

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 13 日現在

機関番号：10106

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2013

課題番号：24656179

研究課題名(和文) ウィンドファームの慣性エネルギーを利用した電力系統の安定化制御

研究課題名(英文) Power System Stabilization using Inertia Energy of Wind Farm

研究代表者

田村 淳二 (TAMURA, JUNJI)

北見工業大学・工学部・教授

研究者番号：40171897

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円、(間接経費) 900,000円

研究成果の概要(和文)：太陽光発電システム(PV)が導入されている電力系統をモデルとして、故障時運転継続能力(FRT)の有無も含めて故障に対する安定度解析を行った。その結果、系統に無限大母線があると想定できる場合、PVがFRT機能なしの場合の方が系統の安定度が高くなる。一方、系統に無限大母線があると想定できない場合、PVがFRT機能なしの場合の方が系統の安定度が低下し、特にこの場合には同期機が減速脱調するとの結論が得られた。続いて、可変速風力発電機から成るウィンドファームにおける風車の慣性エネルギーを利用し、ノッチフィルターを利用して系統周波数変動を抑制する制御法を構築し、その有効性を確認した。

研究成果の概要(英文)：Stability analyses have been performed on the model system including Photo Voltaic system with considering the existence of the Fault Ride Through (FRT) capability. As a result, stability of the system with an infinite bus becomes better in the case that PV does not have FRT capability. On the other hand, stability of the system without an infinite bus becomes worse in the case that PV does not have FRT capability, in which synchronous generators in the system can be out-of-step in decelerating direction.

In addition, a new method with a notch filter applied has been developed which can decrease the power system frequency fluctuations by using inertia energy of wind turbines of variable speed wind generators in a wind farm, and its performance has been confirmed.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学、電力工学・電力変換・電気機器

キーワード：風力発電 太陽光発電 電力系統 過渡安定度 周波数変動 慣性エネルギー

1. 研究開始当初の背景

地球温暖化問題に起因した炭酸ガス排出抑制の観点から自然エネルギーによる発電が近年急速に拡大しているが、東日本大震災による原子力発電所事故に伴い、益々自然エネルギーに対する期待が高まっている。中でも太陽光発電と風力発電への期待が大きく、今後世界中で両者の導入が増加してゆくことは間違いない。しかしながら、これら両者ともに出力変動に伴う電力系統の電圧・周波数変動等の問題があり、電力会社側での受入れがしだいに困難になりつつある。また、我が国では特に太陽光発電の一層の増大が計画されているが、回転機による発電と異なり太陽光発電においては慣性エネルギーがないため、系統側での故障発生時に大量に太陽光発電が脱落した際の系統安定度の低下が懸念されている。これら周波数変動や過渡安定度低下の問題に対して蓄電池による補償が各方面で検討されているが、系統への蓄電装置の大量導入が必要となり、莫大なコストがかかる。

2. 研究の目的

本研究では、初めに大量の太陽光発電システムが導入されている電力系統の安定度の特性解析を行い、その特徴を明らかにする。すなわち、故障発生時運転継続能力(Fault Ride Through, FRT)の有無も含めた特性に応じて、系統での故障発生時に太陽光発電システムの挙動解析を行い、同時に同期発電機の安定度の特性も明らかにする。

続いて、可変速風力発電機から構成されるウィンドファームにおける風車の慣性運動エネルギーを利用して、ウィンドファーム全体をフライホイールエネルギー貯蔵装置のように制御し、慣性エネルギーの入出力によって系統の周波数の安定化に寄与できるシステムを構築する。

3. 研究の方法

本研究は種々の調査結果に基づくデータ並びにモデリングを基礎として、電力系統解析ソフトウェア PSCAD / EMTDC による計算機解析により制御システムの設計を行う。

系統解析モデルとしては、IEEE-9 母線系統モデルを基礎としてそこに太陽光発電システムを導入したもの、および独自構成の4台の同期発電機とウィンドファームから成るモデルシステムを使用し、故障発生時における安定度の特性解析、並びに風力発電からの変動電力入力時における系統の周波数変動特性、および周波数安定化に関する解析を行う。

4. 研究成果

(4-1)太陽光発電を有する系統の安定度解析 1

図1に示す IEEE-9 母線モデル系統に太陽光発電システムを導入したモデルを用いて

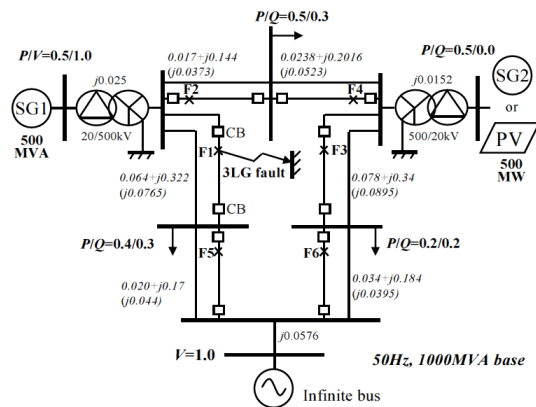


図1. 太陽光発電を含む系統モデル(I)

解析を行った。このシステムは無限大母線を含んでおり、更に SG1 は 500MVA 同期発電機であり、一方右端のノードには同じく 500MVA の同期発電機 SG2 または太陽光発電システム PV が接続される。系統容量は 1000MVA である。PV に関しては FRT 能力有と無しの場合を考慮し、なしの場合には端子電圧が定格電圧の 70% 以下に低下すると PV が系統から解列されるとした。図2は使用した PV のモデルである。インバータは指定した P,Q が出力されるようにベクトル制御される。

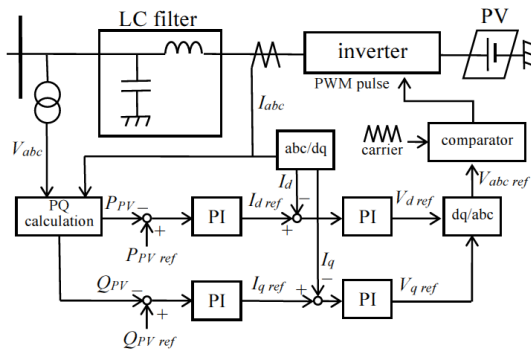


図2. PV モデル

図1のモデル系統での F1 点において 3 相地絡故障が発生した場合(0.1s で故障発生、0.17s で故障回線遮断、1s で再開路)の SG1 の負荷角の計算結果を図3に示す。3 通りの場合、つまり SG2 が接続される場合、PV(FRT 無)接続の場合、PV(FRT 有)接続の場合である。これより、PV(FRT 無)接続の場合の安定度が最も高いと言える。また図4は、図1に示された6個のそれぞれの故障点において同様に3相地絡が発生した場合の系統全体の過渡安定度指標 $W_c(sec)$ の計算結果である。 W_c は故障に伴う同様期間中における全同期発電機の回転子運動エネルギー(絶対値)の変化分を基準電力で除したものであり、大きいほど発電機の動揺が大きいことを意味する。これより、殆どの故障点に対して PV(FRT 無)接続の場合の動揺が小さく、よって安定度が高いと言える。

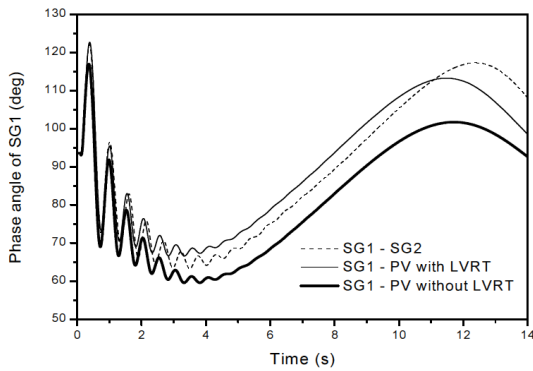


図 3. SG1 の負荷角の応答(I)

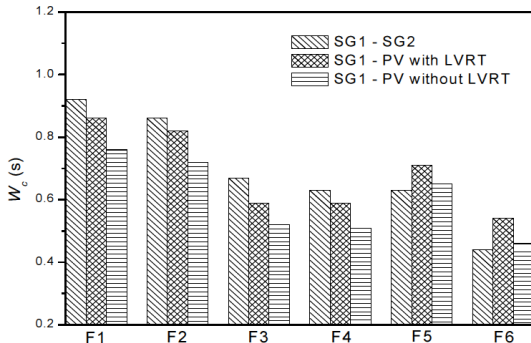


図 4. 過渡安定度指標 W_c の計算結果

以上の結果から、太陽光発電が連系された無限大母線を含む系統の場合、地絡故障時において PV が FRT 機能なしの場合の方が同期発電機の過渡安定度が高くなると言える。これは、PV が解列されることによって同期発電の負荷がその分重くなり、加速脱調とは逆向きに作用するからであると考えられる。

(4-2)太陽光発電を有する系統の安定度解析 2

図 5 に示す IEEE-9 母線モデル系統に太陽光発電システムを導入したモデルを用いて解析を行った。図 5 のモデル系統は(4-1)節の図 1 とほぼ同じであるが、無限大母線がなく、同期発電機が 3 台接続されている点が異なっている。その他の構成は同じであり、右端のノードに 500MVA の同期発電機 SG3 または 500MW 太陽光発電システム PV が接続される。PV に関しては FRT 能力有りと無しの場合を考慮し、なしの場合には端子電圧が定格電圧の 70% 以下に低下すると PV が系統から解列される。PV のモデルは図 2 と同じものを使用している。

図 5 のモデル系統での SG1 至近端において 3 相地絡故障が発生した場合(0.1s で故障発生、0.17s で故障回線遮断、1.17s で再閉路)の SG1 の負荷角(SG1 を基準とする)の計算結果を図 6 に示す。これより SG3 または PV(FRT 有)が接続された場合には初期状態に復帰するが、PV(FRT 無)が接続された場合には様相が一変する。これだけでは判断できないので、図 7 に SG1 と SG2 の回転子運動エネルギーの応答(同期速度において 1pu)を示す。これより、PV(FRT 無)が接続された場合にはいずれ

の運動エネルギーも 0 に収束しており、これは減速脱調していることを示している。

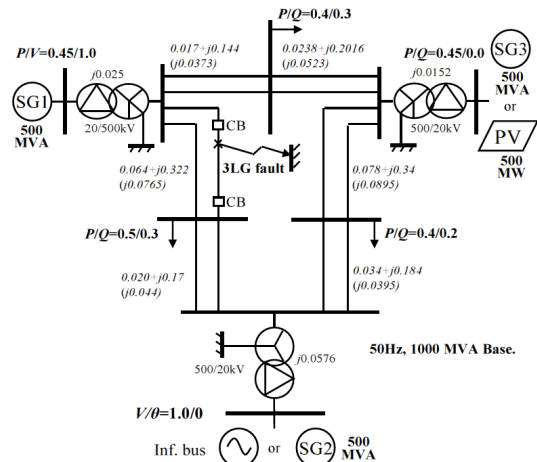


図 5. 太陽光発電を含む系統モデル(II)

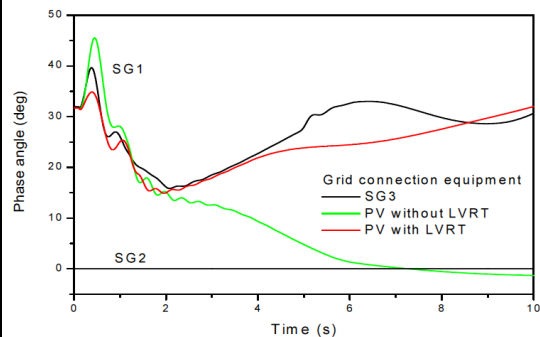


図 6. SG1 の負荷角の応答(II)

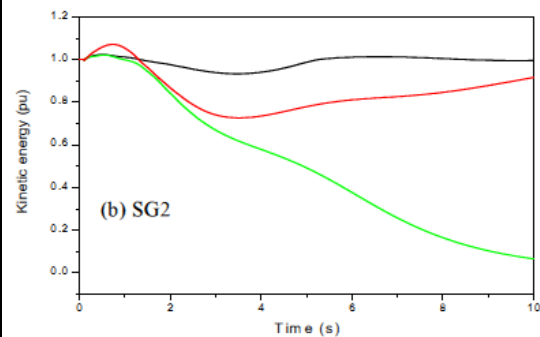
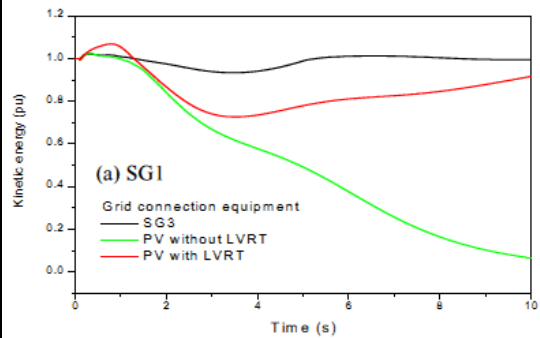


図 7. SG1, SG2 の運動エネルギーの応答

更に、図 8 は SG1, SG2, SG3 または PV の有効出力の応答である。

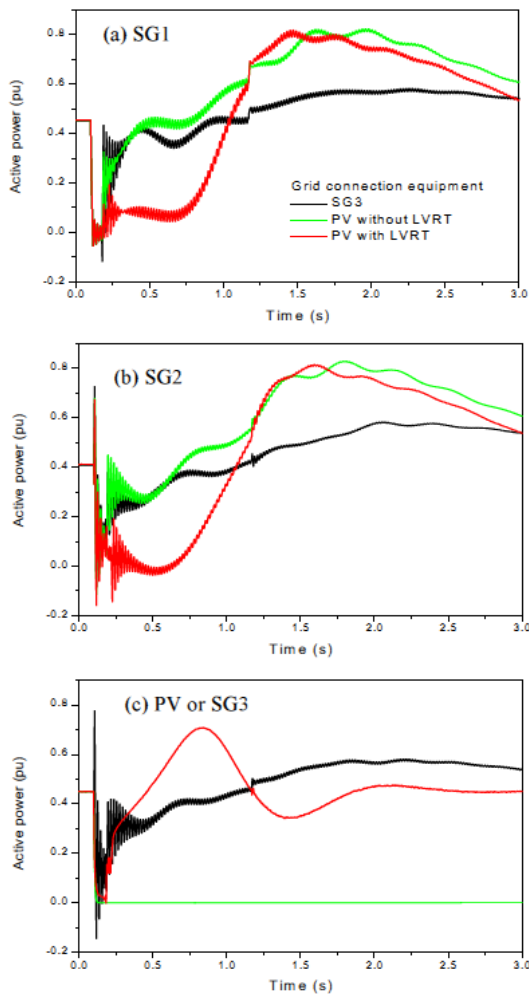


図 8. SG1, SG2, SG3 または PV の有効出力の応答

図 8 (c)より、故障発生とともに PV(FRT 無)の場合には PV が解列していることが分かるが、この際、PV が解列されない場合に比較して故障除去後に SG1, SG2 より比較的大きな有効出力が発生していることが分かる。しかるに、タービンからの動力はあまり変化できないために、この出力は回転子運動エネルギーから供給され、両発電機とも大きく減速し、結局減速脱調に至ることになる。一方、PV(FRT 有)で PV が解列されない場合には、故障除去後に PV からの出力も立ち上がってくるために、両同期発電機の減速が緩和され、脱調しない。また、PV インバータからの無効電力供給も系統電圧維持に一部貢献し、同期発電機の減速脱調阻止に貢献していることも確認している。

以上(4-1),(4-2)節における結論をまとめると、系統の規模が連系される太陽光発電の容量に比較して十分に大きい場合(系統に無限大母線があると想定できる場合)、地絡故障時において PV が FRT 機能なしの場合の方が系統内の同期発電機の過渡安定度が高くなる。これは、PV が解列されることによって同期発電機の負荷がその分重くなり、加速脱調とは逆向きに作用するからである。一方、系統の規模が連系される太陽光発電の容量に比

較して比較的小さい場合(系統に無限大母線があると想定できない場合)、地絡故障時において PV が FRT 機能なしの場合の方が系統内の同期発電機の過渡安定度が低下し、特にこの場合には減速脱調の方向に向かう。これは、PV 解列により同期発電機への負荷が無限大母線が無いことと相まって非常に重くなり、運動エネルギーを放出しながら減速するためと考えられる。

上記の結論は系統の様相に応じて互いに逆の形になっており、今後は更に詳細な検討を行う必要があると考えられる。

(4-3) 可変速風力発電機による系統周波数変動の抑制制御

電力系統においては同期発電機のガバナフリー(Governor Free: GF)運転や負荷周波数制御(Load Frequency Control: LFC)運転によって系統周波数変動を抑制するが、これらの制御では抑制出来ない系統入力電力の周期があることが本研究で明らかになっている。そこで、この系統の周波数応答特性解析結果を用いて、風力発電機の慣性エネルギーを利用し、風車間で協調運転を行い、ウィンドファーム出力の電力系統に影響を及ぼす周波数帯域を制御するシステムを検討した。

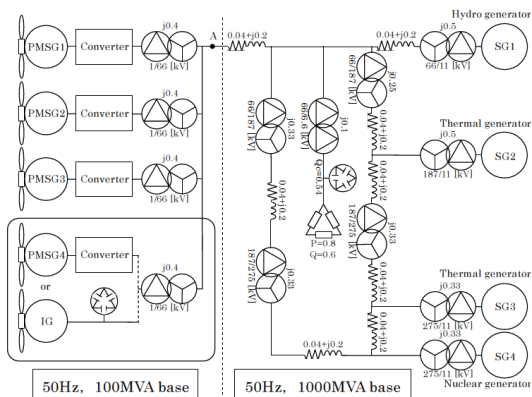


図 9. 周波数制御解析用のモデル系統

本検討のためのモデルシステムを図 9 に示す。ここでは、永久磁石式可変速風力発電機(Permanent Magnet Synchronous Generator) PMSG1, PMSG2, PMSG3, PMSG4 (各 25MVA) を水力発電機 SG1(200MVA)、火力発電機 SG2(200MVA)、SG3(300MVA)、原子力発電機 SG4(300MVA)と需要家を模擬する負荷から成る系統(50Hz)に接続している。SG1 と SG2 は LFC 運転、SG3 は GF 運転、SG4 はロードリミット(定出力)運転としている。なお、PMSG4 を固定速風力発電機 IG に置き換えた検討も行ったが、その結果は省略する。

図 9 の系統のウィンドファーム接続点から振幅 PVR[MW], 周期 TVR[s]の正弦波振動電力を系統に注入し、その際の系統周波数の最大変動値をグラフにしたのが図 10 である。これより、周期 14 秒付近で最も周波数偏差が大きくなっており、GF 運転や LFC 運転では制御できない帯域があることがわかる。

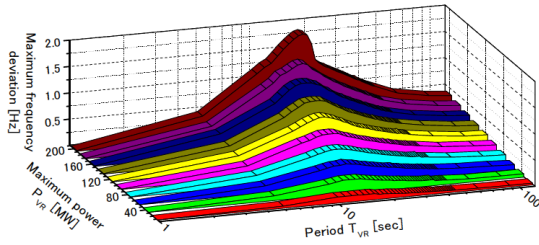


図 10. 系統の周波数特性

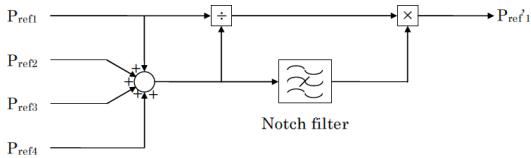


図 11. ノッチフィルターを用いた出力制御

上記の結果を基礎として、ウィンドファームから電力系統に入力される電力に系統側で制御できない周波数帯域成分を含まないように制御するシステムを構築する。具体的にはノッチフィルターを用いて上記の周波数帯域成分を減衰させるように、図 11 に示す制御系を構成した。これは 1 台の風力発電機出力を他の風力機の出力とも協調をとりながら制御するものであり、周期 14 秒程度の LFC や GF 運転では制御できない特定の周波数帯域を減衰させる。同図で P_{ref1} 等は各発電機の MPPT 運転に対応した出力、 P_{ref1}' は新しく生成された 1 号機出力目標値である。2~4 号機についても同様である。次式はノッチフィルターの伝達関数、表 1 は設計したパラメータである。

$$\frac{1 + \left(\frac{s}{\omega_c}\right)}{1 + 2\zeta\left(\frac{s}{\omega_c}\right) + \left(\frac{s}{\omega_c}\right)^2} \quad (1)$$

表 1. ノッチフィルターのパラメータ

Characteristic frequency f_c [Hz]	0.04
Characteristic period T_c [s] = $1/f_c$	25
Damping ratio ζ	0.5
3dB bandwidth [Hz]	0.085

提案法では図 11 に示すように、4 台の MPPT 出力目標値 $P_{ref1} \sim P_{ref4}$ の合計(ウィンドファーム出力の目標値)からノッチフィルターを用いて系統側で制御できない周波数帯域を取り除き、その新しいウィンドファーム出力目標値から回転数に応じて各発電機の出力目標値を算出する。このように出力目標値を各発電機の回転数に応じて分配し発電機間で協調を取ることで、回転数の高い発電機を高出力にし、回転数の低い発電機に慣性エネルギーを蓄える。すなわち、結果的にウィンドファーム全体での慣性エネルギー総量を増やす方向に制御することになる。

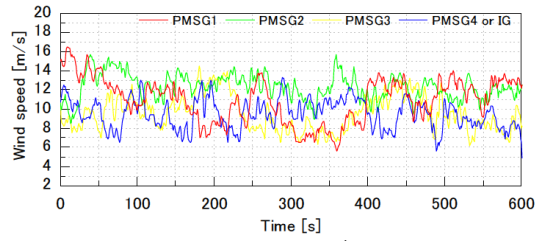
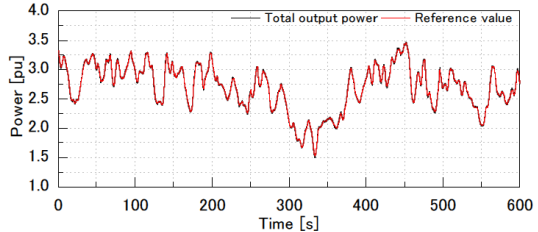
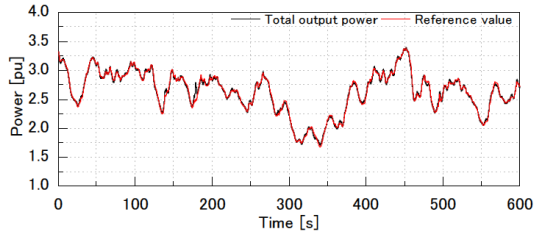


図 12. 風速データ

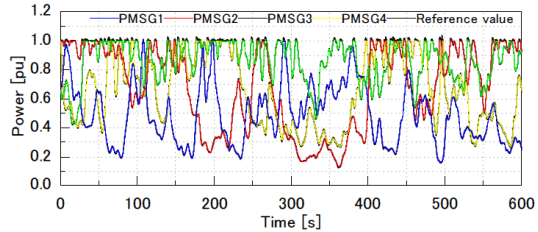


(a) Conventional method

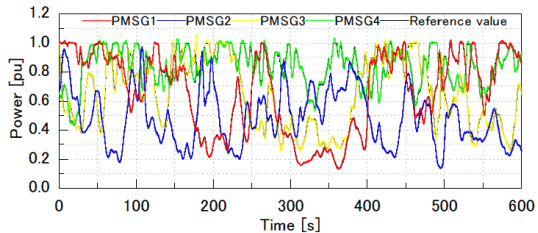


(b) Proposed method

図 13. ウィンドファーム出力



(a) Conventional method



(b) Proposed method

図 14. 各風力発電機の出力

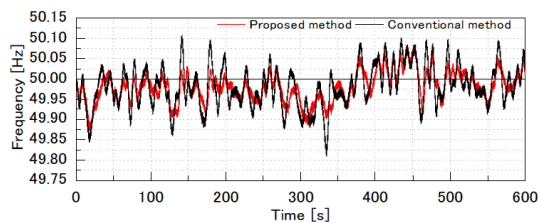


図 15. 系統周波数

図 12 は計算に使用した 4 台の風力発電機に対する風速データであり、北海道内で実測されたものを使用した。この風速を図 9 の 4 台の風力発電機に入力して計算結果を図 13

～15 に示す。図 13(a)は従来法として MPPT 運転を行った場合、(b)は提案制御を行った場合の 4 台の発電機出力合計値を示す。図(b)の赤線はノッチフィルタを通すことにより得られた各発電機出力目標値の合計を示しており、図から提案制御法においてウィンドファーム出力が目標値通りに制御できていることが確認できる。図 14 は MPPT 運転を行う従来法(a)と提案制御法(b)における各発電機の出力と目標値を示す。この図から各発電機がノッチフィルタより得られる目標値通りに適切に制御されていることがわかる。図 15 は系統周波数である。これより、MPPT 運転を行う従来法に比べて提案法の方が全体的に周波数変動が抑制されていることが明らかである。この周波数変動における標準偏差を求めたところ、従来法では ± 0.05 [Hz]、提案法では ± 0.036 [Hz]であった。このことから提案法の周波数安定化効果が高いことが確認できる。

以上本節では、可変速風力発電機の慣性エネルギーを利用し、電力系統の周波数応答特性解析の結果を用いて電力系統に影響を及ぼす出力周波数帯域を制御し、結果として系統の周波数を安定化させる手法の有効性を示した。

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

Masaki Yagami, Takahiko Hasegawa and Junji Tamura : Transient Stability Assessment of Synchronous Generator in Power System with High-Penetration Photovoltaics, Journal of Mechanics Engineering and Automation, Vol.2, No.12, pp.762-768, 2012/12.

〔学会発表〕(計 4 件)

- 1) Masaki Yagami, Naohito Kimura, Masanori Tsuchimoto, Junji Tamura : Power System Transient Stability Analysis in the Case of High-Penetration Photovoltaics, IEEE PowerTech Grenoble, No.A5306MY (6 pages), 2013/06.
- 2) Masaki Yagami, Seiichiro Ishikawa, Yoshihiro Ichinohe, Kenji Misawa, Junji Tamura : Transient Stability Assessment of Synchronous Generator in Power System with High-Penetration Photovoltaics (Part 2), Proc. of International Conference on Electrical Machines and Systems 2013 (ICEMS2013), No.RERT-0741 (4 pages), 2013/10.
- 3) Kazuki Kawamata, Atusi Umemura, Rion Takahashi, Junji Tamura : Evaluation of Expected Value of Frequency Deviation of Power System with Wind Generators, Proc. of International Conference on Electrical Machines and Systems 2013 (ICEMS2013), No.RERT-0870 (4 pages), 2013/10.

- 4) Masaki Yagami, Seiichiro Ishikawa, Yoshihiro Ichinohe, Kenji Misawa, Junji Tamura : Transient Stability Analysis of Power System with Photovoltaic Systems Installed, IET 3rd Renewable Power Generation Conference (採択済。発表予定), (6 ページ)、2014/9.

〔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〕

なし

6 . 研究組織

(1)研究代表者

田村 淳二 (TAMURA JUNJI)

北見工業大学・工学部・教授

研究者番号：40171897

(2)研究分担者

矢神 雅規 (YAGAMI MASAKI)

北海道工業大学・創生工学部・准教授

研究者番号：30364243

(3)連携研究者

なし