

2018年度 永守財団 研究助成 研究報告書

所属機関名	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と電流実効値の同時低減

2. 研究目的

スイッチトリラクタンスモータ(以下、「SR モータ」)は希土類金属が不要であり、また堅牢であることから電気自動車への適用が期待されている。しかしながら、SR モータは原理上トルクリプルが大きい問題がある。トルクリプルを低減するため、従来の SR モータの一相のみに通電する方式に対して、二相に同時に通電することによってトルクリプルを低減する二相通電方式が提案されている。2017年度後期からトルクリプル低減するための理想電流波形(図 2)の生成アルゴリズムを提案し、実験機による検証を進めてきた。本成果によりトルクリプルは低減可能であることが実験により確かめられたが、二相通電方式では二巻線に電流を通流するため銅損が増加する問題がある。

上記の課題を踏まえ、本研究ではモータ電流の実効値とモータに発生するラジアル力の両者を低減するよう重み付け関数を導入することで、所望の特性をもつ理想電流波形を電磁界解析に頼らずに導出する手法を明らかにする。

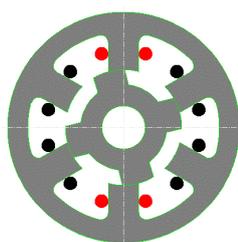


図 1 SR モータ

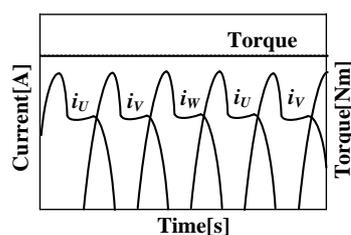


図 2 トルクリプル低減が可能な理想電流波

3. 研究内容及び成果

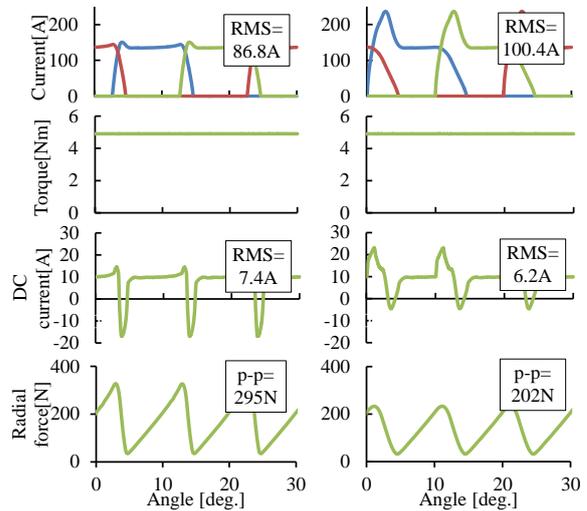
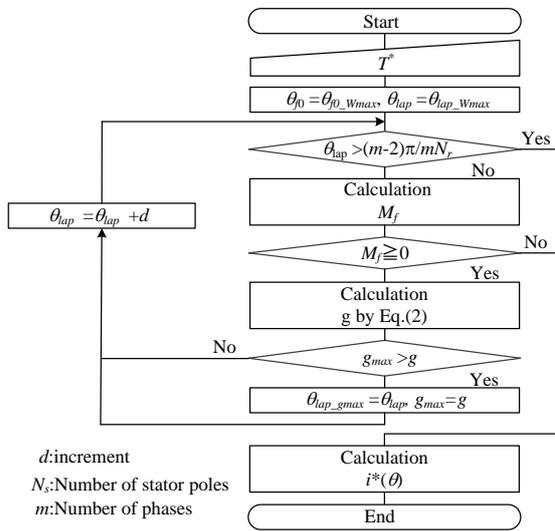
本研究では、瞬時トルクを一定にするための各相の一定トルク電流波形生成法として、回転子位置に対する各相の発生トルク分担を与える Torque sharing function (TSF) $f_{Tx}(\theta_m)$ を用いる。一定トルク電流波形を最適化するには、TSF のパラメータである二相通電期間 θ_{lap} と一相通電期間開始角 θ_{f0} を適切に決定する必要がある。

図 3 に提案する理想電流波形の導出フローチャートを示す。なお、ある電源電圧において、出力できる最大の電流の時間変化と一定トルク電流波形の時間変化の差を余裕度 M とし、 $M \geq 0$ が成立する範囲で最適化を行う。ここでは、昨年までの研究成果に基づき、すでに電流実効値最小化を行っているものとする。電流実効値最小化法では、可能な限り対向状態付近まで電流を流すため、ラジアルカリプルが最大となる。

$$F_{rRip} \approx F_r(i^*(\theta_{fc}), \theta_{fc}) - F_r(i^*(\theta_{f0}), \theta_{f0}) \tag{1}$$

(1)式より、ラジアルカリプル F_{rRip} を低減するには、 F_r が最大となる $\theta_{fc} = \theta_{f0} - \theta_{lap} + 2\pi/mN_r$ を小さくし、 F_r が最小となる θ_{f0} を大きくする必要がある。両者を達成するには、二相通電期間 θ_{lap} を長くすればよい。電流実効値最小化では、立ち上がりの余裕度 M_f は正であるが、立下りの余裕度 M_l は 0 として導出しているため、通電終了角 $\theta_c = \theta_{f0} + 2\pi / mN_r$ は動かすことができない。従って、電流実効値最小化法で求めた通電終了角 θ_c を固定し、通電開始角 θ_0 を調節し、重み関数 g が最小になる θ_{lap} を求める。

図 4 に重み付け係数を(a) $w_1=0.7, w_2=0.15, w_3=0.15$, (b) $w_1=0.15, w_2=0.15, w_3=0.7$ とし理想電流波形を導出した際の電流と出力トルク、DC 電流、ラジアル力のシミュレーション結果を示す。回転速度は 0.25p.u.とした。どちらもトルクリプルをゼロにできている。また、電流実効値低減に重みを置いた(a)の方が電流実効値を低減できており、ラジアルカリプル低減に重みを置いた(b)の方がラジアルカリプルを低減できている。



(a) $w_1=0.7, w_2=0.15, w_3=0.15$ (b) $w_1=0.15, w_2=0.15, w_3=0.7$

図 3 理想電流波形の導出フローチャート

図 4 シミュレーション波形

4. 今後の研究の見通し

これまで、SR モータの磁化特性を数式モデル化し、そのモデルに基づいて所望の特性(トルクリプル低減, 電流実効値低減等)を実現可能な理想電流波形の導出方法について検討を行ってきた。しかしながら、本年までの検討は理想電流波形の生成により SR モータ単体での特性を改善するものである。今後は、本解析を拡張し、SR モータ駆動用インバータで生じるスイッチング損失や導通損失の低減が可能な理想電流波形の生成に関して研究を行い、SR モータ駆動システム全体としての特性改善を図る。

5. 助成研究による主な発表論文, 著書名

熊谷崇宏, 伊東淳一, 日下佳祐: 「磁化特性の数式モデルに基づく SRM のラジアルカリプルの定式化及び低減手法」, 半導体電力変換/モータドライブ合同研究会, No. SPC-19-052, MD-19-052 (2019)

熊谷崇宏, 伊東淳一, 日下佳祐: 「磁化特性の数式モデルに基づくゼロトルクリプル下における SRM の電流実効値, DC 電流リプル, ラジアルカリプルの低減手法」, 令和 2 年電気学会全国大会, Vol. 5, No. 115, pp. 202-203 (2019)

熊谷崇宏, 日下佳祐, 伊東淳一: 「磁化特性の数式モデルに基づく SRM のトルクリプルと電流実効値の低減手法」, 産業応用部門大会, No. 3-2, pp. 137-140 (2019)

Takahiro Kumagai, Keisuke Kusaka, Jun-ichi Itoh, “Torque Ripple Reduction Method with Minimized Current RMS Value for SRM Based on Mathematical Model of Magnetization Characteristic,” IEEE Trans. on Industrial Electronics (査読中)