

2017 年度 永守財団 研究助成 研究報告書

所 属 機 関 名 (大学、大学院、研究所 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

集中巻構成可変漏れ磁束モータの開発

2. 研究目的

本研究の目的は、電機子巻線を集中巻で構成した可変漏れ磁束モータを提案し、その妥当性を実証することである。これまでに提案されている可変漏れ磁束モータの電機子巻線は分布巻で構成されている。電機子巻線の構成を分布巻から集中巻に変更することにより、コイルエンドの短縮に伴う銅損の低減や構造の薄型化、巻線工程の簡単化に伴う生産性の向上など、可変漏れ磁束モータの有用性の向上が期待される。

可変漏れ磁束モータは、広い速度範囲で高効率運転を目指す可変磁束モータの一種であり、鉄心材料の磁気飽和現象を積極的に利用して可変磁束特性を実現する。近年利用拡大が進むハイブリッド車や電気自動車の駆動用モータには、広い速度範囲での高効率運転が求められる。高効率なモータとして界磁での損失が少ない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っている。これに対して、界磁磁束を調整可能な可変磁束という設計概念が注目されている。

本研究では、可変漏れ磁束モータの電機子巻線を集中巻で構成するために、従来、回転（界磁）子の磁極（永久磁石）間で発生させていた磁気飽和を、固定（電機）子のティース先端で発生させることにより、集中巻構成に対して可変磁束特性が実現できることを示す。従来の分布巻構成では、基本波成分による単一の回転磁界が発生し、それと同期する回転子の磁束短絡路中の磁束量、磁気飽和が回転磁界によって調整されるため、界磁磁束が変化する。一方、単に固定子巻線を集中巻構成に変えただけでは、高調波成分による複数の回転磁界が発生するため、回転子の全ての磁束短絡路で同時に磁気飽和が発生せず、界磁磁束がほとんど変化しないことを確認している。この課題に対して、固定子のティース先端の形状を工夫することで、入力電流により磁気飽和および鎖交磁束を調整することが可能になると考えられる。

3. 研究内容及び成果

本研究は、当初、固定子のティース先端部に磁束短絡路を設けることで可変磁束特性を実現することを目指していた。この設計により、研究目的である磁気飽和および鎖交磁束を調整することは可能である。しかし、電機子巻線の漏れインダクタンスが増大してしまい、入力する交流電流の正負が変わる瞬間に逆起電力が急激に上昇してしまい、入力電圧の最大値を超えるため、電流ベクトル制御を実現できない恐れがある。そこで、固定子のティース先端部に磁束短絡路を設けず、磁気飽和を積極的に活用することで鎖交磁束を調整することが可能な設計を、有限要素法を用いて検討した。

本研究で設計したモータの概形を図 1 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 2 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、

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

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

$$= p (\Psi_a - L_d I_a \sin \beta) I_a \cos \beta + p L_q I_a \sin \beta I_a \cos \beta$$

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 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。

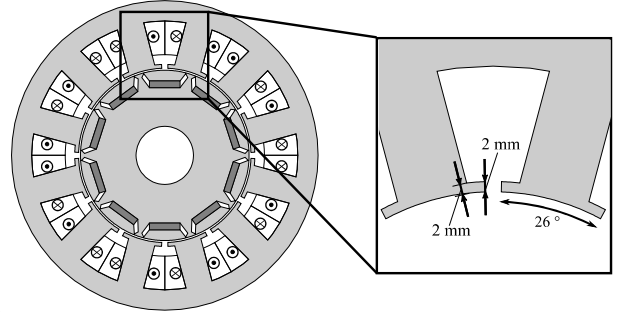


図 1

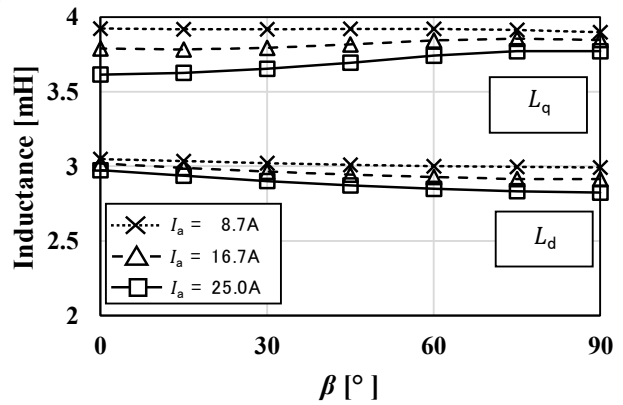


図 2

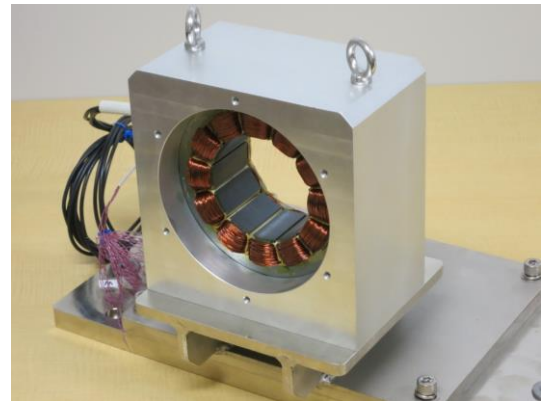


図 3

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%)

4. 今後の研究の見通し

本研究の成果により、固定子のティース先端部での磁気飽和を積極的に活用することで、集中巻構成の可変速モータの効率向上の可能性が明らかになった。

本研究で対象とした構成は、12 スロット 10 極の分数スロット集中巻である。一般的に用いられる分数スロット集中巻構成は、この 12 スロット 10 極構成だけでなく、3 スロット 2 極構成（6 スロット 4 極や 12 スロット 8 極を含む）や 9 スロット 8 極構成などがある。本研究で提案した設計手法の一般性、有用性を示すためには、これらの異なる構成への適用可能性を検討する必要がある。有限要素法解析だけでなく、理論構築を行うことで設計法を確立することを目指す。

また、本研究でのモータ設計は研究室の既存モータをベースとしたため、回転子の構造はその既存モータのままとした。固定子のティース先端部での磁気飽和が固定子構造、特に磁石やフラックスバリアの配置に大きく依存することは明らかである。提案する固定子に適した回転子構造を設計することにより、本研究成果以上の性能向上が期待される。

5. 助成研究による主な発表論文、著書名

1. 横井 裕一, 山田 大門, 樋口 剛, 可変漏れ磁束モータの界磁磁束に対する非線形磁気特性の影響に関する一検討, RM-17-139, pp. 95-98, 名古屋, 2017 年 11 月 16 日.
2. 山田 大門, 横井 裕一, 樋口 剛, 磁気飽和を活用した集中巻構成可変速モータの一検討, 電気学会回転機研究会, RM-18-113, pp. 39-42, 鹿児島, 2018 年 11 月 7 日.