

様 式 C - 1 9、F - 1 9 - 1、Z - 1 9 (共通)

科学研究費助成事業

研究成果報告書



令和 5 年 6 月 1 6 日現在

機関番号：33907

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2022

課題番号：19K04262

研究課題名(和文) 直動・回転電磁アクチュエータの突極可変界磁を利用した電磁力マネジメント技術

研究課題名(英文) Management of electromagnetic force utilizing salient-pole variable magnetic field in linear motion and rotation electromagnetic actuators

研究代表者

大澤 文明 (Osawa, Fumiaki)

大同大学・工学部・教授

研究者番号：50410618

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,600,000 円

研究成果の概要(和文)：本研究は直動と回転を可能にする多自由度電磁アクチュエータの高出力化を目的として、(1)鉄心突極の可変界磁を利用した出力増加の検証、(2)目標運動から各巻線の電流配分を決定する電磁力マネジメント技術の検討、を実施した。

研究成果は、(A)突極構造と鉄心突極の磁化による出力増加の原理を明らかにした。(B)アクチュエータの等価回路、数学モデルを導出して出力特性の評価を可能にした。(C)直動と回転を同時に駆動したときの各巻線電流の配分方法を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

2自由度方向の駆動巻線と可動子鉄心突極に作用する磁気的な相互干渉の利用技術は直動・回転駆動アクチュエータの突極設計と電流制御技術において重要な指針となる。可動子を固定子の外側に配置するアウター駆動型、円筒状を切り開いた平面駆動アクチュエータ等の磁気的な突極性を有する多自由度アクチュエータへの転用も可能である。また、三相インバータ2台によって駆動することができるため、制御システムの構築が容易である。

研究成果の概要(英文)：The study aims to increase the output of an actuator with multiple degrees of freedom, which is capable of linear and rotary motion. To achieve this objective, (1) the increased output was validated using an iron salient-pole variable field and (2) the technology for managing the electromagnetic force that determines the current distribution of various windings based on target motion was investigated.

The results elucidated the principles of salient-pole structure principles and the increased output due to magnetization from an iron salient pole. Equivalent circuits and mathematical models of the actuator were derived to facilitate the evaluation of output characteristics. We demonstrated the current distribution method for each winding during simultaneous linear and rotary motion. This technology can also be applied to the outer drive type.

研究分野：電磁アクチュエータ

キーワード：電磁アクチュエータ 直動・回転 突極可変界磁 磁気干渉 エネルギーマネジメント

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

複雑・高機能化が進む産業応用機器において複数の自由度の動きを、ギヤやボールねじなどの機械的な運動変換機構を介さずに、1台のモータで駆動できる電磁アクチュエータは、モータ個数の削減によるシステムの小型化・軽量化、ダイレクトドライブの実現、省エネ、制御の高速化などにおいて有望である。自動機の代表的な動作であるピックアンドプレイス等は直線動作と回転動作という、2自由度の動作が必要であるが、その多くはボールねじとスプライン機構を適用して2台の回転モータによって駆動されている。代表者らは2次元リニア同期モータを円筒状にすることで、軸方向の直動と軸まわり回転をダイレクトドライブできる直動・回転電磁アクチュエータの研究を進めてきた。その結果、永久磁石が設置された可動子の未使用領域に磁気的な逆突極鉄心を設置することによって、2自由度方向のリラックス電磁力をマグネット電磁力に加えて併用できることを示した。その一方で、直動・回転巻線のd軸電流によって、出力特性が変動することが判明した。そこで、鉄心突極と両巻線のd軸電流との相互的な磁気干渉を解明して利用法を示すことができれば直動・回転電磁アクチュエータの高出力・高効率化が可能になると考えた。

2. 研究の目的

直動・回転駆動を可能にする2自由度電磁アクチュエータの高出力化を目指し、磁気的な突極と界磁電流間に作用する磁気干渉を応用した新たな制御技術を実現するために、以下の手法を確立することを目的とする。

- ・直動・回転の2自由度方向に磁気的な突極構造を検討し、突極と直動・回転巻線の界磁電流における相互的な磁気干渉メカニズムを明らかにする。
- ・界磁電流により鉄心突極に形成される磁界の大きさや向きをコントロールすることで高出力化を可能にする突極可変界磁の利用法を明らかにする。
- ・1自由度および2自由度の同時駆動における機器定数を算出し、本アクチュエータの数式モデルを構築する。構築した数学モデルを用いて出力特性を評価する。
- ・両巻線電流の制限下において、目標運動から最小損失、最大効率を実現する直動・回転巻線の電流配分法（電磁力マネージメント）を示す。

3. 研究の方法

本研究では、直動・回転アクチュエータの高出力・高効率化を実現するため、突極と界磁電流による磁気干渉を利用した制御法を示す。また、目標運動から電流配分を決定する電磁力マネージメント技術を提示する。突極可変界磁を利用した電磁力マネージメント技術について、以下の検討を行う。

- (1) 最初に、2自由度方向の出力増加に寄与する突極構造を検討し、直動・回転側のd-q軸電流と出力特性の関係を磁場解析により求める。このときの磁束の挙動と電磁力の関係から突極と直動・回転巻線間に作用する相互的な磁気干渉メカニズムを検証する。
- (2) つぎに、磁場解析を用いて直動・回転側のd-q軸インダクタンスを求めて、アクチュエータの機器定数を算出する。この機器定数をもとに直動・回転側のd-q軸の等価回路および数式モデルを構築する。
- (3) モデルを用いたシミュレーションにより、鉄心突極を磁化することによって得られる出力増加の効果を評価する。
- (4) 直動・回転巻線に通電する最大電流5Aの制限下において、要求する推力・トルクを実現する両巻線のd-q軸電流の組み合わせを検討し、d-q軸電流の配分法（電磁力マネージメント技術）を示す。

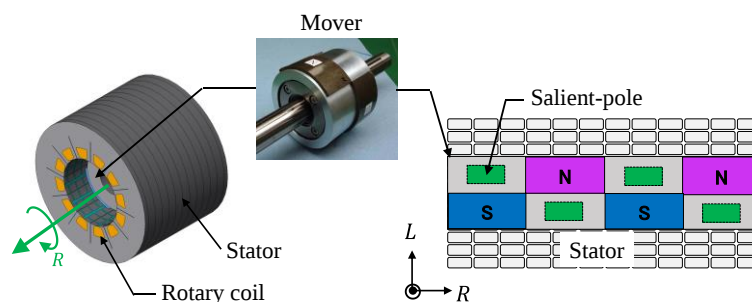


図1 アクチュエータ構成

4. 研究成果

(1) 直動・回転巻線の d 軸電流によって、可動子の未使用域に設置した突極（図 1）が磁化するメカニズムを明らかにした。このことは、突極に形成される電磁石が永久磁石とは異なり、両巻線の d 軸電流によって界磁磁束の強さを自在にコントロール可能であることを示唆している。これより、マグネット電磁力に加えて突極電磁力を併用することが可能となることを明らかにした。

(2) 直動（回転）側の 1 自由度および直動と回転の 2 自由度を同時に駆動したときを想定した数式モデルを構築するために、回転・直動側の d-q 軸インダクタンスを算出した。インダクタンスの一例として、直動側の d 軸電流 I_d^L と回転側の d 軸相互インダクタンス M_{dd}^R を図 3 に示す。直動側の d 軸電流によって回転側に相互インダクタンスが生じ、 I_d^L によって M_{dd}^R は変化する。直動（回転）側の d 軸電流が可動子の突極を介して回転（直動）側の d 軸相互インダクタンスに影響を与えることが判明した。

(3) 機器定数をもとにアクチュエータの等価回路と数式モデルを作成した。数式モデルを用いた計算機シミュレーションによって、直動（回転）側の 1 自由度および直動と回転を同時に運転したときの推力・トルク特性を評価した。回転側に q 軸電流 I_q^R を通電時および I_q^R に加えて直動側に d 軸電流 I_d^L を通電時におけるトルクを図 3 に示す。ここで、 $I_q^R = 5A, I_d^L = 0A$ のときのトルクを基準に正規化して表現している。直動側に d 軸電流 I_d^L を通電することによりトルクが増加することを確認した。

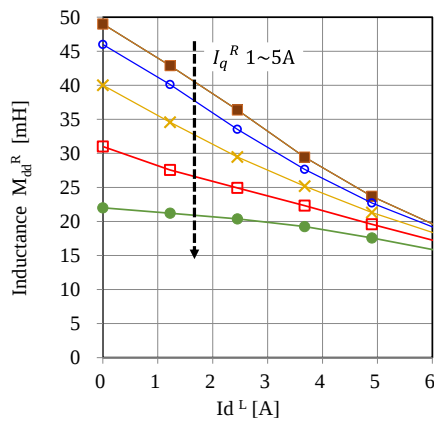


図 2 d 軸電流の相互インダクタンス

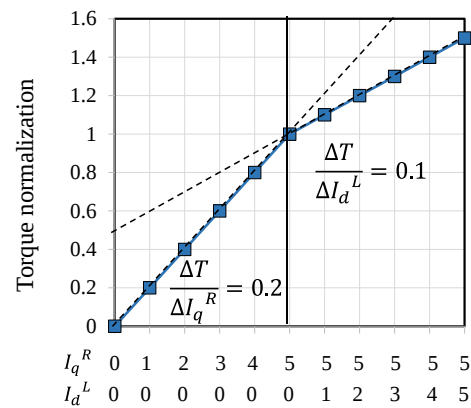


図 3 出力特性

(4) 要求する推力・トルクを実現する両巻線電流の配分法（電磁力マネジメント技術）を検討した。図 4 に直動・回転側に通電する最大電流 5A の制限下において、直動（回転）側の 1 自由度および直動・回転の 2 自由度を同時に駆動したときの両巻線の d-q 軸電流配分を示す。Mode2 の動作点 B は、回転側に q 軸電流 $I_q^R = 5A$ 、直動側に d 軸電流 $I_d^L = 3A$ 、直動側に q 軸電流 4A を通電し、高出力優先側をトルク、非優先側を推力に設定したときの電流配分を示す。Mode2 と Mode3 はそれぞれトルクおよび推力を高出力優先側に設定したときの電流配分を表している。Mode1 の動作点 A は q 軸電流 $I_q^R = 4A, I_q^L = 3A$ 、Mode4 の動作点 D は最大電流制限を超えた領域である。このように、推力・トルクのうち、高出力優先側に対して非優先側の余剰電流を d 軸電流として振り分けることによって優先側の出力増加が可能であることを明らかにした。鉄心突極に形成される電磁石は両巻線の d 軸電流により界磁磁束の強さを自在にコントロールすることができ、直動・回転アクチュエータの出力増加が可能になる。

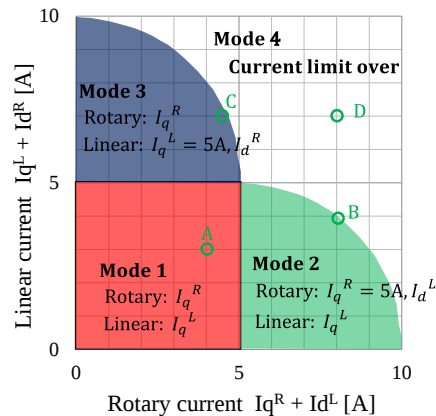


図 4 回転・直動側の要求電流配分

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Osawa Fumiaki, Department of Electrical and Electronic Engineering, Daido University 10-3 Takiharu-cho, Minami-ku, Nagoya 457-8530, Japan	4. 巻 14
2. 論文標題 Utilization of Reluctance Electromagnetic Force of Inner-Mover-Type Rotary-Linear Motor	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 International Journal of Automation Technology	6. 最初と最後の頁 129 ~ 134
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.20965/ijat.2020.p0129	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 OSAWA Fumiaki, INAGUMA Yukio	4. 巻 30
2. 論文標題 Examination of 360 ° Rotational Motion around the Z-axis of the X-Y Linear Synchronous Motor by Alternating Magnetic fields orthogonal	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of the Japan Society of Applied Electromagnetics and Mechanics	6. 最初と最後の頁 316 ~ 323
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.14243/jsaem.30.316	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3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 高橋主税、佐藤雄太、柏原一輝、山下夏奈、稲熊幸雄、大澤文明
2. 発表標題 2次元リアモータのZ軸まわりにおける回転駆動の検討
3. 学会等名 令和4年度電気・電子・情報関係学会東海支部連合大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 西園理奈、清水建吾、伊藤篤志、稲熊幸雄、大澤文明
2. 発表標題 インナーロータ型ロータリ・リアモータ(RLM)の電磁力増加の検討
3. 学会等名 令和4年度電気・電子・情報関係学会東海支部連合大会
4. 発表年 2022年

1．発表者名 千郷八雲、吉田純也、中島蓮、稲熊幸雄、大澤文明
2．発表標題 インナーロータ型ロータリ・リニアモータの電磁力増加の検討
3．学会等名 令和5年度電気・電子・情報関係学会東海支部連合大会
4．発表年 2023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
---------	---------