

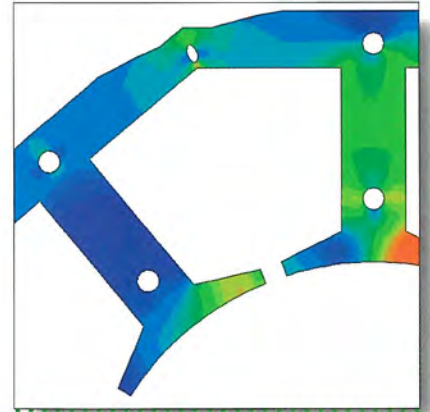
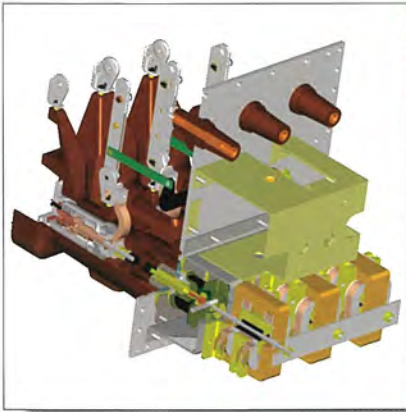
MITSUBISHI

三菱電機技報

Vol.79 No.11

2005 11

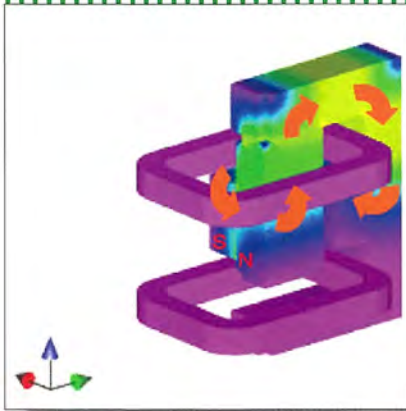
特集「最新の電磁駆動技術」



$$I_{coil}(t) \cdot (R_{coil} + R_{out}) + \frac{d\phi(I_{coil}(t), z(t))}{dI_{coil}} \frac{dI_{coil}(t)}{dt} + \frac{d\phi(I_{coil}(t), z(t))}{dz} \frac{dz}{dt} = E$$

$$m(z(t)) \frac{d^2z}{dt^2} = F_m(I_{coil}(t), z(t)) + F_s(z(t)) + F_{friction}$$

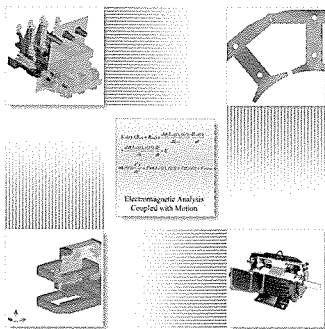
Electromagnetic Analysis
Coupled with Motion



目 次

特集「最新の電磁駆動技術」

電磁駆動技術特集号に寄せて 1 大崎博之	Latest Technologies of Electro-Magnetic Drive Foreword to Special Issue on Electromagnetic Drive <i>Hiroyuki Ohsaki</i>
電磁駆動技術の現状と将来動向 2 小山健一	Current Status and Future Trend of Electro-Magnetic Drive Technology <i>Kenichi Koyama</i>
電磁界運動連成解析による電磁駆動設計技術 7 竹内敏恵	Electromagnetically Actuator Design Technology Using Electromagnetic Analysis Coupled with Motion <i>Toshie Takeuchi</i>
鉄心の詳細な磁気特性を考慮したモータ設計技術 11 大穀見裕・山口信一・中野正嗣・谷 良浩・都出結花利・有田秀哲	Motor Design Technologies Considering Detailed Magnetic Properties in Magnetic Core <i>Akihiro Daikoku, Shinichi Yamaguchi, Masatsugu Nakano, Yoshihiro Tani, Yukari Toide, Hideaki Arita</i>
回転機の鉄損解析技術 15 米谷晴之・谷 良浩	Technologies of Magnetic Power Loss Analysis for Rotating Machines <i>Haruyuki Kometani, Yoshihiro Tani</i>
永久磁石モータの熱減磁評価技術 19 中野正嗣・米谷晴之・川村光弘・宮田浩二	Estimation Technology of Thermal Demagnetization in Permanent Magnet Motors <i>Masatsugu Nakano, Haruyuki Kometani, Mitsuhiko Kawamura, Koji Miyata</i>
駆動制御機器の連成シミュレーション 23 寺田 啓・内田則行・原川雅哉・都出結花利	Multi-Domain-Simulation of Drive Control <i>Kei Terada, Noriyuki Uchida, Masaya Harakawa, Yukari Toide</i>
オブザーバを利用した交流モータの可変速制御技術 27 金原義彦・志津圭一朗	Variable Speed Control Technique of AC Motors Using Flux Observer <i>Yoshihiko Kinpara, Keiichiro Shizu</i>
EGRバルブ用DCモータの電磁駆動技術 31 三宅俊彦・藤田陽一・藤村 哲・栢山盛幸	Electromagnetic Driving Technology of DC Motor for EGR Valve <i>Toshihiko Miyake, Youichi Fujita, Satoshi Fujimura, Moriyuki Hazeyama</i>
ルームエアコン用ブラシレスDCモータの高性能化 35 馬場和彦・松岡 篤・及川智明	Performance Improvement of Brushless DC Motors for the Room Air Conditioner <i>Kazuhiko Baba, Atsushi Matsuoka, Tomoaki Oikawa</i>
電磁操作方式真空遮断器 39 有岡正博	Electromagnetically Actuated Vacuum Circuit Breaker <i>Masahiro Arioka</i>
次世代高機能汎用インバータ “FREQROL-A700シリーズ” 43 池田克司・白石康裕・今中 晶・金原義彦	The Next Generation High Performance Inverter for General Purpose “FREQROL-A700 Series” <i>Katsushi Ikeda, Yasuhiro Shiraiishi, Akira Imanaka, Yoshihiko Kinpara</i>
省エネルギードライブ “FREQROL-FP500J+IPMモータ” 47 谷本政則・林 謙次・小島直樹・仲 興起	The IPM Motor and Driver for Energy Saving “FREQROL-FP500J and IPM Motor” <i>Masanori Tanimoto, Kenji Hayashi, Naoki Kojima, Kouki Naka</i>
M700対応駆動システム “MDS-D/DHシリーズ” 51 筒井和彦・佐野修也・田中利貴	Driving System “MDS-D/DH Series” for M700 <i>Kazuhiko Tsutsui, Syunya Sano, Toshiki Tanaka</i>
新型リニアサーボモータ“LM-H2シリーズ” 55 加藤和彦・仲 興起・伊藤一将・望月 大	New Linear Servo Motor “LM-H2 Series” <i>Kazuhiko Kato, Kouki Naka, Kazumasa Ito, Dai Mochizuki</i>
リニア誘導形モータの技術動向 59 大掛忠雄・林 紘志	Technological Trend of Linear Induction Motor <i>Tadao Otake, Kouji Hayashi</i>
特許と新案	スポットライト
「開閉装置」「駆動制御装置付きモータ」 63	24kV HS-X型脱SF ₆ ガス絶縁スイッチギヤ
「平板型リニア誘導モータ」 64	



表紙

最新の電磁駆動技術

この特集号は、モータや電磁操作等の当社の最新の電磁駆動技術について記載したもので、地球環境の観点からの高効率化や、更に高精度や高制御性の要求にこたえるための技術開発状況について述べている。

表紙の写真は、それら電磁駆動技術の概略ができるだけ直感的に分かるように、内部構造や磁気設計が分かるものを選択した。左上は電磁操作機構を用いた新しいコンセプトの電力用開閉器の構造図、左下はその電磁操作機構の過渡磁束密度の解析結果、右下はモータの内部構造で、右上はモータの固定コアの磁束密度分布を示す。

今後も、これら電磁駆動技術の高度化によって社会への貢献を進めていく。

電磁駆動技術特集号に寄せて

Foreword to Special Issue on Electromagnetic Drive



大崎博之
Hiroyuki Ohsaki

電磁駆動技術は、様々な装置・機器・システムで利用され、我々の周囲を見回しても、家電や情報機器はもちろん、自動車や鉄道、生産設備、社会インフラなど、多種多様な目的や形態で利用されている。電磁駆動は一般に、制御性、システム設計の自由度、効率、環境性、低騒音、高速性などの点で優れている。用途によって、汎用性が強く求められる場合と目的に特化した高度な最適化が求められる場合もあるであろうし、高精度な位置決めや速度制御などが求められる場合と定速回転や単純往復駆動をすればよい場合もあるが、いずれにおいても、適切な構成の選択とシステム設計により、電磁駆動はその特長を発揮できる強みがある。最近の環境、省エネルギーに対する強い要請に対しても有効な対応ができ、それがまた電磁駆動の一層の利用拡大とつながっている。

電磁駆動技術は、材料技術、設計技術、モータ・アクチュエータ技術、パワーエレクトロニクス技術、センサ技術、制御技術などを基盤として成立している。近年の電磁駆動技術の発展はこれらの基盤技術の発展なしにはあり得ず、特に、パワーエレクトロニクス技術の進歩が果たしてきた役割は大きい。また、材料技術は、他の応用技術におけるのと同様に、電磁駆動技術の根幹で深くかかわり、今後の発展の鍵(かぎ)も握っていると言えよう。例えば、モータやアクチュエータでは、永久磁石などの磁性材料の高性能化が機器特性の向上に直接つながり、今日の永久磁石モータの利用拡大も、永久磁石性能の向上にモータ設計技術の高度化が加わって達成されている。将来的には、これらの磁性材料の進歩はもちろんであるが、例えば、既に超電導

磁気浮上鉄道で利用されている超電導材料や、次世代のパワーデバイスとして開発が盛んに進められているSiCなど、新材料への期待は当然大きい。革新的な高性能材料の導入は技術の飛躍的な発展、性能の大幅向上をもたらし、斬新な機器設計などにつながる可能性もある。

一方、設計技術、特性評価・解析技術の発展にも大いに注目しなければならない。最近の計算機性能の向上や数値解析技術の進歩は著しく、モータなどの電磁駆動機器の開発・設計も大きく変わってきた。機器内部の電磁現象、ドライブのためのパワーエレクトロニクス回路、制御などを連成させた詳細な解析が可能となり、さらに、機械振動現象も連成させた解析も実行され、振動・騒音特性なども評価できるようになった。ただし、数値解析における近似が問題の本質を変えていないことを常に確認することは必要である。特に材料のモデリングは重要なポイントの一つであり、材料特性の非線形性、ヒステリシス、温度依存性、異方性などの近似と解析精度との関係をしっかりと評価しなければならない。高性能材料の適用においては、特性の非線形領域で利用されることが多いので、そのモデリングの重要性は高い。

このように、電磁駆動技術は、これを支える基盤技術の高度化と、社会の要求にこたえられる応用システムの拡大によって大きく発展してきた。そして、産学の連携が大変活発に行われてきた技術分野である。今後も、産業の国際競争力を一層高め、豊かな社会を築き上げることに大いに貢献するように、電磁駆動技術が更に発展することを期待したい。



小山健一*

電磁駆動技術の現状と将来動向

Current Status and Future Trend of Electro-Magnetic Drive Technology

Kenichi Koyama

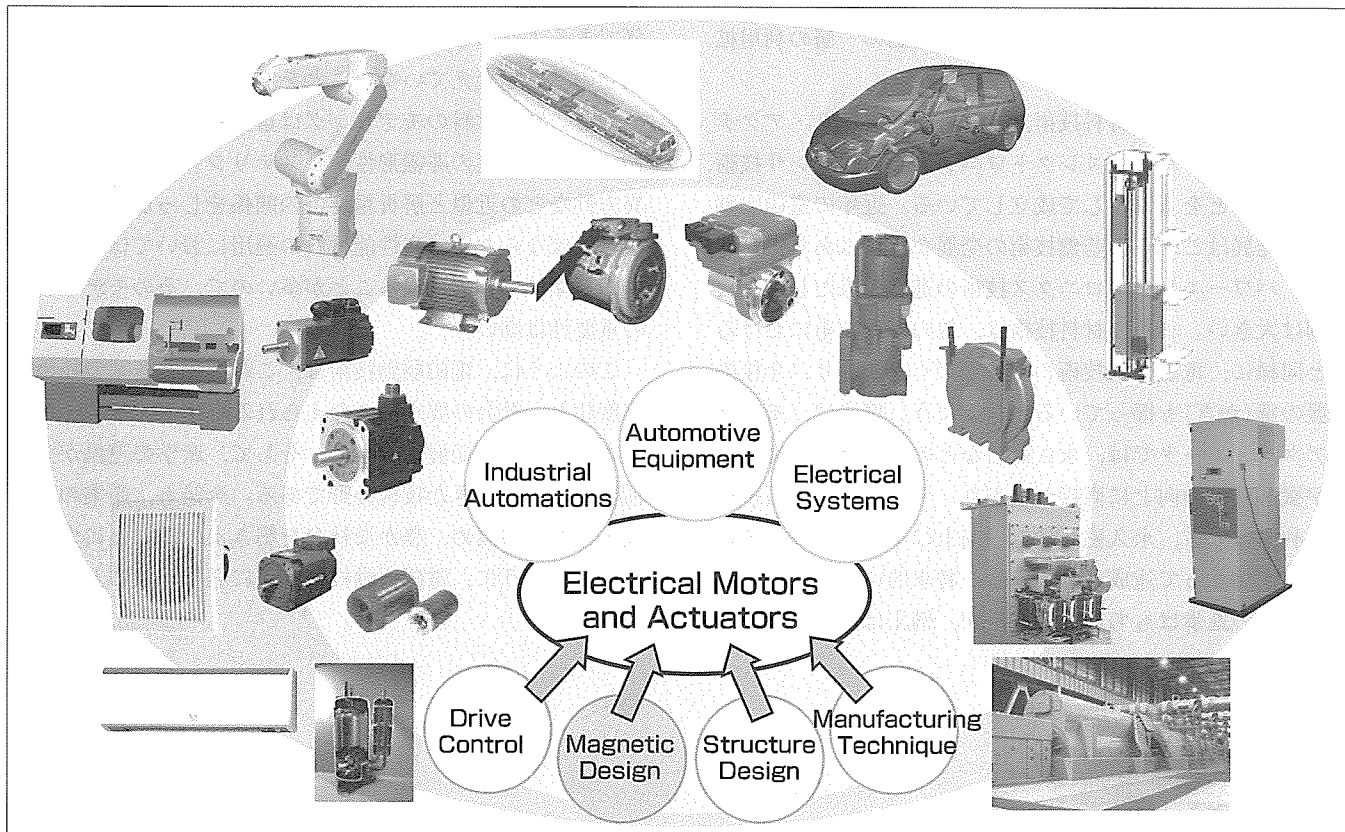
要旨

電気を用いて何らかの仕事をする場合、電気エネルギーを運動エネルギーに変換する必要がある。その場合、多くが電磁現象を利用している。三菱電機が製造している多くの製品において、電磁現象を利用したモータや電磁操作装置が利用されている。一方、電気エネルギーの消費ではなく、その電気エネルギーを発生させる場合においても電磁現象を利用した発電機等が用いられる。これらを取り巻く周囲状況としては、世の中の環境保護からくる高効率化の要求、産業形態の変化からくる高精度・高制御性駆動の要求がますます厳しくなっている。これらに対応するために、当社では、太陽光発電技術や風力発電技術等のグリーンパワーの開発・製品化と並んで、高効率で高制御性の電気機器の実現のため、電磁現象の解明につながる基礎的な研究やその基礎原理を利用した高度な電磁駆動機器と

その設計技術の開発、電磁駆動機器を利用したシステム開発、さらにはすべての量産品が安定して高い性能を発揮するための生産技術開発を実施してきた。

その結果、空調機や産業機器等で利用されるモータ、車載機器で利用されるモータの駆動効率を年々向上させるとともに、その変化する産業構造へ対応するため制御性の向上も同時に実現した。また、電力用発電機や車載発電機でも電力発生時の損失低減が大幅に進んでいる。さらには、開閉装置の接点駆動方式においても、電磁操作機構という新しい技術開発が進んだ。

今後も、電気エネルギー変換において、地球環境保護や産業構造の経済性維持のためには電磁現象に基づく電磁駆動技術は重要であり、継続した現象解明につながる研究とその実用化開発によって、積極的に貢献していく。



多くの製品を支える電磁駆動技術

電気エネルギーを運動エネルギーに変換して仕事をする機械のほとんどに電磁駆動技術が利用されている。高効率駆動・高精度駆動・高速駆動などの必要性能に対して、電磁気現象から製造技術にわたる広範囲な技術の高度化によって的確にこたえ続けており、今後も継続した技術の高度化を進める。

1. ま え が き

特に1997年の地球温暖化防止京都会議以降、世の中の省エネルギーへの取り組みに対する意識が向上し、その中において電気エネルギーの発生から消費までの各過程での高効率化技術の発展、省エネルギーにおける電気エネルギー消費削減への期待が顕著となっている。図1に国内における産業・民生・運輸の各分野のエネルギー消費のトレンドを示す⁽¹⁾。実質GDPの増加割合と比較すると、産業分野ではエネルギー消費の増加が大きくないことが分かる。これは、産業分野においては、そのエネルギー消費が直接的に経済効率に作用することから、ここ10~15年の間に生産効率などの向上や設備利用率の向上、エネルギー効率の向上が積極的に取り組まれてきたことを意味する。今後も引き続き産業分野でのエネルギー効率の向上が要求されると想定されるが、さらに、民生や運輸分野でのエネルギー効率向上が地球環境保護の観点から重要視されると考えられ、これら産業・民生・運輸分野における主要な負荷機器である電磁駆動装置において更に高効率化が必要となる。

一方、電磁駆動機器に対する要求は、高効率化だけではなく、制御性の高度化などの機能向上も要求されている。例えば、携帯電話や携帯情報機器に代表される電子機器の小型化は半導体、電子部品などの小型化が牽引(けんいん)している。ムーアの法則として知られている半導体の小型高集積化は2年で倍の速度で進んでおり、デザインルールはサブミクロンからナノメータ領域に移っている。また、電子部品のサイズもこの20年で1.608(1.6mm×0.8mm)から0.402(0.4mm×0.2mm)へと1/4となっている。これを支えているのが加工機、実装機、半導体関連装置の高速・高

精度化である。これらに使用される送り機構などの位置決め精度は、最近では、ナノメータレベルが要求されるに至っている。

これらエネルギー消費の電気エネルギーの負荷としての機器だけでなく、電気エネルギーの発生と輸送を担う電力インフラ機器においても同様に高効率化やエネルギー利用効率の向上が求められる。例えば、タービン発電機の高効率化開発や、グリーンエネルギーとして年々増加している太陽光発電や風力発電技術の高度化開発も必要である。エネルギー利用効率という観点では瞬低対策の充実化や電力設備のメンテナンスの高度化技術も重要な課題である。

2. モーター技術

ビルや工場などでは、空調や照明、上下水設備、情報機器や生産設備など多くの電気機器によって電力が利用されている。これらのうち、モーターが関係する電力消費は実に半分に達すると言われている。国内の総発電電力量は9,396億kW・h(2000年度)であるので、すべてのモーターの効率を1%向上すれば46億kW・hの電力損失低減につながる。設備容量に換算すると約53万kWに当たり、2010年に目標とされる風力発電容量300万kWの1/6に匹敵する⁽²⁾。このことから風力発電やタービン発電の高効率発電化だけでなく負荷機器としてのモーターの高効率化も重要な課題で、当社としては、そのいずれにおいても積極的技術開発で世の中の進展に貢献している。さらには、現状でのモーター効率向上だけではなく、車載機器である電動パワーステアリングやハイブリッド自動車などのように従来モーターが使われていなかった分野での電動化も進められている。ここでは、主にモーターの高効率化技術の概要について述べる。

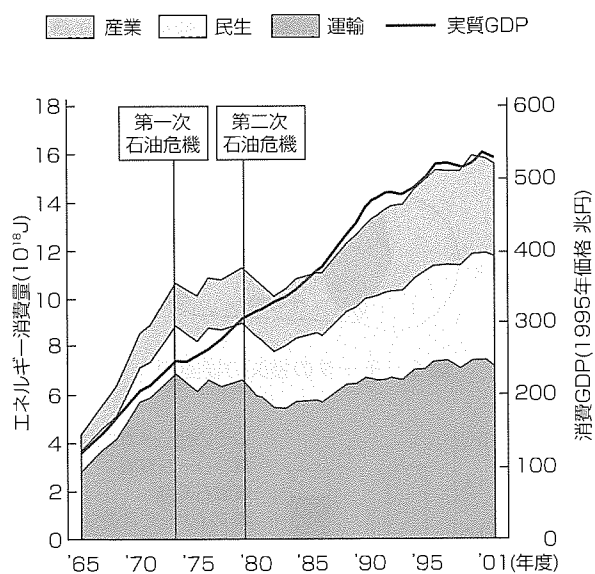
2.1 モーター構造としての高効率化技術

(1) 誘導モーターと永久磁石同期モーター

モーター構造として代表的なものに誘導モーターと同期モーターがあるが、近年の永久磁石材料の進展により永久磁石同期モーターが広く使用されるようになってきた。これは、一般的に誘導モーターより永久磁石同期モーターの方が効率が高く、また、同一出力であれば永久磁石同期モーターの方がコンパクトに実現できるという特長に依存している。図2に三相誘導モーターと永久磁石同期モーターの効率を比較した例を、図3に誘導モーターと永久磁石同期モーターの概略構造比較を示す。

(2) 固定子製造技術

永久磁石同期モーターでは回転子に永久磁石を配置した構造が多く用いられ、誘導モーターと比較して、その磁気的特長から、固定子の巻線に集中巻構造を用いることが可能となった。これにより、図4に示すように、固定子のティースを分割し、それぞれ独立にティースごとに機械を用いて巻線する新たな製造技術が開発された。このことは、製



資料：内閣府「国民経済計算年報」、(財)日本エネルギー経済研究所「エネルギー・経済統計要覧」、資源エネルギー庁「総合エネルギー統計」から作成

図1. 日本のエネルギー消費トレンド

造技術を効率化するだけでなく、それまでのモータと比較して導体占積率が向上するというモータ効率向上にも大きく寄与した。

(3) トルク脈動抑制技術

高効率化の点で永久磁石式同期モータは多く用いられるようになったが、同時に、永久磁石式同期モータでは、モータの回転時にトルク脈動を発生するという新たな技術課題も発生した。さらに、例えばデジタル家電事業の発達に伴って、工場のFA機器に用いられるモータでは、高精度駆動化や高制御性が求められるようになったこともこの技術課題の重要性に拍車をかけた。また、従来の油圧装置に代わってモータが用いられるようになった電動パワーステアリングにおいても、油圧装置との比較の観点からこのトルク脈動抑制が不可欠の技術課題となった。これに対しては、磁気飽和や三次元形状を考慮した磁界解析技術を基に回転子の磁極位置をずらす、スキューや固定子ティースに溝を形成するダミースロットを適用した新構造、形状誤差

を抑制する高精度製造技術などを開発し、低トルク脈動としている。また、永久磁石の中でもNd-Fe-B系の焼結磁石は優れた磁気特性を持つが、温度上昇や電機子電流の磁界で熱減磁が生じる場合がある。そこで、シミュレーションにより熱減磁の定量的な予測を行い、信頼性の高いモータを実現している。

さらに最近では、後述するように鉄心の磁気特性を考慮した更に高度な設計技術も開発され、モータのトルク脈動低減に効果を発揮している。

(4) リニアモータ技術

実装機、半導体関連装置の高速・高精度化の要求に合わせて、従来のボールねじ駆動システムに代わり、リニアサーボモータシステムの適用が拡大している。ボールねじではバックラッシュや摩擦による応答誤差が不可避であるが、リニアサーボモータでは、ダイレクトドライブによる高い剛性により、高速・高精度・静粛・グリスレスが実現できる。さらに、リニアサーボモータに対しては、高精度化のための低発熱と装置構成の柔軟性を高める小型化の相反する要求がある。これにこたえて、集中巻と高度な巻線技術による導体占積率向上を行いつつ、高精度電磁界解析技術に基づく磁気設計により高効率化を図っている。

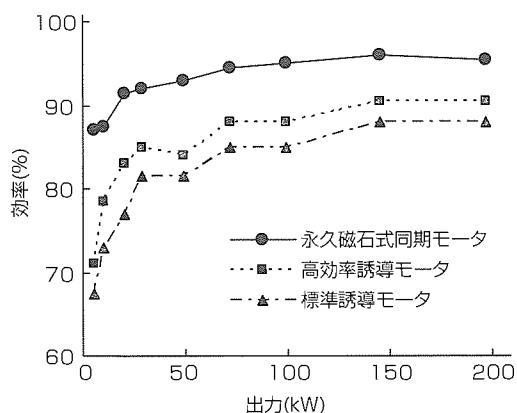


図2. 三相誘導モータと永久磁石式同期モータの効率比較

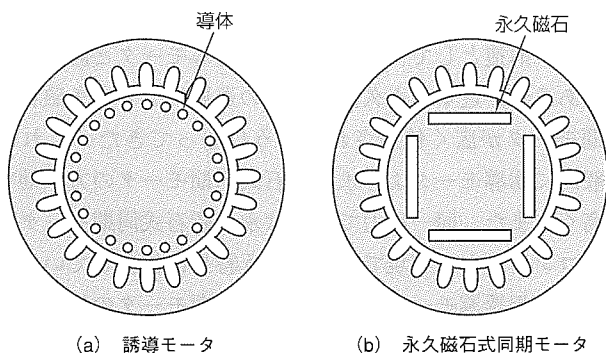


図3. モータの鉄心断面

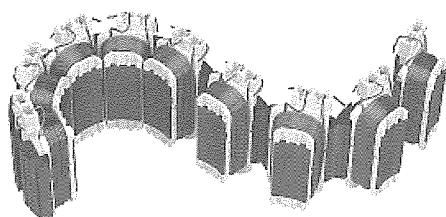


図4. ポキポキコア(分割コア)

2.2 損失低減のための解析技術

モータの損失は、図5に示すように、いわゆる巻線で発生する銅損などのほかにもいろいろな現象や部位で発生している。これまでに十分実現されたとも言われるモータの高効率化を更に高いレベルで実現するためには、設計において損失割合を定量的に把握することが不可欠となっている。高効率を目指したインバータ駆動の永久磁石式同期モータでは、集中巻、分割鉄心、磁石埋め込み構造など銅損低減に関して多くの技術開発がなされてきた。最近では、鉄損を電磁界解析技術により要因別に精度良く見積もる手法を開発し、鉄損の低減を実現している。図6にその一例を示す。

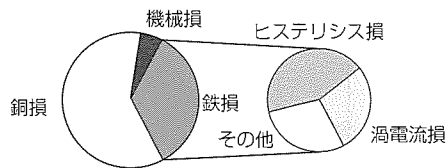


図5. モータの損失の要因別

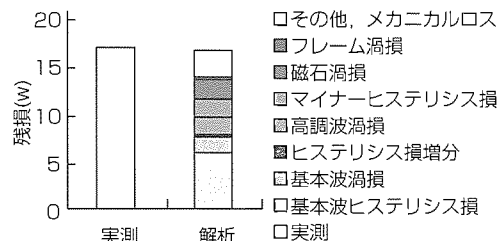


図6. 鉄損の解析例

2.3 より高度な解析技術への発展

前述したトルク脈動抑制技術や損失解析技術では、主としてモータの構造上での解決技術として述べたが、実際のモータではその磁性材料の磁気特性が均一ではなく、磁性材料の製造時やモータへの加工時の残留応力、さらには構造上加わる応力によって局所的に大きく変化している。図7に、応力によって変化する磁気特性の測定例を示す。我々が解析し設計するモータは、これらの応力が存在する製品としてのモータであることから、この磁気特性の変化を考慮した設計技術の確立は特に重要と言える。図8に、一例として、モータフレームの形状に依存した固定子に加わる応力解析結果と、その結果を考慮したモータの磁束密度分布解析結果を示す。このように、モータ構造だけでなく、磁性材料の磁気特性の変化を考慮した解析及び設計技術も開発され高度化されている。

3. 開閉駆動技術

前述したモータ技術は主として電気によって仕事をする負荷機器であるが、その電力を発生して輸送する電力機器

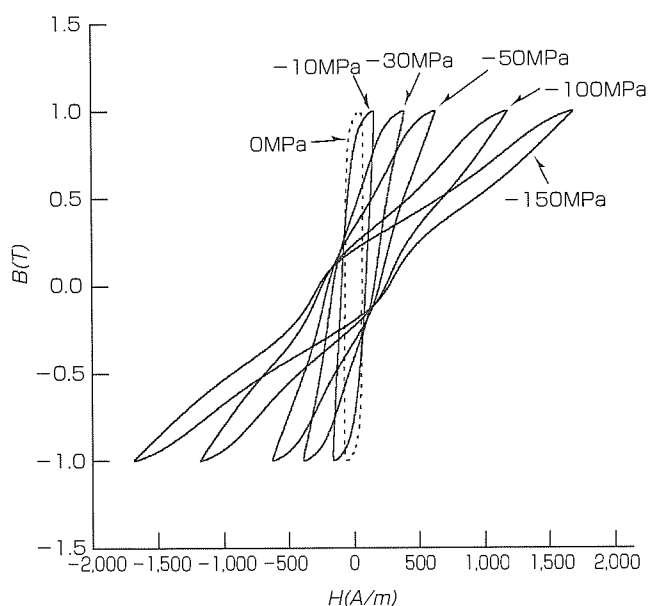
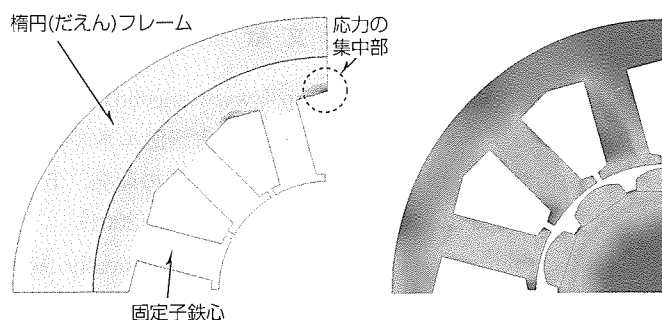


図7. 応力による電磁鋼板の磁気特性の変化



(a) 構造解析結果(ミーゼス相当応力分布) (b) 応力を考慮した磁界解析結果

図8. 構造解析と磁界解析の連成

でもその効率向上が必要であるのは言うまでもない。電力機器分野では、前述したモータ技術と部分的に関連した発電機の高効率化技術や、変圧器の損失低減技術などもあるが、ここでは、電磁駆動という観点で回転機とは異なる直線駆動技術として最近活発にその技術革新が進んでいる遮断器の操作機構技術について述べる。

3.1 背景

電力開閉装置ではその発熱低減などの損失低減技術開発も実施されているが、電力システム全体での環境負荷低減としての観点から、グリーンパワーの導入を背景として分散電源化が進んでいる。さらには、産業構造全体としての高効率化と経済性向上の要求から、電力の無瞬断供給が重要となっている。これらの社会的要求を背景として、従来の開閉駆動装置では持ち得なかった高制御性能を持った開閉装置が製品化されている。ここでは、その新しい開閉装置の駆動技術について概説する。

3.2 高速遮断器技術⁽²⁾

いわゆる配電システムに用いられる真空遮断器は、ばねの開放エネルギーを利用して接点の開閉を行っている。この動作は電力の商用周波数に対して応答が遅く、遮断指令発生から約50ms程度の時間を要する。この動作時間では、多くの負荷機器の特徴から前述した無瞬断での電力切換えに対応できない。そこで開発されたのが図9に示す電磁反発駆動技術を用いた高速遮断器である。この電磁反発駆動技術は、図10に示すように、電路の入切を行う真空バルブに直結された反発板に対して向き合うように固定された開極コイルにパルス電流を流すことによって反発板に渦電流が誘起され、その結果、その反発板が開極コイルから離れる方向に力を発生して真空バルブの接点が開極する。この駆動機構によって、従来のばね操作の場合に要した50msの遮断時間が約10ms程度に短縮された。この遮断器の実現によって二つの電力システムの瞬時切換えや自家発電機の瞬

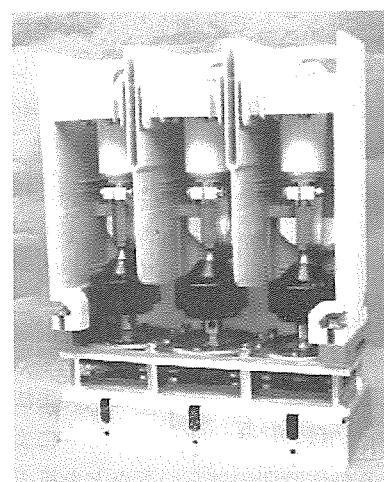


図9. 7.2/15kV-20kA高速遮断器

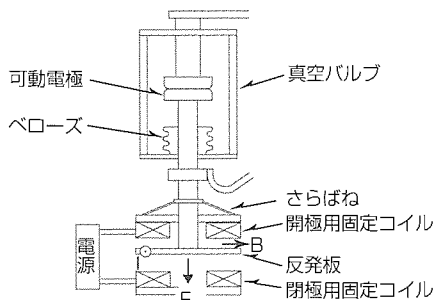


図10. 高速遮断器単相構成

時切り離し等が可能となり、現在多くの実系統で利用されている。

3.3 電磁操作の技術

高速遮断器が瞬時に大きな力によって開閉駆動するのに対して、更に小さな力で接点を直接駆動し、開閉寿命や機構部コストなどが従来遮断器と同等レベルで達成可能な新しい技術として注目されているのが電磁操作技術である。

(1) 電磁操作機構技術

図11に、2004年度に製品化した24kV HS-X型ドライエア絶縁スイッチギヤに搭載されている電磁操作方式真空遮断器の内部構造⁽⁴⁾を示す。この遮断器では、従来のばね操作方式に代わり当社独自の高効率電磁操作方式を採用することにより機構部品点数を当社従来比35%に削減し、大幅な信頼性向上を実現している。また、真空バルブから操作機構を直線上に配置することで、ラッチレバーなどの消耗部品レス化とグリスレス化による省メンテナンス化を達成した。この電磁操作機構部の構造を図12に示す。第1積層ヨーク、第2ヨーク、永久磁石、積層可動子及び閉開極用コイルからなるシンプル構造である。ここで、永久磁石の採用は無電力での開閉保持を実現する。開閉駆動は、コンデンサ回路を用いて開極コイル及び投入コイルにそれぞれ電流を放電することにより行う。第2ヨークの採用は当社独自の構造であり、永久磁石磁路とコイル励磁磁路を分割することにより開閉駆動を高効率化し、さらに、可動子を積層構造にすることで駆動時の渦電流を極小化した結果、駆動エネルギーを当社従来比20%に削減し世界トップクラスの省電力駆動を達成した(2004年当社調べ)。

(2) 電磁界運動連成解析技術

このような高効率の電磁操作機構の開発には遮断器の動作を忠実に計算できる高度な設計技術が不可欠である。そこで当社では、動作途中で質量や接圧ばね力が不連続に変化する遮断器の駆動状態を忠実に再現でき、解析精度を0.5ms以下に極小化できる電磁界と運動の連成解析技術を用いた設計手法を確立した。開発した設計手法では、計算時間を従来の1/10以下にまで短縮したことにより、遮断器の個体差による動作時間のばらつきなどを机上で仮想設計できるようになり、設計期間の大幅短縮を実現している。

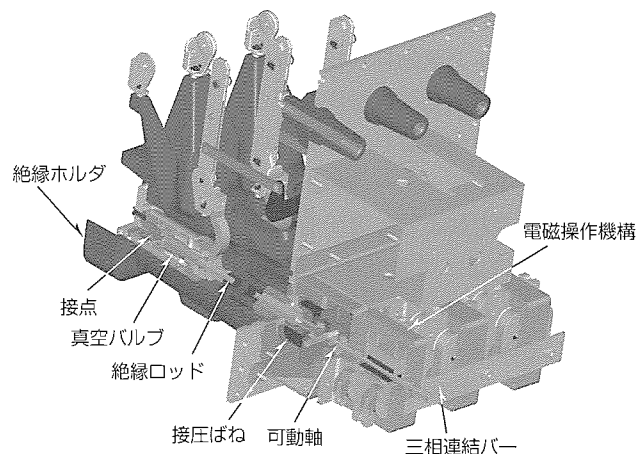


図11. 電磁操作方式真空遮断器構造

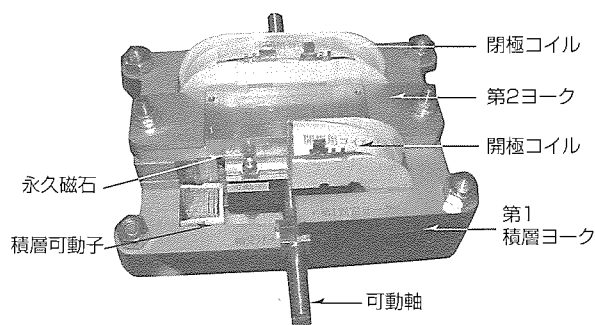


図12. 電磁操作機構部カットモデル

このような電磁操作技術の発展は、真空遮断器の操作機構の部品点数削減だけでなく、電磁現象を利用した新しい機構診断システムの実現などの革新をもたらし、さらには、米国、欧州など電力の安定供給を要する国々で注目の位相制御遮断器へ拡張されていくと考える。

4. む す び

以上のように、現在やこれからの環境保護や機械制御の高度化の要求に対して、最終的に仕事をする電気エネルギー変換機器である電磁駆動機器の高度化を電磁現象に基づく研究により実施している。これらの世の中の要求は今後も停滞することはないと考えられ、継続した社会の発展のために電磁駆動技術の高度化開発を今後も推進していく。

参 考 文 献

- (1) 資源エネルギー庁：HP <http://www.enecho.meti.go.jp/>
- (2) 日本のエネルギー2005，経済産業省資源エネルギー庁
- (3) 小山健一，ほか：24kV定格高速遮断器の開発，Trans. of IEEJ, PE, **121**, No.9, 1187~1192 (2001)
- (4) Takeuchi, T., et al.: An Electromagnetically Actuated Vacuum Circuit Breaker Developed by Electromagnetic Analysis Coupled with Motion, IEEJ Trans. PE, **124**, No.2, 321~326 (2004)

電磁界運動連成解析による電磁駆動設計技術

竹内敏恵*

Electromagnetically Actuator Design Technology Using Electromagnetic Analysis Coupled with Motion

Toshie Takeuchi

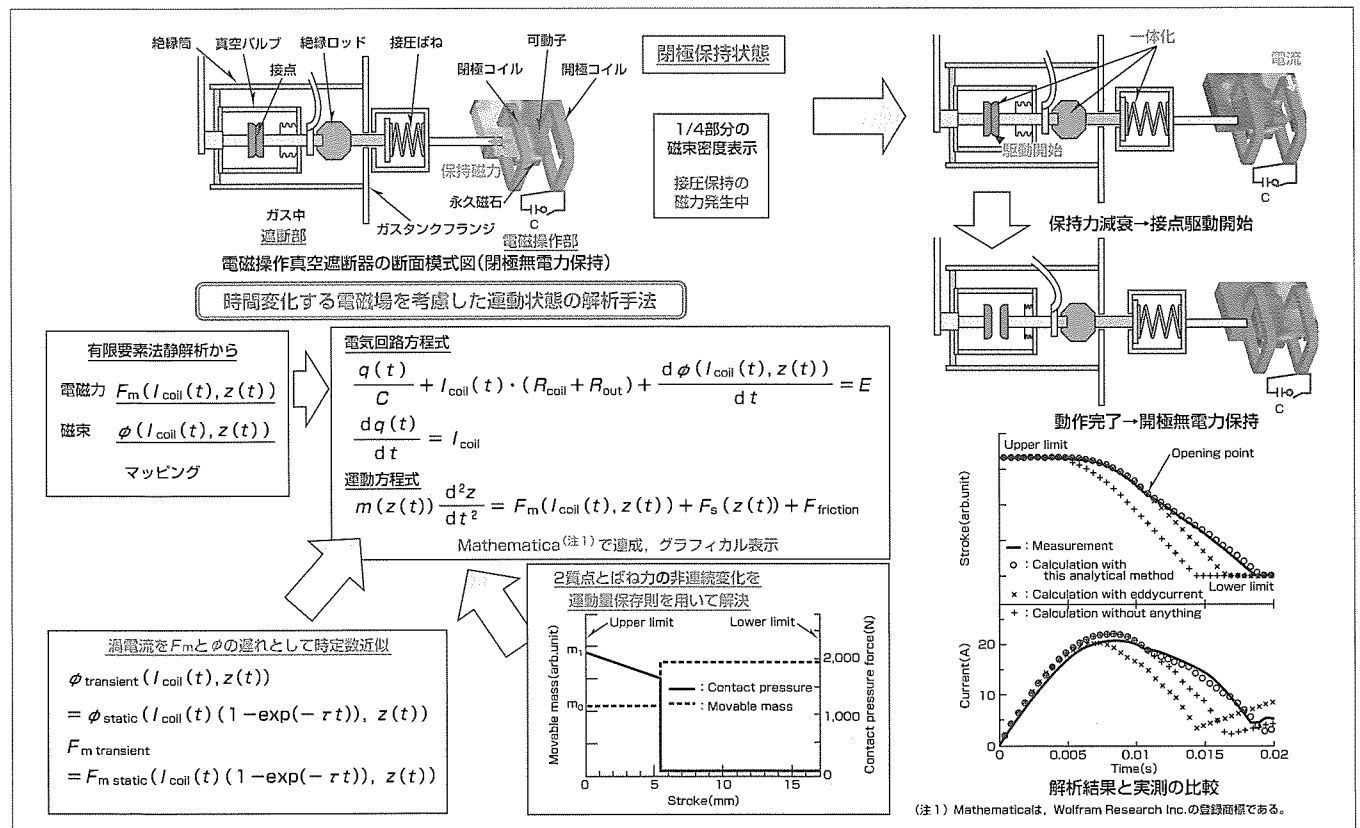
要旨

スイッチなどに用いられている電磁操作機構の設計には、位置状態を固定した静的電磁界解析手法が用いられるのが一般的であった。しかし、電磁操作機構は磁気ギャップの変化を伴い動作するため、短ギャップでのインダクタンスの変化が大きく、特に高速で動く場合には駆動時の速度起電力を考慮することが必要となってくる。この速度起電力の考慮には電磁界と運動の連成解析が必要である。

三菱電機製品の15kV高速スイッチや脱SF₆型複合絶縁(ドライエア絶縁)スイッチギヤ(HS-X)では、従来のばね操作装置に代わり、直動の電磁操作方式真空遮断器を用いており、これらの開発には電磁界と運動の連成解析による電磁駆動設計技術の構築が不可欠であった。そこで、高速スイッチをターゲットに等価回路法を用いた電磁界運動連成解析技術の開発に着手し、さらに、有限要素法電磁界解

析と運動の連成解析技術の開発・適用を実施してきた。今回、HS-Xの新型真空遮断器の開発に当たり、真空遮断器の動作を忠実に模擬できる連成解析を用いた電磁駆動設計技術を開発した。この設計技術により、動作途中で質量や接圧ばね力が不連続に変化する遮断器の駆動状態を忠実に再現でき、解析精度を0.5ms以下にまで極小化した。また、有限要素法で発生するメッシュ更新時間を短縮するため、渦電流効果を磁束及び電磁力の一次時間遅れで模擬し、計算時間を従来の1/10以下にまで短縮した。この手法の開発により、遮断器の個体差による動作時間のばらつきを机上で仮想実験可能となり、開発期間の大幅短縮を達成した。

開発した新型真空遮断器は機構部品点数を従来比35%に削減し、動作に必要な電気エネルギーを従来比20%へ低減(いずれも当社比)し、世界トップクラスの効率を実現した。



電磁界と運動の連成解析を用いた24kV電磁操作真空遮断器の設計技術

電磁界と運動の連成解析フローと24kV電磁操作真空遮断器の解析例を示す。

1. ま え が き

スイッチなどに用いられている電磁操作機構の設計には、位置状態を固定した電磁界解析手法が用いられるのが一般的であった。しかし、電磁操作機構はギャップが変化しながら移動するため、短ギャップでのインダクタンスの変化が大きく、特に高速で動く場合には駆動時の速度起電力を考慮することが必要となってくる。この速度起電力の考慮には電磁界と運動の連成解析技術が必要である。

当社製品の15kV高速スイッチや脱SF₆型複合絶縁(ドライエア絶縁)スイッチギヤ(HS-X)では、従来のばね操作装置に代わり、直動の電磁操作方式真空遮断器を用いており、これらの開発には電磁界と運動の連成解析による電磁駆動設計技術の構築が不可欠であった。そこで、高速スイッチをターゲットに等価回路法を用いた電磁界運動連成解析技術の開発に着手し、さらに、有限要素法電磁界解析と運動の連成解析技術の開発・適用を実施してきた。今回、HS-Xの新型真空遮断器の開発に当たり、真空遮断器の動作を忠実に模擬できる連成解析を用いた電磁駆動設計技術を開発した。

本稿では、これら高速スイッチ及びHS-X用真空遮断器の電磁駆動設計技術について述べる。

2. 等価回路法を用いた渦電流反発式高速スイッチの駆動設計技術

まず、図1に示す当社製15kV高速スイッチの電磁駆動設計技術について述べる⁽¹⁾。高速スイッチとは、開極時間約1ms、遮断時間1サイクル以下の性能を満たす遮断器であり、一般の遮断器の開極時間が約25msであることと比べ、大幅な高速応答性能を持った遮断器である。これらの高速スイッチは受電系統自身や自家発電系統との高速切替装置に適用され、近年では瞬低時の重要負荷の保護などに注目されている。

ここで、当社製高速スイッチは、電路を開閉する接点部を持つ真空バルブ、非線形な荷重特性を持つさらばね、及び上下の開極用並びに閉極用固定コイルの間に低抵抗の反発板を配置した電磁反発機構部より構成されている。例えば、開極駆動時には、コイルにパルス電流を通電することに

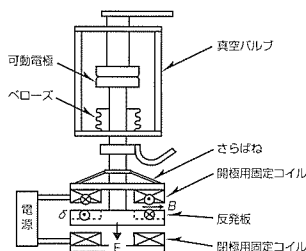


図1. 15kV 高速スイッチの単相構成図

より反発板に誘導される電磁反発力を利用して、開極時間1ms以内に接点が開き始める。電磁反発駆動部の高速応答をできるだけ小型のパルス電源で効率良く設計するには、パルス電源回路を含んだ過渡応答電磁界解析と非線形荷重特性を考慮した運動との連成解析が不可欠であった。

そこで、誘導電流を表皮厚さ δ の1ターンコイルのイメージコイルで模擬し、図2に示す誘導結合等価回路に適用し、非線形ばねを考慮した運動方程式と連成する手法を開発した⁽¹⁾。等価回路法を用いた手法はFEM(Finite Element Method)に比べメッシュが不要であり、形状パラメータの変更が容易となるため、15kV高速スイッチのような非線形材料を用いないモデルの場合には有効であり、また、最適化手法との組合せにも適していると言える。

次に、図2の等価回路を定式化する。固定コイル側の電気回路は、コンデンサが放電するまではLCR(Inductor, Capacitor, and Resistor)回路であり、誘導回路との相互インダクタンス M を用いて式(1)、式(2)で表現できる。ここで、 $\frac{d\phi_{eddy}}{dt}$ 、 $\frac{d\phi_{coil}}{dt}$ は、反発板が運動するときの鎖交磁束の変化であり、運動方向を x とすると式(3)及び式(4)で表される。

$$\frac{q}{C} + I_{coil}(R_{coil} + R_c) + L_{coil} \frac{dI_{coil}}{dt} - M \frac{dI_{eddy}}{dt} + \frac{d\phi_{eddy}}{dt} = 0 \quad \dots(1)$$

$$I_{eddy} \cdot R_{eddy} + L_{eddy} \frac{dI_{eddy}}{dt} - M \frac{dI_{coil}}{dt} + \frac{d\phi_{coil}}{dt} = 0 \quad \dots(2)$$

$$\frac{d\phi_{eddy}}{dt} = - \frac{dM}{dx} \frac{dx}{dt} I_{eddy} \quad \dots(3)$$

$$\frac{d\phi_{coil}}{dt} = - \frac{dM}{dx} \frac{dx}{dt} I_{coil} \quad \dots(4)$$

次に、誘導コイルに発生する電磁力 F_m は、磁気エネルギーを E_m とし仮想変位の考え方から式(6)で表される。これが反発板に発生する電磁力となる。この電磁力を用いて式(7)の運動方程式を立て、電気回路方程式(1)~(4)と連成して解けばよいこととなる。

$$E_m = M \cdot I_{coil} \cdot I_{eddy} \quad \dots(5)$$

$$F_m = - \frac{dE_m}{dx} = - \frac{dM}{dx} I_{coil} \cdot I_{eddy} \quad \dots(6)$$

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = F_m + F_s + F_0, F_s = k(x - x_0) \quad \dots(7)$$

ここで、 m は可動部質量、 x は可動部位置、 F_s は機械力、 F_0 は機械力以外の一定の力、 k はばね定数、 x_0 はばね自然

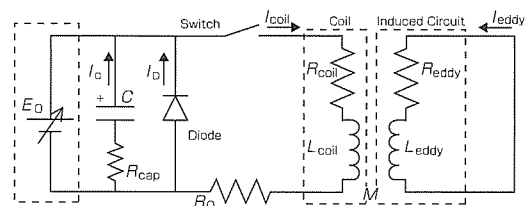


図2. 誘導結合等価回路

長での可動部位置を示す。

以上に示した等価回路手法を用いて連成解析した結果と実測との比較を図3に示す。解析と実測が良好に一致しており、この解析手法を用いることにより駆動部の設計技術の高度化を図ることができる。

3. 有限要素法を用いた電磁界運動連成解析技術

次に、高速スイッチの高電圧化における有限要素法を用いた運動連成解析手法について述べる⁽²⁾。高速スイッチの24kVへの高電圧化に当たっては、15kVに対して駆動距離を1.5倍延ばす必要があり、また、実用化のために駆動電源のコンパクト化など駆動効率の向上が不可欠であった。そこで、渦電流反発式に対し、図4に示すコイル-コイル方式を用いた電磁反発機構の開発に着手した⁽³⁾。図の機構では、コイル電流によるアクティブ駆動に加え、鉄製コアを用いることで磁束を反発部に集中させ、反発力の発生効率を向上している。鉄製コアは非線形の磁気特性を持っており、2章で述べた等価回路法では駆動解析に限界がある。そこで、有限要素法を用いた電磁界解析と運動の連成解析⁽⁴⁾の適用を試みた。

図5にこの手法による電磁反発駆動部の可動部周辺のメッシュを示す。可動部の駆動方向をX方向とし、可動し得る範囲の両端の有限要素メッシュを作成し、移動途中の座標値は両端のメッシュからの内挿により求められる。可動部の周囲は変形する空気領域で囲まれ、固定部及び可動部のメッシュには移動に伴う変形はなく、有限要素領域におい

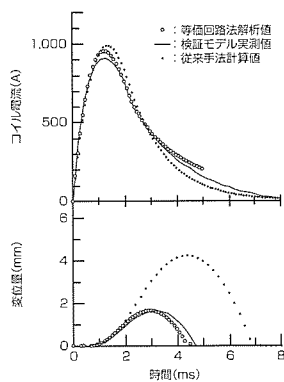


図3. コイル電流と可動部変位量の解析結果と実測の比較

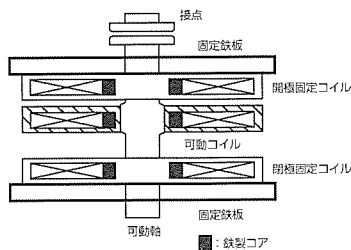


図4. コイル-コイル方式電磁反発機構の模式図

て変形する部分は空気領域のみとなる。この手法の場合、両端の空気領域メッシュで要素の形状が大きく変化するため、最小ギャップでの要素が極めて扁平(へんぺい)になる点、最大ギャップでは要素が粗くなる点など解析精度への影響が考えられる。しかし、24kV高速スイッチへの適用では、メッシュの変形による解析精度の誤差は少なく、十分に実用可能であることを確認している。有限要素法を用いた電磁界運動連成解析は、サイエンスソリューションズ社製EMSolution^(注2)や日本総研製JMAG^(注3)-Studioなどに搭載されており、最近では広く用いられるようになってきている。

この手法を用いて開発した24kV高速スイッチの単極モデル写真を図6に示す。この単極試作器を用いて高速スイッチとしての駆動試験及び短絡遮断試験を実施した結果、開極時間約1ms及び遮断時間1サイクル以下の性能を満たすことを確認している。

4. 電磁操作方式真空遮断器の駆動設計技術

最後に、2004年に製品化したHS-Xに適用している一般用電磁操作方式真空遮断器の駆動設計技術について述べる⁽⁵⁾。

HS-Xの電磁操作方式真空遮断器の概略構造を図7に示す。この遮断器では、従来のばね操作式に代わり、当社独自の高効率電磁操作式を採用している。機構部の部品点数削減による信頼性向上とラッチレバーなどの損耗部品レス化とグリスレス化による省メンテナンス化を目的とし、各

(注2) EMSolutionは、サイエンスソリューションズ(株)の登録商標である。
(注3) JMAGは、(株)日本総合研究所の登録商標である。

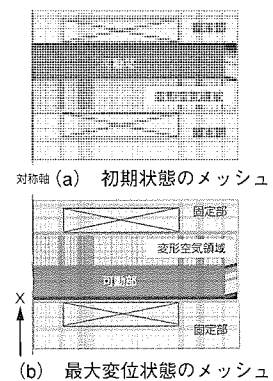


図5. 可動部メッシュ

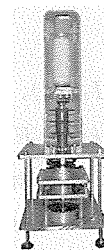


図6. 24kV 高速遮断器単極モデル

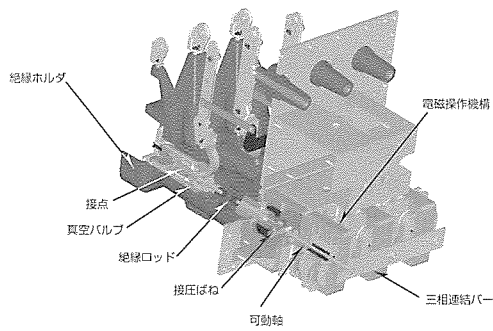


図7. HS-X用24kV真空遮断器構造

相個別に真空バルブ、絶縁ロッド、接圧ばね及び双磁気安定の電磁操作機構を直線上に配置することにより三相リンク機構を廃止した直動型各相個別駆動を採用している。さらに、各相個別駆動の採用は、汎用の遮断器とともに、位相制御遮断器としての拡張が容易となるメリットがある。この電磁操作機構は、第1積層ヨーク、第2ヨーク、永久磁石、積層可動子及び閉閉極用コイルからなるシンプル構造であり、機構部品点数を従来比35%に低減できている。永久磁石の採用は無電力での開閉保持を実現し、開閉駆動はコンデンサ回路を用いて開極コイル及び投入コイルにそれぞれ電流を放電することにより行っている。第2ヨークの採用は当社独自の構造であり、永久磁石磁路とコイル励磁磁路を分離することにより開閉駆動を高効率化している。さらに、可動子を積層構造にすることで駆動時の渦電流を極小化している。

三相個別駆動方式による三相同時開閉制御の実現には、三相間の動作ばらつきを数ms以下に抑える必要がある。そこで、遮断器の動作を忠実に計算できる過渡電磁界運動連成解析を用いた駆動設計技術を開発した。

開発した手法では、磁束 $\phi(I, z)$ 及び電磁力 $F_m(I, z)$ の電流並びに可動子位置依存性を三次元の静電磁界解析により求め、式(8)、式(9)を連成して解析した。電磁操作機構の渦電流による磁束及び電磁力の遅れは時定数 τ を用いて式(10)、式(11)のように表現した。時定数 τ は単体の電磁操作機構の駆動試験結果を基に求めている。さらに、接圧ばね力及び可動部重量変化の不連続性を運動量保存則の適用により解決した。

$$\frac{q(t)}{C} + I_{coil}(t) \cdot (R_{coil} + R_{out}) + \frac{d\phi(I_{coil}(t), z(t))}{dt} = E \quad \dots(8)$$

$$\frac{dq(t)}{dt} = I_{coil}$$

$$m(z(t)) \frac{d^2z}{dt^2} = F_m(I_{coil}(t), z(t)) + F_s(z(t)) + F_{friction} \quad \dots(9)$$

$$\phi_{transient} = \phi_{static}(I_{coil}(t)(1 - \exp(-\tau t)), z(t)) \quad \dots(10)$$

$$F_{m\ transient} = F_{m\ static}(I_{coil}(t)(1 - \exp(-\tau t)), z(t)) \quad \dots(11)$$

この解析結果と遮断器単体の実測結果を図8に示す。図から、時定数 τ と運動量保存則の適用により解析の高精度

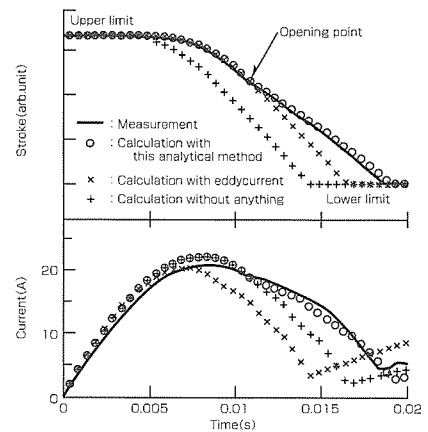


図8. 連成解析結果と実測結果の比較

化が図られていることが分かる。この手法を適用し電磁操作機構の最適設計を実施した結果、駆動エネルギーを当社従来比20%に低減し世界トップクラスの高効率化を達成した。

今回開発した手法では、有限要素法の場合に発生するメッシュの更新が不要であり計算時間を従来の1/10以下にまで短縮できる。そのため、遮断器の製造上の公差、組立て管理公差による動作時間ばらつきを机上で仮想設計が可能となり、三相間の動作ばらつきを数ms内に抑えるための設計要件を簡便に抽出できた。HS-Xは当社が世界に先駆けて製品化したものであり、平成17年度日本工業技術功績者奨励賞を受賞している。

5. む す び

以上、当社製電磁操作方式真空遮断器の電磁駆動設計技術について述べた。現在、国内外で遮断器用操作機構部の電磁操作化が進められており、今後、電磁駆動設計技術の重要度はより大きくなると考える。

参 考 文 献

- (1) 竹内敏恵, ほか: 等価回路モデルによる渦電流反発式高速遮断器の駆動解析, Trans. of IEEJ, PE, 124, No.6, 859~865 (2004)
- (2) 竹内敏恵, ほか: 高速遮断器における運動連成電磁界解析, Trans. of IEEJ, PE, 121, No.9, 1181~1186 (2001)
- (3) 小山健一, ほか: 24kV定格高速遮断器の開発, Trans. of IEEJ, PE, 121, No.9, 1187~1192 (2001)
- (4) 亀有昭久: 有限要素法による電磁場運動連成解析, 第12回電磁力関連のダイナミックシンポジウム, 297~302 (2000)
- (5) Takeuchi, T., et al.: An Electromagnetically Actuated Vacuum Circuit Breaker Developed by Electromagnetic Analysis Coupled with Motion, IEEJ Trans. PE, 124, No.2, 321~326 (2004)

鉄心の詳細な磁気特性を考慮したモータ設計技術

大穀晃裕* 谷 良浩*
 山口信一* 都出結花利*
 中野正嗣* 有田秀哲*

Motor Design Technologies Considering Detailed Magnetic Properties in Magnetic Core

Akihiro Daikoku, Shinichi Yamaguchi, Masatsugu Nakano, Yoshihiro Tani, Yukari Toide, Hideaki Arita

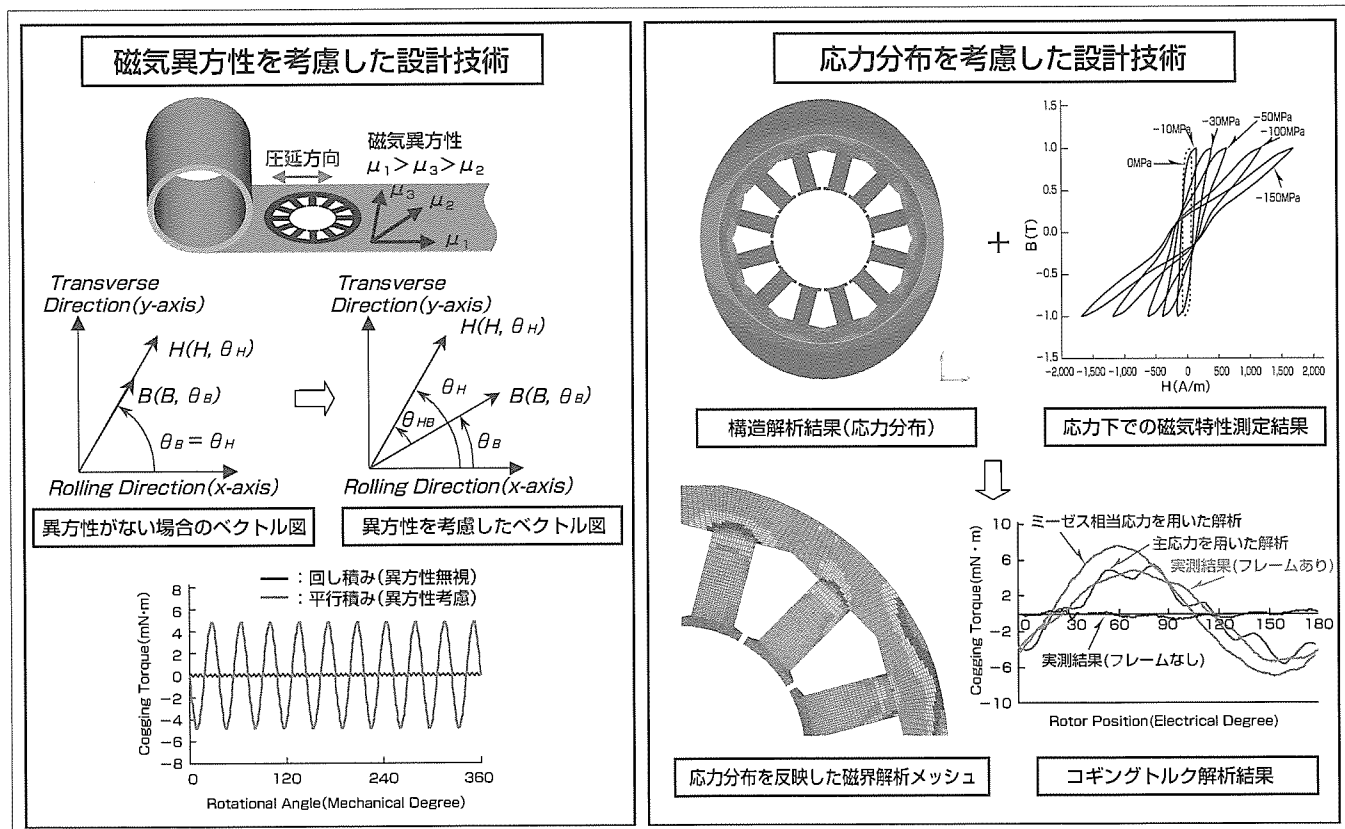
要旨

回転機の競争力強化のため、高性能化と低コスト化を両立する限界設計が求められている。そのためには、従来の設計技術に加え、量産時の特性劣化も加味した詳細な電磁設計技術が必要である。本稿では、これまで均一な特性として扱ってきた鉄心の磁気特性に注目し、実機での鉄心の磁気特性を詳細に考慮するモータ設計技術について、コギングトルク特性の検討事例とともに述べる。

2章では、鉄心材料の持つ磁気異方性を考慮した設計技術について述べる。無方向性鋼板であっても圧延工程に起因して磁気異方性を示すが、これをモデル化するための手法として、磁界の方向と磁束密度ベクトルの関係を直接記述する“二次元磁化法”を適用し、これを考慮した場合のコギングトルクを定量化した。

3章では、応力分布の影響を考慮した設計技術について示す。実使用状態のモータ鉄心では、フレームへの焼きばめなどにより一般に応力分布が生じているが、応力に起因した磁気特性の劣化によって磁束分布自体も変化し、コギングトルク特性にも影響を与える。筆者らは、構造解析と磁界解析の連成によりこれを定量化する技術を開発した。これは、構造解析で得た応力分布と応力下での磁気特性劣化データを基に、磁気特性の分布情報として磁界解析入力データを作成し、これを基に磁界解析を行うものである。

検証用モータを用いて評価した結果、両手法ともに実測結果と解析結果とはよく一致し、解析手法の妥当性が確認された。これらの詳細設計技術は、モータの限界設計を検討する上で重要な情報を与える。



鉄心の磁気異方性又は応力分布を考慮した設計技術

従来は均一として扱っていた鉄心の磁気特性を詳細に考慮したモータ設計技術を開発した。①磁気異方性を考慮する方法として、磁界ベクトル H と磁束密度ベクトル B の関係を記述する二次元磁化法を用い、これがモータ性能に与える影響を評価した。②応力分布を考慮する方法として、あらかじめ測定した鋼板磁気特性の応力依存性を基に、構造解析で得た応力分布を磁気特性分布に置き換えて磁界解析を行う連成解析手法を開発した。

検証用モータを用いてコギングトルクを解析した結果、①、②ともに実測結果とよく一致し、両手法の妥当性が確認できた。

1. ま え が き

産業用・車載用分野でサーボ用途に使用される永久磁石同期モータに対し、位置決め精度向上や振動・騒音低減の観点からコギングトルク低減への強い要求がある。コギングトルクを低減するには固定子ティースや磁石形状の工夫、スキューや補助溝の採用といった設計方法が知られているが、実際のモータでは、これに加え、形状誤差など設計段階で考慮されていない要因(以下“誤差要因”という。)も考慮する必要がある。三菱電機では、上記の誤差要因の一つとして理想状態と実使用状態の鉄心磁気特性の差異に注目し、これに起因するコギングトルクを設計段階で定量化する技術を開発した。

本稿では、開発した技術の概要として鉄心の磁気異方性を考慮する方法、及びフレーム焼きばめ時の応力分布の影響を考慮する方法について、検証用モータによる評価結果とともに述べる。

2. 鉄心の磁気異方性を考慮したモータ設計

2.1 無方向性電磁鋼板の磁気異方性

無方向性電磁鋼板の圧延及び直交方向での磁気特性をエプスタイン試験により測定した結果を図1に示す⁽¹⁾。測定材料は50A290であり、磁束密度に対する比透磁率の変化を示している。同図から、圧延方向と比較してそれと直交する方向の磁気特性が劣ることが分かる。このように無方向性鋼板であっても向きによって磁気特性に差(磁気異方性)があり、これがモータ性能に及ぼす影響を検討する必要がある。

2.2 異方性のモデル化手法

電磁鋼板の磁気異方性のモデル化には幾つかの手法が提案されているが、ここでは二次元磁化法⁽²⁾を取り上げる。鉄心材料の磁気特性が完全に等方性である場合、磁束密度 B と磁界の強さ H の方向は同一となる。一方、磁気異方性を持つ場合には、 B と H には図2の(a)に示すように、空間的に位相差が生じる。二次元磁化法では、圧延方向と直角方向の相互影響を考慮し、透磁率テンソルの各要素を B , θ_B , H , θ_H を用いて表現する。すなわち、 B と H のなす角

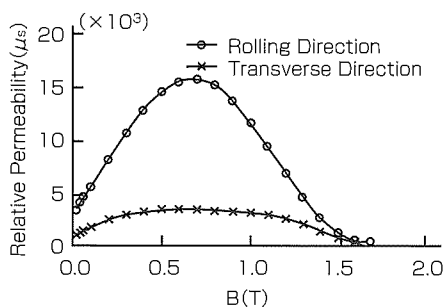


図1. 無方向性電磁鋼板の比透磁率

度を実測どおりに表現することで、鉄心磁気特性のより正確なモデル化を行う。前出の鉄心材料(50A290)について二次元磁化特性の実測を行った結果を図の(b)に示す。

2.3 検証用モータと検証結果⁽³⁾⁽⁴⁾

電磁鋼板から一円状の鉄心を打ち抜いて固定子コア片を製作し、圧延方向がすべてそろうように積層した場合、磁気異方性に起因して1回転当たり2回ないしその整数倍の磁気抵抗の脈動が生じる。これに起因したコギングトルクが発生するのは、極数とスロット数の差が2の場合であることが分かっている。本稿では、磁気異方性の影響が顕在化する代表例として10極12スロットのモータを対象とした。検証用モータの断面形状を図3の(a)に、設計諸元を図の(b)に示す。このモータに対し磁気異方性を考慮したモデル(実機では圧延方向がすべて同一となるように平行積みした場合に対応)と、磁気異方性を無視し等方性として扱ったモデル(同、回し積みを行った場合に対応)について、磁界解析及び実測によりコギングトルクの変化を評価する。

解析及び実測の結果を図4に示す。いずれも、磁気異方性がない場合には極数とスロット数の最小公倍数の成分(1回転当たり60山)のコギングトルクが発生する一方、磁気異方性がある場合は、これに加え、1回転当たり10山の成分が発生していることが分かる。脈動の振幅も両者でよく一致しており、定量化が行えたことが分かる。

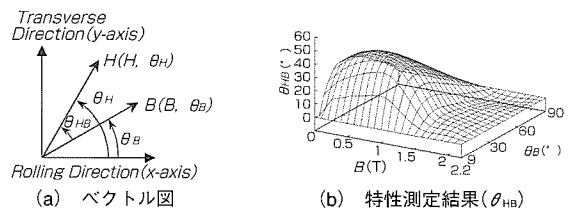


図2. 二次元磁化モデル

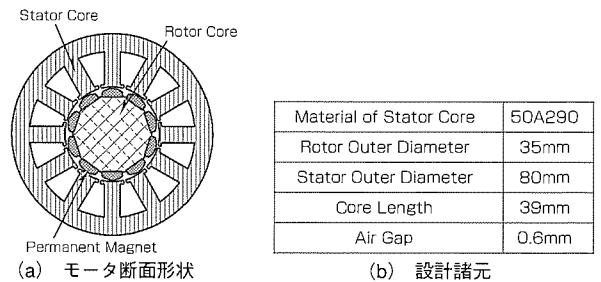


図3. 検証用モータの形状と諸元

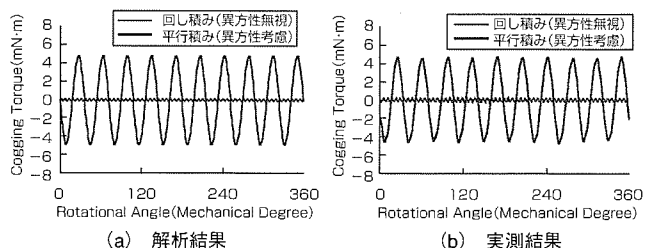


図4. コギングトルク評価結果

3. 鉄心の応力分布を考慮したモータ設計

3.1 応力下における電磁鋼板の磁気特性⁽⁵⁾

応力下での電磁鋼板の磁気特性を測定するため、応力印加機構付きの磁気特性測定装置を開発した。これにより測定した電磁鋼板の応力下での磁気特性の一例を図5に示す。同図(a)は圧縮応力下でのBH曲線(最大磁束密度1.0 T)であり、同図(b)はB=1.0 T及び1.5 Tのときの比透磁率を印加応力に対して表示したものである。これらの図から、応力のない状態(0 MPa)では比透磁率は高い値を示すが、応力が大きくなるに従って比透磁率が低下することが分かる。また、引張応力と圧縮応力では比透磁率の変化が異なり、圧縮時には引張時よりも急峻(きゅうしゅん)に比透磁率が低下する。

3.2 応力分布を考慮した解析手法⁽⁶⁾⁽⁷⁾

今回開発した応力影響検討システムのフローを図6に示す。以後、鉄心のフレームへの焼きばめモデルを例に、各項目について簡単に述べる。

(1)応力印加時における鉄心素材の磁気特性の変化を数段階の応力に対して測定する。(2)固定子のフレームと鉄心を対象とした構造解析を行い、フレームに焼きばめた場合の固定子鉄心の変形量、及び固定子鉄心における応力分布を求める。(3)上記の素材磁気特性測定と構造解析の結果を基

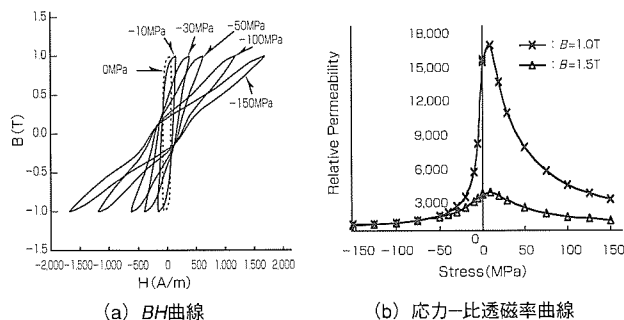


図5. 応力下での電磁鋼板の磁気特性

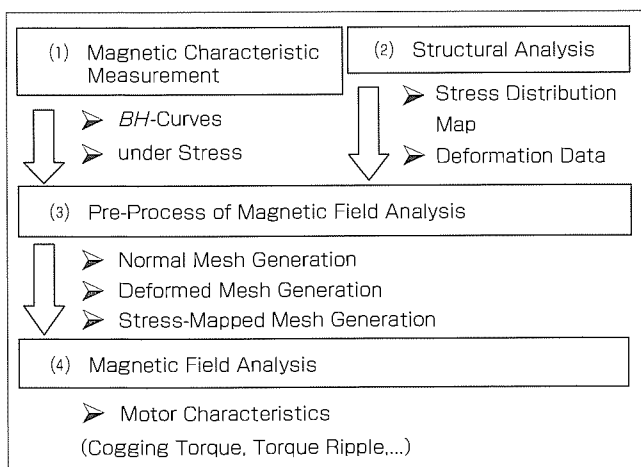


図6. 応力分布を考慮した解析手法の流れ

に、磁界解析用の有限要素入力データを作成する。まず、フレームの影響がない状態のメッシュを作成する。次に、構造解析で得た鉄心変形データから、変形後のメッシュデータを作成する。このメッシュデータの各要素に対し、各要素位置での応力値を構造解析結果から読み取り、この値が先に測定した数段階のデータのいずれに分類されるかを判定し、各要素の物性番号として分類する。(4)上記で作成したメッシュデータに対し、物性番号とBH特性曲線とを対応させた後、磁界解析を実施する。応力の値としては、スカラー量であるミーゼス相当応力とベクトル量である主応力とを必要に応じ使い分けられる構成とした。

3.3 検証用モータの諸元と構造解析結果

検証用モータに対し固定子鉄心内部の応力を考慮したコギングトルク解析を行い、実測値と比較する。モータの諸元は図3と同一(ただし鉄心材料は50A800)とし、鉄心をフレームに焼きばめることで発生するコギングトルクを評価した。前章と同様に、10極12スロットのモータにおいてコギングトルクに顕著な影響を与えるため、フレーム形状は楕円(だえん)状とした。図7の(a)に検証用モータの断面形状を、同図の(b)にコギングトルク測定結果を示す。同図(b)から、焼きばめ前にはほとんど見られなかった1回転あたり10山の成分(電気角360度当たり2山;以後2次成分)が顕著に現れていることが分かる。

3.4 コギングトルク解析結果

構造解析により得られた応力分布(ミーゼス相当応力のコンター図, 1/4モデル)を図8に示す。また、ミーゼス相当応力及び主応力を考慮した磁界解析用のモデルを図9に示す。モデル中の各要素の濃淡は物性番号の違いを表し、

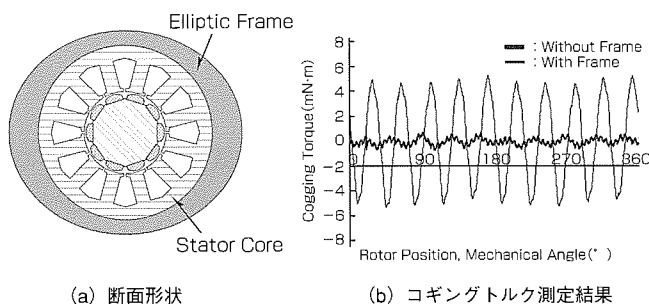


図7. 検証用モータの断面形状とコギングトルク測定結果

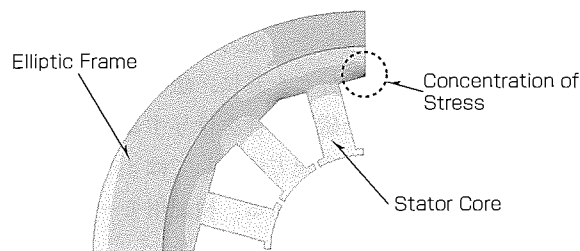


図8. 構造解析結果(ミーゼス相当応力分布コンター図)

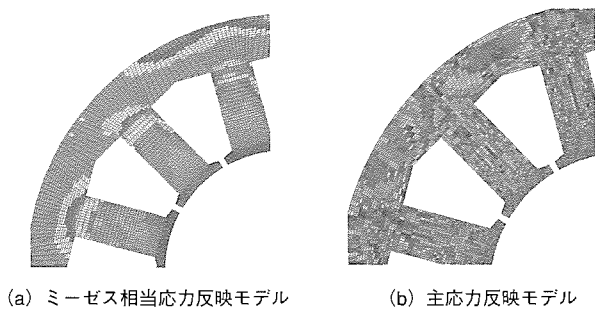


図9. 応力分布を反映した磁界解析メッシュ

応力値に応じてそれぞれ異なる磁気特性が割り当てられていることを示す。

図の2つのモデル及び変形のみを考慮したモデルを用いてコギングトルク解析を行った。得られた結果を実測結果とともに図10に示す。同図(a)は波形, 同図(b)は周波数成分分析結果を表す。

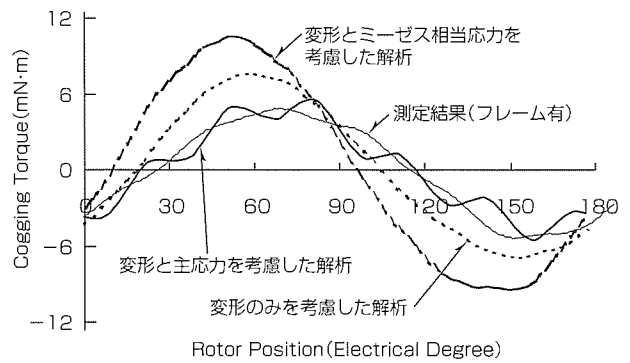
主応力反映モデルを用いた場合, 実測波形と振幅はおおむね一致した。特に主成分である2次成分は約4%の誤差となり, 3通りの解析の中で最も精度良く解析できた。一方, ミーゼス相当応力反映モデルを用いた場合, コギングトルクの主成分である2次成分を過大評価しており, 実測波形よりコギングトルクが大きい結果となった。この理由として, 固定子が受ける応力はほとんどが周方向の圧縮応力であり径方向の応力は相対的に低くなるが, ミーゼス相当応力を考慮したときは径方向, 周方向ともに等しく透磁率の低下を与えるため, 透磁率の低下を過大評価し, 結果的にコギングトルク2次成分が大きくなったと考えられる。

ただし, 極数とスロット数の最小公倍数で決定される12次成分については, 主応力反映モデルよりもミーゼス相当応力反映モデルの方が近い結果となった。この成分の高精度化については検討を要する。

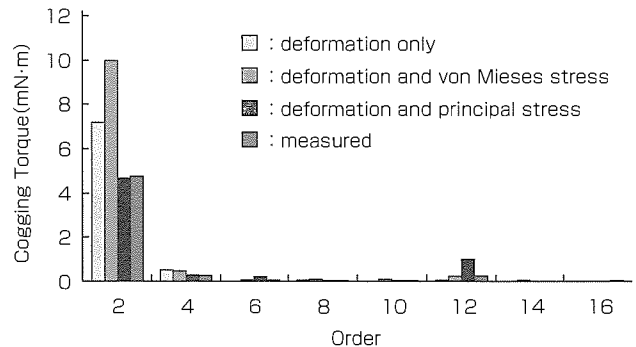
4. む す び

永久磁石モータのコギングトルク低減を題材に, 鉄心の詳細な磁気特性を考慮したモータ設計技術について述べた。

- (1) 鉄心の磁気異方性を考慮した解析手法を示した。磁気異方性のモデル化方法としては二次元磁化法を用いた。磁気異方性に起因するコギングトルクを算出し実測結果と比較した結果, 誤差5%以内で実機を再現できた。
- (2) 鉄心内部の応力分布を考慮するため開発した構造と磁界の連成解析手法を示した。応力下の電磁鋼板磁気特性と構造解析で得た応力分布を基に, 磁界解析メッシュの各要素に応力に応じた磁気特性を付与することで連成解析を実現する。応力の表現方法としてはミーゼス相当応力又は主応力を適用可能である。検証用モータのコギン



(a) コギングトルク波形



(b) コギングトルク成分分析結果

図10. コギングトルク評価結果

グトルクを算出し実測結果と比較した結果, 主応力を用いた場合に誤差4%以内で実機を再現できた。

参 考 文 献

- (1) 有田秀哲, ほか: 環状試料磁気試験法における電動機用鉄心材の磁気異方性の影響について, 第15回電磁力関連のダイナミックスシンポジウム, 2B13 (2003)
- (2) 榎園正人, ほか: 電磁鋼板の磁気異方性のモデリング, 電気学会研究会資料, MAG-03-57 (2003)
- (3) Yamaguchi, S. et.al.: Cogging Torque Calculation Considering Magnetic Anisotropy for Permanent Magnet Synchronous Motors, ISEF (2003)
- (4) 大穀晃裕, ほか: 無方向性鋼板の磁気異方性に起因するPMモータのコギングトルク, 電気学会研究会資料, RM-03-100 (2003)
- (5) 谷 良浩, ほか: 電磁鋼板の応力下における磁気特性の測定, 電気学会研究会資料, MAG-03-191 (2003)
- (6) 大穀晃裕, ほか: フレームの応力の影響を考慮したPMモータのコギングトルク解析, 電気学会研究会資料, SA-03-72, RM-03-74 (2003)
- (7) 中野正嗣, ほか: 固定子鉄心の主応力分布を考慮したPMモータのコギングトルク解析, 電気学会研究会資料, SA-04-16, RM-04-16 (2004)

回転機の鉄損解析技術

米谷晴之*
谷 良浩**

Technologies of Magnetic Power Loss Analysis for Rotating Machines

Haruyuki Kometani, Yoshihiro Tani

要 旨

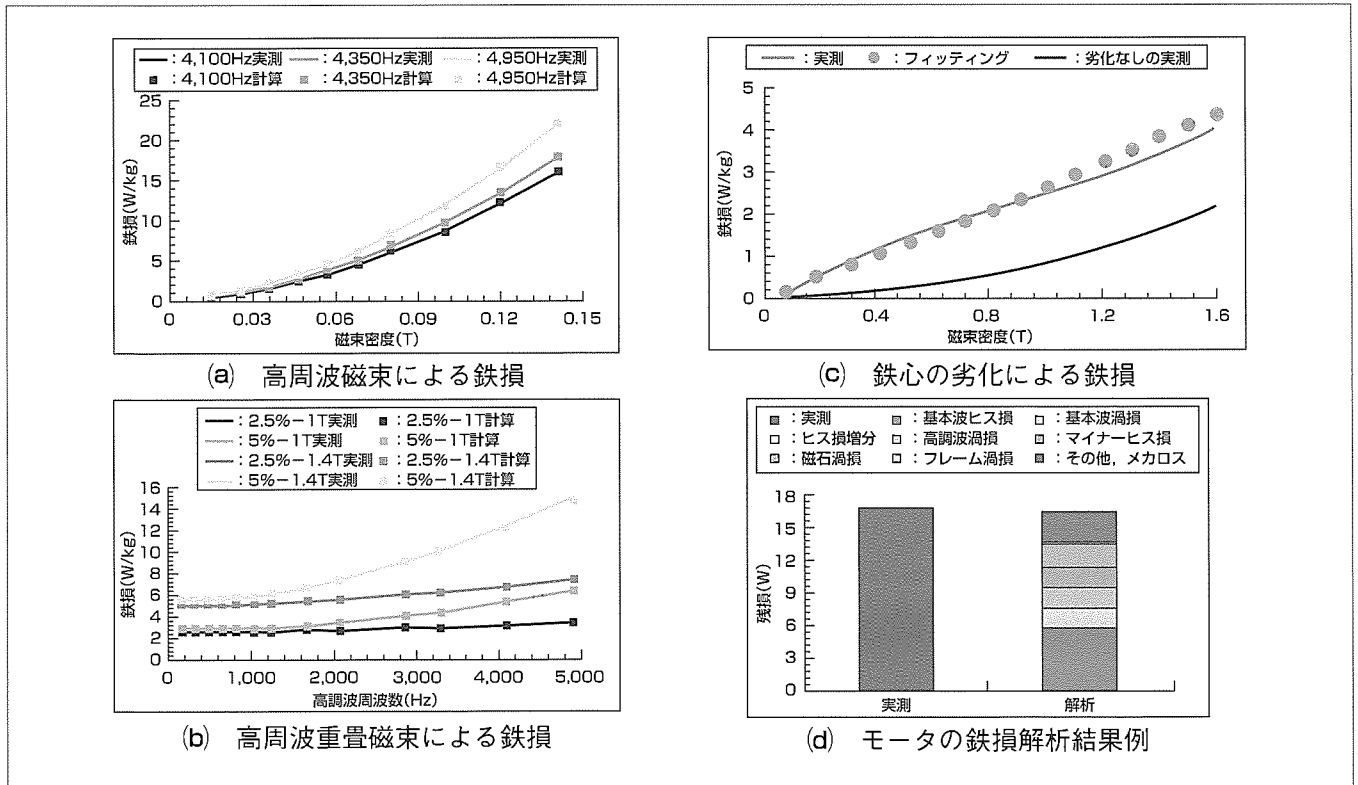
近年、地球環境の観点から省エネルギー化が進み、回転機においても高効率化が製品競争力の強化につながるケースが多くなってきている。これに伴い、インバータ駆動される永久磁石モータでは、集中巻き、分割鉄心、磁石埋め込み構造など銅損低減に関して多くの技術開発がなされてきた。しかし、鉄損に関しては、これまで試作・試験による評価以外にこれを精度良く見積もる手法がなかったため、十分な鉄損低減技術が構築されていないように思われる。

本稿では、試作・試験なしにインバータ駆動される永久磁石モータの鉄損を電磁界解析技術を駆使して計算する手法について示した。

インバータ駆動される永久磁石モータの鉄損は、インバータ高調波やスロット高調波などの高調波による鉄損の見積りがこれまで困難であった。本稿では、表皮効果を考慮

した新たな高調波による鉄損の計算手法を提案し、実測と比較検討し、妥当性を証明した。また、フレーム焼きばめや鉄心打ち抜きひずみによる鉄心の劣化も鉄損特性に大きな影響を与えるため、この鉄心の劣化の影響をモデル化する技術を開発した。これは、上記の劣化は製品により大きなばらつきがあるため、劣化の度合いを2種類の劣化係数で置き換え、この係数に範囲を持たすことで対応できるように考えた。さらに、鉄心で発生する鉄損以外の漂遊損と呼ばれる損失についても、解析技術を構築した。

上記の定式化による鉄損解析と実測値を比較し、妥当な解を得た。この手法を各種モータに適用することにより、これまで十分な精度で検証できなかった鉄損が把握でき、モータ又はインバータ設計段階で、鉄損低減構造が提案できると考えられる。



鉄損解析手法と鉄損解析例

(a)は数千Hz以上の高周波磁束によって鉄心に発生する鉄損を計算した例である。鉄心の表皮効果を考慮した定式化により、実測結果とほぼ一致している。(b)はモータの固定子鉄心内で発生する鉄損を模擬した基本波1T及び1.4Tに高調波2.5%並びに5%が重畳した場合の鉄損計算例である。実測結果と計算結果がよく一致している。(c)は焼きばめなどによる圧縮応力印加時の鉄心に発生する鉄損の計算例で、応力により鉄損が増大し、実測と計算がよく一致している。(d)はモータの鉄損解析例である。鉄損発生メカニズムごとに損失分離しており、実測値によく一致している。

*先端技術総合研究所(工博) **同研究所

1. ま え が き

近年、モータの高効率化が製品競争力のキーポイントとなっている。特に、インバータ駆動される永久磁石モータでは、分割鉄心や集中巻き、磁石埋め込み構造や高性能磁石の適用など、新技術を導入することで従来モータ損失の大半を占めていた銅損を極限まで低減することに成功している。このため、鉄損のモータ損失に占める割合が増加し、更なる高効率化のためには鉄損低減が必要となってきた。鉄損低減には高性能鉄心材料の採用が考えられるが、これ以外の方法、例えばモータ形状やインバータ仕様などで鉄損を低減する検討はこれまで余りなされていなかった。これは、鉄損を試作レスで高精度に評価する手法が開発されていなかったためと考えられる。

本稿では、新たに鉄損解析手法⁽¹⁾を考案し、特にインバータ駆動時などに発生する高調波による鉄損を解析する手法を開発した⁽²⁾。この手法は、膨大な計算機負荷を必要とせず、かつ、鉄損発生メカニズムが解明できるように周波数ごとに鉄損値が計算できるように工夫されている。

2. 鉄損解析手法

2.1 高周波磁束による鉄損計算法⁽²⁾

一般に、回転機の鉄損を電磁界解析を用いて計算する場合、現実的な計算時間で解析するためには、解析により得られた各要素ごとの磁束密度 B の履歴を周波数分析し、鉄鋼メーカーが公表する鉄損カーブをフィッティングして定式化し、これに当てはめてヒステリシス損 W_h と渦電流損 W_e に分離して計算する⁽¹⁾。

$$W_h = \alpha B^\gamma f \dots\dots\dots(1)$$

$$W_e = \beta B^2 f^2 \dots\dots\dots(2)$$

ここで、 f : 周波数, α, β, γ : フィッティングカーブから得られる定数であり、鉄心の板厚方向に磁束密度が均一に分布している状態を表している。

しかし、周波数が数千Hz以上の高周波になれば、積層鉄心の板厚が薄いといても表皮効果により磁束は鉄心表面に集中し、指数関数的に板厚中央に向かって減少すると考えられる。ここで、表皮深さを δ 、板厚内平均磁束密度を B_0 とすると、表皮効果を考慮したヒステリシス損は次式で表される。

$$W_h = \frac{2}{t} \int_0^{t/2} (\alpha B^\gamma f) dx$$

$$= \frac{2\alpha\delta f}{t\gamma} \left[\frac{B_0 t}{2\delta \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{t}{2\delta}\right)\right\}} \right]^\gamma \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{\gamma t}{2\delta}\right) \right\} \dots\dots(3)$$

ここで、 t は板厚である。上記の式で計算すると、表皮効果によりヒステリシス損は増加することになる。

表皮効果により渦電流も板厚表面に集中する。この影響で等価的に抵抗が高くなり、渦電流損は減少する。表皮効

果がある場合の渦電流損の表皮効果がない場合の渦電流損に対する比を渦電流損減少係数 κ とすれば、渦電流損は次式となる。

$$W_e = \beta B^2 f^2 \kappa \dots\dots\dots(4)$$

$$\kappa = \frac{6 \left\{ \left(\frac{3}{2} \delta + \frac{t}{2} \right) \exp\left(-\frac{t}{\delta}\right) + \frac{\delta}{2} - 2\delta \exp\left(-\frac{t}{2\delta}\right) \right\}}{\left\{ 1 - \exp\left(-\frac{t}{2\delta}\right) \right\}^2 t} \dots\dots(5)$$

ここで、表皮深さ δ は、表皮深さ内の平均磁束密度 B_{av} 、及び平均磁界強度 H_{av} を用いて次式で定義した。

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho H_{av}}{\pi f B_{av}}} \dots\dots\dots(6)$$

ここで、 ρ は鉄心の抵抗率であり、 B_{av} は次式で表される。

$$B_{av} = \frac{B_0 t}{2\delta \left(1 - e^{-\frac{t}{2\delta}} \right)} \left(1 - \frac{1}{e} \right) \dots\dots \delta \leq \frac{t}{2} \dots\dots(7)$$

$$B_{av} = B_0 \dots\dots\dots \delta > \frac{t}{2}$$

上記の式を用いて鉄損を計算した結果と実測値を図1に比較する。同図から、高周波鉄損が実測値とよく一致しており、計算法が妥当であることが分かる。

2.2 基本波に高調波が重畳した鉄損の計算法⁽²⁾

実際のモータの鉄心では、固定子においては基本波に高調波が重畳された磁束波形となっており、回転子では直流磁場に高調波が重畳された波形となっている。ここでは、実際のモータで発生する鉄損を以下の5項目に分類する。

- ① 基本波ヒステリシス損
- ② 基本波渦電流損
- ③ 高調波による基本波ヒステリシス損の増分
- ④ 高調波渦電流損
- ⑤ マイナーループヒステリシス損

ここで、高調波重畳時の表皮深さは、式(7)に基本波磁束密度 B_1 を足した値を平均磁束密度とし、式(6)により計

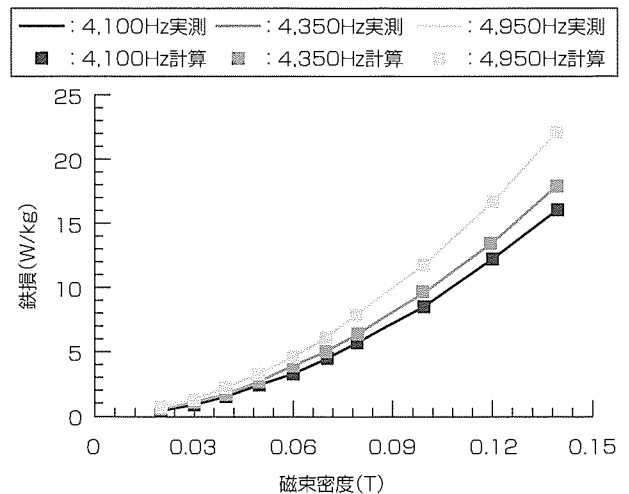


図1. 単一周波数鉄損の実測と計算の比較

算する。③高調波による基本波ヒステリシス損の増分 ΔW_h とは、高調波を含む最大磁束密度を $B_m(x)$ (x : 板厚方向位置)、基本波ヒステリシス損を W_h とすると次式で表される。

$$\Delta W_h = \frac{2}{t} \int_0^{t/2} \{ a B_m^\gamma(x) f_t \} dx - W_h \quad \dots\dots\dots(8)$$

ここで、 f_t は基本波周波数である。

⑤マイナーループヒステリシス損⁽³⁾ W_m は、図2に示すような磁束密度波形のくぼみに対して発生し、文献(3)にあるようにマイナーループが発生する点での磁束密度 B_c とマイナーループ振幅 ΔB の関数として表現した。

$$\Delta W_m = \frac{2}{t} \int_0^{t/2} \left[\sum_0^{2\pi} \eta a \left(\frac{\Delta B}{2} \right)^\gamma f_t \right] dx \quad \dots\dots\dots(9)$$

$$\eta = 1 + c_1 B_c^{c_2} \left(\frac{\Delta B}{2} \right)^{c_3} \quad \dots\dots\dots(10)$$

ここで、 c_1 、 c_2 、 c_3 は現在のところ測定結果を利用して定式化している。

図3に基本波に高調波が重畳した場合の鉄損の実測結果と計算結果を比較して示す。ただし、基本波磁束密度は1T及び1.4T、100Hzであり、高調波磁束密度は2.5%及び5%である。同図から、十分な精度で計算できていることが分かる。

2.3 鉄心の劣化の考慮法

回転機の鉄心は、焼きばめ、打ち抜き、かしめ、分割鉄心などにより、磁化特性や鉄損特性が劣化する⁽⁴⁾。したがって、鉄心の劣化量が把握できれば鉄損計算が高精度になるが、一般に鉄心の劣化量は製品によって大きくばらつくと考えられる。このため、鉄心の劣化にはこのばらつきを認めて、ある範囲内で鉄心が劣化していると考えなければならない。本稿では、この方法として鉄心の劣化を定式化し、この係数がある範囲内で変化するとした劣化のモデリングを考えた。磁化特性の劣化として、劣化係数 p を用いたP型劣化と劣化係数 q を用いたQ型劣化を考えた。

P型劣化による磁束密度 $B_p(H)$ は、元のBHカーブを $B(H)$ とすれば次式で表される。

$$B_p(H) = \mu_0(1-p)H + pB(H) \quad \dots\dots\dots(11)$$

ここで、 μ_0 は真空の透磁率であり、打ち抜きひずみにより鉄心切断面付近で塑性変形を起こしている場合を想定している。Q型劣化による磁界 $H_q(B)$ は元のBHカーブを $H(B)$ とすれば次式で表される。

$$H_q(B) = \frac{(1-q)B}{\mu_0} + qH(B) \quad \dots\dots\dots(12)$$

これは、焼きばめなどによる圧縮方向の残留応力による劣化を想定している。

上記の定式化に基づいた鉄心の劣化を考慮した磁化特性の計算結果と、圧縮応力(約100MPa)を印加した場合の実測値を図4に比較して示す。同図から、十分な精度でモデリングができていることが分かる。

鉄損特性の劣化に関しても、上記の定式化で用いた磁化特性劣化係数 p 、 q を用いて、鉄損劣化係数 u を算出する。劣化後のヒステリシス損 W_h は次式で表す。

$$W_h = a B_m^\gamma f_t u \quad \dots\dots\dots(13)$$

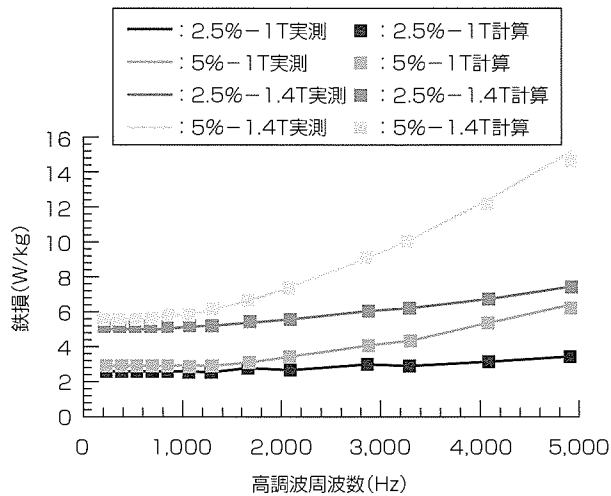


図3. 高調波重畳鉄損

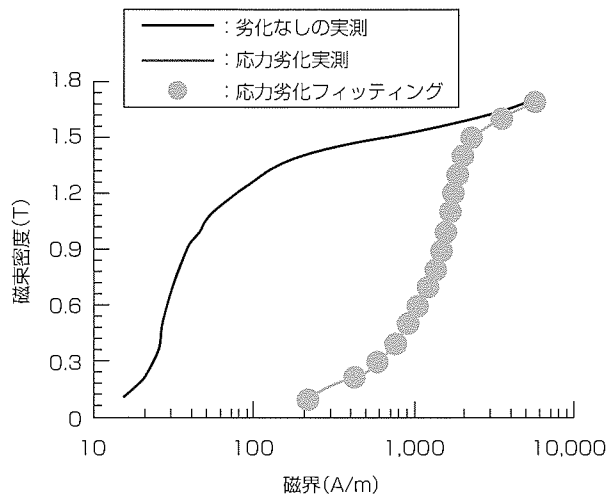


図4. 鉄心の劣化による磁化特性モデリング

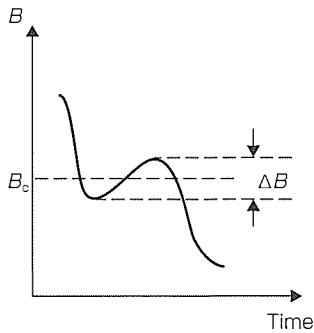


図2. マイナーループが発生する磁束密度波形

ここで、 B_u は劣化後の磁化特性 $H_r(B)$ を用いて次式で表す。

$$B_u = \frac{B - (1 - u)\mu_0 H_r(B)}{u} \dots\dots\dots(14)$$

図5に圧縮応力100MPa時の鉄損特性の劣化特性の実測と計算結果を示す。同図から、十分な精度でモデリングができていることが分かる。

3. 回転機の損失解析

実測における鉄損は負荷時の銅損以外の損失であり、鉄心で発生する損失以外にも機械損や漂遊損と呼ばれる損失が合計されている。漂遊損には、希土類磁石に発生する渦電流損、フレーム(鉄製)で発生する損失、固定子鉄心端面で発生する軸方向磁束による渦電流損、インバータキャリアなどの高周波電流による巻線の表皮効果による付加的な銅損などが挙げられる。

図6にこれらの損失を合計した永久磁石モータの鉄損解析結果と実測値を示す。同図から、実測と比較して精度良く計算ができてていることが分かる。

4. む す び

以上、インバータ駆動モータを鉄損解析するために必要となる高調波磁束による鉄損の推定法及び鉄心材料の劣化に伴う鉄損の増加に関する定式化を行い、解析結果が妥当であることを示した。

この技術は、エアコン用圧縮機モータ、FA用モータ、車載用モータなどの永久磁石モータを始め、電管用主電動機、タービン発電機の高効率化に応用されている。

参 考 文 献

- (1) 電気学会技術報告第942号：回転機の電磁界解析高度化技術 (2004)
- (2) 米谷晴之, ほか：高調波重畳磁束による鉄損解析の検討, 電気学会静止器回転機合同研究会, RM-05-27, SA-05-27 (2005)
- (3) 谷 良浩, ほか：マイナーヒステリシス損近似法によ

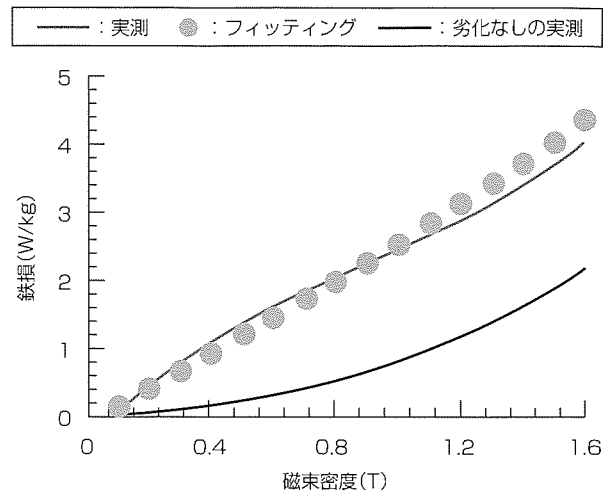


図5. 鉄心の劣化による鉄損特性モデリング

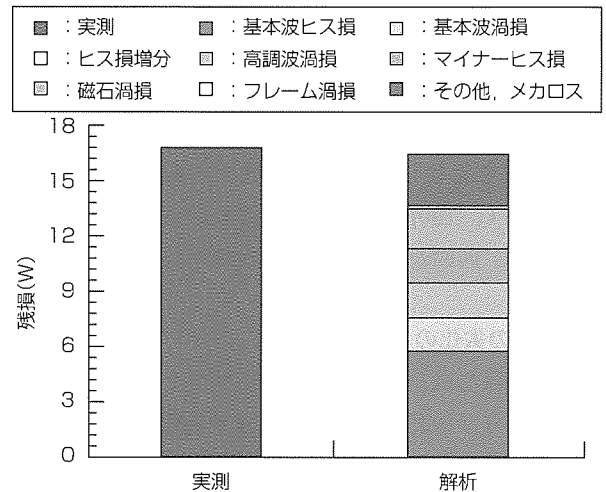


図6. 永久磁石モータの鉄損解析例

- る歪み波鉄損推定への影響(その2), 電気学会マグネティックス研究会, MAG-05-44, 31 (2005)
- (4) 中野正嗣, ほか：固定子鉄心の主応力分布を考慮したPMモータのコギングトルク解析, 電気学会静止器回転機合同研究会, RM-04-16, SA-04-16 (2004)

永久磁石モータの熱減磁評価技術

中野正嗣* 宮田浩二+
米谷晴之**
川村光弘***

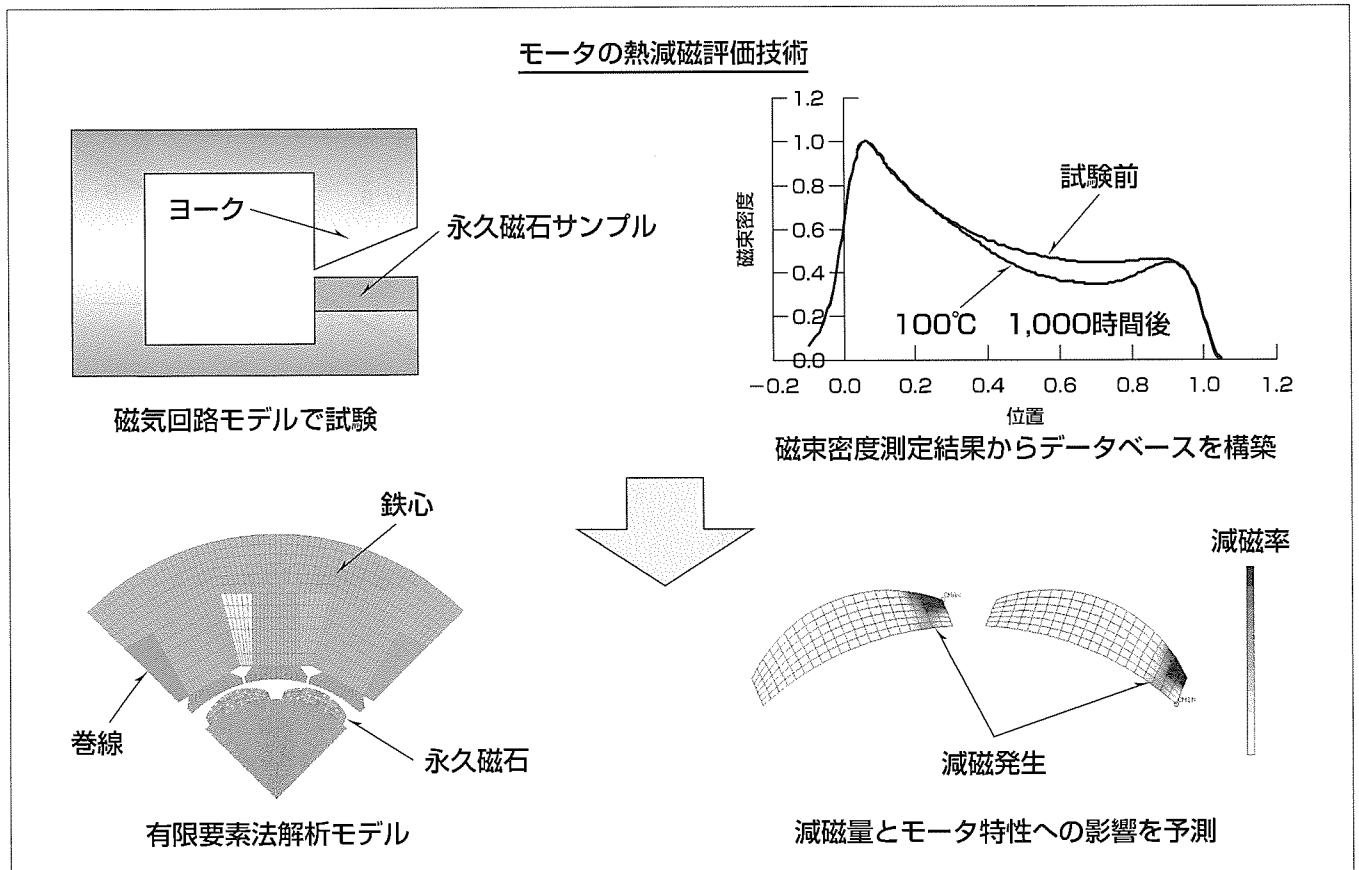
Estimation Technology of Thermal Demagnetization in Permanent Magnet Motors

Masatsugu Nakano, Haruyuki Kometani, Mitsuhiro Kawamura, Koji Miyata

要旨

近年、小型モータのみならず、大容量のモータや発電機へも永久磁石の採用が進んでいる。永久磁石の中でもNd-Fe-B系の焼結磁石は優れた磁気特性を持つが、温度上昇や電機子電流の磁界で熱減磁が生じる場合があり、慎重な磁気回路設計が必要である。熱減磁を検討することは機器の信頼性確保のために重要であり、熱減磁の試験が困難な大型機ではもちろん、小型モータなどでもシミュレーションによる熱減磁の評価の必要性は高い。そこで、シミュレーションによる熱減磁の定量的な評価を行うため、独自の評価法“減磁関数法”を開発した。この手法は永久磁石とヨークから構成される磁気回路モデルの永久磁石表面の磁束

を観察し、得られたデータベース(減磁関数)を用いて有限要素法で減磁量を推定する手法である。解析結果と試験結果は良い一致を示し、従来よりも高精度な評価法であることを確認した。さらに、減磁がモータ特性にどのような影響を及ぼすかを磁界解析によって予測する手法も開発した。永久磁石各部分が経験する磁場条件の履歴を追うことにより減磁率の分布を求め、さらに、減磁率の分布を考慮した解析条件でモータのトルク特性等を計算する手法である。この評価技術は、磁石材料の選定や磁気回路の最適化など、実機的设计に広く適用でき、信頼性の高い製品開発に役立てることができる。



熱減磁評価の概要

永久磁石とヨークから構成される磁気回路のモデルを作成し、一定温度条件で永久磁石表面の磁束の変化を測定し、減磁のデータベースを構築する。さらに、このデータベースを用いて有限要素法でモータの減磁量を予測し、減磁がモータ特性へ与える影響について予測する。

1. ま え が き

近年、小型モータのみならず、大容量のモータや発電機へも永久磁石の採用が進んでいる。永久磁石の中でもNd-Fe-B系の焼結磁石は優れた磁気特性を持つが、温度上昇や電機子電流の磁界で熱減磁が生じる場合があり、慎重な磁気回路設計が必要である。熱減磁を検討することは機器の信頼性確保のために重要であり、熱減磁の試験が困難な大型機ではもちろん、小型モータなどでもシミュレーションによる熱減磁の評価の必要性は高い。

そこで、シミュレーションによる熱減磁の定量的な評価を行うため、実機の磁気回路をモデル化した試験を行い、得られたデータを基に磁界解析を実施する独自の評価法“減磁関数法”を開発した。また、モータの特性に減磁がどのような影響を及ぼすかを磁界解析によって予測する手法についても検討した。この技術は、大容量風力発電機、車載用モータ、エレベーター用モータ、産業用サーボモータなどへ広く適用できる。この技術の開発によって、より信頼性の高い製品の提供が可能となった。

2. 熱減磁の計算法 (減磁関数法)

永久磁石の温度変化については、図1に示すように、可逆変化領域と不可逆変化領域に分けることができる。可逆変化領域では磁化の温度係数で変化し、温度を戻すと元の磁束量に戻る。しかし、動作点が減磁曲線のクニック点近くになると、温度を戻しても磁束量が元に戻らないことがある。このような場合を不可逆変化と言う。また、不可逆変化には、ある温度、ある磁界の下で短時間に起きる初期減磁とその後ゆっくりと磁束量が変化していく経時変化の2段階があるとされる(図2)。したがって、熱減磁の定量的な評価を行うには、初期減磁及び経時変化を考慮する必要がある。

そこで、永久磁石の特性と動作点からパラメータ Δ を算出し⁽¹⁾、試験で得た Δ と減磁量の関係から磁界解析によって減磁量を評価する手法を用いた⁽²⁾。この手法を用いれば、

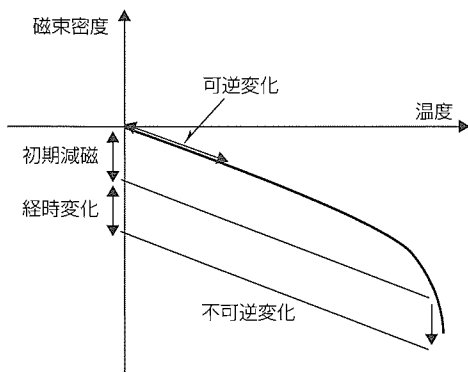


図1. 磁束密度の可逆変化と不可逆変化

磁石内の初期減磁と経時変化の定量的な評価が可能となる。このように減磁率を Δ の関数として表す評価法を減磁関数法と呼ぶこととした⁽³⁾⁽⁴⁾。なお、熱減磁を評価するパラメータとして

$$\Delta = \frac{\mu_{rec}\Delta H}{B_r} \dots\dots\dots(1)$$

を用いた。ここで μ_{rec} はリコイル透磁率、 ΔH は反磁界と保磁力との差、 B_r は残留磁束密度である。図3に減磁曲線とパラメータ Δ の関係(減磁関数)を示す。このパラメータ Δ と初期減磁率 $F_i(\Delta)$ 及び経時変化率 $F_a(\Delta)$ にはおおむね図4に示すような関係があることが分かっており、この

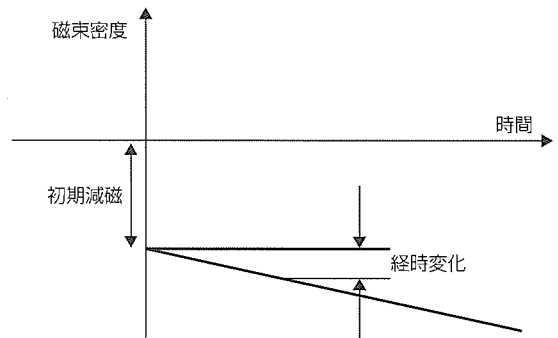
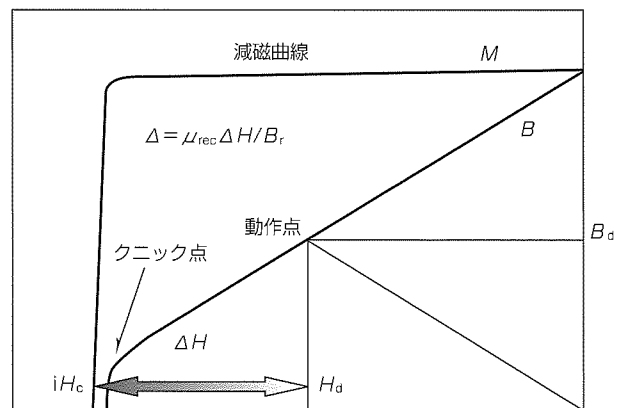


図2. 初期減磁と経時変化



M: 磁化, B: 磁束密度, B_d : 動作点での磁束密度
 iH_c : 保磁力, H_d : 動作点での反磁界

図3. 減磁曲線とパラメータ Δ

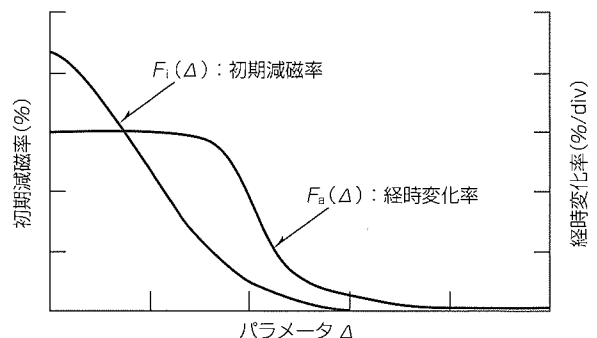


図4. 減磁関数

データがあれば磁石の Δ を知ることで減磁率を推定できる。

3. 試験による検証

減磁率の評価の精度は、 Δ と初期減磁率と経時変化率の関係である減磁関数の精度に直接依存するため、試験によって得られるデータをより Δ と相関の強いものにする必要がある。そこで、減磁量の評価を高精度化するために、永久磁石型同期機の磁気回路を模擬したモデルを作成し、試験を行った。磁気回路モデルは永久磁石とヨークからなり、磁石内でパーミアンス係数に分布を持たせるため、磁石に面するヨーク部分には傾斜を設けた(図5)。これにより、1つのモデルで種々の動作点における減磁量を知ることができる。温度条件は100℃として、1,000時間後までの磁石表面の磁束密度を測定した。なお、試験には保磁力の高い永久磁石Aと低い永久磁石Bの2種類を比較した。

磁石の表面磁束密度波形を永久磁石AとBについて図6、図7にそれぞれ示す。なお、磁束密度は磁石表面に垂直な成分(図5のy方向成分)である。また、磁束密度は試験前の最大値で規格化し、横軸の位置は磁石幅で規格化している。図では試験前の磁束密度波形と1,000時間経過後の波形を示す。磁石とヨーク間のギャップ長が小さい部分では磁束密度が高く、ギャップ長が大きい部分では磁束密度が低くなっており、この部分でパーミアンス係数が低下していることが分かる。保磁力の高い永久磁石Aについて

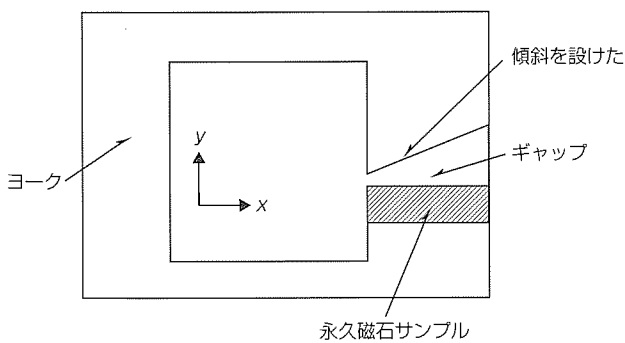


図5. 試験用磁気回路モデル

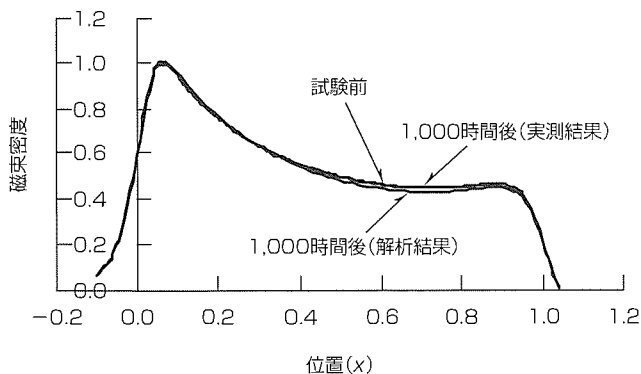


図6. 表面磁束密度波形(永久磁石A)

ではほとんど減磁は確認されなかったのに対し、保磁力の低い永久磁石Bではパーミアンス係数の低い部分に減磁が見られた。また、磁石表面の磁束密度分布を試験時間に対してプロットした結果を永久磁石AとBについて図8に示す。これらの結果から、 Δ に対する初期減磁率と経時変化率(減磁関数)を導出し、このデータベースを用いて有限要素法による磁界解析を行った。100℃、1,000時間後の減磁量を推定した結果、解析結果と試験結果は良い一致をみた(図6、図7)。

4. モータの解析事例

減磁率を考慮してモータの特性を予測する場合には、磁界解析の入力条件に永久磁石の各部の減磁率を考慮する必要がある。したがって、図9に示すように、永久磁石の要素ごとに物性番号を割り当てたモデルを作成するなどの工夫が必要となる。また、永久磁石の各部が経験する反磁界は時々刻々と変化する。そこで、永久磁石の減磁率の分布を求める際は、各解析ステップの履歴を追う手法を用いた。最後に得られた減磁率の分布を反映した解析条件で解析を実施し、モータ特性を検討する。

減磁率を考慮した解析の一例として、図のモデルを用いた例を示す。上述した手法に従い、過大な電流が流れたときの減磁率の分布を求めて、その分布を考慮してトルク特性の解析を行う。なお、このモデルは減磁の解析のために作成したモデルであり、減磁が発生するように実際より非

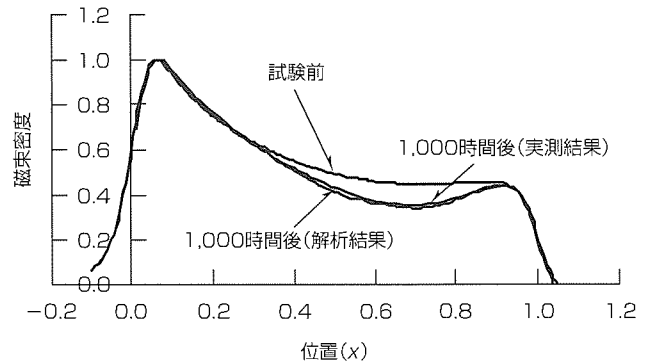


図7. 表面磁束密度波形(永久磁石B)

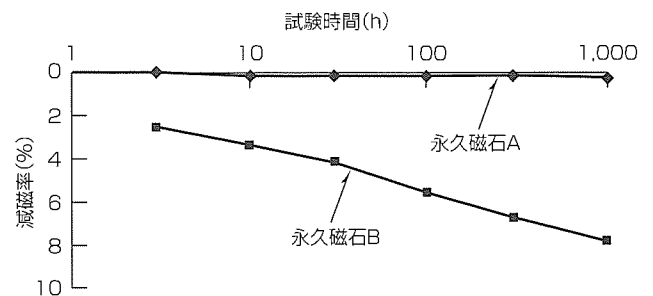


図8. 減磁率の経時変化(x=0.4)

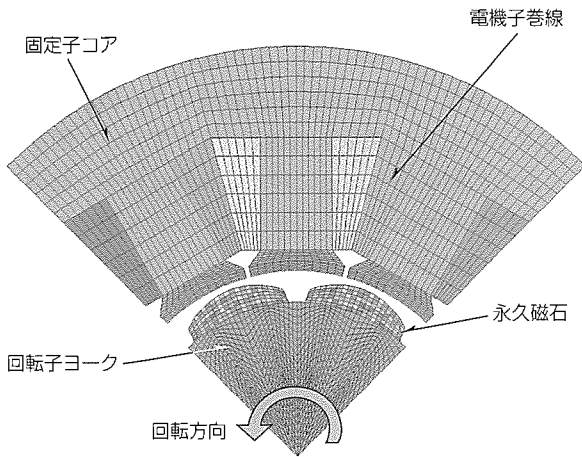


図9. 解析用メッシュ

常に厳しく温度条件，電流条件を決定している。

磁石の減磁率の分布を図10に示す。電機子の反磁界を受ける部分に減磁が発生していることが分かる。次に，図10の減磁率を考慮して，定格電流時のトルクの解析を行った結果を図11に示す。減磁によりトルクが低下しており，その低下率がモータの駆動条件によっても異なることが確認できる。

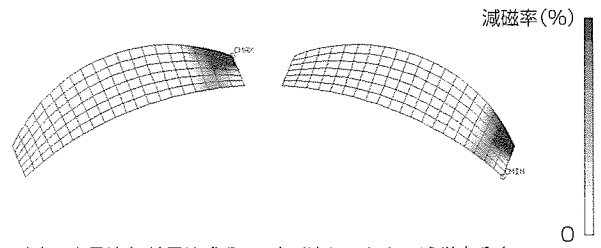
5. むすび

永久磁石型同期機の熱減磁評価を行うために，実機の磁気回路を模擬したモデルで試験を行った。この試験結果とパラメータΔを用いた評価法である減磁関数法により減磁量を磁界解析によって予測した結果，試験結果と良い一致を見た。また，減磁が機器の特性にどのような影響を及ぼすかを磁界解析によって予測する手法について述べた。

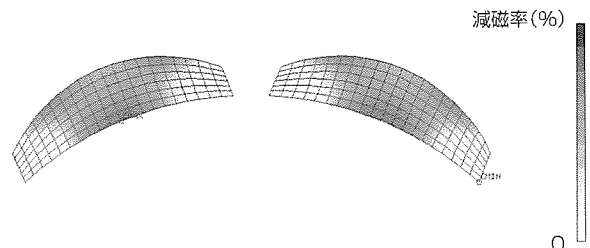
この手法は，磁石の信頼性を確認するためだけではなく，磁石の選定や磁気回路の最適化など，実機の設計に適用できる。また，減磁関数法は他の手法より高精度に減磁量の推定ができるため，信頼性評価がより正確に行える。

参考文献

(1) 伊藤 馨，ほか：長期安定性を考慮した永久磁石磁気回路の磁束条件，電気学会論文誌A，**118**，No.2，176～181 (1998)



(a) 大電流(q軸電流成分のみ)が流れたときの減磁率分布



(b) 大電流(d軸電流成分のみ)が流れたときの減磁率分布

図10. 減磁率の分布

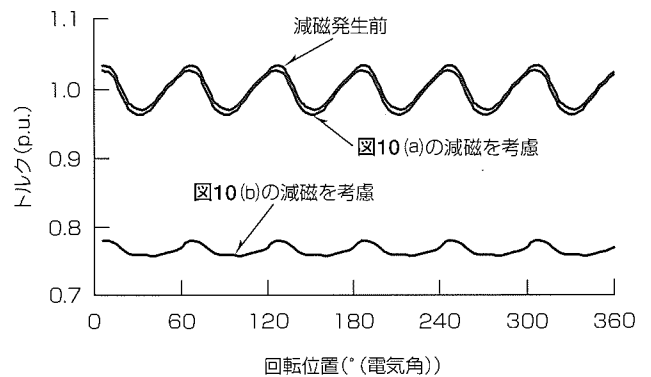


図11. 減磁を考慮したトルクの解析結果

(2) 宮田浩二：永久磁石電動機の高精度モデリング-配向，着磁，減磁の考慮-，電気学会全国大会 5-S16-4 (2001)

(3) 中野正嗣，ほか：永久磁石型同期機の熱減磁評価，電気学会全国大会 5-011 (2003)

(4) 中野正嗣，ほか：磁界解析による永久磁石型同期機の熱減磁評価，電気学会研究会資料 SA-05-26，RM-05-26 (2005)

駆動制御機器の連成シミュレーション

Multi-Domain-Simulation of Drive Control

Kei Terada, Noriyuki Uchida, Masaya Harakawa, Yukari Toide

要 旨

コントローラ・アンプ・モータなど駆動制御機器から構成される駆動制御システムは、多くの技術領域が複雑に絡み合うシステムである。

近年、ユーザー要求の高度化や企業間競争の激化に伴う限界設計が進むにつれ、従来は無視することができた技術領域間の相互干渉で発生する連成現象が、機器の高性能化や高機能化のための障害となるケースが増加している。

本稿では、駆動制御機器の設計段階での連成現象の予測と対策実施に効果のある連成シミュレーション技術について、以下の4つの技術について述べる。

(1) 制御-機械の連成シミュレーション

制御-機構・構造解析の連成技術と3Dビジュアライゼーション技術

(2) 電気-熱の連成シミュレーション

モータの電気-熱連成技術とアンプの電気-熱連成技術

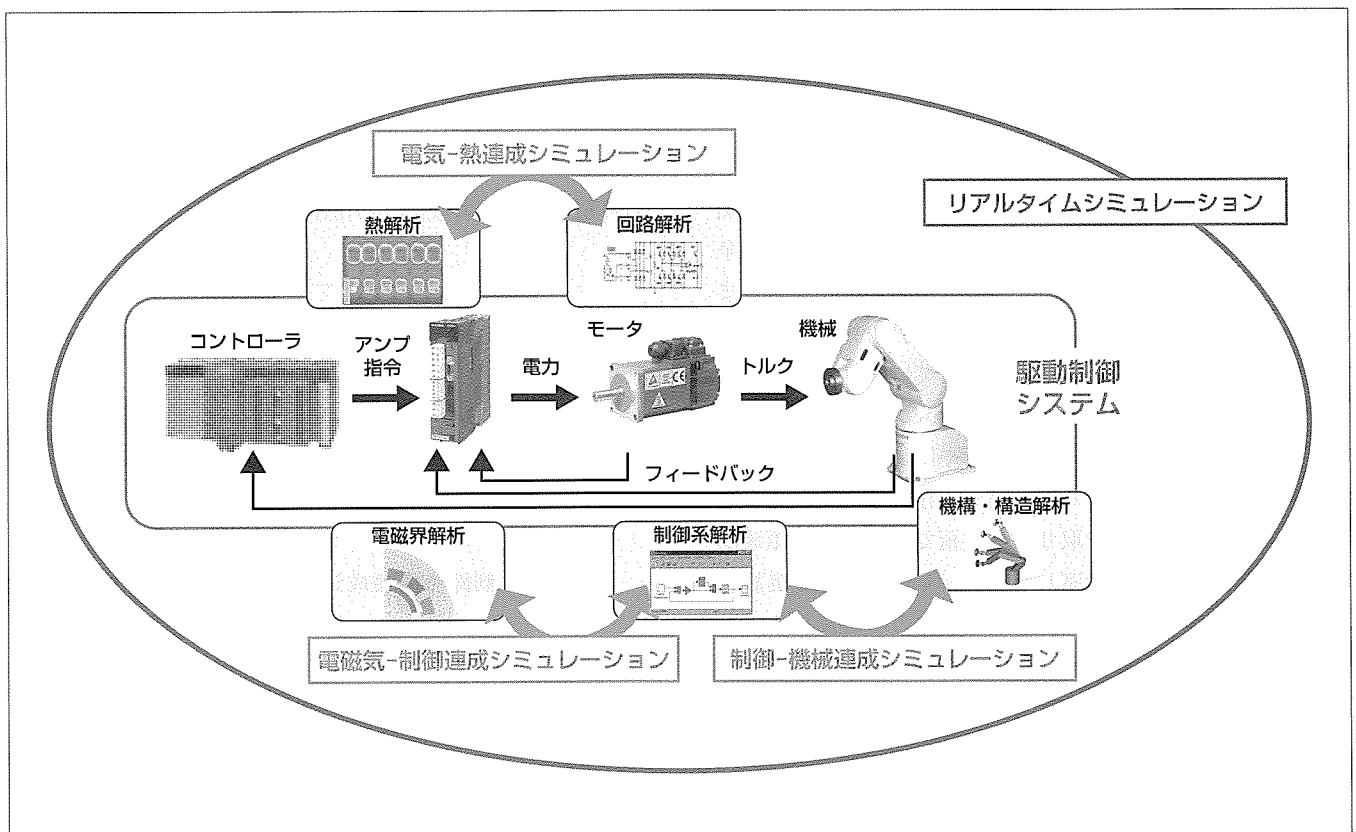
(3) 電磁気-制御の連成シミュレーション

モータ電磁界解析と制御の連成技術

(4) リアルタイムシミュレータ

上記(1)~(3)の連成技術をリアルタイムに実現するリアルタイムシミュレーション技術

これら連成シミュレーション技術は、汎用ACサーボ・汎用インバータ・NCサーボなど三菱電機の駆動制御機器の製品開発・評価に活用し、製品の高性能化・高機能化に寄与している。今後も次世代の駆動制御機器製品開発に役立つため、更なる技術向上を進めている。



駆動制御機器における連成シミュレーションのねらい

駆動制御機器及びそのシステムは様々な現象・技術から成り立っており、従来は、熱解析や電磁界解析など個々の技術領域における単独解析を行っていた。連成シミュレーションはこれらの複数の解析技術を組み合わせて異なる技術領域の現象を同一シミュレーション上で取り扱う技術であり、技術領域間の相互作用を考慮したシミュレーションを行い、実機の現象予測と対策実施を可能とする。

1. ま え が き

駆動制御機器及びそのシステムは様々な現象・技術から成り立っており、複数の技術領域間での連成現象が存在する。

一方、駆動制御機器の開発において、シミュレーション技術は中核技術の1つとして位置付けられており、製品設計・開発から品質・信頼性向上まで幅広く利用されている。

本稿では、その中でも、駆動制御機器の連成現象をターゲットとし、設計段階での連成現象の予測と対策実施に効果を発揮する連成シミュレーション技術について述べる。

2. 駆動制御の特徴と連成シミュレーション

コントローラ・アンプ・モータなど駆動制御機器から構成される駆動制御システムは、様々な現象・技術の重ね合わせで成り立っている(図1)。アンプ(主回路)では交流/直流の電力変換が行われ、モータでは供給された電力をトルクに変換する。機械ではモータトルクをボールねじなど伝達機構を介して所望の機械動作を実現する。また、その過程では電力やトルクの一部が損失となって熱を発生し、温度上昇に伴う特性変動をもたらす。

また、駆動制御機器は、種類の異なるアンプとモータの組合せで使用され、さらに、これら機器が様々な業種の顧客機械にコンポーネントとして格納されるため、種々多様な条件化で使われるという特徴がある。したがって、駆動制御機器の製品開発では、多様な条件下での制御・主回路・モータ・機械の最適組合せを構築する必要があり、各技術領域のトレードオフ設計が必要なケースも少なくない。

従来は個々の技術領域における解析技術を確認し製品開発に役立ててきたが、ユーザー要求の高度化や企業間競争の激化による限界設計が進むにつれ、複数の技術領域にまたがる連成現象が無視できなくなり、単独の技術領域の深掘りでは解決できないケースが増加している。

その解決策として連成シミュレーション技術がある。連成シミュレーションは、電磁界解析や制御系解析、熱解析などの解析技術を組み合わせ、異なる技術領域の現象を同一シミュレーション上で取り扱う技術である。技術領域間にまたがる連成現象を考慮したシミュレーションを実施することで、駆動制御機器の設計段階における連成現象の予測と対策実施を可能とする。その結果、個々の技術領域に

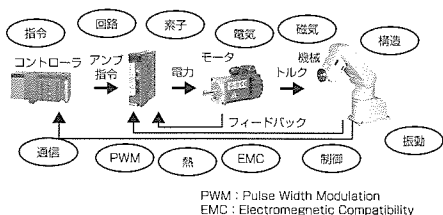


図1. 駆動制御システムにかかわる技術領域

おける最適化の枠を越えた複数技術領域におけるトータルでの最適設計・トレードオフ設計が可能となり、駆動制御機器の高性能化・高機能化を実現することができる。

3. 制御-機械の連成

3.1 制御-機械連成シミュレーション手法

機械の高速・高精度化と同時に軽量化・低剛性化が進む中で、機械の振動問題はますます重要視されている。従来、機械モデルは簡単な2慣性モデルを利用していたが、それでは不十分なケースが発生している。これに対し、有限要素法を用いた機械のモーダル解析からモデルを抽出し、制御-モーダル解析連成シミュレーションを行っている。

一方、多軸による同期・協調駆動など機構の複雑化も進みつつあり、従来の、動作点を固定した単軸での特性解析では精度を満たせない場合がある。これに対しては、機構解析ツールから機械のダイナミクスモデルを抽出し、制御-機構解析連成シミュレーションを行っている。

図2に制御-機械連成シミュレーションの概要を示す。また図3に連成シミュレーション結果例を示すが、実機応答をよく再現した結果が得られている。これらの技術は汎用ACサーボの各種振動抑制制御⁽¹⁾など機械の最適制御機能の開発に貢献している。

3.2 3Dビジュアライゼーション

複雑な機構動作は各軸の動作波形から全体の挙動を評価することは非常に困難である。

当社では、制御-機械連成に3Dビジュアライゼーション機能を活用している。3Dアニメーションによる機構動作の可視化は、複雑な動作の理解を可能にし、機械全体の挙

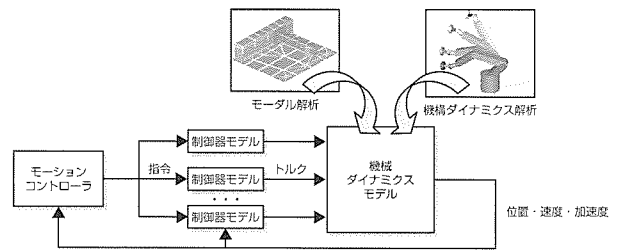


図2. 制御-機械連成シミュレーションの構成

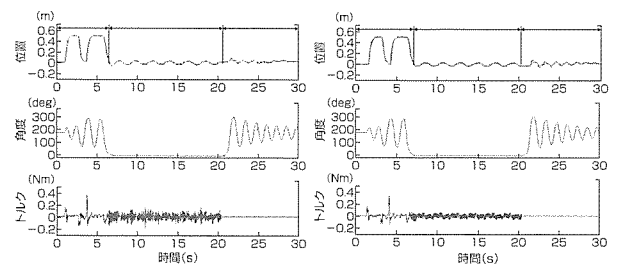


図3. 実験機における制御応答波形

動の評価・検討を容易にする。この機能は、制御-機械連成技術に組み合わせて様々な顧客機械に対応した制御系開発に活用している(図4)。

4. 電気-熱の連成

4.1 モータの熱設計

駆動制御機器の高性能化に伴う鉄損の増加や高出力密度化に伴う銅損の増加に対して、冷却効率の良い熱設計を設計段階において短期間で実現することは、開発コストを低減しつつ品質を向上する上で重要である。

前述のように、電気設計では、実環境・実負荷状態に対する各部の損失分離予測技術及び各部損失低減技術が発達してきている。

これら技術を熱設計に連携して回路シミュレーションから電流波形を導出し、これを電磁界シミュレーションの入力としてモータの損失シミュレーションを実施し、さらに損失結果を熱シミュレーションの入力とすることで、試作前段階の高精度な温度予測による品質向上や局所的な熱設計の最適化が検討可能となってきた(図5)。

4.2 アンプの熱設計

駆動制御機器におけるもう一つのアイテムとして、モータを駆動するアンプ主回路部分の熱設計も重要である。特に、アンプ内に搭載されたモータ駆動素子の実負荷時パワーサイクルにおける発熱は過渡現象であるため、実負荷損失波形を入力とした熱シミュレーションが製品の品質向上に欠かせないものとなっている⁽²⁾。アンプ内素子の多くが大電流化し、高性能化によるスイッチングの高速化で駆動素子の高発熱密度化が加速しており、電気-熱の過渡的な連携シミュレーションによる素子部品の均熱配置最適化等、

熱問題に対する構造設計の重要性が増加している。

回路シミュレータで実負荷時の素子損失波形を導出し、これを熱シミュレーションの入力値とすることで実負荷時系列の過渡熱シミュレーションが可能となる(図6, 図7)。

5. 電磁気-制御の連成

5.1 電磁界解析によるモデル導出と制御との連成

この章では、電磁界と制御の連成シミュレーションについて述べる。連成シミュレーションを行う目的は、モータとドライバの技術領域の相互干渉で発生する連成現象をモータ実機レスで予測し解決することで、開発期間の短縮、開発コストの低減をねらうものである。

図8に連成シミュレーションの構成を示す。電磁界解析によってあらかじめ導出された高精度モータモデルを制御シミュレータに組み込むことで、計算時間の短縮を図っている。

5.2 高精度モータモデルと制御フロー

平板磁石埋め込み型永久磁石モータについて、連成シミュレーションの結果を実測と比較する検討を行った。

電磁界解析によって求めたモータモデルは、材料の非線形性、磁石磁束のロータ位置依存性、インダクタンス及びトルクの電流依存性、ロータ位置依存性をモデル内部にテーブルとして包含している。

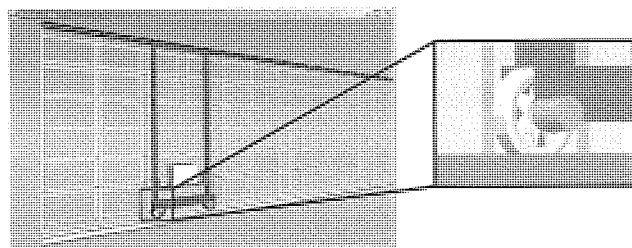


図4. 3Dビジュアライゼーション機能

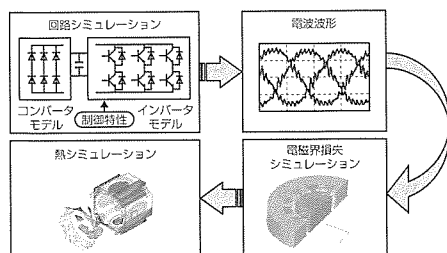


図5. モータの電気-熱連成シミュレーション概念図



図6. アンプの過渡熱現象シミュレーション概念図

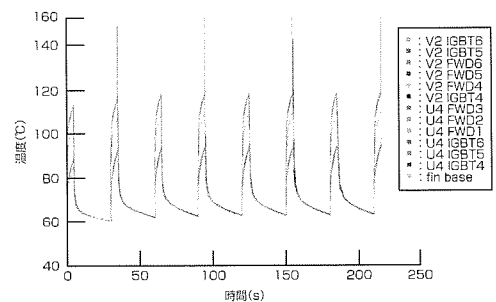


図7. 素子の過渡熱解析による時系列温度結果

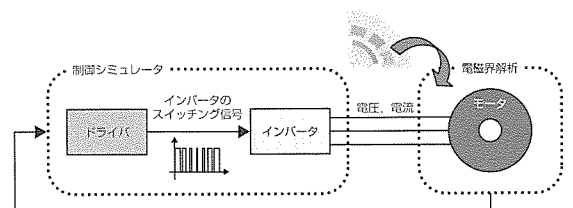


図8. 電磁気-制御連成シミュレーションの構成

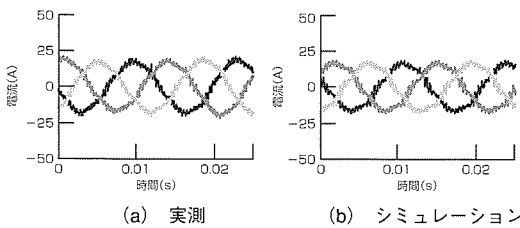


図9. 1,500r/min, 50%負荷時の電流波形

モータの制御フローは、位置センサ、電流センサを用いたフィードバックループによるPWMベクトル制御で、速度一定制御とした。連成シミュレーション時と実測時で制御フローを統一した。

5.3 定常状態における電流波形の比較結果

図9に、一定負荷、一定速運転時の電流波形について、実測と連成シミュレーションの結果を示す。

キャリア高調波の影響の現れ方や、ピーク付近、0付近における電流波形のひずみの傾向が、定性的に実機と同じであることが分かった⁽³⁾。

計算時間は、モータモデル(節点数3,358, 要素数6,288, ケース数180)の導出に、Pentium4.3GHzのパソコンを使用した場合で2時間半を要した。また、連成シミュレーション時の計算時間は、電気角2周期分1,000ステップの計算に約40秒を要した。

6. パワーエレクトロニクス用リアルタイムシミュレータ

6.1 HILシミュレーション

新たに開発したパワーエレクトロニクス用リアルタイムシミュレータは、主回路素子のスイッチングによる μs オーダーの現象も再現可能である。駆動制御系の新たなシミュレーション手法として、このリアルタイムシミュレータを用いたHIL (Hardware in the Loop)シミュレーション(図10)について述べる⁽⁴⁾。

6.2 シミュレーション結果

図11に示すように、HILシミュレーションは実機検証と酷似した結果が得られている。リアルタイムシミュレータは、高時間分解能を持ったFPGA(Field Programmable Gate Array) I/Oボードや各モデルの最適化などにより、図12に示すように演算周期 $10\mu\text{s}$ よりも短いデッドタイムによる電流ひずみの影響なども精度良く再現することができる。

このようにHILシミュレーションは、実インバータや実モータを用意する必要がなく、また、実機では実施できない運転条件を含む様々な検証を行えるため、駆動制御系開発において非常に有用な手法である。

7. む す び

本稿では、駆動制御機器における連成シミュレーション

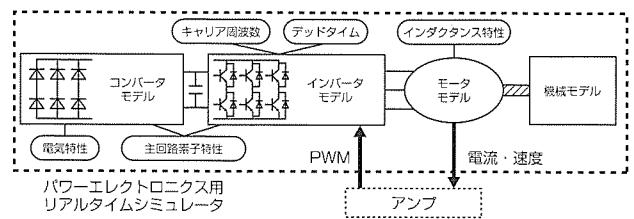


図10. HILシミュレーションの構成

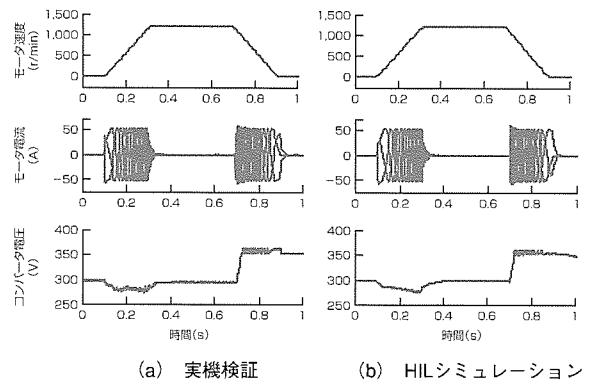


図11. IPMモータ 加減速運転波形

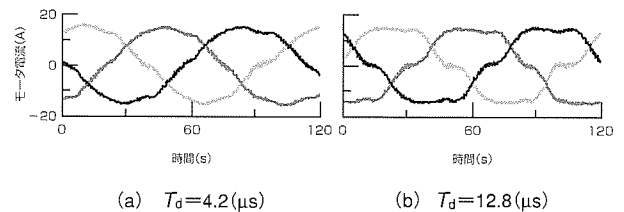


図12. デッドタイムの影響(HILシミュレーション)

技術への取り組みについて述べた。

当社では、今後とも連成シミュレーション技術の更なる技術向上を推進していく。さらに、この技術を駆動制御機器の製品開発に適用していくことにより、ユーザーニーズにマッチした製品を迅速に市場提供していく所存である。

参考文献

- (1) 宮崎友宏, ほか: 新ACサーボアンプ“MR-J3シリーズ”, 三菱電機技報, 79, No.3, 181~184 (2005)
- (2) 菊永敏之, ほか: パワーモジュール高信頼性設計のための解析・シミュレーション技術, 三菱電機技報, 75, No.6, 429~432 (2001)
- (3) 都出結花利, ほか: IPMモータの電磁界・制御連携解析の検討-解析結果と実機測定結果の比較-, 電気学会回転機研究会資料, RM-05-63 (2005)
- (4) Harakawa, M., et al.: Real-Time Simulation of a Complete PMSM Drive at $10\mu\text{s}$ Time Step, IPEC Niigata 2005, S27 (2005)

オブザーバを利用した 交流モータの可変速制御技術

金原義彦*
志津圭一郎**

Variable Speed Control Technique of AC Motors Using Flux Observer

Yoshihiko Kinpara, Keiichiro Shizu

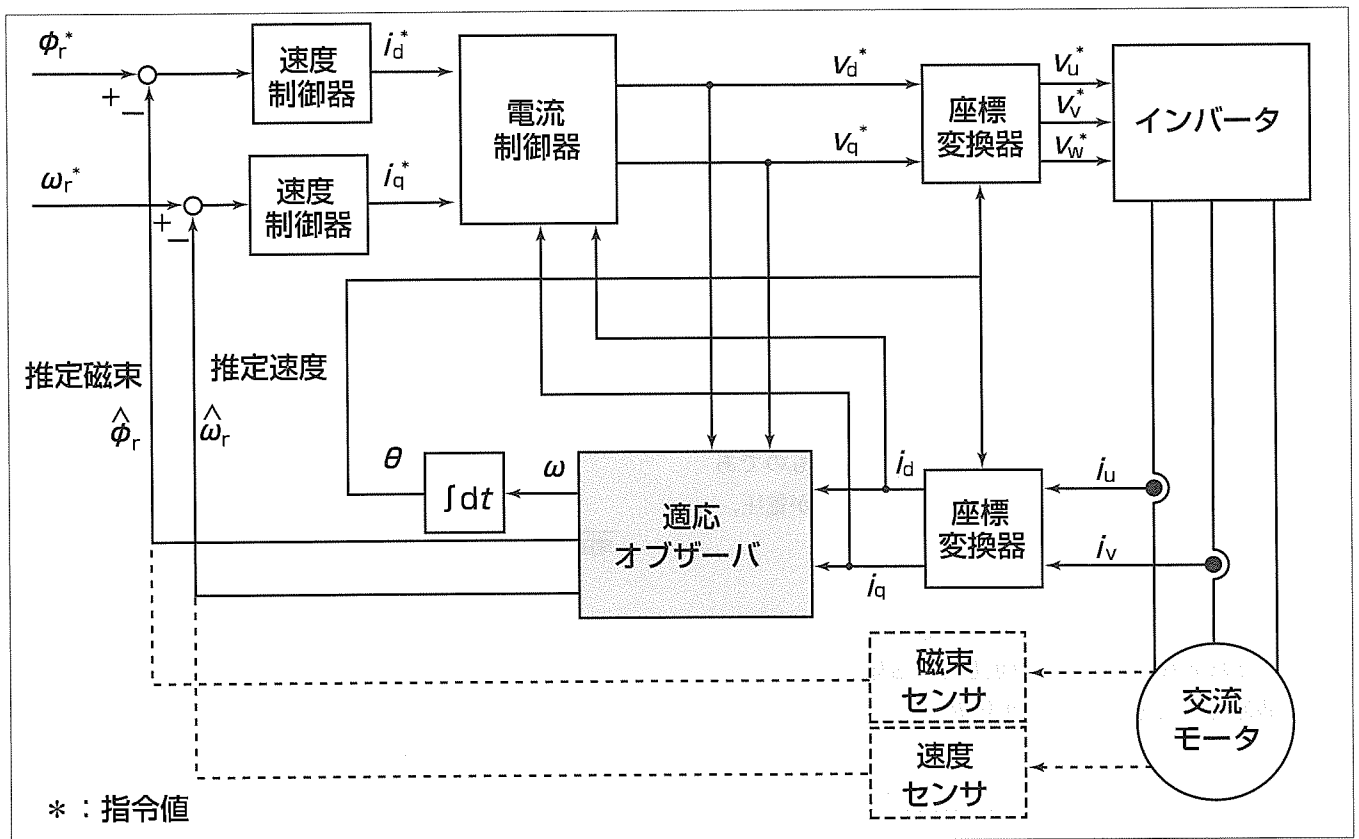
要 旨

交流モータを高性能に可変速制御する磁界オリエンテーション形ベクトル制御が提案されてから30年以上経過しているが、メーカーや大学等の機関における交流モータ制御技術の研究開発に対する勢いは衰えない。

この要因は、パワーエレクトロニクスが身近になり、モータ制御の対象が重電機器、FA機器、家電機器、車載機器と幅広い分野に拡大したので、それぞれの機器がそれぞれの仕様を満足するための課題が次々に発生していることにあるかも知れない。また、視点を変えて考えると、交流モータの制御技術が、電流などの観測量を制御する技術に加え、磁束や速度など直接検出できない状態量の制御といった不思議な課題を扱うことにあるのかも知れない。

三菱電機では、交流モータを“電圧が入力、状態が磁束、出力が電流”という制御対象にとらえ、磁束センサや速度センサを用いることなく交流モータを高性能に可変速制御する技術の開発に取り組んでいる。下図は、適応オブザーバを用いた交流モータの磁束及び速度を制御する系の構成図である。適応オブザーバは交流モータの入力(インバータの電圧指令)に基づいて交流モータの状態(磁束)と出力(電流)をソフトウェア演算により推定し、この推定電流と電流センサから得た電流との偏差を利用して回転角速度の推定と、高い精度の磁束推定を実現することができる。

本稿では、交流モータの磁束と速度を推定する技術と、オブザーバを用いた高性能可変速制御技術について述べる。



オブザーバを用いた交流モータの可変速制御系の構成

オブザーバを用いた交流モータの可変速制御系では、磁束センサや速度センサを用いることなく、交流モータの磁束と速度を所望の値に制御する。交流モータ制御技術の特長の一つに、直接検出できない制御量を取り扱うことがある。

1. ま え が き

交流モータを高性能に可変速制御する磁界オリエンテーション形ベクトル制御が提案されてから30年以上経過しているが、メーカーや大学等の機関における交流モータ制御技術の研究開発に対する勢いは衰えない。

この要因は、パワーエレクトロニクスが身近になり、モータ制御の対象が重電機器、FA機器、家電機器、車載機器と幅広い分野に拡大したので、それぞれの機器がそれぞれの仕様を満足するための課題が次々に発生していることにあるかも知れない。また、視点を変えて考えると、交流モータの制御技術が、電流などの観測量を制御する技術に加え、磁束や速度など直接検出できない状態量の制御といった不思議な課題を扱っていることにあるのかも知れない。

本稿では、パワーエレクトロニクスを応用した交流モータ駆動技術の磁束と速度の推定技術について述べる。

2. 交流モータのモデル

2.1 RL回路

交流モータのモデルを扱う前に、図1に示すRL回路のモデルについて説明する。図において、 v は電圧、 i は電流、 ϕ は磁束、 R は抵抗、 L はインダクタンスである。図から得られる諸関係を式(1a)、(1b)に記す。

$$\frac{d}{dt} \phi = -Ri + v \quad \dots\dots\dots (1a)$$

$$\frac{d\phi}{dt} = L \frac{di}{dt} \quad \dots\dots\dots (1b)$$

電圧、電流、磁束の初期値はそれぞれ零とし、式(1a)、(1b)を整理すると式(2a)、(2b)を得る。

$$\frac{d}{dt} \phi = -\frac{R}{L} \phi + v \quad \dots\dots\dots (2a)$$

$$i = \frac{1}{L} \phi \quad \dots\dots\dots (2b)$$

式(2a)、(2b)はRL回路の状態方程式であり、入力電圧、状態が磁束、出力が電流である。

図2は式(2a)、(2b)をブロック図で表現したものである。図のRL回路も式(2a)、(2b)と同様に、入力電圧、状態が磁束、出力が電流である。

2.2 誘導モータ

誘導モータは、図1のRL回路と同様の回路が一次側と二次側にそれぞれ存在する。静止している座標軸で一次側回路を観測したときの一次磁束を ϕ_s 、一次電圧を v_s 、一

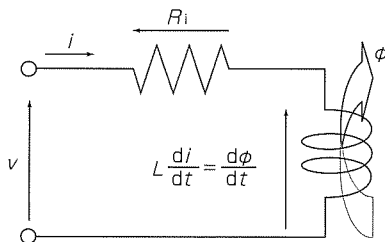


図1. RL回路

次側電流を i_s と定義すると式(3a)が成り立つ。

$$\frac{d}{dt} \phi_s = -R_s i_s + v_s \quad \dots\dots\dots (3a)$$

式(3a)において R_s は一次抵抗である。以下、抵抗やインダクタンスなどの記号については慣例に従う。

回転子と同期して回転角速度 ω_r で回転する座標上から二次側回路を観測したときの二次磁束を ϕ_r' 、二次電圧を v_r' 、二次電流を i_r' と定義すると式(3b)を得る。

$$\frac{d}{dt} \phi_r' = -R_r i_r' + v_r' \quad \dots\dots\dots (3b)$$

かご型誘導モータの場合、 $v_r' = 0$ である。かご型誘導モータにおいて、式(3b)を、静止している座標軸上に座標変換すると式(3c)となる。ここで、 ϕ_r 、 i_r は静止している座標軸上で観測した二次磁束及び二次電流である。

$$\frac{d}{dt} \phi_r = -R_r i_r + \omega_r J \phi_r \quad \dots\dots\dots (3c)$$

また、磁束と電流の間には式(4)が成立する。

$$\begin{pmatrix} \phi_s \\ \phi_r \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_s I & MI \\ MI & L_r I \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_s \\ i_r \end{pmatrix} \quad \dots\dots\dots (4)$$

以上の式を整理すると式(5a)、(5b)を得る。

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \phi_s \\ \phi_r \end{pmatrix} = A \begin{pmatrix} \phi_s \\ \phi_r \end{pmatrix} + B v_s \quad \dots\dots\dots (5a)$$

$$i_s = C \begin{pmatrix} \phi_s \\ \phi_r \end{pmatrix} \quad \dots\dots\dots (5b)$$

式(5a)、(5b)と式(2a)、式(2b)を比較して分かるように、誘導モータのモデルもRL回路と同様に状態方程式で表現できる。図3は式(5a)、(5b)をブロック図で表現したものであり、図2のRL回路の表現と似ている。同期モータについても同様に図3の形態でブロック図表現することができる。

3. 交流モータの磁束推定技術

3.1 RL回路

交流モータが発生するトルクは、電流と磁界の間に働く

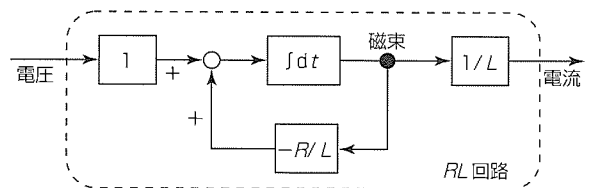


図2. RL回路のブロック図

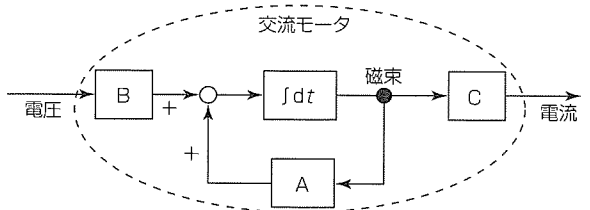


図3. 交流モータのブロック図

電磁力によって定まり、交流モータのトルクを制御するために磁束量観測は欠かせない。一例として、RL回路において、磁束センサを用いずに磁束を推定する技術について考えてみよう。図1、図2のRL回路に電圧形インバータを接続し、電流センサを設けると、電圧が入力量、磁束が状態量、電流が観測量となる。インバータが印加しようとする電圧 v を利用すれば式(2a)によって磁束 ϕ を推定することができる。また、電流センサから得た電流 i を利用すれば式(2b)の関係から磁束 ϕ を得ることができる。ところが、インバータが出力する電圧 v がデッドタイム(短絡防止時間)に起因する誤差を含んだり温度上昇により抵抗 R が変化すると、式(2a)を用いる推定方法では磁束 ϕ の推定精度が低下する。また、式(2b)に基づく推定方法では、磁気飽和に起因してインダクタンス L が変化したり、電流センサのオフセットやA/D分解能、ノイズの混入により電流検出誤差が発生したりすると、磁束 ϕ の推定精度が低下する。

図4は、図3のブロック図を書き改めた現実のRL回路を示したものである。

3.2 誘導モータ

前節の例では、RL回路で磁束 ϕ を推定する場合について述べたが、誘導モータを可変速制御する場合も同じである。誘導モータを高性能に可変速制御するためには、抵抗の温度変化、インダクタンスの飽和、インバータ出力電圧誤差、電流検出誤差などの要因が存在する中で正確な磁束推定を行うことが鍵(かぎ)である。

磁束オブザーバを用いることによって抵抗の温度変化に対してロバスト性の高い誘導モータの磁束推定を行うことが可能である。図5は、現実の交流モータと磁束オブザーバのブロック図である。図において、抵抗変動をシステム雑音ととらえ、最適フィードバックゲインの設計法を適用した同次元オブザーバを構成する。この磁束オブザーバを用いたベクトル制御方式は、図6のように、抵抗変動時においても良好なトルク精度で制御することができる。

4. 交流モータの速度推定技術

4.1 基本原理

図7は適応オブザーバを用いた交流モータの速度推定原理を示すブロック図である。図において、交流モータの回

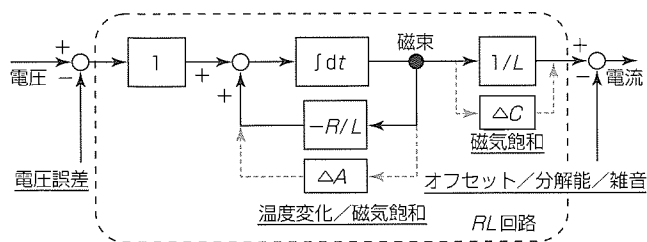


図4. 現実のRL回路のブロック図

転角速度は行列Aのパラメータの一つである。行列B, Cが既知である場合、交流モータの行列Aと適応オブザーバ内部の行列 \hat{A} とが一致していれば推定電流と検出電流に偏差は発生しない。すなわち、電流偏差の発生は行列Aと行列 \hat{A} との不一致であることに着目して、適応オブザーバは行列 \hat{A} 内部の回転角速度を推定する。

実際の交流モータは、3章で述べたように、温度変化や磁気飽和といった外乱が存在する。この外乱を制した上で

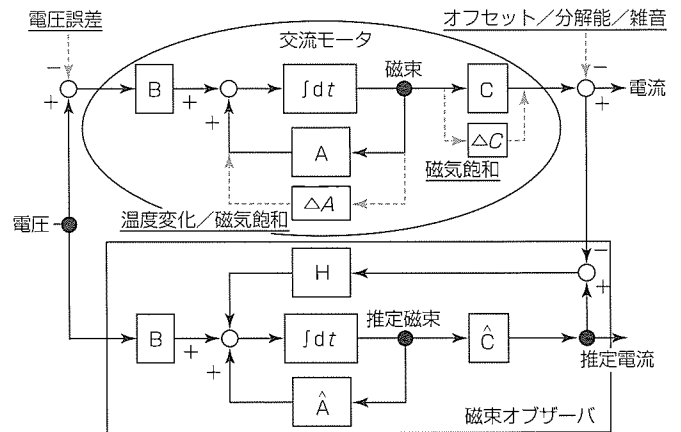
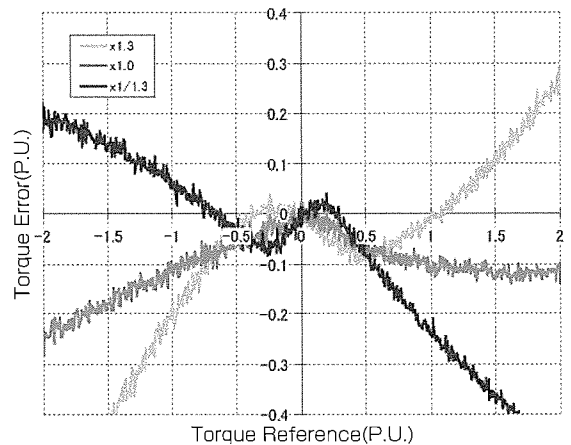
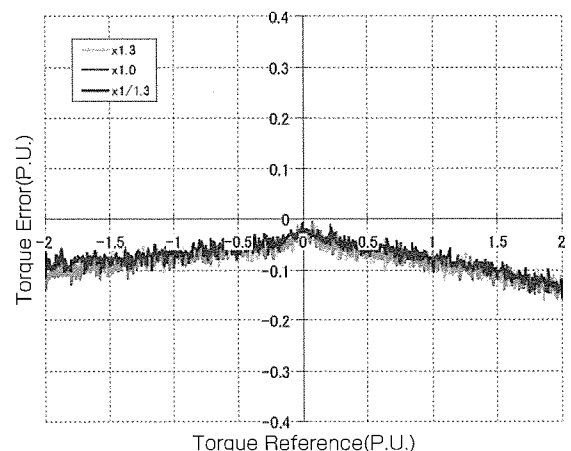


図5. 交流モータと磁束オブザーバのブロック図



(a) すべり周波数形ベクトル制御方式(従来方式)



(b) 磁束オブザーバを用いたベクトル制御方式(新方式)

図6. 抵抗変化時のトルク制御精度(抵抗値1/1.3~1.3倍)

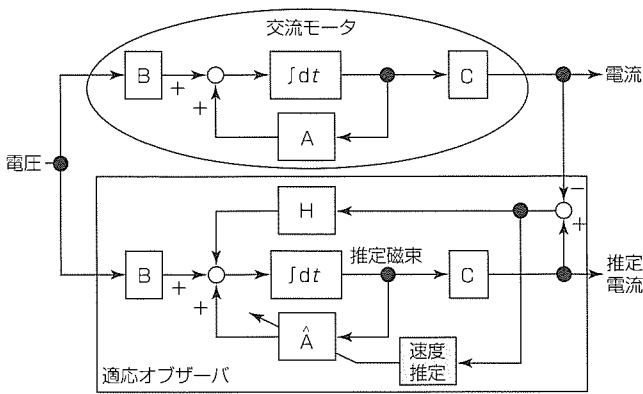


図7. 交流モータと適応オブザーバのブロック図

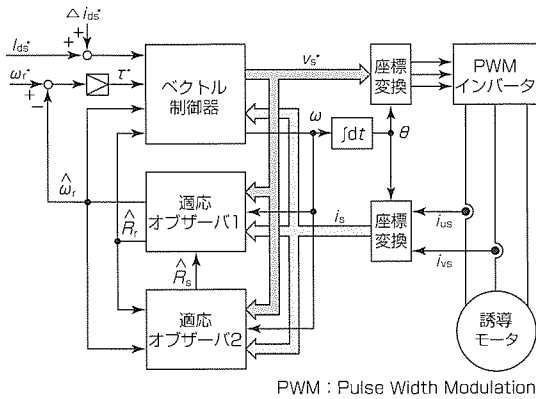


図8. 誘導モータのセンサレス制御系の構成

回転角速度を安定に推定することが速度推定技術の課題である。

4.2 誘導モータ

図8は、2種類の適応オブザーバを用いた誘導モータのセンサレス制御系の構成である。図において、適応オブザーバ1は回転角速度と二次抵抗を推定し、適応オブザーバ2は一次抵抗を推定する。この構成により、温度変化に伴う抵抗変動に対してロバスト性を確保しつつ回転角速度を安定に推定することが可能である。このセンサレス制御系による二象限運転の様子を図9に示す。

4.3 同期モータ

同期モータにおいても、図7の基本原則で回転位置・回転角速度の推定が可能である。図10は、埋め込み磁石型同期モータを速度センサレス制御したときの速度-トルク特性であり、低速から±200%トルクを出力することができる。

図11はシンクロナスリラクタンスモータを加減速運転したときの様子である。シンクロナスリラクタンスモータも適応オブザーバを用いることにより、位置・速度センサレス制御が可能である。

5. むすび

以上、オブザーバを用いた高性能可変速制御技術について述べた。今後も高信頼・高性能な交流モータの可変速駆動システムの開発に取り組む所存である。

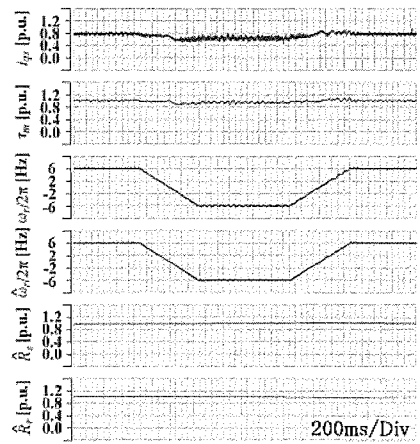


図9. 誘導モータの二象限運転(定格トルク)

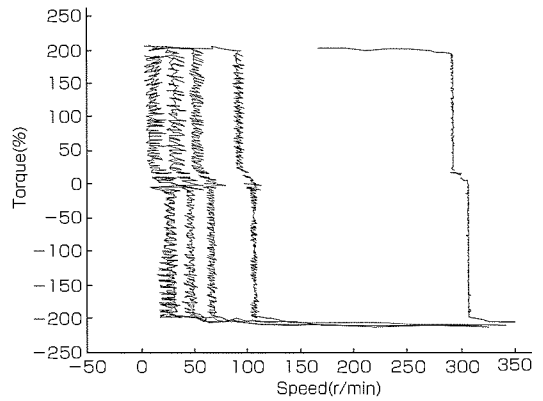


図10. 埋め込み磁石型同期モータの速度-トルク特性

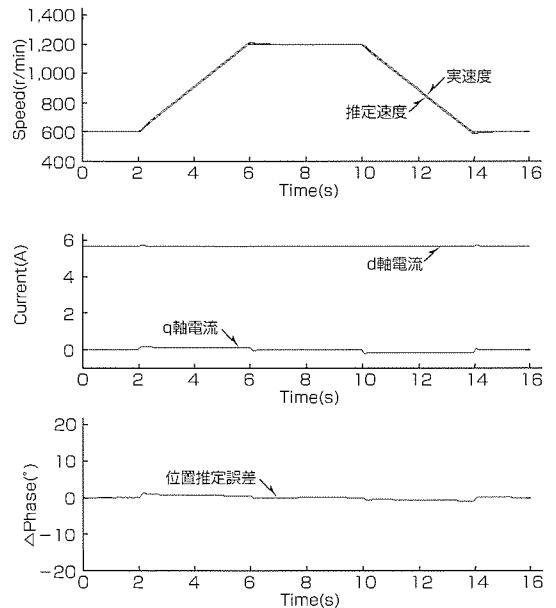


図11. シンクロナスリラクタンスモータの加減速運転

参考文献

- (1) 佐竹 彰, ほか: 最新のモータ制御技術, 三菱電機技報, 76, No.6, 421~425 (2002)
- (2) 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-D, No.8, 902~907 (2001)

EGRバルブ用DCモータの電磁駆動技術

Electromagnetic Driving Technology of DC Motor for EGR Valve

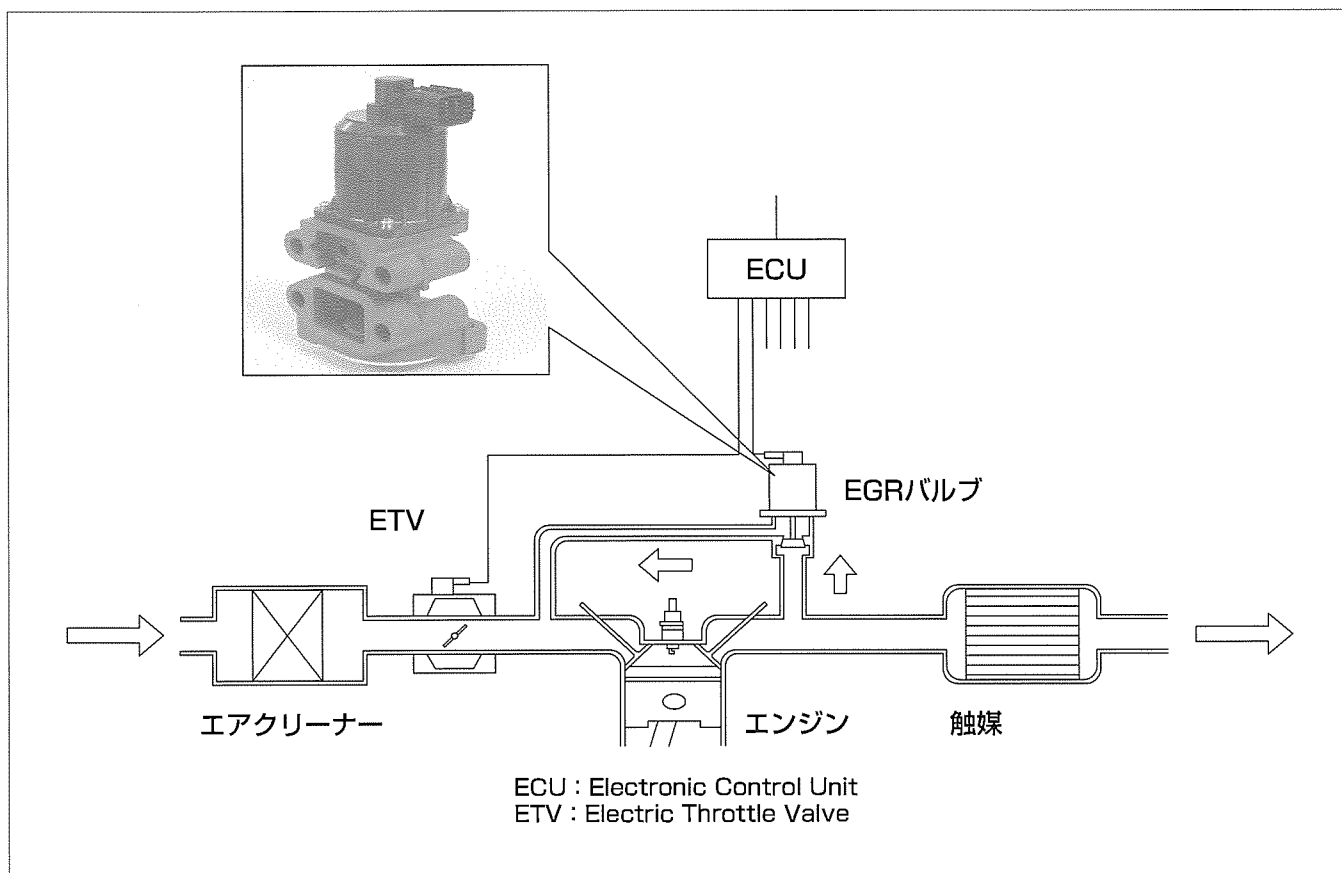
Toshihiko Miyake, Youichi Fujita, Satoshi Fujimura, Moriyuki Hazeyama

要 旨

環境をキーワードに、自動車の排気ガス規制が世界中で強化されつつある。その動きに合わせて対策デバイスである排ガス再循環弁(Exhaust Gas Recirculationバルブ：EGRバルブ)の需要が増大しており、また、バルブに対する要求性能も高度化している。

特にディーゼルエンジン用のEGRバルブに関しては、大流量制御、高精度制御、高速応答性のすべてが求められており、三菱電機では、DCモータを駆動源としたEGRバ

ルブを開発した。モータは高密度巻線のポキボキステータ構造と低慣性のマグネットロータ構造を採用し、ブラシ、ブラシレスの2種類のモータを製品化している。特に、モータの電磁気構造(ステータコア形状、ロータ極数)に関しては、自動車メーカーからバルブへ求められている性能をすべて満足し、当社のEGRバルブ構造にマッチするように設計及び配慮を行った。



DCモータ式EGRバルブ

EGRバルブは、自動車エンジンの排ガス中の窒素酸化物を低減するため、排ガスの一部を吸気管に還流し最高燃焼温度を抑制するものである。ディーゼルエンジン用にDCモータを開発し搭載することで、ディーゼルエンジン用EGRバルブに必要な大流量・高速応答といった性能を実現した。

1. ま え が き

環境問題が広く認知される社会情勢になり、自動車の排出ガス規制もここ数年で一気に強化されつつある。この動きは日本のみならず、ヨーロッパ、アメリカにおいても同様で、ほぼ同時に規制強化の波が迫っている。特に、ディーゼルエンジン自動車は規制の強化度合いが大きく、エンジンシステムに大きな変革をもたらしつつある。このような状況の中、排気ガス制御のキーデバイスであるEGRバルブにおいても技術革新が進みつつあり、当社においても、ディーゼルエンジンの特性にマッチしたDCモータ式EGRバルブを開発し、2001年から生産している。

2. ディーゼルエンジン用DCモータ式EGRバルブ

2.1 DCモータ式EGRバルブ製品概要

ディーゼルエンジン用のEGRバルブには、以下に示す性能が求められる。

- (1) 大流量への対応
→バルブの負荷大への対応
- (2) 高速応答性(加速時のEGRガスの導入停止)
→EGRバルブの閉弁スピード向上不可欠
- (3) 自己閉弁性(故障時にばね力で閉弁)
- (4) 高精度制御(高駆動力、開度安定性)
- (5) 高寿命

これらの性能を確保するためには既存の負圧駆動のダイヤフラム式、又は電制御駆動のソレノイド式やステップモータ式では駆動力が不足しており、いずれも適用が困難である。そこで当社では、EGR専用コンパクトで高トルクを発生することができるDCモータを開発し採用した。

2.2 ブラシモータとブラシレスモータ

図1に当社ブラシモータの基本構造を示す。特長としては、マグネット回転型のブラシレスモータ構造を基本として、機械的転流機構であるコミュテータとスリップリングを設けてブラシモータ化を達成しており、その回転部慣性力の低さからくる高速応答性と、マグネット回転部の内部

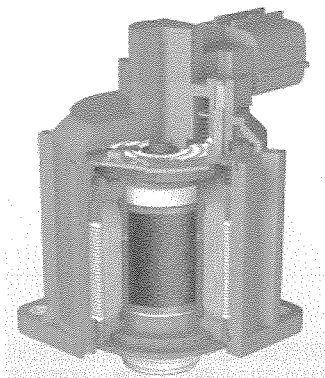


図1. ブラシモータ

に設けられたねじ構造による回転～直動変換機構によって得られる直動推力、自己閉弁の実現及びバルブに加わる外からの力に対する優れた位置安定性を持っている。

また、巻線部は当社固有の技術である“ポキポキコア”構造(図2)を採用しており、高効率で生産性に優れたモータを実現している。さらに、高耐久性を求められるトラック用に採用が拡大されつつあるブラシレスモータ(図3)も、基本構造が同一である利点を生かし、共通の生産ラインで製造が可能というメリットを持っている⁽¹⁾⁽²⁾。

2.3 当社DCモータへの設計要求

他社の同体格EGR用DCモータとの推進力の比較結果を表1に示す。

この比較結果から、当社DCモータは他社に比べ同じ推進力を得るためにモータ出力が高く、高トルク仕様である

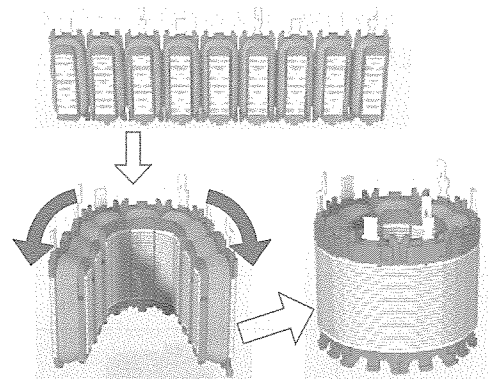


図2. ポキポキコア構造

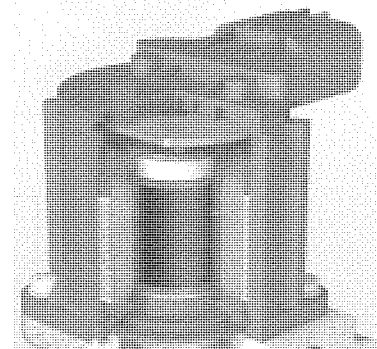


図3. ブラシレスモータ

表1. EGR用DCモータの推進力比較

モータ	モータ出力	減速方式	推進力
他社DCモータ	1/3	ギヤ減速 カム減速 ×3	1
当社DCモータ	1	ねじ変換 ×1	1

※当社DCモータ出力を1として計算
減速後のバルブ開閉弁に作用する力を“推進力”とする

ことが分かる。これは、EGRバルブの要求性能である自己閉弁を実現させるために回転ねじ部での減速率を低く設定しているからである。また、低減速率であることからバルブの目標開度に達するまでのモータの回転数も低く、当社EGRバルブ専用DCモータへの設計要求は高トルク・低回転数であると言える。

3. 当社EGRバルブ用DCモータの技術要素

3.1 構造的、電磁気的特長

前述したディーゼルエンジンEGRバルブ駆動用としての要求性能を満足するため、DCモータは以下に示す構造的・電磁気的な特長を持っている。

(1) 高トルク化

- ポキポキステータコアのV溝設計
- ティース形状設計

(2) ロータの低慣性化、低コギングトルク構成

- マグネット回転型構造(前述)
 - マグネット極数・ステータコアスロット数の選定
- これらの特長を実現するための技術要素、また、これら特長から得られる技術要素について述べる。

3.1.1 高トルク化のための電機設計

モータの発生するトルクは次式で表すことができる。

$$T = \Phi \cdot I = (N \cdot \phi) \cdot I = \phi \cdot (N \cdot I) = \phi \cdot AT \quad (1)$$

ここで、 Φ は鎖交磁束、 ϕ は磁石磁束、 N はコイルの巻き数、 I は電流値、そして、 AT はアンペアターンである。

式(1)から明らかなように、高トルク実現のためには、

- 磁束を増大させる
- アンペアターンを大きくする

ことが必要となる。

磁束増大のためには、磁石そのものの磁束を増加すること以外に、磁石の配向を工夫することにより、トルクに寄与する成分を増加することができる。当社のEGRバルブ用DCモータでは、極異配向磁石を用いて高トルク化を行っている。

次に、同一電流値でトルクを増加させるためには、式(1)に示されるようにコイルの巻き数を増加させればよいことになるが、巻き数増加のためにはスロット部を拡大する必要があるが、逆にティース部幅は狭くなる。その結果、ティースは磁気飽和し、巻き数を増加してもトルクが低下する場合もある。すなわち、所定トルクを発生するためのコイル巻き数やティース幅には最適な領域が存在しており、当社のEGRバルブ用DCモータでは、解析により最適な領域にあることを確認している。

また、前述の積極的に磁石磁束を増加させる方法以外に、トルク発生に有効となる磁束を増加させるためには漏れ磁束を低減することが重要となる。スロットオープンを広くすることでスロット間の漏れ磁束を低減することが可能と

なるが、その反面、磁石磁束も低減され、トルクが低下する。また、ティース先端部も漏れ磁束に影響し、一般的に先端部幅が狭いほど漏れ磁束は小さくなる。このため、このDCモータでは、トルク低下を極力抑制し、かつ、漏れ磁束を最小となるようなスロットオープン、ティース先端部として部品構成上最適な値を適用した。

3.1.2 ステータコアのV溝設計

当社のEGRバルブ用DCモータは、ステータにポキポキコアを用いることで、導体占積率が80%を超える高密度巻線を実現することが可能となった⁽⁹⁾。しかし、ポキポキコアでステータを構成する場合、ステータコアを折り曲げてステータを構成するため、折り曲げ部には図4に示すようなV溝が必要となり、連結部幅は狭いものとなる。

モータトルクを確保するためには、連結部幅とV溝突き当て部に発生する隙間(すきま)との関係が重要であり、この箇所に関して以下に示すような磁界解析を用いて確認を行っている。

まず、ステータコアの折り曲げが不十分である場合、V溝の突き当て部に発生する隙間が大きくなる。

ここで、図5に、V溝の突き当て部の隙間が大きい場合における磁束密度分布の解析結果を示す。同図は白から黒色になるに従い、磁束密度の大きさが大きくなることを示している。図に示すように、磁束は薄肉連結部のみに集中するため、連結部での磁束密度は極めて高くなり、結果として主磁束の漏れが発生する。ここで、ステータコアを鉄製シェルに挿入するモータの場合、漏れた主磁束の一部は

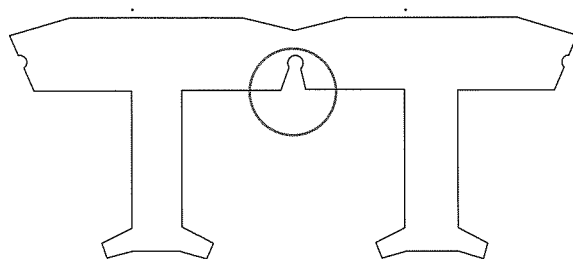


図4. ポキポキコアの折り曲げ部

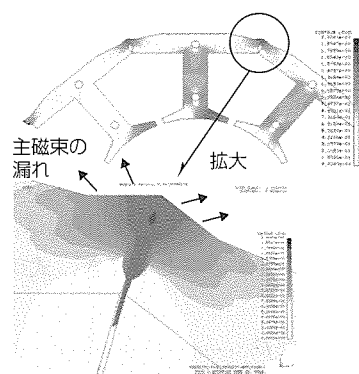


図5. コア薄肉連結部の磁束密度分布(隙間大)

シェルを磁路とするため、トルクの低下はある程度抑制されることがある。しかし、このモータは樹脂一体成形によりステータコアの外装部を形成しており、シェルに補助的な磁路として期待することはできない。したがって、薄肉連結部での磁気飽和は、トルク発生に寄与する磁束の低減となる。すなわち、V溝突き当て部での隙間は発生トルクの低下につながるため、V溝突き当て部の隙間の管理が極めて重要となる。

このモータでは、樹脂一体成形により外周から内径側にステータコアが加圧される状況となり、結果としてV溝突き当て部での隙間が低減するという構造上の利点がある。V溝突き当て部の隙間を低減した場合におけるコア薄肉連結部の磁束密度の解析結果を図6に示す。これは、図5と比較して薄肉連結部での磁束密度が低下し、漏れ磁束が低減できていることを示している。漏れ磁束を低減する構成にすることで高トルクを確保している。

3.1.3 マグネット極数・ステータコアスロット数

マグネット極数・ステータコアスロット数の選定は、機械的・電気的要請や制限から決定される。前述のように、製造上の工夫によりV溝突き当て部での隙間を低減し薄肉連結部での磁束密度を低減させているが、多極化により、更に磁束密度の低減が可能となる。しかし、ロータやステータの構成上の制限から、極数の上限が決定される。

また、当社のEGRバルブは、自己閉弁する必要がある。このDCモータではロータに永久磁石を用いているので、無通電時でもトルクリプル(コギングトルク)が発生している。このコギングトルクの大きさにより、自己閉弁の可否が決定される。すなわち、コギングトルクの大きさは自己閉弁が十分可能となる程度に抑制する必要がある。コギングトルクに影響を与える因子として、マグネット極数とステータコアスロット数の組合せがあるが、前述のステータコアのV溝部構成とティース形状の最適化を前提とし、マグネット極数・ステータコアスロット数の組合せとして8極9スロットを選択している。コギングトルクの大きさが自己閉弁可能なレベルであることを前述する解析からも確認済みである。

3.2 その他、電磁設計によるコストダウン

モータの損失には大きく分けてステータ巻線で発生する銅損と鉄損の2種類がある。ここで、ポキポキコアを用いた集中巻線を適用することで高密度巻線を実現し、銅損を低減することが可能となった。一方、鉄損は電磁鋼板の材料特性に大きく依存する。ここで鉄損 W_{fe} は、ヒステリシス損、渦電流損に分離することができ、式(2)で近似することができる⁽⁴⁾。

$$W_{fe} = \alpha Bf + \beta B^2 f^2 \dots\dots\dots(2)$$

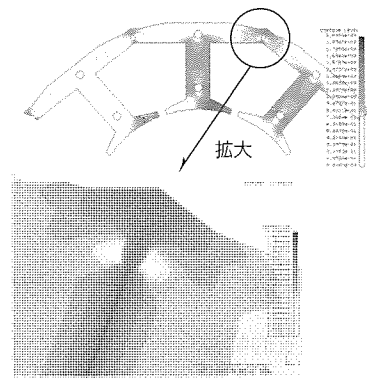


図6. コア薄肉連結部の磁束密度分布(隙間小)

ここで、 α 及び β はそれぞれヒステリシス損係数、渦電流損係数であり、 B は磁束密度[T]、 f は電気角周波数[Hz]を示している。

式(2)に示されるとおり、鉄損は回転周波数、すなわちモータの回転数に依存している。ここで、このDCモータは常時連続的に回転して利用するものではない。また、その利用回転数は非常に低く、ロック状態で利用する場合もある。このため、極めて低回転数で利用することから、発生する鉄損は極めて小さく、ほとんど無視することができる。以上のことから、ステータコアに用いる電磁鋼板は高級な低鉄損材を利用する必要はなく、低グレードの鋼板を利用することが可能となる。

4. む す び

今後も、排出ガス規制の強化、燃費規制の強化等、更なる出力・応答・耐久面での性能向上要求が強くなるものと想定される。自動車メーカーからのニーズにこたえ、他社に先駆けたタイムリーな製品開発を進めるためにも、磁界解析等のツールを有効活用することによりウィークポイントの早期発見、試作期間短縮を行い、機械的・電気的にロスの少ないコンパクトかつ高効率なモータの構築を行う。

参考文献

- (1) 三好帥男, ほか: DCモータ駆動式EGRバルブとその制御, 三菱電機技報, 78, No.9, 589~593 (2004)
- (2) 三宅俊彦: ブラシレスモータのEGRバルブへの応用, 電気学会 自動車研究会資料 JN: L4570A, VT-04, No.13-14, 16-21, 9~13 (2004)
- (3) 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)
- (4) 回転機の三次元CAEのための電磁界解析技術調査専門委員会: 回転機の三次元CAEのための電磁界解析技術, 電気学会技術報告, No.855, 22 (2001)

ルームエアコン用ブラシレスDCモータの高性能化

馬場和彦*
松岡 篤*
及川智明**

Performance Improvement of Brushless DC Motors for the Room Air Conditioner

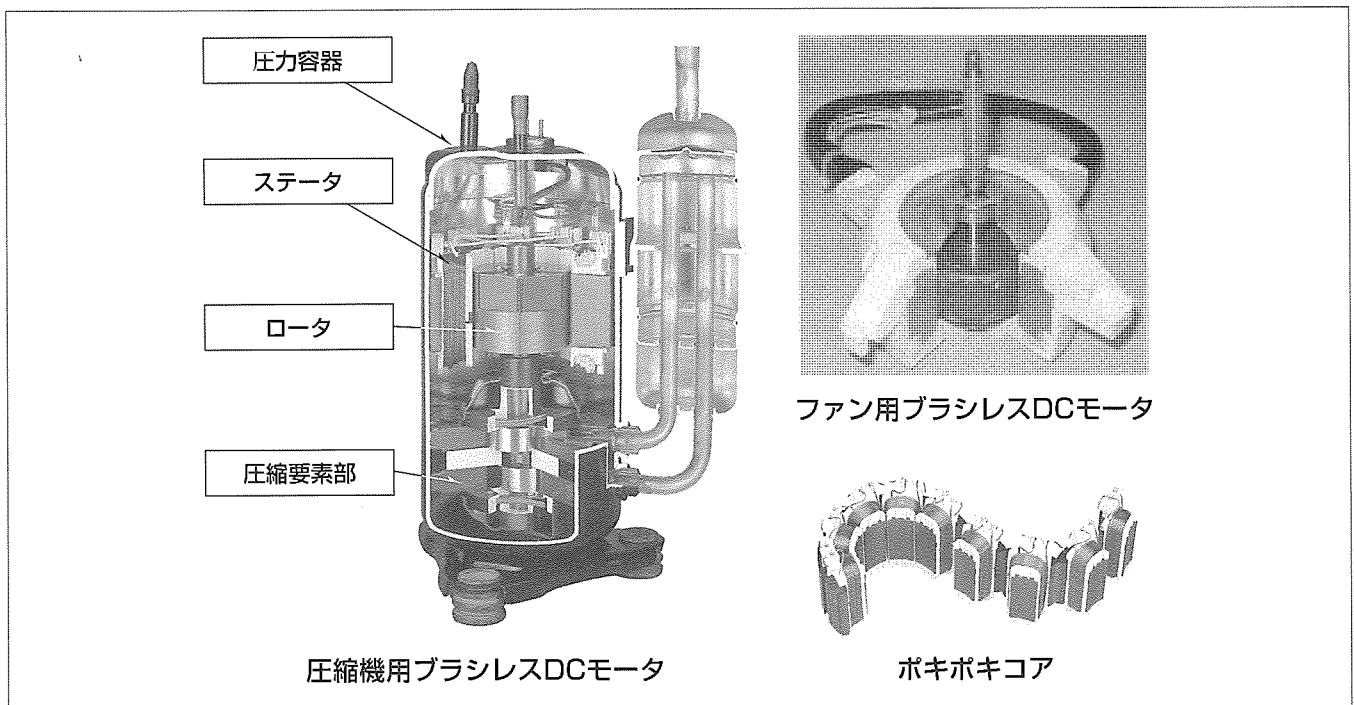
Kazuhiko Baba, Atsushi Matsuoka, Tomoaki Oikawa

要 旨

地球温暖化防止に対する環境保全の観点から省エネルギー化の関心が高まっている。特に、国内の電力消費量の約50%はモータによって消費されており、モータ技術者の省エネルギーに対する責任ある取り組みが不可欠となっている。家電分野においては、家庭で消費される電力の40%以上がルームエアコンと冷蔵庫で占められ、改正省エネルギー法によって、厳しい省エネルギー基準が定められる一方、市場では、激しい価格競争が繰り返されている。このため、省エネルギーのみならず、コストパフォーマンスに優れた省エネルギー技術の開発が重要となっている。ルームエアコンの圧縮機及びファン用モータは、効率、コスト、体積ともに大きなウェイトを占めるキーパーツであり、省エネルギーへの要求が強くなっている。このような中、10年前までは誘導電動機搭載機が主流であったルームエアコンも、高効率なブラシレスDCモータが開発されて以来、急激にブラシレスDCモータ化が進展した。

現在ではルームエアコンのほとんどの製品にブラシレスDCモータを搭載するに至っており、省エネルギー化に大きく貢献するとともに、更なる性能改善を推進している。圧縮機モータ及びファンモータの共通技術は、コイル周長を短くできる集中巻、コイルを高密度に実装できる“ポキポキコア”、小型・高効率化を両立できる希土類磁石の採用である。現在、圧縮機モータは磁石埋め込み型(Interior Permanent Magnet: IPM)が主流であるが、低騒音の要求の強いファンモータは、高調波成分を抑制しやすい磁石表面配置型(Surface Permanent Magnet: SPM)を採用している。

本稿では、最新のブラシレスDCモータの適用事例として、2005年のルームエアコン“霧ヶ峰”に搭載されている圧縮機用モータ、及びファンモータの高効率化への取り組みについて述べる。



ルームエアコン用ブラシレスDCモータ

三菱電機のルームエアコン“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。写真左は、当社のルームエアコンに用いられている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。右上の写真は、ファン用ブラシレスDCモータの断面構造である。右下の写真は、共通技術であるポキポキコアの外観である。

1. ま え が き

国内電力の約50%はモータによって消費されており、地球温暖化防止に向け高効率モータの役割が大きくなっている。家電製品の分野では、電力使用量の最も大きいルームエアコンの圧縮機駆動用モータの省エネルギー化の要求が特に高く、早期から省エネルギー技術が適用されてきた。ここ10年、誘導電動機の代替として、永久磁石を用いたブラシレスDCモータの効率の改善を推進してきている。現在では、ルームエアコンのほとんどの製品にブラシレスDCモータを搭載するに至り、省エネルギー化に大きく貢献するとともに、更なる高効率化のための性能改善が行われている。一方、市場では、激しい価格競争が繰り広げられており、省エネルギーのみならず、コストパフォーマンスに優れた省エネルギー技術の開発が重要となっている。また、限りある資源の有効活用という観点からは、できるだけ使用材料を削減し、小型化することが望ましい。

本稿では、これらの要求を満足するために開発した高効率・低コスト・小型のルームエアコン圧縮機用モータ、及びファンモータを取り上げて述べる。

2. ブラシレスDCモータの高効率化動向

図1に当社のルームエアコン圧縮機用ブラシレスDCモータの効率と材料コストからみた技術トレンドを示す。技術動向としては、ロータ構造では、SUS(Stainless)の保持リングを用いたSPMからIPMが主流となっている。これにより、保持リングが不要となり、材料コストの削減、インバータ制御によるSUSの渦電流損を削減することで、低速運転域で最大5%の効率改善を実現している⁽¹⁾。また、磁力の増加、スリット構造、低鉄損材料の適用などにより、IPMロータの効率改善を継続している⁽²⁾。巻線方式は、分布巻から集中巻へ変更し、これに伴い、コア構造を一体型コアから関節型ボキボキコアへ新させた⁽³⁾。また、巻線抵抗を低減できる完全整列巻技術を開発し、これまでモータ損失の大半を占めていた銅損を半減させた。

同時に、極数を4極から6極へ多極化することで、磁束

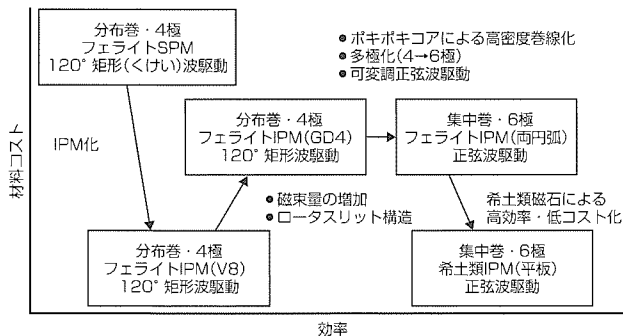


図1. ブラシレスDCモータの技術トレンド

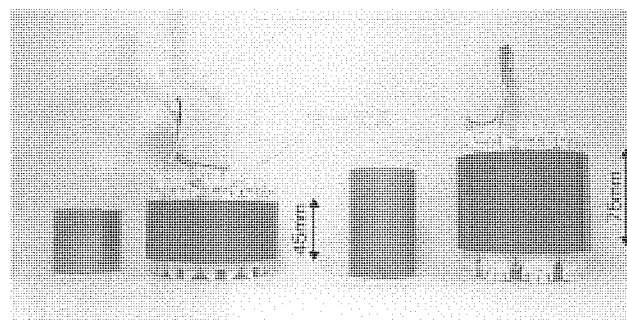
分布を分散し、ステータ内部の磁束密度の増加を緩和させることで、モータに発生する鉄損を低減した。さらに、最近では、磁石材をフェライト磁石から希土類磁石に変更することにより、磁力を向上し、高効率化に加え、小型による低コスト化を実現している。これらは、高効率インバータ駆動技術と併せ、モータ定数の最適化を行うことで、インバータ効率を含めたトータルの効率改善を図っている。

3. 高効率化技術

図2に新型モータと従来モータの外観を示す。新型モータは、平板状のNe-Fe-B系希土類磁石をロータ鉄心内部に6枚配置したIPMロータを採用し、ロータ鉄心外周部には、図3に示すように、径方向に伸びるスリットを配置した構造となっている。また、従来モータへ適用したボキボキコアを新型モータへも適用し、高密度巻線を可能とした。これにより、従来モータに対し、効率を向上させながら、60%の小型化を実現している。

3.1 希土類磁石の採用

コストパフォーマンスに優れたモータ形状を導出するためには、効率とコストの関係を明確にする必要がある。特に、希土類磁石は、モータコストに占める比率が大きいため、磁石の使用量を抑えた設計が重要となる。図4は、コアの積み厚を変えた場合の効率に対する材料コストの特性である。新型モータは、効率とコストパフォーマンスの両立をねらい、従来モータよりも効率・コスト面で有利な図中A点をターゲットとした設計を行っている。



(a) 新型モータ (b) 従来モータ

図2. 新型モータと従来モータの外観

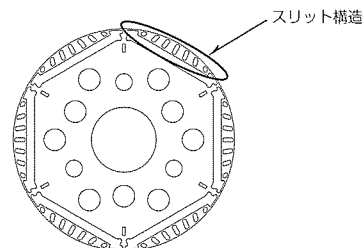


図3. 新型モータのロータ断面

3.2 ロータスリット構造

希土類磁石を用いた場合の課題として、磁束密度の増加による鉄損の増加、及び電磁加振力の増加が挙げられる。新型モータでは、図3で示したロータ鉄心外周部にスリットを設けることにより、電機子巻線反作用による磁束の集中を緩和し、これらの課題を解消している。

3.2.1 誘起電圧高調波含有率の低減

図5に、新型モータにスリットを入れた場合とスリットを入れない場合の誘起電圧波形を示す。ロータ鉄心部にスリットを設けることにより、誘起電圧に含まれる高調波成分を低減した構造とした。また、インバータ制御と併せ、誘起電圧波形と同様の180°正弦波駆動を行うことにより、鉄損、電磁加振力を抑制した。

3.2.2 径方向加振力の低減

生産上のばらつきによりロータ軸が偏心した場合、磁気的にアンバランスな状態となり、径方向の電磁加振力が増加するという課題があった。新型モータでは、この磁気的アンバランスを吸収するため、ロータ鉄心に径方向に伸びるスリットを設けた。図6に、スリットの本数に対する径方向加振力の特性を示す。適正なスリットを入れることで、トルクの低下を抑えながら、径方向加振力を低減できる構造とした。

3.3 誘起電圧定数の増加

巻数の増加により誘起電圧定数を増加させることで、PWM(Pulse Width Modulation)制御に伴う電流リップルが

抑制でき、高調波鉄損を低減できる。また、インバータ電流を低減し、回路効率を大幅に改善できるという相乗効果が得られる。一方、過大な巻数の増加は、高速運転時に巻線に誘起される電圧が上昇し、インバータの出力電圧不足となり運転範囲が低下するという課題があった。新型モータでは、弱め界磁特性に優れた磁石形状・配置の設計と高速運転時の電圧利用率を向上させた独自の可変調PWM制御を開発することにより、出力電圧を最大約10%増加し、電圧不足を解消した⁽⁴⁾。図7に冷房能力4kWクラスの従来モータと新型モータの運転限界特性の比較を示す。新型モータは、従来モータに対し、誘起電圧定数が75%大きい仕様となっている。従来モータの巻数を75%増加させた場合、回転数の増加とともに運転限界トルクの低下が著しいのに対し、新型モータは、誘起電圧定数を増加させても従来の運転範囲を損なうことなく広範囲の運転を可能にしている。

3.4 ポキポキコア

コイルの周長を削減できる集中巻線方式と高密度巻線を実現できるポキポキコアを新型モータに適用した。図8にポキポキコアの外観を示す。関節部では、鉄心材が1枚ごとにラップしており、そのラップの部位の回転中心に凹凸部(関節部)が形成され、関節部を軸に自由自在に折り曲げ可能な構造となっている。これにより、展開した鉄心にコイルを整列巻線してから丸めるという工法が可能になり、

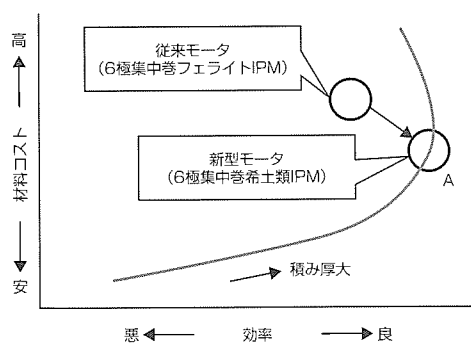


図4. 効率と材料コストの関係

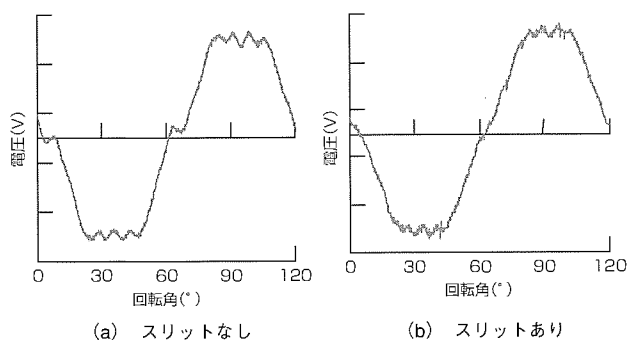


図5. 新型モータの誘起電圧波形

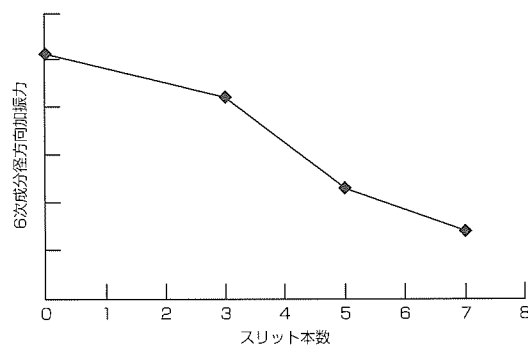


図6. 径方向加振力

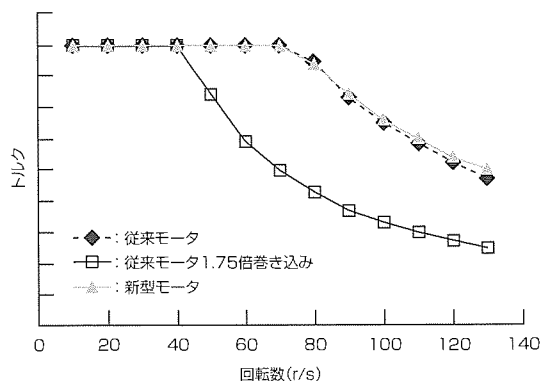


図7. 運転限界特性

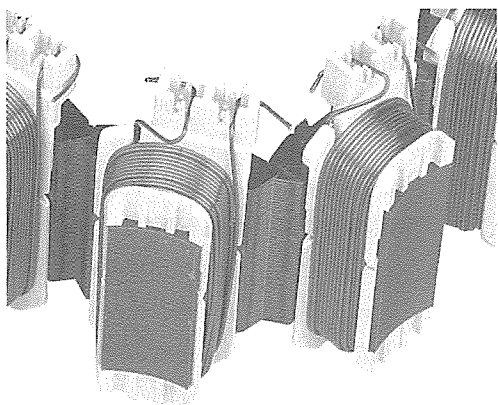


図8. ポキポキコアの外観

巻線抵抗の増加を抑制し、銅損比率の小さいモータを実現した。

3.5 効率特性

図9に4kWクラスルームエアコンの代表的な運転条件における効率特性を示す。効率は、回路効率を含めたトータル効率を示している。新型モータは、従来モータに対して、全領域で約2%の効率改善を図っている。

4. ファンモータの技術動向

室外機及び室内機に搭載するファンモータでも、高効率なブラシレスDCモータを採用している。ファンモータは、高効率であると同時に低騒音であることが要求されるため、誘起電圧の高調波成分を低減しやすいSPMを採用している。また、圧縮機用モータに比べて運転周波数が低いことから、ステータは多スロット集中巻を用いることによりコイルエンドを縮小している。同時に、ポキポキコアを用いて高密度巻線を行うことで巻線抵抗を低減し、銅損の低減を図っている。

室外DCファンモータは、高トルク化を実現するため、スロット数と極数の組合せを9スロット8極としている。ロータの永久磁石には希土類のプラスチックマグネットを採用して、高効率化を図っている。一般的に用いられるフェライトプラスチックマグネットに比べ高価であることから、マグネットは薄肉化してコストの上昇を抑えている。また、磁石の形状を工夫することで、振動・騒音の要因となる誘起電圧のひずみを抑えて、低騒音化を実現している⁽⁵⁾。

一方、室内DCファンモータは、室内機のスペースの制約で薄型化が求められることから、ステータを更に多スロットの12スロットにして、コイルエンドを縮小している。ロータには室外DCファンモータと同様に希土類のプラスチックマグネットを採用して高効率化を図っている。図10に室内DCファンモータの外観を示す。

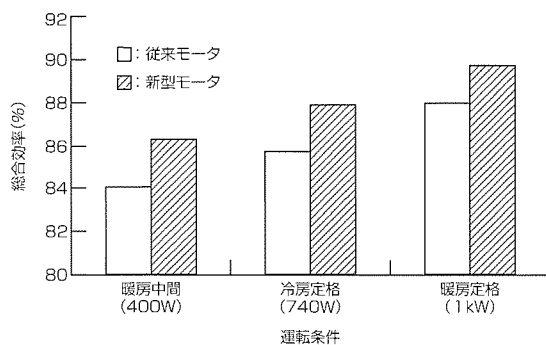


図9. 各運転条件の効率

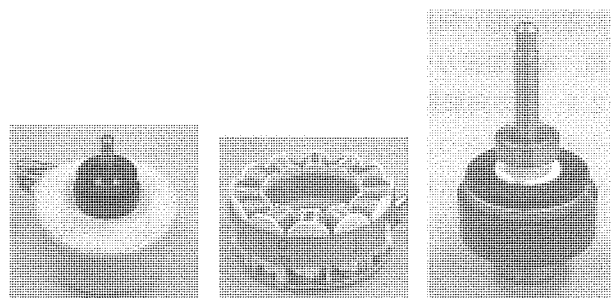


図10. 室内DCファンモータの外観

5. むすび

ルームエアコン霧ヶ峰に搭載されている圧縮機用モータ、及びファンモータの高効率化の取り組みについて述べた。社会的には省エネルギー化の要求はますます高くなるとわれ、他の機器への展開が期待される。地球環境に優しい製品作りは、製品設計に携わる者の使命と強く認識し、今後も、省エネルギー化の推進に積極的に取り組んでいく所存である。

参考文献

- (1) 鈴木康巨, ほか: 密閉型圧縮機用DCブラシレスモータ“V8DCモータ”, 三菱電機技報, 70, No.8, 828~833 (1996)
- (2) 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-99-19 (1999)
- (3) 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)
- (4) 川久保 守, ほか: 空調・家電機器におけるパワーエレクトロニクス技術, 三菱電機技報, 79, No.7, 455~458 (2005)
- (5) 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)

電磁操作方式真空遮断器

有岡正博*

Electromagnetically Actuated Vacuum Circuit Breaker

Masahiro Arioka

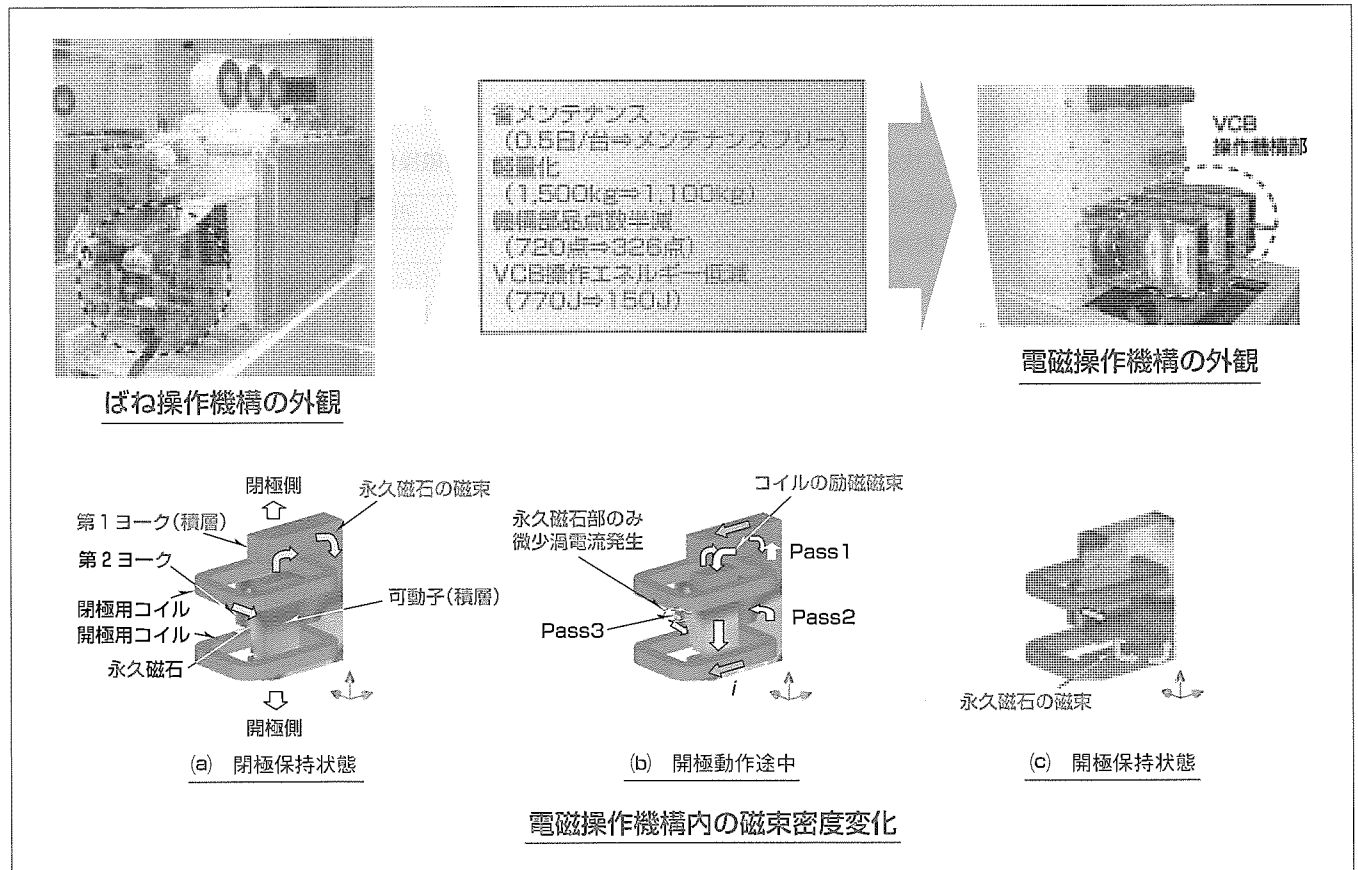
要旨

国内外の送配電及び受配電系統において、系統事故発生時に事故点を他の系統から切り離すために用いられている72/84kV級以下の遮断器は油遮断器、空気遮断器、磁気遮断器が用いられていたが、1960年代からガス遮断器、真空遮断器に移行した。操作機構も電磁操作方式・空気操作方式に変わり小型・軽量化、信頼性向上及び操作エネルギーの省力化を目的としてばね操作方式へと移行し、さらに近年では、消弧性能、長寿命化、ライフサイクルコスト(LCC)低減、環境負荷低減が図れる真空遮断器(Vacuum Circuit Breaker: VCB)が主流となっている。

三菱電機は、一層の環境負荷低減とLCC低減を目的として、2004年に12/24kV HS-X型低ガス圧ドライエア絶縁

スイッチギヤ用VCBに開極/閉極の両操作を電磁力によって行い、開極/閉極状態を永久磁石の磁力によって保持するダブルヨーク式電磁操作機構を採用した。

この電磁操作方式VCBは、主接点を直接動作(直動)することによるラッチ機構などの消耗部品レス化と、中間連結機構をなくすことでの部品点数半減を実現し、大幅に信頼性を向上するとともに、操作機構部をメンテナンスフリーとした。さらに、過渡電磁界と運動の連成解析手法を新規に開発・適用し、電源容量と構造の最適化を行うことで、従来の電動ばね操作方式VCBに比べ動作に必要な電気エネルギーを80%低減し、操作電源用バッテリー容量の大幅な低減を実現した。



電動ばね操作方式VCBと電磁操作方式VCBの操作機構部の比較

24kVガス絶縁スイッチギヤ用VCBの例を示す。

1. ま え が き

国内外の送配電及び受配電系統において、系統事故発生時に事故点を他の系統から切り離すために用いられている72/84kV級以下の遮断器は油遮断器、空気遮断器、磁気遮断器が用いられていたが、1960年代からガス遮断器、VCBに移行した。操作機構も電磁操作方式・空気操作方式に変わり小型・軽量化、信頼性向上及び操作エネルギーの省力化を目的としてばね操作方式へと移行し、さらに近年では、消弧性能、長寿命化、LCC低減、環境負荷低減が図れるVCBが主流となっている。

当社は、24/36kVクラスのHS-X型複合絶縁開閉装置において、地球温暖化防止と環境調和を目的とし、当社が1999年に実用化したドライエア絶縁(相対湿度1,000ppm以下)とバリヤ絶縁を複合した複合絶縁の適用による脱SF₆ガス化に加え、新しいVCBとして、三相各相に開閉極の両操作を電磁力によって行い、開極/閉極状態を永久磁石の磁力によって保持するダブルヨーク式双磁気安定型電磁操作機構を実用化した。このVCBは、電磁操作機構を用いて主接点を直線的に直動することにより、ラッチ機構などの損耗部品レス化と、中間連結機構レスによる部品点数半減を実現し、大幅に信頼性を向上するとともに、操作機構部はメンテナンスフリー化するなどのLCC低減を図った。

また、これまでは、接点を封入した真空バルブ、絶縁ロッド、接圧ばね及び電磁操作機構など複数の機構部品からなるVCBの駆動特性を高度に解析する技術がなく、VCBの開閉操作に必要な電気エネルギーの低減が困難であったため、当社は、遮断器の構造を忠実に模擬できる過渡電磁界と運動の連成解析技術を新たに開発した。この手法を用いて電源容量と構造の最適化を行い、従来の電動ばね操作方式VCBに比べ動作に必要な電気エネルギーを80%低減し、操作電源用バッテリー容量を大幅に低減できる世界トップクラスの高効率電磁操作式遮断器を実現した。

本稿では、電磁操作方式遮断器の概要と新技術について述べる。

2. 電磁操作方式VCBの概要

HS-X型スイッチギヤに搭載している電磁操作方式VCBの特長を表1に示す。

また、定格及び仕様を表2に、代表的な構造を図1に示す。VCBは各相ごとに電磁操作機構を搭載し、主接点を直動することにより、ラッチレバーレス化と部品点数半減を実現し、大幅に信頼性を向上するとともに、操作機構部のメンテナンスフリーを実現した。

3. 電磁操作方式VCBを実現した新技術

3.1 VCBの構造

HS-X型スイッチギヤ用VCBでは、従来のばね操作機構に代わり当社独自のダブルヨーク式電磁操作機構を開発し適用している。部品点数削減での信頼性向上、消耗部品(ラッチレバーなど)レス化、グリスレスによる省メンテナンス化を目的とし、真空バルブ、絶縁ロッド、接圧ばね及び電磁操作機構を直線上に配置した直動型各相個別駆動とすることにより、三相リンク機構を廃止した。この電磁操作機構の構造を図2に示す。第1積層ヨーク、第2ヨーク、永久磁石、積層可動子及び閉閉極用コイルからなる構造であり、当社従来品(ばね操作方式)に対して部品点数は45%に削減されている。永久磁石を採用することで、外部電源

表1. 電磁操作方式VCBの特長

コンセプト	新技術/対策
環境調和	● VCBの操作音低減
LCC低減	運用費 ● 操作エネルギー低減
	保守費 ● 操作機構部のメンテナンスフリー化 ● 気中しゅう動部位に長寿命グリス使用
安全性/信頼性向上	● 構造を単純化 ● 部品点数を削減 ● 主接点直動 ● 操作機構部の損耗部品レス化 (8万回の単体閉閉試験をクリア)

表2. 電磁操作方式VCBの定格及び仕様

項目	仕様	
定格電圧 (kV)	12, 24	
定格耐電圧	雷インパルス (kV peak)	75, 125
	商用周波 (kV rms)	28, 50
定格周波数 (Hz)	50/60	
定格電流 (A)	630, 1,250	
定格遮断電流 (kA)	25	
定格投入電流 (kA)	63	
定格短時間耐電流 (kA)	25(3秒)	
定格遮断時間 (サイクル)	3	
準拠規格	IEC, JEC	

IEC: International Electrotechnical Commission
JEC: Standard of Japanese Electrotechnical Committee

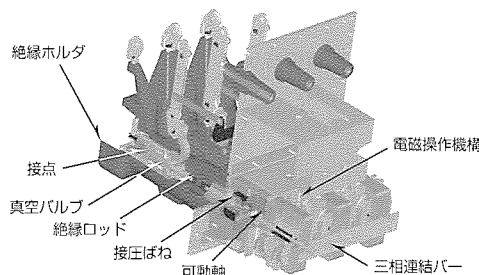


図1. HS-X型 24kVスイッチギヤ用VCB構造

を供給せずに開閉状態の保持が可能である。また、開閉動作はコンデンサに蓄積されたエネルギーを、制御回路を用いて開極コイル又は投入コイルに通電することにより行う。第2ヨークの採用は当社独自の構造であり、図3(a), (b)に示すとおり永久磁石磁路(開閉保持)とコイル励磁磁路(開閉動作)を分割することで、永久磁石の逆励磁を生じず、開閉動作を高効率化できる。さらに、可動子を積層構造にすることで、駆動時の渦電流を極小化し省電力駆動を可能にした。

3.2 連成解析技術

VCBの高効率で安定した開閉極動作を実現するために、過渡電磁界と運動の連成解析手法を開発し駆動解析を実施した⁽¹⁾。この手法では、電磁操作機構の可動子周辺に発生する磁束、電磁力のコイル電流及び可動子間の位置依存性を三次元静電磁界解析により求め、式(1)、式(2)、式(3)を連成解析している。

$$\frac{q(t)}{C} + I_{coil}(t) \cdot (R_{coil} + R_{out}) + \frac{d\phi(I_{coil}(t), z(t))}{dt} = E \quad \dots(1)$$

$$\frac{dq(t)}{dt} = I_{coil} \quad \dots(2)$$

$$m(z(t)) \frac{d^2z}{dt^2} = F_m(I_{coil}(t), z(t)) + F_s(z(t)) + F_{friction} \quad \dots(3)$$

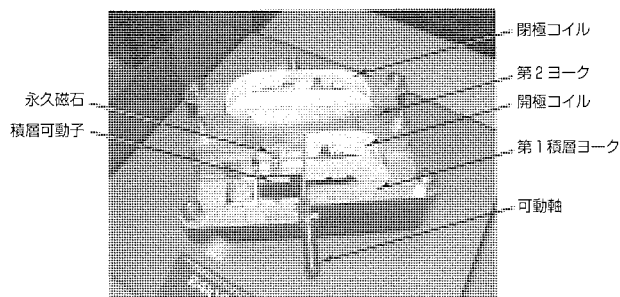


図2. 電磁操作機構カットモデル

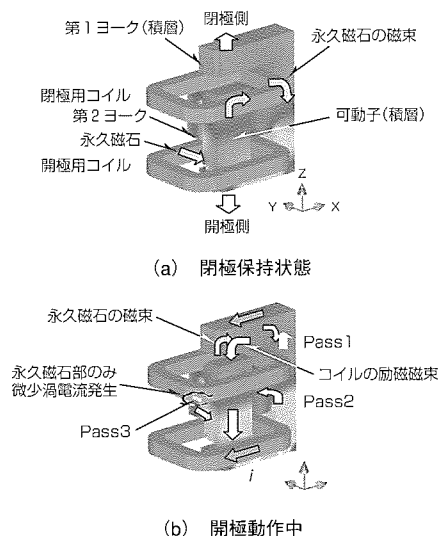


図3. 永久磁石磁路とコイル励磁磁路

C: コンデンサの静電容量

I_{coil} : 駆動コイル電流

R_{coil} : 駆動コイル抵抗

R_{out} : 回路抵抗

ϕ : コイル鎖交磁束

z : 駆動方向

E: 電圧

M: 可動部の質量

F_m : 電磁力

F_s : 接圧ばね力

$F_{friction}$: 摩擦力

渦電流による磁束及び電磁力の遅れは、時定数 τ を用いて表現し、磁束 (ϕ) 及び電磁力 (F_m) に取り込んだ。時定数 τ は電磁アクチュエータ単体の駆動試験結果を基に求めた。また、真空バルブの接圧ばね力及び遮断器可動部の質量変化の不連続性は、運動量保存則を適用して考慮した。図4に遮断器開極におけるこの解析結果と実機における実測結果を示す。同図において、上側は開極ストローク、下側はコイル電流の時間変化を示す。時定数 τ と運動量保存則の適用により、ストローク、コイル電流ともに、解析結果が測定結果とよく一致している。これにより、この解析が高精度で電磁操作機構の開閉特性を再現できることが分かった。この解析を適用して最適設計を実施した結果、駆動エネルギーを従来のばね操作機構から80%削減できた。また、この手法を用いて製造上の部品誤差、組立誤差による開閉極時間ばらつきを検討した(表3)。同表に示すとおり、開閉極時間のばらつきは極めて小さく、試作機での開閉極時間ばらつきは0.5ms以下であった。

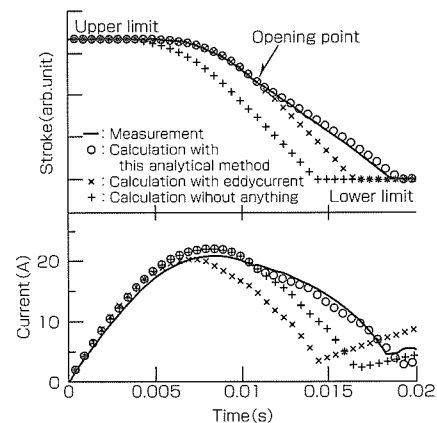


図4. 連成解析結果と実測結果の比較

表3. 三相間の開閉極時間ばらつき計算結果

製作誤差	Worst (100%)	3σ (99%)	2σ (95%)
三相ばらつき			
開極時間ばらつき (ms)	2.8	2.0	1.3
閉極時間ばらつき (ms)	3.4	2.4	1.6

4. 電磁操作方式VCBの今後の展開

図5に示すとおりガス絶縁スイッチギヤで発生している障害の約65%は操作機構部で発生しており、操作機構部の異常を検知し適切に保守を行うことは障害の未然防止に有効であると言える。

電磁操作方式VCBの特長の一つに、電磁操作機構のコイル電流波形と操作機構可動部の変位波形の特徴点が発生する時間が同じであるという現象がある。ここで、式(1)に示す左辺第3項は式(4)のとおり電流微分による起電力項と速度による起電力項に分解される。つまり、式(4)右辺第2項は速度起電力項であり、駆動開始や駆動完了など動作途中に速度が急激に変化した場合に、電流波形が変曲するなど目立った特徴を示すことになる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\phi(I_{coil}(t), z(t))}{dt} = \\ \frac{d\phi(I_{coil}(t), z(t))}{dI_{coil}} \frac{dI_{coil}}{dt} + \frac{d\phi(I_{coil}(t), z(t))}{dz} \frac{dz}{dt} \end{aligned} \right\} \cdot (4)$$

図6に初期状態と接点消耗を模擬した場合のコイル電流波形と操作機構可動部の変位の比較を示す。駆動開始時間、駆動完了時間、駆動途中の特徴点の発生時間が電流と変位で一致していることが分かる。この駆動途中の時間 t_{p1} はワイプばねの開放が完了し、接点が動き出す、すなわち、開極時間と一致している。このことから電流波形が微妙に変化する時間や電流値を抽出して分析することにより、波形変化をもたらした要因を特定することが可能となる。

そこで、前章で述べた連成解析技術を用いて、VCBの経年的に変化する主な要因である摩擦、コンデンサ容量及び接点消耗を、コイル電流波形の特徴点の変化から予測する技術を確立した。特にこの技術を用いて接点消耗量の変化を予測することが可能となれば、位相制御遮断器に不可欠な開閉極時間の予測が、従来のようにトラベルセンサなどを用いずに電源回路上に配置したCT(Current Transformer)でコイル電流を計測することで可能となり、従来の位相制御装置の大幅な簡略化が可能となる。また、摩擦、コンデンサ容量及び接点消耗の経年変化要素の予測は、図7に示すフローのように、CTと経年変化量を演算するための簡単な処理回路によって構成できる。つまり、VCB本体に種々のセンサを追加することなく、図5で示した操作機構部の経年変化状況を常時監視できることになる。

今回述べた電磁操作機構の電流波形分析による経年変化監視技術の確立により、従来のばね操作方式では定期的な実施する必要があったメンテナンス(Time Based Maintenance: TBM)の形態を、機器の状態に応じて実施するメンテナンス(Condition Based Maintenance: CBM)に変更することが可能であり、今後の保守形態の革新をもたらす

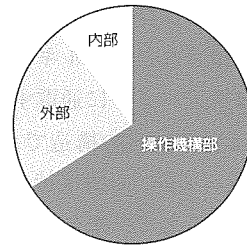


図5. ガス絶縁機器全体での障害発生状況 (電気協同研究会 第44巻第2号 ガス絶縁機器の信頼性向上策から抜粋)

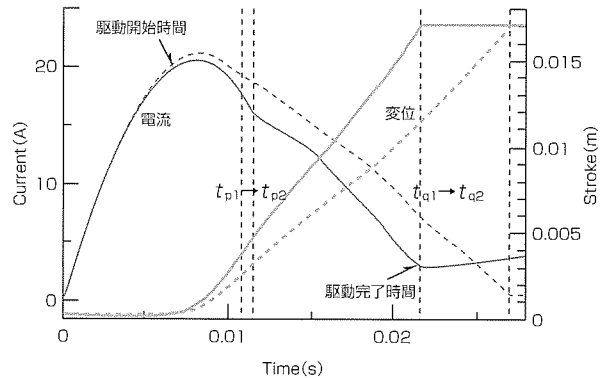


図6. 遮断器駆動時の電流と変位の波形変化

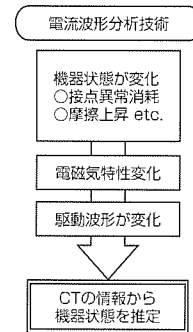


図7. 電流波形分析フロー

と考える。

5. む す び

本稿で述べた12/24kV用電磁操作方式VCBは、2004年以降国内外の多数の受配電設備において運転中である。今後、電磁操作方式VCBは、他の定格への展開を図りシリーズ化を行っていく。

参 考 文 献

(1) Takeuchi, T., et al.: An Electromagnetically Actuated Vacuum Circuit Breaker Developed by Electromagnetic Analysis Coupled with Motion, IEEJ Trans. PE, 124, No.2, 321~326 (2004)

次世代高機能汎用インバータ “FREQROL-A700シリーズ”

池田克司* 金原義彦**
白石康裕*
今中 晶*

The Next Generation High Performance Inverter for General Purpose “FREQROL-A700 Series”

Katsushi Ikeda, Yasuhiro Shiraiishi, Akira Imanaka, Yoshihiko Kinpara

要 旨

近年、モータ駆動機器としてインバータ制御が急速に進展し、三菱電機の高機能汎用インバータである“FREQROL-A500/A500Lシリーズ”は、搬送・昇降・工作機械などの用途向けとして好評を得てきた。今回、それに対し、駆動性能、メンテナンス性、操作性、耐環境性を大幅に向上させた次世代高機能汎用インバータ“FREQROL-A700シリーズ”を開発し製品化した。

駆動性能の改善としては、従来機種FREQROL-A500/A500Lシリーズから採用しているモータ定数の推定を行う回転レスチューニングの精度向上、及び従来のアドバンス

ト磁束ベクトル制御に加え、速度制御範囲、速度応答を大幅に改善した“リアルセンサレスベクトル制御”を搭載した。さらにはPLG(Pulse Logic Generator)入力インタフェース内蔵オプションを追加することにより“本格ベクトル制御”が可能となり、高応答な速度制御のみならず、トルク制御、位置制御が実現できる。

また、先に市場に投入した本格ファン・ポンプ用インバータFREQROL-F700シリーズから好評を得ている“メンテナンス性向上”“操作性向上”“耐環境性向上”“多彩なネットワークに対応”についても実現した。

- 駆動性能向上・・・リアルセンサレスベクトル制御、本格ベクトル制御搭載
- 簡単操作・・・新型パラメータユニットFR-PU07ラインアップ
- ・・・USB接続による簡単セットアップ
- 優れた拡張性・・・ネットワーク対応(CC-Link Ver.1.1/Ver.2.0, CANopen, EtherNET, SSCNETⅢ他)
- ・・・22kW以下プレーキトランジスタ内蔵
- ・・・オプション追加により本格ベクトル制御に対応



次世代高機能汎用インバータFREQROL-A700シリーズ

FREQROL-A700シリーズは、200V系は0.4kWから90kW、400V系は0.4kWから500kWまでの幅広い容量レンジをラインアップし、また、回転レスチューニングの性能向上、及び従来のアドバンスト磁束ベクトル制御に加え、リアルセンサレスベクトル制御、さらにオプション追加による本格ベクトル制御により駆動性能の大幅改善を実現した。また、着脱可能な操作パネルにMダイヤルを搭載し、簡単操作で周波数、パラメータの設定が可能であり、搬送・昇降・工作機械などの用途に最適である。

1. ま え が き

近年、モータ駆動機器としてインバータ制御が急速に進展し、搬送機械、昇降機、工作機械等に使用される汎用インバータでは、低速時の駆動性能、メンテナンス性、操作性、耐環境性、遠隔からのパラメータ設定など幅広い運転条件や用途に対応可能な高性能かつ使い勝手の良いインバータが求められている。

このような市場のニーズに対応するため、高機能汎用インバータFREQROL-A700シリーズを開発した。

本稿では、FREQROL-A700シリーズで採用した最新技術と機能について述べる。

2. 製 品 概 要

FREQROL-A700シリーズの製品概要を表1に示す。200V系では0.4kWから90kWまでの17容量、400V系では

表1. FREQROL-A700シリーズの仕様概要

No.	項目	FREQROL-A700仕様	
1	電圧・容量	0.4kW~90kW/200V(240V対応可) 0.4kW~500kW/400V(480V対応可)	
2	出力周波数範囲	0.2~400Hz	
3	制御方式	高キャリア周波数PWM制御(V/f制御) アドバンスト磁束ベクトル制御 リアルセンサレスベクトル制御 PLG付きベクトル制御(オプションFR-A7AP使用時)	
4	主な機能	搬送・昇降機用途	多段速運転、あて止め選択、ブレーキシーケンス、ドループ制御、回転レスチューニング、マシンアナライザ、単相ゲインチューニング、速度フィードフォワード、直流電源入力、パルス列入出力
		操作性・メンテナンス性	寿命診断機能、メンテナンスタイマ、電流平均値モニタ信号、シンプルモード、冷却ファンON/OFF制御
5	通信	標準整備	RS-485, Modbus-RTU ^(注1)
		オプション	CC-Link Ver.1.1/Ver.2.0, LonWorks, DeviceNet, PROFIBUS-DP, SSCNET III, EtherNET CANopen ^(注2)
6	構造	保護構造	IP20(22K以下)
		ブレーキ	ブレーキトランジスタ: 22K以下内蔵 ブレーキ抵抗: 7.5K以下内蔵
		制御端子台	脱着式(A500の脱着式制御端子台も接続可)
		冷却ファン	カセット式交換(全容量)
	DCL	全容量接続可	
7	対応規格	UL, cUL EN規格(EMC: 2nd Environment)	

PWM: Pulse Width Modulation, DCL: 直流リアクトル
UL: Underwriters' Laboratories, EN: European Norm
EMC: Electro Magnetic Compatibility

(注1) Modbusは、Schneider Automation Inc.社の登録商標である。

(注2) CC-LinkはCC-Link協会、LonWorksはEchelon Corp., DeviceNetはODVA, PROFIBUSはPROFIBUS User Organization, SSCNETは三菱電機株, EtherNETはXerox Corp., CANopenはCIAの登録商標である。

0.4kWから500kWまでの29容量と、幅広い容量をラインアップしている。

FREQROL-A700シリーズは、リアルセンサレスベクトル制御を始めとする搬送・昇降・工作機械などの可変速用途から、巻取り、印刷機械などのライン制御用途に適した機能が装備されており、オプションの装着により本格ベクトル制御、多彩なネットワークに対応できる拡張性を持っている。

以下に主な特長を示す。

- (1) 更なる駆動性能の実現
 - 回転レスオートチューニングの精度向上
 - リアルセンサレスベクトル制御
 - オプション追加によるPLG付きベクトル制御
- (2) 簡単操作・簡単メンテナンス
- (3) 環境への配慮

3. 駆動性能の更なる追求

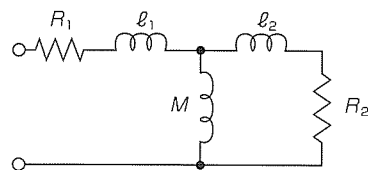
3.1 回転レスチューニングの精度向上

従来のFREQROL-A500/A500Lシリーズから、電気的定数の分からないモータをアドバンスト磁束ベクトル制御で良好に駆動するため、オフラインオートチューニング機能があった。オフラインオートチューニングには、モータを回転させてチューニングするモードとモータを回転させずにチューニングするモード(以下“回転レスチューニング”という。)があり、いずれも図1に示すモータの電気的定数を推定する。しかし、従来の方式では、回転させるモードでは、自己インダクタンス $L_1 (=M+l_1)$ 、 $L_2 (=M+l_2)$ は容易に推定できるものの、回転レスチューニングでは十分な精度を確保することが困難であったが、今回、回転レスチューニングではモータを回転させずに高精度に自己インダクタンス L_1 、 L_2 をチューニングすることを可能にした。

これにより、FREQROL-A700シリーズでは、既設の設備の場合などモータを回転させることができないような場合でも、アドバンスト磁束ベクトルやリアルセンサレスベクトル制御で良好な駆動を実現できるようにした。

3.2 リアルセンサレスベクトル制御

従来のアドバンス磁束ベクトル制御に対し、回転速度検



R_1, R_2 : 一次抵抗, 二次抵抗
 l_1, l_2 : 一次, 二次漏れインダクタンス
 M : 相互インダクタンス

図1. モータのT型等価回路

出器なしでベクトル制御系を構成し、高精度な速度制御やトルク制御を実現するリアルセンサレスベクトル制御を搭載した。この制御方式では、インバータ内部にモータモデルを持ち、電圧・電流から正確な磁束を演算・推定する適応磁束オブザーバを構成した。図2にそのブロック図を示す。

通常のベクトル制御ではPLG等の回転速度検出器により実速度を用いてベクトル制御演算するのにに対し、リアルセンサレスベクトル制御では、前述の磁束オブザーバにより求めた磁束から速度を推定し、この速度を用いてベクトル制御演算をしている。また、この制御方式は、前に述べたオフラインオートチューニングで求めたモータの電気的定数を利用することで、優れた安定性を実現したセンサレスベクトル制御が可能となっている。

3.3 PLG付きベクトル制御

従来機種であるFREQROL-A500/A500LシリーズでもオプションFR-A5APを追加することによりベクトル制御が可能であったが、速度制御のみの対応としていた。

今回FREQROL-A700シリーズでは、オプションのFR-A7APを追加することにより、トルク制御、位置制御を始め当社ベクトルインバータFREQROL-V500/V500Lシリーズと同等の高精度PLG付きベクトル制御を実現した。

表2にFREQROL-A700シリーズに搭載されているアドバンスト磁束ベクトル制御、リアルセンサレスベクトル制御、PLG付きベクトル制御の性能比較を示す。

このように多彩な制御を搭載することで、あらゆる用途に対応することが可能となった。

3.4 簡単ゲインチューニング

PLG付きベクトル制御では負荷機械の特性に合わせて速度制御ゲインなどの制御パラメータを調整しなければなら

ないため、従来から制御パラメータを自動調整するオートチューニング機能が望まれていた。

今回FREQROL-A700シリーズでは、実際の運転状態でリアルタイムかつ高精度に負荷イナーシャを推定し、速度ゲインを自動調整する簡単ゲインチューニングを搭載した。これにより、調整レスでの高精度速度制御の実現が可能となる。図3に簡単ゲインチューニング時の動作波形を示す。この図から、加減速のたびにイナーシャ推定値が真値に向かって収束していき、速度制御ゲインが自動調整されることにより速度波形のオーバーシュートが次第になくなって

表2. 各制御方式の性能比較

	アドバンスト 磁束 ベクトル制御	リアル センサレス ベクトル制御	PLG付き ベクトル制御
速度制御	○	○	○
トルク制御	×	○	○
位置制御	×	×	○
速度制御範囲	1 : 120	1 : 200	1 : 1500
速度応答	20~30rad/s	120rad/s	300rad/s

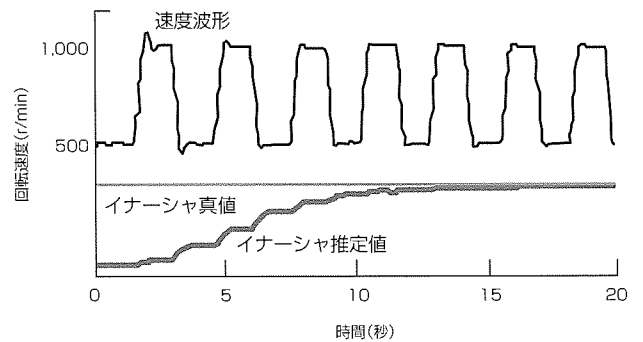


図3. 簡単ゲインチューニング動作波形

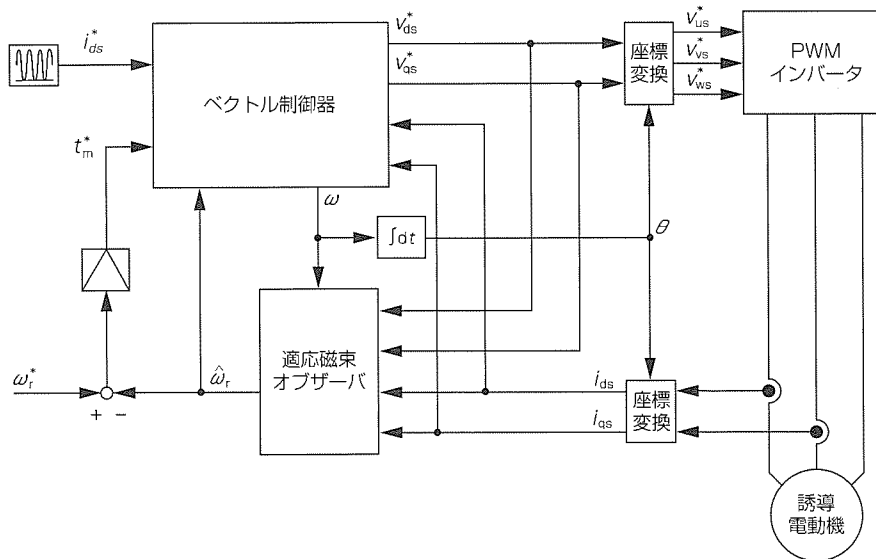


図2. センサレスベクトル制御ブロック図

いくのが分かる。

4. 簡単操作

4.1 USB接続とセットアップソフトウェア

FREQROL-A700シリーズではUSB(Universal Serial Bus) (Ver1.1)を標準装備し、セットアップソフトウェア“FR-Configurator”を用いてパソコンから簡単にセットアップやパラメータ管理(パラメータ設定, ファイル保存, 印刷)が可能となった(図4)。

その他, FR-Configuratorを用いれば, 従来機種FREQROL-A500/A500Lシリーズからリニューアル時に便利なパラメータ自動変換が可能であり, また, マシナナライザ機能を用いて機械共振を容易に避けることができる。

4.2 新形パラメータユニット“FR-PU07”

インバータ表面から操作パネル“FR-DU07”を取り外しオプションの新形パラメータユニットFR-PU07を接続可能である。このFR-PU07は, 見やすい液晶画面, テンキー方式のダイレクトインプットによりパラメータ設定, 運転等が簡単にできる(図5)。また, 従来のパラメータユニットFR-PU04に比べて下記新機能が追加となり, よりパラメータ設定が容易となった。

- (1) 最大3台分のパラメータ設定値を保存可能
- (2) バッテリー内蔵タイプFR-PU07BBを用いればインバータに電源を投入せずにパラメータの設定やコピーが可能

5. 多様なネットワークへの対応

RS-485端子台を標準装備しており, FREQROLインバータの専用プロトコル通信と, Modbus-RTU通信が標準で対応可能である。また, CC-Link Ver.1.1/Ver.2.0, LonWorks, DeviceNet, PROFIBUS-DP, CANopenなどの多様なオープンネットワークにオプションで対応可能とした。これらの通信オプションは, 起動指令受信から実際の起動開始まで約10msで反応できるよう, 従来製品に対して応答性を大幅に改善している。また, 当社モーションコントローラにもオプションによりSSCNETⅢで接続可能である。

また, RS-485端子台とは別に, RS-485通信用のRJ45コネクタやUSBを標準装備しており, 前述のパラメータユニットやセットアップソフトウェアを接続した状態で, RS-485端子台を通じてRS-485通信やModbus-RTU通信が可能であり, 多彩な使用方法が期待できる。

6. その他の機能

6.1 ブレーキトランジスタ内蔵(22K以下)

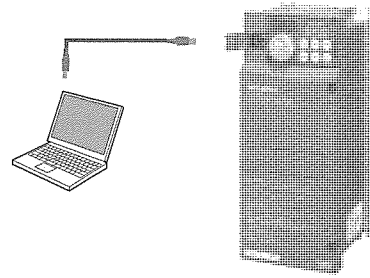


図4. USB接続

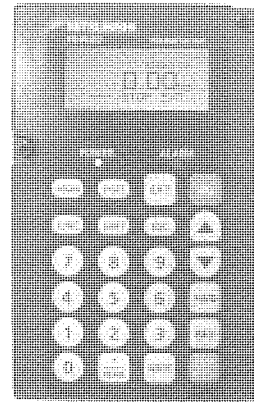


図5. FR-PU07の外観

従来の7.5K以下に加え, 11K~22Kにブレーキトランジスタを内蔵しオプションのブレーキ抵抗を接続可能とした。

6.2 パルス列入出力機能

コントローラなどからのパルス列信号による速度指令を直接入力可能なパルス列入力と, パルス列出力を標準装備している。オプションのFR-A7APとの組合せで位置制御が可能である(最大パルス入力100kpps, 出力50kpps)。

7. むすび

搬送・昇降・工作機械・巻取り・印刷機など一般用途対応の高機能汎用インバータとしてFREQROL-A700シリーズを開発した。今後も, インバータに対し, 駆動性能, 耐環境性, 使いやすさの更なる向上が望まれており, 一層の技術開発に取り組んでいく所存である。

参考文献

- (1) 佐竹 彰, ほか: 最新モータの制御技術, 三菱電機技報, 76, No.6, 421~425 (2002)
- (2) 白石康裕, ほか: 次世代省エネインバータ“FREQROL-F700シリーズ”, 三菱電機技報, 79, No.3, 189~192 (2005)

省エネルギードライブ “FREQROL-FP500J+IPMモータ”

谷本政則* 仲 興起**
林 謙次*
小島直樹*

The IPM Motor and Driver for Energy Saving “FREQROL-FP500J and IPM Motor”

Masanori Tanimoto, Kenji Hayashi, Naoki Kojima, Kouki Naka

要 旨

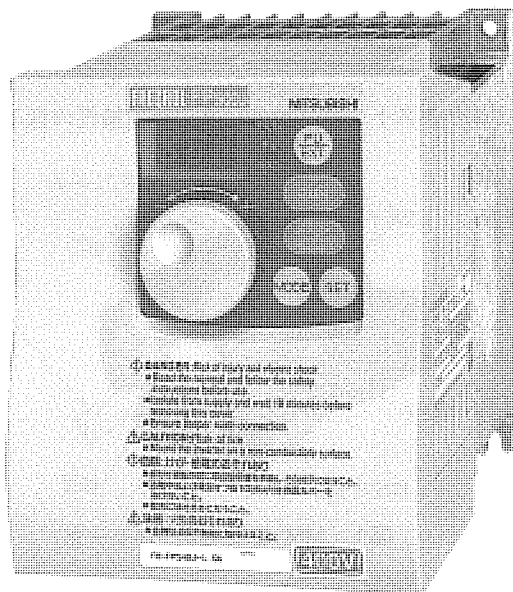
ファン・ポンプ用インバータ“FREQROL-F500J/F700シリーズ”に対し、更に省エネルギー効果を追求するため、“FREQROL-FP500Jシリーズ”を開発し製品化した。

今回開発したFREQROL-FP500Jシリーズでは、組合せモータとして、省エネルギー効果を向上させるために、モータの損失を低減することができる永久磁石を内蔵したMM-EF形専用IPM(Interior Permanent Magnet)モータも併せて開発した。

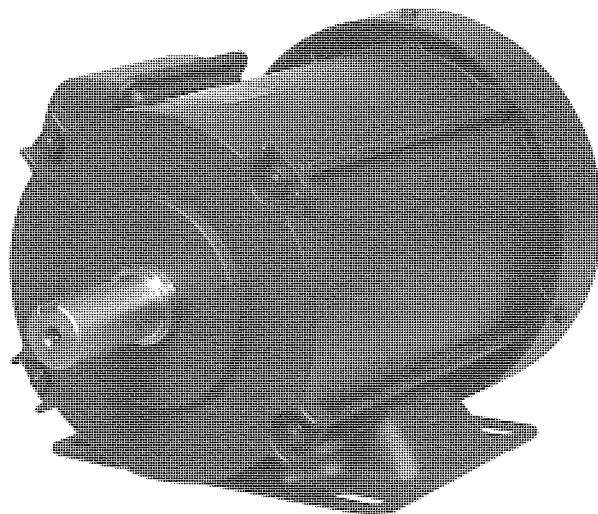
磁石式のモータを駆動するには一般的には磁極位置センサが必要となるが、ドライブユニットは、低価格、高品質を図るため、磁極位置センサなしでIPMモータを駆動させることができるように、センサレスベクトル制御の技術を取り入れている。

ファン・ポンプ用途では、瞬間的な停電でドライブユニットが出力停止したとしても電源が復電した後はモータを止めることなく再始動させる瞬停再始動機能や、慣性が高いファンを回生過電圧アラームを発生させることなく減速停止させる回生回避機能が要求される。従来のIPMドライブ装置ではこれらの機能に対応していなかったが、今回のドライブユニットではこの瞬停再始動機能や回生回避機能も取り入れている。

また、FREQROL-FP500Jシリーズは、これらのIPMドライブの特長な技術のほか、ファン・ポンプ用インバータFREQROL-F500Jをベースにしているため、従来のインバータの特長である小型簡単操作という点も踏襲している。



FREQROL-FP500J



MM-EF形専用IPMモータ

FREQROL-FP500JとIPMモータの外観

FREQROL-FP500Jシリーズは、電源電圧200V、400V系に対応し、容量は200V、400Vクラス共に0.4~15kWをラインアップしており、省エネルギーの要求が強いファン・ポンプ用途に最適である。

1. ま え が き

近年、地球温暖化、環境保全やコスト削減の観点から省エネルギーに対する関心が高まり、空調設備、衛生設備において大きな省エネルギー効果が得られるインバータの需要が拡大している。

このような市場のニーズに対応するためファン・ポンプ用インバータFREQROL-F700シリーズを市場に投入しているが、更なる省エネルギーを実現させるために、磁石式モータであるMM-EF形専用IPMモータとそのドライブユニットFREQROL-FP500Jシリーズを開発した。

本稿では、このドライブユニットFREQROL-FP500JシリーズとMM-EF形専用IPMモータの特長について述べる。

2. 製 品 概 要

FREQROL-FP500Jシリーズの仕様概要を表1に示す。電源電圧は200V、400Vに対応しており、200V、400V共に0.4~15kWまでの9容量に対応している。

FREQROL-FP500Jシリーズは、磁極位置センサがないIPMモータを駆動するためのセンサレスベクトル制御を始めとし、ファン・ポンプ用途に適した機能が装備されている。また、従来のファン・ポンプ用インバータをベースにしているため、以下の主な特長を持っている。

- (1) 更なる省エネルギーの実現
- (2) ファン・ポンプ用機能
- (3) 省スペースと環境への配慮
- (4) 簡単操作

3. 更なる省エネルギーの実現

3.1 MM-EF形専用IPMモータ

一般的にファン・ポンプ用途には、堅牢(けんろう)で安

表1. FREQROL-FP500Jシリーズの仕様概要

No	項目	FREQROL-FP500J仕様
1	電圧・容量	0.4~15kW/200V 0.4~15kW/400V
2	組合せモータ	MM-EF形専用IPMモータ
3	定格回転速度	1,800r/min
4	最大回転速度	2,700r/min
5	制御方式	高キャリア周波数PWM制御 センサレスベクトル制御 IPMモータ最適励磁制御
6	主な機能	ファン・ポンプ用途
		操作性・メンテナンス性
7	通信	標準装備 RS-485
8	保護構造	IP20(3.7K以下), IP00(5.5K以上)
	冷却ファン	カセット式交換(全容量)
	DCL	全容量接続可

PWM: Pluse Width Modulation
DCL: 直流リアクトル

価な誘導モータが用いられている。

誘導モータを使用している場合でも、インバータを用いて可変速運転することでダンパ制御と比べると大幅な省エネルギー効果を得ることができるが、誘導モータは回転子に磁石を持たないため、モータを運転するには、回転子に磁束を作るための励磁電流を必ず流す必要がある。これに対し、磁石を回転子に埋め込んだIPMモータ(図1)は、この励磁電流を流す必要がなく、回転子の損失がないため、誘導電動機に対し、モータの高効率化が実現できる。

今回開発したMM-EF形専用IPMモータでは、

- (1) 電磁界解析を利用した磁気回路の最適化
- (2) 高性能磁石の採用

を実施し、大幅な高効率を実現した。三菱電機製誘導モータ(4P)とMM-EF形専用IPMモータをドライブユニット(インバータ)駆動したときの総合効率比較を図2に示す。専用IPMモータは、ドライブユニットFREQROL-FP500Jとの組合せにより、当社誘導モータと比較し、全機種、約5%以上の高効率を実現している。

また、3.7kWについて、二乗低減負荷時の当社製誘導モータ(4P)とMM-EF形専用IPMモータの総合効率比較を図3に示す。空調機用途で主に使用される負荷(1,273r/min 50%負荷)で約8%の高効率を実現しており、実運転では更なる省エネルギー効果が期待できる。

3.2 IPMモータのセンサレスベクトル制御

- (1) センサレスベクトル制御

一般的に、磁石式モータのベクトル制御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

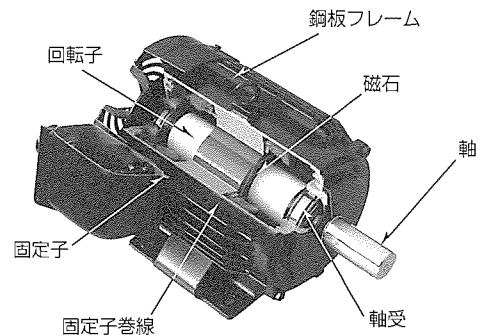


図1. MM-EF形専用IPMモータ

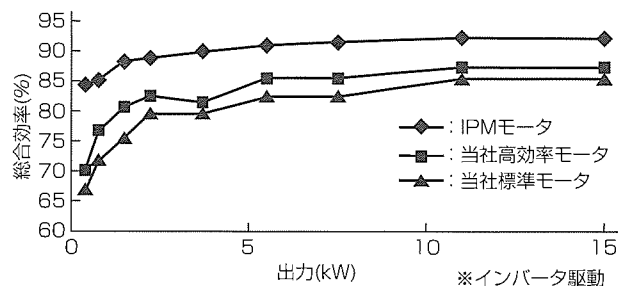


図2. 定格運転時の効率比較

る。そのため、今回のFREQEOL-FP500Jシリーズでは、センサを用いずに制御を行うセンサレスベクトル制御を導入している。

図4にIPMモータのセンサレスベクトル制御の構成を示す。

通常ベクトル制御ではモータの回転速度を検出してモータの電流を制御するが、速度検出器の代わりに適応磁束オブザーバをドライブユニット内部に構成し、モータの回転速度を推定している。この推定した回転速度を基にベクトル制御を行っている。

ベクトル制御では、モータに流れる電流を励磁成分の I_d とトルク成分の I_q に分解して電流制御を行うが、適応磁束オブザーバにも励磁電流 I_d とトルク電流 I_q をフィードバックする。また、磁束オブザーバにはドライブユニットの出力電圧 V_d 、 V_q もフィードバックし、これらの状態量 (I_d 、 I_q 、 V_d 、 V_q) からIPMモータ内部の磁束量と回転子の回転速度を推定している。

(2) IPMモータ最適励磁制御

FREQEOL-FP500Jシリーズでは、IPMモータを最大効率点で運転し、省エネルギー効果を高めるために、IPMモータ最適励磁制御を導入している。

通常、磁石式の同期電動機のベクトル制御ではモータの励磁が必要ないため励磁電流 I_d が流れないように制御するが、IPMモータのセンサレスベクトル制御では、モータに

最適な励磁電流を流すことで、効率を最大限に制御している。

この結果、FREQEOL-FP500JとMM-EF形専用IPMモータの組合せで最大効率で運転でき、省エネルギー効果を向上させている。

4. ファン・ポンプ用機能

4.1 瞬停再始動機能

ビルや工場の空調では、空調設備を停止させるとき以外には、ノンストップでモータを運転させる必要がある。このため、空調設備に用いられるインバータには停電が発生しても電源が復帰した後モータを止めることなく連続的に運転させる機能が要求される。この機能を瞬停再始動機能と呼んでいる。

IPMモータを運転するに当たっては、モータの回転子の磁極位置を正確に把握する必要があるため、センサレスのIPMドライブユニットでは、モータを起動するときにモータの磁極位置検出を行っている。従来のIPMドライブユニットではモータがフリーランしている状態での磁極位置検出に課題があり、瞬停再始動機能が困難であった。これに対し、FREQEOL-FP500Jシリーズでは、ファン・ポンプ用途に適應するため、図5に示すフリーラン速度を検出するfサーチ機能とフリーラン中の磁極位置検出機能を新たに開発し、瞬停再始動機能を実現した。

IPMモータがフリーラン状態から起動する場合、図のデータのように、瞬時的に電力が給電されるようにインバータ回路を制御し、そのときのモータ電力からモータのフリーラン状態を検出することができる。FREQEOL-FP500Jでは、この原理を応用したfサーチ機能によって、瞬停再始動機能を実現している。

4.2 回生回避機能

空調用途では、イナーシャが大きいファンを減速させる場合や、他のファンからの風圧を受けモータが連れ回され

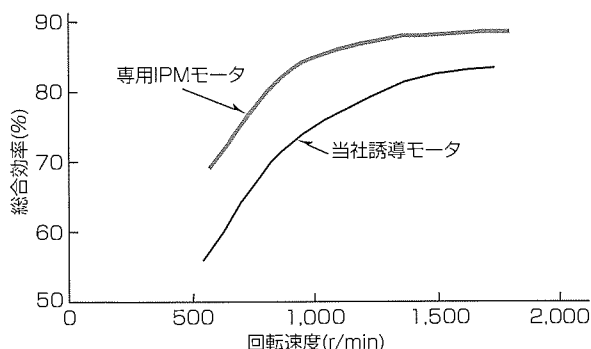


図3. 二乗減負荷時の効率比較(3.7kW)

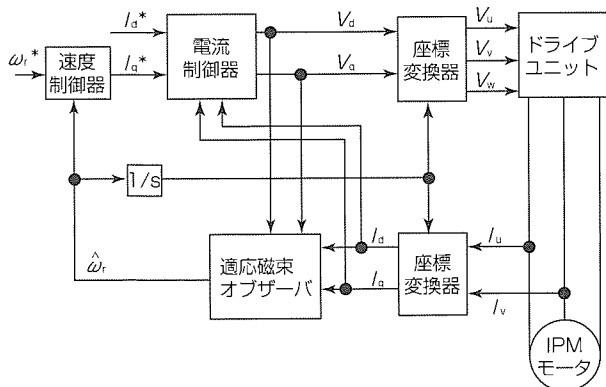


図4. IPMモータのセンサレスベクトル制御の構成

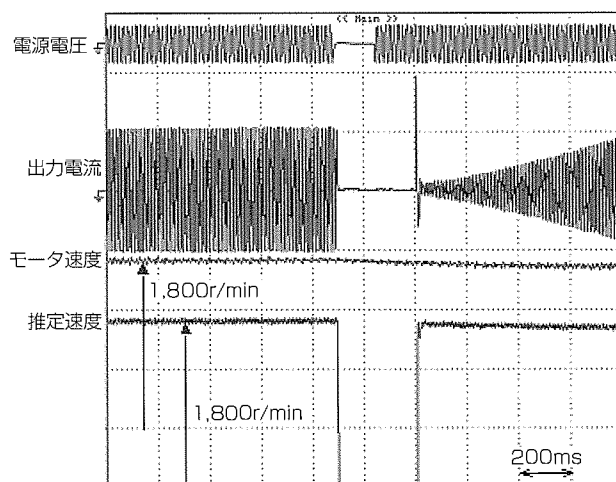


図5. FREQEOL-FP500Jの瞬停再始動機能

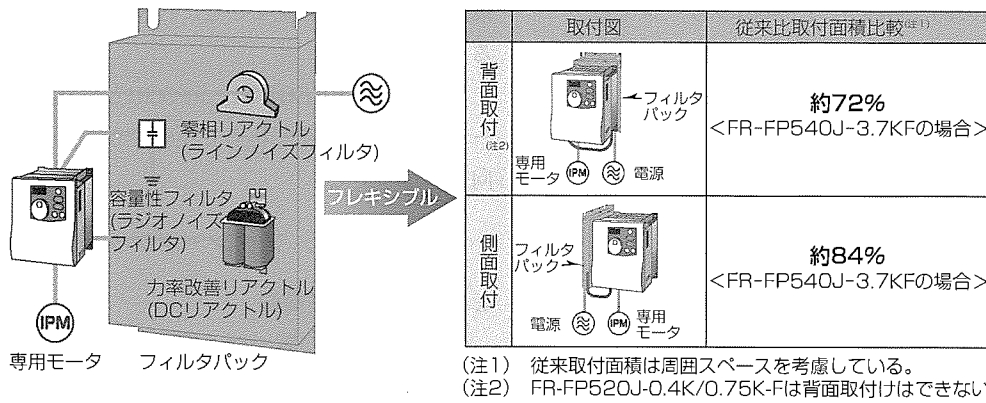


図6. FREQROL-FP500J用フィルタパック

る場合などモータが回生状態となる場合がある。

このようなモータが回生になる場合でも、ドライブユニットが回生過電圧異常とならないように出力周波数を自動的に増減させる回生回避機能もFREQROL-FP500Jシリーズは対応している。

5. 省スペースと環境への配慮

5.1 フィルタパック

FREQROL-FP500Jシリーズは、汎用インバータと同様に商用電源をいったん直流に整流し、その整流された直流電圧を高速にスイッチングするために、場合によっては高調波やノイズの発生源となる可能性がある。

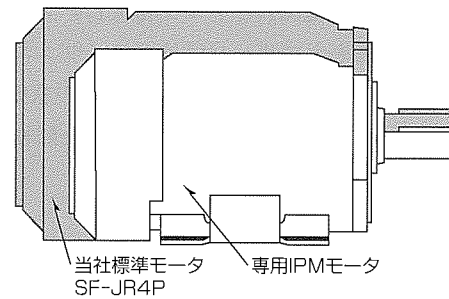
ビルや工場の空調設備にインバータを適用するに当たっては、これらインバータが発生する高調波やノイズについて周辺環境に対し配慮する必要がある。従来は、高調波の対策として力率改善リアクトル、ノイズの対策として零相リアクトルと容量性フィルタ(ラジオノイズフィルタ)など個別に対応し、それぞれのパーツを個別に配線する必要があった。これに対し、据付スペースと配線工数を低減することができるように、図6に示すような力率改善リアクトルとノイズフィルタを一体化したフィルタパックも準備した。

このフィルタパックを用いることによって下記のガイドラインや仕様書に適応可能となる。

- 「特定需要家高調波抑制対策ガイドライン」
- 国土交通省監修の電気設備工事共通仕様書及び機械設備工事共通仕様書(平成16年度)

5.2 MM-EF形専用IPMモータ

専用のIPMモータは、損失の減少により熱容量を小さくすることができるため、モータの小型・軽量化が可能となった。一例として、7.5kWの外形比較を図7に示す。専用



全長:約79% 体積:約58% 質量:約63%

図7. 当社誘導電動機と専用IPMモータとの比較(7.5kWモータの場合)

IPMモータ7.5kWは、当社誘導モータ7.5kW(4P)に比べ、全長約79%、体積約58%の小型化を実現した。また、質量は、約63%へ軽量化を実現した。

6. むすび

新形IPMモータと省エネルギードライブユニットとしてFREQROL-FP500JシリーズとMM-EF形専用IPMモータを開発した。IPMモータとドライブユニットについてはまだ市場での普及率は低いものの、省エネルギー、小型の観点から今後の市場拡大が期待できる製品である。このため、これらの市場拡大のため、一層の技術開発に取り組んでいく所存である。

参考文献

- (1) 佐竹 彰, ほか: 最新のモータ制御技術, 三菱電機技報, 76, No.6, 421~425 (2002)
- (2) 白石康裕, ほか: 次世代省エネインバータ“FRE-QROL-F700シリーズ”, 三菱電機技報, 79, No.3, 189~192 (2005)

M700対応駆動システム“MDS-D/DHシリーズ”

筒井和彦*
佐野修也*
田中利貴*

Driving System “MDS-D/DH Series” for M700

Kazuhiko Tsutsui, Syuuya Sano, Toshiki Tanaka

要 旨

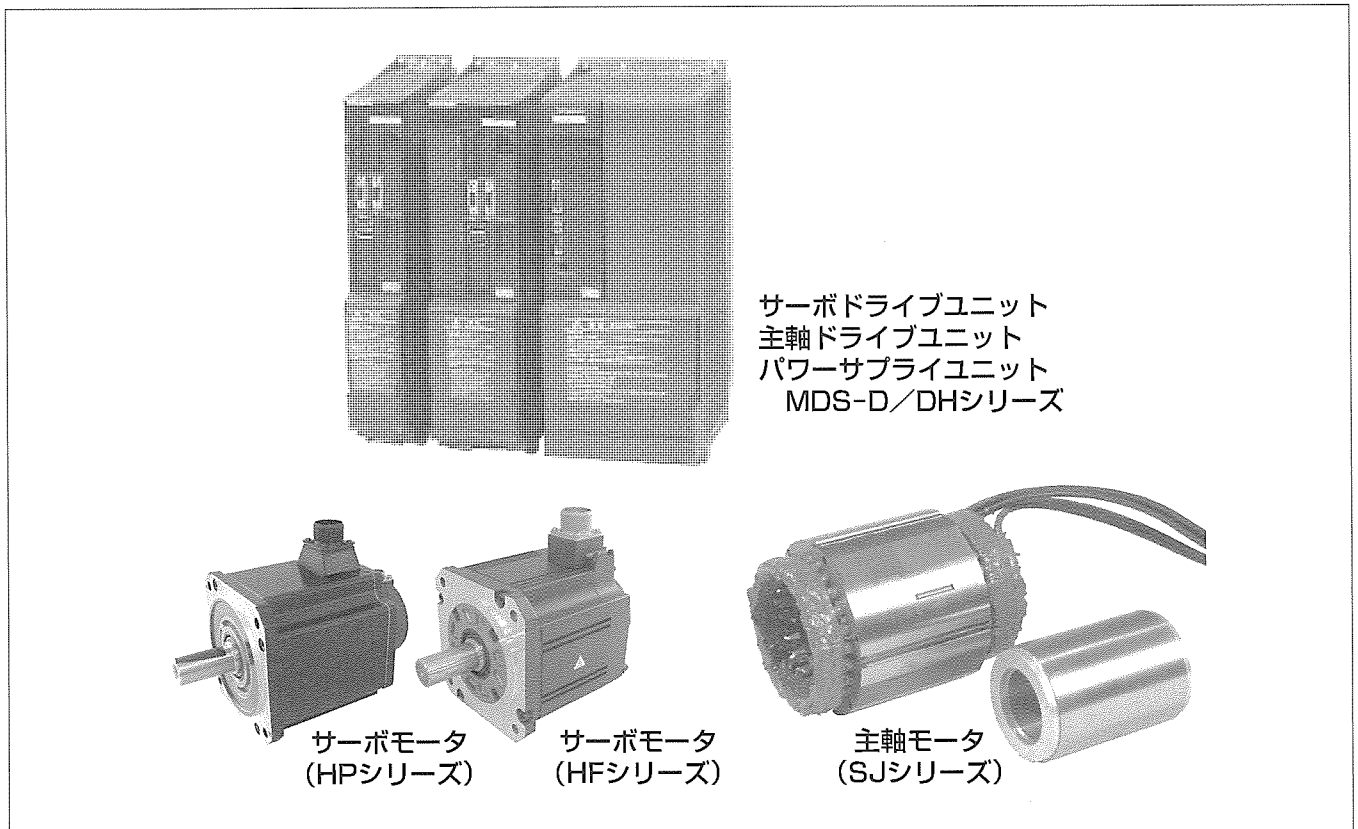
工作機械業界において、送り軸の高速・高精度化はもちろんのこと、工作機械の性能を大きく左右する主軸の性能・機能に対する要求はますます厳しくなっており、NC(Numerical Control)システムの中でも駆動部の担う役割はより重要なものとなっている。

このような要求にこたえるために、“M700シリーズ” CNC (Computerized NC)対応駆動システムとしてMDS-D/DHシリーズを開発し、製品化した。MDS-D/DHシリーズは、高精度モータ(HF/HPシリーズサーボモータ)や高精度検出器にも新規に対応し、駆動システムとしてトータル性能の向上を図るとともに、機械の性能を最大限に引き出す機能も充実させ、工作機械、及びエンドユーザーにおける生産性の向上に大きく貢献する。

シリーズラインアップは次のとおりである。

- (1) 200V系ラインアップ：MDS-Dシリーズ
 - 一軸サーボ：0.1～15kW
 - 二軸サーボ：0.1+0.1kW～7.0+7.0kW
 - 主軸：0.4～55kW
 - パワーサプライ：3.7～55kW
- (2) 400V系ラインアップ：MDS-DHシリーズ
 - 一軸サーボ：0.1～18.5kW
 - 二軸サーボ：0.1+0.1kW～7.0+7.0kW
 - 主軸：0.4～75kW
 - パワーサプライ：3.7～75kW

本稿では、機械の高生産性をサポートする技術として、このシリーズで強化された新技術について述べる。



M700対応駆動システムサーボ・主軸ドライブユニット(MDS-D/DHシリーズ)とサーボモータ(HF/HPシリーズ)と主軸モータ(SJシリーズ)

M700シリーズCNC対応駆動システムとしてMDS-D/DHシリーズを開発し、製品化した。上記写真は、工作機械の一般的な構成となる駆動アンブ(パワーサプライ、主軸アンブ、サーボアンブ)MDS-D/DHシリーズ、サーボモータ“HPシリーズ”“HFシリーズ”、主軸モータ“SJシリーズ”の外観を示す。

1. ま え が き

工作機械業界における市場の変化は激しく、そのニーズは高速化、超精密化、高能率化、微細化、省エネルギー、そして環境対応など多岐にわたってより厳しくなっている。特に日本や欧州の製造業にとって生産効率向上、リードタイム短縮、生産コスト削減を進めることは、中国を始めとするアジアの製造業に対抗する上でも至上命題であり、生産のリードタイムの飛躍的な短縮を実現する高速・高精度化に対する取り組みについては各機械メーカーが最も注力している。また、一方では、中国・台湾・韓国などの追従国との差別化を実現するための高付加価値化も更に重要になってきている。

このような市場要求にこたえるため、三菱電機では、M700シリーズCNCを開発し、また、その対応駆動システムとしては高速光サーボネットワークや業界最高レベルの高応答電流制御を搭載したMDS-D/DHシリーズを開発した。

本稿では、今回開発したMDS-D/DHシリーズの特長、及び適用技術について述べる。

2. MDS-D/DHシリーズの製品概要

2.1 M700シリーズ駆動システム

図1にM700シリーズCNC対応駆動システムの基本構成を示しており、サーボ・主軸ドライブユニットとしては、200V系のMDS-Dシリーズ、400V系のMDS-DHシリーズをラインアップした。なお、NC-サーボ間のネットワークとしては高速光ネットワークを採用し、ナノ単位の位置情報の高速送受信やドライブユニット間での高速通信を可能としている。

2.2 MDS-D/DHシリーズの製品コンセプト

工作機械を用いたエンドユーザーにおける生産性向上を支援する目的で、図2に示すように、MDS-D/DHシリーズでは、Iの高速・高精度化技術はもちろんのこと、工場内での機械の停止をなくすためのIIの高信頼性化技術、及び機械の性能をできるだけ引き出し、機械が高いパフォーマンスを発揮することを支援するためのIIIの機械性能向上の支援技術、のそれぞれの要素に対して新機能や新技術

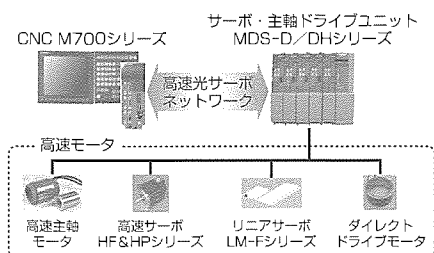


図1. M700シリーズ駆動システム構成

を採用した。

3. 高速・高精度化技術

3.1 高速・高トルク化

M700シリーズ駆動システムでは、モータの磁気・電気特性を大幅に改善した高速サーボモータ(HF/HPシリーズ)とサーボモータの特性を最大限に引き出す制御方式を搭載したサーボドライブユニット(MDS-D/DHシリーズ)との組合せでモータの高速・高トルク化を可能とし、機械の高生産性を大きく支援している。図3にこのシステムでのトルク特性を示すが、従来と比較して高速運転時のトルクの落ち込みを低減し、高速域まで高トルクを維持するトルク特性が実現できていることが分かる。

3.2 基本性能の向上

機械の高速・高精度化を実現するための基本となるのが、制御ループの応答性の向上(ハイゲイン化)である。これを実現するための技術的な課題としては、制御ループ処理周期の高速化による無駄時間の短縮のためにPWM(Pulse Width Modulation)の周波数のアップが必要となる。しかしながら、PWM周波数を上げると、スイッチングロスによる発熱アップにつながり、ドライブユニットの小型化や省エネルギー化の制約となる。そこで今回、当社独自の電流制御技術を開発し、PWM周波数アップを最小限に抑えて、かつ、制御安定性の向上を実現する高応答電流制御を実装した。これにより、電流応答が従来比で2倍に向上した。

また、ほかにも、位置・速度フィードバックの高分解能

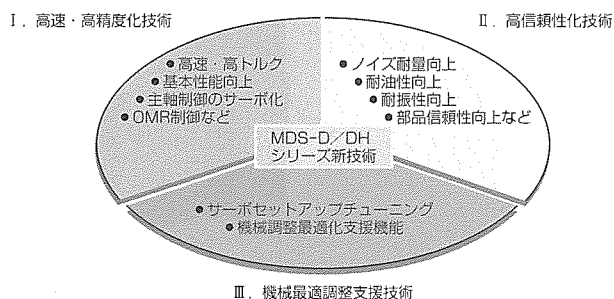


図2. 高生産性をサポートするMDS-D/DHシリーズの新技術

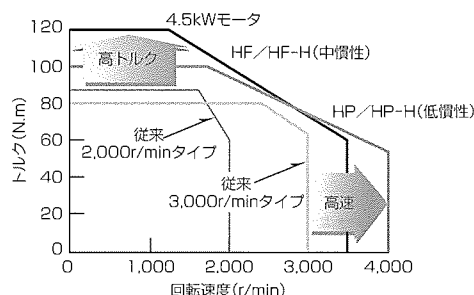


図3. トルク特性

化(サーボ：1,600万p/rev(オプション)，主軸：400万p/rev(検出器歯数：128歯の場合))を実施し，さらに，コギングトルクを従来比1/3に抑えた高速・高精度サーボモータ(HF/HPシリーズ)と合わせ駆動システムのトータル性能向上を実現している。

図4にはサーボ二軸制御による円弧運転時の真円度を示しており，MDS-D/DHシリーズ及びHFサーボモータにより従来比5倍の真円度向上を実現している。

また，図5は1,2000r/minで一定速回転中の主軸モータの発熱を示しており，主軸における基本性能向上(高応答電流制御)の効果で電流に乗る高調波成分を大幅に削減し，鉄損が原因で発生するモータ発熱を低減していることが分かる。

3.3 主軸サーボ化技術

工作機械の高付加価値化に伴い主軸に求められる機能は年々複雑化してきている。従来，主軸では，単純に高速回転する場合と，C軸や同期タップなどサーボとの補間制御を必要とする場合とで，制御ループを速度制御ループから位置制御ループへと加工プログラムの指定があるたびに切換えを実施していた。この結果，機能が切り換わるたびに原点復帰などの動作を必要とし，加工時間の短縮を図る上で大きなネックとなっていた。ここで，従来，常時位置ループを構築できない理由としては，主軸はサーボのように低トルク領域だけで使用するのではなく，低出力領域やトルク飽和領域を使用しての運転を必要とされることから，常時位置指令で運転するとトルク飽和の影響でオーバーシ

ュートや振動を誘発する場合があった。

そこで，MDS-D/DHシリーズ主軸では，図6に示す追従遅れ補償制御を設けることで，従来，位置ループ制御を組む上で課題であった加減速時トルク飽和による影響(オーバーシュートや振動など)を抑制しながら，かつ，主軸端での一回転内位置のNCからの指令追従性を確保した。これにより，常時位置ループを組むことが可能となり，従来必要であった主軸→C軸切換えや，ギア切換え後の原点復帰動作を削減し，加工時間の短縮に大きく貢献する。

また，C軸制御での移動方向反転時のロストモーション補正などサーボで培った軌跡制御技術も展開した。

3.4 OMR (Optimum Machine Response) 制御

機械の最適応答性を実現する機能として，以下のOMR制御機能を開発した。

(1) OMR-FF (Feed Forward) 制御

高速・高加速度の条件下でも指令軌跡に誤差なく追従するための制御としてフィードフォワード制御がある。これまでの制御では，機械振動を誘発しやすくフィードフォワードゲインを十分に上げることが困難なケースが多かった。そこで今回，機械の振動特性を補償する機械特性補償部を付加し，機械端の振動を抑制して指令位置に追従させるOMR-FF制御を開発した。

(2) OMR-DDC (Direct Detect Compensation) 機能

M700シリーズでは，高速光ネットワークを採用し，通信速度を従来比で10倍，通信周期としては8倍向上させた。この通信周期の向上に伴い，ドライブユニット間で情報を共有し，そのデータを実際のフィードバック制御へ展開するOMR-DDC機能の実現を可能とした。

図7は，前述の主軸サーボ化技術で同期タップ時のサーボ・主軸間のドライブユニット間補正(OMR-DDC機能)の適用例である。これにより，主軸トルク飽和による同期誤差の拡大を抑制でき，時定数の短縮を可能としている。

4. 高信頼性化技術

高信頼性化技術として，信頼性向上策/寿命診断について述べる。

工作機械では，システム故障による生産ライン停止は生産コストに大きな影響を与える。MDS-D/DHシリーズでは，システム停止/停止の要因である耐ノイズ，耐油性，

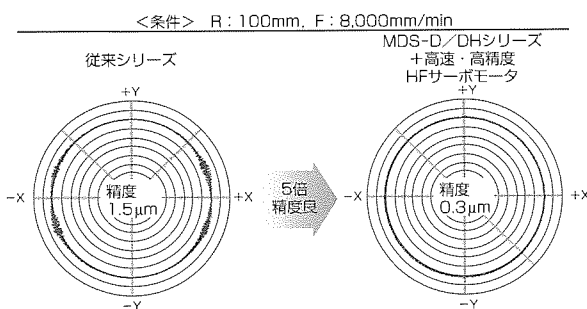


図4. サーボ基本性能向上の効果(真円精度比較)

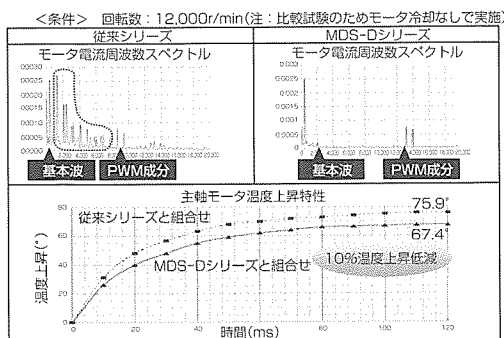


図5. 主軸基本性能向上の効果(モータ温度上昇比較)

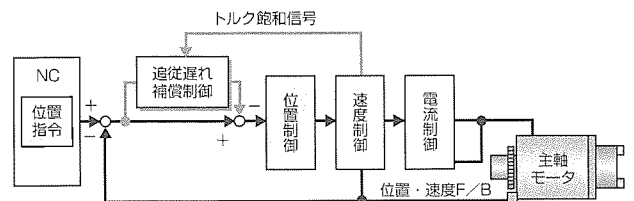


図6. MDS-D/DHシリーズの主軸制御概要

<条件> M6ピッチ1mmねじ、主軸3,000r/min

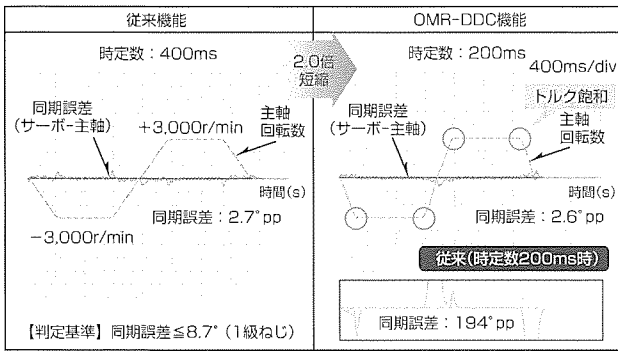


図7. OMR-DDC機能による同期タップ時間の短縮

耐振性、部品不良に対し、表1の(1)に示すような対策を施し、信頼性を向上させることにより、生産性に寄与している。

また、ユニット内の、冷却ファン、コンデンサ、リレーといった寿命部品についても、表の(2)に示すように、部品寿命を事前に検出し警告することで不測のシステム停止を予防し、メンテナンス性向上を大きく支援している。

5. 機械最適調整支援技術

5.1 サーボセットアップチューニング

機械の持つ性能を最大限に引き出す最適駆動システムを構築するためには、機械特性に応じたパラメータの最適設定が重要となる。MDS-D/DHシリーズ対応サーボセットアップチューニングシステムでは、熟練技術者と同等以上のパラメータ設定を実現するために、より正確な機械特性計測技術とその計測データに基づくパラメータ調整アルゴリズム技術を充実させた。

このシステムでは、測定周波数ポイントに応じて機械の加振信号とサーボAMP内動作信号(位置/速度/電流信号等)のサンプリングを最適周波数レートで行うマルチレートサンプリング方式を採用した。その結果、低域から高域までの機械特性を短時間で正確に計測することを可能とした。

また、安定性確保の観点から、低周波域での機械共振フィルタ設定を機械特性(速度制御の応答帯域、位相余裕、ゲイン余裕)により決定するアルゴリズムを開発した。これによって速度制御の応答帯域を安定に高め、より最適な調整パラメータを設定することが可能となった(図8)。これにより、全世界の多種多様な機械について、容易に最適調整することが可能となった。

5.2 機械調整最適化支援機能

機械共振の特性(減衰率など)や機械のイナーシャは経年変化や加工状況に応じて時々刻々と変化するため、MDS-D/DHシリーズでは、特別なツールを必要としないリア

表1. 信頼性向上

(1) 信頼性向上

項目	内容	信頼性
ノイズ耐量向上	光ケーブル採用	ノイズ影響なし
	PLG検出器シリアル化	ノイズ耐量アップ
耐油性向上	モータ密閉度強化	IP65標準→IP67標準
耐振性向上	ユニット構造強化	耐振性1.3倍アップ
部品信頼性向上	低損失パワーモジュール採用、フィン高性能化で温度低減	温度マージンアップによるパワーモジュール信頼性向上

PLG: Pulse Logic Generator

(2) メンテナンス性向上

	診断部品	内容
1	冷却ファン	冷却ファンの停止時に警告
2	主回路コンデンサ	主回路コンデンサの容量低下時に警告
3	外部コンタクタ駆動用リレー(AMP内蔵リレー)	外部コンタクタ駆動用リレーの開閉回数が寿命に近づいた場合に警告

サーボセットアップチューニングによる調整結果 (参考)熟練者による調整結果

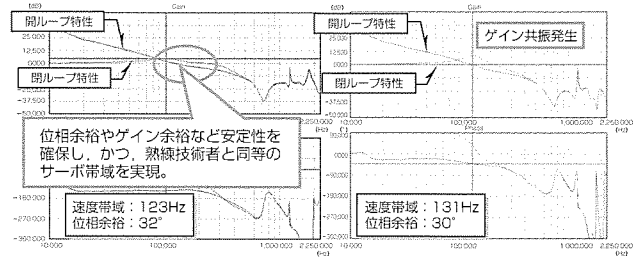


図8. サーボ調整結果(速度ループ周波数応答)

ルタイムでの機械調整最適化支援機能を強化した。

(1) 自動追尾型機械共振フィルタ

機械共振周波数を常時検出し、最大4つの機械共振フィルタ周波数を自動追尾させることによって機械共振を常に抑制する。

(2) イナーシャ推定

イナーシャをリアルタイムに推定し、上位NCコントローラに情報を伝達することで、イナーシャ変動時にはワンタッチで調整パラメータを変更するなど、最適な制御ゲイン設定を可能とする。

6. むすび

CNC M700対応駆動システムMDS-D/DHシリーズは、数々の新制御技術により工作機械の高生産性に大きく貢献する。今後も、高性能化・高付加価値化、さらには省エネルギー化や耐環境性の向上、信頼性向上といった多様化する市場の要求にこたえるため、製品開発に努めていく所存である。

参考文献

- (1) 長岡弘太郎, ほか: CNC工作機械用高応答サーボ制御方式の研究, 精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, 705~706 (2005)

新型リニアサーボモータ “LM-H2シリーズ”

加藤和彦* 望月 大*
仲 興起**
伊藤一将**

New Linear Servo Motor “LM-H2 Series”

Kazuhiko Kato, Kouki Naka, Kazumasa Ito, Dai Mochizuki

要 旨

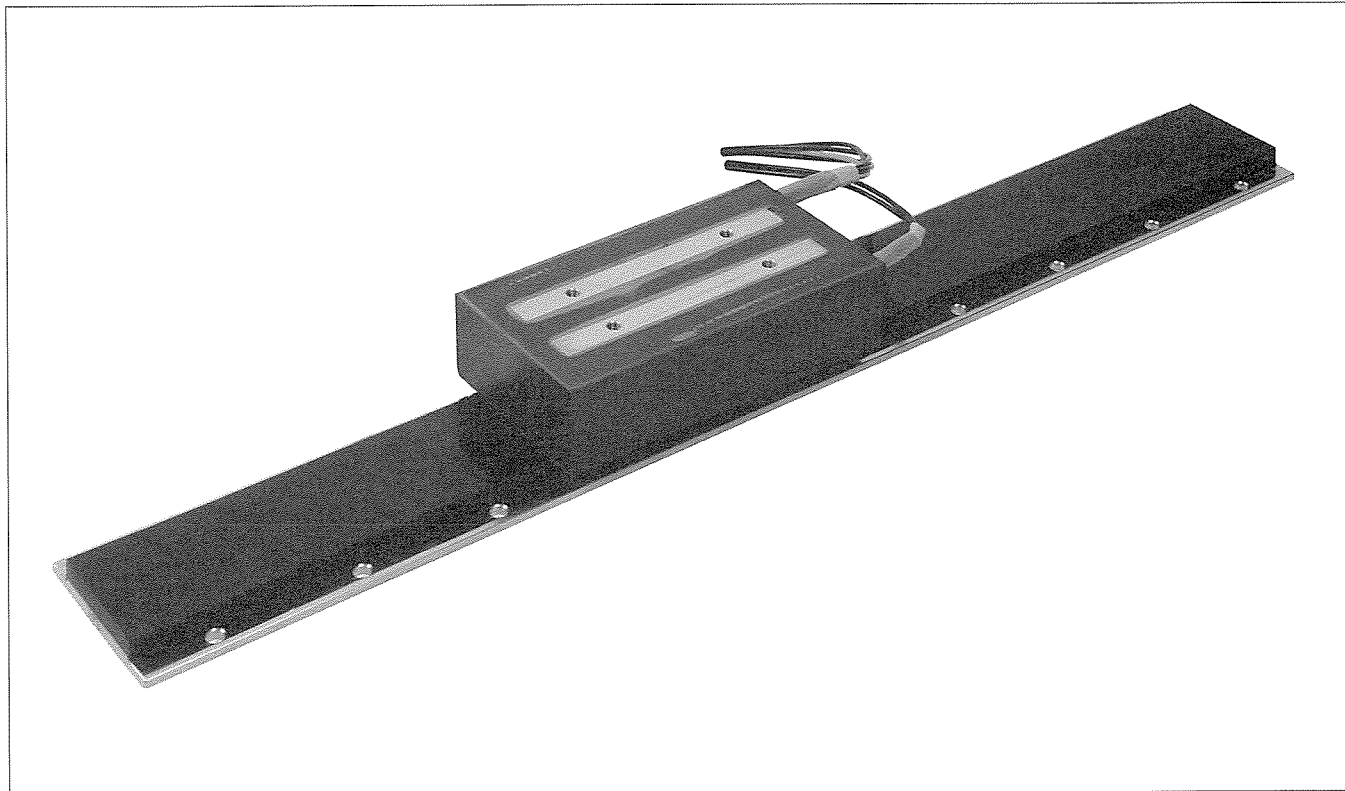
半導体・液晶関連装置や実装機などの分野を中心に、高精度化・高速化・高能率化などの要求が高まっている。この要求にこたえるために、ボールねじ駆動システムに比べ高速度・高加速度特性を得ることができ、かつバックラッシュや摩擦による応答誤差が生じない高精度なシステムを構築できるリニアサーボモータを採用する事例が増えている。

リニアサーボモータ駆動システムでは、ビルトイン構造となることから、上記の特長を持つ反面、モータ設置面積が装置寸法に与える影響が大きく、モータの発熱が装置の精度劣化の要因となり得る。そのため、リニアサーボモータの小型化・低発熱化の要求は、装置の高性能化とともにますます高まっている。また、装置の要求仕様に応じて多

種多様な推力、モータサイズのバリエーションが求められる。

三菱電機では、これまでも工作機械用途及び一般産業用途向けにリニアサーボモータを製品化し、市場投入を行ってきたが、今回更なる小型・高性能化の要求にこたえ、多様な顧客仕様に対応するため、新型リニアサーボモータ“LM-H2シリーズ”を開発した。

LM-H2シリーズでは、ビルディングブロック方式(串(くし)カツ方式)を採用することにより、多品種変量生産にも柔軟に対応可能とすると同時に、集中巻構造の適用と電磁界解析技術により、従来機と比べ大幅な小型・低発熱化の両立を達成した。



新型リニアサーボモータLM-H2シリーズ

新型リニアサーボモータLM-H2シリーズを開発した。定格推力60～960N、最大推力は2,400Nまでを標準ラインアップしており、多様なユーザーニーズに対応可能である。また、高密度巻線技術及び分割コア連結構造による生産技術を採用することにより、小型・軽量・低発熱化を実現した。

1. まえがき

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・高効率化などの要求が高まっている⁽¹⁾。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度・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リニアサーボモータを開発した。

当社では、これまでもリニアサーボモータ“LMシリーズ”を展開し、市場投入を行ってきた。LMシリーズには、大推力リニアサーボモータ“LM-Nシリーズ”，汎用リニアサーボモータ“LM-Hシリーズ”，コアレスリニアサーボモータ“LM-Tシリーズ”及び“LM-Uシリーズ”があり、用途に応じて適切なリニアサーボモータを選択することが可能である。

本稿では、汎用リニアサーボモータLM-H2シリーズの開発に採用した小型・高性能化技術及び幅広いユーザーニーズに柔軟に対応するためのモータ製造技術、並びに実機搭載時の効果例について述べる。

2. リニアサーボモータの特長

リニアサーボモータは、図1に示すように、積層鉄心(コア)に設けられたスロットに巻線を施した一次側と、磁性材の取付座に永久磁石を設置した二次側とで構成される。

一次側巻線に電流を印加することによって一次側と二次側との間に直線状の力が発生し、モータからダイレクトに直動推力が得られる⁽²⁾。

ボールねじ駆動及びリニアサーボモータ駆動システムの構成の比較を図2に示す。

リニアサーボモータ駆動システムでは、従来のボールねじ駆動システムと異なり、可動対象物を直接駆動するダイレクトドライブの特長を持ち、高速・高加減速駆動が可能である⁽³⁾。また、ボールねじやカップリングなどに起因するバックラッシュや摩擦による応答誤差を生じない高精度な駆動システムが比較的容易に構築できる。

しかしながら、モータが装置内部に組み込まれるビルト

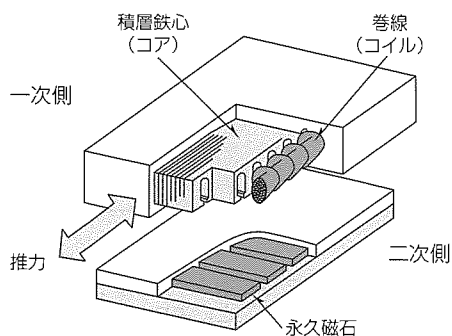


図1. リニアサーボモータの構造

イン構造となることから、モータ寸法(設置面積)が装置寸法に直接影響するため、モータ選定の際には装置の要求仕様に応じて多種多様な推力、モータサイズのバリエーションが求められる。また、モータが可動対象物の近傍に設置されるため、モータの発熱が装置の熱膨張による精度劣化をもたらす要因となり得る⁽⁴⁾。したがって、リニアサーボモータには小型・低発熱化が求められ、それらの要求は搭載される装置の高性能化とともにますます高まっている。

以上の観点から、リニアサーボモータへの要求性能は下記の3点にまとめられる。

- (1) 小型・軽量
- (2) 推力・サイズのバリエーション
- (3) 低発熱

3. 開発項目

3.1 ビルディングブロック方式(串カツ方式)

前章で述べた要求性能に対応するため、今回開発を行ったLM-H2シリーズでは、ビルディングブロック方式(串カツ方式)を採用した⁽⁵⁾。

ビルディングブロック方式とは、図3に示すように、基準コアを必要なコア幅となるように配列し巻線を施したテ

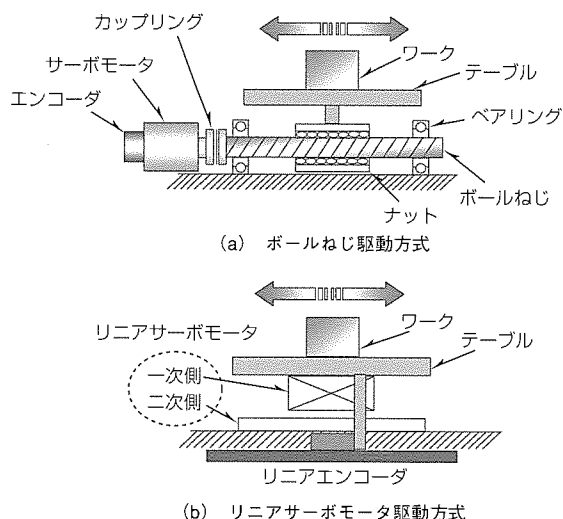


図2. ボールねじ駆動及びリニアサーボモータ駆動方式

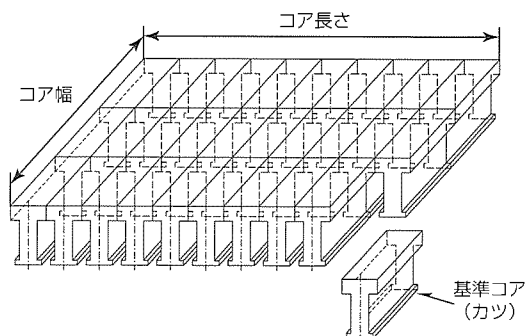


図3. ビルディングブロック方式(串カツ方式)

イスを、必要な長さに並べ、締結部材によって一体化することでモーター次側を形成する構造である。

この構造を採用することで、コア幅及び長さによらず同一の基準コアによって一次側を構成することができ、モータに必要な推力に対して一次側長さ寸法と幅寸法の異なる複数の機種選択が可能となり、幅広いユーザーニーズに柔軟に対応することができる。

3.2 巻線構造

上記分割コア連結構造の採用に伴い、その長を十分に生かせるよう巻線構造について検討を行った。

従来の汎用リニアサーボモータLM-Hシリーズでは、モーター次側の巻線構造に分布巻を採用している(図4(a))。分布巻構造では、コアスロットを渡る巻線のコイルエンド部を小さくすることが困難である。コイルエンド部はモータ推力発生に寄与せず、巻線抵抗による発熱(銅損)を生じるため、できるだけ小さくする必要がある。さらに、巻線占積率(スロット内に占める巻線断面積の割合)についても飛躍的な改善は困難であるため、大幅な発熱低減が困難である。

今回の開発では、分割コア連結構造に適した巻線構造として図4(b)に示す集中巻構造を採用し、上記課題を解決した。集中巻構造はコアブロックに巻線を直接巻き付ける構造であり、コイルエンド寸法を最小限とすることができる。また、スロット部に巻線を整列巻きすることによって占積率を飛躍的に向上させることが可能となり、従来機と比較してコイルエンド寸法を50%削減し、巻線占積率を70%向上でき、モーター次側の小型・低発熱化の両立を実現した。

図5は分布巻及び集中巻によるコイルエンド部の外観であり、集中巻構造では高密度に巻線されている。また、分布巻構造のようなコイルエンド部での異相コイルの重なりがなく、簡便な処理によって絶縁信頼性を確保することができる。

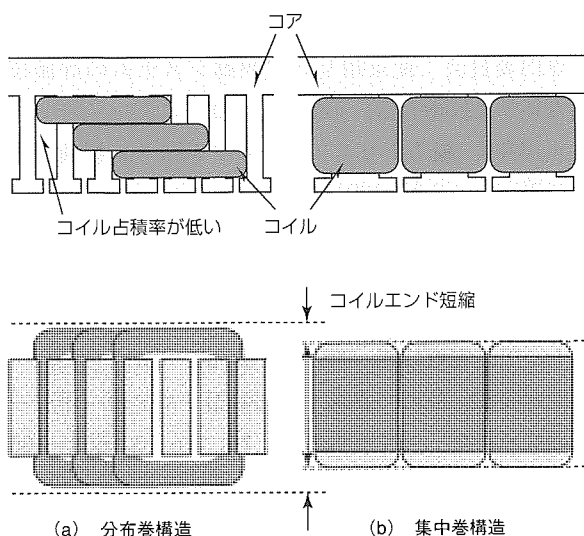


図4. 分布巻と集中巻の構造比較

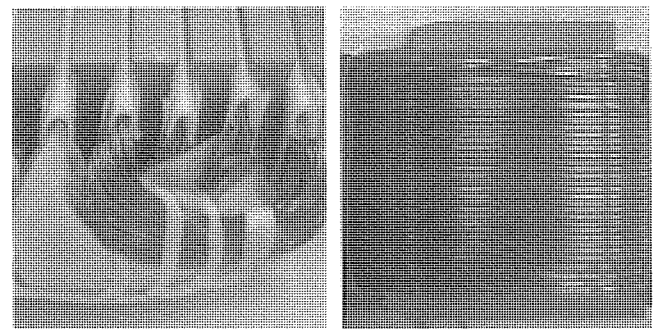
3.3 スキューレス化

高精度な送りを実現するためにはコギング推力の低減が必要となる。コギング推力とは、一次側鉄心が二次側マグネット上を移動する際に、相対的な位置によって磁気回路が不連続となるために生じる推力脈動であり、サーボシステムの外乱要素となるため、位置決め精度や送りの滑らかさを劣化させる。

コギング低減策としては、一般的には一次側鉄心又は二次側マグネットをスキューさせている。

図6にスキュー構造例を示す。図の(a)に示すように、鉄心を長さ方向にずらしながら積層する構造であり、スキュー量に応じて一次側長さ寸法が長くなる。二次側スキュー構造は、図の(b)に示すように、マグネットを斜めに配置している。スキュー角度は機種(コア幅)に応じて異なり、部品共用化のために長方形のマグネットを使用するにはモータ幅方向に余分なスペースを要する。また、通常リニアサーボモータでは必要なストロークに対して複数台の二次側を並べて使用するため、取付座(ヨーク)を平行四辺形状に加工する必要がある。

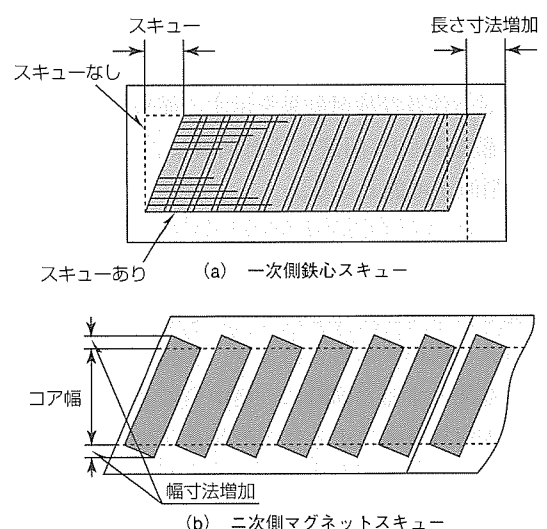
また、スキュー構造は、電流に対する推力特性を低下さ



(a) 分布巻構造

(b) 集中巻構造

図5. 分布巻と集中巻の外観



(b) 二次側マグネットスキュー

図6. スキュー構造

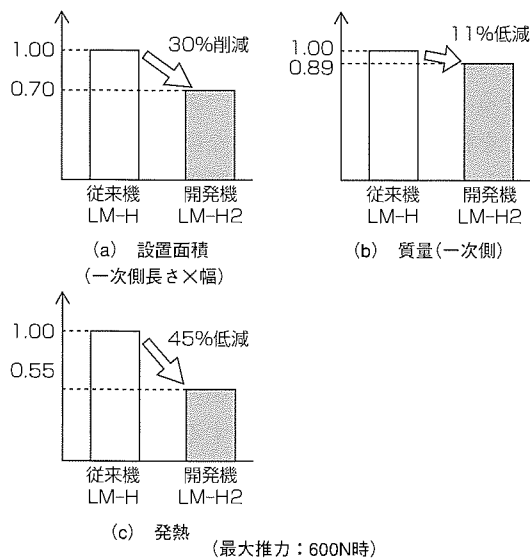


図7. 特性比較(従来機を1とした場合)

せる一要因となっている。これらの課題に対して、LM-H2シリーズでは、高精度な電磁界解析技術を用いて一次側コア形状及びマグネット形状を最適化し、一次側、二次側ともにスキューなしでコギング対策を行い、小型・低発熱を維持しつつ、コギング低減を図っている。

4. 新型リニアサーボモータLM-H2シリーズ

今回開発したLM-H2シリーズでは、リニアサーボモータの用途拡大をねらい、定格推力60~960N、最大推力では2,400Nまでを標準ラインアップとし、従来機種に対して大推力領域を大幅に拡充した機種構成としている。

図7に、最大推力600Nの機種における従来機LM-Hと開発機LM-H2との特性比較を示す。

LM-H2では、LM-Hと比較して大幅な性能向上を実現した。

モータの高性能化は、実機特性の高性能化にも大きく貢献する。そこで、実機組み込み時の送り特性の比較を行うため、図8のようなX-Yテーブルを想定し、性能を比較検討した。

表1に検討条件及び検討結果を示す。従来機と比較して装置設置面積を約20%削減すると同時に、消費電力では30%以上の削減が可能となる。

5. む す び

今回開発を行ったLM-H2シリーズでは、ビルディングブロック方式を採用することにより、多品種変量生産にも柔軟に対応可能とすると同時に、集中巻による高密度巻線技術と電磁界解析技術によるコア形状及びマグネット形状の最適化を行い、従来機と比較して大幅な小型・低発熱及び高効率化を実現した。

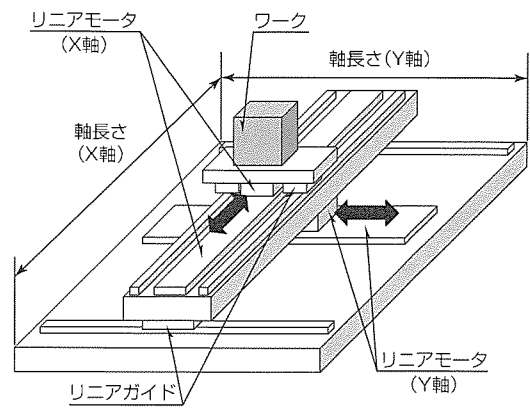


図8. X-Yテーブル検討モデル

表1. X-Yテーブル検討条件及び検討結果

項目	LM-H	LM-H2	備考
ワーク質量(kg)	10	←	
ストローク(mm)	X軸	500	←
	Y軸	500	←
速度(最大)(m/s)	X軸	2.0	←
	Y軸	2.0	←
加速度(m/s ²)	X軸	29.4(3 G)	29.4(3 G)
	Y軸	18.6(1.9 G)	23.5(2.4 G)
軸長さ(mm)	X軸	900	800
	Y軸	900	800
設置面積(X軸長さ×Y軸長さ)	1.0	0.79	LM-Hを1とした場合の比
消費電力	X軸	1.0	0.65
	Y軸	1.0	0.58

今後は、開発した技術の他機種への展開を行うとともに、更なる性能向上に尽力する所存である。

参考文献

- (1) 電気学会 産業用リニア駆動システムの評価技術調査専門委員会：産業用リニア駆動システムの評価技術、電気学会技術報告、第930号(2003)
- (2) 正田英介 編著：リニアドライブシステム技術とその応用、オーム社(1991)
- (3) 古関隆章, ほか：リニアモータ応用技術の展望、リニアドライブ研究会資料, LD-95-41(1995)
- (4) 加知光康, ほか：高応答・高精度リニアサーボシステム、三菱電機技報, 73, No. 9, 671~675(1999)
- (5) 木村康樹, ほか：高速・高応答型リニアサーボモータの生産設計、三菱電機技報, 78, No. 10, 663~666(2004)

リニア誘導形モータの技術動向

大掛忠雄*
林 紘志*

Technological Trend of Linear Induction Motor

Tadao Ogake, Kouji Hayashi

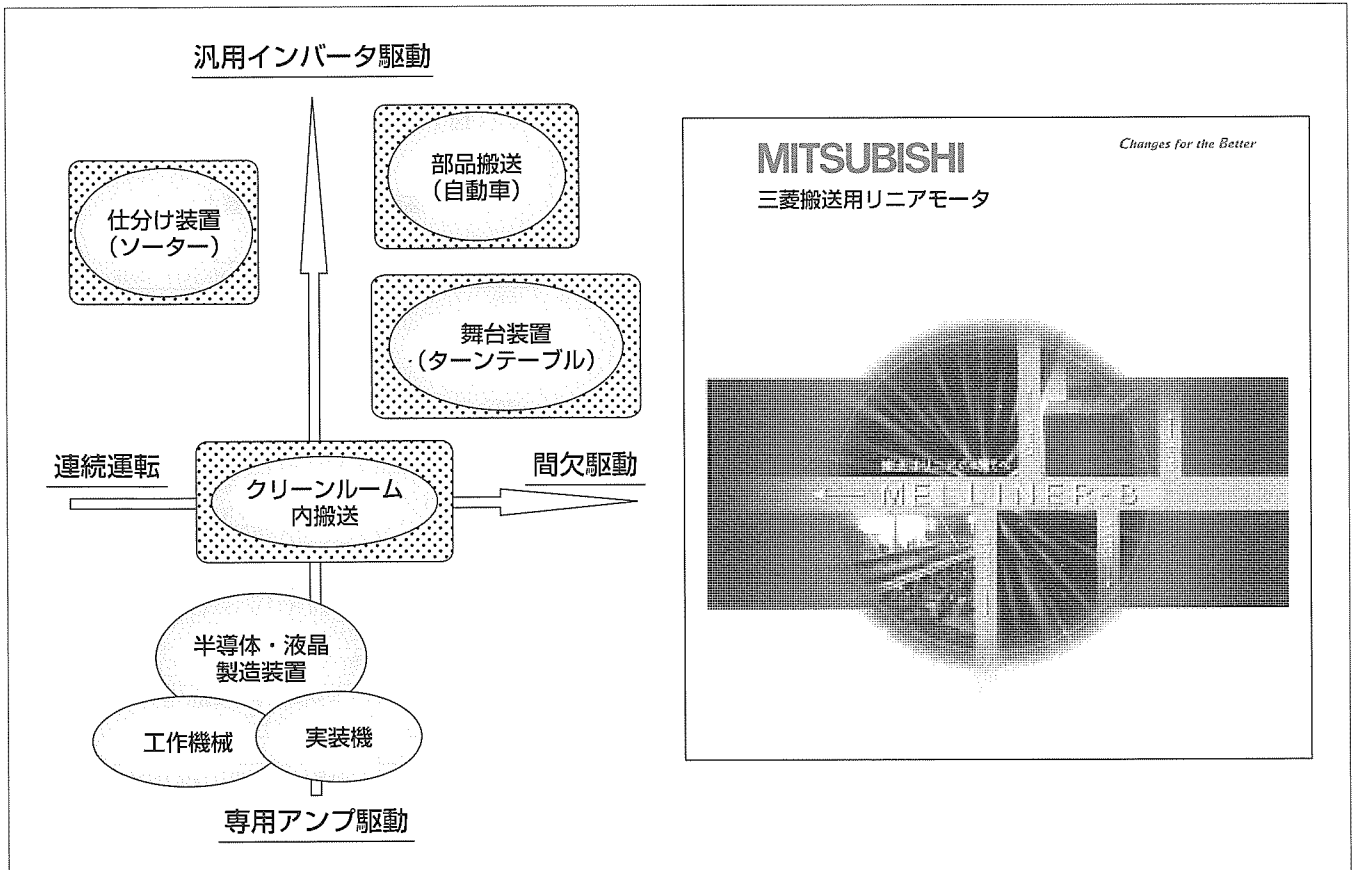
要 旨

現状のモータの産業応用では、製品ごとに駆動系への要求事項が年々増加し、従来方式のメカニズムによる回転-直線変換では要求動作に対し限界に近づいてきた。具体的な項目としては、高速化、高信頼性そして高精度化などである。このような要求事項に対し、近年、半導体・液晶の位置決め、工作機及び実装機などの分野でリニア同期形モータ(LSM)の利用が注目されている。リニア同期形モータの最大の利点は、高速駆動とボールねじなどの機構レスによる直線非接触駆動に基づく経年変化のない高精度の位置決めである。

一方、長距離搬送でかつ位置決め精度をさほど必要とし

ない搬送用途において、磁石を必要としないため2次側の構造がシンプルなりニア誘導形モータ(LIM)が求められている分野もある。

本稿では、最近開発した三菱電機の“MELLINER-B”の高頻度シリーズ“LM-B□□□-75MK形”(通電率(S3):80%)についての概要と特長について述べ、さらに、その特長を生かしたアプリケーション事例として、仕分け装置(ソーター)への適用について述べる。また、今後リニア誘導形モータに要求される高推力、小型軽量化、高効率化についての技術動向についても述べる。



リニア誘導形モータのターゲット

FA(Factory Automation)用のリニアモータには、大別するとLIM(Linear Induction Motor:リニア誘導形モータ)とLSM(Linear Synchronous Motor:リニア同期形モータ)の2つに分類される。代表的な採用分野は、①LIMは搬送・物流分野(クリーンルーム内搬送、部品搬送、仕分け装置、舞台装置)、②LSMは生産機械分野(工作機械、半導体・液晶製造装置、実装機)となる。今回、LIMの採用分野である仕分け装置に適した高頻度シリーズを開発した。

*名古屋製作所

1. ま え が き

直線往復運動が直接得られるリニアモータを使用した駆動装置の歴史は回転形モータと変わらないくらい古く、既に1890年代から研究が始まっていた。当社は、FAの搬送用として、1985年から低速のリニア誘導形モータを展開してきた。また、近年では、半導体装置、工作機械、実装機用としてリニア同期形モータ(LSM)の開発が進められていることはよく知られているとおりである。ここでは、最近開発を完了しシリーズ化を図ったリニア誘導形モータ(LIM)の通電率(S3)80%ED高頻度シリーズについての開発の背景及び製品仕様について述べる。さらに、この高頻度シリーズを駆動源とした搬送装置(仕分け装置)への適用例を紹介するとともに、今後の技術動向について述べる。

2. 高頻度シリーズの開発の背景と製品仕様

2.1 高頻度シリーズの開発の背景

リニア誘導形モータを駆動源とした搬送装置は、従来の回転機を使用したコンベヤ、無人搬送車などの搬送装置にない以下のような特長を挙げることができる。

- (1) ベルト、チェーンなどの動力伝達機構が不要であり、搬送物をダイレクトに駆動できる。そのため、機構が簡単となり、信頼性が高く保守・点検が容易となる。
- (2) 非接触駆動のため、低騒音かつクリーンな運転が可能である。
- (3) 遠心力による速度制限がないため、高速搬送が可能である。
- (4) リニアモータの特性は垂下特性のため、電圧制御や周波数制御での制御性が良い。
- (5) 搬送路側にモータを置き搬送台車に2次導体を配設する地上一次方式では、搬送台車に給電装置のないコードレス搬送が行え、さらに、メンテナンス性が向上するとともに搬送台車がリニアモータ上に来たときだけリニアモータに通電する間欠通電方式となるため省エネルギーが可能となる。

一方、高速、クリーンでかつ連続運転を行う用途では、当社の従来品のリニア誘導形モータは、間欠通電方式をターゲットとしており、通電率(S3)が10%(5分サイクル:30秒通電, 270秒OFF)のため、最大連続通電時間が30秒以内と使用用途に制限があった。このような背景の中、仕分け装置(ソーター)、ループ台車などの連続に近い運転を行う用途に適用した高頻度シリーズを開発する必要があった。

2.2 高頻度シリーズの製品仕様

仕分け装置は、配送先別の仕分け作業を自動化・省力化するための装置であり、運送業界/出版業界/空港手荷物搬送などで広く使われている。この仕分け装置は、①走行

路の走行部、②ワークを投入する投入部、及び③ワークを配送先別に仕分ける排出部に分類でき、今回開発したリニア誘導形モータは、走行路の走行部で使用されている。図1に仕分け装置のイメージを示す。

このリニア誘導形モータを用いた仕分け装置の特長は次のようになる。表1に高頻度シリーズの基本仕様を示す。

(1) 高速化による仕分け能力の効率化

リニア誘導形モータを用いた搬送システムは、100m/minを超える高速運転を実現

(2) 100m/minを超える高速駆動でも低騒音を実現

従来方式(ベルトやチェーン、減速機)に比べ、約10~20dB(A)の低騒音化を実現

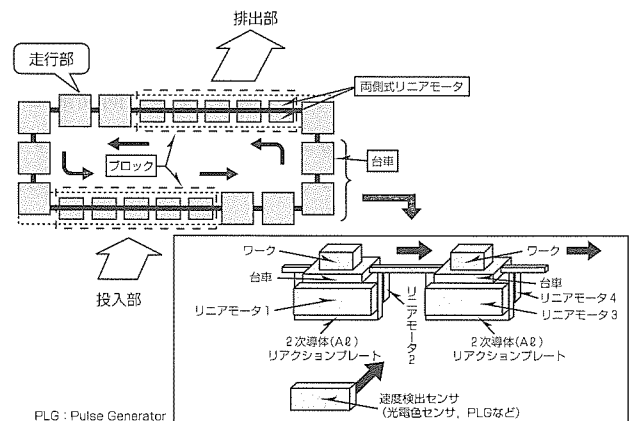


図1. 仕分け装置のイメージ

表1. 高頻度シリーズの基本仕様

高頻度対応シリーズ				
形式(LM-B)	004-75MK	008-75MK	010-75MK	
電源	三相200/220(V), 50/60(Hz)			
推力(N) (kgf)	39.2 (4)	78.4 (8)	98 (10)	
電流(A)	~/3.2	5.8/5.8	7.8/7.8	
同期速度(m/s)	7.5/9.0			
定格	通電率(S3)80%			
耐熱クラス	F			
周囲温度(°C)	0~40			
コイルの保護 熱保護方式	●モールド保護方式 (特殊合成樹脂で注形)			
	サーマルプロテクタ(内蔵)			
	動作温度(°C)	145±5		
	定格電圧(V)	AC 125	AC 250	DC 24
	最大電流(A)	5	3	3
	最小電流(A)	0.1以上		
走行方向	(注3) 正転時の台車(2次導体)は、結線側から反結線側へ走行			
空隙(mm)	2.5			
2次導体	Al板(t3: A2017) + Fe板(t6)			
口 出 線	線径	電源用		
	(mm ²)	サーマル用		
	長さ(mm)	800		
塗色	ライトグリーン			

(注1) 推力、電流値は、モータ上に2次導体[Al(t3)+Fe(t6)]があり(重なり率100%)、2次導体静止時を示す。
 (注2) 通電率はモータ上に2次導体[Al(t3)+Fe(t6)]があり(重なり率100%)の場合を示し、サイクルタイム5(分)<300(秒)>の場合を示す。
 標準シリーズの場合……………(S3)10%30(秒)通電
 高頻度対応シリーズの場合……………(S3)80%240(秒)通電
 (注3) インバータを用いて極性入れ替えすることにより両方向運転が可能である。

(3) 環境に優しくクリーンな用途に最適

リニア誘導形モータによる非接触駆動のため、ベルトやチェーンなどの消耗品がなく、安全でクリーン、給油や修理の手間も不要

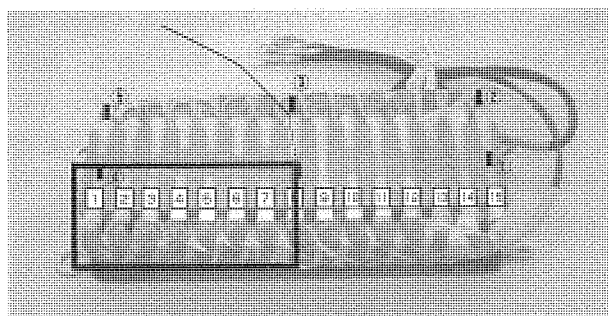
この仕分け装置のリニア搬送装置のシステム構成、リニア誘導形モータ容量・台数の選定フローなどについては、別途、三菱搬送用リニアモータのカatalog、三菱リニアモータ技術資料集を参照されたい。

3. 今後の技術動向

リニア誘導形モータの技術動向は、高推力、小型軽量化、高効率化、及びリニア搬送装置としての性能向上(速度制御、位置制御、応答性向上)などのニーズに合わせて、①フィン付き強制空冷ヒートシンクの構造を採用することによる更なる小型軽量化、②簡易位置決めを必要とする搬送分野を攻略する上で不可欠である制御性能の向上が挙げられ、研究が進められている。

3.1 フィン付き強制空冷ヒートシンク

ここでは、標準 間欠駆動方式の通電率(S3)10%、推力196N(20kgf)の温度上昇実験による実測値とシミュレーション結果とを合わせ込むことによって接触熱抵抗・熱伝導率の不明確なパラメータを算出した一例について述べる。リニア誘導形モータを対象とした熱解析モデルは熱回路網法で構築(対称 1/4 モデル)し、実験計画法を使用して、接触熱抵抗等の不明確なパラメータを決定した。リニア誘導形モータのステータ(モールド処理前)の外観を図2に示す。また、このモデルの仕様を表2に示す。



枠内をモデル化し、熱的に対称とした。
①~⑤：熱電対の挿入位置
①~⑮：スロット数

図2. ステータ(モールド処理前)の外観

表2. モデルの仕様

極数	4
スロット数	15
極ピッチ	75(mm)
コア幅	75(mm)
巻線スロー	#1~#4
一次相抵抗	1.563(Ω)
同期速度	9(m/s)

絶縁板の上に上記リニアモータを置いた場合の計算を実施し、実験計画法で、不明な変数(今回は、①stk:スロットセルの熱伝導率、②corek1:コアの圧延方向熱伝導率、③corek2:コアの積層方向熱伝導率、④e:モールド表面の輻射(ふくしゃ)率)を制御因子として3水準で計算し、L9の直交表に割り当てて計算した。変数の直交表を表3に示す。

その結果、 $stk = 0.02251[\text{kcal}/\text{mh}^\circ\text{C}]$, $corek1 = 50[\text{kcal}/\text{mh}^\circ\text{C}]$, $corek2 = 15[\text{kcal}/\text{mh}^\circ\text{C}]$, $e = 0.766$ の結果が得られた。

次に、リニア誘導形モータのコアバック側に強制空冷放熱フィンを取り付け、発生損失を効率良く放熱し、コイル温度を設計許容温度以内とするために必要な放熱フィンの形状、冷却風量を検討した。表4にシミュレーションの結果得られた放熱フィンの形状を示す。リニアモータのコアバック側に取り付け、周囲温度40℃の環境下でコイルの設計許容温度145℃以下になるかの検証を実施した。図3に装置の外観を示す。

この結果、自然空冷の間欠駆動方式の通電率(S3)10%に対し、フィン付き強制空冷ヒートシンクの構造を採用することにより2倍の通電率(S3)20%を達成する目処が立った。今回は紙面の関係で詳細の結果は述べないが、この解析結果と実機の検証結果を踏まえ、シミュレーションの更なる精度向上を行う予定である。

表3. 変数の直交表(L9)

変数(因子)	水準1	水準2	水準3
stk	0.01	0.025	0.04
corek1	30	40	50
corek2	5	10	15
e	0.6	0.7	0.8

表4. 放熱フィンの形状

	シミュレーション結果(放熱フィン形状)
フィン幅	68(mm)
フィン長	375(mm)
フィン高	37.5(mm)
フィンピッチ	9.4(mm)

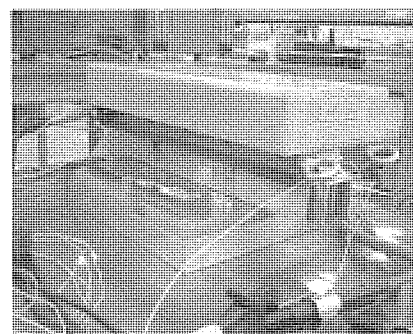


図3. 装置の外観

3.2 誘導リニアモータの制御性の向上

リニア誘導形モータは原理的には回転形の誘導電動機と同じであるが、表5に示すように、回転形モータとは異なる特性を持っている。回転機の同期回転速度 N_s は、周波数 f と極数 p によって決まり、リニアモータの同期走行速度 V_s は極ピッチ τ と周波数 f によって決まる。また、すべり s は、それぞれ回転速度 N と走行速度 V によって表される。回転形では、回転速度 N は同期回転速度 N_s に近いが、低速リニアモータでは走行速度 V は同期走行速度 V_s との差が大きくなるため、すべりが大きく効率も低い。そこで、すべり s を小さくするため、同期走行速度を低く設計すればよいが、極ピッチを小さくすることは製造面の課題大、又は周波数を極端に小さくすることは吸引力の影響など技術的な課題がある。

次に、リニア誘導形モータの等価回路を図4示す。図のように、等価回路は、回転形と同様、T形等価回路で1次抵抗 R_1 、2次抵抗 R_2/s 、1次インダクタンス L_1 、2次インダクタンス L_2 、及び励磁インダクタンス L_m で表すことができる。

リニアモータは、回転形に比べ、相対的に磁気ギャップが大きいため励磁電流 I_0 が大きいので励磁インダクタンスが小さくなる。今後、簡易位置決めを必要とする用途では、この低励磁インダクタンスの特長を持つリニア誘導形モータの制御性の検証、特に低速時で起動停止するためのトルクが確保できるかの技術課題がある。一方、インバータ駆動するリニアモータをV/F制御、すべり周波数制御で駆動させる場合、インバータからの周波数指令、電圧指令を与えるだけであるため、オープンループでは、速度を一定に制御することは困難である。また、低周波数運転時において高推力が得られないという課題が生じる。そのため、リニアモータの特性を効率良く得るためには、回転形と同様にベクトル制御が用いられる。ベクトル制御は、モータ定数を使った演算により、1次電流 I_1 を励磁分電流 I_0 とトルク分電流 I_q に分離し、それぞれを独立に制御する方式である。V/F制御の推力は2次抵抗に流れる2次電流 I_2 に比例し、ベクトル制御の推力は、励磁分電流を一定とし、トルク分電流に比例する。V/F制御の場合、配線やモータの一次巻線での電圧降下によって実際に有効になる電圧が減少するために、十分な推力が出なくなる。この現象は低速になるほど大きく影響する。そこで、あらかじめ電圧降下分を推定して、その分電圧を高くして低速での推力不足を補うことができるが、励磁電流がより大きくなる課題がある。

表5. 回転形誘導電動機とリニア誘導形モータの比較

	回転形誘導電動機	リニア誘導形モータ
同期性	同期回転速度 $N_s = 120f/p$	同期走行速度 $V_s = 2\tau f$
電磁力	トルク	推力
すべり	$s = (N_s - N)/N_s$	$s = (V_s - V)/V_s$
ギャップ	小	大

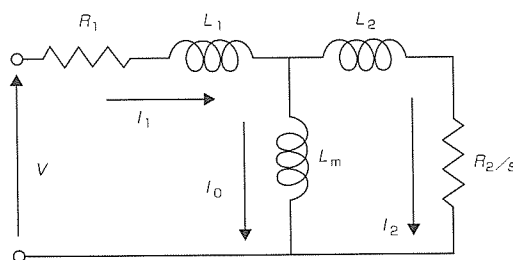


図4. 等価回路

参考まで、3.1節記載モデルのリニア誘導形モータの定格電流17Aに対し、励磁電流は16Aである。今後の取り組みとしては、特性の改善を、

- 磁気ギャップ短縮の研究
- ベクトル制御する方式で励磁分電流とトルク分電流の比を改善
- 高効率化の追求

などにより図っていくことになる。これら要求にこたえるため、これまでとは異なるモータ構造や冷却機構の検討を進めていく予定である。

4. むすび

以上、リニア誘導形モータの技術動向を述べたが、これからは各種分野で実用化されるものと期待される。最近では、回転形誘導電動機のほか、IPMモータ、リラクタンスモータ、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が発表されている。リニアモータも特性向上による新市場拡大を図るためこの高効率化と小型化の技術は不可欠であり、今後とも研究開発を進め、より良い搬送用リニアモータをユーザー各位に提供できるよう努める所存である。

参考文献

- (1) 阪部茂一, ほか: 誘導形リニアモータ<<MELLINER>>とリニア駆動搬送装置, 三菱電機技報, 60, No12, 852~856 (1986)



特許と新案 * * *

三菱電機は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)

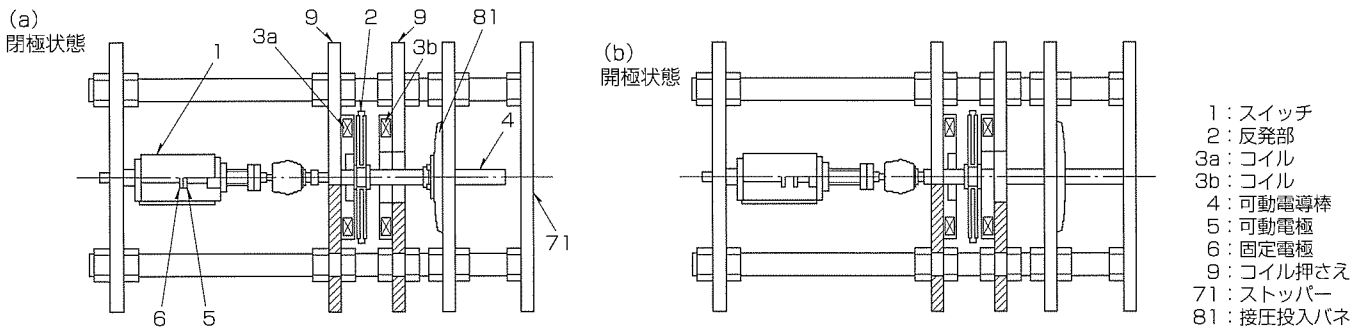
開閉装置 特許第3179349号(特願平08-236113)

発明者 岸田行盛, 小山健一, 笹尾博之
西宮和彦, 山地祐一, 丸山稔正

この発明は、簡単な構造で、高速に開閉する動作信頼性の高い開閉器を実現することを目的としたものである。

従来の高圧遮断器は、開極又は閉極動作時、バネに蓄勢したエネルギーをラッチ機構を用い開放しリンク機構を経て可動電極を動作するものであったため、構造が複雑であり開閉時間は20msから60ms程度必要であった。

この発明は、開閉の駆動には可動電極に直結した可動軸に設置した反発部と固定枠に取り付けたコイルに流れる高周波電流との間の反発力で時間遅れなく直接駆動するものである。また、接圧や開極保持のためのバネとして非線形特性を持つ皿バネを用いることで、ラッチ機構を省きかつ単純な軸方向だけの動作で、開極時間を1ms程度に短縮可能にした高速の開閉装置を実現した。



駆動制御装置付きモータ 特許第2862053号(特開平6-292346)

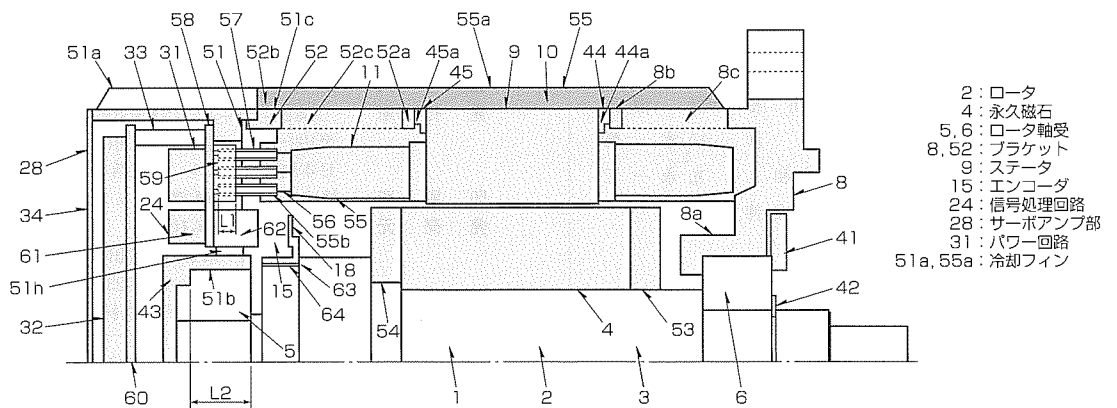
発明者 水谷孝夫

この発明は、エンコーダ・アンプ一体型サーボモータの構造に関するものである。従来の一体型サーボモータでは、アンプ部分が中間フレームの外側(内部にステータがある付近)に取り付けたり、回転軸上の反負荷側に取り付ける場合においてもブラケット外側に取り付けたりしていたため、サーボモータの外径が大きくなる、全長が長くなる、これに伴い振動しやすくなる、ステータ/アンプ間の配線長が長くノイズの発生源となる、という問題点があった。

ケールの動きを検出するよう取り付けることで回転軸方向の寸法を短くした。また、反負荷軸側のブラケットに開けられた穴を通してステータ/アンプ部間の配線を行い、エンコーダの回転部分及び信号処理部並びにアンプ部を積み重ねて組み立てるようにしたものである。

この発明により、回転軸方向の寸法の短縮、外径寸法の縮小、配線距離の短縮等が図られ、小型・軽量、高剛性、組立性向上、低振動、低ノイズとすることが可能となる。

この発明は、上記欠点を解決するためになされたもので、反射型のエンコーダ発光/受光部を反負荷側ブラケットに開けられた穴を通してロータに取り付けられた回転ス





特許と新案**

三菱電機は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)

平板型リニア誘導モータ 特許第3610799号(特開2000-184687)

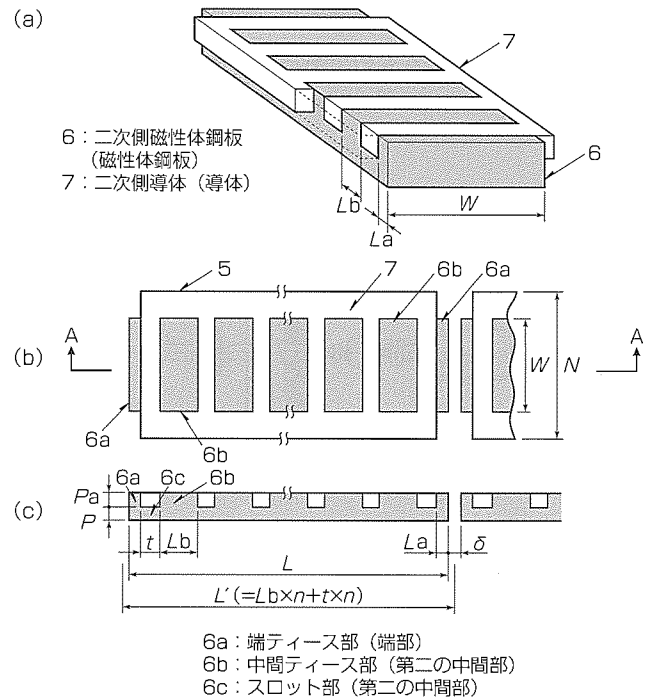
発明者 度会 明

この発明は、一次側と二次側からなり、一次側に交流電流を流すことで磁束変化を発生させ、その磁束変化と二次側に流れる電流から発生する力を利用して一次側を移動させる平板型リニア誘導モータに関するものである。

従来の平板型リニア誘導モータでは二次側部材を複数枚並べる構成としていたが、この二次側部材同士の接合部を接触させる構造にしていたため、接触部で電流の流れが乱れ一次側の振動を発生させた。また、線膨張によりこの接合部で剥離(はくり)や変形が発生していた。

この発明は、二次側部材を構成する磁性体鋼板を、一次側の移動方向での長さが L 、さらに、一次側の移動方向に、内部に一次側の移動方向に対して垂直方向に導体の一部が設置される第一の長さの第一の中間部と、第二の長さ Lb の第二の中間部又は第三の長さ La の端部とが、交互になるように構成するとともに、この磁性体鋼板同士を、第三の長さ La 、第二の長さ Lb 、磁性体鋼板の幅 W 、第二の中間部の最大磁束量 Φ_p 、磁性体鋼板の許容磁束密度 Br 、磁性体鋼板の線膨張係数 α 、磁性体鋼板の温度変化量 ΔT とした場合に、ほぼ $(Lb - La)$ で、かつ、ほぼ $\alpha \cdot L \cdot \Delta T$ 以上で $(La - (\Phi_p / Br \cdot W))$ 以下となるような間隔に配置し、

一次側の振動発生、及び線膨張による接合部での剥離や変形の発生を防止する。



<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.79 No.12 特集「系統変電・受配電システム」

三菱電機技報編集委員	三菱電機技報 79巻11号	2005年11月22日 印刷
委員長 三嶋 吉一	(無断転載・複製を禁ず)	2005年11月25日 発行
委員 小林 智里 増田 正幸 山木比呂志	編集人 三嶋 吉一	
佐野 康之 長谷川 裕 堤 清英	発行人 園田 克己	
浜 敬三 村松 洋 松本 修	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	
木 楓 純一 逸見 和久 光永 一正	〒102-0073 東京都千代田区九段北一丁目13番5号	
黒畑 幸雄 部谷 文伸	日本地所第一ビル 電話 (03)3288局1847	
事務局 園田 克己	印刷所 株式会社 三菱電機ドキュメンテクス	
本号取りまとめ委員 小山 健一	株式会社 オーム社	
石井 義一	〒101-0054 東京都千代田区神田錦町三丁目1番地	
URL http://www.MitsubishiElectric.co.jp/giho/	定 価 1部945円(本体900円)送料別	
英文季刊誌「MITSUBISHI ELECTRIC ADVANCE」がご覧いただけます	三菱電機技報に関するお問い合わせ先 cep.m-giho@ml.hq.melco.co.jp	
URL http://global.mitsubishielectric.com/company/r_and_d/advance/advance.html		

スポットライト

24kV HS-X型 脱SF₆ガス絶縁スイッチギヤ

1. キュービクル型ガス絶縁スイッチギヤ(C-GIS)とは
国内外の送配電及び受配電系統において、系統事故発生時に事故点を他の系統から切り離す等の機能を持ち、主回路が密封容器内に収納されガス絶縁された構造で、小型・軽量・高信頼性・省メンテナンスのニーズに対応できる電力安定供給に不可欠の機器です。

2. 脱SF₆ガス

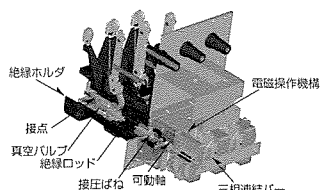
C-GISの絶縁媒体としてこれまで一般に用いられていたSF₆ガス(GWP:23,900)を用いずに、ドライエアを適度に加圧し、適所に絶縁バリアを配することによりSF₆ガスと同等の絶縁耐力を得た、地球環境にやさしい脱SF₆ガス絶縁スイッチギヤです。(GWP:地球温暖化係数, CO₂のGWP:1, AirのGWP:0)

3. 電磁操作式真空遮断器

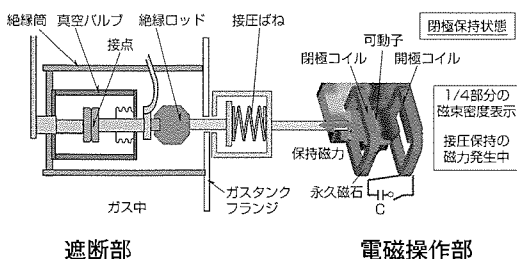
真空遮断器は、各相ごとに搭載した電磁操作機構によって主接点を直動することにより、ラッチレバーなどの損耗部品レス化と部品点数半減を実現し、大幅に信頼性を向上するとともに、操作機構部のメンテナンスフリーを実現しました。また、電磁界運動連成解析技術を用いた高度設計技術を用いて、ばね操作機構に比べ操作エネルギーを大幅に削減しています。

電磁操作方式真空遮断器の特徴

コンセプト	新技術/対策
環境調和	●真空遮断器の操作音低減
LCC低減	運用費 ●操作エネルギー低減
	保守費 ●操作機構部のメンテナンスフリー化 ●気中しゅう動部位に長寿命グリス使用
安全性/信頼性向上	●構造を単純化 ●部品点数を削減 ●主接点直動 ●操作機構部の損耗部品レス化 (8万回の単体開閉試験をクリア)



HS-X用24KV真空遮断器構造



遮断部

電磁操作部

特長

(1) 脱SF₆ガス

ドライエアを適度に加圧し、要所に絶縁バリアを配し、電極形状を最適化した地球にやさしい脱SF₆ガス絶縁設計です。

(2) 高信頼性

主回路構成の単純化、真空遮断器の電磁操作機構の採用などにより、機構部品点数を従来比55%削減しています。

真空遮断器の操作機構部は、電磁操作方式の採用と主回路直動化により、ラッチレバーなどの消耗部品レス化とグリスレス化により30年間メンテナンスフリー(駆動用コンデンサは15年ごとに取替え)を実現しています。

(3) 省力化

ケーブル試験用プッシングを前面に取り付けることにより、ケーブル試験時の作業性が大幅に向上できます。

最大5面まで一体発送することにより、現地据付時間の大幅削減が可能です。

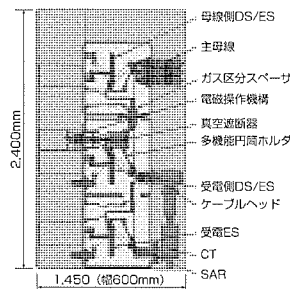
固体絶縁母線の採用による現地据付時のガス処理レス化により、据付時間を大幅に削減できます。

(4) 省資源

部品形状の最適化と機器配置の最適化により、部品質量を従来比40%削減しています。

(5) 省エネルギー

真空遮断器は、電磁操作機構の最適化とリンク機構部などでのエネルギーロスのミニマム化により、ばね操作機構に比べ操作エネルギーを20%に削減しています。



HS-X型スイッチギヤの構造 (ガス区分あり)

HS-X型スイッチギヤの定格及び仕様

項目	仕様
定格電圧	(kV) 24
定格耐電圧	雷インパルス (kV peak) 125 (DS極間145)
	商用周波 (kV rms) 50 (DS極間60)
定格周波数	(Hz) 50/60
定格母線電流	(A) 630/1,250
定格電流	(A) 630, 1,250
定格短時間耐電流	(kA) 25 (3秒)
定格ガス圧力	(MPa.G) 0.07
準拠規格	JEM, JEC, IEC

住 所: 〒100-8310 東京都千代田区丸の内2-7-3 (東京ビル)

会社名: 三菱電機株式会社 お問い合わせ先: 本社駐在受配電システム事業所 東部受配電システム計画課 TEL: 03-3218-2529