

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 2 日現在

機関番号：32621

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2016

課題番号：15K18026

研究課題名(和文) エネルギー利用効率の向上のための解析性能の高い誘導機モデルの開発

研究課題名(英文) Development of a new induction machine model with high analytical performance for improvement of energy utilization efficiency

研究代表者

坂本 織江 (Sakamoto, Orie)

上智大学・理工学部・准教授

研究者番号：40443262

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)：本研究では、エネルギーの利用効率の向上に寄与することを目的として、解析性能の高い新たな誘導機モデルを開発した。誘導機は電気エネルギー消費の多くを占めており、その運転方法の改良は電気エネルギー利用の高効率化への効果が大きいと考えられる。運転方法の研究には、現象を実際の電気波形に即した形で解析できる「瞬時値解析」が有用な手法である。この動機に基づき本研究では、電力系統の瞬時値解析のための、計算の安定性と解析精度の高い新たな誘導機モデルを開発した。また、開発したモデルの安定性、解析精度、有用性について、実機を用いた実験と、数値シミュレーションにより検証した。

研究成果の概要(英文)：Large quantities of electric energy are consumed by induction motor loads. Therefore, improvement of control methods for these motors is very effective to raise energy utilization efficiency. To investigate new control methods in the conditions similar to those of a real power system, electromagnetic transient (EMT) analysis in three-phase instantaneous values is very useful. In this study, a new squirrel-cage induction machine model with high calculation stability and accuracy for power system EMT analysis has been developed for the purpose of improvement of energy utilization efficiency. The noteworthy feature of the model is in the calculation procedure using a two-stage diagonally implicit Runge-Kutta (2S-DIRK) method and second-order Runge-Kutta method (RK2) without any prediction or delay. Stability, accuracy, and usefulness of the model were confirmed through experiments and numerical simulations.

研究分野：電力系統工学、とくに電力系統機器のモデリング・解析・制御

キーワード：誘導機 電力系統 瞬時値解析

1. 研究開始当初の背景

(1) 誘導機によるエネルギー消費の増大

世界では電気エネルギーの50%以上が電動機駆動の負荷によって消費されており、その多くが誘導機である。誘導機は可変速揚水発電機や風力発電機など、電力系統において大容量の発電機としても使用されている。インバータ技術の発展により誘導機の用途は拡大しており、誘導機によるエネルギー消費・エネルギー変換の割合は今後も増加していくことが予想される。

(2) 誘導機の解析モデルに対する要求

近年の電力系統では、系統に連系されているパワーエレクトロニクス機器が増加しており、現象を実際の電気波形に即した形で解析できる「瞬時値解析」のニーズが高まっている。その中で、計算の安定性と精度の高い誘導機モデルの開発も望まれている。

研究代表者は先行研究において新たな計算手法を考案し瞬時値解析のための同期発電機モデルを開発し、誘導機モデルの検討に着手していた。本研究はその知見を生かし、誘導機モデルの開発に取り組むこととした。

2. 研究の目的

本研究の目的は、電気エネルギーの利用効率の向上のために、解析性能の高い誘導機のモデルを開発することである。

世界では電気エネルギーの50%以上がモータで消費されており、とくにその多くを占める誘導モータについて、運転・制御方法の改良により電気エネルギー利用の高効率化を図ることができれば、全体への寄与が大きい。新技術の開発に際しては、「瞬時値解析」が有用な手法である。このため本研究では、電力系統の瞬時値解析を適用先とし、エネルギー利用効率を考慮でき、かつ計算の安定性と精度の高い新たな誘導機モデルを開発することを目的とした。

3. 研究の方法

(1) モデル開発の対象

誘導機には様々な種類があるが、その中で本研究では、安価かつ堅牢であることから広く利用されている「かご形誘導機」という種類を対象とした。かご形誘導機は誘導機の基本的な特性をもつ構造であり、巻線型などの他の種類の誘導機モデルの開発の基盤となるものである。相数は三相を対象とした。

また、誘導機をモータとして運転する場合には様々な電源周波数で駆動されるが、本研究では、50Hz および 60Hz という電力系統の最も基本的な2種類の周波数を対象として開発を行った。

(2) モデル開発に用いたソフトウェア

モデルの開発には電力系統瞬時値解析プログラム(XTAP)を用いた。XTAPではモデルをのライブラリに追加してユーザ間で共有

することが可能であり、XTAPのユーザにより活用されることが期待できる。

一方で、本モデル独自の計算手法はXTAPに限らず適用することができると考えられるので、本研究の成果はXTAPのユーザのみに限定されるものではない。

(3) 開発したモデルの解析精度の検証

試験用誘導機において取得した実測データとの対比により解析精度を検証した。試験機や計測器の性能に制約があるため、本研究においては検証可能な範囲で実施した。

(4) 開発したモデルの有用性の検証

有用性の検証については、電力系統瞬時値解析プログラム(XTAP)を用いたシミュレーションにより実施した。

本研究では誘導機モデルの開発と有用性の検証までを研究対象範囲として計画しており、開発モデルを用いたエネルギー利用率の向上方法に関する更なる研究は本研究終了後に別途行うものとした。

4. 研究成果

(1) 開発したモデルの構成

本研究で開発した誘導機モデルの基本式を(1)~(5)式に示す[2]。本研究においては磁気飽和の影響は考慮していない。

$$e_g = v_s - p\{L_{ls}i_s\} - Ri_s \quad (1)$$

$$v = Ai \quad (2)$$

$$v = [e_{g\alpha} \ e_{g\beta} \ v_{rd} \ v_{rq}]^t, \quad i = [i_{s\alpha} \ i_{s\beta} \ i_{rd} \ i_{rq}]^t$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & L_m'p & 0 \\ 0 & 0 & 0 & L_m'p \\ L_m'p & \omega(t)L_m' & R_r + L_r'p & \omega(t)L_r' \\ -\omega(t)L_m' & L_m'p & -\omega(t)L_r' & R_r + L_r'p \end{bmatrix}$$

$$T_e = L_m'(i_{s\beta}i_{rd} - i_{s\alpha}i_{rq}) \quad (3)$$

$$L_r' = L_r + L_m/2, \quad L_m' = 3L_m/2 \quad (4)$$

$$pS = \frac{1}{M}(T_e - T_m - DS), \quad \omega(t) = 1 + S \quad (5)$$

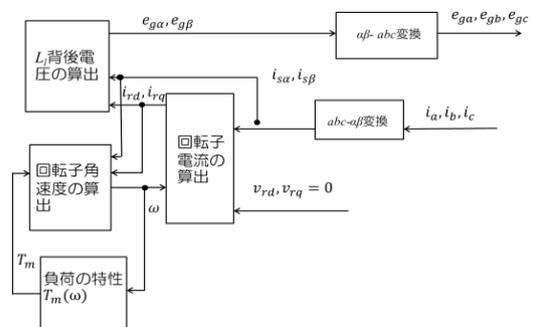


図1 誘導機モデルの計算の流れ[1]

開発したモデルの計算の流れを図1に示す。本モデルは、リアクタンス背後電圧源型である。一次巻線漏れインダクタンスの背後電圧を、次項に述べる計算手法と制御電源とを組

み合わせた構成により電気回路側に遅れなく出力できる点に特長がある。研究代表者らの先行研究に基づき、一次側に dq 変換を用いず $\alpha\beta$ 変換を適用し簡潔な構成とした点にも特色がある。

(2) 開発したモデルの計算手法

本研究では、瞬時値解析における誘導機の動特性計算に対して異なる 2 種類の積分手法を組み合わせた独自の計算手法を適用することにより、解析性能の向上を図った。

具体的には、陰解法である 2 段対角陰的ルンゲクッタ法 (2S-DIRK) と陽解法である 2 次のルンゲクッタ法 (RK2) との組み合わせによる計算手法を用いた。これは系統状態急変時にも数値振動の発生を防いで安定に計算を続け、なおかつ誘導機の基本特性を与える微分方程式を正確に解き続けようとするものであり、電圧の予測に依らずに誘導機の特性を本質的に模擬することが可能であるので、原理的に計算の安定性と解析精度が高い。この点に、本モデルの特色ならびに他のモデルに対する優位性がある。

また、電力系統の瞬時値解析において、回転機のモデルと電力系統側との接続手法は非常に重要であり様々な先行研究があるが、2S-DIRK と RK2 との組み合わせによる手法は本研究の独創的な点である。

(3) 定常運転時の解析精度の検証

開発したモデルの定常運転時の解析精度を、実機による試験結果と、XTAP によるシミュレーションの結果を比較することにより検証した。試験機としては出力 2.2kW を用いた場合のトルク出力と一次電流、有効電力入力の結果を図 2 に示す。

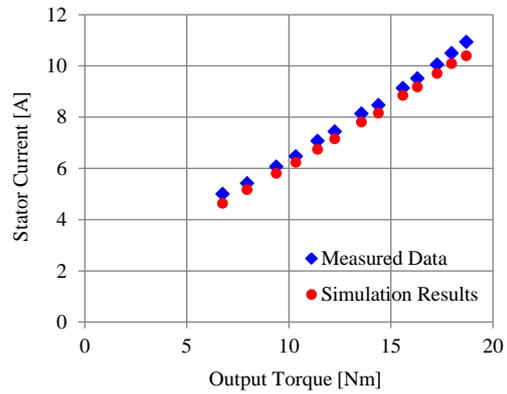
全体としては、試験用誘導機 3 台のうち 1 台は容量が小さく実験時に誘導機の負荷の非線形性や軸振動を生じてしまい、1 台は高経年機であり、もう 1 台はトルクに関する測定が困難であったことから、検証可能な内容に制約があったため、今後更なる検証を実施する必要があるものの、実施できた試験に対しては概ね妥当な結果が得られた。

なおこの試験に関する制約は次の (4)、(5) 項の検証においても同様であった。

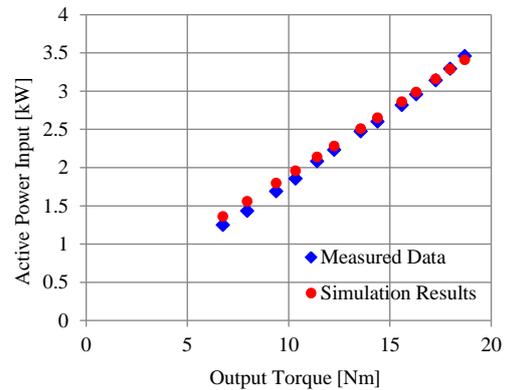
(4) 状態急変時の解析精度の検証

状態急変時の例として、始動、瞬時電圧低下、電圧復帰、電源遮断に対する解析精度を実機との対比により検証した。

研究代表者が有する試験環境では急峻なトルク変化の高精度な測定が困難であったことと、負荷の非線形性があったことから定量的な検討はできなかったが、定性的には瞬時電圧低下時の誘導機の内部電圧の減衰等の過渡特性をよく表しており、提案する計算手法に依り電圧急変時にも誘導電動機の特性を安定に計算できることが確認できた。



(a) トルク出力—一次電流特性[3]



(b) トルク出力—有効電力入力特性

図 2 定常運転時の実測対比の例[3]

(5) 異なる運転周波数に対する解析精度の検証

エネルギー効率の向上で重要となる可変速運転を想定し、定格以外の周波数で運転した際の解析精度を検証した。例として図 3 に誘導機の滑り (回転速度に関する量) の試験結果を示す。

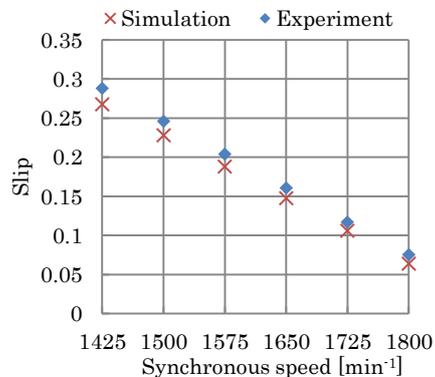


図 3 異なる運転周波数における速度[2]

前述の試験環境の制約から更なる検証が今後の課題となったものの、誘導機の応動を概ね実用的な精度を保って安定に模擬でき

ることが確認でき、開発したモデルの有用性が示された。

(6) 異なる運転周波数に対する効率

開発した基本モデルをエネルギーの利用効率向上の検討に役立てるため、効率を算出する部分をモデルに追加した。

異なる出力および運転周波数に対するエネルギー効率を図4に示す。運転周波数により効率が変化する様子が観察でき、エネルギー利用効率の向上方法の検討に有用であると考えられる。

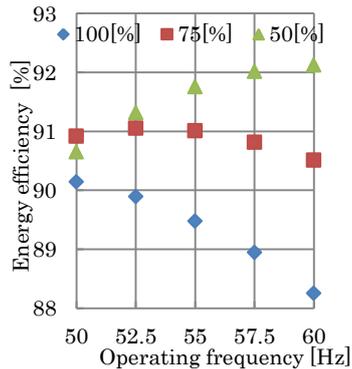


図4 異なる運転周波数における効率[2]

(7) 本モデルの有用性の例

開発したモデルを用い、図5に示す風力発電と誘導モータを含む離島系統におけるフライホイールエネルギー貯蔵装置 (FESS) による電圧安定化制御の効果についてシミュレーションにより検証した。

このシミュレーションにおいては、本誘導機モデルを風力発電機と大型ポンプの模擬に用い、系統状態急変時にも誘導機の特徴を安定に解析できるという本モデルの特徴を生かして、系統事故時のシミュレーションを行った。シミュレーション結果の例を図6に示す。電圧安定化制御の有無に対し誘導機の応動が変化していることから、このような検討では本モデルのような系統状態急変時の誘導機の過渡特性を含む電力系統の瞬時値解析が可能なモデルが必要であり、本モデルが有用であることを示した。

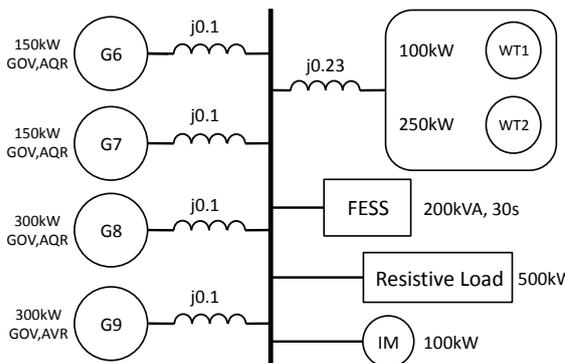
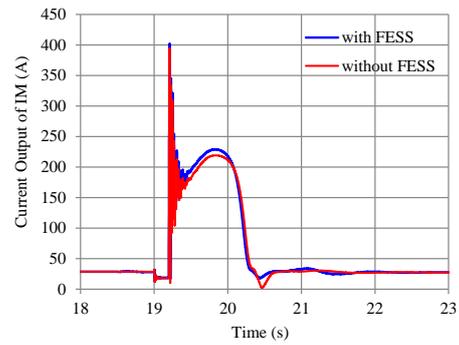
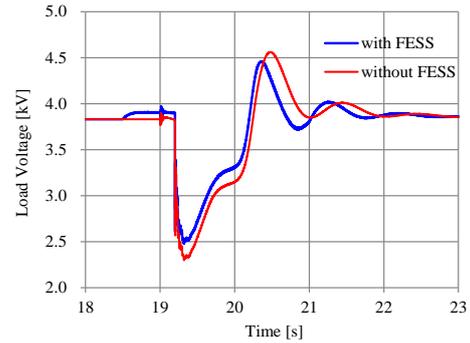


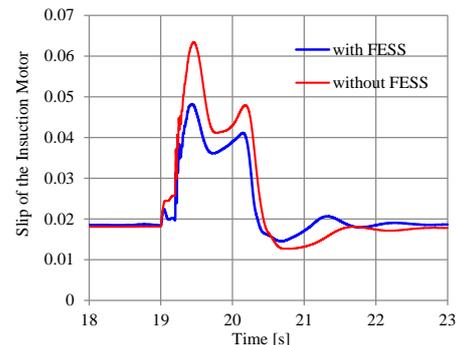
図5 誘導機を含む小規模独立系統[3]



(a) 風力発電システムの電流出力



(b) 誘導電動機接続端の電圧



(c) 誘導電動機の滑り

図6 誘導発電機・電動機の解析結果[3]

とくに離島や工場のような小規模系統の解析においては誘導機の動特性が系統に与える影響は相対的に大きく、本モデルにより誘導機の過渡安定性を考慮した系統制御方法の検討を容易に行うことができる利点が大きいと考えられる。

(8) 本研究の汎用性

モデルの開発には電力系統瞬時値解析プログラム (XTAP) を用いている。XTAP ではモデルをのライブラリに追加してユーザ間で共有することが可能であり、本研究で開発したモデルは XTAP のユーザにより活用されることが期待できる。

また、前述の通り、本研究で提案する計算手法については XTAP に限らず、誘導機の解析に適用できるものである。

<引用文献>

- [1] Hiroki Osawa and Oriie Sakamoto, Considerations on Accuracy of the Squirrel-cage type Induction Motor Model based on the Voltage behind the Primary Winding Leakage Inductance for Different Operating Frequencies, The International Conference on Electrical Engineering 2016, 2016年7月5日, 沖縄自治会館(沖縄県・那覇市)
- [2] 大澤裕輝, 坂本織江, 一次側漏れインダクタンス背後電圧型誘導機モデルの運転周波数と解析精度に関する検討, 平成28年電気学会全国大会, 2016年3月16日, 東北大学 川内北キャンパス(宮城県・仙台市)
- [3] Oriie Sakamoto, Kodai Nagayama and Hiroki Osawa, Effect of voltage-stabilizing control with flywheel energy storage system on stable operation of induction machines in a small isolated power system, 2016 IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia, 2016年11月29日, Melbourne (Australia)

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計0件)

[学会発表] (計4件)

- ① Oriie Sakamoto, Kodai Nagayama and Hiroki Osawa, Effect of voltage-stabilizing control with flywheel energy storage system on stable operation of induction machines in a small isolated power system, 2016 IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia, 2016年11月29日, Melbourne (Australia)
- ② Hiroki Osawa and Oriie Sakamoto, Considerations on Accuracy of the Squirrel-cage type Induction Motor Model based on the Voltage behind the Primary Winding Leakage Inductance for Different Operating Frequencies, The International Conference on Electrical Engineering 2016, 2016年7月5日, 沖縄自治会館(沖縄県・那覇市)
- ③ 大澤裕輝, 坂本織江, 一次側漏れインダクタンス背後電圧型誘導機モデルの運転周波数と解析精度に関する検討, 平成28年電気学会全国大会, 2016年3月16日, 東北大学 川内北キャンパス(宮城県・仙台市)
- ④ 楊熙寧, 坂本織江, XTAPにおける背後電圧型誘導機モデルの瞬時電圧低下時の精度検証, 平成27年電気学会電力・エネル

ギー部門大会, 2015年8月27日, 名城大学 天白キャンパス(愛知県・名古屋市)

[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]

なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

坂本 織江 (SAKAMOTO, Oriie)

上智大学・理工学部機能創造理工学科
・准教授

研究者番号: 40443262

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

なし