

2021 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

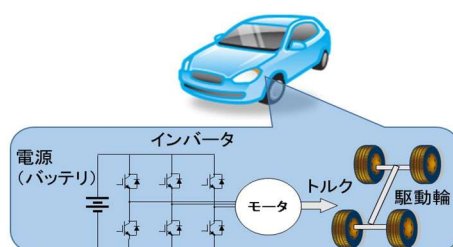


図1 電動自動車の駆動システムの構成例

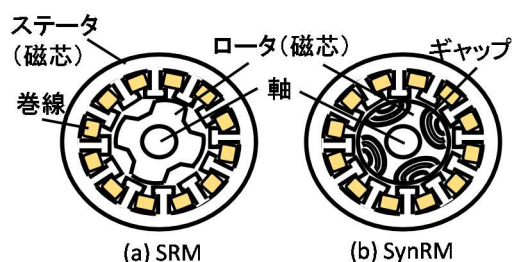


図2 モータの構造

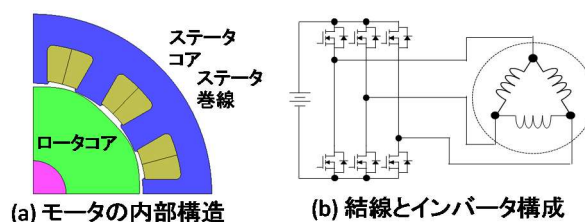


図3 提案リラクタンスモータ

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。

これまで、「研究助成 2019」の研究において、この着想に従い図 3 の新しいリラクタンスモータを開発し、期待通り、正弦波磁束で駆動することで高速回転に対応可能、三相インバータで駆動可能、トルクリプル・電源電流リプルが発生しないことを確認した。しかし、この研究では、提案モータの相電流の実効値が従来のスイッチトリラクタンスモータに比べ 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、「研究助成 2020」でロータ構造の最適設計に取り組んだが、開発したロータ構造ではリラクタンス波形の谷部が正弦波形状から大きく崩れてしまったほか、谷部のリラクタンスを十分に低減できず銅損低減効果も限られていた。そこで、「研究助成 2021」では提案モータのリラクタンス波形を正弦波に近づけつつ銅損低減に効果的なロータ構造を開発し、有効性を実機実証する。

3. 研究内容及び成果

2019 年度の研究で、提案モータの銅損の低減が課題であることがわかった。そのため、2020 年度設計のロータでは、純粋な正弦波のリラクタンス特性に二次・四次の高調波を重ねさせることで、2019 年度設計のロータよりリラクタンスの最小値を低下させ、銅損低減を実現した。しかし、2020 年度設計のロータのリラクタンス特性は、リラクタンス特性の谷部において正弦波形状の実現が困難だったため、トルク・電源電流リプルが悪化した。そこで、2021 年度は、外形形状の最適化によってリラクタンスの最小値を更に低下させつつ、リラクタンス特性の谷部を正弦波に近づけることで、銅損低減とリプル低減の両立を目指した。具体的には、以下の手順でロータの設計を行った。まず、トルク・電源電流リプルが悪化しないように、ロータの突極部分を可能な限り最小ギャップ長にし、リラクタンスの最小値を決定した。次に、ロータ形状の凹部と突極部の間が正弦波のリラクタンス特性となるように、電磁界シミュレータを用いた数値計算によってロータ形状を決定した。

決定したロータ形状を図 4 に示す。また、提案モータにおける 2019 年度、2020 年度設計のロータ構造も同時に示す。さらに、これらのリラクタンス特性のシミュレーション結果を図 5 に示す。2021 年度設計のロータのリラクタンスの最小値は、2020 年度のものと比較し、9% 低下した。これは、2020 年度設計の提案モータと比較して、銅損が低減することに相当する。また、2020 年度と比較して、二次高調波の含有率が低くなっており、リラクタンス特性の谷部も正弦波に近づけることができた。このため、トルク・電源電流リプルの低減が期待できることが分かった。

次に、図 4 のロータ形状について、出力トルク 1Nm、回転数 2000rpm 時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。結果を図 6 に示す。図 6 より、今年度設計した提案モータは、2020 年度に対して相電流の実効値が 3.5% 低下したものの、銅損は同等であった。また、電源電流リプルはほぼ変わらなかったが、提案ロータのトルクリプル率は 2020 年度のロータに対し 23.4% 減少できた。各相

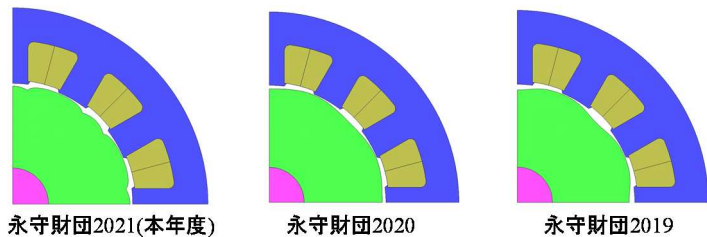


図 4 電磁界シミュレーションを用いて決定したロータ形状

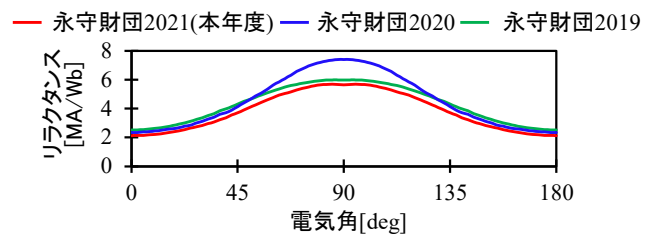


図 5 リラクタンス特性シミュレーション結果

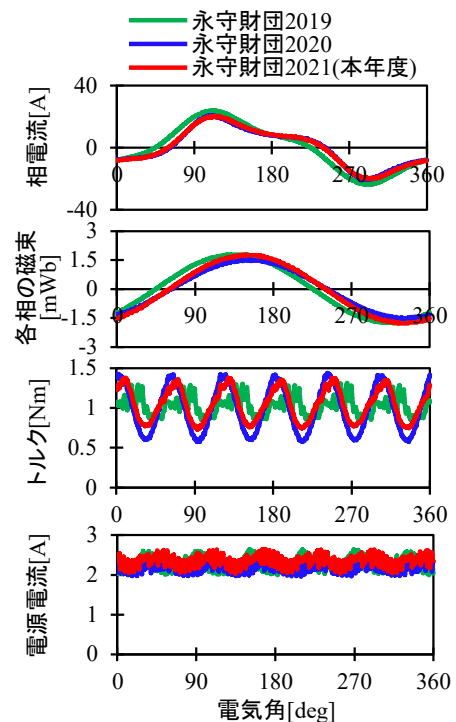


図 6 シミュレーション結果

表1 モータの仕様

型番	RB165SR-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	24
外径	ステータ: 136mm, ロータ: 83mm
厚み	40mm
ギャップ長	0.3mm



(a) ロータ



(b) ステータ

図7 本年度の研究で製作したモータの写真

の磁束は、前年度設計したロータより、 0.1mWb 上昇したが、これは、リラクタンス特性の最大/最小の比が前年度より0.5低下したためである。次に、設計したロータに基づいて提案リラクタンスモータを試作し、トルク及び、電源電流波形の評価を行った。表1に試作機の仕様を、図7に製作したロータとステータを示す。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8に示す。図8より、2021年度設計のロータは、2020年度と比較し、電源電流リップル同等でかつ、トルクリップルを低減できた。

4. 今後の研究の見通し

2019年度から2021年度にわたる本助成の研究の結果、提案するリラクタンスモータが期待通り、従来のスイッチトリラクタンスモータが持つ問題を原理的には解決可能であることを確認できた。また、本助成を通じて、提案するモータの設計最適化に取り組むことができた。その結果、提案モータの弱点として判明した大きな銅損についても、低トルクリプル特性を維持しながら、相電流の実効値を低減できるロータ形状最適化技術を開発でき、スイッチトリラクタンスモータには至らないまでも、シンクロナスリラクタンスモータに比肩する程度に銅損を低減できるところまで到達できた。

しかしながら、スイッチトリラクタンスモータのような集中巻きのステータに基づくモータ設計では、トルクの割に銅損が大きくなる問題は依然としてある。シンクロナスリラクタンスモータに関する先行研究の知見からも、この問題の根本的な解決には、分布巻きのステータを採用したうえで、このステータのためのロータ形状の最適化にあるのではないかと考えている。

したがって、今後の研究では、本助成による研究の成果をベースに、分布巻きステータを用いて提案するリラクタンスモータを開発し、3相インバータ駆動可能でありながら、スイッチトリラクタンスモータに対して低トルクリプル・低電源電流リップルであり、モータ効率およびパワー密度としても比肩できるモータの実現を目指したい。

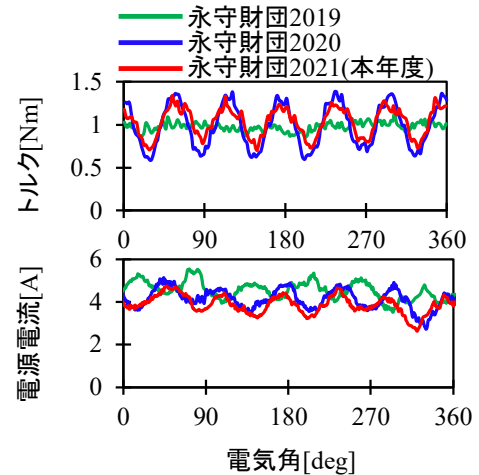


図8 実験結果

5. 助成研究による主な発表論文、著書名

学術論文

[1] IET Power Electronics (投稿予定)

国際会議(査読付)

[1] K. Nagayasu, M. Iida, K. Umetani, M. Ishihara, E. Hiraki, "Performance evaluation of sinusoidal-flux reluctance machine for improving power density with reduced torque and input-current ripples," in Proc. IEEE European Conf. Power Electron. Appl. (EPE2022), Hannover, Germany, Sept. 2022, pp., 1–11.

国内会議(査読無)

[1] 長安希和, 飯田将貴, 石原将貴, 梅谷和弘, 平木英治「銅損低減を目的とした正弦波磁束駆動モータの新ロータ形状の提案」パワーエレクトロニクス学会第246回定例研究会(発表予定)