

平成 30 年 6 月 5 日現在

機関番号：17104

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05943

研究課題名(和文)再生可能エネルギー有効活用のための広域情報に基づく電力システム信頼度監視制御

研究課題名(英文)Power System Reliability Monitoring and Control Based on Wide Area Measurements for Efficient Use of Renewable Energy

研究代表者

渡邊 政幸(WATANABE, Masayuki)

九州工業大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：90398115

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)：電力システムにおける広域観測情報を利用することで、不確定状況下においても特性の異なる電源が信頼性に与える影響度を定量的に評価する方法と、安定性向上のための制御方式を検討した。システム全体の慣性力の低下を実測データから評価するとともに、ダンピング向上のための観測情報を制御入力とする系統制御方式ならびに仮想的な慣性力向上による周波数変動抑制制御方式を提案し、その有効性を示した。

研究成果の概要(英文)：A method to evaluate quantitatively the influence of renewable energy sources which have different characteristics and a control method to improve the power system stability by using wide area measurement information in the power system with uncertainties, have been investigated. The fact that the inertia of whole power system was decreasing, has been evaluated by using measured actual data. A control method to improve the system damping by using measured data as an input to the controller has been developed. Also, a control method to suppress the frequency deviations by using virtual inertia has been developed.

研究分野：電力系統工学

キーワード：電力系統工学 電力系統監視 安定化制御

## 1. 研究開始当初の背景

利便性の高い電気エネルギーは不可欠な社会基盤であり、特に近年は生活面、企業活動、工場等の生産設備に至るまであらゆる面で情報通信技術が浸透し、ごく短時間の停電や瞬時電圧低下でも影響が多大となることから、高い供給信頼性の確保は大命題である。電力システムの構造として、電力会社による大規模集中型運用による供給形態の維持も重要であるが、環境意識の向上とともに、制度面での優遇措置から太陽光発電をはじめとした再生可能エネルギーの大量導入が加速し、連系量が一部制限される状況にまで至っている。システムの複雑化、特性の変化や不確定性の増大は避けられず、運用面ではより一層厳しい対応が求められる。

こうした大きな変化に対し、電力システムの監視・制御のための WAMS (Wide Area Measurement System) の導入は各国で進められ、複数地点において電圧や周波数等を同期して計測し、情報網での伝送・集約・処理を経て系統運用に供されている。これまでに、研究代表者は、電力システムのダイナミクスの監視・制御の方策を具体的に検討し、同期計測技術を用いたシステム状態推定方法や系統制御方法について、その有用性を明らかにしてきた。効果的な系統制御には、実測に基づく監視情報を活用することで大きな効果が期待できる。

特性面の変化を考えると、従来では同期発電機を利用して交流の電力を発生する方式が採用され、一方で、太陽光発電装置や蓄電池などの電力貯蔵装置では直流から交流への電力変換装置 (インバータ) を介して電力システムと連系される。同期発電機の特徴として回転部分をもつ大きな慣性によって、系統擾乱発生時においても回転部へのエネルギーの蓄積・放出によってもとの状態に戻ろうとする作用を有し、システムの周波数を維持し安定化しようとする効果がある程度期待できる。これに対して電力変換装置を介した電源は特性が大きく異なり、この慣性力を有していないことから、系統擾乱に対する制動効果を得にくい。こうした電源の割合の増加に伴ってシステム全体の慣性力が低下し、定常時における周波数変動への影響や、特に擾乱発生後の安定運用に支障を来すことが懸念される。2030年には国内総需要の約1/4に相当する設備容量の太陽光発電導入目標が掲げられており、供給信頼度の大きな低下が懸念される。

## 2. 研究の目的

本研究では、今後増加することが見込まれる電力変換器連系型電源、特に太陽光発電の大量導入シナリオ下における電力システムの特性変化に対し、状態監視制御技術を適用することによる定量的評価と系統制御による供給信頼度向上のための方法を考える。とくに太陽光発電は大幅な増加が見込まれる

が、その多くは一般住宅向けであり個々の状態を把握することは困難であることから、システム全体に対する影響評価が行えない。マクロ的に捉えて評価することが重要であり、そのためには WAMS による広域の観測情報を活用することが有用であると考えられる。

本研究における具体的な検討課題として、

- ・ 監視情報を利用した信頼度評価基準の検討
- ・ 電力動揺抑制制御設計とその効果の検証
- ・ 変換器連系型電源の特性を考慮したシステム安定度の評価と安定化制御

を挙げ、太陽光発電大量導入時の電力システムにおける系統監視情報を用いた信頼度評価と信頼度向上のための制御方法の有用性を明らかにする。

## 3. 研究の方法

電力変換器を介して連系される電源の増加により、特に擾乱が発生したときの動揺収束性に関わる同期化力や慣性力の低下が懸念されることから、これらを定量的に評価する方法を示した。評価結果に対する電力システムの安定度向上策として、特に擾乱発生後にもとの状態に戻ろうとする能力を向上させる制御方式を構築した。主に電力システムシミュレーションを用いて、広域監視を想定した電力システムモデルを用いて、実運用状態を想定した観測データから諸量を推定するための方法を構築した。また、太陽光発電の大量連系を想定したシステムモデルを用いて、導入量と信頼度の関係性を調査し、安定度向上のための監視情報を用いた制御方式、さらにインバータ連系型電源における制御方式を検討し、その有効性の検証を行った。

(1) 観測情報を用いた電力システム信頼度指標の推定について、同期発電機群がもつ慣性の揺れの特徴を位相計測装置 (PMU: Phasor Measurement Unit) で取得した計測情報から捉え、その時間的変化を監視することで、もとの状態に戻ろうとする作用の変化を評価する方法を検討した。変換器連系型電源は慣性力を有しておらず、導入量の増加にともないシステム全体としての慣性力の低下が懸念されることから、慣性力の変化について定量的評価を検討した。西日本の実電力システムを評価対象として実測データに対する統計処理による特徴抽出により、システムに関する詳細な情報が不明であっても観測情報から定量的に諸量の時間的変化を評価した。このとき、広域の同期計測情報から特性を抽出して、太陽光発電の導入量と各評価指標の変化量の相関性を評価した。

(2) 動揺抑制による電力システム安定化について、同期計測情報から広域電力動揺の特性を抽出することによる特性把握と安定化制御系の設計方法について検討し、効果的なシステム安定化を図る方法を検討した。ここ

では同期発電機の励磁制御による補償を考え、計測情報を用いる利点を活かした適応型の制御器設計方法を構築した。広域計測情報を用いてシステム状態をフィードバックし、計測情報を制御則の一部として活用する制御方式を検討した。とくに擾乱発生時における制動力向上を考えて電力動揺を抑える制御設計を検討し、システム全体に対する効果を系統シミュレーションによって評価した。

(3) インバータ連系型電源の増加による電力システム特性への影響に対し、近年、電力変換器に対して同期発電機が持つ慣性力の特性を変換器制御によって実現し、仮想的な同期発電機が連系されているように振る舞う方式が考案されており、こうした制御方式の導入がシステム特性に少なからぬ影響を与えることから、その影響度を評価するとともに、制御効果向上のための検討を行った。この制御方式が模擬できる解析モデルを構築し、全電源に占める太陽光発電の割合が増加したシナリオを想定した電力システムモデルを用いて、系統シミュレーションにより幾つか代表的なシナリオを設定して解析を実施し、その影響度を評価した。また、特に有効電力出力の配分の最適化を行うことで、周波数変動抑制効果の向上を図り、その効果を検証した。

#### 4. 研究成果

(1) 動揺特性を支配する系統の慣性の変化を、計測装置 (PMU) で取得可能な情報から捉えることを試みた。西日本の電力システムで取得した位相差情報から、支配的となる広域動揺モードの動揺周波数を算出することで、等価的にシステム全体の慣性の変化を評価した。これは、電力システムにおいていくつかの仮定を設定することで、慣性定数の平方根と動揺周波数が反比例の関係で表されることを用いた。とくに低需要期の晴れの日の昼間時間帯においては全電源に占める太陽光発電の割合が多くなり、相対的に同期発電機による発電が減少することから、システム全体の慣性が低下することになる。支配動揺モードの動揺周期について、太陽光発電の累積導入量が異なる過去のデータとの比較を行った結果、雨の日においてはほとんど変化が見られなかったのに対し、休日の晴れの日では明らかに太陽光発電導入増加に伴う慣性の低下傾向を捉えることができた。

また、日射量と支配モードの動揺周波数、すなわち等価的な慣性との相関関係を統計的に求め、その影響度を評価した。強い相関は見られなかったものの、過去のデータと比較すると相関度が高くなっている結果が得られ、少なからぬ影響が現れていることが示唆された。このように計測データから電力システムにおける特性変化を定量的に評価できる可能性を示し、実データに基づく電力システムのモデリングや系統シミュレーシ

ョンの妥当性検証に活用されることが期待される。

(2) 観測情報を用いた電力システム信頼度評価のための特性抽出方法を検討した。特性の異なる電源が電力システムに連系されると、支配的な電力動揺モードの特性が変化することに着目し、広域計測情報を用いて動揺特性指標を求める方法を検討した。動揺特性は各動揺モードに対する固有ベクトルを解析的に求めることで説明がなされるが、実システムにおいては求めることが難しく、計測情報から位相の揺れを固有ベクトル相当の指標として可視化することで特性を評価した。系統シミュレーションを用いて、太陽光発電の増加といった電源構成の変化を模擬した条件を設定して解析を行った結果、発電機構成や系統構成の変化に伴う特性変化が計測情報から捉えられることがわかった。また、系統シミュレーションで得られる結果と実系統で取得した PMU データから得られた結果の対比を行ったところ、発電機構成や系統運用の変化に伴う特性変化が観測情報から説明できることがわかった。

(3) 電力システムモデルから算出される固有ベクトルと電圧位相や電流の感度評価を組み合わせて算出した指標を用いて、支配的な電力動揺モードの伝搬特性を可視化した。ここでは、発電機の内部相差角の微小変化に対する各母線の電圧振幅および電圧位相と、各線路の電流振幅の感度を算出することで、動揺成分に対する感度評価を可能とした。得られた感度に対して固有ベクトルを対応づけた指標を算出することで、着目する電力動揺モードにおける各回路網変数の変動分を定量的に評価できるようになった。電力システムモデルに対して適用し、支配動揺モードに着目した動揺解析を行った結果、支配モードに寄与する発電機が特定できることがわかり、また、電流分布において特徴的な結果が得られることもわかり、本指標によってモードの追跡や監視が可能であることが示唆され、PMU の最適配置や動揺抑制のための制御への展開が考えられる。

(4) 固有ベクトルと感度評価に基づいて支配動揺モードのダンピングを向上させる制御方式を検討した。電力システムモデルを用いて検討したところ、感度評価に基づく指標が制御器による動揺抑制効果と高い相関があることがわかり、発電機励磁系の補助装置である系統安定化装置 (PSS: Power System Stabilizer) の制御入力信号として、動揺抑制効果が高くなる信号の選定に有用であることがわかった。これにより、巨大で複雑な電力システムにおいて困難となる入力信号の選定が容易に行えることが期待される。

指標で選定した入力信号をグローバル信号として入力するとともに、発電機自端で取

得できる信号をローカル信号として入力することで二入力型の制御器を構成し、グローバル信号喪失時においてもローカル信号による制御効果を発揮する構成とした。それぞれの入力信号に適した位相補償器を固有値に基づく方法で設計し、西日本の電力システムを模擬したシミュレーションを用いて検証を行った結果、系統故障を想定した大きな外乱に対して動揺抑制効果を有することが確認できた。

(5) 電力変換器に仮想的な慣性を持たせることによる系統制御方式について、周波数変動を許容範囲内に維持するため、その有効電力出力の配分を最適化する方法を検討した。メタヒューリスティクス手法の一つの方法である粒子群最適化 (PSO: Particle Swarm Optimization) を用いることで、複数のシステム条件に対応できる適切な出力配分を比較的容易に求めることができた。最適化の過程で考慮していなかったシステム条件においても有効であることが確認できた。この方法により、系統故障発生後の周波数偏差を最小限に抑えることが可能となり、不要な負荷遮断の回避やシステム全体の周波数安定化に寄与できることが期待される。

本研究を通じて得られたこれらの成果は、従来の回転機を用いた電源とは異なる特性をもつ電源の増加により低下する同期状態を保ちもとの状態に戻ろうとする能力について、観測に基づいて評価した上で系統制御により改善を行う方法であり、電力システムの信頼性向上に寄与できる。

#### 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 1 件)

- ① Yoshiaki Matsukawa, Jun Terashi, Masayuki Watanabe, and Yasunori Mitani, Power Systems Inertia Evaluation associated with PV Installation by Frequency Analysis of Inter-Area Oscillation based on Phasor Measurements, Journal of International Council on Electrical Engineering, Vol. 7, No. 1, pp. 153-158, 2017, 査読有

[学会発表] (計 12 件)

- ① Hibiki Takahashi, Masayuki Watanabe, and Yasunori Mitani, Wide-Area Damping Control by Selection of Location and Input Signal for PSS Using Modeshape and Sensitivity, 24th International Conference on Electrical Engineering, 2018

- ② Fathin Saifur Rahman, Thongchart Kerdpol, Masayuki Watanabe and Yasunori Mitani, Active Power Allocation of Virtual Synchronous Generator Considering Multiple Operating Scenarios, Fifth International Conference on Electric and Energy Conversion Systems, 2018

- ③ 高橋響生・渡邊政幸・三谷康範: Modeshape および感度評価による電力系統動揺解析, 平成 29 年度 (第 70 回) 電気・情報関係学会九州支部連合大会, 2017

- ④ 松川義明・渡邊政幸・三谷康範: 同期位相情報に基づく広域動揺の周波数解析による電力系統の慣性の評価, 平成 28 年電気学会全国大会, 2016

- ⑤ 高島一也・渡邊政幸・三谷康範: 位相計測情報を用いた固有ベクトル推定による広域動揺特性の評価, 平成 27 年電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会, 2015

- ⑥ 佐藤量介・渡邊政幸・三谷康範: モデル化誤差を補償する位相情報に基づく電力系統安定化制御系設計, 平成 27 年電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会, 2015

[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]

特になし

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

渡邊 政幸 (WATANABE, Masayuki)  
九州工業大学・大学院工学研究院・准教授  
研究者番号: 90398115

##### (2) 研究分担者

( )

研究者番号:

##### (3) 連携研究者

( )

研究者番号:

##### (4) 研究協力者

( )