解説

最新の電磁モータ

Recent Trend on Electrical Motors

百目鬼 英雄* *オリエンタルモーター（株）研究部

Hideo Dohmeki* *Oriental Motor Research

1. はじめに

電磁力を応用した電磁モータは（以降、単にモータと呼ぶ）、100年以上の歴史を持ち、小形高出力、軽薄短小、省エネルギーというように、時代背景を反映する要求に応えるべく研究・開発が行われてきた。

近年のモータの性能向上は、永久磁石の進歩に負うところが大きく、希土類磁石の実用化・特性改善とともに飛躍的に性能が向上した。すなわち、アルニコ磁石を有効に利用するハイブリッド形ステッピングモータ、フェライト磁石を応用したブラシレスDCモータ、希土類永久磁石を応用したACサーボモータが開発されてきた。さらにモータを駆動するパワーエレクトロニクスの進歩との相乗効果で1980年代後半から永久磁石モータは、著しい進歩を遂げている[1]。

最近のモータは、環境問題による要求から省エネルギーを目指した高効率化と、電気自動車の主機用途に対応する速度制御範囲の大幅な拡大を目的とした開発で成果が上がっている。ここで注目されたのが、リラクタンストルクを応用したモータである。また、携帯電話の振動用モータに代表されるようにモータの極限までの小形化が迫られている。本稿では、これらモータの最近の動向を概説する。

2. 永久磁石モータの進化

2.1 ACサーボモータの小形・高出力化

永久磁石のエネルギー積の向上とともに、モータはその能力を有効に使えるように設計を見直し、構造を変化させてきた。特に顕著な改善が行われたものがACサーボモータである。基本構造は交流モータを出発点としているため、次節で述べる表面磁石形に分類されるものである。

ACサーボはメンテナンスフリーを特徴とするため、機器の中に埋め込まれて使用されることが多い。機械全体の小形化のために、モータの小形化が重要であった。モータ

図1 ACサーボモータ質量の推移

の性能改善の経緯を図1に示す[2]。

開発当初は、交流モータの延長で設計がされていた。ステータは図2で示すように全節巻線が施され、極数も4極のものが大半であった。永久磁石も希土類磁石を使用しても160[kJ/m³]程度のエネルギー積のものであったが、従来のDCサーボと比較し定格回転速度が3,000[min^{-1}]と高速化されたことで、当時としては非常な高性能化が実現された。

高性能化の第1ステップは80年代後半に行われた、ステータ構造をブラシレスDCモータで行われていた非重ね集中巻とすることであった。これにより銅損を減少することによる性能改善が行われた。90年代に入り、ネオジウム磁石が実用段階に入り、エネルギー積が400[kJ/m³]以上と従来とは比較にならない展開が起こった。高エネルギー積を有効に使うためには、従来の4極構造では磁気回路が不適切であったため、多極構造が採用されるようになり、6極、8極構造が主流となった。同時にステータ製造技術にも革新が興った。モータのスロットに巻線するためには内側から巻かなくてはならず、巻線の密度を上げて巻くことができなかった。ソレノイドコイルのようにボビンに巻線をする場合には整列巻線が可能である。これに着目して、ボビンコイルでステータを構成する構造の開発が行われた。ステータをヨークとティースに分割しティースにボビンを挿入した後にヨークと結合する方法や、ステータティースを一つずつ分割し、それぞれに巻線を施した後にステータ

原稿受付 2003年6月30日

キーワード: Electric Motor, Reluctance Torque Assisted Motor, Stepping Motor, DC Motor

*〒277-8530 千葉県柏市篠籠田1400

*Kashiwa-shi, Chiba

図2 磁石トルクとリラクタンストルクによる分類

とする方法が開発された。これにより、従来巻線の密度を50%程度しか取れなかったのに対し、80%以上の高密度実装が可能となり飛躍的な銅損の低減が実現された。

これらの技術進歩により、この15年でモータの小形・軽量化が進み、容積で約1/3~1/4、質量で1/2~1/3のモータが製品化されている。

2.2 リラクタンストルク応用モータ

モータのトルク発生原理として、大きく、磁束と電流の相互作用によって発生するいわゆるフレミングの左手則で説明されるものと、磁気エネルギーの勾配すなわちインダクタンスの位置による磁気エネルギーの変化を利用するものがある。前節で述べたACサーボでは前者のトルクのみが使われているが、より極限までモータの性能を発揮させようと後者のトルクを積極的に利用する研究が進んでいる。

リラクタンストルク応用モータは、開発途上のモータでありさまざまな構造のものが開発・実用化されており、今後も目的に合わせた改良が加えられていくと思われる。基本的には、永久磁石を使用するPM (Permanent Magnet) モータと、使用しないリラクタンストルクモータ (RM) に分類される。さらに、PMモータは、永久磁石の配置により表面磁石形 (SPMSM) と埋込磁石形 (IPMSM) に分類され、リラクタンストルクモータは、正弦波電流で駆動するシンクロナスリラクタンストルクモータ (SynRM) と、ブラシレスDCモータのように矩形波電流で駆動するスイッチトリラクタンストルクモータ (SRM) に分類される。図2は、構造を示すとともに、磁石トルクとリラクタンストルクの配分により、さら

に詳しく分類したものである。

左に行くほど磁石トルクを使い、右に行くほどリラクタンストルクを使っていることを示した図である。さらにそれぞれは二つの部分に分けられており、SPMSMでも、リラクタンストルクを発生するように全周を永久磁石で覆わず、鉄心で突極を設けた形状が開発され、インセット形と呼ばれる。IPMSMは、永久磁石のトルクを主トルクとするか、リラクタンストルクを主トルクとするかで分類している。実際には、永久磁石の使用量によって決定される。RMは、正弦波駆動をするものと、方形波駆動をするもので分類している。

リラクタンストルク応用モータは、図3に示す電流位相・トルク特性を持っている。永久磁石によるトルクは、電流位相ゼロで電機子電流を流すことにより最大のトルクを発生する。リラクタンストルクは、永久磁石トルクの2倍の周期で発生し、電流位相を進めることで正トルクが発生する。電流を進めることで磁石トルクが減少する分、リラクタンストルクが発生し、その両者の和が最大となる点で運転することで、より優れた特性を得ようというものがこのモータの考え方である。リラクタンストルクはインダクタンスの差が大きいほど（これを突極比と呼ぶ）発生し、突極比を最大限に大きく設計したものが永久磁石を使わないSynRMである。

定格回転数までの利用であれば、表面磁石が最もよい特性を得られる。定格回転数を超えて利用する場合、誘導起電力を低くするため、弱め界磁といって永久磁石の磁束を

図3 リラクタンストルク応用モータの電流位相・トルク特性

減らす方向に電流を制御する技術が使われる（等価的に電流位相を進めることになる）。表面磁石形では磁束を減らすことだけしかその電流は使えないが、リラクタンストルクを発生するモータでは、その電流をより有効に利用できる。この特徴を電気自動車用モータでは有効に利用できるよう設計がなされ、そのためSPMSMでも、少しでも突極性を持たせようと、図2の左から2番目のような構造が開発されている。

モータ効率を最大限にする研究は、トップランナー方式が適応されたエアコンの圧縮機で進んでいる。この圧縮機では冷媒中にロータが入るため、表面磁石形はSUS管がかぶせられているという特徴があり、その損失分でIPMSMより効率が悪化するという問題点がある。同一条件で効率が極限まで追求された実験結果が報告されている[4]。図4に同一ステータでロータを入れ替えた場合の最大効率を測定した結果を示す。回転数4,000 [min^{-1}] で測定されたもので、従来使用されていたインダクションモータ(IM)では88%程度の効率であったのに対し、IPMSMで95%という非常に高い効率が得られることを示している。またSynRMも90%程度の効率が得られ、IMと比較し高効率が得られるということを示している。

このように、リラクタンストルク応用モータは、磁石トルクとリラクタンストルクのバランスにより比較的トルク特性を自由に設計できる利点を有しており、用途に合わせた設計をすることでその能力を最大限に発揮させることができる。位置検出器を必要とし、インバータによるベクトル制御が可能になって初めて実用化されたモータであり今後の更なる展開が期待され、位置検出器を必要としないセンサレス制御も研究が進んでいる。

3. 極小化するモータ

マイクロマシンほどの微細ではないが、ロボットの指や手首といった微小な部分の動作を実現するため、モータの極小化の開発も最近の話題である。

図4 モータ効率の比較

3.1 ハイブリッドステッピングモータの極小化

ステッピングモータは、位置センサを必要とせずオープンループで位置決めできるという、制御モータとして優れた特長を持っている。PM形モータでは、外形6[mm]などミリサイズのモータが製品化されているが、ステップ角が20度と非常に大きい欠点を持っている。

ハイブリッド形ステッピングモータは、発生トルクが大きく、ステップ角も最小のもので0.72度と非常に微細な位置決めにも適応できる能力を持っており、カラーコピー機の倍率調整用途などに使われている。モータの構造は、軸方向に磁気回路を構成し周方向に電機子巻線を巻く必要があるなど小形化を難しくしていた。最近、図5に示すように人差し指にのる20[mm]サイズのモータが製品化された。ミリサイズではないものの、基本ステップ角0.72度と通常のステッピングモータと同等の性能を実現した点に特徴がある。

実現した背景には、磁石の高性能化がまず挙げられる。すなわち薄い磁石で軸方向に磁路をとっても減磁しないだけの高い保持力を持った磁石が開発されたことである。さらに、ステータの製造についても、通常のステータでは電磁鋼板をカシメ積層する工程で製造するが、これほど小形になると十分な精度を得られない難点がある。電磁鋼板に接着剤を塗布しておき、比較的低温加熱で接着できる素材が開発されることで、精度よくステータが製造可能となるなどで製品化ができた。

20[mm]の取り付けサイズで、質量50[g]が実現され、4,000 [min^{-1}] で0.01[Nm]のトルクを持っており、ロボティクスだけでなく、光学系の駆動に応用できるのではないかと期待している。

3.2 DCモータ

DCモータのミリサイズ化は、携帯電話の小形化とともに振動用モータの超小形化として開発が進んだ。1995年の携帯電話では、本体の重さが150[g]あったのに対し、1999

図5 20 [mm] 角のステッピングモータ

図6 DC モータの構造図

年には60 [g] を切る重量のものも製品化されるまでに軽量化が進んでいる。これに対応すべく、モータサイズも直径6 [mm] であったものが、直径4 [mm] で製造されるまでに極小化の開発が進んだ[6]。

極小化されたDCモータの構造は、図6に示すようなコアレスのモータである。永久磁石はネオジ系の高性能磁石が使われ、亀甲型に巻線を巻き、それを円筒状に整形することで電機子が製作されている。高効率を実現するためには、巻線の線径を微細なものとする必要があり、25 [μ m] の線径のもので巻線が実用化されている。テンションを掛けてこのような微細な巻線を施す巻線機は、我が国固有の高い生産技術があって初めて可能とされたものである。ブラシも、電圧降下を極力低減するため、貴金属ブラシが使用されている。ミリサイズのモータは出力を大きくするた

め高速回転となり、アクチュエータとして使うためにはギアを用いる必要がある。その代表的なものとして遊星ギアがあり、ミリサイズのものが同様に製品化されている。

最近米粒大のDCモータが開発されたが、ここまで小さくなることはやブラシ付きでは困難で、ブラシレスタイプが採用された。すなわち、図6では電機子が回転するのに対し、電機子コイルを固定し、永久磁石を回転させることにより小形化が実現されている。ここまで来ると、磁極位置を検出するセンサも取り付けすることはできず、センサレスでの駆動となっている。

4. ま と め

モータは、100年もの歴史を持つことから研究対象としてあまり高い評価が得られないものの、常に縁の下の重要な役割を担い、産業の発展に貢献してきた。また、従来顧みられなかったモータ構造が、駆動技術の進歩でよみがえる例も見られる。例えばリラクタンストルク応用モータは、モータが発明された当時から考えられていたものであるが、制御技術の進展と省エネルギーという時代の要求がマッチすることにより、最近になって初めて実用化の段階になったものもある。

今後も、時代の要求に応えるべくモータが発展することを期待している。

参 考 文 献

- [1] 百目鬼：高効率モータ技術，日刊工業新聞社，2001.
- [2] “小形モータの高性能化”，電気学会技術報告，no.744，1999.
- [3] “特定用途指向型リラクタンストルク応用電動機の高性能化”，電気学会技術報告，no.920，2003.
- [4] 村上他：“シンクロナスリラクタンストルクモータと各種分布巻モータの特性比較”，電気学会論文誌D，vol.120-D，no.8/9，pp.1068-1074，2000.
- [5] オリエンタルモーターカタログ：取付角20 mm，2002.
- [6] 下垣：“携帯電話用振動モータの技術動向”，モータ技術シンポジウムテキスト，2001.
- [7] 並木精密宝石ホームページ：<http://www.namiki.net/fdcc-j.htm>

百目鬼英雄 (Hideo Dohmeki)

1953年生。1977年3月武蔵工業大学電気工学科卒業。1983年オリエンタルモーター株式会社に入社。現在、同社技術研究所研究部部長。武蔵工業大学客員教授。1988年真空協会技術賞受賞。工学博士。IEEE会員など。

(日本ロボット学会正会員)