

学術論文

円筒形スイッチトリラクタンスモータの特性解析

Characteristic analysis of the cylindrical rotor type switched reluctance motor

小山 純	(長崎大学)	樋口 剛	(長崎大学)
阿部 貴志	(長崎大学)	住田 辰彦	(長崎大学)
山田 英二	(長崎大学)		

Jun OYAMA	Member
Tsuyoshi HIGUCHI	Member
Takashi ABE	Member
Tatsuhiko SUMIDA	
Eiji YAMADA	Member

A switched reluctance (SR) motor is simple and robust in structure and is able to endure high speed operation but requires sophisticated control technique. Recent remarkable advance of power electronics and control technique has made the SR motor realistic and it has been widely studied mainly in Europe and U.S.A. However the research inclined to the control theory. We proposed in previous papers, "Cylindrical Rotor Type SR Motor", in which q-axis short-circuited windings are wound around the q-axis iron poles of the rotor and the stator windings are excited by the usual pulse current. We confirmed that the short-circuited windings reduced the q-axis leakage flux and caused additional torque generation by experimentally. In this paper, the characteristic analysis method on the voltage input is proposed for the purpose of an optimum design of the Cylindrical Rotor Type Switched Reluctance Motor. The method is verified by experiment. Furthermore, good performance of the new motor is determined by theoretically.

Key Words: Cylindrical rotor type, switched reluctance motor, finite element method.

1 まえがき

近年、リラクタンストルクを応用した電動機が注目されている。中でもスイッチトリラクタンス (SR) モータは、磁気吸引力のみを用いたモータで、極めて簡易な構造を有し、高速運転に耐えることができる反面、通常の同期電動機に比べて、力率・効率特性が悪いという欠点を持っている。

著者らは先に、設計による特性改善策として、通常の SR モータの回転子歯間に鉄心を設け、その周りに短絡巻線を施した円筒形 SR モータを提案した。こ

れは、短絡巻線により q 軸漏れ磁束を減少させ、トルクの向上を図るもので、実験により通常の SR モータに比べて、トルクが向上することを確認している [1]。

本論文は、円筒形 SR モータの最適設計を目的として、有限要素法を用いた解析法の確立を目指すものである。本モータは q 軸に鉄心とその周りに短絡巻線を施しているため、その誘導電流の取り扱いが問題となる。

今回はあらかじめ回転子位置に対するインダクタンスを有限要素法を使って求め、固定子側と回転子側の電圧方程式を連立させることにより、固定子及び回転子電流を算出し、トルクを求める方法を提案している。

連絡先: 小山 純, 〒852-8521, 長崎市文教町 1-14, 長崎大学工学部, email: oyama@net.nagasaki-u.ac.jp

解析結果と実験結果を比較することにより，解析法の有用性を確認すると共に，提案した円筒形 SR モータが通常の SR モータに比べて，トルクが増加することを理論的に明らかにしている。

2 円筒形 SR モータの仕様及び概形

解析法を検証するために試作したモータの仕様を Table 1 に，概形を Fig.1 に示す．固定子は通常の SR モータと同じ構造であるが，回転子は極と極の間に高さ 30 mm，幅 16 mm，積み厚 234 mm の q 軸鉄心を設け，その周りに短絡された巻線を施した構造となっている。

Table 1: Motor specification.

相数	3
極数	6
出力 (kW)	2.2
定格電流 (A)	15.6
定格電圧 (V)	200
定格回転数 (rpm)	1800
定格トルク (N-m)	11.7

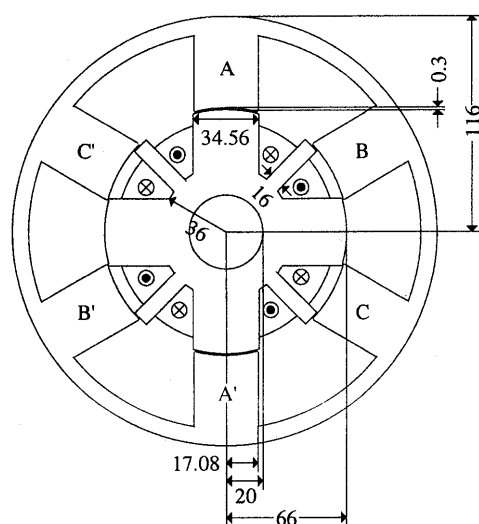


Fig. 1: Motor construction.

3 電圧入力時の円筒形 SR モータの解析

3.1 解析モデル

本解析では，インダクタンスの算出やトルク算出には有限要素法を用いている．その要素分割図を Fig.2 に示す．要素は，計算時間が短く，かつ精度が良くなる一次四辺形要素を用い，0.3 mm のエアギャップを 3 層に，さらに鉄心及び巻線部分もギャップに近くなるほど細かく分割している．要素数は，計算時間と精度を考慮すると，経験的に 9,000 程度は必要と考えられ，ここでは 9,416 (節点数は 9,776) となっている。

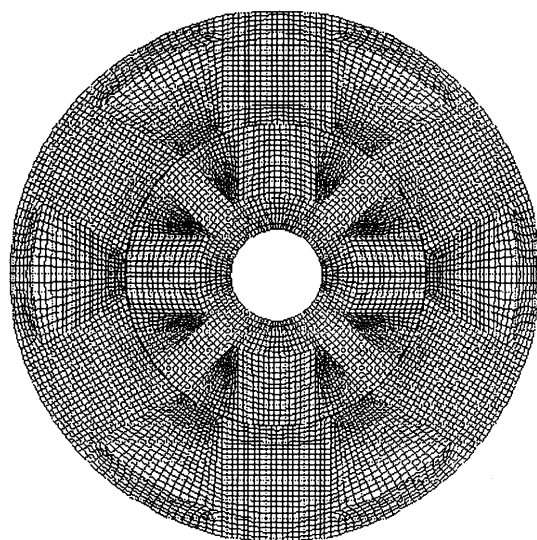


Fig. 2: Finite element mesh.

3.2 電圧入力解析法

有限要素法を用いて解析を行う場合，巻線に与える電流が必要となる．以前の解析では，試作機の実測電流を用いていた [2]．しかし，設計に関する研究を行う場合，固定子に与える電圧に応じた電流波形を正確に算定する必要がある．

今回提案した解析法では，まずモータ形状を定め，回転子位置に応じた各インダクタンスの算出を行う．次に微小時間ではインダクタンスが一定と仮定して，等価回路より固定子巻線電流と回転子短絡巻線の誘導電流を算出し，最後に有限要素法を用いてトルク解析を行う．以下に，その詳細について述べる．

3.3 インダクタンスの算出

固定子巻線及び、回転子短絡巻線に鎖交する磁束はそれぞれ次式となる。

$$\lambda_s = L_s i_s + M_{rs} i_r \quad (1)$$

$$\lambda_r = L_r i_r + M_{sr} i_s \quad (2)$$

ここで、固定子巻線のみ电流を与えて、固定子及び回転子に鎖交する磁束を求め、次式により固定子巻線自己インダクタンス L_s 、固定子側からみた回転子短絡巻線の相互インダクタンス M_{sr} を求める。

$$L_s = \frac{\lambda_s}{i_s} \quad (3)$$

$$M_{sr} = \frac{\lambda_r}{i_s} \quad (4)$$

同様に、回転子短絡巻線のみ电流を与えて、固定子及び回転子に鎖交する磁束を求め、次式により回転子短絡巻線の自己インダクタンス L_r 、回転子側からみた固定子巻線の相互インダクタンス M_{rs} を求める。

$$L_r = \frac{\lambda_r}{i_r} \quad (5)$$

$$M_{rs} = \frac{\lambda_s}{i_r} \quad (6)$$

インダクタンスは、回転子位置を1度ずつ回転させて、求めている。また、次に述べる電流の算出において、等価回路では、相反定理により、 $M_{sr} = M_{rs}$ となるため、相互インダクタンス M は M_{sr} と M_{rs} の平均としている。

3.4 電流の算出

円筒形 SR モータの固定子と磁気回路を構成する回転子を一对とした時の、等価回路を Fig.3 に示す。

この等価回路に対する固定子側及び、回転子側の電圧方程式はそれぞれ次式となる。

$$V = r_s i_s + L_s \frac{di_s}{dt} + M \frac{di_r}{dt} + \omega \frac{\partial L_s}{\partial \theta} i_s + \omega \frac{\partial M}{\partial \theta} i_r \quad (7)$$

$$0 = r_r i_r + M \frac{di_s}{dt} + L_r \frac{di_r}{dt} + \omega \frac{\partial M}{\partial \theta} i_s + \omega \frac{\partial L_r}{\partial \theta} i_r \quad (8)$$

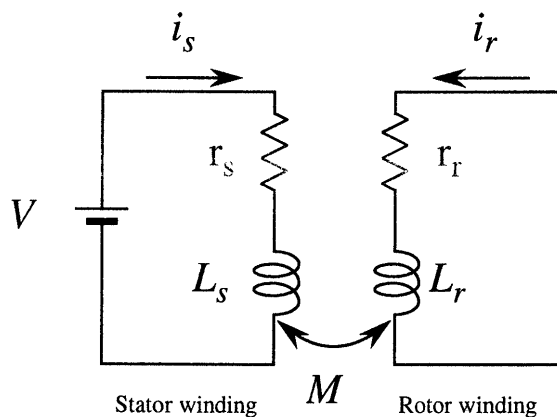


Fig. 3: Equivalent circuit.

但し $\omega \frac{\partial L_s}{\partial \theta} i_s$, $\omega \frac{\partial L_r}{\partial \theta} i_r$, $\omega \frac{\partial M}{\partial \theta} i_s$, $\omega \frac{\partial M}{\partial \theta} i_r$ の項は速度起電力を考慮するためのものである。ここで、微小時間 Δt 秒間は L_s , L_r , M が一定であると仮定して回転子が t 秒の時の固定子巻線電流、回転子短絡巻線電流を初期値とすると、 Δt 秒後の固定子巻線電流、回転子短絡巻線電流の式は以下のように求められる。

$$\begin{aligned} & i_s(t + \Delta t) \\ &= \frac{(r_r + \omega \frac{\partial L_r}{\partial \theta}) V}{\chi} \\ &+ \left\{ \frac{Mr_r + \omega (M \frac{\partial L_r}{\partial \theta} - L_r \frac{\partial M}{\partial \theta})}{2\gamma(L_s L_r - M^2)} i_r(t) \right. \\ &+ \left(\frac{1}{2} - \frac{\alpha}{2\gamma} + \frac{L_s r_r + \omega (L_s \frac{\partial L_r}{\partial \theta} - M \frac{\partial M}{\partial \theta})}{2\gamma(L_s L_r - M^2)} \right) i_s(t) \\ &- \left(\frac{(\frac{1}{2} + \frac{\alpha}{2\gamma})(r_r + \omega \frac{\partial L_r}{\partial \theta})}{\chi} - \frac{L_r}{2\gamma(L_s L_r - M^2)} \right) V \Big\} \\ &\times \exp\{(-\alpha + \gamma)\Delta t\} \\ &- \left\{ \frac{Mr_r + \omega (M \frac{\partial L_r}{\partial \theta} - L_r \frac{\partial M}{\partial \theta})}{2\gamma(L_s L_r - M^2)} i_r(t) \right. \\ &- \left(\frac{1}{2} + \frac{\alpha}{2\gamma} - \frac{L_s r_r + \omega (L_s \frac{\partial L_r}{\partial \theta} - M \frac{\partial M}{\partial \theta})}{2\gamma(L_s L_r - M^2)} \right) i_s(t) \\ &- \left(\frac{(\frac{1}{2} - \frac{\alpha}{2\gamma})(r_r + \omega \frac{\partial L_r}{\partial \theta})}{\chi} + \frac{L_r}{2\gamma(L_s L_r - M^2)} \right) V \Big\} \\ &\times \exp\{(-\alpha - \gamma)\Delta t\} \quad (9) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
i_r(t + \Delta t) = & -\frac{\omega \frac{\partial M}{\partial \theta} V}{\chi} + \left\{ \frac{Mr_s + \omega \left(M \frac{\partial L_s}{\partial \theta} - L_s \frac{\partial M}{\partial \theta} \right)}{2\gamma(L_s L_r - M^2)} i_s(t) \right. \\
& + \left(\frac{1}{2} - \frac{\alpha}{2\gamma} + \frac{L_r r_s + \omega \left(L_r \frac{\partial L_s}{\partial \theta} - M \frac{\partial M}{\partial \theta} \right)}{2\gamma(L_s L_r - M^2)} \right) i_r(t) \\
& + \left. \left(\frac{\omega \left(\frac{1}{2} + \frac{\alpha}{2\gamma} \right) \frac{\partial M}{\partial \theta}}{\chi} - \frac{M}{2\gamma(L_s L_r - M^2)} \right) V \right\} \\
& \times \exp\{(-\alpha + \gamma)\Delta t\} \\
& - \left\{ \frac{Mr_s + \omega \left(M \frac{\partial L_s}{\partial \theta} - L_s \frac{\partial M}{\partial \theta} \right)}{2\gamma(L_s L_r - M^2)} i_s(t) \right. \\
& - \left(\frac{1}{2} + \frac{\alpha}{2\gamma} - \frac{L_r r_s + \omega \left(L_r \frac{\partial L_s}{\partial \theta} - M \frac{\partial M}{\partial \theta} \right)}{2\gamma(L_s L_r - M^2)} \right) i_r(t) \\
& - \left. \left(\frac{\omega \left(\frac{1}{2} - \frac{\alpha}{2\gamma} \right) \frac{\partial M}{\partial \theta}}{\chi} + \frac{M}{2\gamma(L_s L_r - M^2)} \right) V \right\} \\
& \times \exp\{(-\alpha - \gamma)\Delta t\} \quad (10)
\end{aligned}$$

但し,

$$\begin{aligned}
\alpha &= \frac{(r_r + \omega \frac{dL_r}{d\theta})L_s + (r_r + \omega \frac{dL_s}{d\theta})L_r - 2\omega M \frac{dM}{d\theta}}{L_s L_r - M^2} \\
\chi &= \left(\frac{\partial L_s}{\partial \theta} \frac{\partial L_r}{\partial \theta} - \frac{\partial^2 M}{\partial \theta^2} \right) \omega^2 \\
&+ \left(r_r \frac{\partial L_s}{\partial \theta} + r_s \frac{\partial L_r}{\partial \theta} \right) \omega + r_s r_r \\
\gamma &= \frac{\sqrt{\{(r_r + \omega \frac{dL_r}{d\theta})L_s + (r_r + \omega \frac{dL_s}{d\theta})L_r - 2\omega M \frac{dM}{d\theta}\}^2 - 4\chi(L_s L_r - M^2)}}{2(L_s L_r - M^2)}
\end{aligned}$$

3.5 トルク解析

トルク解析では、有限要素法モデルに先ほど算出した固定子巻線電流、回転子短絡巻線電流を位相差を考慮して与えることにより、トルクを求めている。すなわち、Fig.4 の回転子位置を 0 度とすると、励磁する相は B 相となるため、先ほど求めた固定子巻線電流の 0 度から 30 度までを B 相に与える。A 相電流は B 相電流より位相が 1/3 周期進んでいると考えて、30 度から 60 度までの電流を与える。同様に、C 相電流は位相が 1/3 周期遅れていると考えて、60 度から 90 度までの電流を与える。

回転子短絡巻線電流においては、r1, r3 巻線は 0 度から 30 度までの電流を与え、r2, r4 巻線は 1/2 周期の位相差があるので、30 度から 60 度までの電流を与える。

このようにして、回転子の回転角が 0 度から 30 度までのトルクを算出する。

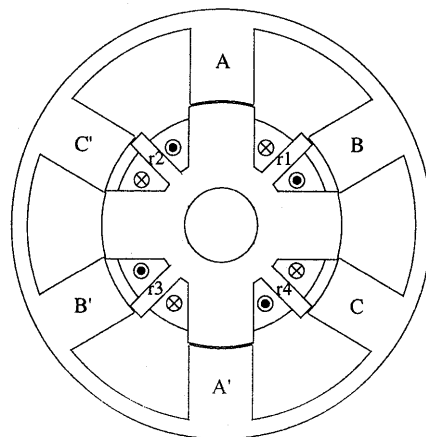


Fig. 4: Torque analysis model.

4 解析結果

4.1 インダクタンス特性

インダクタンスを求める際、与える電流として、固定子巻線電流 5A、回転子短絡巻線電流 1A の場合 (Analysis 1) と飽和の影響の強い固定子巻線電流 20A、回転子短絡巻線電流 3.5A の場合 (Analysis 2) で解析を行った。

Fig.5 に固定子巻線自己インダクタンス L_s を示す。Analysis 2 では固定子巻線電流が大きいので、固定子鉄心が飽和して、固定子巻線自己インダクタンスのピーク値が大きく減少することが分かる。

Fig.6 に回転子短絡巻線自己インダクタンス L_r 、Fig.7 に固定子巻線と回転子短絡巻線間の相互インダクタンス M を示す。回転子短絡巻線自己インダクタンス及び、相互インダクタンスでは、2つの解析値はほぼ同一な波形となっており、解析で用いた電流に対して、磁気飽和の影響が小さいことが分かる。

4.2 電流特性

4.1 節において、2つの解析値を用いて、電流の算出を行った結果、Analysis 1 の方が実測値に近かったため、Analysis 1 の場合で、円筒形回転子と突極

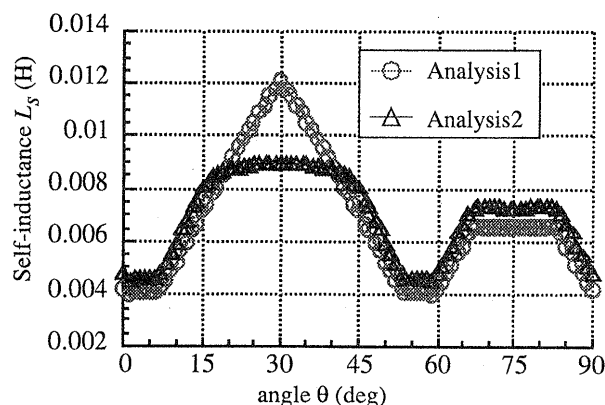
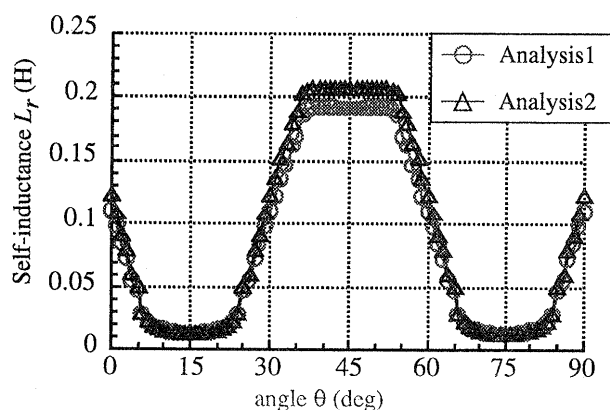
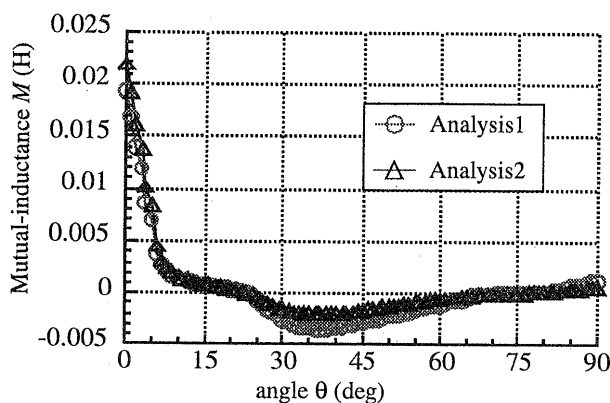
Fig. 5: Self-inductance L_s - angle characteristics.Fig. 6: Self-inductance L_r - angle characteristics.

Fig. 7: Mutual-inductance - angle characteristics.

形回転子の比較を行った。突極形回転子の解析モデルは、円筒形回転子モデルにおいて q 軸鉄心と短絡巻線を取り除いたものとする。また、突極形回転子の電圧方程式は次式となり、3.4 節と同様に解くことにより、電流を算出している。

$$V = r_s i_s + L_s \frac{di_s}{dt} + \omega \frac{\partial L_s}{\partial \theta} i_s \quad (11)$$

固定子巻線に振幅 100 V、幅 25 度のパルス電圧を与え、速度を 1,055 rpm とした場合の固定子巻線電流と回転子巻線に誘導される電流を Fig.8 と Fig.9 に示す。

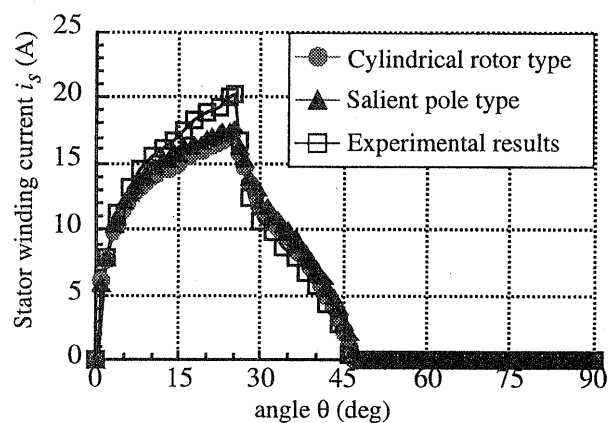


Fig. 8: Stator winding current - angle characteristics.

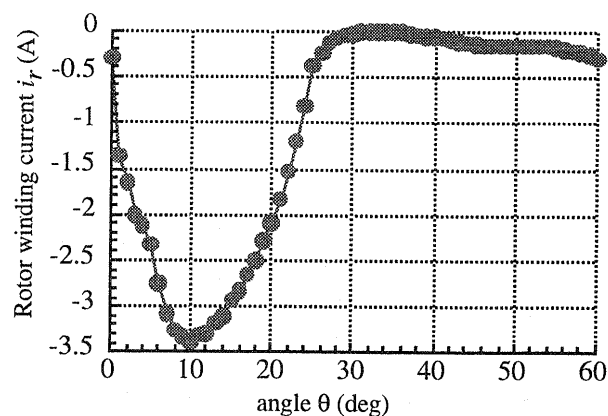


Fig. 9: Rotor winding current - angle characteristics.

円筒形回転子の場合、固定子巻線電流の解析波形は、実測値と非常に良く似た分布となるが、ピーク値が若干小さくなっている。解析では固定子と回転子の一对で電圧方程式をたてているが、実際には励磁を切ったばかりの巻線には電流の立ち下がり部分が残っている

ため、その電流と現在励磁している固定子巻線や回転子短絡巻線間の相互作用を考慮していないためだと思われる。また、円筒形と突極形の固定子巻線電流はほぼ同一な波形となっている。

円筒形回転子の回転子短絡巻線電流は、実測値との比較は不可能であるが、 q 軸鉄心に鎖交する磁束を打ち消す方向に電流が流れるため、負の電流となっていることが確認できる。

4.3 トルク特性

Fig.10 は 4.2 節に示した電流を与えた時のトルク特性である。円筒形のトルクは突極形に比べて、16 度から 26 度まで多少大きくなっている。これは、短絡巻線に誘導される電流の影響と考えられる。また平均トルクは円筒形の実測値が 2.083 N-m、円筒形の解析値が 2.493 N-m、突極形の解析値が 2.406 N-m となった。

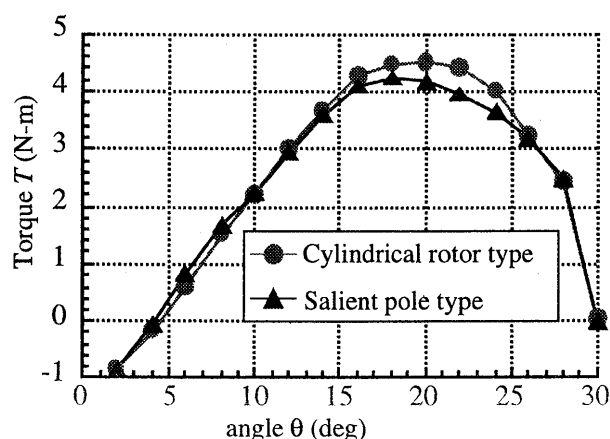


Fig. 10: Torque - angle characteristics.

4.4 速度特性

Fig.11 は、速度を 850 rpm から 1,200 rpm まで変化した時の固定子巻線実効電流を円筒形の実測値と解析値、そして突極形の解析値で比較したものである。図より速度に対して、円筒形の解析値と実測値及び突極形の解析値はほぼ一致としていることが分かる。また円筒形に比べ、突極形のほうが電流が若干大きいことが分かる。

Fig.12 は同様に平均トルクについて比較したものである。円筒形の実測値と解析値は良く一致しているが、1,200rpm 付近では多少誤差が見られる。また円筒形のほうが突極形に比べ、平均トルクがやや大きいことが確認できる。

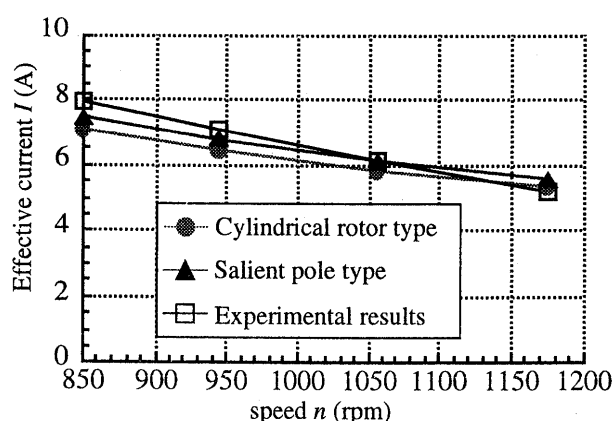


Fig. 11: Effective current - speed characteristics.

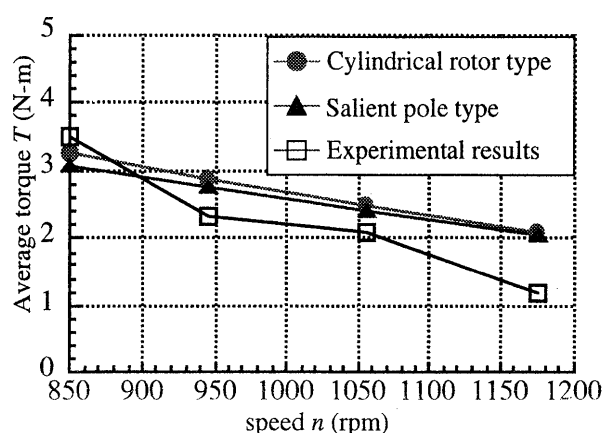


Fig. 12: Average torque - speed characteristics.

5 まとめ

円筒形 SR モータの q 軸鉄心の電圧入力時の特性解析法を提案し、実測値との比較より、その有用性を検証した。また、回転子形状の比較においては、実験結果と同様に円筒形回転子の有用性を確認することができた。今後は、更なる特性向上を目指し、 q 軸鉄心の最適設計を行っていく予定である。

参考文献

- [1] 樋口, 小山, 阿部, 山田: “円筒形スイッチド・リラクタンスマータについて”, 日本 AEM 学会誌, 第 3 巻, 第 1 号 (1995), pp.66-72.
- [2] 小山, 樋口, 阿部, 尾崎, 山田: “円筒形 SR モータの q 軸鉄心構造の最適化に関する研究”, 電気学会産業応用部門全国大会, No.195, (1998).