

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 19 日現在

機関番号：82727

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420263

研究課題名(和文) 全ての交流モータを可変速駆動できる位置/速度センサレス制御法

研究課題名(英文) Universal Sensorless Vector Control Applicable to All Adjustable-Speed Ac Motors

研究代表者

山本 修 (Shu, Yamamoto)

独立行政法人高齢・障害・求職者雇用支援機構職業能力開発総合大学校(能力開発院、基・能力開発院・教授)

研究者番号：00648925

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：汎用インバータで駆動される全てのブラシレス交流モータに対し、共通のアルゴリズムによってパラメータ計測とセンサレス制御の双方を実現できる交流モータのセンサレスベクトル制御法を検討し、その汎用性を向上させた。特に、新しい負荷角推定のアルゴリズムの導入によって制動巻線付永久磁石同期モータへの適用を可能にした他、モータ駆動用インバータの基本機能のみで実現できるモータ電気パラメータの測定法、ならびに適正な磁束分電流指令値の決定法を開発し、それらの妥当性を実機検証にもとづいて明らかにした。

研究成果の概要(英文)：A position/speed sensorless control applicable to both parameter measurement and sensorless control for all adjustable speed ac motor drives have been studied, tentatively named Universal Sensorless Vector (USV) control. The versatility of the USV control was remarkably improved as follows. 1) A novel load angle estimation algorithm made it possible to apply the USV control to all induction and permanent magnet synchronous motors. This contributes to expanding the scope of application of the USV control. 2) A new method for tuning not only electrical motor parameters but also suitable flux-axis current command using an inverter for motor drive was shown. As a result, extra equipment required when classical parameter measurement methods are employed can be removed. The validity of the proposed method was demonstrated with experimental verification using ac motors in the laboratory.

研究分野：電気機器・パワーエレクトロニクス

キーワード：誘導モータ 永久磁石同期モータ センサレスベクトル制御 パラメータ計測

1. 研究開始当初の背景

(1) 近年の可変速交流ドライブでは、従来の誘導モータのみならず、小形で高効率な永久磁石同期モータも多用されている。また、部品点数削減と信頼性向上というニーズに応えるため、位置/速度センサを用いずに、モータの電圧・電流情報から、これらをリアルタイムで推定し、フィードバック制御に用いる技術(位置/速度センサレス制御)が多くの汎用インバータに搭載されている。

上述した駆動システムではブラシレスの交流モータ(誘導モータならびに永久磁石同期モータ)が用いられる。これらのモータの構造や回転原理は互いに異なるため、一般的にはモータ種別に応じたモータパラメータ計測と制御アルゴリズムを用いた可変速駆動が行われている。しかしながら、モータ駆動に必要なハードウェア構成は同一であるため、パラメータ計測やセンサレス制御のアルゴリズムを共通化できれば、システムの汎用性を向上できる。汎用性の向上は、モータ制御の経験が浅いユーザ(生産現場の技術者や今後需要が高まる開発途上国の技術者)に対して大きなメリットがあり、今後の可変速交流ドライブシステムの適用拡大に寄与すると考えられる。

このような背景のもと、申請者らは位置/速度センサを用いることなく、誘導モータと永久磁石同期モータに対して共通のアルゴリズムによって、パラメータ計測とセンサレスベクトル制御の双方を行える新しい制御手法(ユニバーサルセンサレスベクトル制御法と仮称、以下 USV 制御と略記)を開発してきた。この方法は、2つの静止試験(直流試験法と単相交流印加法)と原動機による無負荷回転試験を組み合わせたパラメータ計測法と、申請者らが考案した高速負荷角推定法にもとづくセンサレスベクトル制御法によって、アルゴリズムの共通化を図ったものである。USV 制御は、モータ種別に応じたセンサレスベクトル制御のように個々のモータの性能を最大限に引き出すことを指向するものではないが、簡易可変速駆動法である V/F 制御と比較して、共通のアルゴリズムという簡易性を維持しつつ、トルクを管理できるメリットを付加したものであると言える(図1参照)。

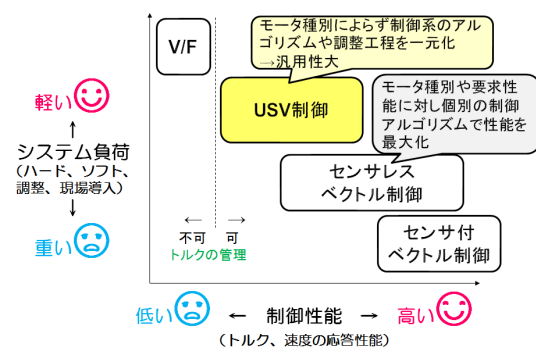


図1 USV 制御の技術的位置づけ

しかしながら、従来のセンサレスベクトル制御手法では、自己始動形の永久磁石同期モータへ適用する際、始動時に脱調する問題が生じるため、USV 制御の特長である汎用性に制限(すなわち、自己始動形の永久磁石同期モータへの適用が困難となる)が生じてしまうことが課題となっていた。

(2) 上述した USV 制御では、多くのセンサレス制御系と同様、モータパラメータを駆動前に取得しておく必要がある。しかしながら、従来のパラメータ計測手法では、高速で十分なメモリ長を有するデジタルオシロスコープや原動機による無負荷駆動システム、さらには汎用品ではない別途の電源装置が必要であったため、実用に際しての汎用性が損なわれてしまうことが課題となっていた。

2. 研究の目的

(1) 誘導モータならびにダンパレスの永久磁石同期モータ(表面磁石形および埋込磁石形)に加え、自己始動形の永久磁石同期モータにも適用可能なセンサレスベクトル制御アルゴリズムを開発することを目的とする。さらに、提案するセンサレスベクトル制御アルゴリズムで固定子磁束推定に採用している誤差補償付きの近似積分法(以下、AIEC と略記)の効果性を明らかにする。

(2) 上記に加えて、デジタルオシロスコープや原動機による無負荷駆動システム、さらには別途の電源装置を用いることなく、モータ駆動用のインバータ装置のみによって、駆動前にモータパラメータを計測できる手法を開発することを目的とする。

(3) (1) および (2) の目的を達成することで、産業界で汎用的に活用される全てのブラシレスの交流モータに対し、統一的に適用できる USV 制御法を確立する。

3. 研究の方法

(1) 自己始動形の永久磁石同期モータにも適用可能なセンサレスベクトル制御アルゴリズムに関する研究の方法を述べる。

始動時に脱調する原因を究明し、対応策を考案することで自己始動形の永久磁石同期モータへの適用を図る。具体的には、脱調前後における各制御変数の様相を注意深く観察することから、脱調の原因を特定する。自己始動可能なダンパ巻線を持つ 0.5kW の永久磁石同期モータに対するオープンループ運転では回転子磁束位相  $\theta$  (回転子位置) と角速度  $\omega$  を正しくセンサレス推定出来ることを手掛かりに考察すると、まずは、1) 回転子磁束の角速度  $\omega$  から回転子の電気角速度  $\omega_{pe}$  を演算するルーチン、もしくは、2) dq 軸の電流制御系のゲイン設計の不具合的を絞って、脱調の原因を探る。

上記の で特定した原因にもとづいて、脱調を回避できる対応策を考案する。その妥当性は、無負荷から定格トルクまでの負荷に対して、20:1 程度の速度比をセンサレスベクトル制御で実現できるか否かを実験によって確認する。

半閉スロットの回転子を有する 0.4kW のかご形誘導モータと表面磁石形の回転子を有する 0.3kW の永久磁石同期モータを供試機とし、提案するセンサレスベクトル制御アルゴリズムにおいて、AIEC を用いるととき、AIEC を用いない時の双方に対して、速度制御特性ならびにトルク制御特性を実測する。これらの結果にもとづいて、AIEC の効果性を明らかにする。

(2) モータ駆動用インバータのみで実施できるモータパラメータ計測法に関する研究の方法を述べる。

以下の条件を前提に、USV 制御に適したモータパラメータ計測法を導出する。

- 1) インバータは指令値どおりの基本波電圧成分を持つ電圧波形を出力できる。
- 2) インバータは電流センサによって線電流を測定できる。
- 3) 定格運転時の電圧、電流、トルク、周波数、回転数がモータ銘板に記載されている。
- 4) インバータ外部の計測器は一切使用しない(固定子巻線抵抗測定は除く)。

上記の で導出した手法を 2 台の供試機(全閉スロットの回転子を有する 0.4kW の誘導モータと表面磁石形の回転子を有する 0.3kW の永久磁石同期モータ)に適用し、パラメータを計測する。これらの結果の妥当性は、実負荷試験時におけるトルク制御精度の性能比較にもとづいて明らかにする。

数式モデルが単純なシンクロナスリラクタンスモータを供試機にして、インバータ駆動時の固定子巻線抵抗値をリアルタイム推定する手段を検討する。

#### 4. 研究成果

(1) 自己始動形の永久磁石同期モータにも適用可能なセンサレスベクトル制御アルゴリズムに関する研究成果を述べる。

低速オープンループ運転時の各部波形や制御変数の変化を注意深く観察することにより、脱調の原因とみられる現象を見出すことができた。

図 2 にその様相を示す。 $i_U$ 、 $\theta_1$ 、 $\theta^{\wedge}$ 、 $\delta$  は U 相線電流、固定子磁束位相、回転子磁束位相(すなわち回転子位置)、負荷角推定値である。なお、図 2 の状態からセンサレス制御に切り替えても必ず脱調してしまう。

図 2 から次の事項が確認される。1)  $\theta_1$  は正しく推定できている。2) しかし、 $\theta_1$  から  $\delta$  を差し引く事(後述する図 3 の  $\theta^{\wedge}$  推定アルゴリズム参照)で演算される図 2 の  $\theta^{\wedge}$  には、 $\delta$  に誤差として重畳されている振動成分がそのまま重畳されている。3) このことから、 $\delta$  に

誤差として重畳される振動成分が脱調の原因になっていると考えられる。

この振動成分は、誘導モータやダンパレスの永久磁石同期モータでは観測されていない。自己始動のためのダンパ巻線を有する永久磁石同期モータに対してのみこの振動成分が発生する。この理由は、アルゴリズムの共通化を図るうえで、永久磁石同期モータにおいては理論上回転子回路のダイナミクスが無いものと見なして  $\theta^{\wedge}$  推定アルゴリズム(後述する図 3 参照)を導出していることに起因すると考えられる。

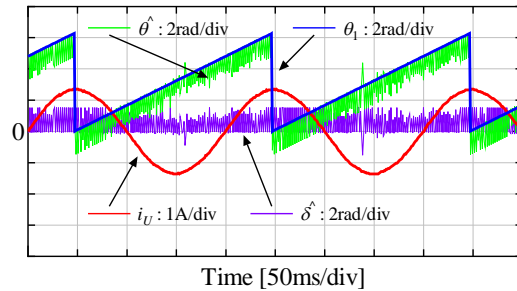


図 2 改良前の低速オープンループ運転

上述した における考察から、最も簡単な方法として、ローパスフィルタ(以下、LPF と略記)によって  $\delta$  の推定誤差となっている振動成分を除去することが直ちに考えられる。図 3 は、負荷角推定値の出力段に LPF (太線部) を挿入したセンサレス回転子位置推定器である。図 4 は、図 3 を用いて低速オープンループ運転を行った結果である。 $\theta^{\wedge}$  が正しく推定されている様相が確認される。このままセンサレス制御に切り替えても脱調することがなくなった。

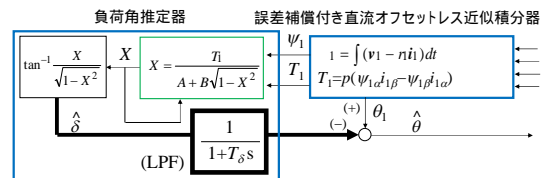


図 3 改良型センサレス回転子位置推定器

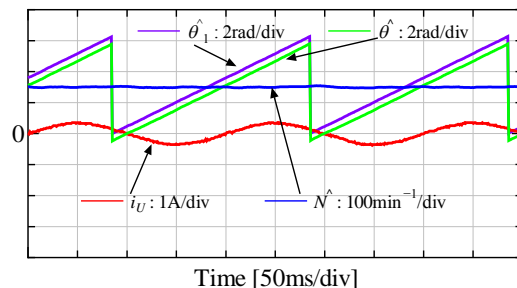
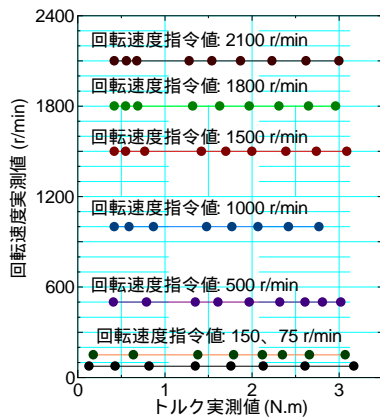


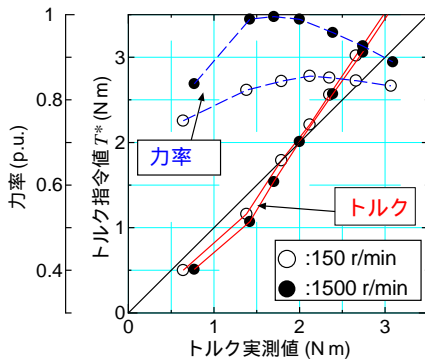
図 4 改良後の低速オープンループ運転

図 5 は、実負荷定常運転の実測特性である。励磁分電流指令値は、全速度全負荷範囲を一定値でカバーできる適正值として -2.5A を選定した。図 5(a) は速度制御特性である。20:1 程度の速度比で定格トルク付近までの運転

をカバーできていることが確認される。図5(b)はトルク制御特性である。トルク制御の線形性の向上は今後の課題であるが、高力率を維持するように磁束電流指令値を可変すれば比較的トルク精度が高い傾向になることは容易に確認される。



(a) 速度制御特性



(b) トルク制御特性

図5 実負荷定常運転特性

図3の誤差補償付き直流オフセットレス近似積分器(AIEC)は、申請者らが低速時の特性改善を狙って考案したものであり、図6に示す内部構造を持つ。

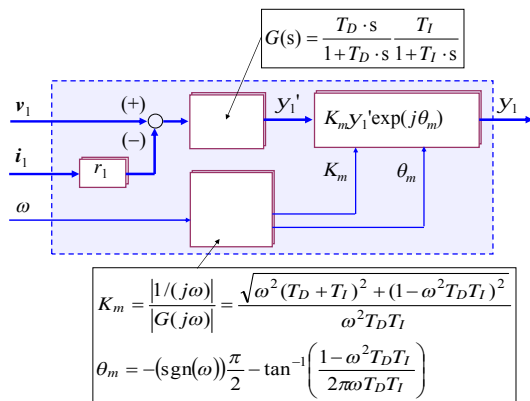
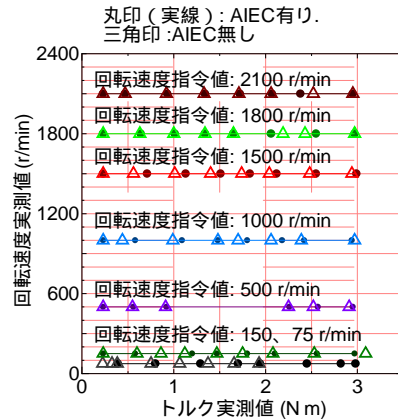


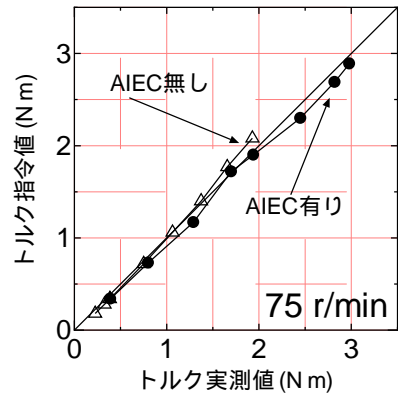
図6 近似積分器の内部構造

図7は、永久磁石同期モータ駆動におけるAIECによる特性改善効果を検証した結果を示す。低速(75 r/min)時における負荷範囲の拡大に大きく寄与していることが確認される。

なお、誘導モータにおいては、低速時の負荷範囲の拡大の他、トルク制御性の向上に寄与することを実験によって確認していることを付記する。



(a) 速度制御特性



(b) トルク制御特性

図7 実負荷特性(永久磁石同期モータ)

(2) モータ駆動用インバータのみで実施できるモータパラメータ計測法に関する研究の成果を述べる。

申請者らは、インバータが持つ基本計測機能と定格銘板値のみの利用によって制御に必要なモータパラメータを計測することを狙い、次の6つのチューニングパラメータ(突極比  $k_{sal}$ 、回転子巻線に鎖交しない直軸インダクタンス  $l_d$ 、誘導モータフラグ  $k_{im}$ 、永久磁石同期モータフラグ  $k_{pm}$ 、トルクゲイン  $T_{gain}$ 、スリップゲイン  $S_{gain}$ )を用いてモータパラメータを表し、以下のチューニングプロセスによって、モータパラメータを計測する手法を考案した。以下に、この方法を述べる。

$$L_d = l_d + k_{im} T_{gain} \quad (1)$$

$$L_q = L_d + k_{pm} (k_{sal} - 1) L_d \quad (2)$$

$$m' = k_{im} T_{gain} \quad (3)$$

$$r_2' = k_{im} S_{gain} \quad (4)$$

$$K_e = k_{pm} T_{gain} \quad (5)$$

1) 誘導モータフラグ  $k_{im}$  および永久磁石同期モータフラグ  $k_{pm}$  の決定

一般に定格銘板値として回転速度  $N_n$  [r/min]、極対数  $p$ 、周波数  $f_n$  [Hz] が明らかであるため、直ちに、 $N_n = 60f_n/p$  であれば  $k_{im}=1$  かつ  $k_{pm}=0$ 、 $N_n = 60f_n/p$  であれば  $k_{im}=0$  かつ  $k_{pm}=1$  とする。

前者は誘導モータ、後者は永久磁石同期モータの物理像を持つこと意味する。

2) 突極比  $k_{sal}$  の決定

静止時の  $\alpha$  軸と  $\beta$  軸に対して個別に低圧単相交流を印加して、 $\alpha$  軸と  $\beta$  軸の電流応答の振幅 ( $I_{cpeak}$  および  $I_{\beta peak}$ ) を測定し、その振幅比を  $k_{sal}$  ( $I_{cpeak} / I_{\beta peak}$ ) として与える。

3) 回転子の巻線に鎖交しない d 軸のインダクタンス  $l_d$  の決定

上記 2) の  $\alpha$  軸に対する試験時における電圧振幅 ( $V_{cpeak}$ )、電流振幅 ( $I_{cpeak}$ )、位相差  $\theta$  から求まるインダクタンス値を  $l_d$  として与える。同様に横軸のインダクタンスを直接測定することも可能であるが、これについては既に求めた  $l_d$  と  $k_{sal}$  から (2) 式を用いる。この理由は、ロータの微振動が発生した状態での測定を避けるためである。

4) 励磁分電流  $i_{1m}$ 、

トルクゲイン  $T_{gain}$ 、トルクスリップゲイン  $S_{gain}$  の決定 供試機を実負荷運転したときの特性が、定格銘板等から得られる所定の負荷運転時におけるトルク  $T_n$ 、電圧  $V_n$ 、電流  $I_n$ 、回転数  $N_n$ 、周波数  $f_n$  と一致するように次の手順で調整する。

4a) 定格銘板値から、励磁分電流  $i_{1m}$ 、 $T_{gain}$ 、 $S_{gain}$  の初期値は次式により与える。

$$i_{1m} = (\sqrt{3}k_{im}I_n) / 2 \quad (6)$$

$$i_{1t} = \sqrt{3I_n^2 - i_{1m}^2} \quad (7)$$

$$T_{gain} = \frac{T_n + p l_d (k_{sal} - 1) k_{pm} i_{1m} i_{1t}}{p (k_{pm} + k_{im} i_{1m} i_{1t})} \quad (8)$$

$$\omega_{se} = 2\pi (f_n - N_n (p / 60)) \quad (9)$$

$$S_{gain} = \frac{\omega_{se} + T_{gain} i_{1m}}{i_{1t}} \quad (10)$$

ここに、(6) 式の  $i_{1m}$  は、誘導モータにおいては定格電流の半分程度、永久磁石同期モータでは零が与えられることに帰着する。(8) 式は、電流とチューニングパラメータでトルク式を表現し、これを  $T_{gain}$  に関する方程式と見なして求解することで導出している。(10) 式は、滑り角周波数  $\omega_{se}$  が次式で表されることから導出している。

$$\omega_{se} = \frac{r_2' i_{1t}}{m' i_{1m}} = \frac{k_{im} S_{gain} i_{1t}}{k_{im} T_{gain} i_{1m}} \quad (11)$$

4b) 供試機を起動後、回転数指令値を  $N_n$  に設定してから、 $\sqrt{i_{1m}^2 + i_{1t}^2} / \sqrt{3}$  が  $I_n$  と一致するように負荷の大きさを調整するとともに、 $\sqrt{v_{1m}^2 + v_{1t}^2}$  が  $V_n$  と一致するよう  $i_{1m}$  を調整する。

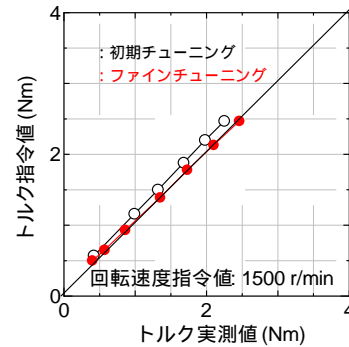
4c)  $T_e^*$  が  $T_n$  と一致するよう  $T_{gain}$  を調整する。

4d) 電源の周波数  $\hat{\omega} / 2\pi$  が  $f_n$  と一致するよう  $S_{gain}$  を調整する。

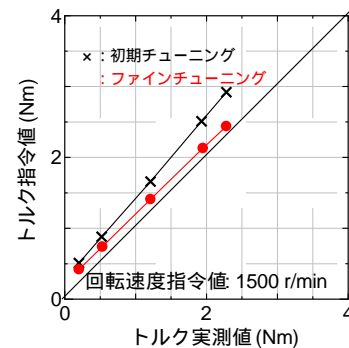
上記の計測プロセスにおいて、モータを回転させない静止試験のみのよってモータパラメータを得る 1) ~ 4a) までを「初期チューニング」と呼び、その後実負荷運転を行って微調整を行う 4b) ~ 4d) のプロセスを「ファ

インチューニング」と呼ぶことにする。

図 8 は、誘導モータと永久磁石同期モータの各々に対して、初期チューニングとファインチューニングを行い、各々のチューニング段階でのモータパラメータを用いてセンサレスベクトル制御を行い、トルク制御精度を比較した結果である。初期チューニングの段階でも定格付近までのトルクの線形性が確保されていることから、提案法の採用によって、従来必要とされていた高価な外部機器を用いることなく、インバータと銘板情報のみによって、モータ駆動前に、妥当なモータパラメータ値を計測できたことが確認される。また、必要に応じてファインチューニングを行うことによって、トルク制御精度の改善を図れることも確認される。



(a) 誘導モータ



(b) 永久磁石同期モータ

図 8 トルク制御特性

提案する USV 制御では、固定子磁束の推定に固定子抵抗の値を用いる。このため、温度に依存して変化する性質を有する固定子抵抗の値はリアルタイムに同定できることが好ましい。

申請者らは、USV 制御系における固定子抵抗のリアルタイム推定の基礎検討として、回転子回路が簡単なシンクロナスリラクタンスモータを対象に、インダクタンス推定誤差に基づくリアルタイム固定子抵抗推定器 (図 9 参照) を既に考案している。今般、インバータ駆動シンクロナスリラクタンスモータのベクトル制御系 (ただし、基礎特性検証のため位置 / 速度センサ付) に対して、図 9 の固定子抵抗推定器を実装し、固定子抵抗のリアルタイム推定の実機検証を行った。

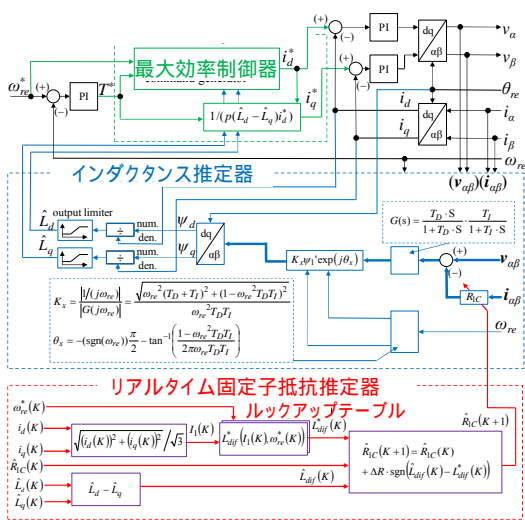


図9 リアルタイム固定子抵抗推定器

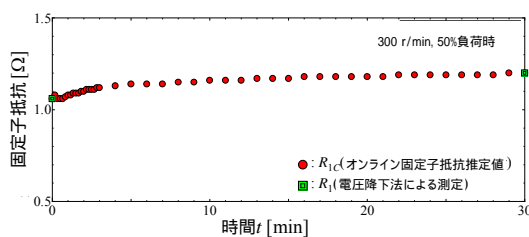


図10 リアルタイム固定子抵抗推定結果

図10はその結果である。モータの回転速度は300r/min一定に制御した状態で、定格50%程度の負荷を取り、モータが冷状態から熱状態になるまで連続負荷運転試験を行う。提案する手法で固定子抵抗のリアルタイム推定器を行う一方で、負荷運転の開始直前と終了直後の固定子巻線抵抗を素早く実測する。これらの推定値と実測値とを比較することから、本方法の妥当性を検証している。図10において推定値と実測値は同じ傾向を示しており、提案法は、物理的に正しい固定子抵抗値を推定出来ること確認した。

### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計1件)

山本 修、平原 英明、田中 晃、荒 隆裕、松瀬 貢規、Universal Sensorless Vector Control of Induction and Permanent Magnet Synchronous Motors Considering Equivalent Iron Loss Resistance、査読有、IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS、51巻、2016、1259-1267  
DOI:10.1109/TIA.2014.2360962

〔学会発表〕(計8件)

江藤 亮汰郎、平原 英明、田中 晃、山本 修、荒 隆裕、インバータ駆動シンクロナスリラクタンスモータの最大効率制御系におけるオンライン固定子抵抗

推定法、電気学会産業応用部門大会、2017年8月29日~2017年8月31日、函館アリーナ(北海道函館市)

山本 修、平原 英明、田中 晃、荒 隆裕、A PWM-Inverter-Based parameter Tuning Method for Universal Sensorless Vector Control of Induction and Permanent Magnet Synchronous Motors、IEEE/ICEMS 2016、2016年11月13日~2016年11月16日、アパホテル&リゾート東京ベイ(千葉県千葉市)  
山本 修、平原 英明、田中 晃、荒 隆裕、Universal Sensorless Vector Control Applicable to Line-Start Permanent Magnet Synchronous Motors with Damper Winding、IEEE/ECCE 2016、2016年9月18日~2016年9月22日、ウインズコンシン州ミルウォーキー(アメリカ合衆国)

HEN Pisihkun、平原 英明、田中 晃、山本 修、荒 隆裕、制動巻線付き永久磁石同期モータに対するユニバーサルセンサレスベクトル制御の適用、2015年3月24日~2015年3月26日、東京都市大学世田谷キャンパス(東京都世田谷区)

〔その他〕

ホームページ

<http://www.uitec.jeed.or.jp/schoolguide/teacher/00041.html>

### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

山本 修 (YAMAMOTO Shu)

独立行政法人高年齢・障害・求職者雇用支援機構職業能力開発総合大学校(能力開発院、基盤整備センター)・能力開発院・教授  
研究代表者番号: 00648925

(2) 研究分担者

平原 英明 (HIRAHARA Hideaki)

独立行政法人高年齢・障害・求職者雇用支援機構職業能力開発総合大学校(能力開発院、基盤整備センター)・能力開発院・助教  
研究者番号: 50649209

田中 晃 (TANAKA Akira)

独立行政法人高年齢・障害・求職者雇用支援機構職業能力開発総合大学校(能力開発院、基盤整備センター)・能力開発院・准教授  
研究者番号: 30648952

荒 隆裕 (ARA Takahiro)

独立行政法人高年齢・障害・求職者雇用支援機構職業能力開発総合大学校(能力開発院、基盤整備センター)・能力開発院・教授  
研究者番号: 40648896