

2019年度 永守財団 研究助成 研究報告書

所属機関	東北大学 大学院工学研究科 電気エネルギーシステム専攻
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に示すように、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。

これまで、これらの課題のそれぞれについて個別に解決を図る研究は国内外で取り組まれている。しかし、上記三つの課題すべてを解決するSRMの駆動方法は、未開発といってよい。これまでの上記三つの課題の解決が困難とされた理由は、通常SRMには電気角に対するリラクタンスやインダクタンスの特性に多くの高調波が含まれるため、トルクリップルやバッテリーからの電源電流リップルを除去する駆動方法の解明が困難だったことにある。

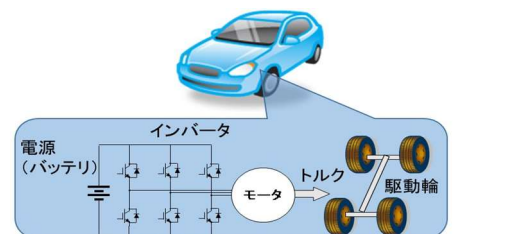


図1 電動自動車の駆動システムの構成例

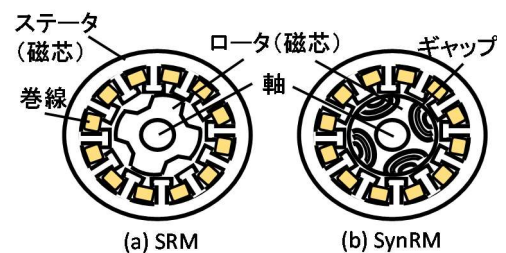


図2 モータの構造

本研究では、SRM 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上記 3 点の問題を解決する新しい SRM の駆動技術を開発し、その原理的な妥当性をシミュレーションおよび実験の両面で確認する。

3. 研究内容及び成果

提案する SRM の駆動技術では、3 相 SRM のロータ構造を改良し、図 3 のように、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図 3 に示す相電流波形で駆動することで、上記三つの課題すべてを解決できるはずである。(ただし、モータ巻線の結線はデルタ結線を使用する。)

もっとも、SRM と同じく磁石を用いないリラクタンスモータであるシンクロナスリラクタンスモータ(SynRM)(図 2(b))でも、電気角に対するインダクタンスの特性を正弦波となるように設計し、相電流が正弦波となるように駆動することで、上記三つの課題を解決することができる。いわば、本研究の SRM は、SynRM でのインダクタンスをリラクタンスに、電流を磁束にしたものに相当しており、原理が類似している。しかしながら、SynRM の各相の磁束波形は、正弦波に 3 次高調波が重畳した波形となり、磁束の変化が急峻である。このため、高速回転に対して磁束が追従しにくく、高速回転領域でトルクを得にくい。機械出力は回転速度とトルクの積であるので、高速回転領域でトルクが得にくいことは出力密度が制限される、すなわち、車載に必要な小型化が難しいことを意味する。他方で、本研究の SRM の駆動方法では、相電流は基本波に対して 3 次高調波が重畳した波形となるものの(図 3)。磁束波形は完全な正弦波であるので、高速回転領域で磁束が追従しやすく、高速回転領域でもトルクが低下しにくいはずである。つまり、小型・高出力で車載可能なモータが実現できると期待できる。

本研究で提案する SRM の駆動技術の妥当性をシミュレーションで確認するため、電磁界解析シミュレータを用いて、リラクタンス波形が正弦波となるロータ形状を設計した。さらに、電磁界解析シミュレータを用いてトルクリプル、電源電流リップルを試算し、提案技術の期待効果を調べた。

電磁界シミュレーションを用いて決定した提案する SRM のロータ形状を図 4 に示す。提案する SRM はロータの突極と窪みがなだらかにつながる形状をしており、SRM としてこれまで例のない新しい形状を導出できた。図 4 では、動作比較のために評価する、従来の SRM および SynRM のロータ形状についても掲載する。(SynRM のロータ形状は通常と異なり、ロータの突極の形状によって構築した。)

次に、図 4 のロータ形状について、1Nm の出力トルクおよび 1000rpm の回転速度において期待されるトルクリプルおよび電源電流リップルの大きさ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。図からも明らかなように、提案する SRM はトルクおよび電源電流ともリップルを効果的に低減できることを確認しており、従来の SRM に比べて期待通り、研究目的に記した 3 つの課題を解決できうるポテンシャルがあることを確認できた。また、SynRM と比べると同じトルクを出力するために必要な磁束量が小さい上、磁束波形の勾配も

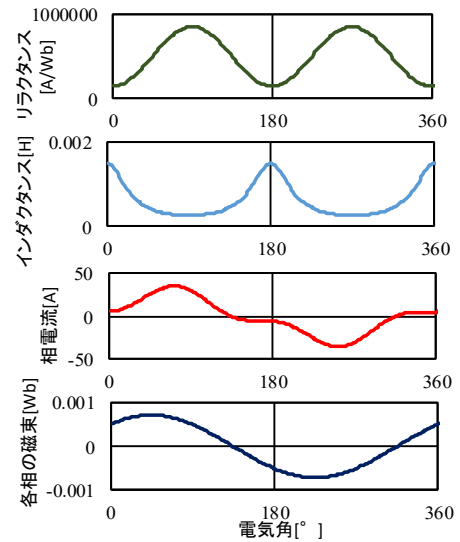


図3 正弦波磁束駆動用に設計された提案する SRM の波形モード図

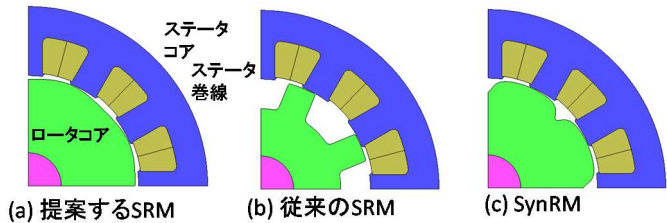


図4 電磁界シミュレーションを用いて決定したロータ形状

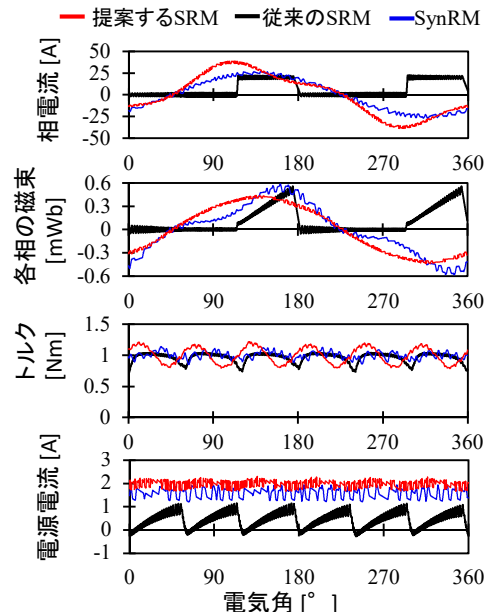


図5 シミュレーション結果



(a) 提案するSRMのロータ (b) 従来のSRMのロータ (c) SRMのステータ

図6 製作したモータ(ステータおよびロータ)

小さく、より高速回転領域で動作可能であることが分かる。しかしながら、その一方で、提案するSRMは、SynRMより相電流が著しく大きく、銅損が顕著に増大する。この問題は、次年度の研究によって解決を図る。

次に電磁界シミュレーションによって設計したロータ形状に基づいて、提案するSRMと従来のSRMの実機を構築し、動作原理を確認した。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1.0Nmおよび回転速度100rpmで動作させたときのトルク・電源電流波形を図7に示す(提案SRMは3相インバータで駆動、従来SRMは3相フルブリッジインバータで駆動)。図からも分かるように、提案するSRMで3相インバータによる駆動によりトルクリプル・電源電流リプルが効果的に低減できることが分かり、提案モータの動作原理を確認できた。

型番	RB165SR-96CSR (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

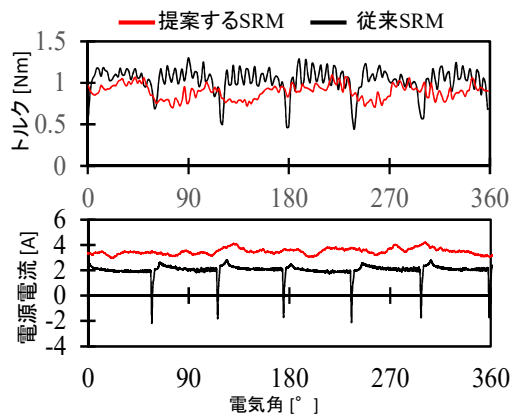


図7 トルク(上)と電源電流(下)の実験結果

4. 今後の研究の見通し

設計時のシミュレーション結果から、提案SRMは従来のSRM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、今後は銅損低減のため、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。

本年度の研究を通じて、当初の純粋な正弦波のリラクタンس特性に、第2次・第4次高調波を適切な比率で加えて図8のようなリラクタンス特性となるロータ構造にすれば、電源電流リプル・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、本申請の研究目的である。

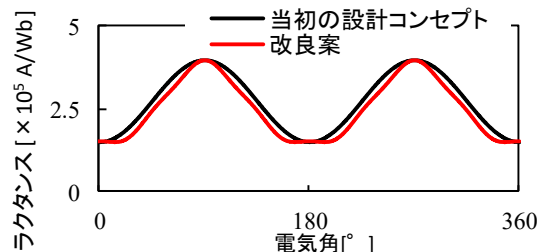


図8 提案SRMのリラクタンス特性改良案

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, 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. 2020 IEEE 19th Intl. Power Electron. Motion Ctrl. Conf., 2021年4月 (採択決定)

- [2] IEEE EPE2021 (投稿予定)

■国際会議 (査読なし) ・国内会議

- [1] 令和3年電気学会産業応用部門大会 (発表予定)