

研究成果報告書

| | | | |
|--|-----|---------------------------------------|-------------|
| 研 究 題 目 | | PMSM に対する超高速・高精度トラッキング制御 アルゴリズムの開発 | 実 施 年 度 |
| | | | 平成 27,28 年度 |
| 代 表 研 究 者 | 所 属 | 広島大学 大学院工学研究科 機械システム工学専攻 | |
| | 氏 名 | 和田 信敬 | 印 |
| <p>1. 研究の目的・背景</p> <p>◆研究の背景と目的： 永久磁石同期電動モータ (PMSM) は機械的な接点を持たないため、寿命が長く、ノイズレス、ダストレスであるといった特徴を有する。また、従来用いられてきたブラシ付き DC モータと比較して、一般にエネルギー効率が高い。PMSM の駆動制御系は、多入力系であり、かつ、入力間にカップリングがあり、さらに、回転角速度に応じて動的特性が変化するという制御上扱いにくい特性を有する。そのため、運転条件 (回転角速度など) が一定あるいは緩やかに変動する場合には、従来の線形時不変制御器 (PID 制御器など) により所望の性能を達成出来るものの、運転条件が急激かつ大幅に変動する場合には、線形時不変制御器では十分な性能を達成することは困難である。そこで、本研究では、時変の回転角速度目標信号への素早い追従を可能とする PMSM 駆動制御アルゴリズムを構築することを目的とする。これに関連して、課題申請者は、最近、制御ゲインと制御器の内部状態を毎時刻最適に調整することで、極めて高い目標値追従性能と外乱抑圧性能を達成する独自の制御アルゴリズムを提案した。本課題は、この手法を基に、高精度な PMSM 用制御アルゴリズムを構築することを試みるものである。</p> <p>◆具体的研究課題： 本研究では、以下に挙げる目標を達成する制御アルゴリズムを開発する。さらに、開発した制御アルゴリズムを実機実装し、その有効性を実験的に検証する。</p> <p>①任意波形の角速度目標信号へ高速・高精度追従： PMSM を移動体の動力源として用いることを想定し、低角速度域から高角速度域まで変化する時変な角速度指令値に対し、モータ軸の角速度を可能な限り素早くかつ高精度に追従させる。このとき、インバータにより印加される電圧には、ノルム制約型の制限が課される。入力電圧をその制限範囲内で有効に活用する。</p> <p>②PMSM ダイナミクスの回転角速度依存性に対する頑健性： PMSM の動特性は、回転角速度に依存して大きく変化することが知られている。そのため、広い角速度域で高精度な追従特性を実現するには、動特性の速度依存性を考慮した制御システムを構築することが必要となる。</p> <p>PMSM は上述の特性を持つため、非線形性の強い動的システムであると言える。本研究では、①、②の制御目的を達成するトラッキング制御アルゴリズムを開発することを目的とする。</p> <p>◆予想される結果と意義： 提案制御アルゴリズムを用いると、広い角速度範囲で高速・高精度な速度制御を行うことが可能となる。例えば、電動車両等の移動体の動力源として PMSM を用いる場合、その運転条件は時々刻々変化する。そのような場合に提案法を用いると、静止状態から高速域までの幅広い速度範囲で精密な摩擦力制御を行うことが可能になる。</p> | | | |

2. 研究成果及び考察（申請時の計画に対する達成度合を織込む）

◆考察した制御問題：

d - q 回転座標系における PMSM のダイナミクスは、線形パラメータ可変（LPV）システム

$$\begin{aligned}x_p(t+1) &= A_p(\omega(t))x_p(t) + B_p(v(t) - h(\omega(t))) \\ y(t) &= C_p x_p(t)\end{aligned}$$

としてモデル化出来る。ここで、 $v = [v_d, v_q]^T$ はインバータ電圧、 $x_p = [i_d, i_q]^T$ は d 軸電流、 q 軸電流から構成される状態ベクトル、 y は電磁トルクである。このシステムでは、係数行列 $A_p(\omega)$ がロータ速度 ω に応じて変化する。本研究では、上記のシステムについて、目標トルクに対して $\lim_{t \rightarrow \infty} y(t) = r(t)$ を達成する制御則 $v(t) = \Phi_V(F(x_p(t), \omega(t), r(t)))$ を設計する問題について考察した。ここで、 $\Phi_V(\cdot)$ はインバータ電圧の振幅制限を表す飽和関数である。

◆主要成果：

上記制御問題に関する成果は主に文献 4,6 にまとめている。主要成果を以下に列挙する。

1) 上記の LPV システムについて、行列方程式 $\Pi = A_p(\omega)\Pi + B_p\Gamma(\omega) + E, \forall \omega$ および $0 = C_p\Pi - 1$ を満たす定数行列 Π およびパラメータ依存行列 $\Gamma(\omega)$ が存在することを初めて明らかにした。定数行列 Π の存在性は、ロータ速度 ω の変動の下で、電磁トルクを任意の目標値に偏差を生じることなく追従させることが可能であることを意味しており、重要な結果である。

2) 1) の結果に基づき、ロータ速度変動の下、インバータ電圧を制限値まで活用する高性能なサーボ制御アルゴリズムを構成する手法を示した。制御アルゴリズムの設計問題は、凸最適化問題に帰着されており、制御系設計ソフトウェア MATLAB を用いることで、容易に設計出来る。

3) 提案制御則では、サーボ性能を向上させるために、サーボ補償器の内部状態をオンラインで最適にリセットさせている。リセット値の決定問題はスカラ変数に関する凸最適化問題に帰着されており、二分法に基づく効率的な求解アルゴリズムを示した。標準的なパーソナルコンピュータ上で、数 10 マイクロ秒で最適入力電圧を決定出来ることを確認した。このことは、提案制御則は PMSM の電流制御に適用可能であることを意味している。

◆達成度：

制御アルゴリズムの設計については、当初目標をほぼ達成している。

◆提案法の特徴と従来法との関係：

産業界で標準的に用いられている PMSM 制御手法として、入力間の干渉項を非線形フィードフォワードにより打ち消し、その後、分散 PI 補償器により、トルク制御を実現する手法がある。この手法は、インバータ電圧が飽和した際に、非干渉化フィードフォワードが無

効となるため、制御性能の劣化が生じ、安定性を保証出来ない。これに対し、提案法は、電圧飽和時も含めて安定性を保持しつつ、サーボ性能を最適化出来る。

3. 経費の使用状況（申請時の計画に対する実績を記述）

申請時の計画では、設備備品費 120 万円、旅費 20 万円、謝礼金 10 万円としていた。旅費、謝礼金については、他の経費により支出可能であったため、これら（合計 30 万円）も設備品費に充当した。内訳としては、PMSM 実験装置（昭和電工株式会社製）を当初予定通り購入した。また、計測データの転送、保存用のケーブル、およびハードディスクドライブを購入した。さらに、提案制御手法は電動車両に対して適用することを想定しており、その基礎実験を行うため、小型電動車両実験装置（ZMP 社製）を購入した。

4. 将来展望（今後の発展性、実用化の見込み等について記述）

提案制御手法は、理論的にはほぼ完成していると考えている。今後の課題としては、提案手法の有効性を実験的に検証することが挙げられる。これについては、現在、本経費にて購入した実験装置を使用して取り組んでいるところである。提案制御アルゴリズムを実装する際には実時間で最適化問題を解く必要があるため、汎用的なマイコン上で実時間実装可能であるか十分な評価を行う必要がある。

提案制御アルゴリズムの応用先として、電動車両用 PMSM のトルク制御が挙げられる。車両制御においては、スリップ率と呼ばれるパラメータを精密に制御することで、タイヤ摩擦力を高精度に制御することが可能となり、その結果、高度な運動制御を実現できることが知られている。提案制御手法を用いることにより、PMSM の潜在能力を最大限に引き出すことが可能となり、その結果、車両運動性能を大きく向上させられるものと期待出来る。このような課題にも今後取り組む予定である。

5. 成果の発表（学会での発表、学術誌への投稿等を記載。予定を含む）

1. Nobutaka Wada, and Seiya Tsurushima: Constrained MPC to track time-varying reference signals: online optimization of virtual reference signals and controller states, IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, Vol. 11, No.S2, pp.S65-S74, 2016.
2. Nobutaka Wada, Hidekazu Miyahara and Masami Saeki: Constrained tracking control by gain-scheduled feedback with optimal state resets: a general servo problem and an online optimization method, ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 138, No. 12, 121008, 2016.
3. Nobutaka Wada, Naoki Kawaoka, and Masami Saeki: A gain-scheduled control algorithm for input constrained systems to track time-varying references using controller state resets, IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, Vol. 12, pp. 87-95, 2017.
4. Nobutaka Wada, Yi Li, Daichi Miyake and Surajet Khonjun: Permanent magnet synchronous motor torque control by gain-scheduled feedback with state resets, IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, to appear
5. Nobutaka Wada: On the improvement of l2-performance by controller resets, IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, to appear
6. 三宅大地, 和田信敬, 李易, Surajet Khonjun: 永久磁石同期モータのためのトルク制御システム設計 -状態リセットを伴う可変ゲイン制御を用いる方法-, 計測自動制御学会中国支部学術講演会予稿集, pp. 170-171, 2016.