

高効率 IPM モータ「GNS シリーズ」「GNP シリーズ」

GNS & GNP Series of High-Efficiency IPM Motors

廣瀬 英男 HIROSE Hideo

中園 仁 NAKAZONO Hitoshi

近年、地球規模で資源需要の急増とエネルギー使用量の削減が問題となっている。富士電機はそれらの問題を解決するために発生損失の低減を極限まで追求した高効率 IPM モータ「GNS シリーズ」「GNP シリーズ」を開発した。

電動機の高効率化に加え、インバータなどのパワーエレクトロニクス機器との組合せによる回転速度制御の実施により、ファン・ポンプ用途において大幅な電力消費量が削減できる。また、既に使用している電動機からの置換えのしやすさや軸受交換のしやすさも考慮しており、省エネルギー関連の需要を喚起している。

Attempting to reduce energy use, as well as rapid resource demands rise, has been a problem worldwide in recent years. To solve this problem, Fuji Electric developed the GNS and GNP series of high-efficiency IPM (interior permanent magnet) motors, which quest the ultimate reduction of generated loss.

In addition to increased efficiency of electric motors, these motors can greatly reduce power consumption in fan and pump applications through implementing revolution speed control by combining with power electronic devices such as inverters. In addition, their design considers ease of replacement from electric motors already in use and ease of exchanging bearings, arousing demands for energy reduction.

1 まえがき

電動機は、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や、工作機械、印刷機、クレーンなどの各種産業機械の動力源などさまざまな装置やシステムで使用されている。世界的に省エネルギー（省エネ）や CO₂ 削減など環境保護の施策が行われている中で、電動機の高効率化は重要である。

永久磁石形電動機の一つである IPM (Interior Permanent Magnet) モータは、非常に優れたモータ効率特性を持つ。ただし、一般的な電動機のように商用電源を接続しただけでは駆動することができず、パワーエレクトロニクス（パワエレ）機器のインバータと組み合わせて初めて駆動できる電動機である。後述するように、最適な用途に“高効率 IPM モータ”を適用すれば、電動機単体のエネルギー消費量の低減に加え、インバータによる可変速制御により、さらなる省エネ効果を得ることができる。高効率 IPM モータとパワエレ機器を導入することによって大きな効果が得られる用途を的確に見極めて適用することが非常に重要である。

本稿では、電動機の高効率化に関する代表的な技術と、高効率 IPM モータ「GNS シリーズ」「GNP シリーズ」について紹介する。

2 電動機の電力消費量

1997 年に地球温暖化防止の「京都議定書」が採択され、温室効果ガスの排出量を削減することが世界的な約束になった。以降、産業機器分野での電力消費量削減の取組みが本格的に始まった。特に日本国内においては、2010 年

に「エネルギーの使用の合理化に関する法律」（省エネ法）が改正され、“工場におけるエネルギーの使用の合理化に関する事業者の判定基準”が告知され、事業者単位でエネルギー使用の合理化に努める義務が課せられるようになった。

全世界で 20 兆 kWh の電力が消費されており⁽¹⁾、約 40% が電動機を介して消費されている⁽²⁾（図 1）。仮に、電動機の効率を 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。工場では、ファン・ポンプの駆動や機器の移動などに使用される電動機を介した電力消費量が相当な割合を占めている。

電動機の電力消費量を削減するため、米国で 2010 年 12 月 19 日に IE3 プレミアム効率のモータ適用の義務化が始まり、欧州においても 2015 年に適用の義務化を決めている。日本をはじめさまざまな国々で義務化を検討または計画しており、電動機単体の効率規制に向けた取組みが進められている。

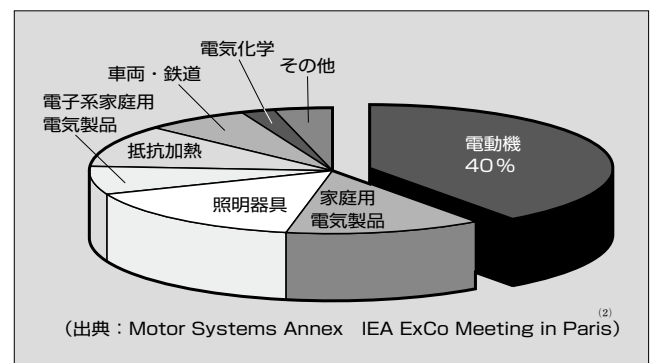


図 1 全世界の電力消費の内訳

③ 電動機の高効率化の手法

図 2 に IPM モータの構造断面図を示す。電動機の各部分で損失が発生しており、それらを低減させる手法について紹介する。

3.1 一般的な手法

(1) 銅損の低減

銅損は、電動機の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、抵抗値に比例する。固定子スロットの形状の最適化や巻線の充填率を向上させて導体の断面積を増やすことにより、電気抵抗を小さくし、銅損を低減させている。

(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。鉄心内の磁束の変化を少なくするために磁束密度を低く設計したり、材料自体の鉄損を減少させるために板厚の薄い電磁鋼板や鉄損の少ない高グレードな電磁鋼板を採用したりする。

また、鉄心各部に応力が加わることで損失が増大するため、応力を緩和させることも重要である。例えば、電磁鋼板をプレス型にて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が、ひずみ取焼鈍をすることにより本来の磁気特性に回復させることで損失の増加を防ぐことができる。

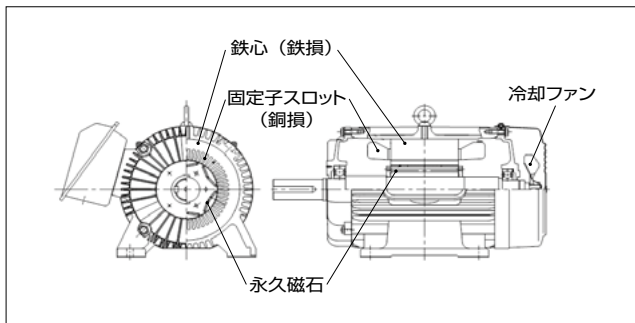


図 2 IPM モータの構造断面図

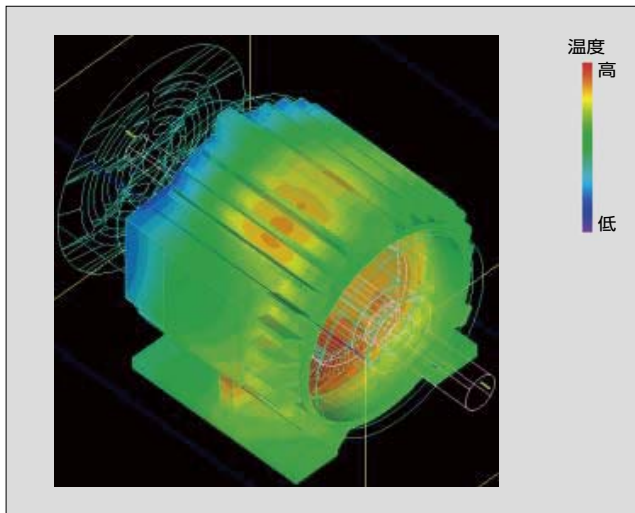


図 3 電動機の熱流体解析例

とにより本来の磁気特性に回復させることで損失の増加を防ぐことができる。

鉄損は電動機の損失の約 40% を占めており、設計時点における発生損失の高精度算出が重要である。鉄損の算出は、従来、交番磁界であるとの前提の基に数値計算を行ってきた。しかしながら、実際には電動機内部では交番磁界だけでなく回転磁界も発生しており、従来の方法では回転磁界による影響を考慮できていなかった。現在では、算定精度向上のため、有限要素法を用いるなど回転磁界による損失も考慮することにより、高精度算出を実施している。銅損とのバランスも考慮し、極数・巻線方式・スロット数・鉄心形状の最適化を図り、高効率化を実現している。

(3) 永久磁石の使用

誘導電動機がアルミニウムや銅などの 2 次側導体に誘導電流を流して回転子側の磁束を作るのに対し、永久磁石形電動機は回転子に永久磁石を使用しているため磁束を作るための電流が不要であり、回転子側の損失が非常に少ない。このため、永久磁石形電動機は誘導電動機に比べて高効率にすることが可能である。

また、発熱が少ないため放熱面積を小さくでき、電動機の小型・軽量化が可能である。

(4) 各部分で発生する渦電流損の低減

PWM (Pulse Width Modulation) インバータで駆動すると電動機の電流にキャリア周波数成分の高調波電流が含まれるため、電動機の内部で不要な渦電流が発生し、損失となる場合がある。

永久磁石形電動機には、強力な磁場を発生できるネオジム磁石がよく用いられる。ネオジム磁石は導電率が高いという特徴があり、磁石内に渦電流が流れて損失となる。対策として、永久磁石に鎖交する高調波磁束を低減させることが挙げられる。また、コイルに発生した磁束が電動機のフレーム・シールドなどの部材に漏れることにより、渦電流が発生して損失となる。対策として、電動機を構成する部品は固定子コイルから適度な距離を確保する必要がある。

(5) 電動機の冷却ファンによる損失の低減

電動機には冷却ファンが付いており、その回転による機械損は電動機の損失に含まれる。そこで、ファンによる冷却は必要最低限にするため、設計段階でモータの温度の高精度算出を行う必要がある。

3.2 富士電機での取り組み

富士電機では、全閉外扇形電動機などの一般的な電動機であれば、流体回路網計算で風速を算出したのち、熱回路網計算で各部の温度を算出する熱流体回路網法を採用し、高精度な熱設計を行っている。

また、自然対流などを考慮する必要があるときには、熱流体解析を用いる場合もある(図 3)。熱流体回路網法、熱流体解析とともに、異なる部品の接触抵抗などの単純に解析できない部分をどのように熱抵抗として定義するかが重要であり、実験などによる基礎データの蓄積が非常に大切である。

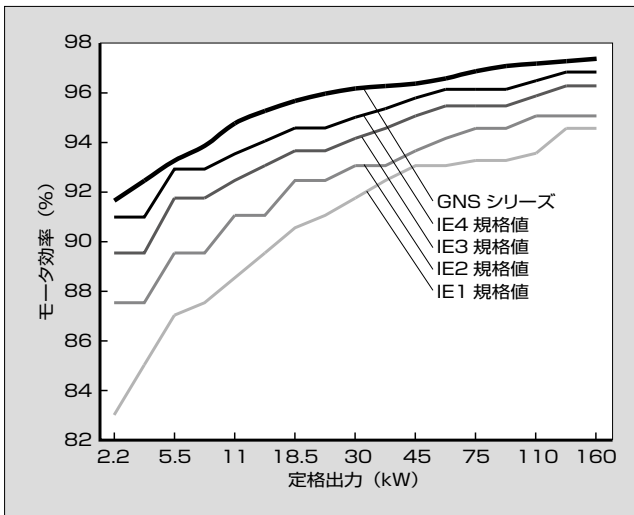


図4 電動機の効率規格値

4 高効率 IPM モータの特徴

高効率 IPM モータは、3章で述べたさまざまな高効率化の手法に加えて、効率向上に特化した開発により、非常に高い電動機効率を実現している。IE4 を超える効率を持つ「GNS シリーズ」は出力範囲で 11 ~ 160 kW を標準でラインアップし、IE4 レベルの効率を持つ「GNP シリーズ」は出力範囲で 5.5 ~ 90 kW を標準でラインアップした。

特に GNP シリーズは、電圧について多重定格仕様とし、国内の 200 V 電源でも 400 V 電源でも 1 台のモータで対応できるようにした。5.5 ~ 90 kW まで全機種を標準在庫とすることにより、即納が可能となった。

また、従来、誘導電動機よりも小型化した IPM モータは、誘導電動機との取合い寸法が異なることが当然であったが、GNS シリーズ、GNP シリーズいずれも、これを同一とし、既に使用している誘導電動機からの置換えを容易にしている。

4.1 高効率化の実現とその効果

電動機の効率は IEC 60034-30 で規定されている (図 4)。IE1 規格値は汎用誘導電動機のレベルであり、IE2 規格値は高効率誘導電動機の EPAct 相当のレベルである。

さらに、IE3、IE4 といった従来の EPAct を上回る規格値が制定されている。GNS シリーズは効率規格の最高レベルである IE4 規格値を上回っており、一般に使用されている誘導電動機 (IE1 レベル) より 8.5 ~ 3 ポイント向上している。また、IE3 レベルより 2 ~ 1 ポイント向上している。

定格出力 75 kW の「GNS」と誘導電動機の効率の測定結果について、定格負荷時の削減効果を表 1 (a) に、実使用に近い負荷率 50% 時の削減効果を表 1 (b) に示す。効率は、定格負荷では 4.1 ポイント向上し、負荷率 50% 時においても 5 ポイント向上している。

高効率化による消費電力量、電気料金および CO₂ 排出

表1 「GNS」による削減効果

(a) 定格負荷, 1,465 min⁻¹ 時

	誘導電動機	高効率 IPMモータ	削減効果
出力 (kW)	75	75	
電動機効率 (%)	93.2	97.3	4.1 ポイント向上
消費電力量 (kWh)	704,900	675,200	29,700
電気料金 (千円)	8,459	8,103	356
CO ₂ 排出量 (t)	282.0	270.1	11.9

(b) 負荷率 50%, 1,480 min⁻¹ 時

	誘導電動機	高効率 IPMモータ	削減効果
出力 (kW)	37.5	37.5	
電動機効率 (%)	91.9	96.9	5 ポイント向上
消費電力量 (kWh)	357,400	339,000	18,400
電気料金 (千円)	4,289	4,068	221
CO ₂ 排出量 (t)	143.0	135.6	7.4

算出条件			
運転時間	8,760時間 (1年間連続)		
電気料金単価	12円/kWh		
CO ₂ 排出換算値	0.4 kg/kWh		

量の削減効果は表 1 に示すとおりである。

4.2 保守性

電動機は、消耗品である軸受の交換が必要である。誘導電動機の場合は、直結側および非直結側ブラケットを取り外し、回転子を引き抜いて軸受交換ができるため、現地での交換作業が可能である。

一方、永久磁石形電動機の場合は磁力があるため、現地での回転子を引き抜くことは実質的に困難であり、電動機をメーカーに返却して軸受交換を行うのが一般的である。これに対し GNS シリーズおよび GNP シリーズは、両側ブラケットを取り外すだけで軸受交換が可能な構造にしているため、現地での軸受交換が可能であり、保守性が向上している。

4.3 設置工事の容易性

永久磁石形電動機は、誘導電動機よりも小型・軽量であることが一般的である。しかし、GNS シリーズおよび GNP シリーズはあえて小型化せず、取付け寸法は誘導電動機と互換性を持たせた。これにより、既存設備への電動機の交換作業を容易にし、省エネルギー関連の需要を喚起している。

5 インバータ駆動による省エネルギー効果

始動巻線を持たない永久磁石形電動機は、インバータと組み合わせて運転する必要がある。そこで、インバータで電動機の回転速度を自由に変更できることを生かし、羽根の回転による遠心力を利用するタイプのファン・ポンプに適用し、回転速度の変更で流量を調整するようにすること

表 3 羽根の遠心力を利用する流体機器での省エネ効果

回転速度 (%)	流量 (%)	圧力 (%)	インバータ速度制御時電力 *1 (%)	電力増減 *2 (ポイント)
100	100	100	105	5
90	90	81	77	-18
80	80	64	54	-36
70	70	49	36	-49
60	60	36	23	-57

*1: インバータ効率を95%と仮定し、インバータ追加による電力増加を5%と仮定した。
*2: ダンパ開度50~100%での流量調整に対する電力増減を示す。

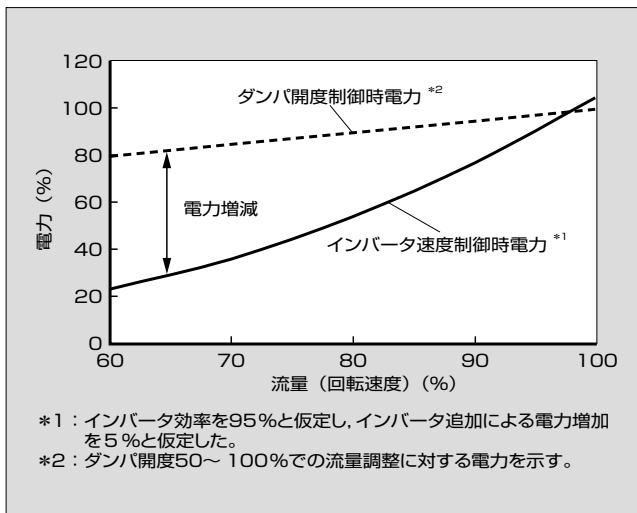


図 5 羽根の遠心力を利用する流体機器での省エネ効果

により、さらなる省エネ効果が得られる。

5.1 羽根の遠心力を利用する流体機器への適用

流体系の動力 (W) は以下の式で表すことができる。

$$\text{動力(W)} = \text{圧力(N/m}^2\text{)} \times \text{流量 (m}^3\text{/s)} \dots\dots\dots (1)$$

羽根の遠心力を使って水や空気などの流体を送り出す流体機器の場合、圧力は羽根の遠心力に比例する。

一般的には、羽根の遠心力を利用する流体機器の場合質量 m、半径 r、角速度 ω とすると、遠心力は $mr\omega^2$ と表すことができ、圧力は角速度すなわち回転速度の 2 乗に比例する。

$$\text{圧力} \propto \text{回転速度}^2 \dots\dots\dots (2)$$

また、流量は羽根が回転して流体を押し出しているため、回転速度に比例する。

$$\text{流量} \propto \text{回転速度} \dots\dots\dots (3)$$

式(1)に示すように、動力は圧力と流量の積であり、羽根の遠心力を利用する流体機器の場合、流体機器の動力すなわち消費電力は、電動機の回転速度の 3 乗に比例する。

表 4 80%流量を想定した社内試験結果

	誘導電動機 *1	高効率 IPMモータ *2	削減効果
流量 (%)	80	80	—
回転速度 (min ⁻¹)	1,778	1,422	—
入力電力 (kW)	73.1	41.2	31.9

*1: 誘導電動機は商用電源による運転であり、バルブ開度による流量調整を想定した。
*2: 高効率IPMモータはインバータ速度制御による流量調整を、入力電力はインバータ入力電力を示す。

$$\text{消費電力} \propto \text{回転速度}^3 \dots\dots\dots (4)$$

回転速度を 1/2 にすると、流量は 1/2 となり、圧力は $(1/2)^2=1/4$ 、消費電力は $(1/2)^3=1/8$ となる。ただし、圧力は回転速度の 2 乗に比例するので、水のくみ上げ、ウォータージェットマシンなど、圧力を必要とする用途では、あまり回転速度を下げるのができず、効果が得られない場合がある。表 3 と図 5 に、これらの関係とその効果 (理論値) を示す。

なお、インバータを使用せず、誘導電動機を商用電源で駆動したときの回転速度・流量・圧力、電力を 100% とし表現している。

5.2 測定事例と効果

富士電機の鈴鹿工場内に 75 kW の誘導電動機と、75 kW の高効率 IPM モータ「GNS」を並べて同時に運転し、インバータ入力電力を測定できる実験設備を保有している。

表 4 に、設備を使って 80% 流量を想定した社内試験を行った結果を示す。

高効率 IPM モータ「GNS」の回転速度を $1,422 \text{ min}^{-1}$ ($1,778 \text{ min}^{-1} \times 0.8$) とし消費電力を比較すると、誘導電動機の商用電源駆動と比較し、31.9 kW もの電力を削減できる。

6 あとがき

電動機の高効率化に関する代表的な技術と、高効率 IPM モータ「GNS シリーズ」「GNP シリーズ」について述べた。特に、永久磁石の技術革新はわが国で歴史があり、世界的に見ても非常に進んでいる分野である。また、インバータドライブ技術も同様に得意とする技術分野である。この永久磁石とインバータドライブを組み合わせた永久磁石形電動機システムは、日本が先行している技術分野であり、その中でも富士電機は高い技術力でソリューションを提案している。

省エネルギーや CO₂ 削減、環境保護という世界的な課題に対して、電動機の高効率化への期待はさらに高くなってきており、サプライヤーとして、さらにはお客さまの製品の価値向上をとみに進めるパートナーとして、期待に応えるための技術の高度化を推進していく所存である。

参考文献

- (1) 総務省統計局2008年世界電力消費.
- (2) Rolamd Brüniger. Motor Systems Annex. IEA ExCo Meeting in Paris 14/15 April 2008.



廣瀬 英男

電動機，特に永久磁石形電動機の開発と設計に従事。現在，富士電機株式会社パワーエレクトロニクス事業本部ドライブ事業部鈴鹿工場設計部。



中園 仁

電動機，特に永久磁石形電動機の開発に従事。現在，富士電機株式会社技術開発本部製品技術研究所回転機技術開発部。電気学会会員。





*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。