

令和 5 年 6 月 28 日現在

機関番号：32621

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2022

課題番号：17K14646

研究課題名（和文）誘導機によるエネルギー利用の過渡状態を含む高効率化に関する研究

研究課題名（英文）Study for Improvement of Energy Efficiency in Induction Motors including Transient State

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） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、誘導機によるエネルギー利用の高効率化に貢献することを目指し、過渡的な状態を含めて電力システムにおける誘導機の運転特性を安定かつ精度よくシミュレーションすることができる、二重給電型の誘導発電機（以下、DFIG）の新たなモデルを提案した。また、提案手法に基づくDFIGモデルを電力系統瞬時値解析ソフトウェアXTAP上で作成した。DFIGは誘導機の一つで、揚水発電所やウィンドファームなどに用いられている。

研究成果の学術的意義や社会的意義

主要な学術的意義は、提案する安定性が高い計算手法が電力システムの瞬時値解析においてDFIGの過渡的な運転状態のシミュレーションに適用できると示した点にある。電力システムの瞬時値解析は電気現象を数十～数千キロヘルツ程度までの波形を追う形で詳細にシミュレーションするものである。開発したモデルは、電力システムに落雷などの大きな擾乱が加わり電圧や電流の波形や周波数が大きく変化する場合にも過渡的な特性を計算でき、社会的にはウィンドファームのよりよい制御手法の検討などに用いることができる。

研究成果の概要（英文）：A new method of modeling a doubly-fed induction generator (DFIG) has been proposed for the purpose to contribute improvement of energy efficiency in induction machines in electric power systems. The method is used for transient simulation of power systems and able to calculate dynamic characteristics of a DFIG stably and accurately by explicitly limiting accumulation of calculation errors. A new DFIG model based on the proposed method has been developed in an electric power system transient simulation software, XTAP. DFIG is a kind of induction machines and used for pumped storage hydro generation and windfarms.

研究分野：電力系統工学

キーワード：誘導発電機 誘導電動機 瞬時値解析 DFIG XTAP

## 1. 研究開始当初の背景

研究実施者は電力系統のエネルギー輸送に関わるシミュレーション技術の高性能化を研究テーマの一つとしている。電力系統の過渡的な状態のシミュレーションでは、電力系統内の発電機などの電力機器の振る舞いやその結果として生じる各部の電圧や電流を微分方程式で表し、それらを数値積分手法を用いて解くことで現象を時間的に追いかける方法がある。これに関し研究実施者は本研究以前に、誘導モータについて、異なる積分手法を組み合わせさせた計算の安定性の高いシミュレーションモデルを提案していた。(以下、これを既開発モデルと呼ぶ。)

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、その多くを誘導モータが占めていると言われている。また、誘導機は発電機としては水力発電や風力発電に用いられており、とくに風力発電について二重給電形誘導発電機(Doubly-Fed Induction Generator, 以下 DFIG と呼ぶ)の発電電力の制御性能を活かした再生可能エネルギー導入量の拡大が期待されている。このため、誘導機について、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と考えられた。

## 2. 研究の目的

シミュレーションにおいて誘導機モデルは、特殊な制約がない限り、発電機としてもモータとしても運転することができ、既開発モデルも両方の運転を行うことができるが、検証は主にモータとして運転した場合について行っていた。

本研究では、既開発のかご形誘導機モデルを基にして、次の項目に取り組んだ。

- (a) 既開発モデルに用いた異なる積分手法を組み合わせさせた安定性の高い計算手法が、巻線形誘導機モデルにも適用可能であるか明らかにすること
- (b) (a)を基に、系統側との双方向のエネルギーの授受が生じるような系統状態急変時の過渡状態においても誘導機の特性を安定かつ精度よく模擬できるモデルを開発すること
- (c) 新たに開発したモデルが、運転・制御方法の改良による電気エネルギー利用の高効率化の検討に用いることができると示すこと

## 3. 研究の方法

研究は主に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行った。XTAP は 1 で述べた時間的なシミュレーション手法に用いられるプログラムの一種であり、(一財)電力中央研究所により開発された。

実際の電力系統では電圧や電流が 50Hz あるいは 60Hz の正弦波状の交流波形になっており、たとえば 50Hz の場合にはその周期(波形ひとつ分の時間的な長さ)が 20ms となる。電力系統のエネルギー輸送の過渡的な状態に関するシミュレーションには大きく分けて、現象をこの 20ms の波形に即した形で計算する「瞬時値解析」と、比較的大規模な系統や長時間のシミュレーションを行うために 1 周期分の特性を均して計算する「実効値解析」が

ある。

本研究では誘導機によるエネルギー利用の高効率化の検討に用いることができる解析性能の高いシミュレーションモデルを開発することを目的としている。電力系統のエネルギー輸送に関する過渡的な現象はこれまでは実効値解析により検討されることが多かった。しかし、現在では誘導機はパワーエレクトロニクス電力変換装置により制御されることが多く、また、需要家に供給される電力品質を維持する重要性も高まっているので、現象を波形レベルで解析できる瞬時値解析向けの誘導機モデルを開発する必要性が高まっていると考えられたので、本研究ではモデルを開発するプログラムとして瞬時値解析用ソフトウェアである XTAP を選択した。

XTAP はモデルの拡張性に富んでおりユーザ間でモデルの共有が容易であることと、電力分野のシミュレーションのために企業や大学等に広く利用されていることから、XTAP によりモデルを開発することで電力分野の瞬時値解析ツールの高性能化にも貢献できる。一方で、本研究で提案した計算手法は 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 のユーザのみに限られるものではない。

#### 4. 研究成果

本研究では、実施者が以前に提案した陰解法と陽解法を組み合わせた計算安定性が高い手法を適用した DFIG モデル（以下、提案モデルと呼ぶ）を XTAP 上で開発した。提案モデルは、系統状態急変時の誘導機と系統側とのエネルギーの授受を含む過渡的な特性を模擬でき、かつ、計算負荷の低減を図ったモデルである。

DFIG は可変速運転によるエネルギー効率の向上と電力変換装置の小型化が可能であるという特長をもち、大容量の揚水発電所やウィンドファームなどに用いられており、誘導機によるエネルギー利用の高効率化に対して広範な導入効果が見込める機器である。今回は提案モデルの適用先として風力発電機群のシミュレーションを想定した。

既開発モデルはかご形誘導機モデルであり、DFIG は同じ誘導機ではあるがかご形とは形状が異なる「巻線形」である。2 に挙げた「研究の目的」の項目(a)について、既開発モデルで提案した手法は、巻線形に対しても誘導機であるので原理的には適用できると考えられるものの、実際のシミュレーションモデルとしての検証は行われていなかった。本研究において、提案手法が巻線形誘導機にも適用できることを明らかにした。

本研究ではさらに、巻線形誘導機モデルにウィンドファームでの DFIG（二重給電型誘導発電機）としての運転を想定した速度・出力制御系を付加した。「二重給電型」は巻線形誘導発電機の運転手法の一種であり、大容量の風力発電機や揚水発電機に用いられている。

ここで、瞬時値解析は現象を波形レベルで計算する方法であるので、実効値解析に比べると非常に大きな計算時間を要し、その計算時間は発電機の台数が増えるほど増加する。提案手法は数値計算の安定性を高めるものであり複数台の場合にも安定に計算できることは確認できたが、瞬時値解析である以上計算時間を要することには変わりなく、ウィンドファーム

ムとして複数台で運転する例をシミュレーションするには計算の高速化（計算負荷の低減）が望まれる。本研究では、DFIGのパワーエレクトロニクス電力変換装置を含む回転子と電力系統と間のエネルギー授受を制御電流源を含む回路により模擬し、エネルギー輸送に関する過渡的な状態の計算精度を十分に維持しつつ、計算負荷の低減を図った。

提案モデルについて、XTAPにおいてパワーエレクトロニクス電力変換装置を含む回転子回路を詳細に模擬した場合との比較を行い、研究の目的の項目(b)に関して、提案モデルが系統状態急変時の誘導機と系統側とのエネルギーの授受を含む過渡的な特性を模擬でき、かつ計算負荷が大きく低減されていることを確かめた。

また、研究の目的の項目(c)に関し、風力発電を想定した速度・出力制御系を付加した運転により、提案モデルが単独の場合だけでなく複数台の場合にも安定に運転でき、風速変動などに対し安定に動作し、提案モデルを用いたエネルギー利用の高効率化を定量的に示すには至らなかったが、風速変動時の制御法などエネルギー利用の高効率化につながる検討に利用できることを確認した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 櫻井聡史、坂本織江
2. 発表標題 XTAPIにおける二重給電誘導発電機モデルの検討
3. 学会等名 電気学会電力技術/電力系統技術/半導体電力変換合同研究会, No. PE-21-025/PSE-21-038/SPC-21-077
4. 発表年 2021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
---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------