

報告番号	甲 第 11891 号
------	-------------

主 論 文 の 要 旨

論文題目 離散電圧ベクトル信号重畳に基づく
永久磁石同期モータの位置センサレス制御
に関する研究
(Study on position sensorless controls
based on discrete voltage vector signal
injection for permanent magnet
synchronous motors)

氏 名 鈴木 俊毅

論 文 内 容 の 要 旨

人類が持続可能な社会を実現するためには、エネルギー資源の管理形態および消費形態の見直しが必要である。温室効果ガスによる地球温暖化とそれに伴う環境問題はますます深刻化し、その国際的な対策が求められている。発電システムにおいては、システムを集約し大規模化することにより、安定供給および環境保全問題の対応が可能である。モータは 90%を超える高い効率で電気エネルギーと機械エネルギーの相互変換が可能であることから、各分野で電気・機械エネルギーの利用において主要な役割を果たしている。また、動力源としてみた場合、一般的な内燃機関のように特定の一次エネルギーに依存しないことから、一次エネルギーを輸入に依存する日本にとって、エネルギーリスクの低減および環境・エネルギー問題に対する対策が可能である。これらの優れた特徴からも、モータによる動力源の電動化は環境・エネルギー問題の解決において重要なキーデバイスであるといえる。

モータの中でも、希土類系磁石や珪素鋼板等の材料技術を用いた、永久磁石同期モータ(PMSM: Permanent Magnet Synchronous Motor) は劇的な進歩を遂げ、現在では、高効率かつ高性能なモータとしてその地位を確立している。PMSM の用途が拡大する中、用途に合わせて特定の性能を特化させる最適化設計が一般化しつつある。このような最適化設計がなされる最たるものが電気自動車(EV)やハイブリッド自動車(HEV)に代表される自動

車である。自動車における PMSM は、限られたスペースで従来の内燃機関に置き換わる性能が要求されるため、出力密度に対する要求は厳しく、用途志向設計が行われている。現状の HEV および EV 用 PMSM ではネオジウム系磁石および電磁鋼板の性能を余すところなく利用し、磁気飽和もいとわれないレベルでの磁束密度向上が図られ、頻繁に磁気飽和領域で駆動されることになる。このような厳しい要求性能から、自動車用 PMSM には最高レベルのモータ技術が投入されている。一方で、その優れた性能を発揮させるためには、PMSM、電力変換器であるインバータ、制御器を一つの駆動システムとして扱い、所望の性能要求を満足する必要がある。PMSM 駆動システムにおいて、制御の果たすべき役割が増しつつある。

本研究では、PMSM 駆動システムの高出力密度化および低コスト化に貢献する様々な制御技術の中で、精力的に研究開発が行われている位置センサレス制御を研究対象とした。位置センサレス制御は速度域により誘起電圧および PMSM の回転子形状に起因する突極性に基づく手法に大別される。中高速域において用いられる誘起電圧に基づく位置センサレス制御法では、拡張誘起電圧モデルなどの優れた数学モデルが提案され、これに基づく拡張誘起電圧オブザーバにより回転子位置を推定する。中高速域位置センサレス制御法は、実用化に値する優れた性能を発揮し、その手法は既に確立している。一方、停止・低速域において用いられる突極性に基づく位置センサレス制御法では、突極性に関する情報(回転子位置に依存するインダクタンス情報)を励起するために、高周波信号重畳法が用いられる。高周波信号重畳法は、高周波正弦波電圧や方形波電圧などの高周波信号を重畳し、電流応答からインダクタンス情報を抽出し回転子位置を推定する手法である。しかしながら、停止・低速域位置センサレス制御では、未だ対象となる PMSM や駆動条件が限定的である。

本研究では、その原因として以下の 2 点に着目する。

(I)インバータを理想電力変換器と仮定した高周波信号重畳法

既に提案されている多くの手法では、信号処理の容易さから単一周波数の正弦波信号重畳が主流である。すなわち、これらの手法では、インバータを理想的な電力変換器と見なし、所望の連続な電圧がモータに印加されるものと仮定して扱う。これは、この仮定により、連続な正弦波性を前提とした様々な信号処理を位置センサレス制御に容易に適用できるためである。これにより、駆動周波数成分および重畳周波数成分の抽出や除去、回転子位置情報の復調などの処理を BSF(Band Stop Filter)、BPF(Band Pass Filter)および LPF(Low Pass Filter)などの代表的なフィルタを用いることにより実現が可能である。しかしながら、これらのフィルタの特性が位置推定性能を大きく左右することから、その設計、実装後の調整には多くの時間を要していた。

また、ここで、インバータにより PMSM に印加される電圧は 8 本の離散的な電圧ベクトル(実離散電圧ベクトル)であり、時間平均的に所望の高周波正弦波電圧を重畳していることを考えると、これらの信号処理が最適であるか懐疑的である。離散電圧ベクトルを重畳している方形波電圧重畳方式においても、方形波電圧の基本波成分に対してヘテロダイン処

理やフーリエ変換等の連続な正弦波性を前提とした信号処理が行われており、直接、離散電圧ベクトルを考慮した信号処理は十分に検討されていない。

(II)磁気飽和を考慮していない理想的な PMSM の数学モデル

用途志向設計されたモータは動作領域によっては著しく磁気飽和した状態で利用されることになり、インダクタンスの空間分布には回転子位置の二倍角成分に加え、多くの空間高調波成分が含有される。しかしながら、多くの位置センサレス制御は磁気飽和が生じないことを前提とした理想的な PMSM の数学モデルに基づいており、磁気飽和によりその性能を大きく損なう。

本論文では、着目した以上の二点が高出力密度化を実現した PMSM に対する位置センサレス制御の普及に向けた重要な課題であると考え、新たな位置センサレス制御の概念を提案することを目的とする。

具体的には(I)及び(II)の課題に対して、それぞれ、

(1)離散電圧ベクトル重畳を前提とした信号処理法(提案法 1-1 および提案法 1-2)

(2)インバータの離散電圧ベクトルおよびモータの磁気飽和現象を考慮した位置センサレス制御法(提案法 2)

を提案する。本論文では、まず、(I)の課題に対し、仮想的な座標である推定回転座標上に方形波電圧状の離散電圧ベクトル(仮想離散電圧ベクトル)を重畳する位置センサレス制御系を構成する。そして、方形波状の仮想離散電圧ベクトル重畳に適した周波数特性をもつし形フィルタにより構成される信号処理法を提案する。これを提案法 1-1 とする。提案法 1-1 により、位置推定応答の改善および低演算負荷化を実現する。次に、仮想的な座標である固定直交座標上に仮想離散電圧ベクトルを重畳し、各仮想離散電圧ベクトルに基づきインダクタンス情報の抽出および位置推定を行う「仮想離散電圧ベクトル重畳モードベース位置センサレス制御法」を提案する。以降、これを提案法 1-2 とする。提案法 1-2 は、各仮想離散電圧ベクトル重畳モードにおける電流変化量とインダクタンス情報との関係から、フィルタを用いることなく電流変化量の取得のみで簡潔かつ質の高い位置推定が可能である。最後に、(1)で提案した信号処理法を発展させることで、(II)の課題に対し、インバータにより PMSM に実際に印加される離散電圧ベクトル(実離散電圧ベクトル)に基づき位置センサレス制御を行う位置センサレス制御法を提案する。これを「実離散電圧ベクトル重畳モードベース位置センサレス制御法」と称し、以降、これを提案法 2 とする。提案法 2 は、実離散電圧ベクトル重畳モードに依存した磁気特性の差を考慮することにより、

- ・インダクタンス情報抽出器出力における高調波成分の低減、
- ・従来手法において信号処理の過程で失われていた位置推定に利用可能な情報の取得が可能である。

以下に、本論文の構成と各章での成果を簡潔に示す。

まず、第 1 章では、本研究の背景および目的について述べた。

第 2 章では、PMSM のベクトル制御に用いられている各種座標系およびそれぞれの座標

系における PMSM の数学モデルを示した。次に、基本となる制御系の構成を示した。最後に、誘起電圧および突極性にに基づく位置センサレス制御法とその問題を述べた。

第 3 章では、提案法 1-1 を提案した。提案法 1-1 は、くし形フィルタの周波数特性および実装の容易さといった特徴から、位置センサレス制御のための信号抽出および除去が可能であり位置推定応答の改善および演算負荷の低減が可能である。また、実機実験により、提案法を用いることにより従来手法に対し 1.7 倍の位置推定応答性能を改善できることを確認した。

第 4 章では、提案法 1-2 を提案した。提案法 1-2 は、特殊な仮想離散電圧ベクトルを重畳することにより、フィルタを用いることなく電流変化量の取得のみで簡潔かつ質の高い位置推定が可能である。実機実験では、モード毎のインダクタンス情報に明確な差異が生じ、その情報には規則性があることを発見した。提案法 1-2 では、これらのインダクタンス情報の規則性を利用し、モード毎に得られたインダクタンス情報を適切に合成することにより、位置推定性能を改善できることを示した。以上の結果は、離散電圧ベクトルとモータの磁気飽和現象とを対応付けた信号処理により位置センサレス制御性能の改善が可能であることを示唆していた。

第 5 章では、各モードにおけるインダクタンス情報の特徴に対する考察を実離散電圧ベクトル重畳モードに着目し考察した。インダクタンス情報の DC 成分に関しては PMSM の数学モデルに基づき、各モード・各相のインダクタンス情報を導出した。導出した数式により、モード毎に生じるインダクタンス情報の DC 成分は、PMSM の突極性に起因することを明らかにした。次に、インダクタンス情報の基本波成分に関しては、モータを構成する電磁鋼板の磁気飽和モデルを用い、回転子位置における磁気飽和の程度の違いにより、増磁方向・減磁方向に実離散電圧ベクトルを重畳した場合とで、そのインダクタンス値が異なることを述べた。

第 6 章では、第 4 章および第 5 章での結果および考察から、提案法 2 を提案した。第 6 章では、従来の各モードを考慮しない従来法の問題および提案法 2 の特徴を述べ、実機実験によりその妥当性を検証した。提案法 2 の特徴は前述の通りである。

第 7 章では、本論文のまとめと今後の課題を示した。

本論文では、高出力密度化を実現した PMSM に対する位置センサレス制御における問題を打開し得る新たな位置センサレス制御の概念を提案した。この離散電圧ベクトルと PMSM の磁気飽和現象とを対応付けた信号処理により、簡潔にかつ質の高い位置センサレス制御が可能となる可能性を示した。本論文の成果は、精力的に高出力密度化が図られている PMSM に対する位置センサレス制御系の問題を打開し、その性能を飛躍的に向上させる基本的な概念となるものであると考える。