

平成 30 年 6 月 26 日現在

機関番号：17301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05945

研究課題名(和文)高性能と簡易性を追求した交流電動機のエンコーダレスベクトル制御

研究課題名(英文) Encoderless Vector Control of AC Motors Taking into Account High Performance and Simplicity

研究代表者

辻 峰男 (TSUJI, Mineo)

長崎大学・工学研究科・教授

研究者番号：80145218

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：交流電動機は誘導電動機と同期電動機に大別でき、電気で動く装置の多くにどちらかの電動機が利用されている。これらの電動機のトルクを瞬時に制御するためにエンコーダの位置や速度情報を基にしたベクトル制御が用いられている。本研究はエンコーダを用いることなく位置や速度を推定してベクトル制御を行う方式を開発するもので、装置の小型化を達成できる。筆者らは、簡単な制御アルゴリズムでトルクの制御が可能なエンコーダレスベクトル制御法の開発を進めてきたが、今回の研究で一次抵抗が変化した場合でも性能が劣化しない方法及び制御器の構成と設計法に関してシミュレーションと実験によりシステム開発を行った。

研究成果の概要(英文)：AC Motors which are divided into induction motor and synchronous motor are used widely for electrical equipments. In this case, an encoder is used to detect the speed and position for the vector control which controls electromagnetic torque instantaneously. In this research, the vector control is realized without using the encoder by estimating the speed and position. As the result, the system size is minimized and the sensor cable is removed. We have proposed a simplified encoderless vector control methods for not only the induction motor but permanent magnet synchronous motor. Especially, an estimation method of stator resistance and simple configuration of current and speed controllers are developed theoretically and experimentally. A linear model is useful for the design of controllers.

研究分野：電気機器制御学

キーワード：交流モータ エンコーダレス制御 ベクトル制御

1. 研究開始当初の背景

交流電動機は産業用から家庭用に至るまで広く利用されている。工作機械やロボット等は精密なトルクや速度の制御を必要とし、電動機に直結したエンコーダが必要不可欠である。しかし、一般産業用、送風機、ポンプ、家電製品、電車等の用途では、エンコーダレス制御が実用化促進の傾向にある。これまで世界中で幾つかの方式が提案されているが、解決すべき問題点も少なくない。例えば、低速度領域での安定な運転の実現、パラメータ変動に対するロバスト性の強化がある。それと同時に問題解決のために複雑な制御を行うことも好ましくない。高性能でかつ簡単な制御法が望まれる。筆者らはこれまで誘導電動機と同期電動機のエンコーダレスベクトル制御に関する研究を行ってきたが、高性能化と簡易性を本研究で更に追求していきたい。エンコーダレス制御は電動機制御の中心となる研究課題であり、自動車の電動化が進展する中で今後もその発展が期待されている。

2. 研究の目的

誘導電動機を速度を検出するためのエンコーダを省きたいいわゆるエンコーダレス制御について、安定に動作し、トルクの瞬時制御が可能な高性能特性をできる限り簡単なアルゴリズムで実現する制御法を開発し、安定解析、シミュレーション解析および実験により検証する。また、同期電動機のエンコーダレス制御についても、誘導電動機のエンコーダレス制御と統一的な手法で高性能特性を簡単に実現する制御法を開発し、安定解析、シミュレーション解析および実験により検証する。さらに、これまでの2レベルインバータ駆動だけでなく、大容量機の運転に適した3レベルインバータ駆動についても研究する。

3. 研究の方法

(1) 誘導電動機のエンコーダレス制御

- ・効率の向上が期待できる AT-NPC (Advanced T-type Neutral- Point Clamped) 方式3レベルインバータ装置を製作する。
 - ・誘導電動機のエンコーダレス制御について、高性能と簡易性を追求したエンコーダレス制御法を開発する。
 - ・制御システムのシミュレーション解析と安定解析を行い制御器を設計する。
 - ・デジタルシグナルプロセッサ制御による実験装置で理論を検証する。
 - ・得られた成果については、随時学会で発表する。
- (2) 同期電動機のエンコーダレス制御
- ・誘導電動機と統一的な考え方で高性能かつ簡易なエンコーダレス制御法を開発する。
 - ・制御システムのシミュレーション解析と安定解析を行い制御器を設計する。
 - ・デジタルシグナルプロセッサ制御による

実験装置で理論を検証する。

- ・得られた成果については、随時学会で発表する。

4. 研究成果

(1) 誘導電動機のエンコーダレス制御

図1は、モータ駆動装置の小型化のため、誘導電動機を速度を検出するためのエンコーダを省いたエンコーダレス制御について、筆者らが考案した制御系の構成図である。

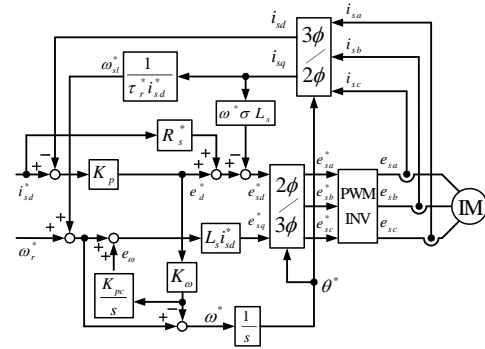


図1 誘導機簡易エンコーダレス制御系

今回の研究により、d軸電流制御は単純な比例制御、速度制御は積分制御で良好に機能することが判った。

次に、温度変化により一次抵抗が変動した場合の安定解析を行い、その影響を理論的に検討した。この結果、図2に示すように、極低速運転領域で一次抵抗の変動が大きい場合に定常解が存在しない領域が発生したり、定常解があっても不安定になることが明らかになった。縦軸は速度指令、横軸はすべり回転数である。図中kは、制御器の一次抵抗を実際の一次抵抗で割った値である。

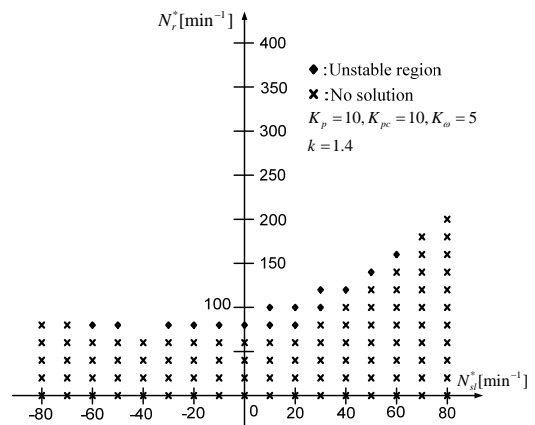
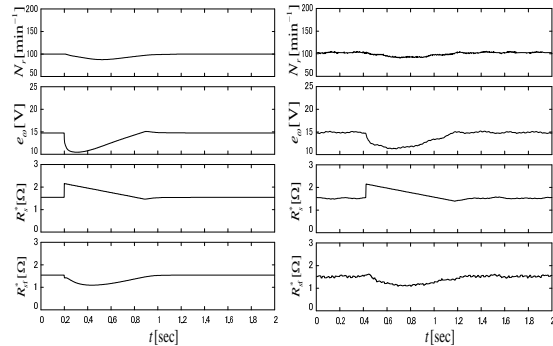


図2 解なしまたは不安定な領域

一次抵抗変動の対策として一次抵抗のオンライン推定法を考案した。一次抵抗推定のシミュレーション解析と実験により、一次抵抗の影響が大きくなる低速運転時に安定に推定が行えることを確認した。図3にその結果を示す。R*が一次抵抗の推定値である。図

では、はじめ実際の抵抗と R_s^* をいずれもノミナル値に設定して運転し、その後 R_s^* だけをノミナル値の 1.4 倍に急変させた場合を示している。図より、シミュレーション及び実験結果とも R_s^* はノミナル値に徐々に収束していることが判る。



(a) シミュレーション (b) 実験
図 3 一次抵抗の推定結果

次に、AT-NPC (Advanced T-type Neutral-Point Clamped) 方式 3 レベルインバータ装置を製作し、誘導電動機のエンコーダレス制御の実験を行ったのでその概要を報告する。図 4 に製作した AT-NPC 方式 3 レベルインバータの主回路を示す。図 5 は、速度指令 N_r^* を 100 min^{-1} から 150 min^{-1} さらに 100 min^{-1} へと変化させた場合の実速度 N_r と推定速度 \hat{N}_r の実験結果である。低速運転領域ではあるが実速度および推定速度いずれも指令速度に追従していることが判る。

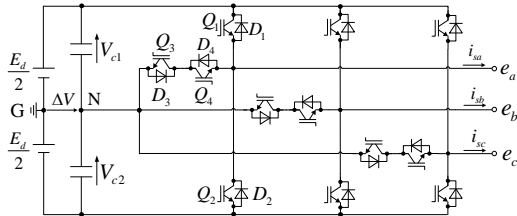


図 4 AT-NPC 方式 3 レベルインバータ

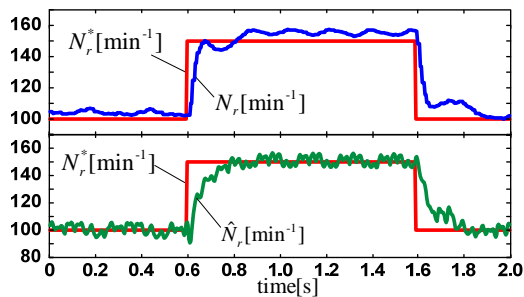


図 5 速度のステップ応答 (実験結果)

(2) 同期電動機のエンコーダレス制御

図 6 は、筆者らが考案した同期電動機のエンコーダレス制御の構成図である。誘導電動機の場合と統一した考え方により、これまで

のオブザーバ方式より簡単な方式を考案し、安定解析、シミュレーション解析及び実験による検証を行った。図 7 は、導出した線形モデルより、位置推定ゲイン K_{pe} と速度制御積分ゲイン K_{ie} をパラメータ場合の不安定領域を示す。図より、 K_{pe} を大きくしないと K_{ie} は大きくできないことが判る。最後に図 6 に示す d 軸電流制御器と速度制御器について検討を加えた。図 8 は電流制御と速度制御にともな PI 制御を用いた場合、図 9 は電流制御と速度制御にそれぞれ比例制御と積分制御を用いた場合の実験結果である。両者に大きな差は見られず、制御が簡単な電流 P 制御と速度 I 制御で良好に機能することが判明した。

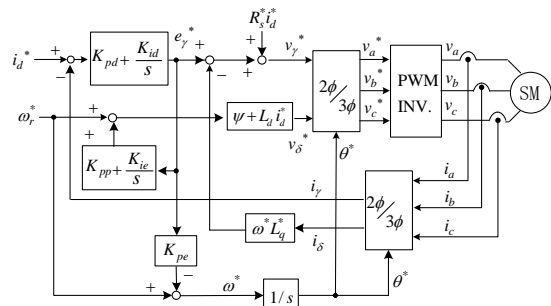


図 6 同期機簡易エンコーダレス制御系

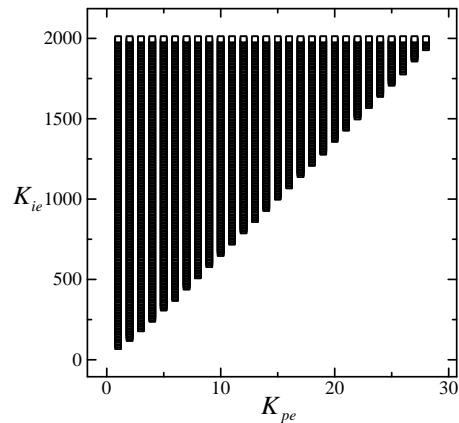


図 7 不安定領域

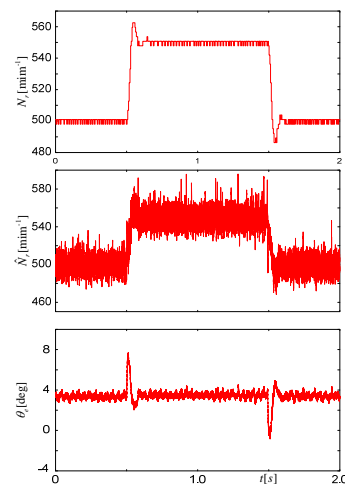


図 8 ステップ応答 (PI-PI 制御系)

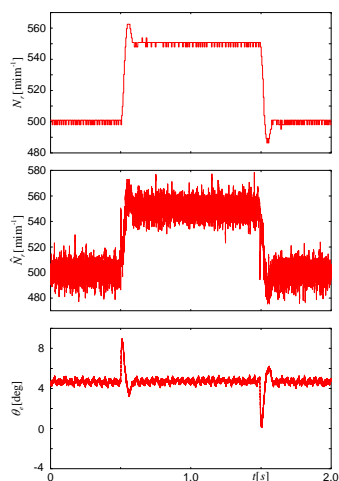


図9 ステップ応答 (P-I 制御系)

(3) まとめ

誘導電動機と同期電動機の簡易エンコーダレス制御について研究し、当初の目的である簡易性と高性能性を両立した制御システムが構築できたと考えている。さらにこれらの制御方式は両電動機について統一的な制御手法で達成され独創的である。以上の成果については次項に述べるように国内外の学会で発表を行っている。発表においては、多くの質問が寄せられた。今後の展望としては実システムへの応用が考えられる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 5 件)

- ① Mineo TSUJI, Shin-ichi HAMASAKI, Kosuke NAKAMURA, Andrea Del PIZZO : "Configuration of Current and Speed Controllers for a Simplified Sensorless Vector Control System of IPMSM", Proceedings of International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM), 査読有, 2018
- ② Naoki Akao, Mineo Tsuji, Shin-ichi Hamasaki : "Robustness of Simplified Speed-Sensorless Vector Control for Induction Motor", Proceedings of International Power Electronics Conference IPEC (ECCE ASIA), 22P14-7, pp.1217-1222, 査読有, 2018
- ③ Takatoshi Inoue, Yasumasa Hamabe, Mineo Tsuji, Shin-ichi Hamasaki : "Extended EMF-based Simple IPMSM Sensorless Vector Control Using Compensated Current Controller", Proceedings of International Power Electronics Conference IPEC (ECCE ASIA), 22P16-1, pp.1276-1281 査読有, 2018
- ④ Koji Sudo, Mineo Tsuji, Shin-ichi Hamasaki, Takuya Fukuoka, Hiroyuki Ichinose : "AT-NPC 3-Level Inverter-Fed Induction Motor Vector Control With Neutral Point Voltage Control",

Proceedings of International Power Electronics Conference IPEC (ECCE ASIA), 22P15-3, pp.1240-1245 査読有, 2018

- ⑤ Mineo Tsuji, Kohei Iwamoto, Shin-ichi Hamasaki, Andrea Del Pizzo : "A Simplified Speed-Sensorless Vector Control for Induction Motor", Proceeding of International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM), 査読有, Vol.1, pp.522-527, 2016
DOI: 10.1109/SPEEDAM.2016.7525842

〔学会発表〕 (計 6 件)

- ① 中村 亘佑, 辻 峰男, 浜崎 真一, 松田 祐樹 「IPMSM 簡易センサレスベクトル制御系の電流制御と速度補償制御」第70回電気・情報関係学会九州支部連合大会, No. 03-2A-11, Vol. 1, pp.269 (2017)
- ② 須藤 皓司, 辻 峰男, 浜崎 真一, 福岡 拓弥 : 「3 レベルインバータを用いた誘導電動機のベクトル制御」第70回電気・情報関係学会九州支部連合大会, No. 03-2A-10, Vol. 1, pp.268 (2017)
- ③ 赤尾 尚季, 辻 峰男, 浜崎 真一 : 「誘導電動機簡易センサレスベクトル制御系のロバスト性について」第70回電気・情報関係学会九州支部連合大会, No. 03-2A-09, Vol. 1, pp.267 (2017)
- ④ 井上 崇稔, 濱辺 恭将, 辻 峰男, 浜崎 真一 : 「拡張誘起電圧を用いた IPMSM センサレス制御における電流制御系補償」平成29年電気学会産業応用部門大会, No. Y-113, pp.113 (2017)
- ⑤ 岩本 康平, 辻 峰男, 浜崎 真一 : 「誘導電動機の簡易センサレスベクトル制御」平成27年電気学会電子・情報・システム部門大会, No. MC8-5, pp.1040-1043 (2015)
- ⑥ 柿森 健吾, 渡邊 裕之, 辻 峰男, 浜崎 真一, 陳 碩 : 「磁束オブザーバを用いた誘導電動機速度センサレスベクトル制御系の安定化」平成27年電気学会電子・情報・システム部門大会, No. MC8-4, pp.1036-1039 (2015)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

辻 峰男 (TSUJI, Mineo)
長崎大学・工学研究科・教授
研究者番号 : 80145218

(2) 研究分担者

浜崎 真一 (HAMASAKI, Shin-ichi)
長崎大学・工学研究科・准教授
研究者番号 : 80363472