

SRM解析のための非線形磁気抵抗のSPICEモデルについて

SPICE Model of Nonlinear Reluctance for Analysis of a Switched Reluctance Motor

月井 智之, 中村 健二, 一ノ倉 理

東北大学大学院工学研究科電気・通信工学専攻, 仙台市青葉区荒巻字青葉05 (〒980-8579)

T. Tsukii, K. Nakamura, and O. Ichinokura

Dept. of Electrical and Communications Engng., Graduate School of Engng., Tohoku Univ.,

Aoba 05, Aramaki, Aoba-ku, Sendai 980-8579

(2000年10月6日受理, 2001年1月24日採録)

In a previous paper, the authors proposed a method for calculating the operating characteristics of a switched reluctance motor (SRM) on the basis of the general-purpose circuit simulation program "SPICE." The method was verified by experimental testing of a 4-phase 8/6 SRM. In the analysis, however, we neglected the effects of magnetic saturation. In this paper, we propose a SPICE model of the nonlinear reluctance of the SRM for analysis that takes into account of the magnetic saturation characteristics. The proposed model is verified by comparing the calculated magnetization curves obtained by using the model with those obtained by finite element analysis.

Key words: switched reluctance motor, magnetization curves, finite element methods, SPICE, nonlinear reluctance

でも種々報告されており^{13)~17)}, 解析技術及び設計技術についても進展を見せているが, コンバータも含めたSRMの定量的な動作解析については必ずしも十分ではない。

先に筆者らは, 汎用の回路シミュレータであるSPICEを用いたSRMの解析手法を提案した¹⁸⁾. 本手法はSRMを可変磁気抵抗でモデル化し, 比較的簡便な計算でSRMの動作解析を行うものである. 本手法により, SRMの励磁電圧及び電流, トルク-速度特性などの算定を行った結果, 実測値と良好な一致を示した. しかしながら, 本手法では磁化特性の線形領域で使用することを前提としており, 材質の非線形磁気特性は考慮されていない. SRMは高出力密度を得るために, 磁化特性の飽和領域まで磁束密度を上げて使用する場合も多い. 本稿では非線形領域も含めた動的解析に必要な, 非線形磁気特性を考慮したSRMのSPICEモデルについて検討を行った.

1. はじめに

スイッチトリラクタンスモータ (以下SRMと略称) は磁気回路の磁気抵抗の変化によるリラクタンストルクを利用した一種の同期電動機である. 固定子, 回転子ともに無方向性ケイ素鋼板を打ち抜いたものを積層して構成され, 永久磁石が不要である. また, 通常の同期電動機のような回転子巻線が不要であるため, 構造が簡単で堅牢であるほか, 高速回転に適する, 高温の環境下でも使用可能であるなどの特長を有する. さらに, チョップパによる直流方形波パルスで励磁するため励磁方式も簡単であり, 安価な可変速モータとして期待されている^{1)~3)}.

一方で, SRMは固定子, 回転子ともに突極構造であるためトルクリプルと運転音が大きいことや, 回転子の位置検出が必要であるなどの欠点があり, 従来は航空機のスタータや燃料ポンプなど応用例が比較的限られていた^{4)~6)}.

しかしながら近年, パワーエレクトロニクスの発達に伴い安価で高性能な制御装置が出現し, トルクリプルと振動を抑制する駆動方式^{7)~9)}や, センサレスドライブ技術^{10)~11)}の提案が多数報告されている. このような技術の進展により電気自動車や電動二輪車などへの応用も検討されている¹²⁾. SRMの動作解析手法につい

2. 供試SRMの構成と磁化特性

Fig. 1に考察に使用したSRMの諸元を示す. Fig. 2はSRMの一相分の駆動回路を示すものである. 固定子8極, 回転子6極で固定子には4相巻線が施されている. 固定子直径は100 mm, 回転子直径は48.8 mmである. 無方向性ケイ素鋼板の厚さは0.50 mmであり, 積層長は50 mmである. 励磁巻線は固定子極に集中巻とし, 1極あたりの巻数は52, 巻線直径は1 mm, 巻線抵抗は平均で0.196 Ωである.

Fig. 3に非線形磁気抵抗を考慮したSRMの解析の流れの一例を示す. まず, 有限要素法(FEM)に基づいた磁界解析により, 各回転子位置における起磁力と磁束の関係を算出する. 次に, 得られた磁化曲線を用いて, SRMの等価回路(SPICEモデル)を作成し, 励磁巻線電圧及び電流, 回転数などの動特性を算出する.

磁界解析は, モータ形状が軸方向に一定であると仮定して, 有限要素法に基づく2次元静磁界解析を行った. 1相のみを励磁した場合, 回転子が6極構造であるので, 60°を1周期として磁気回路が変化する. そこで, Fig. 1のごとく励磁する固定子極と回転子極が完全に対向する位置を回転子位置角0°とし, 回転子を2°ずつ30°まで回転させながら固定子極の磁束 ϕ と巻線電流

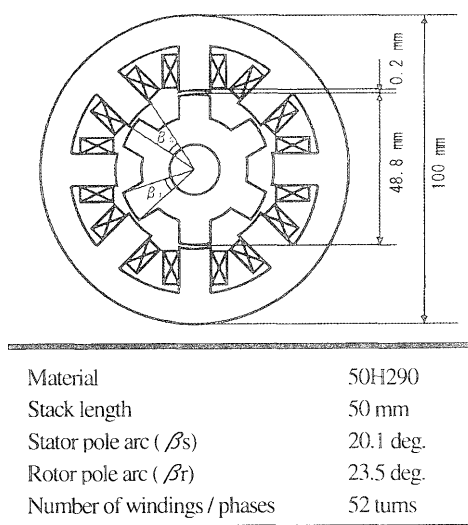


Fig. 1 Specification of the 8/6 SRM.

による起磁力 Ni を計算した。

Fig. 4 に算出した磁化曲線を示す。同図においてシンボルは実測値である。これらの磁化曲線を測定する場合、 $\theta = 0^\circ$ 及び 30° 以外の回転子位置角では回転力が働いたため、一般に測定は困難である。そのため、ここでは $\theta = 0^\circ$ と 30° のみ実測値を示すが、計算値と実測値は良好な一致を示していること、及びこれらの磁化曲線の計算に有限要素法が有用であることが分かる。非線形性を考慮した磁気抵抗モデルを作成するためには、この磁化曲線の飽和領域まで考慮する必要がある。

3. 非線形磁気抵抗の SPICE モデル

磁化特性の非線形性を考慮するため、磁化曲線を次式のように ϕ の多項式で表す。

$$Ni = a_1(\theta)\phi + a_3(\theta)\phi^3 + a_5(\theta)\phi^5 + \dots \quad (1)$$

ここで、 $a_1(\theta)$, $a_3(\theta)$, $a_5(\theta)$, ... は回転子位置角 θ の関数で与えられる係数である。すなわち起磁力 Ni は磁束 ϕ と回転子位置角 θ の関数として表される。(1) 式で考慮すべき ϕ の最大次数は磁化曲線の非線形性の強さで異なってくるが、一般に SRM の磁化曲線は固定子極と回転子極が完全に対向する回転子位置角 0° で最も非線形性が強く、非対向の 30° 付近ではほぼ線形になる。今回使用した SRM では、Fig. 4 の磁化曲線において磁気飽和の影響があまりみられない $20^\circ \leq \theta \leq 30^\circ$ の領域では 1 次の項のみ、 $16^\circ \leq \theta < 20^\circ$ では 3 次の項まで、 $0^\circ \leq \theta < 16^\circ$ では 5 次の項まで考慮した。このときの係数 $a_k(\theta)$ ($k=1, 3, 5$) の回転子位置角 θ に対する関係を Fig. 5 に示す。図中の曲線を $a_1(\theta)$ は (2) 式のようにフーリエ級数展開し、 $a_3(\theta)$, $a_5(\theta)$ はそれぞれ (3), (4) 式

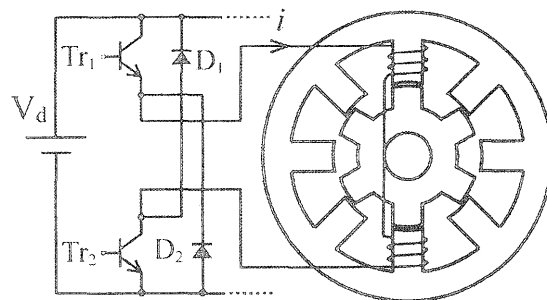


Fig. 2 One phase of the drive circuit.

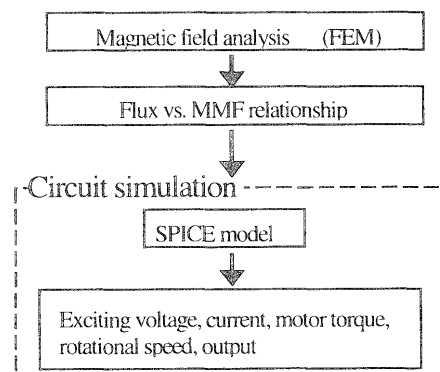


Fig. 3 Flow diagram of analysis.

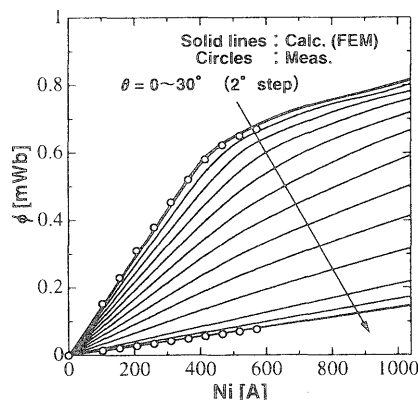


Fig. 4 Magnetization curves calculated by FEM and measured ones for rotor positions of 0 degrees and 30 degrees.

のように多項式で表す。

$$a_1(\theta) = \sum_{n=0}^{14} a_{1n} \cos n\theta \quad (2)$$

$$a_3(\theta) = \sum_{n=0}^{14} a_{3n} \theta^n \quad (3)$$

$$a_5(\theta) = \sum_{n=0}^{12} a_{5n} \theta^n \quad (4)$$

ここで n は偶数である。

(1)~(4) 式より磁束 ϕ と回転子位置角 θ が得られれば起磁力 Ni が求まることになる。

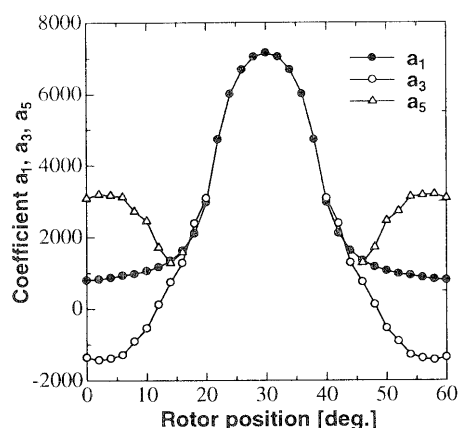


Fig. 5 Coefficient a_k ($k = 1, 3, 5$) versus rotor position.

Fig. 6にSRMのMain Circuitを示す。ここで、 $R_A \sim R_D$ はそれぞれA相～D相の励磁巻線抵抗、 $L_A \sim L_D$ はそれぞれA相～D相の回転子位置角によって変化するインダクタンスである。Fig. 7(a)はSRM main circuitの1相あたりの回路でダイオードを除いたものである。磁化特性の線形領域で動作している場合は、Fig. 7(a)からFig. 7(b)のように変換したモデルで計算される¹⁸⁾。磁化特性が線形である場合、回転子位置角 θ によって変化する可変磁気抵抗 $R(\theta)$ は可変インダクタンス $L(\theta)$ を用いて次式で表される。

$$R(\theta) = N^2 / L(\theta) \quad (3)$$

また、Fig. 7(a)において励磁巻線電流を i 、巻数を N 、1ターンあたりの鎖交磁束数を ϕ とすると、

$$N\phi = L(\theta) i. \quad (4)$$

であるから、起磁力 Ni は、

$$Ni = \frac{N^2}{L(\theta)} \phi = R(\theta) \phi. \quad (5)$$

と表せる。また、誘起起電力 e' は、

$$e' = N \frac{d\phi}{dt} \quad (6)$$

であるので、Fig. 7(b)のように励磁巻線電流 i によって制御される従属電圧源 Ni と可変磁気抵抗 $R(\theta)$ から磁束 ϕ が計算され、また、 e' は磁束 ϕ によって制御される従属電流源 ϕ と巻数 N のインダクタンスの閉回路において、インダクタンスの両端の電圧として求まる。

可変磁気抵抗 $R(\theta)$ が線形の場合は、 $R(\theta)$ に $N^2 / L(\theta)$ によって制御される可変インピーダンスサブキットが使用できる。しかし、非線形の場合は磁束 ϕ によって磁気抵抗が変化するため、これを考慮したモデルが必要である。Fig. 8にSPICEのコンポー

ネントの一つであるアナログ・ビヘービア・モデル (ABM) を用いてモデル化を行った非線形可変磁気抵抗を示す。ABMを用いると、数式やルックアップテーブルにより回路素子の柔軟な記述を行うことができる。Fig. 8はABMを用いて、磁束 ϕ と回転子位置角 θ を入力とし、(1)、(2)式に基づき起磁力 Ni を出力する回路素子を実現している。Fig. 9にこのモデルを用いて算出した磁化曲線を、有限要素法による計算結果と比較して示す。本モデルによ

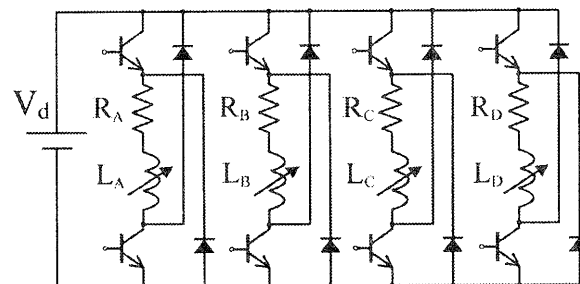


Fig. 6 SRM main circuit.

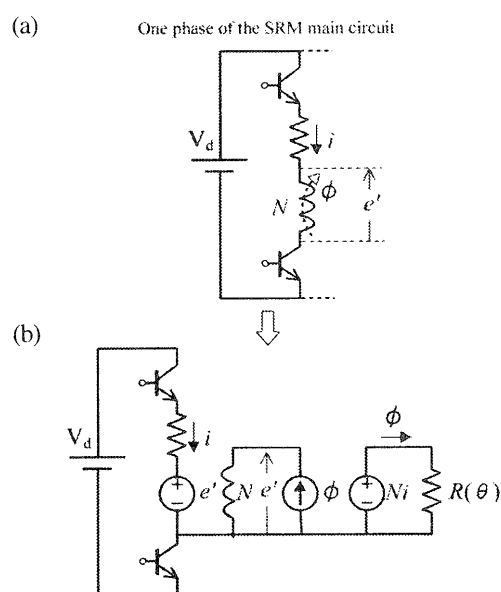


Fig. 7 SPICE model of a SRM.

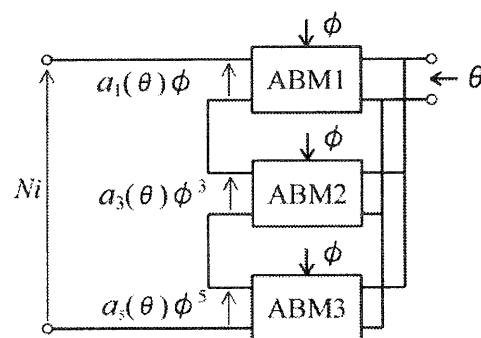


Fig. 8 SPICE model of the nonlinear reluctance of a SRM.

る算出結果と有限要素法による計算結果は良好な一致を示している。よって、本モデルを Fig. 7 (b) の可変磁気抵抗 $R(\theta)$ と置き換えることにより、磁化特性の非線形領域まで考慮した SRM の励磁電圧及び電流、トルク速度特性などの動的な解析が可能であると考えられる。Fig. 9 (a) に本手法による励磁電圧及び電流波形の計算結果を巻線電流の実測値と比較して示す。同図 (b) の磁化特性を線形と仮定した従来のモデルに比べ、計算波形と実測波形は良好な一致を示していることが了解される。

4. まとめ

本論文では磁化特性の非線形性を考慮した SRM の解析を目的

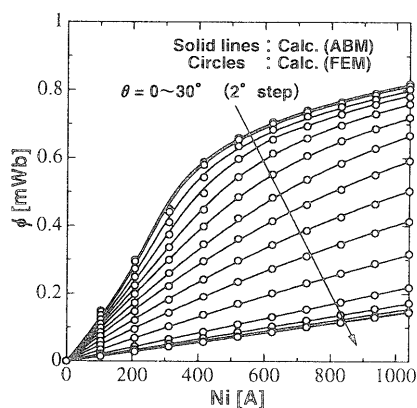


Fig. 9 Magnetization curves calculated by ABM.

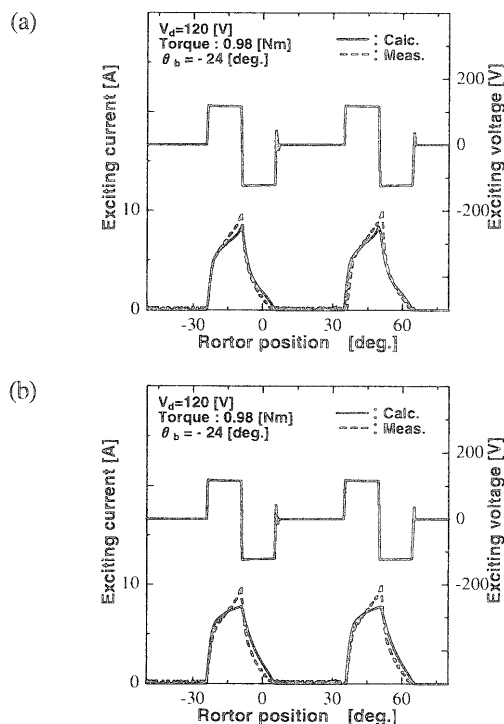


Fig. 10 Exciting voltage and current.

(a) Nonlinear (b) Linear

とした、非線形磁気抵抗の SPICE モデルの導出について述べた。本モデルは有限要素法に基づく磁界解析により算出した磁化曲線を精度良く再現でき、さらに先に筆者らが提案した SPICE を用いた SRM の動作解析手法にそのまま適用できるため、材質の非線形磁気特性も考慮した SRM の動的な解析が可能であると考えられる。

今後は本モデルを用いた SPICE シミュレーションにより、トルク速度特性などの動特性の算定を行い、実測値と比較・検討する予定である。

文 献

- 1) R.C. Becerra, M. Ehsani and T. J. E. Miller : *IEEE Trans. Power Electron.*, **8**, 257 (1993).
- 2) 松井信行, 千葉明, 武田洋次 : 電学論 D, Vol.114-D, **9**, 824 (1994).
- 3) 松井信行, 武田洋次 : 電学論 D, Vol.118-D, **6**, 685 (1998).
- 4) C. A. Ferreira, S. R. Jones, B. T. Drager and W. S. Heglund : *IEEE Trans. Power Elect.*, **10**, 55 (1995).
- 5) E. Richeter and C. A. Ferreira : *IEEE-IAS Annu. Meeting*, 434 (1995).
- 6) A. V. Radun, C. A. Ferreira and E. Richter : *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, **34**, 1026 (1998).
- 7) K. Russa, I. Husain and M. E. Elbuluk : *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, **34**, 1105 (1998).
- 8) S. Mir, M. E. Elbuluk and I. Husain : *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, **35**, 461 (1999).
- 9) F. Blaabjerg, P. C. Kjaer, P. O. Rasmussen and C. Cossar : *IEEE Trans. Power Electron.*, **14**, 563 (1999).
- 10) G. G. Lopez, P. C. Kjaer and T. I. J. Miller : *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, **34**, 832 (1998).
- 11) G. G. Lopez, P. C. Kjaer and T. I. J. Miller : *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, **35**, 859 (1999).
- 12) K. M. Rahman, B. Fahimi, G. Suresh, A. B. Rajarathnam and M. Ehsani : *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, **11**, 111 (2000).
- 13) A. Rudun : *IEEE Trans. Magn.*, **35**, 4473 (1999).
- 14) N. M. Abe and J. R. Cardoso : *IEEE Trans. Magn.*, **35**, 1674 (1999).
- 15) M. Cheng, K. T. Chau, C. C. Chan, E. Zhou and X. Huang : *IEEE Trans. Magn.*, **36**, 339 (2000).
- 16) J. M. Kokernak and D. A. Torrey : *IEEE Trans. Magn.*, **36**, 500 (2000).
- 17) N. J. Nagel and R. D. Lorenz : *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, **36**, 714 (2000).
- 18) 一ノ倉, 須山, 渡辺 : 電気学会回転機研究会, 東京, 2000, RM-00-32 (電気学会, 東京, 2000).