

走行シミュレーションによる 高効率誘導電動機の消費電力量評価

近藤 稔* 宮部 実** 真鍋 慎一*

Estimation of the Energy Consumption of a Train Equipped with a High Efficiency Induction Motor through Running Simulations

Minoru KONDO Minoru MIYABE Shinichi MANABE

Induction motors are widely used as traction motors of railway vehicles. Because the energy loss of the traction motors accounts for a large portion of energy consumption in commuter trains, highly efficient traction motor is very effective for saving energy. Therefore, we have developed a high efficiency induction motor and have verified its efficiency through magnetic field analysis and performance tests with a prototype machine. In this paper, we show the calculation results of running simulations which estimate the energy consumption of a train equipped with the high efficiency induction motor. The results indicate that the energy consumption is reduced by 6% to 11% with the improved efficiency.

キーワード：誘導電動機，消費電力量，走行シミュレーション

1. はじめに

在来線電車の消費電力量低減には、主電動機の高効率化による損失低減が効果的である。そこで、鉄道総研では、低損失材料と新構造回転子により高効率化を図った高効率誘導電動機を開発してきた^{1) 2) 3)}。

本論文では、その主電動機による消費電力量低減効果を定量的に評価するため、実際の車両と路線を想定し、走行シミュレーションを行った結果について報告する。開発した高効率誘導電動機では、主電動機の損失低減だけでなく、回生性能の向上による消費電力量低減も可能である。そこで、回生性能を従来通りとして主電動機損失低減のみが期待できる場合と、回生性能の向上も併せて行った場合の二通りについて計算を行った。

以下では、まず、高効率誘導電動機で用いている高効率化手法について紹介し、次に、走行シミュレーションの方法とその結果について紹介していく。

2. 高効率誘導電動機の特徴

2.1 高効率誘導電動機の仕様

高効率誘導電動機の開発では、既存の在来線電车用誘導電動機（従来機）を基にして、その外径寸法や定格出

* 車両制御技術研究部 動力システム研究室
* 車両制御技術研究部 動力システム研究室（現 西日本旅客鉄道株式会社）

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、定置試験により性能確認を行った。具体的には、低損失材料の使用、固定子巻線の巻回数最適化、新構造回転子の使用、機械損の低減を高効率化の手法として用いた。

2.2 低損失材料の使用¹⁾

まず、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1にまとめる。

表1 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°C)	2.37 $\mu\Omega\text{ cm}$	4.72 $\mu\Omega\text{ cm}$
鉄心材料	35A300	50A800
固定子巻線使用電線	カプトン電線	ガラス電線

まず、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している。銀入り銅は強度向上のために銅に微量の銀を添加した材料で、直流電動機の整流子片にも使用されている。これにより回転子銅損が約半分になることが期待できる。

次に、鉄心材料を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「JISC 2552 無方向性電磁鋼帯」に基づく呼び方であり、前の2桁の数字が厚み、後ろの3桁の数字が鉄損の大きさ

特集：車両技術

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。カプトン電線は高耐熱樹脂のカプトンを素線絶縁に使用しているため、絶縁物の厚みが薄く、巻線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 固定子巻線の巻回数最適化²⁾

固定子巻線の直列巻回数は、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、従来機の設計ではインバータ容量の低減を優先した直列巻回数の設計となっていたため、主電動機効率の向上を優先した直列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。主電動機の出力は磁束密度と電流密度の積に概ね比例するため、磁束密度が高ければ電流密度を低くでき、固定子銅損や回転子銅損を減らすことができる。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。

また、巻回数を減らした場合、高速域でも磁束密度の低下が少ないため、結果的に高速域での回生性能が向上できる。従来機では主電動機の特性上の制約から高速域では速度の 2 乗に反比例して減少する回生ブレーキ力特性となっているが、試作機では最高速度まで一定の回生ブレーキ力を実現できる特性となっている (図 1)。

実際にはインバータ容量や架線容量の制約により、回生電力が制限される可能性が高いが、主電動機特性の観点からは、今回の試作機により高速域における回生ブレーキ力の向上が可能である。また、SiC 半導体等の技術の進展により、今後、インバータ容量に対する技術的制約は少なくなっていくと考えられる。そこで、本論文

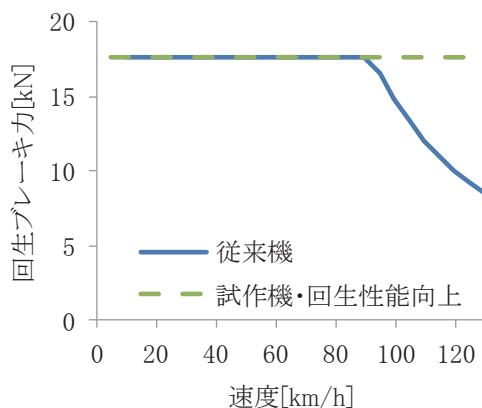


図 1 回生ブレーキ力特性の比較

では、回生ブレーキ力を向上した場合についても消費電力量の評価を行う。

2.4 新構造回転子の使用^{2) 3)}

次に、回転子スロット部には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た構造である (表 2, 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更に 0.4% 効率を向上できる。

表 2 回転子スロット形状の比較

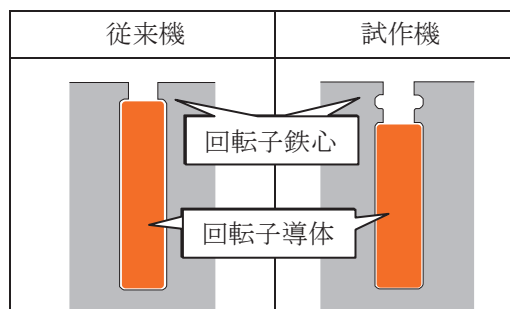


図 2 試作機の回転子スロット部

2.5 機械損の低減

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、冷却ファンを小径化したり冷却風流路の一部を塞いだりすることで、冷却風量を削減して、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冷却ファンの直径を 1 割小さくするとともに回転子通風孔 (図 3) を全て塞ぐように改良を行った。

改良前後の試験から算出した機械損と定格における温度上昇試験結果を図4に示す。改良の結果、冷却風量の減少により、機械損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(180K)以下に収まっている。なお、図4によると、改良前の試作機も従来機に比べて機械損が小さくなっている。これは、新構造回転子により、固定子と回転子の間の空間が広がったことに起因して機械損が低減した結果であると推定する。

この機械損の低減により、改良後の試作機では効率を更に0.5%向上できる。

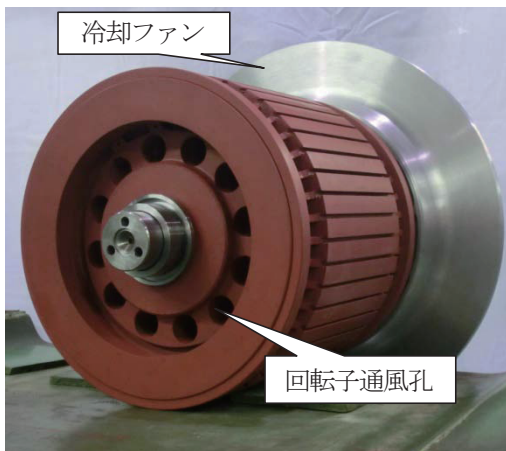


図3 回転子外観

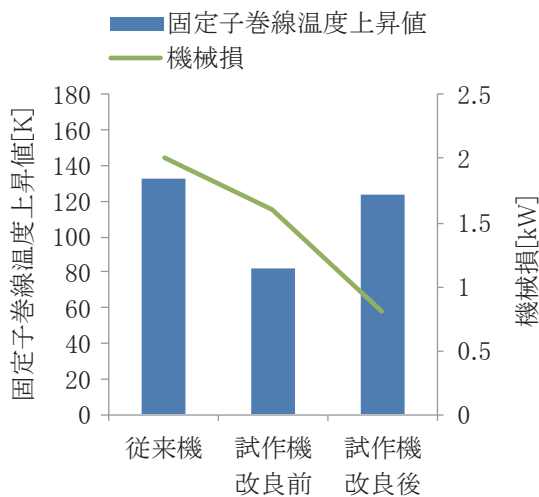


図4 機械損低減改良の効果

2.6 各高効率化手法の効果

これらの手法による損失低減効果を磁界解析により計算した結果を図5に示す。なお、機械損の低減効果については前述の試験結果から算定している。

図5では損失を入力で割った値を示しており、これを100%から引くと効率を算出できる。ここまでに各高効率化手法の説明で記載した効率向上効果は、この解析結

果に基づいている。図5では、各手法の効果を示すために、従来機と試作機以外にも、部分的に高効率化手法を適用した改良機についても損失計算を行っている。損失計算の対象とした主電動機を表3に示す。

表3 磁界解析により損失計算を行う対象

高効率化手法	改良機1	改良機2	試作機
低損失材料	○	○	○
巻回数最適化		○	○
新構造回転子			○
機械損低減			○

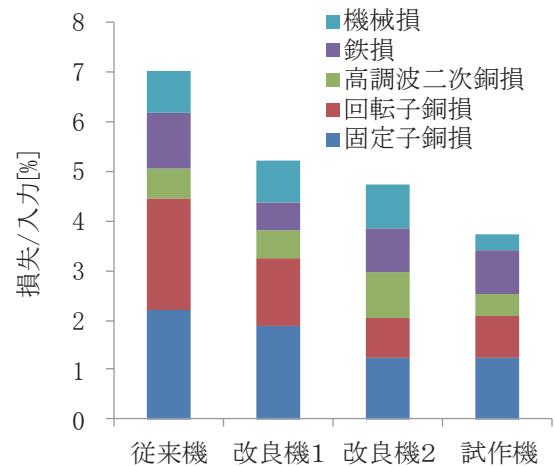


図5 磁界解析による損失計算結果

この計算結果によると様々な高効率化手法を適用することで、従来機の効率93%から約3%効率が向上し、試作機の効率は約96%となることが分かる。各損失の計算結果は試験結果と概ね一致することが確認されており⁴⁾、今回開発した試作機の効率は約96%であった。

3. 走行シミュレーション

3.1 計算方法

3.1.1 計算モデルの概要

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、実際の路線を想定した走行シミュレーションにより、消費電力量の計算を行った。計算には運転曲線作成システムを基に開発した、様々な車両のエネルギー計算ができるシミュレータ⁵⁾を用いた。

想定した路線と車両は、従来機を設計した際に想定したものであり、都市近郊の直流電化区間を走行する近郊形の直流電車を想定した。想定した路線と車両の概要を表4、表5に示す。

車両の駆動用機器には主電動機の他に減速機やインバータがあり、消費電力量を評価する場合にはこれらの損失も考慮する必要がある。今回の計算では、これらの

特集：車両技術

表4 路線の概要

走行距離	130.8km
停車駅数(始発駅含む)	35 駅
最高速度	130km/h

表5 車両の概要

編成	8 両編成 (3M5T)
車両質量 (100% 乗車) [t]	320
車両質量 (空車) [t]	252
定員 [人]	1128
最高速度 [km/h]	130
起動加速度 [km/h/s]	2.5
減速度 [km/h/s]	2.6
ギヤ比	6.53
車輪径 [mm]	820
インバータ効率	98%
減速機効率	98%

機器の効率を表5に示した通り、それぞれ98%と仮定して損失の計算を行っている。

3.1.2 主電動機損失の計算

今回の計算では従来機と試作機の効率の違いによる消費電力量の違いを評価することを目的としているため、主電動機の損失特性を計算に反映する必要がある。そこで、損失に関してなるべく正確な評価を行うために、磁界解析の計算結果を基にして主電動機損失を評価して走行シミュレーションに用いることとした。

磁界解析による主電動機損失の評価は、引張力特性およびブレーキ力特性上の数点について実施し、計算点間の速度での損失は線形補間により計算し、走行シミュレーションに用いている。磁界解析の方法およびその結果から損失を計算する方法については、既発表の文献²⁾の通りである。計算された損失特性を用いて、力行時の力行電力およびブレーキ時の回生電力の特性を計算した結果を図6と図7に示す。

図6に示した力行電力は、主電動機の機械的出力に主電動機損失を加えることにより求めており、図7に示した回生電力は機械入力から主電動機損失を差し引くことで求めている。ただし、主電動機の損失のうち機械損については、後述の通り走行抵抗として考慮するため、ここで用いている主電動機損失には含めていない。これらの図によると、試作機の方が高効率で損失が少ない分、力行電力が少なく、回生電力が多くなっている。

また、2.3で説明した通り、試作機は従来機に比べて高速域の回生性能を向上することが可能であるため、図7には回生性能を向上した場合の回生電力についても計算結果を示している。図7から分かるように、回生性能を試作機の性能の範囲で可能な限り向上した場合には、

速度90km/h以上の領域において回生電力を大幅に向上することが可能であり、高速域からブレーキをかけるような運転が行われている場合には、大幅な省エネ効果が期待できる。

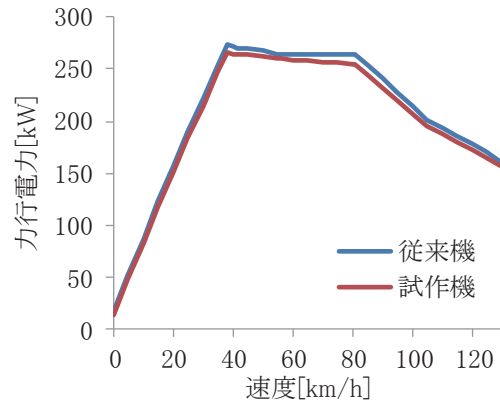


図6 力行電力の比較

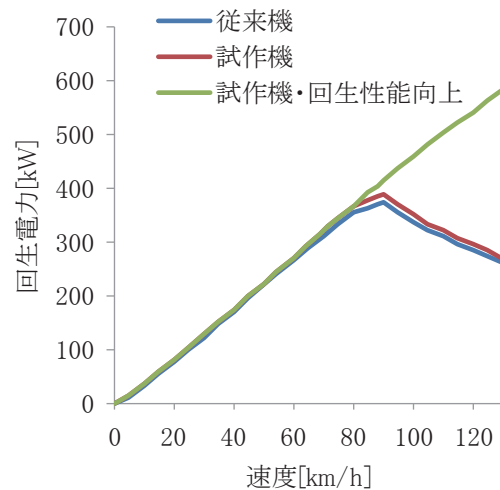


図7 回生電力の比較

3.1.3 走行抵抗による主電動機機械損の考慮

前述の通り、今回の試作機は高効率化により発熱量が少なくなっているため、従来機よりも冷却風量を削減しており、その結果、主電動機の機械損が大幅に削減されている。その他の電磁気的な損失と異なり主電動機の機械損は主電動機の通電状態とは無関係に、惰行時にも発生する。そのため、車両では主電動機の機械損による力が実質的に走行抵抗の一部として作用する。よって、走行シミュレーションで機械損を考慮するためには、機械損の違いを走行抵抗の違いとして表現するのが良い⁶⁾。

今回の走行シミュレーションでは在来線電車用に日本で標準的に用いられている走行抵抗式⁷⁾を用いる。ここで、機械損の違いを考慮するために、その走行抵抗式には従来機の機械損による力が含まれているものと仮定する。すると、表5に示した荷重条件における走行抵抗に

占める機械損の大きさは図8に示す通りとなる。そして、試作機を搭載した車両の走行抵抗は、従来機の走行抵抗から従来機の機械損による力を差し引いて試作機の機械損による力を加えたものとなる。このようにして計算された走行抵抗を図9に示す。

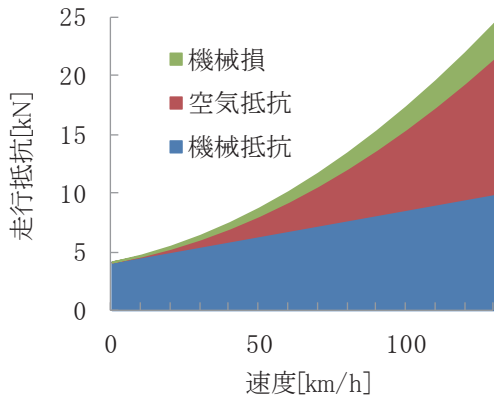


図8 従来機の走行抵抗

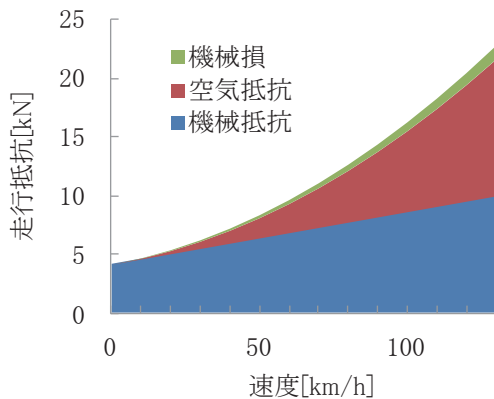


図9 試作機の走行抵抗

図8、図9から分かるように、機械損が走行抵抗に占める割合は小さいものの無視できる大きさでは無く、機械損の低減により走行抵抗が最高速度で7%程度減少している。なお、機械損の測定は定格周波数のみで行われたため、それ以外の速度での値は類似の設計の主電動機の機械損の回転速度に対する特性を参考にして設定した。

3.2 計算結果

消費電力量の計算結果を基に、エネルギー消費原単位を計算した結果を図10に、従来機のエネルギー消費原単位を基準とした場合の消費電力量削減率を計算した結果を図11に示す。エネルギー消費原単位は車両キロあたりの消費電力量を表す量であり、省エネ法で削減が求められている量である。

図10、図11は共に横軸を駅間距離にとってプロットしており、各点が各停車駅間に対応している。今回計算

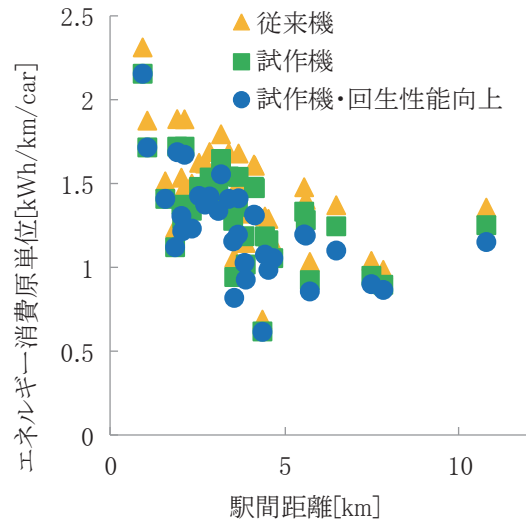


図10 エネルギー消費原単位の計算結果

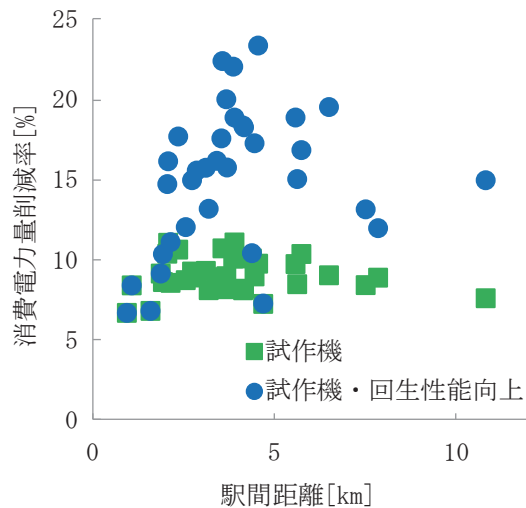


図11 消費電力量削減率の計算結果

対象とした運用では、各駅停車する区間と途中駅に停車しない区間が混在しており、停車駅間距離が1km程度の短いものから10km程度の長いものまでである。一般に、駅間距離が短い方が走行時間に占める力行・回生時間の割合が高くなり、機器損失の影響によりエネルギー消費原単位が大きくなる傾向があるが、図10の計算結果からもそのような傾向が確認できる。

試作機による駅間毎の消費電力量削減率は図11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。一般に駅間距離が短い方が消費電力量に占める機器損失の割合が高いため、高効率化の効果が大きくなるが、図11からもその傾向が確認できる。ただし、駅間距離が1～2km

特集：車両技術

の場合よりも3～4kmの場合の方が高い削減率になっている。この理由としては、今回の試作機で採用した高効率化手法のうち、巻回数最適化、新構造回転子、機械損低減については比較的回転速度が高い運転状態で効果を発揮するため、ある程度最高速度が高くなる駅間距離3～4kmにおいて効果が出やすいためであると推定する。また、前述の通り、主電動機の機械損低減により走行抵抗が減少するため、機器損失の割合が少ない駅間距離が長い走行においても、今回の試作機による消費電力量低減効果が得られているものと考えられる。

また、回生性能を向上した場合には、駅間距離が5km前後で省エネ効果が大きく出ており、最大で23%の消費電力量削減率となった。その一方で、駅間距離が1～2kmの運転では回生性能向上による効果は無かった。その理由は、駅間距離が短い場合には最高速度が十分に高くなり、高速域での回生性能向上の効果が得られないためであると考えられる。

参考のため駅間毎に回生率を計算した結果を図12に示す。なお、本計算では補機電力は考慮していない。

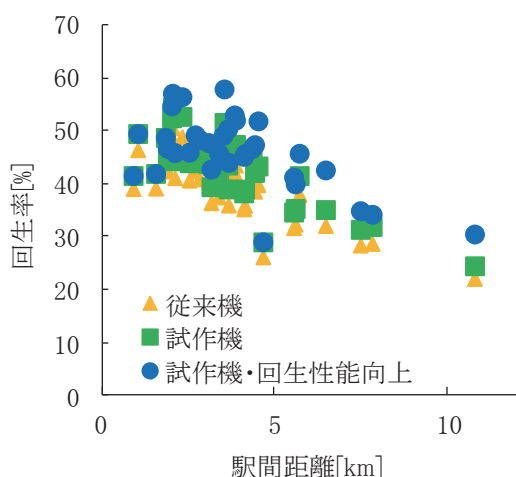


図12 回生率の計算結果

図12の計算結果は実際の路線を想定しているため、勾配の影響等により駅間毎に回生率の値は大きく異なり、従来機の回生率は20～50%程度であった。

従来機と試作機を比較すると、効率向上の効果により、全ての駅間で回生率が若干向上していることが分かる。

一方、回生性能を向上した場合に着目すると、駅間距離が1～2kmの区間では回生率が変化していないことが確認できる。これは、駅間距離が短い場合は最高速度が低く、回生性能を向上した速度以下で回生が行われているためである。そのため、図11に示したように、ある程度駅間距離が長い場合にのみ、回生性能向上による

消費電力量低減効果が得られる。

なお、本計算では、回生性能向上のために必要なインバータ容量増大による質量増加は無いものと仮定している。実際に回生性能を向上して回生率向上を実現するためには、SiC半導体等の新技術を用いて小形軽量で大容量のインバータを実現する必要がある。

4. おわりに

在来線電車の消費電力量低減を目指して高効率誘導電動機の開発を行い、その効果を評価するために走行シミュレーションによる消費電力量の計算を行った。

その結果、従来機に対して約3%高効率化した高効率誘導電動機により、6%～11%の消費電力量削減効果が得られることが分かった。

また、高効率誘導電動機は高速域において従来機よりも出力を大きくできる設計となっているため、これを利用して回生性能を向上した場合には更に省エネ効果が増大し、最大で23%の省エネ効果が得られることが分かった。

今後も更なる消費電力量低減を目指し、機器の高効率化等の研究開発に取り組んでいきたい。

なお、本研究開発の一部は国庫補助を受けて実施した。

文献

- 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) 近藤稔，宮部実，海老塚龍次，花岡幸司，山口敏弘：鉄道車両用高効率誘導電動機の開発，第49回鉄道サイバネ・シンポジウム，2012
- 3) 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
- 4) 近藤稔，宮部実，海老塚龍次，花岡幸司：鉄道車両駆動用高効率誘導電動機の設計と効率評価，電気学会回転機研究会，RM-13-035，2013
- 5) 中村英男，近藤稔，村上浩一，小川知行，熊澤一将，山下修：ディーゼルハイブリッド車両用運転シミュレータの開発，鉄道総研報告，Vol.25，No.1，pp.37-42，2011
- 6) 近藤稔，川村淳也，寺内伸雄：鉄道車両駆動用永久磁石同期電動機の等価回路法による消費エネルギー計算，電気学会論文誌D，Vol.125，No.4，pp.313-320，2005
- 7) 運転理論研究会：運転理論（再改訂版）－基礎知識と応用実務－，日本鉄道運転協会，2010