

称号及び氏名	博士（工学）	十時 詠吾
学位授与の日付	令和 5 年 3 月 31 日	
論文名	「永久磁石同期モータのトルクリプル低減に関する研究」	
論文審査委員	主査	森本 茂雄
	副査	山田 誠
	副査	小西 啓治
	副査	井上 征則

論文要旨

モータは電気エネルギーを機械エネルギーに変換する電力機器であり、我々の生活に欠かせないものとなっている。例えば冷蔵庫やエアコンといった生活に身近な家庭用電化製品から、鉄道などの公共交通機関、またロボットなどの産業用機器に至るまで、非常に幅広い機器に搭載され利用されている。そのため、全電力消費量に占めるモータの消費電力量は日本では約 55%、世界で 40%~50%を占めるといわれている。一方で、人類の活動による地球温暖化問題や異常気象の増加が深刻化しており、持続可能な社会の実現へ向けた取り組みが始まっている。気候変動の抑制に多国間で取り組むことを謳った 2015 年のパリ協定採択以来、世界各国ではカーボンニュートラルに向けた法整備が始まった。特に大きく変化しつつある産業は自動車産業であり、世界各国の自動車メーカは 2020 年以降急速に電動化へとシフトし、自動車用モータの需要が急増している。このように多くの用途に用いられるモータの中でも、小型・高効率なモータとしては高性能な永久磁石をもつ永久磁石同期モータ（Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM, PM モータ）が主流となっている。中でも特に小型もしくは扁平な PM モータに対しては 1 つのティースに集中して巻線を行う集中巻の適用が一般的となっている。

PM モータに対してはその広い用途から高効率化、小型化、省資源化、低コスト化といった様々な要求がある。さらには低トルクリプル化、低騒音化といった要求も大きい。トルクリプルとは、モータ出力トルクの脈動のことである。特に無通電時のトルクリプルはコギングトルクと呼ばれ、通電時におけるトルクリプルの一因となる。例えばサーボモータにおいてトルクリプルが大きいと位置制御精度や速度制御精度の悪化を引き起こし、エレベータの巻上機用モータにおいてトルクリプルが大きいと人が乗るかごの揺れにつながる。車載用モータについても駆動用モータではトルクリプルは振動騒音の原因となるほか、電動パワーステアリング用モータではトルクリプルがあると操舵においてハンドルがガクガクと感じ運転の不快感につながるなど、多くのモータにおいてトルクリプルは小さいほど良い。

PM モータのトルクリプル低減に対してはこれまで多くの技術開発がなされており、大別するとモータ構造によるアプローチとモータ制御によるアプローチとがある。モータ構造によるトルクリプルの低減手法としては、最適な極弧角の設計、ステータやロータのスキュー、補助溝・補助鉄心の適用、鉄心及び磁石の形状最適化、磁石配向の最適化など様々な提案が行われている。ただし、一般に永久磁石を回転子に埋め込んだ PM モータ (IPM モータ) ではロータ構造に起因してギャップ磁束密度の高調波が大きくなるためトルクリプルを低減しにくい課題がある。ギャップ磁束密度の高調波が大きい場合にもトルクリプルが小さいモータ構造とするには、高次成分の巻線係数が小さいモータとする必要がある。分布巻では毎極毎相スロット数や 1 つのコイルが巻回するティース数の調整が可能であり、高次の巻線係数に対する設計自由度が高いが、集中巻では極数とスロット数の組み合わせの選択肢が少なく、設計自由度が低いことが課題である。

モータ制御によるトルクリプル低減手法としては、トルクリプル、もしくはその原因となる磁石磁束・インダクタンスの高調波などを事前に磁界解析や実測によって取得した上でオフラインデータとして制御システム内で参照し、発生するトルクリプルを打ち消すような高調波電流を電流指令に重畳する手法が多く提案されている。しかし、磁石磁束及びインダクタンスの高調波は負荷やモータ温度によって変化するため、いずれの手法も限られた負荷条件のみでしか有効でない。また、事前のオフラインデータ取得は煩雑であり実用上も望ましくない。オフラインデータの取得が不要なモータ制御によるトルクリプル低減手法としては、トルク検出器やトルクオブザーバを用いて瞬時トルクを観測して制御に用いる手法も提案されているが、機械的共振の影響を受けやすい課題や高価な機器が必要となる課題がある。また、磁気随伴エネルギーの回転子位置変動分を瞬時電力から推定する手法や直接トルク制御を用いた手法も提案されているが、いずれも十分な電圧が必要であるため低速ではトルク精度が悪い課題がある。

以上に述べた課題を鑑み、本論文では、モータ構造及び制御の双方についてトルクリプル低減の新たな手法を提案した。まずモータ構造によるトルクリプル低減手法として、集中巻を用いながら 1 つのティースに 2 相の巻線を施す新たな巻線方式を提案した。10 極 12 スロットの集中巻 PM モータに新たな巻線方式を適用することで、基本波成分の巻線係数をほぼ維持したまま、5 次及び 7 次高調波に対する巻線係数をほぼ 0 とすることができ、トルクリプルの駆動周波数の 6 倍の周波数成分 (6f 成分) を大きく低減可能となる。本巻線方式により、集中巻でも設計自由度が向上する。

さらにモータ制御によるトルクリプル低減手法として、電機子鎖交磁束ベクトルの方向を基準とした座標系である M-T 座標系の M 軸電流を用いたモータ制御法を提案した。M 軸は電機子鎖交磁束ベクトルの方向に一致するため、M 軸電流は磁束の高調波成分を反映していると考えられる。M 軸電流を用いたトルク推定式を用いることでオフラインデータを用いないため任意の負荷条件に対して簡易にトルクリプル低減可能となる。

本論文の構成は次の通りである。

第 1 章では、序論として研究の背景や目的とともに本論文の概要について述べた。

第 2 章では、PM モータのトルクリプル発生原理を示し、トルクリプルを低減する原理及び基本的な方針を示した。まず PM モータの瞬時トルク式の導出を通して、トルクリプルが発生する主な要因には電機子鎖交磁束の高調波、電流の高調波、コギングトルクがあることを示した。またその過程でギャップ磁束密度の高調波と巻線係数が電機子鎖交磁束の高調波に与える影響を示し、モータ構造によるトルクリプル低減の原理を導いた。また、モータ構造により発生するトルクリプルを打ち消すよう電流高調波を制御することでトルクリプルを低減できることを示した。さらに、これまでに提案されているモータ構造及びモータ制御による様々なトルクリプル低減手法を体系的にまとめた。

第 3 章では、モータ構造によるトルクリプル低減手法として、集中巻を用いながら 1 つのティースに 2 相の巻線を施す新たな巻線方式を提案した。10 極 12 スロットの集中巻 PM モータに対して提案する巻線方式を適用することで、基本波成分の巻線係数をほぼ維持したまま、5 次及び 7 次高調波に対する巻線係数をほぼ 0 とすることができ、トルクリプルの駆動周波数の 6 倍の周

波数成分（6f 成分）を大きく低減可能となることを理論的に示した。提案方式によるトルクリプル 6f 成分の低減効果を磁界解析及び実測にて検証した結果、磁界解析にて 93%、実測にて 82% 低減できたことを確認し、提案方式の有効性を示した。また、提案方式のデメリットとしては誘起電圧の基本波が巻線係数の低減にともなって 3.8%減少することを原理及び解析、実測により併せて示した。提案方式は誘起電圧低減のデメリットはあるものの、トルクリプルの 6f 成分をほぼ 0 とするほど低減可能なメリットは設計自由度の観点から大きいと考える。

第 4 章では、モータ制御によるトルクリプル低減手法として、電機子鎖交磁束ベクトルの方向を基準とした座標系である M-T 座標系の M 軸電流を用いたモータ制御法を提案した。M 軸は電機子鎖交磁束ベクトルの方向に一致するため、M 軸電流は磁束の高調波成分を反映していると考えられる。そこで M 軸電流を用いたトルク推定式を用いてモータ制御を行うことでトルクリプルを低減可能なことをシミュレーション及び実機試験により検証した。検証の結果、評価に用いた PM モータの主要なトルクリプル成分である 12 次成分について、シミュレーションにて 11~15%、実機試験にて 32~35%の低減を確認し、提案手法の有効性を示した。本手法はオフラインデータを用いないため任意の負荷条件に対して簡易にトルクリプルの低減が可能となる。

第 5 章では、結論として以上の章の総括を行った。

審査結果の要旨

本論文は、小型・高効率なモータである永久磁石同期モータのトルクリプル低減について研究したものであり、以下の成果を得ている。

- (1) 永久磁石同期モータの瞬時トルク式の導出により、トルクリプル発生 of 主な要因には電機子鎖交磁束の高調波、電流の高調波、コギングトルクがあることを示した。また、ギャップ磁束密度の高調波と巻線係数が電機子鎖交磁束の高調波に与える影響を示し、モータ構造によるトルクリプル低減の原理を明らかにした。さらに、モータ構造により発生するトルクリプルを打ち消すよう電流高調波を制御することでトルクリプルを低減できることを示した。
- (2) モータ構造によるトルクリプル低減手法として、集中巻を用いながら 1 つのティースに 2 相の巻線を施す新たな巻線方式を提案した。提案巻線方式によりトルクリプルの駆動周波数の 6 倍の周波数成分（6f 成分）を大きく低減可能となることを理論的に示した。また、提案方式によるトルクリプルの低減効果を磁界解析及び実測にて検証し、磁界解析にて 93%、実測にて 82%のトルクリプル低減効果を確認し、提案方式の有効性を示した。
- (3) モータ制御によるトルクリプル低減手法として、電機子鎖交磁束ベクトルの方向を基準とした座標系である M-T 座標系の M 軸電流を用いたモータ制御法を提案した。電機子鎖交磁束ベクトルの方向である M 軸の電流は磁束の高調波成分を反映していると考えられ、M 軸電流を用いたトルク推定式を用いてモータ制御を行うことでトルクリプルを低減可能なことをシミュレーション及び実機試験により検証した。検証の結果、評価に用いた PM モータの主要なトルクリプル成分である 12 次成分について、シミュレーションにて 11~15%、実機試験にて 32~35%の低減を確認し、提案手法の有効性を示した。提案手法はオフラインデータを用いないため任意の負荷条件に対して簡易にトルクリプルの低減が可能となる。

以上の諸成果は、電気機器の省エネルギー化や自動車の電動化が加速している中で、本論文で提案したトルクリプル低減手法により、小型・高効率モータとして注目されている永久磁石同期モータのさらなる高性能化とその適用範囲の拡大に貢献するところ大である。また、申請者が自立して研究活動を行うのに必要な能力と学識を有することを証したものである。学位論文審査委員会は、本論文の審査および最終試験の結果から、博士（工学）の学位を授与することを適当と認める。