

報告番号	※ 甲 第 11045 号
------	---------------

主 論 文 の 要 旨

論文題目 モデル予測制御に適した永久磁石同期モータシステムの
モデル化に関する研究

氏 名 井村 彰宏

論 文 内 容 の 要 旨

本研究は永久磁石同期モータとインバータ、モータ制御で構成されるモータシステムの新たな価値創造を狙った、モデル予測制御理論を基にした新規のモータ制御技術開発に関するものである。

本研究では、国内エネルギー消費量において大部分を占める製造業を含む産業部門と運輸部門のなかで、特に年間3081PJ (PJ=1015J) に達するエネルギーを消費する運輸部門の省エネルギー化と自動車の魅力向上の両立に貢献することを想定している。まず、この運輸部門におけるエネルギー消費量を削減するには自動車の燃費向上が最も効果的であり、現時点では、モータシステムを積極的に利用した自動車の電動化が有力な手段である。このため近年における自動車製造業者は自動車の電動化を通じたエネルギー消費量の削減、つまり燃費の向上を継続的に進めることに加え、一般的な製造業の命題である市場ニーズを捉えた魅力的な商品開発も並行して進めることが必要であり課題となっている。この課題への取り組みにおいて近年中心に位置するものが、モータシステムを様々な部品に積極的に利用するハイブリッド自動車や電気自動車である。たとえば、1997年から世界に先駆け国内販売が開始されたプリウスに代表される量産ハイブリッド電気自動車（以下、HEV）では、従来の動力源であるエンジンシステムにモータシステムを加えたハイブリッドシステムが特徴である。これは同体格の一般的なエンジン単独のシステムに比べ大幅な燃費向上を実現する自動車として広く知られている。このようにモータシステムを積極的に利用することで燃費性能の向上を実現したハイブリッド電気自動車は、各国の環境意識の高まりに起因する自動車への新たなニーズを捉えることとなり、日本国内に留まらず世界的に販売台数が増加する傾向にある。このハイブリッドシステムに加えモータシステムを適用した自動車部品としては、従来は機械式であったエンジン始動用のスタータやワイパ、またエンジン動力を利用した発電機であるオルタネータや電動パワーステアリング（EPS）などが挙げられ、燃費向上のみならず自動車の魅力向上にも貢献している。このように自動車用モータシステム製品は、自動車の燃費向上のみならず従来の機械式システムからの代

替手段から始まり、さらなる魅力向上に不可欠と言える。今後、将来にわたって自動車の魅力向上と燃費向上の両者を実現し続けるために、モータシステムを前提とした部品の開発が必須である。

これまで自動車に搭載されてきたモータシステムのほぼ全てにブラシ付き DC モータが使用されている。このモータは誘導モータやステッピングモータに比べ、回路構成が簡便でありながら優れたサーボ性が得られるなど制御性も良く、体積重量なども優れている。このため搭載スペースが限られた自動車用部品に適しており、1900 年代初頭から現在に至るまでこのブラシ付き DC モータが主流となっている。その一方、回転部への電気導通経路に接触摺動部品であるブラシを使用することから、磨耗による寿命やノイズなどの問題がある。このため、大型モータではブラシの点検や交換などの定期メンテナンスが不可欠となり保守費用が発生する。また小型モータにおいては搭載構造の都合上ブラシ交換などのメンテナンスが困難である場合が多く、ブラシの寿命がそのままモータの寿命となる。このような欠点を解決するため、原理上ブラシが不要となる同期モータを前提としたモータシステムの技術開発が進められてきた。この同期モータは誘導モータと同様にブラシを用いない構造であり、外部コイルに通電することで磁界を発生しロータを回転させる。またロータに磁石を使用することで誘導モータに対し小型化と効率向上が実現できる。このような優位性を持つ同期モータの実用化は徐々に進められてきた。例を挙げると、1990 年代から限定的に自動車用部品として実用化され始め、1997 年にトヨタ自動車から販売された RAV4-EV には埋込型永久磁石同期モータ (IPMSM) を使用したエアコン用電動コンプレッサ (ES25) などが実用化されている。このように同期モータを利用したシステムは、将来に渡って自動車の燃費向上と商品価値向上に貢献する技術として大きく期待されているものの、技術的に未成熟な点も多く継続的な開発が必要である。特に、従来のブラシ付き DC モータとはトルクを得るための磁界発生手段が異なるため、インバータ等のハード構成のみならず同期モータの性能を十分に引き出すための適切なモータ制御手法の確立が課題として挙げられる。本研究はこの点に着目し、これまで検討されてきた制御手法とは異なるアプローチで技術検討を進めることで、より良いモータ制御法の確立を目指している。

本研究では、3 相電圧型インバータと IPMSM で構成されたモータシステムを対象とし、線形として扱える低・中出力域から矩形波電圧やモータの磁気飽和により非線形性が強く現れる高出力領域までをモデル予測制御理論を基に構築する新規のモータ制御法のみで成立させることを目的とする。これにより、同期モータの性能を十分に引きし、かつ今後増加することが予想されるモータシステム製品の開発効率向上に、制御技術面から貢献することを目指す。また、本研究で提案する制御法はこれまで多くの実績を積上げてきた PID 制御など古典制御に分散される手法ではなく、現代制御に分類されるモデル予測制御理論を基にモータ制御法を構築する。本研究はこれまでのモータ制御法を否定するものではなく新たな視点でモータ制御を検討することで、より良い製品への糸口を探索することを趣旨としている。

今回の研究における要諦であるモデル予測制御理論の最大の特徴は、制御対象のモデル構造を一般的な線形時不変微分方程式に基づくモデルに限定しない点である。これは従来の古典制御で前提とする線形性の良いモデルに加え、扱うことが困難であった切り替え則を含むモデルや外部要因で上下限値を制約されるもの、時間の関数で表現されないパラメー

タを包含するモデルなど、非線形性の強いモデルも一体的に扱えることを意味する。モータシステムにおいては、制御設計に組み込むことが困難であったインバータのスイッチング動作などを直接的に扱うことも可能となる。これらの特徴を活かし、モデル予測制御に適したモータシステムのモデルが構築できれば、これまで古典制御を前提に人手による調整や適合によって対応してきた運転領域の拡大や安定性の確保が、モデル予測制御理論に基づいた設計で対応することが可能となり人手による調整を最小限に抑えることが見込める。そこで本論文では、まずモデル予測制御理論を基にしたモータ制御法の提案とその基本性能を定量化したうえで、モデル予測制御に適したインバータ、永久磁石同期モータの各モデルの提案とその有効性を確認する。

本論文の構成は以下である。

第1章では、本研究の背景について述べる。

第2章では、モデル予測制御理論を基にしたオンラインでの瞬時dq電流制御法(MPICC: モデル予測瞬時電流制御法)の提案と、その応答性と安定性についての周波数特性を定量化する。ここで提案するMPICCは、一般的なインバータと同期モータの各モデルを前提に構築しており、以降のモデル検討で必要となる制御アルゴリズムの構築を優先に取り組んでいる。この構築したアルゴリズムは、従来の三角波キャリア比較PWMによる電流ベクトル制御とは異なり、制御周期ごとにモータモデル、インバータモデルを基に予測する未来の電流と、指令電流との差を評価することでインバータのゲート信号を直接決定する構成が特徴である。その後、モデル予測制御理論自体の強い非線形性が原因で困難であったMPICCの応答性と安定性を把握するため、単一正弦波相関法(SSC: Single Sinusoidal Correlation)に着目した周波数応答解析法により定量化を進める。この手法は、バッテリーなどの電気化学系交流インピーダンス特性解析で実績ある手法であり、モデル予測制御のような非線形システムの特性解析にも応用可能である。

第3章では、第2章で提案したMPICCを前提とし、インバータのデッドタイムに着目した新規のインバータモデルを提案しその効果を検証する。そもそもモデル予測制御理論は有限時間(所定の予測区間)内のシステム挙動を制御する手法であるため、それに適したモデルが必要である。しかしながら、一般的なインバータモデルは、従来の最終値定理を基にする古典制御に適した平均的な挙動を表現するモデルであり、モデル予測制御で望ましい瞬時的な挙動を表現するモデルとは言えない。本章では、この点に鑑み、モータ用モデル予測制御に適したインバータモデルを提案する。この提案インバータモデルの有効性についてはシミュレーションと実験を通じて定量的に示す。

第4章では、永久磁石同期モータのdqモデルにおいて、瞬時的なインダクタンス変動と定常的な磁束に着目した新規のモータモデルを提案する。これは先述したように、モデル予測制御では瞬時的な挙動を表現するモデルが必須であり、これまでの一般的なモータモデルでは表現能力が不足していることが原因である。この提案モータモデルの有効性についても、シミュレーション、実験を通じて電流高調波に注目した解析結果を示す。

第5章では、本論文のまとめと今後の課題を示す。