

環境に優しい鉄道車両用 全閉自冷式主電動機

Eco-friendly Totally Enclosed Type Traction Motor for Commuter Trains

富川 英朝 村上 理 小山 泰平

■ TOMIKAWA Hidetomo ■ MURAKAMI Satoru ■ KOYAMA Taihei

鉄道車両用主電動機は、台車に取り付けられ、粉じんや風雨などの厳しい環境下で使用される。外気を取り入れた冷却方式であるため、数年ごとに分解清掃が必要となる。

東芝は、保守の省力化、低騒音化、及び高効率化の要望に応えるために、全閉自冷式主電動機を開発した。業界の先駆けとしてオイル潤滑式の軸受を用い、熱流体解析を中心に構造解析と電磁界解析を連携させ、シンプルで冷却効率の良い新しい冷却構造を実現した。既にいくつかの鉄道会社の営業線でこの主電動機が現車評価されており、今回、新京成電鉄(株)で本格的に採用された。

Toshiba has been developing totally enclosed type traction motors with oil-lubricated bearings aiming at the realization of environmentally conscious products by improving maintainability, achieving energy saving through high-efficiency operation, and reducing noise.

We have developed new totally enclosed type traction motors with oil-lubricated bearings by adopting a new cooling structure that makes it possible to reduce the temperature of the bearings. This simple structure with high cooling efficiency was designed by thermal fluid analysis in conjunction with structural analysis and electromagnetic analysis. We have supplied the new traction motors to Shin-Keisei Electric Railway Co., Ltd. for the 8000 series commuter trains that have been changed to the variable-voltage variable-frequency (VVVF) system, which were put into service in March 2008 as the first commuter trains in the industry equipped with motors of this type.

1 まえがき

地球温暖化対策として二酸化炭素(CO₂)の排出量削減が急がれるなか、鉄道輸送は、ほかの輸送手段に比べて環境に優しいシステムと言われている。VVVF (Variable Voltage Variable Frequency) インバータの実用化以降、誘導電動機駆動システムが主流で、直流電動機に比べ構造が簡素化されたことからメンテナンスが容易になり、高速回転化による小型・軽量化も実現可能となった。しかし、台車に取り付けられ、粉じんや風雨など厳しい環境下で使用される車両用主電動機は、外気を取り入れて冷却されるため、長期間の使用で内部に粉じんがたい積し、数年ごとに主電動機の分解清掃をする定期的なメンテナンスが必要である。

東芝は、保守の省力化、低騒音化、及び高効率化の要望に応えるため、全閉自冷式主電動機の開発を行ってきた。以前から、大阪市交通局や名古屋鉄道(株)で試験搭載され、営業線において現車評価されており、今回、新京成電鉄(株)で本格的に採用された。ここでは、この全閉自冷式主電動機の概要と特長について述べる。

2 全閉自冷式主電動機の概要

新京成電鉄(株)8000形車両の仕様を表1に示す。改造前

表1. 新京成電鉄(株)8000形車両の仕様

Specifications of 8000 series train of Shin-Keisei Electric Railway Co., Ltd.

項目	仕様
編成	4M2T (Tc ₂ -M ₂ -M ₁ -M ₂ -M ₁ -Tc ₁)
電気方式	DC1,500 V
最高速度	110 km/h
加速度	3.0 km/h/s
減速度	常用最大4.0 km/h/s 非常4.5 km/h/s
軌間	1,435 mm

M : 台車に主電動機を搭載した電動車両 DC : 直流
T : 台車に主電動機を搭載していない付随車両
Tc : 運転台付きの付随車両

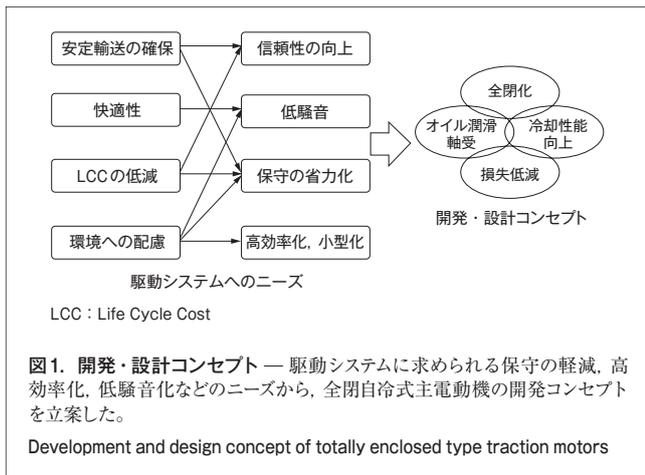
は界磁チョップと直流電動機を搭載していたが、VVVF化改造を行い、4両の電動車両にそれぞれ4台ずつ全閉自冷式の誘導電動機を搭載した。

2.1 開発・設計コンセプト

開発・設計のコンセプトを図1に示す。

誘導電動機の保守は、通常、分解清掃と軸受・グリス交換である。車両用主電動機は、開放型で外部から冷却風を取り入れるため、全閉化することで内部の汚損がなくなるが、冷却効率が悪くなり、更なる温度低減が必要である。

軸受部は、構造の適正化や高耐熱・長寿命グリスの採用で保守の省力化に対応してきた。しかし、グリスの熱劣化



を抑えて潤滑性能を長期間保持するためには、軸受部の温度上昇を低く抑える必要がある。小型化を追求した車両用主電動機では限界があり、グリース潤滑ではなくオイル潤滑にすることで交換周期を長くできる。

小型・軽量化は、イニシャルコスト削減、省エネ、及び機器点数の削減などのために、車両用主電動機改善の重要課題である。小型・軽量化するには、冷却効率の向上、発生損失の低減、及び高耐熱絶縁システムの採用が必要である。高効率化も、鉄道車両の走行に必要なパワーが少なくなり、電力消費量が低減でき、省エネや省資源化のために非常に重要である。

冷却効率を高めて全閉化し、オイル潤滑の軸受を採用することは、保守の省力化と高効率化につながる。更に、全閉化は機内通風騒音を大幅に低減し、沿線環境や快適性の改善に効果的である。

これらの複雑に関連しあった課題を考慮して最適な設計とするため、これまで培ってきた技術に、熱流体解析を中心として構造解析と電磁界解析をそれぞれ連携させ、開発・設計を進めた。

2.2 定格と構造

全閉自冷式主電動機の仕様を表2に、外観を図2に示す。

表2. 全閉自冷式主電動機の仕様

Specifications of traction motor

項目	仕様	
方式	かご形誘導電動機	
冷却方式	全閉自冷式	
軸受	オイル潤滑	
定格	種類	1時間定格
	出力	160 kW
	線間電圧	1,100 V
	相電流	117 A
	回転速度	1,585 min ⁻¹
	周波数	80 Hz
すべり	0.85 %	
質量	785 kg	



オイル潤滑の軸受を採用し、長期非分解を実現した。また、従来の全閉自冷式主電動機にあった冷却装置をなくしたことで、シンプルな構造を実現している。

3 要素技術

3.1 冷却技術

全閉化での大きな課題である内部温度の低減に対して、熱流体解析を用いて冷却性能の向上に取り組んだ。特に内部の温度を可視化することで、軸受付近の温度を把握でき、新しい冷却構造にした。

内部構造と伝熱経路を図3に示す。ステータで発生した熱は、主電動機表面へ伝導され、表面から外気へ放熱される。一方、ロータで発生した熱は、駆動側と反駆動側に設置され



た回転放熱円盤に伝導する。主電動機の稼働に伴うファン作用で熱伝達を促進する機能を兼ね備えている。また、軸受に対して、温度上昇を抑える構成となっている。

モータ全体の固体部、流体部ともにモデル化し、走行風を考慮するとともに、流入と流出の条件は大気圧として熱流体解析を行った。解析モデルと解析条件を図4に示す。

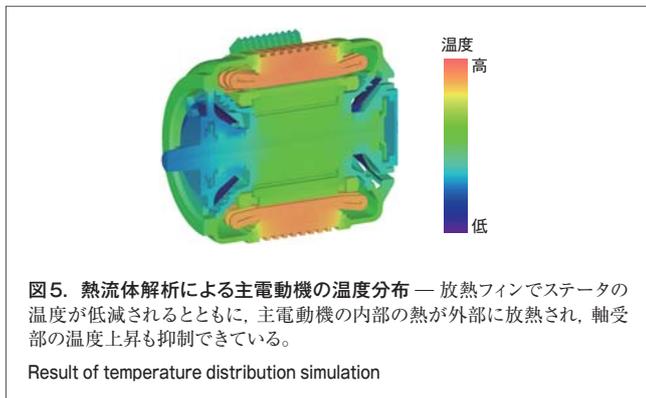
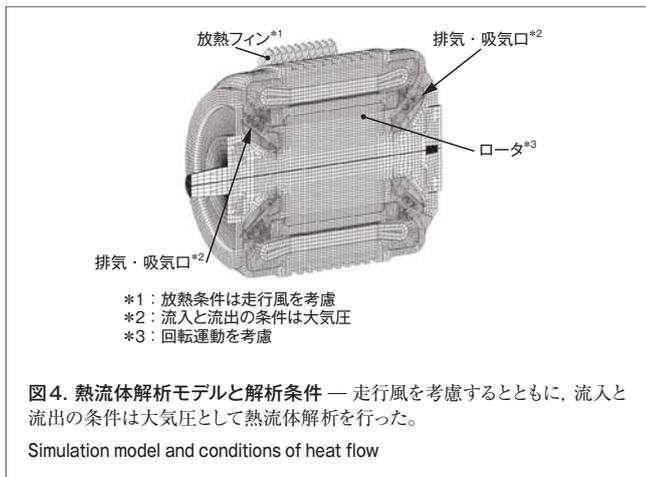
主電動機の温度分布を図5に示す。外表面に設置された放熱フィンにより、ステータの温度が低減している。また、主電動機内部の熱が回転放熱円盤で外部に放熱され、更に、軸受部の温度上昇も抑制できていることが確認できる。

回転放熱円盤の冷却性能について、一般的な回転円盤による実験式(1)から回転での局所熱伝達率(h_r)を計算すると、約45 W/m²Kと算出できる。

$$Nu_r = \frac{h_r r}{\lambda} = 0.616 Re_\omega^{0.5} Pr^{0.43} \quad (1)$$

ここで、 Nu_r ：局所ヌセルト数、 r ：中心からの距離、 λ ：熱伝導率、 Re_ω ：回転レイノルズ数、 Pr ：プラントル数、とする。

静止円盤の熱伝達率5～10 W/m²Kに対して、回転放熱円盤では4～9倍の熱伝達率となる。熱流体解析から回転放熱円盤表面の熱伝達率分布は、円盤の外周付近では30～60 W/m²Kで実験式により求めた値とほぼ等しく、中央付近



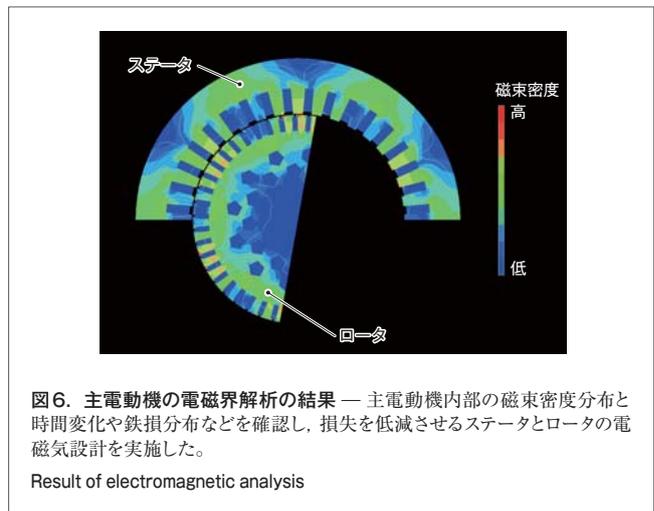
では100 W/m²Kを超えており、十分な冷却性能がある。これにより、冷却効率の向上に大きな役割を果たしていることが確かめられた。

3.2 オイル潤滑軸受技術

オイル潤滑方式を採用することで、潤滑材の熱劣化による交換周期をグリースより長くでき、主電動機を分解することなくオイル交換が可能である。これは「長期無分解」の特長を持つ全閉自冷式主電動機に適した軸受潤滑方式と言える。駆動側及び反駆動側のオイルタンクはパイプでつなぐ構造とし、メンテナンス時のオイル交換では、駆動側に設けた給油口1か所から給油し、駆動側に設けた排油口1か所から排出できる。また、軸受は転動体にセラミックを採用し、電食防止を図るとともに潤滑耐久性を向上させている。

3.3 高効率化及び小型・軽量化技術

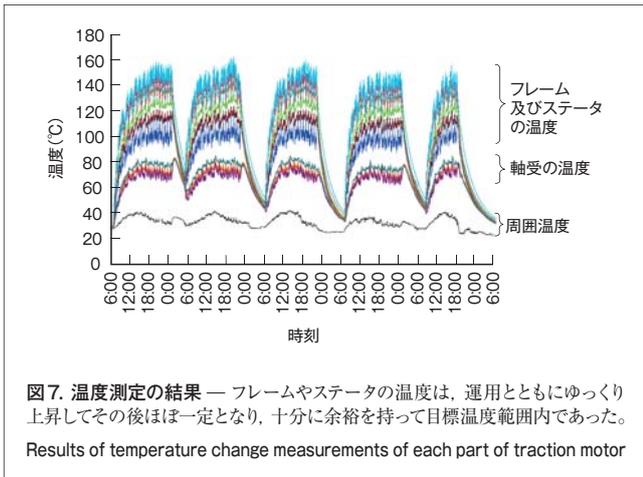
主電動機の発生損失を低減して高効率化を達成するため、低損失の電磁鋼板を採用して鉄損を抑えるとともに、低抵抗率のロータバー材を採用し、ロータで発生する損失を小さくした。また、高耐熱絶縁システムを採用し小型化している。更に、図6に示す過渡応答電磁界解析を実施して、主電動機内部の磁束密度分布とその時間変化や鉄損分布などを確認し、要求性能を満足しながら損失を低減させるステータとロータの電磁気設計を実施した。



4 試験結果

4.1 温度試験結果

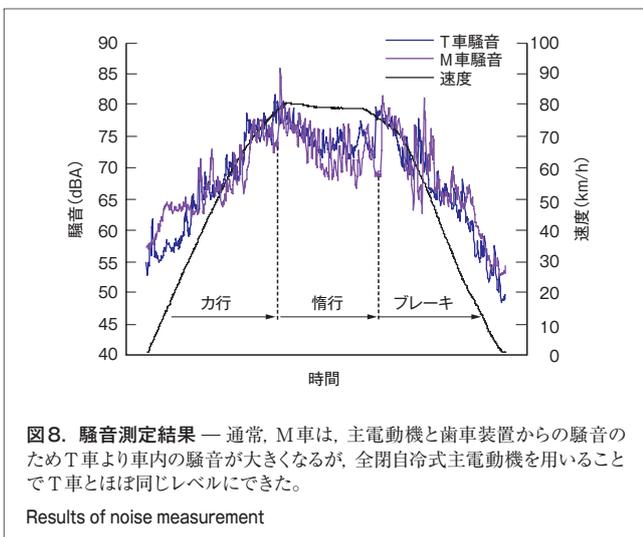
今回、VVVF化改造を行い、この主電動機を搭載している8510編成には、16台中1台に主電動機各部の温度を測定する熱電対が取り付けられている。この主電動機を利用し、営業走行中の各部の温度を追跡調査した(図7)。全閉自冷式主電動機は時定数が長いため、主電動機各部の温度は運用とともにゆっくり上昇し、その後ほぼ一定となった。各部の温度は



十分に余裕を持って目標温度範囲内にあり、長期に使用しても問題のないことを確認した。

4.2 騒音試験結果

現車走行試験時に、M車(電動車両)とT車(付随車両)の車内騒音を測定した。ある一駅間で測定した結果を図8に示す。通常、M車では、主電動機及び歯車装置からの騒音のためT車より車内騒音が大きくなるが、全閉自冷式主電動機を用いることでT車とほぼ同等レベルになっている。単体試験でも、最高使用回転数で81.5 dBAと、従来形主電動機より約10 dBA以上の低騒音化が達成できており、車内騒音の低減に大きく寄与している。



4.3 回生率の向上

VVVF化改造により、全閉自冷式主電動機を搭載した8510編成は回生率が40%以上となっており、VVVF化改造を行っていない、チョッパ制御を搭載したほかの8000形よりも約20%高くなっている。この主電動機は定格における効率が95%以上と、従来の開放型より3%程度高くなっており、回

生率の向上からも高効率化されたことが確認できる。

5 あとがき

オイル潤滑軸受を用いた全閉自冷式主電動機では、長期無分解を目指すため、主電動機の外観や温度状況などの追跡調査が必要である。納入以降、定期的な調査を実施し、オイルの劣化や減少などは認められていない。客先からの協力を得ながら、引き続き追跡調査を実施する。

環境への認識の高まりから、オイル潤滑軸受を用いた全閉自冷式主電動機が、業界の先駆けとして本格的に採用され、良好な運用結果となっている。これは、時間軸と組織軸の両軸から、リソースを横断的に活用して成しえた結果であると考えられる。今後も、市場からの更なる信頼を獲得するため、開発を着実に進めていく。

文献

- (1) 小林芳隆, ほか. 全閉型車両用主電動機. 東芝レビュー. 52, 11, 1997, p.15-17.
- (2) 野田伸一, ほか. 低騒音を目指す密閉タイプの鉄道車両用モータ. 東芝レビュー. 60, 12, 2005, p.28-31.
- (3) 松下真琴, ほか. 名古屋鉄道3300系車両向け全閉自冷式主電動機. 第44回鉄道サイバネ・シンポジウム. 東京, 2007-11, 日本鉄道サイバネティクス協議会. 論文番号510.
- (4) 野田伸一, ほか. 新京成電鉄8000形車両向け全閉自冷式主電動機. 第45回鉄道サイバネ・シンポジウム. 東京, 2008-11, 日本鉄道サイバネティクス協議会. 論文番号507.
- (5) 甲藤好郎. 伝熱概論. 養賢堂, 1979, 453p.



富川 英朝 TOMIKAWA Hidetomo

電力流通・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務。鉄道車両システムのエンジニアリング業務に従事。日本機械学会会員。
Transportation Systems Div.



村上 理 MURAKAMI Satoru

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



小山 泰平 KOYAMA Taihei

電力システム社 電力・社会システム技術開発センター 電機応用システム開発部。鉄道及びエレベータ分野の研究・開発に従事。電気学会会員。
Power and Industrial Systems Research and Development Center