

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 6 月 26 日現在

機関番号：32678

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04008

研究課題名（和文）回転子が回転磁界より速い速度で回転する新しい高速モータの開発

研究課題名（英文）Development of a novel high-speed motor in which the rotor rotates faster than the rotating magnetic field

研究代表者

土方 規実雄 (Hijikata, Kimio)

東京都市大学・理工学部・講師

研究者番号：70710507

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究課題では、回転子が回転磁界より速く回転する新しい高速モータである増速形パーニアモータを提案し、その特性を解析と試作機を用いた実験により明らかにした。

提案モータにおいては回転子と回転磁界が異なる速度で回転するため従来の同期モータで用いられてきたdq座標系を用いることができない。そこで、新たに仮想の回転子に同期して回転する座標系を定義し、その座標上のインダクタンスを用いて特性を算出する方法を提案した。その結果、提案モータの特性を従来の同期モータと同様に表現することが可能になった。仮想の回転子に同期して回転する座標系の妥当性は試作機を用いた実験により検証され、解析結果とよい一致を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

提案する増速形パーニアモータは、これまでの同期機では困難であった多極の巻線を用いて高速モータを構成することを可能にする。多極の巻線を用いることで、巻線のコイルエンドを小さくしたり、固定子鉄心のヨーク厚を薄くして巻線を巻くことができる部分を増やしたりすることができる。したがって、単位体積当たりの出力を向上できる可能性があり、モータを搭載する機器の小型化・軽量化に貢献できる。本研究課題では提案モータの基本的な構造と特性を明らかにするとともに、ベクトル制御が可能であることを試作機を用いた実験によって示すことができた。これらの研究成果は、今後、提案モータの実用化を検討する上で基礎となると考えられる。

研究成果の概要（英文）： In this research project, we proposed a new high-speed motor, a speed-increasing type Vernier motor, in which the rotor rotates faster than the rotating magnetic field, and clarified its characteristics through analysis and experiments using a prototype motor.

Since the rotor and the rotating magnetic field rotate at different speeds in the proposed motor, the dq coordinate system used in conventional synchronous motors cannot be used. Therefore, we defined a new coordinate system that rotates synchronously with the hypothetical rotor, and proposed a method to calculate the characteristics using the inductance on the coordinate system. As a result, the characteristics of the proposed motor can be expressed in the same way as those of a conventional synchronous motor. The validity of the coordinate system that rotates synchronously with the virtual rotor was verified by experiments using a prototype motor, and the results were in good agreement with the analytical results.

研究分野：パワーエレクトロニクス

キーワード：電動機 リラクタンスモータ パーニアモータ 超高速

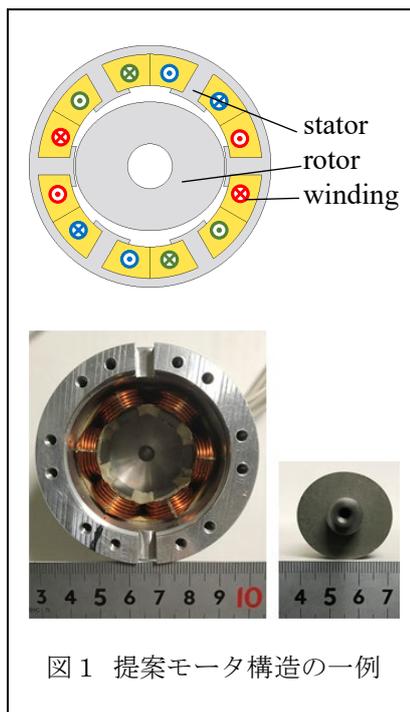
1. 研究開始当初の背景

研究開始時点において、本研究で提案する増速形バーニアモータやそれに類するモータの研究は前例がなかった。

一般的なリラクタンス形の同期モータにおいては、電機子巻線の極数と回転子の構造が一对一の対応関係にあり、回転子が2突極ならば電機子巻線も2極にする必要があった。提案する増速形バーニアモータの場合、図1に示した構造の様に2突極の回転子に4極のような極数の多い電機子巻線を組み合わせる事が可能である。さらに、多極の巻線を採用した場合でも2極の場合と同じ電源周波数での駆動が可能である。したがって、提案する増速形バーニアモータを高速回転用途に適用すれば、従来の同期モータにおけるデッドスペースの問題を解決し体積当たりの出力を改善することができる可能性がある。本研究で提案する増速形バーニアモータは、回転磁界より回転子が速く回転するという従来の同期モータとは異なる特徴をもつ、これまでにない新しいモータであり、高速回転用途への先天的な適性がある。

増速形バーニアモータは高速回転用途への適性があるため、高速モータとして適用した場合を想定し提案モータと各種高速モータとの出力密度および効率の比較を示す(図2)。比較対象の高速モータとして、近年報告された二種類のスイッチトリラクタンスモータ (SRM: Switched Reluctance Motor)、誘導モータ (IM: Induction Motor)

および永久磁石モータ (SPM: Surface Permanent Magnet) が示されている。リラクタンス形の増速形バーニアモータは、永久磁石を使用していないため SPM に対しては出力密度で大きく劣るが、その他のモータとはほぼ同等の出力密度を達成できる。また、効率については、SPM に対しては劣るがその他のモータに対しては優位であり、十分に競争力があると考えられる。永久磁石を用いないため、SPM に対してもコストや耐熱性の点では十分に優位性を示すことが可能である。以上より、提案する増速形バーニアモータは、新たな高速モータの選択肢になり得る可能性があると考えられる。



2. 研究の目的

本研究は、回転磁界より回転子が速く回転する、これまでにない新しい高速モータの開発を目的としている。

従来の同期モータは、回転子が回転磁界と同じ速度に同期して回転することでトルクを発生している。一方で、提案するモータは固定子と回転子の歯数の組み合わせによってモータ自身が磁気ギアのような効果を生じ、回転子が回転磁界より速く回転する増速の効果を得ることができる。特定の歯数の組み合わせにおいては、一般的な同期モータに対して同一の電源周波数のもとで回転速度が2倍にできることが試作機による実験で確認されている。

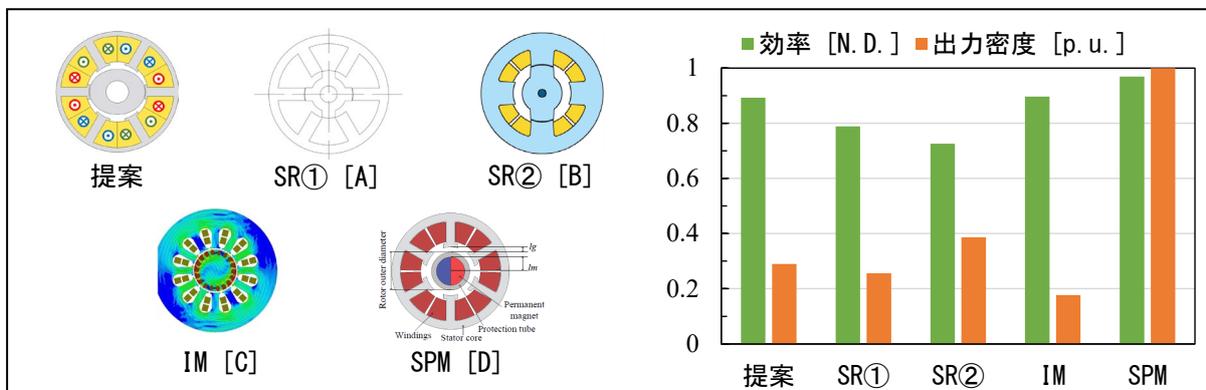


図2 提案モータと各種高速モータの出力密度および効率の比較

※ただし、IMとSPMについては他のモータと定格回転数が異なるため同じ回転数に換算した出力密度を示している。定格の出力密度はIMが1.2倍、SPMが1.5倍

[A] S. Kocan, et al., "Design of High Speed Switched Reluctance Motor," DOI: 10.1109/ICEPE.2018.8559670.

[B] G. F. Lukman, et al., "Design and Analysis of a Low-Cost High-Speed Switched Reluctance Motor for Supercharger," DOI: 10.1109/SCEMS.2018.8624764.

[C] N. Uzhegov, et al., "Comparison of High-Speed Electrical Motors for a Turbo Circulator Application," DOI: 10.1109/TIA.2017.2700793.

[D] 藤田ら, "15 kW, 150,000 r/min 超高速 PM モータの減磁特性を考慮した回転子構造の検討", 2019年電気学会産業応用部門大会講演論文集, III-191-194

本研究課題では、提案するモータについて、(1) 回転の原理および発生するトルクの解析的検討、(2) 有限要素法解析と実機試験によるトルクの検証、(3) 実用化に向けた性能向上の基礎的検討、を実施した。

3. 研究の方法

まず、試作機のインダクタンスや電圧・電流の関係を理論・実験の両面から検討した。特に、提案モータにおける仮想の回転座標系の物理的な意味や、その座標上でインダクタンスなどのパラメータがどのように表されるのか、一般的な同期モータの制御に用いられる dq 座標との関係がどのようになるのか、などを明確にした。

次に、試作機のトルクが有限要素法解析と実機試験でどの程度一致するかを検証した。一般的な同期モータでは dq 座標上のインダクタンスを用いてトルクを表現できるが、提案する増速形バーニアモータでは不可能であった。初年度の検討の結果と併せて、仮想の座標系のインダクタンスとトルクの関係を試作機を用いた実機試験により明らかにした。

4. 研究成果

① 仮想の回転座標系 ($\gamma\delta$ 座標系) の物理的な意味およびパラメータ

提案モータの制御においては、従来の同期モータにおいて用いられる回転子と同期して回転する dq 座標系ではうまく制御が行えない。しかし、回転子と反対方向に、回転子とは異なる速度で回転する仮想の座標系を定義することで提案モータの制御が行えることが実験的に明らかになっていた。本研究課題の初年度は、この仮想の回転座標系の物理的な意味を考察した。

図3に提案モータの断面図を示す。このモデルでは回転子突極数 $Z_r=2$ 、固定子歯数 $Z_s=6$ 、電機子巻線極対数 $p=2$ が採用されている。電機子巻線には対称三相交流の電流が流れており、図3は電流位相の変化に対する各巻線の電流の向きと磁束の分布、回転子位置の関係を表している。図3に示す通り、提案モータは各時刻において最も強く励磁されている歯に回転子が引き寄せられて回転する。

$\omega t = 0$ のとき、図2(a)に示すような4極磁界が発生する。ローターの磁極は、最も強く励磁されたU相巻線が巻かれた固定子の歯1番と4番に引き寄せられる。 $\omega t = \omega/6$ まで時間が進むと、磁束はU相巻線が巻かれている1番と4番の歯、V相巻線が巻かれている3番と6番の歯に集中する。この時、回転子の突極はこれらの歯の中間位置に引き寄せられ、回転子は時計回り方向に30度回転する。さらに時間が進み $\omega t = \omega/3$ になると、 $\omega t = 0$ の場合と同様に、最も強く励磁されたV相巻線が巻かれている固定子の歯3番と6番に回転子の突極が引き寄せられ、回転子は時計回り方向に60度回転する。このとき、回転磁界 (N極とS極の位置) は回転子と逆向きに $\pi/3$ だけ反時計回りに回転している。

従来のリラクタンス形同期モータでは、回転子の突極の位置と回転磁界の磁極の位置が同期して回転するため、回転子に同期した回転座標系である dq 座標系を定義することによってモータの回転数やトルクを容易に制御することができた。しかし、提案モータでは上記のように回転

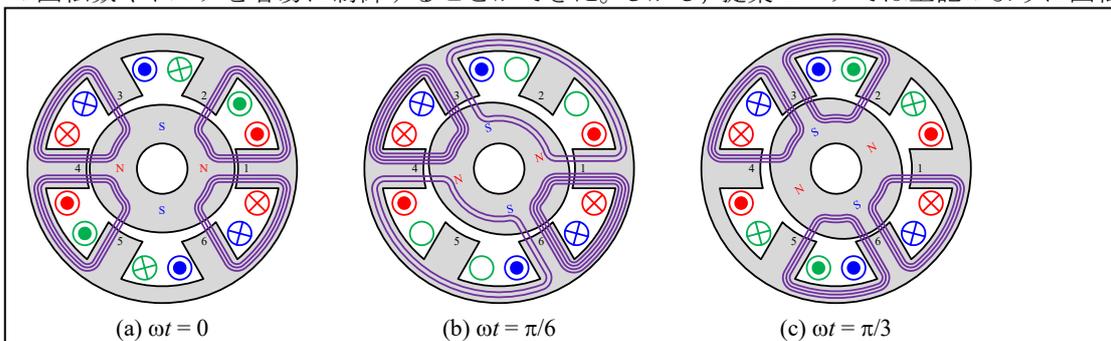


図3 磁束の分布と回転子位置の関係

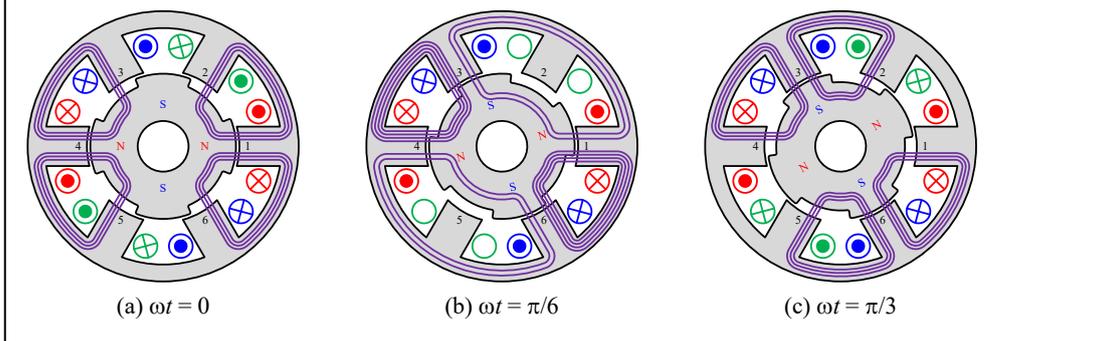


図4 磁束の分布と4つの突極を持つ等価回転子の位置の関係

子と回転磁界が逆方向に違う速度で回転する。そこで、本研究では図4に示すような仮想の回転子を定義して、その仮想の回転子に同期して回転する $\gamma\delta$ 座標系を定義した(図5)。これにより、提案モータにおいても回転数やトルクを容易に制御することが可能となる。図4に示す仮想の回転子は、回転子の突極数が4つになっている点が図3に示した実際の回転子と異なる。このように仮想の回転子を設定すると、図3に示した実際の回転子の場合と磁束の流れが変わらないことがわかる。この等価回転子は、回転子の突極と固定子の歯によって変調されるパーミアンス(磁束の通りやすさ)の分布に由来している。

上記のように等価回転子と座標系を定義することで $\gamma\delta$ 座標におけるパラメータは以下に示すように簡単な形で表現できるようになり、従来の同期モータと同様にトルクや回転速度の制御を行うことが可能であることを示した。

・全鎖交磁束数

$$\begin{bmatrix} \Psi_\gamma \\ \Psi_\delta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_\gamma & M_{\gamma\delta} \\ M_{\delta\gamma} & L_\delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\gamma \\ i_\delta \end{bmatrix}$$

・電圧と電流の関係式

$$\begin{bmatrix} v_\gamma \\ v_\delta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & \frac{Z_R}{2} \omega_m L_\gamma \\ -\frac{Z_R}{2} \omega_m L_\delta & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\gamma \\ i_\delta \end{bmatrix}$$

・トルク

$$T = -\frac{Z_R}{4} (L_\gamma - L_\delta) i_a^2 \sin 2\beta$$

ここで Ψ_γ と Ψ_δ は全鎖交磁束数、 L_γ と L_δ は自己インダクタンス、 $M_{\delta\delta}$ と $M_{\delta\gamma}$ は相互インダクタンス、 i_γ と i_δ および i_a 電流、 v_γ と v_δ は電圧、 R は巻線抵抗、 ω_m は回転子の角速度、 T はトルク、 β は電流位相角を表している。

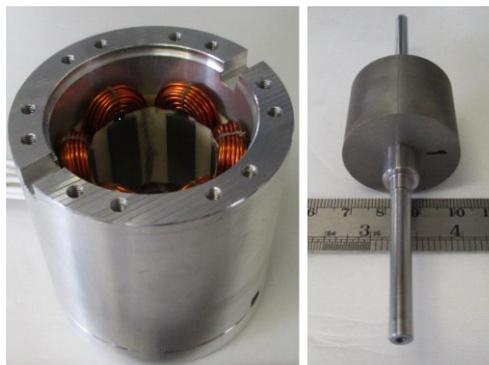


図5 提案モータの試作機

②インダクタンスの測定による $\gamma\delta$ 座標系の妥当性の検証

図5に示す試作機のインダクタンスを測定した。その結果を図6(b)に示す。さらに、固定子座標上で測定されたインダクタンスを座標変換することで、提案する仮想の回転子上の $\gamma\delta$ 座標系におけるインダクタンスを算出した結果を同図(c)に示す。図6(c)に示す通り、自己インダクタンス L_γ および L_δ は回転子の回転角度によらず一定値を取ることが分かる。また、相互インダクタンスはほぼゼロであることが確認できる。このことは、提案する等価回転子とそれに同期して回転する $\gamma\delta$ 座標系が適切な仮定であったことを示している。

③試作機のトルクの測定

図7に試作機のトルク測定の結果を示す。試作機は三相インバータに接続されており、電流のフィードバック制御により任意の大きさ、位相の電流を巻線に流すことができる。試作機の回転子は回転しないように回転角度0度で固定し、 $\gamma\delta$ -座標上の電流指令値を定格電流の70%(9.21A)または50%(6.58A)に相当する大きさに設定し、電流位相角 β を0度から90度まで変化させたときの静止トルクを測定した。また、図7には比較のために同条件でのFEMシミュレーション結果とインダクタンスの実測値から計算した結果を示してある。

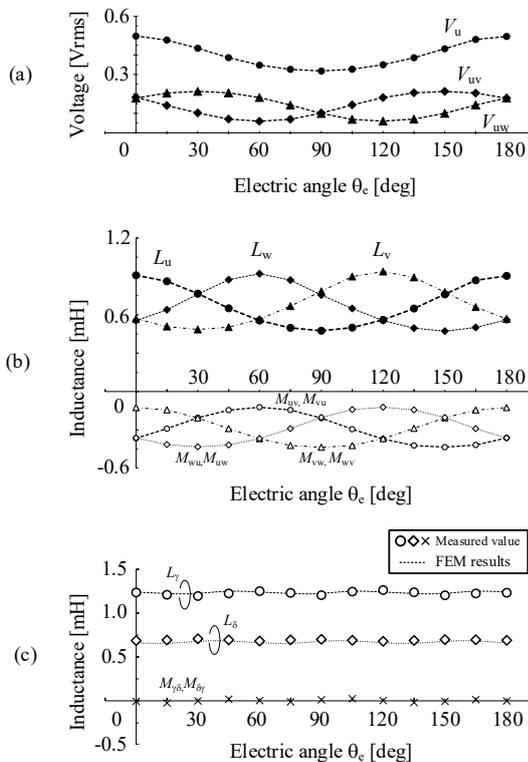


図6 インダクタンスの測定結果

図7の結果から、測定された静止トルクは電流位相角 β に応じて正弦波状に変化し、 $\beta = 45 \text{ deg}$ で最大値を取ることがわかる。トルクの実測値は、FEMの結果よりも約8%小さく、インダクタンスを用いた計算値よりも約15%小さいが、これらの値はよく一致していることがわかる。これらの値が異なる理由は、インダクタンスが定格の20%の電流で測定されたことや、FEAシミュレーションが2次元で行われ、軸方向の漏れ磁束が考慮されていないことなどによると考えられる。これらの結果から、提案モータのトルクは前述の式の形で表せることがわかる。

以上のことから、提案モータを含むパーニアモータは、等価回転子に同期した $\gamma\delta$ -座標系を用いることにより従来の同期モータと同様にベクトル制御を適用することができることが明らかになった。

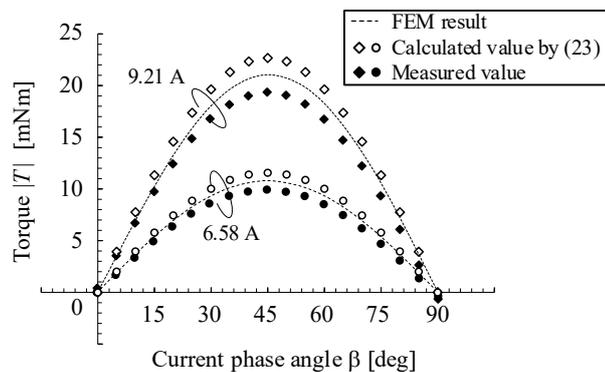


図7 トルクの測定結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 K. Hijikata, J. Kushida and R. Horikawa
2. 発表標題 Speed-Increasing Type Reluctance Vernier Machine
3. 学会等名 IEEE Applied Power Electronics Conference 2024 (国際学会)
4. 発表年 2024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
---------	---------