スイッチトリラクタンスモータのトルクとラジアル力

学生員 兼田 昌子 (大阪府立大学)

正 員 真田 雅之 (大阪府立大学)

正 員 森本 茂雄 (大阪府立大学)

正 員 武田 洋次 (大阪府立大学)

正 員 山井 広之 (ダイキン工業(株))

Torque and Radial Forces of Switched Reluctance Motor

Masako Kaneda, Student Member, Masayuki Sanada, Member, Sigeo Morimoto, Member, Yoji Takeda, Member
(Osaka Prefecture University), Hiroyuki Yamai, Member (Daikin Industries, LTD.)

A Switched Reluctance Motor has a doubly salient structure, both stator and rotor have saliency and it has an advantage in a harsh environments due to a simple and robust structure. However, it has the disadvantage that the motor is noisy because of deformation of the motor by the radial force. This paper examines the radial force for various types of SRM at a constant mmf or constant torque using the two dimensional finite element method. We propose the evaluation factor of the acoustic noise using the finite element analysis. It is cleared that the torque is produced at the oncoming pole edges and the radial force yields at the pole face. The evaluation factor of the acoustic noise in an experimental result agrees well with the calculation value. As a result, the suitable type SRM expecting low noise is 12/8 type.

キーワード：スイッチトリラクタンスモータ、ラジアル力、騒音、変形、トルク、磁気飽和

1. まえがき

スイッチトリラクタンスモータ（以下SRモータと略記）は、誘導モータや永久磁石同期モータに比べ構造が簡単のため、堅牢で安価なモータとして期待されている⁽¹⁾⁽²⁾。しかし、ステータとロータの突極に起因するトルクリプルや騒音に問題があり、汎用の妨げとなっている。トルクリプルの低減策として励磁相の切り替えタイミングを微妙に調整する方法が提案されているが⁽³⁾、汎用性に問題があり、広く利用されるに至っていない。このほか、インダクタンスの空間高調波を考慮して駆動電流に適当な割合の第3高調波を重畳する事により、トルクリプルの改善ばかりでなくトルク/アンペア²を向上させる方法も報告されている⁽⁴⁾。

従来よりSRモータの評価は有限要素法や自己インダクタンスを基にした検討が一般的である。

本論文ではまず有限要素法を用いてトルク特性とステータとロータの各部分に働く磁気吸引力（以下ラジアル力という）との関係を明らかにし、これをもとに騒音を考慮した評価法を提案している。次いで、現在に至るまで実用または試作されている代表的な構造のSRモータについて、トルクとラジアル力の評価を行い、騒音の小さい構造に一つの指針を与えている⁽⁵⁾⁽⁶⁾。

2. トルクとラジアル力

2.1 トルクとラジアル力の発生原理

図1に代表的な3相6/4SRモータのステータ極とロータ極

の重なり部分の磁力線の解析結果を示す。ロータ極とステータ極が重なっている部分では、磁力線は突極面に垂直に働き、電磁力の全てはラジアル方向に吸引力として作用する。このラジアル力はステータ極を上下方向から引きつけ、ステータ形状を歪ませ、騒音の原因となる。また、磁極端部の磁力線は図(b)に示すように極エッジから斜め方向に入るため、電磁力も斜めに作用する。この電磁力はラジアル力 f_R と接線方向の力 f_T に分解できる。接線力はトルクとして有効に作用する⁽⁷⁾⁽⁸⁾。

図1 磁力線

Fig.1. Line of Magnetic force

2.2 トルクとラジアル力の分布

図2に解析に用いた3相6/4モータの基本構造を、表1に主な設計仕様を示す。ロータの基準位置（ $\theta = 0^\circ$ ）はステータ極の中心とロータ極の凹部の中心が一致した状態を、また、ロータ位置 45° （機械角）はステータ極とロータ極が完全に重なった状態を示している。励磁しているステータ極に発生するラジアル力 f_R と接線力 f_T を有限要

素法で解析した結果を図3に示す。解析の範囲は機械角 $-30^{\circ} \sim +30^{\circ}$ 、総起磁力は600A(300A $\times$ 2極)である。図3の上方の太い網線はステータ極の位置を、下方の太い網線はロータ極の位置を示している。なお、ラジアル力と接線力を区別しやすくするため、接線力の値を反転させて表している。ラジアル力は励磁しているステータ極とロータ極の対向している全部分に発生し、接線力はステータ極とロータ極が重なるエッジ部分に集中して発生していることがわかる。このラジアル力 f_R を積分したものが、このステータ極に発生するラジアル力 F_R であり、この接線力 f_T を積分し、ロータ半径($=D_r/2$)および励磁極数($=2$ 極)をかけたものが静トルク T である。図4にラジアル力 F_R と静トルク T を、図5に自己インダクタンスを示す。静トルクおよび自己インダクタンスの測定値と計算値がよく合っていることがわかる。ラジアル力については回転機の構造上の問題で測定できなかったが、静トルクもラジアル力もマクスウェルの応力より計算しており、静ト

図2 SRモータの構造(6/4タイプ)
Fig.2. Construction of SR motor(6/4 type)

表1 解析モデルの仕様

Table 1. Specifications of analytical models

項目	6/4タイプ
ステータ外径 D_s [mm]	112.0
ステータ極幅 δ_s [°]	30.0
ロータ外径 D_r [mm]	60.5
ロータ極幅 δ_r [°]	45.0
ギャップ長 g [mm]	0.25
積み厚(奥行)[mm]	80.0

図4 ラジアル力とトルク(6/4タイプ)
Fig.4. Radial force and torque(6/4 type)

ルクが精度良く計算されていることから、ラジアル力も精度良く計算されているものと推測できる。

(a) ロータ位置 0° (Unaligned)

(b) ロータ位置 9°

(c) ロータ位置 30°

(d) ロータ位置 45° (Aligned)

図3 ラジアル力と接線力の分布

Fig.3. Distribution of radial and tangential forces

図5 自己インダクタンス (6/4タイプ)
Fig.5. Self inductance(6/4 type)

2.3 極幅の異なる 6/4 タイプの SR モータ

6/4 タイプのモータにおいて、ステータ極幅 δ_s およびロータ極幅 δ_r を、 30° (Small) もしくは 45° (Large) にしたときのラジアル力とトルクについて検討する。極幅の組み合わせは表 2 の 4 通りである。

総起磁力 600A のときの静トルクの計算結果を図 6 に示す。後に述べる実験結果との比較の都合上、ここでは積み厚を半分にした。このため、トルクの大きさも図 4 の 1/2 になっている。S-L と L-S の静トルク特性はほぼ同じである。S-S は、S-L または L-S を右に 7.5° シフトした特性になっている。モータは軽量で巻線スペースは広い方が有利であるので、以下の解析では軽量で巻線スペースが広く取れる S-S の組み合わせのタイプについて検討する。

表2 設計仕様

Table 2. Design of various shapes of 6/4 motor

項目	S-S	S-L	L-S	L-L
ステータ極幅 $\delta_s [^\circ]$	30.0	30.0	45.0	45.0
ロータ極幅 $\delta_r [^\circ]$	30.0	45.0	30.0	45.0
積み厚 [mm]	40.0	40.0	40.0	40.0

図 6 静トルク特性(6/4 タイプ)

Fig.6. Static torque curves(6/4 type)

3. トルクとラジアル力の評価

3.1 各種 SR モータのトルクとラジアル力

図7(a)~(e)に現在まで実用に供されているもの、あるいは試作されたことのある、SRモータの各種形状⁹⁾を示す。(a)は基準となる6/4タイプ(前節のS-S)、(b)は8/6タイプ、(c)は12/8タイプである。また、(d)の12/10Aタイプは基本的には、ステータ6極の3相機であるが、ステータ極は、先端が2つの部分に分割されている。また(e)の12/10Bタイプは相隣る2つの歯が逆極性に励磁されるため、継鉄部分

表3 設計仕様

Table 3. Design of various shapes of SR motor

項目	6/4 (S-S)	8/6	12/8	12/10 A	12/10 B
ステータ極幅 $\delta_s [^\circ]$	30.0	22.5	15.0	15.0	15.0
ロータ極幅 $\delta_r [^\circ]$	30.0	20.0	15.0	15.0	15.0
積み厚 [mm]	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0
1励磁期間 $[^\circ]$	30.0	15.0	15.0	12.0	12.0
駆動周波数比	1.0	2.0	2.0	2.5	2.5

(i)ロータ位置 0° (ii)ロータ位置 45°
(a) 6/4タイプ

(i)ロータ位置 0° (ii)ロータ位置 30°
(b) 8/6タイプ

(i)ロータ位置 0° (ii)ロータ位置 22.5°
(c) 12/8タイプ

(i)ロータ位置 0° (ii)ロータ位置 18°
(d) 12/10Aタイプ

(i)ロータ位置 0° (ii)ロータ位置 18°
(e) 12/10Bタイプ

図7 モータ形状

Fig.7. Construction of SR motor

の磁路は短くなる特徴がある。表3に各々の極幅を示す。極幅は、極数に反比例すると仮定すると、8/6タイプのス

デューティ幅は6/4タイプの6/8倍の22.5°、ロータ極幅は4/6倍の20°、その他のタイプの極幅は6/4タイプの半分の15°となる。表中の励磁期間とは、励磁を切り換えてから次に励磁を切り換えるまでに、ロータが回転しなければならない角度であり、式(1)で与えられる。

$$\text{励磁期間} = 360^\circ / \text{ロータ極数} / \text{相数} \quad \dots(1)$$

したがって、同一回転に必要な駆動周波数は励磁期間の逆数になる。前節で述べたように、極幅を小さくすることでステータ極とロータ極の対向面積が減少し、ラジアル力の低減に効果のあることが明らかであるが、極幅を小さくすれば、極数が増加し、駆動周波数上がることも注意が必要である。ここでは、1相あたりの起磁力を等しくして比較を行う。

(1) 起磁力600Aでの比較

1相あたりの総起磁力を600Aとして比較を行う。6/4、8/6、12/10Aについては300A×2極、12/8タイプは150A×4極、12/10Bタイプは(150A×2)×2極として計算した。励磁しているステータ極とロータ極が外れた状態から完全に重なる状態までの範囲のトルクとラジアル力の計算結果を図8に示す。トルクの大きさに関しては、12/10Aタイプは6/4タイプの約2倍、12/8タイプ、12/10Bタイプは約半分になっている。トルクは大きいほど良く、ラジアル力は小さいほど良いが、モデルによって両者の力の大きさが異なる

(a) ラジアル力

(b) 静トルク特性

図8 ラジアル力と静トルク特性(起磁力600A)

Fig.8. Radial force and static torque(at 600A)

(a) 評価関数

(b) ベクトル図

図9 ラジアル力とトルクの評価(起磁力600A)

Fig.9. Evaluation of radial force and torque(at 600A)

ため比較が困難である。そこで、5種類のタイプを比較しやすくするため、式(2)のような評価関数NFを導入する。

$$\text{評価関数NF} = \text{平均最大トルク} / \text{ラジアル力の最大値} \quad \dots(2)$$

この値が大きいほど、高トルク、低騒音が期待できる。なお、(1)式で求めた励磁期間の平均トルクは、1励磁区間の取り方で値が異なる。そこで、その平均トルクが最も大きな値を平均最大トルクとして(2)式で用いている。例えば、6/4タイプではロータ位置13.5°~43.5°にわたる30°区間の平均値、12/10Aタイプでは3.0°~15.0°の12°区間の平均トルクが平均最大トルクとなる。評価関数およびトルクとラジアル力をベクトル表示したものを図9に示す。評価関数が大きい、もしくは、ベクトルが右下に近づくほどトルクの割にラジアル力が小さく、騒音の点で有利となる。この観点からは、12/8タイプが最も優れていることがわかる。高トルクで低騒音が期待できるモータは、最も傾きが小さい12/8タイプであり、次いで12/10Aタイプとなる。単位起磁力あたりのトルクは12/10Aタイプが最も大きくなる。

(2) 起磁力1200Aでの比較

SR モータは磁気飽和の大きい状態で使用する場合が多い。起磁力を2倍の1200Aにして、磁気飽和がかなり進んだ状態での計算結果を図10に示す。

起磁力600Aと比較すると、どの形状もトルクがほぼ4倍になっているにもかかわらず、ラジアル力はトルクほど増加しないことがわかる。図11に評価関数およびトルクとラジアル力のベクトル図を示す。1200Aでは、12/10Aタイプの評価関数が最も大きく、トルクも大きい。その他のタイプについても、600Aより評価関数が大きくなっている。なお、12/10Aタイプの静トルクが大きく歪んでおり、トルクリプルが大きくなることから、トルクリプルによる騒音の評価も別途考慮する必要があると思われる。なお、ここでは1相あたりの総起磁力が等しい条件で比較を行ったが、巻線のスロット占積率、電流密度を等しくして比較を行った場合も、ほぼ同様の評価関数の傾向となる⁽⁶⁾。

(a) ラジアル力

(b) 静トルク特性

図10 ラジアル力と静トルク特性(起磁力1200A)

Fig. 10. Radial force and static torque(at 1200A)

(a) 評価関数

(b) ベクトル図

図11 ラジアル力とトルクの評価(起磁力1200A)

Fig. 11. Evaluation of radial force and torque(at 1200A)

3.2 実験結果およびその検討

放射音のパワーレベルは、放射面の振動速度 u の自乗に比例する⁽¹⁰⁾。振動速度の主要因はラジアル力であることから、トルク一定条件のもとで、振動速度を測定し、評価関数の妥当性を検討する。比較には 6/4 タイプと 12/8 タイプを用いた。測定装置を図 12 に示す。測定ポイントは図 13(a)および(b)に示す 60° の範囲を同図(c)のように 1cm 角に分割した各部の中央 15 箇所である。回転数 20rps、

図12 測定装置

Fig. 12. Measurement equipment

図13 測定ポイント

Fig. 13. Measured points

表4 測定結果(20rps, 15kg·cm)

Table 4. Measurement of vibration (20rps, 15kg·cm)

項目	6/4(S-S)	12/8
振動速度(実測値) u [mm/s]	0.0108	0.0047
振動速度比	2.30	1.00

表5 計算結果(15kg·cm付近)

Table 5. Analysis data(at approx. 15kg·cm)

項目	6/4(S-S)	12/8
起磁力[A]	1200	$1200\sqrt{2}$
平均最大トルク T [kg·cm]	15.9	17.4
ラジアル力の最大値 F_{rmax} [kgf]	78.6	35.0
評価関数 NF	0.202	0.498
(1/評価関数) 比 $\approx$ 振動速度比	2.46	1.00

(a) 評価関数

(b) ベクトル図

図14 ラジアル力とトルクの評価(15kg·cm付近)

Fig. 14. Evaluation of radial force and torque

(at approx. 15kg·cm)

トルク 15kg·cm として各測定ポイントの振動速度を測定した。いずれの測定ポイントにおいても大差は認められ

なかったが、測定値の平均値を表 4 に示す。振動速度比は、6/4 タイプが 12/8 タイプの 2.30 倍になっている。放射音のパワーレベルは u の自乗に比例することから、騒音レベルは振動速度比より、 $10\log(2.30)^2 \approx 7.23$ となり、12/8 のほうが約 7dB 低いと予想できる。

ここではトルクを $15\text{kg}\cdot\text{cm}$ 一定として比較しているの
で、6/4 タイプについては総起磁力 1200A のときの計算値
を用いる。また、12/8 タイプの 1200A では、平均最大ト
ルクが $15\text{kg}\cdot\text{cm}$ の約半分であり、飽和を無視した場合の
トルクは起磁力の 2 乗に比例することから、総起磁力を
 $\sqrt{2}$ 倍の $1200\sqrt{2}$ A として比較した。計算値を表 5 およ
び図 14 に示す。表 4 の振動速度比と表 5 の評価関数の逆
数(1/評価関数)比を比べるとほぼ同じ値になっており、評
価関数の妥当性が示されている。

4. あとがき

SRモータを励磁すると、トルクとともにラジアル力が
発生する。ラジアル力がステータを縮ませ、励磁を切り
換えるたびにモータが変形し、騒音を発生する。解析し
た結果、ラジアル力は励磁しているステータ極とロータ
極が対向している全部分に発生し、また、トルクはステ
ータ極とロータ極のエッジ部分に集中して発生している
ことがわかった。つまり、ラジアル力は、ステータ極と
ロータ極の対向面積が小さいほど小さくなる。

本論文では、低騒音のSRモータの構造を見つけるため
の一つの手法として評価関数を提案した。その評価法を
用いて、12/8タイプと12/10Aタイプが低騒音を期待でき
るという結果を得た。実機により6/4タイプと12/8タイプに
ついて振動速度を測定すると、振動速度比と評価関数の
逆数の比がほぼ等しくなった。放射音のパワーレベルは
振動速度の自乗に比例することから、提案する評価関数
の妥当性が明らかになった。

(平成11年3月19日受付, 平成11年8月13日再受付)

文 献

- (1) 松井,武田:「見直されてきたリラクタン্সモータ」, 電学論D, Vol.118-D, No.6 pp.685-690 (1998)
- (2) 松井,千葉,武田:「リラクタンストルクを利用した回転機」, 電学論 D, Vol.114, No9 pp.824-832 (1994)
- (3) Charles Pollock, Chi-Yao Wu: "Acoustic Noise Cancellation Techniques for Switched Reluctance Drives: Attention to Mechanical Behaviour", IEEE Trans.on I.A., Vol.33, No.2, pp.477-484 (1993)
- (4) 落合,小坂,松井:「RMの電流-トルク特性改善の考察」, 電気学会回転機研究会 RM-97-15 (1997)
- (5) 兼田,真田,森本,武田,松井:「各種SRモータのトルクとラジアル力の評価」, 電学産業応用部門全国大会, No.16 (1998)
- (6) 兼田,真田,森本,武田,松井:「全節巻SRモータの励磁方式と出力特性」, 電気学会半導体電力変換研究会, SPC-99-2 (1999)
- (7) R.s.colby, F.M.Mottier, T.J.E.Miller: "Vibration Modes and Acoustic Noise in a Four-Phase Switched Reluctance Motor", IEEE Trans.on I.A., Vol.32, No.6, pp.1357-1364 (1996)
- (8) N. Sadowski, Y. Lefevre, C. G. C. Neves, R. Carlson : "Finite Elements Coupled to Electrical Circuit Equations in the Simulation of Switched Reluctance Drives: Attention to Mechanical Behaviour", IEEE Trans.on Mag., Vol.32, No.3, pp.1086-1089 (1993)
- (9) T. J. E. MILLER : "Switched Reluctance Motors and their Control" MAGNA PHYSICS
- (10) 福田他:「(社)日本機械学会編 機械騒音ハンドブック」, 産業図書 (1991)

兼田 昌子

(学生員) 1990年3月関西大学工学部電気工学科卒業。同年4月松下電器産業株式会社に勤務。1996年2月関西大学工学部員外研究員。1997年4月大阪府立大学大学院工学研究科修士課程入学、1999年3月修了。

真田 雅之

(正員) 昭和 41 年 6 月 1 日生。平成 6 年 3 月大阪府立大学大学院工学研究科博士後期課程修了。同年 4 月同大学工学部助手、9 年 7 月同講師、現在に至る。工学博士。この間、主としてリニアモータ、電磁界解析の研究に従事。IEEE、日本 AEM 学会、パワーエレクトロニクス研究会会員。

森本 茂雄

(正員) 昭和 34 年 6 月 28 日生。59 年 3 月大阪府立大学大学院修士課程修了。63 年 7 月大阪府立大学助手、平成 6 年 4 月同助教授、現在に至る。工学博士。主として、モータドライブシステム、モーションコントロールの研究に従事。IEEE、計測自動制御学会、システム制御情報学会、パワーエレクトロニクス研究会会員。

武田 洋次

(正員) 昭和 18 年 11 月 10 日生。43 年 3 月大阪府立大学大学院修士課程修了。同年 4 月同大学助手、平成 5 年 4 月同教授、現在に至る。工学博士。主として、モータの可変速制御システム、リニアアクチュエータの研究に従事。IEEE、電気情報通信学会、システム制御情報学会、パワーエレクトロニクス研究会会員。

山井 広之

(正員) 1960年1月30日生。87年3月名古屋工業大学大学院修士課程修了。同年4月ダイキン工業株式会社入社。主に、インバータによる電動機制御に関する研究、開発に従事。