

2020年度 永守財団 研究助成 研究報告書

所属機関	岡山大学 学術研究院 自然科学学域
職位または役職	准教授
氏名	梅谷 和弘

1. 研究題目

正弦波磁束波形で駆動する自動車駆動用スイッチトリラクタンスモータの開発

2. 研究目的

近年、環境負荷が少ない電動自動車としてEV(Electric Vehicle)やHV(Hybrid Vehicle)が普及し始めている。図1のように、電動自動車はモータで駆動されるが、この用途のモータには限られた車載空間に収まるよう小型・高出力が求められるため、現状では埋め込み磁石同期モータが広く用いられている。ところが、埋め込み磁石同期モータは、レアアースを用いるネオジウム磁石を多用するため、原料の安定供給が難しく、価格も高くなりやすい。そこで、磁石が不要なリラクタンスモータへの置き換えが検討されている。

リラクタンスモータの中でも有望視されているのは、小型・高出力で知られるスイッチトリラクタンスモータ(SRM)(図2(a))である。しかし、このモータは現状のところ、車載適用を阻む下記三つの課題がある。

1. トルクリップルが大きく静音性が悪い。
2. 車載バッテリーから引き込む電源の電流に大きなリップルを発生させるためバッテリーが劣化しやすい。
3. 従来の3相インバータではなく、部品数が多く制御が複雑な3相フルブリッジインバータで駆動するため、回路構成・制御など多岐にわたってシステムの変更が必要となる。

本研究は、この問題に対し、スイッチトリラクタンスモータのロータ構造と駆動方法の両方を同時に最適化することで、解決しようとしている。すなわち、3相スイッチトリラクタンスモータのロータ構造を改良し、電気角に対するリラクタンスの特性を正弦波とする。このとき、各相に発生する磁束波形が正弦波となるように駆動することで、上記三つの課題すべてを解決できるという着想を得た。

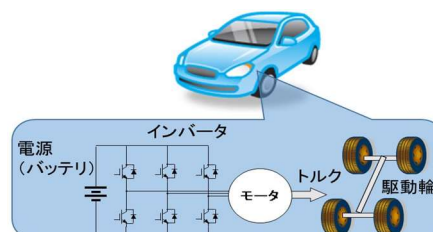


図1 電動自動車の駆動システムの構成例

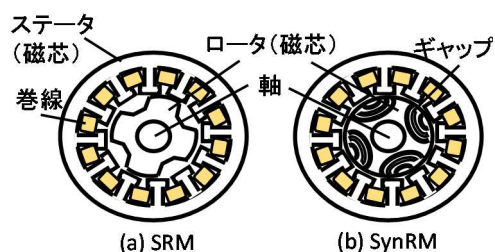


図2 モータの構造

しかしながら、設計時のシミュレーション結果から、この着想の提案モータは従来のスイッチトリラクタンスモータに比べ、同トルク出力でのピーク磁束量が小さく高速で回転できる一方で、相電流の実効値が1.9倍と大きく銅損低減が課題であると分かった。そこで、本研究では銅損低減のため、提案モータのロータ構造およびステータ構造を最適化する。

ロータ構造について、報告者は最近、当初の純粋な正弦波のリラクタンス特性に、第2次・第4次高調波を適切な比率で加えたリラクタンス特性で、電源電流リップル・トルクリプルをほとんど悪化させずに相電流を低減できる可能性を見出した。また、ステータ構造については、磁束が小さく相電流が大きい提案モータの特徴から、ステータにおける巻線の占有比率を増加させることで銅損低減が実現できるはずである。そこで、これらの対策を施すことで、提案モータの銅損を低減し、実用的なモータが構築できることを実証することが、本研究の研究目的である。

3. 研究内容及び成果

前年度設計したロータ構造はリラクタンス特性が正弦波になるように設計されており、ロータ構造を決定した結果、従来のスイッチトリラクタンスモータよりリラクタンスの最小値が小さくなってしまった。更に、ロータの外形形状の変更のみでリラクタンス特性を純粋な正弦波に近づけることが難しく、リラクタンスを正弦波に近づける努力にもかかわらずトルクや電源電流波形に若干のリップルが生じてしまっていた。そこで、報告者は図3に示すように当初の純粋な正弦波のリラクタンス特性に2次・4次の高調波を適切な比率で加えることによって、トルクおよび電源電流波形のリップルが原理上は多少発生しても、実際にはほとんどリップルを悪化させないはずであり、この調整によって銅損を低減させることができると考えた。

本研究では、提案モータのリラクタンス特性を図3のような波形にするために電磁界解析シミュレータを用いてロータ外径の形状最適化を行った。電磁界シミュレーションを用いて決定した新たな提案モータのロータ構造を図4に示す。また、動作比較のために用いた従来のSRMおよびSynRMのロータ構造についても掲載する。提案するSRMはリラクタンス特性に2次・4次高調波が重畳しており、リラクタンスの最小値が前年度設計した提案SRMより低下している。これにより、前年度設計した提案するSRMと比較して銅損の低減に期待できる。更に、トルクリプルに大きく寄与するリラクタンス特性の3次高調波成分を除去することによって、トルクリプルを大きく悪化させずに銅損の低減に期待できる。

次に、図4のロータ構造について、1Nmの出力トルクおよび2000rpmの回転速度において期待される動作波形を電磁界シミュレーションで試算した(提案するSRM、およびSynRMは通常の3相インバータで、従来のSRMは3相フルブリッジインバータで駆動。)結果を図5に示す。前年度設計した提案するSRMは従来のSRMの相電流の実効値より1.9倍と大きかったのに対して、今年度設計した提案するSRMの相電流の実効値は従来のSRMより1.7倍まで低下していることが分かった。(しかし、提案するSRMの銅損の低減は今後も大きな課題であり、来年度の研究ではロータとステータ構造の変更を同時に行い、リラクタンスの最小値の低下や巻線の占有率を増加させることで更なる銅損低減を図っていく。)一方で提案するSRMは従来のSRMより銅損は大きいもののSynRMとは同等の銅損で動作できる見込みがあることが分かった。更に、図から明らかのように提案SRMのトルクおよび電源電流波形のリップルはともに悪化していない。以上のシミュレーションによって、提案SRMがトルクおよび電源電流波形のリップ

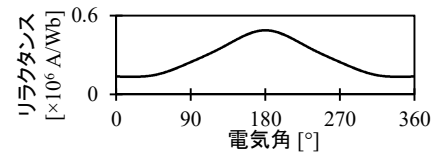


図3 高調波を含ませたリラクタンス特性

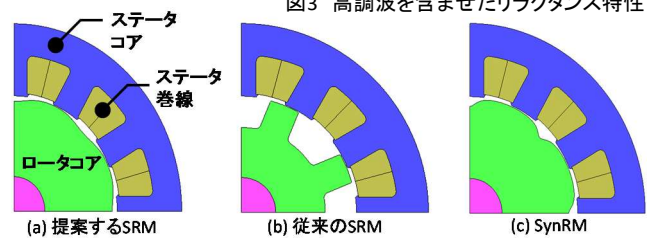


図4 電磁界シミュレーションを用いて決定したロータ構造

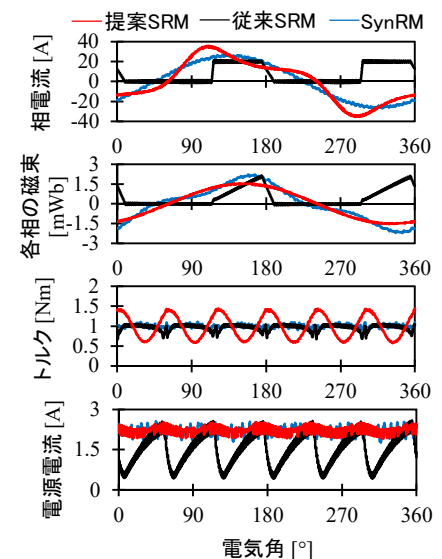


図5 シミュレーション結果

表1 モータの仕様	
型番	RBI65SR-96CSRM (Motion System Tech. Inc.)
定格	1.2 kW, 96 V, 6000 r/min
極数	ステータ: 12, ロータ: 8
ターン数/極	14
外径	ステータ: 136mm, ロータ: 83mm
厚み	40mm
ギャップ長	0.3mm



図6 製作したモータ(ロータおよびステータ)

ルをほとんど悪化させずに銅損を低減できる可能性があることを確認した。

さらに、電磁界シミュレーションによって設計したロータ構造に基づいて、提案する SRM と従来の SRM の実機を構築し、トルクおよび電源電流波形のリプルの評価を行った。表 1 に試作機の仕様を、図 6 に製作したモータ(ステータとロータ)を示す。このモータを用いて出力トルク 1Nm および回転速度 2000rpm で動作させたときのトルクおよび電源電流波形を図 7 に示す。(提案する SRM は通常の 3 相インバータで、従来の SRM は 3 相フルブリッジインバータで駆動。また、トルク波形は測定器の制約により、100rpm で駆動。)図から分かるように、提案する SRM のトルクおよび電源電流波形のリプルは従来の SRM と比較してほとんど悪化していないことが分かり、実機での提案する SRM の実用性を確認できた。

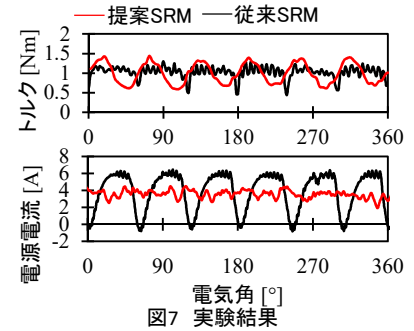


図7 実験結果

4. 今後の研究の見通し

本研究の結果、当初の純粋な正弦波のリラクタンس特性に第 2~4 次の高調波を重畳させた図 3 の特性によって、スイッチトリラクタンスマータよりは損失が大きいながらもシンクロナスリラクタンスマータと同等の損失で、提案モータを駆動できる見込みが立ってきている。

しかし、それと同時に、図 3 のリラクタンス特性は、現在の研究を含め、これまでの研究で模索してきたロータの外形形状の最適化だけでは完全な実現が難しいという感触を得ており、抜本的なロータ構造見直しが必要であることが見えてきた。報告者は、この問題の対策として、外形形状の最適化に加えてロータ鉄心内にフラックスバリアを導入することで、図 3 のリラクタンス特性を実現する構想を着想している。そこで、次年度の研究では、この着想をもとにロータ構造を開発して最適リラクタンス特性を持つ提案モータを実現するとともに、スイッチトリラクタンスマータやシンクロナスリラクタンスマータと比較した提案モータの性能評価を完成させたい。

5. 助成研究による主な発表論文、著書名

■国際会議 (査読付)

- [1] M. Iida, T. Kusumi, K. Umetani, and E. Hiraki, "Feasibility of sinusoidal flux drive design of switched reluctance motor for reducing torque and input current ripples with three-leg inverter," in Proc. IEEE Intl. Power Electron. Motion Ctrl. Conf. (PEMC2020), Apr. 2020, Gliwice, Poland, pp. 439–446.
- [2] M. Iida, K. Umetani, T. Kusumi, M. Ishihara, and E. Hiraki, "Sinusoidal-flux reluctance machine driven with three-phase inverter for improving power density with reduced torque and input current ripples," in Proc. IEEE European Conf. Power Electron. Appl. (EPE2021), Ghent, Belgium, Sept. 2021, pp., 1–10.
- [3] IEEE EPE2022 (投稿予定)

■国際会議 (査読なし) ・国内会議

- [1] 令和 4 年電気学会産業応用部門大会 (発表予定)