

2017年度 永守財団 研究助成 研究報告書

所属機関名 (大学、大学院、研究所名)	長岡技術科学大学
職位または役職	助教
氏名	日下佳祐

1. 研究題目

数式モデルに基づいたスイッチトリラクタンスモータのトルクリプル低減

2. 研究目的

スイッチトリラクタンスモータ(SR モータ)は、希土類金属が不要であり堅牢、かつ高速回転に適するといった特徴を有しており、電気自動車やハイブリッド自動車などの車載モータへの適用が期待されている。SR モータは磁気的な突極性によって発生するリラクタンストルクのみを利用するため、誘導電動機や永久磁石電動機などの他の電動機に対してトルクリプルが大きいという問題がある。

上記の問題を解決するため、通常 SR モータの 1 相のみを通電する方式に対して、2 相を同時に通電する期間を設けることでトルクリプルを低減する手法(2 相励磁方式)が提案されている。2 相励磁方式では、トルクリプルを抑制するために出力トルク毎に各相の理想電流波形(図 1)が必要となるが、この際、非線形性を考慮して SRM の磁化特性を考慮する必要がある。そのため、理想電流波形の取得には有限要素法を用いた電磁界解析が行われることが一般的であるが、出力トルク毎に理想電流波形を取得しなければならないため、トルクの分解能は有限要素法で取得したデータ数により制限される。一方、理想電流波形を導出するため機械学習を行う手法なども提案されているが、繰り返し演算が必要となるため制御器の負荷が大きく、汎用制御システムでの実現は困難である。これらの理由から SR モータの導入は限定的である。

本研究では、所望のトルク低減効果を安価、かつ事前の電磁界解析なしで実現することで SR モータの普及を拡大することを目的とする。提案手法では、事前に測定可能なモータパラメータと、SRM の数式モデルを用いてトルクリプルの低減が可能な理想電流波形を導出する。そのため、詳細な電磁界解析なしで所望のトルクリプル低減効果が得られる。また、機械学習が不要であることから誘導電動機や永久磁石電動機に適用される汎用制御器において SRM を制御することが可能となる。

3. 研究内容及び成果

SR モータのトルクリプルを低減するため、SR モータを二相励磁する際に必要となる理想電流波形を数式的に導出することを目指す。まず初めに、SRM の鎖交磁束を電気角と電流の関数としてモデリングする方法を検討した。本モデリングでは、電流値が小さく磁束が線形増加する領域を線形領域では1次関数、電流が大きい領域では指数関数としてモデリングする。図 2 に示すように、モデリング結果を用いることで電流が小さい線形領域と、電流により磁気飽和が生じる領域の両者を連続的にモデリングすることが可能となった。ただし、飽和領域の一部区間においても FEM モデルと一部不一致を示しているため、改善が必要である。

数式モデルとして磁気回路を表現することが可能となったため、アルゴリズムによりトルクリプルゼロを実現するための理想電流波形を所望の特性(例えば最大トルク/電流)が得られるように決定することが可能となった。加えて、本アルゴリズムでは、直流電源電圧の制限をも考慮可能である。提案する理想電流波形の導出手法は、事前にモータベンチから測定可能なパラメータのみを用いるため、事前の有限要素法による電磁界解析は不要であり、トルクリプルの低減効果が電磁界解析の精度に依存するという従来の問題を解決することが可能である。また、理想電流波形を導出するための機械学習も不要であるため誘導機や永久磁石電動機のように汎用の制御器により駆動可能である。

上記の理論を検証するため、構築した SP モータベンチにより、一相励磁方式に対して提案した理想電流波形で動作するに相電流方式を適用することで、基本波成分を 91.5%低減可能であることを明らかにした(図 3)。同様に、2 次高調波を 29.5%低減可能であることを実験により検証しており、提案手法によって生成した理想電流波形によりトルクリプルの抑制が得られていることが示した。

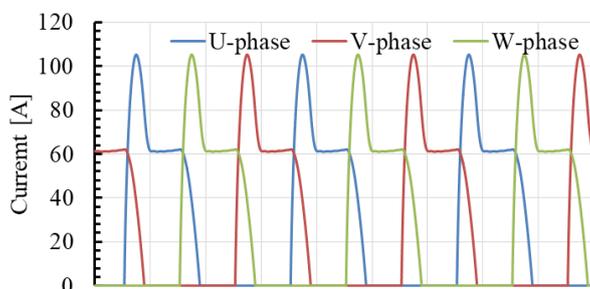


図 1 磁化モデルから導出した理想電流波形

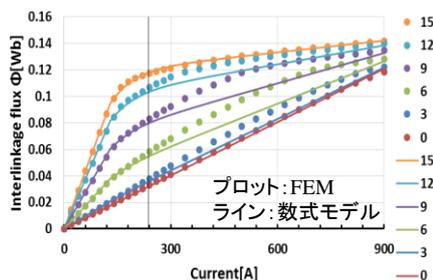


図 2 FEM と数式モデルの比較

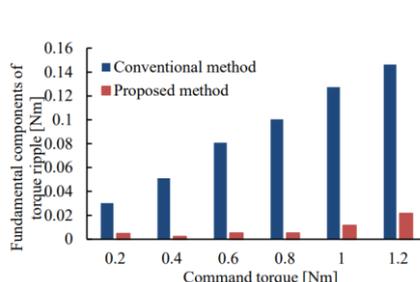


図 3 トルクリプル低減効果(基本波成分)

4. 今後の研究の見通し

2017年度は、SRモータのトルクリプルを低減することを目的とし、トルクリプルが最小となるよう評価関数を設定して理想電流波形の導出アルゴリズムを作成した。これにより、トルクリプルを低減することが実験機により確認できた。2018年度以降、モデリングした磁化特性の数式モデルを用いて、さらなるSRモータの高機能化に向けて研究を推進している。2017年度導出した理想電流波形の導出アルゴリズムには自由度が1つのこされており、さらに制約条件を加えることで特定の機能を付与することが可能となる。例えば、モータの銅損及びインバータの導通損を低減する必要がある場合には、モータ電流が最小となるようアルゴリズムを改善すれば、トルクリプル低減効果に加え、モータ巻線電流の低減を図ることが可能となる。反対に、自動車用途などで、直流側コンデンサの電流リプルが大きいと問題が生じるようなアプリケーションに向けては、直流側電流リプルが小さくなるように導出アルゴリズム及び評価関数を設定することで、直流側電流リプルが小さいSRモータの駆動システムを構築可能となる。2018年度以降、これらの導出アルゴリズムに基づいた評価関数及び導出アルゴリズムの最適化を行い、より特定のアプリケーションに向けたSRモータの高機能化を図る予定である。

5. 助成研究による主な発表論文、著書名

T. Kumagai, K. Kusaka and J. Itoh, "Torque Ripple Reduction Method with Minimized Current RMS Value for SRM Based on Mathematical Model of Magnetization Characteristic," 2018 20th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'18 ECCE Europe), Riga, 2018, pp. P.1-P.9.

T. Kumagai, K. Kusaka and J. Itoh, "Torque Ripple Reduction for SRM Based on Mathematical Model of Magnetization Characteristic," IEEE Transaction on Power Electronics (投稿予定)