

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 13 日現在

機関番号：33910

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2016

課題番号：15K18028

研究課題名(和文) 操作量飽和情報を利用した埋込磁石同期モータの制御性能改善

研究課題名(英文) Improved of torque and current responses of IPMSMs using information of output saturation

研究代表者

松本 純 (MATSUMOTO, Atsushi)

中部大学・工学部・助教

研究者番号：50736072

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、埋込磁石同期モータ(IPMSM)ドライブシステムにおける一課題である操作量飽和時の電流およびトルク制御性能改善を目的とし、「操作量の飽和量」および「操作量のマージン量」を用いた新たなフィードバック型の弱め磁束制御法を提案した。提案法の有効性を実機実験によって検証し、操作量飽和時における電流およびトルク制御性能の改善効果を評価した。この結果、提案法を用いればパラメータ変動が生じるような条件においても駆動可能領域が縮小せず、最大の駆動可能領域を維持できることがわかり、従来法よりも電流およびトルクが立ち上がり、かつ、その応答も改善することが確認できた。

研究成果の概要(英文)：In this study, a new feedback type flux-weakening control method for current control of interior permanent magnet synchronous motors using values of voltage saturation, which is the difference between the output value of the auto current regulator (ACR) and the actual output value, and voltage margin, which is the difference between the output value of the ACR and its limit value, has been proposed. In the proposed method, the current and the torque responses can be improved because the current reference in the transient state can be designed by using values of voltage saturation and voltage margin. In addition, motor parameters are not used directly in the proposed method; therefore, this method has robustness to parameter variation. Simulation and experimental results were presented to demonstrate the effectiveness of the proposed method.

研究分野：電力変換・電気機器

キーワード：埋込磁石同期モータ 応答改善 弱め磁束制御 操作量飽和 アンチウィンドアップ ロバスト

1. 研究開始当初の背景

(1) 近年の埋込磁石同期モータ(IPMSM)ドライブシステムでは高出力密度化および高応答化が要求される用途が増えてきているため、操作量飽和への対策が必要不可欠となりつつある。また、高速領域で駆動させることを想定すると弱め磁束制御の重要性も高まっている。この結果、操作量飽和時における電流およびトルク制御性能改善が重要な課題として認識されている。

(2) 操作量飽和の発生要因としては、高応答化に伴うものと高速駆動に伴うものに大別され、これらの対策には、それぞれ、アンチwindアップ制御および弱め磁束制御が用いられる。これまでも様々な手法が提案されているが、複雑なアルゴリズムが必要であったり、電流制御を停止するために過電流が発生する場合があったり等、解決すべき課題が残されている。

(3) この他にも、これまでに、アルゴリズムの簡略化、システムのロバスト化の観点から、操作量の飽和量を用いたフィードバック型の弱め磁束制御法が提案されており、著者らも同様の手法を提案している。これらの手法はアンチwindアップ制御も同時に実現可能といった利点がある。従来法では飽和量に応じてd軸電流指令値を変更する手法が提案されているが、著者らが提案する手法はd軸電流指令値および電流位相指令値を変更するといった2段階を経て、弱め磁束制御を達成する点に違いがあり、これがトルク応答の改善に寄与するといったことがシミュレーションにより確認できていた。

2. 研究の目的

(1) 本研究では、IPMSMドライブシステムにおける一課題である操作量飽和時の電流およびトルク制御性能改善を目的とした。具体的には、研究期間内に以下の内容について明らかにすることを目的とした。

(2) 提案法の有効性を実機実験によって検証し、操作量飽和時における電流およびトルク制御性能の改善効果を評価する。

(3) 提案法の汎用性を検証するため、位置センサレス制御時においても提案法を適用し、電流およびトルク制御性能が改善されるかについても評価した。位置センサレス制御とは、一般的な制御系において必要とされる磁極位置センサを排して電流およびトルク制御系を構成する手法であり、コストの観点から一般産業分野を中心に要求されている制御法である。

3. 研究の方法

(1) 図1に提案法を適用したシステムの全体構成を示す。本制御系では、操作量(電圧指

令値)飽和が生じた場合、リミッタ前後の差を用いて演算される「操作量の飽和量 v_{satu} 」を電流指令値生成器にフィードバックし、操作量飽和が解消されるように電流指令値を変更することで弱め磁束制御を達成する。また、操作量飽和が生じていない場合、操作量制限値と電圧指令値から演算される「飽和に至るまでのマージン量 v_{marg} 」を電流指令値生成器にフィードバックし、不要な弱め磁束制御を行わないように電流指令値を変更する。

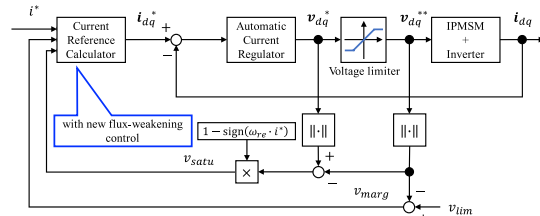


図1 提案法を適用したシステムの全体構成

(2) 図2に提案法における電流指令値変更時のフローチャートを示す。提案法では電流振幅指令値がその制限値を超えるか否かで電流指令値変更指針を切り替えている。電流振幅指令値がその制限値より小さい場合、比較的大きなゲインを有する積分器により、弱め磁束制御を達成するようにd軸電流指令値を生成する(図2(a))。これに対して、電流振幅指令値がその制限値にまで達した場合、比較的小さなゲインを有する積分器により、弱め磁束制御を他制するように電流位相指令値を変更する(図2(b))。操作量飽和が解消された場合、積分器により、弱め磁束制御を緩和し、最大トルク/電流制御時の電流指令値になるよう、電流指令値を変更する(図2(c))。

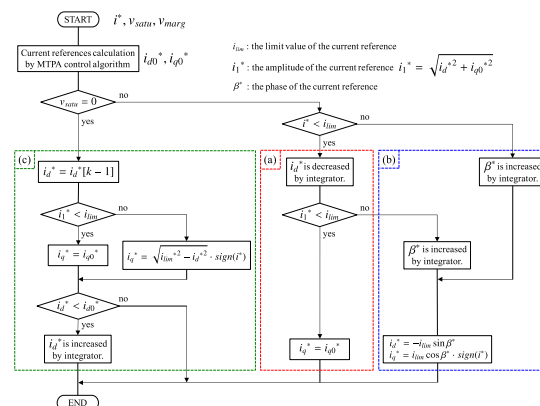


図2 提案法における電流指令値変更時のフローチャート

(3) 上述の提案法について、実機実験により、その有効性を検証する。具体的には、一般的に用いられるシステムと提案法を適用したシステムとを、操作量飽和が定常状態および過渡状態のそれぞれにおいて発生する条件にて比較した。

4. 研究成果

(1) 提案法の有効性を検証するため、実機実験を行った。供試機として用いた IPMSM は巻線抵抗 0.523Ω 、 d 軸インダクタンス公称値 2.70 mH 、 q 軸インダクタンス公称値 4.16 mH 、誘起電圧定数 $0.0915 \text{ V}/(\text{rad}/\text{s})$ 、極対数 4 である。また、直流リンク電圧を 140 V 、電流制限値を三相電流実効値 5 A とし、回転速度は負荷機により固定した。この条件において以下の 2 種類の実験を行った。

(2) 定常特性を評価するため、各手法における速度-トルク特性を測定した。本実験では提案法、従来法およびマニュアルによりファインチューニングしたものを比較した。ここで、電圧方程式に基づいた弱め磁束制御則を併用したものを従来法として示している。提案法の各ゲインは試行錯誤により決定した。図 3 に各手法における速度-トルク特性を示す。図中の赤色、青色、緑色の線がそれぞれ提案法、従来法、マニュアルによりファインチューニングしたものを表している。同図より、従来法では駆動可能領域が縮小している。これは磁気飽和現象に起因するパラメータ変動によるものである。本実験ではパラメータを一定値として扱っているが、実際には電流値にもよるが 20 % から 30 % 程度、設定値よりも減少することを確認していることから妥当であると判断している。一方、提案法においてはマニュアルによりファインチューニングしたものと同様の速度-トルク特性が得られている。以上より、提案法を用いればパラメータ変動が生じるような条件においても駆動可能領域が縮小せず、最大の駆動可能領域を維持できることがわかった。

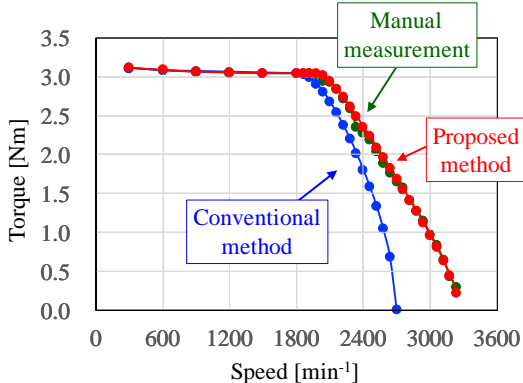


図 3 各手法における速度-トルク特性

(3) 過渡特性を評価するため、電流ステップ応答を検証した。本実験では提案法と従来法を比較した。ここで、操作量の飽和量に応じて積分器の入力を変更してアンチワンドアップ制御を達成する手法と電圧方程式に基づいた弱め磁束制御則を併用したものを従来法として示している。提案法の各ゲインは試行錯誤により決定した。実験条件として定常状態において最大トルク/電流制御が行われる 1920 min^{-1} および定常状態において弱め磁束制御が行われる 2100 min^{-1} とした。図 3 および図 4 にそれぞれ回転速度を 1920 min^{-1}

および 2100 min^{-1} とした際に、電流振幅指令値を零から定格電流の値 (8.66 A) へステップ変化させた場合の各軸電流とその指令値、トルク、操作量の飽和量 V_{sat} 、飽和に至るまでのマージン量 V_{marg} の応答を示す。図 4 より、定常状態において最大トルク/電流制御が行われる領域では、提案法を用いることによって電流およびトルクの立ち上がりを改善することが可能となることがわかる。図 5 より、定常状態において弱め磁束制御が行われる領域において、従来法ではパラメータミスマッチ等の影響によって電流およびトルクの立ち上がりが遅くなった。これに対して、提案法はモータパラメータを用いることなく弱め磁束制御を達成するため、従来法よりも電流およびトルクが立ち上がり、かつ、その応答も改善することが確認できた。

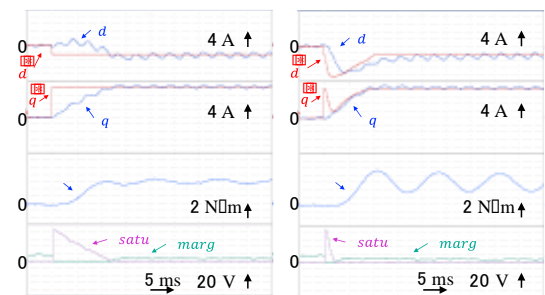


図 4 1920 min^{-1} における電流指令値のステップ変化に伴う電流、トルク、 V_{sat} 、 V_{marg} の応答結果 (左図：従来法、右図：提案法)

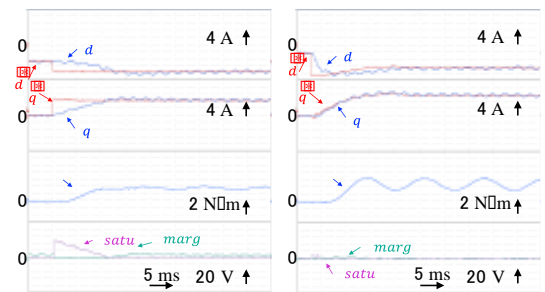
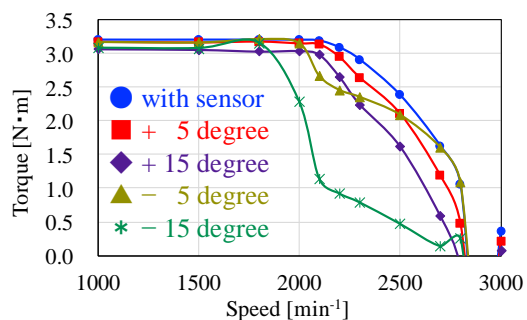


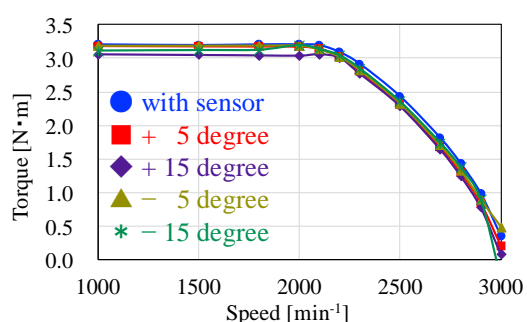
図 5 2100 min^{-1} における電流指令値のステップ変化に伴う電流、トルク、 V_{sat} 、 V_{marg} の応答結果 (左図：従来法、右図：提案法)

(4) 位置推定誤差が発生する条件においても提案法を用いれば駆動可能領域の縮小を抑えられることをシミュレーションにより確認した。シミュレーションに用いた IPMSM のパラメータは実験のものと同様である。本シミュレーションでは提案法の結果に加えて、上述の従来法の結果も示している。図 6 に各手法における速度-トルク特性を示す。同図には位置センサ付きの結果も示している。同図より、定トルク領域となる約 2000 min^{-1} までは従来法および提案法ともに、位置推定誤差に応じて出力が減少している。一方、定出力領域において、従来法では位置推定誤差に応じて出力トルクが減少する程度に違いが見られ、遅れの位置推定誤差が生

じる場合に駆動可能領域が顕著に縮小していることがわかる。これに対し、提案法では位置推定誤差が生じてもその影響は小さく、位置センサ付きのものと同様の速度-トルク特性が得られることがわかった。



(a) 従来法



(b) 提案法

図 6 各手法における位置センサレス速度-トルク特性(シミュレーション)

5. 主な発表論文等

[学会発表] (計 9 件)

- ① Atsushi Matsumoto and Masaru Hasegawa: “Experimental Verification of Improved Torque and Current Responses of New Flux-Weakening Control of IPMSM”, 3rd IEEE Workshop on Electrical Machines Design, Control and Diagnosis (WEMDCD2017), pp.187-192, Apr. 21, 2017, Nottingham (UK).
- ② Atsushi Matsumoto and Masaru Hasegawa: “A Novel Flux-Weakening Control Method for Robust Position Sensorless Control to Magnetic Saturation of IPMSMs”, 18th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE2016 -ECCE Europe), 8 pages, Sept. 7, 2016, Karlsruhe (Germany).
- ③ Kanako Hayakawa, Atsushi Matsumoto, and Masaru Hasegawa: “Control Performance improvement in Feedback-Type Flux-Weakening Control Method using Value of Voltage Saturation for SynRMs”, 18th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE2016 -ECCE Europe), 7 pages, Sept. 7, 2016, Karlsruhe (Germany).

- ④ Atsushi Matsumoto and Masaru Hasegawa: “A Novel Anti-Windup and Flux-Weakening Control Method for Current Control of IPMSMs Using Current and Current Phase Operations”, 17th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE2015 -ECCE Europe), 7 pages, Sept. 8, 2015, Geneva (Switzerland).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

松本 純 (MATSUMOTO, Atsushi)

中部大学・工学部・助教

研究者番号：50736072