

令和 4 年 6 月 15 日現在

機関番号：33907

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2021

課題番号：17K06320

研究課題名（和文）低騒音化を実現する低速域位置センサレスデュアル巻線モータの設計法の研究

研究課題名（英文）Research on design approach of a dual winding wound-field synchronous machine under a new harmonic voltage injection-based sensorless drive at low speeds

研究代表者

加納 善明（Kano, Yoshiaki）

大同大学・工学部・准教授

研究者番号：80456714

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,700,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、二重三相巻線を持つ界磁巻線型同期モータを対象に、2系統の巻線にそれぞれ逆位相で高調波重畳する新方式の位置センサレス制御方式を提案し、同方式を前提としたモータ設計方法について検討している。提案センサレス制御方式では、位置情報を持つ推定用電流発生原理が理論的に解明されていない。本研究では、3D-FEAの解析結果を元に、推定用電流発生原理を理論的に明らかにし、その妥当性を試作機実験検証から確認している。さらに、モータの形状、局所磁気飽和、動的インダクタンス特性、制御安定性の相関を系統的に整理し、その結果から、位置センサレス動作範囲を最大化するモータ設計指針を導出している。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の取組みは、小型化・高トルク化・高出力密度化・低騒音化を追求するモータとセンレスドライブの連成最適化問題の一アプローチを目指すもので、学術的にも世界に類がなく、独創的であり、我が国が先導する当該モータ技術の世界的競争力向上に貢献できると予想される。

研究成果の概要（英文）：This study examine the design approach of a dual winding wound-field synchronous machine under a new harmonic voltage injection-based sensorless drive at low speeds. In the proposed sensorless control method, the principle of high-frequency current generation for rotor position estimation has not been theoretically clarified. In this study, the principle of high-frequency current generation is clarified both experimentally and analytically using a 16-pole-96-slot machine. The correlation between motor geometry, local magnetic saturation, dynamic inductance characteristics, and control stability will be systematically organized. From the results, motor design guidelines that maximize the position sensorless operation range are derived.

研究分野：回転機

キーワード：モータ センサレス制御 二重三層巻線

1. 研究開始当初の背景

近年、ハイブリッド車や電気自動車用の主機モータや発電機、スターター用モータなど、自動車のパワートレイン用途の電動機駆動技術の研究開発が盛んに行われている。これらの用途では、自動車という限られたスペースに搭載されることから体格に対する要求が高く、同時に低速での大トルク特性が要求される。高トルク・高出力密度を実現する電動機駆動技術に、多重巻線電動機がある。これは1つのステータに複数組の巻線を配置し、複数のインバータで各巻線に通電する方式である。特に2つの三相巻線を有する二重三相巻線モータ(図1参照。以下、デュアル巻線モータと略記)には、2つの巻線を電気角で30°ずらして配置することで磁束高調波に起因する6次のトルク脈動を低減できる特徴がある。古くからデュアル巻線モータに関する研究が報告されているが、近年もさらなる高出力密度化を目指した研究が行われている。

同期モータの制御には、回転角度に応じて電流を制御するため、通常、エンコーダ等の位置センサが用いられる。この位置センサを除去することで、小型・軽量化、低価格化、信頼性向上が期待できる。近年、位置センサレス制御技術について多くの研究がなされており、低速域から大トルクが求められるアプリケーションでは、図2に示すような高調波電圧を重畳する方式が一般に用いられている。しかし、自動車駆動のように騒音抑制が求められる用途は、「PWMによって生じる電流高調波成分」と「低速域位置センサレス制御において、重畳する高調波電圧によって増加する可聴域での電流高調波成分」によって発生するモータの磁気的騒音が問題となりやすい。後者によって発生する騒音に対し、重畳する高調波電圧の周波数をランダムにすることで騒音低減を図る手法が提案されている。しかし、この手法は、発生する磁気的騒音の周波数を分散することで、特定の周波数成分が継続的に発生し耳障りな音が発生するのを防ぐことが主目的で、騒音レベルの低減効果が小さい。他方、特殊なPWMを用いることで可聴域での電流高調波成分を発生せずに回転子位置を推定する手法が提案されているが、スイッチング回数の増加や推定演算の複雑化を招く。スイッチング回数を増やさずに騒音を低減するには、電流高調波成分の低減が効果的である。しかし、重畳する高調波電圧の振幅を下げると、騒音が減少する一方で、位置推定精度が低下するトレードオフの問題がある。

高調波電流に起因するトルク脈動は、機械的振動を起し騒音の発生源となる。デュアル巻線モータでは、2系統巻線にそれぞれ個別の位置推定用高調波電圧を重畳することができ、2系統の巻線に逆位相の高調波電圧を重畳すれば、上述のトルク脈動の低減が期待できる。そこで、研究室保有のデュアル巻線モータを対象に、2系統の巻線に逆位相の高調波電圧を重畳した場合のトルク脈動と高調波電流を実測した結果を図3、図4に示す。両図では、比較のため2系統の巻線に同位相の高調波電圧を重畳した従来方式の結果を併記している。

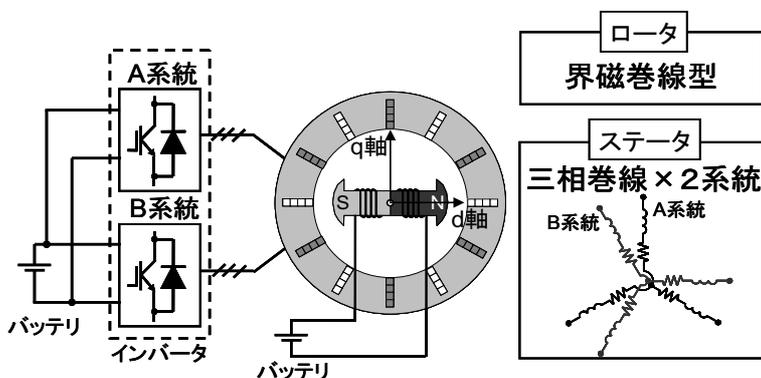


図1 デュアル巻線モータの構造

停止・低速域の位置センサレス制御: 高調波電圧重畳方式

- ・位置に対するインダクタンス変化(電流の流れやすさ)を利用
- ・高調波電圧を印加し、高調波電流より位置推定する

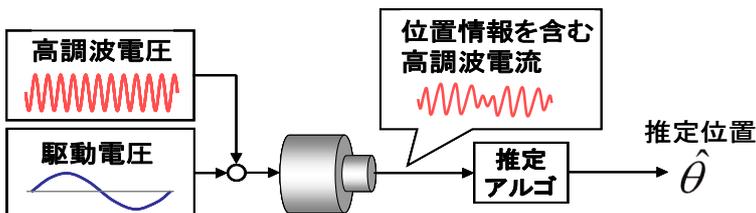


図2 低速域での位置センサレス制御法

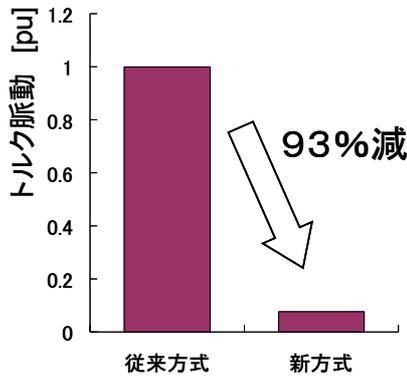


図3 高調波電流に起因するトルク脈動

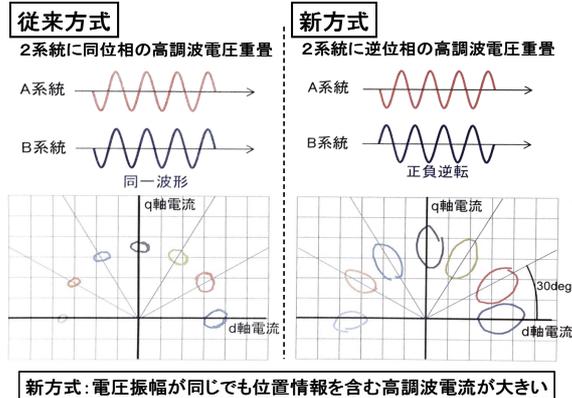


図4 高調波電流軌跡の実験結果

両図から、新方式（逆位相で高調波電圧を重畳する方式）では、従来方式に比べ騒音の原因となるトルク脈動を93%低減でき、位置情報を含む高調波電流の軌跡が大きく位置推定精度の向上が可能である。つまり、新方式は電磁騒音と位置推定精度のトレードオフ問題の本質的な解決手段となる。しかし、位置情報を持つ推定用電流発生原理の解明は未着手であり、同原理の理論的解明と新方式を前提としたモータ設計法の明確化がモータ設計現場で強く望まれている。

2. 研究の目的

本研究の目的は、二重三相巻線を持つ界磁巻線型同期モータを対象に、2系統の巻線にそれぞれ逆位相で高調波重畳する新方式の位置センサレス制御において、位置情報を持つ推定用電流発生原理の解明と同制御を前提としたモータ設計指針を明らかにすることである。同期モータの停止・低速域での位置センサレス制御では、高周波の位置推定用電流に起因した磁氣的騒音が問題となるが、新方式はこれを極小にできる。しかし、位置情報を持つ推定用電流の発生原理が解明されておらず、位置推定原理の理論的考察が不十分である。そこで、高調波電圧重畳時の電流・磁束等の挙動から位置推定用電流発生原理を理論的に解明し、同原理の妥当性を試作機実験検証から確認する。さらに、同センサレス制御に適したモータ構造設計指針を明らかにする。

3. 研究の方法

本研究では、位置推定用高周波電圧を重畳したときの電流・磁束等の挙動から、位置情報を持つ推定用電流発生原理を理論的に解明し、位置推定原理の理論的考察ならびに新方式の位置センサレス制御に適したモータ設計指針を明らかにする。従来の高調波重畳方式における高調波電流は、ロータの電磁石の方向にとった d 軸、その軸に対して回転方向に直交する軸を q 軸と定義する（図1参照）と、 d 及び q 軸における動的インダクタンス L_{dh} 及び L_{qh} から、その発生原理を説明できる。しかし、図4から明らかのように新方式における高調波電流の挙動は、従来方式と異なるため、これまで一般的に利用されてきた動的インダクタンスモデルが適用できない。そこで、実機と精度検証を終了したFEM解析モデルを用いて、高調波重畳時（新方式）における内部の磁束挙動データから、高精度な磁気回路モデルを構築し、提案磁気回路モデルの有用性を回路-磁場-制御を連成させて解析した推定用高調波電流の評価基準データとの比較から検証する。次に、高調波重畳時におけるステータスロット内部の各部の磁束モニタリングが可能な試作機を設計試作し、実モータに対する内部磁束挙動の評価をもって提案モデルの有用性を評価する。構築した磁気回路モデルを利用してモータ形状/局所磁気飽和/動的インダクタンス/制御安定性の関係を系統的に整理し、設計法の理論的考察を行って新方式を前提としたモータ設計法を明らかにする。

4. 研究成果

- (1) 推定用電流発生原理および位置推定原理の理論的解明・・・2系統の巻線に逆位相の高調波電圧を重畳した場合の内部の磁束挙動データを三次元非線形有限要素磁場解析（以下、3D-FEM）により解析し、位置情報を持つ推定用電流発生原理を理論的に解明できる高精度な磁気回路モデルを構築した。図5は研究室保有の12極72スロットの界磁巻線型デュアル巻線モータを対象に無負荷時において2系統の巻線に同位相と逆位相の高調波電圧を印加した場合の磁束の流れを示している。同位相で電圧を重畳した場合（従来方式）、高調波電流によって発生した磁束は、ロータ内界磁極を介した磁束ループを形成するのに対し、逆位相で電圧を重畳した場合（新方式）では、磁束がロータ界磁極へ流れず、ステータ内で還流する。このステータ内還流磁束を図6に示す磁気等価回路モデルで表現し、同ループにおける動的インダクタンスの数式モデルを構築し、高調波電圧に対する電流の発生原理について明らかにした。発生原理の考察に用いた動的インダクタンスマップの比較を図7に示す。

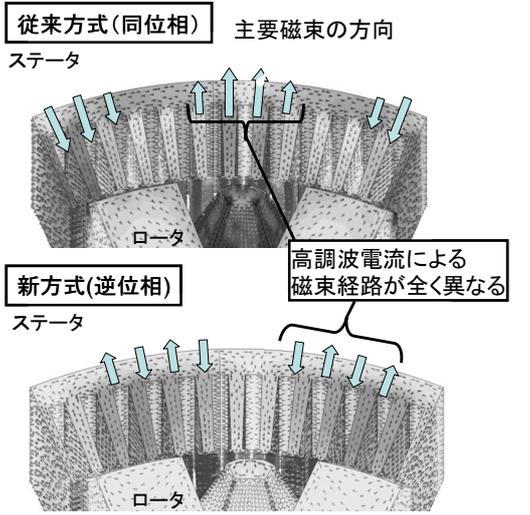


図5 高調波電流による鉄心内部の磁束分布

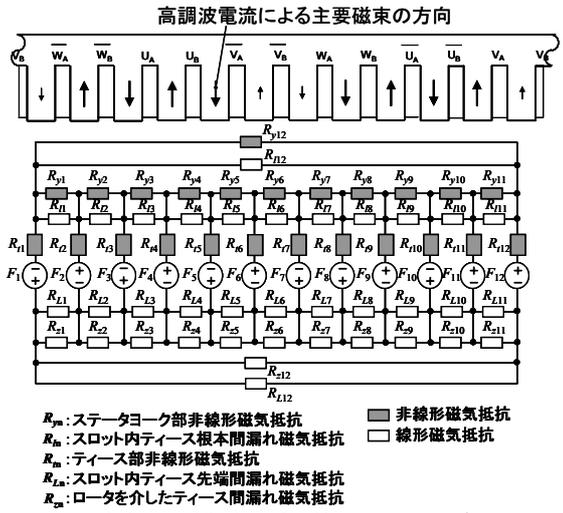


図6 構築した磁気回路モデル

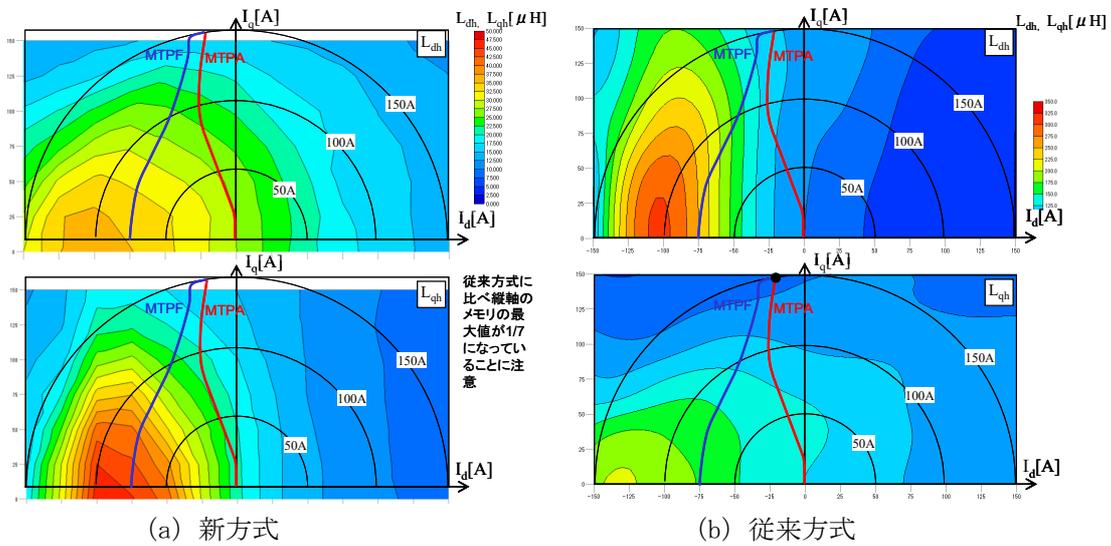


図7 動的インダクタンスマップの比較



図8 各部磁束モニタリングを可能とするデュアル巻線用モータの試作機外観写真

- (2) ステータスロット内部の各部磁束モニタリングが可能な試作機の開発・・・磁気回路モデルの有用性を検証するため、ステータスロット内部の各部磁束モニタリングを可能とするデュアル巻線用ステータの設計および試作を行った。高調波電流によるステータ内漏れ磁束の検出精度を確保するため、3D-FEMの解析結果から得られる漏れ磁束量と高調波電圧の関係からサーチコイル仕様を決定している。図8は実際に試作したモ

ータの外観写真である。試作機を用いた実験で得られた漏れ磁束と磁気回路モデルで得られた漏れ磁束の高調波重畳電圧に対する変化傾向がおおよそ一致することを確認し、提案磁気回路モデルの有用性を確認した。

- (3) 対象用途の実運転範囲内における多数の動作点を対象に、位置推定精度およびセンサレス駆動特性のケーススタディ結果を採取した。モータ内部における局所的な磁気飽和、動的インダクタンスの特性（提案磁気回路モデルで算出）、制御安定性の相関関係を整理した。その結果、新方式の位置センサレス制御では、ステータティースにおける磁気飽和が強いモータが位置センサレス運転に適しており、界磁巻線型モータにおいて高い界磁電流を通電した場合に最も S/N 比が高く位置推定が可能であることを明らかにした。その一方で、埋込磁石同期モータのような固定界磁源のモータでは、高い巻線電流を通電した場合に位置推定ができる範囲もあるが、軽負荷領域では位置推定が困難であることがわかった。また、高電流域で位置推定できても、位置誤差を補正する特性が備わっていないことを動的インダクタンスマップから明らかになり、殆どの埋込磁石同期モータで適用困難であることを明らかにした。

3. 当該分野における本研究の学術的な特色・独創的な点及び予想される結果と意義

本研究の取組みは、小型化・高トルク化・高出力密度化・低騒音化を追求するモータとセンサレスドライブの連成最適化問題の一アプローチを目指すもので、学術的にも世界に類がなく、独創的であり、我が国が先導する当該モータ技術の世界的競争力向上に貢献できると予想される。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 0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 加納善明	4. 巻 54
2. 論文標題 デュアル巻線モータの低速センサレス制御における信号重畳法	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 大同大学紀要	6. 最初と最後の頁 11-15
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
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0件

〔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
---------	---------