

福岡工業大学 機関リポジトリ

FITREPO

Title	有限要素法による電気自動車用SR モータの設計
Author(s)	大山 和宏
Citation	福岡工業大学研究論集 第39巻第2号 P219-P227
Issue Date	2007-2
URI	http://hdl.handle.net/11478/915
Right	
Type	Departmental Bulletin Paper
Textversion	Publisher

Fukuoka Institute of Technology

有限要素法による電気自動車用 SR モータの設計

大 山 和 宏 (電気工学科)

麻 生 賢 一 (電気工学科)

高 原 健 爾 (電気工学科)

Maged Naguib F. Nashed (Electronics Research Institute)

藤 井 裕 昭 (㈱明和製作所)

上 原 一 士 (㈱明和製作所)

Design of Switched Reluctance Motor for Electric Vehicle Using Finite Element Method

Kazuhiro OHYAMA (Department of Electrical Engineering)

Kenichi ASOU (Department of Electrical Engineering)

Kenji TAKAHARA (Department of Electrical Engineering)

Maged Naguib F. NASHED (Electronics Research Institute)

Hiroaki FUJII (Meiwa MFG. CO., LTD.)

Hitoshi UEHARA (Meiwa MFG. CO., LTD.)

abstract

In this paper, Switched Reluctance Motor (SRM) for electric vehicle (EV) is designed using finite element method (FEM). The static torque of SRM is calculated with the magnetic field analysis. The temperature rise of SRM is calculated with the heat transfer analysis. First, the static torque and temperature rise of 600W SRM of sample machine are measured in the experiment, and they are compared with the calculated results using FEM under the same conditions. The validity of magnetic field analysis and heat transfer analysis is verified by the comparison. Then, the 60kW SRM for EV which has the output characteristics equal to 1500cc gasoline engine is designed with the magnetic field analysis and heat transfer analysis.

Keywords: *SR Motor, finite element method, electric vehicle, design of SR motor, static torque, heat transfer analysis*

1. まえがき

近年、車社会の急速な発展に伴い、石油エネルギーの枯渇問題、CO₂による地球温暖化やNO_xによる大気汚染といった深刻な環境問題を引き起こしている。こ

れらの問題に対する解決策として、ハイブリッドカー(HV)で代表される低燃費自動車や低排出ガス車などが徐々に普及してきている。しかし、特にHVの普及率は低迷しており、問題を解決する決定打とは言い難い。その理由として、同じクラスのカソリン車と比較して割高となる点が挙げられる。

スイッチドリラクタンスモータ(SRM)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

を利用したモータである。SRMの固定子と回転子は、積層された珪素鋼板から作られている。SRMは、固定子と回転子が共に突極構造であり、巻線は固定子だけに集中巻される。また永久磁石を使用しない。そのため、誘導電動機や永久磁石同期電動機と比較して非常に簡単な構造となるので、堅牢且つ安価な特徴を有する。また、回転子において巻線や永久磁石を使用しないため、電気自動車用電動機として想定される高速回転や高温状態での運転、衝撃や振動を常に受ける劣悪な路面条件での運転などに耐える可能性を有する⁽¹⁾⁽²⁾。

開発初期のSRMドライブでは、トルク脈動や騒音が大きめという問題が存在した。しかし、パワーエレクトロニクスの発達と技術の向上により、それらの問題が解決されつつある⁽³⁾。このようなSRMドライブの基本性能の向上に伴い、最近では、電気自動車(EV)へのSRMの応用が検討され始めている^{(4)~(15)}。これまで学会等で公表された報告は、EV用SRMの設計に関する報告^{(4)~(9)}、EVへの適用を前提としたSRMの制御および最適化に関する報告^{(10)~(15)}等が見られる。

著者らは、1500ccクラスのガソリン自動車と同程度の動力性能を有するコンパクトEVを開発するプロジェクトに取り組んでいる。そのプロジェクトにおいて、堅牢且つ安価な特徴を有するSRMに着目し、現在、コンパクトEVに搭載するSRMの設計を行っている。その設計において、フロントエンジン・フロントドライブ方式(FF方式)を採用し、ディファレンシャルギアを省略するために2機のSRMを搭載することを前提としている。また、1500ccのガソリンエンジンと同等な出力特性を有し、出力特性を犠牲にしない程度に小型軽量化することを設計指針としている。

本論文では、有限要素法(FEM)による磁場解析と伝熱解析を利用してEV用SRMの設計を行ったので報告する。著者らの文献調査によるとFEMによる両解析を利用してEV用SRMを設計した報告はないようである。最初に、FEMで使用する計算式やFEMソフトウェアの使用方法など、基礎的な事項を確認するために、600Wの供試SRMを対象として磁場解析と伝熱解析を行う。具体的には、静止トルクと温度上昇を計算し、得られた計算結果と計算と同条件で実測した実験結果との照合を行う。両解析の妥当性を確認した上で、EV用SRMの設計への両解析の適用について議論する。次に、両解析を利用して1500ccのガソリンエンジンと同等な出力特性を有するEV用SRMの設計

を行なう。

2. 静止トルクの算出

2.1 磁場解析による静止トルクの計算

有限要素法ソフトウェアANSYSを用いて600Wの供試SRMのインダクタンスおよび静止トルクの計算を行なう。図1に解析モデル、表1に解析条件、表2にSRMの仕様を示す。図1に示す解析モデルを用いて、二次元静磁場解析により計算を行なう。磁場解析では、鉄心における磁気飽和の影響を考慮している。

解析に用いるSRMは固定子6極、回転子4極の3相SRMである。1相のみを励磁した場合、回転子の極数が4極であるため、90度回転すると同じ磁気回路を形成する。また、45度回転するごとに、固定子突極と回転子突極が完全対向状態、非完全対向状態を繰り返す。このような幾何学的な対称性を利用すれば、45度回転分の計算で360度回転分のインダクタンスを得ることができる。そこで、固定子突極と回転子突極が完

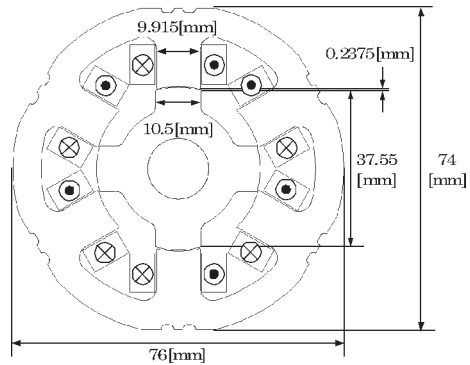


図1 解析モデル

Fig. 1. Analytical model.

表1 解析条件

Table 1. Analytical condition.

number of node	14993~15901
number of element	7382~7836
mesh size (all area)	0.0013
shape of element	triangle
excitation phase of coil	one phase only
magnetomotive force	80 [AT]
current density	1.559×10^6 [A/m ²]
partial area of coil	51.3 [mm ²]
analysis range	0~45 [deg]

表2 SRMの仕様
Table 2. Specification of SRM.

stator outer diameter	76 [mm]
rotor outer diameter	37.55 [mm]
stack length	50 [mm]
output	600 [W]
air gap	0.2375 [mm]
number of windings	20 [turns/pole]
stator poles / rotor poles	6 / 4

全に対向していない状態を0度とし、回転子を1度ずつ、固定子突極と回転子突極が完全に対向する45度まで回転させ、1相分のインダクタンスおよび静止トルクの算出を行なった。

0度から45度まで回転子を1度ずつ回転させながら、次式により磁気随伴エネルギー $W'(\theta, i)$ を算出する。

$$W'(\theta, i) = \frac{1}{2} \sum_i \frac{B_i^2}{\mu_i} \nu_i \quad \dots\dots(1)$$

ここで、 B_i は各要素の磁束密度、 μ_i は各要素の透磁率、 ν_i は各要素の体積である。次式を用いて、磁気随伴エネルギーからインダクタンスを算出する。

$$L(\theta, i) = \frac{2W'}{i^2} \quad \dots\dots(2)$$

ここで、 $W'(\theta, i)$ は回転子位置 θ における磁気随伴エネルギー、 $L(\theta, i)$ は回転子位置 θ におけるインダクタンス、 i は励磁電流である。図2に、式(1)、式(2)より得られたインダクタンスの計算結果を示す。

リラクタンストルク $T(\theta, i)$ は、磁気随伴エネルギーまたはインダクタンスを用いて、次式により計算される。

$$T(\theta, i) = \frac{\partial W'}{\partial \theta} \quad \dots\dots(3)$$

図3に、式(3)を用いて計算された静止トルクを示す。静止トルクはインダクタンスの回転子位置に対する微分値に比例するので、インダクタンスが増加しているときに励磁電流が流れていれば、電流の方向に関係なく正方向のリラクタンストルクが得られる。つまり、インダクタンスの傾きが正方向となる位置で連続して巻線を励磁すると、励磁する度に正方向のトルクが得られ、回転子は正方向に回転し続ける。

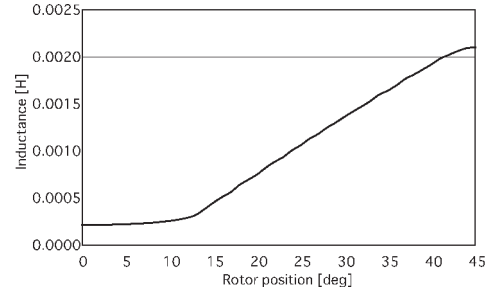


図2 インダクタンスの計算結果
Fig. 2. Calculated result of inductance.

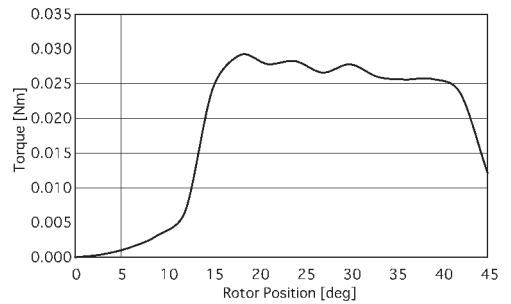


図3 静止トルクの計算結果
Fig. 3. Calculated result of static torque.

2. 2 実験による磁場解析の検証

600Wの供試SRMを用いて、1相のみ励磁させたときの静止トルクの測定を行なった。図4に実験システムを示す。直流電源側からSRモータ1相だけに励磁電流4[A]を流し、トルクメータを用いて、回転子位置 θ における静止トルクを測定した。SRMの回転子は、ブラシレスDCモータを用いて固定した。ブラシレスDCモータドライブを用いて、ブラシレスDCモータの回転子位置 θ をその指令値 θ^{ref} に制御することで、SRMの回転子を固定することができる。ブラシレスDCモータとSRMの間には変速機があり、ギア比は6:1である。従って、ブラシレスDCモータドライブに1/6度回転する指令信号を与えることで、SRMを1度回転させることができる。また、ブラシレスDCモータドライブにより固定される静止位置での静止トルクは、トルクメータによりリアルタイムで測定される。図5に計算結果と実験結果の静止トルクの比較を示す。磁場解析で得られた静止トルクは、同条件において測定された実験結果と良く一致する。以上より、設計に使用するFEMによる磁場解析の妥当性が証明

された。

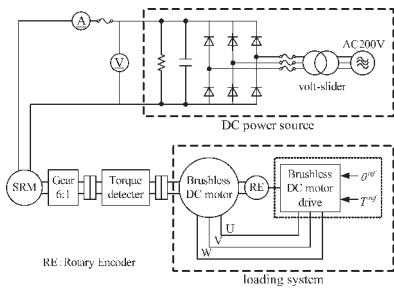


図4 実験システム

Fig. 4. Experimental system.

2. 3 過渡トルク

EV用SRMを設計するにあたり、重要となるのは走行時の過渡トルクである。2.1節と2.2節で取り扱った静止トルクは始動時におけるトルクに相当する。静止トルクとしては、1500ccクラスのガソリンエンジン車(GV)の1速における最大トルクが必要である。走行時の過渡トルクは、電源、電力変換装置、SRMを含む駆動系全体のモデリングを行い、過渡解析において算出する必要がある。過渡解析については、4.4節で説明する。SRMのモデリングを行う際に磁場解析で算出される結果が用いられる。具体的には、 θ と起磁力(MMF)に対する磁束鎖交数 ϕ と T を計算し、ルックアップテーブルを作成する。つまり、2.1節で説明した磁場解析はSRMのモデリングに使用される。

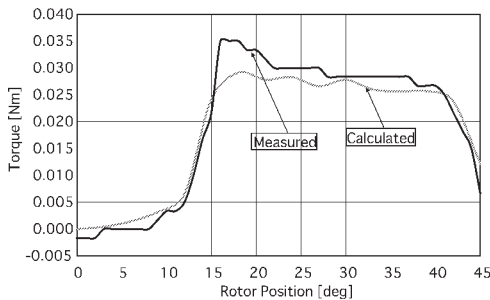


図5 計算結果と実験結果の静止トルクの比較
Fig. 5. Comparison between calculated result and experimental result of static torque.

3. 伝熱解析

3. 1 伝熱解析による解析結果

有限要素法ソフトウェアANSYSを用いて伝熱解析を行う。解析モデルは、基本的に図1と同じであるが、実験と同条件とするために、実際に使用する解析モデルでは、回転子を取り除いて空気層とし、コイル巻数を8[turn]に変更している。コイル巻数の変更は、実験に使用する固定子の巻数に合わせるためであり、変更自体に深い意味はない。

伝熱解析を行うには、コイルの発熱量が分からないといけない。そこで、コイルの発熱量を求めるため磁場解析を行う。磁場解析では、励磁相のコイルに電圧降下を設定して解析することで単位体積あたりのジュール熱が得られる。磁場解析で得られたジュール熱をコイルに設定して伝熱解析を行う。

温度上昇に用いる供試SRMには、空冷装置、回転子がない。従って、強制的な流体の流れを引き起こすものはないので、強制対流とはならない。つまり、SRMと外気との熱伝達は自然対流のみとなる。自然対流における熱伝達係数を、自然対流熱伝達に対する簡易式から求める⁽¹⁶⁾。空気との接触する面が滑らかである固定子表面には、次式で示される層流に対する簡易公式を用いる。

$$\alpha = 1.42 \times \left(\frac{\Delta t}{l} \right)^{\frac{1}{4}} \quad \dots\dots(4)$$

ここで、 α [W/m²K]は熱伝達係数、 Δt [K]は温度差、 l [m]はコア厚である。また、空気と接触する面が滑らかでないコイル表面には、次式で示される乱流に対する簡易公式を用いる。

$$\alpha = 0.95 \times (\Delta t)^{\frac{1}{3}} \quad \dots\dots(5)$$

式(4)と式(5)で用いる温度差 Δt は、初期値0[K]とし、一定時間の計算を行ない、境界面に温度差が生じた時点で更新する。本解析では、温度変化の大きい60分までは5分間で更新し、定常状態に近づき温度変化が小さくなる60分以降は、20分間隔で更新する。図6に1相のみに10[A]を300分間流し続けた場合の温度分布を示す。

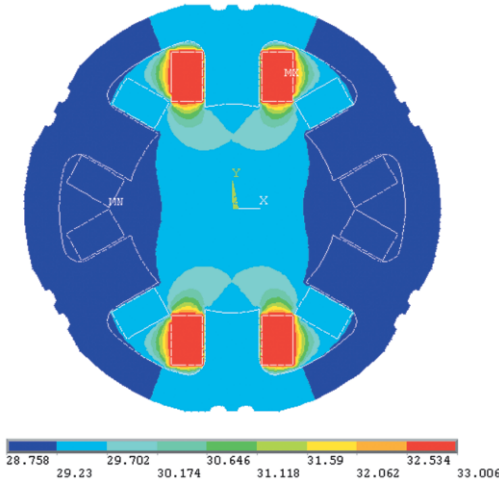


図6 温度分布の計算結果

Fig. 6. Calculated result of temperature distribution.

3.2 実験による伝熱解析の検証

600Wの供試SRMの固定子のみを用いて、1相のみ励磁させたときのコイルと固定子の温度上昇を測定した。実験は、温度が平衡状態に達するまで行なった。このとき、励磁電流は伝熱解析と同じ条件である10[A]を印加した。放射温度計を用いて、コイル、固定子の温度を1分毎に測定した。放射温度計の放射率は0.86とした。実験時の室温は、24.2[°C]であった。図7に、温度上昇の実験結果と計算結果の比較を示す。実線は計算結果を示し、点線は実験結果を示している。温度測定は、予め設定した3箇所の測定点で行った。1箇所は励磁相のコイル表面であり、残り2箇所は固定子表面である。固定子Aは、励磁相の固定子突極の

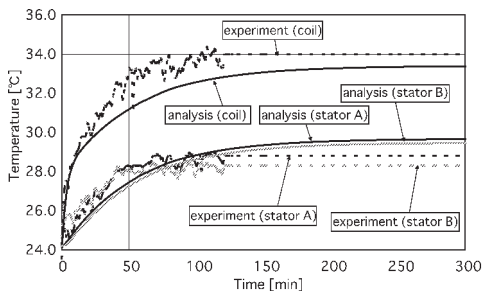


図7 温度上昇の実験結果と解析結果の比較

Fig. 7. Comparison between calculated result and experimental result of temperature rise.

付け根の固定子表面である。固定子Bは、励磁相から最も離れた箇所の固定子表面である。測定は、温度上昇が平衡状態に達するまで行なった。実験結果および計算結果は120分程度で平衡状態に達していることが分かる。また、コイル温度は、計算結果よりも実験結果の方が1[°C]だけ高くなっている。固定子温度は、計算結果よりも実験結果のほうが1[°C]だけ低くなっている。実験で用いた固定子には、コイルの脱落や鉄心との短絡を防ぐために、絶縁物が挿入されていた。そのため、解析モデルと比較してコイルに熱が留まり易くなっていた。そのため、実験ではコイルの温度上昇が計算結果よりも大きくなったと考えられる。また、コイルに熱が留まり易かったために、鉄心へ伝達される熱量が減少し、鉄心の温度上昇が計算結果よりも小さくなったと考えられる。このような熱伝達係数の設定の不適切さに起因する誤差であれば、熱伝達係数において意図的に安全率を考慮することで、実用上問題なく設計が行えると考える。そこで、電気自動車用SRMの伝熱解析を行う場合は、安全率を考慮して、各箇所熱伝達係数を設定する。

本論文では、コイル温度の上昇による絶縁破壊を検討するために、熱源をコイルで発生する銅損に限定して検討を行う。走行時は、絶えず交流磁界が生じるので、固定子と回転子の両鉄心において鉄損が生じる。効率を議論するためには鉄損の考慮は必須となる。鉄損を考慮した走行時の効率については、今後の課題とする。

4. 電気自動車用SRモータの設計

4.1 モータ寸法と減速比

著者らが進めているプロジェクトでは、EV用SRM、電源、電力変換装置、コントローラ等で構成される駆動系の設計と試作を行う。設計の前提条件として、ベース車両であるカローラフィールダー(1500ccVVT-iエンジン、FF方式)と同程度の動力性能を有する駆動システムを開発目標としている。電源と電力変換装置、コントローラについては、試作するEV用SRMの仕様に合わせて設計を進めていく予定である。従って、電源に起因する最大電流、最大電圧の仕様については、非現実的な値にならないければ良いという判断で、EV用SRMの設計を行う。ベース車両のエンジンルールのスペースからSRMの固定子直径を250, 300, 350[mm]とし、各直径に対して奥行きを150,

200, 250[mm] として検討する。図8に固定子直径300[mm]の場合の解析モデル、表3に解析条件、表4にSRMの仕様を示す。EVに搭載するSRMは、1500ccクラスのガソリンエンジン車(GV)と同程度の速度-トルク特性を得ることを開発目標として設計される。また、ベース車両と同じFF方式を採用し、ディファレンシャルギアを省略するために、SRMを2機使用することを前提として設計を行う。

自動車を駆動させるためには、低速時に大きな駆動力を必要とする。表5から、ギアを使用しない場合のモータ2機の平均トルクは、図9で示すGVのエンジンの速度-トルク特性曲線における最大トルクと比較して、発生トルクが非常に小さい。解析条件として与える起磁力6700[AT]は、コイル直径や占積率を考慮した上で発生可能な値であることを確認している。実

際には、より大きな起磁力を発生することも可能であるが、完全対向状態において既に磁気飽和している。そのため、更に起磁力を大きくしても、静止トルクは増加しないことを確認している。このことから、減速機が必要であることが分かる。そこで、SRMと駆動軸の間にギアを用いることにした。ここで使用するギアは1段のみであり、GVで使用される変速機ではない。ギア1段の使用であれば、ダイレクトドライブの電気自動車と相違ないと考える。

ギア比を大きくすると、トルクが大きくなるので停止状態から走り出しには都合が良いが、最高速度が低くなる。また、ギアボックスが大きくなり、エンジンルームにおけるスペースの問題が生じる。そこで、GVの1速程度のトルクが得られ、GV並の高速走行が可能なギア比として、ギア比を1/10とした。表5に、ギア比1/10を考慮したときの、モータ2機の平均トルクを示す。直径250[mm]、奥行き150[mm]の組合せを除いた組合せにおいて、GVの1速程度のトルクが得られることが分かる。そこで、エンジンルームのスペースと小型・軽量化を考慮し、直径300[mm]、奥行き150[mm]を採用することにした。減速機を用いることで、SRMの最高速度が20,000[rpm]となるので、制御

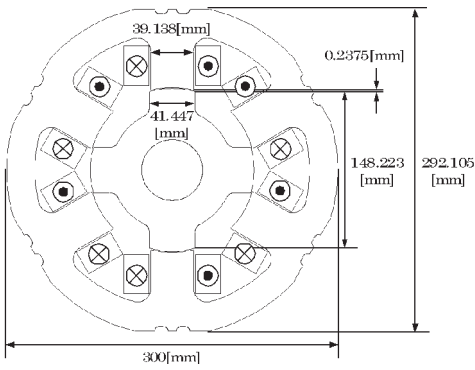


図8 解析モデル (固定子直径300[mm])

Fig. 8. Analytical model (motor size of 300[mm]).

表3 解析条件

Table 3. Analytical condition.

motor size	250 [mm]	300 [mm]	350 [mm]
number of node	11377~11785	11481~11849	11945~12633
number of element	5598~5802	5650~5834	5866~6210
mesh size	0.0055	0.0065	0.0070
shape of element	triangle	triangle	triangle
excitation phase of coil	one phase only	one phase only	one phase only
magnetomotive force	6700 [AT]	6700 [AT]	6700 [AT]
current density	$8.4669 \times 10^6 [A/m^2]$	$8.3819 \times 10^6 [A/m^2]$	$8.4560 \times 10^6 [A/m^2]$
partial area of coil	555.10 [mm ²]	799.34 [mm ²]	1087.99 [mm ²]
analysis range	0~45 [deg]	0~45 [deg]	0~45 [deg]

表4 候補となるSRMの仕様

Table 4. Specification of SRM as candidates.

	250 [mm]	300 [mm]	350 [mm]
stator outer diameter	250 [mm]	300 [mm]	350 [mm]
rotor outer diameter	123.51 [mm]	148.22 [mm]	172.92 [mm]
stack length	150, 200, 250 [mm]	150, 200, 250 [mm]	150, 200, 250 [mm]
air gap	0.2375 [mm]	0.2375 [mm]	0.2375 [mm]
stator poles / rotor poles	6 / 4	6 / 4	6 / 4

表5 SRMの平均トルク

Table 5. Average torque of SRM.

Motor size [mm]	stack length [mm]	MMF [AT]	Average Torque [Nm]		
			without gear 1 phase	with gear 1 phase	with gear 3 phase
250	150	6700	79.15	791.51	1484.51
	200		105.53	1055.35	1979.35
	250		131.92	1319.18	2474.19
300	150		124.19	1241.95	2389.42
	200		165.59	1655.93	3185.89
	250		206.99	2069.91	3982.36
350	150		179.44	1794.45	3562.67
	200		239.26	2392.60	4750.23
	250		299.07	2990.75	5937.79

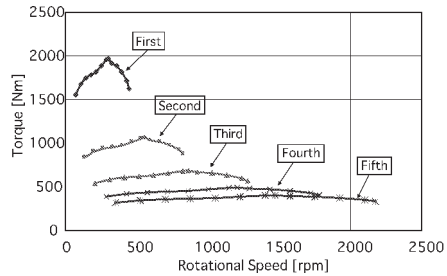


図9 ガソリンエンジンの速度-トルク特性

Fig. 9. Speed-torque characteristic of gasoline engine.

システムは高速演算が要求される。そこで、FPGA をベースとした制御システムを採用する予定である。FPGA における演算速度は、基本的に FPGA のベースクロックと等しいので、20,000[rpm] 程度の回転数であれば十分対応できると考える。

4. 2 定格運転時の温度解析

伝熱解析で用いる熱伝達係数 α は、3.1で述べたように初期温度差を0として温度差が発生した時点で更新する必要がある。しかし、本解析では計算時間を短縮するために、固定子外側に対して一定値 $\alpha = 1.0[\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}]$ を用いる。一定値 $\alpha = 1.0[\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}]$ は、乱流に対する簡易公式である(5)式から分かるように、温度差が約1[K]であるときの熱伝達係数に相当する。従って、一定値 $\alpha = 1.0[\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}]$ を用いると、固定子の温度上昇を考慮して α を更新しながら計算する場合に比べ温度上昇が大きくなる。従って、安全率を考慮した厳しい条件であると言える。SRM 内部のエアギャップは、回転子が回転するので、空気の強制対流となる。管内における空気の強制対流の平均熱伝達係数 $50[\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}]$ であるが、SRM 内部は円筒とは言い難い。そこで、自然対流の平均熱伝達係数 $6[\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}]$ と、管内の強制対流の平均熱伝達係数 $50[\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}]$ の中間である $30[\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}]$ を SRM 内部に与える⁽¹⁸⁾。 $30[\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}]$ を用いると、強制冷却を行った場合と比べ温度上昇が大きくなる。従って、安全率を考慮した厳しい条件であると言える。

GV の1速程度のトルクを得るために必要な $6700[\text{AT}]$ の起磁力を与えた場合の温度上昇を計算する。各コイルは、励磁タイミングに応じて1相ずつ順番に励磁されるが、実際は高速に励磁されるので3相同時に励磁されると仮定する。瞬間的には1相あたり $6700[\text{AT}]$ の起磁力が与えられるが、3相同時に励磁されると仮定するので、その時間平均値である $3868[\text{AT}]$ の起磁力が与えられると仮定して解析を行なった。起磁力が一定であると仮定して計算を行なう場合、コイルで発生する熱量はコイル巻数 N と関係なく一定となる。図10に温度上昇を示す。60分後のコイル温度は約 $130[^\circ\text{C}]$ である。また、同図よりコイル温度が平衡状態に達していることも確認できる。以上より、コイル温度が、F種絶縁における許容温度である $140[^\circ\text{C}]$ を越えないため、定格連続運転を行なっても、コイルは十分熱に耐えうると考えられる。

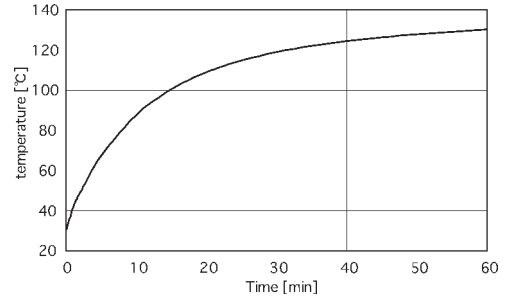


図10 温度上昇の計算結果

Fig. 10. Calculated result of temperature rise.

4. 3 過渡解析

4.1で示した計算結果は、励磁期間中において一定の励磁電流が流れていると仮定している。実際は、インダクタンスの影響で励磁電流の立ち上がりりと立ち下がりに時間を要するため、励磁期間中において常に変化している。そこで、励磁期間における電流の変化を考慮してトルクを計算するために、Matlab Simulink による動的解析を行った。図11に解析モデルを示す。一次抵抗 R は、コイル直径を $1.6[\text{mm}]$ と仮定して、巻数 N と並列回路数を考慮して計算された値を用いる。磁束 ϕ は、端子電圧 V から R での電圧降下を差し引いて得られる誘起電圧を積分することで得られる磁束鎖交数を N で割ることで計算される。回転子位置 θ と ϕ に対する起磁力 (MMF) のデータを記憶したルックアップテーブル、及び θ と MMF に対するトルク T_e のデータを記憶したルックアップテーブルは、予め FEM で計算したものをを用いて作成され、SRM モデルとして使用される。磁気飽和を考慮した非線形な SRM をモデリングする場合、一般にテーブルが使用される。コンバータモデルは、一般に用いられる非対称ハーフブリッジコンバータをモデリングしており、励磁タイミングは手動で調整できるようになっている。DC リンク部電圧 V_{dc} は、計算条件として一定電圧が与えられる。コンバータモデルは、端子電圧 V として、スイッチオンのときに V_{dc} を出力し、スイッチオフのときは一次電流 i の状態に応じて、 $-V_{dc}$ または 0 を出力する。負荷トルク制御器は、負荷トルク T_L を調整することにより、速度 ω_r を速度指令 N^{ref} に調整する構成としている。このような構成とすることで、 ω_r は N^{ref} と一致するので、 ω_r に対する T_e の計測が容易となる。また、 ω_r は、一般的な機械系の方程式より計算される。

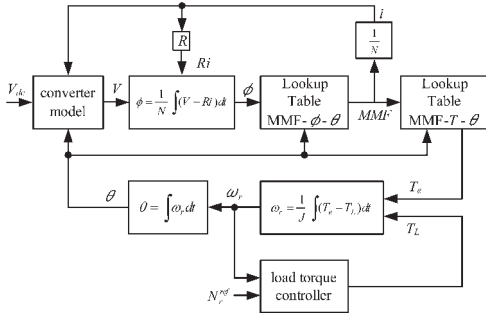


図11 解析モデル
Fig. 11. Analytical model.

慣性モーメント J は、現在のところ不明なので、適当な値を用いている。 T_e の計測の手順としては、最初に N^{ref} を設定し、 T_L が最大となる励磁タイミングを設定する。励磁タイミングの設定には試行錯誤が必要である。 T_L が最大となった時点で、 T_e の時間平均値を計測する。これを各速度に対して繰り返すことにより、図12で示す速度—トルク特性が得られる。4種類の巻数 N と DC リンク電圧 V_{dc} の組み合わせに対して計測を行った。同図より $N=80$ の場合において、1500cc クラスの GV 並の速度—トルク特性が得られることが確認できる。

表6に設計されたSRMの仕様を示す。表6の仕様は、4.1~4.3節の結果を踏まえ、GVと同程度の速度—トルク特性が得られるように決定した仕様である。ただし、コイル直径1.6[mm]の採用に対する特別な理由はない。占積率を変更するために、他のコイル直径を用いることも可能である。

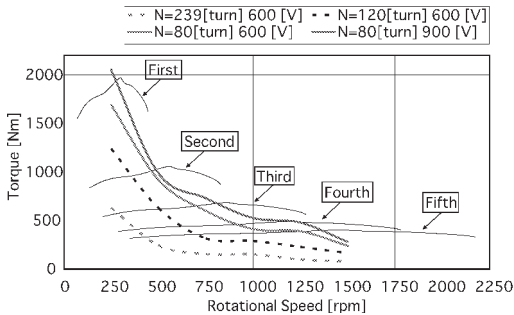


図12 電気自動車用 SRM の速度—トルク特性
Fig. 12. Speed-torque characteristic of 60kW SRM designed for EV.

表6 設計されたSRMの仕様
Table 6. Specification of designed SRM.

stator outer diameter	300 [mm]
rotor outer diameter	148.22 [mm]
stack length	150 [mm]
output	30 [kW]@2
air gap	0.2375 [mm]
diameter of coil	1.6 [mm] (Three lines are arranged in parallel.)
space factor of coil	60 [%]
number of windings: N	80 [turns/pole]
stator poles / rotor poles	6 / 4

5. まとめ

磁場解析において計算される静止トルクと伝熱解析において計算される温度特性が、解析と同じ条件で測定された実験結果と良く一致することを確認した。従って、FEMによる磁場解析と伝熱解析をSRMの設計に利用できることを確認した。

1500ccクラスのGV並の静止トルクが得られるEV用SRMの設計を行った。また、伝熱解析において、連続定格運転における温度上昇を計算した結果、コイルの許容温度である140°Cを越えないことを確認した。更に、励磁回路の電気的な特性を考慮した過渡解析を行い、1500ccクラスのGV並の速度—トルク特性が得られることを確認した。

参考文献

- (1) 千葉明:「スイッチトリラクタンストライブの設計手法と実用化の例」, 日本応用磁気学会誌, Vol.26, No.8, pp.909-914 (2002)
- (2) 秋山勇治, Dan Jones:「SRモータが欧米で急成長—磁石も巻き線もいらぬ単純な回転子—」, NI-KKEI MECHANICAL 1997.2.3, no.439, pp.50-60 (1997)
- (3) 森本雅之・松井信行・武田洋次:「リラクタンストルク応用電動機の現状と動向」, 電気学会論文誌D, 199巻10号, pp.1145-1148 (1999)
- (4) K. M. Rahman, B. Fahimi, G. Suresh, A. V. Rajarathnam, and M. Ehsani, "Application of Switched Reluctance Motor Application to EV and HEV: Design and Control Issues," IEEE Trans. Ind. Applicat., vol.36, pp.111-121, January/February, 2000.
- (5) S. S. Ramamurthy, and J. B. Balda, "Sizing a Switched Reluctance Motor for Electric Vehicles," IEEE Trans. Ind. Applicat., vol.37, pp.1256-1264,

- September/October, 2001.
- (6) R. B. Inderka, M. Menne, and R. W. A. A. D. Doncker, "Control of Switched Reluctance Drives for Electric Vehicle Application," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol.49, pp.48-53, February, 2002.
 - (7) K. M. Rahman and S. E. Schulz, "Design of High-Efficiency and High-Torque-Density Switched Reluctance Motor for Vehicle Propulsion," *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, vol.38, pp.1500-1507, November/December, 2002.
 - (8) W. Cai, P. Pillay, Z. Tang, and A. M. Omekanda, "Low-Vibration Design of Switched Reluctance Motors for Vehicle Propulsion Using Model Analysis," *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, vol.39, pp.971-977, July/August, 2003.
 - (9) 鈴木洋介・中村健二・一ノ倉:「多極スイッチトリラクタンスモータに関する検討」, 電気学会回転機研究会資料, RM-03-87, pp.1-6 (2003)
 - (10) K. M. Rahman and S. E. Schulz, "High-Performance Fully Digital Switched Reluctance Motor Controller for Vehicle Propulsion," *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, vol.38, pp.1062-1071, July/August, 2002.
 - (11) M. Omekanda, "A New Technique for Multidimensional Optimization of Switched Reluctance Motors for Vehicle Propulsion," *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, vol.39, pp.672-676, May/June, 2003.
 - (12) R. B. Inderka and R. W. A. A. D. Doncker, "High-Dynamic Direct Average Torque Control for Switched Reluctance Drives," *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, vol.39, pp.1040-1045, July/August, 2003.
 - (13) S. E. Schulz and K. M. Rahman, "High-Performance Digital PI Current Regulator for EV Switched Reluctance Motor Drives," *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, vol.39, pp.1118-1126, July/August, 2003.
 - (14) S. Wang, Q. Zhan, Z. Ma, and L. Zhou, "Implementation of a 50-kW Four-Phase Switched Reluctance Motor Drive System for Hybrid Electric Vehicle," *IEEE Trans. Magn.*, vol.41, pp.501-504, January, 2005.
 - (15) 後藤・渡辺・郭・本田・一ノ倉:「アウターロータ型多極SRMを用いた電気自動車の開発」, 電気学会回転機研究会資料, RM-04-54, pp.41-46 (2004)
 - (16) 谷下市松:「伝熱工学」, 裳華房, pp.155-pp.176 (1986)
 - (17) 関信弘:「伝熱工学」, 森北出版株式会社, pp.2 (1988)
 - (18) 西川兼康・藤田恭信:「機械工学基礎講座 伝熱学」, 理工学社, pp.81 (1982)
 - (19) 稲村慎吾・沢孝一郎:「スイッチトリラクタンスモータの温度解析に関する検討」, 電気学会論文誌D, 123巻4号, pp.422-428 (2003)