

主電動機の高効率設計による電車の省エネルギー効果

近藤 稔*

Energy-Saving Effect of High Efficient Traction Motors in Electric Train

Minoru KONDO

Most of the traction motors of recent electric trains are composed of induction motors. High efficient induction motors can help railway operators reduce their electricity cost. However, the operators tend to focus on the product cost rather than the electricity cost. Consequently, there is some room to improve the efficiency of them. In this paper, the author compares a high efficient motor with a low cost one in a standard commuter train. The result indicates that the loss of the high efficient motor is lower by 28% than that of the low-cost one.

キーワード：電車，省エネルギー，主電動機，効率，誘導電動機

1. はじめに

近年，地球温暖化対策等の観点から，あらゆる分野で省エネルギー化が推進されている。鉄道は輸送量あたりの消費エネルギーが他の交通手段に比べて小さいものの，更なる省エネルギー化が求められており，省エネ法¹⁾でも輸送事業者に省エネルギーへの取り組みが義務付けられている。また，電気鉄道の事業者は輸送のために多くの電力コストを負担しており，省エネルギーはコスト削減の観点からも重要である。そのため，電車の走行に伴う消費エネルギーを削減することは重要な課題であり，これまでも様々な取り組みがなされてきた。特に，近年では，回生ブレーキが利用可能なインバータ電車の導入により，従来の抵抗制御電車に比べて大幅な省エネルギーが達成されている。しかし，今後も継続的に消費エネルギーを削減していくためには，このインバータ電車を更に省エネにしていく方法を考えなければならない。

インバータ電車ではブレーキ時に車両の運動エネルギーを電気エネルギーとして回生するため，走行に伴う消費エネルギーは走行抵抗による損失や機器損失を足し合わせたものとなる。そこで，インバータ電車の消費エネルギーを更に削減するためには，主電動機等の電気機器の効率を向上し，機器損失を低減することが重要であると考えられる。

しかし，実測により消費エネルギーや回生エネルギーを把握する取り組みは行われている^{2) 3)}ものの，消費エネルギーの内訳は実測で明らかにすることができないため，主電動機等の電気機器の損失が消費エネルギーのどの程度の割合を占めるかは明確でない。よって，主電

動機を高効率化すれば省エネになることは分かっているが，消費エネルギーがどの程度削減できるかは定量的に分からず，主電動機を高効率化しようという動機が起こりにくい。

そこで，本論文では，標準的な通勤電船用主電動機を例に取り，高効率を目指した主電動機設計をすることにより，低コストな駆動システムを目指した設計に比べてどの程度効率がかわるかを示す。さらに，走行シミュレーションにより消費エネルギーの計算を行い，高効率主電動機による消費エネルギーの削減効果を定量的に示し，通勤電車の省エネルギーにおいて主電動機を高効率化することが重要であることを示す。

2. 高効率を目指した主電動機設計

2.1 主電動機設計における材料選定

誘導電動機において電力を機械出力に変換する部分は，主に三つの要素から構成される。それらは，回転子において電流が流れる回路を構成する回転子導体，固定子において電流が流れる固定子巻線，固定子と回転子の双方において磁気回路を構成する鉄心である。これらの要素では，それぞれの部分に適した材料が用いられており，適用可能な候補の中から設計者が用途に応じて材料を選定する。その際に，高効率を目指して損失が少ない材料を使用すれば効率の高い電動機となる。しかし，一般に，損失が少ない材料の使用は主電動機本体とインバータの初期コストの上昇につながる。そのため，低コストを目指した設計がなされた場合，損失が少ない材料は選定されない。本論文では，この材料選定に着目し，これによる高効率化効果や消費エネルギー削減効果を明らかにすることを目指す。

* 車両制御技術研究部（動力システム）

特集：車両技術

以下では各部の材料について材料選定と効率・コストの関係について説明する。

2.2 材料選定による高効率化

2.2.1 回転子導体

誘導電動機中では固定子巻線に流れる電流により回転磁界が形成され、その回転磁界よりも回転子の回転速度が若干低いと、回転子の導体に起電力が発生し電流が流れる。この回転速度の差を回転磁界の回転速度に対する比で表したものを「すべり」と呼ぶ。

$$s = (\omega_{mag} - \omega_r) / \omega_{mag} \quad (1)$$

ただし、 s ：すべり、 ω_{mag} ：回転磁界の回転速度、 ω_r ：回転子の回転速度、である。

誘導電動機ではすべりに応じて、回転子導体等で構成されるかご状の電気回路に電流が流れ、その電流と磁界の作用によりトルクを発生する。その際、電流が流れることにより回転子で損失が発生するが、その損失と出力の関係は次式で表される⁴⁾。

$$P_c = P_m s / (1 - s) \quad (2)$$

ただし、 P_c ：回転子における損失、 P_m ：出力である。一般に運転時のすべりは数%以下で小さいため、回転子損失はすべりと出力の積に概略比例する。そのため、すべりを小さくすれば回転子における損失を低減できる。このためには電気抵抗が小さい材料を回転子導体に用いて、回転子の回路の電気抵抗を小さくし、小さなすべりによる小さな起電力でも必要な電流が流れるように設計すれば良い。しかし、実際の鉄道車両用誘導電動機では、銅よりも2～3倍程度抵抗率が大きい銅合金を使用し、すべりが大きくなるように設計している。

その主な目的は、一台のインバータで複数の誘導電動機を並列運転（以下、一括制御と呼ぶ）する際に、それらの電動機が駆動する輪軸の車輪直径の差（以下、車輪径差と呼ぶ）を許容することにある。車輪は使用に伴い摩耗したり、損傷したりするため、必要に応じて踏面が削正される。この結果として各輪軸間には車輪径差が生じるが、その差はある基準内に収まるように管理されている⁵⁾。車輪径差があると主電動機の回転速度に差が生じるため、各主電動機のすべりに差が生じ、電流やトルクのアンバランスを生じる。車輪径差とトルク差の関係は次式で概略評価される⁶⁾。

$$\frac{\Delta T}{T} = \frac{1-s}{s} \frac{\Delta D}{2D} \quad (3)$$

ただし、 ΔT ：トルク差、 T ：平均トルク、 ΔD ：車輪径差、 D ：平均車輪径である。

車輪径差によるトルク差が大きいと大きなトルクを負担する車輪が空転し、必要な加速力が得られなくなるお

それがある。また電流差が大きいと、電流が大きい主電動機が過熱するおそれがある。しかし、すべりを大きくしておけば同じ車輪径差に対するトルク差は小さくなり、電流のアンバランスも小さくなる。よって、大きな車輪径差を許容するためにすべりが大きく設計される。

表1は一括制御する範囲と、その範囲に対応する車輪径差⁵⁾、およびそれに対応する誘導電動機のすべり⁶⁾と導体材料の選定の例である。

表1 導体材料選定の例

一括制御範囲	車輪径差管理限界	定格すべり	導体材料の例	抵抗率 ($\mu\Omega\text{ cm}$)
1台車	3mm	1.5%	銅-すず	2.6
1車体	6mm	2.5%	銅-亜鉛	4.0
2車体	11mm	3.9%	黄銅	6.7

※抵抗率は20℃における値

表1では、一括制御する範囲が広くなると許容する必要がある車輪径差も大きくなり、それに対応させてすべりを大きくするために抵抗率の大きな材料を選定する必要があることが示されている。

一般に、一括制御する範囲が広いほどインバータを安価にできる。そのため、低コストな駆動システムを目指した設計をする場合、一括制御範囲を広げ、抵抗率が大きい材料を回転子導体を使用するため、効率が低くなる。

逆に高効率を目指すのであれば、一括制御する範囲を狭くし、回転子導体には低抵抗の材料を用いるようにすれば良い。また、編成内の主電動機数を多くすれば、粘着や電動機の温度上昇に余裕ができ、多少のアンバランスが生じて問題にならないため、低抵抗材料の使用が可能である。さらに、近年では制御技術の向上により空転を起こしにくくなっているため、以前より低抵抗材料を使用しやすい。よって、主回路システムの構成によってはすべりの小さい設計をしても実用上問題無い場合も多く、最近の車両では非常にすべりの小さい設計がなされている例もある。

このように、回転子導体には低抵抗材料を選定することによる高効率化の余地がある。

2.2.2 固定子巻線

次に、固定子巻線における材料選定について述べる。

主電動機の固定子巻線は、平角銅線を巻いて作った複数のコイルを固定子鉄心に取り付け、所定の回路を構成するようにそれらのコイルを接続して作られる。

その平角銅線に施す素線絶縁には、ガラス繊維を用いた絶縁と高耐熱樹脂(ポリイミド)を用いた絶縁がある。後者は前者に比べて高価であるが、絶縁層を薄くでき、高い耐熱性も有している。コイルの断面は例えば図1に示すような構成となる。

固定子巻線では通電に伴い銅線の電気抵抗により損失

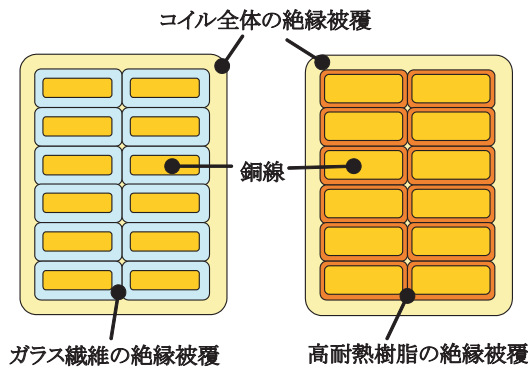


図1 コイルの断面図

が発生するが、その損失を小さくするには銅線の断面積を増やして電気抵抗を小さくすれば良い。図に示したように、薄い高耐熱樹脂の絶縁被覆を用いれば、その分銅線の断面積を増やすことができ、発生損失を小さくすることができる。

ところが、前述の通り、高耐熱樹脂の絶縁はガラス繊維の絶縁に比べて高価であるため、在来線電車ではガラス繊維の絶縁が用いられることが多い。よって、固定子巻線についても、材料選定による高効率化の余地があるといえる。

2.2.3 鉄心

次に、磁気回路を構成する鉄心について述べる。

運転時の電動機内部では前述のように回転磁界が発生するため鉄心中を通る磁界は時間とともに変化する。そのため、鉄心中では渦電流損とヒステリシス損からなる鉄損が発生する。渦電流損は電磁鋼板中において磁界の変化に起因して流れる電流による損失であり、ヒステリシス損は鉄を磁化する際のヒステリシス特性に起因して発生する損失である。渦電流損を低減するためには、表面が絶縁された薄い鉄板を積層して鉄心を構成することが効果的であるため、鉄心は電磁鋼板を積層して作られている。電磁鋼板は透磁率を高く損失を小さくすること等を目指して材質が調整されており、様々な材料が開発されている。一般的な電磁鋼板はJIS規格⁷⁾で規定されており、主電動機でもJIS規格相当の電磁鋼板を使用している。表2はJIS規格に規定されている電磁鋼板から主電動機での使用実績がある材料を抜粋したものである。

JIS規格では20種類以上の材料が規定されているが、実際に鉄道用で使用可能なのは市場で多く流通している材料のみであり、使用実績のある材料のみを考慮するこ

表2 電磁鋼板の種類

種類	鉄損	厚さ
35A300	3.00W/kg 以下	0.35mm
50A400	4.00W/kg 以下	0.5mm
50A800	8.00W/kg 以下	0.5mm

※鉄損は周波数 50Hz, 最大磁束密度 1.5T の際の値

ととする。表から分かるように、種類を表す記号の数字は鉄損と厚さを表現している。

一般に損失が小さい材料は硬くなる傾向があり、加工コストが高くなる。そのため、主電動機の鉄心に使用可能な電磁鋼板の中から比較的損失が少ない材料が選定されることは少なく、通常は50A800が使用される。しかし、35A300等の低損失な電磁鋼板を用いれば鉄損の削減が期待できる。よって、鉄心についても材料選定による高効率化の余地があるといえる。

2.3 標準的通勤電車を想定した高効率化効果の例

以上述べたように、低コスト設計から高効率設計に変えることで各部の損失を削減でき、主電動機の高効率化が可能である。しかし、高効率化効果と消費エネルギー削減効果がどの程度か分からなければ、高効率主電動機を使用することの是非が評価できない。

このうち、高効率化効果については、主電動機の寸法と物性値から計算を行い評価することが可能である。ただし、鉄損については発生メカニズムが複雑であるため、実機での試験結果を基に作成した損失モデルを用いて計算する。以下では、標準的通勤電車を対象として主電動機を仮設計し、材料選定による高効率化効果を評価した結果について示す。

今回の設計で前提とした車両の諸元を表3に、速度引張り特性を図2に示す。

表3 車両諸元

編成	5M5T (Tc-M-M-T-M-T-T-M-M-Tc)
質量	313.4t (Tc車27.7t, T車26.5t, M車35.7t)
定員	1506人
架線	DC1500V (回生時DC1650V)
軌間	1067mm
加速度	3.3km/h/s
減速度	3.5km/h/s (常用最大)
歯車	歯車比: 6.53 (98/15), 歯車効率: 97.5%
車輪径	860mm (最大), 790mm (最小), 820mm (計算)

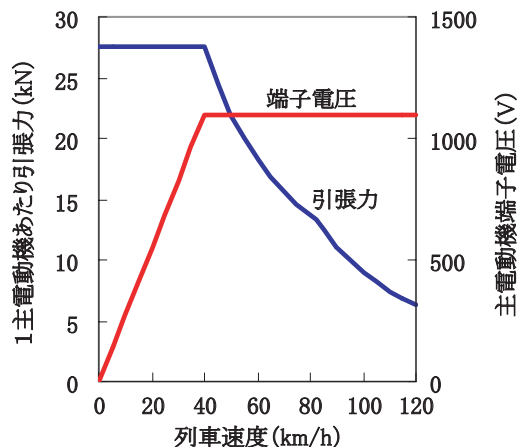


図2 速度－引張り・電圧特性（最大荷重時）

特集：車両技術

本諸元は鉄道車両工業会発行のガイドライン⁸⁾に基づくもので、設計に関係する仕様や条件については基本的にそのガイドラインに沿ったものとしている。

今回の設計検討では、表4に示す仕様に従い主電動機を設計し、寸法が同じで材料が表5に示すように異なる5種類の主電動機A～Eを設計した。

表4 主電動機仕様（共通部分）

電動機方式	三相かご形誘導電動機
装荷方式	台車装荷式（3点片持ち支持）
冷却方式	自己通風方式（ろか器通風式）
駆動方式	たわみ軸継手式平行カルダン方式
定格出力 (1時間定格)	190kW-1825/min-1100V
絶縁種別	H種

表5 主電動機仕様（材料変更部分）

部品	材料	主電動機形式				
		A	B	C	D	E
回転子 導体	黄銅	○		○	○	
	銀入り銅		○			○
固定子 巻線	ガラス繊維	○	○		○	
	高耐熱樹脂			○		○
鉄心	50A800	○	○	○		
	35A300				○	○

Aは各部の材料を低コスト設計により選定したもので、B～DはAをベースにして1つの部品のみを高効率設計で選定したもの、Eはすべての部品を高効率設計で選定したものである。材料は各部品について低コスト設計と高効率設計の2種類の材料が表5に示されている。回転子導体については、表1に示したように車輪径差等を考慮して様々な材料が使用されているが、ここではそのうち最も抵抗率が高い黄銅と主電動機に使用可能な材料で最も抵抗率が低い銀入り銅について設計を行う。銀入り銅は直流電動機の整流子に使用される材料であり、高い機械的強度と銅と同程度の低い抵抗率を有する。また、鉄心についても、表2に示した材料のうち、最も鉄損低減が期待できる35A300と最も鉄損が大きくなる50A800についてのみ設計を行う。

以上の仕様に基づき、主電動機を設計し、過去に製作された主電動機の実測データから主電動機損失を評価した結果を図3に、これに対応する効率を表6に示す。

図3に示すように、低コスト設計のAを基準にすると、回転子導体の材料を変更したBでは回転子銅損が60%減少し、固定子巻線を変更したCでは固定子銅損が15%減少し、鉄心を変更したDでは固定子鉄損が14%減少している。そして全ての材料を高効率設計で選定したEでは、これらの効果が全て合計され、合計損失が27%減少して

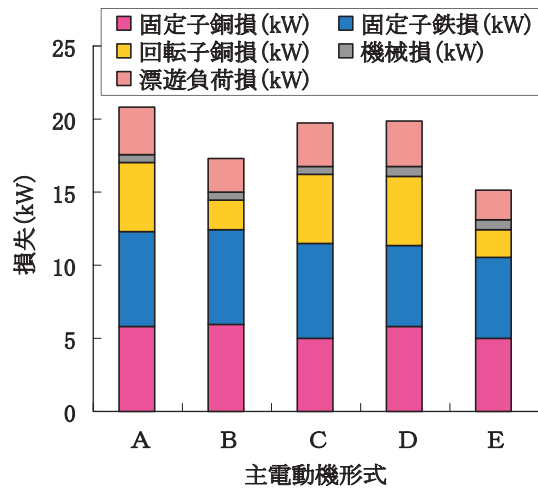


図3 定格出力時の主電動機損失

表6 定格出力時の効率

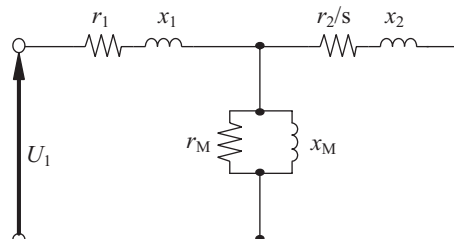
	主電動機形式				
	A	B	C	D	E
効率	90.1%	91.6%	90.6%	90.5%	92.6%

いる。この結果として表6に示したように、EはAに比べて効率が2.5%向上する結果となっている。このように、低コスト設計から高効率設計へ変えるだけで、大幅な損失削減が可能であることが確認できた。

また、設計された主電動機の等価回路定数を表7に示す。なお、等価回路は図4に示すT形等価回路⁴⁾を前提としている。表7から分かるように、Bでは回転子導体等で構成される回路に対応する二次抵抗が、Cでは固定

表7 等価回路定数

等価回路定数 (Ω)	主電動機形式				
	A	B	C	D	E
r_1	0.1041	0.1041	0.0899	0.1041	0.0899
x_1	0.3521	0.3471	0.3520	0.3521	0.3468
r_2	0.1271	0.0532	0.1271	0.1271	0.0532
x_2	0.3749	0.3696	0.3748	0.3749	0.3695
r_M	164.8	161.5	164.6	191.4	187.3
x_M	8.75	8.43	8.72	8.75	8.41



r_1 : 一次抵抗, x_1 : 一次もれリアクタンス
 r_2 : 二次抵抗, x_2 : 二次もれリアクタンス, s : すべり
 r_M : 鉄損抵抗, x_M : 励磁リアクタンス, U_1 : 相電圧

図4 誘導電動機のT形等価回路（1相あたり）

子巻線に対応する一次抵抗が、Dでは固定子鉄損に対応する鉄損抵抗が、Aに対して大きく変化しており、これらが前述の損失の減少に寄与している。

次章では、この等価回路を用いて、主電動機の損失削減により電車走行時の消費エネルギーがどの程度削減できるかを例示する。

3. 通勤電車を想定した省エネルギー効果の評価

3.1 走行シミュレーションによる消費電力量評価法

3.1.1 走行シミュレーションの概要

電車走行時の消費エネルギーを計算により評価するためには、走行シミュレーションを行い、各時刻におけるエネルギー損失を積算して消費エネルギーを求めるのが良い。本章では、主電動機間の相対比較を目的として、駅間距離が短い通勤電車を想定し、起動加速（力行）一惰行→ブレーキ停止という単純な運転パターンを前提として表8に示す条件に従い走行シミュレーションを行い、消費電力量を評価する。

なお、本論文では車両の走行に伴い発生するエネルギー損失のことを消費エネルギーと呼び、空調機器等のサービス機器が使用する電気エネルギーは消費エネルギーに含めない。また、ブレーキ時には回生ブレーキが全てのブレーキ力を負担する前提で計算する。

表8 走行シミュレーション条件

走行距離	1.2km	勾配・曲線	無し
走行時間	90s	車両諸元	表3
荷重条件	各車 21t	引張力特性	図2
減速度	1.5km/h/s (45km/h まで) 2.5km/h/s (45km/h から停止まで)		
走行抵抗式	JIS E 6002 ⁹⁾ に従う		

3.1.2 等価回路による主電動機損失の計算

走行時の主電動機出力は、図2に示した引張力特性から速度に対応する引張力を求め、表3に示した歯車比と歯車効率を考慮して主電動機の回転速度とトルクを計算することにより求められる。そして、その出力に対応する主電動機損失は2.3節で紹介した等価回路により計算する。主電動機損失のうち、固定子銅損、回転子銅損、固定子鉄損については等価回路の抵抗要素で消費される電力として計算される。また、本計算では固定子銅損と回転子銅損の合計に対して30%の漂遊負荷損が発生すると仮定し計算している。ただし、2.3節表7で示した等価回路定数は定格出力に対応するものである。そのため、走行時の計算には任意の出力に対応する等価回路定数を計算する必要がある。等価回路定数のうち、 r_1 と r_2 については電気抵抗なので運転点により変化しないためそのまま用いる。 x_1 、 x_2 、 x_m については周波数に比例するため、

定格点での値に（動作周波数 / 定格周波数）を乗じたものを用いる。鉄損抵抗については、定格点での鉄損抵抗の値を元に、周波数の関数として値を変化させるモデル¹⁰⁾を用いる。

以上のようにして各動作点に対して計算される等価回路定数を用いて、等価回路の動作を数値計算し各運転点での主電動機損失を計算する。

3.1.3 主電動機以外の機器損失の計算

消費エネルギーを計算するためには、主電動機以外の機器損失も計算する必要がある。直流電車において主電動機以外の機器で損失を発生する主な電気機器としてはインバータとフィルタリアクトル (FL) がある。このうちFLについては単純にその抵抗値を用いて、ジュール損失を計算すればよい。インバータについては半導体デバイスにおけるスイッチング損失や導通損失を計算する必要があり、正確に計算するには回路シミュレーションが必要となる。しかし、消費エネルギーを概算する目的であれば、半導体デバイスのデータシートに記載のデータを用いた簡易計算¹¹⁾で十分である。本計算では最近の鉄道車両で標準的に用いられているIGBT（定格電圧3300V、定格電流1200A）を用いた2レベルインバータを想定して損失計算を行う。計算で想定した半導体デバイスの特性値とインバータの諸元等を表9、表10に示す。

表9 損失計算に使用した半導体デバイスの特性値

特性値		試験条件
ターンオン損失	2.2 J	印加電圧：1800 V 導通電流：1200 A
ターンオフ損失	2.0 J	
コレクタ-エミッタ飽和電圧	4.6 V	導通電流：1200 A
ダイオードリカバリ損失	1.0 J	印加電圧：1800 V 導通電流：1200 A
ダイオード導通電圧	3.5 V	

表10 損失計算で仮定したインバータ諸元等

制御主電動機台数	4台
キャリア周波数	1500Hz
主電動機効率	80%
フィルタリアクトル (FL) 抵抗値	0.05 Ω

3.2 計算結果

以上に述べた方法と条件に基づき電車を走行させた際の消費エネルギーを計算する。消費エネルギーの計算結果を図5に、その主電動機損失の内訳を図6に示す。図では、消費エネルギーを車両数と走行キロで除したエネルギー消費原単位でエネルギーを表している。図5ではエネルギー消費原単位の値が1程度である。通勤電車の消費エネルギーの実測例²⁾からエネルギー消費原単位を計算してみると0.8～1.1程度であり、今回の計算は通勤

特集：車両技術

電車における実際の消費エネルギーと概ね一致している。

図5によると、主電動機Aでは消費エネルギーの半分以上を主電動機損失が占めており、通勤電車において主電動機の高効率化が重要であることが分かる。そして、主電動機Eは主電動機Aに対して損失が28%削減されており、その結果、消費エネルギーが14%低減している。

更に図6の内訳を見ると回転子銅損の低減が最も顕著であり、消費エネルギーの削減に大きく貢献している。これに低損失電磁鋼板の使用による固定子鉄損の低減や薄い絶縁被覆を用いた電線の使用による固定子銅損の低減が加わり、全体で3割近い損失削減を実現している。

図3に示した検討結果は定格点における比較であるが、図6は実使用時を想定した計算結果による比較である。図3と図6の比較から、実使用時は固定子や回転子の銅損の割合が比較的大きいことが分かる。起動から低速域にかけては、回転速度が比較的小さいため鉄損の発生が

比較的小さい。その一方で、低速域では大トルクを出力するために大きな電流を流すため銅損の発生が大きい。そのため、起動加速や回生ブレーキによる停止を頻繁に繰り返す通勤電車では、低速域での損失発生の影響が大きく、銅損の割合が大きくなっているものと考えられる。よって、通勤電車のエネルギー損失低減のためには、銅損の低減が特に重要である。

4. まとめ

標準的な通勤電車を対象にして、設計計算とシミュレーションにより、主電動機材料選定による効率向上効果と走行時の消費エネルギー低減効果を評価した。

その結果、材料の選定により主電動機の発生損失が大きく変わり、最も差が大きい場合で、定格点の効率で2.5%、走行時の主電動機損失で28%、消費エネルギーでは14%の差が生じる結果となった。

今回の計算例によると、主電動機損失は通勤電車の走行に伴う消費エネルギーの約半分を占め、通勤電車の省エネルギー化には主電動機の高効率化が重要であることが示された。

今後は高効率と低コストの両立が可能な主電動機を目指し、材料選定以外の手法による高効率化の研究開発を進めていきたい。

文献

- 1) 経済産業省・国土交通省：改正省エネ法の概要（輸送に係る措置）パンフレット，2006
- 2) 本倉幹弘：E233系，E231系における回生エネルギーの現況，鉄道車両と技術，No.150，pp.6-9，2009
- 3) 山下高賢，可児周博，中村悦章：JR西日本における回生電力有効活用の取り組み，鉄道車両と技術，No.150，pp.10-16，2009
- 4) 難波江章，金東海，高橋勲，仲村節男，山田速敏：電気機器学 第3章，オーム社，2000
- 5) 広重巖：輪軸，交友社，p.483，1971
- 6) 坪井孝，加藤憲司：最近のVVVF制御技術の動向，車両と電気，1989年7月号，pp.32-36
- 7) 日本規格協会：JIS C 2552 無方向性電磁鋼帯，2000
- 8) 日本鉄道車輛工業会：鉄道車両ー通勤・近郊電車の標準仕様ガイドライン，日本鉄道車輛工業会，2003
- 9) 日本規格協会：JIS E 6002 通勤用電車の性能通則，1989
- 10) 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
- 11) 為谷典孝：パワーデバイスの損失・温度上昇シミュレータ，三菱電機技報，2007年5月号，pp.55-58，2007

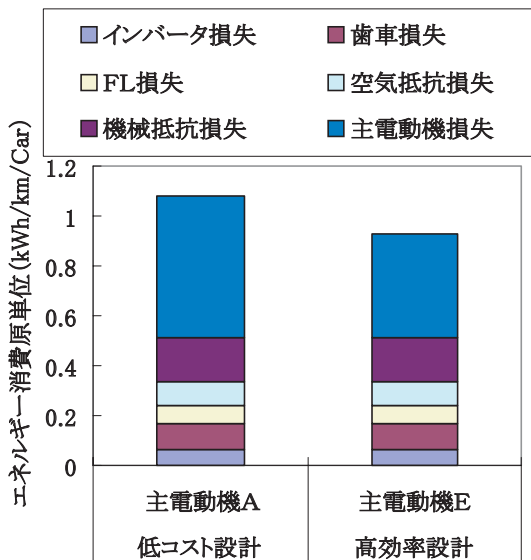


図5 消費エネルギー計算結果

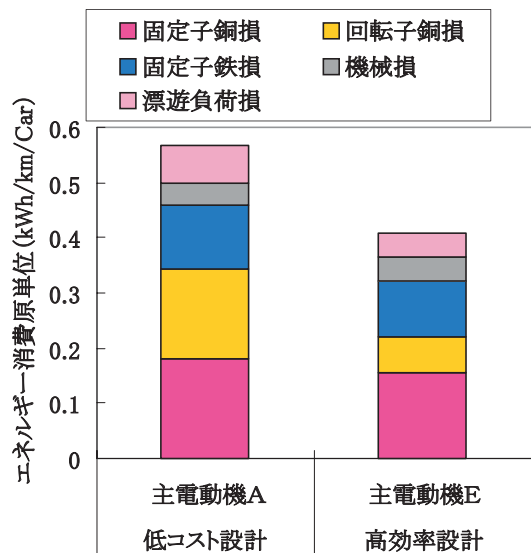


図6 主電動機損失の内訳