

# 鉄道車両用 PMSM 主回路システム

PMSM Propulsion System for Rolling Stock

田坂 洋祐

■TASAKA Yosuke

鉄道車両駆動用の主電動機は、国内では1990年前後から誘導電動機(IM: Induction Motor)が主流となってきたが、2000年代後半から更なる省エネ性能向上のため、IMに比べて高効率な永久磁石を利用した永久磁石同期電動機(PMSM: Permanent Magnet Synchronous Motor)が採用され始めている。対象は、在来線用だけでなく、高速鉄道や機関車にも、PMSMの特長である高効率をそれぞれの車両に効果的に適用することで広がっている。

東芝は、様々な車種向けのPMSMを開発した実績を基に、国内のほぼ全ての路線にPMSMを提供できるラインアップを構築するとともに、駆動用に小型・軽量化を図った4in1インバータ装置を開発することで、既存のIMシステムからの置換えにも対応できるシステムを開発した。

Although induction motors (IMs) have been spreading into the mainstream of traction motors for rolling stock in the Japanese market since the 1990s, higher efficiency permanent magnet synchronous motors (PMSMs) have begun to be introduced not only in commuter trains but also in high-speed trains and locomotives since the late 2000s to improve energy efficiency.

Toshiba has developed a PMSM propulsion system for rolling stock based on its long accumulation of development experience in this field. The PMSM propulsion system consists of the following equipment capable of replacing the equipment of conventional IM propulsion systems: (1) high-efficiency fully enclosed PMSMs corresponding to the requirements of almost all type of rail lines in Japan, and (2) compact and lightweight 4-in-1 variable-voltage variable-frequency (VVVF) inverters.

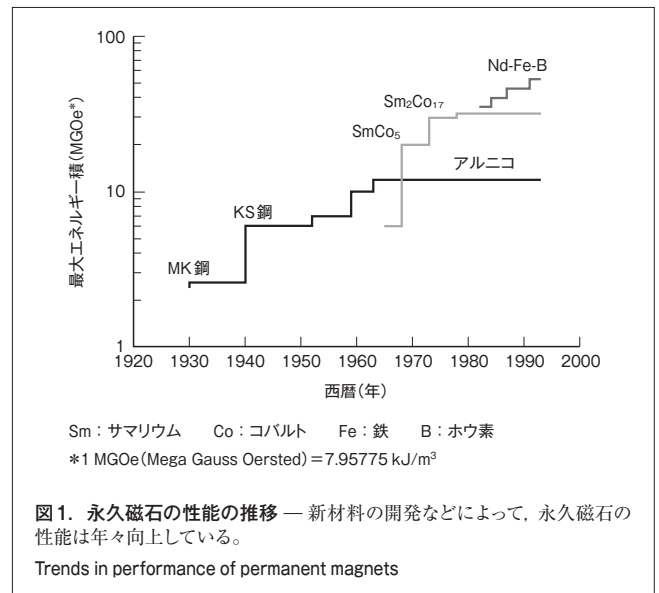
## 1 まえがき

鉄道車両の駆動用主電動機として、国内では1990年前後からIMが主流となっている。これはそれまで使用されていた直流電動機に比べてブラシのメンテナンスが不要になり、また整流子がないために小形・軽量化できるという大きなメリットがあったからである。一方、東日本大震災以降の環境意識の高まりや省エネ法(エネルギーの使用の合理化に関する法律)の改正に伴い、産業界全体で省エネ化が求められている。鉄道システムは、他の交通システムに比べて従来から省エネ性に優れていたが、環境性のいっそうの向上が求められるようになった。

このような背景から、2000年代後半から、鉄道車両駆動システムでも回転子に永久磁石を使用したPMSMが採用され始めている。ここでは、PMSMを採用することの利点、東芝の鉄道車両用PMSMの実績、PMSMを駆動する当社の最新のインバータ技術、及びPMSM主回路システムの今後の動向について述べる。

## 2 PMSM実用化の背景

当社は、1990年代から鉄道車両用PMSMの開発を行って



きた。

近年、PMSMが実用化されてきた背景には、高性能永久磁石の開発がある。永久磁石の性能が向上してきた推移を図1に示す。ネオジム(Nd)系に代表される高エネルギー積の永久磁石が実用化されたこと、及び磁石材料の耐熱性が向上したことにより、鉄道車両用主電動機にも永久磁石を適用でき

るようになった。

一方、IMの場合は1台のインバータで複数台の電動機を駆動できるのに対して、同期電動機 (SM) は同期速度でしか回転できないために1台の電動機に1台のインバータが必要になる。このため、主電動機の数だけインバータを搭載する必要があり、インバータ装置のサイズやコストに制約があった。しかしパワーエレクトロニクスや制御技術の発展により、これらの制約も克服されてきている。

### 3 PMSM採用のメリット

#### 3.1 低損失・高効率化

PMSMはIMと比べて高効率となるが、その最大の要因は、IMのロータバーに流れていた電流がなくなるため、この電流による損失がほぼ0となるからである。

標準的な自己通風IMと、これと同等の大きさで設計されたPMSMの損失の比較を図2に示す。ロータに2次電流が流れないため、2次銅損がなくなる。また、2次側の損失がなくなった分を1次側の低損失化に活用して1次銅損や鉄損なども減らせるため、PMSMの損失はIMの約50%になる。このため定格効率は、標準的なIMの場合が約91%であるのに対して、PMSMの場合には約97%になる。

このような低損失で高効率という特長から、PMSMではIMで実現できない性能向上を達成できる。主な改善項目とPMSMの効果を表1に示す。

鉄道車両にPMSMを適用する場合、表1に示した改善項目を車両の特徴に応じて活用することで、効果を上げることができる。代表的な鉄道車両である通勤電車、機関車、及び高速

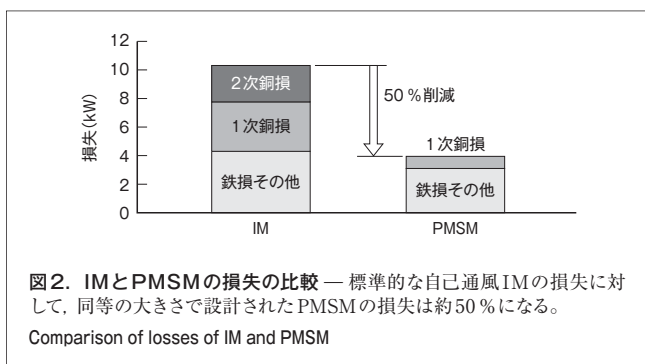


図2. IMとPMSMの損失の比較 — 標準的な自己通風IMの損失に対して、同等の大きさで設計されたPMSMの損失は約50%になる。  
Comparison of losses of IM and PMSM

表1. PMSMの効果

Advantages of PMSMs

No.	改善項目	効果
1	全密閉化	IMとほぼ同一質量で全密閉化が可能
2	大トルク化	IMと同サイズで、約30%の定格トルクアップが可能
3	小型・軽量化	IMの60~70%の質量で構成が可能

鉄道の場合について、次に述べる。

#### 3.2 通勤電車への適用

現在もっとも実用化例の多い通勤電車の場合、全密閉化の効果 (表1のNo.1) を活用することが有効である。

従来の全密閉化されていない主電動機では、外気を主電動機の内部に取り入れて冷却する方式が採用されている。そのため、主電動機内部が塵埃 (じんあい) などにより汚れ、定期的に主電動機を分解して内部を清掃する必要がある。全密閉化することにより、分解して清掃する必要がなくなり、保守作業を大幅に省力化できる。

一方で、主電動機を分解する必要がなくなるために、主電動機の保守で必須となる軸受交換を行うタイミングもなくなってしまおうという問題が生じる。そこで、主電動機を分解せずに軸受を交換できる方式を開発し、全密閉構造のメリットを十分に活用できるようにした (図3)。

もちろん、PMSMの高効率という特長のため、通勤電車の消費電力削減も実現できる。これを実証するため、東京地下鉄 (株) 銀座線01系車両の1両にPMSMシステムを搭載し、けん引力や回生ブレーキなどの特性は既存のIMシステムと同一の条件で長期間走行させた場合の消費電力量を測定した。この結果を図4に示す。消費電力量を約20%低減できることを確認した。

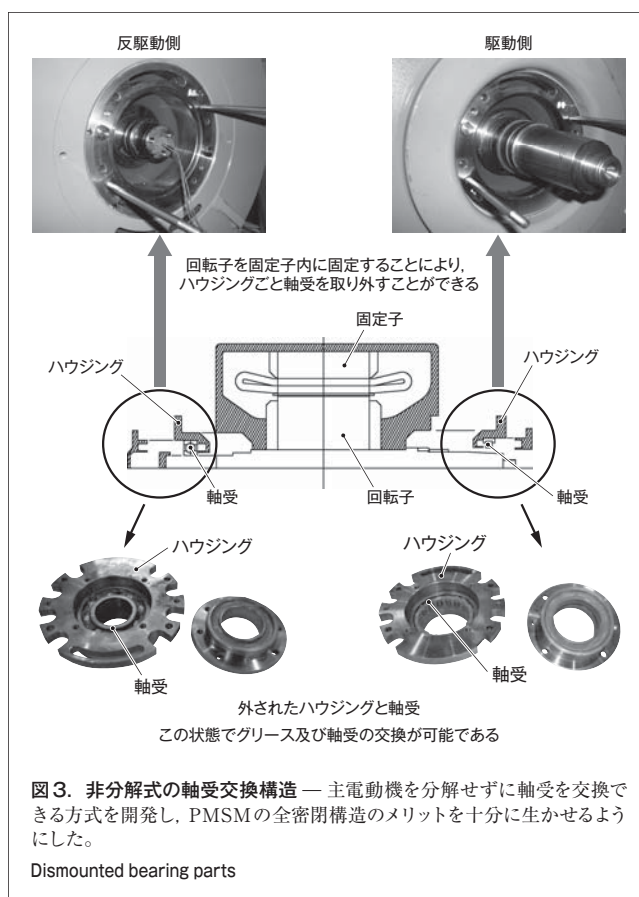
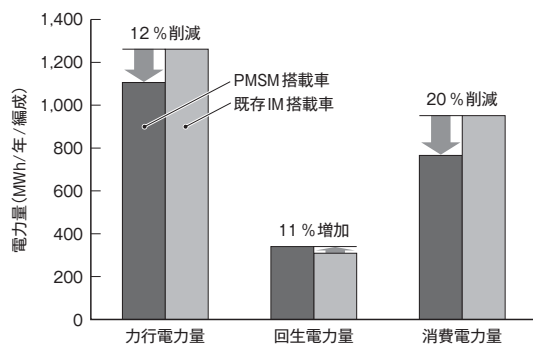


図3. 非分解式の軸受交換構造 — 主電動機を分解せずに軸受を交換できる方式を開発し、PMSMの全密閉構造のメリットを十分に生かせるようにした。

Dismounted bearing parts



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>[1]</sup> (2007年11月18日～2009年5月21日の積算値)から換算

図4. 消費電力量の削減効果 — PMSMを実際の車両に搭載して長期間走行させ、消費電力量を測定した。同一の特性で走行させた既存のIMシステムと比べて消費電力量を約20%低減できる。

Reduction of electricity consumption

### 3.3 機関車への適用

機関車の場合、動力を集中させているシステムであるため、IMと同一寸法で、定格トルクをアップさせること(表1のNo.2)が効果的である。同時にPMSMの高効率という特長による省エネ効果も実現できる。

特に機関車用のIMは起動時などの低速時の損失が大きいため、PMSMとすることで低速時の大幅な損失低減が達成可能になる。また機関車の場合、もともと個別制御のケースが多いため、PMSMシステムを導入してもインバータ装置のサイズやコストが増加することの影響は小さいと言える。

### 3.4 高速鉄道への適用

高速鉄道の場合には、小型・軽量化の要求が大きく、この面でのアプローチ(表1のNo.3)が効果的になる。また省エネの観点でも、PMSMの高効率が寄与できる。

## 4 東芝のPMSM主回路システム納入実績

当社は1990年代から鉄道車両用PMSMの開発を行っており、様々な車種で実績を積んできた。ここでは、2005年以降に営業運転用として納入した事例を中心に述べる。

### 4.1 通勤電車

- (1) 東京地下鉄(株) 02系・1000系車両用PMSM主回路システム 丸ノ内線02系車両用は2010年2月から、銀座線1000系車両用は2012年4月から営業運転に使用されている。DC(直流)600V架線用で営業投入された量産形のPMSM主回路システムとして、世界初のシステムである。車両と装置の外観を図5に示す。
- (2) 東京地下鉄(株) 16000系車両用PMSM主回路システム 千代田線で2010年11月から営業運転に使用されている。DC1,500V架線用で営業投入された量産形



(a) 1000系車両

(b) 02系車両



(c) VVVFインバータ装置

(d) PMSM

図5. 東京地下鉄(株) 1000系と02系車両, VVVF (Variable Voltage Variable Frequency) インバータ装置, 及びPMSM — DC600V架線用で、営業投入された量産形のPMSM主回路システムとして世界初のシステムである。

1000 series and 02 series trains, VVVF inverter, and PMSM of Tokyo Metro Co., Ltd.



(a) 16000系車両



(b) PMSM

図6. 東京地下鉄(株) 16000系車両及びPMSM — DC1,500V架線用で、営業投入された量産形のPMSM主回路システムとして国内初のシステムである。

16000 series train and PMSM of Tokyo Metro Co., Ltd.

のPMSM主回路システムとして、国内初のシステムである。車両とPMSMの外観を図6に示す。

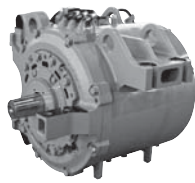
### 4.2 機関車

機関車用のPMSM主回路システムとしては、2010年に試作車を出荷した日本貨物鉄道(株) 構内入換用HD300形式ハイブリッド機関車のシステムが挙げられる。主電動機として、全閉自冷式及びびつり掛け駆動方式を採用している。車両とPMSMの外観を図7に示す。

構内入換用機関車は、通常20～25km/h以下の速度で運転される。この速度域で運転した場合、PMSMを用いたシステムの運転効率はIMを用いた場合に比べて10%以上高く、ハイブリッドシステムとしての効率向上と燃費向上に大きく貢献している。



(a) HD300形式ハイブリッド機関車



(b) PMSM

図7. 日本貨物鉄道(株) HD300形式ハイブリッド機関車及びPMSM  
— 主電動機として、全閉自冷式及びつり掛け駆動方式を採用している。  
Type HD300 diesel hybrid shunting locomotive and PMSM of Japan Freight  
Railway Company

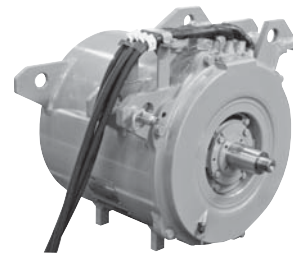


図9. 狭軌軌道用240kW PMSM(1時間定格) — 新たに開発した、  
狭軌軌道用としては最大級のPMSMであり、これにより、国内ほぼ全ての  
路線にPMSMを提供できるラインアップがそろった。  
Newly developed PMSM (240 kW - 1 h)

## 5 PMSM用インバータ装置

2章で述べたとおり、PMSMは同期電動機であるため、主電動機の回転数に同期した制御が必要になる。一方、鉄道用駆動システムには、車輪の空転や滑走の問題が必ず存在する。そのため、インバータとPMSMは、1対1の構成とすることが必須になる。これは、1台のインバータで複数の主電動機を駆動できるIM主回路システムに比べて、インバータ装置の寸法が大きくなる傾向にあることを示す。鉄道車両用の電機品は、一般に床下に設置されるため、設置するスペースが限られていることが多く、インバータ装置の小型化は非常に重要である。

そこで当社は、1台の冷却器で4台のインバータ回路を冷却する4in1インバータユニットを開発し、また制御を高機能化することで、1台の制御ユニットで4台のPMSMを制御することを可能にした。これにより、従来のPMSM用インバータ装置と比べて、体積で60%の小型化、質量で50%の軽量化を達成し、IMシステム用と同等の大きさのインバータ装置を実現した。開発した装置の外観を図8に示す。

この装置は、阪急電鉄(株)8000系車両に搭載され、2012年8月から営業運転が行われている。



図8. 4in1インバータ装置 — 1台の制御ユニットで4台のPMSMを制御することを可能にして、従来のPMSM用インバータ装置に比べて60%の小型化と50%の軽量化を達成した。  
4-in-1 traction inverter

## 6 今後のPMSM主回路システム

台車内の設置スペースが厳しく制約を受ける狭軌軌道用のPMSMとして、最大級の240kW(1時間定格)を達成できる機種(図9)を開発した。これにより、国内ほぼ全ての路線にPMSMを提供できるラインアップがそろった。

これらの要素技術は海外の鉄道にも適用が可能であり、今後は海外への展開も目指すとともに、鉄道車両用システムとして更なる改善と開発を推進する。

## 7 あとがき

鉄道車両用PMSM主回路システムの動向について述べた。昨今、エネルギー問題や環境問題への関心が高まるなか、鉄道車両システムとしても更なる省エネを推し進めていく必要がある。そのなかでPMSM主回路システムは一つの有力な解である。

当社は、今後も新技術及び新製品の開発を進め、鉄道事業発展への貢献を目指している。

## 文 献

- (1) 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.



田坂 洋祐 TASAKA Yosuke

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主務。鉄道車両電機品のエンジニアリング業務に従事。

Railway & Automotive Systems Div.