

2020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

低演算量と高負荷トルク耐量を両立した 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 (IPMSM)(図 1)は従来用いられてきた誘導電動機(IM)より高効率であることから注目を集めている。IM を可変速駆動する場合、運転速度に比例した三相交流電圧を印加する、V/f 制御と呼ばれるオープンループ形の制御法が用いられる。しかしながら、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三相交流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。従って、IPMSM を駆動するためには、ロータリーエンコーダから得られるロータ位置情報を用いたクローズドループ型の制御アルゴリズムがほぼ必須となっている。

この問題を解決するため、モータに流れる有効電流に応じて三相交流電圧の位相補償を行うことにより、モータの脱調を抑制し負荷トルク耐量を向上させる手法が提案されている。しかしながら、従来提案されている手法では、モータ加速時や軽負荷時は有効電流が小さいために十分な位相補償が行えず、モータ速度が振動的になりやすいことが問題となっていた。そこで、報告者は、モータの有効電流だけでなく無効電流も併せて電圧位相補償に用いることにより、モータ加速時や軽負荷時の速度振動を抑制する手法を提案した。提案法は V/f 制御に電圧位相補償を追加したのみであり、演算性能の低いマイコンでも十分に実装可能なアルゴリズムである。この手法により、優れた負荷トルク耐量を有する IPMSM の位置センサレス制御系を低いコストで実現することが本研究課題の目的である。



図 1 IPMSM の外観 (写真右)

3. 研究内容及び成果

研究目的にて述べたように、モータの有効電流だけでなく無効電流も併せて電圧位相補償に用いることにより、モータ加速時や軽負荷時の速度振動を抑制することが可能となる。提案法はV/f制御に電圧位相補償を追加したのみであり、演算性能の低いマイコンでも十分に実装可能なアルゴリズムである。この手法により、優れた負荷トルク耐量を有するIPMSMの位置センサレス制御系を低いコストで実現することが本研究課題の目的である。

突極性を持たない永久磁石同期電動機(PMSM)のV/f制御は'02年に伊東らによって確立され、'17年に東井らによってIPMSMにも適用できる形へと拡張された。これらの手法は中～高速領域において十分な負荷トルク耐量を有しているが、低速領域では十分な負荷トルク耐量が得られないという問題点が報告されている。そこで、報告者は、モータの有効電流と無効電流を組み合わせることで電圧位相補償を行うことにより、負荷トルク耐量を改善する手法を提案する。

この手法の有効性を確認するため、MATLABを用いた計算機シミュレーションを本研究課題の実機実験に先立って実施した。図2に示すシミュレーション結果より、提案法を用いることで速度応答の整定時間が80%程度短縮され、負荷トルク耐量も向上することを確認している。

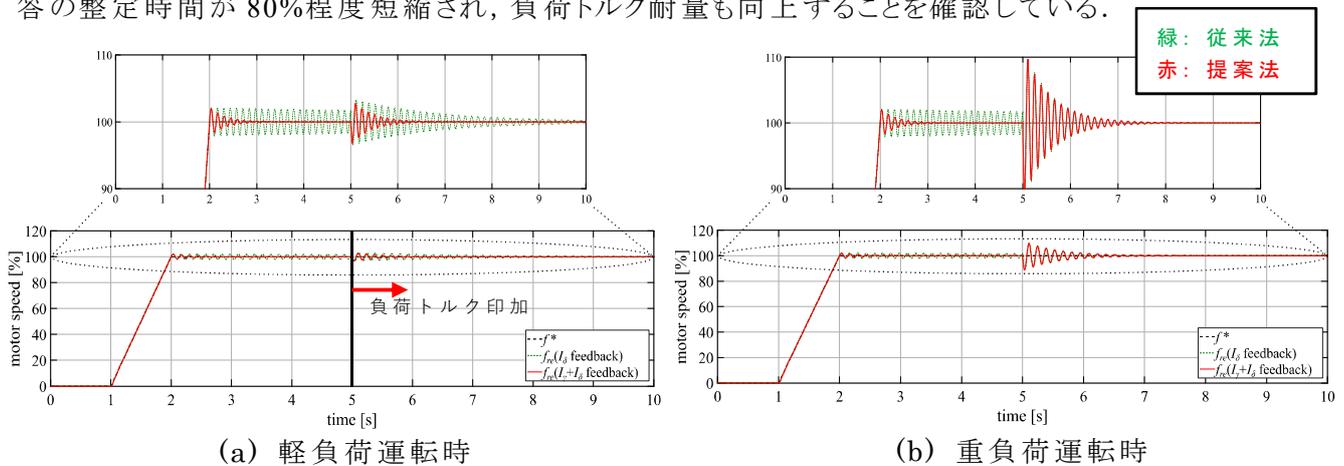


図2 従来法と提案法における制御性能の比較

上記計算機シミュレーションを踏まえ、本研究によって得られた新知見、成果について下記にまとめらる。

[知見1] 有効電流フィードバックが負荷耐量向上に寄与するかどうかは
電動機の運転条件に依存

[知見2] 運転条件によっては無効電流フィードバックの方が負荷耐量向上に寄与することが判明
これはある意味で知見1の裏付けでもある

先行研究の有効電流フィードバックがIPMSMのセンサレス制御に有効である要因は、インバータにより生成した三相交流電圧によって生じる一次側磁束と回転子に生じる二次側磁束の位相差(いわゆる負荷角)に相関があるためである。しかしながら、センサレス座標上における有効電流や無効電流と負荷角の関係は三角関数を含む関数で表され、単純な線形関数として表すことができないと予想される。それ故に、先行研究である有効電流フィードバックが有効か否かは電動機の運転条件に左右され、有効電流フィードバックをもってしても十分な負荷耐量を確保できない場合があった。そこで、有効電流と併せて無効電流フィードバックも行うことで、広い運転条件にて負荷耐量を向上させることが可能となることが判明した。

上記のように、計算機シミュレーションおよび解析では新たな知見を得ることができた。しかしながら、計算機シミュレーションに引き続き検討を進めていた実機検証については、デジタル制御システムPE-Expert 3への制御アルゴリズム実装に難航したため、当該研究期間内では実機評価に移行することができなかった。そのため、実機では制御アルゴリズムの妥当性を評価することができず、研究成果としての確認はできていない。ただし、本研究課題が狙っている運転領域は、線形性の強い軽負荷～中負荷領域であり、非線形性が強くなる連続定格トルク以上の重負荷領域はターゲットとしていない。これを鑑みれば、提案法の到達目標に対し、中負荷領域までの運転に限れば実機実験においても十分に提案法の有効性は発揮されると推察される。

4. 今後の研究の見通し

本研究課題では、V/f 制御時の負荷耐量向上に着眼して研究を進めてきた。しかしながら、本手法は本質的には位置センサレス制御に相当するモータ制御法であり、位置センサ付きのモータ制御法を上回る負荷耐量とするのは現実的に困難である。従って、負荷耐量向上は一定のレベルまでは有意な成果が望めるものの、ある一定のレベル以上では有意な改善は望めなくなってくる。そこで、今後はさらなる負荷耐量向上には着手せず、別の観点から提案手法を活用していく方法を検討している。

具体的には、本制御手法は各種位置センサレス制御としては比較的パラメータ依存度が低いという特徴を鑑みて、パラメータ感度の低い(オートチューニングの依存度が低い)位置センサレス制御法として発展させていくことを検討している。この背景として、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、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。

この目標を達成するため、次のようなステップを経て研究を進めていくことを予定している。なお、この研究課題は永守財団 研究助成 2021 の採択を受けており、引き続き永守財団からの支援を受けながら研究活動を遂行している最中である。

- (1) パラメータ感度解析(モータモデル):モータパラメータと感度関数の関係を解析
- (2) パラメータ感度解析(制御系全体):制御ゲインと感度関数の関係を解析・シミュレーション
- (3) 制御系再設計:混合感度問題に基づくアプローチにより制御ゲインを再設計
- (4) 制御系の実機実装:(3)で設計した制御系をデジタル制御システム PE-Expert 3 上に実装
- (5) 実機実験による評価:モータパラメータをミスマッチさせた条件で提案法の制御性能を評価

5. 助成研究による主な発表論文、著書名

- ・令和 4 年電気学会全国大会(2022/3)にて発表予定
- ・2022 年電気学会産業応用部門大会(2022/8)にて発表予定