

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 6 月 28 日現在

機関番号：32678

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2020

課題番号：19K14971

研究課題名（和文）低速高トルク駆動を可能とする磁気浮上回転機のトルクと軸支持力の脈動の低減

研究課題名（英文）Ripple reduction of torque and suspension force in magnetic levitation machines that enable low speed and high torque drive

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） 3,100,000 円

研究成果の概要（和文）：本研究課題では、提案するコンシクエントポール形のベアリングレスパーニアモータについて、(1)磁気支持力の発生に対する電機子反作用の影響の検討、(2)トルクリプルに対する磁気的なギャ比の影響の検討、を実施した。

提案モータの電圧方程式からトルクと電流の関係式および磁気支持力と電流の関係式を導出した。導出した関係式から、(A)提案モータの磁気支持力は従来型のコンシクエントポール形ベアリングレスモータと同様に直流磁気支持が可能であること、(B)電機子反作用によって磁気支持力の方向が偏ること、(C)発生するトルクリプルの次数がギャ比 $Z_r/p$ と固定子歯数 $Z_s$ の最小公倍数となることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で提案するコンシクエント形ベアリングレスパーニアモータは、磁気浮上の機能を有するベアリングレスモータと、構造的に低速・高トルク駆動に適する永久磁石型パーニアモータを機能的に統合することで、磁気浮上の非接触という特長を維持したままに高トルクの発生を可能とする新しい電動機である。本研究の成果により、提案モータのより安定な浮上制御系の構築や、安定した回転を実現することができる。

提案モータは潤滑が不要で比較的大きなトルクを発生できるため、例えば半導体製造装置などの光線浄土環境で使用されるアクチュエータに適用することで半導体の歩留まりや性能の向上に寄与できると考えられる。

研究成果の概要（英文）：In this research project, (1) the effect of armature reaction on the generation of magnetic suspension force and (2) the effect of magnetic gear ratio on the torque ripple were investigated for the proposed consequent pole type bearingless vernier motor.

From the voltage equation of the proposed motor, the relation between torque and current and the relation between magnetic suspension force and current were derived. From the derived equations, it was clarified that (A) the magnetic suspension force of the proposed motor can be supported by DC current as well as the conventional consequent pole type bearingless motors, (B) the direction of the magnetic suspension force is biased by the armature reaction, and (C) the order of the torque ripple is the least common multiple of the gear ratio  $Z_r/p$  and the number of stator teeth  $Z_s$ .

研究分野：パワーエレクトロニクス

キーワード：磁気浮上 電動機 ベアリングレスモータ 高トルク

### 1. 研究開始当初の背景

ベアリングレスモータは、電動機に磁気軸受の機能を組み込んだ電磁機械であり、単体でトルクの発生と回転子の非接触支持を可能とする。したがって、ベアリング等の機械的な軸受が不要であり、無摩擦・無潤滑・無発塵などの優れた利点を有するとともに、機械摩擦が発生しないため高速での駆動に適するといった特長がある。

しかし、数多くの優れた特長を有する一方で、ベアリングレスモータや磁気軸受を用いたモータは、「ギヤなどの機械的接触を有する減速機構を利用できない」という大きな制約がある。これは、機械的接触を有する減速機構を用いた場合、磁気浮上の利点が全て相殺されてしまうためである。つまり、従来のベアリングレスモータを含む磁気浮上回転機は、本質的にダイレクトドライブ用途にしか適用することができないため、その適用範囲が比較的低トルクの用途に限られていた。(ダイレクトドライブとは、ファンの羽根車のように、減速機構などを介さず電動機の出力軸に直接に負荷を接続することを言う。)

そこで、申請者は構造的に高トルクを発生可能なパーニアモータに着目し、ベアリングレスモータと組み合わせることで磁気浮上の非接触という特長を維持したままに高トルクが発生可能な低速・高トルク用途向けの磁気浮上回転機「ベアリングレスパーニアモータ」を提案している。パーニアモータは同期モータの一種で、図1のように固定子と回転子にそれぞれ数の異なる多数の歯を備えたステッピングモータのような鉄心構造をしている。回転子と固定子の鉄心の歯数の差によって周方向に磁束の通りやすい部分と通りにくい部分が周期的に分布しているため、これらの鉄心に一般的な同期電動機と同じように回転磁界を与えると、空隙において歯数の比に応じた高調波磁界が発生する。パーニアモータは、この高調波磁界に同期して回転することで、磁気的な結合によりあたかも機械的な減速機を用いたかのように低速・高トルクでの駆動を行うことができる。このことは、単純に電動機の極数を大きく設計してトルクを増した場合に比べ、より低速かつ高トルクで電動機を駆動させることができる。したがって、このパーニアモータに磁気浮上技術を適用することで、低速・高トルクと磁気浮上による非接触という、これまでにない新しい機能を備えたモータを実現できる。

これまでの研究では、科研費 16K21420 において、申請者はコンシクエントポール形ベアリングレスパーニアモータを提案している。永久磁石を使用することでトルク密度の向上を図るとともに、浮上のための磁束の磁路を確保し大きな軸支持力を両立できる特長がある。鉄心のみで構成されるリラクタンス型(図1)に対して2倍程度の大きなトルク密度を実現可能であることを解析と実機試験により確認している。また、一般的なコンシクエントポール型ベアリングレスモータ同様に直流電流で浮上の制御が可能であることを明らかにした。

優れた特性が明らかになった一方で、電機子反作用によって軸支持力の方向が発生したい方向に対してずれを生じる、回転子と固定子の歯数で決まる磁気的なギヤ比によりトルクリプルが大きく変動する、などの課題も同時に明らかになった。これらは、従来の一般的なコンシクエントポール型ベアリングレスモータでは発生せず、提案するコンシクエントポール型ベアリングレスパーニアモータの固有の課題である。したがって、これらの課題を検討・解決することが提案モータの実用化に向けて非常に重要である。

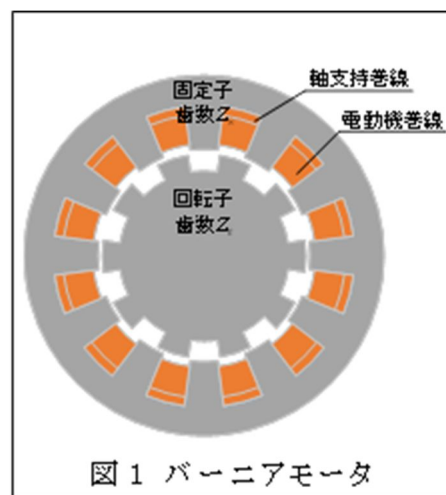


図1 パーニアモータ

### 2. 研究の目的

本研究課題の目的は、提案するコンシクエントポール形ベアリングレスパーニアモータについて、以下の二点を明らかにすることである。

- (1) 軸支持力の発生に対する電機子反作用の影響
- (2) トルクリプルに対する磁気的なギヤ比の影響

### 3. 研究の方法

本研究課題は、二か年の計画であった。当初の計画では、まず初年度に上記二つの課題を有限要素法の結果を援用しつつ解析的に検討し、その後、次年度に検討内容を反映し性能向上した試作機的设计・製作を実施する予定であった。しかし、2019年の大型台風による本学の浸水被害や、2020年以降のコロナ禍による様々な制約により、試作機的设计・制作は実施されていない。

したがって、変更後の計画では研究の目的に示された二つの課題について、明確に数式的に表現することに注力して研究を進めた。(1)については、従来の一般的なコンシクエントポール形ベアリングレスモータでは、電動機の極数が8極以上の場合に軸支持力に対して電機子反作用

による影響が生じないことが知られている。そこで、提案モータについても磁気回路法などにより解析的に軸支持力を導出し、なぜ従来のものと異なる結果が得られたのかを明確にする。また、その結果を用いて構造的に非干渉化が可能かどうかを検討し、さらに、構造的解決が困難な場合は制御的解決方法を模索する。(2)についても、基本的には(1)と同じアプローチを取る。これまでの研究により、提案モータのトルクリプルの次数は、パーニアモータの磁氣的な減速比に比例することが確認されている。まずはこの事実を解析的に数式で表現し、その結果を用いてトルクリプルを低減する構造、具体的には歯部の形状を検討していく。

#### 4. 研究成果

固定子座標系、電動機主磁束座標系、軸支持主磁束座標系および回転子座標系を図2のように定義する。提案するコンシクエントポール形ベアリングレスモータは、回転子の回転方向とは逆にギア比 $Z_R/p_m$ 倍の速度で回転する回転磁界に固定子巻線の起磁力を同期させることで低速高トルクを実現するモータである。そこで、通常の同期モータの制御で用いられるdq座標系ではなく、同期する電動機主磁束座標系 $\gamma\delta$ を新たに定義する。 $\gamma\delta$ 座標系は、回転子の回転方向とは逆に $Z_R/p_m$ 倍の速度で逆転する座標系である。

図3にコンシクエントポール形ベアリングレスモータの構造および電動機巻線・磁気支持巻線の配置を示す。回転子には永久磁石が取り付けられており、すべての永久磁石は外側がN極になるように配置されている。

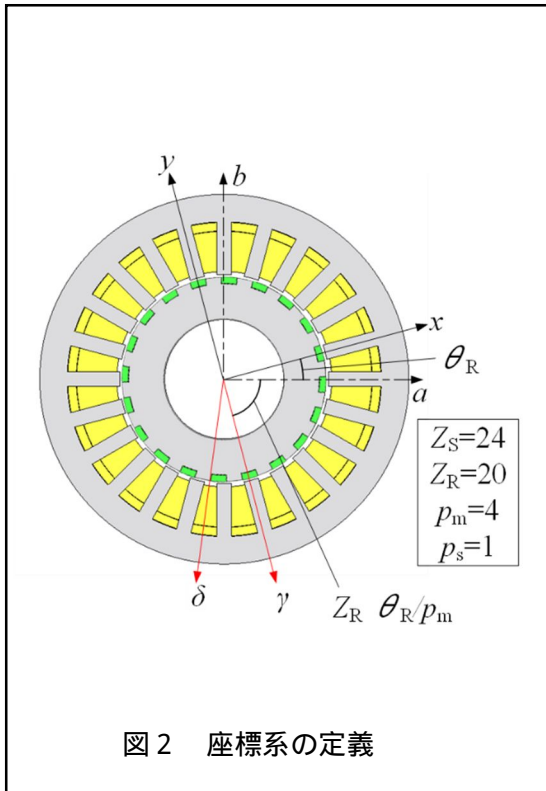


図2 座標系の定義

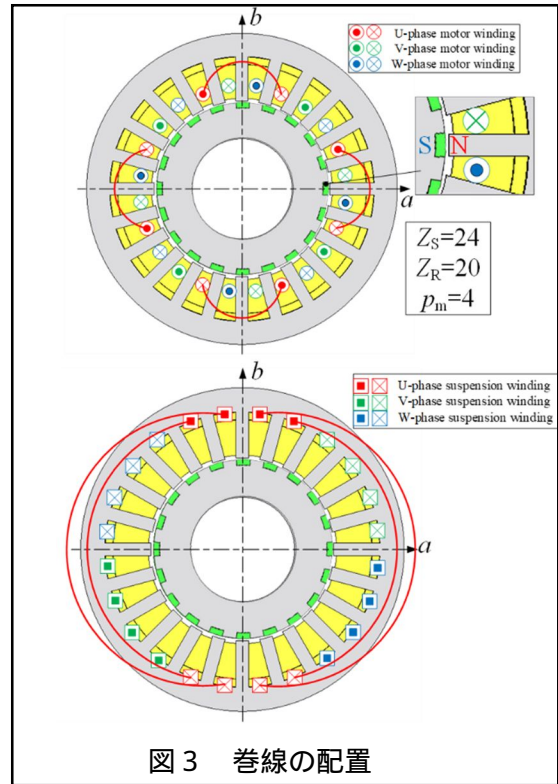


図3 巻線の配置

図3のモデルに基づき電圧方程式を導出すると、ab座標上における電圧方程式は式(1)のように求まる。

$$\begin{bmatrix} v_{ma} \\ v_{mb} \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_{ma} \\ i_{mb} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} L_1 - L_2 \cos 2\theta_e & L_2 \sin 2\theta_e \\ L_2 \sin 2\theta_e & L_1 + L_2 \cos 2\theta_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ma} \\ i_{mb} \end{bmatrix} + \omega \Psi \begin{bmatrix} -\sin \theta_e \\ -\cos \theta_e \end{bmatrix} \quad (1)$$

さらに、以下の式(2)に示す ab 座標系から $\gamma\delta$ 座標系への座標変換を式(1)の ab 座標上の電圧方程式に適用することで $\gamma\delta$ 座標上の電圧方程式である式(3)を得られる。

$${}^{\gamma\delta}C_{ab} = \begin{bmatrix} \cos Z_R \theta & -\sin Z_R \theta \\ -\sin Z_R \theta & -\cos Z_R \theta \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} v_{m\gamma} \\ v_{m\delta} \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_{m\gamma} \\ i_{m\delta} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} L_{m\gamma} & 0 \\ 0 & L_{m\delta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{m\gamma} \\ i_{m\delta} \end{bmatrix} + \omega \begin{bmatrix} 0 & -L_{m\gamma} \\ L_{m\delta} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{m\gamma} \\ i_{m\delta} \end{bmatrix} + \omega \Psi \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

さらに、 $\gamma\delta$ 座標上の電力の関係式は式(4)で表され、その第三項が機械的な出力に変換される電力であるため、第三項を機械的な出力  $T\omega_R$  と等しいと置くと、提案するモータのトルク  $T$  は式

(5)の様を求める。

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} v_{m\gamma} \\ v_{m\delta} \end{bmatrix} [i_{m\gamma} \quad i_{m\delta}] &= R_s(i_{m\gamma}^2 + i_{m\delta}^2) + \frac{d}{dt}(L_{m\gamma}i_{m\gamma}^2 + L_{m\delta}i_{m\delta}^2) \\ &+ \omega(i_{m\gamma}i_{m\delta}(L_{m\delta} - L_{m\gamma}) + \Psi i_{m\delta}) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} T &= Z_R(i_{m\gamma}i_{m\delta}(L_{m\delta} - L_{m\gamma}) + \Psi i_{m\delta}) \\ &= \frac{Z_R}{p_m} p_m(i_{m\gamma}i_{m\delta}(L_{m\delta} - L_{m\gamma}) + \Psi i_{m\delta}) \end{aligned} \quad (5)$$

この式(5)は、提案するコンシクエントポール形ベアリングレスモータのトルクが、一般的な dq 座標上で制御される従来の同期モータのトルクと同形の式で表されることを表している。一方で、係数は極対数  $p_m$  から回転子永久磁石の極対数  $Z_R$  となっており、全体にギア比  $Z_R/p_m$  を乗じた形になっていることが分かる。

磁気支持力は、電動機巻線と磁気支持巻線それぞれに鎖交する磁束から系に蓄えられる磁気エネルギーを求め、仮想変位の原理により磁気エネルギーを偏微分することで導出することができる。

巻線に鎖交する磁束は式(6)で表される。

$$\begin{bmatrix} \lambda_{m\gamma} \\ \lambda_{m\delta} \\ \lambda_{s\gamma} \\ \lambda_{s\delta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{m\gamma} & 0 & M'_{m\gamma,s\gamma}x & -M'_{m\gamma,s\gamma}y \\ 0 & L_{m\delta} & M'_{m\delta,s\delta}y & M'_{m\delta,s\delta}x \\ M'_{m\gamma,s\gamma}x & M'_{m\delta,s\delta}y & L_{s\gamma} & 0 \\ -M'_{m\gamma,s\gamma}y & M'_{m\delta,s\delta}x & 0 & L_{s\delta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{m\gamma} \\ i_{m\delta} \\ i_{s\gamma} \\ i_{s\delta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \lambda_m \\ 0 \\ \lambda'_{m\gamma}x \\ \lambda'_{m\delta}y \end{bmatrix} \quad (6)$$

式(6)から巻線に蓄えられる磁気エネルギーは式(7)のように求まる。

$$\begin{aligned} W_m &= \frac{1}{2}(L_{m\gamma}i_{m\gamma}^2 + L_{m\delta}i_{m\delta}^2 + L_{s\gamma}i_{s\gamma}^2 + L_{s\delta}i_{s\delta}^2) \\ &+ M'_{m\gamma,s\gamma}x i_{m\gamma}i_{s\gamma} - M'_{m\gamma,s\gamma}y i_{m\gamma}i_{s\delta} + M'_{m\delta,s\delta}y i_{m\delta}i_{s\gamma} \\ &+ M'_{m\delta,s\delta}x i_{m\delta}i_{s\delta} \\ &+ i_{m\gamma}\lambda_m + i_{s\gamma}\lambda'_{m\gamma}x + i_{s\delta}\lambda'_{m\delta}y \end{aligned} \quad (7)$$

式(7)を半径方向変位  $x$  と  $y$  で偏微分することで磁気支持力が式(8)のように求められる。

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial W_m}{\partial x} \\ \frac{\partial W_m}{\partial y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda'_m + M'_{m\gamma,s\gamma}i_{m\gamma} & M'_{m\delta,s\delta}i_{m\delta} \\ M'_{m\delta,s\delta}i_{m\delta} & \lambda'_m + M'_{m\gamma,s\gamma}i_{m\gamma} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{s\gamma} \\ i_{s\delta} \end{bmatrix} \quad (8)$$

この式(8)は、提案するコンシクエントポール形ベアリングレスモータが、適切に座標系を設定することで従来型のコンシクエントポール形ベアリングレスモータと同様に直流電流で磁気支持が可能であることをしめしている。一方で、従来型とは異なり係数行列の反対角項に電動機のトルク電流に比例する項が存在する。このことは、提案モータでは電動機の反作用の影響でトルク発生時に磁気支持力の方向がずれるということを表している。

本研究課題の目的は、提案するコンシクエントポール形ベアリングレスパーニアモータについて、軸支持力の発生に対する電機子反作用の影響およびトルクリプルに対する磁気的なギア比の影響を明らかにすることであった。今後は、上記の成果を用いて、磁気支持制御と電動機制御の非干渉化が可能な構造や制御系、トルクリプルを低減する構造、を検討していく。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計0件

〔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
---------	---------