

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

Power Electronics Products for Railway Cars Realizing Low Noise and Energy Saving

山田 敏明

■ YAMADA Toshiaki

中沢 洋介

■ NAKAZAWA Yosuke

白石 茂智

■ SHIRAISHI Shigetomo

地球温暖化防止のため，地球環境保護やエネルギー問題への社会の意識や要求が世界的に高まっている。永久磁石同期電動機（PMSM）駆動システムは，高効率で電力消費量を低減させることで，LCC（Life Cycle Cost）の約90%を占める動力費の低減が可能である。また，低損失で発熱量が少ないことから，従来の誘導電動機と同程度の性能を確保しながら，主電動機を全閉構造とすることができ，騒音とメンテナンスの低減も可能である。更に東芝は，大出力化するにあたり，これまでに鉄道での導入実績がない回転角センサレス制御を採用した。これにより，大出力化のほか，信頼性の向上，保守作業及び初期コストの低減も合わせて期待できる。

Rising social awareness of the need to prevent global warming has led to growing demands for global environmental protection and energy saving. Toshiba has developed a highly efficient permanent-magnet synchronous motor (PMSM) drive system without any rotational sensor, for use in railway car traction. This PMSM reduces the energy cost, which accounts for 90% of the total life-cycle cost (LCC) of a traction motor. In addition, the low amount of heat generated by the PMSM permits it to have a totally enclosed structure, which reduces acoustic noise and maintenance work, yet the motor has a large power output equivalent to that of a conventional self-ventilated motor. The adoption of sensorless control also improves the reliability and reduces the initial cost and maintenance work.

1 まえがき

鉄道車両用駆動システムは，1980年代にVVVF（Variable Voltage Variable Frequency）インバータが実用化されてから誘導電動機駆動システムが主流となり，現在ではほぼすべての新規車両に採用されている。誘導電動機は，これまで長年にわたり使われてきた直流電動機に必要であった，ブラシの交換や整流子の削正^(注1)という手間のかかるメンテナンスが不要で，また，高速回転化による小型・軽量化も実現可能な点が高く評価され，主電動機として広く採用されている。

一方，地球温暖化防止のため，二酸化炭素（CO₂）削減目標を定めた京都議定書に代表されるように，地球環境保護やエネルギー問題への社会の意識や要求が世界的に高まっているなか，現在主流の誘導電動機では実現が困難な高効率化による省エネルギーの実現（併せてLCCの削減）や冷却機器の省略，あるいは更なる小型・軽量化など，次世代の電動機を要望する声が強くなっている。東芝は，この次世代の主電動機として永久磁石同期電動機（PMSM）の開発にいち早く着手し，現在，様々なフィールドにおいて評価試験を実施している。

ここではPMSMとその主回路・制御システムの概要，及びそれらの検証結果について述べる。

(注1) 使用により表面が黒くなったり荒れたりした状態を，削って正常な状態にする作業。

2 PMSM

PMSMは，OA機器や携帯機器などの小形モータの分野で広く用いられてきたが，近年の永久磁石の高性能化とパワーエレクトロニクス技術の進歩，更には電磁界解析技術の進歩により，省エネルギーに対する要求の強い家電製品からハイブリッド自動車用電動機，世界最高速のエレベータ用巻上機に至るまで適用が拡大されている。

特に，永久磁石の高性能化については，1982年に発明され目覚ましい進歩を遂げているNd-Fe-B（ネオジウム-鉄-ボロン）系によるところが大きく，強力な磁界と高温下での使用が要求される主電動機にも適用可能となっている。

以下に，開発したPMSMの概要と検証結果を述べる。

2.1 前提とした設計仕様

今回のPMSM開発の前提条件となる車両の主な仕様を表1に，主電動機の仕様を表2に示す。

2.2 PMSMの構造

表1，表2の仕様を前提に開発したPMSMの外観を図1に，構造を図2に示す。

今回開発したPMSMは，以下の特徴を持っている。

- (1) 永久磁石 高磁束密度で耐熱性，耐久性に優れたNd-Fe-B系を採用した。
- (2) リラクタンストルクの有効活用 永久磁石の磁束によって惰行時に発生する無負荷誘起電圧増加を抑制す

表1. 車両仕様

Specifications of railway car

項目	仕様
編成	3両編成
MT比	1M2T
車輪径 (mm)	φ 860 (計算: φ 820)
駆動方式	平行カルダン方式
起動加速度 ((km/h)/s)	2.5
最高速度 (km/h)	130
減速度 ((km/h)/s)	常用最大4.3
期待粘着係数 (%)	力行: 21.5, 回生: 17
架線電圧 (V)	DC1,500
軌間 (mm)	1,067

M: Motor車 T: Trailer車

表2. 主電動機仕様(目標)

Specifications of traction motor (target)

項目		仕様	
主電動機方式		PMSM (センサレス)方式	
冷却方式		全閉自冷方式	
定格	時間	連続	1時間
	出力 (kW)	235	270
	電圧 (V)	950	950
	電流 (A)	163	186
	回転数 (rpm)	2,960	2,960
	効率 (%)	96.5	97.0
質量 (kg)	625以下		

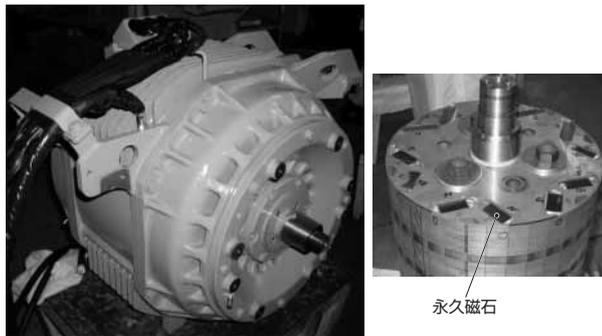


図1. PMSM — 冷却フィンを電動機と一体構造にすることによりスリムな構造としている。永久磁石が回転子に埋め込まれている。

PMSM

るとともに、起動時の電流を極力小さくし駆動用インバータの電流容量増加を抑制するため、ロータに突極性を持たせてリラクタンストルクを有効活用する構造にした。

- (3) 全閉構造 回転子の損失が誘導電動機と比較して大幅に低減される利点と、端部にセンサのないセンサレス構造の特徴を生かし、シンプルな全閉自冷構造とし

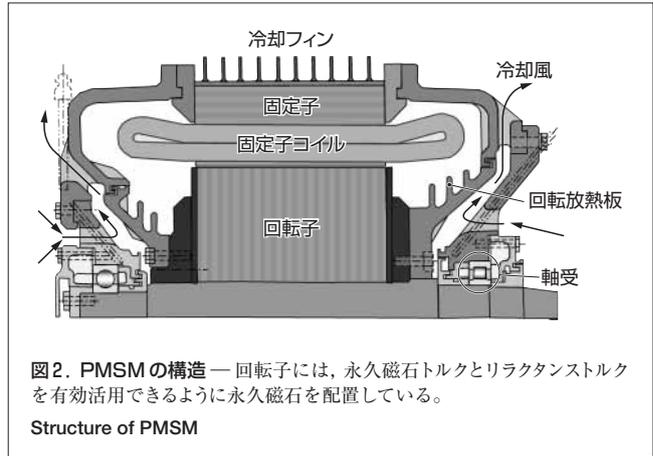


図2. PMSMの構造 — 回転子には、永久磁石トルクとリラクタンストルクを有効活用できるように永久磁石を配置している。

Structure of PMSM

た。回転部はラビリンス(迷路形状)による密閉度を確保する構造とした。

- (4) 冷却構造 全閉構造では、電動機全体の温度上昇が均一化する傾向があり、温度上昇限度の小さい軸受の温度上昇抑制がキーとなる。軸受周りには、空気層を設けて高温な機内空気からの熱を断熱すると同時に、回転フィンにより新鮮空気を導入する冷却構造とした。また、回転部機内側に複数の突起を設けることで、内気の吸熱面積を増大させ放熱を促進させる回転放熱板を用いた冷却構造とした。

2.3 単体での試験結果

- (1) 特性試験の結果 開発したPMSMの定格運転での負荷試験の結果を表3に示す。定格出力を設計値に合わせた場合の実測電流は設計電流以下であり、また効率も設計どおりであることが確認できる。
- (2) 温度上昇試験の結果 定格運転での温度上昇試験の結果を表4に示す。温度上昇限度に対していずれも問題ない値となっていることが確認できる。
- (3) 騒音試験の結果 開発したPMSMと既存誘導電動機の単体に対して、インバータ駆動で無負荷時の騒音試験の結果(機器表面から1mの5点での騒音平均)を表5

表3. 定格負荷試験の結果(熱時*, インバータ駆動)

Results of rated load tests

項目	連続定格		1時間定格	
	設計値	実測値	設計値	実測値
電圧 (V)	950	948	950	925
電流 (A)	163	156	186	181
回転数 (rpm)	2,960	2,960	2,960	2,960
入力 (kW)	243.5	243.6	278.4	278.4
出力 (kW)	235	235	270	270
効率 (%)	96.5	96.9	97.0	97.0
力率 (%)	91.0	90.5	91.0	90.5

*熱時: モータを運転し、加熱した状態

表4. 温度上昇試験の結果(インバータ駆動)

Results of temperature rise tests

項目		連続定格 235 kW		1時間定格 270 kW	
		設計	実測	設計	実測
温度 上昇	固定子(抵抗法) (K)	156	139	122	109
	永久磁石 (K)	144	126	80	77
	駆動側軸受 (K)	34	20	14	10
	反駆動側軸受 (K)	41	35	16	21
周囲温度 (°C)		—	30	—	28

* 模擬走行風は、平均2 m/s
 温度上昇限度は、固定子(抵抗法)：210 K、永久磁石：150 K、軸受：55 K

表5. 騒音試験の結果(無負荷時、インバータ駆動)

Results of noise tests

(単位：dBA)

回転数	既存誘導電動機 (自己通風方式)	PMSM (全閉自冷方式)
2,960 rpm	80.1	72.1
4,000 rpm	86.4	76.0
5,000 rpm	91.7	79.2
5,820 rpm	95.7	82.4

* 騒音値は主電動機表面から1 mの5点平均値

表6. 消費電力試験の結果

Results of electric power consumption tests

項目	既存誘導電動機			PMSM		
	40	100	130	40	100	130
到達速度 (km/h)	40	100	130	40	100	130
力行電力量 (Wh)	660	3,393	5,934	603	3,298	5,844
回生電力量 (Wh)	433	2,397	3,916	436	2,451	4,066
総合電力量 (Wh)	227	996	2,018	167	847	1,778

* フライホイール負荷装置を用いて、実際の列車を模擬して運転を実施
 運転パターンは、力行→10 s惰行→回生ブレーキ→停止

に示す。全閉自冷構造の採用と回転フィンの最適化により、特に高速域での通風音が大幅に低減でき、5,000 rpmで既存機に比べ約12 dBの低騒音化を実現した。

(4) 消費電力の比較 フライホイール負荷装置を用いて、実際の列車の運転を模擬したときの消費電力試験の結果を表6に示す。PMSMは、従来の誘導電動機と比較して、各条件で力行(りっこう)電力量が少なく、回生電力量が多いことがわかり、消費電力を約10%低減できることを確認した。

3 PMSMの主回路・制御システム

PMSMは、各電動機の永久磁石の回転角度方向に応じて最適な位相の電流を流し込むことによって、必要とするトルク出力制御が達成される。

このため、従来誘導電動機のように複数の電動機を1台の

インバータで制御することができず、1台の電動機に1台のインバータを接続する個別制御が必要になる。

個別制御方式は、インバータ故障時の冗長性が高く、雨天時、車輪レール間の空転滑走に対して個々にきめ細かく制御できるため、乗りごちと加速性能を向上できるなど多くのメリットがあるが、インバータ主回路装置としては大型化する方向になる。そこで、以下に示す装置小型化のための開発を進めてきた。

3.1 主回路パワーユニット

主に半導体スイッチング素子IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)とその冷却装置で構成される主回路パワーユニットは、インバータ主回路装置の主要コンポーネントであり、体積としても大きな割合を占める。

2台分のインバータ構成要素を一つのユニットに収めることで、共通構造部材を削減し、スペースの有効利用により小型化を実現した。開発したコンパクト2in1インバータユニットを図3に示す。

3.2 制御ユニット

従来、高速ベクトル制御に適用してきたパワーエレクトロ

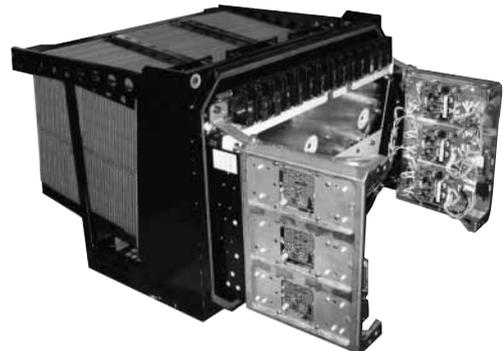


図3. コンパクト2 in 1 インバータユニット— 2台分のインバータ構成部品を1ユニットに収めて小型化を達成した。

Compact two-in-one inverter unit

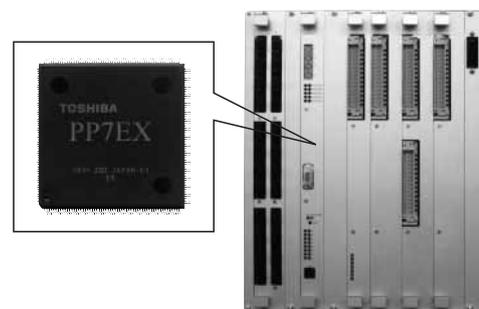


図4. コンパクト型制御ユニット— 新規開発のパワーエレクトロニクス専用プロセッサpp7EXの適用により、機能集約を図り、小型化を達成した。

Compact control unit

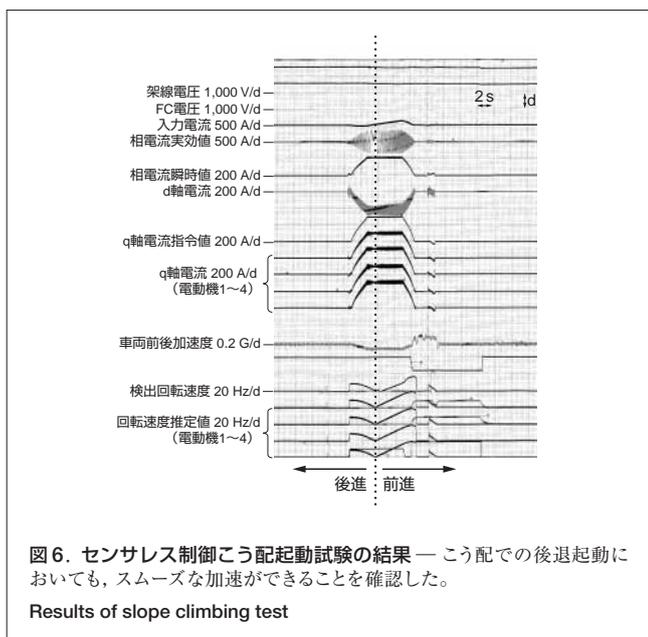
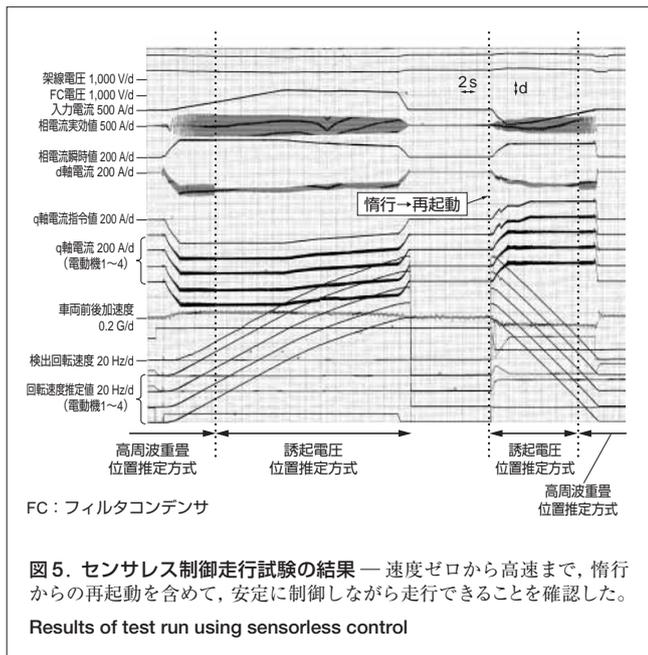
ニクス専用プロセッサ pp7の後継機種 pp7EXを新規開発し、これを適用したコンパクト型制御ユニットを開発した(図4)。

演算処理速度は従来比3倍で、2台の電動機制御を1チップで同時処理できる能力を最大限に生かして制御ユニットの小型化を実現した。

後述するセンサレス制御に必要な複雑な演算処理も、余裕を持って実現できる。

3.3 回転センサレス制御

従来の鉄道車両用誘導電動機制御では、発生トルクを精度良く制御するために、電動機端に速度センサを取り付けて



いたが、センサとインタフェース回路のコスト、電動機取付けスペース、部品点数削減による信頼性、及び配線工数などの観点からセンサレス化が望まれている。

誘導電動機での速度センサレス制御技術は既に完成し、営業車両に投入されて順調に稼働を始めている。PMSMの回転センサレス制御についても以下に示す方法を開発した。

PMSMにおいては、回転数に比例した永久磁石誘起電圧が発生するため、高速回転時には回転数及び回転角度を比較的容易に推定可能である。反対に、誘起電圧の小さい低速・ゼロ速度では正確な回転角度推定が困難になる。そこで、低速・ゼロ速度時には、電動機鉄心突極性を利用して、電動機自体を回転位置センサに見立てた、高周波電圧印加・電流応答検出方式により、高精度の回転角度推定を行い、安定でスムーズな低速・ゼロ速度特性を実現した(図5)。従来のセンサレス制御では難しかったこう配起動(坂道発進)も安定に実現できることを、試験車両で確認した(図6)。

4 あとがき

更なる低騒音及び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として、PMSM駆動システムの概要、及び適用検証結果について述べた。

地球温暖化に対する取組みは、国際社会の中で未来のために早期な着手が求められており、当社は、PMSM駆動システムの確立及び普及のため、努力を続けていく。

文献

- 蒲 浩志, ほか. “高効率な車両駆動システムの開発(在来線用全閉永久磁石同期電動機と回転角センサレス制御の開発)”. 鉄道技術・政策連合シンポジウム(J-Rail2005). 川崎, 2006-01, 土木学会. p.469 - 472.



山田 敏明 YAMADA Toshiaki

産業システム社 交通システム事業部 交通車両システム技術部主任。鉄道車両システムのエンジニアリング業務に従事。Transportation Systems Div.



中沢 洋介 NAKAZAWA Yosuke

電力システム社 電力・社会システム技術開発センター 社会システム開発部主査。パワーエレクトロニクス応用システムの研究・開発に従事。電気学会会員。Power and Industrial Systems Research and Development Center



白石 茂智 SHIRAIISHI Shigetomo

産業システム社 府中事業所 交通システム部グループ長。鉄道車両用主電動機の開発に従事。Fuchu Complex