

2021年度 永守財団 研究助成 研究報告書

所属機関	香川高等専門学校 電気情報工学科
職位または役職	講師
氏名	吉岡 崇

1. 研究題目

チューニングレスで高負荷トルク運転が可能な IPMSM の位置センサレス制御

2. 研究目的

近年では、ファン・ポンプ・空調などのインフラから、ハイブリッド自動車・電気自動車などの駆動系に至るまで、様々な用途で AC 汎用モータが用いられている。中でも、埋込磁石同期電動機 (Interior Permanent Magnet Synchronous Motor: IPMSM)(図 1)は従来用いられてきた誘導電動機 (Induction Motor: IM)より高効率であることから注目を集めている。IPMSM をはじめとする AC 汎用モータを使用する場合、オートチューニングと呼ばれる一種のパラメータ同定試験を行って制御に必要なモータパラメータを同定する必要がある。しかしながら、モータがすでに機械装置に組み込まれてしまっている場合等、モータの試運転前に十分なオートチューニングが行えないケースは少なくない。ベクトル制御をはじめとする高性能なモータ制御アルゴリズムはモータパラメータに対する依存度が高いため、適切なオートチューニングなしで十分な制御性能を引き出すのは難しい。

一方で、IM の制御に広く用いられている V/f 制御はその原理上モータパラメータをほとんど使用せずにモータを制御することが可能である。しかしながら、IM の V/f 制御を IPMSM にそのまま適用した場合、オープンループ型であるが故に回転磁界とロータの同期が難しく、極めて軽い負荷でもモータが脱調してしまうことが知られている。

この問題を解決するため、報告者が永守財団からの支援を受けて研究を進めてきた高負荷トルク耐量を有する IPMSM の V/f 制御法を拡張し、モータパラメータに対する感度を低減させた電流制御および座標変換方法について検討する。この手法を確立することができれば、高いエネルギー変換効率を有するモータ駆動システムを、手間や制約の多いオートチューニングを実施することなく、かつ位置センサ不要で実現することが可能となる。



図 1 IPMSM の外観 (写真右)

3. 研究内容及び成果

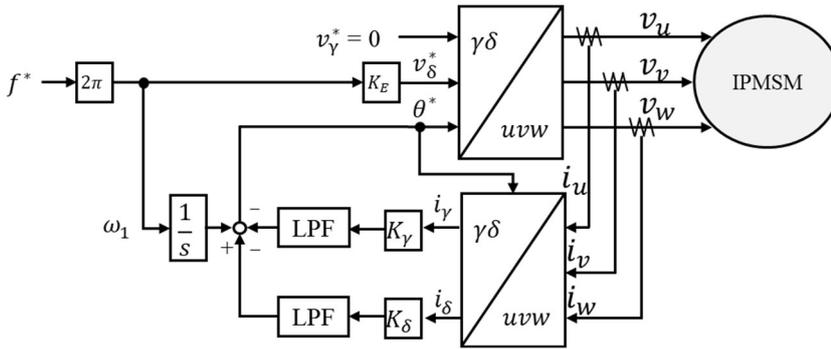


表 1 制御パラメーター一覧

位相補償ゲイン K_γ	-0.05
位相補償ゲイン K_δ	0.05
LPF の カットオフ周波数	8 [Hz]

図 2 提案する IPMSM 位置センサレス制御系の構成

本研究を通じて得られた IPMSM 位置センサレス制御系の構成を図 2 に、制御パラメーター一覧を表 1 に示す。本センサレス制御系は、大きく分けて①電流検出部、②座標変換時の位相補正部、③電圧指令生成部の 3 要素からなる。本制御系にはロータ位置のフィードバックは含まれておらず、位置センサレスで IPMSM の駆動・負荷運転が可能である。なお、一般的な V/f 制御はこのうちの③電圧指令生成部のみで構成されるが、提案する位置センサレス制御系は V/f 制御に①電流検出部および②座標変換時の位相補正部を追加した構造となっている。また、制御系構築にあたって必要となるモータパラメータは誘起電圧定数 K_e のみであり、可能な限りモータパラメータに対する依存度を下げるような設計思想となっている。

提案制御系における回転安定性を評価するため、無負荷における電流波形およびロータ位相波形の比較を行った。実験結果を図 3 に示す。実験結果より、提案法を用いることで電流脈動が大幅に抑制されていることが確認できる。また、提案法を用いることにより外界センサで測定した実位相と制御位相間の位相差がわずかに減少していることが確認できる。

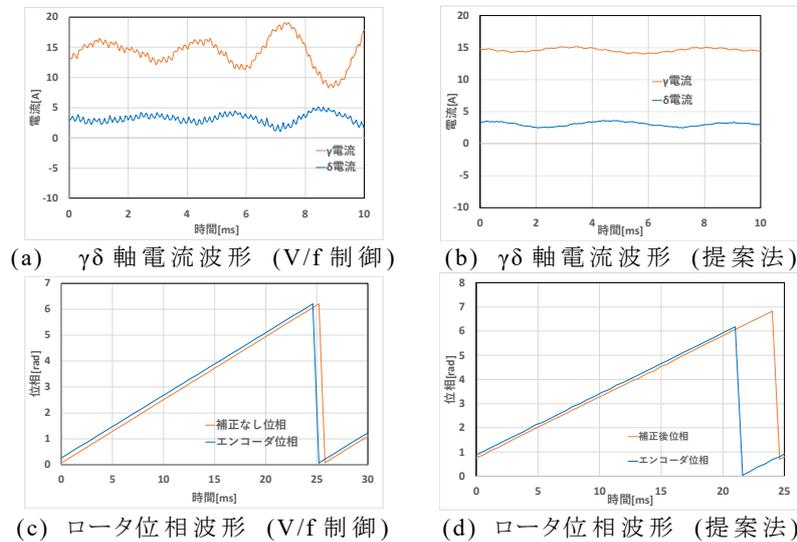


図 3 無負荷試験における電流・ロータ位相波形の比較

次に、負荷耐量試験の実験結果を図 4 に示す。V/f 制御のみ(青)の場合と比較すると、提案法(灰)を用いることにより、負荷耐量が定格比で 40~50%程度向上することが確認できる。

最後に、本研究課題の成果についてまとめる。

- $\gamma\delta$ 軸電流を用いた位相補償により無負荷時の脈動が抑制
- $\gamma\delta$ 軸電流を用いた位相補償により負荷耐量も向上
- 誘起電圧定数以外のパラメータを必要とせずチューニングレスでの運用が期待できる

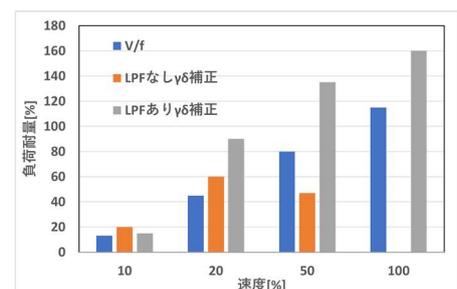


図 4 負荷耐量の比較

4. 今後の研究の見通し

本研究課題では、IPMSM の位置センサレス駆動性能を向上させつつ、チューニングレス化を目指してモータパラメータに対する依存度を下げる手法について検討を行ってきた。結果、誘起電圧定数以外のパラメータを必要とせず、かつ V/f 制御以上の制御性能を有する制御系を構築した。その一方で、現状の制御系には下記のような課題が残されている。

- ① 位相補償ゲイン $K_\gamma \cdot K_\delta$ の定量的な設計指針が不明確
- ② モータパラメータ変動に対する制御性能への影響が未検証
- ③ 高効率運転が可能なアルゴリズム(いわゆる最大出力制御)の適用可能性検討

このうち、①については以前より検討を進めており、今年度中をめどに設計方針を固める予定となっている。具体的な設計手法として、極配置法により暫定的な極配置を行ったのち、動作点を変化させて根軌跡を確認する手法を採用している。本制御系に限ったことではないが、AC モータの制御系の特性方程式は一般に線形微分方程式とならないため(干渉項の影響)、線形制御手法のみで動作点に依らない極配置を実現することは不可能である。そのため、報告者の今後の方針としては、上記のように動作点(回転速度)に対する根軌跡を確認し、現実的な範囲で制御系が不安定とならない設計を割り出す手法を採用する。このような方向性で設計指針を固め、その内容を令和 5 年電気学会全国大会ないし第 17 回高専パワエレフォーラムにて発表することを検討している。

また、②については、①ゲイン設計を確定させたのち、①と同様に根軌跡を確認することでパラメータ変動に対する影響を評価することが可能である。この検証にあたっては、シミュレーションのみならず実機実験による評価も必須となる。大電流時のモータインダクタンス低下はモータ制御において広く知られている課題の一つであり、セミクロード制御となる位置センサレス制御においてはその影響が特に顕在化しやすい。

さらに、③に関して、報告者が提案する位置センサレス制御では、これまでに述べた通り γ 軸電流フィードバックを用いて位相補正を行う。このとき、正確な位相が把握できれば最適な $\gamma\delta$ 軸電流動作点で駆動することが可能となりトルクあたりの電流を最小化することが可能である。現状では、様々な運転条件における制御位相の評価を行えていないためまずはその評価を実施、そののち最大出力制御の適用可能性について検討を行っていく。

5. 助成研究による主な発表論文、著書名

【国内会議口頭発表実績】

[1] 田中大翔, 吉岡崇, 漆原史朗: 「IPMSM の位相補償型 V/f 制御における負荷耐量の実機検証」, 令和 4 年度電気・電子・情報関係学会四国支部連合大会, 3-5, p.39 (2022-9)

【今後の国内会議口頭発表予定】

- ・ 令和 5 年電気学会全国大会 (2023/3)
- ・ 第 17 回高専パワエレフォーラム (2023/3)