

SRM の 5 相化によるトルクリプル, DC 電流リプル, ラジアルカリプル低減

熊谷 崇宏*, 伊東 淳一, 日下 佳祐(長岡技術科学大学)

Reduction method of Torque ripple, DC current ripple, and Radial force ripple with five-phase SRM
Takahiro Kumagai, Jun-ichi Itoh, Keisuke Kusaka (Nagaoka University of Technology)

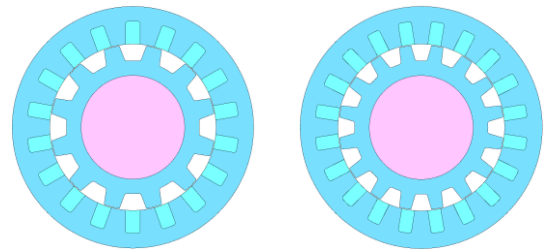
1 はじめに

Switched Reluctance Motor (SRM)は、レアアースが不要でシンプルな構造であり、大量生産に適することから、電気自動車への適用が期待されている。しかし、SRM は原理上、トルクリプル, DC 電流リプル, ラジアルカリプルが大きく、騒音や振動、バッテリー負荷が大きい問題がある。近年のパワーエレクトロニクス技術の発達に伴い、これらのリプルを駆動電流の波形制御により低減する手法が盛んに研究されている⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾。しかし、3 相 SRM において複数のリプルを同時に低減しようとする、正トルク領域だけでは制御的自由度が足りないため、負トルク領域に積極的に電流を流す必要があり、電流実効値が増加し、効率が悪化する⁽²⁾⁽³⁾。そこで、本稿では、5 相化により自由度を拡大し、高効率を保ちつつ、トルクリプル, DC 電流リプル, ラジアルカリプルの 3 つをゼロにする、すなわちトリプルゼロを達成する手法を提案する。

2 5 相 SRM によるトリプルゼロ

図 1 に 3 相 SRM と 5 相 SRM の概形、表 1 にモータパラメータを示す。本論文では、比較のため、筆者らが有する 3 相 18S/12P の SRM⁽⁴⁾と同等の仕様になるように 5 相 SRM を設計した。なお、ポール組合せは 3 相 SRM のポール組合せに最も近い 20S/16P とした。また、巻線占積率を合わせるために 5 相 SRM のターン数を調節している。

図 2 に SRM のインダクタンス分布とトルク特性、および、トルクリプル, DC 電流リプル, ラジアルカリプルのトリプルゼロを達成するために必要な通電期間を示す。SRM は、ロータとステータの対向面積の変化によりインダクタンスが変化しトルクが発生する。通常のパルス電流駆動では、インダクタンスが小さい区間 $[\theta_M, \theta]$ で電流を指令値まで立ち上げ、正トルク $(dL/d\theta_m > 0)$ の区間 $[\theta_i, \theta_K]$ で電流を指令値に制御し、負トルク $(dL/d\theta_m < 0)$ になる θ_N までに電流をゼロにする⁽⁵⁾。これは、限られた電源電圧で電流を立ち上げ、効率的に大きなトルクを得るためである。一方、トリプルゼロを達成するには、制御的自由度が 3 必要であり、常に 3 相同時に通電する必要がある。3 相 SRM においては、連続的に通電することを意味し、負トルク $(dL/d\theta_m < 0)$ の区間 $[\theta_N, \theta_M]$ に電流を流す必要がある。結果として、通常の駆動とはかけ



(a) 3-phase 18S/12P SRM (b) 5-phase 20S/16P SRM
Fig. 1. Examples of general forms of SRMs.

Table 1 Motor parameters of SRMs

	3-phase 18S/12P SRM	5-phase 20S/16P SRM
Rated power P_m	5.5 kW	
Rated speed ω_n	12000 r/min	
Rated torque T_n	9.3 Nm	
Input voltage	48V	
Number of poles	Stator 18, Rotor 12	Stator 20, Rotor 16
Number of turns	12 turns	11 turns
Winding resistance	0.012Ω	0.018Ω

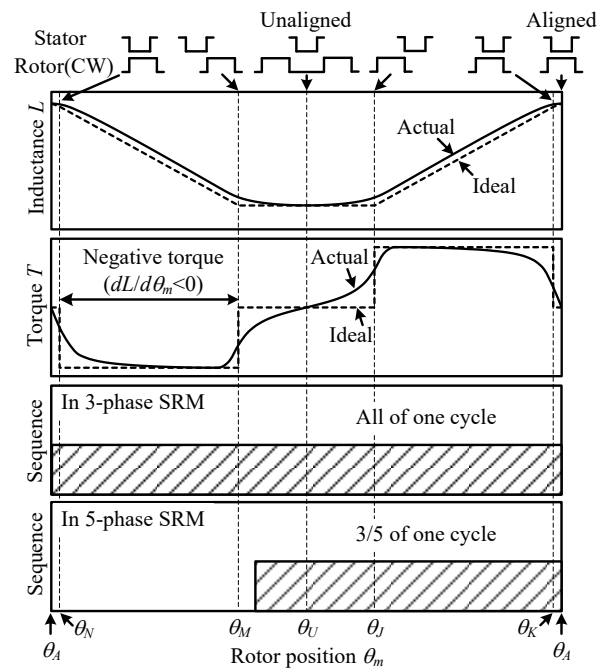


Fig. 2. The inductance distribution and torque characteristic, and the conduction regions which are necessary to achieve the zero torque ripple, zero DC current ripple, and zero radial force ripple in 3-phase SRM and 5-phase SRM.

離れた駆動方法となり、電流実効値が増加し、効率が悪化する。一方、5相SRMにおいては、1周期の3/5の区間で通電すれば、常に3相同時に通電することになる。この場合、負トルクの区間に電流を流す必要がなく、通常の駆動と同程度の効率でトリプルゼロを達成できる。

3 シミュレーション

3相SRMと5相SRMにおいて、トルクリプル、DC電流リプル、ラジアルカリップルのトリプルゼロを達成する理想電流波形を適用し、5相SRMの有用性を確認する。ここで、理想電流波形の導出は、数値解析的にトルクリプルやラジアルカリップルを低減する高調波電流を導出する手法⁽¹⁾⁽²⁾を用いる。この手法において、新たにDC電流リプルを低減するには、理想電流とDC電流リップルの関係式が新たに必要である。巻線抵抗を無視すればDC電流リプル i_{DCrip} は次式で表される。

$$i_{DCrip} = \frac{\omega}{E_{dc}} \left(i(\theta_m) \frac{\partial \Phi(i, \theta_m)}{\partial \theta_m} + i(\theta_m) \frac{di(\theta_m)}{d\theta_m} \frac{\partial \Phi(i, \theta_m)}{\partial i} - T^* \right) \quad (1)$$

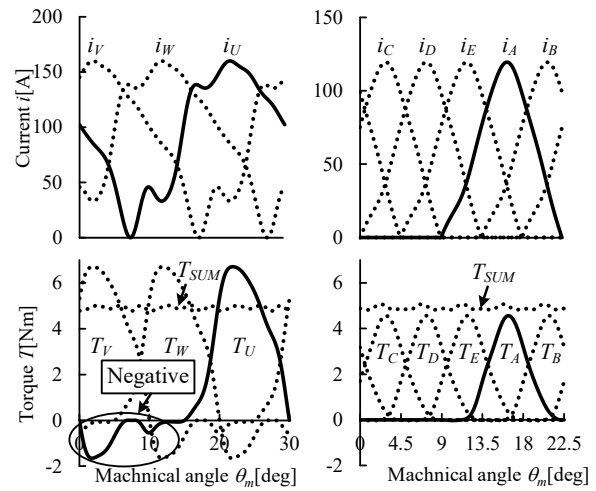
ここで、 ω は回転数、 Φ は鎖交磁束、 T^* はトルク指令である。また、(1)式の微分項は数式として与えられている $i(\theta_m)$ や $\Phi(i, \theta_m)$ を微分することで定式化できる。

図3に3相SRMと5相SRMにおいて、トリプルゼロを達成する理想電流と計算されたトルクを示す。3相SRMの場合、負トルクが発生しており、他相で大きな電流を流し指令トルクを超えるトルクを出力することで、負トルクを補償している。一方、5相SRMの場合、負トルクは発生しておらず、各相でトルク出力を分担することで、無駄な電流を流すことなくトルクを一定に保っている。

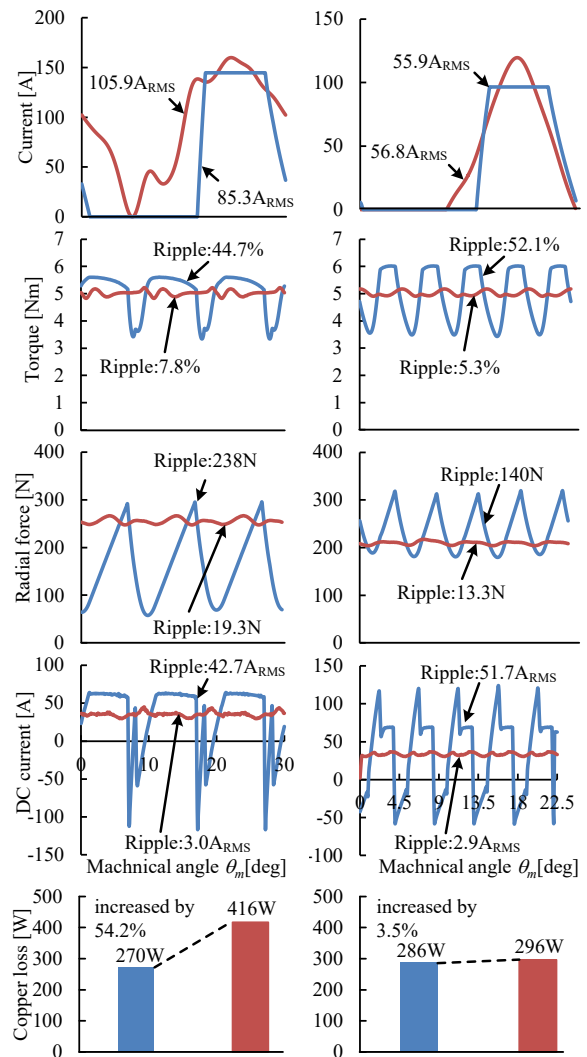
図4にパルス電流駆動と理想電流における電流波形、トルク、DC電流、ラジアル力、銅損の電磁界解析結果を示す。図中に示したように、理想電流によって、3相SRMと5相SRMにおいて、トルクリプル、DC電流リプル実効値、ラジアルカリップルを、それぞれ9割程度低減できることがわかる。また、3相SRMでは電流実効値が24.2%増加しており、銅損が54.2%増加していることが分かる。そのため、3相SRMでトリプルゼロを達成しようとする、効率が著しく低下する懸念がある。一方、5相SRMでは電流実効値の増加は1.7%のみであり、パルス電流駆動とほぼ同等であることが分かる。このことから、SRMの5相化による自由度の拡大によって、通常のパルス電流駆動と同等の効率を保ちつつ、トルクリプル、DC電流リプル、ラジアルカリップルのトリプルゼロを達成できることがわかる。

文献

- (1) J. F., etc.: IEEE Tran. IA, Vol. 54, No. 1, pp. 213-222, 2018
- (2) J. B., etc.: IEEE Tran. EC, Vol. 31, No. 2, pp. 627-636, 2016
- (3) T. K., etc.: IEEE IECON 2016, pp. 1876-1881, 2016
- (4) T. K., etc.: IEEE IFEEC 2019, No. 1123, 2019
- (5) M. H., etc.: Turk J EE&CS, Vol. 26, No. 5, pp. 2753-2767, 2018



(a) 3-phase 18S/12P SRM (b) 5-phase 20S/16P SRM
Fig. 3. Ideal current waveforms and calculated torque.



(a) 3-phase 18S/12P SRM (b) 5-phase 20S/16P SRM
Fig. 4. FEM results of waveforms of the current, the torque, DC current, radial force, copper loss in cases of single pulse-wide current and ideal current at $T^*=4.91\text{Nm}$, $\omega=2400\text{r/min}$.