

省エネルギーシステムを生かす可変速・高効率モータ

High-Efficiency and High-Performance Motor for Energy Saving in Systems

堺 和人
SAKAI Kazuto

新 政憲
ARATA Masanori

田島 敏伸
TAJIMA Toshinobu

省エネルギー(以下、省エネと略記)の装置とするために、負荷に応じて最適に可変速できる高効率のモータが要求されている。高効率で、広範囲に優れた可変速特性を得るため、永久磁石を適用した新規の磁気構成の回転子を持つモータを開発した。開発したモータは、永久磁石の磁束により無効な磁束を低減して出力を向上させる永久磁石式リラクタンスモータ(PRM)である。PRMは、1:5の広い可変速範囲、92~97%の高効率を達成しており、出力は8kW~250kWである。これらの特性により、PRMは車載、鉄道、昇降機などの可変速駆動システムに適している。

Recently, increasing importance has been placed on energy saving in various systems. This has created a need for a motor with high efficiency that is capable of operation over a wide range of speeds.

We have developed a novel permanent magnet reluctance motor (PRM) that has permanent magnets embedded in the rotor to increase the power. This PRM has a wide variable-speed range (1:5) and high efficiency (92 to 97%). With a power output of 8 to 250kW, the motor is suitable for application to electric vehicles, railway systems, and elevator systems.

1 まえがき

地球環境保全、エネルギーの有効利用のために装置の省エネ化が積極的に推進されている。装置の駆動源としてのモータが高効率であることはもちろんのこと、装置の総合運転効率の向上が望まれている。このため、装置の負荷に応じてモータの速度を可変して出力を最適に調整できるモータドライブシステムが要求されている。

また、交通分野でも、電気自動車(EV)、ハイブリッド自動車(HEV)の実用化、電車、エレベータなどの高効率化が進められ、高性能なモータがシステムの性能を決定する重要なコンポーネントとなっている。

ここでは、当社が新規に開発した、可変速運転に適し、高効率で低コストのモータについて述べる。

2 高効率モータ

永久磁石モータ(PM)、リラクタンスモータ(RM)は、回転子にコイルが不要であるため、回転子で発生するジュール損がなく、他のモータよりも効率が向上する。

PMは、近年発明された希土類磁石の適用により、出力密度(出力/モータ体積)も一般的な誘導モータ(IM)より高いものが得られるようになった。また、RMは回転子が鉄だけで構成されるため、回転子での損失はなく、簡素で堅固、安価である特長を持っている。このように基本的な構成上からも、PM、RMが高効率のモータとなり得る。

代表的なPM、RMの回転子の断面形状を図1に示し、可変速特性を図2に示す。なお、図の特性値は連続定格値を1とした換算値(A.U.)である。一般的な表面磁石型永久磁石モータ(SPM)は出力に必要な機内の磁界を永久磁石で形成するが、回転速度に比例して永久磁石の磁束により発生する誘導電圧が極めて高くなる。このため、誘導電圧が電源電圧以内になる範囲でPMの最高速度が制限される。

この欠点を改善したものが、磁性リング式永久磁石モータ(MR-PM)、埋込み型永久磁石モータ(IPM)、及びPRMである。

MR-PMでは、永久磁石に電流による逆磁界を作用させ

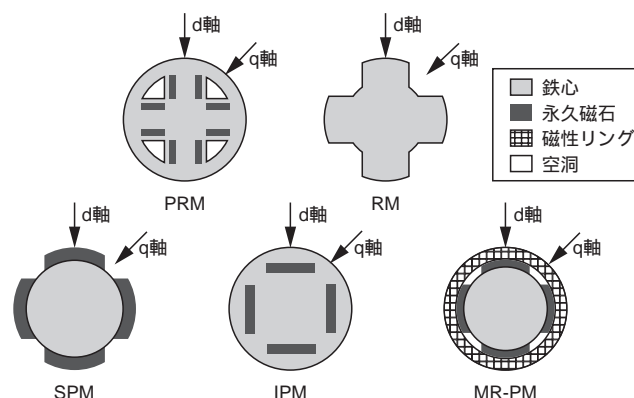


図1 各種モータの回転子断面形状 PMは永久磁石の配置、鉄心形状の自由度が高く、多様な特性を生み出す。

Rotor configurations

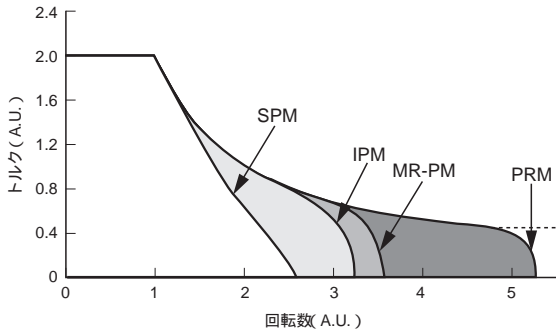


図2. 各種モータの可変速特性 可変速範囲が広いモータがシステムの高効率化, 低コスト化で優れている。
Performance of motors at variable speed

て永久磁石の磁束を減少させる, 弱め磁束制御を適用する。この制御状態では, 磁性リングが永久磁石の磁束と電流による磁束のバイパスの磁路となるので, 効果的に永久磁石の鎖交磁束を減少させることができる。永久磁石にとっては, 最大トルク時は強め磁束, 定出力領域は弱め磁束となり, 永久磁石の鎖交磁束量は1/4 ~ 1倍の範囲で調整できる⁽¹⁾。

IPMの発生トルクは, 永久磁石の磁束と電流で生ずるトルク(永久磁石トルク)成分と, 全トルクの20%程度のリラクタンストルク成分から成る。リラクタンストルクの成分に相当する永久磁石の磁束が少なくなるので, 永久磁石の磁束を抑制するために要する電流は少なくなり, また, 電圧の余裕ができるので可変速範囲も拡大する。

固定速では効率の良いPM, MR-PM, IPMであるが, 可変速運転は, 永久磁石の磁束を抑制するための電流を与えるため, 運転効率が低下する。また, 可変速範囲も3倍程度が限界である。

RMは永久磁石がないため, 誘導電圧は励磁電流だけで調整できるので可変速範囲は理想的には無限となる。しかし, 出力密度が低く, 力率が悪いので, 電源とモータは大型化する欠点がある。

3 PRM

RMは, 回転子の形状的な凹凸で磁気抵抗を変化させ, 磁気吸引力の差でトルクを発生する。しかし, このq軸方向となる凹部に漏れる磁束(q軸磁束)はトルクを低下させ, 力率を悪化させる要因となる。

PRM^{(2),(3),(4)}はリラクタンストルクを発生させるため磁気的な突極性を持つ構造の回転子とし, q軸方向の電流による磁束を相殺させるためq軸方向に磁束を発生させる永久磁石を回転子内に配置させる。PRMの基本的な断面を図3に示す。

q軸の鎖交磁束 ψ_q は, 次式で表わされる。

$$\psi_q = Lq' \cdot I_q = Lq \cdot I_q - m \quad \dots\dots\dots (1)$$

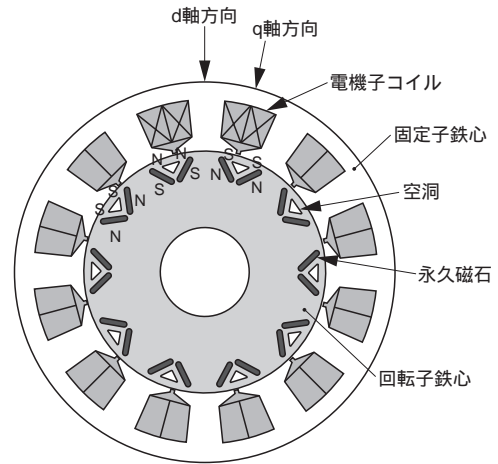


図3. PRMの基本構成 PRMは, 磁気的に凹凸を設けた鉄心とq軸電流を相殺する永久磁石から成る。
Structure of PRM

Lq' : 等価なq軸インダクタンス, Lq : q軸インダクタンス, I_q : q軸電流, m : 永久磁石の鎖交磁束
等価的な Lq' は永久磁石の鎖交磁束 m により調整することが可能となる。

巻線抵抗を無視すると, 電圧とトルクは次式で表される。

$$(V / \omega) = (Ld \cdot Id) + (Lq \cdot I_q - m) \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$T = k(d \cdot I_q - q \cdot Id) \\ = k(Ld \cdot Id \cdot I_q - (Lq \cdot I_q - m) Id) \quad \dots\dots\dots (3)$$

V : 電圧, ω : 角速度, Ld : d軸インダクタンス, Id : d軸電流, T : トルク, k : 定数

(2)式より, m により $(Lq \cdot I_q - m)$ は小となり, 力率が向上することがわかる。(3)式からは, 負のトルクとなる $Lq \cdot I_q \cdot Id$ を $m \cdot Id$ で減少させて, 全体トルクが増えることがわかる。これらから, $q = Lq \cdot I_q - m = 0$ にすれば, 電圧, トルク特性が良好になることがわかる。また, Lq は凹部のインダクタンスであり, 小であるので, m も小にできる。これより永久磁石の誘起電圧は低くなり, 図2に示すように可変速範囲・特性が向上する。

このように, PRMは永久磁石により Lq' を小とし, 突極比 (Ld/Lq') を大としたRMと考えられ, $q = Lq \cdot I_q - m = 0$ の理論式が成り立つモータを現実の形にしたものである。

PRMにおける発生トルクを, リラクタンストルク成分と永久磁石トルク成分に分離して示したものが図4である。最大トルクは電流位相角が 50° のときである。このとき, リラクタンストルク成分は全トルクの約60%となっている。また, 設計によりリラクタンストルクの割合は調整できる。

PRMの特長を次に示す。

- (1) 回転子の銅損がないので, 効率が向上
- (2) 磁石の誘起電圧が小なので, 広範囲の可変速が可能
- (3) 無負荷・軽負荷時の損失がほとんどない

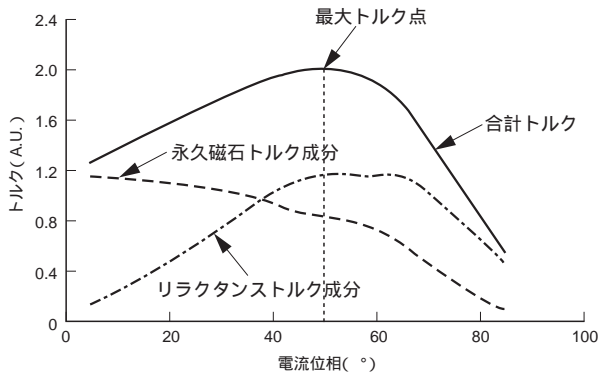


図4. PRMのトルク成分 PRMのトルクは、主にリラクタンストルクから成る。
Torque components of PRM

- (4) 磁石の使用量が少ない(10 g/kW),低磁気エネルギー積だが,安いフェライト磁石を適用できるので安価

4 PRM と IM の特性比較

汎用モータとして代表的なIMとPRMの基本的な性能の比較を行う。同一条件で評価するため,PRMはIMの固定子を組み合わせた。出力特性比較の結果を表1に示す。IMと比較して,PRMの出力は1.3倍,効率は4%向上し,高出力と高効率を同時に実現している。

表1. PRMとIMの基本性能比較
Comparison of PRM and induction motor (IM)

機種	IM	PRM
出力 (kW)	22	28
効率 (%)	89	93

これから,PRMは回転電気機械としての基本性能も優れており,汎用の高効率モータ,発電機としても適用できる。

5 新規開発のPRM

今回,当社が新規に開発したPRMの容量は8 kW ~ 250 kWである。PRMは磁氣的に強い非線形特性を持つため,有限要素法(FEM)による磁界解析で磁束の挙動を把握し,また最適設計を実施した。

解析で得られた磁束密度分布を図5に示す。(a)は電流がゼロ(0)の状態であり,磁束は永久磁石だけで形成され,電機子巻線と鎖交する磁束はわずかであることがわかる。(b)は最大トルクを発生している状態であり,電流による磁束がd軸の回転子の突極部分に集中していることが確認できる。このとき,q軸方向の鎖交磁束はほぼ0であるが,永久磁石

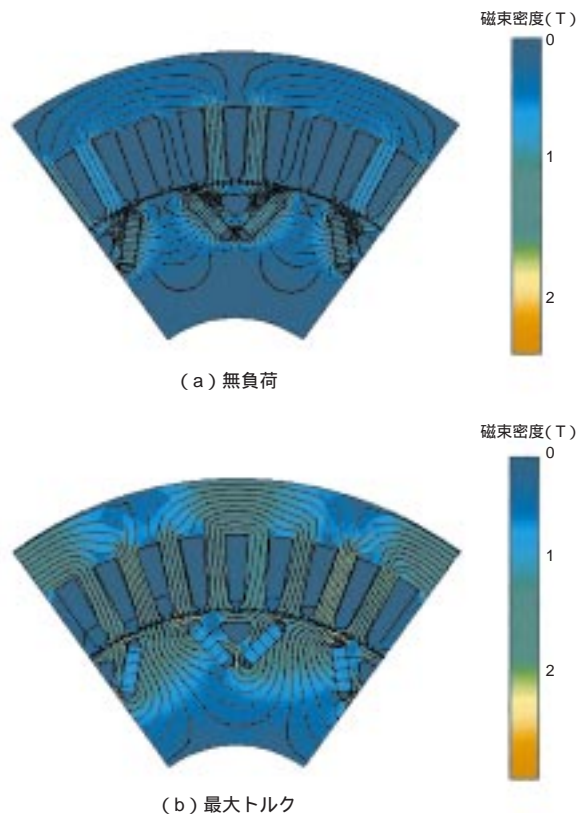


図5. PRMにおける磁束密度分布 PRMは,無負荷時には永久磁石による磁束はわずかである。
Distribution of flux density of PRM using FEM

内の磁束密度は0.65 T(テスラ)である。したがって,永久磁石の反磁界は小で磁氣的に安定であり,この状態で永久磁石が高温になっても不可逆減磁することはない。また,無負荷時の空隙磁束密度は0.3 ~ 0.5 Tであるから,無負荷・軽負荷時の鉄損はわずかであり,巻線が短絡された状態で回転させても磁石の誘起電圧による短絡電流は小である。このように,信頼性,安定性でも優れていることがわかる。

次に,最大出力250 kWの鉄道車両用PRMを用いて出力特性について述べる。可変速運転時の各特性値を図6に示

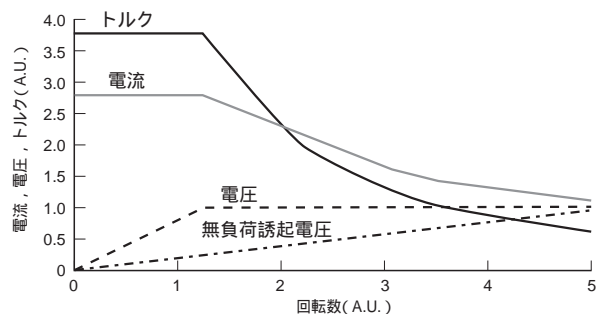


図6. PRMの出力特性 1:4の広い可変速範囲が得られ,磁石による誘導電圧も電源電圧以下である(解析値)。
Power characteristics of PRM

す。最高速度は基底速度の4倍であり、可変速範囲は従来モータの約2倍が達成されている。また、最高速度においても永久磁石による誘導電圧はインバータの出力電圧以下となっており、インバータ内のパワー素子、コンデンサなどを破損することはない。更に、惰行・軽負荷においても磁石の磁束を抑制する電流を流し続ける必要はないので、システムの総合効率も向上できる。最大トルクは、定格トルクの3.8倍の高い値が得られており、短時間で高トルクが必要とされるシステムにも適用できる。

次に効率について述べる。EV用PRMの可変速運転時の効率分布を図7に示す。最高効率は97%であり、90%以上の効率が領域中のほとんどを占めている。PRMは励磁電流(軸電流)成分を調整できるので、図7のように軽負荷から高負荷まで広範囲で高効率を得ることができる。

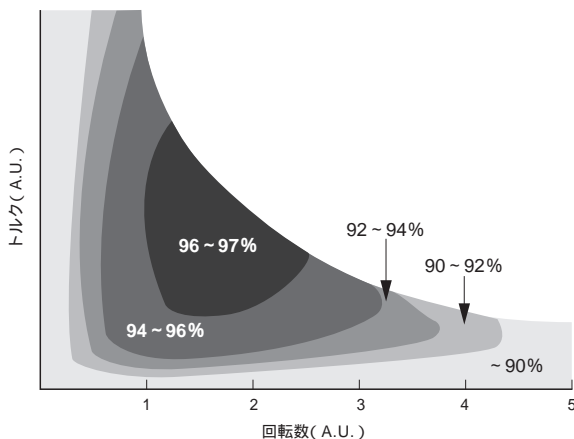


図7. PRMの効率分布 最高効率97%、軽負荷から高負荷まで広範囲で効率が良い。

Distribution of efficiency of PRM

各インダクタンスは図8に示すように変化し、電流が大きくなるにつれて L_d と L_d/L_q は減少する。これは固定子の鉄心の磁気飽和による影響が主要因となっている。

また、突極比を示す L_d/L_q は、鉄心が磁気飽和する電流の大きな領域(高トルク)でも約3と高い値が得られている。

6 あとがき

PRMは安価で高効率・高出力であり、高性能な可変速モータの一つである。PMは限定された範囲、条件において優れた特性が得られるが、PRMは設計自由度も高く、多様

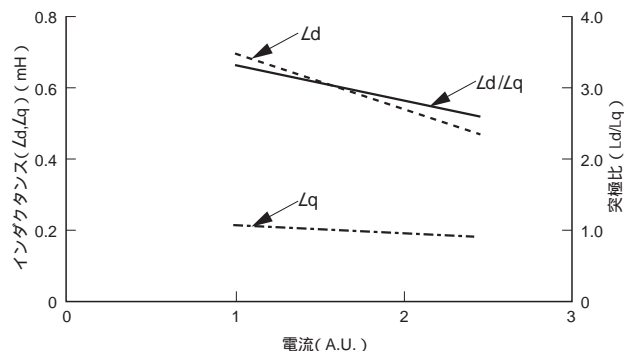


図8. 電流によるインダクタンスの変化 磁気飽和が生ずる電流でも突極比(L_d/L_q)は約3であり、高い値である。

Influence of current on inductance

な条件下でもシステムに最適な運転が可能となり、システムの総合運転効率を向上することができる。

PRMは、EVとHEV用の高性能・低コストのモータ、発電機、電車、エレベーターの省エネ化を図るための高効率のモータとして適用を進めており、更にパワーエレクトロニクス機器を含めて小形・高性能化された駆動システムとして展開を図る予定である。

文献

- (1) 堺 和人, ほか: “弱め界磁制御に適した永久磁石電動機の検討とFEMによる特性解析”. 電気学会論文誌D, 115, 4, 1995, p.436.
- (2) 堺 和人, ほか: “永久磁石式リラクタンス電動機の基礎特性”. 平成10年度電気学会全国大会. No.1002, 1998.
- (3) 堺 和人, ほか: “高効率・高出力の永久磁石式リラクタンスモータの開発”. 平成11年度電気学会全国大会. No.1029, 1999.
- (4) 中沢洋介, ほか: “永久磁石式リラクタンスモータの弱め界磁制御”. 平成12年度電気学会全国大会. No.4-140, 2000.



堺 和人 SAKAI Kazuto, D.Eng.

電力システム社 電力・産業システム開発センター 回転機器開発部主務, 工博。回転電機の研究・開発に従事。電気学会会員。

Power and Industrial Systems Research and Development Center



新 政憲 ARATA Masanori

電力システム社 電力・産業システム開発センター 回転機器開発部主査。回転電機の研究・開発に従事。電気学会会員。

Power and Industrial Systems Research and Development Center



田島 敏伸 TAJIMA Toshinobu

情報・社会システム社 ITS・自動車事業統括部 アドバンスト・ドライブレーン事業推進担当部長。自動車ドライブ事業推進業務に従事。電気学会会員。

ITS & Automotive Business Planning div.