co., Ltd. (Tokyo Metro) is the largest subway operator in Tokyo, with a network of nine lines covering a distance of 195.1km. Tokyo Metro also provides the run-through service on seven lines. In this report, we describe technical topics on electric railway vehicles of Tokyo Metro focused on energy-saving measure and brake performance adjustment.

キーワード：永久磁石同期電動機，省エネ，回生ブレーキ，効率
(PMSM, energy-saving, regeneration brake, efficiency)

1. はじめに

現在東京メトロは、9路線 195.1km の区間で鉄道事業を行っている。また、相互直通運転は今後の予定も含めると 7 路線 8 社にわたり、車両に対して高度な機能・性能が要求されており、直通他社との協議を通じて安全・安定運行実現に努めている。そのような路線状況の中、これまで車両各装置間の協調及びブレーキ性能最適化^{(1),(2)}や ATO 停止精度向上⁽³⁾など、鉄道事業者として様々な観点から、車両性能の最適化に向けて主体的に取り組んできた。

また、近年の省エネルギー化要求の高まりから、鉄道車両におけるエネルギー消費量の大部分を占める駆動制御システムの省エネルギー化を検討していた。そこで、今後の車両電気機器更新や新造車両導入の計画も考慮して、鉄道業界では比較的新しい技術でエネルギー効率の高い永久磁石同期電動機 (PMSM) 駆動システムの試験搭載⁽⁴⁾を東芝と共同で行い、営業線にて長期試験を実施してきた。

上記取り組みを通じて得られた車両性能最適化に関する知見から、新造車及び既存車改良も対象として省エネルギー化方策の検討を本格的に開始した。特に今回の検討では、シミュレーション・現車調査による実態把握、車両システム全体におけるアイデア創出、具体的方策の実現、営業線車両での効果確認など、様々な手順・手法で進める必要があり、幅広い技術分野に数多くの知見をもつ三菱電機と共同で取り組むこととした。

本稿では、まず省エネ方策検討以前から進め、現在まで約 3 年間搭載中の永久磁石同期電動機 (PMSM) 駆動システム試験結果について紹介する。また、省エネ性能最適化

に先行して取り組んできた車両各装置間協調、三菱電機と共同で取り組んできた省エネ化策検討手順、内容及び結果について、既に発表してきた内容も踏まえて紹介する。

2. PMSM 駆動システム試験

銀座線 01 系車両にて、東芝と共同で取り組んできた約 3 年間搭載中の PMSM 駆動システム試験結果を紹介する。

〈2・1〉主電動機諸元 1 両分の主電動機 4 台を PMSM (表 1) に載せ換えて、各種確認試験を行った後、平成 19 年 11 月から営業線での試験を開始した。なお、その他既搭載主電動機は誘導電動機 (IM) である。

〈2・2〉営業線での省エネ効果確認 2007 年 11 月から 2010 年 2 月までの営業線で走行した約 203,000km の記録からエネルギー消費量を測定した結果を図 1 に示すが、実消費電力量において、すべり周波数制御 (IM 駆動システム) のシステムから、約 20% の低減効果が確認できた (力行電力量：約 12% 低減、回生電力量：約 12% 増加)。ただし、制御方式 (PMSM 駆動システム：ベクトル制御) の違いがあり、回生電力量の向上分には軽負荷回生領域におけるベクトル制御の制御性能向上による効果も含まれる。

表 1 主電動機諸元

項目	試験主電動機	既搭載主電動機
方式	永久磁石同期電動機	誘導電動機
極数	4 極	4 極
冷却方式	全閉自冷式	自己通風式
1 時間定格	120kW, 440V, 204A 1890rpm, 63Hz	120kW, 440V, 205A 1890rpm, 65Hz
質量	610kg	630kg
最高効率	約 96%	約 91%



図1 消費電力量比較

銀座線車両の年間走行距離 (約 106,000km) から考えると、消費電力量は1編成当たり年間 190,793kWh、CO₂換算では年間 79.8ton の削減効果が見込める結果となった。

〈2・3〉 減磁確認 約 1.5 年、159,400km 営業線走行後の PMSM を取り外し、回転子永久磁石の減磁が発生していないか、PMSM の他力回転時の誘起電圧を測定した。製造時と比較してほぼ同じ値であり、1.5 年経過による減磁は認められなかった。

3. 車両機器間協調への取り組み

鉄道車両の加減速性能を司る車両部品・機器として、制御装置、ブレーキ装置、制輪子、車輪踏面状態等があげられ、これらの機器に対する高性能化に関わる研究成果が数多く報告されている。一方、鉄道車両システム全体の各機器間相互作用・影響を総合的に評価・調整する内容や省エネ化も考慮した性能最適化については、これまであまり取り組まれていない。

相互直通運転により他社路線を走行する機会の多い東京メトロ車両では、路線条件・運転形態の特殊性からも高精度な性能調整が求められてきた。従って、営業線での走行環境、各機器間の相互作用・影響を把握して総合的に性能評価・調整することの重要性を認識して、鉄道事業者として主体的に機器間協調へ取り組んできた^{(1),(2)}。

営業線添乗や運転状況記録装置を活用した実営業中の挙動把握により、ブレーキ性能変動・フラット発生の原因が、乗務員の他社車両との体感減速度差・回生絞り込み特性の違いや、実際使用する速度域・ブレーキステップ・架線電圧の違いなど自線・他線両方の営業線使用環境によることが明らかになっている。また、回生及び空気ブレーキ力のブレンディング、制御装置の回生絞り込み特性の変更 (絞り込み開始点の高電圧化) や滑走再粘着制御における絞り込み時定数・復帰時定数の調整、車輪踏面の平均荒さ確保を目的として鋳鉄ブロックサイズを適正化した制輪子の開発・実用などにより、加速性能の向上、減速度安定化に伴う乗務員による非常ブレーキ操作の抑制などを実現した。

最終的な車両性能を総合的に評価・調整するためには、自線だけではなく、乗り入れ先の路線条件も十分に考慮しなければならない。また、車両性能は複数装置間における最適調整、メンテナンスが非常に重要である (図2)。さらに、鉄道事業者が主体となって「鉄道システム」全体を構築していく必要があると整理している。

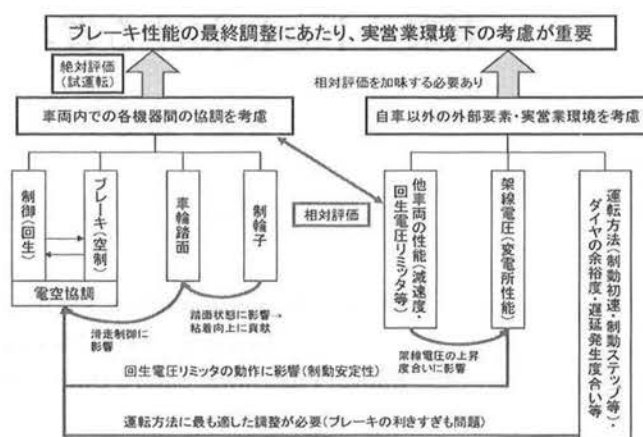


図2 各種機器と実使用環境の相関関係

4. 省エネルギー化方策検討にあたって

昨今の省エネルギー化要求の高まり、直通他社も踏まえた車両性能最適化の知見などから、東京メトロ車両での省エネルギー化方策の検討を実施した。

〈4・1〉 検討の方向性 省エネルギー化方策検討にあたっては、抜本的な対策が可能である新造車はもちろん、相応の対象車両数があり、比較的速やかな対策が可能である既存車両システムの改良も同等に検討対象とし、どこまで省エネ化が可能かという点に主眼を置いた検討を行った。検討にあたっては、現車調査等による営業線の実態把握や、シミュレーションによるシステム毎の状況把握を実施することで、対策の検討と効果の確認を実施した。

〈4・2〉 シミュレーションによるシステム毎の状況把握と低減可能性模索 まず初めに、鉄道車両における省エネルギー化に向けて、改善効果の感度を見極めるため、一般的な鉄道車両でのエネルギー分布について、現状把握・分析を見据えて計算を実施した。結果を図3に示す。同図は力行に使用した総入力電力量を100%とし、各機器の損失、空制、回生によって回収できる電力量割合を示している。

その中で、フィルタリアクトル (FL) 損失、主電動機 (MM) 損失、走行抵抗損失がその他の項目と比較して相対的に大きいと、検討の深度化項目として抽出した。また、これまでの実測データから車種により回生率のバラツキが大きいことを経験的に把握していたため、回生ブレーキの有効活用についても重点検討項目として抽出した。

〈4・3〉 現車調査による営業線の実態把握 各省エネルギー化策実現に向けて、営業線での使用電力量・回生状況調査、走行抵抗測定を実施した。

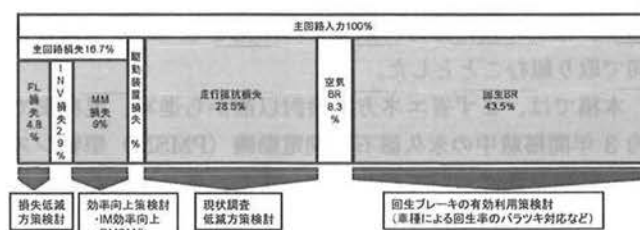


図3 鉄道車両におけるエネルギー損失概算

表2 東西線車両の使用電力量

車種	標記質量	回生率	原単位 (kWh/C-km)		
			合計	力行	回生
チョッパ車 (5M5T)	291.5t	33.0%	1.18	(1.75)	(0.57)
インバータ車 (4M6T)	266.7t	40.9%	0.94	(1.59)	(0.65)
インバータ車 (5M5T)	275.9t	37.9%	1.04	(1.67)	(0.63)

〈4・4・1〉営業線での使用電力量調査 今後の省エネルギー化検討を深度化するため、編成形態、制御装置種別など、車種の多い東西線車両にて使用電力量の実態調査を行った。なお、使用電力量の評価にあたっては、1両が1km走行するのに使用した電力量(単位 kWh/C-km、以下原単位という)を用いている。

車種ごとの調査結果を表2に示す。チョッパ車においては、中高速域での加速性能が悪く力行時間が長くなること、直流モータのブラシ抵抗分が影響していること、車両質量が大きいことから、力行原単位が大きくなっている。インバータ車については、どの速度領域においてもモータ効率が4M6T>5M5Tとなっており、特にモータ電圧の飽和後に中高速域での加速力を重視したため、5M5T車のモータ効率低下が著しいことが分かった。

また、回生ブレーキとしてはチョッパ車において架線電圧リミッタ特性の回生絞り込み開始電圧が低かったこと、インバータ車において5M5T車のモータ効率が低いことなどにより、4M6T車の回生量が大きかったことが分かった。以上の調査・分析結果を踏まえて、速度に対するモータ効率、回生電圧リミッタ特性などを考慮して最適省エネ性能を継続検討することとした。

〈4・4・2〉営業線での回生状況調査 東西線における回生状況調査を行ったが、軽負荷回生状況が力行電力量の5%程度を占めていることが分かり、軽負荷回生状況の改善が省エネルギー化に寄与することを確認した。

〈4・4・3〉駅間の運転方法による使用電力量比較 実運行での詳細を把握するために各駅間の電力量測定を実施した。代表的データの抜粋を表3に示す。また同表中での回生率102.96%と54.94%の場合の運転曲線を図3に示す。

回生率102.96%では、早めにノッチオフして下り勾配を利用して加速し、その後上り勾配でも再ノッチを利用せず惰行し、運転時分は正規運転時分と同一の2分35秒であった。一方回生率54.94%では、ATCコード直前まで力行し、下り勾配で回生ブレーキを使用している。その後上り勾配

表3 東西線、落合→高田馬場駅間の電力量比較

回生率(%)	力行電力量 (kWh)	回生電力量 (kWh)	軽負荷絞込分 (kWh)
102.96	603	621	17
74.13	1565	1160	2
70.49	991	699	59
65.81	1063	700	356
60.84	1755	1068	0
54.94	1835	1008	128
35.09	1862	653	251

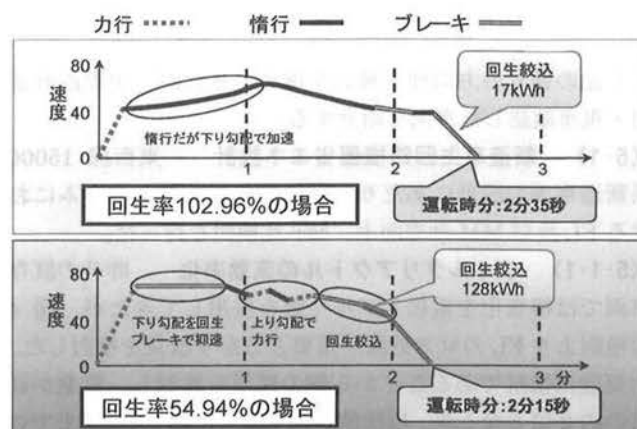


図4 各回生率の運転曲線の比較

で再ノッチし、運転時分は2分15秒であった。同様に他駅間でも運転方法により消費電力量が大きく異なることを確認した。よって運転時分を満足する範囲内で、最も消費電力量が少なくなるよう車両性能を考慮して運転曲線を精査し、それに従った運転を行うことが最省エネに繋がるといえる。

〈4・4・4〉走行抵抗測定 エネルギー損失概算結果から損失のうち、約3割を占める走行抵抗損失を見極めるため、地上及び地下区間に分けて惰行法による走行抵抗測定を実施した。現時点では走行抵抗式の精査中であり、走行抵抗低減策の検討と併せて引き続き調整していく予定である。

〈4・5〉実現策効果確認、実現性評価 省エネ化検討にあたって、改善感度を見極めるため、東西線車両をもとにした使用電力量の内訳を算出した結果を図5に示す。

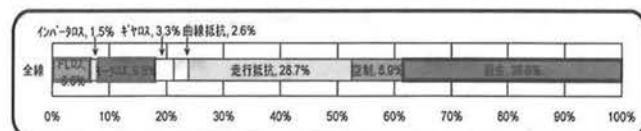


図5 東西線使用電力量内訳計算結果

〈4・5・1〉力行原単位低減へ向けて 図5より力行において総入力電力量低減に対して、改善感度が良いのはフィルタリアクトルのロス(6.6%)低減と、モータロス(9.9%)の低減と考えられる。また図4より惰行を活用し力行頻度を減らし総入力自体の低減も有効である。それぞれ詳細検討結果は後述する。

〈4・5・2〉回生原単位向上へ向けて 図5において回生38.6%とあるが、実際は架線電圧リミッタと滑走制御(滑走を検知すると再粘着を図るために回生トルクを絞る)により回生領域は狭められてしまうことになる。

また制御9.8%については、従来は粘着リミッタを粘着係数16%程度に設定しているため、減速度3.0km/h/s程度までしか負担できないこと(全制動は3.5)、高速域ではモータ特性によって回生負担量が減少してしまうため制御となる領域である。これらを踏まえ、回生原単位向上の可能性があり、大きく改善効果が見込まれるのは架線電圧リミッタ高電圧化と粘着リミッタの解除と考えられる。同適用結果を後述する。

5. 省エネルギー化方策検討事例^{(5),(6)}

上記の通りの方向性で検討を進めてきたが、実際設計適用・現車確認した事例を紹介する。

〈5・1〉 新造車主回路機器省エネ設計 東西線 15000系新造車両の設計にあたり、誘導電動機駆動システムにおけるFL及びMM効率向上、MT比検討を行った。

〈5・1・1〉 フィルタリアクトルの高効率化 昨今の既存車両では軽量化を重視しアルミ製を採用してきたが、図4の検討よりFLのロス低減が重要と分かり改良を検討した。主要因は抵抗であることから銅の採用を検討し、質量が従来の約2倍となるが、抵抗値が約半減し、約3%程度までロス低減が可能である。

〈5・1・2〉 モータ効率の高効率化 高効率化へ向けて、使用材質・使用領域の検討を行った。その結果、固定子素線絶縁の最適化、固定子導体・鉄心材の最適化により、モータ効率を92%から95%程度へ向上できる目処がついた。本高効率化による効果を表4に示す。モータ効率は実際の使用特性で大きく変わるが、本検討は後述する最適MT比検討と同時に行ったものであり、大容量化し余裕のある使用を前提としている。

表4 モータの高効率化前後の比較

	単位	モータ
効率向上による 原単位低減分	kWh/C-km	0.0990
質量低減による 原単位低減分	↑	0.0024
原単位低減合計	↑	0.1014
低減電力量	万kWh/編成・年	10.9



図6 架線電圧リミッタ特性

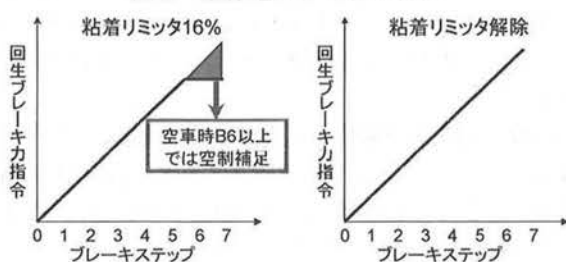


図7 粘着リミッタ特性

〈5・1・3〉 MT比の検討 表2のとおり既存車実績では4M6Tの原単位が最小であったことから同形態が東西線には最適と想定していた。しかし幅広くMT比について効率を重視したモータの使用を前提に、原単位計算を実施したところ、車重を考慮しても5M5Tが最小となった。5M5Tとすると、モータ1個あたりの必要トルクを引き下げることにより力行時の効率低下を最小限とし、回生時は最大限に回

生トルクを確保出来る。その結果、回生原単位の向上が図られ、力行・回生を含めたトータルバランスとして最適と考えることができる。

15000系次期新造車において、従来車と比較して約10%の使用電力量削減を想定しており、現在効果確認中である。

〈5・2〉 既存車における回生ブレーキの有効利用 既存車両における回生ブレーキの有効利用として、架線電圧リミッタの絞り込み開始電圧高電圧化（図6）による回生率の約10%向上、粘着リミッタ解除（図7）による中・高速域での高ステップブレーキ時における回生率向上が見込める結果を得た。半蔵門線8000系車両での実績に加えて、今後他の車両形式にて、展開予定である。

〈5・3〉 ATO運転の最適化 既存車両における省エネ化策として、ATO運転の最適化も検討してきた。

通常ATO装置はATC信号コードの5km/h下を目標速度として、定速度運転を実施しているが、所定運転時分・乗り心地を十分満足する範囲で、惰行運転を有効活用できるよう運転曲線の最適化を検討してきた。南北線での試運転では約15%の低減効果が確認できた。また、非定常時における省エネ運転、減速度変動時の停止精度安定化策などについても現在、検討を継続している。

6. まとめ

東京メトロ車両は、相互直通運転、ATO運転など多様な運転形態に対応するため、高度な機能・性能が要求されており、これまで鉄道事業者として主体的に取り組んできたPMSM駆動システム試験結果、車両性能最適化について紹介した。また、現在実施中の車両システムとしての省エネルギー化、性能最適化の取り組み状況について紹介した。

現時点では、効果確認中のもの、検討継続中のものも含めての紹介であるが、今後評価を行い、新造車だけでなく、既存車両システム改良に展開していくとともに、更なる省エネルギー化を目指し、様々な施策実現に努めていきたい。

文 献

- (1) 大橋、鮫島、野村、下村、伊藤、見澤谷：「営業線環境を考慮したブレーキ性能調整（制御・ブレーキ・車輪路面・制輪子の協調）」、平成18年鉄道技術・政策連合シンポジウム（J-RAIL2008）、pp.101-104（2008.12）
- (2) 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）
- (3) 上村、鮫島、水野、船渡：「東京メトロの鉄道事業者としてのATO停止精度向上とそれを考慮したブレーキ性能評価・調整の取り組み」、R&M, pp.16-19（2009.4）
- (4) 深澤：「銀座線01系車両PMSM主回路システム試験報告」、R&M, pp.4-7（2010.4）
- (5) 深澤、生方、下村、上村：「東京メトロの鉄道事業者としての省エネ性能向上と最適車両性能評価・調整の取り組み」、平成21年度全国「車両と機械」研究発表会、pp.13-16（2010.2）
- (6) 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）