解説

Review

高性能永久磁石モータの技術動向と応用

石橋利之*

Technology Trend of High Performance Permanent Magnet Motors and Their Applications

Toshiyuki Ishibashi

Synopsis

Permanent magnet motor technology keeps improving because of the progress of the permanent magnet, the semiconductor device and the motor control technology. This article describes the technology trend of high performance permanent magnet motors and their applications.

Remarkably compact, light-weight and high performance permanent magnet motors were obtained by using a Nd-Fe-B permanent magnet. The performance of permanent magnet motor is correlated closely with the property of permanent magnet. The high density winding technique and the cooling method of molding with a heat-conductive resin are effective for down-sizing of motor. However, the high energy permanent magnet increases the cogging torque of motor. A magnetic field analysis is effective in reducing the cogging torque. The ultra-small-sized motors and the large torque motors are the recent topics.

Permanent magnet motors are widely used instead of induction motors or hydraulically-operated system. The inverter driven permanent magnet motors have enable industry facilities to realize higher performance and energy saving. The compact and flat-shaped permanent magnet motor removed a machine room from the elevators. The electric injection molding machines have brought about improving an energy conservation and a working environment. The industrial robots have flexible solutions for industrial automation, for practically all manufacturing and material handling requirement.

The improvement of the property, the quality and the reliability of the permanent magnet is expected for the permanent magnet motor.

1. まえがき

モータ技術は 100 年以上の歴史を有しており、理論的・原理的には完成されたと思われる。しかし、周辺技術の進歩によって、モータ技術は今でも発展を続けている。

永久磁石モータは、永久磁石の高性能化、半導体デバイスの性能向上、制御技術の進歩により急速に進化し続けており、広範囲に普及している。

本解説では、高度な制御により駆動される永久磁石モータについて、その技術動向と応用について述べる。

2. 各種モータの種類と特徴

永久磁石モータは、永久磁石の発生する磁石磁界を有効に利用することから、小型・軽量化と高効率を実現してい

る。最近はりニアモータも普及し始めているが、ここでは回転型モータを取り上げる。

2.1 各種モータの比較

モータには様々な種類があるが、高度な制御により駆動するモータには、DC モータ、誘導モータ、同期モータなどがある。

DC モータ（直流モータ；DCM と略される）は、歴史的に最も古く、その制御性の良さから可変速モータとして用いられている。しかし、機械的な整流機構（整流子とブラシ）があるためメンテナンスが必要で、高速回転ができないため小型・軽量化で限界がある。

誘導モータ（誘導電動機；IM）は、固定子巻線による回転磁界と回転子速度の差（すべり速度）により回転子の二次巻体に電圧が誘起し電流が流れトルクを発生する。構

造が簡単で堅牢であり、比較的低コストでシステムを構築することができ、インバータ駆動システムとしての完成度も高い。しかし、すべりに比例した損失（二次銅損）が回転子に発生するため効率は高くない。

同期モータ（SM）である永久磁石モータ（PMモータ；PMSM）は、永久磁石を配置した回転子が、固定子側の回転磁界に吸引・反発し、同期速度で回転する。永久磁石を回転子表面に配置した表面磁石モータ（SPMモータ；SPMSM）では磁石トルクだけであるが、回転子内部に永久磁石を埋め込んだ埋込磁石モータ（IPMモータ；IPMSM）では、リラクタンストルクも有効に利用するため、効率やトルク／電流特性を改善できる。

ただし、永久磁石モータは減磁の危険性を有している。運転中の異常な加熱と過電流による印加磁界が同時に作用したり、保磁力が異常に低いなど不適切な磁石を選んだ場合には、搭載した磁石は減磁し、モータ特性が低下することが報告されている¹⁾。

同期モータ（SM）には、他にリラクタンスモータ（RM）であるスイッチトリクタンスモータ（SRM）やシンクロナスリラクタンスモータ（SynRM）がある。

各種モータの諸特性²⁾を Table 1 に、効率特性³⁾を Fig.1

Fig.1. Variation of motor efficiency for various motors; induction motor(IM), surface permanent magnet synchronous motor(SPMSM), and interior permanent magnet synchronous motor(IPMSM).

Table 1. Comparison of various motors; DC motor(DCM), induction motor(IM), surface permanent magnet synchronous motor(SPMSM), interior permanent magnet synchronous motor(IPMSM), and switched reluctance motor(SRM).

	DCM	IM	SPMSM	IPMSM	SRM
max. efficiency [%]	85~89	94~95	85~97	95~97	<90
efficiency [%] (10 % loaded)	80~87	79~85	90~92	91~93	78~86
max. rotation speed [min ⁻¹]	4,000~6,000	9,000~15,000	4,000~10,000	9,000~12,000	<15,000
cost/output [\$ /kW]	10	8~12	10~15	9~13	6~10
cost of controller	1	3.5	2.5	2.5	4.5
durability	good	excellent	good	excellent	good
reliability	fair	excellent	good	excellent	good

に示した。最高回転数、堅牢性、信頼性の面では誘導モータが、効率、軸出力、制御性の面では永久磁石モータが適していることが分かる。

2.2 永久磁石モータの回転子構造

永久磁石モータの回転子については、様々な構造が提案されている⁴⁾。代表的な回転子構造を Fig.2 に示した。いずれも4極に整理し直している。

Fig.2(a) のリング形状の永久磁石を回転子コアの表面に配置する SPM 構造は、小型永久磁石モータで多く採用されている。ラジアル異方性または極異方性磁石が多いが、極毎に分割した場合には直線異方性磁石が用いられることもある。

Fig.2(b) は極毎に永久磁石が独立している SPM 構造で、直線異方性磁石を用いることが多い。図のようにかまぼこ形状の偏肉磁石を採用することもある。

大型永久磁石モータでは IPM 構造であることが多いが、平板形状で直線異方性磁石をロータコアの内部に配置する Fig.2(c) の構造が採用されることが多い。

3 永久磁石モータの技術動向

産業用途などに用いられる永久磁石モータには、インバータで駆動する高効率を指向する可変速ドライブもあるが、ここではより高度な制御が可能なサーボドライブ用永久磁石モータであるサーボモータについて、その小型・高性能化、超小型化、大容量化について述べる。

Fig.2. Typical rotor configurations of permanent magnet motors; (a) and (b); surface permanent magnet type (SPM), and (c); interior permanent magnet type (IPMSM).

3.1 小型・高性能化の推移

サーボモータは、半導体製造機器、実装機、各種産業用ロボット、金属加工機などに適用されている。サーボモータの製品例を Fig.3 に示す。サーボモータには、以下の特性が要求される。

- (1) 小型・軽量化(機器の小型化 ,可動部の動作速度向上)
- (2) 高パワーレート化 (機器の高速位置決め)
- (3) 低コギングトルク化 (機器の低トルクリプル)

Fig.4 に、サーボモータの重量と定格パワーレート密度の推移 (200 W 級) を示した。ここで、定格パワーレートは、「モータ単体を定格トルクで加速したとき、モータが発生する出力速度」と定義され、加減速性能を示す動的な操作性能値である。高パワーレート化は、モータの急加減

Fig.3. Servo motors(Sigma series).

Fig.4. Change in motor weight and power rate density.

速を可能とし、機器の高速位置決めを実現できる。

Table 2 に新旧のサーボモータの特性を比較したが、パワーレート密度が約 50 倍、重量が 1/7、体積が 1/9 と、大幅な小型・高性能化が実現されている。

永久磁石の最大エネルギー積の推移を Fig.5 に示した。永久磁石の高性能化はサーボモータの小型・軽量化と強い相関関係があるが、他に巻線技術や冷却技術の向上も重要な役割を果たしている。

3.2 小型・高性能化技術

サーボモータの小型・高性能化は、電気装荷向上、磁気装荷向上、冷却改善により実現された⁵⁾。モータの大きさは、内部で発生する熱に制約される。そこで、モータの小型化のためには、発生熱の低減と発生熱の有効な冷却が必要となる。高パワーレート化のためには、モータイナーシャの低減が必要であるが、モータの小型・軽量化により必然的に実現できる。さらに、高性能永久磁石の適用により磁石使用量を低減させることも有効である。

従来のサーボモータの巻線は、固定子コアのスロット開口部から行っていたため巻線量に制約があり、そのスペースファクタ (スロット断面積に対する巻線断面積の割合) は 40% 程度であった。そこで、固定子コアを分割することにより、依積み完全整列巻線が可能となり、スペースファクタを 70% まで高めることができた。結果、巻数を変えることなく巻線を太くでき、巻線抵抗低減 = 銅損低減

Fig.5. Change in maximum energy product of various magnets.

Table 2. Change in servo motor specification.

	DC servo (1959)	AC servo (1998)	Ratio (1959 to 1998)
rated output [kW]	185	200	-
power rate [W/s]	6.1	38.2	6.3
power rate density [(W/s)/kg]	0.76	35	46
flange size [mm]	130	80	0.62
weight [kg]	8.0	1.1	0.14
volume $10^{-3}[\text{m}^3]$	3.1	0.35	0.11

を可能にした。

巻線からの発生熱の放熱性改善のため、スロット内部および巻線端に熱伝導性の良い熱硬化性樹脂をモールドした。結果、熱遮断されていた巻線と絶縁部間およびコアと絶縁部間の熱伝達が良くなり、冷却効率を改善できた。

以上の高密度巻線による銅損低減とモールドによる冷却効率改善により、電気装荷を向上させた。

モータの小型化により永久磁石の寸法が制約されるが、高性能永久磁石はこの制約を補うだけでなく、さらなる磁気装荷の向上を可能にした。

コギングトルクは、ギャップ中のエネルギーの変化に起因し、ギャップ中の磁束密度の二乗の総和に比例する。永久磁石の高性能化は、モータの小型化や高パワーレート化には有効であるが、コギングトルクを増大させてしまう。そこで、スキューや分数スロット、内つなぎコア構造の採用により、ギャップ中の磁束密度の変動を抑制した。さらに磁界解析の活用により、磁石の形状や磁気回路、着磁条件などを最適化し、コギングトルクを低減させた⁶⁾。

3.3 超小型化技術

ノート型パーソナルコンピュータや携帯情報機器(PDA)、携帯電話の小型・薄型化は、それらを組み立てる電子部品実装機に搭載するサーボモータのさらなる小型化を要求する。高性能永久磁石によるモータの小型化、および半導体部品の小型化と実装技術の高密度化により、モータおよびエンコーダの小型化が可能となった。

Fig.6 に超小型サーボモータの製品例を示す。サーボモータの定格出力とモータ体積の関係を Fig.7 に示した。Fig.8 に同一外径のサーボモータ(10 W)とステッピングモータのトルク曲線を示した。超小型サーボモータは、ステッピングモータと比べて高トルクであるだけでなく、高速回転を実現しており、搭載した機器の高速化を可能とした⁷⁾。

3.4 大容量化技術

従来、数十 kW とした大容量の駆動には、油圧サーボ

Fig.6. Ultra-small-sized servo motors(Sigma-mini series).

Fig.7. Change in motor volume with the rated output of servo motor.

Fig.8. Torque curves of servo motor and stepping motor.

が多く使われてきた。しかし、最近の環境への配慮やマシンの小型化・取り扱いやすさから、大容量サーボモータが射出成形機や大型のロボット、液晶用スピンドルなどに採用されている。

SPM 構造を大容量サーボモータに適用すると、インダクタンスが小さくなりすぎ、電流リップルの増大により磁石表面の渦電流損失が増大し、制御性が悪化するため、好ましくない。採用した IPM 構造は適度なインダクタンスを発生するため、電流リップルは小さく、永久磁石がコアの内側にあることから永久磁石表面の渦電流損失も低減でき、耐遠心力の面からも優れている。さらに、リラクタンストルクを有効活用することにより、永久磁石量を低減できた^{8),9)}。

Fig.9 に大容量サーボモータの製品例を示した。大容量サーボモータの用途は、輪転機や自動倉庫などの一般産業

機械分野にも広がりつつある。

4．永久磁石モータの応用

永久磁石モータの応用例として、ポンプ、エレベータ巻上機、射出成形機、産業用ロボットを取り上げ説明する。

4.1 ポンプ

ファン、ポンプなどの風水力機械やコンベヤ、昇降機などの搬送機械などには、従来は電源周波数に準じた速度で駆動する誘導モータが用いられてきたが、省エネルギーを指向した汎用インバータと大型永久磁石モータによる可変速システムが増加している。

サーボドライブが高速・高精度位置決め、同期制御に適しているのに対し、インバータ駆動の可変速ドライブは省エネルギー、可変速運転に適している。

可変速ドライブの製品例を Fig.10 に示した。ポンプなどに用いる可変速システム用モータには、以下の性能が要求される。

- (1) 高効率（適用機器の省エネルギー）
- (2) 小型・軽量化（適用機器の小型・軽量化）

Table 3 に示したように、永久磁石モータは、誘導モータと比較して損失を低減し、小型・軽量化を実現できる。

ポンプに適用した事例¹⁰⁾を Fig.11 に示した。従来の誘導モータの商用電源駆動（一定速運転）のバルブ制御（IM+valve, 75% 流量時の損失：2.6 kW）と比較すると、インバータ駆動による速度制御（IM+INV, 0.60 kW）は損失を大幅に低減でき、IPM モータ（IPMSM+INV, 0.43 kW）

Fig.9. Large torque servo motor(Sigma series).

では省エネルギー効果がさらに大きくなることが分かる。

永久磁石モータの適用による省エネルギー効果は、環境保全だけでなく経費削減にもつながる。

4.2 エレベータ巻上機

高齢者、身体障害者等の公共交通機関を利用した移動の利便性・安全性の向上を促進するため、2000 年 11 月 15 日に「交通バリアフリー法」が施行され、旅客設備などへのエレベータの設置が急増している。エレベータ巻上機用

Fig.10. Variable speed drive motor(VS-686SS5).

Fig.11. Change in motor power loss with different motors and drives.

Table 3. Motor specification of IM and IPM motor.

	IM	IPMSM	Ratio (IM to IPMSM)
output [kW]	55	55	-
power loss [kW]	8.3	5.3	0.64
efficiency [%]	86.9	91.2	1.05
weight [kg]	330	173	0.52
volume [m ³]	0.058	0.032	0.55

モータとしては、従来の直流モータや誘導モータが用いられてきたが、最近になりインバータ駆動の永久磁石モータが採用され、急速に普及し始めている。エレベータ巻上機用モータとしては、以下の性能が要求される。

- (1) 高効率（エレベータの省エネルギー）
- (2) 小型・軽量・薄型（エレベータの設計自由度拡大）
- (3) 低振動・低騒音（エレベータの乗り心地改善）

エレベータには、乗り心地の観点から駆動系にギアがないギアレス巻上機が一般的に用いられている¹¹⁾。ギアレス化のためにはモータの多極化が必要であるが、従来の誘導モータでは、極数増加にともない力率が低下するため、8極程度が限界であった。これに対し、永久磁石モータでは、極数に関係なく高力率・高効率駆動が可能であるので、多極化（20極以上）によるギアレス化が実現できた。さらに、多極化は、鉄心外径の縮小やコイルエンド長の短縮にもつながり、モータの小型化・薄型化にも貢献している。

Fig.12 に機械室レスエレベータの概略図を示した。小型化された巻上機および制御盤を昇降路内に配置することにより、機械室をなくすることができた。結果、エレベータ設置の自由度が大幅に拡大し、建物を有効活用できるようになった。次世代機械室レスエレベータでは、Fig.13 のようにモータを薄型化¹²⁾することにより、乗りかごと昇降路壁面の間に巻上機用モータを設置できるようになり、いっそうの省スペース化が実現できている。

4.3 射出成形機

射出成形機は樹脂成形機のひとつで、溶融させた樹脂を金型に充填させ、加圧、冷却し、取り出すことによって樹脂成形体を製造する機械である。射出成形機は、数～数十kW以上の大きなサーボ出力を要求することから、従来は油圧サーボが多用されていた。近年、永久磁石の高性能化によりサーボモータが大容量化したので、省エネルギーや環境性能に優れた電動式射出成形機が普及している。

Fig.14 に射出成形機の模式図を示す。射出成形機は、材料を可塑化計量する可塑化軸、材料を金型へ押し出す射出軸、材料を一定力で締め付ける型締め軸、成形品を金型から取り外す突出軸からなる。電動式射出成形機では、完全に電動化した場合には4軸にサーボモータを搭載し、直圧方式で型開閉動作と型締め動作に用いるサーボモータを分ける場合には5軸となる^{8),9)}。

射出成形機用サーボモータの製品例をFig.15 に示した。射出成形機用モータには、以下の性能が要求される。

- (1) 大容量化（電動式の大型化）
- (2) 高効率化（省エネルギー）

Fig.12. Elevator without a machine room.

Fig.13. Flat-shaped traction motor for elevator.

Fig.14. Schematic figure of injection molding machine.

電動式射出成形機は、従来の油圧式射出成形機と比較すると、省エネルギー（電力消費量が1/3～1/5以下）、生産性向上（サイクルタイムが4割前後短縮）、成形品の高品位化（高精度、薄型化）、作業環境改善（加工時に潤滑油を使用しない）といった特長を有する。

型締め力15～300トンの小型電動式射出成形機は、携帯電話やデジタルカメラの部品、コンパクトディスクケース、コネクタなどの成形加工向けとして多く使用されている。

Fig.15. Servo motor for injection molding machine(Sigma series).

Fig.16. 6-axis vertical multi-joint robot.

Fig.17. Industrial robot for arc welding(MOTOMAN-UP6).

る。サーボモータのさらなる大容量化により、型締め力が1000 トンを越える電動式射出成形機も登場している。

4.4 産業用ロボット

産業用ロボット(以下ロボットと略す)は、作業の自動化の手段として生産ラインに導入されてきたが、その役割は、自動化からコストミニマムを追求した生産手段へと変化している。ロボットには、高い生産性や付加価値の追求、省スペース、稼働率の向上が要求されている。

6 軸垂直多関節ロボット¹³⁾について説明する。Fig.16 に示したように、旋回(S 軸)、下腕傾動(L 軸)、上腕傾動(U 軸)、手首旋回(R 軸)、手首振り(B 軸)、手首回転(T 軸)の6 個のサーボモータが搭載されている。各軸の最大動作範囲は 240 ~ 400 ° 程度であり、サーボモータには減速機を付けている。

アーク溶接用6軸垂直多関節ロボットの製品例をFig.17 に示した。ロボット用モータには、以下の性能が要求される。

- (1) 小型・軽量(高速化、下部軸の負荷軽減)
- (2) 耐振動・衝撃性(先端軸の高速での加減速動作)

アーク溶接以外にも、スポット溶接、組み立て、ワークハンドリング、パレタイズ、シーリング、検査などへと、ロボットの適用範囲は広がっている。

5. おわりに

高性能で安価な永久磁石の登場は、永久磁石モータの小型・高性能・高効率化を可能とし、適用機器の高性能・高機能化や小型・軽量化、省エネルギーを実現してきた。永久磁石の高性能化に加えて、今後は磁石特性のバラツキ抑制のための品質管理および減磁や耐食性などの信頼性確保が、いっそう期待される。

(文 献)

- 1) 石橋: 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-01-18I(2001)
- 2) 武田: 第3回マグネットセミナー, (1998) 37.
- 3) 大山: 電気学会論文誌D, 118(1998) 813.
- 4) 石橋 他: 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-01-54(2001)
- 5) 熊田 他: 安川電機, 56(1992) 114.
- 6) 熊田 他: 安川電機, 62(1998) 226.
- 7) 吉田 他: 安川電機, 62(1998) 247.
- 8) 長井 他: 安川電機, 62(1998) 243.
- 9) 吉田 他: 安川電機, 65(2001) 314.

- 10 永木 他:安川電機, 62(1998), 283.
- 11 須藤:電気学会誌, 119(1999), 516.
- 12 安川電機, 66(2002), 17.
- 13 松崎:オートメーション, 40(1995), 42.