

MITSUBISHI

三菱電機技報 Vol.76 No.6

特集「21世紀の生活と産業を支えるモータ技術」

2002 **6**



目次

特集「21世紀の生活と産業を支えるモータ技術」

モータ技術の進化 正田英介	1
中小型モータの現状と展望 中村史朗・海野真人	2
エレベーター巻上機用モータ 川口守弥・大殺見裕・安江正徳・小松孝教	6
住環境機器用高効率モータ 川口 仁・馬場和彦・松岡 篤・石井博幸・及川智明	10
電動パワーステアリング用モータ 田中俊則	15
鉄道車両用高効率主電動機 寺澤英男・赤木秀成・坂根正道	19
高性能専用ACサーボモータ 合田 洋・大塚 久	24
高効率産業用モータ 立見廣光・吉野 裕	28
工作機械用主軸モータ 川島和之・小林 学・嶋田明広	33
最新のモータ電磁設計技術 米谷晴之・井上正哉・守田正夫・仲 興起	38
最新のモータ機械設計技術 吉桑義雄・今城昭彦	44
最新のモータ制御技術 佐竹 彰・金原義彦・貝谷敏之	49
最新のモータ製造技術 三宅展明	54

特許と新案

「積層コアの製造方法」「積層コアおよび該積層コアの製造方法」	59
「回転電機」	60

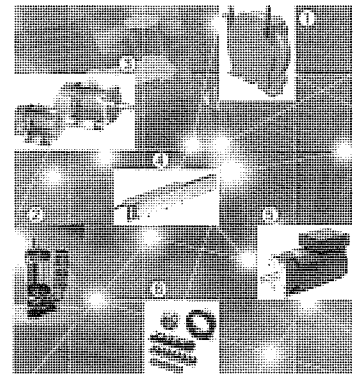
スポットライト

汎用ACサーボ「リニアサーボLMシリーズ」	(表3)
-----------------------	------

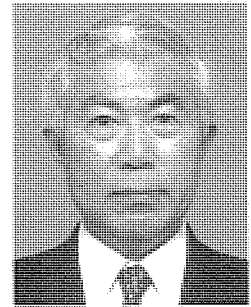
表紙

21世紀の生活と産業を支えるモータ群

我々の豊かな生活はモータが支えている。電車による大量輸送やエレベーター(写真1)による建築空間の利用、快適なマイカー生活、オフィスや家庭での快適な空調空間(写真2)、また、工場での製品の加工や搬送など(写真3, 4, 5)、モータは我々の生活のほとんどすべての局面で活躍している。効率や性能の向上は、多くの恩恵をもたらす。例えば全電力の50%以上がモータで消費されており、モータ効率の1%の向上はCO₂排出量削減に大きな影響を与える。また、高性能モータによって実現された超微細加工は、情報通信技術の発展に必ず(須)である。モータの設計・製造(写真6:ボキボキコア)・制御での技術革新は、21世紀の新たな生活と産業に必須である。



モータ技術の進化



東京理科大学 理工学部

教授 正田英介

生活の快適さや便利さの追求、産業プロセスの高機能化へのニーズによって、モータはあらゆる分野で幅広く利用されている。自動車には数十個のモータが使われているし、住宅の中でもガレージのドア、シャッターからクーラー、各種の家電品を数え上げていくと100を優に超えるモータがある。民生・業務分野においてもIT機器の中に埋め込まれているモータの数は極めて多いし、エレベーター、エスカレーター、バリアフリーや防災のための設備など都市の設備としても多様にモータが使われている。鉄道はもちろんのこと、産業プロセスの中でも加工・輸送・環境維持などの基幹がモータで支えられている。さらに最近では、環境や安全に対する社会の要求や国際競争力のある産業活動のために、電気自動車、可変構造型のアリーナ、クリーンルーム、マイクロマシーニングなどの新しい応用も広がっている。この特集の表題のように正にモータ技術は“21世紀の生活と産業を支えている”のである。

しかし、ほとんどの応用、特に最近の高度のものでは、モータは装置の中に埋め込まれていて外部からは目に留まらないし、騒音や振動を抑え、滑らかな駆動制御が組み込まれているために、逆にその存在感が薄れている。モダンタイムスに見るような人を圧する巨大な機械を力強く動かすモータといった20世紀のイメージから、他の部品と一体化して装置の機能を発揮させる基盤材料のような形にその位置付けが変わってきている。だからと言って技術的に停滞しているわけではなく、むしろ材料から設計まで多様な新しい技術が取り入れられてモータ自体が進化した結果としてこのような状況に至っているのである。それはデータウエルのディスクドライブを可能にするような軽量・小型化、高効率・高速運転を実現する永久磁石の利用、空気や磁気による非接触のベアリング、折り曲げ構造や関節を使

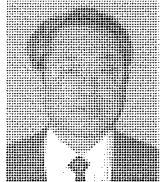
った新しい鉄心の製造法、これらの背景にある各種の計算機ソフトを活用した設計技術などである。

電気利用システムのエネルギー効率是一般に高いものにはあるが、地球環境問題に対処するために一層の高効率化が求められている。個別の機器やプロセスでの省エネルギーは産業においても家庭民生用品においても十分に実施されていると考えられるが、それらの使い方という視点に立つと、四六時中定常的に使用されている装置、例えば建物空調、工場の中での送気・換気ファンや蒸気系のスチームトラップ、IT装置の電源などはさらに少しでも損失を低減できればその効果は大きい。なかでもモータはこのような定常的な利用がされる機器の代表であり、一層の高効率化の追求が望まれる。パワーエレクトロニクスと組み合わせられた永久磁石同期機の更に広汎な応用、低損失化や2方向性の実現など進歩の著しい電磁鋼板を積極的に利用する設計、リニア機や横方向磁束機(TFM)などの新しいモータ構造を取り入れた直接駆動などその技術シーズは十分に整っている。

海外では、モータによる定常的な損失を大きく削減するという目標で中・大容量機を対象とした高温超電導線材を利用したモータの開発も積極的に進められ、既に1,000kW級の機械が長時間連続運転されてその技術的な可能性のデモンストレーションが行われている。小型の冷凍機による直接冷却の技術の進歩とあいまって、これまでのモータと同じような独立した構造で実用化される見通しも得られてきている。リニア機でも4階までのロープレスエレベーターが試作されるなど、モータ技術の進化は着実に進んでおり、従来型の壁を破る時期も遠くないように見える。21世紀のモータ技術がより進化した形で我々の生活や産業を変革することを期待している。



中村史朗*



海野真人**

中小型モータの現状と展望

1. ま え が き

モータは我々の豊かな生活を支える大きな柱である。電車による大量輸送やエレベーターによる高層建築空間の利用、快適なマイカー生活、オフィスや家庭での快適な空調、また、工場での製品の加工や搬送など、モータは生活のほとんどすべての局面で活躍している。モータ技術は170年にも及ぶ歴史があり、用途に応じて直流モータ、誘導モータ及び同期モータなどの開発が進められてきた。近年、中小容量のモータにおいては大量生産による低コスト化が進み、また、インバータなどの制御機器の発展で、従来適用されていなかった多様な用途にも使用されるようになった。さらに、永久磁石を始めとする材料技術、製造技術、制御技術での技術革新で、適用されるモータの種類が変化している。例えば小型化・高効率化の要求に応じて可変速運転するモータは直流モータから誘導モータに、そして更に永久磁石モータへ変化している。この変化は新しい技術開発を促進し、モータは目に見えないところで大きく進化している。以下に、三菱電機の最近の中小型モータの開発状況と成果、展望について述べる。

2. 中小型モータの現状と技術

2.1 当社のモータ関連事業の開発状況

当社の主なモータ関連事業と技術を図1に示す。モータ技術は、産業分野と生活分野、交通分野とに大きく分類される。図に示すように当社のモータ関連事業は多岐にわたっており、それぞれの事業に応じて、ニーズを満たす多様なモータの開発を行っている。モータへのニーズの主なものとして高効率化、制御性の高度化、低振動・低騒音化、信頼性の向上、低価格化等がある。これらの要求は独立なものではなく、使用目的に合わせてバランスよく改善する

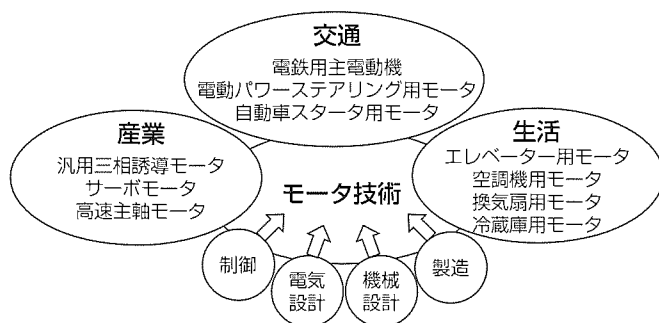


図1. 当社のモータ関連事業と技術

ことが望まれている。

一般にモータの開発では設計が完了した段階で初めて製造方法を検討するが、当社は、コンセプト段階から電気設計、機械設計、制御、製造の各部門が連携し生産性、性能、コストを総合的に検討しながら開発を進めることで市場の要求をバランスよく実現できる革新的なモータを実現している。

2.2 高効率化技術

日本の全消費電力の5割以上がモータで消費されていると推定されており、モータ効率向上による省エネルギー効果は極めて大きい。当社は、損失低減技術としてスロットなどモータ形状による空間高調波や、インバータによる時間高調波に基づく損失の解析技術を確立している⁽¹⁾。図2に解析の一例を挙げる。当社は、従来十分メカニズムが解明されていなかった漂遊損失の解明も実現している。これらの技術を用いて種々のモータの高効率化に取り組んでいる。

また、製造技術では、図3に示すようなポキポキ鉄心技術を中心とした新しい製造技術⁽²⁾がある。この技術の適用により、巻線密度が大きく向上し、コイルエンド部も縮小

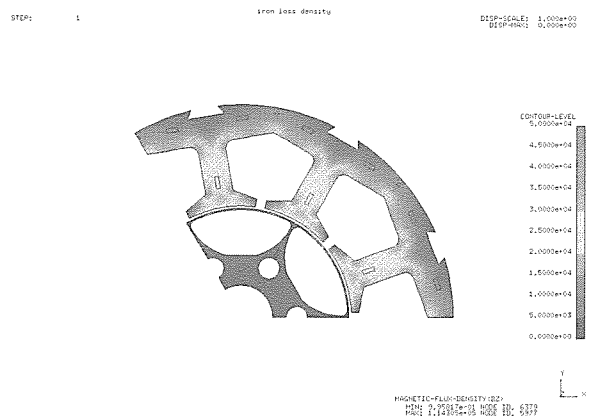


図2. 鉄損解析の一例

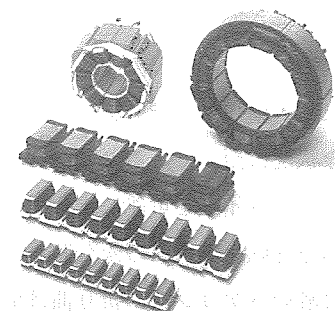


図3. ポキポキ鉄心の例

できるので、銅損を大きく低減できる。

これらの技術を適用した成果として、業界最高の効率を持つルームエアコン用モータや、高効率汎用三相モータの製品化を実現している。

2.3 制御性の高度化技術

(低コギングトルク、低トルクリプル、高速性能)

情報産業用の機器は小型化・高精度化が進んでおり、時代の要請から、ますますこの傾向は進むと考えられる。この高精度・微細加工や高速加工は、サーボモータや工作機械用主軸モータ技術が支えている。また、エレベーターのように人間の感性にかかわる分野も市場の伸びが期待される。この要望を満たす従来の限界を超えた低コギング、低トルクリプルのモータが望まれる。当社は、磁気飽和による非線形性や三次元形状を考慮した磁界解析技術、高速運転時に問題となる空間高調波による損失の解析技術、学習制御技術などを用いて開発を進めている。この結果、高い制御性を持つサーボモータや業界最高クラスの回転速度を実現した工作機械用主軸モータの製品化に成功している。

2.4 低騒音化技術

モータが生活に浸透するにつれて、モータに対する低騒音化の要求が高まっている。特に、生活空間の質が向上するに伴い、従来は問題とならなかったような小さな音も製品の競争力に影響を与えるようになってきている。当社は、モータの電磁騒音と固定子と回転子のスロット数の組合せ関係を明らかにする理論、電磁加振力の解析技術、騒音の原因になる半径方向加振力の現象解明に力を発揮する測定技術を用いて低騒音なモータを開発している。また、従来のギアを用いるシステムに比べて、ギアレスにすると騒音は大きく低下する。これらの技術を用いて、高い低騒音特性を持つ電動パワーステアリング用モータや、業界最薄クラスの機械室レスエレベーター用モータを製品化している。

3. 当社のモータ開発の実例

この章では、高効率化と制御性の高度化技術、低騒音化技術を用いて開発が大きく前進した当社のモータの実例を中心に述べる。

3.1 高効率モータの実例

3.1.1 汎用三相誘導モータ

モータに対する省エネルギー化の需要の高まりや規格化・法制化の動向の中、これらの規格・法制を満足した高効率モータ“スーパーラインエコシリーズ”を開発し販売している。スーパーラインエコシリーズは全閉外扇形で、極数は2, 4, 6極、出力：0.2~55kWをそろえており、国内JIS基準値と米国EPAAct基準値の両方の基準値を満足した業界トップクラスの高効率と、当社製インバータ“FR-A500”によるアドバンスド磁束ベクトル制御運転で1:10の定トルク連続運転が可能などの特長を持っている。

三相モータの損失は、一次銅損、二次銅損、鉄損、機械損、漂遊損に大別される。JIS及びEPAActの効率基準値を満足するモータは、これらの損失の合計を標準モータよりも20~30%低減する必要がある。スーパーラインエコシリーズでは、巻線方式の変更によるコイルエンド長の短縮、ロータスロット形状の最適化による二次導体の断面積増加、高磁束密度・低鉄損特性材の開発と採用による鉄損の低減、磁気回路における定数の最適化等によって損失を低減した。図4に従来の誘導モータと比べた節約電力を示す。

3.1.2 ルームエアコン用モータ

各種住環境機器の動力源には堅ろう(牢)、低騒音、安価なことから誘導モータが使われていたが、この10年で環境保全の意識が国内外で高まり機器の省エネルギー化が大きく進展する中、誘導モータに代わり効率の良いブラシレスDCモータが活用されている。特に、住環境機器ではエアコンと冷蔵庫の消費電力が家庭の消費電力量の約40%を占めていることから、両製品の省エネルギー手段としてブラシレスDCモータ化の進展は目を見張るものがある。

ルームエアコン用モータにはファン用モータと圧縮機用モータがあるが、圧縮機用モータは冷凍サイクルにおけるエネルギー変換の入口に当たり、電気入力 of 8割以上を消費する。このモータの高効率化は省エネルギー化を推進する上で重要である。当社は、2001年冷凍シーズンからこれまで用いてきた4極の分布巻埋込磁石型モータの構造を一新し、関節型ポキポキ鉄心構造の6極集中巻埋込磁石型モータに置き換えることで大幅な効率向上を実現している。ロータは、6枚の両円弧形状のフェライト磁石を埋め込んだ表面配置型の埋込磁石型構造となっている。効率の改善率では、冷房軽負荷条件で5%、冷房定格条件で3%、暖房低外気条件で2%の効果が得られ⁽¹⁾、業界最高レベルの効率を達成した。

3.2 制御性を高度化したモータの実例

3.2.1 工作機械用主軸モータ

工作機械の生産効率向上の観点から、近年、マシニングセンタ、金型加工機等の主軸高速化が急速に進展している。

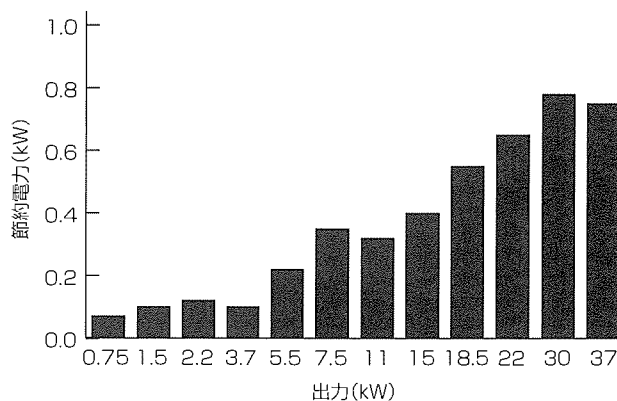


図4. スーパーラインエコシリーズの節約電力

当社は、'95年から“超高速ビルトインIM主軸モータ”の開発に着手した。ロータにはアルミニウム導体を一体成形したかご型ロータが採用されており、ロータ各部の機械的強度、特にロータ両端のエンドリング(短絡環)と呼ばれる部分の疲労強度を向上するために“浮動型溶湯鍛造法”と呼ばれる新しい製造技術⁽³⁾によって引け巣等の欠陥発生を回避し、ロータ外径周速180m/sの超高速ロータを実現している。主軸ドライバの制御では、速度ループ制御で電気角周波数1.167kHz相当を実現しており、最高回転速度70,000r/minまで製品化されている。

3.2.2 汎用リニアサーボモータ

高精度・高速・高能率化の要求から、従来のボールねじ駆動システムに比べ高速度・高加速特性を得ることが可能なLMシリーズを製品化している。このモータは、ダイレクトドライブによる高い剛性とフルクロード制御システムによる高精度な制御で2m/sを実現している。図5に示すコアレスタイプでは、低速でも非常にスムーズな運転を実現している。

3.3 低騒音化したモータの実例

3.3.1 電動パワーステアリング用モータ

電動パワーステアリング(以下“EPS”という。)はハンドルの操舵時のみモータを駆動する方式で、エンジンの運転中常時油圧ポンプが駆動されている従来の油圧パワーステアリングに比べてエネルギー消費が少なく、約3~5%の燃費向上が可能となる。このため、油圧パワーステアリングからの置き換えが進んでいる。当社は'88年に世界で初めてEPS用モータ/ECU(Electronic Control Unit)の量産化を行ったが、それ以後も採用車種の拡大に伴う高出力化要求の市場ニーズに対応し、EPS用モータとして適した高出力モータをタイムリーに開発し量産化を続けてきた結果、順調に生産を拡大させることができた。現在、モータ/ECU各々の累計生産台数は1,000万台以上に達しており、今後も増加する見込みである。適用車種の拡大に伴い、EPS用モータに要求される出力も大きくなっている。EPS用モータの出力増大はモータサイズの増大をきたし、モータの音・トルクリプル・ロストルク・慣性モーメント等も大きくなり、ドライバーに不快感を与えたり、操舵フィーリングが悪くなるという問題がある。当社は、この課題に先発メーカーとしていち早く取り組んだ。独自の電磁界解析手法を駆使し、高負荷電流時でも音・振動の低いブラシ付き高出力モータを開発し⁽⁴⁾、Newモータシリーズと呼称

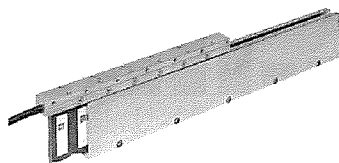


図5. 汎用リニアサーボモータLM-Tシリーズ

して、80A、500Wクラスまでシリーズ化している。図6に定格電流と騒音レベルを示す。Super Silentシリーズでは、従来機種に比べて80Aでも音圧レベルが小さい。このモータで自動車の排気量で2リッタークラスまで対応できる。

また、EPS採用車種拡大時、更に高出力モータが必要となる。ブラシ付きモータで更に高出力(500W超)に対応するとモータが過大となり、EPS用モータとしてその大きさ・慣性モーメント・ロストルク等が許容できないレベルとなる。当社は、この高出力に対応するモータとして小型・低慣性モーメント・低ロストルク化を達成するとともに、EPS用モータとして必要な低トルクリプル・低コギングトルク・低騒音の特長も併せ持ったブラシレスモータも開発している。

当社は、出力の小さい領域はブラシ付きモータ、出力の大きい領域はブラシレスモータで対応することにしており、更に出力の大きい領域(700W超)にはブラシレスモータの36V(42V)システムで対応する計画である。

3.3.2 エレベーター用モータ

高層ビルなどに設置される高速エレベーターでは、モータと綱車を直結したギヤレス巻上機が一般に用いられ、振動や騒音が少なく高級感のある乗り心地を実現している。一方、マンションやオフィスビルなどに適用される低速の標準型エレベーターではモータと綱車の間にギヤを備えた巻上機を用いるのが一般的であったが、'90年代の後半には、永久磁石モータを採用したギヤレス巻上機を業界に先駆けて高速エレベーターに適用し、更なる省エネルギー化とともに巻上機の小型化を実現した。'98年には低速エレベーターの領域にも適用し、機械室レスエレベーターを実現することができた。

省スペース化・省エネルギー化の流れの中で、低速エレベーターにおいては機械室レスエレベーターが主流となってきている。この場合、巻上機は昇降路内に設置されるので、小型かつ静粛であることが要求される。騒音低減にはギヤレス化が有効であり、小型かつ低回転大トルクの仕様

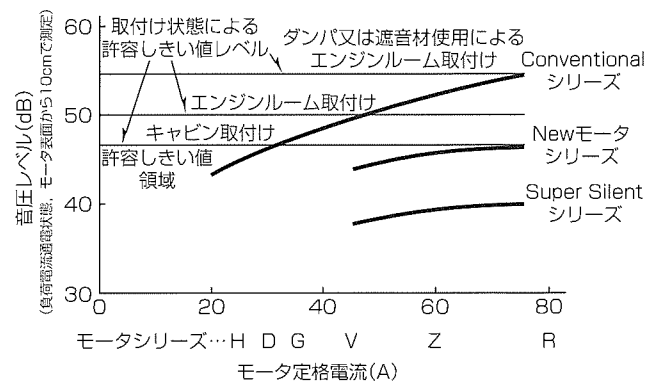


図6. 定格電流と騒音レベル

に対応するにはPMモータが適している。また、巻上機の形状には円筒形と薄形があるが、今後はレイアウト性が良くより省スペース化が可能な薄形巻上機が主流になると考えられる。当社の薄形巻上機⁵⁾を図7に示す。当社は、多極化・小型化の点で誘導モータよりも有利な集中巻PMモータを採用し、独自の関節型ポキポキ鉄心を併用することでモータの薄形化を達成した。このモータの開発でギアレス化が可能になり、静粛な機械室レスエレベーターを実現できた。

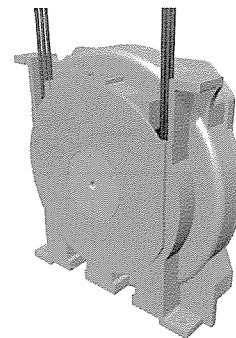


図7. 機械室レスエレベーター用薄形巻上機

4. 中小型モータの展望

4.1 高効率モータの展望

'97年12月に京都で開催された地球温暖化防止京都会議(COP3)で“京都議定書”が採択され、ここで、先進国における温室効果ガスの排出量について法的拘束力のある削減目標が決められた。日本は第一遵守期間である2008年から2012年の温室効果ガス排出量を'90年のレベルから6%削減する目標を持つことになった。この目標は非常に厳しく、達成には大きな技術革新と生活スタイルの変革が必要とされる。高効率モータの重要性は増大すると考えられる。

当社は更なる高効率化のために、リラクタンストルクの活用技術やセンサレス制御技術を進歩させる。また、商用電源に直接接続する誘導モータは使用台数が多くその運転に消費される電力も多い。これに置き換わる新しいコンセプトの高効率モータの開発も進めている。

現在の日本における高効率モータの普及率は数%程度しかない。これは、高効率モータの価格が汎用モータに比べ高いことに起因している。当社は、更なる高効率化とともに、低価格化も実現する。

4.2 制御性を高度化したモータの展望

低トルクリプル化や低コギングトルク化のためには、鉄心材料や永久磁石のミクロな材料特性にまで踏み込んだ研究開発が必要になる。特に、加工方法などの生産技術とリンクした形での解明が必要である。また、これらのデータを用いて特性を明らかにするための解析技術が必要とされる。制御技術、製造技術も更に進化させる必要がある。これらの技術を総合的に用いて開発を進め、国際競争の中で勝つことのできる制御性を高度化したモータを実現する。

4.3 リサイクル性の向上

モータは銅、鉄、希土類金属の宝庫で、かつ生産量も多い。リサイクル性を考えた設計が求められる。自然界から有用な資源を得るためには、分離に膨大な労力を費やす。これは再生資源でも同様で、リサイクル性は有用物質の分離性と言える。モータでは、銅、鉄、希土類金属の分離効

率がポイントになる。銅線は鉄心に巻き付けられており、熱硬化性を主とする絶縁ワニスで固定されているため一般に分離が難しい。細かく裁断して分離する方法もあるが、多大なエネルギーが必要になる。当社のポキポキ鉄心は高い生産性を実現する技術であるが、分解も容易であるので、分離効率を向上させる可能性を持っている。今後、リサイクル性も含めた生産技術の確立を目指す。

5. むすび

モータが大きな原動力となって真に魅力ある革新的な製品が実現される例が増えている。機械室を不要にすることで大きな顧客メリットを実現した薄形の機械室レスエレベーター用モータや、油圧駆動に置き換わるレベルのフィーリングを実現し市場が大きく伸びている電動パワーステアリング用モータは典型例である。モータ技術の発達には製品自体の革新を可能にする。また、高効率化やリサイクル性の向上は企業としての責務である。当社は、モータ技術を更に進化させ、21世紀の生活を豊かにする革新的な製品の創造にチャレンジする。

参考文献

- (1) 馬場和彦, ほか: プラシレスDCモータの高性能化検討, 電気学会回転機研究会資料, RM-00-141 (2000)
- (2) 池田洋一, ほか: 新形汎用ACサーボモータの生産技術, 三菱電機技報, 72, No.4, 303~306 (1998)
- (3) 伊田英紀, ほか: 低欠陥溶湯鍛造によるスピンドルモータの高速化, 三菱電機技報, 75, No.10, 659~662 (2001)
- (4) 大穀晃裕, ほか: 直流電動機の整流帯中の電機子電流を考慮した電磁力解析, 電気学会回転機研究会資料, RM-98-135 (1998)
- (5) 井上健二, ほか: 三菱新機械室レスエレベーター用薄形巻上機, 三菱電機技報, 75, No.12, 772~776 (2001)

エレベーター巻上機用モータ

川口守弥* 小松孝教*
大穀晃裕**
安江正徳*

要旨

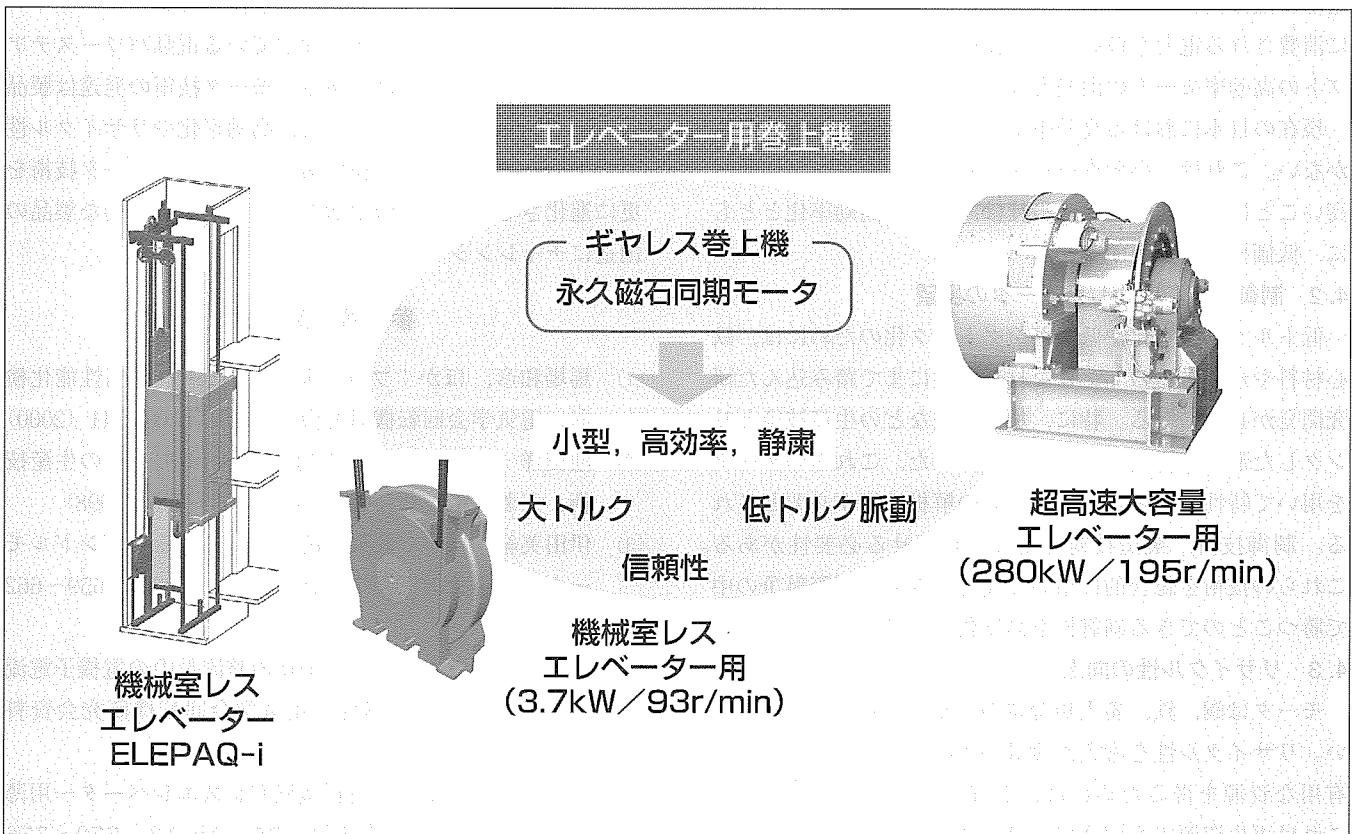
エレベーターは、建物内の縦の交通機関として重要な役割を担っている。近年、建物の高層化や高福祉社会への対応からその重要性が高まっており、一層の普及が期待されている。エレベーターの巻上機は、乗りかごを昇降させる主要機器として、輸送能力や乗り心地の向上、省エネルギー、省スペースなどのニーズに対応しながら進展してきた。巻上機用モータの特長としては、建築設備の主要機器としての信頼性に加え、重い乗りかごを加速するための大トルク、快適な乗り心地のための低トルク脈動などが挙げられる。

三菱電機では、効率や静粛性に優れかつ小型化が可能な、永久磁石同期モータ（PMモータ）を使ったギヤレス巻上機を業界に先駆けて採用し、現在では、これが当社巻上機の

主流となっている。

当社PMモータの特長とそのキー技術を以下に示す。

- (1) 小型化：機械室レスエレベーター用薄形モータ
当社独自の製造技術“関節型ポキポキモータ”による高密度巻線，集中巻方式の採用，多極化
- (2) 信頼性：永久磁石の減磁耐力
保持力の大きいNd-Fe-B系希土類磁石の採用，及び温度特性に配慮した磁気回路設計
- (3) 低トルク脈動：集中巻方式でのトルク脈動低減
磁気飽和を考慮した磁気回路設計，及び工作誤差の影響分析と対策
- (4) 発電制動：エレベーターの救出運転に利用
永久磁石界磁の活用（電源故障時，停電時）



エレベーター用巻上機

図は、当社機械室レスエレベーター“ELEPAQ-i”に適用している薄形巻上機と、超高速大容量エレベーター用巻上機の外観を示す。エレベーターの乗りかごを駆動する巻上機用モータには、信頼性に加え、大トルクかつ低トルク脈動の特性が要求される。当社では、効率や静粛性に優れかつ小型化が可能な永久磁石同期モータを使用したギヤレス巻上機を開発し、エレベーター用に幅広く製品展開している。

1. ま え が き

エレベーターは、建物内の縦の交通機関として重要な役割を担っており、都市で生活する人々にとって必要不可欠な存在と言える。現在のような安全装置付きのエレベーターが世の中に登場して約110年が経過し、今では乗客を安全に目的階へ運ぶという単なる縦の輸送手段としての機能だけでなく、輸送効率の向上や快適性、省エネルギー、省スペースなど様々なニーズへの対応が求められるようになった。これらはキーコンポーネントである巻上機と密接に関係しており、その大幅な性能向上によってエレベーターは著しく進展してきた。

本稿では、エレベーターの巻上機用モータについて簡単に説明し、近年主流となっている永久磁石同期モータ（PMモータ）とそのキー技術について紹介する。

2. エレベーター用巻上機の概要

2.1 駆動方式の変遷

エレベーターは駆動原理の相違からロープ式と油圧式に大別されるが、現在の主流はロープ式であり、巻上機の綱車にロープを巻き掛けて乗りかごを昇降させる方式である。高層ビルなどに設置される高速エレベーターでは、モータと綱車を直結したギヤレス巻上機が一般に用いられ、振動や騒音が少なく高級感のある乗り心地を実現している。一方、マンションやオフィスビルなどに適用される低速の標準型エレベーターでは、モータと綱車の間にギヤを備えた巻上機を用いるのが一般的であった。

表1に当社エレベーターの代表的な機種について駆動方式の変遷を示す。1980年代から'90年代にかけて、減速機の高効率化やインバータ制御方式の実用化など、駆動装置の省エネルギー化が進んだ。'90年代の後半には、PMモータを採用したギヤレス巻上機を業界に先駆けて高速エレベーターに適用し、更なる省エネルギー化とともに巻上機の小型化を実現した。'98年には、低速エレベーターの領域にも適用し、機械室レスエレベーターを実現することができた。

このように当社では、低速から高速までの代表機種に、

表1. エレベーター駆動方式の変遷(代表機種)

年		'85	'90	'95	2000
ベ 高 速 タ エ レ	制御方式	サイリスタレオナード	インバータ		
	巻上機	ギヤレス(DC)	ギヤレス(IM)	ギヤレス(PM)	
ベ 低 速 タ エ レ	制御方式	一次電圧制御	インバータ		
	巻上機	ウォーム歯車式(IM)	はすば歯車式(IM)	ギヤレス(PM)	ギヤレス(薄形PM)

DC：直流モータ、IM：誘導モータ、PM：永久磁石同期モータ

幅広く、PMモータを使ったギヤレス巻上機を適用している。

2.2 ギヤレス巻上機の動向

省スペース化、省エネルギー化の流れの中で、低速エレベーターでは機械室レスエレベーターが主流となってきている。この場合、巻上機は昇降路内に設置されるので、小型かつ静粛であることが要求される。騒音低減にはギヤレス化が有効であり、小型かつ低回転大トルクの仕様に対応するにはPMモータが適している。また、巻上機の形状には円筒形と薄形があるが、今後は、レイアウト性が良く、より省スペース化が可能な薄形巻上機が主流になると考えられる。

一方、ビルの高層化に伴う輸送能力向上の要求があり、大容量化が進んできた。一般に大容量化はモータと巻上機の大型化につながりレイアウト性の悪化を招くが、PMモータの特長を生かすことで巻上機の小型化が可能となり、従来の誘導モータでは対応できなかったシステムの実現が可能となった。今後もPMモータによる巻上機の大容量化が進むと考えられる。図1に当社の代表的な巻上機の外観を示す。

3. 巻上機用モータの特長とキー技術

3.1 巻上機用モータの特長

巻上機用モータは、エレベーターに特有な製品仕様に対応する必要がある。特長としては、建築設備の主要機器としての信頼性に加え、重い乗りかごを加速するための大トルク、快適な乗り心地のための低トルク脈動などが挙げられる。当社の代表的なギヤレス巻上機用PMモータについて、その仕様を表2に示す。表からも分かるように、ギヤレス巻上機用モータは一般的に低回転大トルクのモータである。また、機械系の乗りかご、釣合いおもりやロープなどの重量物を加速させるため最大トルクが大きく、高速

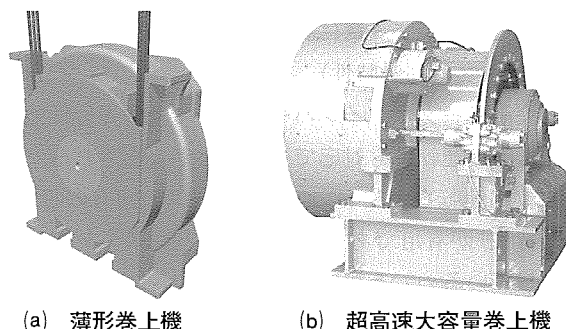


図1. 巻上機の外観

表2. ギヤレス巻上機用PMモータ仕様例

出力	回転速度	最大トルク	適用エレベーター
3.7kW	93r/min	約250%	低速、機械室レス
40kW	251r/min	約300%	高速中容量
280kW	195r/min	約500%	超高速大容量

化・大容量化するほどこれが顕著になる。

3.2 要求特性とキー技術

(1) 小型化及びレイアウト性

巻上機の小型化は、すべての機器を昇降路内に配置する機械室レスエレベーターにおいて特に重要であり、レイアウトに適合した設計が必要となる。

例えば、当社の機械室レスエレベーター-ELEPAQ-iでは、巻上機を乗りかごと昇降路壁のすき(隙)間に配置するため、小型でかつ薄形である必要がある。当社では、ELEPAQ-iの開発に当たり、多極化・小型化の点で誘導モータよりも有利な集中巻PMモータを採用し、当社独自の関節型ボキボキ鉄心を併用することでモータの薄形化を達成した⁽¹⁾⁽²⁾。

(2) 信頼性

PMモータの信頼性確保のための重要な要素の一つに、永久磁石の減磁耐力が挙げられる。永久磁石が作る磁束量は電機子反作用磁界等の外部磁界によって変動するが、外部磁界が減磁曲線上の保磁力手前にある変曲点を超えると、外部磁界を取り去っても元の着磁特性まで回復しない。この減磁を防ぐため、磁石材料は高保磁力である必要がある。一方、小型・高出力の面では高エネルギー積を持つ材料が必要であり、これらの観点から巻上機用モータにはNd-Fe-B系希土類磁石を採用した。Nd-Fe-B系磁石は高温において減磁が発生しやすいため、機器の使用環境温度を想定した磁気回路設計と評価を行う必要がある。当社PMモータでは、永久磁石の温度特性を考慮し、必要な減磁耐力を確保した設計としている。

(3) トルク脈動低減

エレベーターの品質を支える重要な特性として、乗り心地の悪化につながるトルク脈動が小さいことが要求される。ELEPAQ-iでは、開発に当たって詳細な磁界解析を行い、種々の要因に対してトルク脈動を抑制する設計を追求した。トルク脈動の低減はエレベーター用モータにとって重要な技術課題となるので4章に詳述する。

(4) その他(発電制動特性)

巻上機用モータは、インバータによる通常走行性能に加え、非常時の運転にも対応できることが要求される。特に乗客の救出運転などにおいてPMモータの固有の特性(発電制動特性)が有用であり、当社機械室レスエレベーターに適用しているので5章で紹介する。

4. トルク脈動低減設計

PMモータのトルク脈動低減には、一般に、永久磁石形状の最適化による回転子起磁力高調波の低減、極数・スロット数比を含めた巻線配置の検討、スキュー(斜めスロット)構造の採用などの設計がなされる。高速・大容量機種で採用している分布巻モータにおいては、上記設計を行う

ことでほぼ理論値どおりのトルク脈動低減効果を得ることができる。

一方、大幅な薄形化及び大口径化と集中巻方式を採用したELEPAQ-i用薄形モータでは、磁気飽和や工作誤差の影響により、理論値どおりのトルク脈動低減効果が得られない。これに対し、磁気飽和を考慮した磁気回路設計、及び工作誤差の影響分析と対策とにより、トルク脈動の低減が可能となる。

4.1 磁気飽和の影響低減

モータの薄形化には集中巻固定子の高電気装荷化が必ず(須)となるが、この場合、通電時に固定子ティース部での磁気飽和が生じやすく、分布巻固定子よりもトルク脈動が増加する傾向にある。これに対し、磁界解析を用いて図2に示した各設計パラメータを最適化し、磁石形状に加えて固定子ティース部の形状及び寸法を検討することで、高電気装荷設計と低トルク脈動とを両立できる。図3にスロット開口幅変更時のトルク脈動の変化を示す。スロット開口幅 b_g とティース間隔 τ_s との比を適当な値(図の例では0.25)に設定することで、ティース先端部での漏れ磁束による磁気飽和を緩和し、広い運転領域の全域においてトルク脈動を低減することができる。

4.2 工作誤差の影響分析と対策

モータの製造過程においては理想値に対して様々な工作誤差が生じ、これによるトルク脈動の増加やばらつきが懸念される。これに対し、工作誤差に含まれるトルク脈動の要因を分析した上で、磁界解析によって工作誤差とトルク脈動の関係を検討した。一例として、固定子内径ひずみとトルク脈動の関係を検討した例を図4に示す。ひずみの形

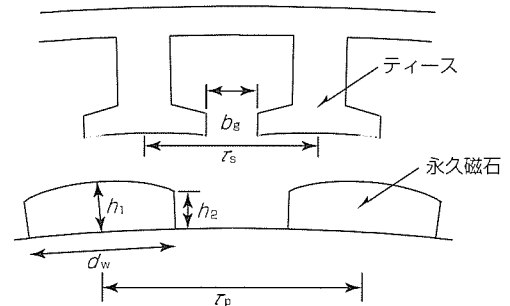


図2. 集中巻モータの代表的な設計パラメータ

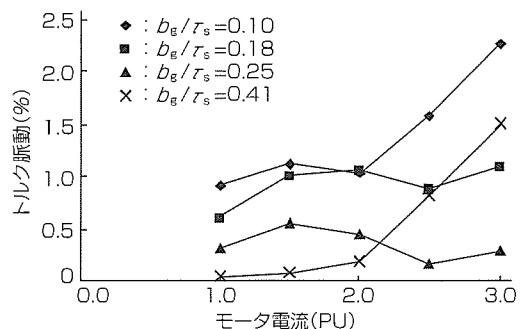
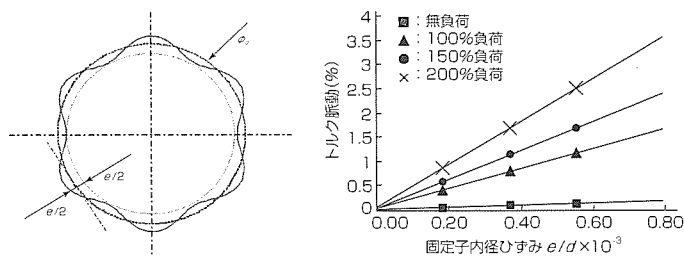


図3. 電流-トルク脈動特性(スロット開口幅に対する検討)



(a) 固定子内径とひずみ量 (b) 固定子内径ひずみとトルク脈動の関係

図4. 固定子ひずみがトルク脈動に与える影響

状(変形モード)としては種々のものが想定されるが、磁界解析によって個々に検討した結果、特定の変形モードのみがトルク脈動に大きく関与することが分かった。そこで負荷電流をパラメータにとりこの変形モードのひずみ量とトルク脈動の関係を求めたのが図の(b)である。横軸は図の(a)に示す d , e を用いて規格化してある。図から、ひずみ量と脈動の大きさは比例し、また同じひずみ量に対し負荷電流とトルク脈動とはほぼ比例することが分かる。この結果から、トルク脈動を低減するためにはひずみ量を極力少なくする必要があることが分かる。さらに、解析結果を基に工作時のひずみ量管理値を定めることで、安定した品質の確保が可能となる。

5. 発電制動運転

PMモータは界磁磁束が永久磁石によって確立されているため、電源故障や停電時においても発電制動が可能である。この特性を利用して非常制動後の乗りかごを最寄り階の乗り場にゆっくりと移動させる救出運転に利用することができる。

救出運転においては、停止状態でモータ端子を短絡しておき巻上機の機械式ブレーキを開放すると、かごは釣合いおもりとの質量差による不平衡トルクと発電制動トルクがバランスする速度で一定速度を保ちながら動いていくので、最寄り階乗り場に到着した時点で機械式ブレーキを投入すればよい。発電制動時の電流 I とモータトルク T は、図5の等価回路に基づき、下式によって求められる。

$$I = E / \sqrt{R^2 + X_d^2} \dots\dots\dots(1)$$

$$T = (mp / \omega) \cdot EI \cos \phi \dots\dots\dots(2)$$

ここで、 R , X_d はモータ内部インピーダンス、 p は極対数、 m は相数、 Ψ は磁束鎖交数、 ω は電気角周波数を表す。

このトルク特性をプロットすると図6の曲線が得られ、制動トルクは速度 ω_0 において最大値 T_{max} をとる。

ここで、インピーダンス X_d , r をモータ定格値をベースにとった定格速度におけるpu(per unit)値とすれば、

$$\omega_0 = r / X_d \quad [\text{pu}] \dots\dots\dots(3)$$

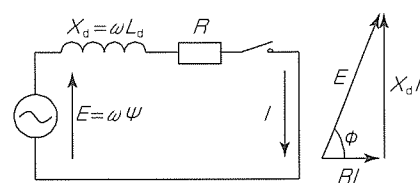


図5. 一相当たりの等価回路とベクトル図

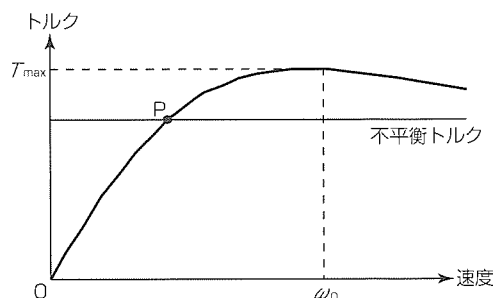


図6. 発電制動トルク特性

$$T_{max} = 1 / (2X_d) \text{ [pu]} \dots\dots\dots(4)$$

となる。このトルク曲線がロープ系の不平衡トルクと交わるP点の速度でかごは移動する。一般に $r \ll X_d$ でありトルク最大点の速度 ω_0 は定格速度よりも十分に小さいので、P点のかご移動速度を適切な範囲に抑えることが可能である。

ELEPAQ-iは、この特性を有効に利用したシステムとなっている。

6. む す び

以上、当社の巻上機用モータとその技術について紹介した。当社独自のポキボキコアを適用した薄形モータは目下のところ当社の標準機種である低速エレベーターに適用しているが、高速エレベーターにも展開しシリーズ化を図る予定である。今後も、更なる性能・品質の向上により、一層魅力ある製品の開発に取り組む所存である。

参 考 文 献

- (1) 井上健二, ほか: 三菱新機械室レスエレベーター用薄形巻上機, 三菱電機技報, 75, No.12, 772~776 (2001)
- (2) 大穀晃裕, ほか: 機械室レス・エレベーター巻上機用永久磁石式薄形モータの開発, 電学研資, RM-01-113 (2001)
- (3) 加藤 覚, ほか: 高速エレベーター用新形ギヤレス巻上機, 電学研資, RM-97-107 (1997)
- (4) 林 美克, ほか: 三菱新機械室レスエレベーター“ELEPAQ-i”, 三菱電機技報, 75, No.12, 766~771 (2001)

住環境機器用高効率モータ

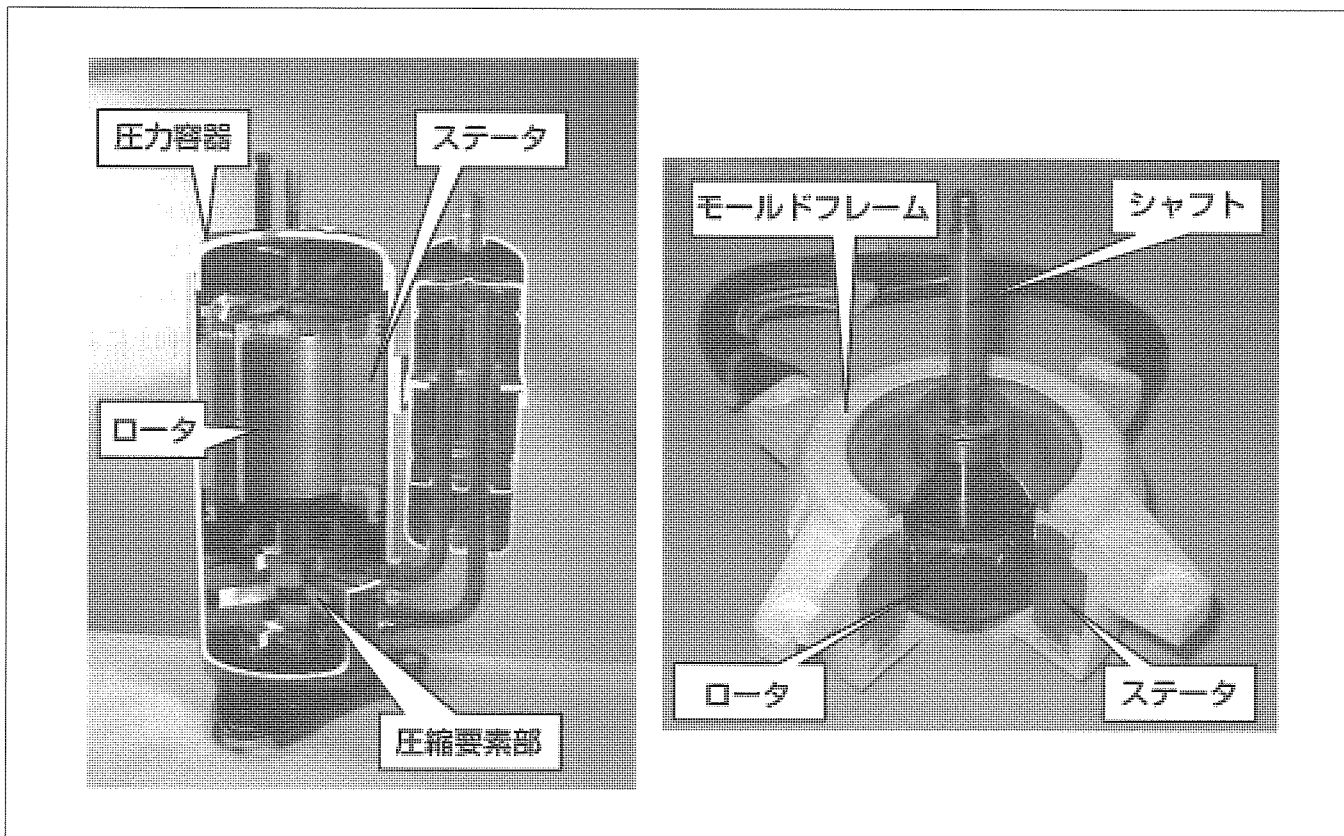
川口 仁* 石井博幸*
馬場和彦* 及川智明**
松岡 篤*

要 旨

住環境機器では、環境保全意識の高まりの中、主に省エネルギーの観点から高効率なブラシレスDCモータが誘導モータに代わって動力源として組み込まれ使用されるようになってきた。三菱電機では、本質的に効率の良いブラシレスDCモータを更に高効率化する開発に取り組んでいる。

特にルームエアコンは、家庭電力の約24%を占めるに至っており、省エネルギー化が毎年継続的に推進されている。また、ルームエアコンの消費電力の大半を圧縮機用モータやファン用モータで消費するため、これらのブラシレスDCモータの効率改善が重要である。当社は2001年冷凍シーズンから圧縮機用ではこれまで用いていた4極の分布巻IPMモータの構造を一新し、当社独自の関節型連結分割コア構造の6極集中巻IPMモータとすることで大幅な効率改

善を実現した。この圧縮機用モータは、当社の従来モデルに比べて約2～5%の効率向上と最大効率96%を達成した。損失低減に置き換えると、銅損を最大50%低減し、鉄損を最大30%低減した。また、ファン用では、ポキポキコア9スロット集中巻ステータと希土類ボンド磁石8極ロータを用いて高効率かつ高出力を実現した。希土類ボンド磁石採用によって鎖交磁束量を40%アップすることで銅損を最大45%低減した。高効率化と低騒音化を両立させる手法として希土類ボンド磁石のリング形状を新規に最適化し、コギングトルク、トルクリプル低減に努めた。このファンモータは、従来比5～8%の効率向上と最大効率85%を達成した。



ルームエアコン用ブラシレスDCモータ

当社のルームエアコン“霧ヶ峰”には高効率化されたブラシレスDCモータが搭載され、省エネルギー化に貢献している。左図が圧縮機の断面構造で、内部にブラシレスDCモータが組み込まれている。右図がファン用ブラシレスDCモータの断面構造である。両モータ共に当社独自のポキポキコアによる集中巻方式を使用している。また、新たな技術も開発しながら高効率化を推進している。

1. ま え が き

各種住環境機器には堅ろう(牢), 低騒音, 安価なことから誘導モータが動力源として使われていたが, この10年で環境保全の意識が国内外で高まり機器の省エネルギー化が大きく進展する中, 誘導モータに代わり効率の良いブラシレスDCモータが活用されている。特に住環境機器では, エアコン, 冷蔵庫の消費電力が家庭の消費電力量の約40%を占めていることから, 両製品の省エネルギー手段としてブラシレスDCモータ化の進展は目を見張るものがあった。ブラシレスDCモータは, 回転子に永久磁石を配置した同期電動機で, 誘導モータに比べて滑りがないことや回転子に電流が流れないなど原理的に誘導モータより効率が良いが, 更なる高効率化開発が進められている。

本稿では, 当社で開発し導入しているルームエアコン圧縮機用ブラシレスDCモータとファン用ブラシレスDCモータを事例として高効率化技術を紹介する。

2. ブラシレスDCモータの高効率化

ブラシレスDCモータの高効率化を換言すれば, モータ損失の低減である。モータ損失には, 大別して, 銅損と鉄損, そして機械損がある。機械損としては軸受部のロスやロータ部の風損などが考えられるが, 今回取り上げるモータにおいては機械損の全損失に占める割合が小さいため割愛し, 銅損と鉄損の改善手法を表1に示した。

銅損とはモータの巻線抵抗に電流が流れることによって発生するジュール熱であり, これを低減するには, 巻線抵抗を小さくするか, 必要とする電流量を小さくする方法を採る。前者はモータの巻線スペースにいかにかたく短く巻線を押し込むことができるか(占積率を大きくする)という課題であり, 以前からモータの巻線技術として開発が進められているが, 当社の開発したボキボキコアを用いた巻線方法は飛躍的に占積率を向上する技術である。後者は, モータトルク T が式(1)に示す関係にあるから, 鎖交磁束 Φ を増加させたり, dq 軸インダクタンス差の大きなロータ構造を作ればモータ電流が低減して銅損が削減できる。 dq 軸インダクタンス差の拡大はロータをIPM(Interior Perma-

nent Magnet)構造とすることによって実現している。

$$T = P_n \Phi_a i_q + P_n (L_d - L_q) i_d i_q \dots \dots \dots (1)$$

ここで, i_d, i_q : 電機子巻線電流の d, q 軸成分

L_d, L_q : d, q 軸インダクタンス

Φ_a : 永久磁石による電機子巻線鎖交磁束

P_n : 極対数

鉄損は, 大まかにはヒステリシス損と渦電流損に分類され, 使用する電磁鋼板の材料特性により大きく依存する。モータとして必要な鎖交磁束量を確保しながらステータ, ロータ各部の磁束密度をできる限り均一にするように磁界解析を活用し形状を最適化することで, 最大限に電磁鋼板の持つ材料特性を引き出して鉄損の低減に努めている。

モータ損失は制御方式によっても低減できる。例えば, 駆動電流を正弦波状に印加する正弦波駆動は, 一般にブラシレスDCモータで採用されている(矩)形波駆動(120°通電)に比べ電流の実効値を下げるので銅損低減ができる。また, 可変速制御に用いられるPWM制御の高duty運転法は, PWM制御時に巻線に流れるキャリア周期でのリップル電流振幅を低減させることでステータの起磁力高調波成分を低減し鉄損を削減している。

3. ルームエアコン圧縮機用ブラシレスDCモータ

ルームエアコンの圧縮機用モータは冷凍サイクルにおけるエネルギー変換の入口に当たり, 電気入力 of 8割以上を消費する。このモータの高効率化は省エネルギー化を推進する上で重要である。当社は, 2001年冷凍シーズンからこれまで用いてきた4極の分布巻IPMモータの構造を一新し, 関節型連結分割コア構造の6極集中巻IPMモータとすることで大幅な効率向上を実現している。

3.1 圧縮機用モータ構成

圧縮機用モータは, 圧縮容器内にステータが焼きばめられて固定されて, ロータと圧縮要素部がシャフトで結合して圧縮部(ロータリ)に動力を伝達している(要旨参照)。

モータの回転数運転範囲は600~8,000r/minと広範囲で, 出力も回転数に応じて100W~1.5kWと変化する。したがって, モータは広い運転範囲において高効率化することが要求される。図1に圧縮機用新型モータと従来モータの横

表1. ブラシレスDCモータ効率改善手法

	ロータ	ステータ	制 御
銅損	<ul style="list-style-type: none"> ● FLUX量UP ● ブリッジ部薄肉化 ● 磁束集中化 ● リラクタンストルクUP (L_q/L_d比) 	<ul style="list-style-type: none"> ● 銅量UP(スロット断面積拡大, 高占積率化, ボキボキコア) ● 巻線周長低減(集中巻, 多極化) 	● 正弦波駆動
鉄損	<ul style="list-style-type: none"> ● IPM化 ● SUSリング薄肉化 ● FLUX量最適化(高磁束密度部の緩和) ● 焼鈍(加工応力緩和, 結晶粒径の調整) ● 低鉄損材, 薄手法 	● 導体数UP	<ul style="list-style-type: none"> ● PAM ● 高Duty制御

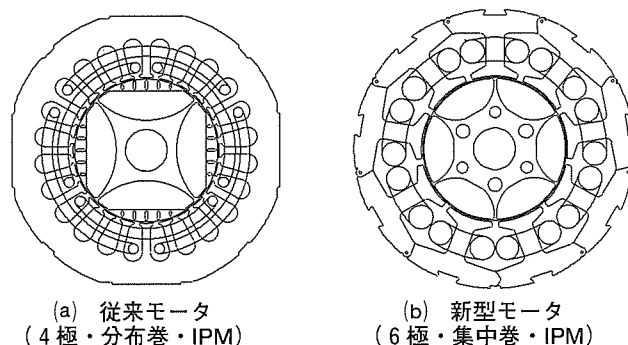


図1. モータ横断面図

断面図を、図2に側面図を示す。各図の(a)は従来モータであり、三相4極24スロットの分布巻ステータとIPMロータを組み合わせた構造としている。図の(b)は新型モータで、三相6極9スロットの集中巻ステータとIPMロータを組み合わせた構造となっている。ステータは当社が独自に考案した関節型連結分割コア(関節型ボキボキ鉄心)とし、ロータは6枚の両円弧形状のフェライト磁石を埋め込んだ表面配置型のIPM構造となっている。

3.2 関節型連結分割コアを用いた集中巻線化

新型モータは、集中巻方式を選択することで大幅に巻線の抵抗値を削減した。

分布巻線は、あらかじめ巻枠に巻き取られた巻線をスロットに挿入する方式で、図1(a)に示すように一つの巻線が1/3周区間のステータ端面を渡っているため、巻線の周長が長く抵抗値が大きくなっていった。また、図2で示すとおり、分布巻はコイルエンド部の高さが大きくなりモータの体積も増加させる原因となっていた。

集中巻は、図1(b)に示すように、一つのティースに巻線を直接巻き付ける方式で、前出の分布巻と比べて9スロットのステータの場合1/9周区間のステータ端面の渡りに短縮されており、この周長削減で銅損22%の低減効果が得られた。また、コイルエンド部の高さも図2(a)、(b)のように半分程度となりモータの小型化にも有効である。

集中巻のメリットを更に引き出すために、圧縮機用モータに初めて関節型連結分割コアを導入した。詳細は後節に譲るが、関節型連結分割コアを使用することで巻線を俵状に積み上げる完全整列巻を実現し、同一スロット面積に押し込む巻線量を格段に向上させた。図3に巻線占積率と当社モータで達成できる効率の関係を示す。ステータコアに一体コアを用いた場合の占積率はせいぜい50~60%であるのに対して、関節型連結分割コアを用いた場合は最大95%の占積率が達成できた。従来の分布巻に比べてスロット断面積を拡大したことと占積率を向上したことによる銅損の

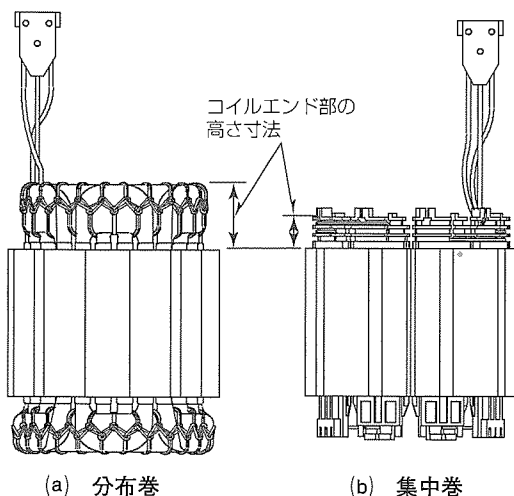


図2. モータ側面図

28%低減と、前に述べた周長削減による銅損低減を合わせると、銅損の50%低減を実現した。占積率を向上したことによる銅損の低減効果の効率への寄与は、高出力を出している暖房低外気条件運転において1%程度、年間電気代に及ぼす影響が大きな冷房軽負荷条件で2.5%程度の改善効果がある。

3.3 多極化とIPM構造

集中巻線化で大幅な銅損低減を実現したことを述べたが、一般に、集中巻は鉄損が増大するという問題もあった。この鉄損を改善するために、6極化とロータの構造の見直しを行った。4極から6極にすることでコア内の磁束密度分布が分散低減され、電気的周波数は増加するものの、冷房定格条件(3,180r/min 1.63N・m)で、4極集中巻モータよりも鉄損は11%低減できた。また、ロータには外周部まで永久磁石を配置した表面配置型IPMロータを採用し、さらに低鉄損の電磁鋼板を導入している。図4に従来モータと新型モータの定格負荷時の磁束線図を示す。図から、電機子反作用によるティース部の磁束の集中が緩和されているのが分かる。また、永久磁石の形状をD型磁石形状からロータの表面まで磁石を配置した両円弧形状とし、磁石の厚みを大きくすることで磁力の向上を図った。また、磁石の配向については、配向の焦点中心が外径側を向くようなラジアル配向とし、トルク定数が最大となるように磁界解析を用いて最適化した。これら、磁石形状と配向を最適化することにより、磁石の磁力を十分に確保することができて、分布巻から集中巻にすることによる巻線係数の減少分

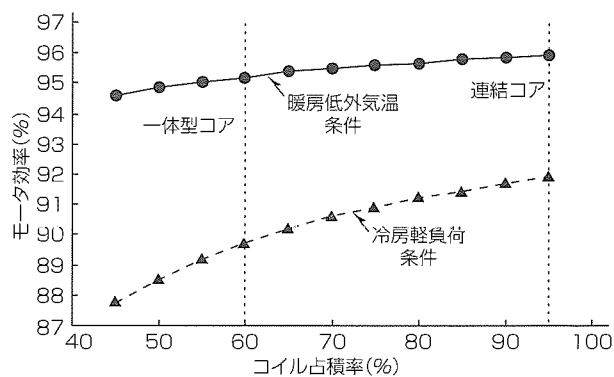


図3. 巻線占積率とモータ効率の関係

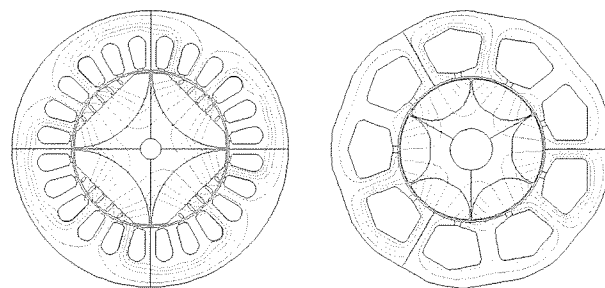


図4. 磁束線図の比較

を補うことができた。多極化，及びロータ構造見直しで，負荷条件で差があるが，約20～30%の鉄損改善を実現している。

3.4 効率特性

図5に，4極の分布巻IPMモータと6極の集中巻連結コアIPMモータについて，モータ出力に対するモータの効率特性を示す。また，参考のため，4極の集中巻一体コアIPM(GD4ロータ)モータの特性も示す。出力は，圧縮機の負荷ポイントに合わせて，200W～1.2kWの範囲で測定した。圧縮機の負荷ポイントは，出力の小さい方から，大きく分けて冷房軽負荷条件，冷房定格条件，暖房低外気条件に分類され，それぞれの条件に合わせて，回転数とトルクが同時に変化している。この結果から，全域にわたって6極の集中巻連結コアモータの効率が上回っており，特に低出力側で効率が大幅に改善されているのが分かる。効率の改善率では，冷房軽負荷条件で5%，冷房定格条件で3%，暖房低外気条件で2%の効果を得られている。また，図6に，冷房定格条件運転時におけるそれぞれのモータの損失分離結果を示す。4極の分布巻IPMモータに比べて4極の集中巻IPMモータは，銅損が40%低減しているものの鉄損が20%増加し，モータ効率で1%程度の効率改善にとどまっている。これに対し，6極の集中巻連結コアIPMモータでは，銅損，鉄損とも低減することができ，銅損で50%，鉄損で20%と大幅な損失低減を実現することができ

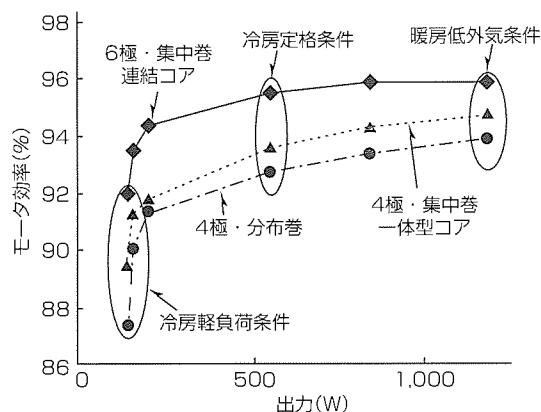


図5. モータ効率特性

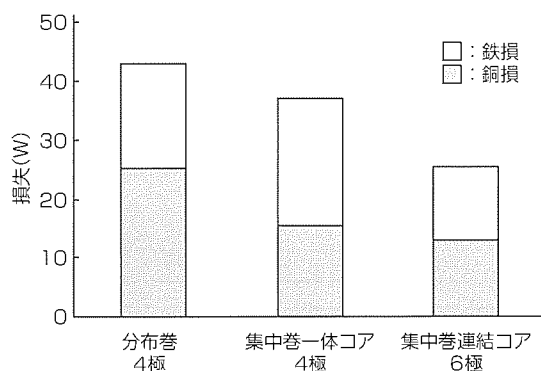


図6. 損失分離

た。

4. ルームエアコンファン用ブラシレスDCモータ

ルームエアコンの省エネルギー化が進むにつれ，圧縮機用モータばかりでなく搭載されているファン用モータも，誘導モータからブラシレスDCモータへと切り換わってきている。

当社では，2000年から高効率なファン用ブラシレスDCモータを開発して導入し，2001年には更に出力アップと高効率化を実施した。

4.1 ファン用モータ構成

モータフレームを樹脂で成形したモールドモータである。このモータは，ルームエアコンの室外機内に配置され，シャフトにはプロペラファンが取り付けられ，室外機内の熱交換器，インバータ回路のヒートシンクに送風している(要旨参照)。駆動回転数は200～1,200r/minで，出力も数W～70Wと変化する。モータは低騒音化のために正弦波駆動されている。従来モータ(2000年導入品)においても，ロータには8極極配向フェライトボンド磁石を，ステータにはポキボキコア9スロットを採用した集中巻とし，多極化や高占積率化による高効率化が既に実施されている。

4.2 希土類ボンド磁石採用による高効率・高出力化

従来モータの損失の割合は，定格負荷ポイントにおいて約80%が銅損，20%が鉄損であった。銅損の改善方法として，既に導入した方式に合わせて，今回は使用磁石の高磁力化を行った。表2に，今回採用した希土類ボンド磁石と従来使用していたフェライトボンド磁石の磁気特性の比較を示す。採用した希土類ボンド磁石は異方性のサマリウム-鉄-窒素(Sm-Fe-N)であり，射出成形されるボンド磁石ではトップレベルのエネルギー積を持つ材料である。従来モータよりも40%以上の鎖交磁束量をアップさせ，必要電流を低減することで大幅な銅損を実現した。

図7に，新型モータと従来モータの効率比較を示す。ルームエアコンの運転条件に合わせ，定格条件(600r/min, 0.2N・m)，及び最大負荷条件(1,000r/min, 0.48N・m)の2点について比較を行った。両条件において効率の改善がなされ，特に高出力側での改善が大きく，銅損を45%削減

表2. 磁石の磁気特性

	希土類ボンド磁石 (Sm-Fe-N)	フェライトボンド磁石
残留磁束密度 Br (T)	0.66	0.28
B保磁力 bHc (kA/m)	450	210
J保磁力 iHc (kA/m)	750	260
最大エネルギー積 BHmax (kJ/m ³)	79	16

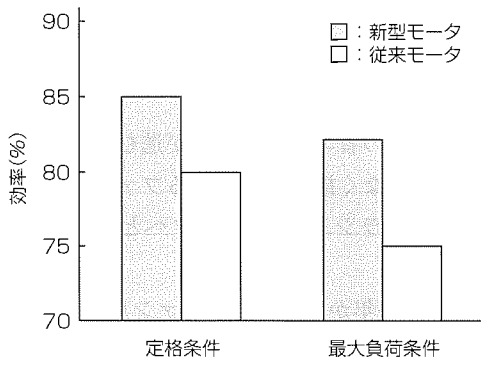


図7. 効率測定結果

し8%の効率改善を実現している。この高効率化により、さらに同じモータサイズで出力を出すことが可能となった。

4.3 コギングトルク、トルクリプルの低減

初期開発時において、新型モータは、磁力が上がった分、従来モータよりもコギングトルクやトルクリプルが増大した。ブラシレスDCモータは、圧縮機用モータでも同じだが、効率改善をした代わりにコギングトルクやトルクリプルを増大させて製品の低騒音性能を悪化させてはならない。このモータは、図8に示す新たな形状を考案することで、従来と同等の騒音性能を確保することができた。一般的には図(a)のように磁極をスキューさせて鎖交磁束量を緩やかに変化させる方法が用いられるが、この方法では鎖交磁束の低減につながり効率が下がる。新型モータは、磁石面の面積を変化させることで、鎖交磁束量を穏やかに変化する方法を採った。磁界解析によって生産性を考慮して形状最適化を実施した結果が図(b)の新形状であり、射出成形ボンド磁石でしかできない特殊形状となっている。

図9に誘起電圧の高調波成分の測定結果を示す。新型モータは、磁力をアップさせたが、従来モータよりも5次と11次の高調波が低減され、騒音を同等レベルに抑えることができた。

5. む す び

高効率なブラシレスDCモータを採用し、さらにそのモータの効率改善開発で住環境機器の省エネルギー化、小型化が推進されてきた。ブラシレスDCモータは、当社の提案するポキポキコアや磁石材料、電磁鋼板材料による性能

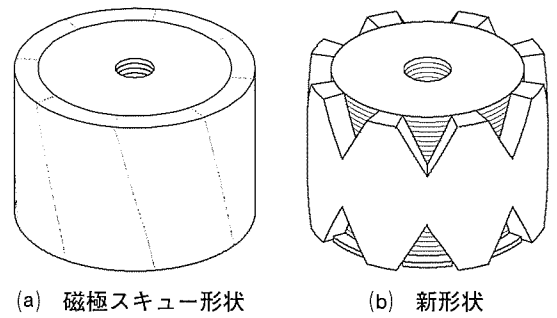


図8. ロータ形状

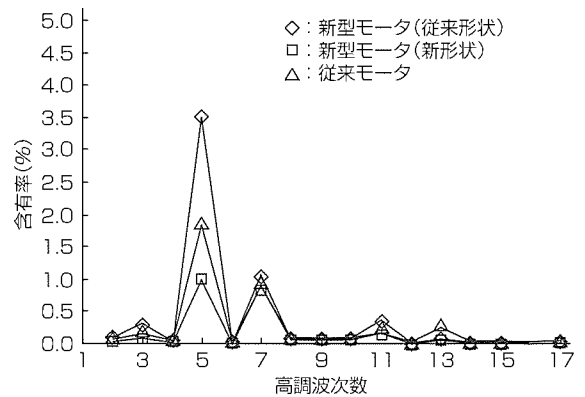


図9. 誘起電圧高調波含有率(測定結果)

改善が目覚ましく、進化が早い。今後も、開発の手を緩めることなく継続し、モータの更なる高効率化を目指す所存である。

参 考 文 献

- (1) 馬場和彦, ほか: ブラシレスDCモータの高性能化検討, 電気学会回転機研究会資料, RM-00-141 (2000-11)
- (2) 松岡 篤, ほか: 送風機用ブラシレスDCモータの高性能化検討, 電気学会回転機研究会資料, RM-01-161 (2001-11)
- (3) 秋田裕之, ほか: エアコン用圧縮機モータの省エネルギー・高効率化, 三菱電機技報, 75, No.10, 655~658 (2001)
- (4) 小形モータの高性能化, 電気学会技術報告書, 第744号 (1999-9)

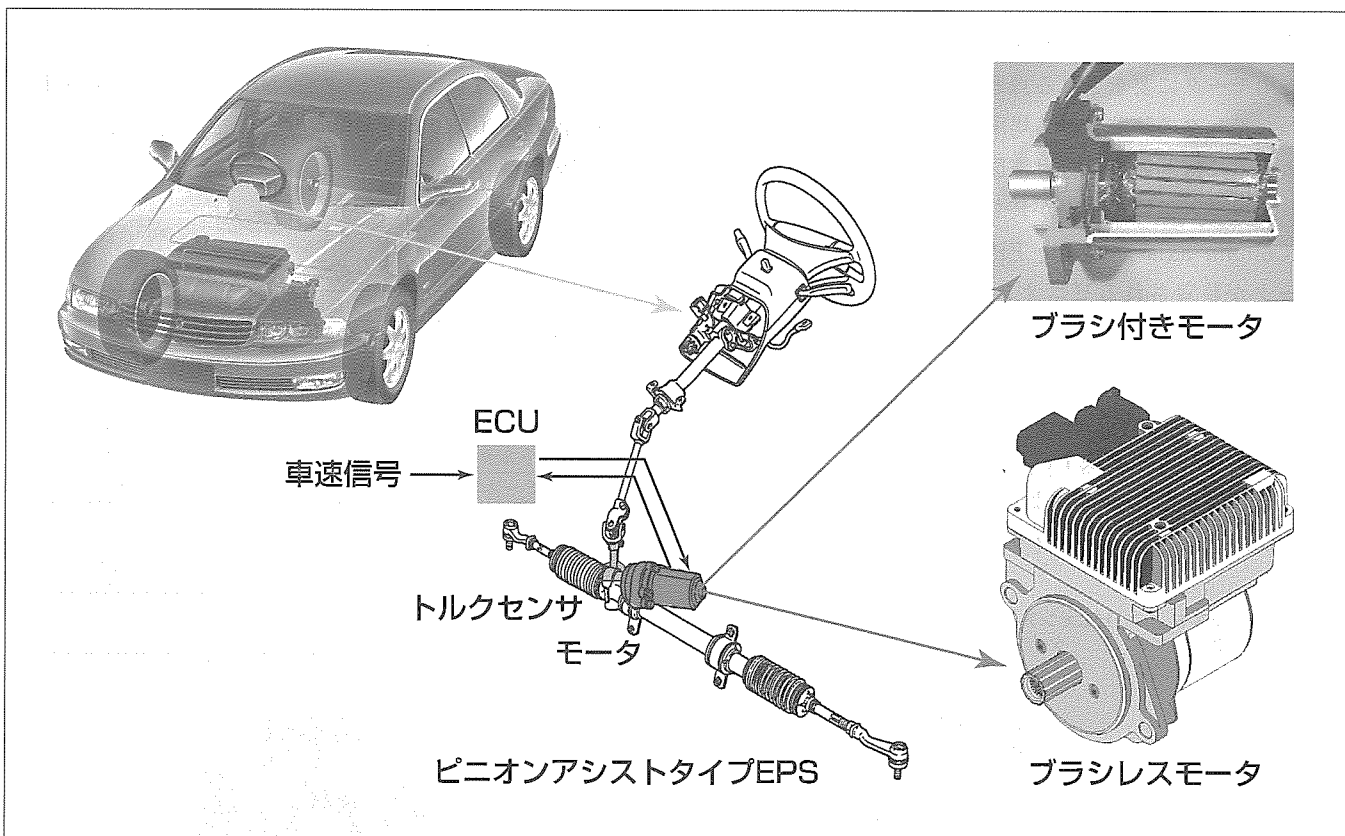
電動パワーステアリング用モータ

田中俊則*

要旨

電動パワーステアリング(以下“EPS”という。)はハンドル操舵時のみモータを駆動させる方式なので、エンジンの運転中常時油圧ポンプが駆動されている従来の油圧パワーステアリングに比べ、約3~5%の燃費向上が可能となる。このため、近年の省燃費・CO₂削減要求対応としてEPSの採用が増大しつつある。初期の軽四輪車用のみでなくリッターカーから普通車へと適用車種が拡大しているが、EPS用モータに要求される出力も大きくなってきている。この出力増大はモータサイズの増大をきたし、モータの音、トルクリプル、ロストルク、慣性モーメント等も大きくなり、ドライバーに不快感を与えたり操舵フィーリングが悪くな

るという問題があった。三菱電機は、この課題に対し、当社独自の電磁界解析手法を駆使し、高負荷電流時でも音・振動等の課題を解決したブラシ付き高出力モータを開発した。これを“New(Noise Erase Winding)モータシリーズ”と呼称して、2リッタークラスまで対応できるシリーズを設定した。さらに、これよりも大排気量の車両にも対応するモータの方策として、低慣性モーメント・低ロストルク化が可能なブラシレスモータを開発した。ブラシレスモータでは、構成方式を種々検討した結果、結線作業性に優れるECU(Electronic Control Unit)一体方式を標準設定とした。



EPSシステムにおけるモータ

車両運転時の操舵負荷を軽減し運転者の疲労感を緩和するパワーステアリングは、現在の車両では必ず(須)装備となっている。ここに紹介する電動パワーステアリング(EPS)は、上記のとおり従来の油圧パワーステアリングに比べ3~5%燃費が改善される。上図に電動パワーステアリングシステムの装着状況と駆動力発生源であるモータの装着状態を示しているが、従来の油圧パワーステアリングのような油圧配管が不要で、電気配線のみで構成できるのでシステムが簡潔である。モータ単品状態はブラシ付きモータとブラシレスモータの2種類を示している。

1. ま え が き

電動パワーステアリング(EPS)は、ハンドルの操舵時のみモータが駆動する方式なので、エンジンの運転中常時油圧ポンプが駆動されている従来の油圧パワーステアリングに比べてエネルギー消費が少なく、約3～5%の燃費向上が可能となる。この効果を活用して近年の省燃費・CO₂削減要求にこたえるため、EPSの採用が増大しつつある。初期の軽四輪車用のみでなくリッターカーから普通車へと適用車種が拡大しているが、EPS用モータに要求される出力も大きくなってきている。EPS用モータの出力増大はモータサイズの増大を来し、モータの音、トルクリプル、ロストルク、慣性モーメント等も大きくなり、ドライバーに不快感を与えたり操舵フィーリングが悪くなるという問題があった。当社は、この課題に先発メーカーとしていち早く解決に取り組んだ。当社独自の電磁界解析手法を駆使し、高負荷電流時でも音・振動の低いブラシ付き高出力モータを開発し、“Newモータシリーズ”と呼称して、2リッタークラスまで対応できるシリーズを設定した。更なる高出力要求に対応するモータとして、ブラシレスモータも開発したので併せて紹介する。

2. EPS用モータに要求される課題と対応

2.1 システムによる要求課題比較

EPS用モータに要求される課題は、EPSシステムの方式、すなわちモータの装着される場所によって変化する。EPSのシステムには、大きく分けて図1に示すような3種類がある。①コラム軸にモータが装着されるコラムアシストタイプ(Column axis assisting EPS：C-EPS)②ピニオン軸にモータが装着されるピニオンアシストタイプ(Pinion axis assisting EPS：P-EPS)③ラック軸にモータが装着されるラックアシストタイプ(Rack axis assisting EPS：R-EPS)。これら各システムにおいて、モータに要求される内容を比較したものを表1に示す。

モータに要求される内容是对応するシステムによって差はあるが、音・振動、トルクリプル・コギングトルク、ロ

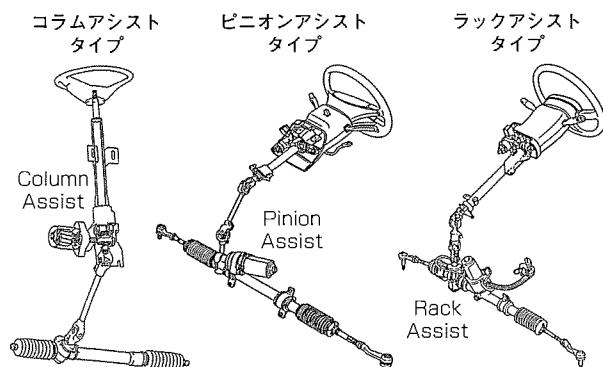


図1. 各システムの構成

ストルク、慣性モーメント等は、操舵感から各システムに共通して低減する必要がある。

2.2 EPSの高出力化に伴う課題

特にC-EPSではモータがドライバーの近くに装着されているので、モータの音はダッシュボード回りから、振動はステアリング軸系を通じてダイレクトにドライバーの耳や手に伝わるため、モータの音、トルクリプル等はドライバーに不快感を与える可能性が高い。また、ロストルク、慣性モーメントの増大は、各システムに共通して、操舵感の悪化をもたらす。これらの課題解決に対し当社が取り組んできた対応方法について述べる。

2.3 ブラシ付きモータの課題と対応

2.3.1 音・振動の低減

(1) 電磁氣的騒音の低減

ブラシカバーリングや整流スイッチングモードを考慮し整流帯における電流配置をも考慮した詳細な磁界解析により、巻線方式・スロット数・ブラシ数等の電磁設計仕様によってロータの半径方向加振力が異なることが判明したので、半径方向加振力が最小となる最適な仕様の選定と巻線の工夫によってモータの電磁氣的な騒音を大幅に低減した。図2に、解析に用いたFEM(Finite Element Method)によるメッシュ分割の例を示す。

この結果により、騒音の電流依存性をほとんどなくすることができ、80A、500Wクラスまでブラシ付きモータで対応可能となった。このモータを“Newモータ”と呼称して定格電流45～80Aのモータでシリーズを設定した。

(2) 機械的騒音の低減

表1. 各システムとモータへの要求課題

システム	コラム	ピニオン	ラック
操舵感			
音・振動	大	中	小
トルクリプル	中	中	中
コギングトルク	小	小	小
ロストルク	中	中	中
慣性モーメント	中	中	中
使用環境			
温度(耐熱性)	小	大	大
防水性	小	大	大
対応出力			
出力の大きさ	小	中	大

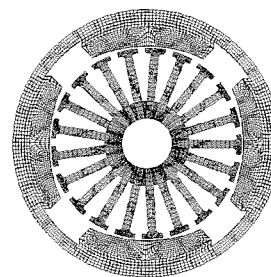


図2. メッシュ分割(主要部のみ)

上記の電磁気的な騒音の低減に加えて、さらにロータ側からステータ側への騒音伝達経路に弾性体を設けることによって機械的な騒音の低減を図った弾性支持構造を開発した。New巻線とこの弾性支持構造を組み合わせたモータを“スーパーサイレントモータ”と呼称して特にC-EPS用として設定した。

(3) モータ音低減の効果

上述の音低減方策による効果を図3、図4に示す。図3はモータシリーズをパラメータにしてモータ定格電流とオーバーオール音圧レベルの関係を示している。図4は各モータシリーズの音成分の大きさを音の周波数分析で比較して効果を示したものである。

2.3.2 トルクリプル・コギングトルクの低減

スキュー、エアギャップ形状、整流条件等の最適化を図ることによってトルクリプル・コギングトルクの低減を達成した。EPSモータとして要求される上記特性を最適な電磁気設計仕様を選定することにより、高出力モータにおいてもEPSとして実使用可能なレベルに抑えた。

2.3.3 ロストルクの低減

ロストルクはロータとステータの空けき(隙)部に発生する磁気的作用が大きな要因を占めるので、磁気装荷を減少させ電気装荷を増大させることができる高密度巻線の採用

と、鉄損の一種であるヒステリシス損の低減が可能な鉄心コア材の採用等によってロストルクをEPSとして実使用可能なレベルに抑えた。

3. ブラシレスモータ

3.1 ブラシレスモータの開発目的

ブラシ付きモータで80A、500Wクラスまでのシリーズ化の設定は完了しているが、EPS採用車種を拡大する際、更に高出力なモータが必要となる。ブラシ付きモータで更に高出力(500W超)に対応すると、モータが過大となり、EPS用モータとしてその大きさ、慣性モーメント、ロストルク等が許容できないレベルとなる。当社は、この高出力に対応するモータとして小型、低慣性モーメント、低ロストルク化を達成するとともに、EPS用モータとして必要な低トルクリプル、低コギングトルク、低騒音の特長も併せ持ったブラシレスモータを開発し市場の要求に対応することとした。

モータ出力と対応モータ種類について図5に当社の計画を示しているのをこれを参照されたい。

3.2 当社ブラシレスモータの技術要素

当社は、下記の技術要素を採用することにより、EPS用高出力モータとして対応できるものを開発した。

(1) 低慣性モーメント

界磁磁石ロータ方式と高エネルギー磁石材を採用しモータ及びロータの小型化を図った。

(2) 低ロストルク

ブラシ押圧用ばね不要による機械的ロストルク低減に加えて、磁気的にも鉄損の低減を図った。

(3) 低トルクリプル

ブラシレスモータの駆動方法として古典的なく(矩)形波方式と高精度制御が可能な正弦波方式があるが、正弦波方式を採用し、かつスキュー、エアギャップ、磁気回路の最適設計を行った。矩形波方式と正弦波方式の比較を表2に示しているが、総合的に判断して正弦波方式の方がEPSシステムに適していると言える。

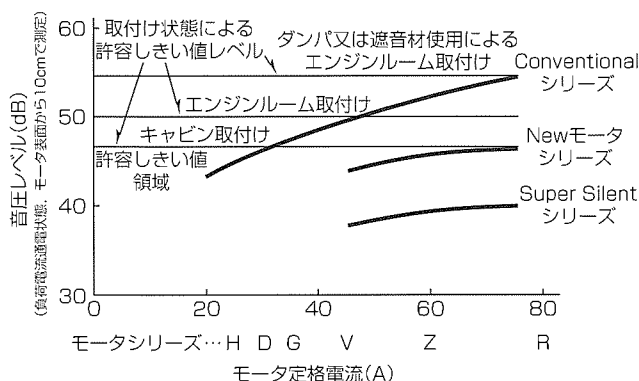


図3. モータ定格電流と音圧レベル

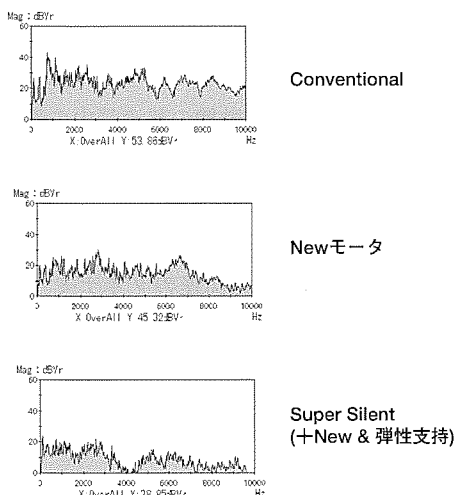


図4. 音低減効果(周波数分析)

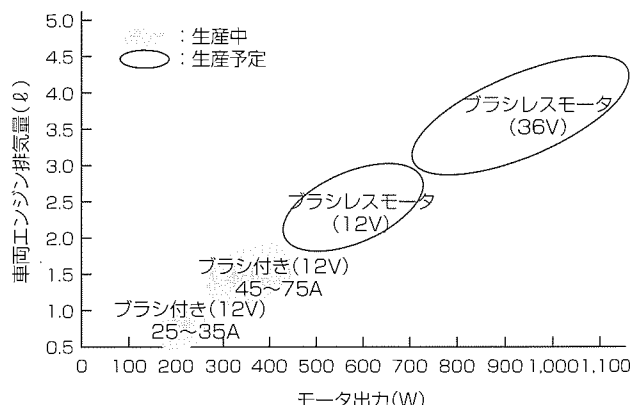


図5. モータ出力と対応モータ

表2. 矩形波方式と正弦波方式の比較

	矩形波	正弦波
	分布巻	集中巻
操舵感・操舵性能		
コギングトルク対策		○
通電トルクリプル		○
音・振動		○
弱め界磁	△	○
コスト		
マグネット	○	
センサ		△
巻線		○
制御回路	△	
サイズ		
小型、軽量化		○
総合評価		○

注：○=有利(容易・安価) △=やや有利

(4) 低コギングトルク

上記と同様にスキュー、エアギャップ、磁気回路の最適設計を行い、低トルクリプルとの両立を図った。

(5) 低騒音

ブラシのしゅう(摺)動部が不要となるので、ブラシの摺動音・整流音がなくなり、音の発生源が大幅に減少した。

3.3 その他の特長

(1) ポキポキコアの採用

当社ブラシレスモータに広く採用されているポキポキコア方式をEPS用ブラシレスモータにも採用し、ステータ巻線の占積率向上によるモータの小型化、コア材の歩留り向上、巻線時間短縮を図っている。

(2) リング磁石の採用

リング磁石の場合、セグメント磁石とは異なりスキュー着磁が可能であるので、上述のコギングトルクの低減に寄与しているとともに、ロータ構造の簡略化によって耐オーバラン性を向上させている。

3.4 ECU一体方式の検討

市場ニーズとしてのモジュール化に対応して、モータとECUとの一体化の有効性について、ブラシ付きモータとブラシレスモータの各々の場合について比較検討した。この検討結果を表3に示す。

ブラシレスモータの場合はモータとECUを接続する配線がパワー線3本とセンサ信号線6本の計9本もあるのに対し、ブラシ付きモータの場合はパワー線2本だけであるので、ECU一体方式によるメリットはブラシレスモータの場合に大きいと言える。

したがって、ブラシレスモータの場合はECU一体方式、ブラシ付きモータの場合はECU別体方式を標準とすることでEPS用モータ/ECUのシリーズ化を設定している。

3.5 更なる高出力化対応

表3. ECU一体方式の検討

モータタイプ	ブラシ付き		ブラシレス		備考
	ECU装着	別体	一体	別体	
組み付け時間	-	◎	-	◎	
レイアウト裕度	◎	-	◎	-	
補修対応	◎	-	◎	-	
効率	-	○	-	○	
EMC	-	○	-	○	
コネクタ	◎	-	-	◎	※一体ブラシ付きはブラシホルダ回り構造が複雑で別体の方が有利 ※配線・コネクタの多いブラシレスの方がコスト低減効果大きい
配線の数	パワー	2		3	
	センサ信号	0		6	
総合評価	◎	-	-	◎	

注：◎=大きく有利 ○=有利

図5に示すとおり、出力の小さい領域はブラシ付きモータ、出力の大きい領域はブラシレスモータで対応することになっているが、更に出力の大きい領域(700W超)にはブラシレスモータの36V(42V)システムで対応する計画である。

36V(42V)システムによる高出力化時の課題としては、入力・出力の電力ワットが大きくなるので、モータの耐熱設計と各部の耐圧性向上の検討が必要となる。

4. む す び

当社は1988年に世界で初めてEPS用モータ/ECUの量産化を行ったが、それ以後も採用車種の拡大に伴う高出力化要求の市場ニーズに対応し、EPS用モータとして適した高出力モータをタイムリーに開発し量産化を続けてきた結果、順調に生産を拡大させることができた。

現在、モータ/ECU各々の累計生産台数は1,000万台以上に達しており、今後もますます増加する見込みである。

14年にわたる量産の歴史と1,000万台以上の生産実績は当社にとって大きな財産と言える。今後も当社は、ソリューションビジネス拡大の視点に立ち、EPS用モータ/ECUのパイオニアとして市場ニーズに合ったものをいち早く開発して生産化し、EPSの採用拡大に貢献していく所存である。

参 考 文 献

- (1) 大穀晃裕, ほか: 直流電動機の整流帯中の電機子電流を考慮した電磁力解析, 電気学会回転機研究会資料, RM-98-135 (1998)
- (2) 吉桑義雄, ほか: ブラシ付直流機の電機子内電流挙動と加振力, 第12回電磁力関連のダイナミックシンポジウム資料 (2000)
- (3) Tanaka, T., et al.: An Advanced Electrical Power Steering Motor(2), SAE No.2001-01-0483 (2001)

寺澤英男*
赤木秀成*
坂根正道*

鉄道車両用高効率主電動機

要旨

大量輸送交通機関としての鉄道は、我々の生活において欠くことのできない存在になっており、その鉄道車両の大半が電動機(以下“主電動機”という。)によって駆動される。電動機駆動のいわゆる電車が登場して以来長い間、速度制御の容易な直流直巻電動機が使用されてきたが、①発電電力の回生、②大容量少台数化、③回生電力増大、④保守の軽減と、一貫したコスト低減のための顧客ニーズによって駆動システムが変遷し、誘導主電動機が使用されるに至った。誘導機は、整流子・ブラシというしゅう(摺)動部分がなく、その特長が様々な形で応用できるため、システムに対するニーズから主電動機そのものに対するニーズに変化し、多様化してきた。

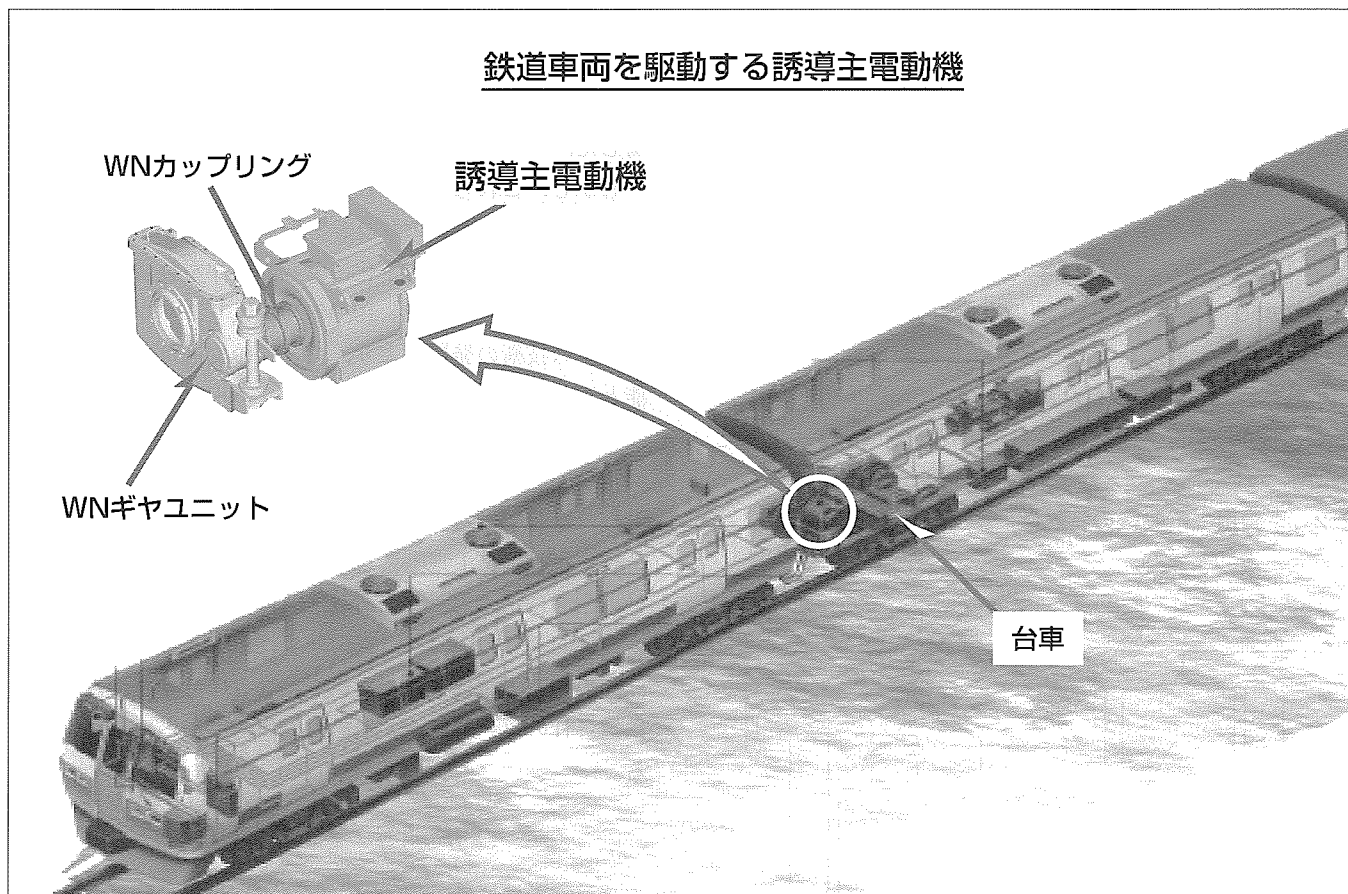
この多様化するニーズを分析して設定した3項目の主電動機設計コンセプトは次のとおりである。

- (1) LCC(Life Cycle Cost)の低減
- (2) 環境への配慮
- (3) 快適性の向上

本稿では、このコンセプトに対応する取り組みを、従来のニーズも踏まえて紹介する。

今後の主電動機においては高効率化は省エネルギー・環境保護の観点から最重要課題であり、低ロス化のための種々の取り組みを述べる。

また、今後の主電動機のあるべき姿を想定し、環境規制に対する取り組みやコスト低減についても触れる。



鉄道車両を駆動する誘導主電動機

鉄道車両は車体の下に台車と呼ばれる走行装置があり、車両を駆動するための誘導主電動機はその台車に取り付けられている。台車には、車両を支持・走行させるための車輪と車軸が収納されており、左右の車輪の間の限られたスペースに、誘導主電動機がWNカップリング、WNギヤユニットとともにぎ(艱)装される。ここで、外部から供給される電力(電気エネルギー)がトルク(機械エネルギー)に変換されて車両を動かしている。正に縁の下の力持ちであり、狭いスペースの中で進歩・発展の歴史があった。今でも進歩・発展の歴史は継続しており、人間社会への貢献度はますます高まってきている。

*系統変電・交通システム事業所

1. ま え が き

都市間及び都市内の大量輸送交通機関としての鉄道の役割は大きく、我々の生活において欠くことのできない存在となっている。近年地球環境保護の観点からも見直されつつあり、国内はもとより、各国の都市開発及びオリンピックやワールドカップなどの世界的行事が開催される地域においても鉄道路線の再整備計画があり、電鉄市場の需要は依然として健在である。鉄道車両には、大都市間を高速で結ぶ新幹線を始めとして主要都市間を結ぶ特急車・急行車、都市内における通勤車や軽快電車など人の移動目的のほか、貨物輸送用などがある。電動機はこの鉄道車両を駆動するための動力源としても使用されており、顧客ニーズを満足するため、制御技術やパワーエレクトロニクス技術の進歩とともに変化してきた。ここでは、今までの車両駆動用電動機の変遷を振り返り、多様化する顧客ニーズに対応するための主電動機の課題、環境を配慮した近年の取り組みや対応について紹介し、今後の電動機の姿を主に更なる高効率化・省メンテナンス化という観点から考察してみた。

2. 鉄道車両用主電動機の概要

2.1 主電動機の搭載位置

普段何気なく乗っている電車には、どこに主電動機が搭載されているのだろうか。車体の下には台車という走行装置があり、その中に主電動機は収納されている。乗客からは見えない部分であり、正に縁の下の力持ち的存在である。架線又は第三軌条から供給される電気的パワーを、トルクという機械的パワーに変換し、駆動装置を介して車軸・車輪に伝達し、車輪とレール間の摩擦力(鉄道では粘着力と呼ぶ)によって車両を駆動させる。したがって、図1に示すように、台車内の限られたスペースに駆動装置・継手とともに搭載されるため、高出力を必要としながら、小型化も要求される。

2.2 車両用主電動機の特長

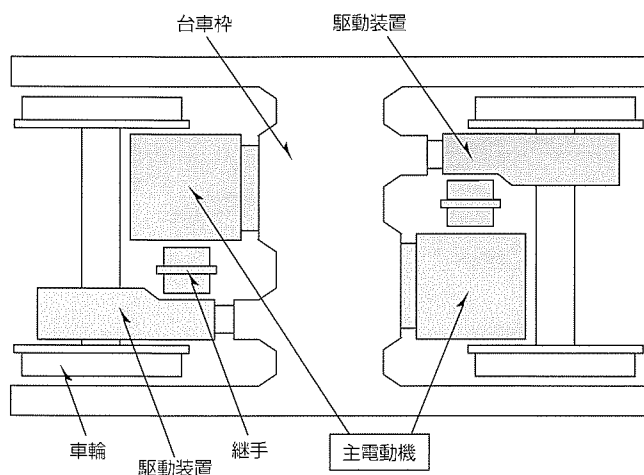


図1. 台車内の主電動機の配置

鉄道車両用主電動機は、一般産業用電動機に比べると、以下の点で特殊な使われ方であると言える。

- (1) 両側の車輪間の限られたスペースへの収納が必要
- (2) エネルギー密度が高いため、高耐熱絶縁が必要(耐熱指数は、H種が220℃、Class200が240℃)
- (3) 最高使用回転数は、5,000~6,000r/min
- (4) 両回転において、0~最高回転数の範囲で自由に使用
- (5) 最大出力は、定格出力の1.5~2倍
- (6) 主電動機負荷は、0~最大出力まで自由に使用
- (7) 大きな振動加速度(5~20G)が作用する使用環境
- (8) 鉄分、水分、その他じんあい(塵埃)が多い使用環境

3. 顧客ニーズと主電動機の変遷

主電動機で駆動する電車が登場して以来長い間、速度制御が簡単な直流直巻電動機を用いた抵抗制御方式が使用されてきた。しかし、普及するにつれて制動時の発電電力を回生したいというニーズが強まり、電力回生が可能なシステムが登場した。容量の大きい補助電源を用いて界磁側を励磁する添加励磁制御、電機子回路の電圧を直接制御する電機子チョッパ制御、直流複巻電動機を用いて界磁側を制御する界磁チョッパ制御などが挙げられる。さらに、車両の高性能化・主電動機の大容量少台数化のニーズにこたえるため、直流分巻電動機を用いて電機子回路の電圧制御と界磁側の制御を組み合わせた四象限チョッパ制御方式が登場した。

しかし、これらはいずれも直流主電動機駆動システムであり、直流主電動機のブラシと整流子に関する頻繁な保守があるために、無整流子化によって保守を軽減したいというニーズが根強かった。1980年代に入り、パワーエレクトロニクス技術の発展により、大容量の交流可変速制御が可能となり、誘導電動機を用いたインバータ電車が急速に普及し始めた。現在、新製される車両はほとんどがインバータ電車であり、新製される主電動機はほぼ100%が誘導電動機になっている。

誘導電動機を主電動機として採用するに至るまでの変遷は、図2に示すとおりであり、前述のように顧客ニーズが密接に関係しているが、電力回生はランニングコストの低減、無整流子化はメンテナンスコストの低減と、一貫して鉄道各社のコスト低減のためのニーズであったことが分かる。

4. 顧客ニーズの多様化

誘導電動機には整流子がないため直流電動機に比べると小型になり、しかも摺動部分がないことから高速回転数化が可能となる。これらを含めた誘導電動機のメリットは、大容量化・小型軽量化・省保守化・低騒音化などの様々な形で応用することができることになり、顧客のニーズも多

様化してきた。

4.1 車両性能向上と大容量少台数化

交流可変速制御+誘導主電動機の大きなメリットとして、良好な再粘着性能(車輪が空転してもすぐに粘着する特性を持つ)を生かした車両性能の向上と大容量少台数化が挙げられる。主電動機を搭載する車両の数が減少し、初期投資低減が図られた。また、回生ブレーキにおける車両性能も高く設定できることになり、より多くの電力回生が可能となることからランニングコスト低減も図られた。これらはいずれも従来のニーズの延長であり、鉄道各社のコスト低減に貢献している。また、この特長を生かして、電気機関車用の大型主電動機にも誘導主電動機が採用されるに至った(図3)。

4.2 小型軽量化

整流子・ブラシの摺動部分がないこと、高速回転による小型化が可能なことから、直流電動機に比べると大幅な小型軽量化が達成できる。

新幹線車両への誘導主電動機(図4)の適用は、高速走行時の安定性確保のため、主電動機を含めた台車部分の質量

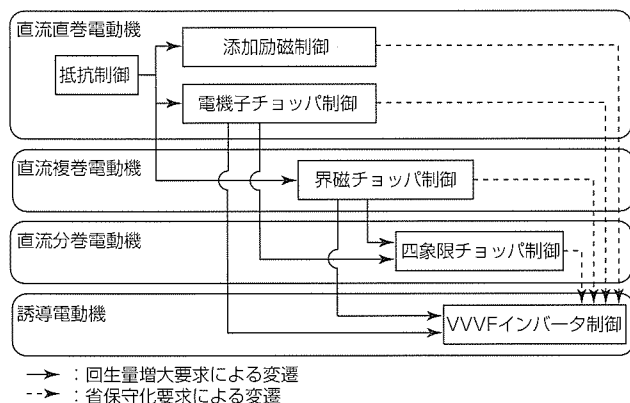


図2. 主電動機と制御方式の変遷

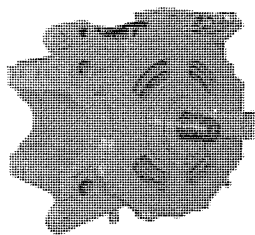


図3. 電気機関車用誘導主電動機

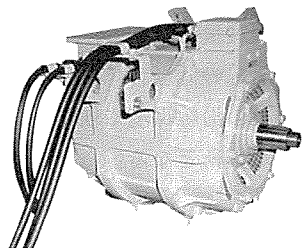


図4. 新幹線電車で用いられる誘導主電動機

軽減が決め手となった。これは、直流主電動機では成し得なかった主電動機の大幅な小型軽量化を達成するという新たなニーズにこたえたものである。東海道新幹線・山陽新幹線においては、100系新幹線電車(2階建て)が直流主電動機を搭載した最後の車両であり、この直流主電動機と300系新幹線電車(のぞみ)に搭載した誘導主電動機を比較すると、300系用誘導主電動機は容量が大きくなっているにもかかわらず、質量は大幅に軽減されている。これは、誘導電動機の特長である無整流子化・高回転数化に加えて、強制風冷における冷却風量増大、軽量アルミ鋳物のブラケットへの採用など、徹底した軽量化を図った結果であり、300系用誘導主電動機の1kW当たりの質量は、100系用直流主電動機の約37%にまで低減した(表1)。

この300系新幹線電車において採用された誘導主電動機の軽量化思想を受け継いで、その後の新幹線電車で主電動機も誘導主電動機が採用されることとなった。

4.3 保守の省力化, 分解周期延長

保守の省力化は誘導主電動機の最大のメリットであり、直流主電動機におけるブラシと整流子の保守が皆無となる。ユーザーでの調査の結果、作業量・発生費用ともに直流主電動機の場合の10%以下に軽減されている。保守が必要な部分は、冷却風を取り入れる吸気カバーの清掃と軸受部分が主となる。軸受部分の保守は基本的には直流主電動機と同様であるが、更にメンテナンスコストを低減するために、分解周期延長と軸受の長寿命化というニーズが生まれてきた。最適な軸受サイズの選定、絶縁軸受、長寿命グリースの採用などにより、このニーズに対応している。

4.4 低騒音化

鉄道車両は従来移動手段であったが、利用する機会が増えれば移動時間を過ごす居住空間と考えることができ、静かな空間の要求から、低騒音化のニーズがクローズアップされてきた。主電動機の騒音には磁歪(歪)音と風切り音の2種類があり、前者はインバータの出力電流に含まれる高調波成分による電動機各部の振動、後者は冷却風が流れる際の各部への衝突による疎密の発生にそれぞれ起因するものである。磁歪音の低減には、インバータの出力波形の改善を行うことが必要となる。風切り音は、ファン出口近傍又は回転子のバーエンド近傍からの発生が主であり、風が当たる部分の平滑化のほかに回転側と固定側の間のギャップの確保によって低減させることになるが、冷却風量の低減など冷却能力にも影響するため、種々の検討が必要と

表1. 単位容量当たりの質量比較

項目	100系(直流機)	300系(誘導機)
定格容量	230kW	300kW
質量	825kg	396kg
質量/kW	3.59kg/kW	1.32kg/kW
比率	1.00	0.37

なる。

5. 顧客ニーズの細分化と主電動機の今後の取り組み

顧客ニーズも時代とともに変化し、従来駆動システムが対象であったが、最近各機器ごとに細分化されてきている。

5.1 主電動機設計コンセプト

主電動機は、前述したように、パワーエレクトロニクス技術の進歩も大きく関与しているが、顧客のニーズによって変化してきている。したがって、従来からの顧客ニーズを踏まえ、今後の細分化された顧客ニーズを満足する主電動機とすることが必ず(須)であり、設計コンセプトを図5に示すとおりの内容としている。

5.2 LCCの低減

車両用主電動機の保守は顧客が実施するため、保守に要するコストを低減することが可能な設計とすることが要求されている。

5.2.1 信頼性向上

車両用電機品の保守には、定期的な保守のほかに、不具合・故障等による不定期な保守が含まれる。この不定期な保守を最小限に抑えることが必要であり、信頼性を向上するとともに、MTBF(Mean Time Between Failure)やMDBF(Mean Distance Between Failure)などの定量化された信頼性データに基づいて保守計画を立て、これを定期的保守に反映させることが要求される。電鉄業界、特に海外案件においては、これらの指標が非常に高い目標値となっており、適正な余裕を持たせた設計としなければならない。

5.2.2 保守の省力化

誘導主電動機の場合の定期的保守は、軸受部が主となる。基本的には主電動機を分解しグリースの交換や必要に応じ

た軸受の交換も行われるため、分解周期を延長することが要求される。従来、軸受構造の最適化や長寿命グリースの採用で対応してきたが、グリースの熱劣化を抑えて潤滑性能を長期間保持することが分解周期延長に有効であることから、軸受部の温度上昇を低く抑えることが必要となる。軸受部の温度上昇は、回転子の温度上昇と強い相関があるため、低抵抗材料の採用、冷却効率の向上など回転子温度上昇を低く抑える設計が要求されている。

一方、主電動機内部の汚損やたい(堆)積した塵埃の除去が保守上問題視されるようになり、冷却風内の塵埃を高効率で除去可能な冷却風押し込み形の主電動機も開発し採用されているが、外部の空気を主電動機内部に取り入れられない全閉形主電動機の要求もある。全閉形は、内部の清掃保守が皆無となるが、熱交換が外周部のみとなるため冷却効率が低く、軸受の温度は高くなる。したがって、全閉形でしかも軸受温度を低減できる主電動機を構成することが保守の省力化という観点からの今後の課題である。

前述のように低抵抗材料採用や冷却効率向上で回転子温度の低減は可能となるが、回転子で発熱することは避けられないため、全閉形誘導主電動機は大容量化に対し不利となる。

回転子での発熱がない電動機としては永久磁石を用いた同期電動機やリラクタンスモータなどがあり、これらを全閉形の車両用主電動機として適用することも有効であると考えられ、これらの電動機も視野に入れた取り組みが必要となっている。

5.2.3 更なる小型軽量化

初期投資低減を考慮した大容量少台数化、又は省エネルギーのための軽量化が要求され、更なる小型軽量化技術が必須である。これには、温度上昇を低く抑えることが必要であり、次の項目が基本方針となる。

- (1) 冷却効率の向上：冷却風経路の最適化
- (2) 発生熱量の低減：低抵抗材料の採用、高効率化
- (3) 許容温度の上昇：耐熱性の高い絶縁材料使用

5.3 環境への配慮

地球環境を保護する活動が活発になっており、省エネルギーや省資源を推進することが要求されている。投入する資源を最小限に抑え、しかも得られるパワーを最大限に活用するために、効率の向上が最大の課題である。また、人体への影響という観点からも環境に対する配慮が要求されている。前述の小型軽量化は、省エネルギー・省資源に有効であり、しかも沿線の低騒音化又は低振動による乗り心地向上にもつながり、沿線環境や快適性の観点からも環境への配慮にこたえる技術となる。

5.3.1 高効率化

主電動機の効率を向上することは、鉄道車両の走行に必要なパワーを得るための入力パワーが少なくなることを意

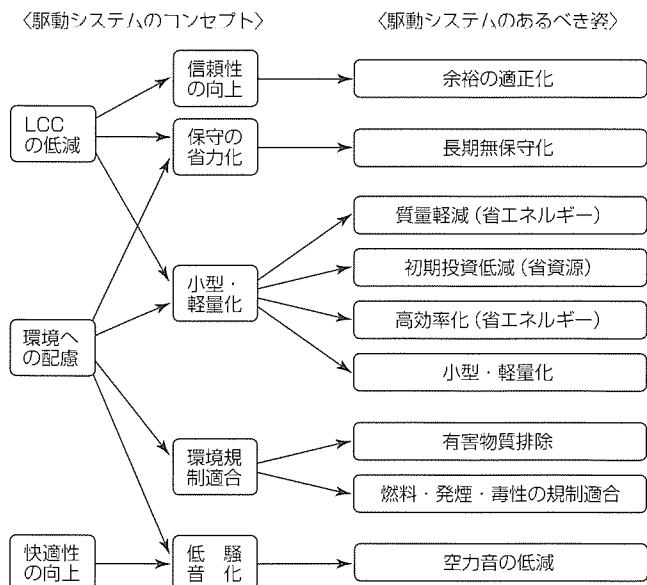


図5. 主電動機的设计コンセプト

味する。言い換えれば、同一の入力パワーであれば、より高い走行パワーを得ることが可能となる。入力パワーが少なくなることは、電力消費量が減少することであり、省エネルギー・省資源にとって非常に大きな効果となる。また、電力供給されない路線では、車両側にエンジンを持つDEL (Diesel Electric Locomotive) のように限られたエンジンパワーの中から走行のための出力パワーを取り出すことになるため、高効率化は、けん(牽)引力の増大、エンジンの小型化、燃費の向上に対して大きな効果を持っている。さらに、高効率化は主電動機の小型軽量化にも反映できるものであり、今後の主電動機の重要な課題である。高効率化は損失低減と同等であり、以下に示す取り組みが必要である。

- (1) 回転子導体への低抵抗材料の適用(誘導機)
- (2) 永久磁石式同期電動機、リラクタンスモータの適用
- (3) 高調波鉄損を低減する構造の採用(解析による)

上記の(1)と(2)は、いずれも回転子の損失低減を目的としたものであり、省保守化・小型軽量化の部分でも述べた内容である。(3)の高調波鉄損は、高速域での損失の大半を占めるものであり、今まで検討が及ばない領域であったが、磁性材料の鉄損解析、回転子導体の渦電流解析により、電動機内部の損失の分析・評価と発生部位の同定を行うことができるようになり、より定量的な高調波鉄損の把握が可能となった。その結果、最適形状での高効率化設計が高精度で可能になった(図6)。

5.3.2 有害物質の排除

環境保護の観点から、人体に有害とされる材料の使用が規制されている。国内では平成12年3月にPRTR法が施行され、特定化学物質の排出量の把握と届出(MSDS)が必要となった。海外では、有害物質を含む材料の使用が禁止されており、有害な特定化学物質を含まない材料の使用を促進することが必須である。

5.3.3 燃焼性・発煙性・毒性規制

国内では具体的な要求にはなっていないが、海外案件に関しては、厳しく規制されることが多い。ASTMやBS等の規格に試験方法と規制値が規定されており、火災発生時の安全性のために、規制に合格した材料のみの使用が認められる。

5.4 快適性の向上, 更なる低騒音化

鉄道車両を快適な移動空間とすることが要求されており、従来以上に低騒音化を進めることが必要となっている。

低騒音高性能ファンの採用によって従来に比べ3~5 dBAの低騒音化を達成しているが、更に厳しい騒音規制が要求される場合、サイレンサを適用することも必要となる。サイレンサはカバー内面に多孔質のアルミ系吸音材を

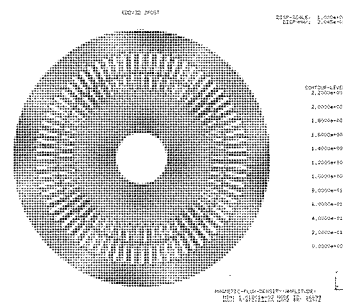


図6. 磁界解析例

取り付けられた構成となっており、選定周波数の騒音に対して高い防音機能を発揮することになるが、冷却風量の減少も伴うため、冷却能力の検討も必要となる。

また、車内騒音には、主電動機から直接発生する騒音のほかに、主電動機の振動が車体に伝達して車体が共鳴箱となって発生するいわゆる固体伝搬騒音も含まれており、車体・台車も含めた全体の機械系として振動伝達を抑えることも必要となっている。すなわち、構造物各部の局所的な共振周波数が一致しないようにすることが有効な手段であり、装置側と車体側の連携のとれた取り組みが必要となる。

5.5 低価格

顧客の初期投資低減のための要求であり、機器の標準化が必須である。主電動機で考えれば、車両性能の統一(主電動機の発生トルクパターンの統一)、台車の統一(取付けのためのインタフェース統一)など、電気的にも機械的にも標準化を図ることが必要である。そのためには、より多くの顧客にも参画していただき、より多くの満足が得られるような共通化を図っていくことが必要と考える。

6. むすび

すべての機器に言えることであるが、顧客のニーズによって進歩・発展してきており、従来のニーズを踏まえて今後のニーズにいかに対応するかがかぎ(鍵)となる。電動機は成熟機種と言われて久しいが、車両用主電動機はまだまだ進歩・発展するものと考えられる。今後の技術開発により、様々な形で社会に貢献できるものと信じている。

参考文献

- (1) リラクタンストルク応用電動機と制御システム調査専門委員会：リラクタンストルク応用電動機と制御システム，電気学会技術報告，No.719 (1999-2)
- (2) 横西富志雄，ほか：300系新幹線電車用主電動機の軽量化，電気学会全国大会，No.1082 (1993-3)
- (3) 飯田秀樹，ほか：VVVFインバータ制御電車概論-1-，鉄道車両と技術，No.29 (1997-12)

高性能専用ACサーボモータ

合田 洋*
大塚 久*

要 旨

三菱電機のACサーボモータは、市場のあらゆるニーズに対応するため、モータ小容量30W～大容量55kWの磁石式同期モータで品ぞろえしている。

また、各々の容量帯でモータイナーシャや回転速度などにバリエーションを持たせ、顧客の機械性能が最大限有効に引き出せるような性能・機能の向上を織り込んだ製品シリーズの拡大を図ってきた。

しかしながら、近年は、半導体・液晶製造装置関係の実装機・洗浄機・搬送機、移載用ロボット等の分野では装置の小型化・高性能化に対する要求が急増し、従来のACサーボモータとは異なる仕様のニーズが高まり、これらの用

途に特化した専用モータの開発が必要となっている。

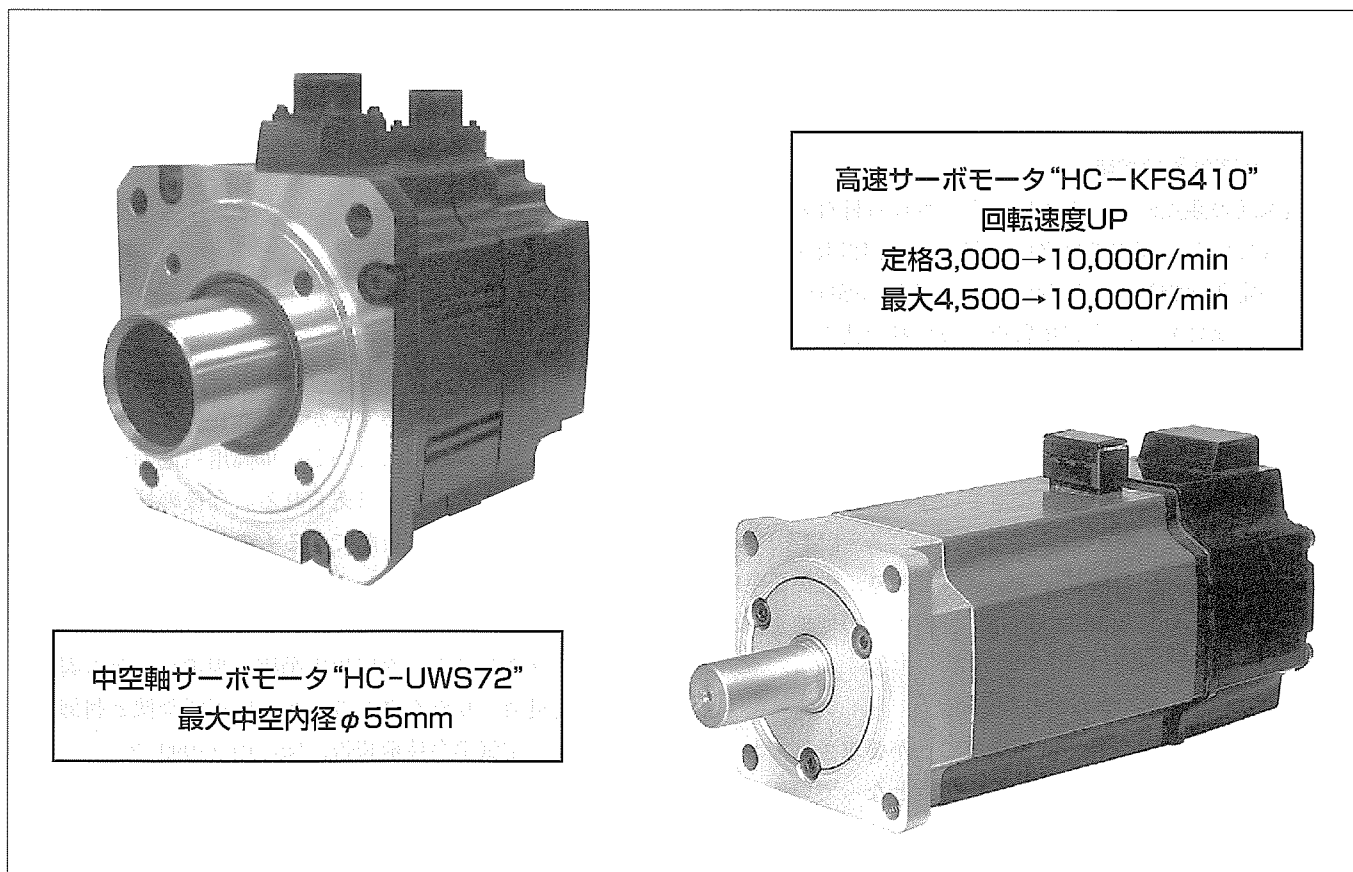
本稿では、これら市場ニーズに対応するために開発した高性能専用ACサーボモータシリーズの仕様と特長について述べる。

(1) 中空軸サーボモータ

装置簡易化要求に対応した小口径又は大口径の貫通穴構造を持ったサーボモータ

(2) 高速回転サーボモータ

高速仕様要求に対応した定格と最大回転速度が6,000r/minと10,000r/min仕様のサーボモータ



中空軸サーボモータ“HC-UWS72”と高速サーボモータ“HC-KFS410”

MR-J2Sシリーズに中空軸サーボモータ及び高速サーボモータを追加した。

中空軸サーボモータは、最大φ55mmの内径を持ち、配管やボールねじを通すことで装置の小型化に対応できる。

高速サーボモータは、定格と最大回転速度が6,000r/minと10,000r/minの仕様で、スピナ装置等に適した仕様となっている。

1. ま え が き

ACサーボモータは1996年に画期的なステータ・巻線方式である薄肉連結鉄心方式(ポキポキ鉄心方式)を導入し巻線占積率を飛躍的に向上し他社に一步先んじた小型化・高性能化を遂げてきたが、昨今は標準的なサーボモータでは顧客ニーズの満足は得られず、カスタマー対応の特殊専用サーボモータの要求が多くなってきている。

特に半導体・液晶製造装置メーカーからは、同業他社をりょうが(凌駕)した性能を持った製品仕様にするために、ACサーボモータに対して装置仕様に合致した専用モータの開発要求が増加している。

このような要求にこたえるため、装置側の構成が簡易小型化できる中空軸サーボモータ、装置側の性能向上ができる高速サーボモータを開発し、顧客要求に対する製品ラインアップの拡大を図った。

2. 中空軸サーボモータ

2.1 市場動向

近年、半導体ウェーハと液晶用ガラス基板は大型化してきているため、各種製造装置の駆動部分であるモータ容量と機構部分も大型化が必ず(須)となってきている。しかしながら、製造装置は、クリーンルーム内での大きさの制約などから、小型化を図る必要がある。

各装置メーカーは、コーティング、洗浄用スピナ等の駆動用サーボモータの軸を大口径中空化し、その中に各種溶液を通すパイプや機構部を構成するボールねじを通すことで製造装置の簡易化・小型化を検討している。

また、ロボット分野などにおいても複数台のサーボモ

ータを内蔵するためにモータの電源・エンコーダ用ケーブル類の引き回しが複雑になり構造・寸法面で課題となっていたが、ケーブル類を中空軸部分に通すことによって改善を図ることができる。

これらの理由から、最近では中空軸サーボモータの要求が急増している。

2.2 モータ仕様

中空軸サーボモータは、フレームサイズ4種類、モータ容量750Wから5kWまでシリーズ化し、中空軸内径は24mmから65mmまでラインアップしている(表1)。

2.3 特 長

2.3.1 中空軸エンコーダの新規開発

中空軸サーボモータ搭載のエンコーダは、□80タイプ及び□176タイプの2機種を開発した。

絶対値対応で分解能は17ビット(131,072分割)、モータとの結合はメンテナンス性を考慮したカップリング構造を採用した。

図1に中空軸サーボモータの構造を示す。

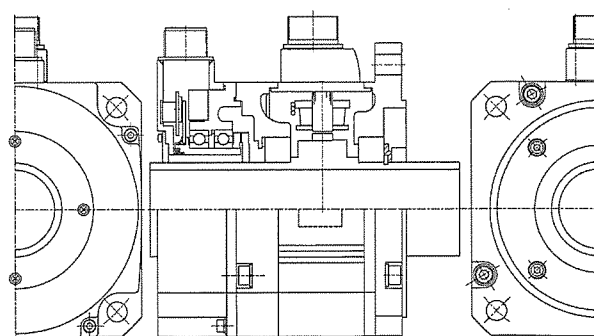


図1. 中空軸サーボモータの構造

表1. 中空軸サーボモータの仕様

モータフランジ□寸法		□80	□130			□176		□220			
モータ形名	HC-□	KWS73	SWS52	SWS102	SWS152	UWS72	UWS152	UWS202	UWS352	UWS502	
軸径	mm	30			65		75				
中空軸径(最大)	mm	24			55		65				
定格出力	kW	0.75	0.5	1	1.5	0.75	1.5	2	3.5	5	
定格トルク	N・m	2.4	2.39	4.78	7.16	3.58	7.16	9.55	16.7	23.9	
最大トルク	N・m	7.2	7.16	14.4	21.6	10.7	21.6	28.5	50.1	71.6	
慣性モーメントJ	$\times 10^{-4} \text{kg} \cdot \text{m}^2$	1.5	6.6	13.72	20	51	63	90	133	175	
定格回転速度	r/min	3,000	2,000								
最大回転速度	r/min	4,500	3,000						2,500		
絶縁階級		B種	F種								
速度・位置検出器		エンコーダ(サーボモータ1回転当たりの分解能:131,072P/rev)									
装備品		□80絶対値エンコーダ				□176絶対値エンコーダ					
保護構造	軸貫通部を除く	IP44	IP65								
冷却構造		全閉自冷									
周囲温度		0~40℃(凍結のないこと)									
周囲湿度		80%RH以下(結露のないこと)									
雰囲気		屋内(直射日光が当たらないこと)、腐食性ガス・引火性ガス・オイルミスト・じんあい(塵埃)のないこと									

2.3.2 特殊要求への対応

半導体や液晶の製造工程においてはモータから発生するオイルシールの磨耗粉などの発じん(塵)が問題となるため、中空軸サーボモータでは、低発塵タイプのベアリンググリースを使用し、軸貫通部はオイルシールに代えてラビリンス構造にするなどの特殊対応を行っている。

また、通常サーボモータの軸材質は鉄を使用しているが、さび(錆)発生の影響が懸念される用途の場合は、ステンレスシャフトの対応も行っている。

2.3.3 中空軸の応用

中空軸サーボモータの応用例として、中空軸モータと通常軸モータを同軸に結合することによって二軸一体のモータユニットで二軸の回転運動を発生するアクチュエータ的なサーボモータとすることができる。

図2に二軸一体モータへの応用を示す。

3. 高速サーボモータ

3.1 市場動向

小容量機種の内行ACサーボモータは定格回転速度

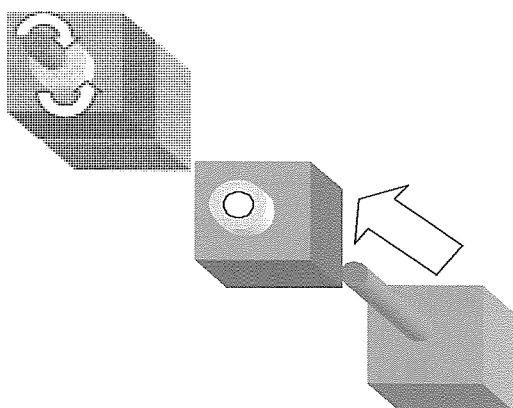


図2. 二軸一体モータへの応用

3,000r/min, 最大回転速度4,500r/minの仕様であるが、近年、半導体製造装置、液晶製造装置、記録媒体製造装置のコーティング、洗浄スピナ及び繊維機械等の分野で、高速回転モータに対するニーズが増加している。

このような市場要求に対し、モータ回転速度を高速化したACサーボモータを開発して投入し市場ニーズに対応した。

3.2 モータ仕様

モータ容量は当社標準のHC-KFSシリーズをベースに400W, 750Wの2機種をラインアップし、定格回転速度を顧客要求に合わせた6,000r/min, 10,000r/minの2シリーズを品ぞろえした。

また、モータフランジサイズ及び取付寸法は標準品と同一で現行モータからの置き換えを考慮した仕様とした(表2)。

3.3 特長

3.3.1 トルク特性

標準サーボモータの最大トルクは300%としているが、高速サーボモータは、高加速度を要求される用途が多いため、定格回転速度における最大トルクを450%以上とし急加減速運転に対応した特性を持っている。

3.3.2 ベアリング構造

高速回転時の振動・騒音特性及び寿命確保のため、ベアリングの精度等級、グリース、アキシヤル方向の固定方法について標準品とは異なる仕様に変更するとともに、反負荷側ベアリングにはクリープ防止を目的とした特殊ベアリングを採用した。

3.3.3 エンコーダ

一般的にエンコーダの絶対値データは、一回転内カウンタと多回転カウンタによって作成されている。

高速サーボモータ用のエンコーダは、高速回転でのデー

表2. 高速サーボモータの仕様

モータフランジ□寸法	□60		□80	
モータ形名	HC-KFS46	HC-KFS410	HC-KFS76	HC-KFS710
定格出力	0.4kW	0.75kW	0.4kW	0.75kW
定格トルク	0.64N・m	0.38N・m	1.19N・m	0.72N・m
最大トルク	2.87N・m	1.91N・m	5.37N・m	3.58N・m
慣性モーメントJ	0.64×10 ⁻⁴ kg・m ²	0.47×10 ⁻⁴ kg・m ²	1.46×10 ⁻⁴ kg・m ²	1.41×10 ⁻⁴ kg・m ²
定格回転速度	6,000r/min	10,000r/min	6,000r/min	10,000r/min
最大回転速度	6,000r/min	10,000r/min	6,000r/min	10,000r/min
絶縁階級	B種			
速度・位置検出器	エンコーダ(サーボモータ1回転当たりの分解能:131.072P/rev)			
装備品	絶対値エンコーダ			
保護構造	IP55			
冷却構造	全閉自冷			
周囲温度	0~40℃(凍結のないこと)			
周囲湿度	80%RH以下(結露のないこと)			
雰囲気	屋内(直射日光が当たらないこと)、腐食性ガス・引火性ガス・オイルミスト・塵埃のないこと			

タ作成が必須となるため、マイコン上でクロックアップし、一回転内データから多回転データ作成の際の検出タイミングを最適化して対応した。

3.3.4 電磁界解析による最適化

高速回転仕様のサーボモータの場合、ロータに発生するラジアル方向への磁気吸引力アンバランスが振動・騒音の要因となる。そこで、二次元電磁界解析によってその影響度を確認した。

サーボモータは9スロット6ポールの電気設計であるが、図3に示すとおり磁気吸引力は3方向均等に分散して、ラジアル方向の力が相殺しており影響がないことを検証した。

また、従来の電磁界解析は二次元解析を中心に行ってきたが(図4)、高速サーボモータでは、コギングトルクなどのモータ特性向上のために三次元解析を実施した(図5)。

解析を三次元化することにより、ロータ着磁のスキュー角度を変数とし、最適化することができた。

これらの解析結果に基づいて設計した高速サーボモータは、同一出力の標準回転数機種と比較して、コギングトルクを低減することができ、また、高速回転仕様でありながら、振動・騒音レベルを同等以下とすることができた。

4. む す び

上記に紹介した専用ACサーボモータは特定ユーザー向けに開発したものであるが、これらの特殊モータを必要としている分野が市場には内在していると思われるため、この分野を調査していくことが必要である。

また、専用ACサーボモータとして、潜在的には今後更に機械仕様のマッチした要求が増加すると考えられる。

この要求にタイムリーかつ的確にこたえることが、半導体分野のみならず、工作機械・一般産業機分野への当社のACサーボモータを伸ばしていくキーワードであり、顧客の機械仕様と要求性能を把握しながら開発提案思考のスタンスで今後とも開発を推進していく所存である。

参 考 文 献

(1) 池田洋一, ほか: 新形汎用ACサーボモータの生産技術, 三菱電機技報, 72, No.4, 303~306 (1998)

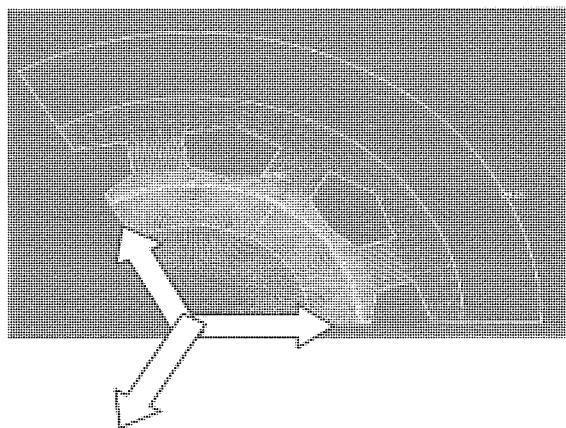


図3. 9スロット6ポール磁気吸引力

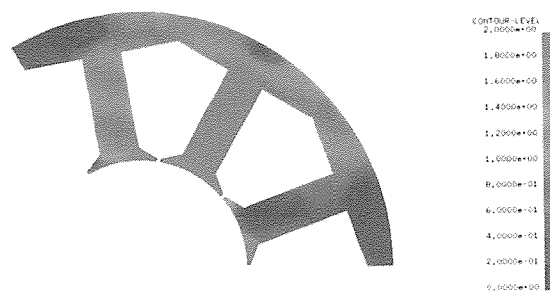


図4. 二次元解析

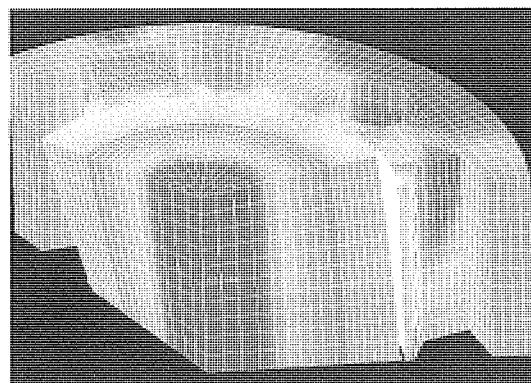


図5. 三次元解析

(2) 井川 康, ほか: 次世代汎用サーボアンプ“MELSER-VO-J2 Superシリーズ”, 三菱電機技報, 73, No.9, 661~664 (1999)

高効率産業用モータ

立見廣光*
吉野 裕*

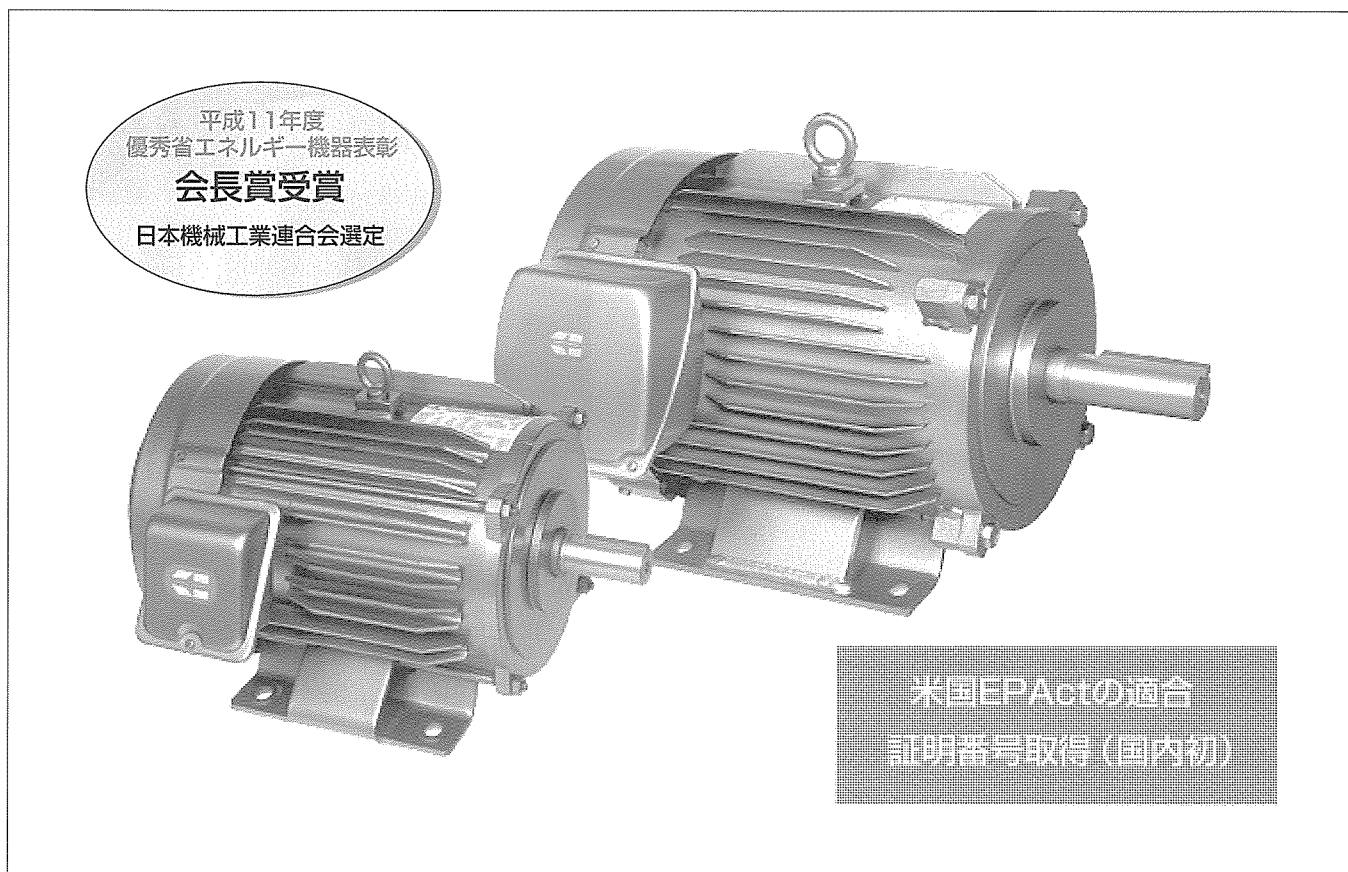
要 旨

誘導電動機(以下“モータ”という。)は基本原理が19世紀末に発明されて以来100年以上の歴史を持ち、その間、製造業の基幹動力として成長し、材料の進歩(コア、電線、絶縁など)と設計技術・解析技術・製造技術の開発によって特性の向上、小型・軽量化、高性能化が図られてきた。しかし、近年の地球温暖化を含めた環境保護や化石エネルギー枯渇の危機感から省エネルギーへの動きが加速してきており、モータに対しても高効率化の要求が高まっている。

米国やカナダでは規格や法律によるモータの効率規制が実施され、特に、1997年10月24日に施行された米国エネルギー政策法(EPAAct)においては、米国国内で製造・販売される若しくは海外から輸入されるモータ単体又は機械に組

み込まれているモータも、同法で規定された効率基準値を満たさない場合には罰則が課せられるという厳しいものである。日本では、従来、高効率モータの効率基準値は日本電機工業会技術資料第137号(省エネルギーのための電動機の選定と適用)によっていたが、米国エネルギー政策法を踏まえ、新たに日本工業規格(JIS C 4212)が2000年7月に制定された。

三菱電機は、国内のJIS規格とEPAAct法の両方の効率基準値を満足した高効率モータをシリーズ化し、さらに米国エネルギー省の適合証明番号(CCナンバー)を国内メーカーとして初めて取得したので、以下に高効率モータとモータの高効率化技術について紹介する。



高性能・省エネルギーモータ“スーパーラインエコシリーズ”

当社独自の鋼板フレームの使用と徹底した低損失設計によって業界トップクラスの高効率・省エネルギーを実現した高効率モータである。日本機械工業連合会公募の平成11年度優秀省エネルギー機器表彰で会長賞を受賞し、2001年9月25日に米国エネルギー省の適合証明番号(CCナンバー)を国内のモータメーカーとして初めて取得した。

1. ま え が き

モータの歴史は、約100年前に基本原理が発明されて以降、重厚長大の時代から始まり20世紀後半の軽薄短小化へと正に小型・軽量化(省資源化)の歴史であった。モータは、電気エネルギーを機械エネルギーに変換する装置としてエネルギーの変換効率が高くまた構造も簡素・堅ろう(牢)であるため、20世紀の産業界を原動力として支えてきた。今日では家庭用から産業用のあらゆる用途の駆動源として広く普及しているが、近年、省エネルギー・高効率化の需要が加速しており、三相モータに対しても省エネルギーへの要求が高まっている。

以下に、高効率化の動向と現状の技術、製品化及び今後の技術課題について紹介する。

2. 三相モータの動向

2.1 三相モータの小型・軽量化

当社モータの歴史は、明治41年(1908年)の三菱合資会社神戸造船所時代に池の端博覧会への100HPのモータの出席に始まり、基本原理こそ変わっていないが、設計技術を始め冷却技術・材料技術・製造技術等の進歩によってモータも大きく発展し小型・軽量化を達成した。

小型・軽量化をJIS規格との関連で見ると、'51年制定のJIS C 4201ではA種絶縁、'65年制定のJIS C 4210ではE種絶縁、'83年改定のJIS C 4210ではE, B, F種絶縁を採用し、絶縁階級の変更に合わせて、同一モータサイズに入る出力が増加してきた。例えば、図1に示すように、開放形の250フレームの4極では25HP(18.5kW)から175HP(132kW)の約7倍となり、同一出力で比較すると体積・質量は約1/4までになっている。

2.2 ユーザー動向調査

図2は日本電機工業会(JEMA)が'96年から2000年度に

実施したモータに対するユーザーの要望の調査結果であり、各要望事項に対しどれに重点を置くか第1位・第2位・第3位と優先順位を記入してもらった結果である。この調査結果では低価格化に対する要望が最も大きく、短納期化・高効率化・小型化・低騒音化の順となっている。モータの特性面では高効率化の要望がトップであり、高効率化への要望は'96年度、'98年度、2000年度と調査を重ねるごとに増加していることが分かる。

2.3 省エネルギー化への規制

近年、地球温暖化対策(CO₂排出量の削減)に代表される地球規模での省エネルギー政策が推進されている。国内においては、「エネルギー使用の合理化に関する法律」の改正や経済産業省の新スキームによる省エネルギー管理強化指定業種の指定などの規制が強化され、ISO14001取得工場増加に伴うエネルギー使用の合理化計画の推進などエネルギー消費が少ない機器へのニーズが急速に増加している。これは、工場で使用される電力量の70%はモータで消費されていると言われており、モータの高効率化は電力消費量の削減に大きな効果があるためである。このような背景から、各国では高効率モータに関する法制化も行われている。

省エネルギー化への取り組みが進んでいる米国やカナダでは既に法制化がされており、特に米国では、高効率モータの使用を義務付けたエネルギー政策法(Energy Policy Act of 1992: EPLA)が'97年10月から発効され、例外を除いて高効率モータ以外のモータの販売・使用が規制されている。さらに、2002年6月以降は、該当モータは米国エネルギー省へ適合証明番号(CCナンバー)を申請したモータである必要があり、モータ本体名板への適合証明番号の表示が義務付けられている。ヨーロッパでも法制化が検討されており、日本では高効率モータのJIS規格(JIS C 4212)が2000年7月に制定され規格整備が行われた。

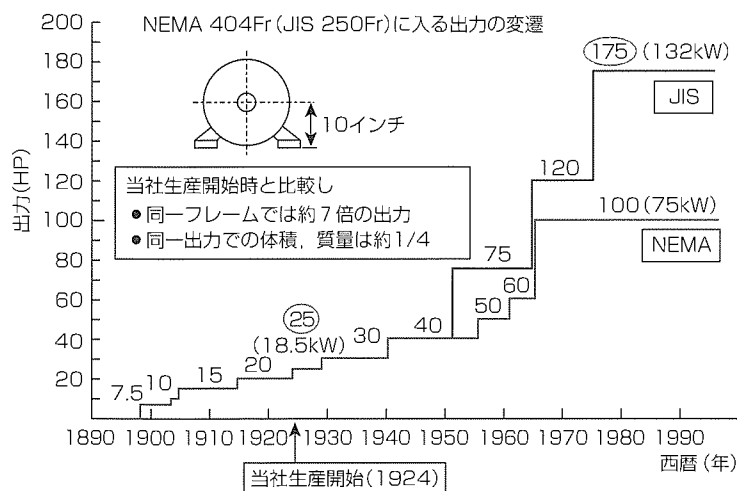


図1. 小型化の歴史

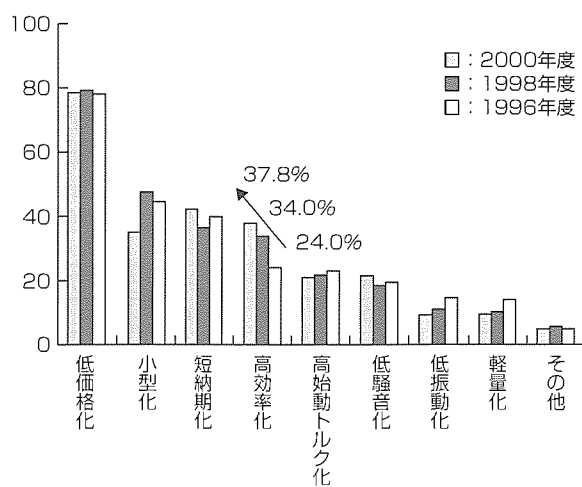


図2. ユーザー動向調査

3. 当社の対応

当社では、近年のモータに対する省エネルギー化の需要の高まりや規格化・法制化の動向の中、これらの規格、法制を満足した高効率モータ“スーパーラインエコシリーズ”を発売し整備しているもので以下に紹介する。

3.1 高効率モータの製品概要

(1) 準拠基準・規格

高効率モータとしての各効率基準値を4極で比較すると表1のとおりであり、米国EPA Actと国内JIS規格の60Hzの基準値はほぼ同等である。これらと国内JEMA基準値と比べると数値上はJEMA基準値が高い値となっているが、効率の試験・算定法の違いによるもので、実質はEPA ActとJISの方がJEMAよりも高い効率基準であると言ってよい。スーパーラインエコシリーズはこれらの効率基準値をすべて満足している。

(2) スーパーラインエコシリーズのシリーズ化範囲

- 外被構造：全閉外扇形
- 枠番号：63M~225Sフレーム
- 極数：2, 4, 6P
- 出力：0.2~55kW

(3) スーパーラインエコシリーズの特長

(a) 国内JIS基準値と米国EPA Act基準値の両方の基準値を満足した業界トップクラスの高効率・省エネルギーモータである。平成11年度日本機械工業連合会の「優秀省エネルギー機器表彰で会長賞」を受賞し、2001年9月25

日に米国エネルギー省の適合証明番号「CC0012A」を国内のモータメーカーとして初めて取得した。

(b) 当社製インバータ“FR-A500”によるアドバンストベクトル制御運転で1:10の定トルク連続運転が可能である。

(c) 耐環境性を強化し標準仕様で湿度100%RH(ただし結露がないこと)、熱帯処理、周囲温度-30~40℃に対応し、軸受の長期メンテナンスフリー化を実現した(当社比:軸受グリースの計算寿命2倍以上、耐クリープ性能約4倍)。

(d) 当社標準モータよりも平均3dB(A)静かな低騒音で、振動はV10又はV15の低振動である。

(e) 標準モータと同一取付寸法である。

以上のように汎用効率のモータとの置き換えが可能で少ない損失で必要動力が得られるモータであるので、長時間使用する設備ほど高い節電効果が得られる(図3)。

3.2 業界トップクラスの高効率化技術

三相モータの損失は一次銅損、二次銅損、鉄損、機械損、漂遊損に大別され、各損失は、全閉外扇形3.7kW 4Pの場合、図4に示す割合を占めている。JIS及びEPA Actの効率基準値を満足するモータは、これらの損失の合計を標準モータよりも20~30%低減をする必要がある。このスーパーラインエコシリーズでは、以下のような技術によって低損失・高効率化を実現した。

(1) 一次・二次銅損の低減

銅損は導体に電流が流れることによって発生する I^2R 損

表1. 効率基準値比較(全閉外扇形, 0.2~55kW, 4極)

効率基準	国内JEMA (技術資料第137号)		米国 EPA Act	国内JIS規格 (JIS C 4212)		
	200V	200, 220V	230V	200V	220V	
電圧	200V	200, 220V	230V	200V	220V	
周波数	50Hz	60Hz	60Hz	50Hz	60Hz	
出力 (kW)	0.2	72.6	75.4	—	72.0	74.0
	0.4	77.5	80.0	—	76.0	78.0
	0.75	81.4	83.2	82.5	80.5	82.5
	1.5	84.4	85.8	84.0	82.5	84.0
	2.2	86.6	87.6	87.5	85.5	87.0
	3.7	88.4	89.2	87.5	86.0	87.5
	5.5	89.8	90.3	89.5	88.5	89.5
	7.5	90.8	91.0	89.5	88.5	89.5
	11	91.6	91.8	91.0	90.2	91.0
	15	92.2	92.2	91.0	90.6	91.0
	18.5	92.6	92.6	92.4	91.7	92.4
	22	93.0	92.8	92.4	91.7	92.4
	30	93.3	93.0	93.0	92.4	93.0
	37	93.5	93.2	93.0	92.4	93.0
	45	—	—	93.6	92.7	93.0
55	—	—	94.1	93.3	93.6	
効率試験法	JIS C 4207(三相誘導電動機の特許算定法)の円線図法		IEEE Std 112 Method Bの実負荷法	JIS C 4212の実負荷法(ブレーキ法又は動力計法)		

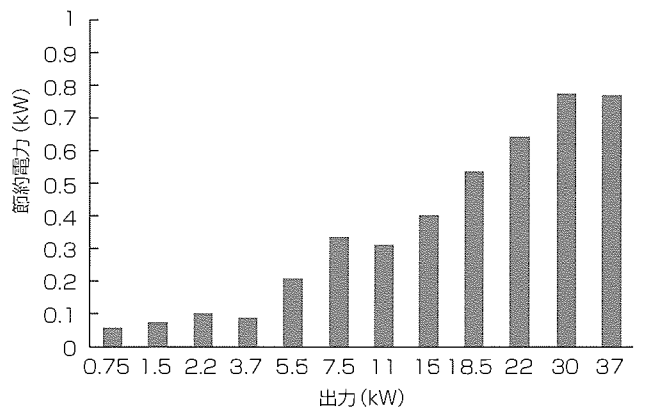


図3. スーパーラインエコシリーズの節約電力

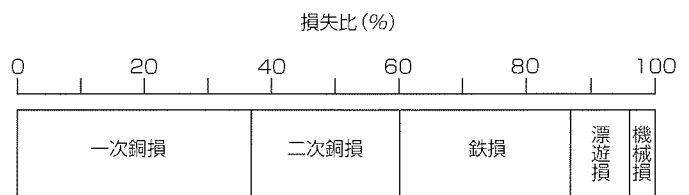


図4. 汎用モータの損失例(全閉外扇形, 3.7kW, 4P, 200V, 50Hzの場合)

(I = 電流, R = 抵抗)である。したがって銅損を低減するには電流か又は抵抗値の低減が必要であるが、電流はモータ出力が同じならほぼ同じであるので、抵抗の低減がポイントとなる。このモータでは、①電線の巻数減と導体の断面積増、②巻線方式の変更によるコイルエンド長の短縮、③ロータスロット形状の最適化による二次導体の断面積増加、④エンドリング断面積増加などにより、導体抵抗の低減を図った。

さらに低鉄損・高磁束密度鉄心材の採用や鋼板フレームの透磁性を考慮した電気設計と磁界解析の結果、従来の高効率モータとステータサイズを同等又は小型化しかつ巻線抵抗の低減を図った(当社標準モータとの損失比: 10~30%減)。

(2) 鉄損の低減

鉄損は、無方向性電磁鋼板を積層したステータ鉄心に回転磁界を加えることによって発生する損失(ヒステリシス損、渦電流損)である。このモータでは、高磁束密度・低鉄損特性材を開発して採用し鉄損の低減を図り、電気部品のコンパクト化による小型で効率の高いモータを実現した(同鉄損比: 20~40%低減)。

(3) 漂遊負荷損の低減

漂遊損は、“モータ入力からモータ出力、一次銅損、二次銅損、鉄損、機械損を引いたもの”と定義され、主なものは、負荷時の高調波銅損、高調波磁束による鉄損、積層鉄心間の絶縁不足による導通損、ロータのスロット絶縁不足によるバー間の渦電流損などがあり、これらの複合的な損失である。このモータでは、解析と実機による検証を基に①ステータ・ロータの溝数組合せの最適化、②ステータ・ロータ間のギャップ長、ロータのスキュー量、ロータスロットのブリッジの厚さなど磁気回路における定数の最適化によって漂遊損の低減を図った(0.75~3.7kW当社比: 漂遊損約50%減)。

(4) 機械損の低減

機械損は、モータ運転中の軸受の摩擦損、外扇ファンの風損などによって発生する損失である。このモータでは、摩擦損の小さいグリースの開発・採用と当社標準モータと比べ風損の小さなファンの採用によって機械損の低損失化を図った。

4. 今後の高効率モータの課題

今後の市場ニーズを考えると、エネルギー変換機としてのモータの需要は、機械のダイレクトドライブ化と併せ今まで以上に高まり、さらに運転時の省エネルギーだけでなく、素材から生産・流通・運転・保守・廃棄までの全ライフサイクルの環境負荷低減を考慮した環境配慮形製品への脱皮への要求も高まってくると考えられる。現在の日本における高効率モータの普及率は数%程度しかない。これは

高効率モータの価格が汎用モータに比べて2~3割高いことに起因しており、現在の高効率モータに課せられた課題は、更なる高効率化とともに、低コスト・低価格な製品開発にあると考えられる。

(1) 銅損の低減

一次銅損を今まで以上に低減するためには、ステータスロット内の電線占有密度を更に高くし、コイルエンドと呼ばれるコイルのスロットに装着されない部分の長さを更に短くできる巻線技術の開発が必要である。これらは集中巻方式では新巻線技術が多数開発され大きく進歩しているが、今後は、三相モータの分布巻に適した新しい巻線の成形・挿入技術が開発されて実用化され、一次銅損の低減が更に進むと考えられる。

二次銅損の低下は、スロット断面積の増加と導体材料の低固有抵抗化への取り組みが必要で、アルミダイカスト製導体の代わりに、巣が少なく密度の高い導体を得られるアルミ溶湯鍛造技術、固有抵抗値が低い銅によるダイカスト・溶湯鍛造技術の適用が挙げられる。

現在、かご形ロータに磁石を装着し同期運転が可能な誘導機も開発され、三相モータに比べ高い運転効率を実現しているものもあるが、価格が高く始動できる負荷慣性モーメントが三相モータに比べて小さいなどの課題を残している。

(2) 漂遊負荷損

モータの損失のうち約10%を占める漂遊負荷損は、モータ負荷に応じて増加する損失で、今までは定量的な解析が困難であった。これは、基本波成分のみを考慮し、負荷に応じて増加する高周波成分の解析を定量的に行うことが難しかったためである。近年の磁界解析技術の進歩により、この高調波損失を高調波鉄損と高調波銅損に分離し、ステータ、ロータやギャップなどで発生する損失をほぼ正確に解析できるようになった。これと高精度な損失測定技術を併用することにより、漂遊負荷損の定量的な値を解析と実機による検証によって得ることができるようになっており、今まで経験的方法が主体であった漂遊負荷損の低減が大きく進みつつあり、低コスト化に寄与していくものと考えられる。

(3) その他

モータとしての高効率化以外の課題は、モータの生産工程における省エネルギー・省資源化、環境汚染物質を全廃・削減した生産方法、リサイクルと廃棄を考慮した製品設計などが挙げられる。

モータは鉄・銅・アルミニウムと少量の有機材料から構成されており、通常、モータの寿命はわずかな量の有機材である絶縁物の寿命で決まってしまう。また、機械的な寿命である軸受寿命は、軸受の交換を実施することによって延命が可能である。したがって、モータとしては、絶

縁・巻線の長寿命化，メンテナンスの容易化，廃棄時のリサイクルや分別が容易な構造設計・材料選択が全ライフサイクルにおける環境負荷の低減をする方法であろう。

5. むすび

以上，三相モータにおける省エネルギー・高効率化の動向と当社の高効率モータの製品・技術の紹介をした。本文で述べたように規格化・法制化の動向によってモータに対し高効率化を含めた高性能化が要求されているため，三相モータのほかにIPMモータ，リラクタンスマータ，DCブラシレスモータなど，新しい方式でより高効率化と小型化

をねらった製品も実用化されている。しかし，一部の用途以外では，堅牢・安価で商用電源で手軽に使用できるなどの使いやすさから，今後も三相モータは駆動源の主力を担っていくものと考えられる。産業用モータの供給メーカーとしては，より高性能かつ高効率な三相モータを追求し，省エネルギー化に貢献していきたい。

参考文献

- (1) 電動機に関するユーザ調査，(社)日本電機工業会，平成8年度版，平成11年度版，平成13年度版

工作機械用主軸モータ

川島和之*
小林 学**
嶋田明広*

要 旨

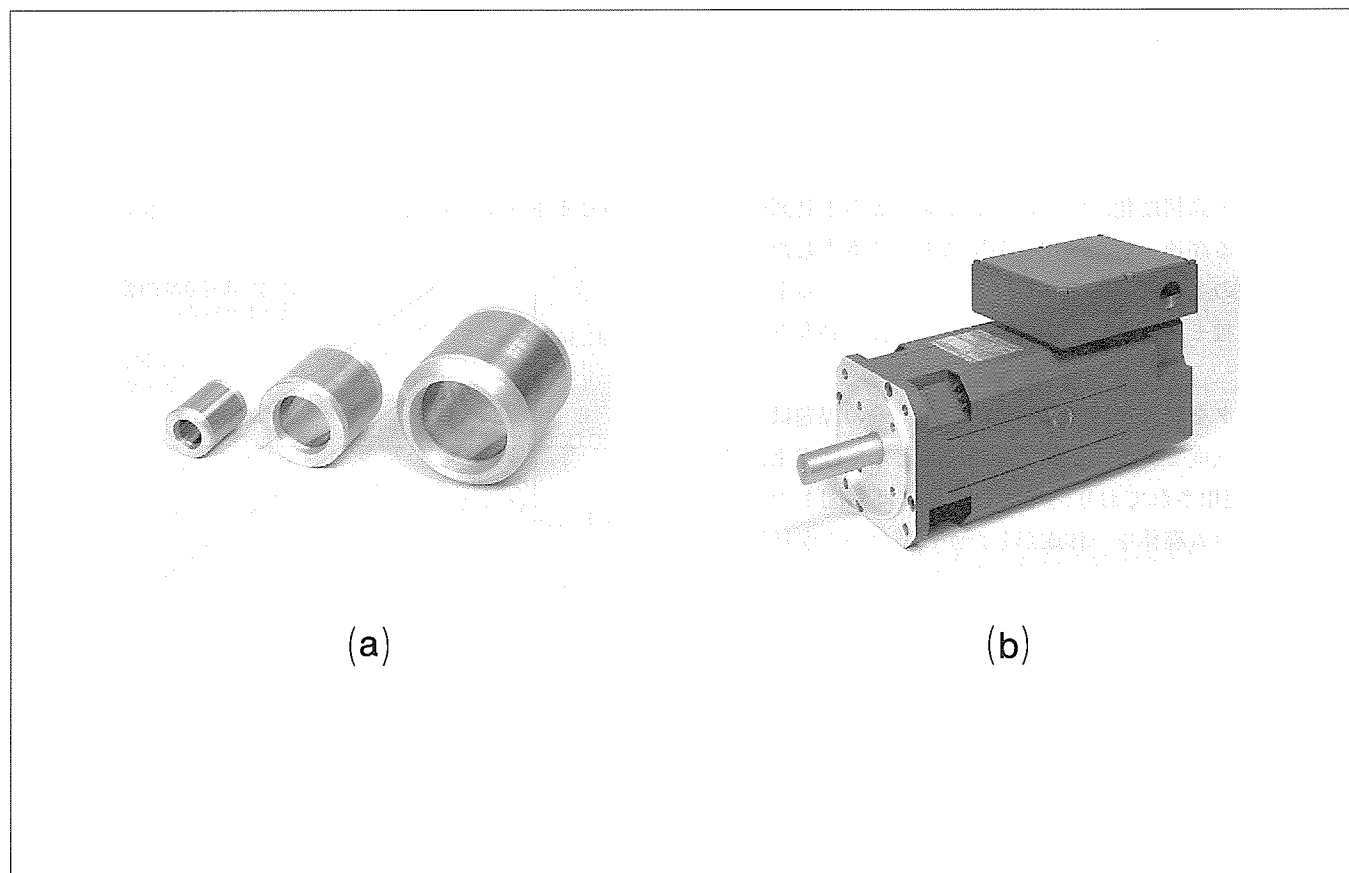
工作機械用の主軸モータには、高速マシニングセンタの進展に応じて高速性能が要求される一方、高精度加工の視点からは低発熱化が望まれている。三菱電機においても高速化に有利な誘導モータ(Induction Motor:IM)と高効率・低発熱化に寄与できる永久磁石埋め込み型(Internal Permanent Magnet-type:IPM)モータの二つの製品開発を実施してきた。本稿では、70,000r/minを実現した高速IM主軸モータと高効率特性を持つIPMモータについて述べる。

高速IM主軸モータを超高速回転させる場合の技術的課題として、ロータの機械的強度の向上、制御ドライバの高性能化、励磁周波数の増加に伴う鉄損対策が挙げられる。これらに対して、浮動型溶湯鍛造法による高剛性ロータの

製作や最適制御方式による鉄損低減を行うことによって、最高回転速度70,000r/minを達成することができた。

一方、低発熱化に関しては、IPMモータがマグネットトルクとリラクタンストルクを利用している点について述べ、次に、低速大トルク運転時のロータ内側の温度上昇が、IMと比較して60%以上低く抑えられている事例を紹介する。

現在、IMとIPMモータは、高速化と高効率化というニーズに対して補完する関係にある。また、ロータの剛性強化や制御性能の向上など互いに共通する課題も持っており、これらの技術を相互に生かすことによって、より一層の適用領域の拡大が期待される。



超高速ビルトインIM主軸モータ用ロータと枠付きIPM主軸モータ

超高速IM主軸モータ用ロータは、浮動型溶湯鍛造法によって高剛性化が図られており、最高回転速度70,000r/minで運転することが可能である。IPM主軸モータは、ロータに永久磁石を埋め込んだ構造を持ち、低速高負荷時において効率が良いという特長を持っている。

(a)に超高速ビルトインIM主軸モータ用ロータ、(b)に枠付きIPM主軸モータの外観を示す。

1. ま え が き

工作機械の主軸モータはサーボモータの一種ではあるが、高速回転性能を重視した独自の特性を持っている。高速マシニングセンタの進展に応じて高速回転化が進み、現在では、最高回転速度70,000r/minまで製品化されている。一方、高精度加工の視点からは低発熱化に関する技術開発が進んでおり、従来から“AC主軸モータ”として広く使用されている誘導モータ(IM)タイプの最適制御による低発熱化のほか、永久磁石埋め込み型(IPM)モータの登場による高効率・低発熱化で選択肢が広がってきている。また、高能率加工の点では、前述の高速化とともにモータの小型化・低慣性化による主軸の加減速時間短縮が大きな効果をもたらす。

本稿では、70,000r/minを実現した超高速IM主軸モータと当社独自のIPM方式主軸モータの技術と今後の展開について述べる。

2. 超高速ビルトインIM主軸モータ

2.1 概 要

工作機械の生産効率向上の観点から、近年、マシニングセンタ、金型加工機等の主軸高速化が急速に進展している。当社においても1995年から“超高速ビルトインIM主軸モータ”の開発に着手し、現在では、最高回転速度70,000r/minまで製品化されている。

ビルトイン主軸モータは、旋盤等のワーク回転型主軸における小型・高精度化、マシニングセンタ等の工具回転型主軸における高速・高剛性化の進展によって誕生した機械組み込み型の主軸モータである。この章では、ビルトインタイプの主軸モータを対象に、当社の最新技術動向を紹介する。

主軸モータを超高速回転させる場合の第一の課題はロータの機械的強度である。高速主軸モータとしては従来からIMが広く使用されており、そのロータには、図1のようなアルミニウム導体を一体成形したかご型ロータが採用さ

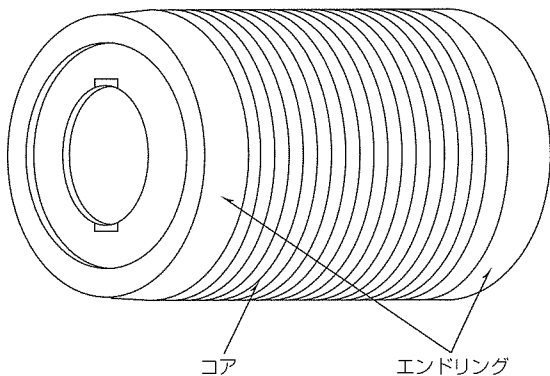


図1. かご型ロータの外観

れている。かご型ロータは構造が堅ろう(牢)で高速回転に適しているが、それでも超高速回転させる場合には、ロータ各部の機械的強度、特にロータ両端のエンドリング(短絡環)と呼ばれる部分の疲労強度が問題となる。

第二の課題は主軸ドライバの制御性能である。超高速IM主軸モータでは最高回転速度における電気角周波数が比較的高いため、制御対象である主軸モータは一般に2極モータで構成されることが多いが、それでも70,000r/minにおいては駆動周波数が1kHz以上にも達する。このクラスの回転速度域においては高周波インバータによるオープンループ制御方式での駆動が一般的であるが、オープンループ制御方式では、加減速時間短縮の限界、切削加工時の速度むらによる加工面精度の悪化等の問題を生じることがある。当社においては、速度ループ制御で70,000r/min(電気角周波数1.167kHz相当)という超高速回転を実現している。

2.2 超高速回転実現のための高強度ロータの開発

かご型ロータは堅牢で高速回転に適しているが、最高回転速度までの起動停止を繰り返すとエンドリングの疲労寿命が問題となる。

エンドリングの強度低下の主要因は、製造時に発生する引け巣などの casting 欠陥である。当社においては、“浮動型溶湯鍛造法”と呼ばれる新しい製造技術の開発により、引け巣等の欠陥発生を回避し、ロータ外径周速180m/sの超高速ロータを実現している(図2)⁽¹⁾。

超高速ビルトインIM主軸モータシリーズのロータの外観を図3に、製品の仕様を表1に示す。いずれの機種も従来のビルトインIM主軸モータシリーズよりもロータ内径

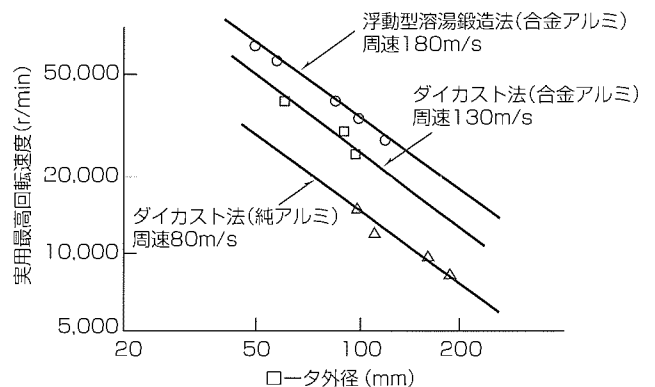


図2. IMロータ外径と実用最高回転速度

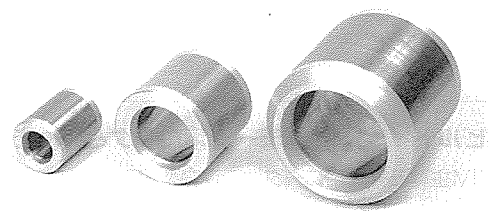


図3. 超高速ビルトインIMシリーズのロータの外観

を20~30%程度大きくし、さらに全長寸法を極力短縮しており、主軸本体の高剛性化に貢献している。

また、高速仕様のIM主軸モータについては、ロータ外径の遠心膨張によるステータとの衝突回避、高速回転時の低発熱化の観点から、ステータとロータの間のエアギャップを広くとる傾向にある。

2.3 最適励磁制御

当社の超高速主軸駆動システムは、速度制御機能、ATC (Automatic Tool Changer)動作時の主軸オリエンテーション機能等、工作機械用主軸モータとして必要な制御機能を完全に装備した状態で、70,000r/minを実現している。

超高速回転時には、主磁束の周波数上昇に伴うモータ損失(鉄損)増加が懸念される。高速回転仕様のIM主軸モータについては、モータに使用される鉄心材料(電磁鋼板)の薄板化等の鉄損低減対策が検討されているが、主軸ドライバ側での低減策の一つに“最適励磁制御”がある。これは、全回転域において負荷の大きさに応じて励磁電流(主磁束を発生させるための電流)の大きさを制御するもので、特に無負荷・軽負荷時の無負荷鉄損(特に基本波鉄損)の低減に効果がある。図4は最適励磁制御時の励磁電流パターンを示したものである。負荷が発生した場合、電流フィードバック信号、回転角度フィードバック信号を基にトルク分電流を算出し、そのトルク分電流に見合った励磁電流を印加するため、急しゅん(峻)なインパクト負荷を受けた場合でも高応答性は維持される。

3. IPM主軸モータ

3.1 概要

永久磁石埋め込み型モータの工作機械主軸モータへの適用は、主に旋盤用のビルトイン仕様からスタートした。これは大トルク領域での高効率化の効果が最大限に生かされ

るため、主軸ユニットの小型化、又は低発熱化を生かした冷却構造の簡素化などが実現されている。この章では、IPMモータの動作原理及び低速大トルク領域における温度特性について述べる。

3.2 構造及び動作原理

図5にIPMモータのロータカットモデルを示す。IPMモータはその名のとおり永久磁石をロータの内部に埋め込んだ構造をしており、これによって永久磁石の作るマグネット

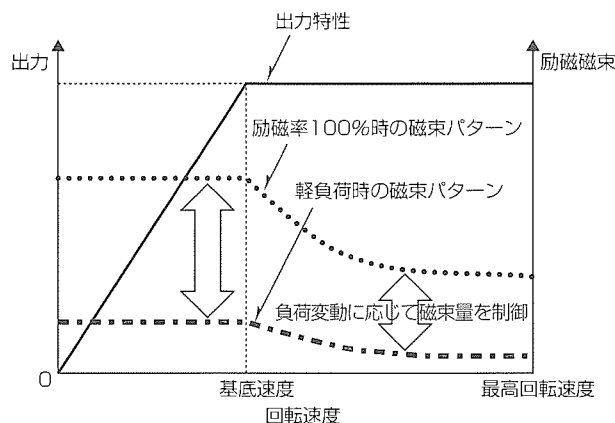


図4. 最適励磁制御時の励磁電流

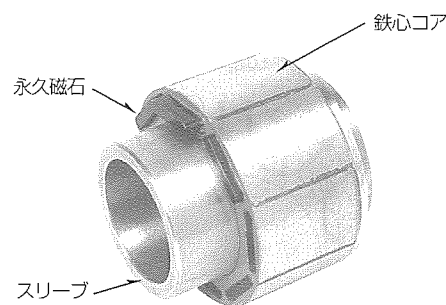
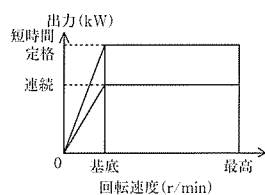


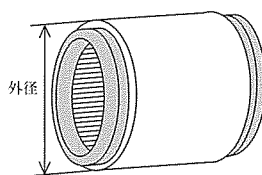
図5. IPMモータのロータカットモデル

表1. 超高速ビルトインIMシリーズの製品仕様

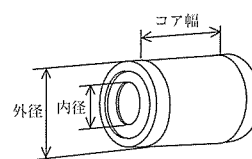
製品型名	枠番	出力(kW) (連続/ 30分定格)	回転速度 (r/min) (基底/最高)	主要寸法(mm)			
				ステータ外径	ロータ外径	ロータ内径	コア幅
SJ-2B2A04Y	50-50	7.5/11	40,000/70,000	φ89.5	φ49.1	φ28	50
SJ-2B2009Y	63-70	5.5/7.5	30,000/60,000	φ109.5	φ57.1	φ35	70
SJ-2B2210Y	100-60	11/15	30,000/40,000	φ159.5	φ86	φ55	60
SJ-2B2307Y	112-60	15/22	30,000/30,000	φ179.5	φ98.9	φ70	60
SJ-2B2402Y	132-90	22/30	20,000/25,000	φ209.5	φ122.8	φ85	90



出力-回転速度特性



ステータの主要寸法



ロータの主要寸法

トルクと、突極性構造によって得られるリラクタンストルクの両方を生かすことができる。

図6にIPMモータの断面及び磁束の流れを示す。図の(a), (b)はそれぞれd軸及びq軸電流 i_d , i_q (A) が作る磁束の流れ ϕ_d (Wb), ϕ_q (Wb) を示しており、これらに永久磁石による鎖交磁束 ϕ_m (Wb) も加えた三つの磁束によって得られる発生トルク T の基本式は式(1)と与えられる⁽²⁾。

$$\begin{aligned}
 T &= P_n (\phi_m i_q + \phi_d i_q - \phi_q i_d) \\
 &= P_n (\phi_m i_q + L_d i_d i_q - L_q i_q i_d) \\
 &= P_n \{ \phi_m i_q + (L_d - L_q) i_d i_q \} \dots\dots\dots(1)
 \end{aligned}$$

ここで、 P_n ：極対数

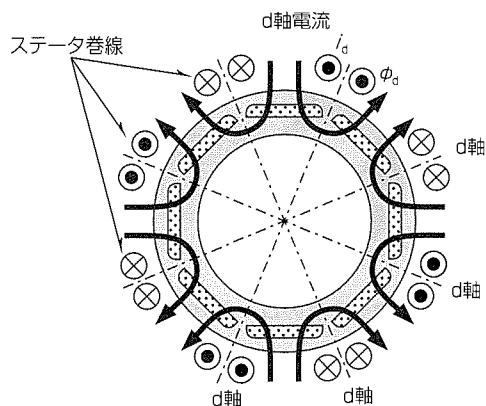
L_d ：d軸リラクタンس(H)

L_q ：q軸リラクタンス(H)

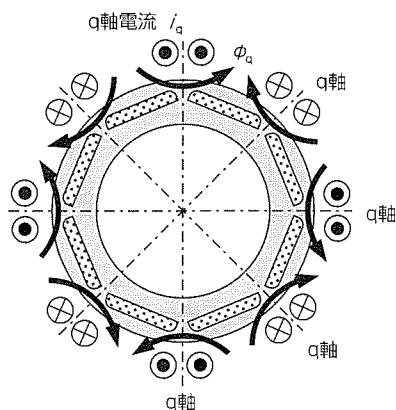
式(1)の第1項はマグネットトルクを、第2項はリラクタンストルクを表しており、式(1)からも二つのトルクを利用していることが分かる。また、永久磁石がロータの内部に埋め込まれているという構造は、遠心力による永久磁石の飛散を抑制できるという利点も持っており、許容回転速度を超えて加減速を繰り返す疲労寿命試験において、その耐久性が検証されている。

3.3 低速高負荷時におけるIPMとIM主軸モータの性能比較

図7に、出力5.5/7.5kW，最高回転速度6,000r/minのビ



(a) d軸電流が作る磁束の流れ (ϕ_d)



(b) q軸電流が作る磁束の流れ (ϕ_q)

図6. IPMモータの磁束の流れ

ルトイン仕様のIPMモータとIM主軸モータについて、連続負荷運転時(出力：5kW，回転速度：445r/min)の温度上昇を示した。この実験結果は大トルク領域におけるIPMモータの高効率・低発熱をよく表しており、同じ出力仕様においては、IPMモータの方がIM主軸モータよりもステータコア体積が25%小さいにもかかわらず、各部の温度上昇は低く、特にロータ内側の温度上昇は60%以上低く抑えられていることが特筆すべき点である。

このように数々の特長があるIPMモータではあるが、一般の表面磁石型サーボモータに比べて高速回転向けのロータ構造を採用しているとはいえ、最高回転速度の点ではIM主軸モータが有利であり、高速軽負荷時の効率向上にも限界があるため、20,000r/minまでの速度領域の範囲内で使用条件に応じたモータの選択が効果的である。

3.4 ビルトインIPMモータのラインアップ

表2にビルトインIPMモータの製品仕様の一例を示す。当社では、連続定格トルク20~400N・mを持つ製品を取りそろえている。また、要旨のページに示したように、枠付きIPMモータについても製品化している。

3.5 IPMモータの今後の展望及び課題

IPMモータは、低速大トルク領域における低発熱性が最大の特長であり、軸受への熱影響の軽減、小型軽量化による振動の低減などの効果により、加工精度の向上が期待できる。また、市場ニーズの一つとして、高速運転時の特性改善が挙げられている。

現在、高速運転時の特性を抑制している原因としては、

- (1) 永久磁石による誘起電圧の上昇
- (2) 駆動周波数の増加に伴う鉄損増大(温度上昇)
- (3) 遠心力に対する機械的強度の限界

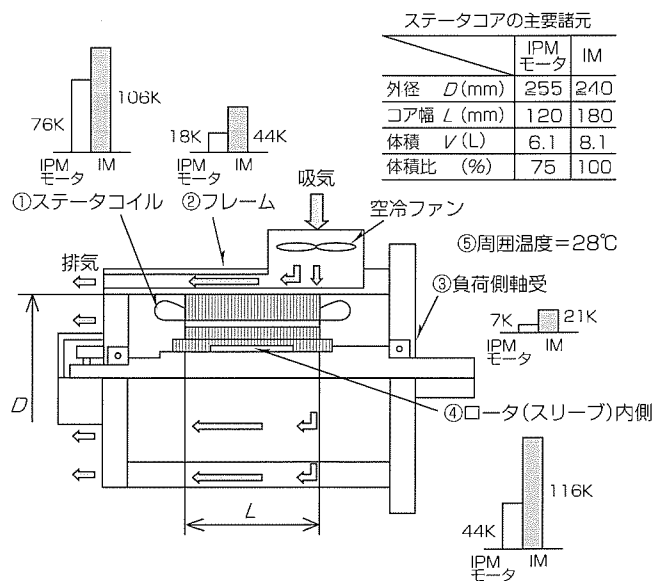
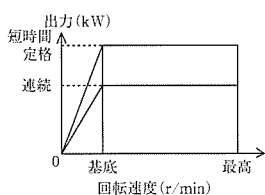


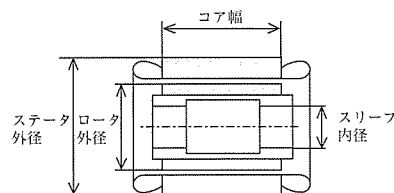
図7. 連続負荷運転時のIPMモータとIMの温度上昇比較 (出力：5kW，回転速度：445r/min)

表2. ビルトインIPMモータの代表的な製品仕様

製品型名 SJ-PMB-	枠番	出力(kW) (連続/ 短時間定格)	回転速度 (r/min) (基底/最高)	トルク(N・m) (連続/ 短時間定格)	主要寸法(mm)			
					ステータ外径	ロータ外径	スリーブ内径	コア幅
02032-03	80	6.7/10.7	3,200/8,000	20/31.9	φ140	φ99	φ55	100
03909-00	100	3.7/7.5	910/6,000	38.8/78.7	φ160	φ115	φ65	120
05509-02	112	5.5/7.5	955/8,000	55/75	φ180	φ115	φ65	120
09607-00	132	7.5/11	750/6,000	95.5/161.6	φ210	φ140	φ85	160
12004-00	160	5.5/7.5	445/6,000	118/160.9	φ255	φ160	φ95	120
41003-02	180	15/18.5	350/4,000	409.3/504.7	φ300	φ210	φ135	200



出力-回転速度特性



主要寸法

などがあり、これらを克服することが現在の課題である。

IPMモータは同期モータであり、IM主軸モータと異なって滑りがないため、検出器(エンコーダ)の精度もあいまって高精度位置決めシステムが構成できるという特長を持っている。これを利用すれば、例えば2台のIPMを同期させて一つの動作を行うといったアプリケーションも考えられる。

4. む す び

工作機械の主軸高速化は送り系の高速化と並行して今後進展するものと考えられ、超高速IM主軸モータの更な

る高速化と低発熱化を追求していく所存である。また、IPMモータに関しては、低速大トルク領域における高効率性を生かしつつ、更なる適用範囲の拡大を図りたい。

参 考 文 献

- (1) 伊田英紀, ほか: 低欠陥溶湯鍛造によるスピンドルモータの高速化, 三菱電機技報, 75, No.10, 659~662 (2001)
- (2) 武田洋次, ほか: 埋込磁石同期モータの設計と制御, オーム社 (2001)

最新のモータ電磁設計技術

米谷晴之* 仲 興起**
井上正哉**
守田正夫**

要 旨

回転機の競争力強化のためには、高性能化と低コスト化を両立する限界設計が必要とされている。この限界設計を達成するためには、従来の設計技術だけでなく、詳細な電磁設計技術が必要である。本稿では、従来からあいまに取り扱われてきた回転機内の高調波の挙動、及び鉄損、漂遊損などの損失を、電磁界解析を用いて高精度に予測する方法について紹介した。

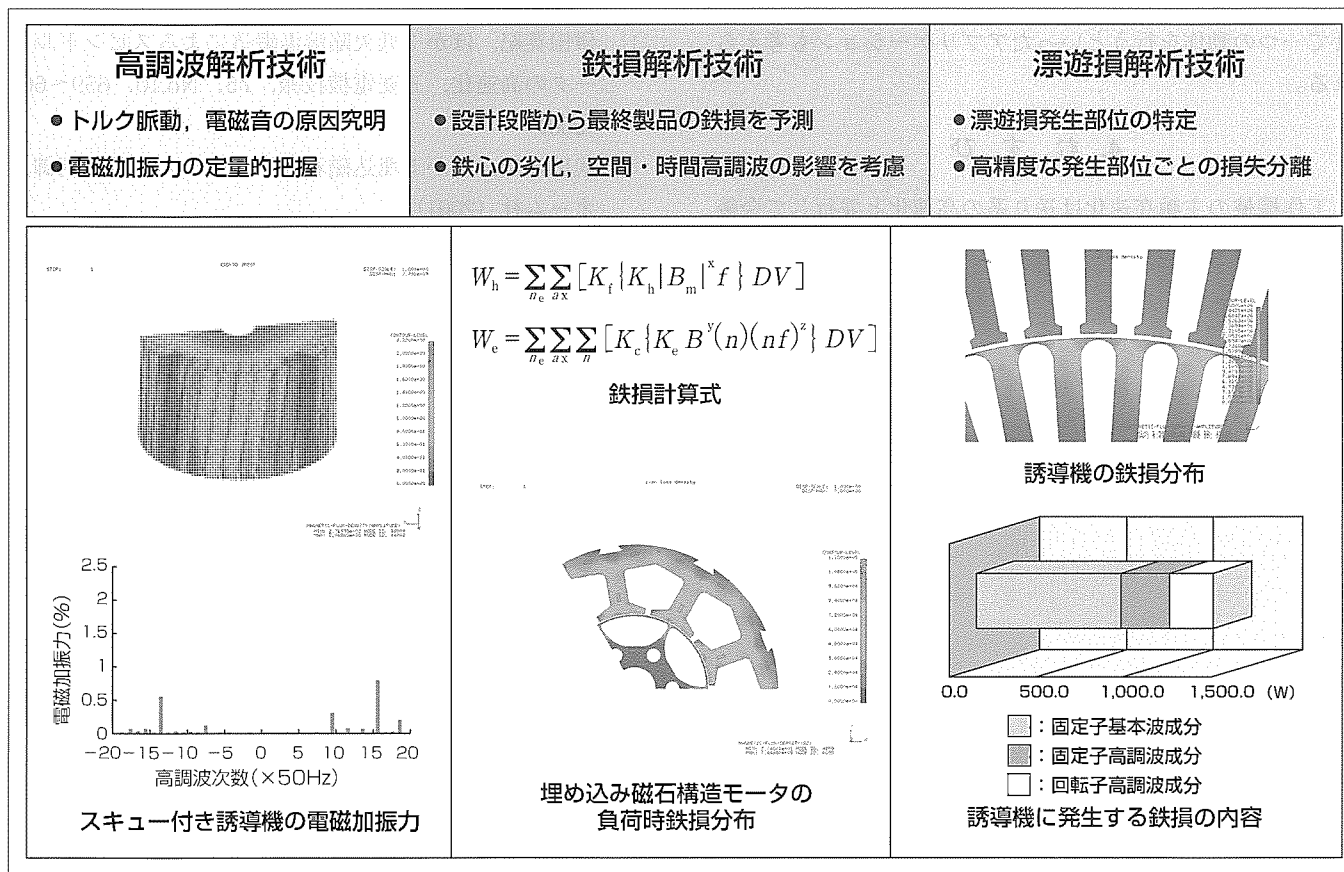
回転機内の高調波は、トルク脈動、電磁騒音の原因となる。2章では、この高調波の発生メカニズムを解明するための簡易理論を紹介し、簡易設計に役立てる方法を示した。次に、高調波の大きさを論じる場合に必要となる詳細な電磁界解析を紹介した。本稿では、誘導機の電磁加振力解析結果を示し、スキュー角によって電磁加振力が変化する様

子を示した。この解析結果により、スキュー角の最適化に対する指針が得られる。

3章では、空間及び時間高調波による影響を含めた鉄損の解析手法について示し、埋め込み磁石構造モータの無負荷時及び負荷時の鉄損解析を行った。解析結果は実測結果とほぼ一致し、妥当性が証明された。この解析により、設計段階から製品の鉄損を予測することができる。

次に、高調波二次銅損又は高調波鉄損が主原因となる誘導機の漂遊損についての解析結果を紹介した。これにより、これまで不明であった漂遊損失の発生部位及び損失分離など、漂遊損発生メカニズムを明らかにした。

これらの解析は、回転機の限界設計を検討する上で、重要な情報を与える。



詳細な電磁界解析を用いた電磁設計技術の例

回転機的设计において従来から詳細を検討することができなかった、回転機内の高調波の影響、鉄損、漂遊損についての電磁界解析例を紹介する。高調波の影響については、スキュー付き200Wクラスの誘導機の三次元解析結果とモード2の電磁加振力を示した。鉄損解析については、電磁界解析で鉄損を計算する方法と埋め込み磁石構造モータ負荷時の鉄損解析結果を示した。漂遊損の解析については、75kWクラスの誘導機において、回転子及び固定子表面近傍の高調波鉄損分布と、解析による鉄損発生部位ごとの損失分離結果について示した。

1. ま え が き

回転機は約150年にも及ぶ歴史があり、これまでにその電磁設計技術に関して多くの研究がなされ、ほぼ設計技術が確立されている。しかし、近年、更なる性能向上と低コスト化の両立なしに市場競争力が得られない事態となっており、限界設計が必要となっている。限界設計を達成するためには従来の設計技術を用いているだけでは不可能であり、これまでにない高度電磁設計技術の確立が不可欠である。

一方、計算機環境の急速な発展があり、従来の設計では無視又は実験式でしか考慮することができなかった物理現象を正確に計算することができるようになり、限界設計を実現する上で多くの情報を与える電磁界解析が可能となった。

本稿では、これまで比較的あいまいに取り扱われてきた回転機内の高調波や損失に関する考え方及びこの電磁界解析例を紹介し、限界設計への指針を与える。

2. 高調波に関する設計技術

回転機の性能のうちトルク脈動、電磁騒音又は誘導機における高調波トルクなどは、回転機内の高調波が原因となって発生する。この章では、これらの原因となる電磁加振力の原因究明のための簡易理論と、最新の電磁界解析による電磁加振力解析結果を示す。

2.1 回転機の高調波に関する簡易理論

回転機内の高調波は空間高調波と時間高調波に分離され、一つの高調波は空間高調波次数及び時間高調波次数を持ち、空げき(隙)磁束密度を高調波分析することでおおよその物理現象が推定できる⁽¹⁾。

空隙磁束密度はパーミアンス×起磁力で計算されるため、高調波もパーミアンス高調波と起磁力高調波がある。回転機における主な高調波は、①パーミアンス高調波であるスロット高調波、②有限のスロット内に巻線が格納されることから発生する固定子起磁力高調波、③永久磁石の起磁力に含まれる回転子の起磁力高調波、④磁気飽和に起因する高調波、⑤偏心など工作誤差に起因する高調波、⑥インバータキャリアなど電源高調波などがある。

三相かご型誘導機では、工作誤差を無視すると空間高調波次数は次式となる。ただし、磁気飽和に関しては厳密にはフーリエ級数展開できないが、磁気飽和による高調波の主成分を考えて、便宜的に次数表示している。

$$N_s K_s + N_r K_r + 6 K_{ps} p + 4 K_B p \pm p \dots\dots\dots(1)$$

時間高調波次数は次式となる。

$$\frac{N_r K_r (1-s)}{p} + 4 K_B \pm 1 \text{ (複号同順)} \dots\dots\dots(2)$$

ここで、 p ：極対数、 N_s ：固定子スロット数、 N_r ：回転子スロット数、 s ：滑り、 K_s 、 K_r 、 K_{ps} 、 K_B ：任意の整数で

ある。

電源高調波に関しては、式(2)の±1の代わりに電源高調波次数とする。

電磁加振力 $F(N/m^2)$ は、空隙磁束密度 $B_g(T)$ を用いて

$$F = \frac{B_g^2}{2\mu_0} \text{ (ただし、}\mu_0\text{：真空の透磁率)} \dots\dots\dots(3)$$

と表されるため、空間高調波次数は次式となる。

$$N_s K_s + N_r K_r + 6 K_{ps} p + 4 K_B p + \begin{cases} 2p \\ 0 \\ -2p \end{cases} \dots\dots\dots(4)$$

時間高調波次数は次式となる。

$$\frac{N_r K_r (1-s)}{p} + 4 K_B + \begin{cases} 2 \\ 0 \\ -2 \end{cases} \text{ (以下同順)} \dots\dots\dots(5)$$

電源高調波次数を N とすれば、式(5)の3項は以下となる。

$$\begin{cases} 1+N \\ 1-N, N-1 \\ -1-N \end{cases}$$

ここで、空間高調波次数における1項は固定子スロット高調波、2項は回転子スロット高調波、3項は固定子起磁力高調波、4項は磁気飽和による高調波を意味している。

極数：スロット数が2：3の突極集中巻永久磁石モータでは、電磁加振力の空間高調波次数は次式となる。

$$N_s K_s + 3 K_{ps} p + 4 K_{pr} p + 4 K_B p + \begin{cases} 2p \\ 0 \\ -2p \end{cases} \dots\dots\dots(6)$$

時間高調波次数は次式となる。

$$4 K_{pr} + 4 K_B + \begin{cases} 2 \\ 0 \\ -2 \end{cases} \text{ (以下同順)} \dots\dots\dots(7)$$

ここで、 K_{pr} は、回転子の起磁力高調波に関する係数であり、任意の整数である。

適当に K に関する任意の整数を調整することで空間高調波次数が0となる高調波はトルクリプル、工作誤差による電磁加振力となる高調波成分であり、空間高調波次数が1となる高調波は軸系の電磁加振力、空間高調波次数が2となる高調波はモード2の電磁加振力となる。上記の式(6)(7)で示される永久磁石モータ($N_s = 3$, $p = 1$)で問題となる6次のコギングトルク($K_{ps} = 0$)は、 $K_s = 2$, $K_{pr} = -1$, $K_B = 0$, 5項 $= -2$ や $K_s = 2$, $K_{pr} = 0$, $K_B = -1$, 5項 $= -2$ や $K_s = 2$, $K_{pr} = -2$, $K_B = 0$, 5項 $= 2$ で発生することが分かる。これは、固定子スロット高調波の2倍調波と回転子起磁力高調波の5, 7次高調波又は磁気飽和の高調波で発生すると分析できる。

このような理論的な検討により、コギングトルク低減のための形状最適化や誘導機のスロットコンビの最適化などへの考え方が容易に展開できる。

2.2 小型誘導機の電磁加振力解析

2.1節の考え方は、問題となる高調波の発生メカニズムを解明し的確に対策を打つ場合には有効な指針を与えるが、高調波の次数を検討しているだけであるため、その大きさについては検討することができない。また、同一次数の高調波が複数の原因によって発生するときこの位相関係によっては高調波が大きくなることも考えられ、単純な理論計算で高調波の大きさについて論じることは不可能である。

このため、高調波の大きさについて検討するためには、電磁界解析による定量化が必要となる。この節では、高調波による影響として、小型誘導機の電磁加振力解析結果を紹介する。

解析モデルは文献(2)記載の三相誘導電動機電気学会Kモデルを用いている⁽²⁾⁽³⁾。固定子スロット数24、回転子スロット数34の4極機であり、50Hz、100Vで定格回転数が1,200r/min近辺である。出力は200Wクラスである。詳細寸法については文献(2)を参照されたい。

本稿では、スキューなしと、回転子スロットピッチスキュー及び固定子スロットピッチスキュー(回転子スロットピッチに直すと1.417スキュー)の場合を比較した。解析精度に関しては、文献(2)において実測値と比較検討しており十分な精度があることが確かめられているため、本稿では省略する。例として、回転子スロットピッチスキュー、滑り0.2(1,200r/min)のときの固定子、回転子の磁束密度分布及び二次導体に発生する渦電流密度分布を図1に示す。

2.1節で示した空隙磁束密度の空間及び時間高調波次数を滑り0.2のときに(空間高調波次数, 時間高調波次数)の表記法で記述すると、

- 基本波 (2, 1)
- 5次固定子起磁力高調波 (10, -1)
- 7次固定子起磁力高調波 (14, 1)
- 固定子スロット高調波 (22, -1)(26, 1)
- 回転子スロット高調波 (32, 12.6)(36, 14.6)
- 固定子スロット高調波の2倍高調波 .. (46, -1)(50, 1)

となる。

それぞれの磁束密度高調波の軸方向積分値を表1に示す。

同表から、回転子スロットピッチスキューで、回転子スロット高調波磁束が大幅に低減されていることが分かる。また、スキューが大きくなると固定子起磁力高調波や固定子スロット高調波が大きくなるのは、これらの高調波によって二次導体に発生する渦電流が影響していると考えられる。スキューがない場合、これらの高調波磁束は二次導体に渦電流を発生させるため、この二次電流が作る磁場によって高調波がキャンセルされる。ところが、これらの高調波成分によって生じる二次電流はスキューがあると小さく

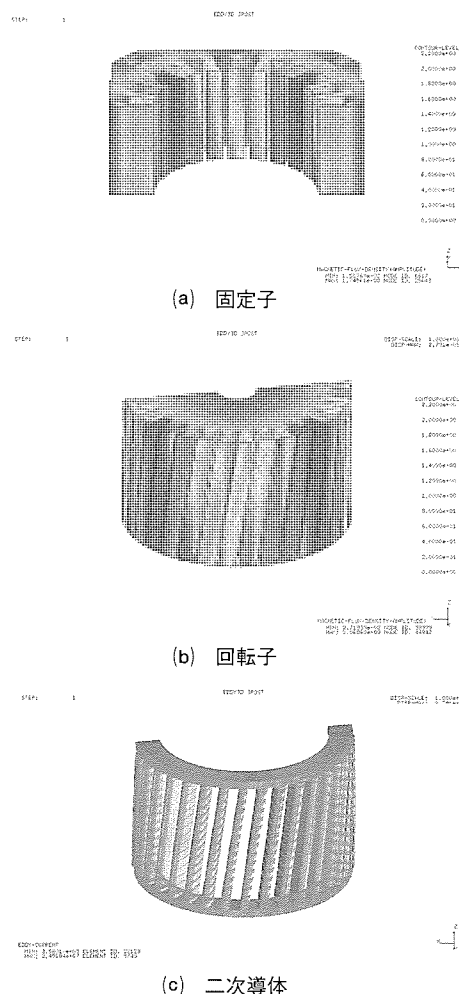


図1. 解析結果コンター図

表1. 磁束密度の高調波成分(解析結果)

高調波次数	スキューなし	回転子スロットピッチスキュー	固定子スロットピッチスキュー
(2, 1)	0.587T	0.586T	0.586T
(10, -1)	0.025T	0.036T	0.044T
(14, 1)	0.027T	0.037T	0.044T
(22, -1)	0.152T	0.179T	0.186T
(26, 1)	0.086T	0.094T	0.093T
(32, 12.6)	0.063T	0.007T	0.014T
(36, 14.6)	0.055T	0.001T	0.016T
(46, -1)	0.095T	0.092T	0.092T
(50, 1)	0.069T	0.067T	0.067T

なり、空隙においてこの高調波をキャンセルする磁束を作らなくなる。これにより、スキューがあると起磁力高調波や固定子スロット高調波が大きくなると考えられる。ただし、(46, -1)(50, 1)のように固定子スロット高調波の2倍調波がスキューによってほとんど変化がないのは、2倍調波が作る高調波磁束をスキューがない回転子においても高調波二次電流としてほとんど発生させないためであると考えられる。

誤解のないように補足する。上記の記述ではスキューに

よって高調波磁束が増大するためスキューによって高調波に関する特性が悪化するかのような印象を与えてしまうが、実際にはそうではない。固定子起磁力高調波や固定子スロット高調波によって発生する高調波磁束を二次導体に高調波電流が流れることでキャンセルするという事は、回転子の起磁力高調波に固定子起磁力高調波や固定子スロット高調波と同じ成分の高調波が含まれるということになる。この固定子起磁力高調波や固定子スロット高調波と同じ成分回転子の起磁力高調波は、固定子起磁力高調波や固定子スロット高調波との相互作用で高調波トルクを発生させ、トルク特性を悪化させることになる。また、高調波トルクの発生は漂遊損の増加にもつながり、特性としては悪化することになる。

本稿では、例としてモード2(空間高調波次数が2)の電磁加振力を検討する。スキューなし、回転子スロットピッチスキュー及び固定子スロットピッチスキューにおけるモード2の電磁加振力の周波数分析を図2に示す。

2.1節の検討により、モード2の電磁加振力の時間高調波次数は、-13.6次、15.6次、9.6次等が大きいことが分かる。-13.6次は固定子スロット高調波と回転子スロット高

調波及び固定子起磁力高調波の5次、7次高調波の相互作用で、15.6次は固定子スロット高調波と回転子スロット高調波及び固定子起磁力高調波の5次高調波の相互作用であり、9.6次は固定子スロット高調波と回転子スロット高調波及び磁気飽和による影響の相互作用が主である。

このため、スキューなしと比較した場合、回転子スロットピッチスキューを施したモータでは、回転子スロット高調波成分が低減できるため、これらの成分が大きく低減されていることが分かる。

しかし、表1で示した空隙磁束密度の比率ほどはこの高調波が低減されないのは、電磁加振力の同じ次数の高調波でも異なる原因で発生し位相が異なること、又は軸方向に磁束密度が均等に分布していないことなどが考えられる。この位相の影響及び三次元効果を考慮することで、回転子スロットピッチスキューよりも固定子スロットピッチスキューの方が電磁加振力が小さくなるという現象となっていると考えられる。

3. 鉄損, 漂遊損に関する設計技術

従来の設計計算においても鉄損や漂遊損に関する計算式は存在するが、近年の鉄心材料の進歩、制御方法の高度化又は製造方法の革新に対応しているとは言えない。

ここでは、高調波による鉄損と漂遊損に着目し、電磁界解析によってこれを見積もる方法について示し、解析例を紹介する。

3.1 鉄損, 漂遊損の検討方法

有限要素法によって鉄心の磁束密度を計算することが可能であるため、これを基に鉄損を計算することが可能となる⁽⁴⁾。ただし、一般に測定される鉄損カーブは交番磁界かつ単一周波数によるものであり、回転機のように回転磁界かつ高調波重畳における鉄損は単純計算では大きく異なることになる。本稿では、有限要素法によって各要素ごとの磁束密度履歴を解析した後、これを周波数分析することで高調波鉄損をも考慮した鉄損値を予測する手法を述べる。鉄損は、ヒステリシス損失と渦電流損失に分離される。測定された鉄損カーブをヒステリシス損失と渦電流損失に分離し、これに関するフィッティングカーブを概算する。各要素ごとの磁束密度最大値を $|B_m|$ (T)、磁束密度の周波数分析結果における n 次高調波成分の最大値を $B(n)$ (T)とすれば、ヒステリシス損 W_h (W)、渦電流損失 W_e (W)は次式で表される。

$$W_h = \sum_{n_c} \sum_{n_x} [K_f \{K_h |B_m|^x f\} DV] \dots\dots\dots(8)$$

$$W_e = \sum_{n_c} \sum_{n_x} \sum_{n_y} [K_c \{K_c B^y(n)(nf)^2\} DV] \dots\dots\dots(9)$$

ここで、 f :基本周波数(Hz)、 D :密度(kg/m³)、 V :

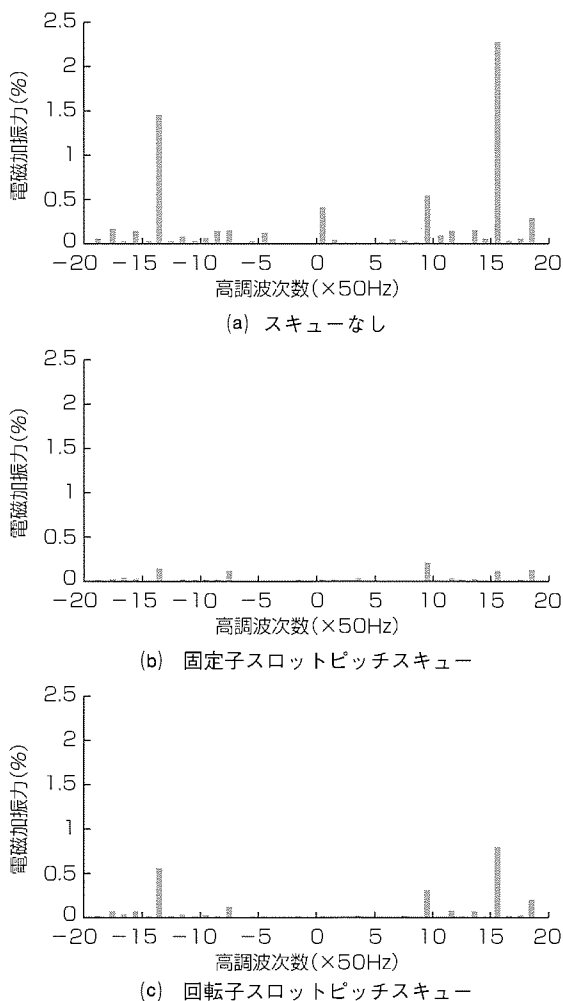


図2. モード2の電磁加振力

要素の体積(m³), K_f : 残留応力によるヒステリシス増
加係数, K_c : 高調波重畳による渦電流増増加係数⁽⁵⁾又は
表面損失増加係数であり, a_x は径方向又は周方向のこ
と, n_c は鉄心の要素数である。ここで, フィッティングカーブ
から K_h, x, K_e, y, z を求める。

3.2 埋め込み磁石構造モータの鉄損解析

埋め込み磁石構造モータの鉄損解析を行った⁽⁶⁾。

図3に無負荷時鉄損分布を示す。無負荷時は, 永久磁石
による起磁力のみが存在するため, ヒステリシス損失が支
配的となる。表2に無負荷鉄損の実測値と解析結果の比較
を示す。同表から, 鉄損解析の妥当性が確認できる。

図4に負荷時の鉄損分布を示す。負荷時は, 120°通電の
インバータ駆動を行っているため, 時間高調波による渦電
流損が支配的となる。インバータ高調波による鉄損は固定
子スロットオープン又は回転子表面を通る磁路で流れる磁
束に含まれており, この磁路における磁気抵抗を高く設定
することで損失が低減できる。表3に, 解析による損失分
離を示す。同表から, 回転子表面損失, 固定子表面損失
(高調波損失)及び焼きばめなど残留応力の影響を含めた基
本波ヒステリシス損が支配的であることが分かる。

3.3 誘導機の漂遊負荷損解析

誘導機には漂遊負荷損と呼ばれるモータ負荷に応じて増
大する損失がある。この漂遊負荷損に関しても古くから理
論・実験の双方の視点で多くの取り組みがなされており⁽⁷⁾,
その定性的な解釈に基づいた設計が行われてきた。誘導機
の漂遊負荷損は式(10)で定義される⁽⁸⁾。

$$W_{LL} = P_1 - (P_2 + W_{cl} + W_{c2} + W_h + W_m) \dots \dots \dots (10)$$

ここで, W_{LL} は漂遊負荷損, P_1 は入力, P_2 は機械軸出力,
 W_{cl} は一次銅損, W_{c2} は二次銅損, W_h は無負荷鉄損, W_m は

機械損である。式(10)で示されるように, 負荷時の入力か
ら鉄損と銅損を分離できないために鉄損は無負荷時と同じ
値を用いており, また, 二次銅損も滑りと軸出力から算出
するために基本波成分のみを考慮したものとなる。しか
し, 実機においては負荷に応じて増加する高調波によつて
損失があることから, これが漂遊負荷損の主要因として
測定されることになる。

この負荷に応じて増加する誘導機の高調波損失は, さら
に, 高調波鉄損と高調波銅損に分類される。したがって,
漂遊損の低減には高調波二次銅損と高調波鉄損の和を最小
化する設計を探す作業が必要となる。しかし, この二つの
損失を実測することは難しい。すなわち, かご型二次導体
の場合には, 高調波に対しては表皮効果の影響が大きく二
次導体断面の電流分布が分からないことから高調波二次銅
損の定量的な評価は難しく, また, 負荷電流によって特に
回転子の空隙近傍が磁気飽和して磁束分布が著しく変化す
るために, 高調波鉄損を定量化することも難しい。そのた
め, 従来は実測を繰り返しながら最適化していく作業が必
要であった。

一方, 非線形過渡の磁界解析を用いればバー電流の挙動
を詳細に把握することも可能であり, 高調波を含む鉄損に
関しても前述した式(8), (9)を使った方法で求めることが
できる。また, 損失の分布や発生量をビジュアルに理解で
きるために, 要因推定や形状設計の最適化もよりの確に行
える。一例として, 4極75kWの産業用誘導機の漂遊損解
析結果を示す。図5は, 解析で求めた二次銅損を基本波と
高調波成分に分離して示したものである。図で無負荷時に
もバー電流は高調波が含まれているが, これは, 実測では
無負荷鉄損として測定されることが分かる。また, 負荷に

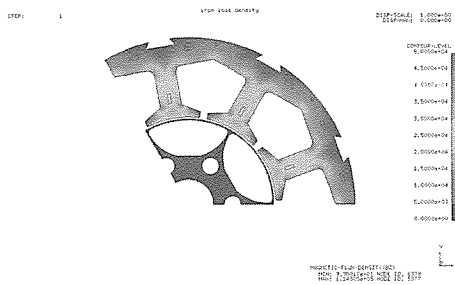


図3. 無負荷時鉄損分布

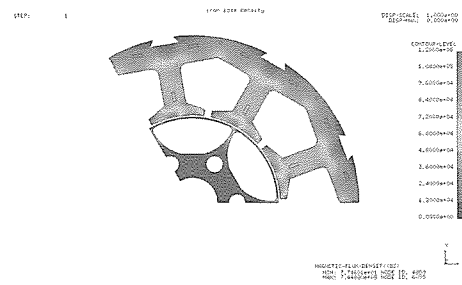


図4. 負荷時鉄損分布

表2. 無負荷鉄損

		1,000r/min	2,100r/min	3,180r/min
実測		1.2W	3.2W	5.6W
解析	ヒステリシス損	1.0W	2.1W	3.2W
	基本波渦損	0.2W	0.8W	1.6W
	高調波渦損	0.1W	0.3W	0.6W
	合計	1.3W	3.1W	5.4W

表3. 負荷時鉄損など

		実測	解析	
平均トルク		1.63N・m	平均トルク	1.63N・m
無負荷鉄損		5.6W	ヒステリシス損	7.3W
残損		11.3W	基本波渦損	2.9W
			高調波渦損	6.8W
合計鉄損		16.9W	合計鉄損	17.0W

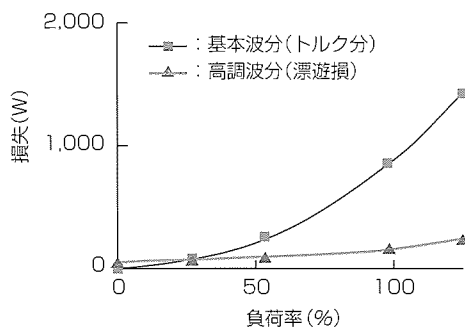


図5. 磁界解析から求めた二次銅損

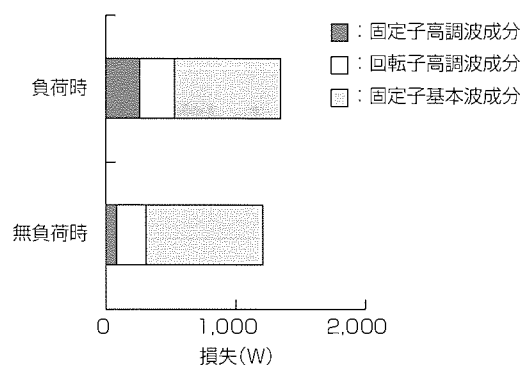


図6. 磁界解析を使った鉄損分析

よって高調波二次銅損が増加していく傾向が示されており、漂遊負荷損の一因となっていることが分かる。図6は、同様に、固定子、回転子それぞれの鉄損を高調波成分と基本波成分に分離して示したものである。ただし、回転子の基本波成分の鉄損は小さいので表示していない。図5に示されるように、負荷をとることで固定子、回転子双方ともに鉄損の高調波分が増大しており、漂遊負荷損のもう一つの要因となっていることが分かる。図7ではモータ内部の鉄損分布を示す。図6に示した高調波鉄損の多くは空隙近傍で生じていることが分かる。

以上のように、漂遊損のおおよそを解析によって把握できるようになってきた。残された課題としては、スキューしたモータで顕著な横流損失⁽⁹⁾などの三次元的な現象、又はダイカスト時のアルミが積層鉄心間に浸み出して生じる損失、回転子の外径切削といった加工ばらつきに依存して大きく変化する損失がある。これらに関してはまだ不明な点も多く残されており、モータの低損失化の極限を追求するためにも今後の検討が必要である。

4. む す び

本稿では、回転機の電磁設計を限界設計に近づけるために、高度に計算機を利用して、これまであいまに取り扱われてきた回転機内の高調波計算の簡易理論を示すとともに、電磁加振力、鉄損(高調波鉄損を含む)、及び漂遊損の解析など最新技術を用いた解析例を示した。

電磁加振力計算では、誘導機のスキューとの関係を示し、詳細な電磁界解析をすることで、最適なスキュー角を選定できる可能性があることを示した。

また、埋め込み磁石構造モータでは、インバータ高調波など時間高調波を考慮した鉄損解析を行うことで、実測の鉄損値と比較して解析結果が妥当であることを示した。これにより、製品最終段階での鉄損の見積りが可能となり、設計段階での鉄損予測を行うことが可能となった。

最後に、解析において最難関である漂遊損の解析例を示し、漂遊損の発生原因別に損失値を分離することが可能となり、漂遊損低減のための設計に反映できることを示した。

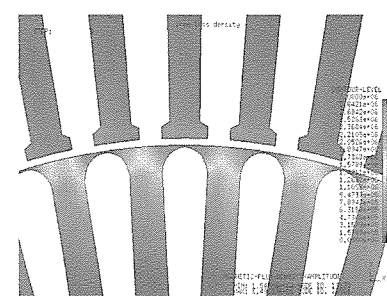


図7. モータ内部の鉄損解析例

参 考 文 献

- (1) 米谷晴之, ほか: 小形誘導電動機の二次導体アンバランスによる電磁振動, 電気学会産業応用部門全国大会, No.104, 5~8 (1997)
- (2) 電気学会: 回転機のバーチャルエンジニアリングのための電磁界解析技術, 電気学会技術報告, 第776号 (1999)
- (3) Kometani, H., et al: 3-D Analysis of Induction Motor with Skewed Slots Using Regular Coupling Mesh, IEEE Trans. on Magn., 36, No. 4, 1769~1773 (2000)
- (4) 西岡直樹, ほか: 三相誘導機の鉄損解析, 電研資, MAG-00-121, 49~53 (2000)
- (5) 谷 良浩, ほか: 単一高調波励磁下での無方向性電磁鋼板の鉄損, 電研資, MAG-00-302, 7~12 (2000)
- (6) 馬場和彦, ほか: ブラシレスDCモータの高性能化検討, 電研資, RM-00-141, 13~18 (2000)
- (7) 八木 勝, ほか: 誘導電動機における漂遊負荷損, 三菱電機技報, 37, No.9, 20~26 (1963)
- (8) 誘導機専門委員会: 誘導機の漂遊負荷損, 電気学会技術報告, 第58号 (1963-8)
- (9) 一杉和良, ほか: かご型誘導電動機の横流損失, 電学論D, 119-2, 217~225 (1999)

最新のモータ機械設計技術

吉桑義雄*
今城昭彦**

要 旨

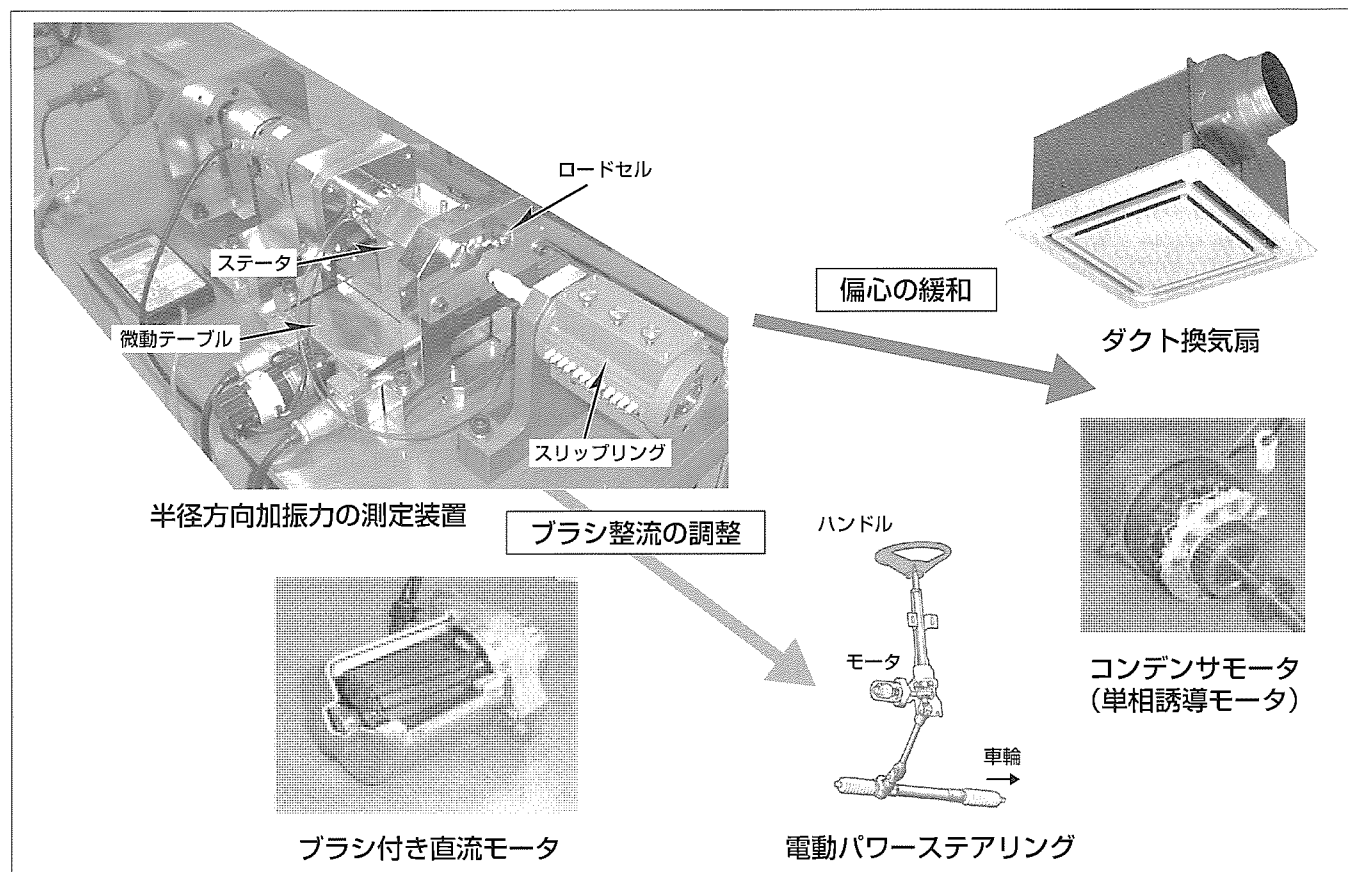
500W以下の小型モータにおいては、モータ加振力が伝達した駆動系やモータ支持系から生じる伝達音が問題となる。本稿では、伝達加振力源として最も騒音になりやすい半径方向加振力を取り上げ、測定装置及び製品の低騒音化検討の例を述べる。

半径方向加振力の測定装置は、ステータコアをフレームから分離し、ロータ系を支持する軸受にロードセルを設けて、半径方向成分をトルクから分離して検出するものである。ステータ位置を微動テーブルに取り付け10 μ mピッチで偏心を設定し、偏心の影響を定量的に測定した。

最近のエレクトロニクス化の進展に伴い、商用電源のひずみが大きくなっている。換気扇用コンデンサモータにおいては、製造上避けられない機械的偏心があり、電源ひず

みの周波数帯域で半径方向加振力が生じる。本稿では、偏心と加振力の関係を定量的に求め、対向する極の巻数を調整することによって半径方向加振力を低減できることを示した。

適用車種拡大のために電動パワーステアリング用直流モータは高トルク化しており、従来の2極、2ブラシから、4極、4ブラシに移行している。4極、4ブラシモータでは、ブラシ整流タイミングのずれによって電機子電流の分布が非対称となり、半径方向の加振力を生じる場合がある。本稿では、巻線の対称位置に短絡線を設けることによって、半径方向加振力を約1/5と大幅に低減できることを示した。これにより、電動パワーステアリングの低騒音化が可能となった。



半径方向加振力測定装置による各種製品の低騒音化

ステータコアをフレームから分離して微動テーブルに取り付けて偏心を設定し、ロータ系を支持する軸受をロードセルで保持して半径方向成分をトルクから分離して検出する。換気扇用コンデンサモータでは機械的な偏心を不平衡巻線で緩和する方法、電動パワーステアリングモータ用ブラシ付き直流モータでは整流タイミングのずれを対称位置短絡線で緩和する方法によって低騒音化できることを示した。

1. ま え が き

500W以下の小型モータにおいては、モータフレーム振動などによるモータ自体からの直接音よりも、モータ加振力が伝達した駆動系やモータ支持系から生じる伝達音が問題となることが多い。これは、小型モータのステータとフレームの固有振動数が高く、音の放射面積が小さいためである。

本稿では、伝達加振力源として最も騒音になりやすい半径方向加振力を取り上げ、測定装置及び製品の低騒音化検討の例を述べる。

2. 半径方向加振力の測定装置⁽¹⁾

ロータ表面に発生する電磁力は、周方向、半径方向、軸方向の3成分を持っている。周方向成分は有効なトルクとなるが、半径方向成分は騒音源となりやすい。この半径方向成分を測定するため、図1のような実験装置を考案した。

ステータとロータを分離して固定する。ステータコアは微動テーブルに取り付け、ロータとの静的偏心量を設定する。ロータ系を支持する軸受は図2のように力センサを介して保持する。この力センサは、PCB社製の圧電型ロードセル208B01であり、圧縮方向の力を検出する。ロードセルの圧縮方向がモータ軸を中心とした半径方向となるように配置することにより、ロータに加わる半径方向加振力の

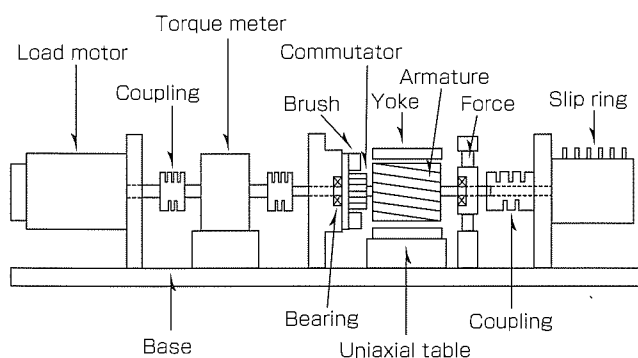


図1. 半径方向加振力の測定装置

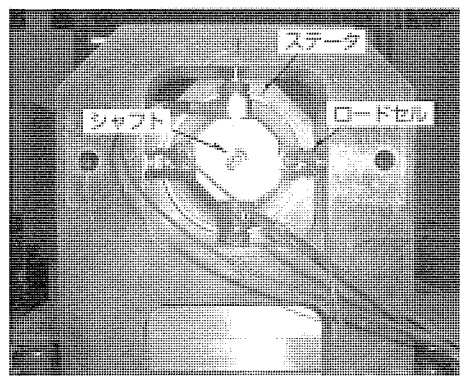


図2. ロードセル

みを分離して検出している。供試ロータのシャフトにはトルクセンサを介して外部駆動モータを取り付け、供試モータに負荷トルクを与える。また、シャフトの反対側にはスリップリングを取り付けて、直流機の巻線電位を測定する。

3. 偏心による半径方向加振力

3.1 測定結果

ダクト換気扇用のコンデンサモータについて、偏心で生じる半径方向加振力を検討した。供試モータの諸元を表1に示す。ステータを取り出して図1の装置に組み込み、10 μ mピッチで偏心を変化させた。また、印加電圧には表2に示すように5%のひずみを与え、定格回転数1,050r/minで回転させた。

半径方向加振力の測定結果を図3に示す。偏心率0%と32%の時間波形を示しているが、偏心率32%では、高調波成分が増えていることが分かる。

3.2 不平衡巻線による加振力の低減

対向する極を異なる巻数として偏心による半径方向加振力を低減することを検討する。偏心状態を図4の簡易モデルで考える。あるスロットXを通る巻線から誘起される磁

表1. 試供モータの諸元

極数	4
定格出力	20W
定格電圧	100V
定格周波数	60Hz
定格回転数	1,050r/min
ステータスロット数	16
ロータスロット数	22
巻線形式	分布巻
エアギャップ	0.25mm
コア外径	80mm

表2. 電源ひずみの割合

周波数 (Hz)	割合 (%)	位相 (°)
1f	100	0
3f	1	314
5f	5	198
7f	1	327

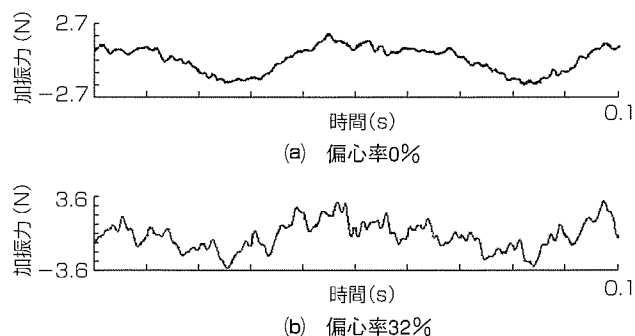


図3. 半径方向加振力の時間波形

束 ϕ_x と、あるスロット Y を通る巻線から誘起される磁束 ϕ_y を等しくする。起磁力を F 、磁気抵抗を R 、巻線数を n 、巻線電流を i とすると、

$$F_x/R_x = F_y/R_y \dots\dots\dots(1)$$

$$F_x = n_x \times i_x, F_y = n_y \times i_y \dots\dots\dots(2)$$

で表せる。磁気抵抗 R は、エアギャップ長を l 、エアギャップ部の面積を S 、空気の透磁率を μ とすると、

$$R_x = l_x / (\mu \times S_x), R_y = l_y / (\mu \times S_y) \dots\dots\dots(3)$$

で表せる。式(1)に式(2)、式(3)を代入し、空気の透磁率を一定、面積 $S_x \doteq S_y$ として整理すると、

$$(n_x \times i_x) / l_x = (n_y \times i_y) / l_y \dots\dots\dots(4)$$

となる。これにより、磁束 ϕ_x と磁束 ϕ_y を等しくするためには、巻線数 n 及び巻線電流 i を変化させればよい。ここでは、巻線電流 i は一定とし巻線数 n を変化させる。

偏心のない状態でのスロット X の巻線を n_0 、エアギャップ長を l_0 とすれば、巻線数 n_x は、

$$n_x / n_0 = l_x / 2l_0 \dots\dots\dots(5)$$

である。スロット Y でも同様に求めることができる。なお、磁束の磁路のエアギャップは2か所あるので $2l_0$ としている。式(5)は、任意のスロット X の巻数 n_x の調整を偏心のない状態を仮定してそのときの巻線数 n_0 を基準とし、スロット X の位置でのステータとロータ間のエアギャップ l_x に比例し、かつ偏心のない状態でのエアギャップ l_0 に反比例するようにすれば、誘起する磁束を平衡にできる。

次に、偏心時のエアギャップ長 l を図4から算出する。

図において、 d はステータとロータ中心 O_1 と O_2 の直線距離である。 l_{x1} 、 l_{x2} はスロット周りの磁束の磁路におけるエアギャップ長、 α_x はスロット中心線と偏心方向とのなす角度である。ステータ中心 O_1 と2か所のエアギャップ部のなす角度は $\alpha_{x2} - \alpha_{x1}$ で表せ、これを極数 P で表すと、

$$\alpha_{x2} - \alpha_{x1} = 2\pi / P \dots\dots\dots(6)$$

となる。したがって、偏心方向と磁路のエアギャップがなす個々の角度は、

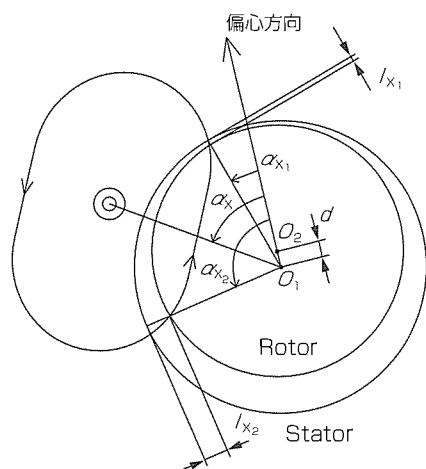


図4. モータの偏心状態

$$\alpha_{x1} = \alpha_x - (\pi / P)$$

$$\alpha_{x2} = \alpha_x + (\pi / P) \dots\dots\dots(7)$$

で表せる。また、エアギャップ長 l_{x1} 、 l_{x2} は、

$$l_{x1} = l_0 - d \cos \{ \alpha_x - (\pi / P) \}$$

$$l_{x2} = l_0 - d \cos \{ \alpha_x + (\pi / P) \} \dots\dots\dots(8)$$

となる。偏心率 e ($e = d / l_0$) を使用して2か所のエアギャップ長の和を書き表すと、

$$l_x = l_{x1} + l_{x2} = 2l_0 \{ 1 - e \cos \alpha_x \times \cos(\pi / P) \} \dots\dots(9)$$

となる。上式(9)を式(5)に代入して、

$$n_x = \{ 1 - e \cos \alpha_x \times \cos(\pi / P) \} n_0 \dots\dots\dots(10)$$

で求めることができる。

スロット Y についても、同様の方法で計算すれば、スロット X を通る巻線から誘起される ϕ_x とスロット Y を通る巻線から誘起される ϕ_y とを平衡にすることができる。

15%の機械的偏心に対して、半径方向吸引力を釣り合わせる不平衡巻線ステータを製作し実験した。電源ひずみは表2のように与えている。偏心と半径方向加振力の関係を図5に示す。2f, 4f, 6f など異なる周波数の成分があるが、いずれの周波数成分も偏心15%付近で最小となった。機械的な偏心量に合わせて巻線を調整することによって、半径方向加振力を低減できることになる。

4. ブラシ整流タイミングによる半径方向加振力⁽²⁾

次に、電動パワーステアリング用のブラシ付き直流機において、ブラシ整流で生じる半径方向加振力を検討した。供試モータは極数4、スロット数22、重ね巻方式である。スロット数は偶数であり、コア形状及び巻線の配置はコアの中心に対して対称となる。

モータの巻線図と投影図、及び整流子とブラシが接触する部分の断面図を図6に示す。ブラシA、Bは正極、ブラシC、Dは負極であり、同極性のブラシを対称位置に設置している。また整流子内の $c_1 \sim c_{22}$ は整流子片であり、ブラシの幅は整流子片の幅と同寸法に設計しているため、各

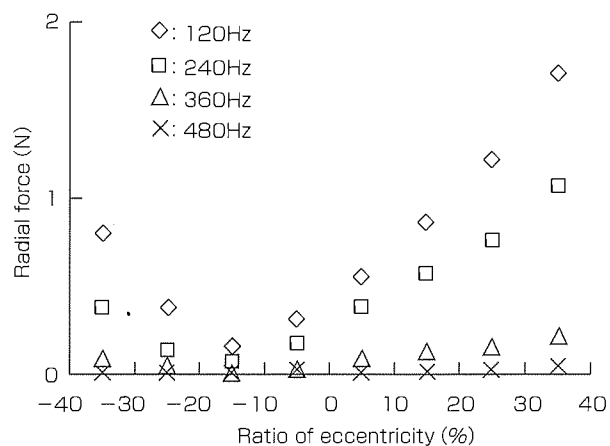


図5. 不平衡巻線における偏心と半径方向加振力

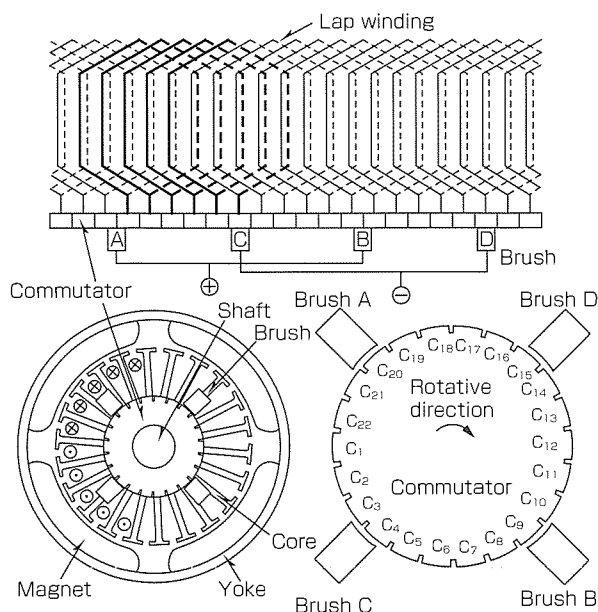


図 6. モータの巻線図と投影図及び整流子部断面図

ブラシは1枚又は2枚の整流子片と接触する。正極ブラシAから負極ブラシCに流れる電流は巻線図の太線で示す巻線を通り、その位置はモータ投影図に丸印で示すようにコアの中心に対して紙面左側に分布する。また同様に、正極ブラシBから負極ブラシDに流れる電流は、紙面右側に分布する。これらの巻線電流が異なる場合、巻線電流分布はロータコアの中心に対して非対称になる。

直流機の回路モデルを図7に示す。ここで $L_1 \sim L_{22}$ は巻線を示し、また例えば R_{A1} はブラシAと整流子片 c_1 間の接触抵抗を、 I_{AC} は正極ブラシAと負極ブラシCからなる回路の巻線電流を示している。図では、正極ブラシA、Bは2枚の整流子片と接触し、負極ブラシC、Dは1枚の整流子片と接触しているため、内部回路に含まれる巻線数はいずれも5個になる。それに対して、例えば整流子片 c_1 がブラシAと非接触の場合は、正極ブラシAと負極ブラシDからなる回路に含まれる巻線数は6個になる。このとき内部回路の抵抗などが大きくなるため、巻線電流 I_{AD} はその他の巻線電流よりも小さくなる。このように、対称位置にある整流子片とブラシの接触状態が異なる場合、巻線電流が異なるため電流分布が非対称になり、半径方向加振力が発生する。

そこで、図8に点線で示すように、ロータコアの中心に対して幾何学的対称位置にある整流子片間を結ぶ対称位置短絡線を導入して低騒音化を図る。この対称位置短絡線は、対称位置にある整流子片とブラシの接触状態を電気的に等しくして、電流分布を対称にする役割を持っている。

図9は対称位置にある巻線 L_1 、 L_{12} の電流差の波形である。図の(b)は対称位置短絡線がないときの結果で、巻線電流の差は、電流の方向が変わるときに最大6Aになっている

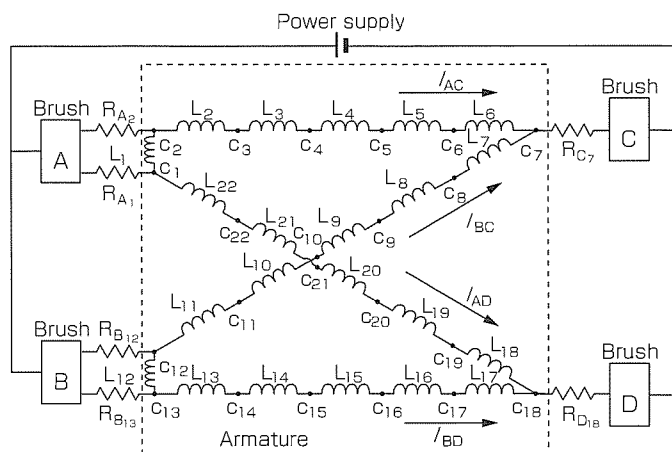


図 7. 直流機の回路モデル

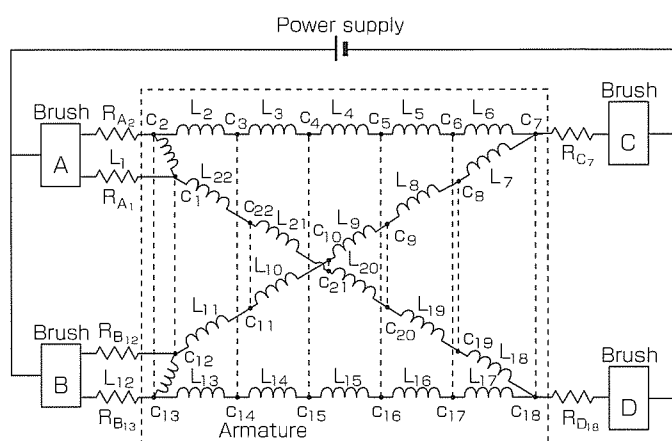
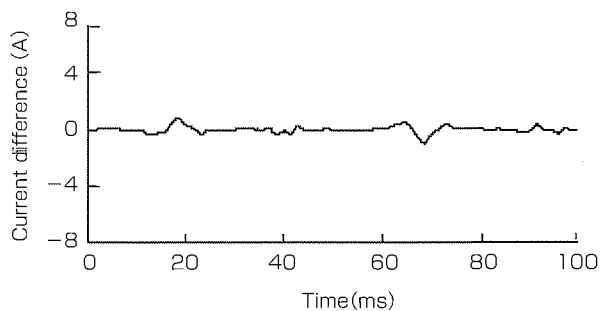
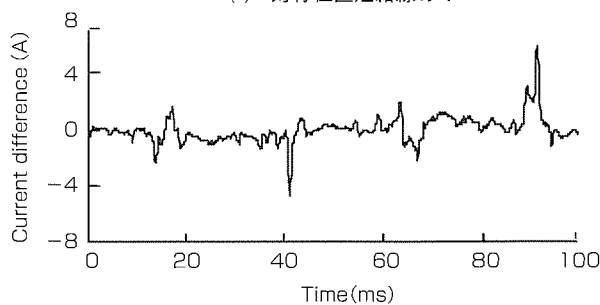


図 8. 対称位置短絡線の結線図



(a) 対称位置短絡線あり



(b) 対称位置短絡線なし

図 9. 対称位置にある巻線 L_1 、 L_{12} の電流差

る。図の(a)は対称位置短絡線があるときの結果で、巻線電流の差は最大1 Aと小さくなり、また、整流周期4.5msでの変動もほとんど見られない。

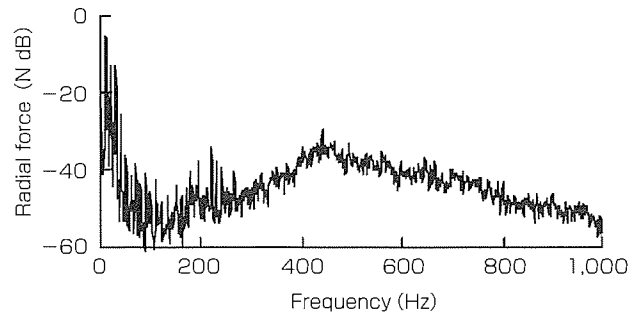
対称位置短絡線を導入したモータと従来のモータについて、半径方向加振力の周波数特性を図10に示す。駆動条件は端子電流15A、回転数600r/minであり、整流子片数22に対応した加振力の1次成分は220Hzとなる。図から、モータの半径方向加振力は220Hzの整数倍の成分が大きいが、対称位置短絡線を導入することによって大幅に低減することが分かる。加振力の1次成分である220Hzについて比較すると、対称位置短絡線を導入することにより、-14dBすなわち約20%に低減できている。対称位置短絡線の効果は実車の騒音で確認されている。

5. む す び

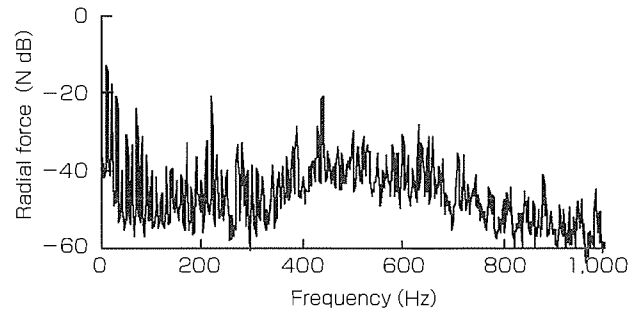
本稿では、半径方向加振力を分離して測定する装置を紹介し、その適用例として換気扇用コンデンサモータの偏心問題と電動パワーステアリング用ブラシ付き直流機の対称位置短絡線について述べた。中小型モータの低騒音化には、半径方向加振力を低減することが極めて有効である。

参 考 文 献

- (1) 岡田順二, ほか: コンデンサ誘導電動機の偏心による振動・騒音低減の一考察, 電気学会産業応用部門講演



(a) 対称位置短絡線あり



(b) 対称位置短絡線なし

図10. 半径方向加振力の周波数特性

会 (1999)

- (2) 吉桑義雄, ほか: ブラシ付き直流機の電機子内電流挙動と加振力, 第12回電磁力関連のダイナミクスシンポジウム, 653~656 (2000)

最新のモータ制御技術

佐竹 彰*
 金原義彦**
 貝谷敏之***

要 旨

パワーエレクトロニクスの進歩に伴い、インバータを用いたモータ制御技術は発展を遂げてきた。サーボモータ等の制御用ドライブは交流モータ方式への転換が進み、ファン・ポンプ等の動力装置の駆動においては、省エネルギーニーズの高まりから、誘導モータへのインバータ駆動の普及、さらに最近では、永久磁石モータを適用したドライブシステムの製品化が進んでいる。本稿では、三菱電機におけるモータ制御技術開発について簡単に紹介する。

(1) 永久磁石モータのセンサレス制御

永久磁石モータのセンサレス制御方式として、固定子磁束を一定に制御する方式を開発した。電流から固定子磁束を求めてこれを一定に制御するよう電圧指令を算出する簡

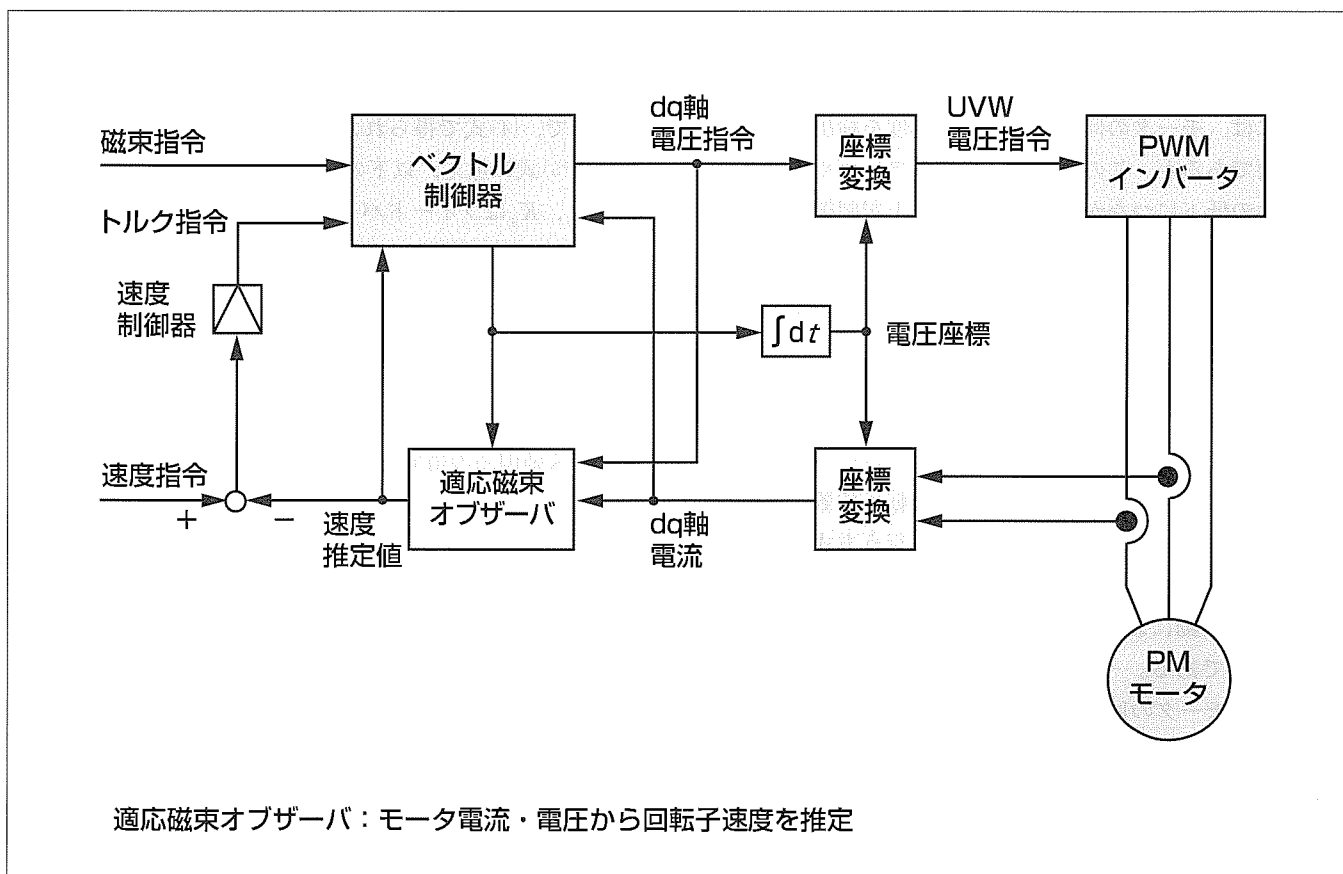
便な方式により、センサレス駆動を実現した。

(2) 誘導モータのセンサレスベクトル制御

誘導モータをセンサレスでベクトル制御する方式を開発した。適応磁束オブザーバを用いて、回転子・固定子磁束及び回転子速度を推定する。この速度を用いてベクトル制御を行い、低速域でも良好な駆動特性が得られた。

(3) 誘導モータの高精度トルク制御

誘導モータのセンサ付きベクトル制御において、磁束オブザーバを用いて磁束推定を行うことにより、磁束制御精度を向上した。モータ抵抗の変動に対してオブザーバをロバストに設計することにより、モータ温度変化によるトルク変化を抑圧することができた。



誘導モータのセンサレスベクトル制御系の構成

最近の新しいモータ制御技術の一つである誘導モータのセンサレスベクトル制御系の構成を示す図である。回転速度センサを用いず、代わりに適応磁束オブザーバによってモータ電圧・電流から回転子速度を推定する。推定回転速度を用いて誘導モータをベクトル制御することにより、センサレスによる低コスト化及び信頼性の向上を図ることができる。

1. ま え が き

パワーエレクトロニクスの進歩に伴い、可変電圧可変周波数電源(インバータ)を用いたモータ制御技術は発展を遂げてきた。サーボモータ等の制御用ドライブでは、従来の直流モータ方式からベクトル制御を適用した交流モータ方式への転換が進んだ。また、ファン・ポンプ等の動力装置の駆動においては、近年省エネルギーに対するニーズが高まっており、従来の交流電源直結での一定回転数での運転から、装置負荷に応じて回転数を変えて出力を調整できるインバータ駆動の適用が急速に普及しつつある。

さらに最近、動力用ドライブの分野では、更なる省エネルギー化を図るため、永久磁石モータを適用したドライブシステムの製品化が進んでおり、対応する技術の開発が進んでいる。一方、制御用ドライブの分野では、より高精度・高品位な駆動を実現するためのモータ制御技術が要求されている。

本稿では、以上に述べた課題に対応するため、当社において進めているモータ駆動制御技術開発の最近の状況について紹介する。

2. 最新のセンサレス制御技術

2.1 センサレス制御技術の動向

永久磁石モータの制御や誘導モータのベクトル制御には、基本的には、モータの回転子位置又は速度を検出するセンサが必要であるが、このことは、コストアップやモータの耐環境性の低下につながる。そのため、上記制御をセンサを用いずに行うセンサレス制御方式が要求されている。

現在開発されているセンサレス制御方式は、大きく次の二つに分類できる。

- (1) モータの状態量(電圧・電流・回転数)の基本的な関係に着目し、この関係が維持されるように操作量(電圧・電源周波数)を制御する方式
- (2) モータの状態量(電圧・電流)から回転子位置・速度を推定し、その推定情報を基に制御を行う方式

(1)の方式は特に永久磁石モータに用いられる方式で、誘導モータ駆動におけるV/f制御に相当する比較的簡便な制御方式である。一方、(2)の方式では、従来のセンサの代わりにモータの回転情報を推定するオブザーバが設けられるため、より正確な制御が実現できる反面、制御に伴う演算量が大きくなる傾向がある。

以下の節では、これらの制御方式の詳細について述べる。

2.2 永久磁石モータのセンサレス制御

永久磁石モータは、回転子上に永久磁石による界磁磁束が発生しているため、固定子から回転磁界を与えるとこれに同期して回転子が回転する。一般に、固定子から加える磁束(電機子反作用磁束)が回転子が発生した磁束と直交す

る場合にモータは最も効率良くトルクを発生するが、これに近い状態を保つ方法の一つとして、上記磁束の合計、すなわち固定子磁束を一定に保つ方法が考えられる。

図1に、制御軸(γ 軸)が固定子磁束と一致した状態で運転されている場合の、永久磁石モータのベクトル図を示す。図において、 ϕ_f は永久磁石磁束、 L はインダクタンスであり、 i_γ 、 i_δ は γ 、 δ 軸電流である。なお、 θ は負荷角と呼ばれる。

図から、固定子磁束 ϕ 及び負荷角 θ は以下の式で表される。

$$\phi = \phi_f \cos \theta + Li_\gamma \dots\dots\dots(1)$$

$$\sin \theta = \frac{Li_\delta}{\phi_f} \dots\dots\dots(2)$$

これから、固定子磁束 ϕ を永久磁石磁束 ϕ_f と同じ大きさに制御しようとするとき、磁束誤差 $\Delta\phi$ は次式で表される。

$$\Delta\phi = \phi_f - \phi_f \cos \theta - Li_\gamma \dots\dots\dots(3)$$

θ が小さい場合、以上の式から次式が得られる。

$$\Delta\phi = \frac{L^2}{2\phi_f} i_\delta^2 - Li_\gamma \dots\dots\dots(4)$$

一方、図の状態での永久磁石モータの γ 、 δ 軸電圧 v_γ 、 v_δ は次式で与えられる。なお、 R は固定子抵抗である。

$$\begin{bmatrix} v_\gamma \\ v_\delta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 \\ 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\gamma \\ i_\delta \end{bmatrix} + \omega \begin{bmatrix} 0 \\ \phi_f \end{bmatrix} \dots\dots\dots(5)$$

ここで、(4)式で得られた磁束誤差によるフィードバック項を(5)式に加え、以下の γ 、 δ 軸電圧指令 v_γ^* 、 v_δ^* を得る。 K_γ 、 K_δ はフィードバックゲインである。

$$\begin{bmatrix} v_\gamma^* \\ v_\delta^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 \\ 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\gamma \\ i_\delta \end{bmatrix} + \omega \begin{bmatrix} 0 \\ \phi_f \end{bmatrix} + \Delta\phi \begin{bmatrix} K_\gamma \\ K_\delta \end{bmatrix} \dots\dots\dots(6)$$

上記電圧指令を所望の周波数で永久磁石モータに与えることにより、速度制御系を構成することができる。

以上に述べた方式によって構成した永久磁石モータのセンサレス制御系の構成を図2に示す。なお図の構成では、

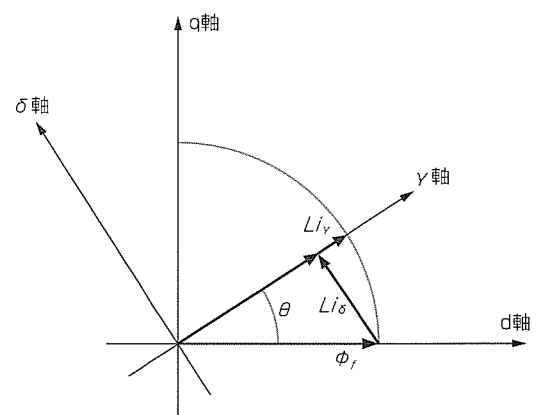


図1. 永久磁石モータのベクトル図

負荷急変等の過渡状態での制御系の安定性を確保するため、指令周波数 ω_m^* に対して、負荷電流を用いて一次周波数 ω_1 を調整する周波数補償器を加えている。

なお、上記のセンサレス制御系は誘起電圧を基に磁束制御を行っているため、モータ停止時には制御軸を磁束軸方向に合わせることはできない。そのため、モータ停止状態で無負荷に近い場合は適当な方向に制御軸をとって引き込むことも可能であるが、停止状態から負荷が掛かる状態では同期に引き込むことができず制御不能になる。

そこで、停止状態でも磁極位置を推定できる方式の検討を行った。UVWの各相に正負の電圧パルスを印加すると各相にパルス電流が流れるが、その大きさは、図3に示すように、電圧パルスの方向で異なる。これは、永久磁石モータにおいては、磁気飽和のため回転子位置によって各相のインダクタンスが変化するためである。このパルス電流波形信号を処理して磁極位置を求めることができる。

上記に述べた永久磁石モータのセンサレス制御及び磁極位置検出方式を用いたシステムの性能例として、100%負荷での停止状態から起動・加速運転を行ったときの運転波形を図4に示す。良好な制御特性が得られていることが確認できる。

2.3 誘導モータのセンサレスベクトル制御

誘導モータを高応答に駆動するには、トルク制御が可能なベクトル制御を用いる必要がある。ベクトル制御を行うには回転子磁束の方向(回転子磁束ベクトル)を知る必要があり、通常は回転速度センサからの速度情報を用いてこれ

を算出する。回転速度センサを用いずに回転子磁束ベクトルを求める方法として、磁束オブザーバを用いる方法がある。

誘導モータの電圧方程式から、入力を固定子電圧 v_s 、出力を固定子電流 i_s 、固定子磁束 Φ_s 及び回転子磁束 Φ_r を状態変数と考えた状態方程式を導けば、次式が得られる。

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \Phi_s \\ \Phi_r \end{pmatrix} = A \begin{pmatrix} \Phi_s \\ \Phi_r \end{pmatrix} + Bv_s \dots\dots\dots(7)$$

$$i_s = C \begin{pmatrix} \Phi_s \\ \Phi_r \end{pmatrix} \dots\dots\dots(8)$$

なお上式において、Aは回転子速度 ω_r を含む係数行列、B、Cは ω_r を含まない係数行列である。これに対して以下の同次元オブザーバを構成すれば、入出力から状態変数を再現することができる。なお式中、Hはオブザーバのフィードバックゲインであり、符号 $\hat{}$ がついた値は推定値を表す。

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \hat{\Phi}_s \\ \hat{\Phi}_r \end{pmatrix} = \hat{A} \begin{pmatrix} \hat{\Phi}_s \\ \hat{\Phi}_r \end{pmatrix} + Bv_s - H(\hat{i}_s - i_s) \dots\dots\dots(9)$$

$$\hat{i}_s = C \begin{pmatrix} \hat{\Phi}_s \\ \hat{\Phi}_r \end{pmatrix} \dots\dots\dots(10)$$

ここで未知パラメータである回転子速度 ω_r を求めるため、パラメータ調整則を次式で与える。

$$\hat{\omega}_r = k_{ap} \frac{(J\hat{\Phi}_r)^T e}{|\hat{\Phi}_r|^2} + \frac{K_{ap}}{T_{api}} \int \frac{(J\hat{\Phi}_r)^T e}{|\hat{\Phi}_r|^2} dt \dots\dots\dots(11)$$

このオブザーバは式(11)を用いて回転子速度 ω_r を適応同定しながら磁束推定を行うので、適応磁束オブザーバと呼ばれる。

なお、式(9)、(10)で表されるオブザーバの安定性は、回転子速度 ω_r の影響を受ける。このため、必要な動作領域でオブザーバの安定性を確保するには、回転子速度 ω_r を参照してフィードバックゲインHを変化させる必要がある。

以上に述べた適応磁束オブザーバを用いて回転子速度 ω_r を推定することができ、これにより、ベクトル制御系を構

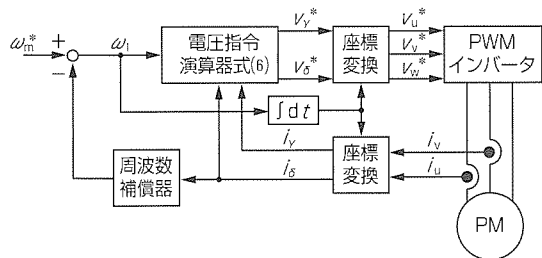


図2. 永久磁石モータのセンサレス制御系の構成

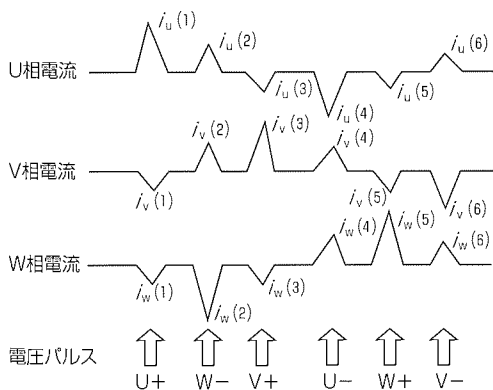


図3. 停止時の磁極位置検出方式波形

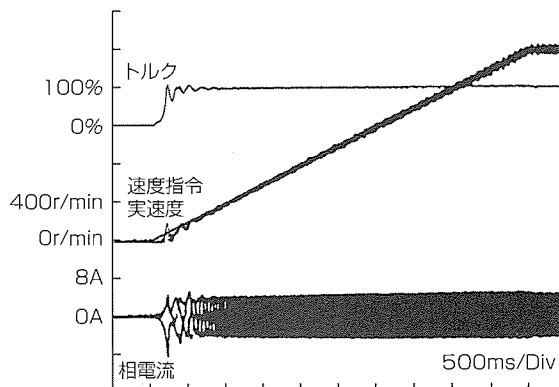


図4. 負荷状態起動・加速波形(0.4kW)

成することができる。図5に上記オブザーバを用いた誘導モータのベクトル制御系の構成を示す。

以上に述べた誘導モータのセンサレスベクトル制御系を用いたシステムの性能例として、低速域の速度トルク特性を図6に、加減速運転の波形を図7に示す。図から、一般に誘導モータのセンサレス制御が困難とされている低速域でも良好な特性が得られていることが確認できる。

3. 最新の高精度トルク制御技術

3.1 高精度トルク制御技術の動向

モータの回転子位置又は速度を検出するセンサを用いるベクトル制御方式においては、付加価値を高めて製品競争力を向上するため、従来以上の高精度なトルク制御性能が要求されている。

トルク制御特性が変動する現象には、平均的な変動(トルク定数変化)と交差的な変動(トルクリプル)がある。これらの現象を発生する要因としては、以下のものが考えられる。

- (1) 誘導モータの場合：モータ定数の運転条件による変化に伴う磁束演算誤差
- (2) 永久磁石モータの場合：誘起電圧定数の変動、回転子位置によるインダクタンス変動や永久磁石着磁波形の

ひずみ等によるコギングやトルクリプル

- (3) 共通の課題：電流センサのオフセットやゲイン誤差、及びインバータ素子の短絡防止時間による電圧出力誤差がもたらすトルクリプル

以上の課題に対して様々な技術の開発が行われているが、本稿では、上記(1)項に対応した誘導モータの制御技術例を紹介する。

3.2 誘導モータのセンサ付き高精度ベクトル制御

一般に、誘導モータのベクトル制御においては、回転子速度と固定子電圧周波数の差である滑り周波数及び固定子電流により、回転子磁束の方向と大きさを算出して制御を行う。この演算にはモータ定数を用いるが、モータ固定子及び回転子の回路抵抗はモータの温度変化によって値が変化する。このため、運転条件によってモータ温度が変化すると、磁束制御の精度が低下し、結果としてトルク定数が変化する。

以上の問題に対する方式として、磁束オブザーバを用いたセンサ付きベクトル制御方式を検討した。

2.3節で述べた磁束オブザーバにおいて、回転子速度 ω_r にセンサから得られる真値を用いて式(9)を書き直せば以下のとおりである。

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \hat{\Phi}_s \\ \hat{\Phi}_r \end{pmatrix} = A \begin{pmatrix} \hat{\Phi}_s \\ \hat{\Phi}_r \end{pmatrix} + B V_s - H (\hat{i}_s - i_s) \quad \dots\dots\dots(12)$$

2.3節で述べたセンサレス制御方式では回転子速度にかかわらず磁束オブザーバが安定に動作するようにフィードバックゲインHを設計したが、この制御方式においては、システムに対する外乱としての抵抗変化に対して、状態変数の誤差が最小となるようなオブザーバのフィードバックゲインを求めることが肝要である。誘導モータの回転子及び固定子の回路抵抗が初期値から変化したとき、状態方程式においては係数行列Aのみに上記抵抗値が含まれるため、式(7)は次のように変化する。

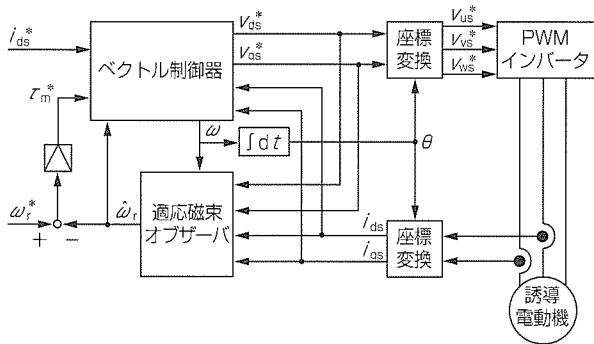


図5. 適応磁束オブザーバを用いたベクトル制御系

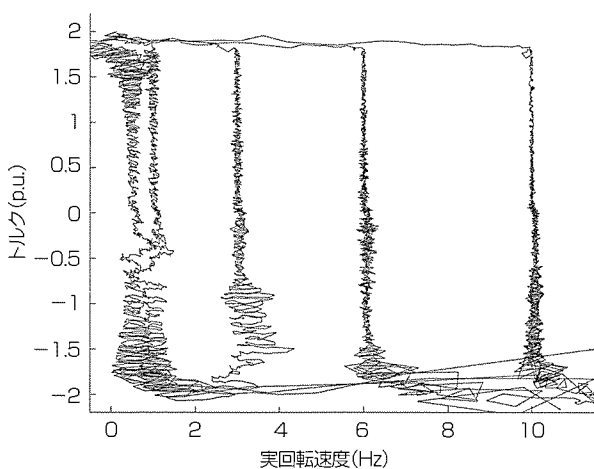


図6. 速度-トルク特性 (3.7kW機, 低速域)

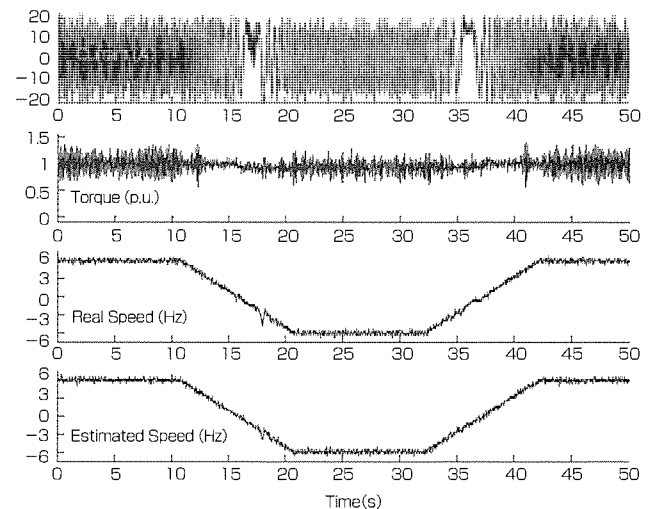


図7. 加減速運転 (3.7kW機)

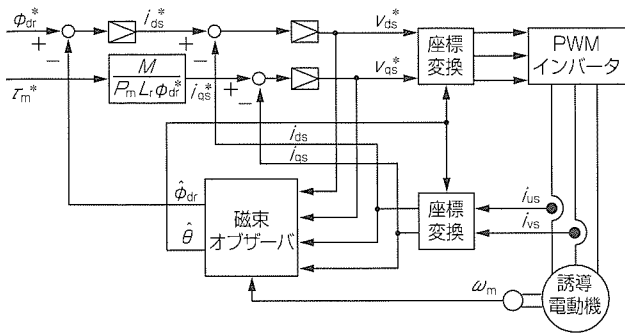


図8. 磁束オブザーバを用いたセンサ付きベクトル制御系の構成

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \Phi_s \\ \Phi_r \end{pmatrix} = (A + \Delta A) \begin{pmatrix} \Phi_s \\ \Phi_r \end{pmatrix} + Bv_s \dots\dots\dots(13)$$

上記のパラメータ変動 ΔA に対して磁束誤差が最小になるようなフィードバックゲイン H を求めれば、抵抗変動に対してロバストな磁束推定を行うことができる。図8に磁束オブザーバを用いたセンサ付きベクトル制御系の構成を示す。従来の滑り周波数形ベクトル制御の磁束演算器の代わりに磁束オブザーバが用いられ、その状態変数である回転子磁束ベクトルから求めた磁束の大きさ及び方向を、磁束制御系及び座標変換に用いている。

図9に上記方式を基に改良・変更を加えたベクトル制御系のトルク制御特性を従来のものと比較して示す。図から、上記方式(図中高精度トルク制御方式)によってモータ温度の変化に対するトルク制御の安定性が格段に向上していることが分かる。

4. む す び

以上、当社において進めているモータ駆動制御技術開発の最近の状況について述べた。モータを用いた駆動システ

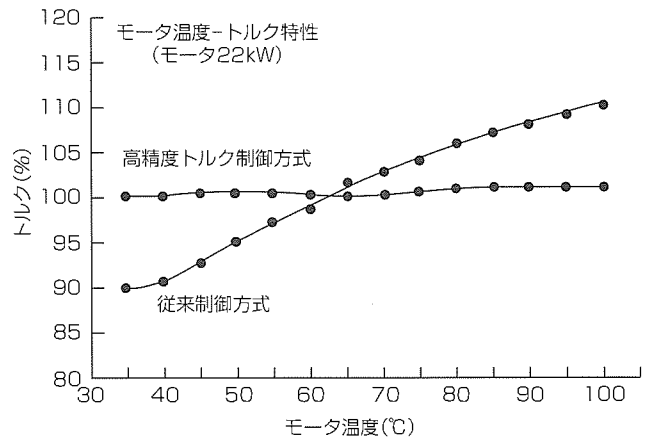


図9. 高精度トルク制御方式の効果

ムは、近年の電車交通の発展やハイブリッド自動車の普及に見られるように、クリーンで省エネルギーな動力変換装置として、その役割は今後一層重要になる。それとともに、モータ駆動制御技術に求められる要求はますます大きくなるものと予想される。これらの要求にこたえるため、今後とも技術開発に努める所存である。

参 考 文 献

- (1) 貝谷敏之：マグネットモータのセンサレス制御，2001モータ技術シンポジウム，A-5-2，2.1~2.10 (2001)
- (2) 金原義彦，ほか：低速・回生領域を含む誘導電動機の世界センサレスベクトル制御法，電気学会論文誌D，120，No.2，223~229 (2000)
- (3) 金原義彦，ほか：抵抗変動にロバストな最適オブザーバを用いた誘導電動機のベクトル制御法，電気学会論文誌D，121，No.8，902~907 (2001)

最新のモータ製造技術

三宅展明*

要旨

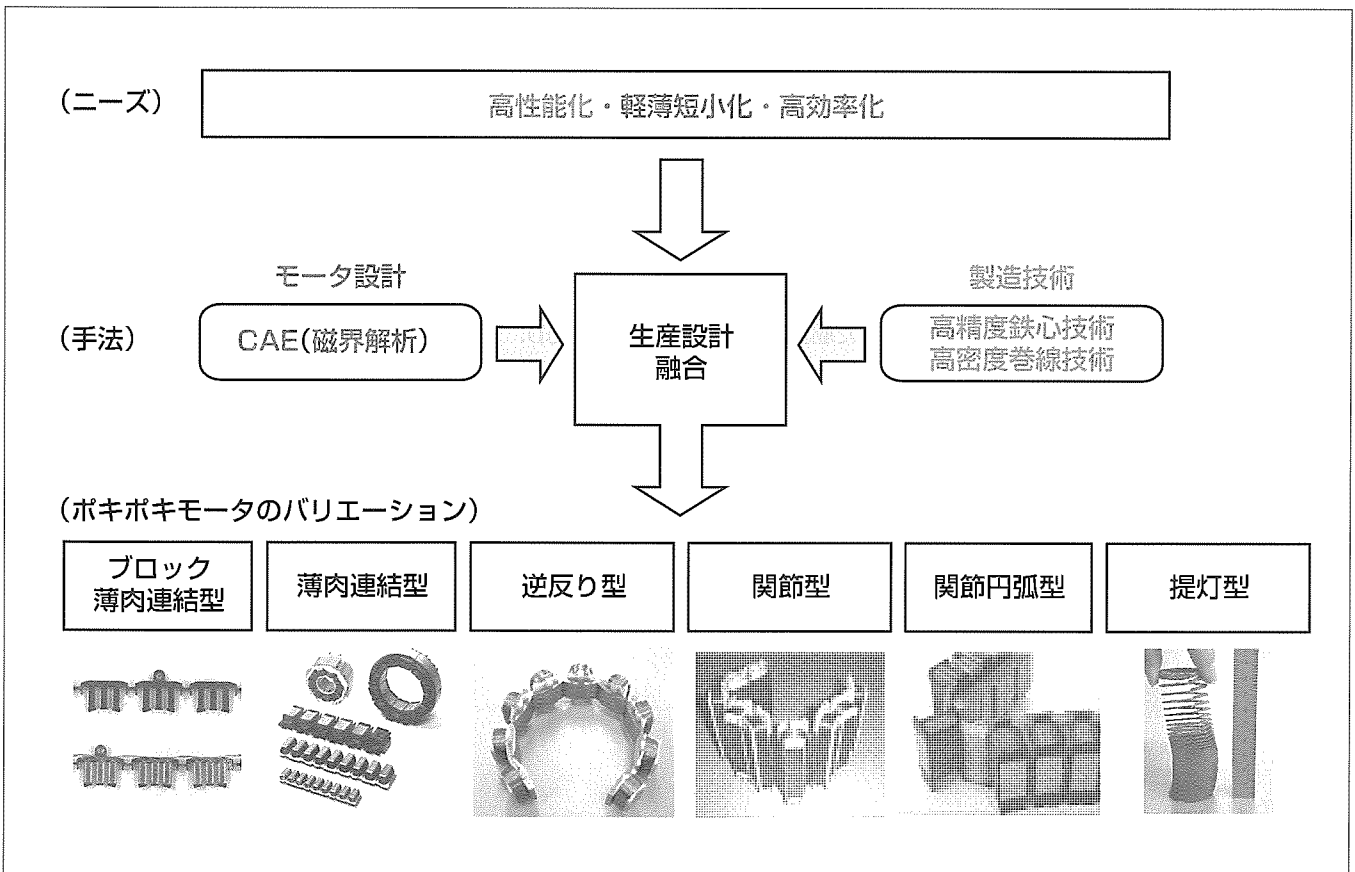
近年、地球環境保護の観点から、モータの省エネルギー・高効率化のニーズがおう(旺)盛であり、従来主流であった誘導モータに代わって、小型・高効率を特長とするブラシレスDCモータが急速に普及している。ブラシレスDCモータにおいて、ロータには高性能希土類磁石が採用されるとともに、ステータでは磁極歯ごとにコイルが配置される磁極集中巻きが増えている。

従来、インナロータ型ステータにコイルを巻線するためには、ステータ内側の狭あい(隘)なスペースから巻線ノズルをスロット開口部に通過させて磁極歯周りに駆動する必要があり、コイルの整列性や巻線速度に限界があった。これらを改善するための手法として鉄心を分割する方式があるが、部品点数の増大やコイル端末線の接続数が増える等の課題があった。

三菱電機では、このような従来のステータ製造方法の課題を解決するために、1993年に通称“ポキポキモータ”という独自のステータ構造と、これに基づく“展開した鉄心に巻線してから丸める”という製造プロセスを考案した。このステータ構造と製造プロセスによれば、組立性や接続性を損なうことなく、分割鉄心と同等に巻線作業のためのスペースを確保して、小型・高効率モータを得ることができる。

ポキポキモータを情報機器、FA機器、家電機器、自動車機器、昇降機等の分野に適用するに当たり、ブロック薄肉連結型、薄肉連結型、逆反り型、関節型、関節円弧型、提灯型というバリエーションを開発した。

今後、モータの分解性やリサイクル性等の新たな観点から製品設計を見直し、ポキポキモータを更に展開していく所存である。



ポキポキモータ

鉄心構造と巻線方法に着目して製品設計を見直すことにより、通称“ポキポキモータ”という独自のステータ構造と、これに基づく“展開した鉄心に巻線してから丸める”という製造プロセスを考案した。ポキポキモータを種々の分野に適用するに当たり、ブロック薄肉連結型、薄肉連結型、逆反り型、関節型、関節円弧型、提灯型というバリエーションを開発し、高性能化、軽薄短小化、高効率化のニーズにこたえることができた。

1. ま え が き

モータは、170年にも及ぶ歴史の中ではぐく(育)まれ、基本的な形態は踏襲しながらも高信頼性、高機能性に飛躍的な進歩を遂げている電気機械である。既に成熟したと思われるが、製品の付加価値向上、とりわけ地球環境保護の観点から省エネルギー・高効率化のニーズが旺盛であり、モータ開発はますます活発化している。

最近、モータ関連製品において、従来主流であった誘導モータに代わって、小型・高効率を特長とするブラシレスDCモータが各分野で急速に普及している。ブラシレスDCモータにおいて、ロータには高性能希土類磁石が採用されるとともに、ステータでは磁極歯ごとにコイルが配置される磁極集中巻きが増えている。

当社では、1993年から通称“ポキポキモータ”と呼ぶ独自のステータ構造を考案し、情報機器、FA機器、家電機器、自動車機器、昇降機等の分野で高性能化、軽薄短小化、高効率化のニーズにこたえてきた。

本稿では、ポキポキモータの発想プロセス、各製品に適用してきたバリエーション、今後の展開を紹介する。

2. 発想のプロセス

従来、インナロータ型ステータにコイルを巻線するためには、図1に示すように、巻線ノズルがステータ内側の狭隘なスペースからスロット開口部を通り磁極歯周りに駆動する必要があった。マグネットワイヤを積積み状に整列して巻くためには、高価な巻線機を使って非効率に生産しなければならなかった。

巻線の生産性を上げるために一般的に用いられる手法として、図2に示すように、鉄心を分割する方式がある。巻線作業は改善されるが、部品点数の増大やコイル端末線の接続数が鉄心分割数に応じて増える等の課題がある。

当社では、分割鉄心の課題を解決するため、巻線時には分割鉄心と同等に巻線作業のためのスペースを確保しながら組立性・接続性を損なわない独自の構造を考案した。

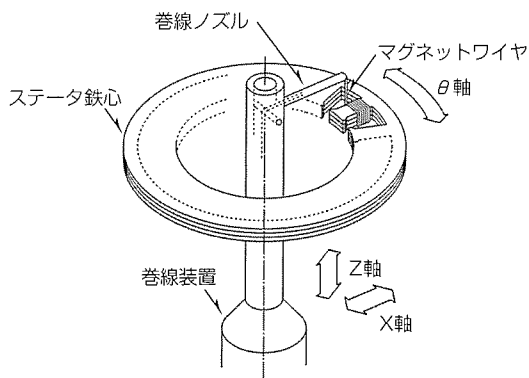


図1. 従来の巻線

3. ポキポキモータのバリエーション

3.1 ブロック薄肉連結型ポキポキ鉄心

情報機器が急速に普及する中で、携帯性を損なうことのない薄形ニーズが高まっており、記憶媒体を回転駆動させるスピンドルモータの極薄化が必ず(須)となっている。

例えば、FDD用途では、アウトロータ型が最も普及しているが、コストパフォーマンス良く薄形化するためには、磁気ヘッドとの干渉部を切り欠いてステータ容積を大きく稼げるインナロータ型が最も有利である。また、コイル発熱を軸受から遠ざけて軸受温度の上昇を抑えたり、放熱性を良くすることができる。

図3は、三つの磁極歯を一つのブロックとし、五つのブロックとステータ切り欠き部に配置される磁気バランスを薄肉の鉄心で直線状に連結したブロック薄肉連結型ポキポキ鉄心を示している。巻線時には、UVW相の3本の巻線ノズルを一括に駆動して、ブロック間の渡り線を切らずに連続して巻線する。巻線後、鉄心薄肉部を曲げ、本来の円筒状ステータを形成する。この構造によれば、巻線では多数個の鉄心と多数本の巻線ノズルが対面配置となり、シンプルな機構によって高速に整列巻きが可能となる。また、コイル端末の接続箇所と部品点数が大幅に減り、組立性向上が実現できる。

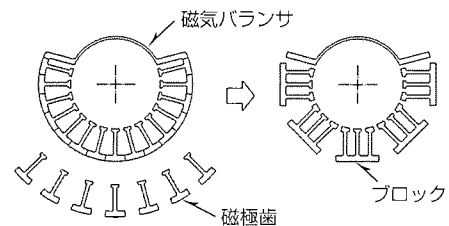


図2. 従来の分割鉄心

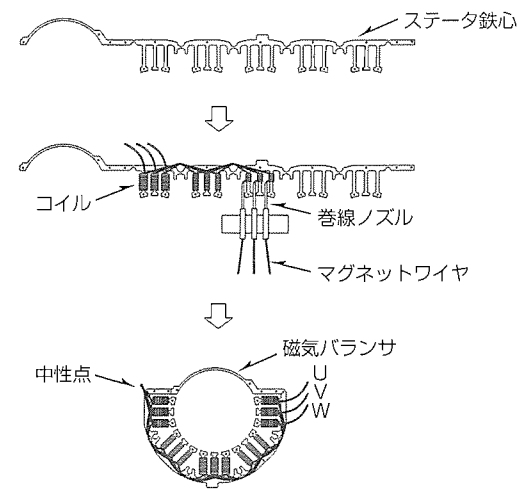


図3. ブロック薄肉連結型ポキポキ鉄心

3.2 薄肉連結型ポキポキ鉄心

FA機器用のACサーボモータは、ロボット、実装機、半導体装置、成形機等で多く採用されており、高機能化(高速高精度、高応答、低トルクリプル)に加え、一層の小型軽量化が求められている。

小型軽量化を達成するためには、①コイルの高密度化、②ロータ磁石の高性能化、③放熱性の向上、④電磁気設計の最適化が有効である。それらの中で、コイルの高密度化を達成するには、ステータのスロット内のコイルを整列化しなければならない。また、低トルクリプル化を達成するためには、スロットの開口部の幅寸法を巻線ノズルの太さ以下にすると最適値があることが磁界解析から分かっている。

図4は、磁極歯ごとに分割されバックヨークで薄肉部を介して連結された直線状の薄肉連結型ポキポキ鉄心を示している。この鉄心構造によれば、巻線時に磁極歯間が大きく開くため、整列状態のコイルをスロット内に最大限に高密度化できるとともに、鉄心折り曲げ後のスロット開口幅を最適値まで狭くすることができる。

図5にACサーボモータのステータを示す。

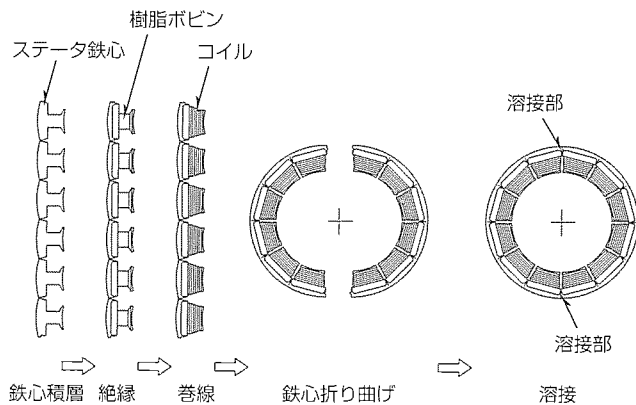


図4. 薄肉連結型ポキポキ鉄心

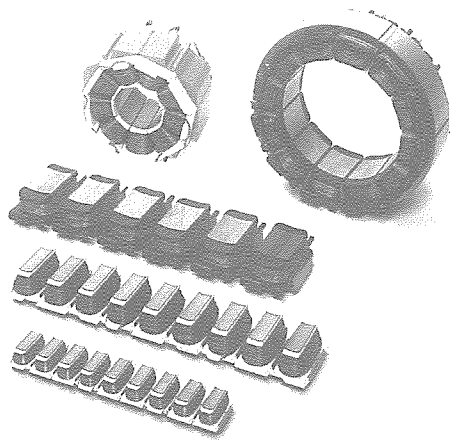


図5. ACサーボモータ(ステータ)

3.3 逆反り型ポキポキ鉄心

エアコン等の家電機器に用いられるファンモータは、省エネルギー・高効率化のニーズにこたえるため、従来の誘導モータからブラシレスDCモータへの転換が進展している。高効率化には、コイル発熱(銅損)を抑えるため、コイル密度の向上とコイル周長減を達成する必要がある。また、ファンモータのステータ仕様は比較的にコイル線径が細く巻数が多いので、巻線スピードの高速化が望まれる。

図6及び図7は、薄肉連結型ポキポキ鉄心を巻線時に逆反り姿勢とする逆反り型ポキポキ鉄心を示している。巻線時に逆反り姿勢とすることにより、直線状の姿勢に比べて約2倍に展開角度を増やすことができる。そして、鉄心の積厚が磁極歯間の寸法に比べて小さい場合、巻線ノズルの軌道を円にすることができる。すなわち、巻線ノズルをフライヤ先端に取り付け、フライヤを回転させることで高速巻線が実現できる。

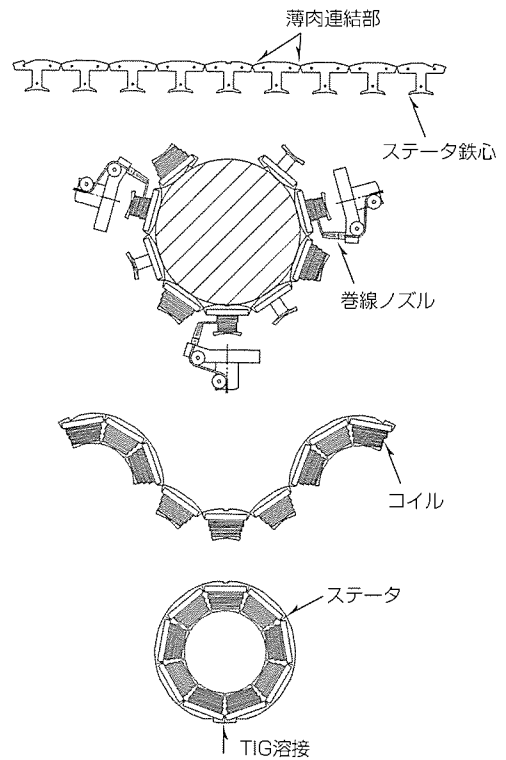


図6. 逆反り型ポキポキ鉄心

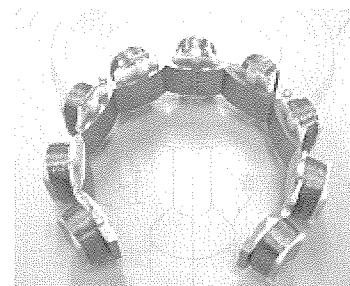


図7. ファンモータ(逆反り姿勢のステータ)

3.4 関節型ポキポキ鉄心

ポキポキ鉄心を逆反り姿勢とすることは、巻線スペースが拡大し、高速高密度巻線に有効である。鉄心の積厚が磁極歯間の寸法に比べて大きい場合、図8に示すように、磁極歯ごとに自在に屈曲できれば、巻線される磁極歯の周りをオープンな状態とすることができる。

図9は、関節型ポキポキ鉄心の関節部の外観である。関節部では鉄心材が1枚ごとにラップしており、そのラップ部位の回転中心に凹凸が形成され、それらが積み重なってちょう(蝶)番のように振る舞うものである。この鉄心構造は、順送金型内で従来の一体型の鉄心と同等の打ち抜き速度で円筒状に積層される。

図10は、圧縮機用モータのステータを示している。コイルは俵積み状態に整列巻きされている。巻線後、ステータは再び円筒状に形成され、モータフレームに圧入又は焼きばめされる。その状態では、鉄心の分割面に接触応力が均等に作用し、一体型鉄心と同等の剛性と真円度を得ることができる。

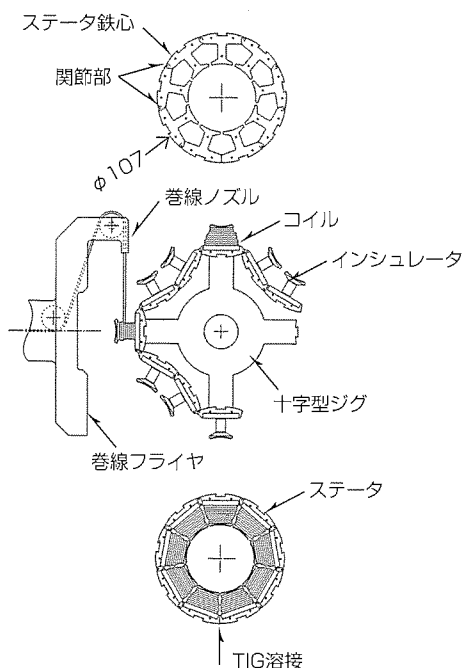


図8. 関節型ポキポキ鉄心

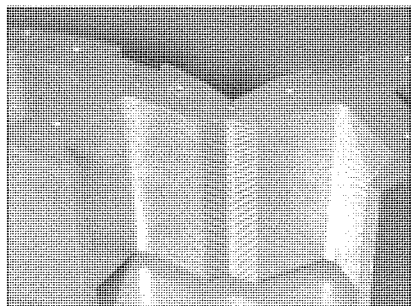


図9. 関節部

3.5 関節円弧型ポキポキ鉄心

エレベーターは、建築物の省スペース化のニーズから、屋上の機械室をなくし、昇降路内の乗りかごと壁のすき(隙)間に巻上機を配置するタイプが増えている。エレベーターの品質は乗り心地、高速性、静粛性であり、低トルクリプルのダイレクトドライブモータが不可欠となる。

一般に、トルクリプルはステータの磁極歯数とロータ磁石の極数との最小公倍数の値に関与することから、薄形大口径化は巻上機として望ましいことになる。また、薄形大口径化をインナロータ型モータで実現すれば、巻上機に必須のブレーキ機構をロータ内にビルトインでき、よりコンパクトな構成が可能となる。

図11は、巻上機用モータの関節円弧型ポキポキ鉄心である。図中のステータ鉄心は、汎用プレス機で扱える長さの円弧状に積層され、打ち抜き時の鋼飯の歩留りやマテハン性が向上している。巻線では、図12に示すように、鉄心を逆反り姿勢とし、整列巻きが達成されている。巻線後、再び円弧状に形成された鉄心は、1ステータ分、リング状に集められ、各々のつなぎ目が溶接される。ワニス処理後、フレームに焼きばめされ、ステータの精度と剛性が確保される。なお、この方式によれば、ステータ径に応じて分割数を変えられるので、円弧状鉄心の長さがほぼ統一でき、多品種少量生産にも対応しやすい。

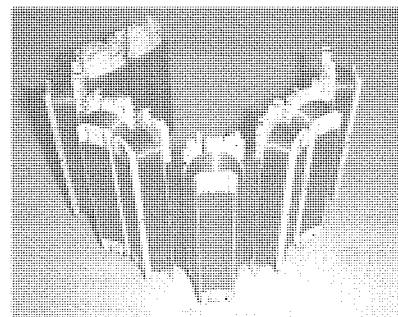


図10. 圧縮機用モータ(関節型ステータ)

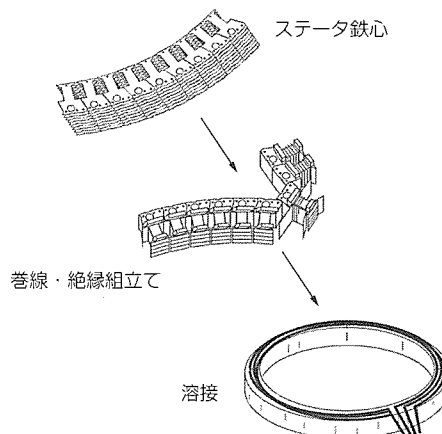


図11. 関節円弧型ポキポキ鉄心

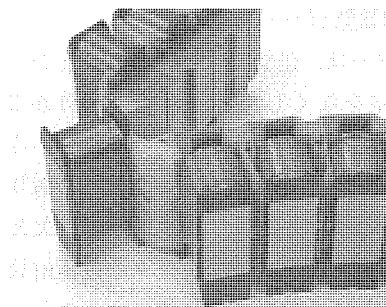


図12. 巻上機用モータ(円弧状鉄心)

3.6 提灯型ポキポキ鉄心

生産量の多い薄形スピンドルモータでは、ステータ製造工程のマテハンに関して、一層の生産性向上が望まれる。例えば、鋼板5枚からなる鉄心を毎分300ストロークの打ち抜き速度で積層する場合、鉄心を排出するサイクルタイムは1秒と短い。この鉄心をプレス機から取り出し、絶縁塗装や巻線等の工程へ搬送・位置決めする作業は、多くの手間を要する。

図13は、提灯型ポキポキ鉄心を示している。鉄心は、順送金型内で、ステータ複数個分を順次連結しながら円筒状に積層される。絶縁塗装後、一度、直線状に展開され、巻線・切断後、再び折り曲げられ、円筒状のステータに組み立てられる。

図14に示すように、積層鉄心内部でステータ複数個分はらせん状に連結されている。らせん状は、ねじのような一定のリードではなく、階段のような鋼板の段差で形成される。鋼板1枚分の段差がステータ1個分の中に設けられ、薄肉を介して、次のステータ1個分との橋渡し役となっている。この鉄心構造によれば、ステータ複数個分を一括して効率良く搬送できるとともに、ステータ1個分は薄肉で容易に切断・分離することができる。

4. む す び

鉄心構造と巻線方法に着目して製品設計を見直すことにより、通称“ポキポキモータ”という独自のステータ構造と、これに基づく“展開した鉄心に巻線してから丸める”という製造プロセスを考案した。

ポキポキモータを情報機器、FA機器、家電機器、自動車機器、昇降機等の分野に適用するに当たり、ブロック薄肉連結型、薄肉連結型、逆反り型、関節型、関節円弧型、提灯型というバリエーションを開発し、高性能化、軽薄短小化、高効率化のニーズにこたえることができた。

今後、モータの分解性やリサイクル性等の新たな観点から製品設計を見直し、ポキポキモータを更に展開していく所存である。

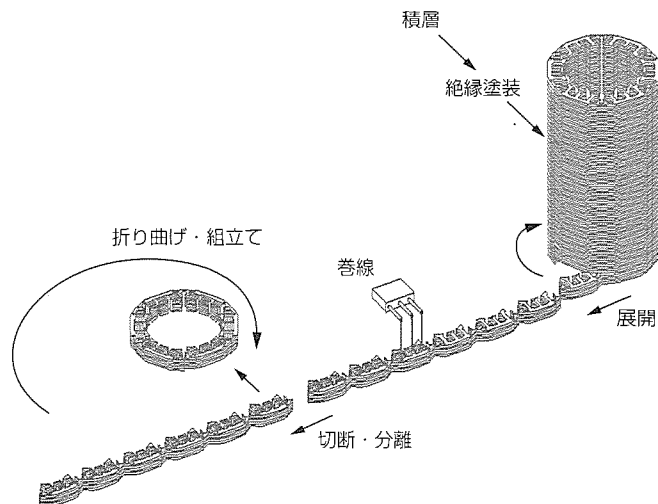


図13. 提灯型ポキポキ鉄心

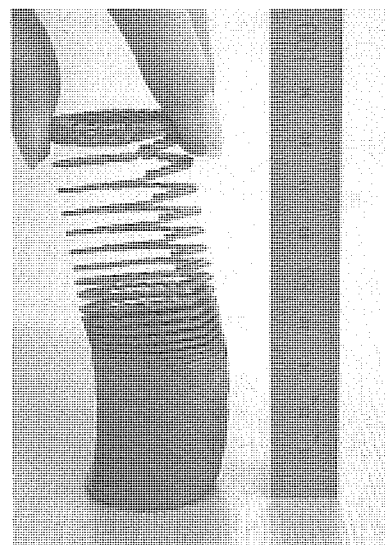


図14. 提灯型鉄心の積層状態

参考文献

- (1) 池田洋一, ほか: 新形汎用ACサーボモータの生産技術, 三菱電機技報, 72, No.4, 303~306 (1998)
- (2) 中原裕治, ほか: ポキポキモータの車載機への応用, 三菱電機技報, 74, No.9, 579~582 (2000)
- (3) 秋田裕之, ほか: エアコン用圧縮機モータの省エネルギー・高効率化, 三菱電機技報, 75, No.10, 655~658 (2001)
- (4) 井上健二, ほか: 三菱新機械室レスエレベーター用薄形巻上機, 三菱電機技報, 75, No.12, 772~776 (2001)



特許と新案 * * *

三菱電機は全ての特許及び新案を有償開放しております

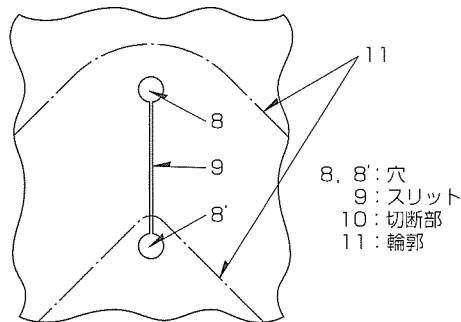
有償開放についてのお問合せは
三菱電機株式会社 知的財産渉外部
電話(03)3218-9192(ダイヤルイン)

積層コアの製造方法 (特許 第3181029号, 特開平10-271771号)

この発明は、ポキポキモータの積層コアを、直線状に展開された形態でなく、分割されていない一体型コアと同等の形態でプレス抜きするために考案されたものである。

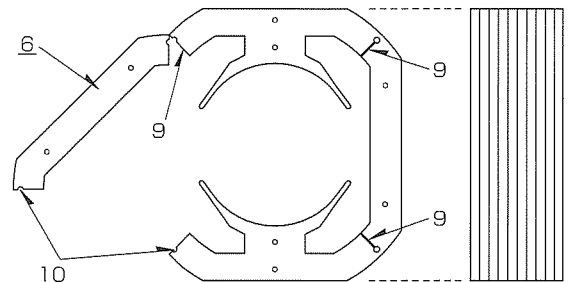
従来、ポキポキモータの積層コアは、直線状に展開された形態で、その短手方向と金型の順送り方向が一致するようにプレス抜きされる。直線状に展開された長さがステータ外径の約3倍になることから、外径寸法の大きいモータになると、既存の設備が使えず大きなベッドサイズのプレス機が必要となっていた。

この発明では、順送プレスの金型内において、ポキポキモータの薄肉連結部に相当する部位に一对の穴(8)を形成する工程と、これら穴(8)間



発明者 中原裕治, 三宅展明, 東 健一
にスリット(9)を形成する工程と、コアの輪郭(11)を形成する工程によって、一体型コアと同等の形態でポキポキモータの積層コアをプレス抜きすることができる。

この積層コアは、環状の形態でありながらスリット(9)と切断部(10)が形成されているため、コイル巻きを実施する前にコアを展開することができ、巻線後に再び環状に戻してステータを形成することができる。

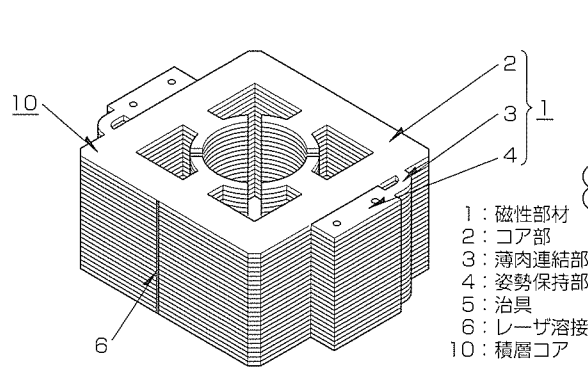


積層コアおよび該積層コアの製造方法 (特許 第3180687号, 特開平10-127015号)

この発明は、磁路となるコア部(2)に抜きかしめがなく、積層ずれの影響を受けずに高精度な積層コアを生産性よく得るために考案されたものである。

従来、高生産性に積層コアを得るには、順送金型内でコア部材の数箇所凹凸状のダボを形成し、同位置に形成されたダボ同士をブランク抜きと同時にかしめて積層固定していた。この方法では、積層ずれがある方向に累積するので、ダボの形状が0.001mmの精度であっても、0.5mm厚さのコア部材を200枚積むと100mm厚さの積層コアが0.2mm傾くこととなる。

この発明では、コア部(2)及び薄肉連結部(3)を介して姿勢保持部(4)を持った形状の磁性部材(1)を形成し、姿勢保持部(4)に配置した抜きかしめで金型内で積層固定し、金型外で治具(5)でコア部(2)を矯正した状態でレーザー溶接



発明者 中原裕治, 木枝銅希, 中山喜敬
(6)等で積層固定している。このとき、コア部(2)と姿勢保持部(4)との間で生じるひずみは、薄肉連結部(3)で吸収されることとなり、抜きかしめによる積層誤差に影響されることなく、高精度のコアを生産性よく得ることができる。

なお、姿勢保持部(4)は、製品に邪魔であれば、積層固定の後に折り曲げたり除去することができる。



特許と新案***

三菱電機は全ての特許及び新案を有償開放しております

有償開放についてのお問合せは
三菱電機株式会社 知的財産渉外部
電話(03)3218-9192(ダイヤルイン)

回転電機 (特許 第2564801号, 特開昭62-268347号)

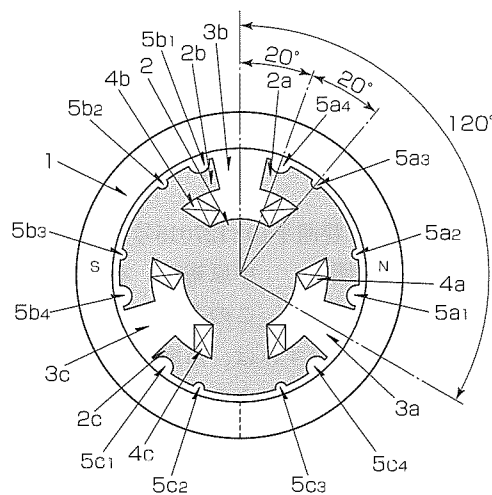
発明者 横山 博, 阪部 茂一

この発明は、複数の極磁を持つ界磁部と対向配置される主突起部がある電機子鉄心を備えた回転電機に関するものである。

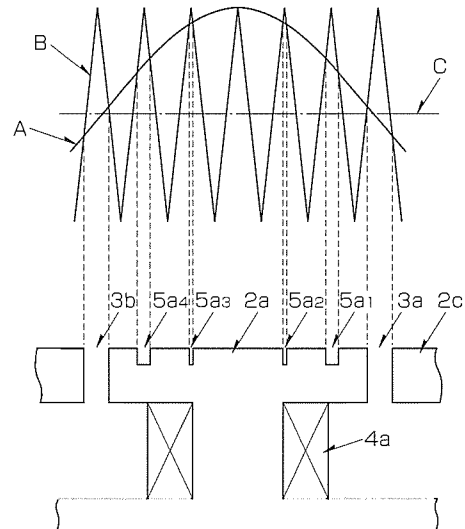
このような回転電機(モータ)は小型、軽量で大きな出力が得られる利点があるが界磁部が第2次調波成分を基本成分として第4次, 第6次, 第8次...等の高調波成分を含んでおり, 電機子鉄心が主突起部の磁気的不均一性から第3次調波成分を基本成分として第6次, 第9次, 第12次...等の高調波成分を含んでいるため第6次, 第12次, 第18次, ...等の調波成分が主に影響してコギング力が発生する問題点がある。

この発明では, 電機子鉄心の各主突起部における対向面に, 半周期が $2\pi/S$ であり, 隣接主突起部との快打の巻線

用溝の中心位置を零位相とする正弦波の正半波と, $2\pi/S \cdot (m+1)$ (ただし m は2以上で, 一つの主突起部の設けようとする補助溝形成位置の数)の周期を持ち, 上記正弦波と同振幅で上記巻線用溝の中心位置を正の頂点とする三角波の各正半波との幾何学的交点から求められる幅の補助溝を上記三角波の正の各頂点位置にそれぞれ形成したもので, 複数の補助溝が電機子鉄心の磁気的不均一性の調波成分における基本的調波成分の比率を高め, コギング力に関係する高調波成分を減少させることが可能になり高性能な回転電機を実現できる。



- 1: 界磁部
- 2: 電機子鉄心
- 3: 主突起部
- 4: 巻線
- 5: 補助溝



<本号記載の商標について>

本号に記載されている会社名, 製品名はそれぞれの会社の商標又は登録商標である。

<次号予定> 三菱電機技報 Vol.76 No.7 「最近のプラント建設工事」特集

三菱電機技報編集委員 委員長 井手 清 委員 高橋 大 畑谷正雄 堤 清英 柴原幸志 村松 洋 松本 修 浜 敬三 石野 禎将 中川博雅 中島克人 荒木政敏 黒畑幸雄 山木比呂志 事務局 松本敬之 本号取りまとめ委員 長尾政志	三菱電機技報 76巻6号 (無断転載・複製を禁ず) 印刷 2002年6月22日 発行 2002年6月25日 編集人 井手 清 発行人 福本 紀久男 発行所 三菱電機エンジニアリング株式会社 e-ソリューション&サービス事業部 〒105-0011 東京都港区芝公園二丁目4番1号 秀和芝パークビルA館9階 電話 (03)3437局2692 印刷所 株式会社 三菱電機ドキュメンテクス 発売元 株式会社 オーム社 〒101-0054 東京都千代田区神田錦町三丁目1番地 電話 (03)3233局0641 定 価 1部735円(本体700円) 送料別
URL http://www.melco.co.jp/giho/	三菱電機技報に関するお問い合わせ先 cep.giho@ml.hq.melco.co.jp

半導体・液晶関連装置や実装機などの分野を中心に、高精度化、高速化、高能率化などの要求が強くなっています。この要求にこたえるために、ボールねじ駆動システムに比べ高速・高加速度特性を得ることができ、かつバックラッシュや摩擦による応答誤差が生じない高精度なシステムを構築できる汎用ACサーボ“リニアサーボLMシリーズ”を製品化しました。

特長

1. 高速、高精度の実現

ダイレクトドライブによる高い剛性とフルクロード制御システムによる高精度な制御で、2m/sも難なくクリア可能で、従来の伝達機構では得られなかった高速・高精度運動を実現できます。

特に、コアレスリニアは、低速でも非常に滑らかな運動を行うことができます。

2. 機械機構をシンプルに

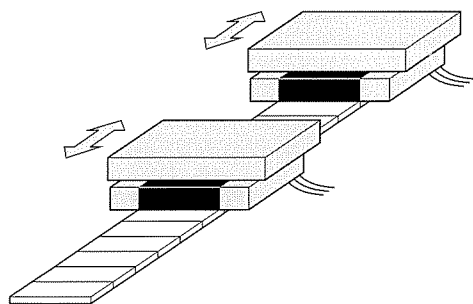
一つの固定子(磁石)上に複数の可動子(コイル)をそれぞれ独立に動かすことができるマルチヘッドシステムにより、シンプルな機械機構を構築できるようになります。

さらに、複数の可動子(コイル)を連結するシステムも簡単に構築できます。

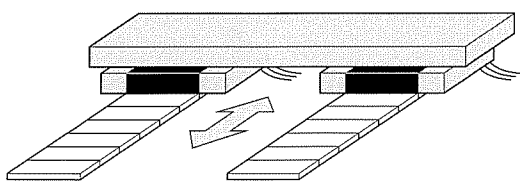
3. 環境にやさしくクリーンな用途に最適

バックラッシュを含む伝達機構がないため、高速運動でも非常に静かな運動が可能です。

また、ボールねじなどを使用しないため、グリースの飛散がなくクリーンな環境でも使用可能です。



マルチヘッドシステム



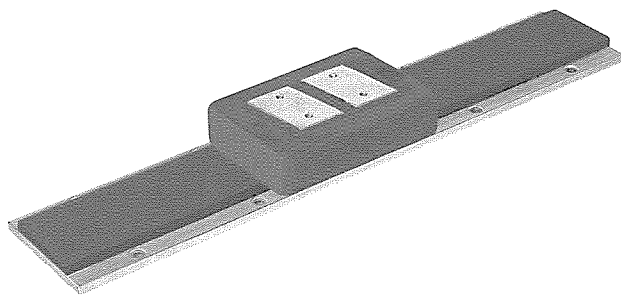
可動子(コイル)連結システム

4. 高性能アンプMR-J2-Superシリーズ対応

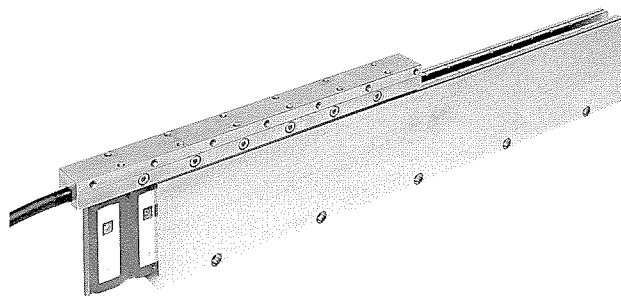
オートチューニング、機械共振フィルタ、マシンアナライザなど好評をいただいておりますセットアップソフトウェアが使用できます。

また、三菱モーションコントローラと組み合わせることにより、同期運転やマルチ運転などが簡単に行えます。

さらに、MR-J2-Superのシリアル通信に対応したリニアスケール(スケールメーカー対応品)により、高速、高精度、高信頼性のシステムが構築可能になり、加えてABS(アブソリュート)スケールを選択していただければ、簡単に絶対位置システムが構築できます。



LM-Hシリーズの外観



LM-Tシリーズの外観

機種構成

シリーズ	構成	推力範囲(N)				
		1	10	100	1,000	10,000
LM-H シリーズ	コア付き			連続 推力		
					最大 推力	
LM-N シリーズ	コア付き			連続 推力		
					最大 推力	
LM-T シリーズ (近日発売)	コアレス	連続 推力				
				最大 推力		