

令和 3 年 6 月 18 日現在

機関番号：17301

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2020

課題番号：18K13745

研究課題名（和文）磁気飽和を積極的に活用した集中巻モータにおける空間高調波の強調設計法の確立

研究課題名（英文）A design method to improve space harmonic distribution of fractional-slot concentrated winding motors with magnetic saturation

研究代表者

横井 裕一（YOKOI, Yuichi）

長崎大学・工学研究科・准教授

研究者番号：80610469

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000 円

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は、鉄心における磁気飽和を積極的に活用することにより、分数スロット集中巻モータの性能を向上させる設計を確立し、実証することである。モータ設計では一般的に、磁束量の増加を抑制する磁気飽和は特性を悪化させるものとして極力避けられてきた。本研究では、磁気飽和により固定パラメータとみなされるd軸およびq軸インダクタンスを大きく変化させて、分数スロット集中巻モータの性能向上が可能であることを理論的検討かつ有限要素法解析を用いた数値的検討により明らかにするとともに、実験機を試作してその妥当性を実証している。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の提案設計は、多くの分数スロット集中巻モータの設計に容易に応用できるため、学術的のみならず産業界への波及効果は大きいと考えられる。また、この提案設計が従来設計にとらわれない新たな設計によって特性向上を目指すという考えに基づいていることを踏まえ、既存の設計理論の適用が適切かどうか分からない分数スロット集中巻モータなどに対する設計を抜本的に見直す研究開発の流れに寄与する。

研究成果の概要（英文）：This research establishes and verify the design method to improve the performance of fractional-slot concentrated winding motors with magnetic saturation in iron cores. The magnetic saturation is suppressed in conventional motor designs because the phenomenon gives rise to undesirable effects on the motor performances. This research clarifies that the performance of fractional-slot concentrated winding motors can be improved by the variation of d- and q-axis inductances with magnetic saturation theoretically and numerically through a finite-element method analysis and determines the efficacy through experiments with a prototype.

研究分野：電力工学・電力変換・電気機器

キーワード：モータ 分数スロット集中巻 磁気飽和 可変磁束

1. 研究開始当初の背景

近年、化石燃料の枯渇や価格変動、再生エネルギーの利用促進、各国の政策を背景に、エネルギー媒体が化石燃料から電気エネルギーに変わりつつある。このエネルギー媒体の転換に伴い、電気エネルギーを力学的エネルギーに変換する原動機はエンジンからモータに置き換わることになり、その影響は自動車に代表される輸送機器において顕著に現れる。このような状況の中、モータのさらなる大トルク化・高効率化が求められている。これまで、モータの大トルク化・高効率化は普遍的な研究開発目標であり、設計および材料の両観点から検討されてきた。しかし、今後求められるモータのさらなる大トルク化・高効率化を達成するためには、材料特性の大幅な向上や従来設計にとらわれない新たな設計手法が必要である。

この状況を踏まえて、代表者はモータ設計を専門とする研究者として、分数スロット集中巻という巻線法で構成される固定子鉄心の従来設計を抜本的に見直すことに着目している。その理由は、固定子鉄心の従来設計が、本研究の対象とする分数スロット集中巻ではなく、これまで主に使われてきた整数スロット分布巻という巻線法に対して最適化されたものだからである。近年、磁石の高性能化に伴い、分数スロット集中巻が採用されるようになってきた。しかし、固定子鉄心の設計に対しては従来のものでそのまま踏襲されている。代表者は独自に考案した設計手法として、分数スロット集中巻で構成された固定子の鉄心内にスリット状のフラックスバリアを設けたスリットステータモータを提案して、トルク・効率の向上を達成した。代表者は、固定子鉄心内に磁束の流れを妨げるフラックスバリアを積極的に設けることにより、透磁率を均一に保つという従来設計を抜本的に見直し、透磁率が不均一な固定子鉄心形状を設計することで、ギャップ磁束密度分布、その結果としてトルクと効率を改善することができた。

近年利用拡大が進むハイブリッド自動車や電気自動車の駆動用モータにおいて、広い可変速領域での高効率駆動を実現する可変磁束特性が注目されている。高効率なモータとして永久磁石モータが挙げられるが、その磁石磁束はある動作点における高効率駆動には適しているものの、広い可変速領域での駆動には適していない。これに対して、電流ベクトル制御を用いて磁石磁束を変化させることで広い可変速領域での駆動を実現している。この電流ベクトル制御における効率向上には、d軸およびq軸のインダクタンスが重要な設計パラメータとなる。一般的に、入力電流（トルク）の増加に伴い、磁気飽和の影響でq軸インダクタンスが減少する。その一方で、d軸インダクタンスはほとんど変化しない。d軸インダクタンスを大きく変化させることができれば、可変磁束性能、そして効率の向上に繋がるのが期待される。ここで磁気飽和とは、鉄心材料となる電磁鋼板の非線形磁気特性に由来するものであり、図1の「非線形(実際)」で示すように大きな磁界強度 H に対して磁束密度 B がある値で飽和する現象である。この現象は特性を悪化させる要因として広く認知されており、従来設計では「線形(理想)」が成立する領域を利用することが前提であった。これに対して、鉄心の磁気飽和を積極的に活用してモータの性能を向上しようとする設計手法は、鉄心の透磁率を一定(線形)に保つという従来設計にとらわれない新たな設計手法だと言える。

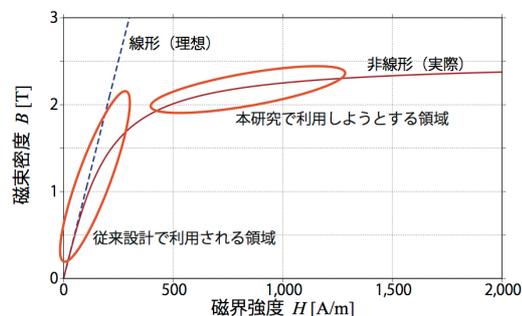


図1

2. 研究の目的

従来設計では、特性を悪化させる要因として避けられてきた鉄心における磁気飽和を有効活用することで、固定パラメータとみなされるd軸およびq軸インダクタンスを大きく変化させて、分数スロット集中巻モータの性能を向上させることである。具体的には、各スロット・ポールコンビネーションに対する設計手法の確立、10極12スロットモータを試作して提案手法を実験的に実証する。

3. 研究の方法

(1) 磁気飽和を考慮したギャップ磁束密度分布に基づく固定子設計の理論的検討

分数スロット集中巻のコイル配置を考慮しながら、不要な空間高調波を極力含まないギャップ磁束密度分布の形状を決定することは、これまで行われておらず、逆問題を解くことに相当するため容易ではない。ギャップ磁束密度を大きくすべき箇所を基準に巻線配置を構築する。そして、ギャップ磁束密度を小さくすべき箇所では磁気飽和が発生するように固定子鉄心形状を決定する。この固定子の設計法の妥当性は、電磁界解析ソフトウェアで確認する。

(2) 非線形磁気特性を考慮した分数スロット集中巻モータの設計・製作

試作モータの設計として、(1)を用いて固定子の巻線および鉄心形状の理論設計を行い、さらに詳細な形状を決定するために電磁界解析ソフトウェアを用いたシミュレーション設計を行う。代表者が所属する研究室の既存実験装置を利用することを考慮して、試作モータは 10 極 12 スロットの分数スロット集中巻モータとする。また、モータの製作は、加工および組立てに専門技術を要するため、特注で外部に委託する。

(3) 試作モータを用いた実験検証

研究室の既存実験装置を用いて、試作モータのトルク、効率等の諸特性を測定し、設計の妥当性を実証する。この一連の実験は、スリットステータモータに対して実施済みの実験と同様であり、実験実施における支障はない。得られた実験結果と設計時に行なったシミュレーション結果を比較して、試作モータが設計理論通りであることを確認する。

4. 研究成果

本研究で設計したモータの概形を図 2 に示す。このモータは、固定子のティース先端部の厚さを薄くすることで、磁気飽和が発生しやすい構造になっている。そのため、入力電流に応じて、磁気飽和が発生して透磁率が変化し、一般的に固定パラメータと見なされるインダクタンスが変化する。図 3 に示すように、入力電流の大きさ I_a および位相 β によって d 軸インダクタンス L_d および q 軸インダクタンス L_q が大きく変化することが分かる。ここで、埋込磁石モータの逆起電力 V およびトルク T は、磁極対数 p 、電機子巻線に鎖交する磁石磁束 Ψ_a とすると、

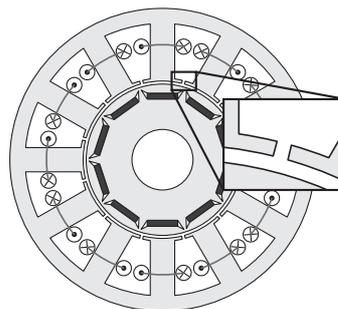


図 2

$$V = \omega \sqrt{(\Psi_a - L_d I_a \sin \beta)^2 + (L_q I_a \cos \beta)^2}$$

$$T = p \Psi_a I_a \cos \beta + \frac{1}{2} p (L_q - L_d) I_a^2 \sin 2\beta$$

で表される。広い速度範囲での定出力運転を実現するために、一般的に、回転速度の増加に伴い位相 β が大きくなるように制御する。これにより、逆起電力を入力電圧制限値以下に保つことができ、かつ必要なトルクを出力することができる。当該モータは電流位相 β の増加に伴い $(L_q - L_d)$ が大きくなるため、電流の大きさを抑えることができる。表 1 に広い速度範囲での各動作点における効率を示す。また、括弧内に、インダクタンスの変化が小さい比較モータとの比較結果を示す。大きな入力電流を必要とする高出力運転動作点において効率が向上することが分かる。これは、磁気飽和に伴う上記の特性によるものと考えられる。

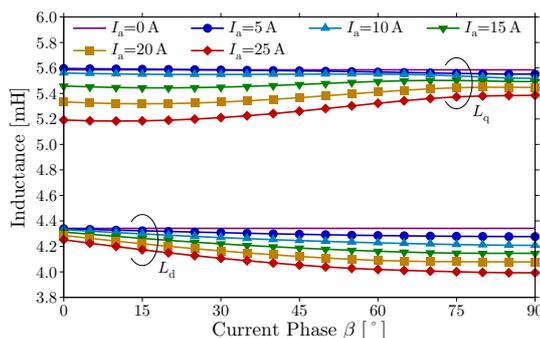


図 3



図 3

図 3 に、本研究助成により製作したこのモータの実験機を示す。実験により、有限要素法解析の結果と同様の基本特性が得られていることを確認している。

表 1

| | 500 min ⁻¹ | 1500 min ⁻¹ | 2500 min ⁻¹ | 3500 min ⁻¹ | 4500 min ⁻¹ |
|---------|-----------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| 10.0 Nm | 81.4% (-0.1%) | 91.1% (+0.4%) | | | |
| 6.0 Nm | 86.3% (-0.1%) | 93.2% (-0.1%) | 93.6% (+1.0%) | | |
| 4.3 Nm | 88.7% (-0.1%) | 94.0% (-0.1%) | 94.5% (-0.2%) | 93.2% (+0.9%) | |
| 3.3 Nm | 90.0% (-0.1%) | 94.2% (-0.2%) | 94.6% (-0.4%) | 93.5% (-0.4%) | 92.3% (+1.1%) |

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1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 Yokoi Yuichi, Hashizume Ryuta, Higuchi Tsuyoshi | 4. 巻 13 |
| 2. 論文標題 Design of slit width to improve space harmonic distribution in a slit stator motor | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 IET Electric Power Applications | 6. 最初と最後の頁 1125 ~ 1130 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1049/iet-epa.2018.5289 | 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 山田 大門, 荒木 遼太, 横井 裕一, 樋口 剛 |
| 2. 発表標題 磁気飽和を活用した集中巻構成可変磁束モータの実験的検討 |
| 3. 学会等名 電気学会産業応用部門大会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|-------------------------------------|
| 1. 発表者名 山田 大門, 横井 裕一, 樋口 剛 |
| 2. 発表標題 磁気飽和を活用した集中巻構成可変速モータの一検討 |
| 3. 学会等名 電気学会回転機研究会 |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|----------------------------------|
| 1. 発表者名 横井 裕一, 樋口 剛 |
| 2. 発表標題 鉄心材料の特性を考慮した集中巻モータの設計 |
| 3. 学会等名 電気学会全国大会 |
| 4. 発表年 2019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 |
|---------|---------|
|---------|---------|