

富士電機のトップランナーモータ ——「プレミアム効率モータ」の損失低減技術——

Fuji Electric's Top Runner Motor —
Loss-Reduction Technology of “Premium Efficiency Motor”

館 憲弘 TACHI, Norihiro

鯉淵 博文 KOIBUCHI, Hirobumi

高橋 和利 TAKAHASHI, Kazutoshi

モータは、社会生活や産業活動に欠かせないキーコンポーネントであり、その使用電力量は全世界の使用エネルギーの約40%に達する。そのため、モータの高効率化が世界の主要国の課題であり、日本ではトップランナー制度によって2015年4月から効率の規制が始まる。富士電機が開発した「プレミアム効率モータ」は、スロット形状の最適化、低損失の電磁鋼鉄の採用などの損失低減技術によって効率規制値を満足している。高効率に加え、低騒音も実現した環境に配慮した製品である。

Motors are a key component indispensable for social and industrial activities. They consume electric power that accounts for nearly 40% of the global energy consumption. Consequently, improving motor efficiency is a challenge for the major countries of the world. In Japan, the Top Runner Program was introduced in April 2015 to regulate motor efficiency. The “Premium Efficiency Motor” that Fuji Electric has developed satisfies the efficiency regulation value through various loss-reduction technologies including an optimized slot shape and the adoption of magnetic steel that dissipates less power. This is an environmentally friendly product achieving low noise as well as high efficiency.

① まえがき

三相誘導電動機（モータ）^{〔注1〕}は、社会生活や産業活動に欠かせないキーコンポーネントである。空調用ファン・コンプレッサ、送風用ファン、水道用ポンプ、エレベータなどのインフラ設備の動力源として、また、工作機械、印刷機、クレーンなどの各種産業機械の動力源として数多く使用されている。したがって、地球規模の省エネルギー（省エネ）においてモータの高効率化は不可欠である。

海外の主要国で効率の規制が進められてきているが、日本はシステムで省エネを行うことに主眼を置いてきたことからモータ単体での規制はなかった。しかし、2013年11月に「エネルギーの使用の合理化等に関する法律」（省エネ法）^{〔注2〕}の改正が施行され、モータのトップランナー制度として2015年4月から効率の規制が始まることとなった。

本稿では、富士電機のトップランナーモータ「プレミアム効率モータ」の損失低減技術について述べる。

② モータの電力消費量と効率クラス

電力は全世界で1年間に20兆kWh消費されており、その内の約40%がモータによって消費されている（図1）^{〔1〕}。

1997年には地球温暖化防止の「京都議定書」^{〔注2〕}が議決され、温室効果ガスの排出量を削減することが世界的な約束となった。仮に、モータ効率を1%向上させれば、全世界の電力消費量を800億kWh、CO₂排出量を3,200万t削減

できる。

欧米先進国をはじめとするエネルギー消費大国にとって、モータの高効率化はCO₂排出量の削減に対して非常に効果的な施策と位置付けられ、モータ単体での効率向上を図る動きとなっている。効率に関する国際的な規格として、国際電気標準会議（IEC）のIEC 60034-30〔回転電気機械－第30部：単一速度三相かご形誘導電動機の効率クラス（IEコード）〕がある（表1）。米国は、高効率（IE2）とプレミアム効率（IE3）の生産出荷台数の合計が約70%となっている。欧州は、IE2が50%以上となっており、2015年1月にはIE3での法規制が始まった。

このように欧米でモータの高効率化が進んでいる状況に対し、日本もトップランナー基準による効率の規制が

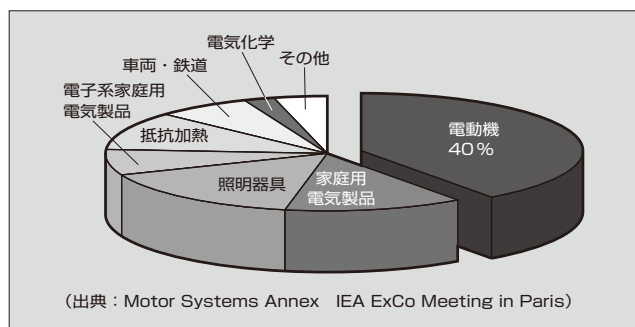


図1 全世界の電力消費量の内訳

表1 IEコードと効率クラス

IEコード	効率クラス	JIS
IE3	プレミアム効率	JIS C 4213
IE2	高効率	JIS C 4212相当
IE1	標準効率	JIS C 4210相当

〔注1〕モータ：モータは一般的には全ての電動機を指すが、本稿では三相誘導電動機を指す。

〔注2〕京都議定書：正式名称は“気候変動に関する国際連合枠組条約の京都議定書”である。

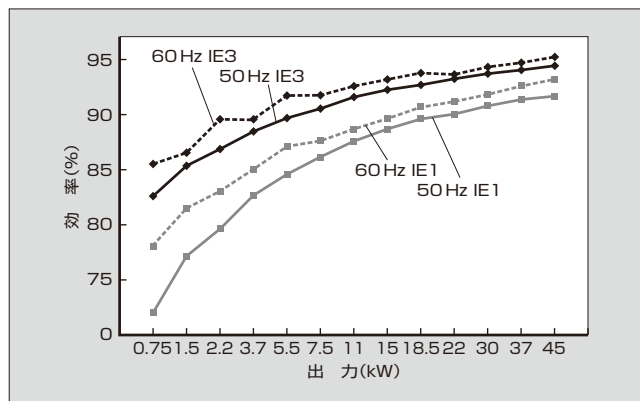


図2 富士電機の代表機種における効率比較

2015年4月に始まる。⁽³⁾

トッランナー基準はIE3をベースにしながらか日本独自の電源事情である3種類の定格電圧・周波数を考慮した規制となっている。すなわち、200V 50Hz および 220V 60Hz の効率規制値はIE3であるのに対し、200V 60Hz はIE3に係数を掛けた値を規制値とし、また、規制値の達成判定を36区分で設定している。図2に、IE1とIE3について富士電機の代表機種における効率比較を示す。

③ 「プレミアム効率モータ」の特徴

プレミアム効率モータの外観を図3に、仕様を表2に示す。特徴は次のとおりである。

(1) トッランナー基準のモータ効率

全ての出力(0.75~375kW)でトッランナー基準のモータ効率を実現している。また、定格電圧・周波数の3定格^(注3)および6定格^(注4)で、効率クラスIE3(プレミアム効率 JIS C 4034-30:2011)を実現している。

(2) 標準モータとの容易な置換え



図3 「プレミアム効率モータ」

<注3> 3定格: 200V 50Hz, 200V 60Hz, 220V 60Hzを指す。

<注4> 6定格: 200V 50Hz, 400V 50Hz, 200V 60Hz, 400V 60Hz, 220V 60Hz, 440V 60Hzを指す。6定格にするためには、3定格に対して電圧や電流の増加を考慮した設計が必要になる。

表2 「プレミアム効率モータ」の仕様

項目	仕様	
シリーズ名	MLU (鋳物フレーム100L以上) MLK (鋼板フレーム90L以下)	
保護方式	IP44 (屋内) IP55 (屋外)	
定格電圧・周波数	枠番160L以下: 200/200-220V および 400/400-440V 50/60Hz 枠番180M以上および屋外型: 200-400 50Hzおよび 200-400/220-440V 60Hz	
時間定格	S1 (連続)	
始動方式	3.7kW以下: 直入始動 5.5kW以上: スターデルタ始動	
耐熱クラス	155 (F)	
端子箱 (脚取付)	取付位置	枠番200L以下: 負荷側から見て左横側 枠番225S以上: 負荷側から見て上側
	引込口方向	枠番200L以下: 下向き (屋内) 反運転側向き (屋外) 枠番225S以上: 負荷側から見て左向き
口出線	方式	枠番160L以下: 端子台方式 枠番180M以上および屋外型: ラグ方式
	本数	出力3.7kW以下: 3本 (屋内), 9本 (屋外) 出力5.5kW以上: 6本 (屋内), 12本 (屋外)
耐振性	6.8m/s ² (0.7G)	
塗装色	マンセルN1.2 (黒ツヤなし)	
銘板 ワッペン エンブレム	仕様銘板	枠番200L以下: フレーム部へ貼付 (鋼板製) フレーム銘板取付座にくぎ止め (鋳物製) 枠番225S以上: ファンカバー部にくぎ止め
規格	適用	JIS C 4213
	効率	JIS C 4034-30: 2011*
モータ効率クラス	2P-45kW以下, 4・6P-7.5kW以下 (ただし6P-1.5kWのみ除く): IE3/IE3-IE3 at 200/200-220V, 400/400-440V 50/60Hz, 二重電圧 2P-55kW以上, 4・6P-11kW以上および 6P-1.5kW: IE3/IE2-IE3 at 200/200-220V, 400/400-440V 50/60Hz, 二重電圧	

*モータ効率の試験方法は、JIS C 4034-2-1「単一速度三相かご形誘導電動機の損失及び効率の算定方法」規定の「不確かさ低」による。

^(注5) 枠番号および取付寸法を、従来の富士電機の標準モータと同一とすることで、モータの円滑な置換えができる設計とした。脚取付で枠番号160M以下の機種は全長および径寸法も同一寸法とした。

(3) ワイド電圧

屋外型のモータにおいては汎用性を追求し、富士電機および顧客における在庫点数を削減するため、定格電圧・周波数を6定格とした。

(4) 耐環境性の向上

温度上昇を抑えつつも絶縁性能を上げ、また、鋳鉄フレームの採用範囲を拡大して耐食性の向上や低騒音化を進め、さまざまな環境下で使用できるようにした。

(a) 保護方式

従来のモータの保護等級は屋内と屋外で仕様の区別は

<注5> 枠: シリーズ化されたモータは2~3容量を“枠”としてサイズを共通化する場合が多い。

なく IP44 であったが、^{〔注6〕}プレミアム効率モータにおいては世界標準に合わせて、屋内仕様を IP44、屋外仕様を IP55 とした。

(b) 周囲温度

周囲温度の仕様は、一般に -20 ~ +40℃であったが、富士電機のプレミアム効率モータにおいては -30 ~ +50℃に範囲を拡大した。

(c) 最大始動電流

効率を上げるために従来の標準モータより抵抗を小さくした結果、最大始動電流は大きくなったが、ロータスロット形状を見直すことで増加を 20% 程度に抑えた。

(5) インバータ運転への対応

インバータ運転の使用範囲を拡大した。60 Hz の基底周波数において、従来は 15 ~ 60 Hz の範囲で定トルク運転が可能であったが、プレミアム効率モータは 3 ~ 60 Hz で定トルク運転が可能である。より広範囲で使用できるので利便性が高まった。

4 損失低減技術

4.1 損失低減方法

図 4 にモータの損失低減策を示す。損失はモータの各部分で発生しており、効率規制値を満足するためには全ての部位の損失を低減する必要がある。また、損失は、銅損（一次銅損および二次銅損）、鉄損、機械損および漂遊負荷損に分けられ、約 50% を占める銅損と約 30% を占める鉄損の低減が重要である。

(1) 銅損の低減

一次銅損とは、モータ巻線の電気抵抗と電流によるジュール損失のことであり、電流が一定の場合は抵抗に比例して増加する。抵抗を小さくするために、固定子スロットの数および形状の最適化を行い、従来品と比較してスロットの形状を大きくすることや、導体の断面積を増やすことなどの見直しを行った。式(1)で示すように、抵抗と導体断面積は反比例の関係であるため、導体の断面積を増やすことで抵抗を下げ損失を低減している。

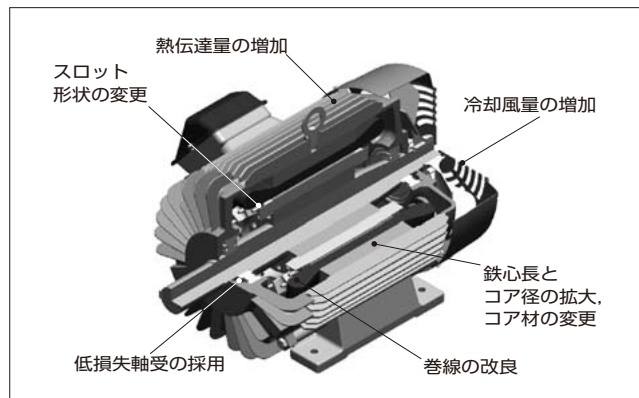


図4 モータの損失低減策

〔注6〕 IP : 77 ページ「解説4」を参照のこと

$$R = \rho \frac{L}{S} \dots\dots\dots (1)$$

- R : 抵抗 (Ω)
- ρ : 電気抵抗率 (Ω・m)
- L : 導体長さ (m)
- S : 導体断面積 (m²)

スロット数および形状は、有限要素法を用いて検討し、固定子と回転子の磁束分布と発生する損失とのバランスを考慮して最適なものに決定した。その他、スロットに入れる巻線の充填率を向上させることによる導体断面積の増加、およびコイルエンド部分を短く成形することによる導体長の短縮により、巻線での抵抗を小さくして一次銅損を低減している。

回転子側で発生する二次銅損は、アルミニウムや銅などの二次側導体に誘導電流が流れることで発生する損失である。一次銅損と同様にスロット形状の最適化を行い、抵抗を小さくして二次銅損を低減している。また、回転子スロットの形状によってモータのトルク特性および電流特性が大きく変わるため、各特性を満足させながら効率を満足させるために、モータの出力や極数ごとに形状を最適化した。

(2) 鉄損の低減

鉄損は、鉄心内の磁束の変化によって発生する渦電流損とヒステリシス損の和である。材料自体の鉄損を減少させるために低損失な電磁鋼板を採用した。

鉄心各部に応力が加わることで材料の磁気特性にひずみが生じて損失が増加するため、応力を緩和させることも重要である。例えば、コアとフレームのしめしろを小さく見直すことでコアの変形を最小限に抑え、損失の増加を防いでいる。従来のモータでは電磁鋼板を積層する際にコアの背面を溶接しているが、溶接によりコアの応力が増加し鉄損が増えることが想定された。そこで、コア積方式を溶接しない方法に変更して鉄損の増加を防いだ。

鉄損を低減するためには、固定子と回転子の溝数（スロットコンビ）やスロット形状・寸法など多くのパラメータを考慮する必要がある。銅損を低減するためにスロットを大きくしていくとモータの磁束密度が高くなり、鉄損が増加して効率が低下していく。したがって、銅損とのバランスや電気特性を考慮しながら鉄損を低減する必要があるため、独自に作成した計算プログラムでおおよその仕様を

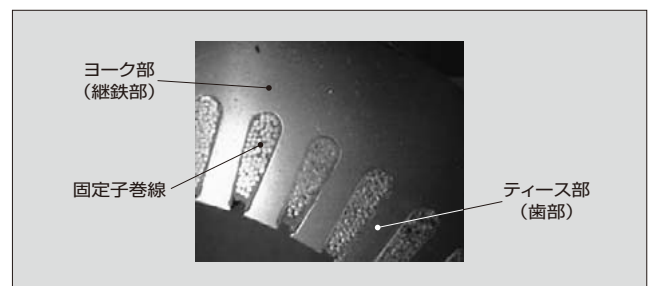


図5 固定子鉄心の断面（部分）

決め、電磁界解析によって設計精度を上げて最適化を図った。

固定子鉄心(図5)の電磁界解析について述べる。図6に鉄心の磁束密度分布の例を示す。回転中のある時点での磁束密度を表したものである。また、図7に鉄心の鉄損密度分布の例を示す。電圧が正弦波状に1周期変化したときの鉄損密度の平均を表したものである。

図6では、スロットを大きくすることで局所的に磁束密度が高くなることが予想されたが、全体的に1.4~1.6T(緑~黄色)程度であり、図内の丸印で示す磁束密度の高い部分においても、磁束密度が飽和せず従来品と同程度であることが分かった。図7では、図6の磁束密度の高い部分においても鉄損は増加しておらず、銅損と鉄損のバランスが取れたスロット形状であることが確認できた。

(3) 機械損の低減

モータには外被冷却用のファンがあり、その回転によって発生する風損も機械損に含まれる。そこで、トッランナーモータは従来のモータよりも損失が少なく発熱による温度上昇が低くなることを踏まえ、設計段階で熱流体回路網法を採用した熱設計を行ってモータの温度を高精度に算出し、冷却ファンによる風損が最小となるようにした。な

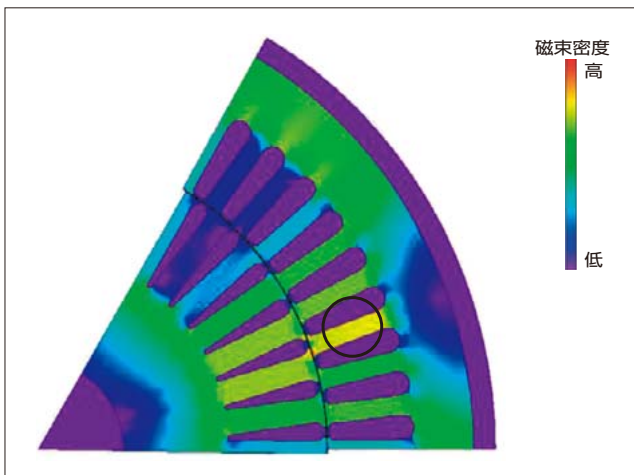


図6 鉄心の磁束密度分布の例

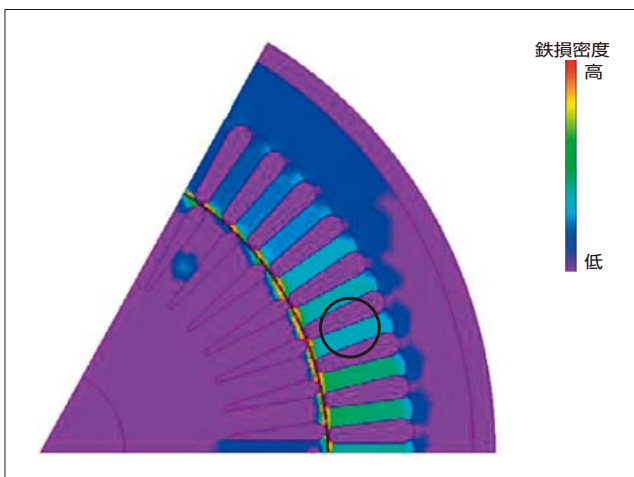


図7 鉄心の鉄損密度分布の例

お、熱流体回路網法は、流体回路網計算で風速を算出した後、熱回路網計算で各部の温度を算出する方法である。

また、モータの軸受で発生する損失も機械損に含まれるため、軸受サイズの見直しや使用するグリースの改善を行い、機械損をさらに低減させた。

(4) 効率の製品間ばらつき低減

トッランナー基準では、規制値の達成判定を36区分で設定しており、区分ごとの加重平均で効率値を満足する必要がある。このため、効率の製品間のばらつきを小さく抑えることも重要であり、製造時における加工精度や管理を厳しくすることで、ばらつきを抑えている。

4.2 損失低減における今後の課題

今後、効率規制値が引き上げられることを想定し、さらなる損失低減を進めていく必要がある。

4.1節で述べたように、モータで発生する損失は、銅損、鉄損、機械損および漂遊負荷損に分けられる。これらの損失は互いにトレードオフの関係になっており、どれか一つの損失を大きく減らすとその他の損失が増えてしまうため、全てをバランス良く低減していかなければならない。損失を低減してIE1からIE3まで改善するためには、損失を20~40%程度減らす必要がある。今後さらに損失を低減して効率を改善していくためには、漂遊負荷損を低減していく必要がある。

漂遊負荷損の主な要因は次の二つである。

- (a) 固定子スロットの漏れ磁束によって固定子巻線中に生じる渦電流損
- (b) エアギャップ部の高調波磁束による損失

漂遊負荷損は正確な算定が困難であり、通常は、銅損、鉄損、機械損のいずれにも含まれない損失と捉えられている。出力の小さい機種では漂遊負荷損の割合が小さく無視できるが、出力の大きい機種ではその割合が大きく損失増加の要因となっている。漂遊負荷損を低減していくためには、損失の発生原因を明確にし、設計段階で損失を精度良く算定できる手法を取り入れる必要がある。

また、高効率のモータでは、始動時のトルク特性や電流特性が悪くなる傾向にある。「MLU・MLKシリーズ」では損失の低減と始動特性を両立できるようなスロット形状の最適化を行っているが、さらに損失を低減していくと両立は困難になっていくと考えられる。さらなる損失低減のため、形状の変更などの検討と並行して新たな低損失コア材料の検討が必要である。また、電磁鋼板をプレス型で打ち抜く際に発生する打ち抜きひずみによって材料の鉄損が増加するので、ひずみ取りの検討も必要である。

5 あとがき

富士電機のトッランナーモータである「プレミアム効率モータ」の損失低減技術について述べた。日本を含む主要な国々で効率の規制がかけられており、富士電機は、この規制を満足する高効率モータを実現するための開発を進

めてきた。

今後も、温室効果ガス削減のための省エネルギー・省電力がモータには要求されていくと考えられる。さらなる高効率化に向け、引き続き開発を進めていく所存である。

参考文献

- (1) 総務省統計局. “石炭・石油・天然ガス・電力消費量 (2008年)”. 世界の統計2012.
- (2) Rolamd Brüniger. Motor Systems Annex IEA ExCo Meeting in Paris 14/15 April 2008.
- (3) 日本電機工業会高効率モータ普及委員会. “トッランナーモータ”. 省エネルギー. 2013, vol.65, no.5.
- (4) 富井栄一, 宇津野良. 高効率モータの技術解説. 工業加熱. 2015, vol.52, no.1, p.27-33.



館 憲弘

電動機およびその応用製品の開発・設計に従事。現在、富士電機株式会社パワエレ機器事業本部鈴鹿工場回転機設計部課長。



鯉淵 博文

電動機の開発・設計に従事。現在、富士電機株式会社パワエレ機器事業本部鈴鹿工場回転機設計部課長補佐。



高橋 和利

電動機、特に三相誘導電動機の開発と設計に従事。現在、富士電機株式会社パワエレ機器事業本部鈴鹿工場回転機設計部。





*本誌に記載されている会社名および製品名は、それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。