

電動機の技術 第10回

— 電動機技術の動向 —

森本 雅之*

1 はじめに

この連載講座の最終回として、家電などに使われる小型電動機と、今後の電動機技術について述べる。

2 小型電動機

小型電動機と呼ばれる電動機は、特に出力によって区分されていない。一般的には出力が1kW未満の、片手で持ち上げられる電動機と理解していただきたい。小型電動機のうち現在よく使われるものについて、いくつかを紹介する。

2.1 ブラシレスモータ

ブラシレスモータとは、直流電動機の整流子とブラシの機械的な接触をなくすために、ブラシと整流子の作用を電子的に行う電動機である。ブラシレスモータの回転子は永久磁石であり、界磁である。固定子が電機子巻線となるが、電機子電流で回転磁界をつくるのではなく、回転子の回転に応じて電機子電流の方向を切り換える。その回転子のため、回転子のN、Sの磁極を検出するセンサを設け、磁極に応じて電流の方向を切り換えることにより連続的に回転させる。

電流の切り換えを直流電動機と対応して図1に示す。上段は直流電動機でブラシと整流子の位置関係により電流の方向が異なることを示している。下段は同じことをスイッチの切り換えで行えることを示している。スイッチ S_1 、 S_2 を図のように結線して交互にオンオフする。図では S_1 がオンの状態を示している。このときは上段の直流電動機と同じ方向に電流が流れる。 S_1 をオフして S_2 をオ

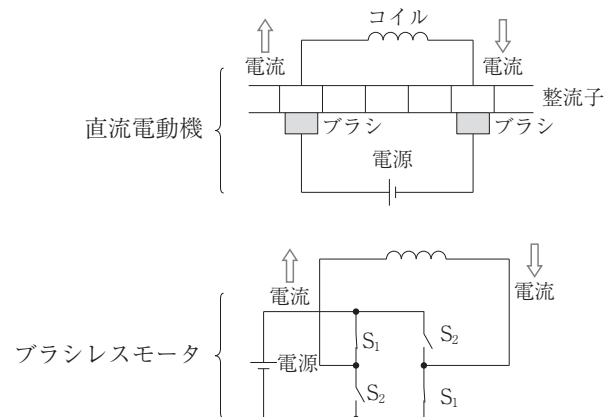


図1 ブラシの作用のスイッチへの置き換え

ンすると、電流の方向が逆転する。このような操作を回転子の永久磁石の位置に応じて行えば、ブラシと整流子の作用をスイッチで行うことができる。

磁極の検出は、磁束密度を検出できるホール素子、磁気飽和素子などの磁気センサや光を位置により遮断して検出する光学的方法が使われる。ブラシレスモータは電動機本体に磁極センサを内蔵している。ブラシレスモータは、センサと電流切り換えの制御装置を含めた一つのシステムとして考えるべきである。システムとして考えると、システムの特徴はブラシ付きの永久磁石直流電動機と同等と考えることができる。図2のようなブラシレスモータシステムは、外部から見ると入力直流なので、永久磁石直流電動機と同じものと考えられる。したがって、永久磁石直流電動機の特徴式がそのまま使える。直流電動機を置き換えることができるので、ブラシレスDCモータと呼ばれる。永久磁石同期電動機SPMと類似の構成であるが、ブラシレスモータは、三相交流

* Masayuki Morimoto モリモトラボ

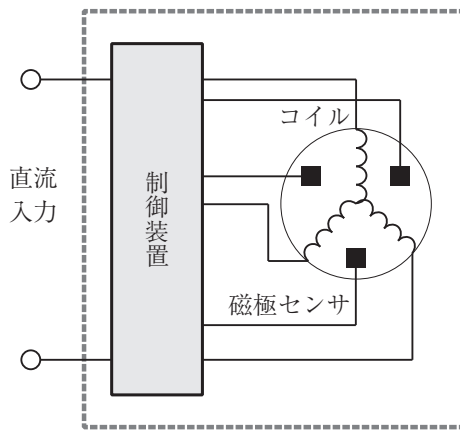


図2 ブラシレスモータシステム

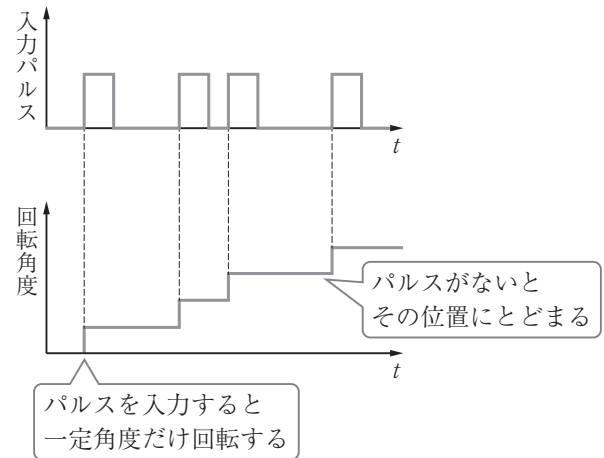


図3 ステッピングモータの動作

による回転磁界を使わないものとして区別されている。

2.2 ステッピングモータ

ステッピングモータは、パルス電流により一定角度だけ回転する電動機である。図3に示すように、駆動回路にパルスを入力するごとに1ステップずつ回転する。回転角度は入力するパルス数で決まり、回転の速さ（回転数）はパルスの繰り返し周波数に比例する。パルスで動作するためデジタル制御しやすい。ステッピングモータは、トルク発生原理からは同期電動機的一种と考えられる。

ステッピングモータのもう一つの大きな特徴は、それぞれの位置に保持できることである。停止中でも直流電流を流し続けられれば、その位置を保持するような力を発生できる。このトルクをホールディングトルクという。

ステッピングモータは永久磁石の回転子を持つPM型、回転子に永久磁石があり、さらに歯車状の磁極のあるHB型がある。なお、かつてはVR型もあったが、現在ではあまり使われることがない。VR型は、次節で述べるSRモータに進化したと考えられる。

ステッピングモータは連続回転させて動力を得ることより、制御用電動機として使われることが多い。

2.3 SRモータ

SRモータ（スイッチトリラクタン্সモータ）はリラクタン্সモータと同様に、突極の回転子によるリラクタンストルクのみを利用するモータである。しかし、固定子鉄心も図4に示すように突極構造であり、しかも三相交流による回転磁界を利用しない。固定子巻線のパルス電流により磁界を断続させる。その点では、ステッピングモータの一種であるとも考えられる。

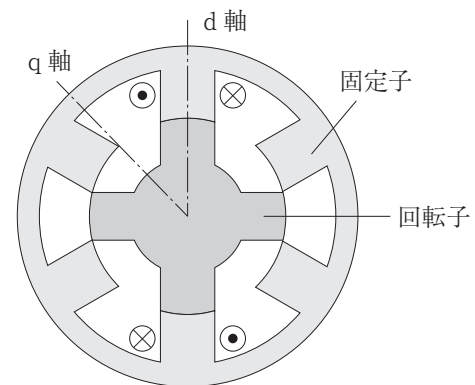


図4 SRモータ

SRモータのトルク発生原理を説明する。両突極の相対的な位置関係により、回転子磁極と固定子磁極の対向面積が異なる。図4のd軸位置のように磁極が対向していれば鎖交磁束数が増加し、q軸位置のように非対向位置になると鎖交磁束数が低下する。磁極の相対的位置関係により鎖交磁束数が変化するので、蓄えられる磁気エネルギーも変化する。磁気エネルギーが変化するということはエネルギーを出し入れすることができるということ

である。磁気エネルギーはインダクタンスに比例するので、インダクタンス L の回転角 θ による変化を利用して電流を流せば、次のようなトルクが得られる。

$$T = \frac{1}{2} I^2 \frac{dL(\theta)}{d\theta} \quad (1)$$

インダクタンスと発生トルクの関係を図5に示す。インダクタンスが増加する位置で電流を流せば、正方向のトルクが発生するので電動機となる。インダクタンスが減少する位置で電流を流せば、負方向のトルクが発生するので発電機作用をする。また、電流の2乗でトルクが決まるので固定子コイルに流す電流は一方向でもかまわない。つまり、交流電流でなく、直流電流の断続で駆動できる。しかし、SRモータは電流のオンオフのために、専用のドライブ回路が必要である。

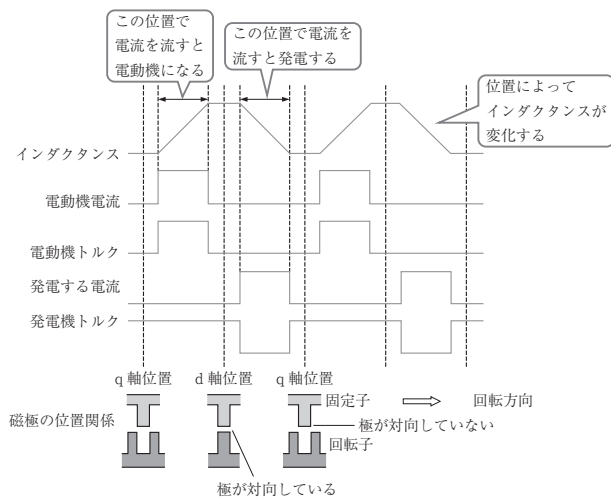


図5 SRモータのインダクタンスの変化

2.4 単相交流電動機

単相交流は、わが国では100Vで15A、200Vで20A以下とされ、単相交流電動機は、出力が1kW以下のものが使われている。単相交流で使用する電動機として、交流整流子電動機と单相誘導機を取り上げる。

交流整流子電動機は直流電流でも交流電流でも駆動できる電動機である。交流でも直流でも使用できるので、ユニバーサルモータともよばれる。交流整流子電動機は、界磁と電機子が直列に接続

された直巻電動機と同一の基本構造である。

交流整流子電動機の駆動原理を図6で説明する。図(a)では、上の入力端子がプラスであり電流は矢印の方向に向かって流れる。一方、図(b)では、交流電源の極性が反転するので電流の向きが反転する。つまり、電流が反転するので界磁のN、Sが反転する。また、電機子電流もブラシと整流子の作用により反転する。つまり、磁界と電流がともに反転するので発生トルクの方法は同一となる。したがって、同一方向に回転することになり、交流電源でも直流電動機として動作するのである。

交流整流子電動機のトルク特性は低速で高トルク、高速で低トルクの直巻電動機の特徴と同じである。誘導電動機、同期電動機などの交流電動機は同期速度が回転数の上限となり、商用電源(50Hzまたは60Hz)では 3000min^{-1} または 3600min^{-1} 以上の回転数は得られない。一方、交流整流子電動機は、商用電源で容易に数万 min^{-1} の高速回転が得られるという特徴をもっている。そのため、掃除機、コーヒーミルなどの家電や電動工具に使われている。

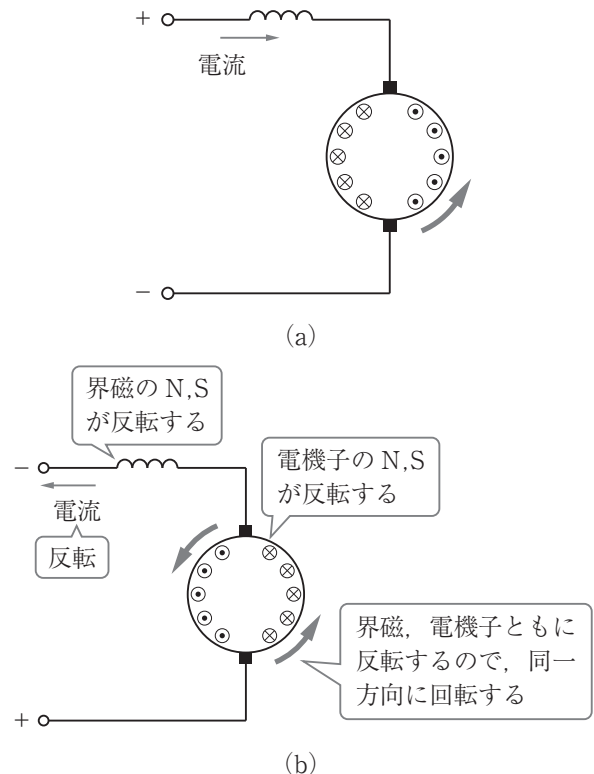


図6 交流整流子電動機の原理

単相誘導電動機は単相交流電源で利用できる誘導電動機である。交流電動機は三相交流による回転磁界が基本となるが、単相誘導電動機は単相交流電流により回転することができる。

単相交流で回転磁界を作るためには二つの巻線が必要である。図7に示すような空間的に90°離れた位置にある二つの巻線を考える。これを二相電動機という。二相電動機のそれぞれの巻線に90°の位相差のある電流を流したとする。これを二相交流という。これにより回転磁界が生じる。

図に示すように、三相誘導機と同様なかご形回転子を用いれば、電動機として動作が可能である。構造的には単相巻線（主巻線 M）に90°の位置にもう一つの巻線（補助巻線 A）を設けている。しかし、二つの巻線の電流には90°の位相差が必要である。単相交流から位相の異なる二つの交流電流（二相交流電流）が得られるようにするために、コンデンサを用いる。図7には、補助巻線に直列にコンデンサを接続している。巻線のインダクタンスに対応する容量のコンデンサにより電流の位相を90度進める。このような電動機をコンデンサモータとよんでいる。

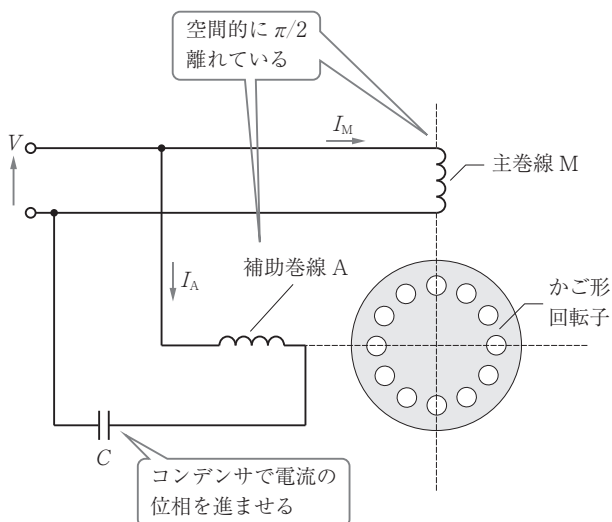


図7 単相誘導電動機の原理

単相誘導電動機は始動できれば、回転中は単相交流電流と二つの巻線でトルクを発生することができる。これを純単相誘導電動機と呼ぶ。単相誘導電動機には様々な始動方法がある。コンデンサ始動方式は、始動時のみコンデンサを用いた補助

巻線を接続する方式である。始動時のみ補助巻線に電流を流す。始動加速後、補助巻線を切り離し、純単相の誘導電動機として動作する。また、くま取りコイル型誘導電動機は、固定子の磁極の一部に1回巻の、くま取りコイルが巻かれている。主巻線電流による主磁束がくま取りコイルと鎖交し、誘導起電力が生じる。くま取りコイルは短絡されているので電流が流れる。くま取りコイルの電流による磁界が発生するが、この磁界は主磁束よりも時間的に遅れて生じる。そのため、主磁束からくま取りコイルの方向へ磁界が移動する。移動磁界により始動トルクを発生する。加速後は純単相誘導電動機として動作する。

以上、述べた単相誘導電動機は、家電機器など三相電源の得られない用途で使われている。

3 電動機の進化

電動機は歴史的には、動力用として交流電動機、制御用として直流電動機が使い分けられてきた。しかし1960年代にパワーエレクトロニクスが実用化し、交流電動機の制御が容易になり、直流電動機が使用されることが少なくなっていった。

そのような進歩の中で、1990年代に電動機に関する技術に大きな進歩があった。その技術とは次の3つの技術革新である。

- ・ネオジム磁石の実用化
- ・コンピュータのハード、ソフトの進歩
- ・IGBT¹の実用化によるパワーエレクトロニクスの進歩

この3つにより20世紀の電動機が姿を変え、21世紀の電動機に進化したといっても過言ではない。

ネオジム磁石（Nd Fe B）は日本人が発明した永久磁石であり、現在のところ「地球上最強の磁石」と言われている。1990年代から電動機に使われるようになった。これにより小型で高効率な永久磁石同期電動機が広く使われるようになった。また、扁平な電動機なども実現できるようになった。

コンピュータの進歩はスマホやパソコンの性能で体感できるが、小型のコンピュータで大量のデータを高速に演算処理できるようになった。こ

¹ Insulated Gate Bipolar Transistor

れにより複雑で高度な電動機制御が可能になった。特にダイレクトドライブが可能になったので、減速機なしで電動機を使えるようになった。

IGBTはインバータなどに使われるパワーデバイスであり、トランジスタの一種である。IGBTは高速でオンオフが可能であり、発生損失も小さい。これにより交流電動機を駆動するためのインバータで電流を精密に制御することが可能になった。これにより、交流電動機が容易に制御できるようになった。

この三つの技術により、電動機は進化したと言える。この進化により、21世紀になって、様々な用途が広がっている。以下にいくつかの例を説明する。

3.1 機械室レスエレベータ

一般のエレベータは、誘導電動機と減速機により、かごを駆動している。そのため、屋上に、それらを納める機械室が必要であった。近年、永久磁石同期電動機を用いることにより、電動機が小型になり、さらにダイレクトドライブにより減速機を使わずに駆動できるようになった。それにより昇降路内に電動機を設置することができるようになり、屋上の機械室が省略できるようになった。

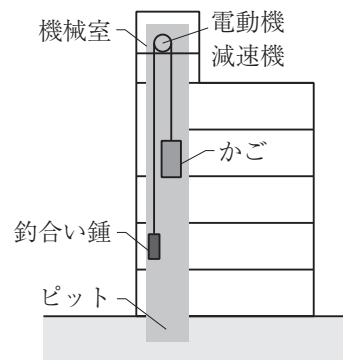
超高層ビルを除いて、永久磁石同期電動機を用いた機械室レスエレベータが使われることが多くなった。さらに、機械室レスエレベータは、地下鉄や駅の跨線橋などの屋上の機械室を設けることが難しい場所へのエレベータの設置を実現した。

3.2 ドラム型洗濯機

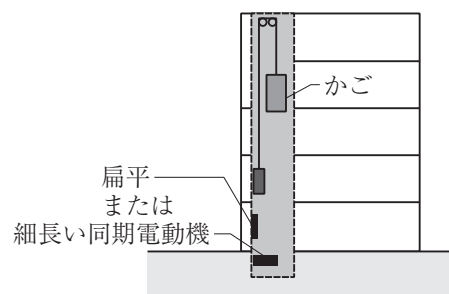
洗濯機の駆動は、洗濯動作では低回転で高トルクが必要であり、脱水動作では高速回転で低トルクとなる。そのため、従来は電動機を定速で運転し、減速機の減速比を切り換えていた。電動機をダイレクトドライブできるようになり、減速機が不要になり、洗濯機の騒音が低下した。

一方、ドラム型洗濯機はコインランドリーでは古くから使われてきたが、国内では家庭用として使われることはなかった。これは、国内の住宅では、洗濯機スペースの奥行きが決まっており、横型洗濯機には電動機を取り付けることができなかったからである。扁平形状の永久磁石同期電動機の実現により家庭用のドラム型洗濯機が実現した。

一方、ドラム型洗濯機はコインランドリーでは古くから使われてきたが、国内では家庭用として使われることはなかった。これは、国内の住宅では、洗濯機スペースの奥行きが決まっており、横型洗濯機には電動機を取り付けることができなかったからである。扁平形状の永久磁石同期電動機の実現により家庭用のドラム型洗濯機が実現した。



(a) 一般のエレベータ



(b) 機械室レスエレベータ

図8 機械室レスエレベータ

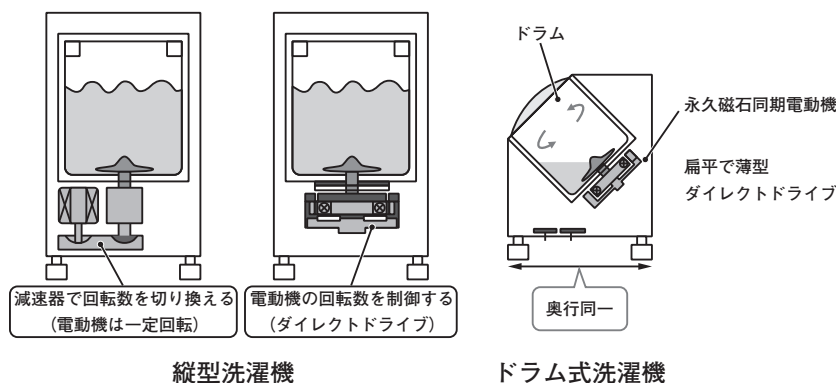


図9 ドラム型洗濯機

3.3 エアコン

従来のエアコンは誘導電動機によりコンプレッサを駆動し、サーモスタットにより温度に応じて電動機をオンオフしていた。エアコンをはじめとする空調の消費電力は発電量の10%近くに相当するため、エアコンは古くから省エネルギー技術を取り入れてきた。1980年代から、コンプレッサのかご型誘導電動機をインバータにより回転数制御したインバータエアコンが使われてきた。

21世紀のモータの進化により家庭用のエアコンにも誘導電動機に代えて永久磁石同期電動機が使われるようになった。エアコンの運転は、運転開始直後には、電動機は高速回転して温度を調節するが、その後の運転時間の大部分は低速回転で設定温度を維持している。永久磁石同期電動機は低速回転でも電動機効率があまり低下しない。それにより、年間を通しての消費電力が大きく低下した。

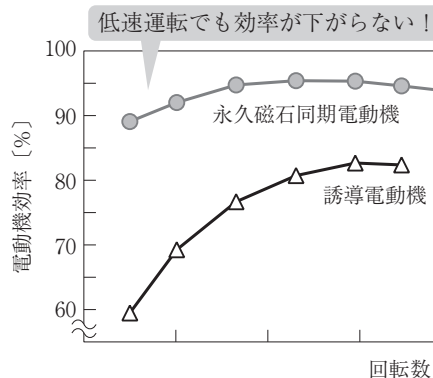


図10 永久磁石同期電動機の効率

3.4 ハイブリッド自動車

電気自動車は電動機のみで走行する自動車である。一方、ハイブリッド自動車はエンジンのほかに電動機を備えた自動車である。そのため、ハイブリッド自動車では電動機が小さくならないと搭載スペースの点で実用的な自動車にならない。

ネオジム磁石を使う永久磁石同期電動機で高出力の電動機が小型化できた。ネオジム磁石によりハイブリッド自動車を実用化したといっても過言ではない。また、図11に示すように、自動車駆動の電動機は広い範囲で運転される。低速から高速まで、すべての運転点で高効率が要求される。その点でも永久磁石同期電動機が適している。

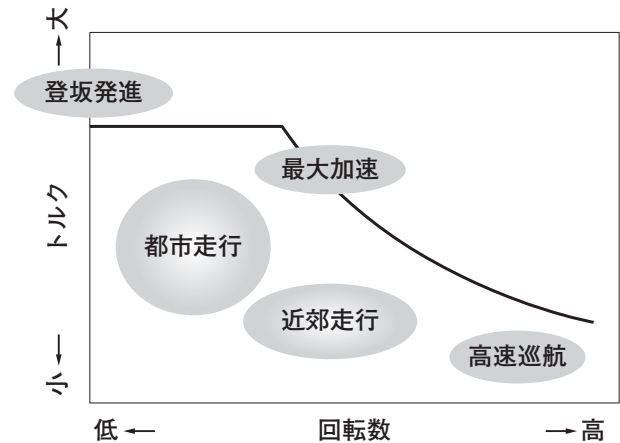


図11 自動車の駆動

3.5 新聞のカラー印刷

新聞を印刷する輪転機は1時間に数万部を印刷する高速な印刷機である。カラー印刷の場合、各色の印刷が必要なので実効的な印刷速度はさらに一桁以上高くなる。輪転機は50台以上の電動機を完全に同期回転させて用紙を送っている。現在では朝夕刊でもカラーの紙面が当たり前になっているが、これも電動機の技術の進歩によるものである。すなわち、カラー印刷できるような精度で、多くの電動機を完全に同期させる技術によるものである。

このほか、電動機の進化により21世紀になって活用できるようになった機器、技術は非常に広い分野に展開している。

4 今後の展望

近年の電動機の開発は、「特定用途指向」と「機電一体」というキーワードが使われている。これについて簡単に述べてゆく。

特定用途指向の電動機とは、ある用途、製品だけに最適化した設計の電動機である。前節で述べた「進化した電動機」は、ほとんど、これに相当する。家電や電気自動車に搭載する電動機は、その用途で最適な性能を目指して設計されている。特定の用途だけではなく、特定の企業の製品だけに向けた電動機もある。従来から、カスタムモータ、専用モータという電動機があったが、これらとは性格が異なってきている。

これについて電動機の製造という観点から次のようなことがある。従来の電動機は、標準的な鉄

心を用い、軸方向の寸法や巻線仕様の変更により、標準的な電動機のバリエーションの形で製造されてきた。これは鉄心製造のための金型が高価なこと、および量産のための巻線機設備が大規模なことが原因している。そのため、従来の電動機の製造設備は、ある意味ではプラントのように考えられる。すなわち、製造設備の制約の中で製造可能なカスタムモータを製造してきた。

しかし、永久磁石同期電動機の一般化に伴い、電動機の製造法も変化した。固定子の鉄心を(a)に示すリング状ではなく、(b)のように鉄心をいくつかの円弧に分割する。鉄心を分割した状態で巻線を行う。(c)に示すように、巻線がしやすくなり、密に巻くことができる。巻線後に分割鉄心を組み合わせてリング状に接合する。これにより電動機の性能が向上し、製造もプラントではなく、専用機として考えればよくなった。

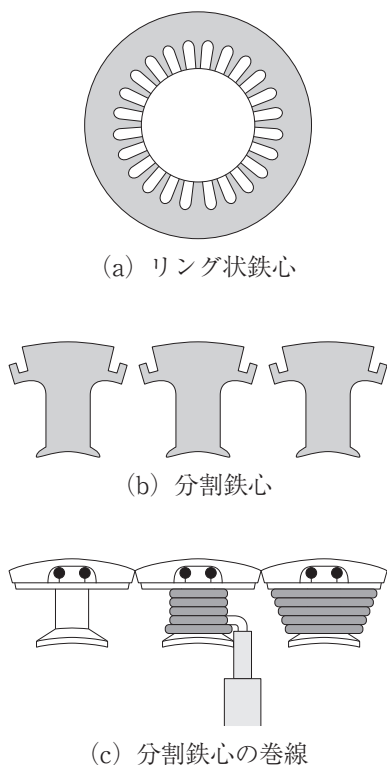


図 12 分割鉄心

さらに、電動機をパワーエレクトロニクスで制御して使うことが一般的になり、電動機単体ではなく、モータドライブシステムとしてとらえられるようになってきた。パワーエレクトロニクスで駆動することにより、電源の制約がなくなった。

交流電動機は商用電源で使用する際には電源周波数や電圧が電動機の制約となるが、モータドライブシステムとすれば、このような制約は全くない。また、直流電源でも駆動できる。最高速度、電圧についてもパワーエレクトロニクスで制御可能である。例えば、単相100V電源で使われる家電品でも、内部には三相200Vの三相電動機が使われていることもある。モータドライブシステムでは、電源の制約は電力供給の制約とはなるが、電動機への制約ではなくなる。特定用途指向電動機の多くはパワーエレクトロニクスと1:1の関係となっている。

機電一体とは、機械と電動機を一体化することである。最も多くみられるのはインバータを電動機に組み込む一体化である。これは、インバータと電動機の接続ケーブルがない、ということである。外見からもモータドライブシステムとなる電動機である。これにより据え付けの問題もなくなり、ノイズや通信なども簡素化できる。一般用途向けに市販されているものもある。インテリジェントモータなどの呼び方をされることもある。

さらに機械との一体化も進んでいる。従来から、ポンプ類は電動機と一体になっていることが多いが、ポンプなどの機械の内部に電動機が配置されることが多くなってきている。例えば、自動車分野ではトランスミッションの内部に電動機とインバータを組み込んだ機器の開発が盛んである。これはe-Axleと呼ばれている。e-Axleは、そのまま電気自動車の駆動部分となるので、電気自動車の開発が容易になる。また、現在研究開発されている電動航空機でも機電一体の電動機を使用する方向となっているといわれている。

5 おわりに

今後の電動機は、汎用的、標準的な電動機と特定用途指向電動機に、さらに分かれてゆくと考えられる。汎用、標準品の動向は、小型、軽量、高効率と、従来と変わらないが、特定用途指向での様々な技術開発の成果が適用されてゆく。それにより、さらに小型、高効率な電動機が実現することは間違いがない。電動機の技術は古くて新しい技術なのである。

本講座の掲載号を以下に示す。

- | | |
|-------------------------------------|-----------------------------|
| 1 電動機を理解するための電磁気と電気回路
(2022年4月号) | 5 誘導電動機 (2022年12月号) |
| 2 電動機の基礎技術 (2022年6月号) | 6 かご型誘導電動機の駆動と制御 (2023年2月号) |
| 3 直流電動機 (2022年8月号) | 7 巻線型誘導電動機 (2023年4月号) |
| 4 直流電動機の制御と永久磁石直流電動機
(2022年10月号) | 8 同期電動機 (2023年6月号) |
| | 9 電動機の絶縁 (2023年8月号) |
| | 10 電動機技術の動向 (本号) |

1991年に制定された旧文部省の学術用語集では「電動機」と呼ぶことになっており、「モータ」という呼び方はカタカナ語の後に続くときのみ使うこととされている。例えばニアモータなどである。

JCA 規格のご案内

JCAS 1301-2016 軌条上を走行するクレーンの電気設備に関する接地の指針

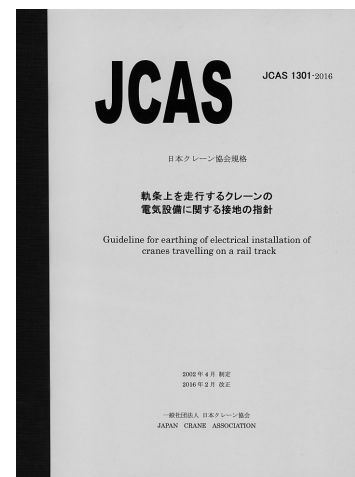
A4版 定価1,048円 (税込)・送料実費 会員割引もあります。

掲載内容

お申し込みは、本部・技術部へ

この指針は、軌条上を走行するクレーンの電気機械器具について事業者が、電気設備技術基準（平成24年9月14日改正 経済産業省令第68号）、電気設備技術基準の解釈（平成26年7月18日改正）に基づいて、接地工事を行う場合等に参考とするための事項を判り易く示しています。

クレーンに樹脂製車輪が多用化されてきた状況を背景として本指針が作成されました。しかし、高圧、特別高圧を使用する大型クレーンには樹脂製車輪が使用されておらず、これらの接地はメーカーとユーザー間で個別に仕様を定めている現状にあることから、今回の改正では、改正後の電気設備技術基準に準拠し、かつ、低圧に関する事項を重点に示しました。



一般社団法人 日本クレーン協会