

2019年度 永守財団 研究助成 研究報告書

所属機関	長崎大学大学院・工学研究科
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特性式と制御に関する研究

2. 研究目的

本研究の目的は、2017年度、2018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軸インダクタンス集中巻モータの特性を数理的に定式化することによって、その広い可変速領域の各動作点において高効率駆動を実現する入力電流の条件を明らかにすることである。これまでの研究によって、当該モータの可変速特性を実現する設計法は確立しつつある。さらに、その制御法を確立することができれば、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ことができる。

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、その固定界磁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。

本研究では、可変d軸インダクタンス集中巻モータの広い可変速領域における高効率駆動を実現する制御法の確立を目指す。ここでの目的は当該モータの応用可能性を高めることであるため、可変d軸インダクタンス集中巻モータに分類される全てのモータに適用できなければならない。そこで、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する。これは、設計が異なる各モータに応じて緻密な検討が求められる効率最大化制御を構築するための前段階の実施項目にもなる。また、得られた制御法を有限要素法解析並びに製作済の実験機を用いた試験によって検証する。

3. 研究内容及び成果

本研究の目的は、広い可変速領域において可変d軸インダクタンス集中巻モータの高効率駆動を実現する制御法を確立することである。そのためには、モータ特性を数理的に定式化した数理モデルが必要となる。当該モータは永久磁石モータに分類できるため、既存の永久磁石モータの特性式に対して、当該モータ特有の可変インダクタンス特性を適用して、数理モデルを構築した。この数理モデルの構築において必要となる可変インダクタンス特性は、鉄心中における磁気飽和が密接に関連するため、理論的に求めることは非常に困難である。そこで、当該モータ(図 1)を有限要素法で数値的に解析することによって求めた可変インダクタンス特性(図 2)を参考にして、可変インダクタンス特性をモデル化している。この可変インダクタンス特性は、図 2 に示すように、入力電流の大きさと位相にのみ依存すると仮定している。ここでは、研究助成 2018 の成果を踏まえて、図 1 に示す 12 スロット 10 極だけでなく、12 スロット 8 極、9 スロット 8 極などの代表的な分数スロット集中巻構成に対する可変インダクタンス特性を参考にして、一般化できることを確認している。この構築した数理モデルを用いて、最大トルク制御、弱め磁束制御、最大効率制御を適用した際の入力電流条件と出力特性を導出した。これにより、応用事例で要求される可変速領域に対して効率マップも概算することができる。

構築した制御法における各パラメータを実験機に対して設定し、各動作点に対して高効率駆動を実現する入力電流の条件を求めて、実験を実施してその妥当性を検証した。ここでは、研究助成 2017 で製作した実験機(図 3)を用いており、本研究助成により導入した負荷装置を用いて高速領域まで駆動できるようになっている。数理モデルの構築が有限要素法解析の結果に基づいているため、実験機の効率は、想定よりも数%程度低くなっているものの、許容範囲内であることを確認している。この構築した制御法は、一般化された可変d軸インダクタンス集中巻モータに対して適用可能であるものの、応用事例が異なる個々のモータに最適化されたものではない。そこで、構築した制御法で得られた、各動作点に対して高効率駆動を実現する入力電流の条件に基づいて、実験機において各動作点の効率を最大化する入力条件を、実験的に探索した。その実験結果の一部を表 1 に示す。表の上段が効率、中段が入力電流の大きさ、下段が入力電流の位相である。磁気飽和の影響が大きい状況において、入力電流の誤差は大きくなるものの、概算可能であることを確認している。

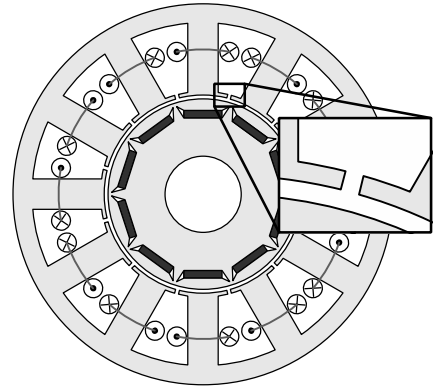


図 1

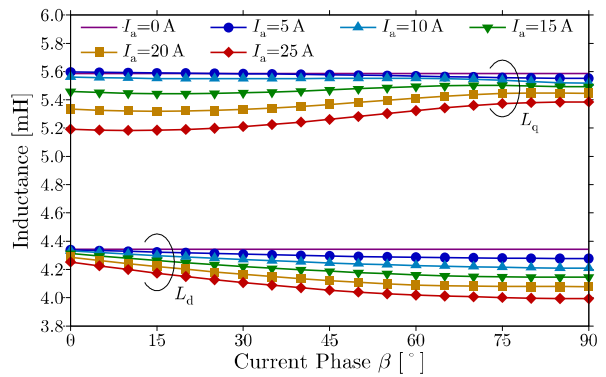


図 2

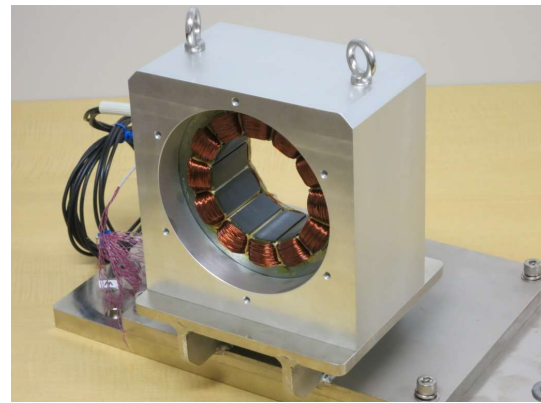


図 3

表 1

トルク [Nm]	回転数 [min^{-1}]		
	500	1500	2500
10.0	77.3 %	87.8 %	—
	25.9 A 11°	27.3 A 22°	—
6.0	82.7 %	89.0 %	89.0 %
	16.6 A 6°	17.0 A 13°	22.8 A 42°
4.3	84.7 %	88.5 %	89.9 %
	12.3 A 4°	12.8 A 13°	14.4 A 29°
3.0	85.6 %	88.7 %	88.1 %
	9.8 A 4°	10.3 A 13°	11.0 A 22°

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軸インダクタンス集中巻モータの特性を定式化することによって、その数理モデル、および各動作点において高効率駆動を実現する入力電流の条件が明らかになった。これにより、当該モータの応用可能性を示すことができたと言える。特に、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おり、構築した数理モデルと制御法は、当該モータの採否を判断する際の有効性の確認、モータや制御系を設計する際の特性の概算において重要な役割を担うと考えられる。

可変d軸インダクタンス集中巻モータの数理モデルの構築において、モータ特有の可変d軸インダクタンス特性と設計パラメータとの関係性が少しずつ明らかになってきた。この関係性を解明できれば、適用事例に応じた当該モータおよび特性の最適化が可能になる。

また、本研究の成果により、鉄心中の磁気飽和を活用することによってモータの性能を向上できる可能性が示された。従来のモータ設計では磁気飽和を無視した線形性が成り立つ状況を想定している。磁気飽和を活用するためには、磁気飽和を考慮した線形性が成り立たない状況も想定したモータ設計の確立が望まれる。今後は、この観点から、モータに関する研究に従事していきたい。

5. 助成研究による主な発表論文、著書名

Yuichi Yokoi, Tsuyoshi Higuchi, Variable d-axis Inductance Machines with Concentrated Windings (tentative), in preparation.