

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 電流リップル, ラジアルカリプルの低減手法

熊谷 崇宏*, 伊東 淳一, 日下 佳祐(長岡技術科学大学)

Reduction Method of Current RMS value, DC Current Ripple, and Radial force ripple under zero torque ripple for SRM based on Mathematical Model of Magnetization Characteristics
Takahiro Kumagai, Jun-ichi Itoh, Keisuke Kusaka (Nagaoka University of Technology)

1 はじめに

Switched Reluctance Motor (SRM)のトルクリプル低減法として、瞬時トルクを一定にする一定トルク電流波形を用いて部分的に二相通電を行う手法⁽¹⁾がある。しかし、二相通電でトルク/電流比が小さい区間でトルクを補うため、電流実効値が増加する。また、トルクリプルをゼロにし、出力を一定にしたとしても、磁気エネルギーは負荷と電源を往復するため、入力電力が脈動し、DC 電流にリップルが発生する。また、対向状態での電流立下りに伴うラジアル力の急峻な変化によってステータ振動が生じ、騒音、振動が発生する。

これまでに筆者らは、モータ電流実効値と DC 電流リップル実効値のトレードオフ関係を明確にし、重み関数を導出し、所望の重みに対して、有限要素法(FEM)解析を用いることなく、電流指令を導出する方法を提案⁽²⁾した。本論文では、同様に FEM 解析を用いることなく、ラジアルカリプルに関する評価関数を導出し、新たな重み関数を導出することで、所望の重みに対してモータ電流実効値、DC 電流リップル、ラジアルカリプルを低減する手法を提案する。

2 多目的最適化

本論文では、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) $f_{Tx}(\theta_m)$ ⁽¹⁾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_{ap} と一相通電期間開始角 θ_0 を適切に決定する必要がある。文献⁽²⁾では、電源電圧の制約下において、モータ電流実効値と DC 電流リップルに関する重み関数より決定している。本稿ではラジアルカリプルの評価関数を導出し、新たな重み関数を導出する。

図 1 に一定トルク電流波形適用時のラジアルカリプルのシミュレーション結果と評価関数の比較を示す。文献⁽³⁾で、ラジアル力 $F_r(i, \theta_e)$ は磁化特性およびモータの代表寸法から定式化されている。一定トルク電流波形では、ラジアル力が大きい対向状態付近まで電流を流してから、電流を立下げ始める。従って、ラジアル力が最大となるのは、電流を立下げ始

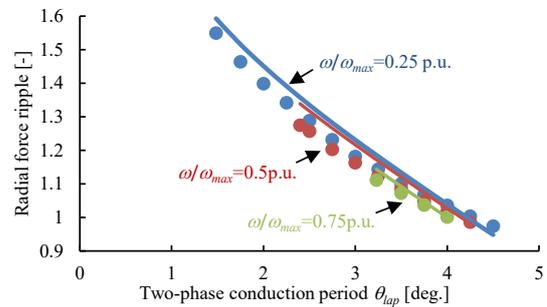


Fig. 1. Radial force ripple value of evaluated results and simulation results. 1 p.u. is the value when applying the minimized current RMS value method⁽⁴⁾ at $\omega/\omega_{max}=1$ p.u..

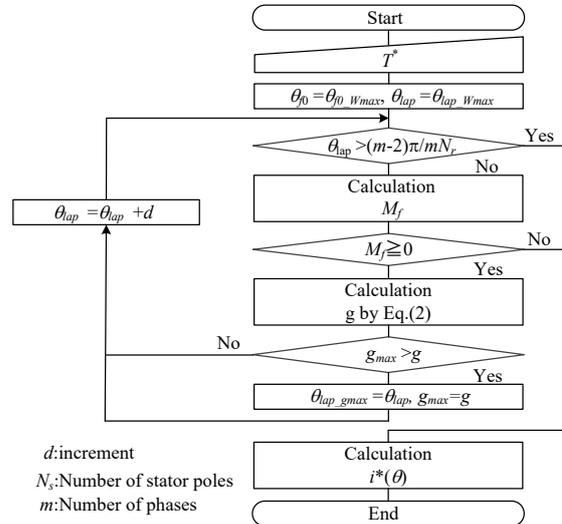


Fig. 2. Generation flow for ideal current waveform.

める、二相通電終了角 $\theta_{fc} = \theta_0 - \theta_{ap} + 2\pi/mN_p$ 付近である。一方、ラジアル力が最小になるのは、電流が完全にゼロになる二相通電終了角(隣接相における一相通電期間開始角 θ_0)付近である。従って、ラジアルカリプルは、(1)式で表される。

$$F_{r,rip} \approx F_r(i^*(\theta_{fc}), \theta_{fc}) - F_r(i^*(\theta_{f0}), \theta_{f0}) \dots \dots \dots (1)$$

(1)式と解析値で誤差がある(図 1)。これは、漏れ磁束により発生するラジアル力を無視しているため⁽³⁾である。

図 2 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っている。ここでは、文献(4)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、できるだけ対向状態付近まで電流を流すため、ラジアルカリブルが最大となる。重み関数 g を(2)式のように定義する。なお、各評価関数は各評価関数の最大値と最小値で規格化している。

$$g = w_1 Z(i_{RMS}^*) + w_2 Z(i_{DCRip,RMS}^*) + w_3 Z(F_{rRip}) \dots\dots\dots (2)$$

ただし、 $w_1 + w_2 + w_3 = 1$ 、 $0 \leq w_n \leq 1$ とする。(1)式より、ラジアルカリブル F_{rRip} を低減するには、 F_r が最大となる $\theta_c = \theta_0 - \theta_{ap} + 2\pi/mN_r$ を小さくし、 F_r が最小となる θ_0 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_{ap} を長くすればよい。電流実効値最小化では、立上りの余裕度 M_l は正であるが、立下りの余裕度 M_d は 0 として導出しているの、通電終了角 $\theta_e = \theta_0 + 2\pi/mN_r$ 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_e 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_{ap} を求める。

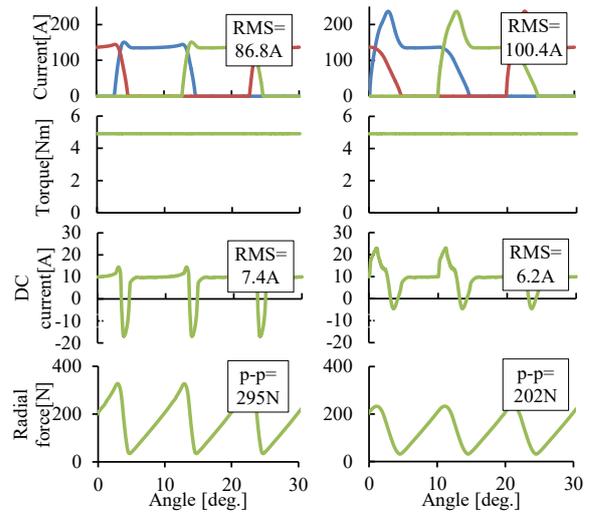
3 シミュレーション結果

図 3 に (a) $w_1=0.7, w_2=0.15, w_3=0.15$, (b) $w_1=0.15, w_2=0.15, w_3=0.7$ で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。どちらもトルクリブ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、ラジアルカリブル低減に重みを置いた(b)の方がラジアルカリブルを低減できている。

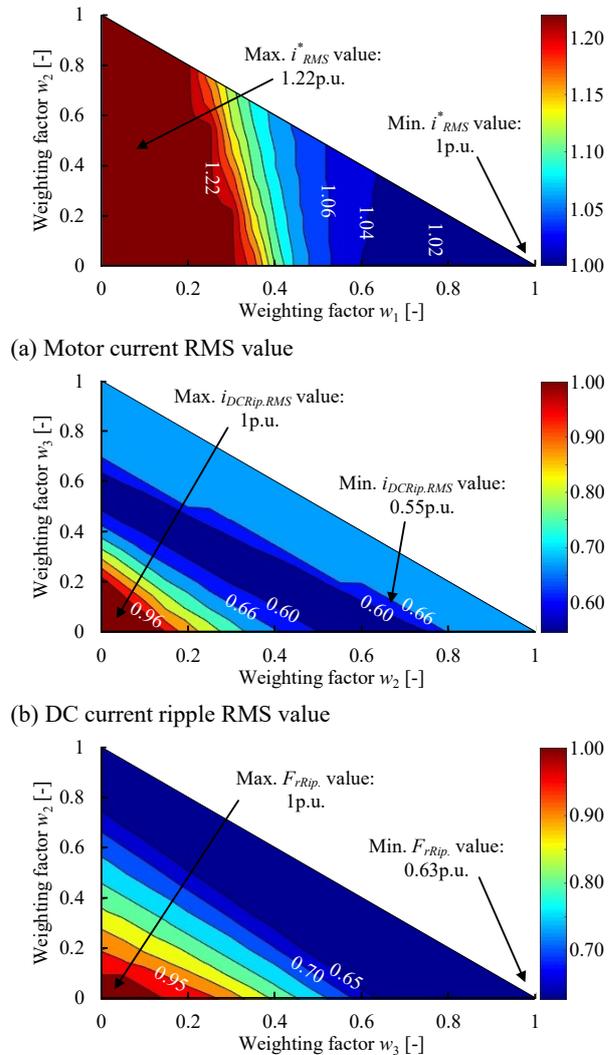
図 4(a)-(c)に重み係数 w とモータ電流実効値、DC 電流実効値、ラジアルカリブルの関係を示す。なお、横軸は、示している物理量に関する重み係数としている。回転速度は $0.25p.u.$ とした。図 4(a)-(c)から、電流実効値、DC 電流リップル実効値、ラジアルカリブルはそれぞれの重み係数 w_1, w_2, w_3 が大きいほど低減され、それぞれ最大で 18%, 45%, 37% まで低減できる。なお、図 4(b)では w_3 、図 4(c)では w_2 が大きい場合でも、DC 電流リップル、ラジアルカリブルが小さくなっている。これは、 θ_{ap} を長くすると、ラジアルカリブルが小さくなるとともに、電流変化が小さくなり、DC 電流リップルのピークおよび実効値が小さくなる⁽²⁾ためである。また、DC 電流実効値低減において、重みが小さい領域で DC 電流リップルが増加傾向にある。これは、DC 電流リップルの評価関数を θ_{ap} が十分に小さいとして導出しているの、 θ_{ap} が大きくなると近似誤差が増え、傾向が一致しない⁽²⁾ためである。

文献

- (1) I. Husain : IEEE Tran. PE, Vol. 11, No. 1, pp. 83-88, 1996
- (2) 熊谷, 他: JIASC2018 Vol.1, No. 3, pp. 3-14, 2018.
- (3) 熊谷, 他: SPC-19-052, MD-19-052, 2018.
- (4) 熊谷, 他: H30 全国大会, Vol. 5, No. 084, pp. 144-145(2018)



(a) $w_1=0.7, w_2=0.15, w_3=0.15$ (b) $w_1=0.15, w_2=0.15, w_3=0.7$
Fig. 3. Simulation results ($T^*=4.91Nm, N=0.25p.u.$).



(c) Radial force ripple
Fig. 4. The relationship with weighting factor w . 1 p.u. is the value when applying minimized current RMS value method⁽⁴⁾.