

磁気飽和を考慮した SRM の簡易磁気回路モデル

Simple Magnetic Circuit Model of Switched Reluctance Motor Considering Magnetic Saturation

中村健二・木村幸四郎・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)

K. Nakamura, K. Kimura, and O. Ichinokura

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

A switched reluctance motor (SRM) has such desirable features as simple construction, high reliability, and low cost. The SRM has not, however, been put into wide application because of large torque ripple and acoustic noise. In addition, quantitative analysis and optimum design of the SRM have not been fully clarified. In a previous paper, we proposed a simple magnetic circuit model of an SRM based on its configuration. We calculated such dynamic characteristics of the SRM as excitation voltage, winding current, and flux in each part of the motor. In this model, however, reluctances of the stator and rotor cores are approximated by a linear function. In order to improve the calculation accuracy, we have to consider nonlinear characteristics of the core material. Furthermore, local saturation occurring at stator and rotor pole-tips and leakage fluxes from the stator pole must be considered. In this paper, we examine a nonlinear magnetic circuit model of the SRM considering the local saturation at the pole-tips and the leakage fluxes.

Key words: switched reluctance motor (SRM), magnetic circuit analysis, nonlinear magnetization characteristic, local saturation, leakage flux

1. はじめに

リラクタンスモータは、磁気回路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、回転子は共に電磁鋼板を打ち抜き、積層して製作される。また、回転子に巻線が無く、永久磁石も存在しない。そのため、一般的な誘導機や同期機と比較して、構造が簡単で堅牢、高速回転に適するなどの特長を有している。

リラクタンスモータは、シンクロナスリラクタンスモータ (SynRM) と、スイッチトリラクタンスモータ (SRM) に大別される。SRM は上述の特長に加えて、固定子巻線が集中巻可能、励磁方式が極めて単純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^{1) 2)}。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、従来は航空機のスタータや燃料ポンプなど、特殊な用途への応用に限られていた³⁾。

この問題に対して、近年ソフトならびにハード面での制御技術の発展により、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⁴⁾、センサレスドライブに関する研究が進展している⁵⁾。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^{6) 7)}。

モータの最適設計法としては、一般に計算精度の高い有限要素法を用いたモータ形状の最適化などがある。しかしながら、SRM は励磁条件によって諸特性が大きく変化することが知られており、モータ形状の最適設計に加えて、駆動回路であるコンバータや制御回路まで含めたシステム全体の解析設計が必要不可欠である。最近ではモータ運転状態における電磁界解析が可能な汎用の有限要素法ソフトもいくつか存在するが、十分な精度を得るためには高性能な計算機が必要である。また、制御回路まで含めた解析については現状の有限要素法では、実用性の観点から現状では問題点もあり、簡便かつ高速で精度の高い解析手法の確立が望まれる。

これに対して、磁気回路法は電磁機器内の複雑な磁気現象を巨視的に捉えて解析する手法であり、有限要素法に比べて計算精度は劣るが、機器の形状を反映したシンプルな解析モデルが構築できるため、簡便な計算で機器の動作原理を容易に把握することができる。また、電気と磁気の双対性により電気回路との連成が容易であり、計算には汎用の回路シミュレータが利用できる。

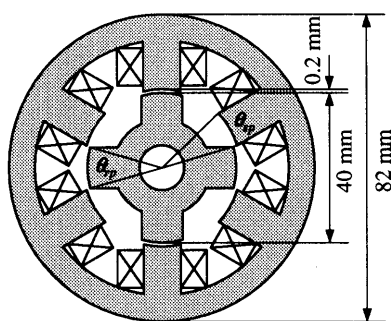
上記の考えに基づき、先に筆者らはモータ形状に対応して複数の磁気抵抗で構成された SRM の磁気回路モデルを導出し、このモデルと駆動回路等を連成することで、運転状態におけるモータ各部の磁束密度を算定する手法について検討を行った⁸⁾。算出したモータ諸特性ならびに磁束密度は実測値とほぼ良好な一致を示したが、磁心磁気特性を線形と仮定したため、重負荷領域では誤差が拡大する傾向にあった。

本稿では、提案する手法の更なる計算精度の向上を目指し、磁心磁気特性の非線形性を考慮した SRM の磁気回路モデルの構築方法について種々検討を行ったので報告する。

2. SRM の非線形磁気回路モデル導出

2.1 考察に使用した SRM

Fig. 1 に考察に使用した SRM の構造と諸元を示す。本モータは固定子 6 極、回転子 4 極の三相 SRM であり、材質は厚さ 0.35 mm の無方向性電磁鋼板 (JFE 製, 35RM290) である。Fig. 2 は、SRM の最も一般的な駆動回路である非対称ハーフブリッジコンバータである。以下の考察では、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定義する。この場合、A 相のインダクタンスは $\theta = 0^\circ$ で最大、 $\theta = \pm 45^\circ$ で最小になる。Fig. 3 に A 相のインダクタンス L の回転子位置角 θ 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。 θ_w および θ_b は、それぞれ励磁幅および励磁開始角である。



Stator pole arc (θ_{sp}):	29 deg
Rotor pole arc (θ_{rp}):	32 deg
Stack length:	51 mm
Number of windings / pole:	72 turns
Winding resistance:	0.87 Ω

Fig. 1 Specification of the 6/4 SRM.

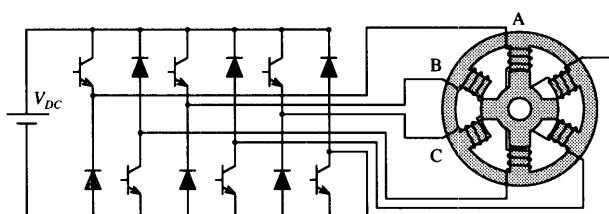


Fig. 2 Configuration of the SRM drive circuit.

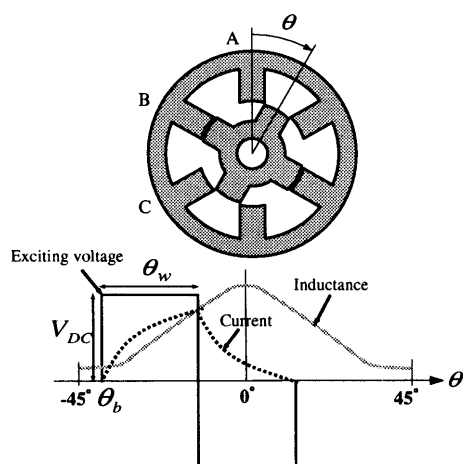


Fig. 3 Schematic diagram of phase-A inductance, excitation voltage, and winding current relative to rotor angle.

2.2 モータ鉄心部の磁気回路の導出方法

まず, Fig. 4 に示すように SRM を 20 の要素に分割し, 分割した要素それぞれを寸法および材料の磁気特性から求められる磁気抵抗に置き換える. 本稿では磁気特性の非線形性を考慮するため, Fig. 5 に示す材料の B - H 曲線のカタログ値を最小自乗法により, 以下の式で近似した.

$$H = \alpha_1 B + \alpha_{15} B^{15} \quad (1)$$

α_1 および α_{15} は近似係数である. 要素の断面積ならびに磁路長を S および l とすれば, 起磁力 f_m と磁束 ϕ の関係は(1)式を用いて次式で表される.

$$f_m = \frac{\alpha_1 l}{S} \phi + \frac{\alpha_{15} l}{S^{15}} \phi^{15} \quad (2)$$

従って, 磁気抵抗 R_m は $f_m = R_m \phi$ の関係より, 次式で与えられる.

$$R_m = \frac{\alpha_1 l}{S} + \frac{\alpha_{15} l}{S^{15}} \phi^{14} \quad (3)$$

Fig. 6 に SRM の鉄心部分の磁気回路を示す. 本モデルにおいて, モータ鉄心部は固定子極, 固定子ヨーク, 回転子極, および回転子ヨークの四種類の磁気抵抗で構成される. また, 図中の従属電源は巻線電流によって決まる起磁力源である.

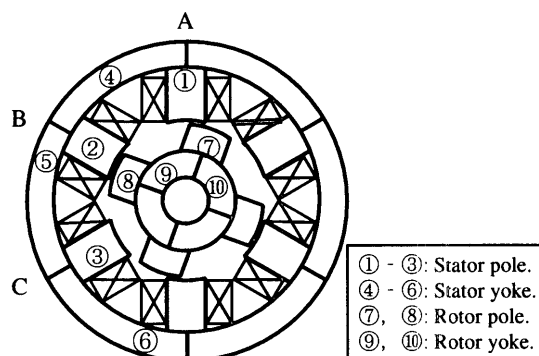


Fig. 4 Subdivided view of SRM.

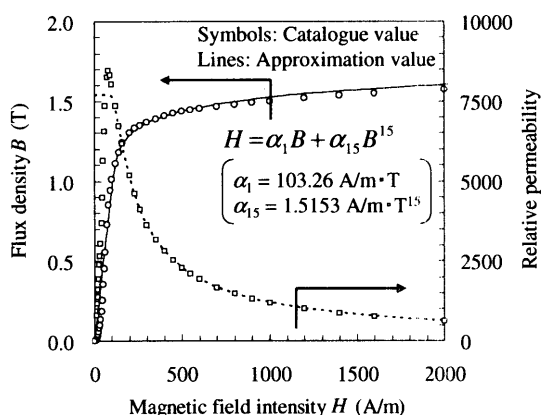


Fig. 5 B - H and μ - H curves of core material and its approximation curve.

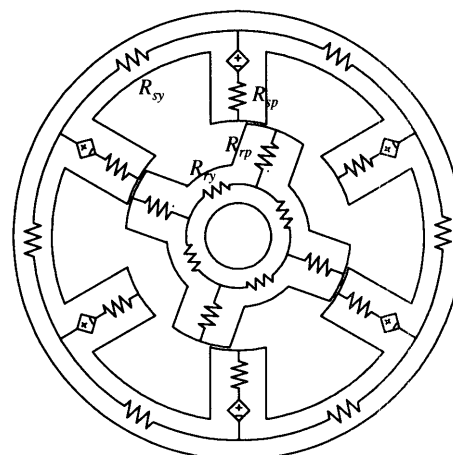


Fig. 6 Magnetic circuit of stator and rotor cores.

2.3 空隙部の磁気回路の導出方法

SRMは固定子および回転子が突極構造を有することから、回転子位置角により空隙の磁束の流れが大きく変化する。本稿では、Fig. 7(a)に示すように固定子極と回転子極が完全に対向した状態（完全対向状態）、同図(b)の固定子極と回転子極の一部が対向した状態（部分対向状態）、そして Fig. 8 の固定子極と回転子極が対向していない状態（非対向状態）について、固定子突極部から回転子突極部への磁束の流れを円弧と直線で近似することで、空隙の磁気抵抗を求めた^{8)~10)}。

まず初めに、Fig. 7(a)に示す完全対向状態における空隙磁気抵抗は、極同士が重なった箇所の空隙磁路と、固定子極側面から回転子極側面への磁路から求めることができる。それぞれの磁路を直線と円弧で近似すれば、磁気抵抗は次式で与えることができる。

$$R_{10} = \frac{l_g}{\mu_0 r_{sp} \theta_{sp} D} \quad (4)$$

$$R_{11} = \frac{\pi}{2\mu_0 D} \quad (5)$$

式中の l_g はギャップ長、 D はモータ積層長であり、 μ_0 は真空の透磁率である。

次いで、同図(b)の部分対向状態における空隙磁気抵抗について考える。極の重なり部分の磁気抵抗は、次式で与えられる。

$$R_{20} = \frac{l_g}{\mu_0 r_{sp} \theta_{ov} D} \quad (6)$$

また、固定子極側面から回転子極先端、および固定子極先端から回転子極側面への磁路の磁気抵抗は、それぞれ次式で与えることができる。

$$R_{21} = \frac{\theta_{p1}}{2\mu_0 D} \quad (7)$$

$$R_{22} = \frac{\theta_{p2}}{2\mu_0 D} \quad (8)$$

最後に非対向状態における空隙磁気抵抗は、Fig. 8 に示す4つの磁路の磁気抵抗を計算し、これらを合成することで求めることができる。4つの磁路の磁気抵抗は、それぞれ以下の式で与えられる。

$$R_I = \frac{r_{n0} \theta_{n0}}{2\mu_0 r_{rp} \theta_{rp} D} \quad (9)$$

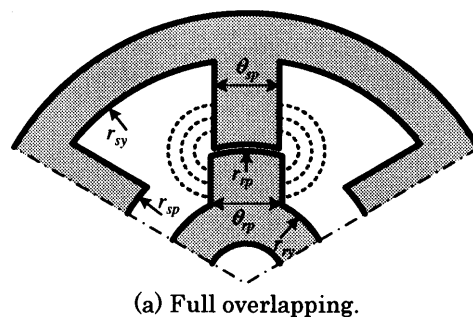
$$R_{II} = \frac{\pi}{4\mu_0 D} \left(\because \theta_{n1} = \frac{\pi}{2} \right) \quad (10)$$

$$R_{III} = \frac{\theta_{n2}}{2\mu_0 D} \quad (11)$$

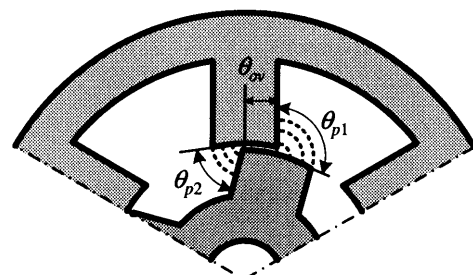
$$R_{IV} = \frac{d}{\mu_0 l_{rp} D} \quad (12)$$

ここで、(12)式中の l_{rp} は回転子極の長さである。

上記の(4)~(12)式より、求めた空隙磁気抵抗は回転子位置角によって変化する可変磁気抵抗として与えられる。以上により、SRMの非線形磁気回路モデルが導出される。

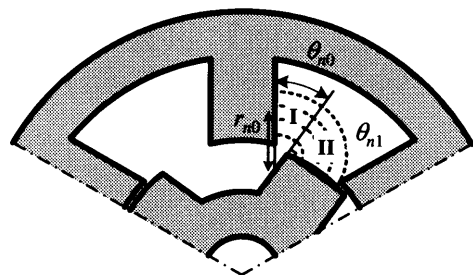


(a) Full overlapping.

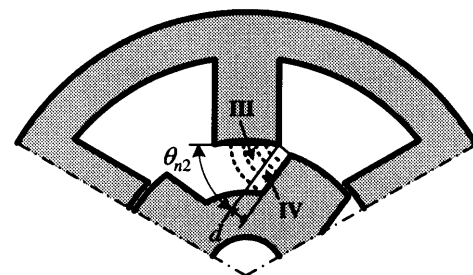


(b) Partial overlapping.

Fig. 7 Flux tubes of an air gap between stator and rotor poles, in the case of full and partial overlapping.



(a) From a side of the stator pole to a tip of the rotor pole.



(b) From a tip of the stator pole to a side of the rotor pole.

Fig. 8 Flux tubes of an air gap between stator and rotor poles, in the case of the non overlapping.

Fig. 9 に、導出した磁気回路モデルを用いて求めた SRM の磁化曲線を示す。また、比較のため汎用の有限要素法ソフト JMAG-Studio の二次元静磁場解析により得られた結果を示す。この図から、完全対向状態では両者はほぼ良好な一致を示していることが了解されるが、その他の位置では定量的誤差が大きい。また磁気回路解析によって得られた磁化曲線では、飽和を始める磁束の値が回転子位置角によらずほぼ同じであるのに対し、有限要素法で得られた結果では、回転子位置角が大きくなるのに従い、飽和を始める磁束の値が小さくなっていることがわかる。

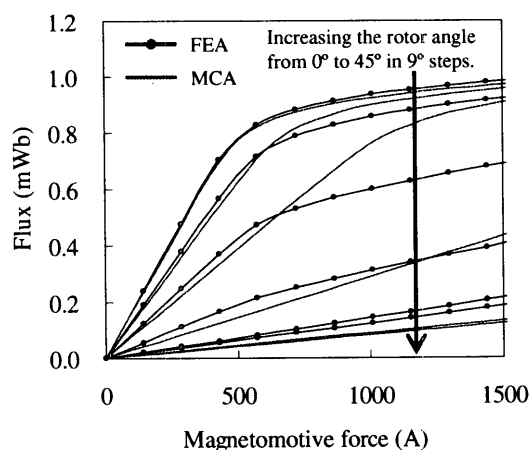


Fig. 9 Flux-MMF curves of the SRM (in the figure, FEA is a finite element analysis, and MCA is a magnetic circuit analysis).

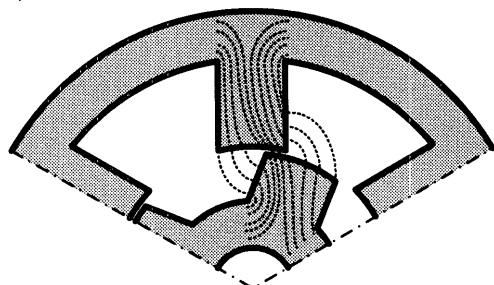


Fig. 10 Flux flow diagram around stator and rotor poles, in the case of partial overlapping.

この原因としては、Fig. 10 に示すような部分対向状態において固定子極が励磁された場合、固定子極と回転子極が重なった部分に磁束が集中するため、極先端部で磁気飽和が生じ易くなることが考えられる。また、この磁気飽和は極同士の重なりが減少するに従い、より小さな磁束で生じることになる。このことから、極先端部での局所的な磁気飽和を考慮できるように、磁気回路モデルを改良する必要があることがわかる。

3. 局所飽和および漏れ磁束を考慮した磁気回路モデル

前節までの考察に基づいて、極先端部での局所的な磁気飽和を考慮できるように磁気回路モデルの改良を行った。Fig. 11 に、Fig. 10 に対応した部分対向状態における極部分の磁気回路を示す。前節までのモデルでは、一つの磁気抵抗で置き換えられていた固定子極、回転子極の磁気抵抗は、それぞれ極先端部で二つに分割されている。図中の極の重なり部分の磁気抵抗により、先端部での局所的な磁気飽和が考慮される。

Fig. 12 に上記のモデルを用いて算定した SRM の磁化曲線を示す。図を見ると、飽和を始める磁束の値は有限要素法の結果とほぼ同じになり、計算精度の改善が認められる。一方、磁化曲線の立ち上がり、および飽和後の直線の傾きに差異が認められる。

これらの原因としては、固定子極からの漏れ磁束の影響が考えられる。今回は有限要素法による解析結果から、Fig. 13 に示す二種類の漏れ磁路が確認できたため、これらの磁路の磁気抵抗を求

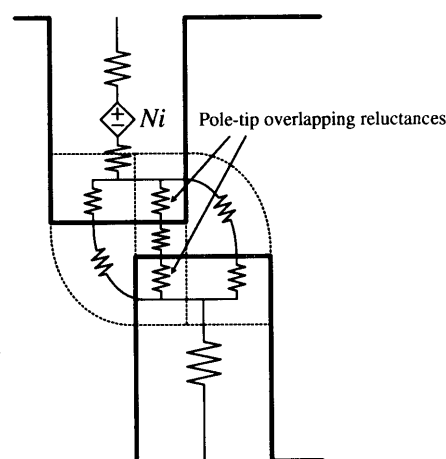


Fig. 11 Magnetic circuit model considering local saturation of the pole-tips.

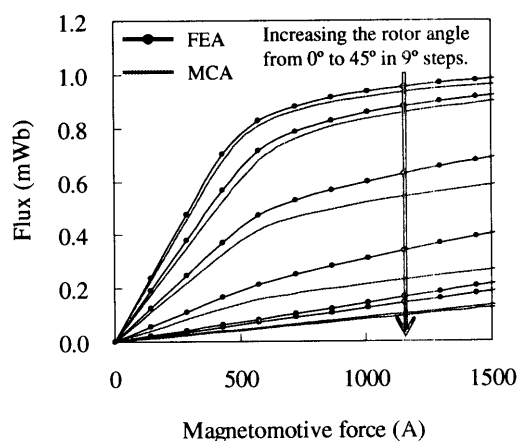
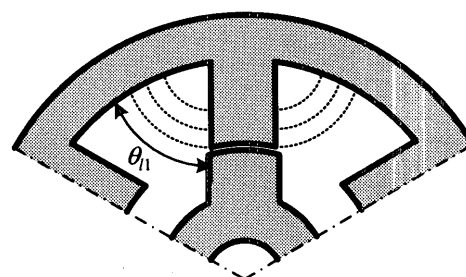
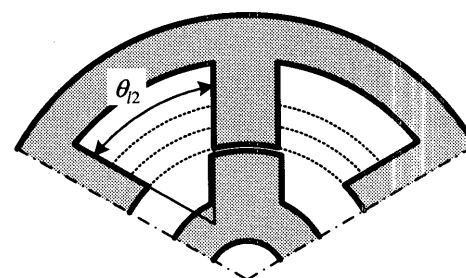


Fig. 12 Flux-MMF curves of the SRM considering local saturation of the pole-tips



(a) Stator pole to stator yoke.



(b) Stator pole to other stator poles.

Fig. 13 Leakage flux paths from stator pole confirmed by FEA.

め、新たにモデルに組み込んだ。上記の考えに基づき導出した局所飽和ならびに漏れ磁束を考慮したSRMの磁気回路モデルをFig. 14に示す。但し、図面の都合上、空隙磁気抵抗は省いている。

Fig. 15に、上記の磁気回路モデルを用いて算定したSRMの磁化曲線を示す。この図より、計算精度の更なる改善が認められる。特に回転子位置角が 0° から 18° の間では、有限要素法と定量的にはほぼ一致した結果が得られた。一方、非対向状態では両者の間に若干の誤差が認められるが、これは固定子極で発生した磁束が空間に複雑に分布するためであり、精度を更に向上させるためには、この分布を表現できるより詳細な磁気回路モデルの導出が必要になる。

4. まとめ

以上、SRMの非線形磁気回路モデルの導出方法について種々検討を行った。磁気回路モデルの導出に際しては、極先端部での局所的な磁気飽和を考慮すること、固定子極からの漏れ磁束を考慮することが重要であることが明らかになった。

今後は、導出した磁気回路モデルと駆動回路、制御回路、および機械運動系を連成したSRMの動特性解析手法の構築を行い、最適励磁法に関する検討を行う予定である。また、動解析によって求めた磁束密度波形から鉄損の定性的な評価を行う手法についても検討する予定である。

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) K. Nakamura, K. Kimura, and O. Ichinokura: "Consideration on Calculation Method of Iron loss Characteristics of SRM using Simple Magnetic Circuit Model," *The Paper of Technical Meeting on Rotating Machinery, RM-02-110* (2002) (in Japanese).
- 9) H. C. Roters: *Electromagnetic Devices*, pp. 116-150 (John Wiley & Sons, Inc., New York, 1941).
- 10) J. M. Kokernak, and D. A. Terrey: "Magnetic Circuit Model for the Mutually Coupled Switched-Reluctance Machine," *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 36, pp. 500-507 (2000).

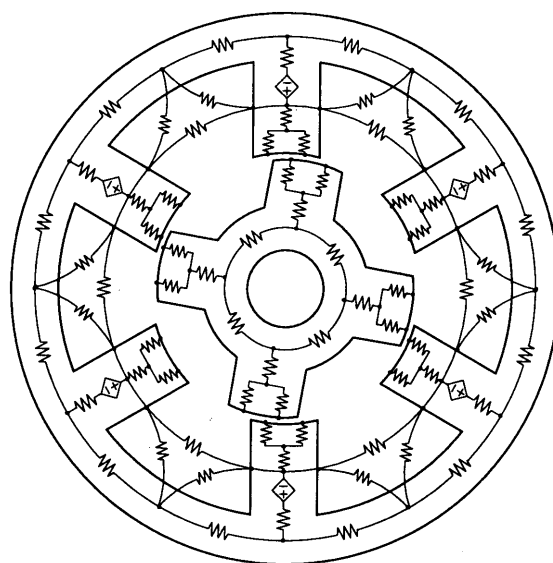


Fig. 14 Magnetic circuit of SRM considering local saturation of the pole-tips and leakage fluxes from stator pole.

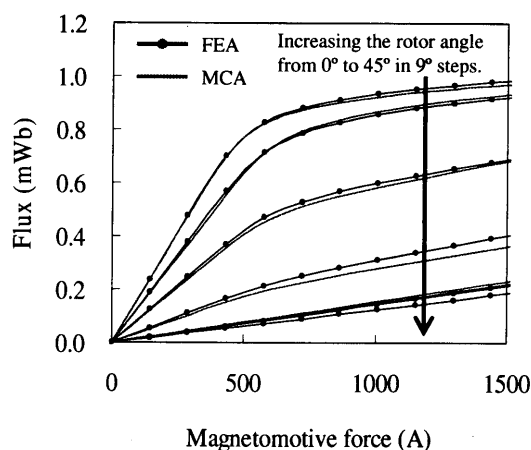


Fig. 15 Flux-MMF curves of SRM considering local saturation of the pole-tips and leakage fluxes from stator pole.

2003年10月24日受理、2004年2月10日採録