

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 6 月 1 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2009～2011

課題番号：21560291

研究課題名 (和文)

大トルク直接駆動横磁束形永久磁石ディスク同期電動機の提案と実証研究

研究課題名 (英文)

Proposal and experimental study on permanent magnet-type transverse flux synchronous machines with a disk rotor for large torque direct drives

研究代表者

古関 隆章 (KOSEKI TAKAFUMI)

東京大学・大学院工学系研究科・准教授

研究者番号：20281899

研究成果の概要 (和文)：

本研究では、船舶の電気推進を想定し、多極化しやすく低速で大トルクの実現に向くとされる横方向磁束型という磁路構成に注目し、直接駆動による電動機の研究／開発を行った。まず騒音や振動の原因となるコギングトルクが、磁石数・電機子極数の組み合わせと関係があることを数値的に評価した。そして適切な磁石数・電機子極数の組み合わせを用いることにより、コギングトルクの低減が可能であることを示した。また大トルク化に関しては、対象とする電動機のモデル化を行い、空間制限下におけるトルク最大化設計法を提案した。そして、駆動制御実験を行った。、低速度制御に伴う固有の問題点を明確にし、低速度制御において有効な手法であるデュアルサンプリングレートオブザーバを制御系に実装した。そして実験を通じて幅広い領域において本電動機の駆動が可能であることを確認した。ここまでの実験的検討では、大トルクの実現に関する課題として残った。これに対して、古典的手法として定着しているパーミアンス法に電機子のアンペアターンの変化に伴うティースとコイルの占有面積の変化を陽に導入し、トルク最適点を探索する理論設計手法を構築し、FEM や IEM と照合しながら高トルクを実現する設計を検討している。これにより、比較的高精度に傾向を把握できるため、三次元数値解析に基づく設計工程と比べ大幅な設計時間の短縮が期待できる。

研究成果の概要 (英文)：

Direct drive motor solutions are becoming increasingly important in electric motor applications from hybrid vehicles to electric ships. New type permanent magnet synchronous motors (PMSMs) such as a transverse flux machine are an attractive option for such applications because of high torque characteristics. Hence a C-core type transverse flux PMSM for electric ships has been proposed and studied theoretically and experimentally in this research. This motor had some critical problems such as high cogging torque and unexpectedly large resistance torque in our early study stage. We have, therefore, proposed the methods for higher performance in a transverse flux type PMSM for electric ships, especially focusing on reducing cogging torque and maximizing torque. We have built a prototype motor with low cogging torque characteristics using carefully designed pole-core combination. Maximizing torque method under the space constraint using magnetic circuit method has been theoretically investigated. We have simultaneously investigated possibility of applying the current type dual sampling rate observer to low speed drive controls in our prototype experimental bench. Experimental results demonstrate validity of low speed driving control of the proposed synchronous motor with large number of poles with the current type dual sampling rate observer. For further development of large torque machines, we are continuing investigations on machine design methodology based on simplified magnetic circuit calculations.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,000,000	600,000	2,600,000
2010年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2011年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：工 学

科研費の分科・細目：電気電子工学 電力工学・電力変換・電気機器

キーワード：(1) 永久磁石 (2) 高トルク (3) 永久磁石形同期電動機 (4) 横磁束形同期機 (5) ダイレクトドライブ (6) 船舶電気推進 (7) 電気推進船 (8) 同期電動機

1. 研究開始当初の背景

近年、希土類永久磁石の発達により、電動機の小型化・高性能化が進み、電気鉄道、電気自動車など移動体の電気駆動技術の応用の広がりは著しい。また、内航船を中心に、静謐、コンパクトで環境にやさしく、制御上も好ましい特性を持つ船舶の電気推進技術の発達にも関心がもたれている。船舶推進用の直接駆動を目指した大トルク電動機の実現のために、超電導同期機を開発しようという技術的試みも研究者の世界では行われている。

一方、永久磁石を用いて、直接駆動を可能とするような同期電動機の開発は過去二十数年、横磁束形モータの海外における提案に発し、継続的に行われてきた。横磁束形モータは、磁気漏洩を防ぎながら小ポールピッチを実現することで、比較的高い周波数で低速ドライブが可能なため、体格あたりのトルク、出力電力を高く取ることが可能である。しかし、その構造は複雑で、実用的電動機として量産を図ることは難しい。日本独自の大トルクモータとして研究が進められている磁束集中形同期電動機にも類似の難しさがある。

日立製作所が発表しているトンネルアクチュエータというリニアモータは、期せずして横磁束形の磁気回路構成を持ちながら、独自の簡単な構成で、可動部が軽量、力脈動の少ないダイレクトドライブを実現した。これにより高精度位置決めを要する高級な工作機械などへの実用化が進みつつある。しかし、このトンネルアクチュエータの磁気回路構成そのままに、より大きな応用分野が期待される回転機への展開は不可能である。そこで、本研究では、トンネルアクチュエータと似た磁路構成、直接駆動の長所を持ちながら、簡単な構造をもつ横磁束形モータとして、永久磁石ディスク形同期電動機を提唱し、その設

計法を研究すると共に、実験を通じた特性検証を行う。これにより、船舶の電気推進用のモータとして、低温を維持する手間のかからない常電導技術で大トルク直接駆動の可能性がある。

2. 研究の目的

本研究では、欧米で過去十数年間にわたり研究が続けられてきた横磁束形モータ(1)の原理を活かし、小ポールピッチで大トルクを発生できる駆動用モータを、新しい方式で容易に製造可能とする構造を提案する。そして、その特性を実験的に評価して、船舶の常電導技術による電気推進用ダイレクトドライブなどに应用可能な技術を確認することを目標とする。

3. 研究の方法

[1] 平成 21 年度

- 初年度は提案方式の具体化と原理実証用試験機の設計・製作を基本とする。具体的には
- 1) 船舶の電機推進を中心とした大トルクモータの一般的マーケット調査
- 2) 大トルクを発生可能な磁気回路方式の提案と図面化
- 3) 設計の既存となる理論的磁気回路計算モデルの具体化、それに基づく逆起電力計算を含む動特性の定式化
- 4) (連携企業研究所との情報間を通じた) 三次元有限要素法による詳細な特性算定と前項検討結果との比較
- 5) 基礎的なクレーモデルの作成と考察を経た実験システム的设计
- 6) 試験測定項目の具体的検討

[2] 平成 22 年度

2年度目は、測定、性能評価と検証を中心としたフェーズである。具体的には、

- 1) 試験システムの静特性の測定、磁気回路計算や設計時の算定モデルの正当性の検証
- 2) 無負荷試験、負荷試験による、同期電動機としての基礎特性の測定と性能の検証、力率などの交流電動機としての問題点の確認
- 3) 大トルク機としてのデモ
- 4) 長時間試験による温度上昇、駆動音や機械的強度、堅牢性の確認

[3] 平成 23 年度

最終年度は、成果公開、対外的な議論を通じた応用可能性や客観的評価に関する議論。情報収集を中心としたフェーズとする。具体的には

- 1) 提案機の性能の他の方式と比較した却下的な特性評価
- 2) 船舶電気推進計への応用を考えた形状・寸法の改良の検討
- 3) 船舶部品製造者などへのデモと対外発表を通じた議論で、実用化に向けた問題点抽出のための議論
- 4) 速度制御、位置制御などの駆動制御方法の検討と新たな応用先の議論

4. 研究成果

3 年にわたる研究を行った結果、平成 23 年度末の時点で、以下の成果を得た。

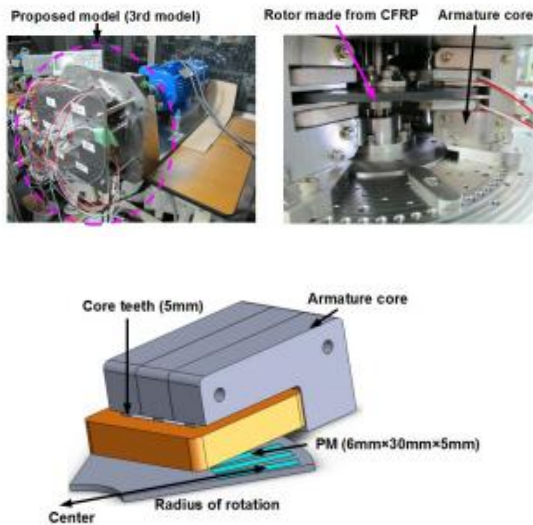


図 1 平成 23 年度試験機の概観と一相分の詳細形状

(1) 図 1 に示す回転円板を不導体である GFRP 材料とし、磁気回路構成を改良した最新の試験機の静特性と動特性を測定した。図 2 に示す磁極の配置によりトルク脈動を初代機と比べて著しく低減すると共に、平成 22 年度までの検討で大きな問題となった説明のつきにくい抵抗トルク発生や、回転子温度上昇をなくすことができ、性能良い回転機が実現

できた。この結果、基本的磁気回路計算や設計時の算定モデルに基づく設計で想定した逆起電力の速度特性、発生力と、実験値がよく一致し、本研究で提唱した基本的な設計法、特性算定法の有効性が検証できた。

(2) d/q 軸電流を分離し、電流フィードバック、速度フィードバックによる速度制御器を実装した状態で図 3 に示すような回転試験を行った。精度の高い速度制御が出来、無負荷試験において、想定どおりのきれいな逆起電力波形（電機子端子電圧波形）が得られると共に、静かで安定した低速回転が出来ることを実証した。同期電動機としての基礎特性の測定と基本性能を検証した。

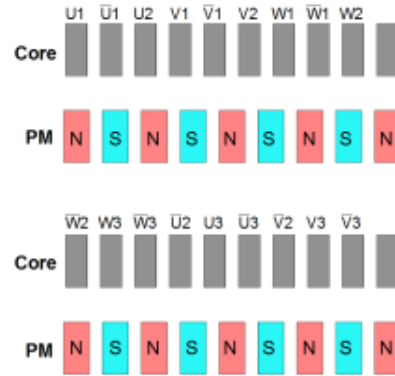


図 2 本研究で得たトルク脈動低減のための電機子極と界磁磁石の配置

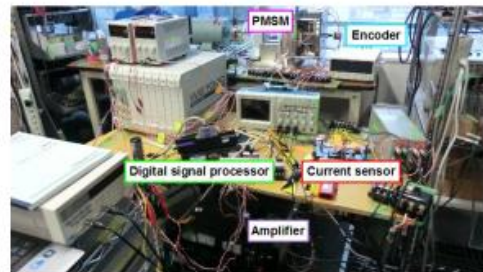


図 3 駆動制御実験の様子

(3) ただし、提案同期電動機においては、トルクを得るため電機子巻線のターン数を増やすと力率が悪化することが、本質的問題として残った。また、現設計では、電機子コアの密度が低くなりがちであり、このため電動機の占有体積あたりの kVA, トルクの密度が制約を受けた。このため、電機子コアの密度をさらに高めるような電機子鉄心、巻線の形状を考案した。

(4) 本研究で、提案電動機の基本動作を確認し船舶駆動用ダイレクトドライブモータとしての技術的可能性を示すことが出来た

(5) 一方、試験機の規模が研究室内における小さなものにとどまったため、大型高トルク

機としてのデモはできなかった。

(6) 改良効果を実証するため、図 3 に示す試験装置で長時間試験を行った。その結果、温度上昇、駆動音や機械的強度、堅牢性などが、実際の回転試験で全く問題にならず、設計時に予定した性能が問題なく出ていることを確認した。

(7) これら一連の作業を通じ、特性向上に向けた設計法の有効性が試験結果に基づき検証された。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

① G. Patterson, T. Koseki, Y. Aoyama, K. Sako: "Simple Modeling and Prototype Experiments for a New High-Thrust Low-Speed Permanent-Magnet Disk Motor," IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 47, No.1, pp. 65-71, February 2011

② Taichi Nakamura, Takafumi Koseki and Yasuaki Aoyama: "A low-speed high-torque permanent magnet synchronous motor---Reducing cogging torque and eddy current loss," ,2012 日本 AEM 学会論文誌 MAGDA 2011 特集号 (掲載決定)

[学会発表] (計 8 件)

① Genevieve Patterson, Takafumi Koseki, Yasuaki Aoyama, Kentaro Sako: "Simple Modeling and Prototype Experiments for a New High-Thrust, Low-Speed Permanent Magnet Disk Motor," Proceedings of the 12th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS 2009), DS2G01-06, 6pages, November 2009, Tokyo, Japan

② Kouichi Sato, Jung-Seob Shin, Takafumi Koseki and Yasuaki Aoyama: "Basic Experiments for High-Torque, Low-Speed Permanent Magnet Synchronous Motor and a Technique for Reducing Cogging Torque," International Conference on Electrical Machines, Roma, Italy, Sep 2010

③ 佐藤 功一, 古関 隆章, 青山 康明: "低速・大トルク永久磁石同期電動機的设计と評価," 平成 22 年電気学会研究会 回転機研究会, RM-10-147, pp.79-84, 北見, 2010

④ 中村 太一, 佐藤 功一, 古関 隆章, 青山 康明: "コアキシャル形永久磁石同期機の低床式 LRV の車輪直接駆動への応用の可能性 - 弱め界磁を用いず速度制御範囲を広げる方法 -, " 第 4 回 LRT 国際ワークショップ 2010,

沖縄, 2010. 11

⑤ 中村 太一, シンジュンソブ, 古関 隆章: "永久磁石形リニア同期モータにおける 8 磁石 9 極配置のギャップ磁束密度の空間高調波分析," 平成 22 年電気学会全国大会, 2011

⑦ 中村 太一, シンジュンソブ, 古関 隆章: "横方向磁束型永久磁石形リニア同期モータにおける磁石と電機子極の組み合わせによるコギング力" 平成 23 年電気学会交通・電気鉄道/リニアドライブ合同研究会, LD-11-031, 青森, 2011.07

⑧ Taichi Nakamura, Takafumi Koseki and Yasuaki Aoyama: "A low-speed high-torque permanent magnet synchronous motor? Reducing cogging torque and eddy current loss," The 20th Magnetodynamics Conference in Pacific Asia (MAGDA 2011), Kaohsiung, Taiwan, November 14th?16th, 2011

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

名称: 回転電機

発明者: 青山康明・古関隆章

権利者: 日立製作所・東京大学

種類: 特許

番号: 特願 2009-255821

出願年月日: 2009 年 11 月 9 日

国内外の別: 国内

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

<http://koseki.t.u-tokyo.ac.jp/report.html> (古関研究室年報)

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

古関 隆章 (KOSEKI TAKAFUMI)

東京大学・大学院工学系研究科・准教授

研究者番号: 20281899