

省エネ性能を追求した鉄道車両用主回路システム

High Energy-Saving Propulsion Systems for Rolling Stock

門岡 昇平

■ KADOOKA Shohei

東芝は、全社を挙げて環境負荷の低減に貢献するモノづくりを推進している。鉄道分野においても、時代に先駆けた省エネ性能を実現した機器を開発し、適用を進めている。

鉄道車両を駆動する主回路システムにおいては、低騒音、保守作業の省力化、及び省エネ性能を実現した全密閉タイプの誘導電動機 (IM) と永久磁石同期電動機 (PMSM) を開発し、また、装置の小型・軽量化が可能で省エネ性能を実現した次世代素子の炭化ケイ素 (SiC) を用いた駆動用インバータ装置を開発した。それぞれについて、実証試験や営業線での追跡調査を実施した結果、消費電力量の低減を確認した。

Toshiba is committed to developing and delivering environmentally conscious products and services. In the field of railway systems, we are engaged in the development and application of various products offering high energy-saving performance.

We have developed energy-saving propulsion systems for rolling stock comprising the following equipment: (1) totally enclosed induction motors (IMs) and permanent magnet synchronous motors (PMSMs) that achieve energy saving and low noise while requiring less maintenance work; and (2) inverters equipped with silicon carbide (SiC) devices, one of the next-generation power devices providing energy saving, compactness, and light weight. From the results of demonstration experiments and data obtained in actual commercial operations, we have confirmed that these systems achieve significant reductions in power consumption.

1 まえがき

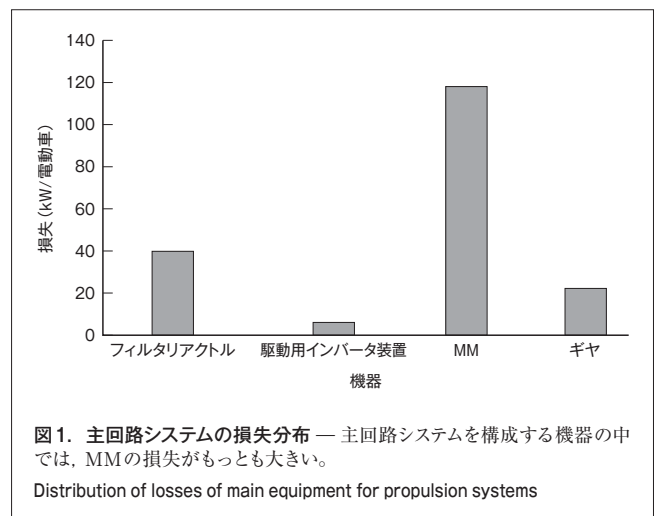
近年、地球温暖化や大気汚染などの環境問題の顕在化により、環境性能や省エネ性能に優れた鉄道システムでも、更なる改善が強く求められている。

東芝は、1990年代以降、鉄道システムで主流となっている誘導電動機 (IM: Induction Motor) 駆動システムに対し、省エネ性能が向上する全密閉タイプのIMや、更なる省エネ化が可能な永久磁石同期電動機 (PMSM: Permanent Magnet Synchronous Motor) 駆動システムを他社に先駆けて開発した。そして、その優れた環境性能や省エネ性能が多くの鉄道事業者から高評価を受け、数々の実証試験や営業線への導入を積み重ねてきた。更に、低損失化が期待されている炭化ケイ素 (SiC) を用いた駆動用インバータ装置も開発し、車両へ搭載して営業運用を開始している。

ここでは、IM及びPMSM駆動システムに関する最新技術とともに、省エネ性能の実証結果について述べる。

2 省エネを実現するための施策

鉄道車両で省エネ化を検討するアプローチとして、車両を動かす力行時の電力削減と車両を減速させるときに発生する回生電力の有効活用が挙げられる。



力行時の電力量削減では、図1に示すように、主回路システムの機器の中で主電動機 (MM: Main Motor) の損失の割合がもっとも高いことに着目し、MMの高効率化に向けた開発を重点的に進めた。その結果として、全密閉IM及び全密閉PMSMを開発した。

回生電力では、電力量自体の向上とその有効活用が必要となる。回生電力量の向上は、高効率を実現可能なPMSMを用いた駆動システムと、低損失で耐圧・耐熱性に優れているSiCを適用したインバータ装置で実現した。また、回生電力の

有効活用としては、車両に蓄電池を搭載することで、回生できなかった電力を吸収し、回生失効を防ぐシステムの開発を進めている。

3 省エネを実現する主回路システム機器

ここでは、主回路システムの省エネ化を実現する機器について、それぞれの特徴や開発の経緯を述べる。

3.1 MM

3.1.1 IMとPMSM IMをMMとして用いる主回路システムは今や成熟したシステムとなっているが、このIMやPMSMといったMMには、更なる高効率化による省エネ化を実現するためのよりいっそうの小型・軽量化や、通風冷却による機内への塵埃（じんあい）侵入・堆積に伴う分解・清掃作業や軸受交換作業に対する保守作業の省力化、回転時の騒音低減など、特に環境に配慮したニーズに応える進化が求められていた。その対応策としてMMの全密閉化が挙げられる。全密閉化により機内清掃レスや低騒音化も実現できることから、1990年代から開発を進めてきた。全密閉化では、熱放散がMM表面だけになり、全体的に均等に温度上昇するため、結果的に熱的な裕度のもっとも小さい軸受部がネックになる。この問題を解消するため、軸受部と発熱部を冷却仕切り円盤により断熱することで、高出力タイプのMMでもグリース潤滑軸受構造を採用することが可能になった。全密閉IM及び全密閉PMSMの主な適用例を、それぞれ表1及び表2に示す。また、代表的なMMを図2に示す。

3.1.2 保守作業の省力化と低騒音 従来の全密閉化されていないMMでは、自己通風冷却方式^(注1)などの外気を内部に取り入れる冷却方式が採用されている。そのため、塵埃などで内部が汚れ、定期的に分解して清掃する必要がある。全密閉化することにより、分解清掃の必要がなくなり、保守作業を省力化できる（図3）。

表1. 東芝の全密閉IMの開発実績と計画

Actual and planned deliveries of Toshiba totally enclosed IMs

納入年	事業者/車系又は形式	1時間定格出力 (kW)	状況
1997	大阪市交通局/23系	140	試験
2003	米国 Metra/Highliner1	160 (連続)	量産
2006	西日本鉄道(株)/3000形	175	量産
2007	名古屋鉄道(株)/3300系	170	試験
2009	新京成電鉄(株)/8000形	160	量産
2009	東京急行電鉄(株)/7000系	190	試験
2012	東京急行電鉄(株)/7500形, 7550形	190	量産
2014	東日本旅客鉄道(株)/E235系	140	量産
2016	西日本鉄道(株)/9000形	175	量産

(注1) MM内部のファンで外気を取り入れて冷却する方式。

表2. 東芝の全密閉PMSMの開発実績と計画

Actual and planned deliveries of Toshiba totally enclosed PMSMs

納入年	事業者/車系又は形式	1時間定格出力 (kW)	状況
2004	西日本旅客鉄道(株)/213系	270	試験
2007	東京地下鉄(株)/O1系	120	試験
2009	東京地下鉄(株)/O2系	120	量産
2010	東京地下鉄(株)/16000系	205	量産
2011	東武鉄道(株)/30000系	190	試験
2012	東京地下鉄(株)/1000系	120	量産
2013	阪急電鉄(株)/1000系	190	量産
2014	北大阪急行電鉄(株)/9000形	170	量産
2015	九州旅客鉄道(株)/305系	150	量産
	阪神電気鉄道(株)/5700系	190	量産
	シンガポール SMRT社/C151系	145	量産
2016	京浜急行電鉄(株)/新1000形	190	量産
	京王電鉄(株)/8000系	150	量産
	西武鉄道(株)/40000系	190	量産
	東武鉄道(株)/500系	190	量産
	シンガポール SMRT社/C651系	145	量産

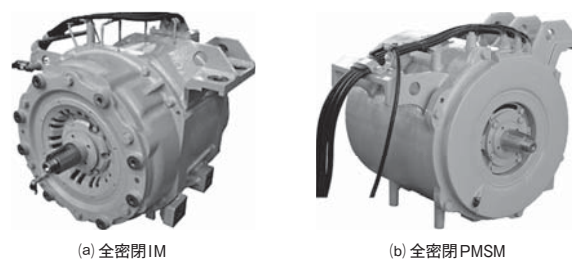


図2. 代表的なMM — 開発した全密閉IMと全密閉PMSMである。
Totally enclosed IM and PMSM

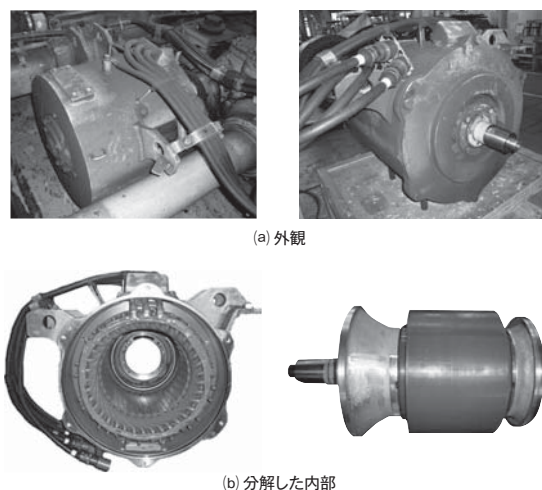


図3. 3年間営業走行したPMSMの内部分解調査 — 全密閉化によりPMSM内部の汚損防止効果が得られ、分解清掃の必要がなくなり、保守作業を省力化できる。

Inspection of disassembled totally enclosed PMSM after three years of operation

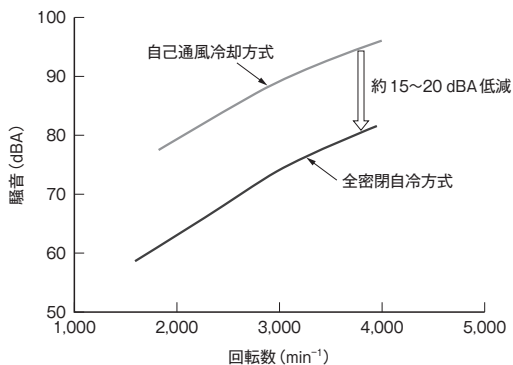


図4. 自己通風冷却方式と全密閉自冷方式のMMの騒音比較 — 全密閉化により、MMの低騒音化が実現できる。
Comparison of noise emission of self-ventilation-cooled and totally enclosed nonventilated motors

全密閉化により、MM外部への騒音についても、全密閉自冷方式^(注2)では、自己通風冷却方式と比較して15～20 dBAの低騒音化が実現できることを確認した(図4)。

3.2 インバータ装置

3.2.1 PMSM駆動用インバータ装置 PMSMを用いた鉄道車両では、原理上、1台のインバータで複数台のPMSMを並列に駆動することができず個別駆動が必須となるため、複数台のIMを並列駆動できるIM駆動用インバータより大型化することがデメリットであった。そこで当社は、4台のPMSMを駆動する回路を1台のパワーユニットに実装した、4in1インバータ装置を開発し、従来の当社製PMSM駆動用インバータ装置と比較して体積で60%、質量で50%の削減を実現した。4in1インバータ装置では、2回路分(上下アーム1相分)のスイッチング素子を内蔵した高耐熱の絶縁ゲートバイポーラトランジスタ(IGBT)モジュールを採用している(図5)。この装置は従来のIM駆動用インバータ装置とほぼ同等サイズまで小型化しているため、新造車両への適用はもちろん、更新車両^(注3)に対する既設装置からの置換えも可能である(図6)。

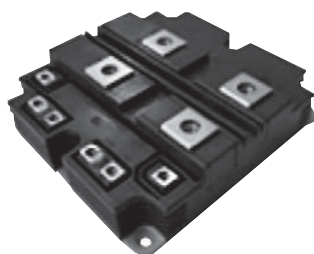


図5. 3,300 V-500 A-2in1モジュール — 2回路分の高耐熱IGBTを内蔵することで、モジュールを小型化した。
3,300 V-500 A 2-in-1 module element

(注2) MMと空気との接触面からの放熱だけで冷却する方式。



図6. 4in1インバータ装置(1群タイプ) — 4台のPMSMを駆動する回路を実装して小型・軽量化したPMSM駆動用インバータ装置を開発した。
4-in-1 inverter unit (1-set type)

3.2.2 SiCを用いたインバータユニット 更なるインバータの高効率化を図るために、従来のシリコン(Si)を用いたIGBTから、SiCを用いた低損失ハイブリッドIGBTに置き換えたSiCインバータユニットを開発した。IM駆動システム用及びPMSM駆動システム用それぞれのラインアップがあり、現車試験の結果、両方とも良好な結果が得られたことで、量産採用が決定し、営業運行を開始している。

4 省エネ効果

3章で説明したIM駆動システム、PMSM駆動システム、及びSiCインバータユニットにおける省エネ効果について述べる。

4.1 IM駆動システムの省エネ効果

表1に示した名古屋鉄道(株)3300系に搭載した全密閉自冷方式のIMで、既存の自己通風冷却方式のIMに対して約9%の省エネ効果が実測された(約8万km走行時点)⁽¹⁾。

また、同じ表1に示した西日本鉄道(株)3000形に搭載した全密閉外扇冷却方式^(注4)のIMでは、実測効率が94.2%であり、従来の自己通風冷却方式のIMにおける実測効率92.1%に対し2%の高効率化を実現した⁽²⁾。

4.2 PMSM駆動システムの省エネ効果

主回路システムとしてPMSM駆動システムを搭載した阪急電鉄(株)の1000系新造車を、既存車系と原単位で比較したのが図7である。PMSMを搭載した1000系では、自己通風冷却方式のIMを搭載した9000系に対し、消費電力量が約40%削減されている。更に、8000系、7000系、及び5000系と比較すると、それぞれ約47%、約53%、及び約64%削減されている⁽³⁾。

次に、京王電鉄(株)の8000系車両における更新前後の原単位を比較した結果を図8に示す。IMからPMSMへ更新したことで、約43%の消費電力量が削減されている⁽⁴⁾。

(注3) 車体を再利用し、電機品を更新した鉄道車両の総称。車体は30～40年使用されることが多い反面、主な電機品は15年前後で寿命を迎えるため、電機品だけ更新されることが多い。

(注4) MM内部は密閉化されているが、外側に空気が流れる通り道があり、主にその流れる空気によってMM内部の熱を放熱する方式。

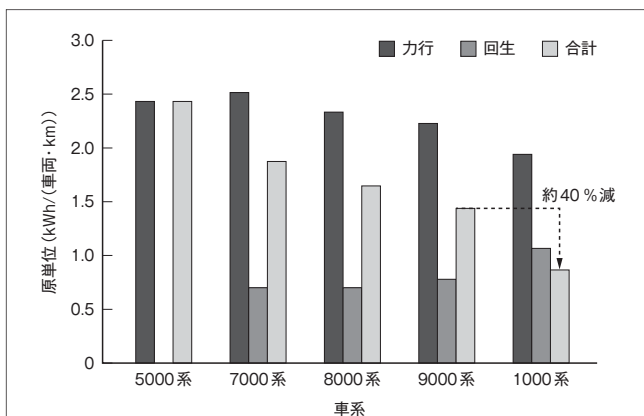


図7. 阪急電鉄(株)の車両における原単位比較 — PMSMを搭載した1000系は、歴代のIMを搭載した車両と比較して、高い省エネ性能を示している。

Comparison of power consumption of Hankyu Corporation trains

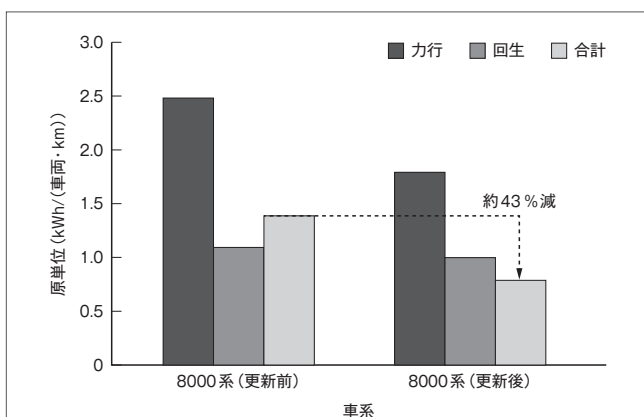


図8. 京王電鉄(株)の車両における原単位比較 — IMからPMSMに更新したことで高い省エネ効果が得られている。

Comparison of power consumption of Keio Corporation trains

4.3 SiCインバータユニットの省エネ効果

4.3.1 IM駆動システムへのSiC適用効果⁽⁵⁾ IM駆動用インバータ装置に、SiCインバータユニットを適用し、SiデバイスによるSiインバータユニットを適用したIM駆動用インバータ装置と消費電力量の比較を行った。

9か月間の合計消費電力量を測定した結果、SiCインバータユニットでは166,698.8 kWhであり、Siインバータユニットでの177,318.3 kWhの94%であった。ハイブリッドSiCデバイスによる低損失化や同期多パルスモード制御の適用効果により、従来のSiインバータユニットを適用したIM駆動システムに比べて、約6%の消費電力量削減効果が確認できた。

4.3.2 PMSM駆動システムへのSiC適用効果⁽⁶⁾

PMSM駆動用インバータ装置でも、同様に消費電力量の比較を行った。

2時間程度走行する間の消費電力量を測定した結果、SiCインバータユニットでは179.115 kWhであり、Siインバータユ

ニットでの183.644 kWhの97.5%と約2.5%の消費電力量の削減効果が確認できた。また、SiCインバータユニットを適用したPMSM駆動用インバータ装置のサーミスタ温度は、Siインバータユニットを適用した場合のサーミスタ温度に比べ3~5℃低くなっており、SiC適用により、PMSM駆動用インバータ装置の損失が低減していることが確認できた。

5 あとがき

当社が取り組んでいる鉄道用主回路システムにおける省エネ機器について、その特徴と省エネ効果について述べた。IM及びPMSM駆動システムや、SiCインバータユニットは、既に実用・量産化の段階にあり、多くの鉄道事業者の車両に搭載され、高い省エネ効果を実現している。

今後も、新たな省エネ機器の技術開発を進めながら、今回述べた省エネ機器を最適に組み合わせることで、世界中の鉄道車両におけるよりいっそうの省エネ化に貢献していく。

文献

- (1) 村上 理 他. “環境に配慮した主電動機の開発”. 第46回鉄道サイバネ・シンポジウム論文集. 大阪, 2009-11, 日本鉄道サイバネティクス協議会. 2009, 論文番号507.
- (2) 白石茂智 他. “全閉外扇式主電動機の開発と現車試験結果”. 第41回鉄道サイバネ・シンポジウム論文集. 東京, 2004-11, 日本鉄道サイバネティクス協議会. 2004, 論文番号505.
- (3) 廣田航介. PMSMシステム導入の省エネ効果と阪急電鉄における主回路の変遷. 鉄道車両と技術. 21, 5, 2015, p.15-19.
- (4) 門岡昇平 他. “標準PMSM及び駆動用4in1インバータシステムの開発と適用の広がり”. 第52回鉄道サイバネ・シンポジウム論文集. 大阪, 2015-11, 日本鉄道サイバネティクス協議会. 2015, 論文番号508.
- (5) 杉山明央 他. “西日本鉄道株式会社3000形車両向け3.3kV SiCハイブリッドIGBT適用インバータ装置の実証試験”. 第51回鉄道サイバネ・シンポジウム論文集. 東京, 2014-11, 日本鉄道サイバネティクス協議会. 2014, 論文番号512.
- (6) 田坂洋祐 他. 省エネと環境性能に寄与する鉄道車両用PMSMドライブシステム. 東芝レビュー. 69, 4, 2014, p.28-32.



門岡 昇平 KADOOKA Shohei

インフラシステムソリューション社 鉄道システム事業部 車両システム技術部. 鉄道車両電機品のエンジニアリング業務に従事。
Railway Systems Div.