

2018年度 永守財団 研究助成 研究報告書

所属機関名	長崎大学
職位または役職	准教授
氏名	横井 裕一

1. 研究題目

可変d軸インダクタンス集中巻モータの設計と可変速特性に関する研究

2. 研究目的

本研究の目的は、2017年度永守財団研究助成の支援を受けて提案および開発した可変d軸インダクタンス(漏れ磁束)集中巻モータの設計法を確立し、その可変速特性を解明することである。同助成で開発したモータは12スロット10極の分数スロット巻線構成であるため、「可変d軸インダクタンス」という特性が他のスロットと極の組合せの分数スロット巻線構成で実現可能かどうかは未だ明らかになっていない。可変d軸インダクタンス集中巻モータの応用可能性拡大を図るためには、その最適設計の観点から、設計法の確立および特性の解明は必要不可欠である。

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、広い速度範囲での高効率運転を目指す可変磁束という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、その固定界磁磁束が広い速度範囲での高効率運転の妨げになる。そこで、電流ベクトル制御に基づく弱め磁束制御を用いることにより、可変磁束が実現できる。この理由から、可変磁束用の永久磁石モータにおいて、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(負荷トルク)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、可変磁束性能の向上に繋がることが期待される。

本研究では、可変d軸インダクタンス特性が12スロット10極構成特有のものではなく、様々な分数スロット集中巻構成で実現可能な特性であることを示す。そのために、代表的な分数スロット集中巻構成である3スロット2極(12スロット8極)構成および9スロット8極構成に対して、有限要素法を用いた設計および特性の解析を実施する。すでに、可変d軸インダクタンス特性は、固定子ティース先端部の形状に大きく依存することを確認している。そのため、固定子ティース先端部の形状を微調整することで、他のスロットと極の組合せの分数スロット巻線構成に適応可能であると考えられる。

3. 研究内容及び成果

本研究の目的は、代表的な分数スロット集中巻構成における可変d軸インダクタンス特性を有限要素法解析により実証することである。そのためには、採用する有限要素法解析の精度の確認が不可欠である。そこで、まず、採用する有限要素法解析の妥当性を、実験結果と比較することで確認した。実験機には、2017年度永守財団研究助成により製作した12スロット10極構成のモータを用いた。図1にこのモータの固定子の写真を示す。実験結果と解析結果の比較の一例として、表1にこのモータの各運転動作(トルク、回転数)点における効率を示す。ここでは、無負荷損を機械損として考慮している。また、二次元有限要素法解析を用いているため、コイルエンド部での銅損ならびに軸方向磁界の影響を考慮できていない。一般的に、解析は実際よりも数%程度効率を過大評価するため、考慮できていない点も鑑みて、採用した有限要素法解析は妥当であると判断している。

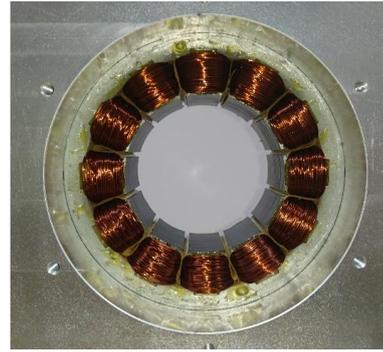


図 1

表 1

トルク [Nm]	回転数 [min ⁻¹]		
	500	1500	2500
10.0	77.3 % (-2.6 %)	87.8 % (-1.9 %)	—
6.0	82.7 % (-1.6 %)	89.0 % (-2.0 %)	89.0 % (-1.9 %)
4.3	84.7 % (-1.6 %)	88.5 % (-2.5 %)	89.9 % (-0.9 %)
3.0	85.6 % (-1.6 %)	88.7 % (-1.8 %)	88.1 % (-1.4 %)

この有限要素法解析を用いて、本研究では、12スロット8極構成および9スロット8極構成の分数スロット集中巻モータのモデルを作成し、諸特性ならび

に可変d軸インダクタンス特性を計算した。図2に12スロット8極構成、図3に9スロット8極構成における入力電流(電流値 I_a 、位相 β)に対するd軸およびq軸インダクタンス L_d 、 L_q を示す。12スロット8極構成では、12スロット10極構成と同じ固定子鉄心形状を採用し、回転子の磁石幅ならびにフラックスバリアの形状を総断面積が同じになるように調整している。9スロット8極構成では、12スロット8極構成と同じ回転子構造を採用し、固定子のティースならびにスロットの総断面積が同じになるように調整している。両モデル共に特性に特化した設計ではないものの、可変d軸インダクタンス特性を確認することができる。これまでに得られている12スロット10極構成と、本研究で取得した両構成における可変d軸インダクタンス特性を比較すると、d軸インダクタンスは9スロット8極構成、次いで12スロット10極構成において大きく変化することが分かった。この結果は、各相の巻線コイルの配置に関係していると考えられる。各相の巻線コイルが、9スロット8極構成では隣り合った3つの固定子ティースに、12スロット10極構成では隣り合った2つの固定子ティースに巻かれている。これらのティース間のティース先端部は、入力電流の増加に伴う磁気飽和が顕著になるため、d軸インダクタンスが大きく変化すると考えられる。

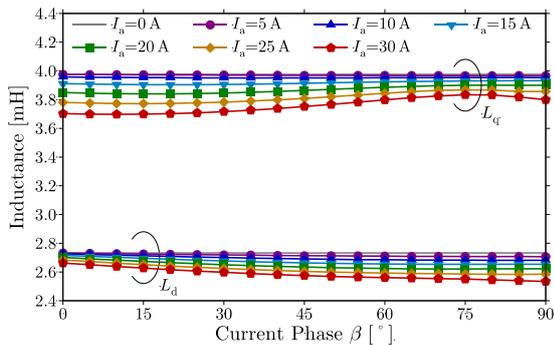


図 2

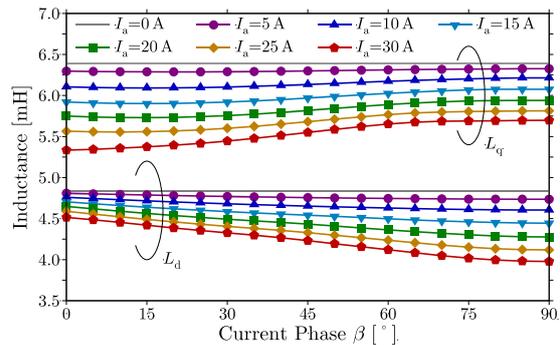


図 3

4. 今後の研究の見通し

本研究の成果により、提案する可変d軸インダクタンス特性が、代表的な分数スロット集中巻構成において実現することが明らかになった。さらに、各相の巻線コイルが連続する配置によって、この特性が顕著に誘導される可能性も明らかになった。これらの成果により、可変d軸インダクタンス特性を誘導する設計はほぼ確立しつつあると言える。

本研究で対象とする可変d軸インダクタンス集中巻モータは、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への応用を目指している。このようなモータには広い可変速領域における高効率駆動が求められており、その実現には、適切な特性を有するモータの設計だけでなく、適切な制御も必要である。さらに、可変d軸インダクタンス集中巻モータの応用可能性を高めるためには、その設計および制御の一般化が不可欠である。そこで今後は、モータ特性を数理的に定式化して数理モデルを構築し、それを用いて一般的な制御法を構築していく予定である。

5. 助成研究による主な発表論文、著書名

1. 横井 裕一, 樋口 剛, 鉄心材料を考慮した集中巻モータの設計, 電気学会全国大会, S20-3, 北海道, 2019年3月14日.
2. 山田 大門, 荒木 遼太, 横井 裕一, 樋口 剛, 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, 電気学会産業応用部門大会, Y-108, 長崎, 2019年8月20日.