

平成 30 年 6 月 27 日現在

機関番号：32678

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2017

課題番号：16K21420

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高性能化に関する研究

研究課題名(英文) A research for improving performance of magnetic levitated motors for low-speed and high-torque drive

研究代表者

土方 規実雄 (Hijikata, Kimio)

東京都市大学・工学部・助教

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)：本研究では、構造的に高トルクを発生可能なパーニアモータをベアリングレスモータと組み合わせたベアリングレスパーニアモータを提案している。本研究課題では、特に永久磁石の利用によるトルク密度向上を狙い、コンシクエントポール型の回転子構造を有するベアリングレスパーニアモータを提案し、その試作機を作成した。提案構造は、先行研究で提案したリラクタンス型と比べ、同一体格において、同程度の磁気支持力を維持しつつ2倍以上のトルク密度を達成できることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：We propose bearingless vernier motors. That motors are combined the function of bearingless motor and vernier motor which can generate high torque structurally. In this research, we proposed and manufactured a consequent-pole type bearingless vernier motor to improve torque density of bearingless vernier motor by using permanent magnets. The prototype of proposed consequent-pole type can achieved 2 times or higher torque density than reluctance type in same volume and same magnetic suspension force.

研究分野：磁気浮上

キーワード：磁気浮上 ベアリングレスモータ パーニアモータ ダイレクトドライブ コンシクエントポール型

1. 研究開始当初の背景

これまで、ベアリングレスモータ(以下、BelM)等の磁気浮上技術の適用はポンプやファン等の比較的高速・低トルクのダイレクトドライブ用途に限られ、高トルクが必要とされるアクチュエータ等への適用は行われてこなかった。これは、BelM等の磁気浮上回転機が非接触による無摩擦や無潤滑といった優れた利点を有する一方で、機械的接触をとまなうギアなどの減速機構を一切利用できないためである。そこで、本研究では、構造的に高トルクを発生可能なパーニアモータをBelMと組み合わせたベアリングレスパーニアモータ(以下、VBelM)を提案している。本応募研究課題では、特に永久磁石の利用による更なるトルク密度向上・高性能化を狙う。

2. 研究の目的

本応募研究課題においては、VBelMのさらなる高トルク密度化・高性能化を実現するため「永久磁石型VBelM」を提案し、その開発を行う。具体的には、期間内に以下の三点の達成を目指す。

- (1) 永久磁石によるトルク密度向上と電磁気力発生を両立する電動機構造の提案
- (2) 三次元有限要素法解析を用いた試作機的设计・製作
- (3) 実機試験による性能の評価

3. 研究の方法

本応募研究課題では、トルク密度 8 Nm/l を目標として、永久磁石型 VBelM の開発を行う。具体的には、期間内に下記の項目の達成を目指す。

- (1) 永久磁石によるトルク密度向上と磁気支持力発生を両立する構造の提案
- (2) 三次元有限要素法解析を用いた試作機的设计・製作
- (3) 実機試験による性能の評価

以上により、提案する低速高トルク用途向け永久磁石型ベアリングレスパーニアモータの基本的な特性を明らかにするとともに、

実用化の可能性を検証する。

4. 研究成果

本研究の主な成果は、下記の通りである。

- (1) 大きなトルク密度と磁気支持力を両立する構造として、永久磁石を用いたコンシクエントポール型 VBelM を提案した。
- (2) 三次元有限要素法解析により、提案するモータが高いトルク密度と磁気支持力を両立できることを示した。解析上、最大トルク平均値 14.7 Nm、トルク密度 15.8 Nm/l を達成することを確認した。(固定子外径 130 mm、固定子積厚 70 mm で算出)
- (3) 上記の設計にもとづき、試作機を製作した。しかしながら、当初予定していた試作機による特性評価の実施には至らなかった。

各項目についての詳細を以下に示す。

(1) 永久磁石型構造の検討

これまでに提案していた永久磁石を用いていないリラクタンstypeに対し、トルク密度向上を目的とし永久磁石を用いたタイプの構造の検討を行った。永久磁石を用いることでギャップ部の磁束密度を向上しトルク密度を向上できるが、表面磁石貼り付け型のように全周を永久磁石で覆う構造では、その磁気抵抗の大きさゆえに磁気支持力発生のための磁束が妨げられ有効に磁気支持力を発生できなくなってしまう。そこで、本研究では図1に示すようなコンシクエントポール型の回転子構造を採用した。この構造は、回転子の歯間に設けられる永久磁石が、すべて同じ向きに着磁されており(図1ではギャップ側がN極)、永久磁石のN極から流れ出た磁束が回転子の歯に戻ってくるため、回転子の歯はS極のように振る舞う。コンシクエントポール型では、永久磁石の間の回転子鉄心部を磁気支持力発生のための磁束が通過できるため、有効に磁気支持力を発生できる。

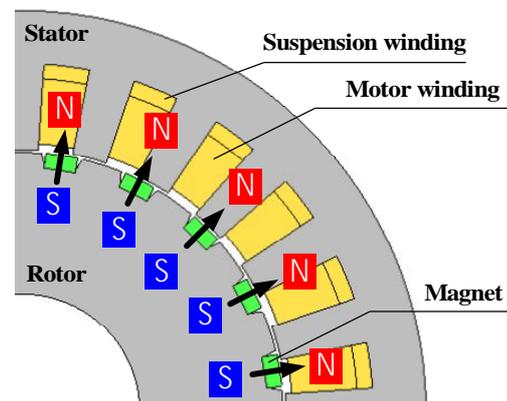


図1 コンシクエントポール型ベアリングレスパーニアモータの構造

固定子には、電動機としてトルクを発生するための電動機巻線と、浮上のための磁気支持力を発生するための磁気支持巻線が備えられている。コンシクエントポール型 BelM では電動機の極数によらず、2 極の磁気支持巻線に直流電流を流すことで一定方向の磁気支持力を発生することができる。さらに、電動機の極対数を 8 極以上とすることで軸支持力が回転角度に依存しなくなるとともに、軸支持力に対するトルク電流の干渉を無くすことができることが知られている。極数を変更したいくつかの解析結果によって、電動機の極数を 8、磁気支持巻線の極数を 2 と決定した。パーニアモータにおいて電動機の極対数は回転子の歯数と固定子の歯数の差の絶対値に等しくなければならない。したがって、解析結果に合わせて、電動機の極対数 4 に対してそれぞれの歯数の差が 4 となるように、回転子歯数 Z_R を 20、固定子歯数 Z_S を 24 とした。固定子歯数の方を大きく設定したのは、外径の大きい固定子側の歯数を大きくすることで、固定子の歯部における磁気飽和の緩和と巻線スロットの面積確保を狙っている。これらの解析の詳細は、後述の雑誌論文に記載されている。

(2) 試作機的设计・製作

図 1 に示した提案モータに対して、様々な観点から構造を検討した。特に磁気支持力の特徴に大きな影響を与えたのは、固定子ヨーク幅と回転子ティースの形状である。

提案するコンシクエントポール型 VBelM においては、通常の電動機と比べ固定子ヨークを広く設計しておく必要がある。これは、電動機として駆動するための磁束に加え、磁気支持のための磁束が固定子ヨークを通過するためである。特に、コンシクエントポール型では磁気支持巻線の極数が 2 極であるため磁気飽和の影響を受けやすい。したがって、磁気飽和の発生に注意し、定格の電動機電流および定格の磁気支持電流の範囲で互いに干渉を生じないように固定子ヨーク幅を決定した。

回転子ティースは、図 1 に示したように根元が広がった台形に近い形状としている。固定子表面に備えられている永久磁石は、コストを下げるために環状扇形ではなく単純な長方形断面の永久磁石を使用している。その場合、これらの永久磁石に挟まれたティースは、根元が狭まるような形状となり磁気飽和を生じやすくなる。この対策として、回転子外周に占める永久磁石と鉄心の割合を 1:1 ではなく、鉄心が多くなるように調整した。これにより、ティースの表面側に対して根元が狭くなっても定格電流の範囲内で磁気飽和が生じない構造とした。さらに、永久磁石の直近部分の鉄心を削り、回転子ティースを台形に近い形状とした。この部分の鉄心は回転子内で永久磁石の磁束を短絡する磁路を形成するため、固定子巻線に鎖交して有効に利

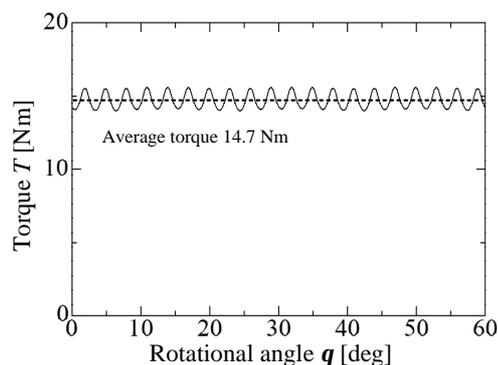


図 2 最大トルクの解析結果 (@200min⁻¹)

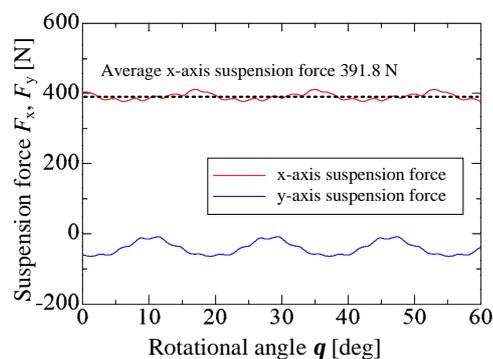


図 3 最大磁気支持力の解析結果 (@200min⁻¹)

表 1 解析モデルの諸元

固定子外径	D_{OS} [mm]	130
固定子内径	D_{IS} [mm]	85
回転子外径	D_{OR} [mm]	84
固定子積厚	L_S [mm]	70
回転子積厚	L_R [mm]	77
ギャップ長(固定子-回転子間)	g [mm]	0.5
磁石径方向厚	h [mm]	2.5
定格回転数	N [rpm]	200
巻線径	d [mm]	0.4
電流密度	J [A/mm ²]	8
巻線占積率	A [%]	40
電動機巻線巻数	n_m [turn/slot]	54
軸支持巻線巻数	n_s [turn/slot]	27
電動機巻線並列数		4
軸支持巻線並列数		2
鉄心材料		35H300
磁石材料		NMX-40CH

用できる磁束を減少させる。したがって、回転子表面側の鉄心で、永久磁石に接していた部分を切り落とすことで短絡磁路の磁気抵抗を増すような構造とした。

最終的に実機を製作した設計におけるトルクと磁気支持力の解析結果を、図 2 および図 3 に示す。解析の諸元を表 1 に示す。また、図 1 に示した提案構造は、最終的に製作した実機と同じ寸法比で描かれている。図 2 では、最大トルクを発生する電流条件で解析を行っている。このとき、最大トルクの平均値は 14.7 Nm、平均値に対する脈動率は 11.3 % であった。図 3 では、トルクを発生しない状態

で最大の x 軸方向磁気支持力を発生する電流条件で解析を行っている。このとき、最大磁気支持力の平均値は 398.1 N、平均値に対する脈動率は 8.4%であった。解析上ではあるが、最大トルクは同体格のリラクス型に対して 2 倍以上、最大磁気支持力は回転子重量に対して 5 倍以上を達成することを確認した。

一方で、パーニア構造を持たない従来型のコンシクエントポール型ベアリングレスモータでは電動機の極数が 8 極以上のときには電動機巻線のトルク電流と磁気支持巻線の電流の干渉が存在しないことが知られていたが、提案モータでは従来型と異なり、トルク電流の増加により磁気支持力が干渉を受け、その発生方向が変化することが確認された。回転子と固定子のパーニア構造によって生じる高調波磁束の影響であると考えられる。今後、この点についても詳細に検討を進める予定である。また、この現象に関する解析の詳細は、後述の雑誌論文で報告されている。

(3) 製作した実機について

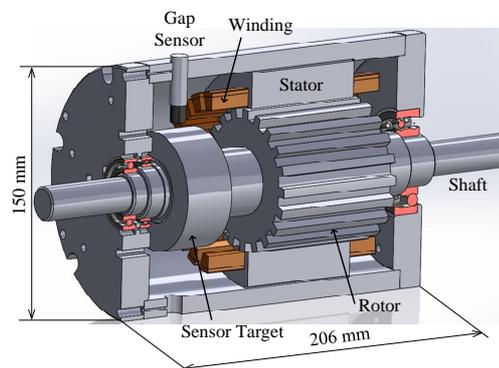
図 4 に、上記の設計にもとづき製作した試作機の外観を示す。また、図 5 に設計した試験装置の外観を示す。

図 4 に示した試作機は、中央に提案するコンシクエントポール型 VBelM のユニットを備え、トルクと同時に半径方向に任意の磁気支持力を発生することができる。本試作機は、提案モータの原理検証を目的としているため、完全磁気浮上が可能な構成にはなっていない。左端の軸受と主軸には半径方向に ± 0.1 mm ほどの可動範囲があり、右端の自動調心玉軸受を支点として左端側を非接触で駆動する構成となっている。主軸の半径方向変位は二つの渦電流変位センサによって制御器にフィードバックされ、常に主軸が固定子中心に浮上するよう浮上制御が行われる。しかしながら、試作機の納入後、加工業者による製作上のミスが明らかになったため、修正作業により期間内の実機試験の実施には至らなかった。

図 5 の試験装置は、左端から順に提案モータの試作機、トルクセンサ、負荷となるパウダブレーキが同一軸上に取り付けられており、試作機のトルク試験を実施することが可能である。磁気支持力の試験を実施する際には、試作機の主軸左端にばねや重りなどにより荷重するための治具が取り付けられるようになっている。

今後の展望

本研究課題の実施期間内において、目標とするトルク密度を達成する VBelM 試作機の設計を完了し、試作機を製作することができた。しかしながら、試作機における特性の評価を実施するには至らなかった。今後、試作機における特性の評価を実施する必要がある。また、解析を通じて新たに明らかになっ



(a) 3D-CAD モデル



(b) 実機の写真

図 4 製作した試作機の外観

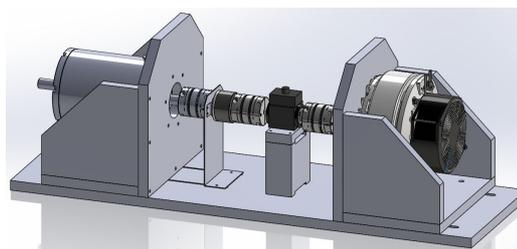


図 5 設計した試験装置の外観

た、提案するコンシクエントポール型 VBelM における電動機電流と磁気支持電流の干渉について調査を進めていく必要があると考えられる。

これらの研究を通じ、低速・高トルク用途における磁気浮上技術適用の可能性を検討していきたい。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

南香夏子, 関根隆弘, 土方規実雄, 田中康寛, 「永久磁石型ベアリングレスパーニアモータにおける永久磁石と電動機巻線の極数の検討」, 日本 AEM 学会誌, 査読有, Vol. 26, No. 1, 2018, pp. 71-76, DOI: 10.14243/jsaem.26.71

〔学会発表〕(計 4 件)

K. Minami, T. Sekine, K. Hijikata and Y. Tanaka, "A Proposal of Consequent-Pole Type Bearingless Vernier Motor", The

12th IEEE International Conference on Power Electronics and Drive Systems, 2017

南香夏子, 関根隆弘, 土方規実雄, 田中康寛, 「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における固定子と回転子の歯数がトルクと軸支持力に与える影響」, 平成29年産業応用部門大会, 2017

南香夏子, 関根隆弘, 土方規実雄, 田中康寛, 「永久磁石型ベアリングレスパーニアモータにおける永久磁石と電動機巻線の極数の検討」, 第29回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム, 2017

南香夏子, 関根隆弘, 土方規実雄, 田中康寛, 「永久磁石型ベアリングレスパーニアモータの提案」, 平成29年電気学会全国大会, 2017

〔その他〕

ホームページ等

東京都市大学研究者情報データベース

<http://www.risys.gl.tcu.ac.jp/>

東京都市大学 計測電機制御研究室

<http://www.eml.mse.tcu.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

土方 規実雄 (HIJIKATA, Kimio)

東京都市大学・工学部・助教

研究者番号：70710507