

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 22 日現在

機関番号：82727

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420278

研究課題名(和文)小容量の直流電源を用いた大容量回転機の新特性算定試験法

研究課題名(英文) A New Testing Method to Calculate the Performance of Large-Capacity Electric Machines Using a Small-Capacity DC Power Source

研究代表者

荒 隆裕 (Ara, Takahiro)

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・その他部局等・教授)

研究者番号：40648896

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：工場の製造現場で実負荷運転を実施する事が困難となる各種の大形の回転機やリニアモータに対し、小容量の直流電源を用いた静止試験(以下、直流試験と呼ぶ)によって、実際に電動機や発電機を駆動させることなく、その運転特性を精度よく測定する方法を開発した。特に、汎用的に工場内に設備されている機材のみで静止試験を実施できるようになった。また、改良型の直流試験法を開発したことによって、これまで適用できなかった各種の電動機/発電機に対しても静止試験のみによってその運転特性を測定評価することが可能となった。

研究成果の概要(英文)：A novel standstill testing method, tentatively called dc test, have been studied. The dc test can measure the driving performance of motors and generators indirectly using a small-capacity dc power supply unit. Since classical actual driving tests that have many troublesome tasks for large-capacity machines and linear motors can be completely eliminated, the dc test extremely simplifies the testing procedure for motors and generators in most manufactures' factories. New ideas to carry out the dc test using only general-purpose marketing products and to apply the dc test to machines which was not able to do this are proposed. The validity of the ideas are demonstrated with experimental verification using the motor and generators in the laboratory.

研究分野：電気機器

キーワード：電気機器

1. 研究開始当初の背景

(1) 回転機の運転特性は、実負荷試験(実際に負荷を取って回転機を回転させてトルクや電流などの特性を測定する試験)によって測定できる。この測定法は、小容量の小形回転機に対しては容易である。しかしながら、大形回転機に対しては、設備容量や試験工数の増加を伴うため、実負荷試験の実施は困難となる。よって、大形回転機に対する試験を簡単に実施できれば、試験に要する手間・時間・コストの全てを軽減できる。

このような背景のもと、申請者らは既に小容量の直流電源を用いた静止試験である直流試験を検討・提案してきている。この方法は、静止した状態の回転機の巻線端子間に対してステップ状の直流電圧を印加した時の電流の応答をレコーダで計測し、申請者らが導出したフーリエ変換公式に代入することによって、回転機の周波数特性(回転機の巻線端子間から内部を見たときの各周波数に対するインピーダンスの特性)を精度よく測定するものである。測定の際に回転機を実際に回転させる必要がないうえに、1回の試験によって商用周波数付近から0.1Hz以下の極低周波までの周波数特性を精度よく測定できるという特長を有している。供試機の周波数特性が判明すれば、負荷運転特性や制御に必要な等価回路定数といった各種の特性を求めることができる。

しかしながら、回転機へのステップ電圧印加には、図1に示す半導体スイッチ(もしくは水銀リレー)を含む特殊な「中間スイッチング回路」を準備する必要があったため、実際の製造現場への導入が困難であった。

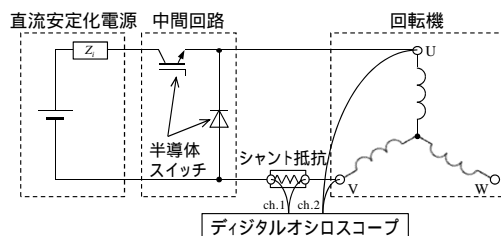


図1 中間スイッチング回路を有する従来の直流試験回路構成例

(2) 上述した直流試験は、回転子回路が線形な半閉スロット回転子を有する誘導機や同期機であれば、その種別によらず統一した試験手順によって周波数特性を測定できた。また、主磁束による鉄心の磁気飽和を考慮した固定子巻線自己インダクタンスについても、直流試験時における試験電流の選定の工夫によって測定できた。

しかしながら、リニアモータ、塊状磁極形同期機、ブラシレス方式の同期機、ならびに、全閉スロット回転子を有するかご形誘導機は、一般産業や電力システムにおいて多用されているにも関わらず、回転子回路に非線形性を有するために提案する直流試験をその

ままの形で適用することが困難であった。

2. 研究の目的

(1) 直流試験において中間回路を排除した状況下であっても、回転機の周波数特性の測定精度が劣化しない、新しい直流試験を開発することを目的とする。中間回路が排除されることにより、様々な制約のある製造現場への導入が容易となる。さらに、得られた周波数特性を利用した新しい特性計算法として、パソコン等の解析ツールが必要となる従来最小二乗法によらない、周波数特性グラフに対する簡単で精度の高い作図による計算法を開発することを目的とする。

(2) リニアモータ、塊状磁極形同期機、ブラシレス励磁方式の同期機、全閉スロットかご形誘導電動機に対しても適用可能な直流試験法を開発することを目的とする。これに付随して、一般に規格化された測定法がない固定子漏れリアクタンスの測定法についても言及する。これにより、本方法を適用できるモータや発電機の種類を増やし、直流試験の実用性と汎用性を高める。

3. 研究の方法

(1) 中間回路を排除できる新しい直流試験に関する研究の方法を述べる。

図1の半導体スイッチを汎用のサーキットブレーカで代用することで回路の簡単化を図る。これを具現するために、スイッチング時のチャタリングがあることに起因してステップ電圧が印加されるタイミングがならずしも明確でなくても実用できるフーリエ変換公式を電気理論モデルにもとづいて新たに導出する。供試機として線形な回路を有する5.5kW-200V-50Hz-4極の半閉スロットかご形誘導電動機に対して提案法を適用して周波数特性を測定し、この結果からトルク-滑り特性と電流-滑り特性を計算し実測値と比較することから提案法の妥当性を検証する。

周波数特性の数理的な性質を多方面から検討し、「直軸開路過渡時定数  $T_{do}'$ 」、「横軸開路初期過渡時定数  $T_{qo}''$ 」、「直軸過渡リアクタンス  $x_d'$ 」を一義的に求めるための具体的な指標を見つける。その妥当性は、10kVA-200V-50Hz-4極の積層磁極突極形同期機に対する実施例から明らかにする。

(2) 回転子に非線形な回路を有する回転機に対する直流試験に関する研究の方法を述べる。

リニアモータの非対称性については、従来よりも簡単でありながら特性算定精度が劣化しない簡易非対称回路モデルを導出する。この導出は、非対称性を有するリニアモータは固定子と回転子の漏れインピーダンスが対称で相互誘導回路のみが非対称となる二相回転機と等価であるという仮定を出発点

に行う。導出したモデルの回路パラメータを直流試験によって求める方法を開発し、供試機である片側式リニア誘導モータに対する実施例からその妥当性を明らかにする。

塊状磁極形同期機については、供試機とする 10kVA-200V-50Hz-4 極機の磁束レベルを変えて周波数特性を測定した結果にもとづいて適正な等価回路モデルを明らかにし、その妥当性を検証する。

ブラシレス励磁方式の同期機（以下、ブラシレス同期機）については、界磁回路のダイオードが存在する状況下で実施できる直流試験法を開発し、前出の積層磁極突極形同期機（直接励磁方式）の界磁端子に外付け整流回路を付けた疑似的なブラシレス同期機に対する直流試験の実施例から、その妥当性を明らかにする。

全閉スロットかご形誘導電動機については、供試機に対する各電流と周波数での拘束試験の結果から、回転子表面のブリッジ部の磁化特性の非線形性とかご形導体回路の周波数依存性（表皮効果等の要因で周波数によって抵抗とインダクタンスの値が変化する）の双方を加味した等価回路モデルを明らかにする。さらに、直流試験によってこのパラメータを決定する方法についても言及する。

固定子漏れリアクタンスの測定法については、対称性のある回転機と非対称性のあるリニアモータの双方に適用できる方法を開発し、0.3kW の表面磁石同期モータ、0.4kW のかご形誘導モータ、前出のリニアモータに対する実施例を示し、その妥当性を検証する。

#### 4. 研究成果

(1) 中間回路を排除できる新しい直流試験の研究成果を述べる。

スイッチングのタイミングが明確でないことを前提に、図 2 に示す直流試験時における固定子巻線端子間の電圧  $v(t)$  と電流  $i(t)$  にもとづいて、フーリエ変換による周波数特性算定公式の導出を試みた。

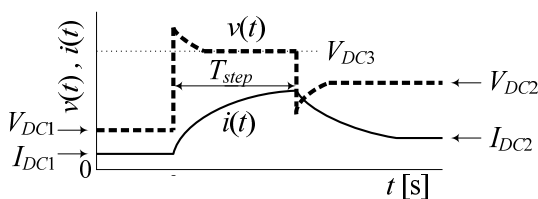


図 2 中間回路を排除した直流試験時における電圧および電流のモデル波形

その結果、固定子巻線端子間の電圧変化が起る瞬間が不明確であっても、3 通りの直流試験（固定子巻線に直流電流を流した後に端子間を短絡した時の減衰電流を測定する直流減衰法、固定子巻線端子間にステップ電圧を直接印加するステップ応答法、同じくパルス電圧を印加するパルス応答法）に対して統一的に次式を用いることで、理論面でも誤差なく周波数特性  $Z(\omega)$  を求められることを導

出した。

$$Z(\omega) = \frac{v_{ac}}{i_{ac}} = \frac{\int_0^{\infty} (v(t) - V_{DC2}) e^{-j\omega t} dt - j \frac{V_{DC2} - V_{DC1}}{\omega}}{\int_0^{\infty} (i(t) - I_{DC2}) e^{-j\omega t} dt - j \frac{I_{DC2} - I_{DC1}}{\omega}} \dots \dots \dots (1)$$

図 3 は求めた周波数特性から始動特性（トルク - 滑り特性、電流 - 滑り特性）を算出した結果である。計算値と実測値はほぼ同じ傾向を示しておりチャタリングの影響も出ていないことから、提案法の妥当性が確認される。

これらの成果により、特殊な主回路と制御回路を含む中間回路なしで直流試験を実施できるようになったため、実際の製造現場への直流試験の導入が容易になった。

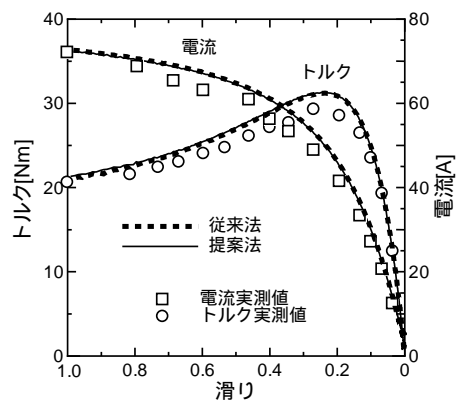


図 3 始動特性（100V-50Hz）の計算値と実測値の比較

直流試験で得た周波数特性に対する作図による計算法の研究成果を述べる。申請者らは、固定子抵抗一相分を  $r_1$ 、滑り周波数を  $\omega$ 、滑りを  $s$  として、

$$X(js) = \frac{Z(\omega)/2 - n}{js} \dots \dots \dots (2)$$

のように演算子インピーダンス  $X(js)$  を定義し、図 4 の周波数特性グラフを描いた際、以下の性質を有する事を新たな事実として数理的に明らかにした。

- ・直軸開路過渡時定数  $T_{do}'$  は、直軸演算子演算子インピーダンス  $X_{ds}(js)$  の虚数成分 ( $\text{Im}\{X_{ds}(js)\}$ ) が最小となる時の時定数（図 4 (C) 参照）と一致する。
- ・横軸開路初期過渡時定数  $T_{qo}'$  は、横軸演算子演算子インピーダンス  $X_q(js)$  の虚数成分 ( $\text{Im}\{X_q(js)\}$ ) が最小となる時の時定数（図 4 (C) 参照）と一致する。
- ・-20dB/dec の傾きの漸近線と周波数特性との交点は、その漸近線の中点と一致する。この性質を用いることによって、周波数特性に平坦部の生じない同期機（図 4 (a)）に対しても直軸過渡リアクタンス  $x_d'$  を求める漸近線を一義的に描ける。これらの成果によって、試験を行う製造現

場に数値解析ツールを擁するパソコン等を持ち込むことなく、静止試験の結果のみから電卓と作図のみによって、容易かつ一義的に同期機諸定数を求めることが可能となった。

なお、図4 (a)および図4 (b)の図中の数値が提案法によって求めた供試機の諸定数である。これらの結果は、商用試験によって測定した結果にほぼ一致していることを確認している。

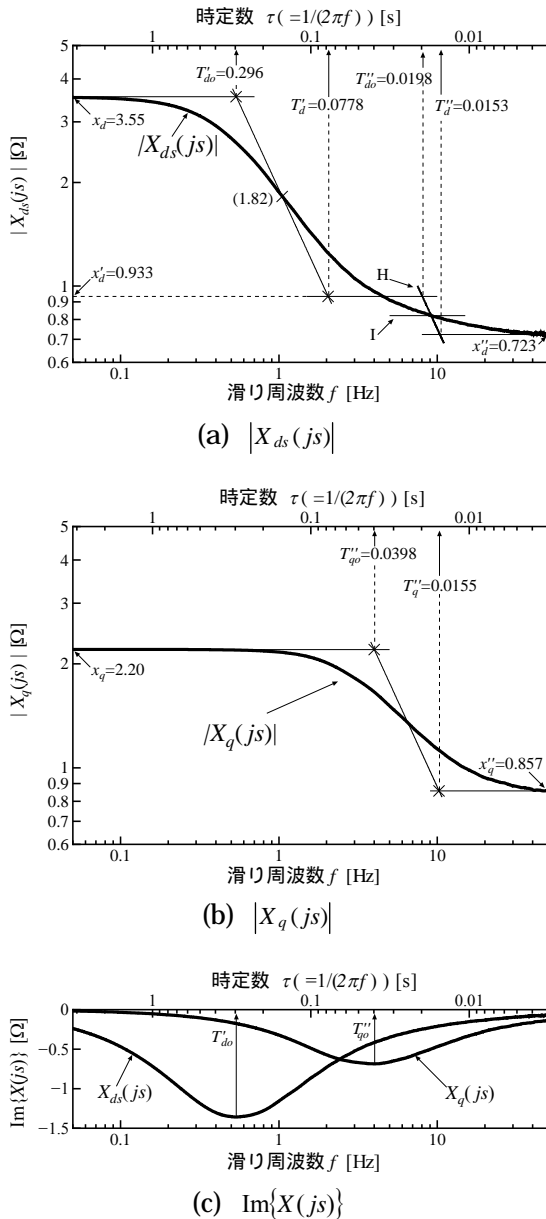


図4 周波数特性グラフの作図実施例

(2) 回転子に非線形な回路を有する回転機に対する直流試験に関する研究成果を述べる。

リニアモータの非対称性を考慮した二軸( )座標の新しい数式モデル(電圧方程式と推力式)として次式を導出し、無負荷時の不平衡電流と始動時の推力リップルの瞬時値をシミュレーションによって計算した。この結果は、実測値とよく一致することから、従来よりも簡単な数式モデルによって、リニアモータ特有の電流不平衡や推力脈動を模

擬できることを明らかにした。さらに、搬送用リニアモータのストロークが有限であることに起因して回転機の無負荷試験に相当する試験を実施できないリニアモータに対して、直流試験によって提案数式モデルの回路パラメータを決定できることも明らかとなった。搬送用リニアモータのストロークが有限であることに起因して無負荷試験の実施が不可能であった現状を打破し、リニアモータの電気回路パラメータを実用的な静止試験によって測定評価できるようになった。

【電圧方程式】

$$[v_{\alpha\beta}] = [Z][i_{\alpha\beta}] \dots \dots \dots (3)$$

ここに、

$$[v_{\alpha\beta}] = [v_{1\alpha} \ v_{1\beta} \ 0 \ 0]^T$$

$$[i_{\alpha\beta}] = [i_{1\alpha} \ i_{1\beta} \ i_{2\alpha} \ i_{2\beta}]^T$$

$$[Z] = \begin{bmatrix} r_1 + p(l_1 + m_d) & 0 \\ 0 & r_1 + p(l_1 + m_q) \\ pm_d & \omega_{re} m_q \\ -\omega_{re} m_d & pm_q \end{bmatrix} *$$

$$* \begin{bmatrix} pm_d & 0 \\ 0 & pm_q \\ r_2 + p(l_2 + m_d) & \omega_{re}(l_2 + m_q) \\ -\omega_{re}(l_2 + m_d) & r_2 + p(l_2 + m_q) \end{bmatrix}$$

【推力式】

$$F_m = \frac{\pi}{\tau} \{ (\dot{i}_{1\beta} m_q i_{2\alpha} - \dot{i}_{1\alpha} m_d i_{2\beta}) - (m_d - m_q) i_{2\alpha} i_{2\beta} \}$$

$$\dots \dots \dots (4)$$

ただし、 $v_{1x}$  と  $i_{1x}$  は  $x$  軸の電圧と電流、 $r_1$  と  $l_1$ 、 $r_2$  と  $l_2$  は一次側と二次側の抵抗と漏れインダクタンス、 $m_x$  は  $x$  軸の相互インダクタンス、 $p$  は微分演算子、 $\omega_{re}$  は可動子の電気角速度、 $\tau$  はポールピッチである。

塊状磁極形同期機に対して試験電流を変化させて直流試験を実施して求めた周波数特性には、差異がみられないものの半円軌跡にはならないという結果であった。このことから、ダンパ回路を2回路に置き換えて、界磁巻線と制動巻線の相互漏れリアクタンス  $x_{23}$  を付加する回路モデルを提唱した。

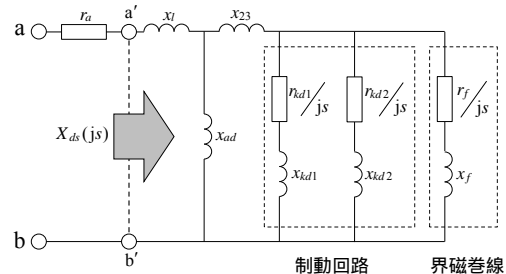


図5 塊状磁極形同期機の直軸等価回路

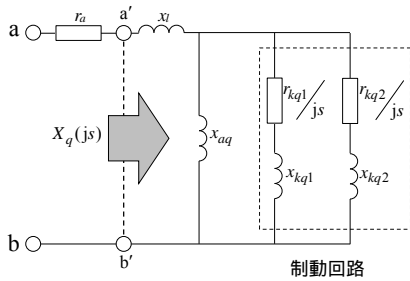


図6 塊状磁極形同期機の横軸等価回路

この等価回路の定数を直流試験によって決定して始動特性と三相突発短絡時の電機子および界磁電流過渡特性を計算した。これらの計算結果は実測値を精度よく模擬していたことから、これまで直流試験を適用することの妥当性が不透明であった塊状磁極形同期機に対する直流試験の妥当性が明らかとなった。

ブラシレス同期機に直流試験を適用する際、界磁巻線短絡時の直軸の周波数特性を求めることに対して、従来の直流試験をそのまま適用できないことを実験結果にもとづいて指摘した。その対応策として、最初に界磁電流の起磁力を打ち消す方向に試験電流（電機子巻線二端子間に直流電流）を流し、その状態で界磁側より直流電流を通電した後に、電機子巻線二端子間を短絡させたときの減衰電流を測定するという手順を踏む手法を新たに導出した。これは、直流試験時に回転子回路のダイオードを非線形領域で動作させず、且つ、鉄心のヒステリシスと初期透磁率の影響の影響を受けずに、普通磁化曲線と同じ傾きで機内の磁束が減衰するように工夫したものである。

これらの成果によって、ブラシレス同期機に対しても直流試験を適用できる手段を明らかにした。

さらに、この成果を非同期投入シミュレーションに応用すると、回転試験によらない界磁過渡電流が一時的に負になる領域で界磁端子に異常電圧が生じ、ブラシレス同期機の界磁回路のダイオードが過電圧で損傷する危険性のある動作領域を図7に示すように予め精度よく予測することも可能であることも示した。

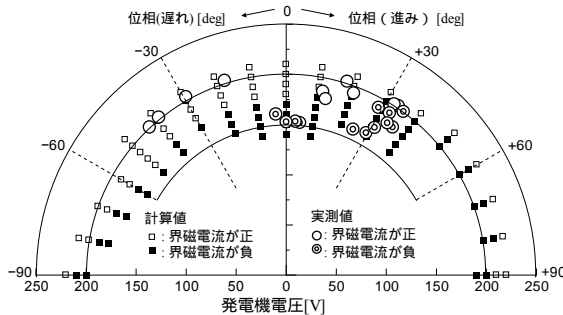


図7 非同期投入時において界磁電流が負になる危険動作領域の計算値と実測値

2つの周波数での拘束試験の結果から、二重かご形誘導電動機の上巻線と下巻線のインピーダンスを分離して算定する計算式を導出した。この成果によって、簡単な計算式で、二重かご形誘導電動機の等価回路定数を算定する事が可能となった。

上記の成果を利用して、全閉スロットで且つ二重かご形回転子を有する供試機に対して各電流と周波数での拘束試験を実施して、上巻線と下巻線のインピーダンスを分離して算定した。その結果は、図8に示すとおりであり、回転子の上巻線（添え字が3）と下巻線（添え字が4）に共通の漏れリアクタンスについては電流の関数として表現し、個々の上巻線と下巻線の抵抗と漏れリアクタンスについては定数として表現することの妥当性が確認された。よって、回転子表面のブリッジ部における磁化特性の非線形性をかご形巻線の周波数依存性の双方を考慮できる誘導電動機の等価回路として図9の回路を提案した。

なお、全閉スロットかご形誘導電動機に対する直流試験の適用に関しては、試験電流や試験手順の工夫では十分な周波数特性算定精度を得るに至らなかった。これについては、今後の検討課題となった。

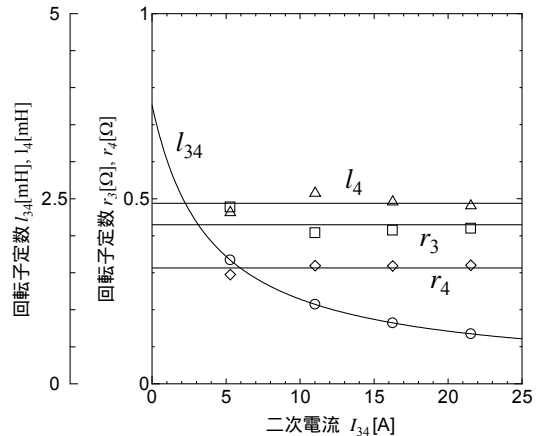


図8 全閉スロット二重かご形誘導電動機の拘束試験から求まる二次電流に対する上巻線と下巻線のインピーダンスの変化

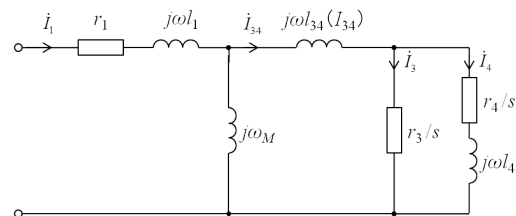


図9 回転子表面ブリッジ部の磁化特性の非線形性を考慮可能な全閉スロット二重かご形誘導電動機の等価回路

鉄心に端部が有るリアモータに対しても適用できる固定子漏れリアクタンスの測定法を開発した。新規な着眼点は、各巻線間（UV、VW、WU間）の空間的な位相差（ $\theta_{UV}$ 、 $\theta_{VW}$ 、 $\theta_{WU}$ ）の和が360度となる原則から、



直流試験によって求められる各一次巻線間の相互インダクタンス ( $M_{UV}''$ ,  $M_{VW}''$ ,  $M_{WU}''$ ) を次式に代入することで、各相の一次巻線と二次巻線の相互インダクタンス  $M''$  を求めるところにある。

$$360^\circ = \theta_{UV} + \theta_{VW} + \theta_{WU}$$
$$= \cos^{-1}\left(-\frac{M_{UV}''}{M''}\right) + \cos^{-1}\left(-\frac{M_{VW}''}{M''}\right) + \cos^{-1}\left(-\frac{M_{WU}''}{M''}\right)$$

.....(5)

リニアモータ、かご形誘導電動機、表面磁石同期モータに対する適用例から、本方法はリニアモータや磁石モータのように等価的なギャップが大きい機械に対して精度良く漏れインダクタンスを測定できることを示した。この研究成果によって、非対称性を有する機械の漏れインダクタンスを静止試験のみによって測定することが可能となった。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計4件)

田中 晃、山本 修、荒 隆裕、堺 和人、小室 修二、演算子インピーダンスの周波数特性を利用した同期機諸定数の簡易算出法、電気学会論文誌D、査読有、135巻、2015、1040-1046

DOI:10.1541/ieejias.135.1040

平原 英明、山本 修、荒 隆裕、清水敏久、A Method to Calculate the Performance and Circuit Parameters of Linear Induction Motors Using Simple Two-Phase Model、IEEJ Journal of Industry Applications、査読有、4巻、2015、409-417

DOI:10.1541/ieejia.4.409

田中 晃、平原 英明、山本 修、荒 隆裕、直流試験による交流回転機の特異算出法の開発、職業能力開発研究誌、査読有、30巻、2014、85-90

[http://www.uitec.jeed.or.jp/philanthropy/kenkyushi/kenkyushi\\_030.html](http://www.uitec.jeed.or.jp/philanthropy/kenkyushi/kenkyushi_030.html)

〔学会発表〕(計4件)

田中 晃、平原 英明、山本 修、荒 隆裕、相互漏れリアクタンスを考慮した塊状磁極同期等価回路定数算出、職業大フォーラム2015 第23回職業能力開発研究発表講演会、査読無、2015年10月30日~2015年10月31日、職業能力開発総合大学校(東京都小平市)

平原 英明、山本 修、荒 隆裕、清水敏久、各巻線間の相互インダクタンスを用いた交流機の一次漏れインダクタンス算出法の検討、電気学会回転機研究会、査読無、2014年10月29日~2014年10月30日、大阪府立大学 I-site なんば(大阪府大阪市)

田中 晃、山本 修、荒 隆裕、堺 和人、小室 修二、ダイオード整流器を有

する同期発電機の定数算出法と非同期投入条件に関する検討、電気学会回転機研究会、査読無、2014年10月29日~2014年10月30日、大阪府立大学 I-site なんば(大阪府大阪市)

平原 英明、山本 修、荒 隆裕、清水敏久、A Method to Calculate the Performance and Circuit Parameters of Linear Induction Motors Using Simple Two-Phase Model、The 2014 International Power Electronics Conference IPEC-Hiroshima 2014 -ECCE Asia-、査読有、2014年5月18日~2014年5月21日、広島国際会議場(広島県広島市)

山本 修、平原 英明、田中 晃、荒 隆裕、松瀬 貢規、Maximum efficiency drives of synchronous reluctance motors with on-line inductance estimator、IEEE ECCE (Energy Conversion Conference and Expo.) 2013、査読有、2013年9月15日~2013年9月19日、デンバー(アメリカ合衆国)

田中 晃、山本 修、荒 隆裕、回転機の各種直流試験におけるフーリエ変換処理に関する検討、電気学会モータドライブ/回転機合同研究会、査読無、2013年7月11日~2013年7月11日、電気学会本部(東京都千代田区)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.uitec.jeed.or.jp/schoolguide/teacher/00040.html>

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

荒 隆裕 (ARA Takahiro)

職業能力開発総合大学校・能力開発院基盤ものづくり系・教授

研究者番号： 40648896

(2) 研究分担者

山本 修 (YAMAMOTO Shu)

職業能力開発総合大学校・能力開発院基盤ものづくり系・教授

研究者番号： 00648925

(3) 研究分担者

田中 晃 (TANAKA Akira)

職業能力開発総合大学校・能力開発院基盤ものづくり系・准教授

研究者番号： 30648952

(4) 研究分担者

平原 英明 (HIRAHARA Hideaki)

職業能力開発総合大学校・能力開発院基盤ものづくり系・助教

研究者番号： 50649209