磁石量が異なる埋込磁石同期モータの機器定数と諸特性

正員 森 本 茂 雄 (大阪府立大)

正員 武 田 洋 次 (大阪府立大)

Machine Parameters and Performances of Interior Permanent Magnet Synchronous Motors with Different Permanent Magnet Volume

Shigeo Morimoto, Member, Yoji Takeda, Member (Osaka Prefecture University)

Permanent magnet synchronous motor (PM motor) is widely used for several industrial applications. Some applications such as an electric vehicle and a compressor drive require a constant power operation. The operating limits and the constant power speed range deeply depend on the machine parameters. The relationships between the motor parameters and the operating performance have been theoretically examined. This paper examines the performances of the prototype synchronous motors, where a stator structure and a rotor structure of all motors are the same. The permanent magnets are inserted into the rotor slits and the volume of permanent magnet is adjusted to control the magnet-flux linkage. The effects of adding magnet into the rotor on the machine parameters and the operating performance are examined based on the various experimental results. The prototype motor has flexibility on the speed versus power performance by adjusting the volume of permanent magnet. The theoretical results with respect to the operating limits and the motor parameters are also confirmed experimentally.

キーワード: PMモータ, 埋込磁石モータ, リラクタンストルク, 定出力運転, 出力範囲

1. まえがき

永久磁石同期モータ (PMモータ) は, 保守性, 制御性, 耐環境性に優れ, 高効率, 高力率運転が可能であるため広く用いられるようになってきた。特に, 最近では電気自動車やコンプレッサ駆動用の高効率モータとしても注目され, 実用化が進んでいる。モータの構造では永久磁石を回転子の内部に埋め込む埋込磁石同期モータ (IPMSM) が, 永久磁石によるトルクに加えて逆突極性に起因するリラクタンストルクも有効に利用できる, 弱め磁束制御による定出力運転が可能などの特長があるため様々な構造が提案され活発に研究開発されている⁽¹⁾。また, モータを高性能運転するための各種制御法も提案されている⁽²⁾⁻⁽⁵⁾。サーボモータとしての用途では高トルク運転など定トルク域の性能が重視されるが, 電気自動車やコンプレッサ駆動では, 定トルク域の性能だけでなく高速域での定出力運転特性も要求される。電流および電圧の制限を考慮した時の定出力運転範囲とモータパラメータの関係については理論的に詳しく検討されており, 永久磁石による鎖交磁束 ϕ_a と d 軸電機子反作用による鎖交磁束の最大値との差 ϕ_{dmin} ($=\phi_a - L_d I_{am}$) が速度-出力特性のパターンを決定することが明らかにされている⁽⁶⁾⁻⁽⁸⁾。しかし, そのような関係を実験的に検証した

報告は少なく, 特に理論的に出力範囲が無量大となり, 広範囲定出力運転に最適とされる機器定数 ($\phi_{dmin} \approx 0$) を有するモータの報告はほとんどない。モータおよびモータシステムの研究開発には, モータモデルに基づく理論的検討のみでなく実験に基づく検討も非常に重要である。

本論文では, まずロータ内に磁束障壁として3層のスリットを設けたシンクロナスリラクタンスマータを試作した。突極比 (L_q/L_d) を大きくするにはスリットの層数を多くするほど良いが, スリット内に磁石を挿入することを考慮して今回はスリットを3層とした。その結果, 磁石が1層の一般の埋込磁石同期モータに比べ大きな突極比とリラクタンストルクの増加が期待できる。3層のスリット内に磁石を挿入して埋込磁石同期モータを製作したが, 挿入する磁石量を変えることにより速度-出力パターンを決定するパラメータ ϕ_{dmin} を調整し, 5種類のモータを試作した⁽⁹⁾。これらモータについて実験により機器定数や出力特性などの諸特性を詳細に検討する。また, 本論文で行ったようにロータ内部に挿入する磁石量を調整することで所望の速度-出力特性が比較的簡単に得られることも示す。

2. モータモデル

d - q 座標上で表したPMモータの定常時の電圧方程式と

ルク T は次式で与えられる。

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a + pL_d & -\omega L_q \\ \omega L_d & R_a + pL_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega \phi_a \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$T = P_n \phi_a i_q + P_n (L_d - L_q) i_d i_q$$

$$= P_n \left\{ \phi_a I_a \cos \beta + \frac{1}{2} (L_q - L_d) I_a^2 \sin 2\beta \right\} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ただし、 i_d 、 i_q ：電機子電流の d 、 q 軸成分、 v_d 、 v_q ：電機子電圧の d 、 q 軸成分、 $\phi_a = \sqrt{3/2} \phi_f$ 、 ϕ_f ：永久磁石による電機子鎖交磁束の最大値、 R_a ：電機子抵抗、 L_d 、 L_q ： d 、 q 軸インダクタンス、 $p = d/dt$ 、 P_n ：極対数、 $\rho = L_q/L_d$ ：突極比、 β ：電流ベクトルの q 軸からの進み角、 $I_a = \sqrt{3} I_e$ 、 I_e ：電機子電流の実効値

上記 d - q 座標モデルを用いて様々な電流ベクトルの制御法が提案されている。PM モータはインバータで駆動されるため次式のような電機子電流と端子電圧の制限を考慮する必要がある。

$$I_a = \sqrt{i_d^2 + i_q^2} \leq I_{am} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$V_a = \sqrt{v_d^2 + v_q^2} \leq V_{am} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ただし、 I_{am} 、 V_{am} ：電流および電圧の制限値

この制約条件を考慮して最大の出力範囲を得る制御法として、電圧余裕がある低速域では電流に対する発生トルクが最大になる最大トルク制御を、電圧が制限値を越える高速域では弱め磁束制御を用いる最大出力制御法が提案されており、その有効性が実証されている^{(4),(5)}。

最大出力制御を行ったときの出力範囲や定出力運転範囲は、機器定数によって決まり、速度－出力特性のパターンは

$$\phi_{dmin} = \phi_a - L_d I_{am} \quad \dots\dots\dots (5)$$

に依存することが明らかにされている⁽⁶⁾⁻⁽⁸⁾。 ϕ_{dmin} は永久磁石による電機子鎖交磁束から最大の負の d 軸電機子反作用磁束を引いたものであり、 d 軸方向鎖交磁束の最小値に相当する。ただし、実際にこのような運転状態 ($i_d = -I_{am}$ 、 $i_q = 0$) になることはない。 $\phi_{dmin} > 0$ の時には出力限界が存在し、巻線抵抗を無視すると

$$\omega_c = \frac{V_{om}}{\phi_a - L_d I_{am}} = \frac{V_{om}}{\phi_{dmin}} \quad \dots\dots\dots (6)$$

で出力限界に至る。 ϕ_{dmin} が大きいほど最大トルクは大きくなる反面、定出力範囲は狭くなる。一方、 $\phi_{dmin} \leq 0$ の時には理論上出力限界が存在しなくなり、 ϕ_{dmin} の絶対値が小さいほど出力は大きくなる。従って、非常に広い定出力範囲が必要な場合には $\phi_{dmin} = 0$ が理想条件となる。このように速度－出力パターンと ϕ_{dmin} の間には密接な関係があるため、必要とする速度－出力特性に応じて ϕ_{dmin} が適切な値となるように設計する必要がある。本論文では、磁石量を変える

表 1 試作モータの諸元

Table 1. Specifications of prototype motors.

極対数	2
固定子外径	73 mm
固定子内径	30.5 mm
回転子外径	29.9 mm
エアギャップ長	0.3 mm
積厚	45.3 mm
定格電流	2.4 A
電機子抵抗	1.00 Ω

図 1 ロータの断面図

Fig. 1. Cross-section of rotor.

図 2 試作モータのロータと磁石

Fig. 2. Photograph of rotor and permanent magnet for prototype motor.

ことで ϕ_a を変化させ、 ϕ_{dmin} を調整して速度－出力パターンの調整を試みる。

3. 試作モータの構造と機器定数

試作したモータの諸元とロータ断面図を表 1 および図 1 に示す。試作モータは、市販の表面磁石同期モータ（定格：200 (W)、3000 (rpm)、2.4 (A)）のステータを使用し、ロータのみ図 1 のものに交換した。図 2 にロータとロータ内のスリットに挿入する永久磁石の写真を示す。ロータ内には 1 極当たり 3 層のスリットを設けており、これが d 軸方向の磁束障壁として機能するため d 軸方向のインダクタンス L_d が q 軸インダクタンス L_q よりも小さくなり $L_d < L_q$ の逆突極性を示す。従って、このモータは同期リラクタン্সモータ（本文では SynRM と略記）となる。なお、同期リラクタン্সモータでは一般に磁気抵抗が最小の方向を d 軸とするが、本論文では図 1 に示すように磁気抵抗が最大となる方向を d 軸としているので注意されたい。

SynRM のロータ内のスリットに図 3 に示すように永久磁

図3 各モータのスリット内の磁石配置

Fig. 3. Arrangement of permanent magnets in slit per pole.

表2 試作モータの永久磁石の体積

Table 2. Volume of permanent magnet of prototype motors.

	永久磁石の体積 V_{PM} (mm ³)	永久磁石 体積比* K_{PM}
SynRM	0	0
Hybrid I	2350	1.0
Hybrid II	4700	2.0
Hybrid III	7050	3.0
Hybrid IV	10960	4.7

* : Hybrid I の磁石体積を基準とする

石 (Neodymium-Iron-Boron) を挿入する。挿入する磁石の量を変えることで4種類のロータが得られる。Hybrid III と Hybrid IV はいわゆる埋込磁石同期モータ (IPMSM) である。Hybrid I と Hybrid II では磁石が挿入された部分はIPMSMに、磁石が挿入されていない部分はSynRMに相当する。すなわち、軸方向にIPMSMとSynRMを結合したハイブリッドモータであるとも言える。例えば、Hybrid I では1/3がIPMSMで2/3がSynRMに相当する。各モータの磁石量を表2に示す。

磁気飽和や磁束の漏れを無視し、永久磁石の透磁率がほぼ真空透磁率と等しいことを考えると図3のように磁石を挿入することで機器定数のうち ϕ_a は磁石量に比例して増加し、 L_d 、 L_q は変化しないと言える。その結果、リラクタンストルクは一定でマグネットトルクは磁石量に比例して増加する。また、速度-出力特性のパターンを決定する ϕ_{dmin} ($=\phi_a - L_d I_{am}$) は磁石量によって調整できることになる。実際には、磁気飽和や永久磁石の漏れ磁束があるため上述の通りにはならないが同様の傾向は得られると思われる。

図4に各モータの機器定数の測定結果を示す。なお、測定は文献(10)の方法で行い、 d 、 q 軸インダクタンスは回転数 $N=1000$ r/min, 電流 $I_e=2.4$ A (定格), 電流位相角 $\beta=45^\circ$ の運転状態における測定値である。 ϕ_a はほぼ磁石体積に比例して増加しており、 ϕ_a の増加により磁束レベルが上昇する結果、磁気飽和の影響で q 軸インダクタンスは減少していく。

(a) 磁石磁束とインダクタンス

(b) インダクタンス差と突極比

図4 試作モータの機器定数測定結果

Fig. 4. Measured motor parameters of prototype motors.

図5 最大トルク発生時のリラクタンストルクとマグネットトルク ($I_e=2.4$ A)

Fig. 5. Reluctance torque and magnet torque in maximum torque production.

一方、 d 軸インダクタンスは磁石を全く挿入していない SynRM では比較的大きな値を持つが、磁石を挿入することにより半分以上に減少している。これは次のように考えられる。図1のロータにおいて d 軸方向を励磁した時、空気層のスリットにより磁束は妨げられるはずであるが、実際には d 軸方向磁束はロータの円周部 (図1のA部) を通るため L_d が小さくならない。今回試作した SynRM では2程度の突

極比しか得られておらず同期リラクタンスモータとして十分な特性は期待できない。スリットに磁石を挿入すると磁石磁束の一部は漏れ磁束としてロータ円周部を通り、円周部が飽和する結果、 d 軸方向の磁気抵抗が増加して L_d が減少する。その結果、Hybrid Iでは4を越える突極比が得られ、 $L_q - L_d$ も大幅に増加しておりSynRMよりも大きなリラクタンストルクが期待できる。図5に最大トルク制御を行ったときの定格電流における発生トルクの計算値を示す。なお、計算には図4(a)に示した機器定数を用いた。Hybrid I, Hybrid IIではSynRMよりも大きなリラクタンストルクが得られている。磁石の挿入によりマグネットトルクが増加し、逆に磁気飽和によりリラクタンストルクが減少する。また、Hybrid IIでは定格負荷においてマグネットトルクとリラクタンストルクがほぼ同程度出力されており、それよりも磁石の少ないHybrid Iはリラクタンストルクがメインで、Hybrid III, IVはマグネットトルクがメインのモータとなる。

4. 試作モータの諸特性

本章では実験結果に基づき各モータの諸特性を検討するが、モータは電流制御系を持つ一般的な電圧形PWMインバータ（三角波比較方式、キャリア周波数10kHz）で正弦波電流駆動されており、電流の振幅と位相を制御できる。トルクはモータと負荷（直流発電機）の間に取り付けたトルク検出器（小野測器製SS-020）で検出し、それとモータ速度より出力を計算している。モータ入力にはデジタルパワーメータ（横河電機製2533E）で計測し、モータ入出力より効率を計算している。力率は電流、電圧の基本波成分より求めた基本波力率である。

図6に電流を定格値（ $I_e=2.4$ A）に保ち電流位相 β を変えたときのトルク特性を示す。SynRMの場合、(2)式よりインダクタンス値が一定であれば $\beta=45^\circ$ でトルクが最大となるはずであるが、実際には磁気飽和の影響で 45° よりも大きい位相角で最大トルクが発生している。磁石を挿入していくことによりトルクが増大し、最大トルクを発生する位相

図6 電流位相-トルク特性 ($I_e=2.4$ A)

Fig. 6. Current phase angle versus torque characteristics.

角は小さくなっていくことが分かる。

図7に定速運転時の負荷特性を示す。ただし、各モータは最大トルク制御^{(4),(5)}で運転されている。発生トルク、力率、効率のいずれも磁石量が増加するほど改善されている。ただし、端子電圧は磁石量の増加に伴い当然上昇することになる。図7(c)のように出力194 (W)（今回の試作機の元に

(a) 電流-トルク特性

(b) 電流-力率特性

(c) 出力-効率特性

図7 最大トルク制御時の負荷特性 (3000 r/min)

Fig. 7. Performances under maximum torque control.

なった市販表面磁石同期モータの定格とほぼ同じ)においてHybrid IVは90%の効率が得られ、そのときの損失を計算すると銅損が11.9 (W), 鉄損など銅損以外の損失が9.7 (W)であった。

図8に電圧制限 ($V_{am}=16.5$ (V)) および電流制限 ($I_{am}=4.16$ (A); $I_e=2.4$ (A)に相当)を考慮したときの速度-トルク, 出力特性を示す。ただし, 各モータ共に電圧余裕のある低速域では最大トルク制御を, 電圧飽和が生じる高速域では弱め磁束制御を行う最大出力制御^{(4),(5)}で運転している。磁石量を零 (SynRM) から増やすことにより ϕ_{dmin} ($=\phi_a - L_d I_{am}$) は負から正に増加し, その結果速度-トルク, 速度-出力特性のパターンは著しく変化している。これはこれまでに理論的に検討されてきた傾向と同様である。

ここで, ϕ_{dmin} の値について検討を加える。図9は図4(a)の機器定数より計算した ϕ_{dmin} である。同図より, SynRMとHybrid IIは $\phi_{dmin} < 0$ の機器定数を有し, Hybrid II, III, IVは $\phi_{dmin} > 0$ となっていることが分かる。また, Hybrid Iの ϕ_{dmin} が最も0に近く, 広範囲の定出力運転が可能なモータであると思われるが, 図8の実験結果からはHybrid Iの特性より

(a) 速度-トルク特性

(b) 速度-出力特性

図8 速度-トルク, 出力特性⁽¹¹⁾

($I_{am}=4.16$ (A), $V_{am}=16.5$ (V))

Fig. 8. Speed versus torque and power characteristics.

もHybrid IIの特性が優れており, 図9の ϕ_{dmin} から予想される結果と合わない。図9のパラメータは定格電流 ($I_e=2.4$ A), $\beta=45^\circ$ における測定結果を用いて計算したものであるが, 弱め磁束運転領域では β を大きくする (負の d 軸電流を増やす) 必要があるため, 機器定数が $\beta=45^\circ$ の場合とは異なっていると思われる。そこで, Hybrid IIのモータについて $I_e=2.4$ Aとし, β を変化させたときの機器定数の測定結果を図10に示す。 β が大きくなるほど負の d 軸電流が大きくなるため減磁作用が大きく働き, かつ q 軸電流も減少するため磁気飽和が解消される結果, d , q 軸インダクタンスはともに増加している。その結果, $L_d - L_q$ は余り変化していないが ϕ_{dmin} は大幅に減少し, 定出力範囲が広くなる方向に変化している。例えば, $\beta=80^\circ$ における ϕ_{dmin} の値 (約0.005 (Wb)) を用いて(6)式より出力限界速度を求めると2万r/min以上となる。このように, 弱め磁束制御を行った時の運転範囲を検討する場合には, 磁気飽和等も考慮し, 電流位相角が大きい領域での機器定数を用いる必要がある。

図8より, 高トルクが必要で定出力運転を行わないような用途には, Hybrid IVが適しており, 逆に広範囲の定出力運転が必要であればHybrid IIが適していると言える。また, Hybrid IIとHybrid IVの中間的な特性は磁石量の調整や磁石材料の変更により実現可能であると考えられる。このように, 本論文の試作モータは速度-出力特性の設計に関して非常に自由度が高い。

図9 図4(a)の機器定数より計算した ϕ_{dmin}

Fig. 9 ϕ_{dmin} calculated by parameters in Fig. 4 (a).

図10 Hybrid IIの電流位相に対する機器定数

Fig. 10 Parameters of Hybrid II as a function of current phases angle.

試作モータの内、高トルクが得られサーボモータなどの用途に適したHybrid IVと高速定出力運転に適したHybrid IIの力率と効率の特性を図11に示す。ただし、運転状態は図8と同一である。Hybrid IIでは電圧飽和後の弱め磁束制御域に入ってからほぼ100%の力率で運転されており、効率の低下もない。なお、効率が低いのは実験装置の上限速度の制約で基底速度を低く設定したためであり、これを高くすることで図7(c)に示したような高効率が得られると考えられる。

5. あとがき

本論文では、3層のスリット（フラックスバリア）を有する同期リラクタンスモータのスリット部に永久磁石を挿入して埋込磁石同期モータを試作し、その磁石量を調整して機器定数や出力特性を検討した。従来理論的に示されていた $\phi_{dmin} (= \phi_a - L_d I_{am})$ と速度-出力特性との関係を実験的にも検証する事ができた。また、フラックスバリア形の同期リラクタンスモータに少量の磁石を挿入することで突極比の改善およびリラクタンストルクの向上に効果があることが明らかとなった。さらに埋込磁石PMモータは磁気飽和の影響が大きいので、速度-出力パターンを決定するパラメータ ϕ_{dmin} は弱め磁束運転領域、すなわち電流位相角が大きい状態での機器定数を用いる必要があることを示した。本論文の実験結果および検討結果は、広範囲定出力運转向けのPMモータの設計に有効活用できる。最後に大学院在学中に本研究にご協力いただいた山下貴史氏（現在、デンソー勤務）に謝意を表します。

（平成10年4月30日受付，平成10年7月30日再受付）

文 献

- (1) 松井・千葉・武田：「リラクタンストルクを利用した回転機」，電学論D, **114**, 824 (平6-9)
- (2) 石崎・三野・斉藤：「起磁力相差角一定制御方式による内部磁石形PMモータの可変速運転」，電学論D, **111**, 230 (平3-3)
- (3) T. M. Jahns : "Flux-Weakening Regime Operation of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor Drives", *IEEE Trans. Industr. Applic.*, **IA-23**, 681 (1987)
- (4) 武田・森本・大山・山際：「PMモータの制御法と回転子構造による特性比較」，電学論D, **114**, 662 (平6-6)
- (5) 森本・上野・武田：「埋込磁石構造PMモータの広範囲可変速制御」，電学論D, **114**, 668 (平6-6)
- (6) 森本・弓削・武田・平紗：「PMモータの機器定数と出力範囲」，電学論D, **110**, 1171 (平2-11)
- (7) R. Schiferl, T. A. Lipo : "Power Capability of Salient Pole Permanent Magnet Synchronous Motors in Variable Speed Drive", *IEEE Trans. Industr. Applic.*, **IA-26**, 115 (1990)
- (8) 森本・武田：「PMモータの出力範囲に関する一般的な解析と定出力運転に適した機器定数の検討」，電学論D, **117**, 751 (平7-6)
- (9) S. Morimoto, M. Sanada, Y. Takeda : "Performance of PM/Reluctance Hybrid Motor with Multiple Flux-Barrier", *Proc. of PCC-Nagaoka'97*, 649 (1997)

(a) 速度-力率特性⁽¹¹⁾

(b) 速度-効率特性

図11 図8の運転状態における力率と効率

Fig. 11 Power factor and efficiency at same condition in Fig. 8.

(10) 森本・武田・平紗：「PMモータのdq等価回路定数の測定法」，電学論D, **113**, 1330 (平5-11)

(11) 松井・武田：「見直されてきたリラクタンスモータ」，電学論D, **118**, 685 (平10-6)

森本 茂雄

（正員） 昭和34年6月28日生。59年3月大阪府立大学大学院修士課程修了。63年7月大阪府立大学助手，平成6年4月同助教授，現在に至る。工学博士。主としてモータドライブシステム，モーションコントロールの研究に従事。IEEE，計測自動制御学会，システム制御情報学会，パワーエレクトロニクス研究会会員。

武田 洋次

（正員） 昭和18年11月10日生。43年3月大阪府立大学大学院修士課程修了。同年4月同大学助手，平成5年4月同教授，現在に至る。工学博士。主として，電動機可変速制御システム，リニアアクチュエータの研究に従事。IEEE，システム制御情報学会，パワーエレクトロニクス研究会会員。