

# 磁気飽和モデルを用いた 同期リラクタンスモータの最大効率運転法

加藤隆弥\* 野口季彦 (長岡技術科学大学)

Maximum Efficiency Operating Method of Synchronous Reluctance Motor Using Magnetic Saturation Model  
Takaya Kato, and Toshihiko Noguchi (Nagaoka University of Technology)

## Abstract

This paper describes a novel control strategy of a synchronous reluctance motor to achieve the maximum efficiency operation. The key feature of this strategy is an optimal magnetization of the motor taking its magnetic saturation model into account. The optimal magnetization condition has been proven to be a nonlinear function of the torque current, which completely differs from a conventional condition, i.e. the magnetizing current equals to the torque current.

In this paper, a theoretical aspect of the proposed algorithm is developed and several experimental results are presented as well as computer simulation results. These results demonstrate a superior performance of the proposed method to that of the conventional technique.

キーワード：同期リラクタンスモータ，インダクタンス，磁気飽和モデル，最大効率  
(synchronous reluctance motor, inductance, magnetic saturation model, maximum efficiency)

## 1. はじめに

従来、AC サーボモータとして回轉子に永久磁石を有するものが専ら使用されているが、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) も工作機械等に使われ始めている。また、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。周知のように、SynRM には励磁電流を流す必要があり、これがモータの運転効率や力率低下を招く主因となっている<sup>[1]</sup>。このため、励磁電流を運転状態に応じて変化させることにより、最大効率で運転する手法が有効となる。しかし、従来の最大効率運転法では磁気飽和によるインダクタンスの変動を考慮していないため、必ずしも効率が最大化されるとは限らない。そこで、筆者らは磁気飽和を有する SynRM の最大効率運転法を検討し、その有効性を計算機シミュレーションにより確認した<sup>[2]-[4]</sup>。

本稿では、まず、実機のインダクタンス測定を行い磁気飽和モデルとして定式化する。その結果を SynRM の数学モデルに適用して、最大効率運転条件を理論的に導出する。次に、計算機シミュレーションおよび実験により、提案する最大効率運転法の運転特性を評価する。

## 2. 同期リラクタンスモータの磁気飽和特性

### 2.1) インダクタンスの測定法

SynRM の鉄心は磁気飽和特性をもつため、固定子巻線に流れる

電流によってインダクタンスが大きく変動する。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。また、一般に SynRM は磁気飽和が顕著となる動作点近傍で運転することが多い。そこで、電流に対するインダクタンスの変動を考慮することで、最大効率を得られる励磁条件を考えなければならない。ここでは、Table 1 に示した実機の  $L_d$ 、 $L_q$  を測定し磁気飽和特性を実験的に確認する。

測定法としては SynRM をベクトル制御により運転し、各軸電流に対するインダクタンス  $L_d$ 、 $L_q$  をモータの数学モデルから計算する。まず、各軸電流  $i_d$ 、 $i_q$  および各軸電圧  $v_d$ 、 $v_q$  を測定する。これらの値を用いて、(1)より  $L_d$ 、 $L_q$  を求める。

$$\begin{cases} L_d = \frac{v_q - R_a i_q}{\omega_m i_d} \\ L_q = \frac{R_a i_d - v_d}{\omega_m i_q} \end{cases} \quad (1)$$

表 1 供試モータの仕様  
Table 1. Specifications of test motor.

Number of Poles	6
Rated Current	10.7 (A)
Rated Power	1.0 (kW)
Rated Speed	1300 (r/min)
Rated Torque	7.1 (Nm)
Rotor Inertia	0.00416 (kgm <sup>2</sup> )

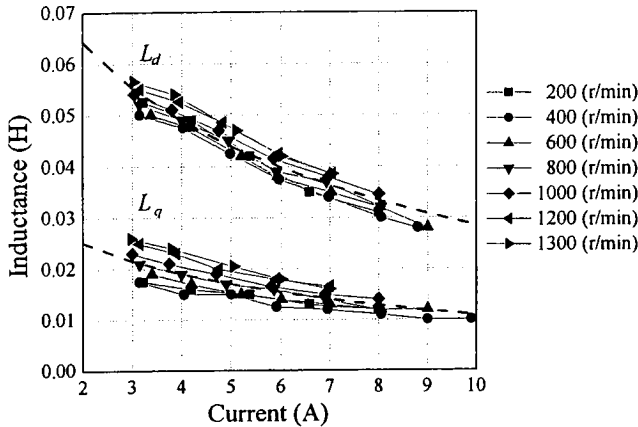


図1 供試モータの磁気飽和特性  
Fig. 1. Magnetic saturation characteristics of test motor.

### 2.2 磁気飽和特性のモデリング

Fig. 1 に供試モータの種々の速度におけるインダクタンスの電流依存性を示す。同図より、電流の増加とともにインダクタンスが減少していくことが確認でき、速度によるインダクタンスのばらつきはあまり見られない。このインダクタンスの各軸電流に対する特性をモデル化すると、自然対数を用いて次のように定式化することができる。

$$\begin{cases} L_d = -k_{L_d} \ln(i_d) + L_{d0} \\ L_q = -k_{L_q} \ln(i_q) + L_{q0} \end{cases} \quad (2)$$

回転速度 200~1300 (r/min) についてインダクタンスの平均を取ると、Fig. 1 より(2)のパラメータは次のように決定される。

$$\begin{cases} k_{L_d} = 0.0223, & L_{d0} = 0.0798 \\ k_{L_q} = 0.0089, & L_{q0} = 0.0314 \end{cases} \quad (3)$$

## 3. 磁気飽和を考慮した最大効率運転法

### 3.1 鉄損を無視した場合の最適励磁条件

Fig. 2 に鉄損を無視した SynRM の  $d$  軸,  $q$  軸等価回路を示す。ここで、 $R_a$  は固定子巻線抵抗である。したがって、定常状態の電圧電流方程式は以下のように表される。

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a & -\omega_m L_q \\ \omega_m L_d & R_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \quad (4)$$

このとき、トルク  $T$  およびモータの運転効率  $\eta$  は(5), (6)となる。

$$T = (L_d - L_q)i_d i_q \quad (5)$$

$$\eta = \frac{\omega_m (L_d - L_q)i_d i_q}{R_a (i_d^2 + i_q^2) + \omega_m (L_d - L_q)i_d i_q} \quad (6)$$

これより、最大効率を得る最適励磁条件は  $\partial\eta/\partial i_d = 0$  となる  $i_d$  を見つけることにより導くことができる。もし、 $L_d, L_q$  が変動せず一定であるならば、最適励磁条件は(7)のように求められ、 $i_d$  を  $i_q$

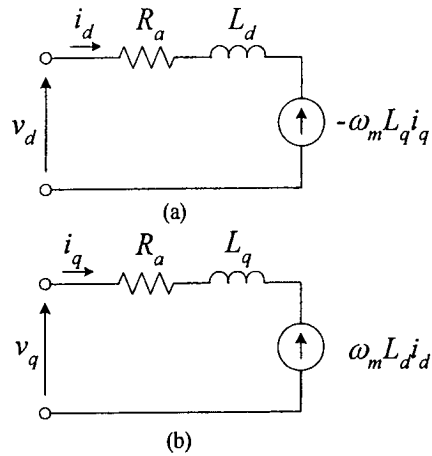


図2 鉄損を無視した同期リラクタンスモータの等価回路  
(a)  $d$  軸等価回路 (b)  $q$  軸等価回路

Fig. 2. Equivalent circuits without iron-core losses.

(a) Equivalent circuit of  $d$ -axis. (b) Equivalent circuit of  $q$ -axis.

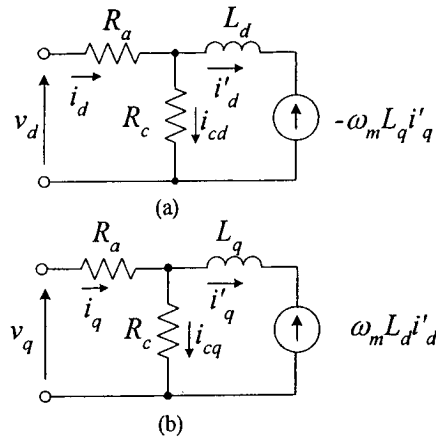


図3 鉄損を考慮した同期リラクタンスモータの等価回路  
(a)  $d$  軸等価回路 (b)  $q$  軸等価回路

Fig. 3. Equivalent circuits with iron-core losses.

(a) Equivalent circuit of  $d$ -axis. (b) Equivalent circuit of  $q$ -axis.

と等しくなるように制御すればよい。

$$i_d = \pm i_q \quad (7)$$

しかし、実際のインダクタンスは、前述のように各軸電流の対数関数となっているため、(7)が最適解とはならない。そこで、(2), (3)を(6)に代入して  $\partial\eta/\partial i_d = 0$  となる最適励磁条件を再度求めると(8)のようになる。

$$i_d = \pm \sqrt{\frac{L_d - L_q - k_{L_d} i_q}{L_d - L_q + k_{L_d} i_q}} i_q \quad (8)$$

(8)は  $i_d$  や  $i_q$  の関数である  $L_d, L_q$  を含んでいるので、まだ完全に最適励磁条件が解けたわけではない。したがって、適当な  $i_d$  と  $i_q$  を与えて繰り返し収束計算を行うことにより、 $i_q$  に対する最適な  $i_d$  を求めなければならない。

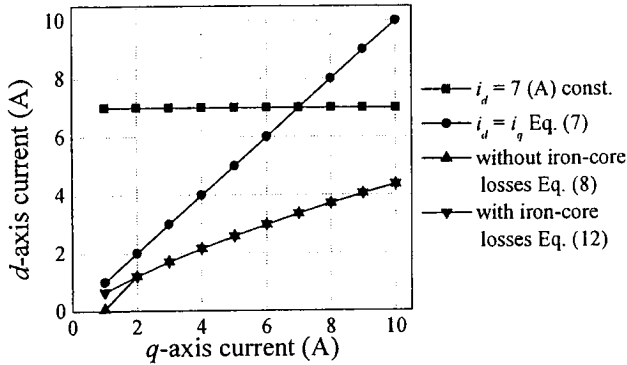


図4 励磁電流特性 (計算結果)  
Fig. 4. Magnetizing current characteristics (simulation results).

### 〈3.2〉鉄損を考慮した場合の最適励磁条件

次に、鉄損を考慮した場合について考える。Fig. 3は鉄損を考慮した SynRM の等価回路である。このときの電圧電流方程式は(9)と与えられる。

$$\begin{bmatrix} v_d - R_a i_d \\ v_q - R_a i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_m L_q \\ \omega_m L_d & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i'_d \\ i'_q \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} i'_d \\ i'_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} - \frac{1}{R_c} \begin{bmatrix} v_d - R_a i_d \\ v_q - R_a i_q \end{bmatrix}$$

前述の銅損のみを考慮した場合と同様に考えると、トルク  $T$  および運転効率  $\eta$  は近似的に(10)、(11)となる。

$$T = \frac{R_c^2}{(R_c^2 + \omega_m^2 L_d L_q)^2} (L_d - L_q) (R_c i_d + \omega_m L_q i_q) (R_c i_q - \omega_m L_d i_d) \quad (10)$$

$$\eta = \frac{\omega_m (L_d - L_q) i_d i_q}{\left\{ R_a + \omega_m^2 L_d L_q \frac{R_a + R_c}{R_c^2} \right\} (i_d^2 + i_q^2) + \omega_m (L_d - L_q) i_d i_q} \quad (11)$$

最大効率となる最適励磁条件はインダクタンスの変動を考慮しなければ、銅損のみの場合と同じく(7)となる。すなわち、(11)について  $\partial \eta / \partial i_d = 0$  となる  $i_d$  を解くと、

$$i_d = \pm i_q \quad (7 \text{ 再掲})$$

であり、常に  $q$  軸と同じ電流を  $d$  軸に流すことにより、最大効率運転を達成することができる。しかし、磁気飽和特性を考慮すると、最適励磁条件は  $\partial \eta / \partial i_d = 0$  より銅損のみを考慮した場合と同様に計算すれば、(12)のように導かれる。

$$i_d = \pm \frac{\sqrt{(L_d - L_q - k_{l,d}) R_a + \omega_m^2 L_q \left\{ (L_d - L_q) L_d - k_{l,d} L_q \right\} \frac{R_a + R_c}{R_c^2}}}{\sqrt{(L_d - L_q + k_{l,d}) R_a + \omega_m^2 L_q \left\{ (L_d - L_q) L_d - k_{l,d} L_q \right\} \frac{R_a + R_c}{R_c^2}}} i_q \quad (12)$$

表2 運転効率の比較 (シミュレーション結果)

Table 2. Comparison of efficiency characteristics (simulation results).

$\omega_m$ (r/min)	$i_q$ (A)	$\eta$ (%)						
		without iron-core losses			with iron-core losses			
		$i_d=7$	$i_d=i_q$	Eq. (8)	$i_d=7$	$i_d=i_q$	Eq. (12)	
600	3	38.0	68.9	72.9	37.6	68.5	72.7	
	4	47.0	66.0	71.1	46.7	65.6	70.9	
	5	52.6	63.2	69.5	52.3	62.9	69.3	
	6	56.1	60.6	68.1	55.8	60.4	67.9	
	7	58.2	58.2	66.8	57.9	57.9	66.7	
	8	59.4	55.7	65.7	59.2	55.6	65.5	
	9	60.1	53.4	64.6	59.9	53.2	64.5	
	10	60.3	51.0	63.6	60.2	50.9	63.5	
	1300	3	57.0	82.8	85.4	53.8	80.2	83.5
		4	65.8	80.8	84.2	63.1	78.6	82.6
5		70.6	78.8	83.1	68.5	76.9	83.1	
6		73.4	77.0	82.2	71.6	75.2	82.1	
7		75.1	75.1	81.4	73.5	73.5	81.3	
8		76.0	73.2	80.6	74.7	71.8	79.6	
9		76.5	71.3	79.8	75.4	70.0	79.0	
10		76.7	69.3	79.1	75.7	68.2	79.1	

(12)においても収束計算を行うことにより、鉄損を考慮した場合にも最大効率を得られる最適励磁条件を求めることができる。

## 4. シミュレーションによる制御特性の検証

### 〈4.1〉最適励磁特性

本方式の基本的な運転特性を確認するために計算機シミュレーションを行った。シミュレーションに用いる SynRM は Table 1 の仕様をもつモータとした。なお、シミュレーションにおいては  $R_a$  を 0.43 ( $\Omega$ ) とし、等価鉄損抵抗  $R_c$  は 50 (Hz) のとき 200 ( $\Omega$ ) となるように設定した。Fig. 4 に各種励磁条件を示す。一つは  $i_d=7$  (A) 一定となるように励磁する場合であり、もう一つの従来法は  $i_d=i_q$  となるように励磁電流を制御する場合である。一方、(8)や(12)の収束計算から得られた提案法による最適励磁条件は、従来の  $i_d=i_q$  と比較して更に励磁電流を低減するものである。Fig. 4 より最大効率運転が得られる励磁条件は  $i_d$  が  $i_q$  に対して小さくなるため、二つの従来法と比較すると、 $q$  軸電流が小さな領域では  $i_d=i_q$  としたときの励磁特性が最大効率を得られる条件に近づき、一方、 $q$  軸電流が大きな領域においては、 $i_d=7$  (A) とした場合の励磁特性が最適励磁条件に近づく。このように励磁特性が最適励磁条件に近づいている方がより高い運転効率となること、以下に述べる Fig. 5, Fig. 6 および Table 2 によって確認できる。提案法では最適励磁電流によりモータを励磁しているため、三つの運転法の中で最も高い運転効率を実現することができる。

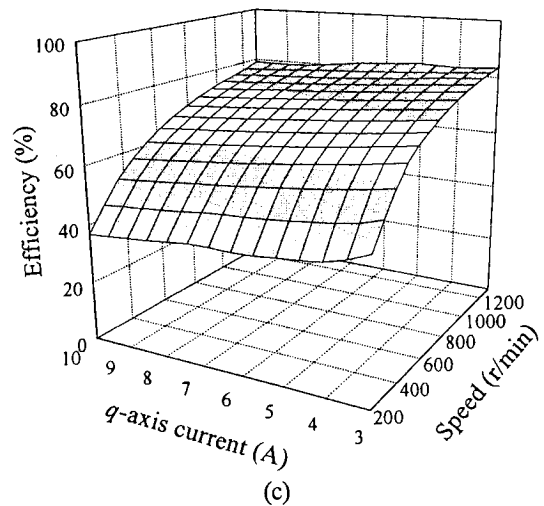
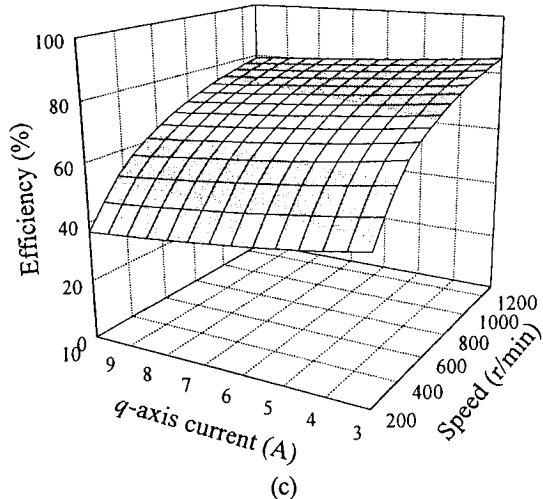
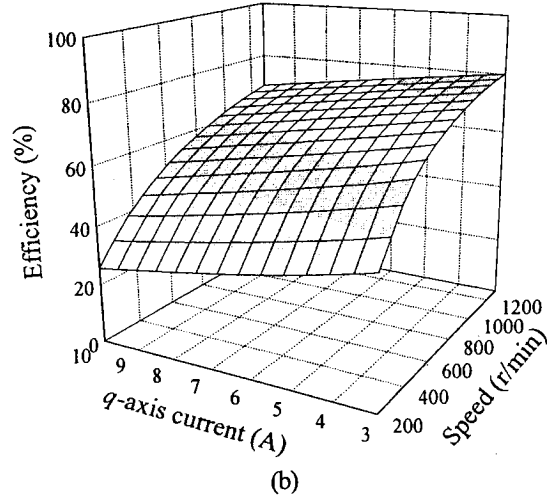
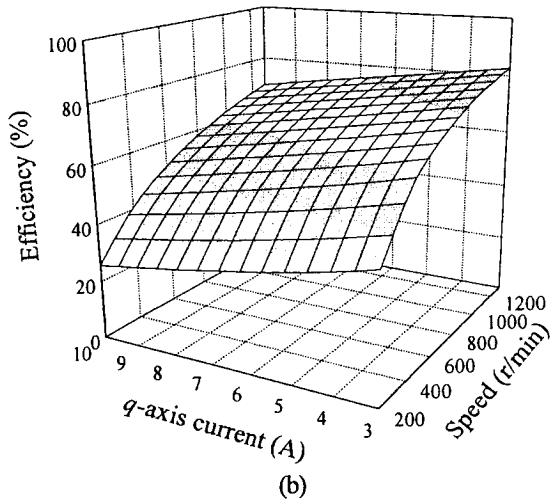
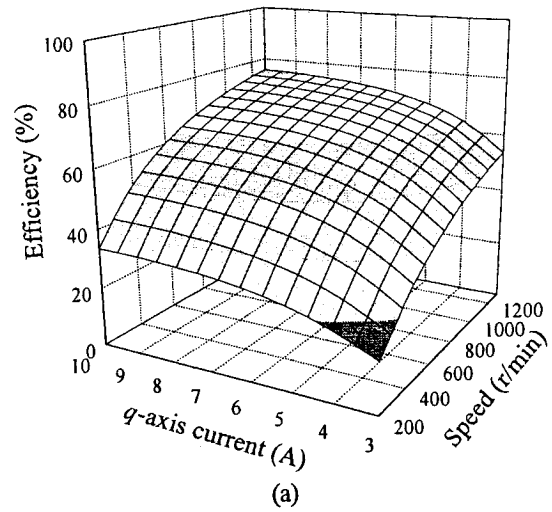
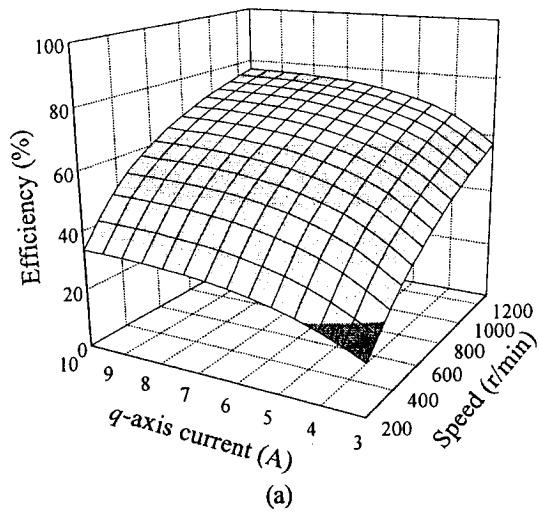


図5 鉄損を無視した場合の運転効率比較 (シミュレーション結果)  
 (a) 励磁条件:  $i_d = 7$  (A) (b) 励磁条件:  $i_d = i_q$  (c) 励磁条件: Eq. (8)

Fig. 5. Comparison of efficiency characteristics without iron-core losses (simulation results).  
 (a) Magnetization condition:  $i_d = 7$  (A). (b) Magnetization condition:  $i_d = i_q$   
 (c) Magnetization condition: Eq. (8).

図6 鉄損を考慮した場合の運転効率比較 (シミュレーション結果)  
 (a) 励磁条件:  $i_d = 7$  (A) (b) 励磁条件:  $i_d = i_q$  (c) 励磁条件: Eq. (12)

Fig. 6. Comparison of efficiency characteristics with iron-core losses (simulation results).  
 (a) Magnetization condition:  $i_d = 7$  (A). (b) Magnetization condition:  $i_d = i_q$   
 (c) Magnetization condition: Eq. (12).

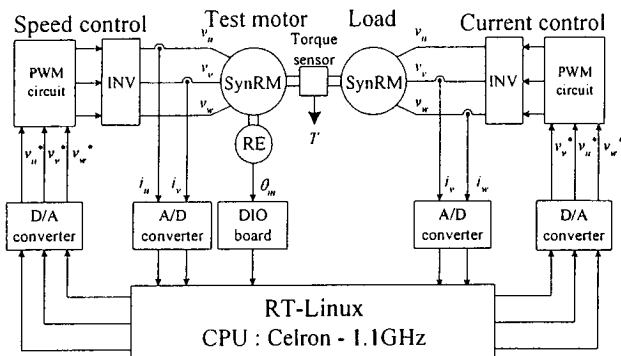


図7 実機システム構成

Fig. 7. Experimental setup.

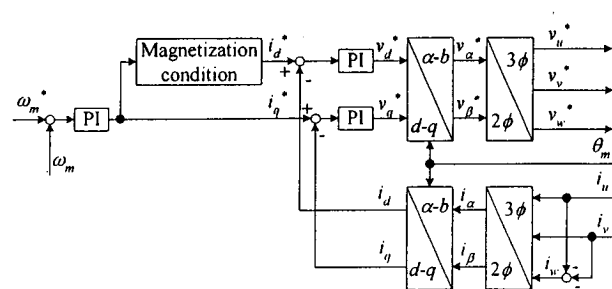


図8 RT-Linuxによる制御ブロック図

Fig. 8. Block diagram of RT-Linux based control.

#### <4.2> 運転効率特性

Fig. 5 および Table 2 に鉄損を無視した場合について運転効率の計算結果を示す。Fig. 5 (a)に  $i_d=7$  (A)一定, (b)に(7)に基づく従来の最大効率運転法, (c)に提案法による運転効率を示す。いずれの場合も  $L_d, L_q$  は Fig. 1 の特性をもっているものとしている。これらと比較すると,  $i_d=7$  (A)とした場合に比べ, 従来の最大効率運転法は  $q$  軸電流が小さな領域で効率改善がなされることが確認できる。しかし,  $q$  軸電流が大きくなると逆に効率が低くなっている。全体としては,  $q$  軸電流が大きい領域における効率の低さよりも,  $q$  軸電流が小さい領域での効率改善の効果が顕著である。提案法を用いた場合には,  $q$  軸電流が小さな領域における従来の最大効率運転法の効率を上回り,  $q$  軸電流が大きな領域においても  $i_d=7$  (A)とした場合の効率を上回っており, 全体的に従来法よりも効率の改善がなされる。

次に, Fig. 6 に鉄損を考慮した場合の運転効率を示す。これらより, 鉄損を無視した場合に比べて若干運転効率が下がっているが, 全体としては同じような傾向をもつことが確認できる。

### 5. 実機による制御特性の検証

#### <5.1> 実験システムの構成

本稿では Fig. 7 に示したようにリアルタイム OS である RT-Linux を制御演算に用いて全デジタル・ソフトウェア制御系を構成した。RT-Linux によって供試モータと負荷モータを同時に制御する。

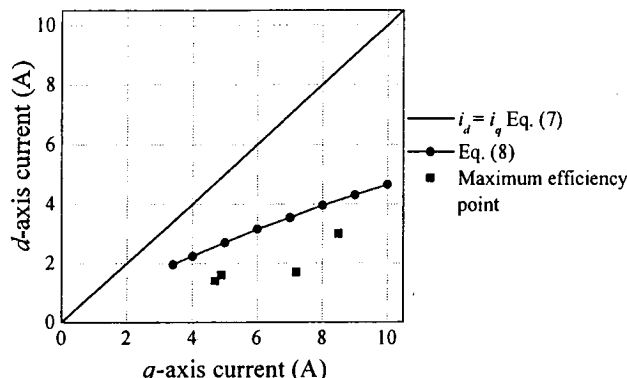


図9 励磁電流特性 (実験結果)

Fig. 9. Magnetizing current characteristics (experimental results).

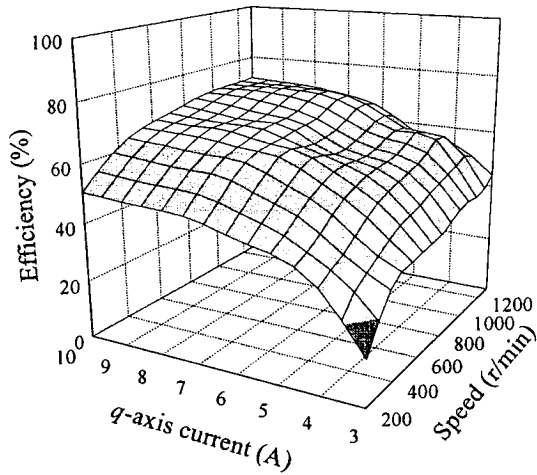
また, 各種フィードバック量は 12bit の A/D コンバータを通じて RT-Linux 内に取り込まれている。サンプリング周期は RT-Linux 内のスレッドによって  $100$  ( $\mu$ s) としている。Fig. 8 に RT-Linux 内で処理される制御ブロック図を示す。速度指令  $\omega_m^*$  とフィードバックしてきた実速度  $\omega_m$  を比較し PI レギュレータを通じて  $q$  軸電流指令値  $i_q^*$  を決める。この  $i_q^*$  に対して 3通りの方法で  $i_d^*$  を決定する。一つ目の方法は  $i_d^*=7$  (A)一定とするものであり, もう一つは  $i_d^*=i_q^*$  とするもの, 更に(8)や Fig. 4 に基づいて  $i_d^*$  を決める提案法である。他は通常のベクトル制御を行い, 三相電圧指令  $v_u^*, v_v^*, v_w^*$  を D/A コンバータにより出力する。なお, PWM 制御は三角波比較方式とし,  $2$  ( $\mu$ s)の上下アーム短絡防止時間を設けている。

#### <5.2> 最適励磁特性

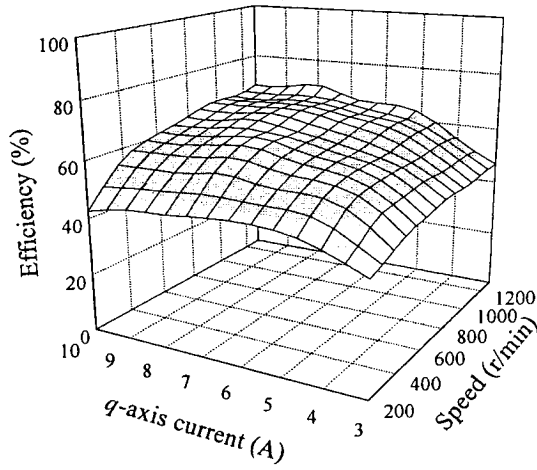
提案法における励磁電流特性を Fig. 9 に示す。提案法の励磁特性は  $i_d=i_q$  よりも小さくなっている。しかし, 実際に最大効率が得られる点を探索してみると, 提案法よりも更に小さい位置に存在している。これは(8)や Fig. 4 の導出過程で機械損が考慮されていないためであり, 実際の実験システムにおいては非常に大きな摩擦の影響を無視できないためと考えられる。

#### <5.3> 運転効率特性

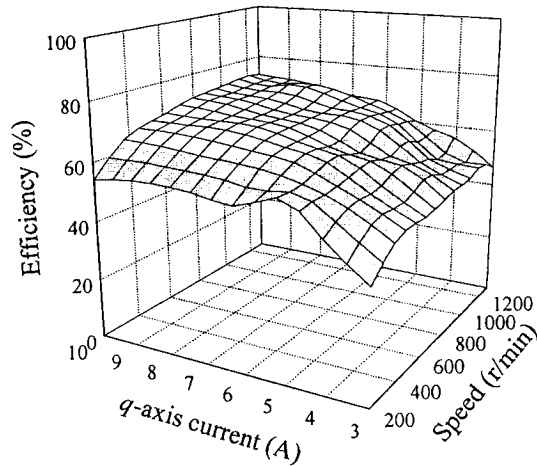
Fig. 10 および Table 3 に実機による鉄損を無視した場合の効率比較を示す。比較結果を見ると, シミュレーションと同様に効率改善が見られる。まず, 二つの従来法を比較すると,  $i_d=i_q$  とする従来の最大効率運転法を採用することにより,  $i_d=7$  (A)としたときよりも  $q$  軸電流が小さい領域における効率が改善され,  $q$  軸電流が大きな領域においては逆に効率が低下する。また, 提案法では, 全体的に従来法に比べて効率が改善されていることが確認できる。ただし,  $i_d=i_q$  や提案法において, シミュレーションでは  $q$  軸電流が小さくなるとモータの運転効率が高くなっているのに対し, 実際には  $q$  軸電流の低下に伴い効率が低下している。これは前述のように, (8)や Fig. 4 では機械損を考慮していないため, シミュレーションにおいては  $q$  軸電流の増加に伴い効率は高くなるが, 実機では電流が小さいほど機械損の割合が大きくなるため, 効率が低下するものと考えられる。



(a)



(b)



(c)

図10 鉄損を無視した場合の運転効率比較 (実験結果)  
 (a) 励磁条件:  $i_d=7$  (A) (b) 励磁条件:  $i_d=i_q$  (c) 励磁条件: Eq. (8)  
 Fig. 10. Comparison of efficiency characteristics without iron-core losses (experimental results).  
 (a) Magnetization condition:  $i_d=7$  (A). (b) Magnetization condition:  $i_d=i_q$   
 (c) Magnetization condition: Eq. (8).

表3 運転効率の比較 (実験結果)

Table 3. Comparison of efficiency characteristics (experimental results).

$\omega_m$ (r/min)	$i_q$ (A)	$\eta$ (%)			
		$i_d=7$	$i_d=i_q$	Eq. (8)	
600	3	34.7	44.7	46.0	
	4	47.5	52.2	54.1	
	5	55.3	58.5	61.1	
	6	61.9	60.4	63.9	
	7	63.6	63.6	67.1	
	8	65.8	62.7	68.2	
	9	66.1	61.1	68.0	
	10	66.5	61.0	68.3	
	1300	3	44.2	46.9	46.9
		4	54.0	54.5	55.5
5		56.8	63.0	59.6	
6		64.4	65.3	66.1	
7		68.2	66.3	67.7	
8		70.1	70.3	70.2	
9		71.0	68.4	71.8	
10		71.7	68.0	72.7	

## 6. まとめ

本稿では、磁気飽和特性を考慮した SynRM の最大効率運転法を提案した。シミュレーションによりその制御特性の評価を行うとともに、実験システムを構築し実験検証も行った。また、従来法の実験結果と比較検討することにより、提案法の優位性を確認した。提案法を用いると従来法に比べ、平均 4 (%) 程度の運転効率が改善される。

運転効率は最適励磁条件となる提案法を用いた場合に最も高くなるが、二つの従来法においても励磁特性が最適励磁条件に近づく領域では効率が高くなることが確かめられた。また、機械損の影響により、最大効率が得られる条件は理論的に導出した最適励磁条件よりも  $i_d$  を更に小さくした場合であることを確認した。

## 参考文献

- [1] 松井, 千葉, 武田: <解説> 「リラクタンストルクを利用した回転機」 電学論 D, Vol.114, No.9, pp.824 (平6)
- [2] 會澤, 野口: 「磁気飽和を考慮した同期リラクタンスマータの高効率運転法」 第11回電学新潟支所大会, IV-16 (平13)
- [3] 會澤, 野口: 「磁気飽和特性に着目した同期リラクタンスマータの高効率運転法」 電学全国大会, 4-116 (平14)
- [4] 加藤, 野口: 「磁気飽和を考慮した同期リラクタンスマータの最大効率運転法と最大トルク運転法」 電学全国大会, 4-116 (平15)

原稿受付日	平成16年1月7日
-------	-----------

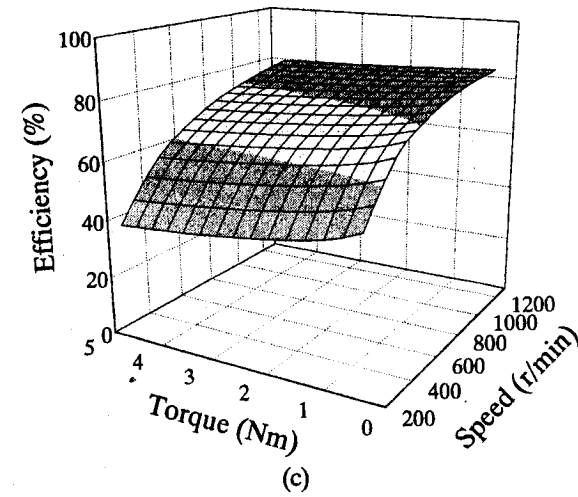
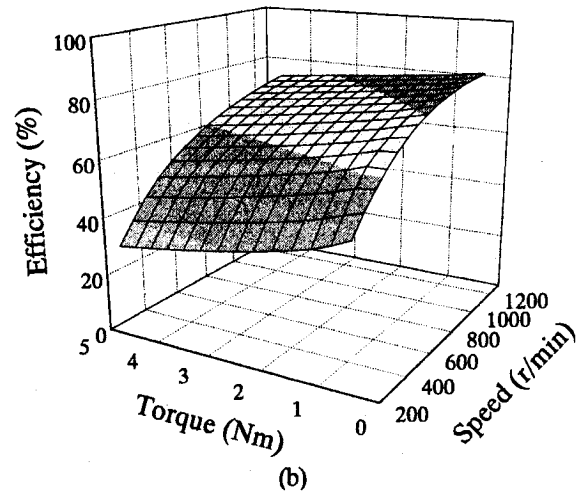
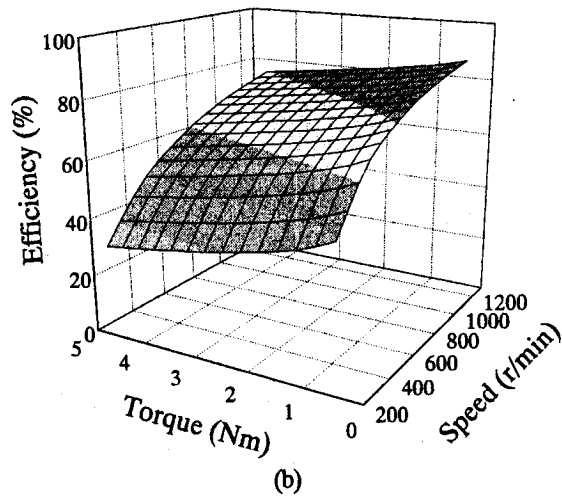
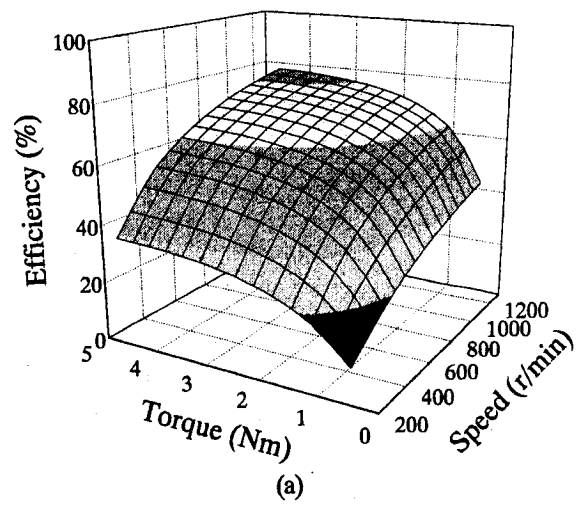
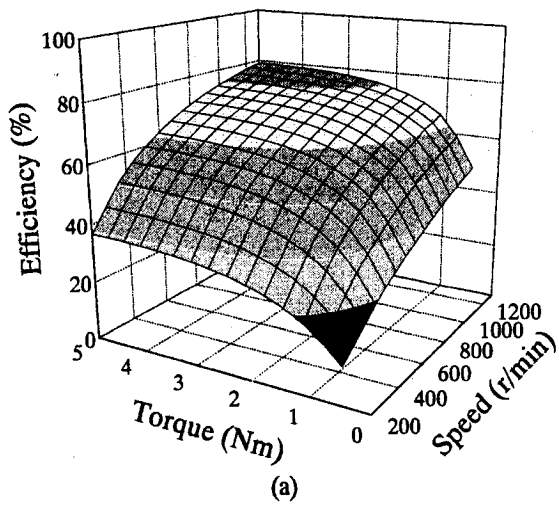
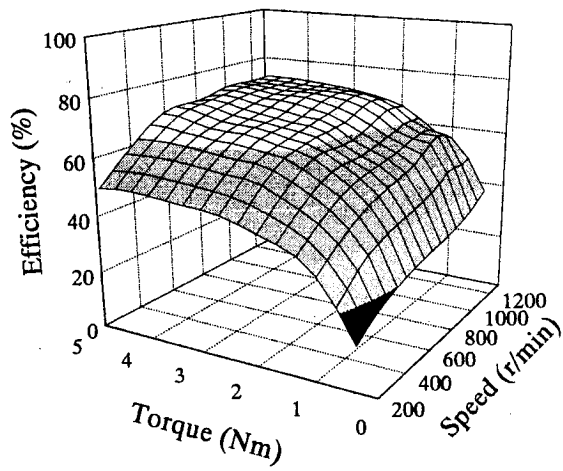


図5 鉄損を無視した場合の運転効率比較(シミュレーション結果)  
 (a) 励磁条件:  $i_d = 7$  (A) (b) 励磁条件:  $i_d = i_q$  (c) 励磁条件: Eq. (8)  
 Fig. 5. Comparison of efficiency characteristics without iron-core losses (simulation results).

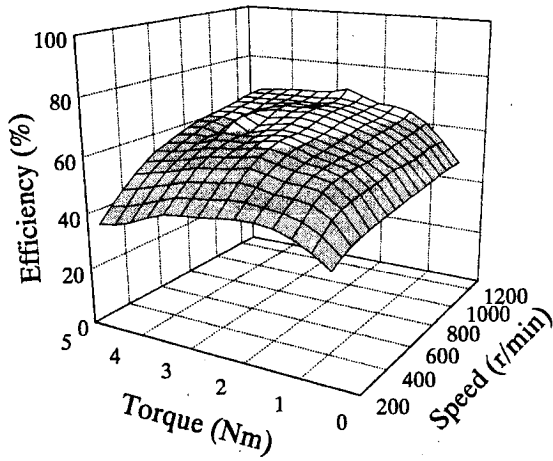
(a) Magnetization condition:  $i_d = 7$  (A). (b) Magnetization condition:  $i_d = i_q$   
 (c) Magnetization condition: Eq. (8).

図6 鉄損を考慮した場合の運転効率比較(シミュレーション結果)  
 (a) 励磁条件:  $i_d = 7$  (A) (b) 励磁条件:  $i_d = i_q$  (c) 励磁条件: Eq. (12)  
 Fig. 6. Comparison of efficiency characteristics with iron-core losses (simulation results).

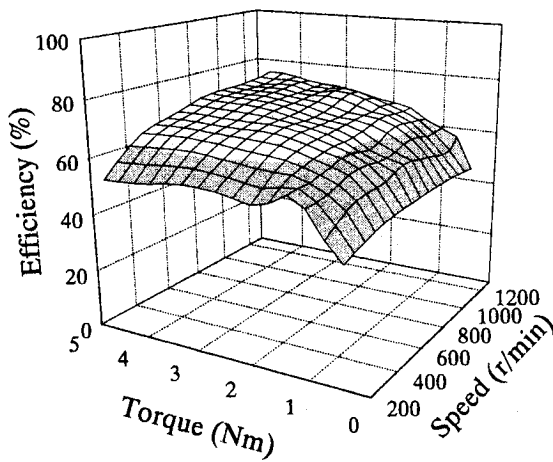
(a) Magnetization condition:  $i_d = 7$  (A). (b) Magnetization condition:  $i_d = i_q$   
 (c) Magnetization condition: Eq. (12).



(a)



(b)



(c)

図10 鉄損を無視した場合の運転効率比較 (実験結果)

(a) 励磁条件:  $i_d = 7$  (A) (b) 励磁条件:  $i_d = i_q$  (c) 励磁条件: Eq. (8)

Fig. 10. Comparison of efficiency characteristics without iron-core losses (experimental results).

(a) Magnetization condition:  $i_d = 7$  (A), (b) Magnetization condition:  $i_d = i_q$ ,

(c) Magnetization condition: Eq. (8).