

SRM のトルクリプルを許容した DC 電流リプルの低減法

加藤 大貴・徳井 幸輝・熊谷 崇宏・日下 佳祐・伊東 淳一（長岡技術科学大学）

1. はじめに

Switched Reluctance Motor (SRM)は、トルクリプルに加えて、自己インダクタンスに蓄えられた磁気エネルギーの時間変化率が大きく、インバータの DC 側の電流リプルが大きい問題がある。そこで、トルクリプルと磁気エネルギーの時間変化率を同時に抑制することで DC 電流リプルを低減する手法があるが、モータ電流実効値が増加する⁽¹⁾。

本稿では、振動や騒音が許容される場合に、トルクを積極的に脈動させ、磁気エネルギーの時間変化分を打ち消すことで、モータ電流実効値を増加させずに DC 電流リプルを低減する手法を提案する。トルクリプルとモータ電流実効値のトレードオフ関係を明確にし、シミュレーションにより提案手法の優位性を示す。

2. DC 電流リプル低減下におけるトルクリプルとモータ電流実効値のトレードオフ関係

モータに流入する瞬時電力は、損失を無視すれば機械出力と磁気エネルギーの時間あたりの変化量との和で表される。また、DC 電流 i_{DC} は瞬時電力から求められ、電源電圧 E_{dc} により、(1)式で表される。

$$i_{DC}(i_x) = \frac{1}{E_{dc}} \left\{ \sum_{x=u}^w \frac{1}{2} \frac{\partial L_x}{\partial \theta} i_x^2 \frac{d\theta}{dt} + \sum_{x=u}^w \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} L_x i_x^2 \right) \right\} \dots\dots\dots(1)$$

なお、 L は自己インダクタンス、 i_x はモータ電流、 θ は機械角、添え字の x はモータ相である。第一項は機械出力であり、第二項は自己インダクタンスに蓄えられる磁気エネルギーの時間変化率を示している。各項は三相分の総和であり、モータ定数と流れる電流により DC 電流 i_{DC} が決定する。ここで、DC 電流リプル低減下におけるトルクリプル T_{rip} とモータ電流実効値 I_{RMS} のトレードオフ関係を明確にするため、重み関数 g を(2)式に定義する。

$$g(i_x) = w \frac{T_{rip}(i_x) - T_{rip.min}}{T_{rip.max} - T_{rip.min}} + (1-w) \frac{I_{RMS}(i_x) - I_{RMS.min}}{I_{RMS.max} - I_{RMS.min}} \dots\dots\dots(2)$$

なお、 w は重み係数である。また、各項の評価関数は、最大値を 1、最小値を 0 とするため、それぞれ最大値と最小値で規格化する。任意の重み係数 w を与え、その際の重み関数 g が最小となる i_x を、数値解析にて決定⁽²⁾し、そのときの i_x から T_{rip} 、 I_{RMS} を求める。なお、 $w=1$ のときの i_x により求めたトルクリプルが $T_{rip.min}$ であり、電流実効値が I_{RMSmax} である。同様に $w=0$ のときの i_x により $T_{rip.max}$ と I_{RMSmin} は求められる。

図 1 に重み係数 w を 0 から 1 まで変化させたとき、各々で重み関数 g が最小になるトルクリプルとモータ電流実効値の値を示す。図 1 から、DC 電流リプル低減下において両者にはトレードオフ関係がある。

3. シミュレーション結果

図 2 に(B)従来法($w=1$)と(C)提案法($w=0$)による電流指令を与えたときの瞬時電力波形を示す。図 2(b)より、機械出力の脈動を磁気エネルギーの時間変化率で打ち消すことで入力瞬時電力を一定にできる。

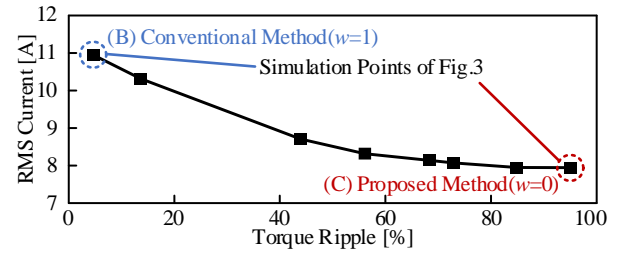
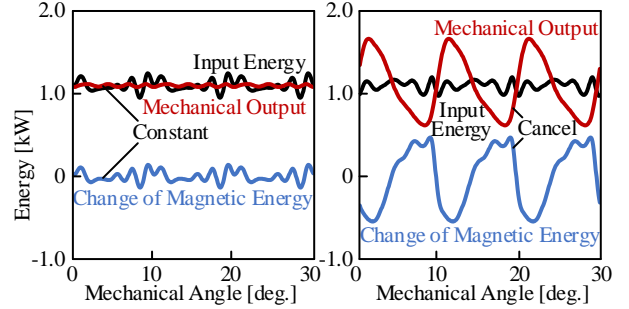


Fig.1 Trade-off relationship between torque ripple and RMS current.



(B)Conventional Method. (C)Proposed Method. Fig.2 Momentary power waveform.

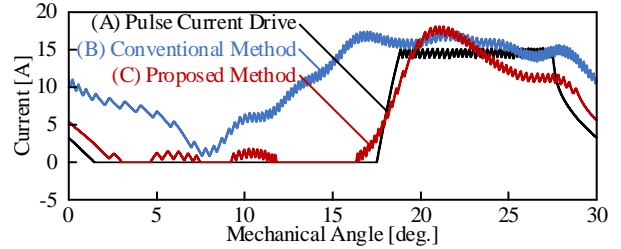


Fig.3 Current waveforms for each drive method.

Table.1 DC current ripple, torque ripple and for each drive method with the current hysteresis control (Hysteresis width=1A).

Drive Method	DC Current Ripple [%]	Torque Ripple [%]	RMS Current [A]
(A) Pulse	126	77.7	7.96
(B) Conv.	20.1	26.1	11.6
(C) Prop.	17.7	108	7.98

図 3 に(A)パルス電流駆動⁽³⁾、(B)従来法($w=1$)、(C)提案法($w=0$)による電流波形を、表 1 に基本波の 20 次までの高調波振幅から計算した DC 電流リプルの実効値⁽⁴⁾、トルクリプルおよびモータ電流実効値を示す。また、シミュレーションでは非対称 H ブリッジ回路を用いている。表 1 より、(B)従来法と(C)提案法の両方で、(A)パルス電流駆動と比較して、DC 電流リプルを 85%程度低減しており、提案法でも従来法と同程度に DC 電流リプルの低減ができています。加えて、(C)提案法は、(B)従来法と比較してトルクリプルが 415%増加するが、モータ電流実効値を 28.1%低減でき、(A)パルス電流駆動と同程度の電流値である。以上より、提案法によりトルクリプルは増加するが、モータ電流実効値が低減できることを確認した。

文 献

(1) T.Kusumi, et al. :IEEE Tran. IA, Vol.56, No.6, pp. 6384-6398, 2020
 (2) J.Furqani, et al. :IEEE Tran. IA, Vol.54, No.1, pp. 213-222, 2018
 (3) I.Kioskeridis, et al. :IEEE Tran. EC, Vol.20, No.4, pp.809-817, 2005
 (4) 西澤 他, 産業応用部門大会, Vol.1, No.109, pp.491-494, 2007