

令和 4 年 6 月 3 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04346

研究課題名(和文) オンライン演算に基づく再生可能エネルギーの広域制御による電力系統安定化理論の開発

研究課題名(英文) Development of Stabilizing Control Method by Wide-Area Control of Renewable Energy Sources Based on On-Line Calculation

研究代表者

河辺 賢一 (Kenichi, Kawabe)

東京工業大学・工学院・助教

研究者番号：60634061

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：将来の電力系統では、太陽光発電などの出力予測が難しい再生可能エネルギー(再エネ)が大量導入されることで電力系統の運用状態の事前把握が難しくなり、既存の安定化技術だけでは発電機群の安定性を維持できなくなり、停電リスクの増加が懸念される。本研究では、近年技術開発が進んでいるリアルタイムの系統情報計測技術や広域間の高速度情報通信技術により、インバータで連系された再エネの出力を広域的かつ高速に制御することで、再エネの不確実性にも対応可能な新たな電力系統安定化システムを提案し、システム構築の核となる安定化制御理論を開発した。また、提案理論の有効性を計算機シミュレーションにより明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

電力系統における発電機群の安定性は、これまでインバータによる安定化の対象とされてこなかった。本研究では、インバータの高速な応答性を鑑み、制御システム次第では十分にその安定化が可能であることに着目し、これまでインバータの機能開発の分野において研究対象とされてこなかった発電機群の安定性向上理論を提案した。提案理論において、インバータの制御に広域リアルタイム計測技術や高速情報通信網などの新技術を適用するという発想にも、本研究の独自性がある。提案理論は、状態変化しやすい将来の電力系統に適用可能な電力系統安定化システムの構築に寄与する。

研究成果の概要(英文)：As the installed capacity of renewable energy sources is increasing, the role of inverters is becoming more important in the maintenance of power system stability. Therefore, in this study, we propose the use of a wide area control system to control the inverters of renewables in a coordinated manner to improve transient stability. Numerical simulation results demonstrate that this method can further improve transient stability compared with an autonomous voltage support function that is applied to existing inverters of renewables. The proposed wide area control system could be a promising approach to address the transient instability phenomena under unscheduled power flow conditions by periodically updating the control table based on real-time information.

研究分野：電力系統工学

キーワード：電力システム 再生可能エネルギー スマートインバータ 広域制御 安定化制御

## 1. 研究開始当初の背景

送電線への雷撃などの擾乱発生時に、電力系統内の同期発電機群が同期運転状態を維持する能力の度合いを過渡安定性と呼ぶ。過渡安定性が不十分な場合には、擾乱発生から数秒以内に発電機の同期が崩れ、停電の原因となる。わが国の電力事業では、同期発電機の同期外れ現象に伴う大停電を防ぐために、これまで系統保護リレーシステムや発電機の励磁制御システムなど、様々な系統安定化技術が開発・実用化されてきた。

既存の系統安定化技術は、予め計画した発電機の運用条件や予め想定した事故条件に対して、系統安定化制御動作の決定や制御系パラメータのチューニングを行うものが殆どである。しかし、出力予測が難しい再生可能エネルギー電源（再エネ）が大量導入されることで、時間的余裕をもった運用計画が難しくなる。既に欧州では、計画外の電力潮流が流れる事態が生じている。そのため、想定外の運用状態で系統事故に直面した場合、既存の安定化技術だけでは電力系統の安定運転を維持できない恐れがあり、将来の安定的な電力供給のためには、新技術を適用した系統安定化システムの開発が必要である（図1）。

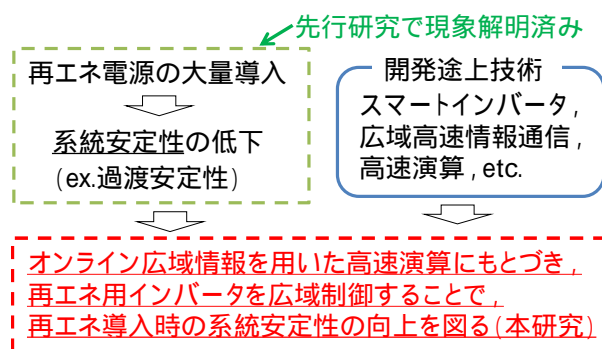


図1 本研究と先行研究の位置づけ

再エネの大量連系が予想される将来の電力系統で系統安定性を維持するための対策として、リアルタイムの計測技術、高速情報通信網、高速計算機などの新技術の適用に着目している。これら新技術の適用による系統安定化システムの高度化が、想定外の事象にも対応可能なシステム構築に寄与するのではないかと考えている。

また、近年では、系統貢献機能や通信機能をもたせた再エネの連系用インバータ（スマートインバータ）を適用することが米国を始めとして系統連系要件になりつつあり、今後の再エネの導入拡大やインバータの高速な応答性を鑑みると、スマートインバータを系統安定化システムの制御対象とすることが、将来の電力系統の安定運用に寄与するのではないかと考えている。

## 2. 研究の目的

本研究では、再エネが大量導入された電力系統における系統事故時の過渡安定性向上のために、再エネのスマートインバータを制御対象としたオンライン演算型の広域制御理論を開発することを目的とする。

## 3. 研究の方法

本研究では、太陽光発電および風力発電のスマートインバータを制御対象として、以下の順で研究を進めた。また、検討を進める中で、スマートインバータによる有効電力の制御が、周波数安定性にも影響を与えることを確認したため、過渡安定性と同じ時間領域で問題となる周波数安定性にも焦点をあて、その安定化を可能にするスマートインバータの制御理論にも取り組んだ。

### (1) 太陽光発電の無効電力出力の広域制御による過渡安定性の向上理論の開発

電力系統の過渡安定性向上を目的として、太陽光発電の無効電力を制御対象とした広域的な緊急制御理論の開発に取り組んだ。申請者の先行研究で、太陽光発電のインバータによる無効電力注入は、諸条件に応じて過渡安定性に良くも悪くも作用することを確認している。そこで、新たな理論により、過渡安定性の向上に寄与するインバータ群だけで無効電力を注入すれば、効果的に過渡安定性を高められると考えた。なお、無効電力は、実際に仕事には変換されない交流電力成分であるが、交流系統の電圧の大きさを変化させる効果をもつ。

オンライン演算型システムの実現のために、一つの想定事故に対して一度の時間領域シミュレーションを行うだけで、系統内に多数台あるスマートインバータ群の制御動作を決定できる方法の開発に取り組んだ。わが国で適用されているオンライン演算型の発電機脱調未然防止システムでも、一つの想定事故に対して一度の時間領域シミュレーションが実施されていることを鑑みると、この方法でオンライン演算型の緊急制御システムが実現できると考えられる。

提案理論の有効性は、シミュレーションによって検証した。電気学会や米国電気学会で公開されている電力系統モデルで太陽光発電の導入を模擬し、提案理論の有無による過渡安定性の違いを比較することで、提案理論による安定化効果を検証した。

#### (2) 風力発電の有効・無効電力出力の広域制御による過渡安定性の向上理論の開発

電力系統の過渡安定性向上を目的として、風力発電の有効・無効電力を制御対象とした広域的な緊急制御理論の開発に取り組んだ。太陽光発電に比べて発電設備容量の大きい風力発電は、より高い電圧階級に連系されることが予想される。つまり、風力発電は同期発電機を用いた大規模電源との電氣的距離が近く、有効電力の抑制が過渡安定性に与える影響も大きいと考え、本検討では風力発電の有効電力の抑制制御に新たに着目した。

理論開発に際しては、研究項目(1)で開発した太陽光発電の無効電力の広域制御手法(従来法)を拡張し、これを新たにWFの有効電力の抑制制御に適用可能にすることを目指した。まず、風力発電の有効電力制御のみに焦点をあて、理論の開発およびシミュレーションによる系統安定化効果検証を行った。次に、有効電力と併せて無効電力を制御対象とし、有効・無効電力の協調制御理論の開発およびシミュレーションによる系統安定化効果の検証を行った。

#### (3) 電源脱落時における周波数安定性向上のための再エネ出力の緊急制御理論の開発

前項までで検討した過渡安定性と同じ時間領域において考慮しなければならない周波数の安定性に焦点をあて、その安定化を可能にする再エネ出力の制御理論の開発に取り組んだ。再エネ出力の制御手法として、既存の系統連系用インバータでは用いられていない電圧制御型のインバータの活用に注目し、電力系統における電源脱落時の周波数安定化に寄与する基礎理論の開発に取り組む。電圧制御型のインバータは、電力系統の周波数と独立した周波数をもつ電圧を出力でき、電力系統の周波数低下に対して、交流電気回路の物理特性に従って、高速に有効電力を変化させる潜在性をもつと期待される。

提案理論による周波数の安定化効果は、電力系統における電源脱落事故を模擬した数値シミュレーションにより検証する。

### 4. 研究成果

#### (1) 太陽光発電の無効電力出力の広域制御による過渡安定性の向上理論の開発

電力系統の過渡安定性向上を目的として、太陽光発電の無効電力出力を制御対象とした広域緊急制御手法を提案した。

図2に、想定する広域制御システムの概要および制御フローを示す。図2の上部は時間軸を表しており、事故前の平常時に周期的に制御テーブル作成のための中央事前演算を行い、事故発生時に太陽光発電群(PV systems)に緊急制御指令を与えることを示している。

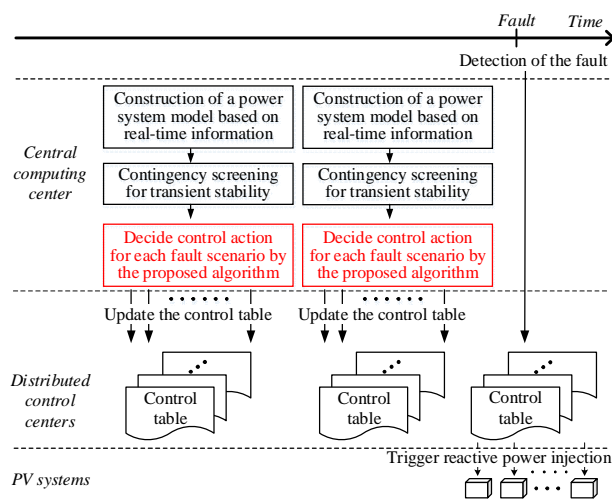


図2 太陽光発電の広域制御システムの概念図

中央事前演算では、オンライン系統情報に基づく電力系統モデルの作成、過渡安定性の観点で特に厳しいと想定される危険事故のスクリーニング、危険事故群に対する太陽光発電の制御動作の決定を行うものとする。このうち、本研究では、危険事故群に対する太陽光発電の制御動作を決定するための手法(図2の赤字のブロック)を提案した。つまり、提案法適用の前提として、

オンライン情報に基づき作成された電力系統モデル（基幹系統と縮約された負荷供給系統を模擬したモデルを想定）が既知であること、スクリーニングによって脱調に至る恐れの高い危険事故が既知であること、としている。これらの前提は、既存のオンライン事前演算型の脱調未然防止リレーシステムに基づいている。

得られた緊急制御動作は、例えば、(危険事故数) × (太陽光発電連系地点数) のサイズの制御テーブルの形で、ローカル制御所に送信・保存しておく。そして事故時には、事故情報を各ローカル制御所が受信し、各ローカル制御所が管轄する太陽光発電に対して制御指令を送信するものとする。

構想システムで重要な点は、中央事前演算の演算量をいかに少なくできるかにある。これは、時々刻々変化する電力潮流状態の変化に柔軟に対処するために、緊急制御動作の事前決定のための演算をできるだけ短い周期で繰り返し、制御テーブルを更新することを考えているからである。それに対して提案法では、一つの想定事故に対して一度の詳細シミュレーションを行うだけで、系統内の全ての太陽光発電の緊急制御動作を決定できる。具体的には、事前シミュレーションの結果から、発電機相角の第一波動揺が最も大きい発電機を危険発電機として同定し、系統内の各太陽光発電による無効電力注入が、危険発電機の回転子角速度の増加をその他の発電機群に対して相対的に抑制できるか否かを独自の指標によって判断し、事故後に無効電力を注入する太陽光発電を選ぶ。

シミュレーションによる検証の結果、提案法による太陽光発電の無効電力制御によって、無効電力を一定値に制御した場合(定値制御)と比較して、過渡安定性を高める効果を明らかにした。また、提案法により得られた安定化効果は、太陽光発電を自端電圧に基づき制御した場合(自端電圧制御)と比較して、より高いことを明らかにした。例えば、図3に示す地絡事故時における同期発電機の内部相差角の時間変化を比較すると、事故後の動揺の大きさが、提案法を適用した場合に最も小さくなることが示された。このとき、図4の無効電力の変化の比較から分かるように、自端電圧制御では事故点付近の太陽光発電を中心に全ての太陽光発電が無効電力を変化させるのに対して、提案法では事前に選定された太陽光発電だけが無効電力を注入しており、この動作の違いが安定化効果の違いを生むことを確認した。

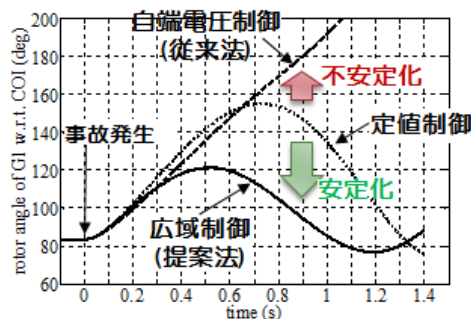


図3 同期発電機の内部相差角の波形比較

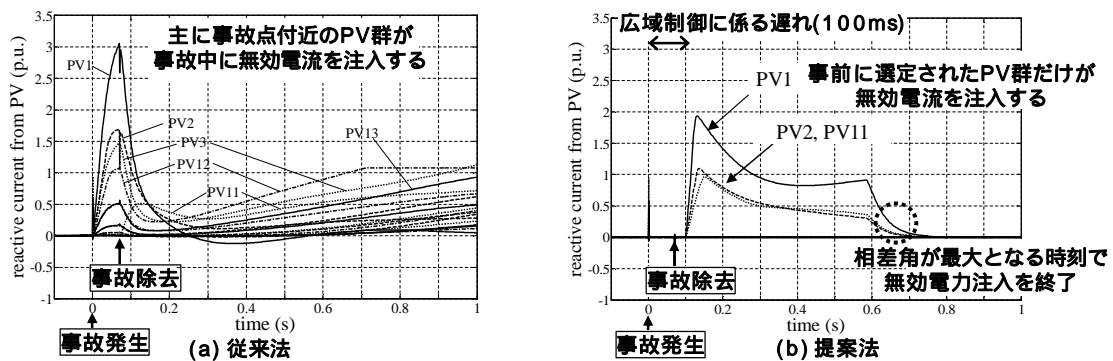


図4 太陽光発電の無効電力出力の変化

提案法では、一つの想定事故に対して一度の詳細シミュレーションにより緊急制御動作を決定できる。提案システムの考え方の元となっているオンライン事前演算型の脱調未然防止システムでも遮断発電機選択のために詳細シミュレーションが実施されていることを鑑みると、提案法も演算量の観点ではオンライン事前演算型の緊急制御システムとして適用できると考えられる。高速計算技術や高速情報通信ネットワークなどの新技術を適用することで、提案システムはリアルタイムに近い環境で緊急時の制御動作を決定でき、系統運用状態の変化に対する柔軟性をもった系統安定化システムとなりうる。

## (2) 風力発電の有効・無効電力出力の広域制御による過渡安定性の向上理論の開発

電力系統の過渡安定性向上を目的として、風力発電の有効・無効電力を制御対象とした広域的な緊急制御理論を開発した。

研究項目(1)で開発した手法を従来法と呼ぶこととすると、従来法では、再エネ用インバータの無効電力を緊急制御の対象としたのに対して、提案法では新たに有効電力を制御対象とした。系統事故時に再エネが有効電力の出力を停止することが過渡安定性向上に寄与することを参考に、提案法では提案アルゴリズムによって選定された特定のWF群において、緊急時に有効電力を抑制することにする。

また、提案法では、系統事故時における緊急制御動作の継続時間の決定方法を改善した。従来法では、事前シミュレーションにおいてCMの相差角の第一波動揺が減少し始める時刻を緊急制御動作の終了時刻とした。この事前シミュレーションでは、再エネ用インバータ群の出力指令値を事故前の値に固定しているため、緊急制御動作による安定性向上効果によって第一波動揺の減少開始時刻が早まることを考慮できていなかった。そこで提案法では、1回目のシミュレーションでWF群の緊急制御動作を決定(従来法に相当)した後、1回目の事前シミュレーションで決定したWF群の緊急制御動作を模擬した2回目のシミュレーションを行い、WFの緊急制御動作を改めて決定する。

シミュレーションによる検証の結果、新たに提案した有効電力の抑制制御は、先行研究で検討した無効電力の注入制御と組み合わせることで、過渡安定性向上に対する相乗効果を生むことを明らかにした。また、再エネの有効電力の制御は、系統事故時の周波数安定性にも影響を与えることを明らかにした。

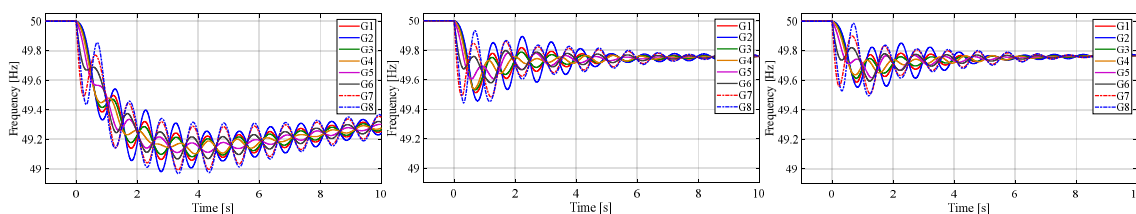
## (3) 電源脱落時における周波数安定性向上のための再エネ出力の緊急制御理論の開発

前項までで検討した過渡安定性と同じ時間領域において考慮しなければならない周波数の安定性に焦点をあて、その安定化を可能にする再エネ出力の制御理論を開発した。

再エネの系統連系に用いられている既存のインバータは、出力の制御において電流の指令値を算出する電流制御型の制御方式であるのに対して、近年、出力の制御において電圧の指令値を算出する電圧制御型の制御方式に注目が集まっている。これは、電圧制御型のインバータは、電力系統の周波数変化に対して、交流電気回路の物理的特性によって有効電力出力を高速に変化させる潜在性を持っているからである。

本研究では、電流制御型のインバータの適用を前提とした制御理論と、電圧制御型のインバータの適用を前提とした制御理論をそれぞれ開発した。電流制御型の制御理論では、連系母線の周波数や周波数変化率(RoCoF: rate of change of frequency)を入力として、系統事故の検出理論や系統事故時に有効電力の指令値を変化させる理論を開発した。また、電圧制御型の制御理論を新たに開発し、これと併せて、系統事故の検出理論や系統事故時に有効電力の指令値を変化させる理論を開発した。

開発理論の有効性について、周波数低下を伴う電源脱落事故を模擬したシミュレーションによって検証した。なお、本研究では、提案したインバータの制御理論と、再エネのエネルギー源(風力発電の場合は回転体、太陽光発電の場合はコンデンサ)との協調制御理論の開発には至らなかったため、提案理論の適用先として蓄電池を模擬した。シミュレーションによる検証の結果、電圧制御型のインバータは電流制御型のインバータと比べ、周波数安定化効果が高いことを確認した。例えば、図5に示す電源脱落時における同期発電機の周波数変化から分かるように、開発した電流制御型のインバータや電圧制御型のインバータの適用によって、電源脱落後の周波数低下幅やRoCoFの絶対値を抑制できることを示した。周波数低下幅やRoCoFの絶対値の抑制は、負荷遮断や再エネの運転停止を防ぐ効果を持つため、提案理論による再エネのインバータの制御は、電力安定供給に寄与することを示唆している。



(a) 周波数制御機能なし (b) 電流制御型の適用時 (c) 電圧制御型の適用時

図5 電源脱落時における同期発電機の周波数変化

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2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 Kenichi Kawabe, Toshiya Nanahara	4. 巻 Vol.140, No.10
2. 論文標題 Reactive power control of photovoltaic power generation systems by a wide-area control system for improving transient stability in power systems	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Electrical Engineering in Japan	6. 最初と最後の頁 736-746
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1541/ieejpes.140.736	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 -

1. 著者名 板井準, 河辺賢一, 七原俊也	4. 巻 Vol.141, No.6
2. 論文標題 風力発電の有効・無効電力出力の広域的緊急制御による電力系統の過渡安定性向上手法	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 電気学会 電力・エネルギー部門誌	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 K. Kawabe, and T. Nanahara
2. 発表標題 An Event-Based Wide Area Control System Using Inverters of Photovoltaic Generation for Improvement of Transient Stability in Power Systems
3. 学会等名 IEEE PES PowerTech 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 J. Itai, K.Kawabe, and T. Nanahara
2. 発表標題 Active Power Control of Wind Power Generation by Wide Area Control System for Improvement of Transient Stability in Power Systems
3. 学会等名 9th International Conference on Power and Energy Systems (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 板井準, 河辺賢一, 七原俊也
2. 発表標題 電力系統の過渡安定性向上のための可変速風力発電システムの広域的緊急制御手法
3. 学会等名 令和元年度電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会
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
---------------------------	-----------------------	----

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