

令和元年6月25日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06220

研究課題名(和文) 系統連系インバータの過渡安定性に関する研究

研究課題名(英文) Study on transient stability of power system interconnected inverter system

研究代表者

舟木 剛 (Tsuyoshi, FUNAKI)

大阪大学・工学研究科 教授

研究者番号：20263220

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：系統連系インバータの大きな出力変動や系統故障に対する電力系統の過渡安定性を評価に用いる実効値解析モデルを構築した。洋上風力発電などの再生可能エネルギーの大量導入に向けた多端子直流送電システムの既存交流電力システムへの導入による動特性を、数式モデルで記述することに加え、動特性の背後にある物理的なメカニズムを表した。構築した多端子直流システムの動特性モデルを用いて、直流多端子システム側で構成変化が生じた場合に、トポロジーの違いにより、システム全体の過渡安定性に現れる違いを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

電力系統の電源構成に占める再生可能エネルギーの割合は、着実に高くなっており、高速応答する系統連系インバータの電力系統における大擾乱に対する過渡安定性を評価するとともに、これを向上する変換器制御・運用方式の知見が必要である。本研究により再生可能エネルギーの系統連系インバータの大量導入時における系統故障に対する運転継続要件に対して、その応答を評価する基盤技術となるとともに、さらに厳しい要件に対応する変換器制御系開発のプラットフォームを提供した。

研究成果の概要(英文)：This research work developed the transient stability analysis model of power system interconnected inverter to evaluate the influences of large variation of renewable energy source output and fault in power system operation. This work developed mathematical model of power system to explain the dynamics of multiple interconnected inverters, which assumes bulk installation of renewable energies; e.g. off shore wind farms, and clarified mechanisms of dynamical behavior of system. This work also clarified the difference in transient stability stemming from topology of power system configuration and change of interconnection state of power system.

研究分野：パワーエレクトロニクス

キーワード：系統連系 インバータ 数式モデル 動特性 安定性 スイッチング関数 瞬時値 実効値

## 1. 研究開始当初の背景

化石燃料の大量消費にともなう CO<sub>2</sub> 濃度上昇に起因する地球温暖化による異常気象や、東北大地震での津波による福島第一原子力発電所事故を契機とした我が国の原子力発電所の稼働停止と電源政策の変更を踏まえ、太陽光や風力を中心とした再生可能エネルギーの導入が進められている。特に固定価格買取制度が実施されてからは導入計画を含めると電力系統の電源構成に占める再生可能エネルギーの割合が非常に大きくなりつつある。自然エネルギー利用の再生可能エネルギーを単独で利用する場合は、気象条件によりその出力が大きく変動するため、電力の安定した利用には蓄電池などのエネルギー貯蔵が必要となる。一方再生可能エネルギーを電力系統に連系して用いる場合、再生可能エネルギーの出力変動および負荷変動に対する過不足分を電力系統側からの電力により補償することが可能となり、再生可能エネルギー利用の利便性が格段に向上する。ただし補償を行う側である電力系統は、需要や再生可能エネルギー出力の変動予測に基づく発電計画・系統運用を行わなければならない。再生可能エネルギーの導入量が無視できる程度であれば、電力系統に連系された再生可能エネルギーは負の負荷として扱うことができるが、大量に導入された場合その出力変動が電力系統に与える影響は無視できないものとなる。また電源となる系統連系インバータの動特性も同期発電機とは大きく異なるため、電力系統の安定運用のためにはそれらが電力系統に大量に接続された場合の電力系統の振る舞いを予め把握しておく必要がある。

電力系統の安定運用には、交流の周波数と電圧の維持・変動抑制が必要である。従来の電力系統では、同期発電機が主たる電源であったため、動揺方程式と呼ばれる二次の微分方程式で表される回転子の運動方程式により、周波数や位相が決まっていた。発電機の電機子回路により、出力端子電圧の位相は回転子の位相から変化するものの、出力電圧の周波数と位相は動揺方程式に従った振る舞いをする。すなわち、発電機の機械入力と電気出力との差により、発電機の回転子は加速もしくは減速し、回転子の回転速度が変化する。このため機械入力と電気出力の大きさを同じに維持することが、電力系統を安定に運転継続するために必要である。発電機端子と負荷端子における交流電圧の大きさや位相により送電線の線路潮流、すなわち発電機の電気出力が決まる。また発電機の機械入力はガバナにより調整する。ここで、与えられる擾乱の大きさにより現れる現象の性質が異なる。すなわち、負荷変動等で常時生じているような微小擾乱に対しては各要素の特性を動作点近傍で線形近似した動態安定性で評価可能であるが、系統故障や大きな出力変動に対しては非線形性が顕著に表れるため、これをエネルギーの観点で考慮した過渡安定性として評価することが必要である。

## 2. 研究の目的

再生可能エネルギーの系統連系や直流送電に用いるインバータの、電力系統における過渡安定性をミニモデルおよび数値解析により評価し、これを模擬可能な実効値解析モデルを構築する。従来電力系統の過渡安定性評価で対象とされてきた系統故障に加え、出力変動を対象とした過渡安定性を明らかにする。また開発する実効値解析モデルを用いて、多端直流送電などの多数の系統連系インバータが接続された系統構成における過渡安定性の解析を行う。そのうえで、過渡安定性を改善する系統連系インバータの運用・制御方法を開発する。

## 3. 研究の方法

再生可能エネルギーの大量導入に向け、系統連系インバータの大きな出力変動や系統故障に対する電力系統の過渡安定性を評価するための解析モデルを構築するとともに、運転継続能力を高める変換器制御方式の検討を、ミニモデルを用いた回路実験および数値解析を用いて行った。ミニモデルを用いた回路実験のために、系統連系インバータを作成し、現在の模擬送電線路及び母線と組み合わせて試験を行った。ミニモデルを用いた一機系統の試験にもとづき、瞬時値解析モデルの妥当性を検証したうえで、これを縮約した実効値解析に対するモデル化を行った。開発したモデルを用いた実効値解析によって、複数インバータの系統連系を想定した多端子直流送電などの多機系統における過渡安定性の検討を行い、運転継続能力を高めるためのインバータの運用・制御方式について検討を行った。

過渡回路として電力系統における電圧・電流の状態量を扱う瞬時値解析での系統連系インバータモデルと、三相交流の正相成分を対象として交流回路として状態量を扱う実効値解析に用いる系統連系インバータモデルの応答を、ミニモデルでの試験結果と対比させることで、数値解析モデルの問題点を明らかにした上で妥当な解析モデルを構築した。

## 4. 研究成果

再生可能エネルギーの大量導入に向けた系統連系インバータの大きな出力変動や系統故障に対する電力系統の過渡安定性を評価に用いる実効値解析モデルの構築のために、瞬時値解析モデルに対応した実験ミニモデルのコントローラ部のプロトタイプを設計・制作した。サンプリング周波数 10kHz で AD 変換したインバータの電圧・電流値を用いて系統連系インバータを動作させた。またインバータ自身から生じる高調波成分の影響を低減する IIR タイプのデジタルフィ

ルタを構成して適用した。瞬時値解析モデルを用いた数値解析結果に比べ、回路図上に明示していない寄生インダクタンスや寄生キャパシタンスの影響により生じた雑音成分が大きく、コンバータのスイッチング周波数を 10kHz より高くするためには、さらに高周波数での状態量のサンプリングが必要であり、100kHz サンプリングでの処理が必要であることを示した。過渡安定度に対して、系統連系インバータでは系統電圧位相検出が重要であることから、既存技術を拡張した複素係数フィルタを用いた同期位相ループを構築し、その引き込み (pull in) および脱出 (pull out) 領域の評価を行うとともに、大きな系統故障等を想定した過渡条件を与えた場合に対する雑音成分と故障との高速な判別に適したデジタルフィルタを設計した。

自励式変換器を用いた多端子直流送電システムの既存交流電力システムへの導入が進められていることから、多端子直流送電システムの設計、解析、及び制御において、上記を適用した場合のシステムの動特性を記述する数式モデルの構築について検討を行った。電力システムの解析において用いられてきた発電機、電力変換器、変圧器ならびに送電線などの要素毎に動特性を詳細に記述した数式モデルに加え、動特性の背後にある物理的なメカニズムを抽出したシンプルな数式モデルを構築した。特に、多端子直流送電システムの計画および制御において物理的解釈及び系統的設計への展開を可能とする数式となるようモデルの構築を行った。変換器の制御入力をスイッチのオン時間と初期位相により表すモデル化を行うとともに、導出した数式モデルの妥当性について、数値シミュレーションにより検証を行った。交直混在システムとして直流送電線は、線路抵抗ならびに線路リアクタンスで構成されたモデル化を行い、中性点と同容量の平滑コンデンサで接地されているものとしてモデル化を行った。交流送電線については、送電線の短絡容量としてモデル化を行い、故障点位置や不平衡故障、故障時間、出力変動幅をパラメータとした解析条件を設定した。数値解析と並行して、購入した NI-PXI を用いたインバータの制御系を構築し、消耗品で購入したパワーデバイスおよびトランス・コンデンサを用いて主回路を作成したミニモデルでの、数値解析の検証を行った。

また自励式変換器による多端子直流システムの動特性モデルを用いて、直流多端子システム側で構成変化が生じた場合に、直流多端子システムのトポロジーの違いにより、システム全体の過渡安定性に現れる違いを明らかにした。2 つの非同期交流システムが端子直流システムを介して連系されている系統構成において、非同期交流システムの内、一つは動特性を有する 1 機の同期発電機と無限大母線を有し、これらは直流多端子送電線を介して 2 つの自励式変換器に接続されている。他方の交流システムは無限大母線のみが送電線を介して自励式変換器に接続されている。この設定は非同期交流システムにおいて動特性を呈する場合の最も簡単なケースを想定したものである。2 種類の異なるトポロジーの直流多端子システムを考え、一つは全ての直流母線が直流送電線を介して互いに接続しており、もう一つはその直流送電線を取り除いた場合に相当する。これらのトポロジーの設定は数値例において結果の差異が見やすいものである。交流システム間で有効電力を授受するような制御指令値を自励式変換器に与えた場合、多端子直流システムの構成により直流送電線に流れる電力潮流の大きさだけでなく方向も異なる。交流システムの直流多端子母線間の送電線に何らかの故障が発生し、2 回線送電から 1 回線送電に切り替わった場合の過渡応答について検討した結果、交流/直流多端子システムは過渡的応答を呈した後に定常状態に収束することを明らかにした。直流多端子システムの過渡応答は発電機の動揺と比べ早く収束している。単位長さあたりの線路抵抗と線路リアクタンスを用いて求めた直流送電線の時定数は同期発電機の時定数と比較して小さく、現象と一致することを確認した。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 3 件)

「交流・多端子直流送電システムに対する動特性モデルの構築と過渡解析」, 大橋悠介, 薄良彦, 石亀篤司, 舟木剛, 電気学会 電力系統技術研究会, 2019 年

「自励式変換器を用いた交直混在システムの動特性モデリングに関する一検討」, 大橋悠介, 薄良彦, 石亀篤司, 舟木剛, 平成 29 年電気学会電力・エネルギー部門大会, 2017 年

「SiC パワーデバイスのパワーエレクトロニクス適用における回路実装の課題」, 舟木剛, 平成 28 年度第 4 回応用科学研究所定例研究会, 2016 年

〔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〕

## 6. 研究組織

(1)研究分担者

(2)研究協力者

研究協力者氏名：薄良彦,石亀篤司

ローマ字氏名：Yoshihiko SUSUKI, Atsushi ISHIGAME

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。