

令和 5 年 5 月 11 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04444

研究課題名(和文)5相2軸独立出力モータの開発

研究課題名(英文)Development of a 5-phase motor with 2 controllable output shaft

研究代表者

新口 昇(Niguchi, Noboru)

大阪大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：60614039

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)：2軸独立出力モータとして、1セットのコイルで回転と直動を同時に行うことが可能な3相6相回転直動モータの開発に取り組んだ。申請者が提案する永久磁石配置とステータ磁極の配置では、電流重畳技術を用いることで、回転と直動が互いに干渉することなく独立して同時に駆動が可能であるが、この現象を数学モデルを用いたシミュレーションにより明らかにした。また、ベクトル制御下での有限要素解析と試作機による実験により、回転と直動方向の各軸の位置決めが可能であることを示すとともに、両軸同時の位置決めを実現できることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

2軸独立出力モータの実用化により、これまで2台必要であったモータが1台で運用でき、特に今回の課題のような回転と直動を1つのモータで実現することにより、半導体実装機のノズルに大幅な革命をもたらす。半導体実装機のノズルは、回転モータとベルトの組み合わせで複数のノズルに対して同時に同じ運動をさせるが、これが無駄になっている。そのため、各ノズルに回転モータと直動モータが搭載されれば、全ノズルを互いに独立に駆動することが可能となり、半導体実装に要する時間が大幅に短縮されることが期待される。

研究成果の概要(英文)：I developed a motor with 2 controllable output shaft, which consists of 1 set of coils. This motor enables rotary and linear motions using superimposed currents of 3 and 6 phases, where the proposed permanent magnet arrangement and stator tooth arrangement are needed. In this motor, 2 motions do not interfere with each other, and this is investigated by the simulation using the mathematical model. In order to show the effectiveness of the motor, finite element analysis under vector control and measurements on a prototype were carried out. As a result, the positioning of rotary and linear motions was available.

研究分野：回転機

キーワード：多相モータ

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

機器の電動化に伴ってモータとインバータの台数が増加している中、2つの出力軸を有する6相モータ(6相2軸独立出力モータ)を1台の6相インバータで駆動する技術が提案されている。この技術を適用したモータの一例を挙げるが、1つのステータと2つのロータがあり、2つのロータの出力軸は互いに独立である。ロータの極数は互いに異なるが、ステータには1セットの6相コイルしか存在しない。一方のロータを6相コイルを使って3相モータとして駆動させ、他方のロータを6相コイルを使って6相モータとして駆動させることが可能なような極数スロット数コンビネーションが採用されている。両ロータを同時に駆動させる場合には、それぞれのロータを駆動させるための電圧指令を重畳してインバータに入力することで、1セットの6相コイルによる2つの独立した出力を実現している。このとき、一方のロータを回転させる電流は、電流波形と誘起電圧波形が正弦波であれば、他方のロータにトルクを発生させない。仮に誘起電圧波形が正弦波ではなかった場合には、他方のロータにトルクを発生させるが、平均トルクはゼロになる。

この技術により、2台のモータを1台の2軸独立出力モータとし、1台の6相インバータにより駆動させることで、モータとインバータの台数を半減させることができた。しかし、この構造ではステータが2つのロータには挟まれているために放熱性が低いことや、支持が困難という課題があり、実用化が困難という課題があった。この課題に対して、申請者は軸方向に2つのロータを配置した2軸独立出力モータで特性検証を実施してきた。このモータでは、ステータは最外周にあるために固定が容易で、さらに放熱性が高く、2つのロータの支持も容易となっている。しかし、モータの構造は簡素化されたが、2軸独立出力モータを駆動させるために必要なインバータは2つの3相インバータを組み合わせた6相インバータであり、インバータの構成やサイズが従来とは変わらない。さらに、3相と6相の組み合わせのため、一方のロータの巻線係数が低くなり、2台のモータを1台の2軸独立出力モータにしたメリットが小さい。このようなことから、2軸独立出力モータは、実用化には至っていない。

2. 研究の目的

本研究では、申請者が提案する5相インバータで駆動する2軸独立出力モータを洗濯機用途に開発することを目的とする。現行の洗濯機では、ドラムとパルセータを駆動させるモータが共通のため、ドラムとパルセータを互いに逆方向に回転させるといった運転ができないが、2軸独立出力モータを使えば可能となる。これにより、ドラムとパルセータを逆方向に回転させるねじり洗いなど、これまででできなかった洗濯方法を実現可能となる。

これまでの2軸独立出力モータでは、誘起電圧波形と電流波形が正弦波であれば、3相交流と6相交流が発生するトルクは干渉せず、両ロータを独立に駆動できることがわかっている。また、合成電流に対して3相および6相のdq変換を適用することで、それぞれの電流に分離できることがわかっている。一般的な5相モータは、72度位相差の交流によって駆動するが、クラーク変換行列とその転置行列の積が単位行列になることから非線形方程式を解くと、144度位相差の交流でも駆動可能であることわかる。ここで、72度位相差と144度位相差の交流のパーク変換行列は同じであるが、クラーク変換行列は異なることから、全体座標系からdq座標系へ変換する行列も異なる。

以上より、5相の2軸独立出力モータの極数スロット数の組み合わせの一例として、スロット数を10とした場合、72度位相差の交流で駆動するロータは4極、144度位相差の交流で駆動するロータは8極が挙げられる。ベクトル制御で駆動するが、72度位相差と144度位相差の合成交流電流に対して、それぞれの変換行列を用いることで、合成電流を72度位相差と144度位相差の交流に分離することができる。このように、申請者が提案する5相インバータで駆動する5相2軸独立出力モータにおいても、これまでの6相インバータで駆動する3相6相2軸独立出力モータと同様、2つのロータを独立に制御可能であることがわかる。

3. 研究の方法

(1) 数値シミュレーションによる試作機の設計(～2020年12月)

モータの極数スロット数を選定する上で、巻線係数のデータベース化が必要である。これまで、5相モータの巻線係数は明らかにされていないため、極数スロット数ごとに巻線係数を計算し、最も巻線係数が高い組み合わせを明らかにする。その上で、要求仕様に応じた試作機を設計する。

(2) 試作機の製作と評価(～2021年9月)

試作機を製作するとともに、5相2軸独立出力モータを駆動させる制御プログラムを開発する。その後、特性評価と課題抽出を実施することで、5相モータにおけるシミュレーションと試作機の差を明らかにする。

(3) 課題解決技術の開発(～2022年3月)

上記試作機の評価により判明した課題解決技術を開発する。

(4) 改良機の製作と実機試験（～2023年3月）

改良機を製作し、評価するとともに、実機に搭載して評価することで、製品搭載時の挙動を把握し、本研究以降の実用化に向けた開発課題を明らかにする。

4. 研究成果

2軸独立出力モータとして、回転と直動を独立して制御可能なモータを提案した。本モータは、3相と6相の電流重畳で成立するが、これはロータの永久磁石を格子状に配置した上、ステータのティースをらせん状に配置することで実現した。これにより、3相交流と6相交流が干渉せず、回転と直動を独立して制御可能である。

本モータは、回転が8極6スロット、直動が2極6スロットとなっており、回転トルクと直動推力の両方を大きくすることができる組み合わせである。同時に、多極化することでコギングトルクを大幅に低減している。

回転と直動が互いに干渉しない原理を数学的に示した上、数学モデルを用いたシミュレーションにより検証した。その結果、直動と回転をそれぞれ独立に制御できる上、直動と回転を同時に指令した場合にも位置決め制御が成立することを示した。

最後に、試作機を用いた実験により、原理の妥当性を検証した。回転方向と直動方向の単独駆動での位置決めは当然であるが、両軸駆動での位置決め制御に対しても、問題なく追従することを確認した。これにより、直動と回転を同時に成立させるモータ構造と制御手法の妥当性が明らかになった。

本開発技術は、半導体実装機のノズルの制御に有効で、産業界への大きな貢献が期待できる。現状、半導体実装機のノズルは、回転運動をベルトを使ってノズルに伝えており、複数のノズルが同じ動きをしてしまう。そのため、すべてのノズルを同時に使うことができない。しかし、本モータを搭載すれば、ノズルを個別に制御可能となるため、半導体実装に要する時間を大幅に短縮することが可能となる。すでに回転直動のメカニズムを明らかにしたので、今後は製品化に向けた開発が必要となると考えられる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 森田真仁, 部矢明, 高原一晶, 新口昇, 平田勝弘	4. 巻 Vol.29
2. 論文標題 横磁束構造を用いたダブルギャップ型Z アクチュエータの研究	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本AEM学会誌	6. 最初と最後の頁 269-274
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 高原一晶, 平田勝弘, 新口昇	4. 巻 Vol.29
2. 論文標題 横磁束型Z アクチュエータの提案	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本AEM学会誌	6. 最初と最後の頁 558-563
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 鈴木寛典, 平田勝弘, 新口昇, 高原一晶	4. 巻 Vol.28, No.2
2. 論文標題 5相インバータを用いた2軸独立出力モータの提案	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本AEM学会誌	6. 最初と最後の頁 107-114
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 鈴木寛典, 平田勝弘, 新口昇, 小原章	4. 巻 Vol.140, No.11
2. 論文標題 2軸独立出力モータにおける高巻線係数モデルの実験検証	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 電気学会論文誌D	6. 最初と最後の頁 862-873
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔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 森田真仁, 部矢明, 新口昇, 平田勝弘
2. 発表標題 ダブルギャップ型Z アクチュエータの磁石配置の検討
3. 学会等名 第33回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hironori Suzuki, Katsuhiko Hirata, Noboru Niguchi
2. 発表標題 2-Controllable-Rotor Motor Driven by a 5-Phase Current
3. 学会等名 ICEM2020 (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
---------	---------