



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	内部永久磁石同期モータの位置センサレス駆動システムの高性能化に関する研究 [論文内容及び審査の要旨]
Author(s)	顧, 明磊
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第11312号
Issue Date	2014-03-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/55765
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.1/jp/
Type	doctoral thesis
File Information	Minglei_Gu_abstract.pdf, 論文内容の要旨



学 位 論 文 内 容 の 要 旨

博士の専攻分野の名称 博士（工学） 氏名 顧 明 磊

学 位 論 文 題 名

内部永久磁石同期モータの位置センサレス駆動システムの高性能化に関する研究
(Study on High-Performance Position-Sensorless Drive Systems for Interior Permanent Magnet Synchronous Machines)

エネルギーや地球環境の問題を解決していく上で、電気エネルギーを高効率で変換、制御することのできるパワーエレクトロニクス技術の重要性がますます高まっている。内部永久磁石同期モータ (IPMSM) には、小型、軽量、構造が簡単、効率が低い、制御性が良いなどの特長があるため、現在電気自動車や風力発電などの応用分野で広く採用されている。ネオジウム磁石を使った永久磁石同期モータが登場する以前は、自動車を走らせるような大出力の交流モータには主に誘導モータが使用されてきた。現在では、IPMSM は小型高性能という点で誘導モータを上回り、電気自動車の高性能化に大きく貢献している。

IPMSM の速度閉ループ制御にはモータの位置信号が不可欠であるため、通常はモータに位置センサを取付ける必要があるが、以下のような欠点がある：

- 1 位置センサとそのスペースのため、コストと体積が増加
- 2 位置センサの信号線の断線などによる信頼性低下
- 3 位置センサによる耐環境性 (温度、湿度、振動) に対する制約。

以上の問題を解決するため、モータの電圧、電流と数学モデルを利用して、回転子位置を推定する、すなわち位置センサレス IPM モータ駆動システムが提案されている。この位置センサレス IPMSM 駆動システムの高性能化は駆動システムの低コスト、省スペース、高信頼性化のために最も重要なテーマの一つである。

IPMSM の突極性により、固定子巻線から見た自己インダクタンスは回転子の位置によって変化するので、自己インダクタンスを測定し、dq 軸インダクタンスの違いを利用して回転子位置を推定することが可能である。突極性に基づく位置センサレス駆動の利点は停止時や低速時にも位置推定が可能、推定精度が高いである。本論文ではこの位置推定法を採用し、以下の 3 つのテーマについて検討した。

1 インバータの非線形性の補償による推定精度の改善

マルチ空間ベクトル PWM パターンで発生するインバータ出力電圧によりモータ電流は制御されている。従って、モータ電流はモータの磁気特性、すなわちインダクタンスに依存しており、モータの回転子位置情報を含んでいる。しかし、デッドタイムなどのインバータの非線形性のために、PWM 信号と実際のインバータ出力電圧との間に、誤差を発生し、この誤差が位置推定の誤差の原因となる。この問題を解決するために、高調波電圧の誤差を補償して、位置推定の精度を改善する方法を開発した。理想的パワーデバイスをを用いれば、電圧ベクトルはスイッチング信号のみで決まるが、パワーデバイスの電圧降下とデッドタイムのために、出力電圧の高調波成分を抽出する際には、出力電圧ベクトルおよび平均出力電圧ベクトルの正確な値が必要である。採用した位置推定法では、各スイッチング時刻の三相電流をサンプルしているので、この情報を用いて電圧ベクトルと平均出力電圧ベクトルを修正する。安定な位置推定を実現するために、精密に高調波電流をサンプリングすることのできる検出回路基板を設計した。位置推定誤差を平均値で電気角度 1° 程度改善できることをシミュレーションと実験により確認した。

2 新しいインダクタンス推定及び磁極判定法

突極性に基づく位置推定法では磁極の判定が原理的に不可能である。このため、モータを始動する際、推定インダクタンスの変化に基づく磁極判定法を開発した。採用したセンサレス位置推定法はモータの位置信号を推定すると同時にインダクタンスもリアルタイムで推定できるという他の方法にはない特長を有しているため、磁気飽和によるインダクタンスの変化を利用して磁極検出を行う。

固定子巻線に電流を永久磁石磁束と同方向に流すと、永久磁石方向の磁束は増加し、磁気飽和により推定したインダクタンスは小さくなる。逆に、電流を永久磁石磁束と逆方向に流すと、永久磁石方向の磁束は減少し、磁気飽和は低減されて推定したインダクタンスは大きくなる。電流の変化によりインダクタンスが変化する特性を利用し、位置推定と同時に得られたインダクタンスの変化から、磁極判定を行うことが可能である。マルチ空間ベクトル PWM に基づく位置推定法により、信号分離用フィルタを用いず、停止時においても位置リアルタイムで推定できるだけでなく、インダクタンスもリアルタイムで推定可能である。推定インダクタンスの相対精度は高く、バラツキが 0.5 パーセント以内で、定格電流の半分程度以下の小さな電流変化で磁極判定を安定に行うことが可能といった長所を有している。

3 電流を低減可能な PWM パターンの検討

提案しているマルチ空間ベクトル PWM を用いた位置推定法は、PWM により発生する高調波電圧電流成分を利用して、位置推定を行う。発生する高調波電流の実効値は電圧指令値及び PWM パターンで決めた出力電圧ベクトルの順番に関係して変化する。しかし、これまでにこのマルチ空間ベクトル PWM の出力電圧ベクトルの順番と高調波電流実効値の関係を理論的に検討した例はなかった。マルチ空間ベクトル PWM パターンの発生する高調波電流実効値の理論計算を行い、スイッチング損失を増大させることなく高調波電流の実効値を低減できるスイッチングパターンの最適化を行なった結果、高調波電流による最大 30 パーセント低減可能であることを明らかにした。更に、この PWM パターンの有効性を実験より確認した。

研究内容の新規性と有効性は下記に示す。

1 マルチ空間ベクトル PWM を用いた位置推定法に関するインバータ非線形性の影響を、初めて理論的に解析した。解析により、インバータ非線形性の数学モデルを導出し、電圧ベクトルの修正アルゴリズムを提案した。補償した位置推定方法の位置推定誤差は数度以内に抑制可能だけでなく、推定信号フィルタは不要、推定応答は速いなどの特長を持ち、低コスト、高信頼性の位置センサレス IPMSM 駆動システムを実現した。

2 マルチ空間ベクトル PWM に基づく位置センサレス駆動システムを用いて、位置信号を推定する同時に、d 軸インダクタンスも推定し、その変化に基づく磁極判定の新しい方法を提案した。逆起電力に基づく位置推定法は停止に利用不可で、HF 信号注入法はリアルタイムでインダクタンスが推定不能などの欠点に対して、提案法は停止時においてもリアルタイム推定可能、モータ定数が不要、判定用電流が定格以内という特長がある。従来は定格電流以上の大きい電流を用いて磁極を判定するのに対して、提案法では定格電流の 10 パーセント程度でも磁極判定が可能であることを実験的に確認した。

3 マルチ空間ベクトル PWM を用いた位置推定法の PWM パターンに対する高調波電流の実効値を初めて理論計算した。計算結果により、位置推定精度を低下させることなく、高調波電流実効値を低減する新 PWM パターンを提案した。これまでの PWM パターンと比べ、提案した新 PWM パターンは高調波電流に対する銅損を最大 30 パーセントの程度に低減できる。この結果、位置センサレス駆動システムの効率やトルクリプルを改善することが可能になった。