

誘導電動機の高効率化技術

米谷晴之*
阿知和典**
川崎啓宇***

Technologies of High Efficiency for Induction Motors

Haruyuki Kometani, Norihiro Achiwa, Keiu Kawasaki

要 旨

各国でいわゆる“省エネ法”がIEC(International Electrotechnical Commission)国際規格に沿った形で制定され、2015年4月には国内でもトップランナー規制が開始されている。また、世界の全電力消費量の40~50%を占める誘導電動機で、2015年から三相誘導電動機だけでなく単相誘導電動機もIEC規格が適用されるようになった。

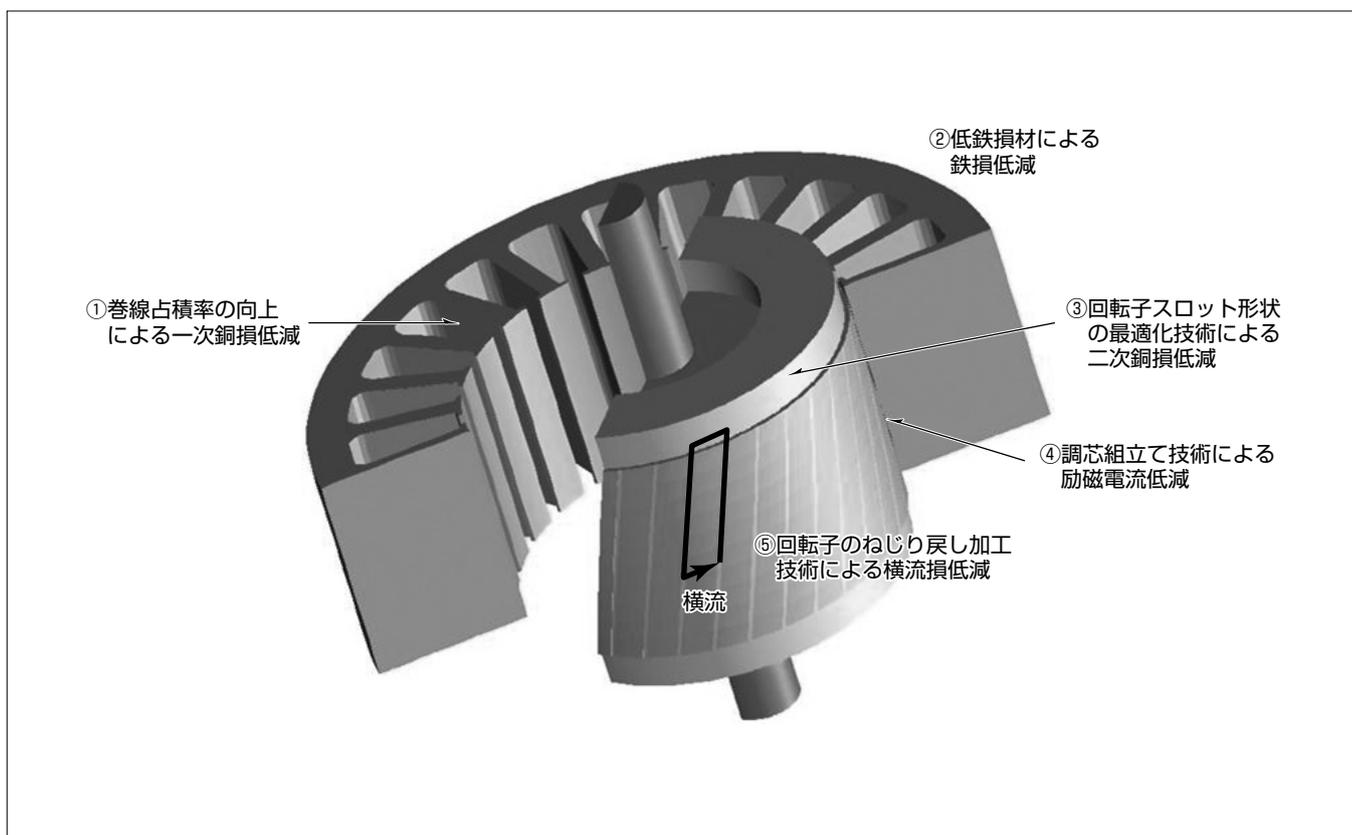
三菱電機では、IE3(プレミアム効率)を大幅に更新するとともに、使いやすさを考慮した従来機との互換性(起動トルク、始動特性、力率など)を確保した三相誘導電動機“SF-PRシリーズ”を市場投入している。

互換性を維持しつつ高効率化する技術として、始動時と定格運転時では回転子二次導体内で電流の流れる場所が変化することに着目し、始動時には高抵抗で定格時には低抵

抗となるスロット形状を最適化した。

また、対向コイルの電圧差を最小化しながら圧入を行い、回転子の偏心を極小化する調芯組立て技術を開発し、電磁騒音の増加なしに空隙長を縮小することに成功した。これによって励磁電流の低減が可能となった。

さらに、空間高調波による損失として漂遊負荷損に計上される、二次導体間の積層鋼板に発生する渦電流損失(横流損)を低減する方法として、“ねじり戻し加工”を開発した。これは、回転子鉄心を周方向にねじり戻すことで、二次導体と鉄心の間に隙間を作り、電気的に絶縁するものである。これによって、漂遊負荷損の大幅な低減を達成しただけでなく、製品の特性ばらつきも抑制することができた。



誘導電動機の高効率化技術

誘導電動機の損失低減のための技術として、①巻線占積率の向上による一次銅損低減、②低鉄損材による鉄損低減だけでなく、③始動特性の互換性を確保しつつ二次銅損を低減する回転子スロット形状の最適化技術、④電磁騒音を抑えつつ空隙を縮小して励磁電流を低減する調芯組立て技術及び⑤空間高調波による横流損を低減する回転子のねじり戻し加工技術がある。

1. ま え が き

近年、国内外でのエネルギー消費量の著しい増加、国際的な地球環境問題への関心の高まりなどの状況下で、エネルギー需要の伸びを抑えていくことが緊急の課題となっている。このような状況の下、各国でエネルギー使用の合理化等に関する法律いわゆる“省エネ法”が制定され、製造及び輸入業者に対して規制が実施されている。

誘導電動機は、産業全般で幅広く利用されており、これによる全消費電力量は世界の消費電力量の40~50%を占め、国内でも産業部門の消費電力量の約75%、全体として約55%を占めている⁽¹⁾。この状況に鑑み、国際規格IEC60034-30-1⁽²⁾との整合をとった国内トップランナー規制⁽³⁾が2015年4月から開始され、IE3効率が義務化されることになった⁽⁴⁾。これに伴い、当社では三相誘導電動機SF-PRシリーズを新規に市場投入し⁽⁵⁾、IE3効率を大幅に更新するとともに、使いやすさを考慮した互換性を達成している。

また、2015年には单相誘導電動機に対してもIEC規格が適用されるようになり、小型の換気扇用ファンモータの高効率化も急ピッチで実現している。

本稿では、三相誘導電動機の高効率化技術と互換性を達成する技術、及び、小型誘導電動機に対して開発した高効率化技術についても述べる。

2. 前提条件

2.1 誘導電動機の損失

誘導電動機の損失は、一次銅損、鉄損、二次銅損、機械損及び漂遊負荷損に分類される⁽⁶⁾。

一次銅損は固定子巻線に流れる電流と固定子巻線抵抗によって決まるため、巻線抵抗を低く、定格電流を小さくすることで高効率化が図れる。固定子スロット内の巻線の占積率を向上させる工作技術の開発によって、大幅な高効率化を達成している。鉄損は、無負荷同期回転時の入力から励磁銅損及び機械損を差し引いた損失であり、主に固定子の積層銅板で発生するヒステリシス損及び渦電流損である。鉄損を低減するためには、磁束密度を抑えつつ低鉄損材を適用することで損失低減を達成している。二次銅損は回転子二次導体に発生する損失である。二次導体の抵抗を低くすることで定格回転数を高くすることができ、同一出力に対する二次銅損を低減することができる。機械損は、回転子の回転を支える軸受の摩擦損失及び回転子の回転に伴う風損が主成分である。風損の低減には、機内温度とのトレードオフを考慮した範囲内で回転子フィンを小さくすることで達成することができる。漂遊負荷損は、誘導電動機の内外部に発生している空間高調波による損失が主

成分である。漂遊負荷損の低減には、空間高調波を小さくする固定子巻線配置を採用することや、固定子で発生した高調波が回転子二次導体に鎖交しにくい回転子スロット数を選定する、又は回転子スロットを軸方向に斜めにする回転子スキューを採用することで低減されている。

2.2 互換性

この節では、2.1節に述べた損失を単に低減するだけでなく、製品として保有すべき互換性について述べる⁽⁷⁾。

まず、同一出力のモータのサイズ(枠番)を大きくすると銅損や鉄損の低減につながり、比較的簡単に高効率化が図れるが、モータを使用する負荷機に取付けが困難になる場合があり避けなければならない。誘導電動機は量産工場で製造されるため、極端に難しい工作法を採用しないで量産性を確保する必要がある。定格条件は、各国で異なっており、国内でも200V系では200V/50Hz、200V-220V/60Hz等の定格条件がある。これら全てを1種類のモータでIE3効率を満足することが望ましい。

2.2.1 停動トルク

停動トルクは、定格電圧、定格周波数でモータが出すことができる最大のトルクのことであり、低くなると負荷変動に対応できなくなるおそれがある。停動トルクは主磁束に対する漏れ磁束の大小によってほぼ決まっているため、互換性を確保するためには巻数、漏れリアクタンスを大幅に変更することが難しい。

2.2.2 始動特性

二次抵抗を減少させると、定格すべりが小さくなり二次銅損が低減するが、始動時のインピーダンスが減少して始動電流が増加する。始動電流が増加すると、ブレーカや電源の容量を大きくする必要があり、避けなければならない。また、始動電流を減少させるために巻数を増加させると、始動トルクが減少し、起動できなくなる可能性がある。このため、単に二次抵抗を低減することでの高効率化は難しい。

2.2.3 力率

高効率化を図ることで、負荷電流(定格電流-励磁電流)を減少させ、励磁電流に近くなってくると、力率が悪化する。力率が悪化すると無効電力が増加し、電源容量が増加する。このため、励磁電流に対する負荷電流を極端に低減することは避けねばならない。

3. 高効率化技術

この章では、2.1節に示した損失の低減を2.2節に示した互換性を確保しつつ達成するための技術、及び短いタクトタイムで量産性を確保したまま高効率化する技術について述べる。

3.1 回転子スロット形状の最適化技術

二次銅損の低減には二次導体の抵抗を小さくする必要が

あるが、二次抵抗を小さくすると始動電流が増加するという問題があった。図1に始動時のT-II型等価回路を示す。始動時には励磁回路を無視することができるため、始動電流は R_1, X_1, X_2, R_2 の回路インピーダンスで概略計算できる。すなわち、 R_2 が小さいと始動電流が大きくなることが理解できる。定格負荷時には回転子に鎖交する磁束はすべり周波数であり、比較的低い周波数であるが、始動時には定格周波数の磁束が鎖交する。回転子周波数 sf (s : すべり, f : 周波数) に対して表皮深さ δ は次式で表される。

$$\delta = 1/\sqrt{\pi s f \mu_0 \sigma} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 μ_0 : 真空の透磁率, σ : 導電率である。導体の深さ h に対して、等価電流深さ h_{er} は次式で表される⁽⁸⁾。

$$h_{er} = h/\phi(\xi) \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 $\xi, \phi(\xi)$ は次式で表される。

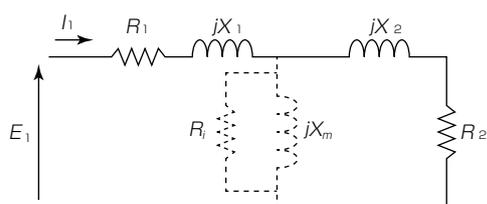
$$\xi = h/\delta \dots\dots\dots (3)$$

$$\phi(\xi) = \xi \frac{\sinh 2\xi + \sin 2\xi}{\cosh 2\xi - \cos 2\xi} \dots\dots\dots (4)$$

すなわち、図2で h_{er} の範囲の抵抗が高く、全体の抵抗を低く設計することで始動電流を低減しつつ二次抵抗を低く設計できる。また、回転子スロットは軸方向にスキューされており、アルミダイカストによって製造されているため、スロット内にアルミが流れやすいようにすることで二次抵抗を低減できる。図2ではA部を回転子径と同心円に近くすることで二次抵抗を低減している⁽⁹⁾。

3.2 調芯組立て技術

励磁電流を低減することで定格電流を低減することは、先に述べた力率低下の懸念もなく効率向上に効果的である。励磁電流は、図1の等価回路で X_m に流れる電流であり、



R_1 : 一次巻線抵抗, X_1 : 一次漏れリアクタンス, X_2 : 二次漏れリアクタンス, R_2 : 二次抵抗, X_m : 励磁リアクタンス, R_l : 鉄損抵抗, j : 虚数記号, I_1 : 一次電流, E_1 : 一次相電圧

図1. 始動時のT-II型等価回路

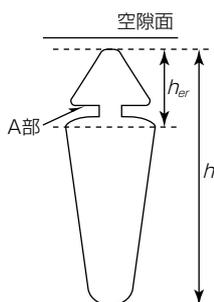


図2. 回転子スロット

固定子と回転子の空隙を縮小することで低減できる。しかし、空隙を縮小すると工作精度の影響を大きく受け、特に、回転子が固定子の中心に通らなくなる偏心状態となりやすくなる。回転子が偏心すると電磁騒音が発生し、製品となりにえない。このため、空隙は0.3mm程度が限界であった。

回転子が偏心すると、対向するコイルに電圧差が発生し、この電圧差が図3に示すように偏心率(偏心量/平均空隙長)にはほぼ比例し、かつ偏心方向に対して正弦波的に変化することが分かった。これを利用して対向コイルの電圧差を0に近づけながらフレームブラケットへの圧入を行う調芯組立て⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾⁽¹²⁾と呼ばれる生産技術を確立した。また、この生産技術は2方向以上の対向コイル電圧差を用いて調芯するので、短いタクトタイムで達成できるため、量産性を損なわないことが分かった。図4に小型換気扇用ファンモータの空隙長に対する効率(設計計算値)の変化を示す。この図から、空隙縮小によって効率が向上することが分かる。この調芯組立て技術を採用することで、電磁騒音の増加を抑えつつ効率を向上させることが可能となった。

3.3 回転子のねじり戻し加工技術

固定子巻線は限られたスロット内に格納されているため、空隙に発生する磁束密度分布は周方向に正弦波にはならず、空間高調波を含んでいる。この空間高調波が二次導体に鎖交すると高調波二次銅損と呼ばれる漂遊負荷損を発生させる。空隙を小さくすれば、固定子で発生する空間高調波はさらに回転子二次導体に鎖交し、高調波二次銅損が大きくなる。この高調波二次銅損を低減するために、回転子のスロット数を最適化し、回転子を軸方向に斜めに積層する回転子スキューを施すことがなされている。しかし、二次導

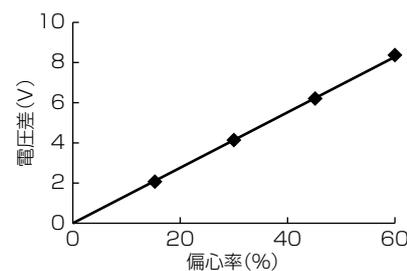


図3. 偏心率に対する対向コイル電圧差(100V印加時)

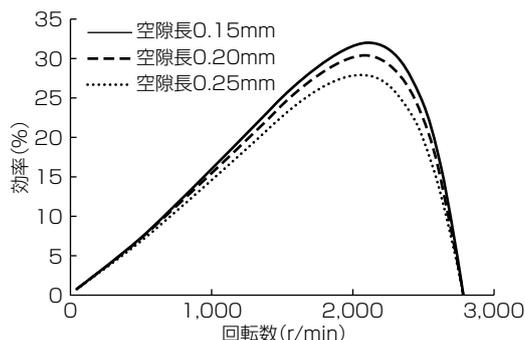


図4. 空隙長に対する効率



図5. 電磁界解析による横流損失密度分布

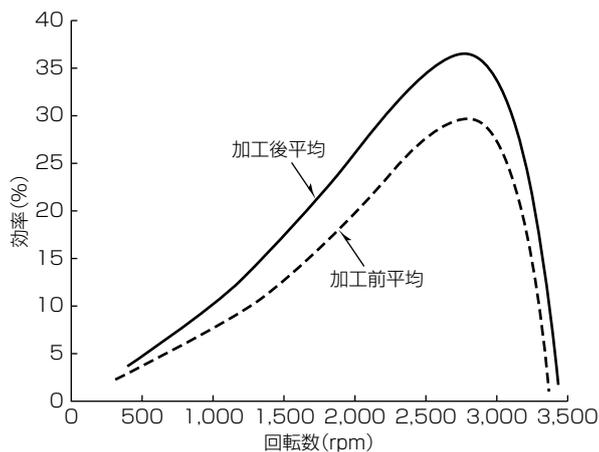


図6. 効率の比較

体はスロットに溶融アルミニウムを流し込むことによって製造されるため、二次導体とスロット横の積層鉄心間が導通し、パー間に流れる電流(横流)が発生する⁽¹³⁾。この横流による損失を横流損(図5)という。

横流を抑制するには、二次導体と回転子鉄心を電氣的に絶縁すればよい。従来は、アルミと鉄心の熱膨張率の差を利用して回転子組立て後に加熱するポストヒート法が提案されていたが、加熱後のシャフトの信頼性やタクトタイムを考えると採用が難しい状況であった。

小型モータで、短いタクトタイムで確実に二次導体と鉄心を絶縁する方法として、回転子鉄心を周方向にねじって戻す“ねじり戻し加工”⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾の実用化に成功した。この加工によって、二次導体と鉄心の間に隙間を作ることが可能となり、横流損が大幅に低減された。小型換気扇用ファンモータでの実測結果として、図6に示すように効率の大幅な改善が図られた。さらに、横流による性能ばらつきも極小化させることが可能となった。

4. む す び

世界の消費電力量の40~50%を占める誘導電動機での、停動トルク、始動特性、力率などの互換性を確保しつつ、損失を低減する高効率化技術について述べた。

回転子スロット形状の最適化技術によって二次銅損を低

減しつつ始動特性の互換性を確保した。また、空隙を縮小して励磁電流を低減し、量産性も確保した調芯組立て技術によって、電磁騒音の増加なしに励磁電流を低減させることが可能となった。さらに、空間高調波による損失となる回転子二次導体間の横流損失を低減するねじり戻し加工技術によって、横流損が大幅に低減された。

今後も更なる誘導電動機の高効率化技術の開発を行い、消費電力量を低減することで低炭素社会の実現に貢献していく。

参 考 文 献

- (1) 資源エネルギー庁：2009年度エネルギー消費機器実態等調査報告書(2009)
- (2) IEC60034-30-1(2014)
- (3) 法律：エネルギーの使用の合理化等に関する法律(トップランナー制度関連条文：第78条、第79条、第80条、第81条、第87条、第95条)
- (4) 阿部倫也：国内トップランナー規制とモータ効率IEC規格，電気学会誌，137，No. 5，281~284(2017)
- (5) 仲 興起：トップランナー規制対応プレミアム効率モータSF-PRシリーズ，TECHNO-FRONTIER2015，第35回モータ技術シンポジウム(2015)
- (6) 廣塚 功，ほか：汎用誘導機の損失と高効率化，電気学会誌，137，No. 5，258~288(2017)
- (7) 米谷晴之：トップランナー誘導電動機の注意点と高効率運転，電気学会誌，137，No. 5，289~291(2017)
- (8) R.Richter：Electrische Maschinen，Verlag Birkhauser(1954)
- (9) 米谷晴之，ほか：特許第5084980号「2重かご形回転子」
- (10) 吉桑義雄，ほか：特許第5592688号「回転電機の偏心推定方法と偏心推定システム」
- (11) 吉桑義雄，ほか：モータの振動騒音低減方法，日本機械学会2009年度年次大会講演論文集，No. 09-1，75~76(2009)
- (12) 米谷晴之，ほか：対向コイルの電圧差による回転子の偏心検出，電気学会回転機研究会資料，RM-10-141，43~47(2010)
- (13) 鶴見祐輔，ほか：三相かご型誘導電動機における横流電流の検討，平成27年電気学会全国大会論文集，No. 5-054(2015)
- (14) 大石晋也，ほか：特許第5843980号「かご形回転子の製造方法および誘導電動機の製造方法」
- (15) 大石晋也，ほか：小形誘導モータの横流れ電流を低減する加工法の開発，第63回大河内記念技術賞業績報告書(2017)