

磁気飽和と鉄損特性の数学モデルに基づく 同期リラクタンスモータの最大効率運転法

学生員 日吉 良太* 正員 野口 季彦 (静岡大学)

Maximum Efficiency Operation of Synchronous Reluctance Motor Using Mathematical Models of Magnetic Saturation and Iron-Core Loss Characteristics

Ryota Hiyoshi*, Toshihiko Noguchi (Shizuoka University)

This paper describes a maximum efficiency control method of a synchronous reluctance motor taking magnetic saturation and iron-core loss into account. The method is based on simple mathematical models of the d -axis inductance, the q -axis inductance and the equivalent iron-core loss resistance obtained by FEM analyses.

As a result, it was confirmed through experimental tests that the efficiency was improved with the proposed technique. In addition, propriety of the maximum efficiency condition was experimentally proven by a comparison between theoretical and experimental efficiency characteristics.

キーワード：同期リラクタンスモータ，インダクタンス，磁気飽和，鉄損，最大効率

(Keywords: Synchronous reluctance motor, inductance, magnetic saturation, iron-core, maximum efficiency)

1. はじめに

従来は回転子に永久磁石を有する回転機が主に AC サーボモータとして使用されてきたが，最近ではコスト低減と信頼性向上のため同期リラクタンスモータ (SynRM) も工作機械等に用いられるようになってきている。SynRM は界磁制御を行うことができ，高速運転時の鉄損も少ないことから，フライホイールエネルギー貯蔵システムのモータ/ジェネレータとしても有望である。また，レアアース材料の価格高騰や資源確保の問題から磁石を使用しないレアアースフリーモータとしても期待される。SynRM は負荷に応じて励磁電流を制御することにより，最大効率運転や単位モータ電流あたりの最大トルク運転を実現することができる⁽¹⁾⁽²⁾。筆者らはこれまで SynRM の特性検討に電磁界解析を用いておらず，磁気飽和特性しか考慮してこなかった。そこで，本稿では電磁界解析により得られた SynRM の特性に基づき，磁気飽和および鉄損特性を考慮した最大効率運転条件を数学モデルから導出し，理論的に検討するとともに，提案した手法の有効性を実機により検証した。さらに理論特性と実機による測定結果の比較を行ったので報告する。

2. SynRM の磁気飽和特性と等価鉄損抵抗特性

図1に鉄損を考慮した SynRM の d 軸および q 軸等価回路を示す。図中の R_a は固定子巻線抵抗， R_c は等価鉄損抵抗である。突極性をもつ SynRM は d 軸インダクタンス L_d と q 軸インダクタンス L_q の差によってトルクを発生するため，磁気飽和によるインダクタンスの変動は運転特性に重大な影響を及ぼす。これらのインダクタンスを d 軸電流 i_d ， q 軸電流 i_q の自然対数を用いて(1)のように定式化する。ここで，電流に対する磁気飽和の度合いを示す値 k_d ， k_q を磁気飽和係数と呼ぶこととし，磁気飽和モデルを簡単化するために両軸間の磁気飽和相互干渉 (Cross Saturation) は無視できる

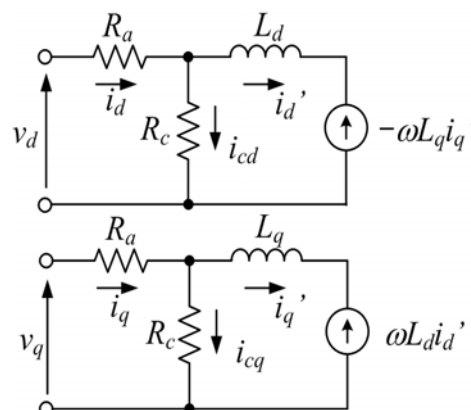


図1 等価鉄損抵抗を考慮した SynRM の等価回路
Fig. 1. Equivalent circuits incorporating equivalent iron-core loss resistance.

ほど小さいと仮定する。実際，後述の電磁界解析結果が示すとおり，本稿で制御対象とする供試モータは磁気飽和相互干渉を低減した設計が施されている。また，等価鉄損抵抗は運転角周波数 ω と d 軸電流 i_d の自然対数を用いて(2)のように定式化する。

$$\begin{cases} L_d = L_{d0} + k_{L_d} \ln(i_d) \\ L_q = L_{q0} + k_{L_q} \ln(i_q) \end{cases} \quad (1)$$

$$R_c = k_{\omega} \omega + k_{R_c} \ln(i_d) + R_{c0} \quad (2)$$

3. 最大効率励磁条件と最大トルク励磁条件の導出

図1の等価回路で定常状態におけるSynRMの電圧電流方程式は下式により与えられる。

$$\begin{bmatrix} v_d - R_a i_d \\ v_q - R_a i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega L_d \\ \omega L_d & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d' \\ i_q' \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} i_d' \\ i_q' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} - \frac{1}{R_c} \begin{bmatrix} v_d - R_a i_d \\ v_q - R_a i_q \end{bmatrix} \\ = \frac{R_c}{R_c^2 + \omega^2 L_d L_q} \begin{bmatrix} R_c & \omega L_q \\ -\omega L_d & R_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \quad (4)$$

上式を扱いやすいように端子側から見た電圧電流方程式に書き換えると(5)のようになり、これより与えられるトルクは(6)で表される。

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \frac{R_c^2}{R_c^2 + \omega^2 L_d L_q} \begin{bmatrix} R_a + \omega L_d L_q \frac{R_a + R_c}{R_c^2} & -\omega L_q \\ \omega L_d & R_a + \omega L_d L_q \frac{R_a + R_c}{R_c^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$T = \frac{R_c^2}{(R_c^2 + \omega^2 L_d L_q)^2} (L_d - L_q) (R_c i_d + \omega L_q i_q) (R_c i_q - \omega L_d i_d) \quad (6)$$

(6)を用いて最大効率運転条件、もしくは最大トルク運転条件を導出すると、その運転条件は煩雑な数式となるため、トルクを(7)のように近似する。また、効率は(5)より入力電力、(6)より出力を求めることにより(8)のように導出される。

$$T = \frac{R_c^2}{R_c^2 + \omega^2 L_d L_q} (L_d - L_q) i_d i_q \quad (7)$$

$$\eta = \frac{\omega (L_d - L_q) i_d i_q}{\left(R_a + \omega^2 L_d L_q \frac{R_a + R_c}{R_c^2} \right) (i_d^2 + i_q^2) + \omega (L_d - L_q) i_d i_q} \quad (8)$$

上式の分子は機械出力、分母第一項は銅損と鉄損を含めた電氣的な損失、分母第二項は機械出力を示している。(8)において(1)と(2)で表わされたインダクタンスと等価鉄損抵抗を考慮して、効率 η を最大化する励磁条件 $\partial \eta / \partial i_d = 0$ を i_d について解くと(9)が得られる。

$$i_d = \pm \sqrt{\frac{(L_d - L_q + k_{L_d})(R_a + \omega^2 L_d L_q \frac{R_a + R_c}{R_c^2}) - \omega^2 L_q (L_d - L_q) \left(k_{L_d} \frac{R_a + R_c}{R_c^2} - k_{R_c} L_d \frac{2R_a + R_c}{R_c^3} \right)}{(L_d - L_q - k_{L_d})(R_a + \omega^2 L_d L_q \frac{R_a + R_c}{R_c^2}) + \omega^2 L_q (L_d - L_q) \left(k_{L_d} \frac{R_a + R_c}{R_c^2} - k_{R_c} L_d \frac{2R_a + R_c}{R_c^3} \right)} i_q} \quad (9)$$

(9)は右辺に i_d, i_q の関数であるインダクタンスおよび等価鉄損抵抗を含んでいるため、適当な初期値(例えば $i_d = i_q$)を与えて i_q に対する i_d の収束計算を行い、条件を満足する d 軸電流を求めなければならない。

なお、従来のように磁気飽和と等価鉄損抵抗を無視、即ち、 d 軸および q 軸のインダクタンスの磁気飽和係数がともに0でインダクタンスが変動せず一定であり、等価鉄損抵抗が回転速度にのみ依存する場合は(10)のように単純化される。($k_{L_d} = k_{L_q} = k_{R_c} = 0$ の場合に相当する。)

$$i_d = \pm i_q \quad (10)$$

これは d 軸電流と q 軸電流を等しくなるように制御する従来の最大効率運転法と一致する。

4. 最大トルク励磁条件の導出

最大トルク運転条件の導出も最大効率運転条件と同様の手順で行う。(1)と(2)で表わされたインダクタンスと等価鉄損抵抗を考慮し、モータ電流のノルム i を一定に維持した条件で求める。(7)のトルク T を最大化する励磁条件、即ち $\partial T / \partial i_d = 0$ を i_d について解くと(11)が得られる。

$$i_d = \pm \sqrt{\frac{L_d - L_q + k_{L_d} + \omega^2 L_d L_q \left\{ \frac{1}{R_c^2} \left(L_d - L_q + k_{L_d} \frac{L_q}{L_d} \right) + \frac{2k_{R_c}}{R_c^3} (L_d - L_q) \right\}}{L_d - L_q + k_{L_q} + \frac{\omega^2 L_d L_q}{R_c^2} \left(L_d - L_q + k_{L_q} \frac{L_d}{L_q} \right)}} i_q \quad (11)$$

この場合も(9)と同様に収束計算を行って、 i_q に対する i_d の関係を求めなければならない。なお、従来のように磁気飽和と等価鉄損抵抗の特性を無視した場合($k_{L_d} = k_{L_q} = k_{R_c} = 0$)、単位モータ電流あたりの最大トルク運転条件を求めると、(11)は(10)のように単純化される。これより、磁気飽和と等価鉄損抵抗の特性が無視できる理想的な場合は、単位モータ電流あたりの最大トルク運転条件と最大効率運転条件は完全に一致する。磁気飽和などの特性を考慮した場合、励磁条件(9)、(11)は異なるが、後に示すように収束計算を行った結果はほぼ同じ特性となる。

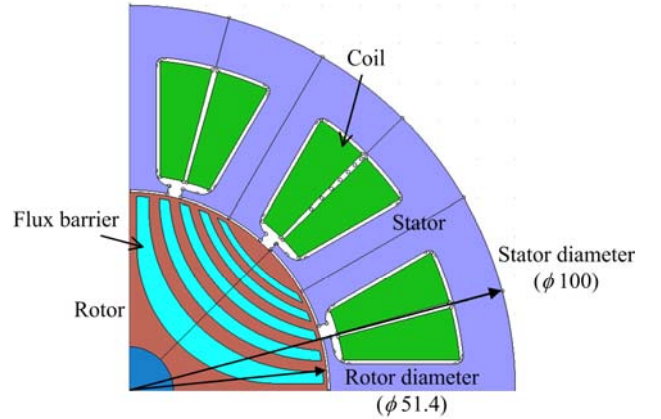


図2 SynRMの断面図(1/4モデル)

Fig. 2. Cross section diagram of SynRM (1/4 model).

表1 供試SynRMのパラメータ
Table 1. Parameters of test SynRM.

Number of poles	4
Number of slots	12
Rated power	100 W
Rated speed	1000 r/min
Rated torque	0.95 Nm
Stator outer diameter	100 mm
Rotor diameter	51 mm
Axial length of iron core	30 mm

表2 測定された供試SynRMのパラメータ
Table 2. Measured parameters of test SynRM.

Winding resistance	$R_q = 0.173 \Omega$
d -axis inductance	$L_d = 7.82 - 1.72 \ln(i_d)$ mH
q -axis inductance	$L_q = 2.48 - 0.58 \ln(i_q)$ mH
Iron core loss resistance	$R_c = 0.00534 \omega - 1.34 \ln(i_q) + 6.28 \Omega$

5. モータパラメータの算定

5.1> インダクタンスの算定

図2と表1に検討を行ったSynRMの径方向断面図と主要諸元を示す。電磁界解析によりインダクタンス L_d , L_q を求め、磁気飽和特性を確認した。ここでは、ベクトル制御されたSynRMにおいて、各軸電流に対するインダクタンス L_d , L_q をモータ数学モデルから計算する手法で算定した。この場合、インダクタンス L_d , L_q を導出可能とするため、等価鉄損抵抗は十分大きいと仮定し、鉄損を無視した場合のモータモデルを用いている。各軸電流 i_d , i_q および各軸電圧 v_d , v_q から、(12)より L_d , L_q を求めることができる。

$$\begin{cases} L_d = \frac{v_q - R_a i_q}{\omega i_d} \\ L_q = \frac{v_d - R_a i_d}{\omega i_q} \end{cases} \quad (12)$$

以上の算定結果を図3に示す。低電流領域では鉄損抵抗の影響が相対的に大きくなり、インダクタンスが過小に算定されるため、当該領域の測定点は除外している。また、磁気飽和相互干渉特性も示している。同図より、 d 軸インダクタンスについては磁気飽和相互干渉の影響が確認できるが、その影響は大変小さい。よって、両軸間の磁気飽和相互干渉の影響は無視でき、インダクタンスの変動を(1)を用いて表わすことは妥当であると考えられる。

5.2> 等価鉄損抵抗の算定

等価鉄損抵抗 R_c はインダクタンスと同様に電磁界解析により算定した。 q 軸電流は0とし、 d 軸電流のみの関数となるように、鉄損 P_{core} 、電圧 v 、電流 i_d より(13)から求める。

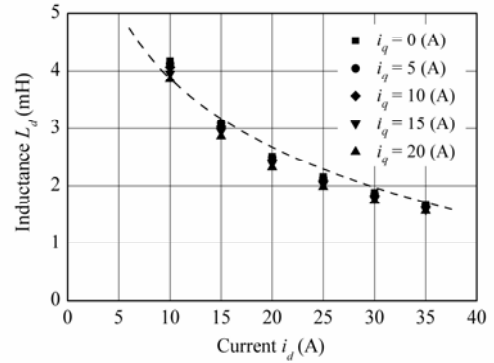
$$R_c = \frac{(v - R_a i_d)^2}{P_{core}^2} \quad (13)$$

図4に d 軸電流を変化させた場合の等価鉄損抵抗 R_c の特性を示す。同図より、モータ回転数の増加とともに等価鉄損抵抗 R_c が増加することを確認でき、線形近似できることがわかる。また、等価鉄損抵抗は回転速度のみでなく、電流に対する依存性も有しており(2)のように定式化できる。

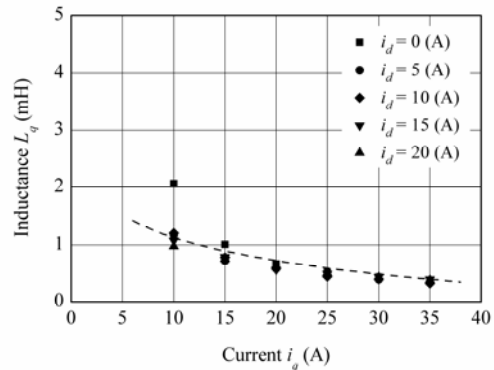
6. 数式モデルによる理論特性

6.1> 励磁電流

本方式の運転特性を確認するために数学モデルによる理論特性の検証を行った。表2に示すSynRMのパラメータを用いて、最大効率励磁条件である(9)、最大トルク励磁条件である(11)の収束計算を行った結果を図5に示す。従来の最大効率運転法と比較すると、最大効率励磁条件と最大トルク励磁条件は大きく異なり、 d 軸電流が小さな値となっていることがわかる。また、提案した最大効率励磁条件と最大トルク励磁条件はわずかに異なることもわかる。通常、機械出力の最大化を考えると、最大効率運転と最大トルク運転は同一であり、励磁条件は一致しなければならない。最大トルク励磁条件は単位電流あたりのトルクが最大となる条件であり、電流が最小すなわち銅損を最小化する励磁条件である。最大効率励磁条件は銅損だけでなく鉄損も最適化する励磁条件であり、鉄損の存在により最大効率励磁条件と最大トルク励磁条件は、わずかではあるが異なる結果になったと考えられる。また、励磁条件の導出過程において、(6)を(7)のように近似しており、この近似による影響も考えられる。



(a) d 軸インダクタンス
(a) d -axis inductance.



(b) q 軸インダクタンス
(b) q -axis inductance.

図3 インダクタンスの磁気飽和特性

Fig. 3. Magnetic saturation characteristics of inductance.

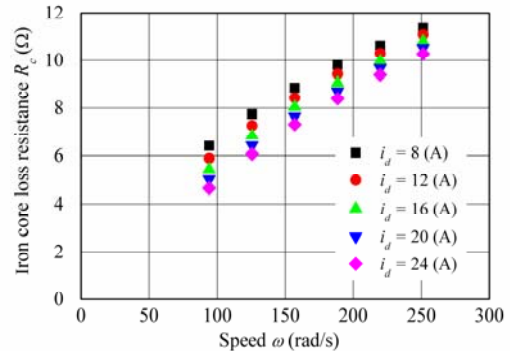


図4 等価鉄損抵抗特性

Fig. 4. Equivalent iron-core loss resistance characteristics.

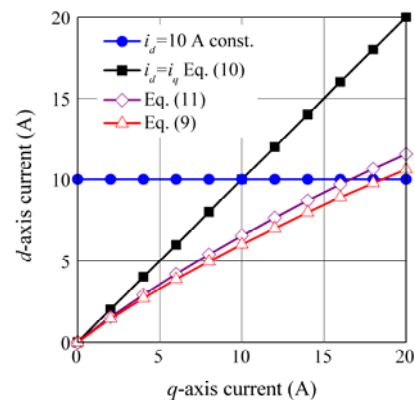


図5 励磁電流特性

Fig. 5. Magnetizing current characteristics.

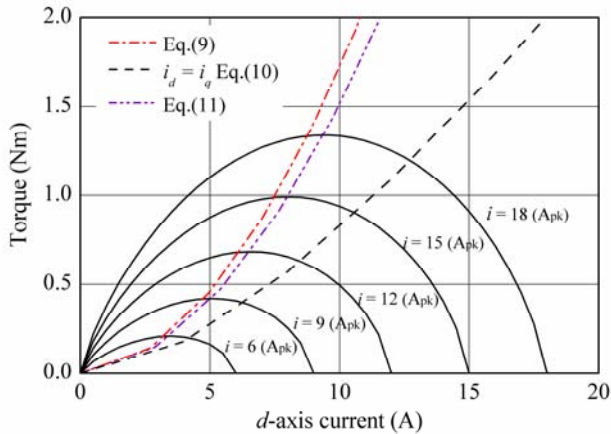


図 6 励磁電流に対するトルク曲線群と各励磁条件におけるトルク

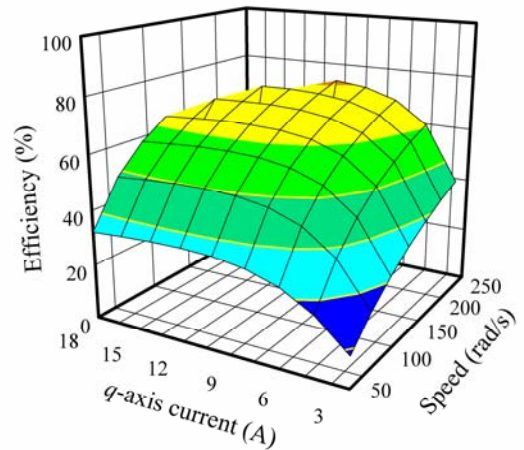
Fig. 6. Magnetizing current and torque characteristic curves and delivered torque corresponding to magnetizing conditions.

<6.2> トルク特性

図6に1000 r/minにおいてモータ電流ノルムを一定にした場合のトルク曲線群と(9)、(10)、(11)の各励磁条件における出力トルク特性を示す。最大トルク励磁条件により与えられる出力トルク特性は、トルク曲線群の最大トルクを与える頂点に正確に位置していることがわかる。最大効率励磁条件により与えられる出力トルク特性は、トルク曲線群の最大トルクを与える点からわずかに外れるが、両者はほぼ一致する。一方、従来の最大効率励磁条件はトルク曲線群の最大トルクを与える点から大きく外れており、電流ノルムが同じ場合で、提案した最大効率励磁条件と最大トルク励磁条件よりも出力トルクが小さくなる。

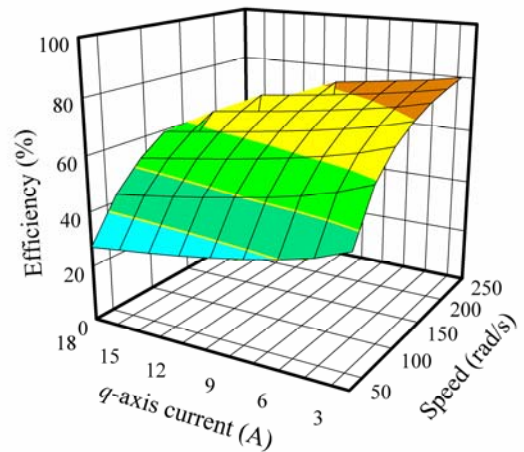
<6.3> 効率特性

図7に各励磁条件における運転効率特性を示す。比較を行った励磁条件は、 i_d を一定($i_d = 10A$)とする場合、従来の最大効率励磁条件である $i_d = i_q$ とする場合、そして提案法である(9)で与えられる最大効率励磁条件である。いずれの場合も、 L_d 、 L_q は図3の特性、 R_c は図4の特性をもっているものとしている。 i_d を一定($i_d = 10A$)とした場合と従来の最大効率運転法を比較すると、従来の最大効率運転法の方が、 q 軸電流が小さい軽負荷で効率が高くなっていることがわかる。しかし、 q 軸電流が大きい重負荷では逆に効率が低くなっている。これは図5の励磁電流特性からわかるように従来の最大効率運転法は q 軸電流が小さいときは提案した最大効率励磁条件と近い値であるが、 q 軸電流が大きくなるほど、提案法の励磁条件と乖離し、むしろ i_d を一定とした場合の方が提案法の励磁条件に近い値となるためである。従来の最大効率運転法と提案法を比較すると、どの領域においても提案法の方が高い効率を示していることがわかる。特に、 q 軸電流が大きくなる重負荷において効率の改善が顕著である。これは電流が大きくなるとインダクタの磁気飽和の影響が大きくなり、インダクタンスの差が小さくなって出力が小さくなるからである。効率の平均値を比較すると、提案法を用いることにより、 i_d を一定とした場合とは11pt効率が改善し、従来の最大効率運転法とは2.9pt効率が改善することを確認した。



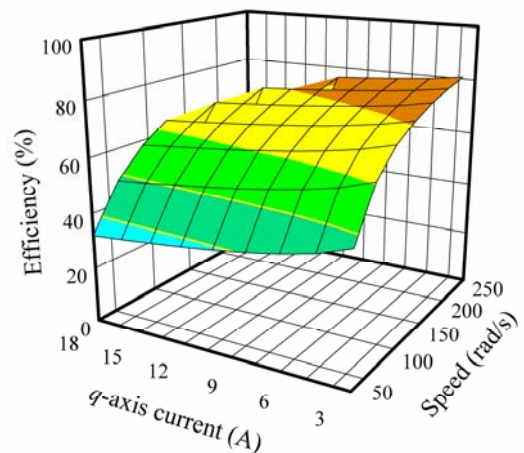
(a) 励磁条件： $i_d = 10A$

(a) Magnetizing condition： $i_d = 10A$ const.



(b) 励磁条件： $i_d = i_q$

(b) Magnetizing condition： $i_d = i_q$.



(c) 励磁条件：Eq. (9)

(c) Magnetizing condition：Eq. (9).

図7 励磁条件による効率特性の比較 (シミュレーション結果)

Fig. 7. Comparison of efficiency characteristics for three magnetizing conditions (simulation results).

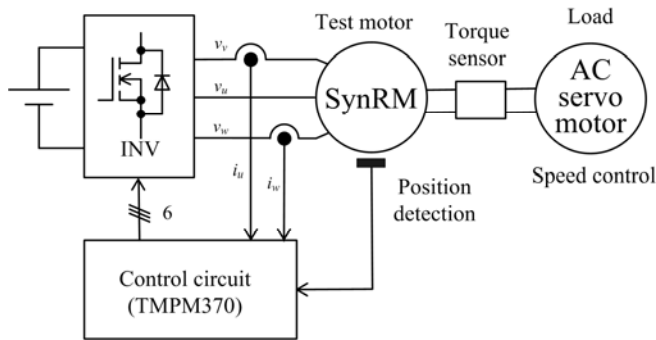


図 8 実験システムの構成
Fig. 8. Experimental setup.

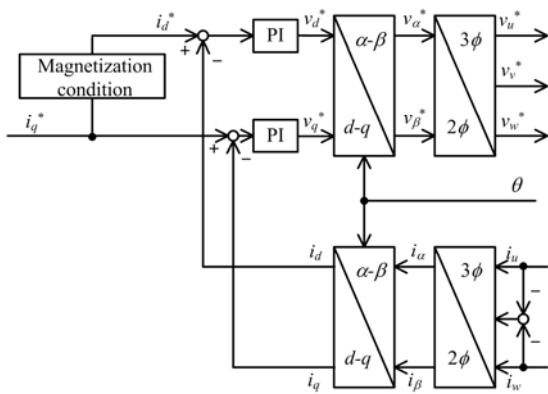


図 9 電流制御系のブロック図
Fig. 9. Block diagram of current control system.

7. 最大効率運転の実験検証

<7.1> 実験システム

本稿で提案した最大効率運転法の有効性を確認するため、表 1、表 2 に示したパラメータを有する供試機を用いて実験システムを構築した。図 8 に示すように、実験システムはマイコン（東芝製 TMPM370）を採用し全デジタルソフトウェア制御系で構成した。負荷側には AC サーボモータを接続し、トルクセンサーを介して SynRM を直結した。

図 9 にマイコン内で処理される制御ブロック図を示す。負荷側の AC サーボモータで速度制御を行い、供試機である SynRM はトルク制御を行う。電流指令値に各励磁条件を与え、それ以降は通常のベクトル制御を行う。なお、PWM は三角波比較方式で行い、上下アーム短絡防止時間は $1.5 \mu\text{s}$ とし、ホールセンサによりモータの位置検出を行う。

<7.2> トルク特性

図 10 は 1000 r/min 一定で運転した場合のトルク曲線群であり、モータ電流ノルムを一定に維持しながら、 d 軸電流と q 軸電流の組み合わせを変化させて計測した結果である。プロットが実験結果を示し、実線は(7)から得られた理論特性である。実験で得られたトルク曲線群は理論特性の曲線群を若干潰した形になっているが、全体として良く一致した結果が得られていることがわかる。

<7.3> 効率特性

図 11 に 1000 r/min と 1800 r/min の各励磁条件における運転効率特性の実験結果を示す。比較を行った励磁条件は理論特性と同じように、 i_d を一定 ($i_d = 10 \text{ A}$) とする場合、従

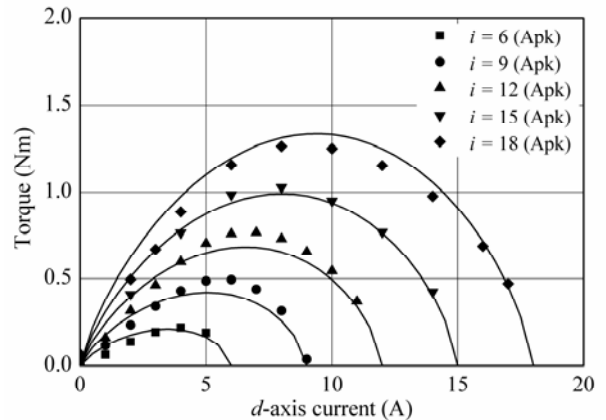
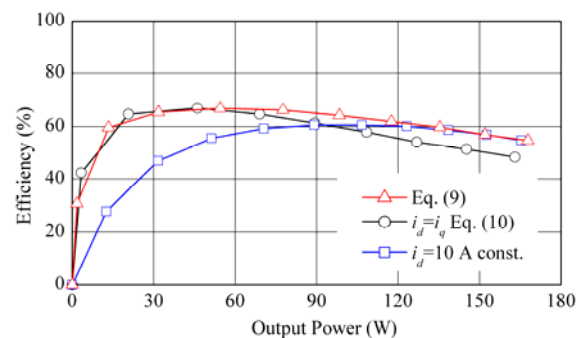
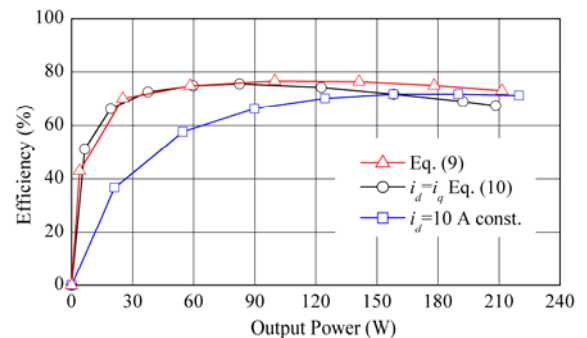


図 10 1000 r/min における出力トルク曲線群
Fig. 10. Output torque curves for 1000 r/min.



(a) 1000 r/min

(a) 1000 r/min.



(b) 1800 r/min

(b) 1800 r/min.

図 11 励磁条件に対する効率特性

Fig. 11. Efficiency characteristics for three magnetizing conditions.

来の最大効率励磁条件である $i_d = i_q$ とする場合、そして提案法である(9)で与えられる最大効率励磁条件である。 i_d を一定とした場合と従来の最大効率運転法 ($i_d = i_q$) を比較すると、従来の最大効率運転法は軽負荷では効率が改善されるが、重負荷では効率が逆に低くなっており、 i_d を一定とした場合は、重負荷の領域で提案法の最大効率運転の効率値と近くなっている。提案法と従来法の最大効率運転法を比較すると、軽負荷では効率の改善はあまり見られないが、重負荷になるにつれて提案法は従来法を凌駕する。3通りの励磁条件の中で提案法がどの領域においても効率が高くな

っており、いずれの回転速度においても同様の結果が得られた。

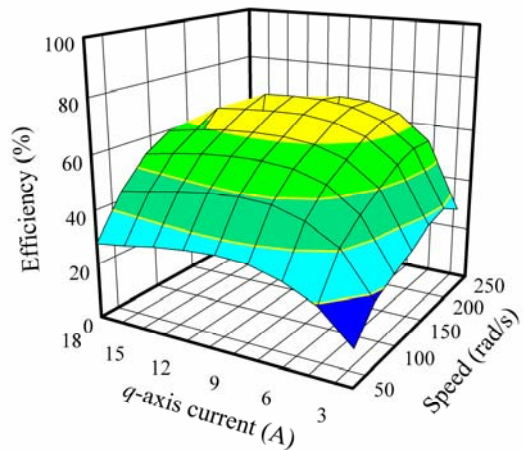
図 12 は回転速度を低速から高速領域まで変化させたときの実験結果である。図 12(a)に i_d を一定とした場合、(b)に従来の最大効率励磁条件、(c)に提案する最大効率励磁条件の効率特性を示す。どの回転速度においても同様の結果が得られ、提案法が最も高い効率となっている。図 12 の実験結果と図 7 の理論特性を比較すると、軽負荷以外ではどの励磁条件においても同様の効率特性が得られていることがわかる。理論特性は(8)から求めた特性であり、機械損が含まれていないため、軽負荷において効率が高くなっている。実際には軽負荷領域では出力に対して機械損の割合が大きくなるため、実験結果のような特性となる。実験結果では、提案法を用いることにより、 i_d を一定とした場合に対して 7.3pt 効率が改善し、従来の最大効率運転法に対して 2.7pt 効率が改善することを確認した。

8. まとめ

本稿では SynRM の磁気飽和特性と鉄損の特性を考慮した最大効率励磁条件を数理的に導出し、理論的に検証するとともに実機により従来法と提案法の運転特性を検証した。磁気飽和と鉄損の特性を考慮することにより、励磁電流は変化し d 軸電流を従来法と比較して抑制した方が高効率化できる。2つの従来法と比較して、提案法では負荷や回転速度によらず運転効率が改善されることを示し、数理的に導出した励磁条件により大幅な効率改善が可能であることを確認した。実機では提案法を用いることにより、従来の最大効率運転法から平均で 2.7pt 効率が改善された。また、理論特性と実験結果においてトルク特性と効率特性でよく一致した結果が得られ、数学モデルの妥当性も立証できた。

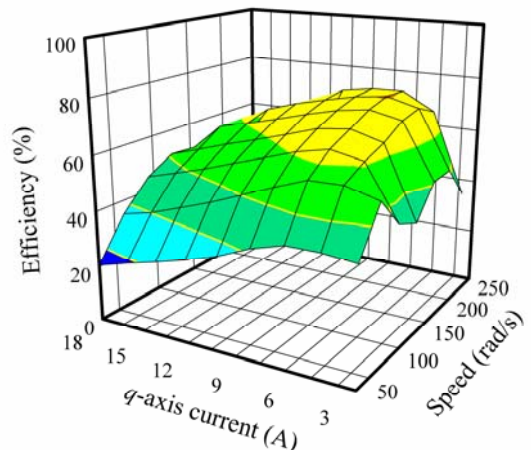
文 献

- (1) N. Iiduka, T. Noguchi, "Mathematical Derivation of Excitation Condition to Realize Maximum Efficiency Operation of Synchronous Reluctance Motor and Its Experimental Verification", PE-07-11・PSE-07-26・SPC07-51, pp. 25-30 (2007)(in Japanese).
飯塚直毅・野口季彦:「同期リラクタンスモータの最大効率運転を実現する励磁条件の数理的導出と実験検証」電学電力技術・電力系統技術・半導体電力変換研究会, PE-07-11・PSE-07-26・SPC07-51, p.p. 25-30 (2007)
- (2) R. Hiyoshi, T. Noguchi, "Maximum Efficiency Operation and Maximum Torque Operation of Synchronous Reluctance Motor Taking Magnetic Saturation and Iron Core Loss Characteristics into Account", IEEJ Proc. IAS Annual Conference, 3-49 (2013)
日吉良太・野口季彦:「磁気飽和と鉄損の特性を考慮した同期リラクタンスモータの最大効率運転と最大トルク運転」電学産業応用部門大会, 3-49 (2013)
- (3) S. Yamamoto, T. Ara, "Determination of Synchronous Reactance of Synchronous Reluctance Motor", 2000 National Convention Record IEE Japan, No.5-018, p.p.1761 (2001)
山本 修・荒 隆裕:「シンクロナスリラクタンスモータの同期リアクタンス測定法」電学全国大会, No.5-0.18, p.p.1761 (2001)
- (4) S. Yamamoto, T. Ara, "Determination of Direct and Quadrature Axes Inductances of Reactance Motors Taking into Account Cross Saturation", IEEJ Trans., Vol.123, No.8, p.p.911-917 (2003)
山本 修・荒 隆裕:「軸間の干渉を考慮したリラクタンスモータの直軸および横軸インダクタンス算出方」電学論 D, Vol.123, No.8, p.p.911-917 (2003)
- (5) M. Nashiki, Y. Inoue, Y. Kawai, T. Yokochi, A. Satake, S. Okuma "Improvements of Power Factor and Torque of a Synchronous Reluctance Motor with a Slit Rotor", IEEJ Trans., Vol.126, No.2, p.p.116-123 (2006)
梨木 政行・井上 芳光・川井 庸市・横地 孝典・佐竹 明喜・大熊 繁:「スリット回転子を用いたシンクロナスリラクタンスモータの力率・トルク向上に関する検討」電気学会論文誌 D, Vol.126, No.2, P116-123 (2006)



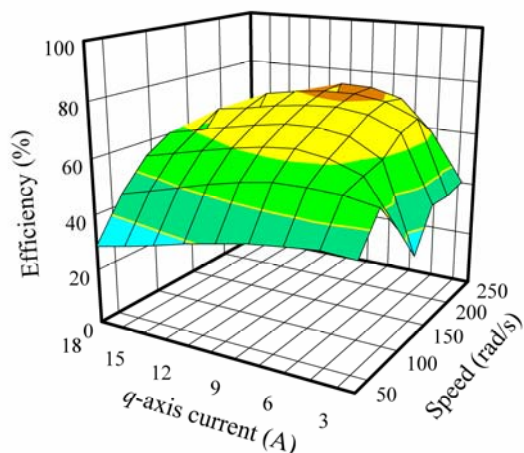
(a) 励磁条件 : $i_d = 10A$

(a) Magnetizing condition : $i_d = 10A$ const.



(b) 励磁条件 : $i_d = i_q$

(b) Magnetizing condition : $i_d = i_q$.



(c) 励磁条件 : Eq. (9)

(c) Magnetizing condition : Eq. (9).

図 12 励磁条件による効率特性の比較 (実験結果)

Fig. 12. Comparison of efficiency characteristics for three magnetizing conditions (experimental results).