

平成 26 年 6 月 11 日現在

機関番号：17301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560330

研究課題名(和文) DCリンク情報のみ利用した交流電動機の新センサレスベクトル制御

研究課題名(英文) New Sensorless Vector Control of AC Motors Using DC Link Current

研究代表者

辻 峰男 (TSUJI, Mineo)

長崎大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：80145218

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円、(間接経費) 930,000円

研究成果の概要(和文)：DCリンク電流を用いた交流電動機の新センサレスベクトル制御について研究を行った。まず、誘導機の簡易センサレス制御法を考案した。DCリンク電流とインバータのPWM信号から相電流を推定する方法を開発し、シミュレーションで動作を確認した。開発した制御プログラムを実験装置に組み込んで、DCリンク電流のみを利用した速度センサレスベクトル制御を実現した。次に、永久磁石型同期電動機の新センサレスベクトル制御法を考案した。考案したセンサレスベクトル制御のプログラムを開発し、実験装置に組み込んで実機実験を行った。この結果はシミュレーション解析と良く一致し、良好な速度制御が実現できた。

研究成果の概要(英文)：We studied the speed sensorless vector control of AC motors using DC link current. At first, we proposed a simplified sensorless vector control of induction motor. We developed a method which estimate phase currents from DC link current and pulse width modulation (PWM) signals. This method is confirmed by simulation results which are obtained by considering PWM. The developed method was tested by experimental systems and good transient responses are obtained without using phase currents. Furthermore, we proposed a simplified sensorless vector control of an interior permanent magnet synchronous motor (IPMSM). This method is tested by experimental system. It is confirmed that the experimental transient responses are very close to simulation results which consider PWM. Since quick responses are obtained, the proposed method is useful for industrial applications.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電力工学・電力変換・電気機器

キーワード：センサレスベクトル制御 DCリンク電流 誘導電動機 同期電動機

1. 研究開始当初の背景

電動機駆動システムは産業用から家庭用に至るまで広く利用されている。電気自動車や産業用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やレゾルバが必要不可欠である。しかし、それ以外の電車、産業用、家電製品、送風機、ポンプ等の用途では、センサレスベクトル制御が実用化促進の傾向にある。センサレス制御においても、DCリンクの直流電圧センサ、直流電流センサ及び交流側電流センサを使用して速度や位置の推定を行い、ベクトル制御を実現している。

申請者らはこれまで誘導電動機速度センサレスベクトル制御において下記の論文を発表して、本研究の基礎となる成果を挙げた。

・ M. Tsuji, S. Chen, K. Izumi, E. Yamada : "A Sensorless Vector Control System for Induction Motors Using q-axis Flux with Stator Resistance Identification", IEEE Trans. Industrial Electronics, Vol.48, No.1, pp.185-194 (2001)

・ M. Tsuji, Y. Umesaki, R. Nakayama, K. Izumi : "A Simplified MRAS based Sensorless Vector Control Method of Induction Motor", Proceedings of PCC-Osaka, pp.1090-1095 (2002)

2. 研究の目的

交流電動機の回転位置を検出するエンコーダを省いたセンサレスベクトル制御が国内外で注目を集め活発に研究されている。本研究は、これまで申請者らが考案してきた交流電動機(誘導電動機及び同期電動機)のセンサレスベクトル制御を改良・発展させ、更にハードウェアの簡単化を目的として、現在3相電流検出のために使用されている電流センサを省き、DCリンク側の1個の電流センサだけでセンサレスベクトル制御を実現する。DCリンクの側の電流センサは現状のシステムでも保護用として使用されており、これが実現するとハードウェアが大幅に簡単化されることになり、装置の小型軽量化・対環境性向上が図れる。

3. 研究の方法

(1) 誘導電動機

・ 誘導電動機のセンサレス制御に関して、できるだけ簡単で高性能な方法を開発する。

・ DCリンク電流とインバータのPWM信号から必要な電流を推定する方法を開発し、誘導電動機のセンサレス制御についてシミュレーションを行う。

・ 研究室に既に購入している、誘導電動機直結直流発電機、インバータ制御装置、電球負荷、電力計を利用して、DCリンク電流のみを利用した速度センサレスベクトル制御の制御プログラムを開発する。

・ 開発した制御プログラムを実験装置に組み込んで、DCリンク電流のみを利用した速度センサレスベクトル制御の実験を行う。

・ 得られた成果に関しては、随時学会で発表する。

(2) 同期電動機

・ 科研費により永久磁石型同期電動機、トルク検出器、直流発電機、DSP制御インバータ制御装置などを購入する。

・ 永久磁石型同期電動機の抵抗、インダクタンス、起電力定数などを測定する。

・ 永久磁石型同期電動機の速度センサレスベクトル制御法を考案する。

・ 考案した永久磁石型同期電動機速度センサレスベクトル制御の制御プログラムを開発する。

・ 開発した制御プログラムを実験装置に組み込んで、速度センサレスベクトル制御の実験を行う。

・ 得られた成果に関しては、随時学会で発表する。

4. 研究成果

(1) 誘導電動機

①センサレスベクトル制御システムの考案

構成が簡単な誘導電動機の速度センサレスベクトル制御方式として図1のシステムを考案した。誘導機のd軸電圧方程式は定常状態では次式により表せる。

$$e_{sd}^* = R_s^* i_{sd}^* - \omega^* \sigma L_s i_{sq}^* - \omega^* M \psi_{rq}^* / L_r \quad (1)$$

従って、図1のように制御系を構成するとd軸PI電流制御器の出力電圧は次式で表せる。

$$e_d^* = -\omega^* M \psi_{rq}^* / L_r \quad (2)$$

(2)式より、q軸鎖交磁束が求まるので、これを0にするようにd-q軸の回転角速度を調整すれば磁束の方向が求まりベクトル制御が実現できることになる。これを図2の磁束位相推定原理に示す。 ω_e はすべり周波数で、これと速度指令 ω_r^* を加えた値が ω^* の定常値となる。

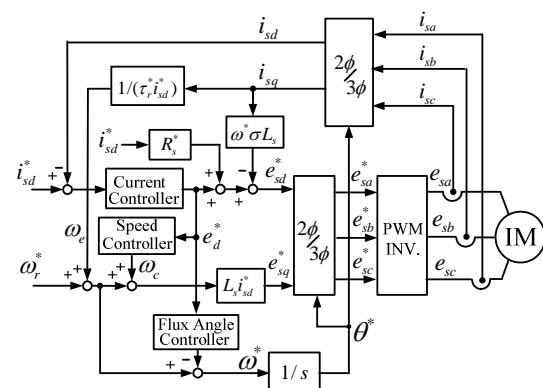


図1 誘導機のセンサレスベクトル制御系

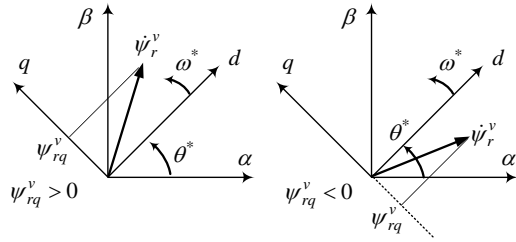


図2 磁束位相推定原理

e_d^* は速度指令と速度推定値の偏差にも比例するので、速度制御器でこれに比例した q 軸電圧を加えてトルク電流を制御することができる。

提案システム (図1) の安定性を調べるためシステム全体の線形状態方程式を導出した。この系行列の固有値を根軌跡として図3に示す。速度指令は 100 min^{-1} で、すべり回転数 (負荷トルクに比例) を -80 min^{-1} から 80 min^{-1} まで変化させている。図より力行運転のみならず回生運転領域においても安定に運転できることが判る。提案方式は従来の状態オブザーバを用いる方式に比べて構成が簡単であり、従来困難とされていた低速回生運転領域でも安定な運転が実現でき実用的な方式である。

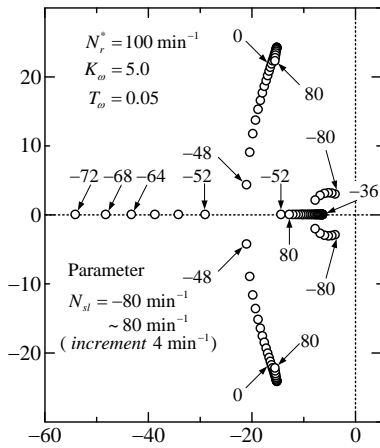


図3 根軌跡

②シミュレーション解析

DC リンク電流より三相電流を推定する方式に関してシミュレーション解析を行った。図4にDC リンク電流とインバータ回路を示す。IGBT のスイッチングはキャリア信号と各電圧指令によって図5のように決定され、そのスイッチングパターンからDC リンク電流と三相電流の関係が図のように求まる。しかし実際には図6に示すように、IGBT のターンオン時間、ターンオフ時間、デッドタイムにより複雑に変化する。従ってこれらを詳細に考慮したシミュレーション解析が必要となる。

DC リンク電流の検出はA/D変換器の変換時間を考慮して $5 \mu\text{s}$ ごとに行うものとし、

PWM の1周期 $T_{pwm} = 200 \mu\text{s}$ の最初の半周期で電流検出残りの半周期で制御演算を行う。

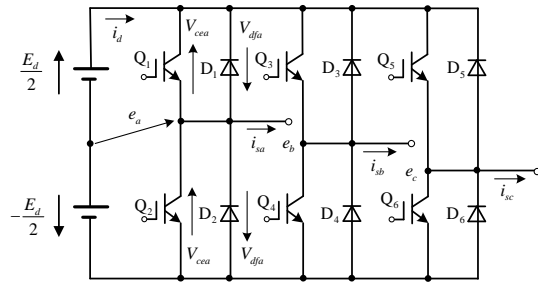
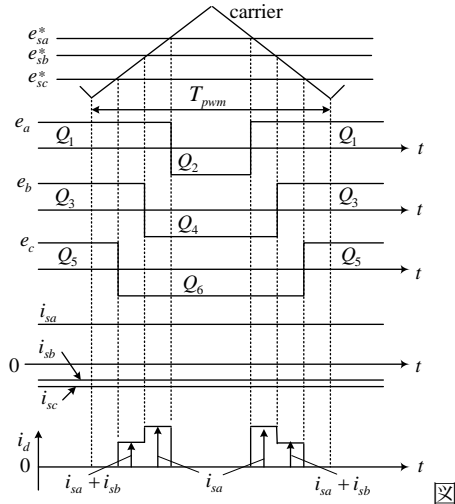


図4 DC リンク電流とインバータ回路



5 DC リンク電流と三相電流の関係

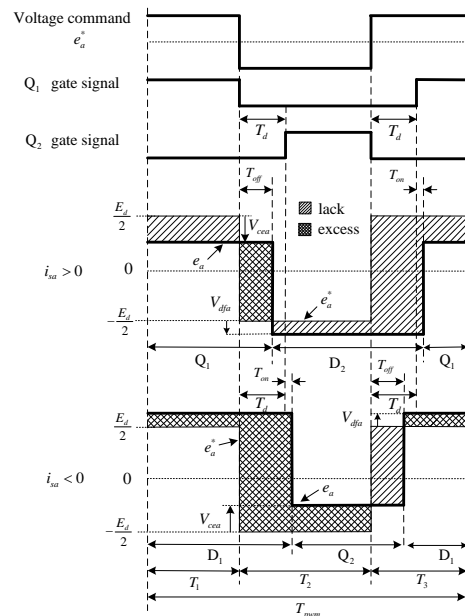


図6 詳細なPWMのスイッチング動作

図7はDC電流から三相電流を推定した場合の速度センサレスベクトル制御のシミュレーション結果である。波形は上から順番に実速度、推定速度、実a相電流、推定a相電流である。推定a相電流のスパイクはPWM

のスイッチングが理想的でないことによる。図8は、制御器側でターンオン時間、ターンオフ時間、デッドタイムを考慮して電流パターンを決定した場合である。実a相電流と推定a相電流はほぼ一致しており、DCリンク電流のみでセンサレス制御が良好に行われていることが判る。

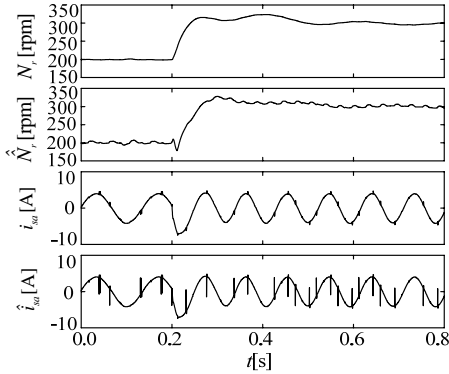


図7 シミュレーション結果 (改善前)

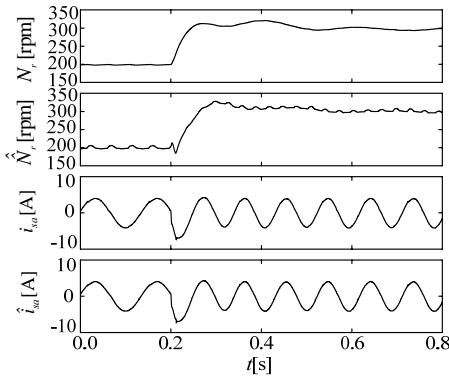


図8 シミュレーション結果 (改善後)

③実験結果

図9は実験により得られたDCリンク電流の測定値例である。図のように電流にオーバーシュートが発生し、DCリンク電流の変化を順に調べ変化量から3相電流を推定する方法では良い結果が得られなかった。そこで前周期で出力した変調率とDC電圧からPWMのスイッチングが起こる時間を求め、PWMのスイッチングが起こる直前のDCリンク電流を検出することで3相電流の推定を行った。ただし、3相電圧指令値の交点付近では3相電流の推定は困難となる。このような場合には最小2乗法による線形補間を行った。

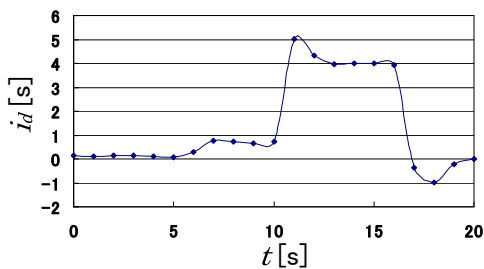


図9 DCリンク電流の実験波形

最小2乗法では、

$$r(a,b) = \sum_{i=1}^N (y_i - ax_i - b)^2 \quad (3)$$

が最小になるように、 $y = ax + b$ の a, b を次式で決定する。

実際のセンサレス制御には三相電流を用い、三相電流の推定が行えているかの確認を行った。この結果を図10と図11に示す。両方共上の波形が実際の三相電流であり、下の波形が推定三相電流である。制御には三相電流センサの値を用いたので推定三相電流の歪みによる実際の電流の歪みは出ていない。図10の波形は線形補間を行っていない場合で、図11は線形補間を行った場合である。三相電圧指令値の互いの相の交点付近での推定は困難であるため、補間を行わない場合の推定電流波形には等間隔で大きな歪みが生じているが、補間を行った場合にはなくなっていることが判る。

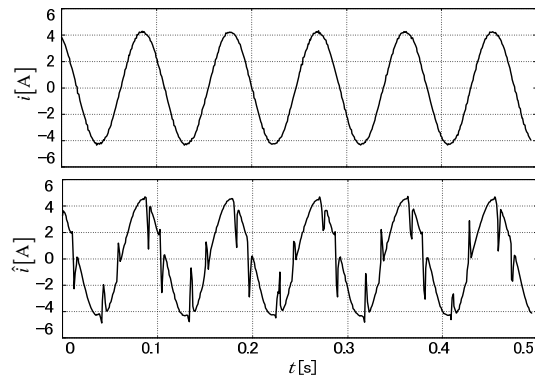


図10 推定電流の実験値 (補間なし)

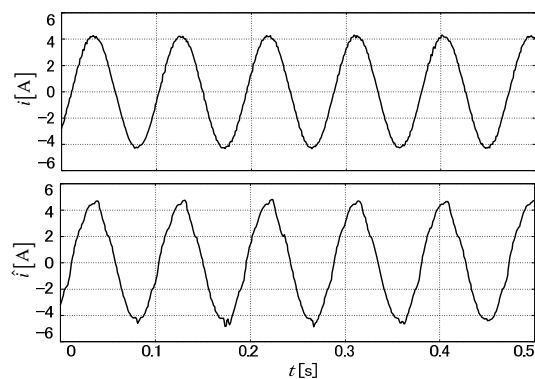


図11 推定電流の実験値 (補間あり)

図12と図13は推定電流を用いた場合の速度センサレスベクトル制御の速度応答の実験結果である。各図の上の波形が実回転速度、下の波形が推定回転速度である。補間がない場合には速度の実測値と指令値に偏差が生じているが、図13では回転速度の脈動も偏差も小さくなり、良好な速度制御が達成されていることが判る。

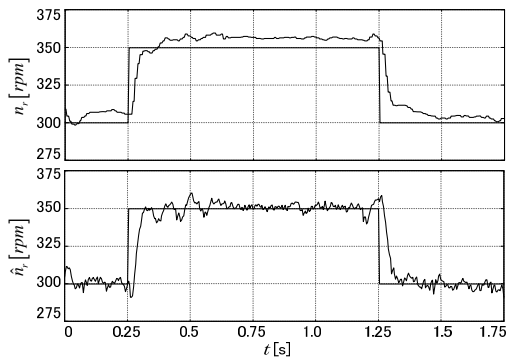


図 12 センサレスベクトル制御の実験波形 (補間なし)

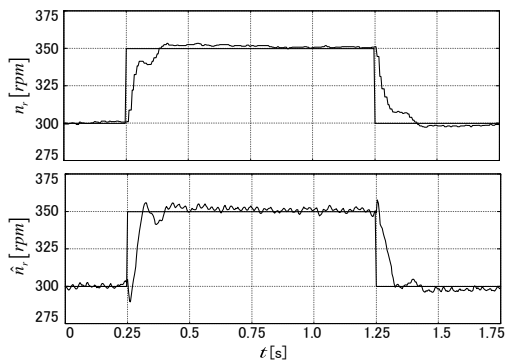


図 13 センサレスベクトル制御の実験波形 (補間あり)

(2) 同期電動機

①センサレスベクトル制御システムの考案

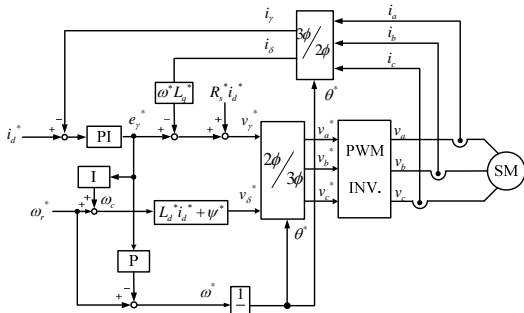


図 14 考案した IPMSM センサレス制御系

考案した IPMSM のセンサレスベクトル制御系を図 14 に示す。拡張誘起電圧方式ではオブザーバにより得られる誘起電圧を用いて速度を推定したが、本方式では d 軸電流 PI 制御の制御電圧 e_γ^* を用いて速度を推定する。 e_γ^* は次式で定まり、 d - q 軸と γ - δ 軸の軸誤差に比例する。

$$v_\gamma^* = e_\gamma^* - \omega^* L_q^* i_\delta^* + R_s^* i_d^* \quad (4)$$

従って、次式により回転角速度が推定できる。

$$\omega^* = \omega_r^* - K_{pe} e_\gamma^* \quad (5)$$

また、 e_γ^* は速度誤差に比例するので次式で δ 軸電圧を制御すれば速度制御が行える。

$$v_\delta^* = \left(L_d^* i_d^* + \psi^* \right) \left(\omega_r^* + \frac{K_{ie}}{s} e_\gamma^* \right) \quad (6)$$

図 15 は、制御ゲインをパラメータとしたときの特性方程式の根を示す。 K_{pe} を大きく選ぶと、 K_{ie} を大きく選んで速度の応答が速くできることが判る。

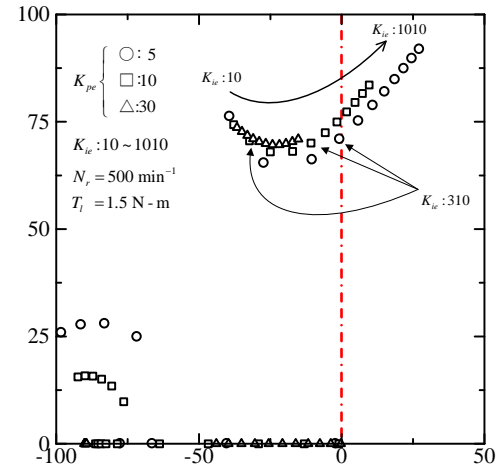


図 15 特性方程式の根軌跡

②シミュレーション解析と実験結果

図 16 に科研費で購入した同期電動機、トルクセンサ、負荷用直流発電機を示す。



図 16 購入した電動機負荷装置

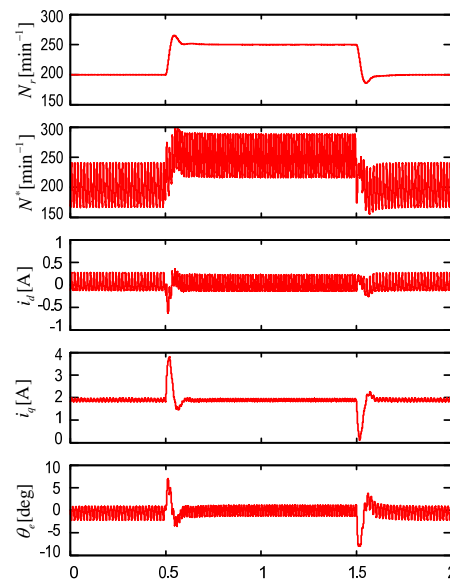


図 17 応答のシミュレーション結果

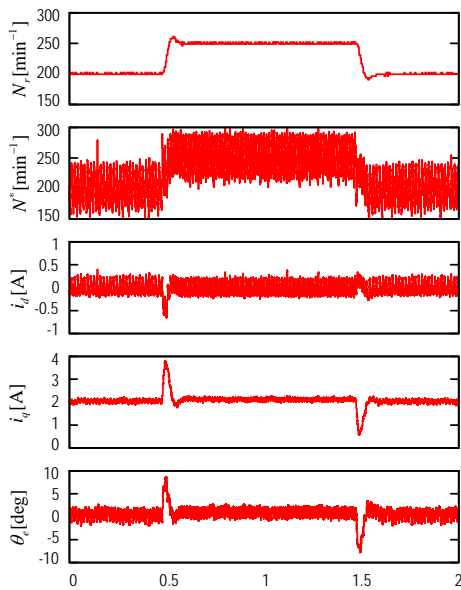


図 18 応答の実験結果

図 17 は提案方式の PWM 動作を考慮したシミュレーション結果、図 18 は同じ条件での実験結果である。波形は上から順に実速度、推定速度、 d 軸電流、 q 軸電流、磁極推定誤差である。両者は良く一致しており、理論の妥当性が確認できた。また、速度制御が良好に行われており、提案方式の有用性が検証できた。

(3) まとめ

- ・誘導電動機の簡易センサレス制御法を考案した。
- ・DC リンク電流とインバータの PWM 信号から必要な電流を推定する方法を開発し、誘導電動機センサレス制御のシミュレーションで動作を確認した。
- ・開発した制御プログラムを実験装置に組み込んで、DC リンク電流のみを利用した誘導電動機速度センサレスベクトル制御を実現した。
- ・永久磁石型同期電動機速度センサレスベクトル制御法を考案した。
- ・考案した永久磁石型同期電動機速度センサレスベクトル制御の制御プログラムを開発し、実験装置に組み込んで実機実験を行った。この結果はシミュレーション解析と良く一致し、良好な速度制御が実現できた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 2 件)

① Glanny. M. C. Mangindaan, Mineo Tsuji, Shin-ichi Hamasaki : "Transient Characteristics of a New Simplified Speed Sensorless Vector Control for Induction Motors", Proceeding of The International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), 査読有, No. IMD-0245, pp.2018-2023 (2013.10)

② Mineo Tsuji, Fujin Xu, Jun Tsuruda, Shin-ichi Hamasaki and Eiji Yamada: "A Current-Observer-Based Induction Motor Speed Sensorless Control and Use of DC Link Current", Proceeding of International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM), 査読有, Vol.1, pp.213-218 (2012.6)

〔学会発表〕(計 3 件)

① 水崎 裕, 辻 峰男, 浜崎 真一 「IPMSM センサレスベクトル制御系の安定性比較」平成 25 年電気学会産業応用部門大会, No. 3-55, Vol. 3, pp. 289-292, 2013 年 8 月 30 日, 山口大学

② 渡邊 裕之, 鶴田 純, 辻 峰男, 浜崎 真一: 「Q 軸磁束に基づく誘導電動機センサレス制御系の安定性改善」平成 25 年電気学会産業応用部門大会, No. Y-120, pp. 120 2013 年 8 月 28 日, 山口大学

③ 鶴田 純, 辻 峰男, 浜崎 真一: 「直流母線電流を利用した誘導機の速度センサレスベクトル制御」平成 24 年電気学会産業応用部門大会, No. Y-107, pp. 107, 2012 年 8 月 21 日, 千葉工業大学

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

- 出願状況 (計 0 件)
- 取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ

<http://www.eee.nagasaki-u.ac.jp/~asca/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

辻 峰男 (TSUJI, Mineo)

長崎大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：80145218

(2) 研究分担者

樋口 剛 (HIGUCHI, Tsuyoshi)

長崎大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：50156577

阿部 貴志 (ABE, Takashi)

長崎大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：30222649

浜崎 真一 (HAMASAKI, Shin-ichi)

長崎大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：80363472