

全閉形主電動機の 環境配慮型社会への適用技術

金子健太*
味岡佳史*
大津一晃*

Totally Enclosed Traction Motor Technologies for Environmentally Conscious Society

Yoshifumi Ajioka, Kenta Kaneko, Kazuaki Otsu

要 旨

地球環境に配慮した輸送システムである鉄道車両で、その駆動源となる主電動機に求められる性能は、鉄道車両の省エネルギー化に寄与する高効率化を始め、小型軽量化、大容量化、低騒音化、省メンテナンス化などがある。鉄道分野では、これら全ての要求を高い次元で満たした鉄道環境配慮型社会への適用技術が求められている。これらの背景から、トータルバランスを考慮した全閉形主電動機を開発した。

鉄道車両の省エネルギー化で、車両が走行する際に発生する損失を詳細に分析し、主電動機の発生損失の大幅低減に加え、回生出力の向上(高出力化)を同時に実現した。さらに、主電動機を始め、主回路システム全体での徹底的な

各機器の損失低減を行うことで、鉄道車両の大幅な消費電力量低減を実現した。

さらに、主電動機の大幅な発熱損失の削減に併せ、全閉形の冷却構造をより熱交換効率の高い構造へと進化させることで、従来では困難であった全閉形主電動機の大容量化と軽量化を同時に実現した。これによって、小型の開放形主電動機を前提とした台車への搭載も実現し、幅広く全閉形主電動機の適用が可能となった。

また、全閉形主電動機の適用による主電動機の分解清掃作業の削減に加え、新たな軸受保守構造の適用、保守周期の見直し等によって、大幅な省メンテナンス化を実現した。

製品実績

方式：全閉自冷式
出力：225kW(1時間)
質量：605kg

最新型全閉形主電動機

省エネルギー
環境性

小型・軽量・大容量
多様性

トータルバランスを考慮した主電動機

省メンテナンス
経済性

低騒音
快適性

4つの特長

高効率全閉形主電動機

高度な低損失設計と冷却設計によって、発熱損失51%低減(車両全体で10%の省エネルギー化)を実現するとともに、開放形主電動機と同程度までの小型軽量化と、大幅な高出力化(回生出力向上によって車両全体で25%の省エネルギー化)を達成した(在来線向け1時間225kW, 605kg, 狭軌台車対応)。省エネルギー、小型・軽量・大容量、省メンテナンス、低騒音の4つの特長を兼ね備えたトータルバランス設計の最新型全閉形主電動機である。

*伊丹製作所

1. ま え が き

地球環境に配慮した輸送システムが求められる中、鉄道車両用主電動機に求められる高効率化要求を始めとし、小型・大容量、省メンテナンス及び低騒音などの高い設計要求性能に対してトータルバランスを考慮した全閉形主電動機を開発した。

本稿では、全閉形主電動機へのこれら最新の適用技術について述べる。

2. 省エネルギー化⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾

2.1 鉄道車両の消費電力量分析と発生損失低減への取組み

鉄道車両は、電力変換装置及び主電動機(以下“モータ”という。)によって電気エネルギーを運動エネルギーに変換して走行する輸送機関である。電力変換装置及びモータは、鉄道車両に搭載される機器で、加速時は電気エネルギーから運動エネルギーへ変換し、減速時は運動エネルギーから電気エネルギーへ変換(回生)して車両を走行させる。鉄道車両における消費電力量とは、これらのエネルギー変換の際に発生する機器損失及び車両が走行することで発生する走行抵抗や摩擦抵抗のことを指す。

図1にエネルギー変換フローと車両の発生損失を示す。発生損失とは、エネルギー変換時に各機器で発生する発熱損失に加え、走行時に運動エネルギーを消失させる走行抵抗及び減速時に電気エネルギーに変換されない運動エネルギーの一部を、摩擦ブレーキで熱エネルギーとして消失さ

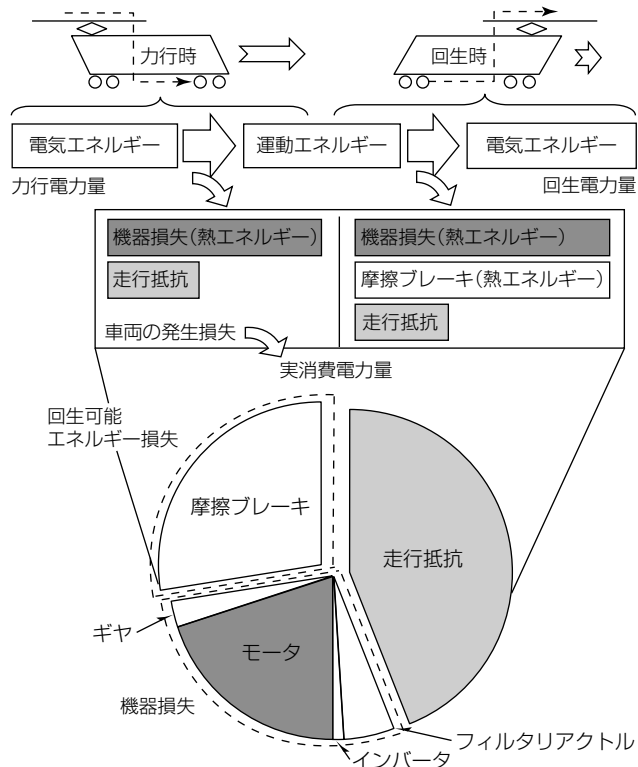


図1. 鉄道車両の発生損失(消費電力量)とその内訳

せる損失に分類される。鉄道車両の消費電力量を低減させるには、これら全ての損失に着目する必要がある。

図1の円グラフに発生損失の内訳例を示す。走行機器に関連する発生損失のうち、モータで発生する熱損失及び回生できずに消失した摩擦(空気)ブレーキでの熱損失など、回生可能なエネルギー損失が多くを占める。そこで、この2つの損失を同時に削減するための、モータの高効率化及び高出力化を実施した。

2.2 発熱損失低減によるモータの高効率化

モータの発生損失は、車両全体の発生損失の約20%を占める。図2に示すモータ設計の①~④の改良によって、図3に示すように、モータで発生する発熱損失を51%削減し、インバータによる実負荷時の効率95.1%を達成した。

また、モータの発熱損失の低減には、モータにパルス電圧を印加して制御するインバータ装置との連携が必要不可欠であり、SiC(シリコンカーバイド)素子適用インバータ装置の特徴も活用し、システムで最適な機器構成でモータの発生損失の最小化を実現した。これらによって、車両の発生損失を10%低減した。

2.3 モータの高出力化(回生性能の向上)

次に、摩擦(空気)ブレーキ損失を削減するため、回生可能な運動エネルギーを回生できるように最大出力(停動トルク)を増加させ、モータの回生出力を向上させた。

車両の減速力は通常、加速時よりもトルクが高く設定されており、かつ高速域から一定の高い減速力が必要とされる。そのため、モータが搭載されていない車両の減速力は、モータの回生性能で負担できない分を摩擦ブレーキによって補足していた。しかし、先に述べた発生損失の低減に

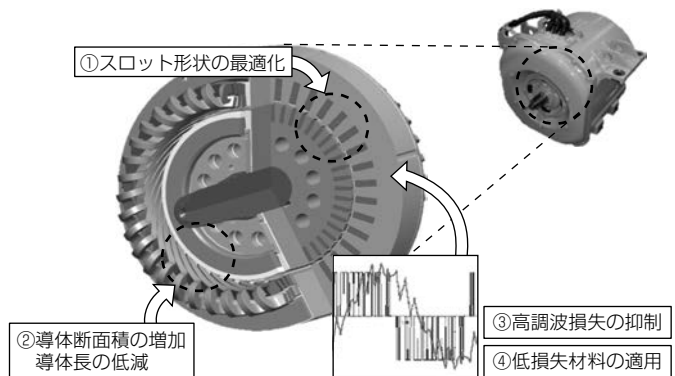


図2. 電磁界解析技術を活用した発熱損失の低減

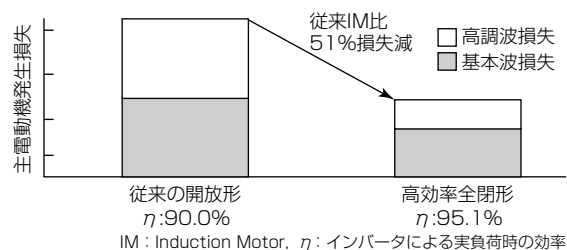


図3. 発生損失割合比較

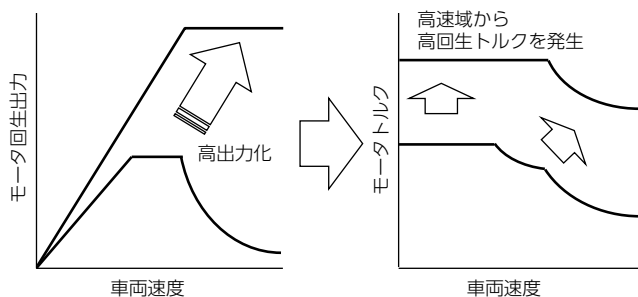


図4. モータの発生出力向上と高トルク化イメージ

よってモータの高出力化が可能となるため、停動トルクを増加させ、モータが搭載されていない車両の減速力分全てをモータの回生性能だけで負担可能となった(図4)。

このような回生性能の向上でも、モータを制御するインバータ装置との連携が必要となるため、機器全体での取組みによって、これまで回生できずに消失していた回生可能な運動エネルギーを全て回生し、車両の発生損失を約25%低減した(車両の構成によって低減割合は前後する)。

これらから、モータの低損失化並びに高出力化によって車両の発生損失を約35%低減した。また、SiC素子適用インバータ装置や、フィルタリアクトル等各機器の発生損失低減効果も含めると車両の発生損失は約40%の低減を実現した。

3. 小型・大容量化

従来、全閉形モータは、開放形に比べ外部の空気(外気)で直接固定子コイルや回転子バー等の発熱部を冷却できないため、複雑な熱交換器や走行風によって放熱を促進させるフィン等が設けられ、大型化かつ重量化する欠点があった。そのため、国内在来線向けモータでは主に150~200kWの出力に対し、質量は700~800kg以上となり、更新工事への置き換えや、軽量開放形モータを前提として設計された台車への搭載は困難となっていた。これら課題に対し、最新の高效率全閉形モータでは、2.2節で述べた大幅な発熱損失の削減に併せ、全閉形の冷却構造をより熱交換効率の高い構造へと進化させた。これによって、同一容量のモータで開放形モータの質量と同等となる500~650kg程度への軽量化に成功した。

最新の全閉形モータの冷却構造を図5に示す。断面図に示すとおり、内部の空気(内気)が循環する経路と、外気が通り抜ける構造を持っている。この全閉形モータでは発熱部を間接的に冷却するため、この通風構造を最適化することで冷却効率を高めた。具体的には、回転子鉄心の両側に設けたファンによって内気と外気を熱交換し、さらに、フレーム内部でも、内気・外気の通風路を交互に設けることで、効率的に熱交換させている。この冷却構造は、全閉外扇形の特徴である外気通風による熱交換構造と、全閉内扇形の特徴である内気循環による熱交換構造の両方の利点を

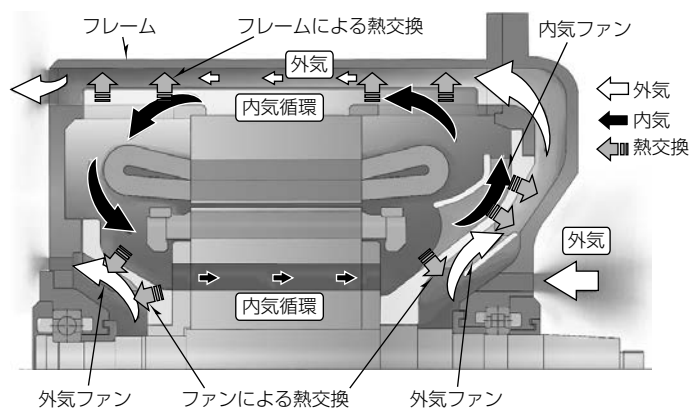


図5. 最新の全閉形モータの冷却構造

組み合わせた構造である。さらに、このような冷却構造を、従来の開放形モータ同様に、コイル・鉄心で構成される電気部分を、フレーム内に嵌(は)め込むフレームタイプとすることで、台車への艤装(ぎそう)に柔軟性を持たせている。これによって先に述べた軽量化と併せ、更新車両から新車まで、幅広い台車艤装条件に対応している。

4. 低騒音化

モータの低騒音化は、モータ自体の体格及び質量とトレードオフの要素を持つ。一般的に全閉形では軸端に冷却ファンを構成する外扇形よりも、内部に冷却ファンを持つ内扇形の方が低騒音であるが、体格・質量面では相反する。

そこで、この全閉形モータでは、騒音の遮蔽性を高めるために、内扇形同様に冷却ファンを内部に構成する構造を基本とした。さらに、内部の冷却ファンの外側にもガイド付の羽を設けることで、外気を冷却ファンの背面全体に通風させ、内気の熱交換性能を向上させた。また、開口部を必要最小限とすることで機外に漏れる騒音量を低減した。これによって、モータの質量増加なく、内扇形相当の低騒音化を実現した。

5. 省メンテナンス化

5.1 全閉形によるメンテナンス時間の削減

モータの省メンテナンス化に向け、より効果的に作業時間を削減するために、各定期検査のメンテナンス作業時間を分析した。表1に各種モータの作業時間を示す。

全閉形モータは、外部の冷却風を直接機内に取り込む開放形モータとは異なり、吸気フィルタが不要となるため、短い周期で頻繁に発生する吸気フィルタの清掃作業が不要となる。また、全閉形モータ内部は長期間クリーンな状態が維持されるため、定期検査ごとの大型設備を使用したモータの分解や機内清掃についても不要となる。さらに、全閉形モータで定期検査ごとの分解が不要となることから、軸受のメンテナンスはモータ外部から潤滑グリースを給油する“中間給油方式”を標準採用した。これによって、重要部検査での台車からのモータの取り外しが不要となり、中

表1. メンテナンス項目・時間比較(時間は当社試算)

	メンテナンス項目	所要時間(h)		
		従来開放	従来全閉	最新全閉
月検査	吸気カバー清掃(フィルタ)	0.17	-	-
	外観検査	0.17	0.17	0.17
	合計	0.34	0.17	0.17
	台車付外し・継手付外し	10.00	-	-
重要部検査	モータ分解・組立て	10.00	-	-
	吸気カバー清掃(全体)	2.00	-	-
	機内清掃	1.00	-	-
	各部点検	2.00	0.17	0.17
	軸受・グリース交換	4.00	-	-
	中間給油	-	0.17	0.17
	センサ分解・調整組立て	1.00	-	-
	回転試験	5.00	-	-
	合計	35.00	0.34	0.34
	台車付外し・継手付外し	10.00	10.00	10.00
全般検査	モータ分解・組立て	10.00	10.00(-)	-
	吸気カバー清掃(全体)	2.00	-	-
	機内清掃	1.00	-	-
	各部点検	2.00	1.00	1.00
	軸受・グリース交換(注1)	4.00	4.00(2.00)	0.25(0.17)
	センサ分解・調整組立て	1.00	1.00	-
	回転試験	5.00	5.00(-)	5.00(-)
	合計	35.00	31.00(14.00)	16.25(11.17)
	全般検査(2回目)までの合計時間(月検査60回/重要部検査2回/全般検査2回)	160.00	56.00	38.00

(注1) 全般検査1回目は端ふた内グリースだけ交換
()内は全般検査1回目の作業時間

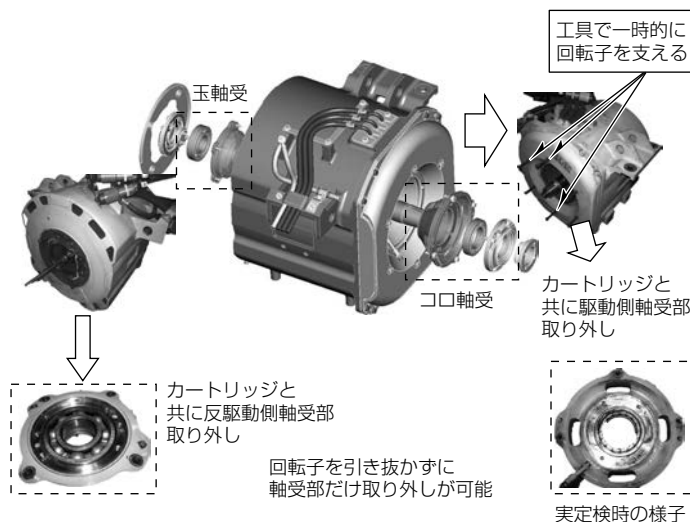


図6. 回転子非分解軸受交換構造

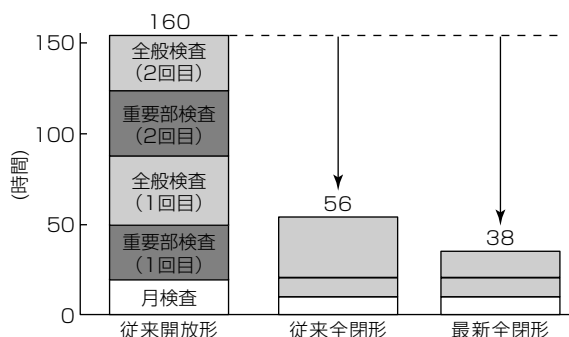


図7. メンテナンス時間の比較

間給油以外の保守作業は月検査と同等にまで軽減された。

5.2 軸受交換作業の軽減

モータの軸受交換作業は、モータ本体から回転子を取り出す必要があるため、全閉化によって機内清掃が不要となっても、軸受交換のためにモータの分解・再組立て作業が必要であった。特に、モータの台車からの脱着作業や、モータ自体の分解組立て作業は、重量物であるモータを取り扱うため、大型設備での作業となり、全体作業時間に占める割合は大きい。そのため、軸受交換の作業性には課題が残っていた。特に、従来の全閉形では、開放形と異なる複雑な構造部材を分解する特殊性が課題であった。

そこで、モータの軸受分解作業で回転子を引き抜かず、軸受部品だけを分解することで分解作業を簡略化する回転子非分解軸受交換構造(図6)を開発した。この構造によって、軸受交換作業が軽減されるだけでなく、重量物である回転子の分解作業が不要となり、クレーン等の設備の待ち時間や作業場所の制約がなくなる。さらに、軸受部品の構造は従来と同様とすることで、長年培ってきた潤滑構造を維持し、その分解要領も開放形とほぼ同等とすることで、作業に特殊性を要さない構造を実現した。

これらの軸受交換作業の軽減によって、この全閉形モータでは、2回目の全般検査までの合計作業時間は、開放形と比較して約1/4以下にまで短縮され、1台当たり160時間から38時間程度となる(作業時間は当社試算)(図7)。

6. むすび

鉄道車両は30年以上使用され、長いものでは50年以上使われるものもある。当社が扱う電気機器も同様で、メンテナンスを繰り返し30年以上の使用期間を想定している。このような鉄道車両での省エネルギー化や機器の高性能化、省メンテナンス化は、長年使い続ける鉄道車両の環境負荷軽減に大きな影響を与えるものとなる。

当社ではモータのみならず、モータを制御する主回路システム全体を含め、このような環境配慮型社会への適用技術を各製品へ展開していく。

参考文献

- (1) 山下良範, ほか: SiCパワーモジュール適用鉄道車両用インバータシステムの省エネルギー運転について, 電気学会全国大会論文集, 5-078, 128~129 (2012)
- (2) 大橋 聡, ほか: SiCパワーモジュール適用鉄道車両用の高効率インバータシステム, 第49回鉄道サイバネ・シンポジウム, No.505, 1~4 (2012)
- (3) 山下良範, ほか: SiCパワーモジュールを用いた鉄道車両用主回路システムの開発, 鉄道車両と技術, No.190, 6~11 (2012)