

令和 4 年 6 月 19 日現在

機関番号：13801

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2021

課題番号：19K14960

研究課題名（和文）高トルク密度と高出力化を両立する受動的変界磁モータの開発

研究課題名（英文）Development of Passive Variable Magnetic Flux Motor Compatible with High Torque and High Power

研究代表者

青山 真大（Aoyama, Masahiro）

静岡大学・工学部・助教

研究者番号：00824517

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）：モータの高性能化を目的に、従来損失として消費されていた高調波磁束をモータトルクおよび効率向上に利用する技術開発を行った。モータ構造上不可避に生じる空間高調波とモータ制御上不可避に生じるキャリア高調波の2種類の高調波磁束利用に着目し、シミュレーションによる磁気回路トポロジー構築から試作機による実機検証まで行った。実機検証では2種類の高調波磁束の利用によるトルクおよび効率向上を実証できた。本研究の成果により、次世代モータへの応用に対する技術的基盤を提供することができた。キャリア高調波のトルク利用においては、モータドライブシステムまで拡張することで更なる性能向上の可能性を立証することができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

産業界や我々の生活を支える動力源として、家電民生から電力発電、輸送機器におけるまでモータは広く世の中に使われている。今日、高効率化を達成しているモータは高性能なネオジム磁石が採用されて成立している。一方、ネオジム磁石は耐熱減磁のため、DyやTbなどのレアアースが添加されるが、それらは産出地が偏在しており社会情勢によって価格高騰のリスクを潜在している。さらに酸を用いて鉱山から採掘されるため、環境負荷が著しく大きい。これらの課題に鑑みて、従来のモータから磁石量を半減しながら性能を飛躍できる変界磁モータが産業界から強く望まれている。その実現は資源が乏しい我が国において国際競争力の強化にもなる。

研究成果の概要（英文）：For the purpose of high performance motors, development was carried out in which the harmonic fluxes consumed as losses are utilized to improve the motor torque and efficiency. Focusing on the use of two types of harmonic flux, the space harmonics that are inevitably generated in the motor structure, and carrier harmonics that are inevitably generated in motor control, the construction of magnetic circuit topology by simulation and the experimental verification with prototype were performed.

In the experimental tests, torque and efficiency improvement were demonstrated by utilizing two types of harmonic flux. The result of this research provided a technological foundation for next-generation motors.

Furthermore, by utilizing carrier harmonics for torque, it has been proved that there is the possibility of further performance improvement by expanding to its suitable drive system.

研究分野：電気機器，パワーエレクトロニクス

キーワード：モータ インバータ駆動 変界磁 自励式巻線界磁 空間高調波 キャリア高調波 同期 ベクトル制御

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

近年、CO<sub>2</sub> 排出量の規制により電動車の普及が進められ、主要部品である電力変換器、電池、モータ等の技術開発が盛んになっている。特に駆動源となるモータは小型・高効率に加えて希少資源となるレアアースの削減が望まれている。その解決策の 1 つの可能性として巻線界磁を併用した可変界磁モータが着目されている。従来の巻線界磁はロータ側巻線にスリップリングを介して給電する方式が一般的であったが、保守や堅牢性の面で課題があった。近年、ブラシレス給電方式が提案され、ドライブ回路まで含めたシステム検討が行われている。他研究機関におけるブラシレス巻線界磁方式として、励磁用 DC/DC コンバータと回転トランスまたは容量性結合を組み合わせた給電方式や、基本波にパルス電流を重畳させる給電方式などが盛んに研究されている。しかし、前者においては付加電力変換装置が必要になることやモータ体積および質量増加によるトルク密度の低下が懸念される。後者においてはトルクリプルの増加やモータ損失増加による効率低下が懸念される。それらの課題を解決できる巻線界磁併用の可変界磁モータへの給電方式の技術開発を行うことで次世代モータへの応用に対する技術的基盤を提供できる。

### 2. 研究の目的

本研究では、従来損失として消費されていた高調波磁束を利用した巻線界磁へのブラシレス給電方式に着目し、その駆動原理構築から実機検証までを行う。モータ構造上またはモータ制御上不可避に生じていた空間高調波とキャリア高調波をモータのトルク向上および効率向上に利用できる磁気回路トポロジーを電磁界シミュレーションにて構築する。試作機を製作し、試作機による原理検証および駆動特性評価試験を行い、従来構造のモータに対する優位性を明らかにする。加えて、モータ制御上発生するキャリア高調波においては最適なドライブシステムまで言及し、最適なモータ制御アルゴリズム構築の技術基盤を構築する。

### 3. 研究の方法

本研究では、以下の方法で駆動原理の構築と実機検証を行った。

#### 3-1. 空間高調波

##### 3-1-1. 原理検証

- 1) 電磁界シミュレーションソフトウェア (JMAG-Designer) を活用し、空間高調波をトルク向上に効果的に利用できる磁気回路トポロジーを構築する。
- 2) 3D-CAD (Solid Works) を活用して原理検証用小型試作機 (400W) の構造設計をし、試作機を製作する。
- 3) 試作機評価用環境を構築し、回転速度および電流指令値に対する駆動特性を行う。制御は永久磁石同期モータのベクトル制御を基盤とし、実機にてパラメータを調整して駆動する。

##### 3-1-2. ロータ巻線力率調整による受動界磁調整技術

- 1) ロータ巻線回路に LC 共振原理を適用することで受動界磁調整を調整できる技術を回路シミュレータ (PSIM) と電磁界シミュレーションソフトウェアを活用して原理構築を行う。
- 2) 3-1-1 で試作した原理検証機を改造し、実機にて 3-1-1 と同様の評価試験を行う。

#### 3-2. キャリア高調波

##### 3-2-1. 原理検証

- 1) 電磁界シミュレーションソフトウェアを活用し、キャリア高調波をトルク向上に利用できる磁気回路トポロジーを構築する。
- 2) 3-1-1 で試作した原理検証機を改造し、実機にて 3-1-1 と同様の評価試験を行う。さらに、キャリア周波数を変化させたときのトルク特性を評価し、キャリア周波数の変更によってもロータ巻線への給電量調整による可変界磁機能を有することを実証する。

### 4. 研究成果

#### 4-1. 空間高調波

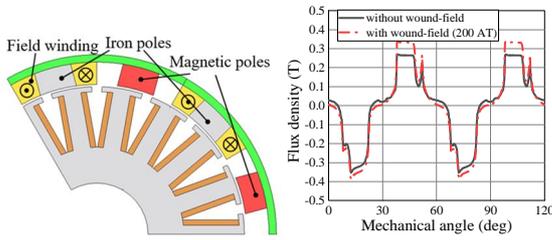
##### 4-1-1. 原理検証

##### 1) 磁気回路トポロジー構築

永久磁石と巻線界磁を併用した可変界磁モータ構造において、空間高調波による給電性能を向上できる磁気回路トポロジーを検討した。図 1 と図 2 に示すように永久磁石と巻線界磁極を 1 極毎または 1 極対毎に配置するのかが比較した。両図において(a)はモータ径方向分割断面図を示し、(b)はギャップ磁束波形を示している。比較の結果、図 2(a)に示す 1 極対毎配置の構造のほうが図 2(b)に示すとおりに界磁巻線の磁力の調整幅が広いことがわかった。

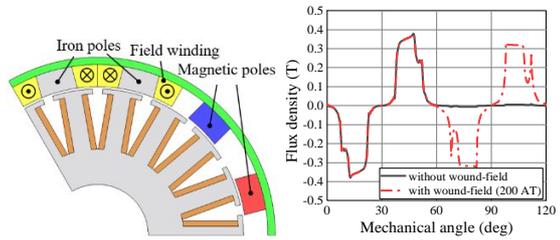
次に図 2(a)の 1 極対毎の構造を初期モデルとし、空間高調波によってロータ巻線に多くの起電力を得ることができる磁気回路を検討した。図 3(a)に示すようにモータ構造上不可避に生じる第 2 次空間高調波に着目し、巻線界磁極を 3 つのティースで構成して界磁巻線 (F-coil) と空間高調波から起電力を得る励磁巻線 (I-coil) の 2 種類の巻線を用いる方式とした。それらの巻線ピッチを不一致とさせ、I-coil は空間高調波の磁束分布ピッチに合わせ、F-Coil は磁石磁極ピッチ

に近づける設計とした。2種類の巻線は図3(b)に示すような整流回路に結線され、空間高調波によって得た I-coil 上の起電力はダイオード整流回路を介して整流され、F-coil に界磁巻線と供給される。図4に構築したモータ径方向断面図を示す。



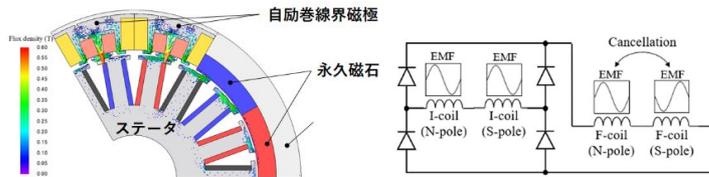
(a) 1極毎配置 (b) ギャップ磁束波形

図1. 1極毎磁極配置



(a) 1極対毎配置 (b) ギャップ磁束波形

図2. 1極対毎磁極配置



(a) 第2次空間高調波分布 (b) ロータ巻線整流回路

図3. 巻線界磁極構造とロータ巻線回路

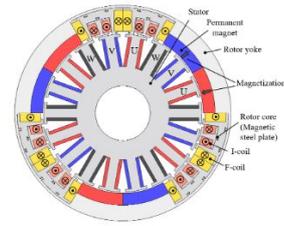


図4. モータ径方向断面図

## 2) 試作機構造設計および実験環境構築

実機による原理検証を行うために、小型原理検証機を試作することを目的に 3D-CAD を活用して構造設計を行った。電磁界シミュレーションにて構築した磁気回路を具現化できる構造として、図5に示すように巻線界磁極を分割コア構造で設計した。これによりロータ巻線占積率の向上と組立性向上を両立できる。図6に試作機組図を示す。研究室実験環境の制約により 400 W の小型試作機を設計した。図7に主要な試作部品を示し、図8に示す試作機のように研究室でアッセンブリ作業を行った。図9に実験環境を示す。小型モータベンチを製作し、負荷モータ側から回転速度制御を行い、供試側は電流指令値制御（電流ベクトル制御）とした。

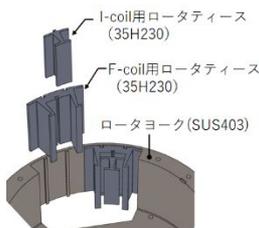


図5. 巻線界磁極設計

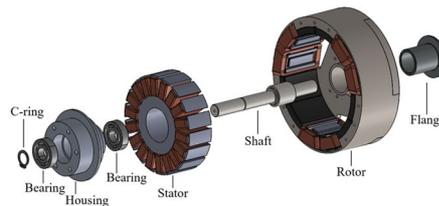


図6. 試作機構造設計（展開図）

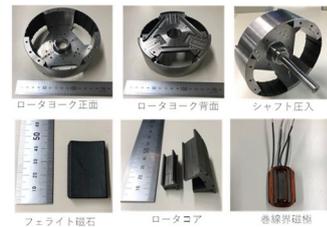


図7. 試作部品



図8 試作機（左：出力軸側，右：反出力軸側）

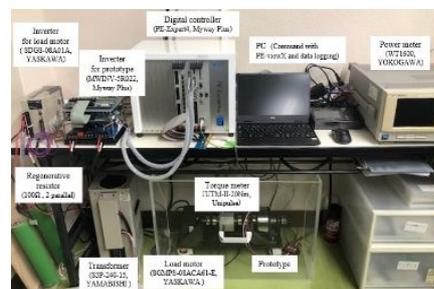
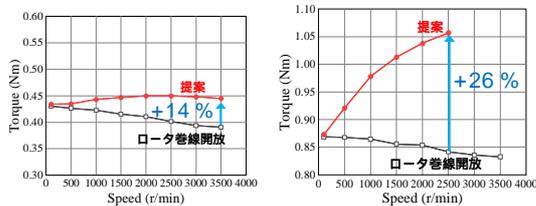


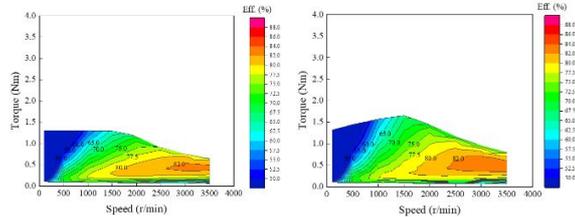
図9. 実験環境

## 3) 実験結果

図10に  $i_d = 0$  制御時の可変速特性を示す。同図(a), (b)を比較すると電流指令値によってトルク増加量が異なることがわかる。両図において回転速度に着目すると回転速度の増加とともにトルク向上量が増加していることがわかる。この結果から、空間高調波を利用した巻線界磁へのブラシレス給電が可能であることの実証に加え、電機子電流および回転速度によって界磁調整可能であることを実証できた。図11に効率マップを示す。同図から空間高調波をトルクに利用することでトルクおよび出力の向上と高効率エリアの拡大を実証できた。



(a) 12  $A_{rms}$  指令 (b) 20  $A_{rms}$  指令  
図 10.  $i_d = 0$  制御時の可変速特性



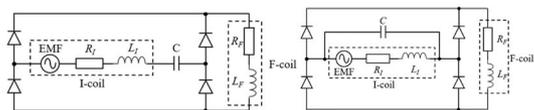
(a) ベンチマーク (b) 提案  
図 11. 効率マップ評価

#### 4-1-2. ロータ巻線力率調整による受動界磁調整技術

##### 1) 回路トポロジー構築

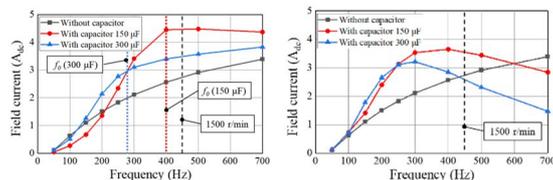
回路シミュレータを活用して I-coil に対して力率調整用コンデンサ  $C$  を直列結線または並列結線した回路シミュレーションを行った。空間高調波から起電力を得る I-coil に対して力率調整用  $C$  を図 12 に示すように 2 通りで検討し、周波数に対する界磁電流の特性をシミュレーションによって求めた。図 13 にその結果を示す。ここで、可変界磁モータとして望ましい機能として、低回転域には高トルクを実現するために強い界磁磁束、つまり大きな界磁電流が必要となる。一方、高回転域は高出力を実現するために弱い界磁磁束、つまり小さな界磁電流が必要になる。これらの相反する要望をロータ巻線力率調整によってインピーダンス周波数特性の設計で受動的に実現する。図 13 の回路シミュレーション結果を確認すると、図 13(b) の LC 並列結線の場合、低周波時に大きな界磁電流、高周波時に界磁電流の抑制を実現できていることがわかる。

実機には図 14 に示すように図 8 に示した試作機を一部改造して力率調整用  $C$  を実装した。ロータ上に実装するためのサイズ制限と耐圧の兼ね合いから図 14(b), (c) に示すようにセラミックコンデンサをアレイ上にしてロータ上に実装した。



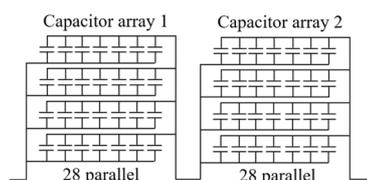
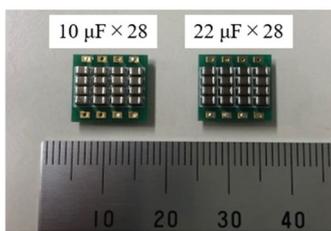
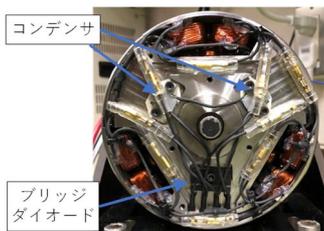
(a) LC 直列回路 (b) LC 並列回路

図 12. ロータ巻線力率調整回路構成



(a) LC 直列結線 (b) LC 並列結線

図 13. 界磁電流シミュレーション結果



(a) ロータ上への実装 (b) コンデンサアレイ (c) コンデンサアレイ回路

図 14. ロータ巻線力率調整用のコンデンサアレイとロータ上への実装

##### 2) 実験結果

図 15 に  $i_d = 0$  制御で可変速特性を評価した結果を示す。同図から図 10 と同様に電機子電流および回転速度によって受動的に界磁調整されることでトルク特性が変化することを確認できる。加えて、ロータ巻線力率調整用コンデンサなし(両図における“結線 + C なし”)に対してコンデンサを結線(両図における“結線 + 140  $\mu F$ ”または“結線 + 308  $\mu F$ ”)することで低回転域でトルクが向上し、高回転域でトルクが減少することを確認できる。これは低回転域でロータ巻線力率が改善することでインピーダンスが減少し、界磁電流が増加することで空間高調波を利用した電磁石トルクが向上した結果であると考えられる。一方、高回転域においてはロータ巻線力率が低下することでインピーダンスが増加し、界磁電流が減少することで空間高調波を利用した電磁石トルクが減少した結果であると考えられる。

上記の結果から、ロータ巻線力率調整によっても界磁調整可能であることが実証された。

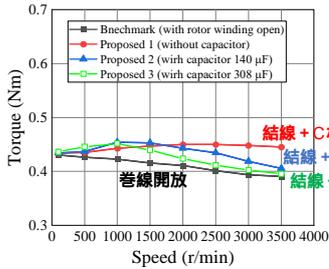
#### 4-2. キャリア高調波

##### 4-2-1. 原理検証

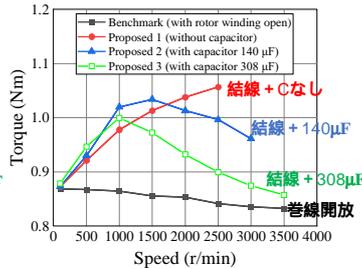
##### 1) 磁気回路トポロジー構築

図 16 に電磁界シミュレーションにて可視化した空間高調波分布とキャリア高調波分布の

比較を示す。キャリア高調波は空間高調波とは異なり、基本波と同じ磁路で分布するため、高調波磁束から起電力を得るロータ巻線 (Induction coil; I-coil) に鎖交する磁束ベクトルが N 極側と S 極側で異なる。したがって、図 17 に示すように I-coil を結線する。キャリア高調波は PWM 制御時に不可避に生じる PWM 電圧の側帯波電圧に起因して生じ、電機子巻線インダクタンスによって電機子電流に重畳するキャリア高調波電流が決まる。したがって、効率的にロータ巻線にキャリア高調波から起電力を得るためには 4-1-2 のロータ巻線力率調整技術を応用するのが望ましい。キャリア高調波を共振周波数とする LC 共振回路を図 17 に示すように構成し、図 18 に示すようにロータ巻線インピーダンスを調整する。共振させるキャリア周波数を変更した時の特性を把握するため、図 18 に示す 4 パターンのロータ巻線回路を構成し、次節にて実験することとした。



(a) 12A<sub>rms</sub> 指令



(b) 20A<sub>rms</sub> 指令

図 15 .  $i_d = 0$  制御時の可変速特性

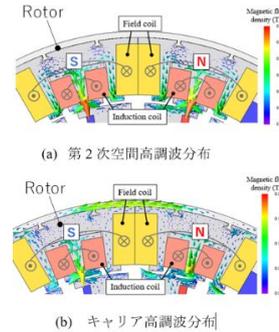


図 16 . 空間高調波分布とキャリア高調波分布の比較

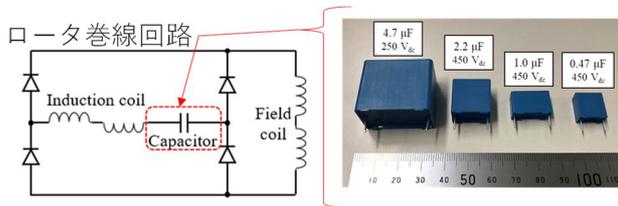


図 17 . キャリア周波数共振利用のロータ巻線回路

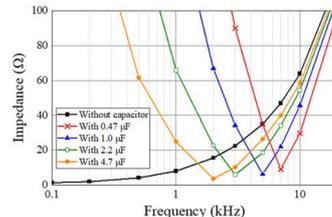


図 18 . ロータ巻線インピーダンス特性

## 2) 試作機および実験結果

第一にキャリア周波数を変更したときのトルク特性を評価した。図 17 に示すように 4 種類のコンデンサを用いて図 18 のようなロータ巻線インピーダンス特性を構成した。ここで、キャリア高調波はキャリア周波数の 2 倍成分が最も多く重畳するため、例えば 2kHz が共振周波数となる 4.7μF のコンデンサで LC 共振回路を構成した場合、キャリア周波数を 1kHz とすることでキャリア高調波と共振周波数を一致できる。図 19 にトルク評価を行った結果を図 20 に示す。同図から、キャリア周波数 1 kHz つまり共振周波数が 2 kHz のときにトルク向上効果が最大になることが明らかになった。次に、キャリア周波数 1kHz 且つロータ巻線共振周波数 2kHz としたときの可変速特性を図 20 に示す。同図に示すとおり、キャリア周波数 1kHz でスイッチングすることで生じるキャリア高調波 2kHz でロータ巻線回路と共振し、ロータ側にキャリア高調波による電磁石トルクを形成でき、トルクが向上していることが確認できる。回転速度の増加とともにキャリア高調波が増加するためトルクが向上していく特性も確認できる。

以上より、ロータ巻線回路の共振周波数の 1/2 倍となるキャリア周波数でスイッチングすることでキャリア高調波をロータ巻線への給電に利用でき、キャリア高調波による自励電磁石トルクを得ることができる原理を実証できた。さらに図 20 より、ロータ巻線回路の共振周波数に対してキャリア周波数をシフトする制御を行うことで能動的な界磁調整が可能であることも明らかにした。

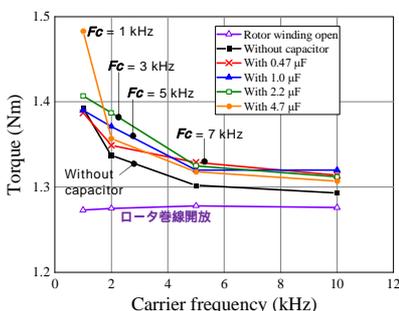


図 19 . キャリア周波数とトルクの関係

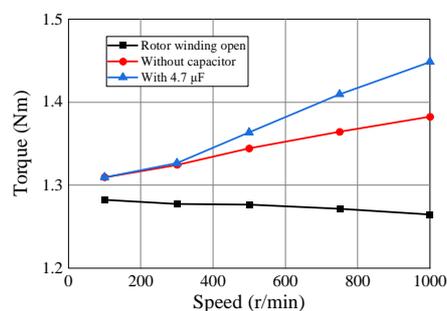


図 20 .  $F_c = 1\text{kHz}$  時の可変速特性向上効果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5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 熊井巧, 青山真大	4. 巻 141
2. 論文標題 空間高調波を利用した受動可変界磁PMモータの提案と実機検証	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 電気学会論文誌D	6. 最初と最後の頁 354-365
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejias.141.354	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 熊井巧, 青山真大	4. 巻 141
2. 論文標題 空間高調波を利用した受動可変界磁PMモータへのロータ巻線回路力率調整適用の実機検証	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 電気学会論文誌D	6. 最初と最後の頁 486-495
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejias.141.1	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 熊井巧, 青山真大	4. 巻 142
2. 論文標題 巻線界磁併用PMモータにおけるキャリア高調波励磁利用の実機検証	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 電気学会論文誌D	6. 最初と最後の頁 67-75
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejias.142.67	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 Aoyama Masahiro, Kumai Takumi	4. 巻 37
2. 論文標題 Adjustable Speed Drive Capability of Self-Excited Wound-Field Synchronous Motor Utilizing Space Harmonics With 500 W Class Prototype	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Energy Conversion	6. 最初と最後の頁 855-867
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TEC.2021.3127107	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 青山真大, 熊井巧	4. 巻 142
2. 論文標題 三相空芯回転トランス式キャリア共振結合形受動可変界磁モータ	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 電機学会論文誌D	6. 最初と最後の頁 -
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15件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 熊井巧, 青山真大
2. 発表標題 空間高調波を利用したラジアルギャップ形自動可変界磁PMモータの提案と可変速特性
3. 学会等名 電気学会半導体電力変換/モータドライブ合同研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 熊井巧, 青山真大
2. 発表標題 空間高調波を利用した自動可変界磁可変界磁PMモータの実機検証
3. 学会等名 電気学会マグネティクス/モータドライブ/リニアドライブ合同研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 熊井巧, 青山真大
2. 発表標題 空間高調波を利用した受動可変界磁PMモータへのLC共振利用における低速域性能向上
3. 学会等名 電気学会半導体電力変換/モータドライブ合同研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 青山真大, 熊井巧
2. 発表標題 空間高調波自励式巻線界磁形同期モータにおける可変速特性の考察
3. 学会等名 電気学会半導体電力変換/モータドライブ合同研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 熊井巧, 青山真大
2. 発表標題 空間高調波を利用した受動可変界磁PMモータへのLC直列共振の適用と実機検証
3. 学会等名 電気学会モータドライブ/家電民生合同研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 熊井巧, 青山真大
2. 発表標題 空間高調波を利用した受動可変界磁PMモータへのLC共振利用による可変速特性の拡大
3. 学会等名 令和3年電気学会全国大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Masahiro Aoyama, Toshihiko Noguchi
2. 発表標題 Self-Excited Diode Rectifying Wound-Field Synchronous Motor Utilizing Space Harmonics and Flux-Intensifying with Carrier Harmonics
3. 学会等名 IEEE Energy Conversion Congress & Expo (ECCE2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 青山真大, 野口季彦
2. 発表標題 キャリア高調波と零相磁束による自励式分布巻磁石フリーモータの提案とドライブシステムの基礎検討
3. 学会等名 2019年度電気学会産業応用部門大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 熊井巧, 青山真大
2. 発表標題 キャリア高調波を可変界磁に利用した受動可変界磁PMモータの実機検証
3. 学会等名 2022年電気学会産業応用部門大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 熊井巧, 青山真大
2. 発表標題 巻線界磁併用形可変界磁モータへのキャリア高調波利用の実機検証
3. 学会等名 電気学会半導体電力変換/モータドライブ合同研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 青山真大
2. 発表標題 三相空芯回転トランス式キャリア共振結合形モータの提案と基礎実証
3. 学会等名 電気学会モータドライブ/家電・民生合同研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 熊井巧, 青山真大
2. 発表標題 空間高調波を利用した受動可変界磁モータのP2-HEV用10kWモータへの適用
3. 学会等名 電気学会 静止器/回転機合同研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 青山真大, 熊井巧
2. 発表標題 ハルバッハAC巻線式三相空芯回転トランスの提案と実機基礎検証
3. 学会等名 電気学会半導体電力変換/モータドライブ合同研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 熊井巧, 青山真大
2. 発表標題 空間高調波を利用した受動可変界磁モータのxEV駆動用モータへの適用
3. 学会等名 令和4年電気学会全国大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Masahiro Aoyama
2. 発表標題 Three-Phase Air-Core Rotary Transformer with Halbach AC Windings for Wound-Field Motors
3. 学会等名 International Power Electronics Conference2022 (IPEC 2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計1件

<p>1. 著者名          執筆者：60名（加藤克司，牧野秀樹，小森雅晴，山本真義，今岡淳，内山英和，内藤治夫，加藤尚和，榎本裕治，水野勉，吉田征弘，青山真大，新口昇，後藤博樹，中村武恒，斎藤哲治，藤崎敬介，高下拓也，太田元基，尾藤三津雄，ほか40名）</p>	<p>4. 発行年          2022年</p>
<p>2. 出版社          技術情報協会</p>	<p>5. 総ページ数          673</p>
<p>3. 書名          次世代EV/HEV用モータの高出力化と関連材料の開発</p>	

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>静岡大学教員データベース  <a href="https://tdb.shizuoka.ac.jp/RDB/public/Default2.aspx?id=11254&amp;l=0">https://tdb.shizuoka.ac.jp/RDB/public/Default2.aspx?id=11254&amp;l=0</a></p> <p>IEEE Xplore database  <a href="https://ieeexplore.ieee.org/author/37085359732">https://ieeexplore.ieee.org/author/37085359732</a></p> <p>Google Scholar  <a href="https://scholar.google.co.jp/citations?user=Q2fqY8EAAAAJ&amp;hl=ja">https://scholar.google.co.jp/citations?user=Q2fqY8EAAAAJ&amp;hl=ja</a></p>
--

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
---------	---------