

令和元年6月26日現在

機関番号：12701

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H04314

研究課題名(和文)再生可能エネルギーのDVSによる電力系統安定化制御方式

研究課題名(英文)Stabilization Control of Power Systems with Dynamic Voltage Support by Renewable Energy Sources

研究代表者

大山 力(OYAMA, Tsutomu)

横浜国立大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：40160642

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,400,000円

研究成果の概要(和文)：これまでの電力系統では、大規模電源群が同期運転を行うことで安定な電力供給が実現されてきた。しかし近年の太陽光発電の普及拡大に伴う電力潮流の複雑化や同期発電機の稼働台数の低下などにより、今後は同期安定度の低下が懸念されている。そこで本研究では、太陽光発電の有効電力および無効電力の制御を適切に活用することで、電力系統における送電線停止などの事故発生時にも適切に同期運転を継続することを目的とした安定化制御技術を検討した。多数台の太陽光発電は、事故直後の周波数上昇時に有効電力出力を抑制し、得られた空き容量により連系点電圧の維持を目指して無効電力制御を行うことで、同期安定度を向上できる結果が得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

一般に電力系統は無数の電源、送電線、電力需要などを含む大規模システムであるため、精緻な制御を実現することは容易ではない。本研究課題は、電力系統内に無数に分散配置される太陽光発電を分散的な制御論理により活用することで安定度を効率的に向上させる手法を開発したものであり、学術的には分散制御の応用と位置づけられる。

社会的には、電力の安定供給の重要性に加え、本研究の成果により電力系統の安定度向上が期待されることにより、太陽光発電の一層の普及拡大にも寄与する意義を有する。

研究成果の概要(英文)：Stable power supply has been realized in power systems based on synchronized operation of conventional generators. However, the synchronous stability might be decreased in accordance with integration of photovoltaics because of more complex power flow condition or decreased number of synchronous generators in operation. In this paper, we have developed a decentralized stabilization control method based on active and reactive power control of photovoltaic systems. First, photovoltaic systems reduce active power output when locally measured system frequency increases. Second, reactive power of photovoltaic systems are controlled based on droop characteristic to keep local voltage by using reserve capacity of power conditioning sub-systems as the capacity was procured by the active power curtailment. It was shown that synchronous stability can be improved by the proposed method successfully through numerical simulations.

研究分野：電力系統工学

キーワード：電力系統 太陽光発電 同期安定度 分散制御 周波数制御 電圧 - 無効電力制御

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

電力の安定供給の実現のために、電力系統における同期安定度の維持は非常に重要な課題である。送電線の短絡故障などの事故発生時には、事故点に近いエリアに含まれる発電機群が加速されることで発電機間の位相差が広がり、脱調に至ることが危惧される。この現象は一般的に“過渡安定度”として議論されている。近年、太陽光発電や風力発電などの再生可能エネルギーを活用した小規模分散型電源（再エネ電源）の普及が進んでいるが、これにより過渡安定度は以下のような観点から変化する可能性がある。

(1) 電力潮流の複雑化

再エネ電源の普及が進むと、電力系統内の地域間での導入量や発電量の差異に応じて電力潮流が変動し、過渡安定度も不確実に変化する可能性がある。需要地近郊の再エネ電源により、各エリアの電力需要が一様に低下したように見える場合は、地域間の送電量が低下することで過渡安定度が改善される可能性がある。しかし、地域間での導入量や発電量の差異が大きくなり、地域間の長距離にわたる送電量が増加するような場合には平常時から地域間の位相差が広がりやすく、事故発生時の過渡安定度も低下しやすい傾向となる。

(2) 慣性力の低下

再エネ電源が供給力の内の大きな比率を担う場合、入れ替わりに在来の同期発電機群は停止することとなり、供給力に占める同期発電機の比率が下がる。これにより、電力系統の慣性力が低下すると、事故発生時の発電機は一層加減速されて発電機間の位相差も広がるため、過渡安定度が低下する要因となる。

以上の通り、再エネ電源の普及拡大に伴い過渡安定度も不確実となりやすく、より適切に過渡安定度を把握することが重要となる。また、再エネ電源の出力は、系統連系用パワーコンディショナ（PCS）の機能によりある程度制御することが可能であるため、その活用により過渡安定度を改善できる可能性も期待される。

2. 研究の目的

過渡安定度の低下が懸念される、再エネ電源の普及が一層進展した将来の電力システムを想定して、主として以下の3点の課題に取り組む。

[研究目的1] 第N波不安定現象を考慮した安定判別手法の検討

安定限界付近で電力システムが運用されている条件下では、事故発生後に複数回の電力動揺を経て脱調に至る“第N波不安定現象”が生じる可能性がある。この現象は非線形力学系理論にしたがって説明することが可能であるが、電力システムの解析モデルは次数の高い大規模モデルとなるため、その精緻な解析は容易ではない。そこで本研究では、電力システムにおける事故発生後の動的挙動が不安定に至るケースではカオス性を有することに着目し、事故除去直後のごく短い時間での解軌道を分析することで、より早期のうちに安定性を予見する技術の開発を目指した。

[研究目的2] 非線形モードの解析手法の検討

系統事故時における発電機の過渡応答には電力システムの安定度に関わる電力動揺と非線形モードが重畳して発生する。この非線形モードは、過渡安定度問題の1つである第N波不安定現象に関与しており、定常状態における位相（周波数）の揺らぎ情報には出現しないモードである。第N波不安定現象の解明のためには、非線形モードの解析が必要になる。そこで、過渡応答波形から非線形モードだけを抽出するための解析手法の開発を目的とする。

[研究目的3] 再エネ電源の有効・無効電力制御を活用した安定化制御手法の開発

事故発生後の過渡的な時間領域において、再エネ電源のPCSの有効電力および無効電力を適切に制御することで、過渡安定度の向上が期待される。ここで、小規模かつ分散配置された無数の再エネ電源に対して、集中的な方式により制御信号を送信することは容易では無いため、本研究では分散的な方式によりPCSが系統安定化に貢献できるような制御方式の開発を目指した。

3. 研究の方法

以下、研究目的1～3に対応した研究方法を示す。

(1) 第N波不安定現象を考慮した安定判別手法の検討

本項目は、研究代表者らがこれまでに開発した、実効値に基づく過渡安定度解析プログラムを用いた数値解析により実施した。西日本の60Hzの電力システムの特徴を模擬した電気学会標準WEST10機系統モデルを用いて、送電線における三相地絡故障の発生を想定してシミュレーションを実施した。事故除去時間や事故点、さらには再エネ電源の発電量などの条件を変化させることで、事故除去後に安定に復帰できるケースと、複数回の動揺を繰り返した後に脱調にいたる第N波不安定ケースとを、それぞれ生成した。一般に、電力動揺が安定に復帰するケース

では、最終的な定常解が同一となるケースでは、電力動揺の初期点をわずかにずらした(摂動)場合でも同一の平衡点へと収束するが、不安定ケースでは最終的に発散に至るため、摂動に対して異なる最終値へと軌道が進展する特徴を有する。したがって、事故除去直後の動作点の近傍に別の動作点を仮定し、ここからの解軌道を合わせて導出すると共に、両解軌道間の距離を評価することで安定判別が可能になると期待される。ここで解軌道間の距離を評価する際には、カオス理論にて広く用いられるリアプノフ指数が候補となるが、電力系統の動特性は多次元のモード空間上で説明されるため、次数が非常に高い特徴を有する。そこで、特定のモードに着目して解軌道を評価すべきかどうか、合わせて検討を実施した。

(2) 非線形モードの解析手法の検討

定常状態の揺らぎ情報(計測データ)から安定度に関わる電力動揺のモード数、減衰率(固有値実部)、動揺周波数(固有値虚部)を推定することができれば、過渡応答波形から安定度に関与する電力動揺だけを除去することができる。その結果、非線形モードのみを抽出することが可能になる。そこで、シミュレーションや計測データを用いて系統解析を行い、これらの推定手法を提案した。

(3) 再エネ電源による安定化制御手法開発

一般に、事故除去後の電力動揺を適正化するためには、発電機から電力系統へ注入される電氣的出力を調整することが有効となる。電力系統内の負荷を増加させれば、発電機からの電氣的出力も増加するため、発電機の加速エネルギーを低減する効果が得られる。また、電力システムの電圧を高く調整することで、送受電端間での電圧位相差が同一の場合での送電量は増加するため、やはり発電機の加速エネルギーを吸収できると期待される。したがって、発電機が大きく加速されるタイミングで電力需要を増加させると共に、電力システムの電圧を安定化させることで、一般的には過渡安定度の向上が達成できると考えられる。

上記の概念を実現するために、再エネ電源のPCSの制御機能を活用する。需要地近郊に導入されている再エネ電源の出力を抑制すると、等価的に電力需要を増加できる。また、電力システムの電圧は無効電力制御により調整できるため、PCSの無効電力制御を活用して電圧の安定化制御を実施する。ここで、電力システム全体の情報に基づいてリアルタイムの解析を適用することで、最適な制御量を都度導出することができるが、過渡安定度の観点からの安定化制御は十分に高速に行う必要があるため、解析や通信に要する時間の観点から前述の通り無数の再エネ電源に対して集中的な制御方式を適用することは容易ではない。そこで本研究では、特に太陽光発電に注目して、PCSが連系点で観測できる電圧や系統周波数の情報を活用したローカルな制御を適用することで系統安定化を目指す方式を開発した。具体的には、系統周波数が増加した際に太陽光発電が出力を抑制すると共に、これにより生じたインバータの空き容量を活用し、無効電力をドループ制御により調整して電圧の安定化を目指す方式とした。

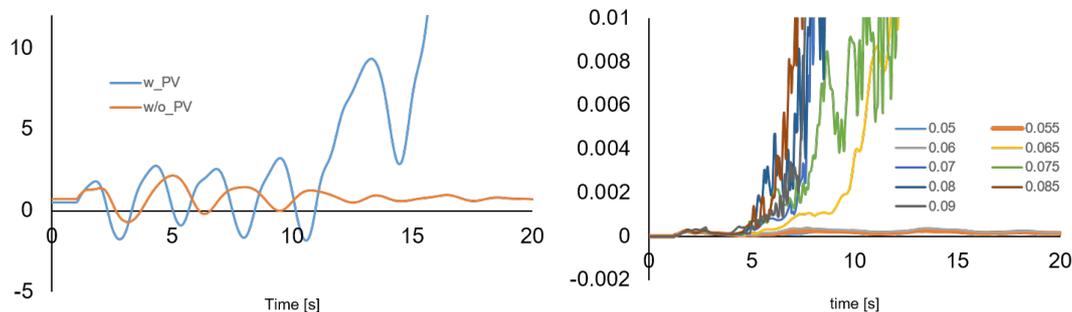
まず、本学にて開発した実効値による過渡安定度解析プログラムを用いて、前述の電気学会標準WEST10機系統モデルに太陽光発電を追加したモデルにおいて、提案手法を適用せずに太陽光発電が常に出力最大化を目指して制御された場合に、不安定となる事故条件を生成し、同一の条件に対して提案手法を適用してその効果を確認した。また、各PCSは連系点での情報に基づいて電力システムの電圧や周波数を検出するが、検出の遅れや系統擾乱発生時の精度についても別途確認する必要がある。そこで、PLL(Phasor Locked Loop)の挙動を適切に解析するために、電力中央研究所開発の電力系統瞬時値解析プログラム(XTAP)を用いて同様の過渡安定度解析用のモデルを整理し、PCSのより詳細な挙動を確認しながら提案手法の有効性を確認した。さらに、PCSの制御の遅れについては実験的にも確認する必要があると考え、系統連系用インバータを調達して実験検討も実施した。

4. 研究成果

以下、研究目的1~3に対応した研究成果について述べる。

(1) 第N波不安定現象を考慮した安定判別手法の検討

太陽光発電の普及拡大により安定性が低下したケースとして、図1(a)に示す動揺波形に基づいて数値解析を進めた。ここで、太陽光発電が含まれない場合のモデルでは事故発生に対して安定に復帰しているのに対し、太陽光発電が含まれるケースではおよそ11秒あたりで動揺が拡大し脱調に至っていることがわかる。一方で、事故除去直後の解軌道に摂動を与え、その後の軌道間の距離をリアプノフ指数により評価した結果を同図(b)に示す。ここでは事故除去時間が異なる複数の曲線が示されているが、実波形は事故除去時間が0.065秒以上の場合に不安定となっている。同図では不安定な場合には5秒あたりから指標が急増して不安定ケースであることが示されており、安定判別の閾値を適切に定めることができれば有効に機能することが期待されるものの、提案手法では摂動の有無に応じた2つの解軌道の解析が必要となるため、通常の過渡解析に比較して同じシミュレーション時間の解析に2倍の計算時間を要するため、現状では解析の高速化は実現できておらず、今後の課題である。



(a)実波形（発電機相角） (b)リアプノフ指数による評価指標

図1 シミュレーション結果

(2) 非線形モードの解析手法の検討

提案手法により、定常状態の揺らぎ情報（計測データ）から安定度に関与する電力動揺のモード数、減衰率（固有値実部）、動揺周波数（固有値虚部）を推定することで、過渡応答時の波形から安定度に関わる電力動揺波形だけを推定することが可能になったため、非線形モードのみを抽出することができるようになった。

また、推定手法を応用することにより、地域間の発電機間で発生する電力動揺に関する簡略的なボード線図を示すことが可能になった。この結果から、制御対象モデルを推定することができるため、系統安定化制御手法のコントローラ設計における制御効果向上に寄与することができる。

(3) 再エネ電源による安定化制御手法開発

太陽光発電を追加した電気学会標準 WEST10 機系統モデル(図2)において提案方式を適用することで、元々は不安定となっていたケースにおいても安定化が達成できる結果を得た。具体的な波形の例を図3に示した。ここで、同図中の Case1 は提案手法を適用しない場合に動揺が発散していく様子であり、Case4 は有効電力と無効電力の双方を制御することで動揺が安定化できた事例である。また、本提案方式を適用することで、過渡安定度の指標となる臨界故障除去時間を長くできる結果を得た。

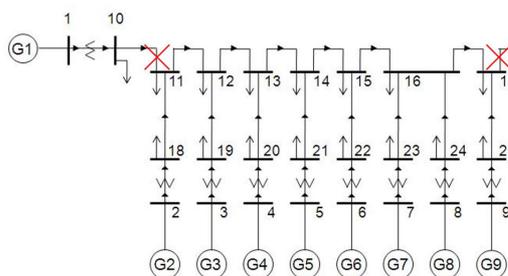


図2 電気学会標準 WEST10 機系統モデル

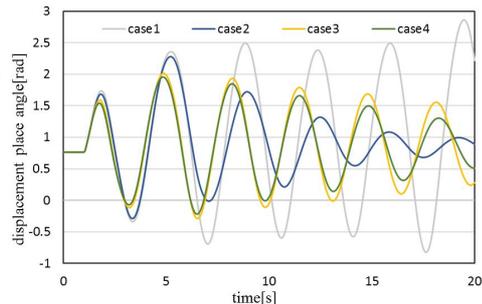


図3 電力動揺波形の例

瞬時値解析により提案手法を検証した結果も概ね同様であり、過渡安定度を適切に改善できる結果を得た。特に不平衡故障の発生などが生じた場合には、系統電圧に離散的な変化が生じることで周波数の検出誤差が大きく現れるなどの問題点が確認できたが、適切に動作の閾値を設定することで、系統安定化に際して大きく問題となるような誤動作を回避できる結果を得た。

5. 主な発表論文等

〔学会発表〕(計15件)

- [1] Takuhei Hashiguchi, Takao Tsuji, Tsutomu Oyama: “Visualization Method of Power System Parameters Based on Phasor Measurement Units Data”, Proc. of the International Conference on Electrical Engineering (ICEE), 2019
- [2] 鴨田啓二, 辻隆男, 大山力: “無効電力の必要制御容量を考慮したPVの分散制御による電力系統の安定化制御方式”, 平成31年電気学会全国大会, 2019
- [3] 鴨田啓二, 辻隆男, 大山力: “瞬時値解析に基づくPVの分散制御による電力系統の過渡安定度向上手法”, 平成30年電気学会電力技術電力系統技術合同研究会, 2018
- [4] Takuhei Hashiguchi, Takao Tsuji, Tsutomu Oyama: “Analysis Method on Power System Oscillation in Phasor Measurement Data”, Proc. of the International Conference on Electrical Engineering (ICEE), G1-2178, 2018
- [5] Hossam Aboelsoud Eid Elhassaneen, Takao Tsuji: “Transient Stability Analysis with Wind Power Integrated HVDC Transmission System in the Egyptian Grid”, Proc. of the

- International Conference on Electrical Engineering (ICEE) 2017, 2017
- [6] Hossam Aboelsoud Eid Elhassaneen, Takao Tsuji, “Transient Stability Enhancement by Active/Reactive Power Control of Hybrid HVDC in the Egyptian Power Grid with Wind Power Integration”, Proc. of the Solar Integration Workshop 2017, 2017
- [7] 緒方溪介, 橋口卓平, 辻隆男, 大山力: “PSSによる系統安定化手法に関する解析”, 電気・情報関係学会九州支部連合大会, 04-2P-01, 2017
- [8] 松浦隆誠, 橋口卓平, 辻隆男, 大山力: “PMUデータに基づく電力動揺の解析手法に関する研究”, 電気・情報関係学会九州支部連合大会, 2017
- [9] 羽田野晶嗣, 辻隆男: “電力系統の力学系理論に基づいた安定判別手法”, 電気学会電力技術電力系統技術合同研究会, 2016
- [10] 古林薫, 辻隆男, 大山力, 内田健康: “過渡安定度向上のためのPVの有効・無効電力の分散制御方式”, 電気学会電力技術電力系統技術合同研究会, 2016
- [11] Akitsugu Hatano, Takao Tsuji: “A Transient Stability Assessment Method of Power Systems by using Dynamical Systems Theory in Japanese 60 Hz Power System with Photovoltaics”, Proc. of the 6th Solar Integration Workshop, 2016
- [12] Kaoru Furubayashi, Takao Tsuji: “A Transient Stability Improvement by Decentralized Non-Linear Control of Active and Reactive Power of PV”, Proc. of the 6th Solar Integration Workshop, 2016
- [13] リジャル キラン, 橋口卓平, 辻隆男, 大山力: “非線形性を考慮したロバスト制御手法によるコントローラの制御効果”, 電気・情報関係学会九州支部連合大会, 12-2A-06, 2016
- [14] Kiran Rijal, Takuhei Hashiguchi, Takao Tsuji: “Robust Control Design Method with Consideration for Power System Uncertainty”, Proc. of the International Conference on Electrical Engineering, 2016

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名: 辻 隆男

ローマ字氏名: (TSUJI, Takao)

所属研究機関名: 横浜国立大学

部局名: 大学院工学研究院

職名: 准教授

研究者番号(8桁): 00432873

研究分担者氏名: 橋口 卓平

ローマ字氏名: (HASHIGUCHI, Takuhei)

所属研究機関名: 九州産業大学

部局名: 理工学部

職名: 教授

研究者番号(8桁): 30452816

(2) 研究協力者

該当なし

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。