

磁化特性の数式モデルに基づく SRM のトルクリプル低減と電流実効値最小化手法

熊谷 崇宏, 伊東 淳一* (長岡技術科学大学)

Torque Ripple Reduction Method with Minimized Current RMS Value for SRM

Based on Mathematical Model of Magnetization Characteristic

Takahiro Kumagai, Jun-ichi Itoh (Nagaoka University of Technology)

1. はじめに

Switched Reluctance Motor (SRM)では一相通電の場合、相切換え時にトルクリプルが発生するため、瞬時トルクを一定にする平坦トルク電流波形を用いて部分的に二相通電を行うことで、トルクリプルを低減する手法がある⁽¹⁾。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、部分的に電流値が増加する。電流値を低減させるには、トルク/電流比が大きい区間で通電すればよいが、実電流が追従できる電流指令は電源電圧によって制限されるため、トルクリプルゼロと電流低減の両立は困難である⁽²⁾。

筆者らはこれまでに、ある電源電圧の制約下において、トルクリプルゼロで出力可能なトルクを最大化する手法を提案している⁽²⁾。本論文では、トルクリプルゼロを達成できる範囲で、電流実効値を最小化する手法を提案し⁽³⁾、実験検証にて提案法の有用性について確認したので報告する。

2. トルクリプル低減と電流実効値最小化手法

図 1 に提案する理想電流波形の導出フローチャートを示す。ある電源電圧の制約下において、トルクリプルゼロで出力可能なトルクを最大化する手法は文献⁽²⁾のアルゴリズムを用いる。ここで、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平坦トルク電流波形の時間変化の差を余裕度 M と定義する。 M が最小になる二相通電開始時と終了時における余裕度 M_f および M_r を導出し、ともに $M \geq 0$ が成立するように、単独通電開始角 θ_0 、オーバーラップ角 θ_{ap} を導出し、二相通電区間を決定する⁽²⁾。ここで、トルクリプルゼロと電流値低減を達成するためには、 $M \geq 0$ が成立する範囲でトルク/電流比が大きい区間で通電させる必要がある。まず、電源電圧の制限がない場合における最大トルク/電流比が達成できる理想通電期間を導出する。次に、電源電圧の制限を考慮し、実際の通電期間を導出した理想通電期間にできるだけ近づける。電源電圧の制限がなければ $\theta_{ap}=0$ にでき、通電期間は $[\theta_0, \theta_0+2\pi/mN_r]$ となる。

図 2 に平坦トルク電流波形が描く $i-\Phi$ 軌跡を示す。なお、 $M \geq 0$ が成立するば、いかなる $i-\Phi$ 軌跡を通ってもトルクリプルゼロは達成される。一周期の平均トルクは磁気エネルギー W を 2π で除して表されるため、 W が最大の時に最大トルク/電流比が達成される。ここで、 W は磁化特性における $i-\Phi$ 軌跡の周回積分、つまり図 2 中の点線内部の面積であり、

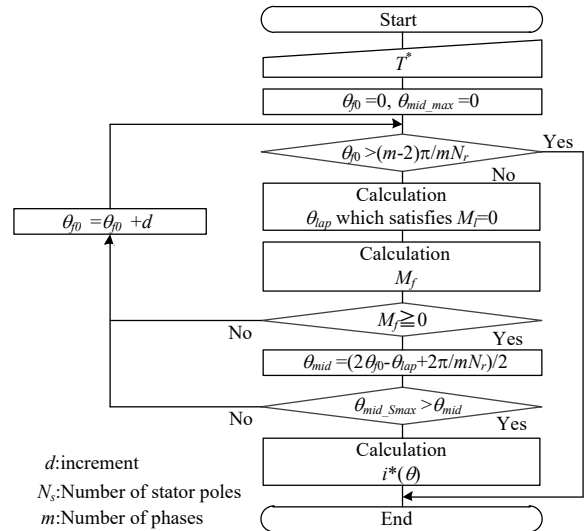


Fig. 1. Generation flow for ideal current waveform.

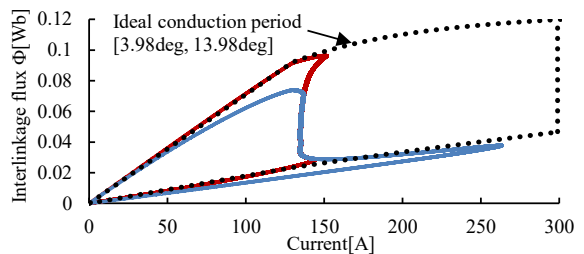


Fig. 2. Current paths in magnetization characteristic.

(1)式で表される。

$$W = (f(\theta_{f_0} + 2\pi/mN_r) - f(\theta_{f_0})) \int_0^1 (\Phi_a(i) - \Phi_u(i)) di \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 N_r はロータの極数、 m は相数、 $\Phi_a(i)$ は対向状態の鎖交磁束、 $\Phi_u(i)$ は非対向状態の鎖交磁束、 $f(\theta)$ は非対向状態と対向状態の間の鎖交磁束特性を表現する関数である。(1)式において、定積分の項は定数である。よって、 W を最大化するには $f(\theta_0 + 2\pi/mN_r) - f(\theta_0)$ を最大化すればよい。 W を最大化できる $\theta_{f_0_Wmax}$ は既存の最大値探索法で求められる。このとき、 W を最大化できる通電期間の中心角 θ_{mid_Wmax} は、(2)式で表される。

$$\theta_{mid_Wmax} = \theta_{f_0_Wmax} + \pi/mN_r \dots\dots\dots (2)$$

一方、実際の通電期間の中心角 θ_{mid} は、(3)式で表される。

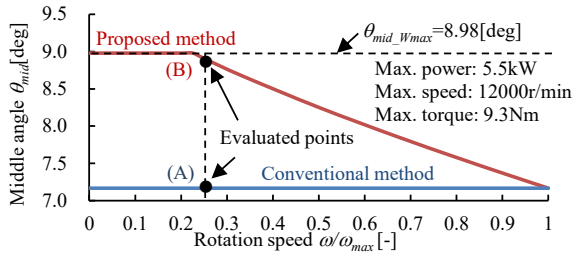


Fig. 3. Relationship between Rotation speed and Middle angle θ_{mid} .

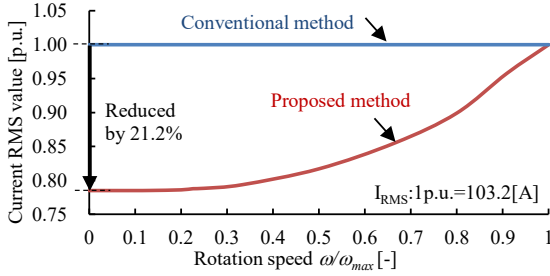


Fig. 4. Relationship between Rotation speed and current RMS value. The rotation speed 1 p.u. is defined as the maximum rotation speed under no torque ripple at rated torque, i.e. M_r and M_l are 0, and further optimization is impossible. ($T_n=4.91\text{Nm}$, $V_n=48\text{V}$, $\omega_{max}=98.3[\text{rad/s}]$)

$$\theta_{mid} = \frac{2\theta_{f0} - \theta_{iap} + 2\pi/mN_r}{2} \dots\dots\dots (3)$$

トルクリプルゼロを達成し、かつ、電流値を低減するには、ある電源電圧下で $M \geq 0$ が成立する範囲で θ_{mid} を θ_{mid_Wmax} に最大限近づければよい。

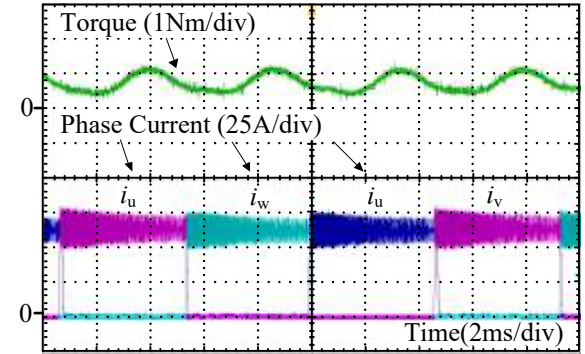
3. 電流実効値最小化効果

図 3 に回転速度と理想電流波形の通電中心角の関係を示す。ここで、従来法では回転速度によらず同一の θ_{f0} , θ_{iap} を用いている。一方で、提案法では回転速度ごとに実際の通電期間の中心角 θ_{mid} を理想の通電期間の中心角 θ_{mid_Wmax} に近づける。図 3 では、高速になると、電圧余裕がなくなるため θ_{mid} が θ_{mid_Wmax} である 8.98 deg. から遠ざかることがわかる。これは、高速ほど電源電圧の制限が厳しくなるためである。

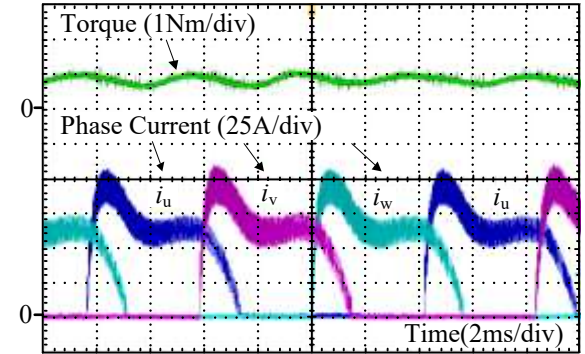
図 4 に回転速度と電流実効値の関係を示す。図 4 から、低速ほど電流/トルク比が大きい区間で通電できるため、電流実効値が低減され、最大で 21.2%まで電流実効値を低減できることが分かる。

4. 実験結果

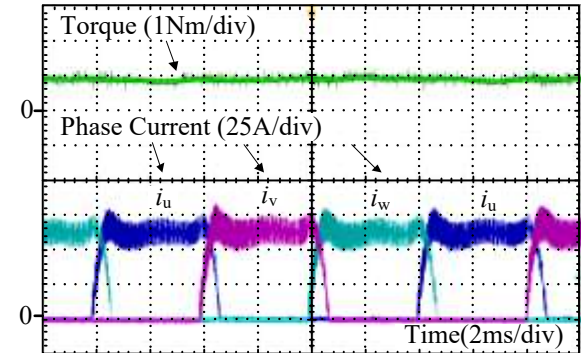
図 5 に一相通電モードおよび図 3 中の(A)従来法と(B)提案法でトルクリプル低減手法を用いた際の、電流波形とトルク波形を示す。一相通電モードとトルクリプル低減手法を比較すると、従来法と提案法では、それぞれ 41.5%, 61.0% のトルクリプル低減がなされていることが分かる。どちらにおいても $M \geq 0$ を満たしているため、理論上はトルクリプルゼロが達成できるはずだが、実際にはトルクリプルが発生している。これは磁化特性の数式モデルの誤差がトル



(1) One-phase excitation mode
(Command: $I_{RMS}=34.6[\text{A}]$, $I_{peak}=60.0[\text{A}]$, Torque ripple: 82.0[%])



(2-A) Conventional method
(Command: $I_{RMS}=42.0[\text{A}]$, $I_{peak}=91.5[\text{A}]$, Torque ripple: 48.0[%])



(2-B) Proposed method
(Command: $I_{RMS}=35.8[\text{A}]$, $I_{peak}=65.7[\text{A}]$, Torque ripple: 32.0[%])

Fig. 5. Current waveform at $T^*=1.00\text{Nm}$, Rotation speed: 0.25 p.u.

クリプルとして現れたためだと考えられる。また、(A)従来法と(B)提案法における電流実効値を比較すると、提案法によって、電流実効値が 14.8%低減されている。これらの結果から、提案法により、トルクリプルの低減と電流実効値の低減ができる。

文献

(1) I. Husain, M. Ehsani: "Torque Ripple Minimization in Switched Reluctance Motor Drives by PWM Current Control", IEEE Trans. PE, vol.11, no.1 (1996)
 (2) T. Kumagai, D. Sato, J. Itoh: "Torque Ripple Reduction Method for SRM based on Mathematical Model considering Voltage Limitation", EPE2017, Vol. DS1g, No. 0392 (2017).
 (3) 熊谷, 伊東, "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値の同時低減法", NGT-17-208 (2017).