

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 5 月 9 日現在

機関番号：17301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04006

研究課題名(和文) 磁束フィルタ回転子による分数スロット集中巻誘導モータの駆動

研究課題名(英文) Magnetic flux filtering rotors in fractional-slot concentrated winding induction motors

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、回転子設計を抜本的に見直すことにより、固定子が分数スロット集中巻で構成された誘導モータのトルク特性を向上させる設計を実証し、設計理論を確立することである。分数スロット集中巻による回転磁界の空間分布には、トルクに寄与する調波成分だけでなく、それ以外の成分も大きい。そのため、トルク脈動が大きくなり、誘導モータの正常な駆動が実現できないことが知られている。本研究では、不要な成分を大幅に減少させるための磁束フィルタ機能を回転子に具備する設計法を理論的かつ数値的に明らかにし、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

本研究で提案する設計法の確立は、多くの分数スロット集中巻誘導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かわ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 proposed a rotor winding configuration to filter space harmonics in rotating magnetic field (RMF) owing to stator fractional-slot concentrated winding (FSCW) configurations for induction motors. Stator FSCW configurations generate a specific harmonic that produces the drive-torque and several other harmonics as the dominant components in the stator RMF. Conventional squirrel-cage winding rotors generate torques derived from all the dominant stator RMF harmonics. This prevents the production of adequate drive-torque and line-start capability. The proposed wave-winding rotor traps the driving RMF harmonic and completely eliminates the effects of the other dominant RMF harmonics. This filtering effect on the stator RMF harmonics leads to the production of an adequate drive-torque and line-start capability. The efficacy of the proposed rotor winding configuration is determined theoretically, numerically, and experimentally.

研究分野：電力工学・電力変換・電気機器

キーワード：誘導モータ 分数スロット集中巻 磁気フィルタ回転子 波型回転子

### 1. 研究開始当初の背景

近年、我が国のエネルギー政策は、「安全性を大前提とし、自給率、経済効率性、環境適合を同時に達成する」ことを基本方針としている。その取組みの一つである「徹底した省エネ」として、国内の総消費電力量の約 55%を占めるモータを対象に、その駆動効率を向上させて消費電力量を削減しようとするトップランナー制度が導入されている。このトップランナー制度に準じた高い駆動効率のモータが普及することに伴い、その消費電力量の削減幅が徐々に拡大している。その一方で、AI や IoT などの技術革新に伴い、モータが必要となる新たな製品やサービスが生み出されており、モータによる消費電力量がますます増加することが予想される。

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モータ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、モータの従来設計が、本研究で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。分数スロット集中巻は、既存の整数スロット分布巻に比べて、回転機の効率向上や製造工程の簡便化が可能である。そのため、近年、磁石の高性能化に伴い、磁石を用いた同期モータにおいて、固定子巻線に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、固定子巻線以外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、トルクと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。

本研究で対象とする誘導モータは、産業用途として最も利用されており、効率向上が期待できる分数スロット集中巻を採用すれば、総消費電力量の大幅な削減が見込まれる。しかし、これまで、誘導モータの固定子巻線に分数スロット集中巻はほとんど採用されていない。その理由は、ギャップ磁束密度分布に含まれる不要な調波成分が大きいことに伴い、駆動を阻害する脈動トルクが大きくなり、モータとしての正常な駆動を実現できないからである。これまでに、固定子の分数スロット集中巻の巻線構成や鉄心形状を工夫する設計法が検討されてきており、不要な調波成分を減少させることができているものの、設計や巻線が複雑になり、効率向上が見込めなかった。このような固定子による不要な調波成分を減少させるという従来設計方針ではなく、回転子設計、特に回転子巻線によって、ギャップ磁束密度分布の調波成分をフィルタリングすることができれば、不要な成分を大幅に減少させ、その分、必要な成分を増大させて、分数スロット集中巻構成の誘導モータの正常な駆動を実現し、その効率の向上に繋がることを期待できる。ここでのフィルタとは、ギャップ磁束密度分布の各空間調波成分を対象としたものであり、図 1 の「提案設計」で示すように、特定の調波成分、ここでは第 5 調波成分を増大させて、それ以外の成分を大幅に減少させる機能である。ただし、5 次の整数倍の調波成分も大きくなる可能性がある。従来は、ギャップ磁束密度分布に不要な成分がほとんど含まれない整数スロット分布巻が採用されているため、基本波成分を減衰させない設計が前提となっている。

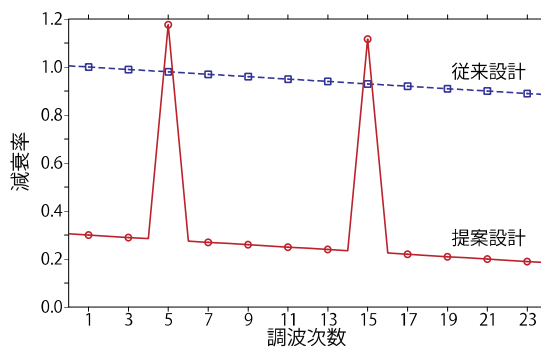


図 1

### 2. 研究の目的

誘導モータにおいて、回転子に磁束フィルタ機能を具備させることで、ギャップ磁束密度分布の不要な空間調波成分を減少させ、かつ必要な成分を増大させて、トルク脈動が少ない正常な駆動を実現することである。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) 磁束フィルタ機能の定式化および所望磁束フィルタ機能を有する回転子の設計法の確立

任意のギャップ磁束密度分布に対して、コイルピッチをパラメータとして、巻線コイル単体の磁束フィルタ機能を定式化する。これにより得られた巻線コイル単体の磁束フィルタ機能を参考にして、所望の磁束フィルタを実現する巻線構成を構築する。この手順により、配置された巻線に対する磁束フィルタ機能の確認から所望の磁束フィルタを探索するというアプローチで

はなく、磁束フィルタを直接設計することができる。この回転子の設計法の妥当性は、電磁界解析ソフトウェアを用いたシミュレーションで確認する。

(2) 磁束フィルタ機能を有する回転子の設計・製作

試作モータの設計として、(1)を用いて回転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、試作モータの速度-トルク特性、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

本研究の成果として提案した磁束フィルタ機能を有する波型回転子巻線を図 2 に示す。この図の回転子巻線は、10 極モータ用であり、ギャップ磁束密度の第 5 空間調波成分とその奇数倍の調波成分のみから回転子電流を誘導し、それ以外の成分の影響を完全に除去することができる。この波型巻線回転子を採用して、設計した分数スロット集中巻誘導モータの概形を図 3 に示す。このモータの固定子巻線は 10 極 12 スロット 2 層の分数スロット集中巻で構成されており、発生するギャップ磁束密度の主成分は、基本調波、第 5 調波、第 7 調波である。回転子巻線は、図 2 に示す波型巻線を 1 相として、3 相分を配置した構成としている。理論計算並びにシミュレーションの結果より、不要な主要成分である基本調波と第 7 調波の両成分の影響を完全に除去できることを確認している。また、従来のかご型回転子巻線と比較して、固定子電流、回転子電流ともにほぼ半減できており、かご型回転子では得ることができない始動トルク（回転速度が  $0 \text{ min}^{-1}$  におけるトルク）を、提案する波型回転子では十分に発生させることができることを確認している。

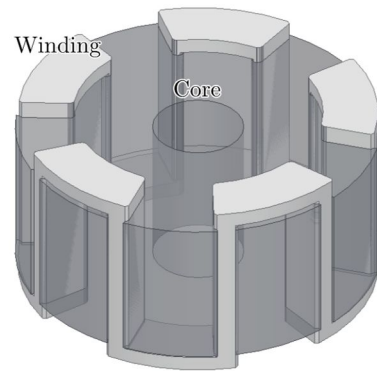


図 2

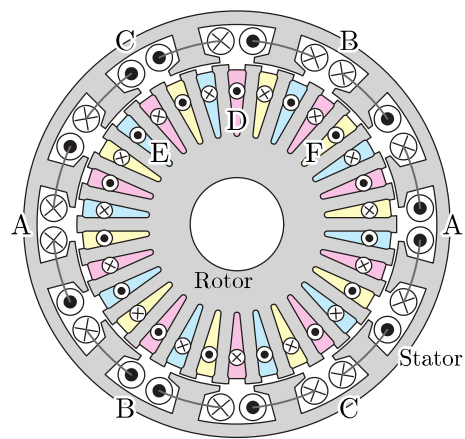


図 3



図 4

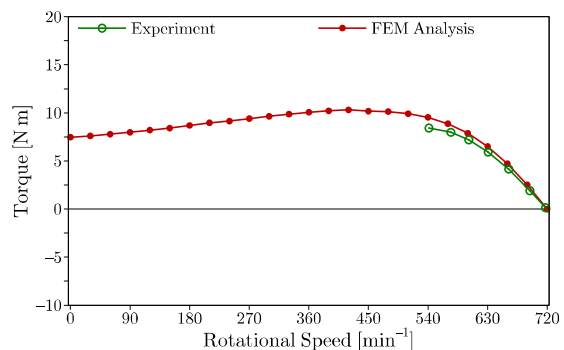


図 5

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Yuichi Yokoi
2. 発表標題 A 12-Slot 10-Pole Induction Motor with Wave Winding Rotor
3. 学会等名 The 11th International conference on Power Electronics - ECCE Asia (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 下湯 郁弥, 横井 裕一
2. 発表標題 波形回転子集中巻誘導モータの特性に関する一検討
3. 学会等名 電気学会 回転機研究会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 誘導電動機	発明者 横井 裕一	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2023-037825	出願年 2023年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔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
---------	---------