

令和 4 年 6 月 29 日現在

機関番号：82727

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04342

研究課題名（和文）トルク検出器を用いない交流電動機の高精度トルク推定法

研究課題名（英文）High-Precision Torque Estimation of AC Machines without Torque Detector

研究代表者

山本 修（YAMAMOTO, Shu）

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、基盤整備センター）・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） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：鉄損、機械損、漂遊負荷損を考慮した三相交流電動機の高精度なトルク推定法を開発した。この方法は、正弦波のみならず、方形波やパルス幅変調（PWM）で駆動される三相交流電動機に適用できることを実験によって明らかにした。誘導電動機のみならず、永久磁石同期電動機、シンクロナスリラクタンスモータへの適用も可能である。誘導電動機に対しては、一般的な手段である仮定値に依らず個別の電動機の特徴を反映できる漂遊負荷損推定法を示した。さらに、ベクトル制御シンクロナスリラクタンスモータにたいして、オンライントルク推定の高精度化に必要な固定子抵抗のリアルタイム推定法を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

提案するトルク推定法は、全ての電動機損失を合理的に正しく考慮でき、本質的に過渡トルクの推定が可能であるという学術的意義を有している。誘導電動機や同期電動機を包含する各種三相交流電動機に対して、ほとんど同一の演算アルゴリズムでトルクの推定が可能である点も学術的特長である。トルク検出器の取り付けが困難な場合や、モータユーザに納品されて稼働中の三相交流電動機に対して、電圧と電流の計測情報から高精度なトルクモニタリングを具現できるようになる社会的意義を有している。

研究成果の概要（英文）： We have developed a highly accurate torque estimation method for three-phase AC motors considering iron, mechanical, and stray load losses. Experiments have shown that this method can be applied not only to sine-wave drive, but also to square-wave and pulse width modulation (PWM) drives. The proposed method can be applied not only to induction motors but also to permanent magnet synchronous motors and synchronous reluctance motors. For induction motors, we have shown a stray load loss estimation method that can reflect the characteristics of individual motors. Furthermore, we proposed a real-time estimation method for stator resistance to improve the accuracy of online torque estimation. The validity was clarified based on an example for a synchronous reluctance motor.

研究分野：電気機器

キーワード：電気機器 トルク 損失 インバータ 誘導電動機 同期機 漂遊負荷損 固定子抵抗

1. 研究開始当初の背景

トルク検出器は、運転中の電動機のトルクや効率を正しく測定する際に利用される測定器である。価格が高価であり使用法とメンテナンスに注意を要する上、高速電動機や負荷システムにビルトインされた電動機に対してはトルク検出器を取り付ける事が物理的に困難となる欠点がある。トルク検出器を用いることなく運転時のトルクを高精度に推定できるようになれば、トルク検出器の取り付けが困難な場合のトルク計測に有効な手段を与える他、メーカーとユーザの双方の工場現場におけるコスト、人手、作業時間の低減に寄与するため、国内外の産業界への波及効果は大きい。

交流電動機のトルクは、固定子鎖交磁束と固定子電流の外積によって求める手法が知られており、交流電動機の位置センサレス制御に広く活用されている。この方法は演算が容易な特長を持つ反面、固定子鎖交磁束の演算に積分を伴うため低速時駆動時にはドリフトや初期値の誤差が原因となり演算が不安定になる問題や、低速回転で端子電圧が相対的に低くなり固定子抵抗の誤差が固定子鎖交磁束の演算に影響する問題が指摘されてきた。

このような背景のもと、代表者らは、固定子鎖交磁束と固定子電流の外積演算の新規な手法を検討してきた。直近では、誤差補償機構を有するオフセットレス近似積分器によって積分に伴う不安定化と精度劣化を理論上完全に排除し、鉄損の影響を考慮することで、一次磁束鎖交数ならびにトルクの演算精度を高める方法を提案している。この手法がトルク検出器を用いることができないときの代替法として活用されるためには、トルク検出器と同等の精度(トルク検出器の測定値を基準にして誤差率 1.0%以下)で運転中の交流電動機のトルクを推定できることが望まれる。

2. 研究の目的

交流電動機全般を対象とし、トルク検出器を用いずに電圧と電流の情報から負荷運転時のトルクを高精度にオンラインで推定するために、以下の手法を確立させることを目的とする。

- ・インバータ駆動誘導電動機を対象として漂遊負荷損の合理的な考慮法を試案し、トルク推定精度の向上に寄与する方法を明らかにする。
- ・提案するトルク推定法に適した固定子抵抗変動の補償法を開発し、固定子抵抗変動時のトルク推定精度を向上させる手法を明らかにする。
- ・高速電動機や、推力脈動を有するリニアモータなど、特殊環境下の電動機に対する提案法の適用方法を明らかにする。

3. 研究の方法

(1) インバータ駆動誘導電動機のトルク推定精度の向上に関する研究の方法

①電動機の損失分析 インバータ駆動誘導電動機は、方形波やパルス幅変調(PWM)されたパルス列状のひずみ波電圧が印加されて駆動される。このひずみ波電圧には、その主たる正弦波周波数成分である基本波以外の成分(すなわち時間高調波成分)を含んでいる。よって、インバータ駆動誘導電動機に対するトルク推定精度を向上させるには、この高調波成分の影響を含めて、どの損失がトルクの推定精度を劣化させているのかを明確にする必要がある。これを明確にするために、図1の回路を構成して次の1)~4)の手順で供試機(0.358kW, 167V, 1.93A, 4極, 50Hz)に対する実験を行い、実測された電動機損失分布と、銅損のみを考慮した一般的な誘導電動機の回路モデルに基づくトルク推定演算(図2)の過程で計算される電動機損失分布とを比較する。

- 1) 無負荷試験を実施して機械損 W_m を測定するとともに、 v_{uv} , v_{vw} , i_u , i_w (定格無負荷時における電動機端子間の電圧と電流の波形) をトルク推定用に測定する
- 2) 1)の後に固定子抵抗 r_1 を測定し、損失分布の実測値と推定値を比較する。
- 3) 負荷試験を実施する(負荷レベル: 25~125%、電圧波形: 正弦波、方形波、PWM)。
- 4) 3)の結果から、負荷時における損失分布の実測値と推定値を比較する。

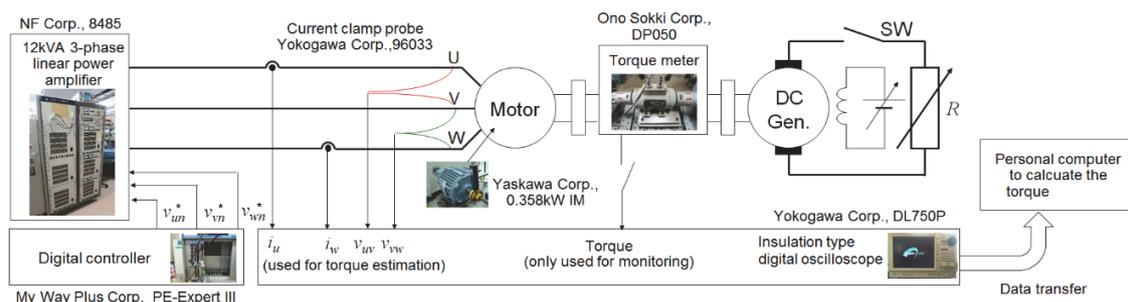


図1 実験回路

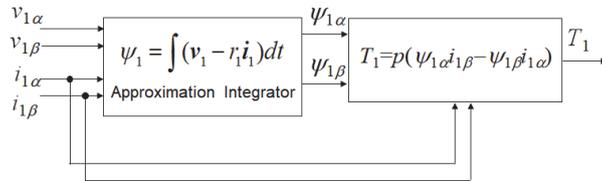


図2 銅損のみを考慮した一般的な誘導電動機の回路モデルに基づくトルク推定アルゴリズム

②損失分析に基づくトルク推定アルゴリズム 上記(1)の①の損失分析によって判明するトルク推定誤差の様相を踏まえて、鉄損、機械損、漂遊負荷損に分類される全ての損失要素を考慮したトルク推定アルゴリズムを考案する。

③百分率漂遊負荷損の決定法 上記(1)の②のトルク推定アルゴリズムにおいて、仮定値[引用文献①]に依らず個別の誘導電動機の特性を反映できる合理的な百分率漂遊負荷損の決定法を考案し、その効果性を実機検証する。

(2) 誘導電動機以外の三相交流電動機への適用に関する研究の方法

①オープンループ駆動の永久磁石同期電動機への適用 上記(1)の②で考案したトルク推定アルゴリズムを始動巻線付き突極形永久磁石同期電動機 (0.5kW-200V-4極-50Hz) に適用する。供試機を図1の実験回路に設置して、方形波インバータ駆動時における電動機端子間電圧と電流の計測データから平均トルクの推定値を計算する。これらと並行して、トルク検出器によるトルク実測値を取得して計算値と比較することから、提案法によって求めたトルク推定値がどの程度実測値に近い値を計算できるのかを検証する。

②フィードバック制御駆動のシンクロナスリラクタンスマータへの適用 上記(1)の②で考案したトルク推定アルゴリズムをベクトル制御シンクロナスリラクタンスマータ (1.1kW-4極-2200min⁻¹ (最大値)、永久磁石無し、始動巻線無し) に適用する。上記(2)の①と同様のプロセスで、キャリア周波数 10kHz のPWMインバータ駆動時におけるトルクの推定値と実測値を比較して、提案法がどの程度実測値に近い値を計算できるのかを検証する。

(3) 可変速駆動への適用に関する研究の方法

上記(1)の②のトルク推定アルゴリズムは、電源の基本波周波数が未知である場合や磁束レベルが変化して運転される場合に対応していない。そこで、これらに対応できるトルク推定アルゴリズムを考案し、インバータ駆動誘導電動機に対する実施例に基づいてその妥当性を検証する。

(4) トルク推定のオンライン化に関する研究の方法

①トルク推定に利用する電動機パラメータの変動がトルク推定に及ぼす影響の検討 上記(1)で用いた誘導電動機を供試機として、トルク推定に利用する電動機パラメータ (固定子抵抗 r_1 、鉄損抵抗 r_c 、機械損によるトルク減少分 T_{mn}) の変動がトルク推定に及ぼす影響を調べる。具体的には、意図的に真値と異なるパラメータ値を与えてトルク推定を行い、真値を用いたときのトルク推定値との差異を評価する。

②固定子抵抗のオンライン推定法の検討 上記(4)の①の検討の中で、電動機運転中の機内の温度変化に依存して変動する性質を有する固定子抵抗を運転中の電圧と電流の情報からリアルタイムで推定することがオンライントルク推定の高精度化に寄与すると考えられる。そこで、ベクトル制御シンクロナスリラクタンスマータに対して、提案するトルク推定で利用している固定子鎖交磁束演算に基づいて固定子抵抗を推定する方法を適用し、固定抵抗のリアルタイム推定精度を実験検証する。

4. 研究成果

(1) インバータ駆動誘導電動機のトルク推定精度の向上に関する研究成果

①電動機の損失分析 損失分析の結果から、以下の知見が明らかになった。

- ・図2で演算されるトルク推定値には、基本波鉄損、機械損および漂遊負荷損によるトルクの減少分が誤差として含まれてしまう。

- ・ひずみ波電圧 (方形波やPWM) の高調波成分は平均トルクの推定値に影響を及ぼさない。

②損失分析に基づくトルク推定法 前述の知見から3つの損失 (基本波鉄損、機械損、漂遊負荷損) を精度よく差し引く新規なトルク推定アルゴリズム (図3) を導出した。

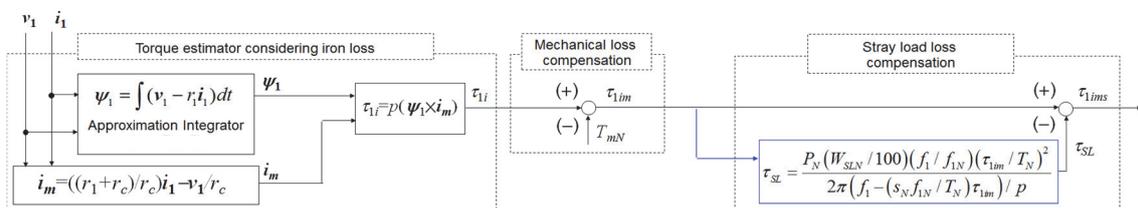


図3 鉄損、機械損および漂遊負荷損を考慮したトルク推定アルゴリズム

図3の第1ブロックでは鉄損を考慮した誘導電動機の回路モデルに基づいて、鉄損によるトルクの減少分を考慮したトルク τ_i を出力する。第2ブロックでは、さらに機械損によるトルクの減少分を考慮したトルク τ_{im} を出力する。第3ブロックでは、さらに漂遊負荷損によるトルクの減少分を考慮したトルク τ_{ims} を最終的なトルク推定値として出力する。なお、第1ブロックと第2ブロックのパラメータ（等価鉄損抵抗 r_c と機械損分トルク T_{mN} ）は各運転周波数 f_1 における事前の無負荷試験データから一義的に決定可能である。定格出力 P_N 、定格角周波数 f_{1N} 、定格トルク T_N 、定格滑り s_N 、極対数 p は銘板値から取得可能である。

③百分率漂遊負荷損の決定法 トルクと回転子電流の線形性を利用する手法を考案した。トルク推定値 T_{1ims} （任意の W_{SLN} を与えて図3のアルゴリズムで推定）一回転子電流 I_2 特性の傾きの最大偏差 $\Delta\theta_{slope}$ （図4）に着眼し、過大でも過小でもない W_{SLN} を与えて $T_{1ims}-I_2$ 特性を描けば $\Delta\theta_{slope}$ は最小になる性質を利用し、間接的にトルク推定に必要な正しい W_{SLN} を決定する。

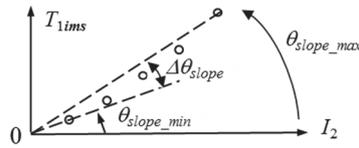


図4 トルク平均値 T_{1ims} 一回転子電流 I_2 特性の傾きの最大偏差 $\Delta\theta_{slope}$ に着眼した W_{SLN} 決定法

定格運転角周波数に対する各負荷時（負荷レベル：25, 50, 75, 100, 125%）のトルク推定誤差率の平均値は、正弦波駆動時で0.2%、方形波駆動時で0.4%、PWM駆動時で0.5%であり、望まれる誤差率（1.0%以下）が達成された。

(2) 誘導電動機以外の三相交流電動機への適用に関する研究成果

図5と図6は、永久磁石同期電動機とシンクロナスリラクタンスモータに対してトルク推定を行った結果である。提案法によって鉄損・機械損・漂遊負荷損を考慮したトルク推定値は、負荷の大きさによらずトルク実測値に対する精度が高いことが確認された。

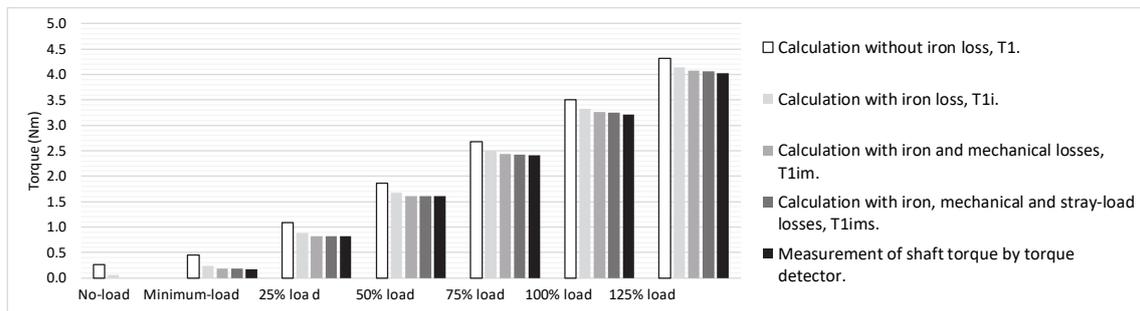


図5 永久磁石同期電動機のトルクの推定値と実測値の比較（200V/50Hz時）

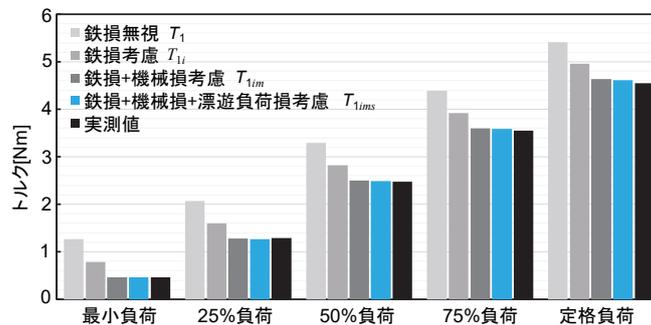


図6 シンクロナスリラクタンスモータのトルクの推定値と実測値の比較（回転速度：300min⁻¹、励磁分電流：定格値一定）

(3) 可変速駆動への適用に関する研究成果

改良型のトルク推定アルゴリズム（図7）を考案した。漂遊負荷損によるトルクの減少分 τ_{SL} を求める計算式を見直したことが改良のポイントである。 τ_{SL} の分子の式は漂遊負荷損を求めている。漂遊負荷損は運転周波数に比例し、トルク分電流 (i_{mq}) の二乗に比例するものとして立式することで、磁束レベル変動への対応を図った。 τ_{SL} の分母は回転子角速度である。既に演算されている固定子鎖交磁束ベクトルと T-I 形等価回路定数（固定子自己インダクタンス L_1 、励磁インダクタンス m' 、回転子抵抗 r_2' ）を用いて、固定子と回転子の磁束鎖交ベクトルの位相差 δ を求

めることから、回転速度計を用いることなく回転速度を推定する機構を付加した。

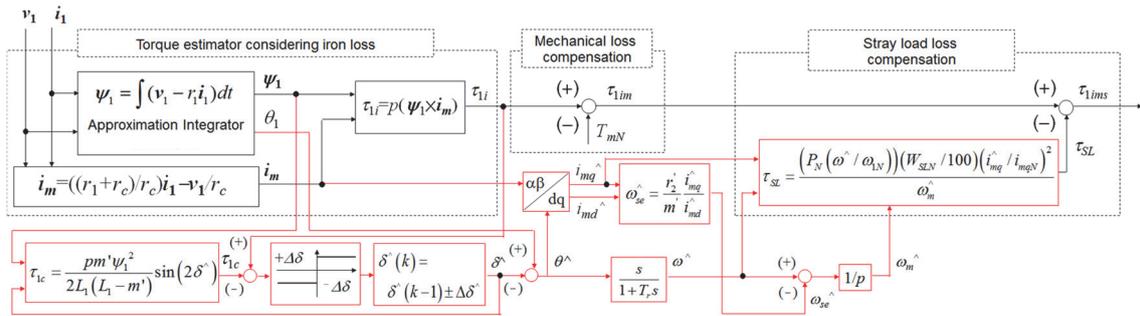


図7 改良型のトルク推定アルゴリズム

前出の供試機（インバータ駆動誘導電動機）に対して図3と図7のトルク推定アルゴリズムを適用してトルク推定精度を比較した結果、次の知見を得た。

- ・磁束レベルが定格値一定の運転条件下では、両者のトルク推定精度に差異は見られない。
- ・磁束レベルが変化する運転条件下（特に低速・高負荷・低磁束レベル）では、図7のトルク推定精度は図3よりも優れる。

(4) トルク推定のオンライン化に関する研究成果

①トルク推定に利用する電動機パラメータの変動がトルク推定に及ぼす影響 3つのパラメータのうち、トルク推定精度への影響度が最も高いのは固定子抵抗 r_1 の変動であった。図8は、各運転周波数における r_1 の設定値を真値に対して変えたときにおけるトルク推定値 T_{1ims} の誤差率を求めた結果である。低速時ほど r_1 の変動を考慮する必要のあることが確認される。

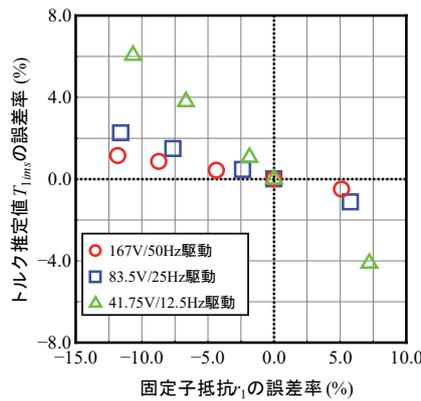


図8 固定子抵抗の変動がトルク推定に及ぼす影響（定格トルク時）

②固定子抵抗のオンライン推定法 回転子鎖交磁束ベクトル位相を基準（dq 軸）とするベクトル制御下において、固定子抵抗の変動は、固定子鎖交磁束演算から得られる d 軸と q 軸のインダクタンス差 ($L_d - L_q$) の推定値への影響度が高い。一方、最大効率を具現する最適固定子電流ベクトルの大きさ (I_1) の演算には影響を及ぼさない。この性質に着目し、誤差を有するインダクタンス差の推定値 (\hat{L}_{dif}) が、 I_1 から得られる正しいインダクタンス差 (L_{dif}^*) に一致するようにコントローラ内の固定子抵抗の設定値 (R_{1c}) を自動調整することによって、 R_{1c} を真値に収斂させる手法を考案した（図9）。

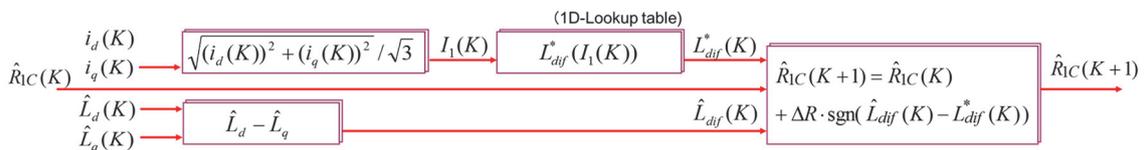


図9 固定子鎖交磁束演算に基づくインダクタンス差の推定値を利用した固定子抵抗推定法

電流に対するインダクタンス変動を有するシンクロナスリラクタンスモータに対して図9を適用した結果、低速 (300min^{-1})・50%負荷時において、冷状態から熱状態に変化した固定子抵抗値を5%未満の精度でトルクが推定されることを確認した。

<引用文献>

- ① “IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators,” 112-2017, 2017.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Shu Yamamoto, Hideaki Hirahara, Balapuwaduge Amith Shantha Gunasekara, Masayuki Motosugi	4. 巻 57
2. 論文標題 Stator-Flux-Linkage-Calculation-Based Torque Estimation of Induction Motors Considering Iron, Mechanical, and Stray-Load Losses	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Industry Applications	6. 最初と最後の頁 5916, 5926
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TIA.2021.3110498	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Shu Yamamoto, Hideaki Hirahara, Masayuki Motosugi
2. 発表標題 Torque Estimation of a Variable Speed Induction Motor Without Torque and Rotational Speed Meters
3. 学会等名 The 2022 International Power Electronics Conference, IPEC-Himeji 2022 -ECCE Asia-（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 本杉 雅行, 平原 英明, 山本 修
2. 発表標題 電圧と電流の計測に基づくPWM インバータ駆動誘導電動機のトルク推定法における時間高調波に起因した損失の影響
3. 学会等名 職業大フォーラム2021 職業能力開発研究発表講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 本杉 雅行, 平原 英明, 山本 修
2. 発表標題 PWMインバータ駆動可変速誘導電動機のトルク推定法
3. 学会等名 電気学会回転機研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 本杉 雅行, 平原 英明, 山本 修
2. 発表標題 電圧と電流の計測に基づくPWMインバータ駆動誘導電動機のトルク推定法
3. 学会等名 令和3年電気学会産業応用部門大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 本杉 雅行, 平原 英明, 山本 修
2. 発表標題 誘導電動機の漂遊負荷損を考慮した電圧と電流の計測に基づくトルク推定法の検討
3. 学会等名 令和3年電気学会全国大会講演論文集
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 本杉 雅行, 平原 英明, 山本 修
2. 発表標題 電圧と電流の計測に基づく誘導電動機のトルク推定における固定子抵抗変動の影響
3. 学会等名 職業大フォーラム2020 職業能力開発研究発表講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 YAMAMOTO Shu, HIRAHARA Hideaki, ETO Ryotaro
2. 発表標題 On-Line Stator Resistance Estimation of Vector-Controlled Synchronous Reluctance Motors Using Inductance Information
3. 学会等名 2020 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 パラブワドゥゲ アミス シャーンタ グナセカラ, 平原 英明, 山本 修
2. 発表標題 固定子磁束鎖交数演算に基づく瞬時トルク推定による誘導電動機の固定子ターン間短絡故障検出法の検討
3. 学会等名 電気学会回転機研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shu Yamamoto, Hideaki Hirahara and Balapuwaduge Amith Shantha Gunasekara
2. 発表標題 A Method to Estimate Torque and Stray Load Loss of Induction Motor without Torque Detector
3. 学会等名 2019 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 パラブワドゥゲ アミス シャーンタ グナセカラ, 平原 英明, 山本 修
2. 発表標題 固定子磁束鎖交数演算に基づくトルク推定による誘導電動機の固定子ターン間短絡故障検出の検討
3. 学会等名 令和元年電気学会産業応用部門大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	平原 英明 (HIRAHARA Hideaki) (50649209)	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、基盤整備センター)・能力開発院・准教授 (82727)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------