

令和 3 年 6 月 17 日現在

機関番号：13102

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2019～2020

課題番号：19K21968

研究課題名（和文）トリプルゼロを実現する5相SRMの挑戦

研究課題名（英文）Challenge of triple-zero technology for five-phase SRM

研究代表者

伊東 淳一（Itoh, Junichi）

長岡技術科学大学・工学研究科・教授

研究者番号：90377218

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 5,000,000円

研究成果の概要（和文）：スイッチトリラクタンスモータ(SRM)は、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。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研究されている。しかし、3相SRMにおいて複数のリプルを同時に低減
しようとすると、正トルク領域だけでは自由度が足りないため、負トルク領域に電流を流す必要があり、電流実
効値が増加する。そこで、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し、実機により有用性を確認
した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年、電気自動車やハイブリッド自動車の普及に伴い、駆動用モータの需要が高まっている。現在、永久磁石同
期モータは、高効率で高性能なため、駆動用モータとして広く採用されているが、レアアースであるネオジム磁
石を多用するため、安定供給の観点で問題がある。本研究では、レアアースを使用しないスイッチトリラクタン
スモータの高効率化と高性能化を両立する革新的な研究であり、本成果によって、電動化の時代において高効率
で高性能なモータの持続的な供給が期待できる。

研究成果の概要（英文）：Switched reluctance motor (SRM) has drawbacks of a large torque ripple,
large DC input current ripple, and large radial force ripple. These ripples lead to the vibration,
acoustic noise, and battery deterioration. The three-phase SRM does not have enough control
flexibilities during no-negative torque period to simultaneously reduce the multiple ripples.
Therefore, it is necessary for the simultaneous reduction of multiple ripples to positively use the
negative torque period, which resulting in extremely increases the motor current root-mean-square
(RMS) value. As a result, the efficiency is significantly deteriorated compared with a general
driving method. The proposed method made these three ripples simultaneously zero, which is so-called
“triple zero” in this paper with improved control flexibility of five-phase. In particular, the
triple zero is achieved with the same motor current RMS as general driving method by utilizing the
control flexibility effectively.

研究分野：パワーエレクトロニクス

キーワード：SRM 5相 機電一体

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年、電気自動車やハイブリッド自動車の普及に伴い、モータの高効率化や高性能化に関する研究が盛んにおこなわれている。特に、スイッチトリラクタンスモータ(SRM)は、レアアースを使用する磁石が不要で、鉄心と集中巻の巻線のみで構成されるため、製造コストが安価である。加えて、回転子は堅牢な突極鉄心構造で、高速運転や高温環境に適することから、自動車駆動用モータとして期待されている。

図1に3相SRMの構造と巻線電流を示す。SRMは、磁石の代わりに突極鉄心構造のロータを有する。従来のパルス電流駆動では、正トルク(回転方向に吸引)が得られるように、通電相を切り替えることで、継続的な回転動作を達成する。しかし、この駆動法は、駆動原理上、通電相の切り替えに伴うショック、つまり、トルクリプル、入力電流リプル、ラジアルカリプルが発生する問題がある。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。

図2にトリプルゼロへの課題を示す。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 $[\theta, \theta_K]$ 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。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。

これらの問題に対して、トルクリプルとDC電流リプルを同時に低減しつつも、高効率を維持するようにロータ形状を最適化する手法が提案されている⁽¹⁾。しかし、ラジアルカリプルに関しては考慮していない。また、トルクリプル、DC電流リプル、ラジアルカリプルを各々の重みに応じて低減するように電流波形を多目的最適化する手法が提案されている⁽²⁾。しかし、同時に複数のリプルを低減することはできない。

2. 研究の目的

図3に本研究の目的を示す。本研究では、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の達成を目標とする。とりわけ、5相化により制御的自由度を拡大し、それらの制御的自由度を効率的に活用することで、通常用いられる高効率を達成するパルス電流駆動と同等の効率を保ちつつ、トリプルゼロを達成することで、レアアースを使用しないスイッチトリラクタンスモータにおいて原理的に不可能であった、高効率化と高

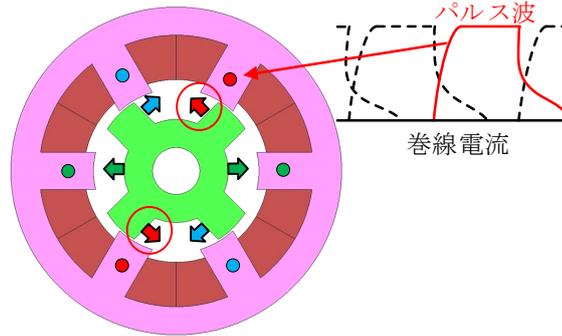


図1 3相SRMの構造と巻線電流

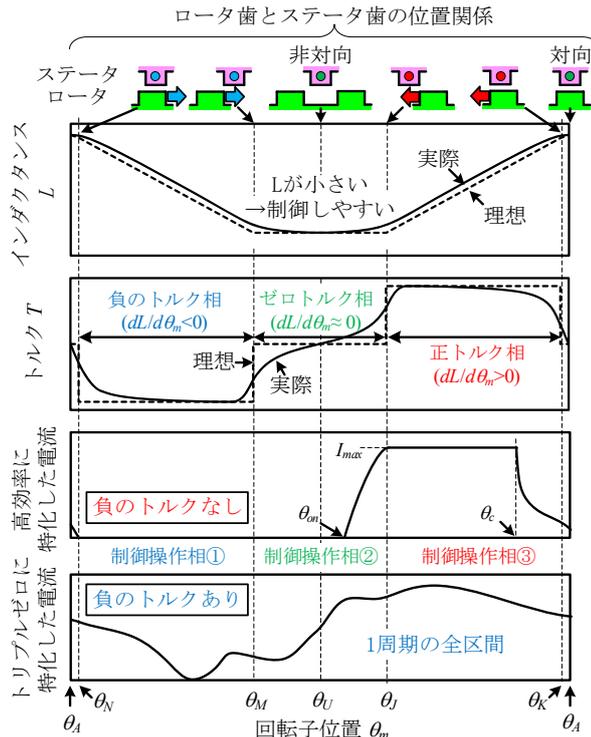


図2 トリプルゼロへの課題

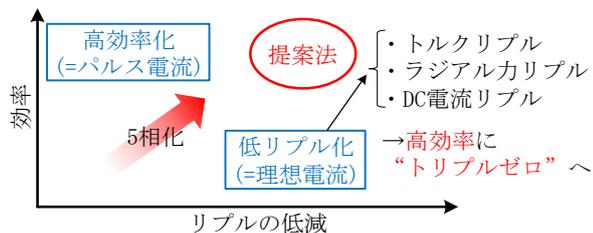


図3 研究の目的

性能化の両立を実現する。

3. 研究の方法

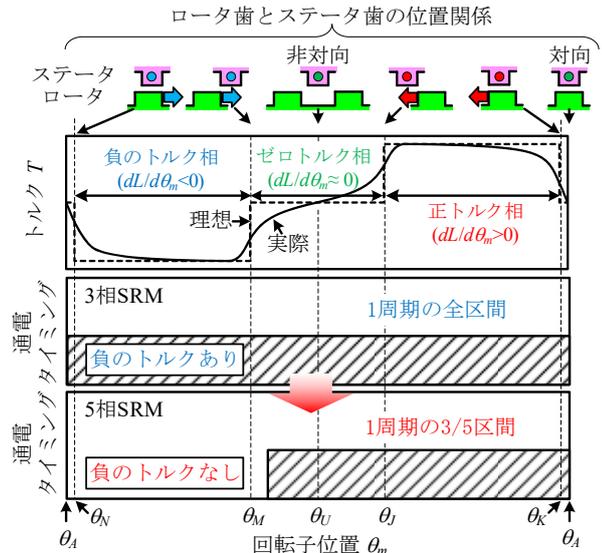
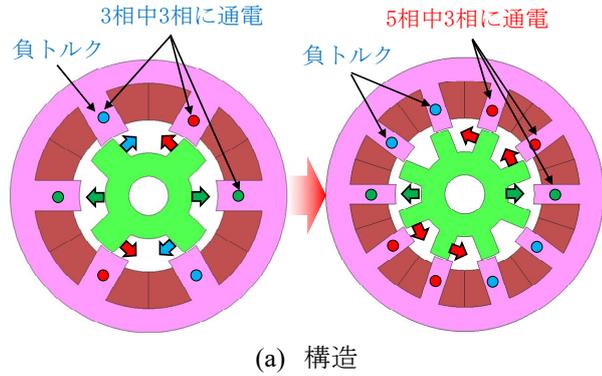
図4に3相SRMと5相SRMの構造とトリプルゼロを達成する電流の通電タイミングを示す。2節で説明したように、3相SRMでトリプルゼロを達成するには、負トルクの区間に電流を流す必要があり、電流実効値が増加し、効率が悪化する。一方、5相SRMにおいては、1周期の3/5の区間で通電すれば、常に3相同時に通電することになる。この場合、負トルクの区間に電流を流す必要がなく、通常の駆動と同程度の効率でトリプルゼロを達成できる。なお、4相SRMの場合は、1周期の3/4の区間で通電すれば、常に3相同時に通電することになるが、負トルク区間に電流を流す必要がある。一方、6相以上でも、5相同様に負トルクの区間に電流を流す必要がなくなる。しかし、多相化は、インバータ数の増加に繋がるため、電流実効値の低減効果とインバータ数の増加を加味して、5相が最良であると考えられる。

トリプルゼロを達成する理想電流波形の導出には、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を用いる⁽³⁾。この手法では、DC成分および複数の高調波成分で構成された高調波電流における各高調波の振幅と位相を最適化することで、各リップルを低減する。5相SRMにおいては、通電開始角 θ_0 と通電終了角 θ_e において、電流値がゼロである必要がある。本研究では、通常のパルス電流駆動における通電タイミングを参考に θ_0 を対向角 θ_A とし、 θ_e は3相同時通電を達成するために、 $\theta_A - 3/5 * 2\pi/N_r$ とした。したがって、5相SRMにおける理想電流指令は次式で表される。

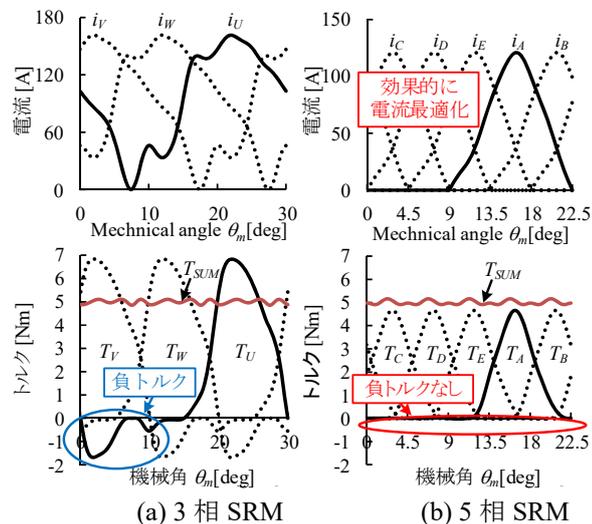
$$i(\theta_e) = \begin{cases} \sum_{n=1}^N i_n \sin \left\{ n \frac{N_r}{2} \left(\theta_e - \frac{2 \cdot 2\pi}{5 N_r} \right) \right\} & \frac{2 \cdot 2\pi}{5 N_r} \leq \theta_e \leq \frac{2\pi}{N_r} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

ここで、 θ_e は電気角、 N_r はロータ極数、 i_n はn次高調波の振幅である。本研究では、各リップルが5%以下となる範囲内で電流実効値が最小となるように、(1)式における i_n を一般化簡約勾配(Generalized Reduced Gradient: GRG)法により最適化している。なお、制約を5%以下とするのは、最適化の際に用いているトルクやDC電流、ラジアル力の数理モデリングの誤差に起因するリップルが数%程度であるためである。

図5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。これは、通常の駆動とはかけ離れた駆動方法であり、電流実効値が増加し、効率が悪化する。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。



(b) 通電タイミング
図4 3相SRMと5相SRM



(a) 3相SRM (b) 5相SRM
図5 導出した理想電流と発生トルク

4. 研究成果

表1に3相SRMと5相SRMの仕様を示す。比較のため、筆者らが有する3相18S/12PのSRMと同等の仕様になるように5相SRMを設計した。なお、ポールの組合せは3相SRMのポールの組合せに最も近い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6に5相SRMの写真を示す。振動は、ステータ側面に加速度センサ(NP-3120, カットオフ周波数50kHz, 小野測器)を直接設置し、測定している。一方、トルクリプルは、トルクメータ(UTMII-10Nm, カットオフ周波数1kHz, ユニパルス)を用いて測定している。

図7に3相SRMと5相SRMにおける、高効率な駆動であるパルス電流駆動と、提案する理想電流駆動を適用した場合の、電流実効値の比較を示す。3相SRMでは、電流実効値が27.6%増加しており、銅損が62.8%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0.8%のみであり、高効率な駆動であるパルス電流駆動とほぼ同等であることが分かる。

図8に5相SRMにおいて、高効率な駆動であるパルス電流駆動と、提案する理想電流駆動を適用した場合の、トルクリプル、振動、DC電流リップルの実測値を示す。なお、3相SRMにおけるリップル低減の結果は紙面の都合上、省略している。図8より、トルクリプルを93.5%、振動を-24.8dB、入力電流リップルを95.9%低減していることがわかる。これらの結果から、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電流リップル、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ことを確認した。

<引用文献>

- ① T. Kusumi, etc.: "Simultaneous Tuning of Rotor Shape and Phase Current of Switched Reluctance Motors for Eliminating Input Current and Torque Ripples With Reduced Copper Loss" IEEE Trans. on IA, Vol.56, No.6 pp.6384-6398 (2020)
- ② T. Kumagai, etc.: "Reduction Method of Current RMS Value, DC Current Ripple, and Radial Force Ripple for SRM based on Mathematical Model of Magnetization Characteristic", in IEEE IFEEEC2019, No. 1123 (2019)
- ③ J. Furqani, etc.: "Current Waveform for Noise Reduction of a Switched Reluctance Motor under Magnetically Saturated Condition", IEEE Trans. on IA, Vol.54, No.1 pp.213-222 (2018)

表1 3相SRMと5相SRMの仕様

	Three-phase 18-12 SRM	Five-phase 20-16 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

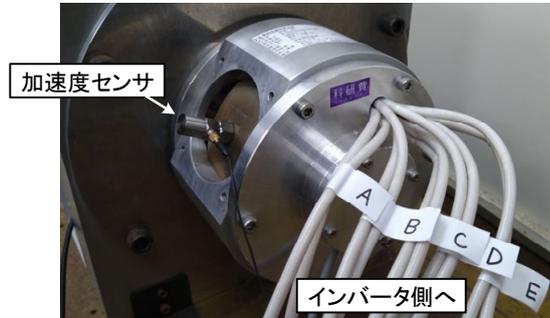


図6 5相SRMの写真

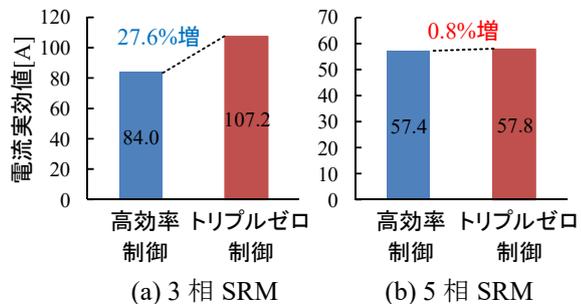


図7 高効率制御とトリプルゼロ制御の電流実効値の比較

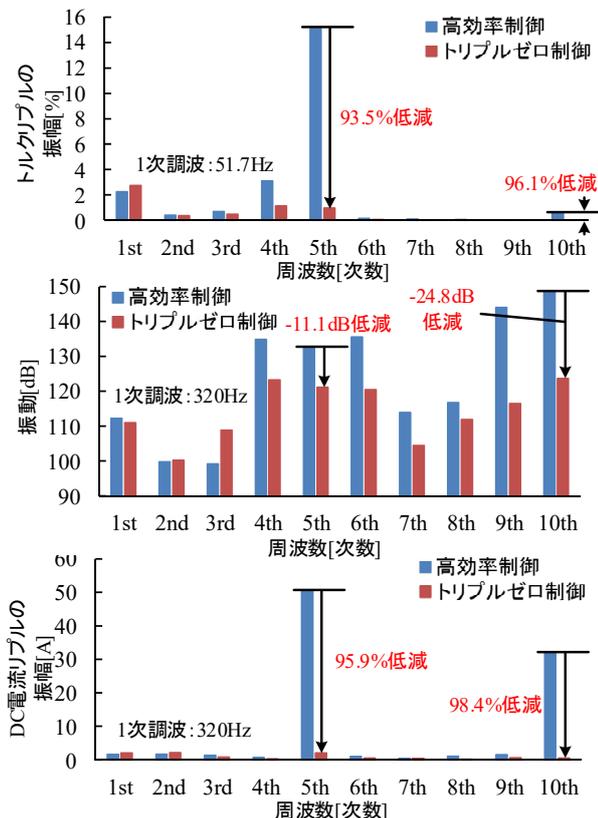


図8 トルクリプル、振動、DC電流リップルの実測

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 熊谷崇宏・伊東淳一・日下佳祐
2. 発表標題 SRM5 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
3. 学会等名 令和2年電気学会全国大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Takahiro Kumagai; Jun-ichi Itoh; Keisuke Kusaka
2. 発表標題 Reduction Method of Torque Ripple, DC Current Ripple, and Radial Force Ripple with Control Flexibility of Five-Phase SRM
3. 学会等名 2020 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE) (国際学会)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------