

# 低騒音と省エネを実現した 東京メトロ丸ノ内線車両用のPMSM主回路システム

PMSM Propulsion System for Tokyo Metro Marunouchi Line Trains

川合 弘敏

春原 輝彦

生方 伸幸

深澤 真吾

■ KAWAI Hirotoishi

■ SUNOHARA Teruhiko

■ UBUKATA Nobuyuki

■ FUKASAWA Shingo

昨今の鉄道車両用主回路システムは、環境問題への高まりと、少子高齢化社会への移行による保守技術の継承困難などを背景に、高効率、低騒音、及び省メンテナンスへの要求が高まっている。

東芝は、これらを解決する主回路装置として、PMSM (Permanent Magnet Synchronous Motor : 永久磁石同期電動機) 主回路システムを開発した。このシステムを東京メトロ銀座線の車両に搭載して試験を行い、PMSM主回路システムが従来のIM (Induction Motor : 誘導電動機) 主回路システムと比較し、低騒音と省エネであることを確認できた。また営業線での走行実績も積むことができ、今後は東京メトロ丸ノ内線の主回路を更新していくとともに、更にメンテナンス性の評価やDC (直流) 1,500 V主回路装置への展開を進め、次世代の主回路システムとしての確立を目指している。

The demand for high efficiency, low noise, and reduction of maintenance work has been increasing in the field of propulsion systems for rolling stock, accompanying the rising awareness of global environmental issues and the shift to an aging society with fewer children in recent years.

In response to these conditions, Toshiba has developed a permanent-magnet synchronous motor (PMSM) propulsion system and evaluated this system through running tests on the Ginza Line of Tokyo Metro Co., Ltd. As a result, we have confirmed that the PMSM propulsion system has lower noise and greater energy saving compared with the conventional induction motor (IM) propulsion system. Furthermore, we have carried out running tests for more than 1½ years.

We are providing the system into the renewal of the propulsion system of the Tokyo Metro Marunouchi Line trains, and are continuing our efforts to establish this technology as an advanced propulsion system through evaluations of maintainability and development of a DC 1,500 V PMSM propulsion system.

## 1 まえがき

近年、改正省エネ法の施行に伴う更なる省エネのほか、低騒音、低振動などの環境性能向上への要求と、少子高齢化社会を背景とした保守の省力化への要望などが高まっている。鉄道車両用の駆動システムについても例外ではなく、これまで小型や、軽量、高出力が大きなポイントであったが、更なる省エネ、低騒音、及び省メンテナンスも重要視されてきた。

東芝は、これらの課題を解決するため、PMSM (Permanent Magnet Synchronous Motor : 永久磁石同期電動機) 主回路システムを開発した。2007年10月から、東京メトロ銀座線の01系車両で、このPMSM主回路システムの現車試験を実施しており、今回、電気品の更新を行う東京メトロ丸ノ内線の02系車両に、PMSM主回路システムが搭載されることになった。

ここでは、この02系向けDC600 V用PMSM主回路システムの仕様と特長、及び01系現車走行試験結果について述べ、更に千代田線車両向けDC1,500 V用システムについて述べる。

## 2 DC600 V用PMSM主回路システム

### 2.1 丸ノ内線02系車両

02系電車の外観を図1に、車両の仕様を表1に示す。



図1. 02系電車 — 02系の車両に、DC架線600 Vを電源とするPMSM主回路システムが搭載されることになった。

02 series train on Marunouchi Line

表1. 丸ノ内線02系車両の仕様

Specifications of 02 series train on Marunouchi Line

項目	仕様
編成	東京メトロ02系車両
MT比*	3M3T
電気方式	DC600 V
最高速度	75 km/h
加速度	3.2 (km/h)/s
減速度	4.0 (km/h)/s (常用) 5.0 (km/h)/s (非常)
軌間	1,435 mm

\* 鉄道車両で電動車 (M) と付随車 (T) の構成を示した比

## 2.2 PMSM主回路システム<sup>(1)-(3)</sup>

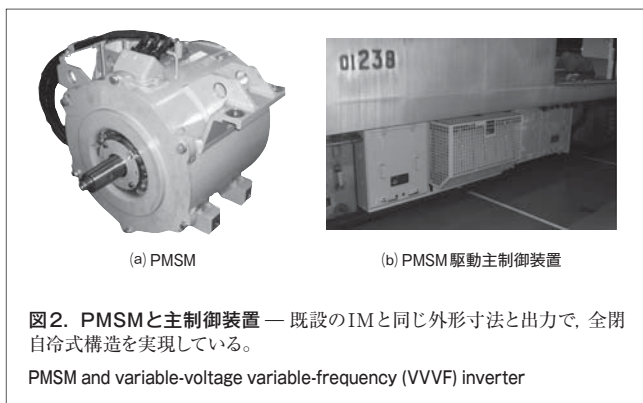
### 2.2.1 PMSM

- (1) 仕様 PMSMの仕様と定格を表2に、外観を図2に示す。更新車両用のため既設のIMと同じ外形寸法と出力で、全閉自冷式構造を実現している。
- (2) 特長 全閉構造により低騒音化やメンテナンスの軽減を実現している。回転子に永久磁石を使用しているため回転子バーや短絡環がなく、IMに比べ発熱量が少ないため、全閉構造にしてもフレームの冷却フィンや放熱器が不要となり、シンプルな構造となっている。
- (3) メンテナンス性 従来の自己通風式IMでは定期的に機内清掃が必要だったのに対し、PMSMは全閉構造のためほこりの侵入がなく、半永久的に機内清掃が不要である。ただし、従来の軸受構造のままでは軸受交換のためにPMSMの分解と組立が発生してしまい、回転子に永久磁石を組み込んでいるため、その作業は通常の主電動機よりも複雑である。そこで、PMSMを分解しなくても軸受部のメンテナンスができるよう、PMSMの外側か

表2. PMSMの仕様と定格

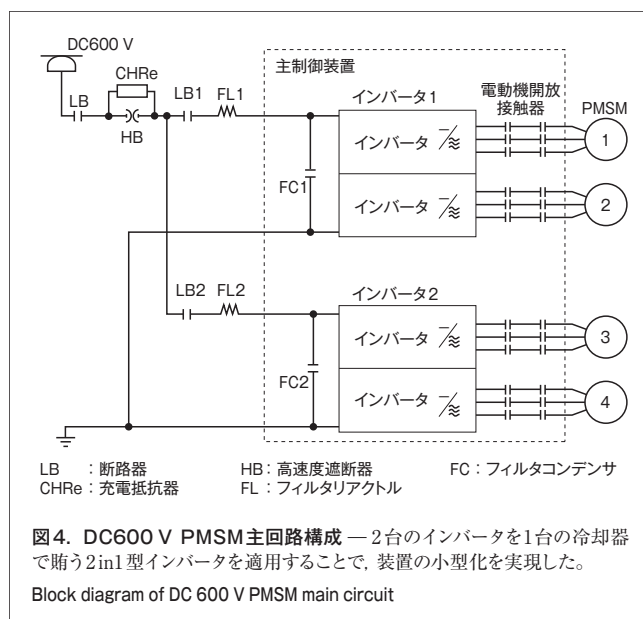
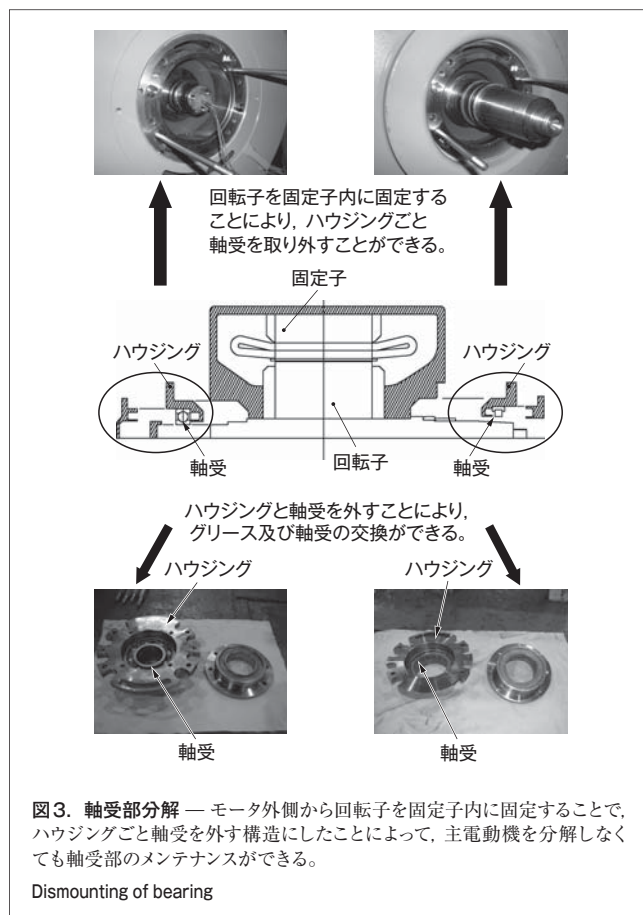
Specifications and ratings of PMSM

項目	仕様・定格	
方式	PMSM	
相数	3	
極数	4	
冷却方式	全閉自冷式	
駆動方式	平行カルダン歯車形継手方式	
装荷方式	台車装荷式	
定格	定格の種類	1時間定格
	出力	120 kW
	線間電圧	400 V
	相電流	198 A
	定格回転速度	1,890 min <sup>-1</sup>
	周波数	63 Hz
絶縁種別	Class200	
質量	610 kg	
最高使用回転数	3,664 min <sup>-1</sup>	



ら回転子を固定子内に固定することで、ハウジングごと軸受を外す構造にした(図3)。

2.2.2 主制御装置 PMSM 駆動主制御装置の主回路構成を図4に示す。PMSMは、永久磁石の回転方向に応じて最適な位相の電流を流し込むことでトルクの制御が可能にな



るが、IMのように複数の電動機を1台のインバータで制御できず、電動機ごとのインバータによる個別制御が必要になる。したがって、装置の大型化が懸念されるが、2台のインバータを1台の冷却器で賄う2in1型インバータを適用することで、装置の小型化を実現した。また、1台の制御ユニットで2個のPMSMを個別制御することにより、制御ユニットの小型化も実現した。一方信頼性を向上させるため、万一インバータに異常が発生した場合、PMSMの誘起電圧により発生する電流がインバータへ流れ込むのを防止できるよう、インバータとPMSMの間に電動機開放接触器を挿入してPMSMを切り離せるようにした。

### 2.3 走行試験結果

ここでは、銀座線01系で実施した現車試験について述べる。試験車両（銀座線01系38編成）は、PMSMと従来のIMとの走行条件を合わせるために1編成内で、2号車にPMSM駆動の主制御装置を、4号車及び5号車に現行のIM駆動の制

御装置を搭載し、騒音や消費電力量などを比較した。試験車両を2007年9月末に営業運転に投入した後、営業線での走行データを採取した。

**2.3.1 騒音の測定** PMSMと現行の自己通風式IMそれぞれの車両速度に対して、車内床1.2mでの騒音を測定した(表3)。PMSMのほうが1.7～5.5 dB低騒音となっている。また、車両速度66 km/hでの周波数分析結果(図5)では、IMは構造上必要なファンや回転子バーの周波数成分が500 Hz付近に見られるのに対し、PMSMでは見られなかった。

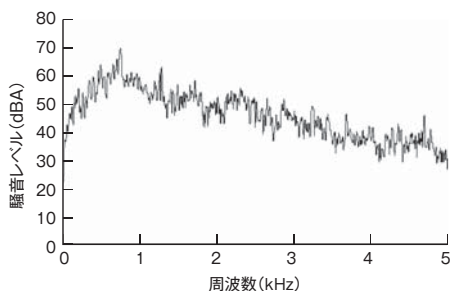
**2.3.2 制御性能の試験** 図6に示すように、ゼロ速から高速までの加減速試験の結果、低速域から高速域まで安定に制御している。高速惰行中は、永久磁石による誘起電圧がフィルタコンデンサ電圧を超えて回生ブレーキが自然に作用するのを抑えるため、ゼロトルクとなるようインバータを動作させる惰行制御を行っている。

**2.3.3 消費電力量の低減効果** 2007年11月18日から2009年5月21日までの営業運転期間中に消費された電力の測定結果を表4に示す。PMSM主回路システムは従来のIM

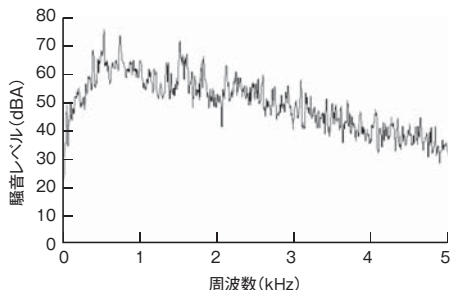
表3. 騒音の測定結果

Results of noise tests

車両速度 (km/h)	床1.2 m 騒音 (dBA)	
	PMSM	自己通風式IM
20	70.5	76.0
40	74.5	76.2
60	79.8	80.7
65	85.0	86.7



(a) PMSMの周波数分析



(b) 自己通風式IMの周波数分析

図5. PMSMと自己通風式IMの周波数分析結果 — IMでは構造上必要なファンや回転子バーの周波数成分が500 Hz付近に見られるが、PMSMでは見られない。

Frequency analysis of PMSM and IM

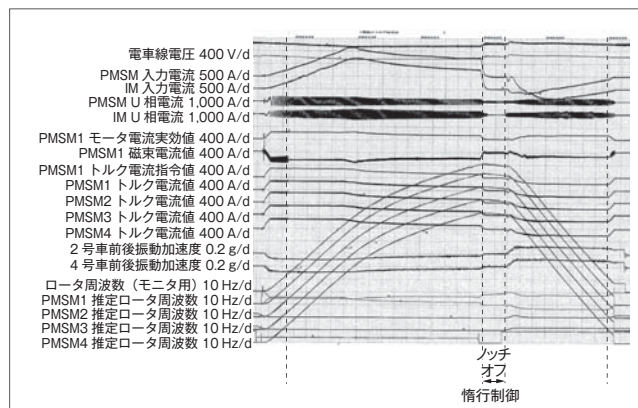


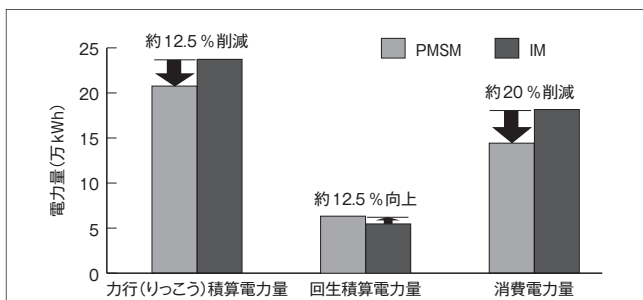
図6. 加速試験の結果 — 低速時やゼロ速時に、高精度に回転角度を推定しており、低速域から高速域まで安定に制御している。

Results of acceleration and braking tests

表4. 消費電力量の測定結果

Results of power consumption measurements

積算電力量		期 間						
		2007年 11月18日 ～ 12月26日	2007年 12月27日 ～ 2008年 3月31日	2008年 4月1日 ～ 6月30日	2008年 7月1日 ～ 9月30日	2008年 10月1日 ～ 2009年 1月1日	2009年 1月2日 ～ 3月30日	2009年 3月31日 ～ 5月21日
2号車 PMSM (kWh)	力行	51,702	89,557	76,307	137,464	83,926	78,698	38,825
	回生	15,669	27,402	23,416	42,485	26,174	24,398	12,026
	合計	36,033	62,155	52,891	94,979	57,752	54,300	26,799
4号車 IM (kWh)	力行	58,890	102,502	87,077	156,773	95,571	88,923	43,872
	回生	13,272	23,004	20,513	37,530	22,961	20,901	11,107
	合計	45,618	79,498	66,564	119,243	72,610	68,022	32,765
5号車 IM (kWh)	力行	58,846	102,295	86,747	155,843	94,836	89,527	44,181
	回生	14,272	24,951	21,875	39,810	24,402	22,543	11,485
	合計	44,574	77,344	64,872	116,033	70,434	66,984	32,696



出典：平成20年度「車両と機械」技術セミナー第4回資料、「東京メトロの新しい車両技術」<sup>(4)</sup>

図7. 消費電力量の低減効果測定結果 — 東京メトロ銀座線の営業線での現車試験における、消費電力量の低減効果を示す。同一車両編成で、PMSMシステムとIMシステムを比較の結果、消費電力量は約20%の省エネが実現できている。

Comparison of reduction of power consumption of permanent-magnet synchronous motor (PMSM) and induction motor (IM)

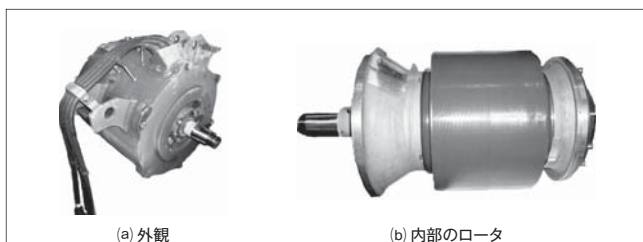


図8. 1年使用後のPMSM — 外観は汚損が進んでいるが、全閉構造のため内部にはほこりが侵入せず、回転子部分は新品と同様の状態のままである。

PMSM after one year of operation

主回路システムと比較して、力行積算電力量で約12.5%の削減、再生積算電力量で約12.5%の向上、その結果、消費電力量で約20%の削減効果が得られた(図7)。

**2.3.4 PMSMの分解調査** PMSMを営業運転投入して1年経過後に分解調査を行った(図8)。外観は汚損が進んでいるが、全閉構造のため内部にはほこりの侵入がなく新品と同様の状態であり、半永久的に内部の清掃が不要であることを確認した。

### 3 DC1,500 V用PMSM主回路システム

前述の各種試験の実績を踏まえ、DC1,500 V路線である千代田線向け新造車両もPMSM主回路システムで製造することになった。DC1,500 V用PMSM主回路システムは、DC600 V用をベースにして、新たにインバータを個別に開放できるようにしている(図9)。

### 4 あとがき

ここでは、PMSM主回路システムが、従来のIM主回路システムと比較し、省エネ、低騒音、かつ省メンテナンスであるこ

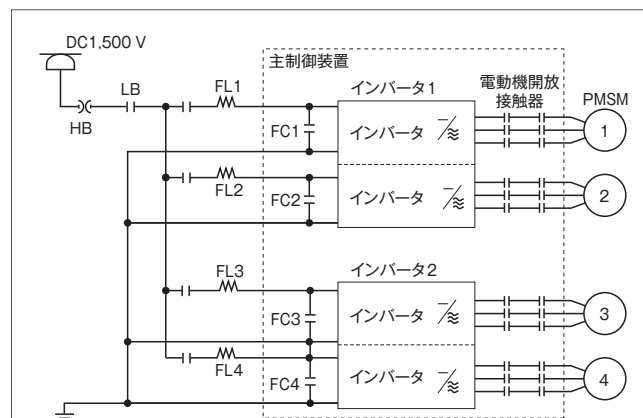


図9. DC1,500 V PMSM主回路構成 — DC600 V用PMSM主回路をベースにして、新たにインバータを個別に開放できるようにしている。

DC 1,500 V PMSM main circuit

とについて述べた。この結果を受けて、東京メトロ丸ノ内線の更新車両、更に1,500 V系システムである千代田線の新造車両にPMSM主回路システムが搭載されることになった。銀座線の車両での現車試験と併せて、引き続き営業線での追跡調査を実施し、次世代の主回路システムとして確立させていく。

### 文献

- 川合弘敏, ほか. 東京メトロ銀座線車両向けPMSM主回路システム. 東芝レビュー. 63, 6, 2008, p.45 - 49.
- 山田敏明, ほか. 更なる低騒音, 省エネルギーを実現する鉄道車両用パワーエレクトロニクス製品. 東芝レビュー. 61, 9, 2006, p.11 - 14.
- 山崎 修, ほか. “永久磁石モータによる車両駆動システムの開発”. 平成20年電気学会全国大会講演論文集5. 福岡, 2008-03, 電気学会, p.141 - 142.
- 留岡正男. “東京メトロの新しい車両技術”. 平成20年度「車両と機械」技術セミナー第4回配布資料. 東京, 2008-12, 日本鉄道車両機械技術協会. 講演番号8.



川合 弘敏 KAWAI Hiroto

電力流通・産業システム社 府中事業所 交通ドライブシステム部。鉄道車両用ドライブ装置の開発に従事。  
Fuchu Complex



春原 輝彦 SUNOHARA Teruhiko

電力流通・産業システム社 府中事業所 交通システム部主務。鉄道車両用主電動機の開発に従事。  
Fuchu Complex



生方 伸幸 UBUKATA Nobuyuki

東京地下鉄(株) 鉄道本部 車両部課長補佐。鉄道車両の設計に従事。  
Tokyo Metro Co., Ltd.



深澤 真吾 FUKASAWA Shingo

東京地下鉄(株) 鉄道本部 車両部副主任。鉄道車両の設計に従事。  
Tokyo Metro Co., Ltd.