

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 1 日現在

機関番号：17301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420262

研究課題名(和文) 広い可変速・高効率領域を持つクローポール型半波整流可変界磁モータの開発

研究課題名(英文) Development of Claw Pole Type Half-wave Rectified Variable Field Flux Motor with Wider Controllable Speed and Higher Efficiency Operating Range

研究代表者

阿部 貴志 (ABE, Takashi)

長崎大学・工学研究科・准教授

研究者番号：30222649

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：広い可変速・高効率領域を持ち、堅牢なブラシレス構造である、クローポール型半波整流可変界磁モータの実現を目指して、モータの設計・試作、制御方法の確立、評価用シミュレータ開発を実施した。3次元FEMを用いて定格2kW、1800rpmの1次試作機および2次試作機を作成した。その際に、平均トルク向上とトルク脈動低減についても検討した。一方で、可変界磁制御を実現するために、電流追従型ヒステリシスPWM制御器を持つ実験システムを構築し、実験により諸特性を確認した。さらに、モータ特性を評価するために、試作モータ、インバータ、制御プログラムの各モデルからなるマルチドメインシミュレーションを確立した。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this research is to realize the new variable field flux motor and brushless robust structure for wider controllable speed and higher efficiency operating range. This research accomplished the designing, control method and evaluation simulator for a novel claw pole rotor type motor using the variable field flux method (CP-HVFM). We have studied the designing for CP-HVFM using 3D-FEM. The designed prototype CP-HVFM reached a rated power of 2kW or more at a rated speed 1800 rpm under design restrictions of experimental equipment and initial specifications. In addition, we found the best claw pole shape for maximum average torque and minimum torque ripple. We also built an experimental system using the current hysteresis controller and proposed the variable field flux control method to realize maximum torque and high efficiency characteristics. And we proposed the evaluation simulator using multi-domain simulation with motor model, inverter model, and control program model.

研究分野：パワーエレクトロニクス学，電動機制御学

キーワード：同期電動機 可変界磁法 ダイオード整流方式 クローポール型回転子 半波整流ブラシなし同期電動機

### 1. 研究開始当初の背景

高効率モータの主流である埋込型永久磁石モータは、Nd や Dy の高騰により新たな展開が望まれており、永久磁石によるトルクをリラクタンストルクで代用するスイッチリラクタンスマータや電磁石で代用する界磁巻線型モータが注目されている。

モータの応用範囲は広く、低速から高速、高トルクから低トルクと、広範囲な速度・トルク領域で高効率を実現する必要があることから、特殊構造を持つ可変界磁モータや可変定数モータなどの開発が行われている。

研究代表者は、「半波整流ブラシなし同期電動機」と題した、本研究の基礎原理である「半波整流可変界磁」を利用した、同期モータの開発と制御法の研究を行ってきた。この半波整流ブラシなし同期電動機は、図1に示すように、通常の特極回転子に巻線を施した巻線型同期モータであるが、回転子界磁巻線はダイオードで短絡され、ブラシとスリップリング、界磁用電源は不要である。図2に固定子巻線に供給する三相電流波形を示すが、基本波に対して数倍の周波数をもつ三角波を重畳した正弦波電流であり、三角波に同期した磁束が回転子に鎖交し、その磁束を一定に保つようにダイオードがオン・オフを繰り返す。これにより、通常の前流励磁と同様な、図3に示す一定界磁磁束 $\lambda_{fd}$ が得られ、トルクが発生する。しかしながら、従来の半波整流ブラシなし同期電動機は、回転子巻線が突極部にあり、高速に耐えられない。回転子に挿入したダイオードはオン期間が長く、Si ダイオードのオン抵抗が損失を増加させる。

低速で高トルクを目指す多極化において、多数のコイルが必要となり、銅損が増加するなどの問題点を持っていた。

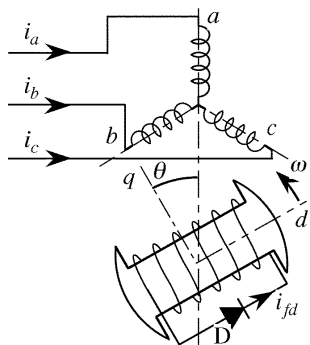


図1 原理図

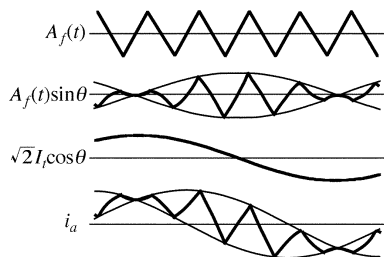


図2 電流波形図

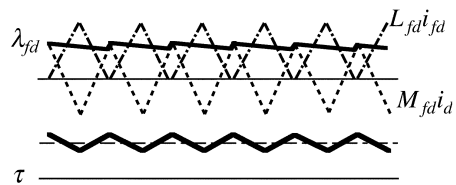


図3 磁束、トルク波形

### 2. 研究の目的

高効率モータの主流である永久磁石モータに匹敵する新型モータであり、広い可変速と高効率領域を持ち、使用環境による劣化にも強い、クローポール型半波整流可変界磁モータを開発する。本モータが利用する半波整流可変界磁とは、代表者が研究を続ける可変界磁法であり、回転子の界磁巻線をダイオードで短絡するだけの簡単な構造で、固定子巻線より界磁の励磁を行う手法である。本モータは、必要とされる速度やトルクに応じて、界磁磁束をゼロから広い範囲で任意に調整可能であり、永久磁石モータの弱め界磁制御と比べ、可変速・高効率領域の拡大が容易である。また、クローポール形状を採用することで、高速域までの堅牢さを持たせ、さらに、回転子に挿入するダイオードにSiCダイオードを用いることで、オン抵抗を削減し、効率特性の向上を目指す。

### 3. 研究の方法

#### (1) 半波整流可変界磁モータの試作

研究室所有の有限要素法ソフトを利用して本モータの設計を行う。ただし、三角波を重畳した三相交流を与え、回転子巻線にはダイオードを挿入する簡易回路連成など、本モータの特長を考慮した解析により設計を実施する。ただし、研究室の実験設備を流用するため、2kW程度を出力目標とし、トルク計測器や負荷装置から最大トルクや回転数に、さらにインバータの定格から電圧と電流、台座の寸法からモータ外径にも制約を設ける。初年度には1次試作機を設計・試作し、2年目には回転子のみを最適設計し1年目の固定子を利用して2次試作機を試作する。

#### (2) 広範囲高効率制御法の確立

電動機の世界速度 - トルク特性における高効率範囲は、モータ定数によって決められ、特に界磁磁束によるところが大きい。よって、本モータの可変界磁を利用して、高効率範囲の拡大を実施する。本モータの固定子に供給する電流に重畳する三角波の振幅を、速度やトルクに応じて変化し、回転子界磁巻線に発生する界磁磁束を自在に変更して、広範囲の使用領域において常に損失を最小にするような制御アルゴリズムの確立を目指す。

また、半波整流可変界磁方式の制御手法を実現するために、研究室所有のDSP駆動システムに標準で装備されている三角波比較PWM方式を電流追従PWM方式に変更し、試作機の実験による特性評価を実施する。

### (3) 特性評価用システムシミュレータの開発

特殊な励磁方式を持つ本モータの設計において、一般のモータのように有限要素法のみによる設計では不十分であり、有限要素法ソフトと回路シミュレータによる連成解析にて、半波整流可変界磁法式の制御法や駆動システムを考慮したモータ特性を評価しながら、設計解析が可能なシステムシミュレータを構築する。

また、このシステムシミュレータに、試作したモータモデルを回路シミュレータに取り込み、可変界磁制御プログラムモデルと駆動インバータモデルを作成し、トルク特性や効率特性を評価する。この得られた評価結果は、2次試作機の設計に再利用され、評価と設計を繰り返すことで、最適な設計・試作方針を決定する。

## 4. 研究成果

### (1) 半波整流可変界磁モータの試作

図4に本モータのdq軸原理図を示す。この図のd軸巻線に基本波周波数とは別のバイアス周波数で脈動する電流を供給し、q軸巻線にはトルク電流を供給することで、トルクを発生することが可能となる。図には簡単のために2極機を示しているが、回転子界磁巻線はダイオードにて単相短絡されている。

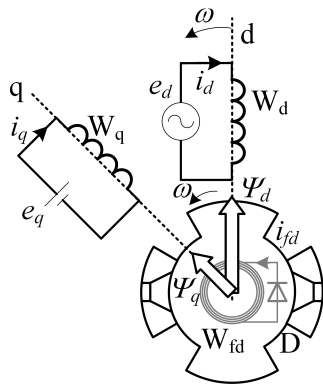


図4 dq軸原理図

本モータは小型の電気自動車や HEV への搭載を目標とするが、研究室既存の実験システムによる制約があり、表1に示すような設計制約条件を設けた。また、これらの制約の下、使用する鉄心材や巻線、自然風冷となることなどから、初期仕様を表2のように定めた。なお、1次試作では、他のPMモータなどとの比較を考慮して3相8極48スロットと固定し、固定子巻線に関して、最大電流密度  $10\text{A}/\text{mm}^2$ 、占積率60%、全節巻、毎極毎相2スロット、15ターン/スロットとして、スロット断面積を定めた。また、回転子巻線は、最大電流密度  $5\text{A}/\text{mm}^2$ 、占積率70%、単相400ターンとして、界磁巻線スペースを定めた。さらに、クローポール回転子形状、ステータ内径とロータ長については、3次元電磁界解析ソフトを利用したトルク評価により、各種

パラメータ設計を実施し、表3のような結果を得た。図5に設計に用いたクローポール形状のパラメータを示す。さらに、この設計パラメータを利用した一次試作モデルを図6に示す。

表1 設計制約条件

Rated power	2kW
Rated speed	$1800\text{min}^{-1}$
Rated current	26A 以下
Rated voltage	200V 以下
Motor outer diameter	160mm 以下
Motor total length	100mm 以下
Shaft diameter	30mm

表2 初期仕様

Pole number	8
Stator slot number	48
Armature winding turn number	15
Field winding turn number	400
Motor stack length	94.5mm

表3 設計パラメータ

Stator External Diameter	160mm
Stator Internal Diameter	109mm
Stator Length	82.5mm
Rotor Diameter	108mm
Rotor Length	94.5mm
Pole Length	85.5mm
Tip Embrace	0.1
Root Embrace	0.8
Tip Thickness	4mm
Root Thickness	17.4mm
Shoe Thickness	10mm
Slot Depth	11mm
Yoke Thickness	12.5mm

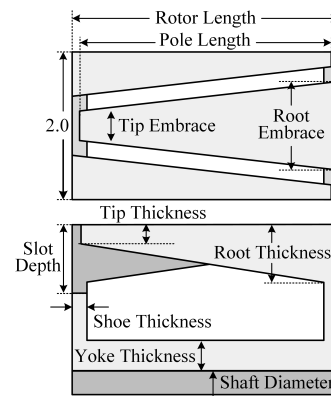


図5 回転子の設計パラメータ

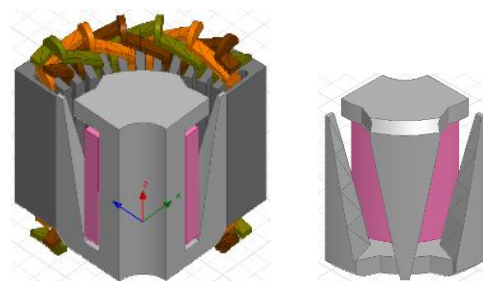


図6 1次試作機モデル

以上の設計パラメータを利用して、1次試作機を作成した。図7に回転子、図8に固定子の写真を示す。クローポール回転子は2つの部品をシャフトにて結合している。また、本モータはブラシとスリップリングは不要であるが、本試作機では、界磁電流などの観測を目的として、シャフトを通じて外部に引き出し、ブラシとスリップリングを用いて界磁巻線をダイオードにて単相短絡する。図9はモータの概観写真である。モータ上部に固定子三相巻線端子、界磁巻線端子、さらに回転子軸に取り付けたエンコーダ端子を取り付けている。

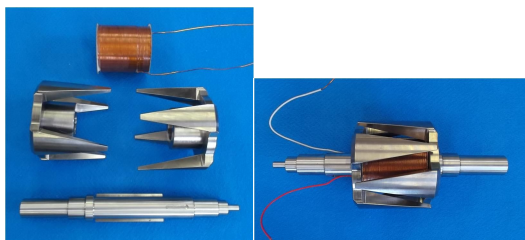


図7 クローポール回転子写真



図8 固定子のコアと巻線の写真

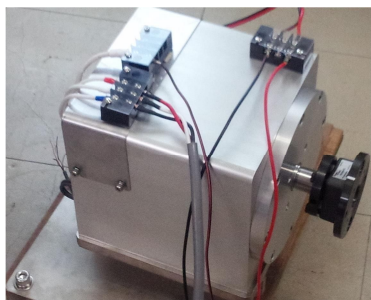


図9 本モータ概観写真

1次試作機の実験検証結果や特性評価用システムシミュレータによる評価を利用して、回転子の再設計を実施した。2次試作機では、渦電流やヒステリシス損などの鉄損評価、また爪型の先端からの漏れ磁束検討などを実施し、平均トルクの向上、トルク脈動の低減を設計目的として再設計した。表4に変更したパラメータを記載する。

表4 設計パラメータ

Turn number of Field Windings	200turn
Tip Embrace	0.433
Root Embrace	0.767
Root Thickness	19.5mm
Shoe Thickness	22.6mm
Yoke Thickness	13.5mm



図10 2次試作回転子写真

## (2) 広範囲高効率制御法の確立

図10に構築した駆動システムを示す。本システムは、固定子巻線に供給する3相交流を演算するDSP、その電流と実測電流によりPWM信号を発生する電流追従方式ヒステリシス形PWM信号発生器、さらに電圧形PWMインバータからなる。本システムを利用して、1次試作機を駆動し、原理どおりの励磁電流により、回転子界磁巻線に界磁電流が現れることを確認し、半波整流可変界磁の動作確認が証明された。

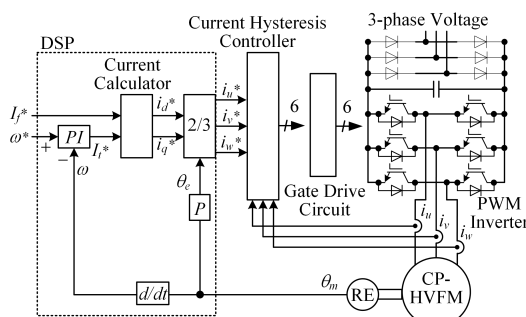


図10 駆動システム

広範囲な高効率制御は、負荷に対して適切な界磁電流振幅とトルク電流振幅のバランス決定、また、駆動速度に応じたバイアス周波数の検討などが必要となり、それらの演算には電動機パラメータを利用する。1次試作機において、有限要素法での設計時パラメータと実機での計測結果に相違が生じた。1次試作機の組み立て段階におけるシャフトとの結合、すべり防止のキーの影響で、磁束飽和が生じやすい構造であることが判明した。これにより dq 軸インダクタンスが小さくなり、さらに d 軸に比べ q 軸インダクタンスが大きくなり、高トルク制御へ悪影響を及ぼす結果となった。しかしながら、有限要素法での検討が可能となり、作成業者との打合せにより解決策を検討し、2次試作機ではこれらの問題を解決した。

図11には300, 800, 1300, 1800rpmにて駆動し、バイアス周波数を変化させた際の回転子に誘導される界磁電流実効値を示している。この図のように原理どおりの可変界磁特性が得られ、バイアス周波数による影響を確認した。さらに、図12は励磁電流を変化させた際の電機子電流実効値の変化を評価したものであり、これにより、励磁電流実効値を選定することにより、固定子に流れる電流を最小にすることが可能であることが分かる。

これらの実験結果を利用して、励磁電流実

効値とバイアス周波数をトルク電流指令値と速度指令値によって変化させることで、効率を最大とする駆動が可能であることが判明した。この実験結果をテーブル化し、効率を最大にする励磁電流パラメータを選定し、効率を最大にする制御アルゴリズムを確立したが、負荷急変や速度の広範囲変化に対して、応答性が悪く、今後の課題となった。

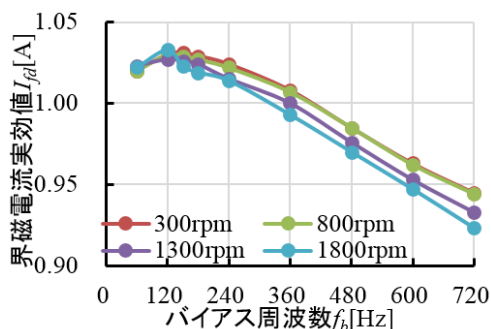


図 11 界磁電流特性

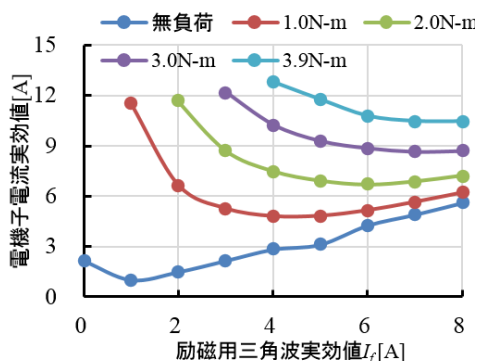


図 12 電機子電流特性

### (3) 特性評価用システムシミュレータの開発

有限要素法ソフトと回路シミュレータによる連成解析にて、半波整流可変界磁法式の制御方式を考慮した、本モータの基本特性評価を実施可能なシミュレーションシステムを構築した。本シミュレータには、有限要素法での解析にて得られたトルク - 電流特性をテーブル化することで取り込み、上記駆動システムを回路シミュレータにて表現している。この評価システムを利用して、クローポール形状の本モータに適した、半波整流可変界磁方式の制御手法について検討し、界磁巻線電流とトルク電流とのバランス評価などを実施した。

さらに、事前の研究にて確立している、ガソリン車燃費シミュレーションを利用して、簡易な電気自動車システムシミュレーションへと変更するために、バッテリー駆動されるインバータと上記実験結果を利用したマップモデルによるモータモデルを組み込んだ。本シミュレータによる解析結果に関しては、現在、その詳細を整理中であり、2016年度の学会にて発表予定である。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 2 件)

Takashi Abe, Ryohei Ohba, Tsuyoshi Higuchi: Fundamental Characteristics and First Prototype of a Novel Claw Pole Type Half-Wave Rectified Variable Field Flux Motor, The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, 査読有, Vol.35, Issue.2, pp.407-423 (2016.3), DOI:http://dx.doi.org/10.1108/COMPEL-02-2015-0102

Takashi Abe, Kyosuke Maeda, Tsuyoshi Higuchi, Variable Field Flux Characteristics of a Novel Claw Pole Type Half-wave Rectified Variable Field Flux Motor, Proc. of The 18th International Conference on Electrical Machines and Systems, 査読有, No.28D1-4, pp.1-5, (2015.10), 10.1109/ICEMS.2015.7385369

〔学会発表〕(計 11 件)

阿部貴志, 加藤利次, 関末崇行, 市原純一, 菅谷英彦, 上田雅生, 松本比呂志, VHDL-AMS による自動車モデル作成について, 自動車技術会 2015 年春季学術講演会, No.S094, pp.521-525 (2015.5.20), パシフィコ横浜(横浜市)

前田恭輔, 高瀬慎也, 阿部貴志, 樋口剛, クローポール型半波整流可変界磁モータの回転子設計について, 第 27 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム, No.15A08, pp.269-272 (2015.5.14), ハウステンボス(佐世保市)

岡田裕一, 阿部貴志, 樋口剛, 実測トルクテーブルを用いた SR モータのトルク特性試験, 第 27 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム, No.15A10, pp.275-278 (2015.5.14), ハウステンボス(佐世保市)

Takashi Abe, Ryohei Oba, Tsuyoshi Higuchi: A First-Prototype of the Claw Pole Type Half-Wave Rectified Variable Field Flux Motor, Proc. of The 17th International Conference on Electrical Machines and Systems, No.DS1H5-18, pp.1842-1846 (2014.10.23), 杭州市(中国)

高瀬慎也, 大場亮平, 阿部貴志, 樋口剛, クローポール型半波整流可変界磁モータの測定パラメータについて, 電気・情報関係学会九州支部連合大会, No.12-1A-06, p.104 (2014.9.18), 鹿児島大学(鹿児島市)

大場亮平, 高瀬慎也, 阿部貴志, 樋口剛, クローポール型半波整流可変界磁モータの 1 次試作機について, 平成 26 年電気学

会産業応用部門大会, Vol.1, No.Y-73, p.73  
(2014.8.27), 東京電機大学(東京都足立区)

阿部貴志, 大場亮平, 高瀬慎也, 樋口 剛,  
クローポール型半波整流可変界磁モータ  
の試作, 自動車研究会資料, VT-14-23,  
pp.87-92 (2014.7.10), 電気学会会議室(東京  
都千代田区)

大場亮平, 阿部貴志, 樋口 剛, クローポ  
ール型半波整流可変界磁モータの一次試  
作, 平成 26 年電気学会全国大会, No.5-053,  
p.95-96 (2014.3.18), 愛媛大学(松山市)

大場亮平, 丹羽義尚, 阿部貴志, 樋口 剛,  
クローポール型半波整流可変界磁モータ  
の設計について, 平成 25 年電気学会産業  
応用部門大会, No.Y-85, p.85(2013.8.28),  
山口大学(山口市)

古賀誉大, 熊谷真也, 阿部貴志, 樋口 剛,  
PM モータの電磁界解析による特性パラ  
メータ抽出, 平成 25 年電気学会産業応用  
部門大会, Vol.3, No.12, pp.115-118  
(2013.8.28), 山口大学(山口市)

田中雄一郎, 阿部貴志, 丹羽義尚, 樋口  
剛, 実験によるトルク特性を用いた SR モ  
ータの位置制御システムについて, 平成  
25 年電気学会産業応用部門大会, Vol.3,  
No.38, pp.221-224 (2013.8.28), 山口大学  
(山口市)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

阿部 貴志 (ABE, Takashi)  
長崎大学・工学研究科・准教授  
研究者番号: 30222649

### (2) 研究分担者

樋口 剛 (HIGUCHI, Tsuyoshi)  
長崎大学・工学研究科・教授  
研究者番号: 50156577

### (3) 研究協力者

犬塚 勝利 (INUTSUKA Katsutoshi)  
サイエンスリサーチ株式会社

### (4) 研究協力者

重松 浩一 (SHIGEMATSU, Koichi)  
サイバネットシステム株式会社