

# 回路 - 磁場連成解析による SRM の励磁方式に関する考察

## Excitation Methods for SRM Based on Electric and Magnetic-Coupled Analysis

後藤博樹・志田淳・中村健二・郭海蛟・一ノ倉理

東北大学大学院工学研究科, 仙台市青葉区荒巻字青葉 05 (〒980-8579)

H. Goto, J. Shida, K. Nakamura, H. J. Guo, and O. Ichinokura

Graduate School of Engineering, Tohoku University, 05 Aoba Aramaki Aoba-ku, Sendai 980-8579

Switched reluctance motors (SRMs) have such desirable features as simple construction, high reliability, and low cost. Characteristics of the SRM differ with the excitation timing or period even if the SRM is operated at the same source voltage, because motor torque depends on gap reluctance, which changes with rotor position. Examinations of the excitation timing of SRMs have been reported in many papers. On the other hand, no examination of excitation direction has been reported. Furthermore, combinations of excitation direction in each phase also have not been investigated. In this paper, based on a finite element analysis, we examine the effects of an excitation direction on characteristics of the SRM.

**Key words:** switched reluctance motor (SRM), finite element analysis, coupled analysis

### 1. はじめに

スイッチトリラクタンスモータ (以下では SRM と略称) は, 磁気回路中の磁気抵抗の変化に起因するリラクタンストルクを利用した電動機である。固定子, 回転子は共に突極構造であり, 巻線は固定子の方に集中巻される。また, 永久磁石も使用しない。そのため, 誘導電動機や永久磁石同期電動機と比較して, 構造が簡単で堅牢, 高速回転に適する, 高温などの厳しい環境下でも使用可能などの特長を有しており, 安価な可変速電動機として応用が期待されている<sup>1, 2)</sup>。しかしながら, SRM は突極構造に起因するトルクリプルや, 磁気吸引力に起因する振動および騒音の問題があり, 従来応用は航空機のスタータや燃料ポンプなど, 特殊な用途に限られていた<sup>3)</sup>。

この問題に対して, 近年パワーエレクトロニクス技術の進展により, トルクリプルや振動を抑制する駆動方式に関する研究や<sup>4)</sup>, センサレスドライブに関する研究が進展している<sup>5)</sup>。このような技術の進展により, 既に米国では洗濯機用モータとして実用化された例もあり, また最近では電気自動車や電動二輪車などへの適用も検討され始めている<sup>6, 7)</sup>。

SRM は励磁相を回転子位置角に応じて適切に切り替えることにより連続回転が得られるが, トルクがギャップ磁気抵抗の空間分布に依存するため, 励磁相の切り替えのタイミングや励磁期間によってモータ諸特性が大きく変化する。そのため, SRM はモータ構造の最適設計に加えて, 最適励磁法に関する検討が重要である<sup>8-10)</sup>。

一般に SRM は非対称ハーフブリッジコンバータなどによりユニポーラ駆動されるため, 固定子極における励磁の方向は常に同

一である。ここで, 固定子極における励磁の方向は固定子から回転子あるいはその逆方向の二種類存在する。従って, 極毎の励磁方向の組み合わせには, いくつかのパターンが存在する。しかしながら, これまでこのような励磁パターンとモータ特性の関係について検討した例はほとんど無い。

本稿では, 有限要素法 (FEM) を用いた回路 - 磁場連成解析により, 励磁パターンとモータ諸特性の関係について検討を行った。

### 2. SRM の励磁パターンに関する検討

#### 2.1 SRM の動作原理

Fig. 1 に考察に使用した固定子 8 極, 回転子 6 極の四相 SRM を示す。鉄心材料は厚さ 0.35 mm の無方向性電磁鋼板である。Fig. 2 に SRM の駆動回路である非対称ハーフブリッジコンバータを示す。

今, A 相の固定子極と回転子極が対向したときの回転子位置角を  $\theta = 0^\circ$  とし, 時計回りの方向を回転の正方向とすれば, A 相のインダクタンスは  $\theta = 0^\circ$  で最大,  $\theta = \pm 30^\circ$  で最小となる。Fig. 3 に A 相のインダクタンス  $L$  の回転子位置角  $\theta$  に対する変化と, 励磁電圧, および巻線電流の概略波形を示す。図中の  $V_{dc}$  は電源電圧である。 $\theta_w$  および  $\theta_s$  は, それぞれ励磁パルス幅および励磁開始角である。

SRM の一相当りのトルク  $\tau$  は磁気特性を線形と仮定すれば,

$$\tau = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta)}{d\theta} \quad (1)$$

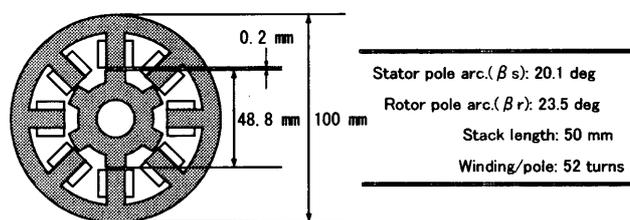


Fig. 1 Specification of the 8/6 SRM.

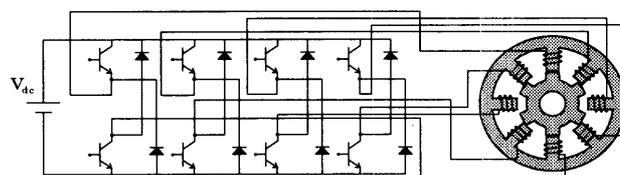


Fig. 2 Configuration of the SRM drive circuit.

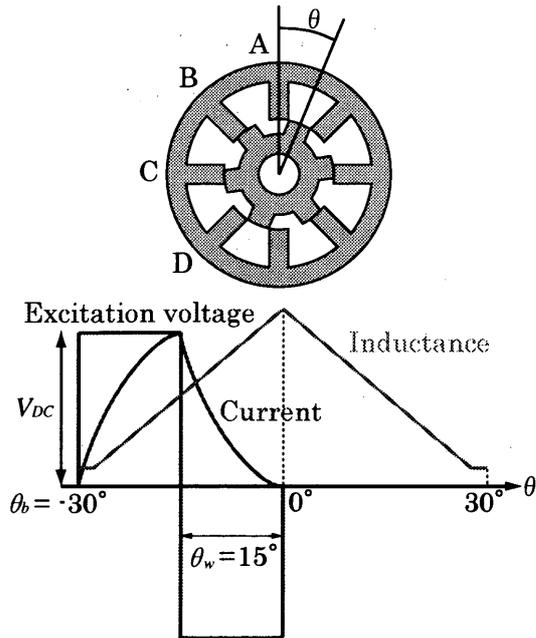


Fig. 3 Schematic diagram of phase-A inductance, excitation voltage, and winding current relative to rotor position.

で与えられるので、インダクタンスが増加する領域で巻線に電流を流せば正方向のトルクが発生する。他の相についても同様に回転子位置角に応じて適切な励磁を加えれば連続回転が得られる。なお、本稿の考察においてSRMの励磁条件はFig. 3に示すように励磁開始角 $\theta_b = -30^\circ$ 、励磁幅 $\theta_w = 15^\circ$ とする。この条件は、①負トルクが発生しない。②いずれか一相が必ず励磁されている。③二相が同時に励磁されない。以上の条件を満たしており、四相SRMにおいてはほぼ最適運転に近い条件であると考えられる。

## 2.2 励磁パターンの比較検討

Fig. 4に実験および計算により比較検討を行った三種類の励磁パターンについて示す。図中の矢印は各固定子極における励磁の方向を示している。パターン1が最も一般的な励磁パターンであり、各相の固定子極の励磁方向が同じ方向を向いている。一方、パターン2およびパターン3では各相固定子極の励磁方向が逆向きになっている。

計算には汎用の有限要素法解析ソフトであるJMAG-Studioを用いた。JMAGではモータのFEMモデルと駆動回路を連成して解析を行う機能があり、本稿ではこれを利用した。Fig. 5にSRMの要素分割図と駆動回路を示す。モータのFEMモデルにおいては、解析時間の短縮のため、モータ材質の比透磁率が十分高く、固定子外の空気領域および出力軸に磁束が漏れないものとして領域分割を行った。駆動回路中のコイルがSRMの巻線を表しており、FEMモデルの巻線領域と結合されている。計算では回転数一定条件の下でモータ諸特性を算定した。

Fig. 6に計算および実験で得られた回転数が3000 r/minの時の各励磁方式における巻線電流波形を示す。これらの図を見ると、計算結果と実験結果には定量的な誤差が存在するが、これは、メッシュ分割や解析ステップの設定に起因すると考えられる。特に動解析においては、計算機容量が不十分であると高精度な解析を

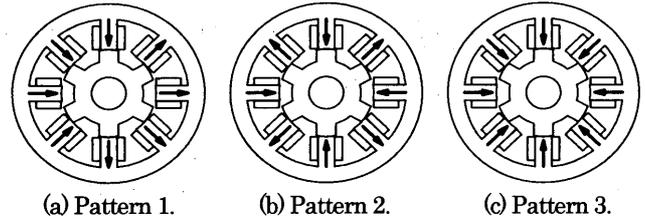
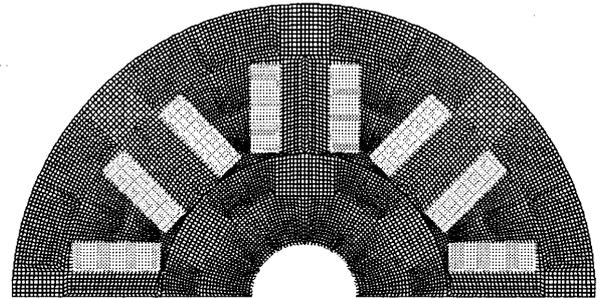
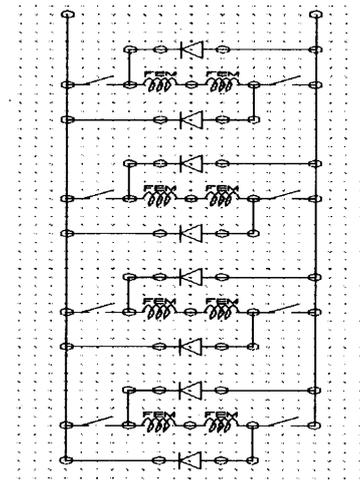


Fig. 4 Excitation patterns.



(a) FEM model of the 8/6 SRM.



(b) Drive circuit.

Fig. 5 FEM model of 8/6 SRM coupled with a drive circuit.

行うことは難しいのが現状である。しかしながら、定性的にはよく一致していることがわかる。パターン1と比較すると、パターン2では励磁期間以外にも電流の流れる期間が存在していることがわかる。また、パターン3は他の方式に比べて残留電流の流れる期間が長い。これらの波形の解釈については3章に示す。

Fig. 7に各励磁パターンにおけるトルク-速度特性ならびにトルク-出力特性の計算値を示す。これらの図を見ると、同一励磁条件の下ではパターン2の方がパターン1に対して速度、出力ともに高いことがわかり、この傾向は同図(b)の実測値でも認められる。Fig. 8に出力-効率特性の計算値を示す。なお、回転機における鉄損計算については、未だ高精度な手法が確立されていないため、効率の評価には銅損のみを用いた。この図より、同一出力で比較をするとパターン1が最も効率が高く、パターン2はパターン1に対して3%~5%程度低い。パターン3は他の方式に比べ、効率が大幅に低下している。

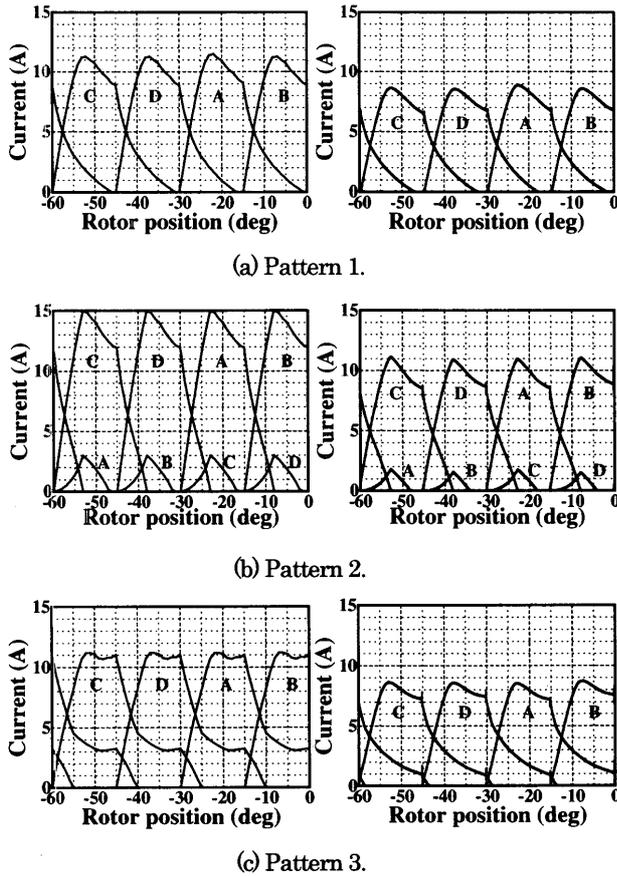


Fig. 6 Phase current waveforms for rotational speed of 3000 r/min (left: calculated results, right: measured results).

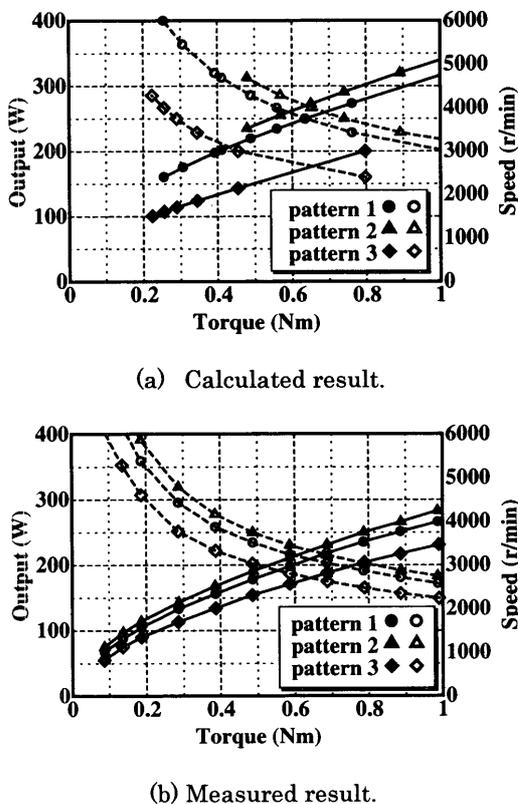


Fig. 7 Torque vs speed and output characteristics (solid lines are speed, and broken lines are output).

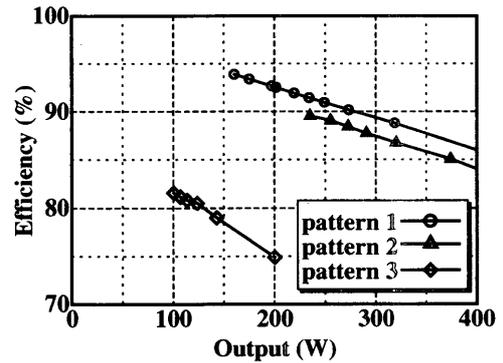


Fig. 8 Output vs efficiency characteristics.

以上より、効率面で比較すると、SRMの一般的な励磁方式であるパターン1が最も良い特性を示すことが明らかになった。但し、パターン2との差は僅かである。一方、同一励磁条件ではパターン2の出力の方がパターン1を上回っている。従って、パターン2において効率を向上させることができれば、モータ特性を更に向上できる可能性がある。次節では、パターン2および、パターン3の効率低下原因を考察するし、上記の考えに基づきパターン2の効率向上に関する検討を行う。

### 3. 効率向上に関する検討

#### 3.1 パターン2における効率低下の要因

Fig. 9に回転数が3000 r/minの時のパターン2におけるC相の巻線電流波形とインダクタンス曲線の概略を示す。この図を見ると、パターン2の特徴である非励磁期間に流れる電流がインダクタンス曲線の負の傾きの領域にあることがわかる。また、同図中の破線で示す回転子位置角に対応するモータ内部の概略的な磁束の流れをFig. 10(a)に示す。この状態は、Fig. 6(b)に示した電流波形からも明らかのように、A相の励磁が始まり、D相には残留電流が流れ、また非励磁相であるC相にも電流が流れている位置である。この図を見ると、A相とD相の固定子極間に流れる磁束が主であるが、C相にも磁束が流れ込んでいるのがわかる。これにより、C相巻線には誘起電圧が生じ、この電圧の向きが、駆動回路のダイオードに対して順方向であるため、非励磁相であるC相にも電流が流れる。また、磁束の流れからA相とD相の固定子極と回転子極の間に働くトルクは回転方向と同一であるが、C相は逆方向である。本SRM駆動システムでは負のトルクは電気エネルギーとして電源に回生されるように構成されているが、巻線抵抗やダイオードの内部抵抗による損失が生じる。このため、パターン2の同一出力における効率はパターン1よりも低いと考えられる。さらに実機においては軸摩擦などの機械的損失もあるため負トルクの発生自体が効率を低下させる可能性がある。

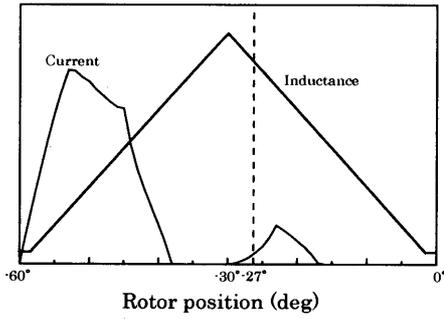


Fig. 9 Relationship between phase-C current and inductance curve.

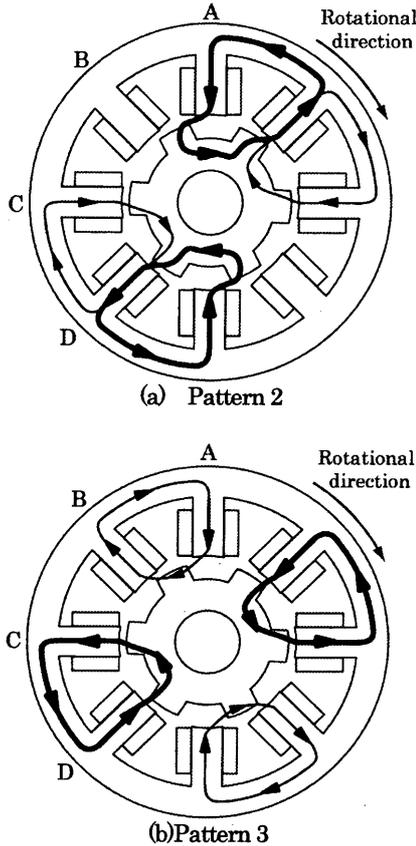


Fig. 10 Flux flow diagram for a rotor position of  $-27$  deg.

### 3.2 パターン 3 における効率低下要因

Fig. 10(b)にパターン 3 の場合の回転子位置角 $-27^\circ$ におけるモータ内部の概略的な磁束の流れを示す。このとき、パターン 2 の場合と同様に、A 相が励磁され、D 相に残留電流が流れている。A 相と D 相の起磁力の向きが共に回転子中心方向であるため、磁束は双方に通らずに、それぞれ隣接する非励磁相を通る。回転子と固定子の位置関係から、B 相および C 相で回転方向と逆方向のトルクを発生し、出力を低下させる。このとき、非励磁相である B 相および C 相には磁束の通過により電圧が誘起されるが、励磁回路のダイオードに対して逆方向であるため、電流は流れない。したがって、非励磁期間には他極からの磁束によって発生した負トルクによる回転エネルギー減少分が励磁巻線に蓄えられ、励磁終了後の残留電流として電源へ回生されるために、パターン 1 よりも残留電流の流れる期間が長くなると考えられる。また、回生電流増加による銅損の増加が効率を低下させていると考えられる。

### 3.3 駆動回路の工夫によるパターン 2 の効率改善

パターン 2 において、A 相の非励磁期間では、Fig. 2 に示した駆動回路の A 相のトランジスタはどちらも OFF であるが、回生用のダイオードが存在するためダイオードの順方向の電流は流れる。すなわち、パターン 2 において非励磁期間に流れる電流はダイオードを流れていることになる。ここでは、この電流を遮断するため、Fig. 11 に示すように二つあるダイオードの一方をトランジスタに置き換え、インダクタンス曲線の傾きが負の領域内で電流が流れないように制御を行った。以下では、上述のようにパターン 2 を改善した励磁パターンをパターン 2' と称す。

Fig. 12 にシミュレーションにより求めた回転数が  $3000$  r/min の場合のパターン 2' の巻線電流波形を示す。この図を見ると、非励磁期間に流れていた電流が無くなっていることが確認できる。

Fig. 13 に出力-効率特性の計算値を示す。この図を見ると、パターン 2 に対してパターン 2' の効率が向上し、パターン 1 とほぼ同程度の効率が得られていることがわかる。今後、モータ形状や励磁条件などを工夫し非励磁相への磁束の流れ込み起因する負トルクを改善できれば、パターン 1 を上回る特性が得られる可能性があると考えられる。

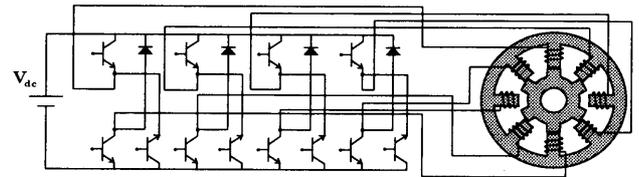


Fig. 11 Configuration of the improved drive circuit.

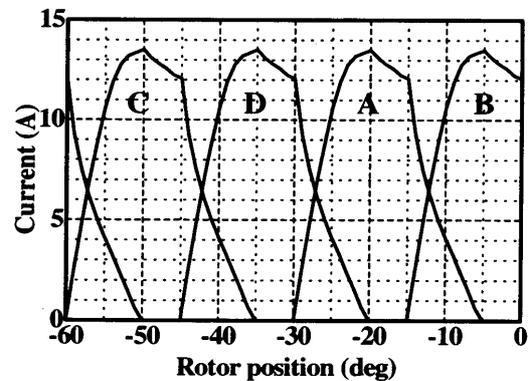


Fig. 12 Calculated waveforms of the phase current pattern 2.

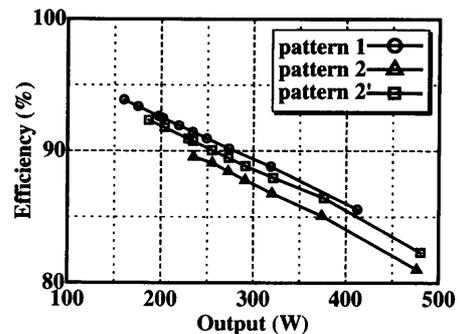


Fig. 13 Output vs efficiency characteristics of the SRM.

#### 4. まとめ

以上、励磁パターンとモータ諸特性の関係について検討を行った。その結果、同一励磁条件ではパターン 2 が最も高速かつ高出力であることが明らかになった。効率面で比較をすると、SRM の一般的な励磁パターンであるパターン 1 が最も良い特性を示したが、パターン 2 の駆動回路を工夫することで、パターン 1 と同程度の効率を得られることが明らかとなった。パターン 2 の効率については、更なる改善の余地があるためパターン 1 の特性を上回る可能性があると考えられる。

#### 文 献

- 1) R. C. Becerra, M. Ehsani, and T. J. E. Miller: "Commutation of SR Motors," *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 8, pp. 257-263 (1993).
- 2) N. Matsui and Y. Takeda: "Reluctance Motors -State-of-the-art-," *T. IEE Japan*, Vol. 118-D, pp. 685-690 (1998) (in Japanese).
- 3) C. A. Ferreira, S. R. Jones, B. T. Drager, and W. S. Heglund: "Design and Implementation of a Five-hp, Switched Reluctance, Fuel-Lube, pump Motor Drive for a Gas Turbine Engine," *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 10, pp. 55-61 (1995).
- 4) S. Mir, M. E. Elbuluk, and I. Husain: "Torque-Ripple Minimization In Switched Reluctance Motors Using Adaptive Fuzzy Control," *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, Vol. 35, pp. 461-468 (1999).
- 5) G. G. Lopez, P. C. Kjaer, and T. I. J. Miller: "A New Sensorless Method for Switched Reluctance Motor Drives," *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, Vol. 34, pp. 832-840 (1998).
- 6) Y. Akiyama and T. Kuroda: "Recent situation of Technical developments and Application of SR motors in U. S. A.," *The Paper of Technical Meeting on Rotating Machinery, IEE Japan*, RM-99-28 (1999) (in Japanese).
- 7) S. S. Ramamurthy and J. C. Balda: "Sizing a Switched Reluctance Motor for Electric Vehicles," *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, Vol. 37, pp. 1256-1264 (2001).
- 8) S. Suyama, T. Yanada, T. Watanabe, H. J. Guo, and O. Ichinokura: "Experimental Consideration for Characteristics of 8/6 Switched Reluctance Motor," *J. Magn. Soc. Jpn.*, Vol. 24, pp. 999-1002 (2000) (in Japanese).
- 9) H. C. Lovatt and J. M. Stephenson: "Optimum excitation of switched reluctance motors," *8<sup>th</sup> International Conference on Electrical Machines and Drives*, pp. 356-360 (1997).
- 10) R. Orthmann and H. P. Schoner: "Turn-off angle control of switched reluctance motors for optimum torque output," *5<sup>th</sup> European Conference on Power Electronics and Applications*, Vol. 6, pp. 20-25 (1993).

2003年10月24日受理, 2004年2月10日採録