

低損失材料と新構造回転子を適用した高効率誘導主電動機の開発

車両制御技術研究部 動力システム研究室
主任研究員 近藤 稔

1. はじめに

電車の消費電力量低減は電力コスト削減や地球環境問題への取り組み等の観点から重要であり、これまでも、様々な取り組みが行われてきた。例えば、通勤電車等の停車駅間距離の短い電車では、回生ブレーキの導入により大幅な消費電力量低減が達成されてきた。電車の走行に伴う消費電力量の内訳は、走行抵抗等による損失、駆動システムの機器損失、回生ブレーキ以外のブレーキによる損失に分類できる。このうち、ブレーキによる損失が回生ブレーキの導入によって大幅に減少した結果、最近の通勤電車では走行抵抗による損失と機器損失が占める割合が高くなっており、更なる消費電力量低減のためにはこれらを低減することが重要である。通勤電車に多く使用されている直流電車の場合には、機器損失のうち主電動機の損失が特に大きい。そのため、通勤電車の消費電力量低減のためには主電動機の高効率化が重要である。

そのため、鉄道総研ではこれまでに誘導電動機の高効率化目指して研究開発を行ってきた。高効率化の手法としては、低損失材料の使用、固定子巻線の巻回数最適化、新構造回転子の適用、冷却構造の改良について検討した。そして、これらの手法を適用した高効率誘導電動機を試作し、定置試験により高効率化効果を検証した。また、これと並行して走行シミュレーションによる消費電力量低減効果の計算を行い、主電動機の高効率化による省エネ効果を明らかにした。本発表ではこれらの研究開発について紹介する。

2. 開発した高効率誘導電動機の試作機

2.1 試作機の概要

今回の開発では、既存の在来線電車用誘導電動機（従来機）を基にして、その寸法や定格出力等の基本性能は同等に保ちながら、様々な手法を用いて高効率化を図った主電動機（試作機）を試作し、試験により性能確認を行った。試作機の外観を図1に、主電動機の仕様を表1に示す。

主電動機の方式は在来線用主電動機として標準的な仕様となっており、狭軌の台車に収まる寸法となっている。



図1 試作機外観

表1 主電動機仕様

電動機方式	かご形誘導電動機
相数	3相
極数	4極
冷却方式	自己通風式
装荷方式	台車装荷式
定格出力（1時間）	220kW-2981/min

2. 2 低損失材料の使用⁽¹⁾

まず、高効率化手法のうち、低損失材料の使用について説明するため、従来機と試作機の使用材料を表2にまとめる。

表2に示したように、回転子導体は従来の丹銅よりも抵抗率の小さい銀入り銅を使用する。これにより回転子の銅損（電気抵抗による損失）が約半分になることが期待できる。

鉄心は材料を50A800に代えて35A300を使用することとした。50A800、35A300という呼び名はJISに基づく呼び方であり、後ろの3桁の数字が鉄損（磁気により鉄心中で発生する損失）の大きさを示している。すなわち、50A800から35A300に変更することで、鉄損が3/8程度になることが期待できる。

また、固定子巻線の電線をガラス電線からカプトン電線にしている。カプトン電線は、絶縁物の厚みが薄く、導体の占積率を高めることができるため、結果的に巻線の抵抗値を小さくすることができる。この結果、固定子巻線の銅損を削減できる。

これらの材料変更により、定格出力における効率を従来機に対して1.8%向上できる。

2. 3 巻回数の最適化

固定子巻線の巻回数については、従来機の72回に対し、試作機では54回に減らしている。これは、従来機的设计ではインバータ容量の低減を優先した巻回数設計となっていたため、主電動機効率の向上を優先した巻回数にすることで効率の向上を図ったものである。

主電動機の電圧は主電動機内の磁束密度と巻回数の積に比例する。そのため、電圧が最大電圧で一定値となる高速域や定格点では、巻回数を減らすことにより磁束密度を高くすることができる。磁束密度が高ければその分電流が少なくなるため、固定子銅損や回転子銅損を減らすことができる。その一方で、磁束密度の二乗に比例して発生する鉄損や後述する高調波二次銅損は増加するが、銅損の低減効果の方が大きいため、全体としては損失が低減する。この結果、材料変更後の主電動機に対して効率を更に0.5%向上できる。

2. 4 回転子構造改良による高効率化⁽²⁾

次に、回転子の導体が入るスロット部には、固定子スロットによる磁場の乱れの影響で導体表面に電流が流れて発生する損失（高調波二次銅損）の低減を目的とした新構造を採用している。新構造では、固定子スロットの影響を受けやすい回転子表面付近に導体を配置しないようにすることで、高調波二次銅損の低減を図っている（表3、図2）。また、従来導体が配置されていた場所を空隙とすることで、冷却風流路とし、冷却性能の向上も同時に図っている。

本構造の採用により高調波二次銅損が低減され、巻回数最適化後の主電動機に対して効率を更に0.4%向上できる。また、回転子と固定子の間の空間が広がったため、

表2 使用材料の比較

項目	試作機	従来機
回転子導体材料	銀入り銅	丹銅
抵抗率(115℃)	2.37 $\mu\Omega$ cm	4.72 $\mu\Omega$ cm
鉄心材料	35A300	50A800
固定子巻線用電線	カプトン電線	ガラス電線

表3 回転子スロット形状の比較

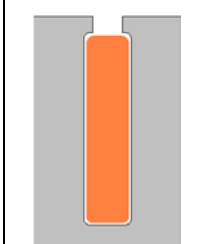
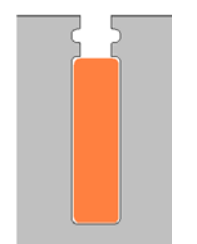
従来機	試作機
	



図2 試作機の回転子スロット部

本構造は次に述べる機械損の低減にも若干寄与している。

2. 5 冷却構造の改良による高効率化

以上の高効率化手法を適用した結果、試作機は従来機と比べて大幅に発熱量が少なくなるため、従来機と同じ冷却性能は不要である。そのため、冷却風量を削減することで、通風に伴う損失を削減して更なる高効率化が可能である。そこで、試作機では従来機よりも自己通風ファンの直径を1割小さくするとともに回転子通風孔を全て塞ぐように改良を行った。

改良による冷却風量の減少と前述の新構造回転子により、機械損（通風や摩擦による損失）は半分以下となった。その一方で温度上昇値は、従来機と同等の温度上昇値となっており、十分に余裕をもって限度値以下に収まっている（図3）。この機械損の低減により、効率が更に0.5%向上できる。

また、改良後の構造では回転子の通風孔が全て塞がれているため、通風孔への塵埃の蓄積による回転アンバランスが発生せず、通風孔目詰まりによる冷却性能低下も無い。そのため、分解清掃等による通風孔の清掃が不要となり、省保守化も図られている。

2. 6 定格点における損失の比較

以上の高効率化手法を適用して、様々な損失を少しずつ低減することで、主電動機全体で約3%の高効率化が可能となる。

定置試験結果を基にして等価回路法⁽³⁾により従来機と試作機の損失を評価した結果を図4に示す。効率の高い主電動機の効率評価では、入力電力と機械出力の測定結果から直接的に効率を算出する方法は、出力トルク等の測定精度を考えると高い精度が期待できない。そのため、主電動機の効率評価では、定置試験結果から各損失を個別に算出して総損失を求める方法が用いられており、ここでもそのようにして損失を計算している。図4では損失を入力で割った値を示しており、これを100%から差し引くことで効率を算出できる。

様々な高効率化手法を適用した結果、試作機の損失率は従来機の約7%から約3%低減し、約4%となっている。すなわち、試作機の効率は約96%であるという結果になっており、磁界解析等で予測していた通りの高効率化効果が確認できた。

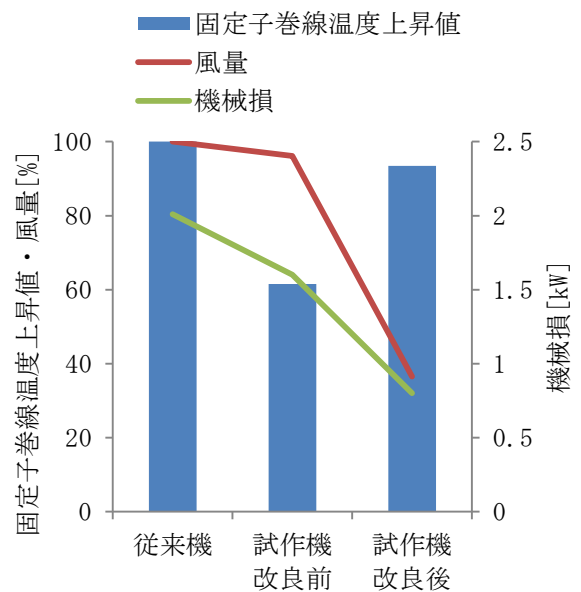


図3 冷却構造改良の効果

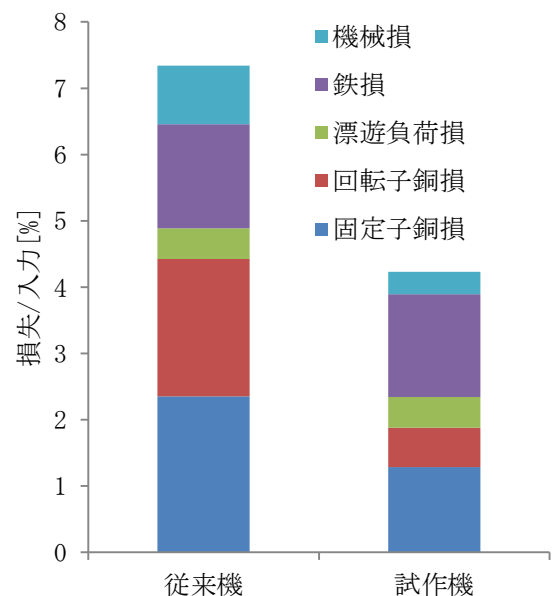


図4 定格点における損失の比較

3. 走行シミュレーションによる評価

開発した高効率誘導電動機の省エネ効果を評価するため、走行シミュレーションを実施した。対象とする車両と線区は設計時に想定したものとし、停車駅はその路線の標準的な運用を参考にして決定した。車両と線区の概要を表4に示す。

走行シミュレーションにより得られた駅間毎の消費電力量の計算結果を基に、従来機の消費電力量を基準として消費電力量削減率を計算し、駅間距離に対してプロットしたものを図5に示す。

駅間毎の消費電力量の削減率はこれらの図から分かるように6%~11%であり、この路線を走行した際の全消費を計算すると9%であった。今回評価対象とした試作機と従来機の効率の差は約3%であるが、その違いが消費電力量に与える影響は大きく、1割弱の消費電力量低減効果が得られることが示された。

4. まとめ

本研究開発では、在来線電車の消費電力量低減を図る目的で、高効率誘導電動機を開発した。試作機による効率評価の結果、開発した主電動機の効率は約96%であり、従来機に対して約3%効率を向上することができた。また、走行シミュレーションにより、高効率誘導電動機による省エネ効果を試算したところ、1割弱の消費電力量削減効果が期待できることが分かった。

本研究開発では様々な高効率化手法を適用したが、それらは個々に適用しても効果がある。本研究開発が今後新規に製作される誘導電動機的设计の参考にしていただければ幸いである。

なお、本研究開発の一部は国庫補助を受けて実施した。

- (1) 近藤稔：「主電動機の高効率設計による電車の省エネルギー効果」, 鉄道総研報告, Vol.23, No.11, pp.29-34 (2009)
- (2) 宮部実, 近藤稔：「誘導電動機の回転子スロット内空隙による損失低減効果の解析」, 鉄道総研報告, Vol.24, No.6, pp.23-28 (2010)
- (3) 電気規格調査会：「JEC 2137 誘導機」 (2000)

表4 想定した車両と線区の概要

編成	8両 (3M5T)
車両重量	252t
最高速度	130km/h
乗車率	100%
走行距離	130.8km
停車駅数 (始発駅含む)	35 駅

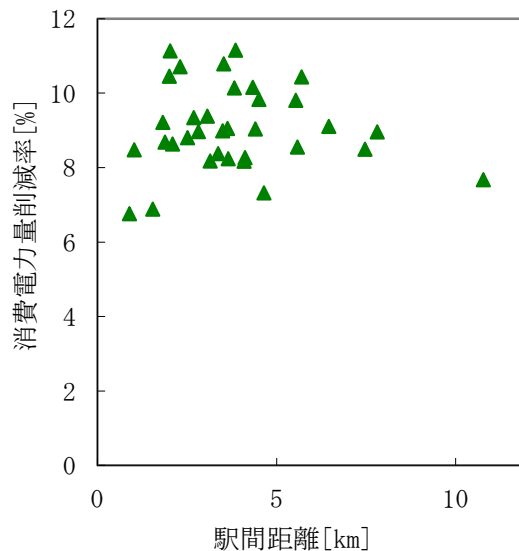


図5 消費電力量削減率計算結果