

平成 30 年 6 月 20 日現在

機関番号：10106

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H03956

研究課題名(和文)大規模ウインドファームを有する電力システムの総合的安定化

研究課題名(英文)Comprehensive Stabilization of Power System with Large Wind Farm Installed

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) 7,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、風力発電や太陽光発電が導入されている電力システムを対象に、直流(HVDC)連系線の潮流制御と蓄電池の入出力制御との協調により系統周波数変動を抑制する制御系を構築した。更に、これらの自然エネルギー電源が導入されることによる系統慣性の減少に基づく安定度低下の改善を目的として、系統内の可変速風力発電機の慣性エネルギーを利用した仮想慣性制御システムによる系統安定化制御システムの構築も行った。シミュレーション解析により、HVDC連系線と蓄電池による周波数変動の抑制と可変速風力発電機の仮想慣性制御による系統の安定度改善のいずれにおいてもその有効性が確認された。

研究成果の概要(英文)：In this project, a coordinated control system for suppressing frequency fluctuations of a power system with wind farm and photovoltaic station installed has been constructed, which is composed of power flow control of HVDC interconnection line and input/output control of battery. In addition, a virtual inertia control system utilizing inertial energy of a variable speed wind power generator has been constructed in order to improve instability of the power system whose inertia is decreased due to introduction of such natural energy electricity sources. Effectiveness of the coordinated control system composed of HVDC interconnection line and battery, and that of the virtual inertia control system of the variable speed wind power generator, have been confirmed through simulation analyses.

研究分野：電力工学・電気機器学

キーワード：風力発電 電力系統 周波数変動 過渡安定度 太陽光発電

1. 研究開始当初の背景

地球温暖化等の環境問題に伴い、風力発電等の自然エネルギーに対する期待が高まっている。しかしながら、大規模風力発電所(WF)が接続された電力系統においては、WFからの変動出力に起因する系統の周波数変動が大きな問題となる。現実にこれが主な原因で系統へのWFの導入に制限が生じており、これを解決するために蓄電池により変動電力の平滑化を行う方法が様々な検討されているが、蓄電池が非常に高コストである点が最大の難点である。

このような状況の下、本研究では、大規模に風力や太陽光等の自然エネルギー電源が導入されている北海道電力の系統を参考に、直流(HVDC)連系線の潮流制御による周波数変動抑制システムを構築する。また、風力発電や太陽光発電等が導入されると、これらのシステムは一般に慣性エネルギーを持たないので、系統故障発生時等においては瞬時に供給過剰となって系統周波数が上昇し、過渡的に不安定になる恐れがある。これに対して本研究では、このような過渡時における系統の特性を解析するとともに、系統内の可変速風力発電機の慣性エネルギーを利用して系統安定度の低下を抑制する制御システムの構築も行う。

2. 研究の目的

本研究では上記の状況を考慮し、風力や太陽光等の自然エネルギー電源が導入され、またHVDC送電線により他系統に連系されている電力系統を対象に以下の3点に関して検討を行い、総合的な安定化制御法を確立する。

- (1) HVDC連系線の潮流制御により、風力や太陽光等の自然エネルギー電源が導入されている電力系統の周波数変動を抑制するシステムを構築する。
- (2) WFが接続された電力系統内での事故発生に伴う風力発電機の安定性向上に関する検討を行う。また、風力や太陽光等の自然エネルギー電源が導入されている電力系統における過渡安定度特性に関して検討し、風力発電や太陽光発電における故障時運転継続性能(FRT)の有無による安定度特性や安定度向上のための系統条件を明らかにする。
- (3) 大規模に風力や太陽光等の自然エネルギー電源が導入されている電力系統における地絡故障等発生時に、可変速風力発電機の慣性エネルギーを利用して系統全体の過渡安定度を改善できる制御方法を検討する。

3. 研究の方法

WFと太陽光発電所を含む電力系統の構成、風況、運転実績等のデータ、周波数制御システムとそのモデリング、HVDC連系線および風力発電機のモデリング等に関するデータ収集を行った後、電力系統の周波数変動特性等の解析のためのモデルシステムを電力系統解析ソフトウェアPSCAD/EMTDC上に構

築する。具体的には電気学会の標準モデル(EAST10機系統)や米国電気電子学会(IEEE)の標準モデル(3機9母線系統)を使用し、周波数制御システムや必要に応じてHVDC連系線モデルを追加して、解析用のモデルシステムを構成する。これに、風力発電機としてかご形誘導発電機(SCIG)による風力発電機、並びに永久磁石型同期発電機(PMSG)または2重給電交流機(DFIG)をベースとする可変速風力発電機によるWFを導入し、また必要に応じて太陽光発電所モデルも追加して、解析用のモデルシステムを完成する。

このモデルシステムを用いて「2. 研究の目的」欄に記述した各項目に対する解析を行い、風力や太陽光等の自然エネルギー電源が導入されている電力系統の総合的な安定化制御システムを構築するとともに、その有効性を確認する。

4. 研究成果

(1) HVDC連系線潮流制御による系統周波数制御方法の構築

風力発電や太陽光発電が導入されている電力系統の周波数変動をHVDC連系線の潮流制御並びに蓄電池との協調制御にて抑制する制御系を検討した。

図1は、検討のためのモデル系統Iであり、基準となるIEEE標準モデルである3機9母線系統にかご形誘導発電機(SCIG)をベースとするWFと太陽光発電所PVを導入し(System A)、更にHVDC連系線を通して別の大規模系統(System B)に連系されている。図2は構築したHVDC連系線の潮流指令値 $P_{ref}$ を決定するブロックを示しており、System Aの周波数偏差 $\Delta f$ をDeadbandに通し、系統定数に相当するP-Gainを乗じた後、HVDC潮流基準値 $P_{DC0}$ を加えて $P_{ref}$ を作製する。Deadbandの閾値 $\alpha$ は0.05とした。

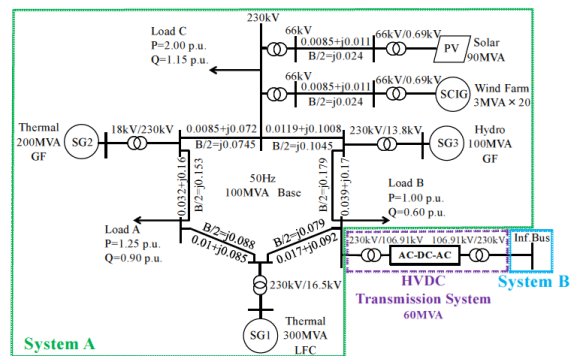


図1. モデル系統 I

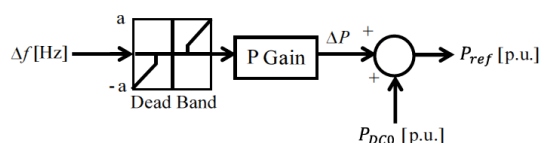


図2. HVDC潮流制御モデル I

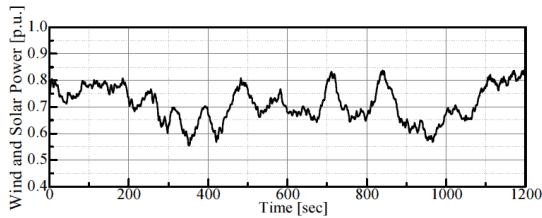


図 3. WF と PV の合計出力

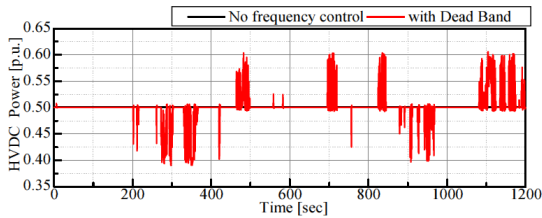


図 4. HVDC 連系線潮流 I

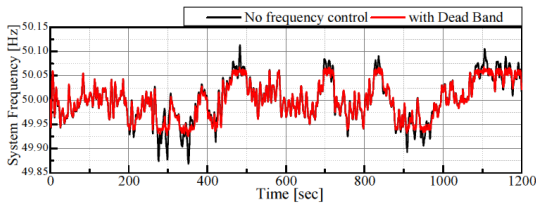


図 5. System A 周波数 I

図 3 は WF と PV の合計出力、図 4 は HVDC 連系線潮流、図 5 は System A の周波数である。これより、図 2 のように設計した HVDC 潮流制御系により、系統周波数変動が抑制されていることが確認できる。

次に図 6 は、HVDC 連系線と蓄電池との協調制御のためのモデル系統 II であり、図 1 の系統に新たに蓄電池を導入している。図 7 はこの場合の HVDC 連系線潮流指令値  $P_{ref}$  を決定するブロックを示しており、蓄電池の入出力電力指令値  $P_{ref}$  決定のためのブロックともなっている。ただし、図 2 と図 7 の相違点は Deadband であり、図 2 では Deadband 出力がステップ状に変化するのに対して図 7 では単純化してステップ変化がないようにしている。それ以外は図 2 の場合と基本的に同じである。図 8 は WF 出力、図 9 は HVDC 連系線潮流、図 10 は蓄電池入出力、図 11 は System A の周波数である。これより、この場合においても図 11 より系統周波数変動が効果的に抑制されていることが確認できる。図 9 と図 10 より、HVDC 連系線が主体的に動作し、制御の不足分を蓄電池が負担している様子が見られ、協調制御が達成されている。また、図 4 と図 9 を比較すると、図 4 においては HVDC 連系線潮流の変化がステップ状で激しいのに対し、図 9 ではある程度緩和されており、図 7 における Deadband の修正が功を奏したと判断できる。

以上の結果より、HVDC 連系線と蓄電池との協調による周波数変動抑制制御の有効性が確認された。

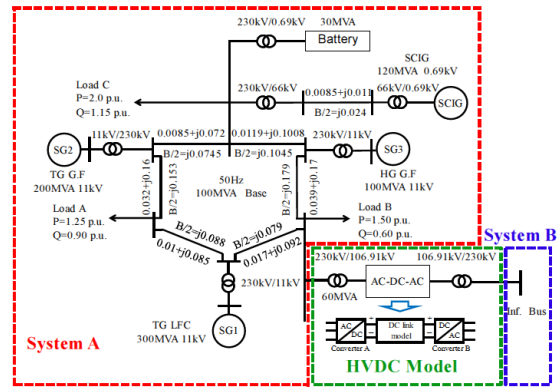


図 6. モデル系統 II

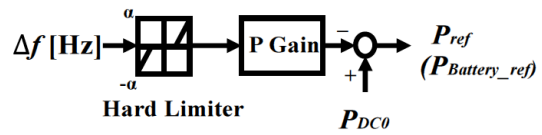


図 7. HVDC 潮流制御モデル II

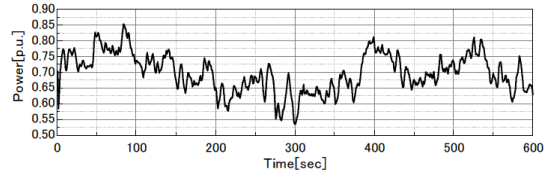


図 8. WF 出力

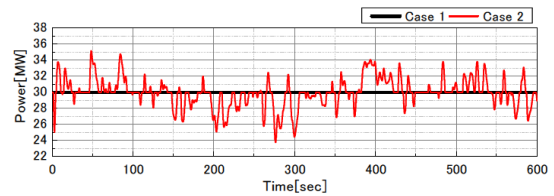


図 9. HVDC 連系線潮流 II

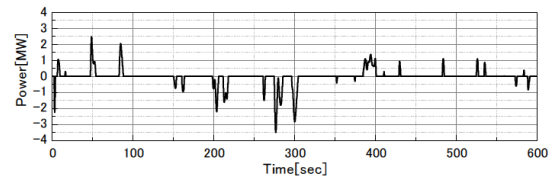


図 10. 蓄電池入出力

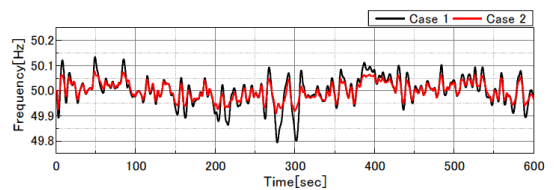


図 11. System A 周波数 II

(2) 系統故障時における WF 内風力発電機の安定性向上に関する検討  
 可変速風力発電機として DFIG と並んで多く使用されている PMSG 形風力発電機の DC リンク安定化システムに関して検討した。

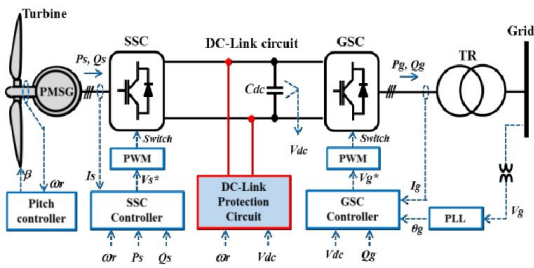


図 12. PMSG 風力発電機モデル

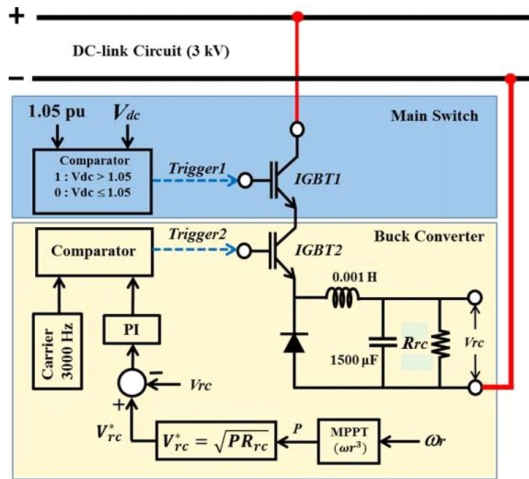


図 13. PMSG 風力発電機 DC リンク保護回路

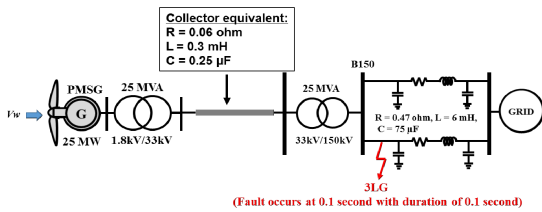


図 14. モデルシステム III

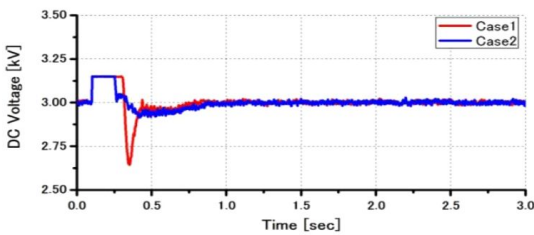


図 15. DC リンク電圧応答

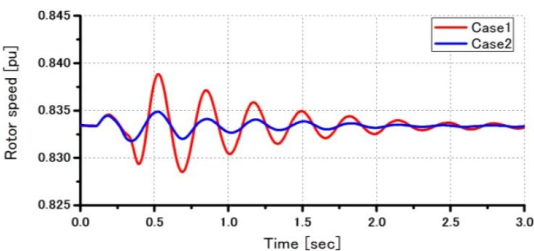


図 16. PMSG 風力発電機回転速度

図 12 は PMSG 風力発電機の基本構成を示しており、固定子側コンバータ SSC と系統側コンバータ GSC の間にある DC リンク回路は GSC によりその直流電圧が一定に制御され

るが、系統故障時にはこれが過渡的に変動し、安定な運転に支障を来す。通常はコンデンサ  $C_{dc}$  と並列にスイッチを通して保護抵抗を挿入するが、抵抗値が一定であるためその安定化効果には限界がある。そこで、図 13 に示すように、スイッチ IGBT1 に更に IGBT2 から成る DC-DC コンバータを通して保護抵抗を接続するシステムを構築した。この場合、抵抗での消費電力を発電機の条件に応じて自在に制御できる。

図 14 は解析に用いたモデルシステム III であり、送電系統での 3LG 故障時における PMSG 風力発電機の過渡応答を計算した。図 15 と図 16 はそれぞれ DC リンク電圧と発電機回転数の応答である。ここで、Case 1 は IGBT スイッチを通して一定の保護抵抗を挿入する従来システム、Case 2 が提案システムである。これより、提案システムでは DC リンク電圧の過渡現象が抑制され、この結果として回転数変動も抑制されていることが分かる。

### (3) 可変速風力発電機の仮想慣性エネルギー制御による系統の安定度改善

電力系統に風力や太陽光等の自然エネルギー電源が大規模に導入されると、相対的に同期発電機の割合が減り、電力系統全体の慣性が低下することによる系統安定度の低下が懸念されている。これに対して、地絡故障等発生時に、DFIG 形可変速風力発電機の慣性エネルギーを利用した仮想慣性制御により系統全体の安定度を改善する制御システムを構築した。

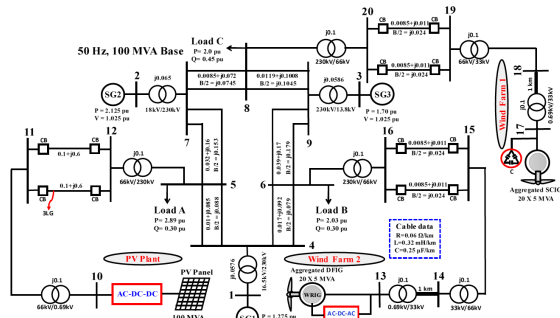


図 17. モデルシステム IV

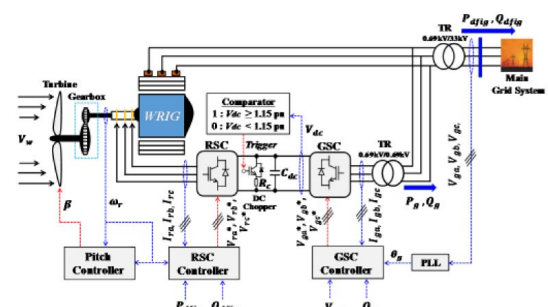


図 18. DFIG 風力発電機基本構成

図 17 は本解析に使用したモデルシステム IV であり、3 台の同期発電機から成る 3 機 9 母線系統に太陽光発電所 PV、固定速風力発電機 SCIG から成る WF1、DFIG 形可変速風力発電

機から成る WF2 が接続されている。また、図 18 は DFIG 風力発電機の基本構成を示しており、回転子側コンバータ RSC と系統側コンバータ GSC により発電機の出力制御を行う。図 19 が構築したファジィ制御に基づく仮想慣性エネルギー制御系である。系統周波数  $f_{sys}$  の微分値と風速値  $V_w$  に対応して発電機出力の出力補正值  $\Delta P$  を決定する。

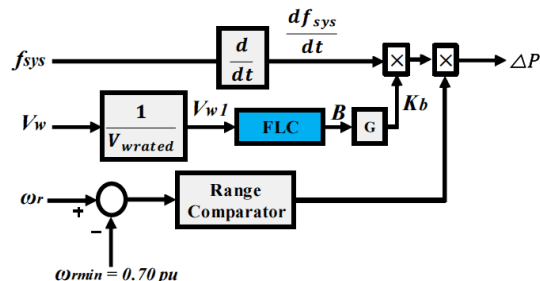


図 19. DFIG 風力発電機出力制御系

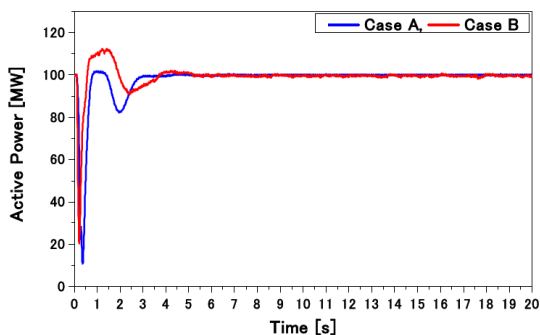


図 20. DFIG 風力発電機出力

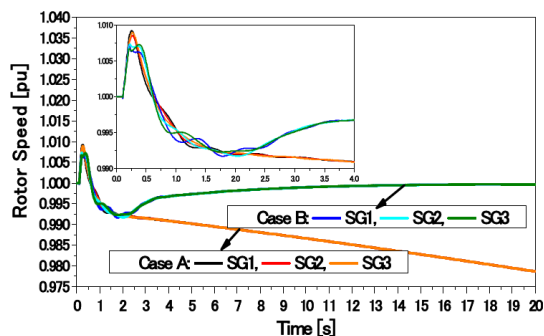


図 21. 同期発電機回転速度

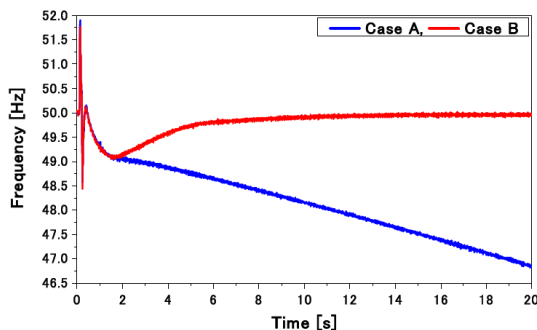


図 22. 系統周波数

ここで、ノード 11 近傍での 3LG 故障を対象とした解析を行った。この際、PV と WF1 は故障時運転継続性能(FRT)がないものとして、故障発生後に何れもトリップして系統か

ら解列されるとした。図 20 は DFIG 風力発電機の出力であり、Case A は仮想慣性制御無しの場合である。これより、提案法の Case B においては、故障除去直後に出力が短時間上昇していることが確認できる。図 21 は 3 台の同期発電機の回転速度であり、仮想慣性制御無しの場合には 3 台とも減速脱調している。また、図 22 は系統周波数であり、仮想慣性制御無しの場合には周波数が低下し続けて系統が不安定となるが、提案手法の場合には安定化できていることが確認できる。これより、構築した仮想慣性制御システムの安定化効果が有効に作用することが確認された。

以上の結果により、HVDC 連系線による周波数変動の抑制、系統故障発生時における風力発電機の安定化制御、可変速風力発電機の仮想慣性制御による系統の安定度改善、いずれにおいてもその有効性が確認された。

## 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 7 件)

- 1) Md. Rifat Hazari, MA Mannan, S.M. Muyeen, Atsushi Umemura, Rion Takahashi, Junji Tamura : Fuzzy Logic Based Virtual Inertia Control of DFIG Based Wind Generator for Stability Improvement of Hybrid Power System, 電気学会論文誌 B (Power and Energy), Vol.138, No.8, 2018/08. (掲載決定、査読有)
- 2) Linda Sartika, Atsushi Umemura, Rion Takahashi, Junji Tamura : Wind Turbines Cluster System Composed of Fixed Speed Wind Generators Controlled by Cluster Converter based VSC-HVDC System, 電気学会論文誌 B (Power and Energy), Vol.138, No.3, p.205-215, 2018/03. (査読有)
- 3) Md. Rifat Hazari, Mohammad Abdul Mannan, S. M. Muyeen, Atsushi Umemura, Rion Takahashi, Junji Tamura : Stability Augmentation of a Grid-Connected Wind Farm by Fuzzy-Logic-Controlled DFIG-Based Wind Turbines, Applied Sciences , vol.8, no.1 (Special Issue "Large Grid-Connected Wind Turbines"), 24 pages, 2018/01. (査読有)
- 4) Linda Sartika, Atsushi Umemura, Rion Takahashi, Junji Tamura : Enhancement of DC-Link Protection of PMSG based Wind Turbine under Network Disturbance by using New Buck Controller System , Journal of Mechanics Engineering and Automation (JMEA), Vol. 7, No. 4, p.171-179, 2017/09. (査読有)
- 5) Masaki Yagami, Yoshihiro Ichinohe, Yohichiro Kojima, Kenji Misawa and Junji Tamura : Transient Stability Analysis of Synchronous Generator in Power System with Renewable Power Sources Installed , Journal of Mechanics Engineering and Automation, Vol.6,

- No.8, pp.400-407, 2016/8. (査読有)
- 6) M. Yagami, S. Ishikawa, Y. Ichinohe, K. Misawa and J. Tamura : Transient Stability Assessment of Synchronous Generator in Power System with High-Penetration Photovoltaics (Part 2), Journal of Mechanics Engineering and Automation, Vol.5, No.7, 6 pages, 2015. (査読有)
- 7) M. Yagami, S. Ishikawa, Y. Ichinohe, K. Misawa and J. Tamura : Transient Stability Analysis of Power System with Photovoltaic Systems Installed, Journal of Energy and Power Engineering, Vol.9, No.10, 9 pages, 2015. (査読有)
- 〔学会発表〕(計 10 件)
- 1) Md. Rifat Hazari, Mohammad Abdul Mannan, S. M. Muyeen, Atsushi Umemura, Rion Takahashi and Junji Tamura : Transient Stability Augmentation of Hybrid Power System Based on Synthetic Inertia Control of DFIG , 2017 AUSTRALASIAN UNIVERSITIES POWER ENGINEERING CONFERENCE (AUPEC2017), paper-id 69 (6 pages), 2017/11.
- 2) Masaki Yagami, Yoshihiro Ichinohe, Yohichiro Kojima, Kenji Misawa, Junji Tamura : Enhancement of Transient Stability of Synchronous Generators Using Kinetic Energy of Variable Speed Wind Generators ,The 20th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS 2017), ID128 (6 pages), 2017/08.
- 3) Takamasa Sato, Atsushi Umemura, Rion Takahashi, Junji Tamura, Yoshiharu Matsumura, Daisuke Yamaguchi, Hirooki Kudo, Masakazu Niiyama, Yasuhito Taki : Frequency Control of Power System with Large Scale Wind Farm Installed by HVDC Interconnection and Battery Systems , The 20th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS 2017), ID715 (6 pages), 2017/08.
- 4) Kimiko Tada, Atsushi Umemura, Rion Takahashi, Junji Tamura, Yoshiharu Matsumura, Daisuke Yamaguchi, Hirooki Kudo, Masakazu Niiyama, Yasuhito Taki : Frequency Control of Power System with Solar and Wind Power Stations Installed by Flow Control of HVDC Interconnection Line , The 20th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS 2017), ID621 (6 pages), 2017/08.
- 5) Takamasa Sato, Atsushi Umemura, Rion Takahashi, Junji Tamura : Frequency Control of Power System with Large Scale Wind Farm Installed by Using HVDC Transmission System , IEEE PowerTech Manchester, No.108 (6 pages), 2017/06.
- 6) Md. Rifat Hazari, Mohammad Abdul Mannan, Atsushi Umemura, Rion Takahashi, Junji

- Tamura : A New Fuzzy Logic Based Control Strategy for Variable Speed Wind Generator to Enhance the Transient Stability of Fixed Speed Wind Generator , IEEE PowerTech Manchester, No.34 (6 pages), 2017/06.
- 7) M. Yagami, Y. Ichinohe, Y. Kojima, K. Misawa, and J. Tamura : Transient Stability Analysis of Synchronous Generator in Power System with Renewable Power Sources Installed , The 19th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS 2016), DS3G-4-15 (5 pages), 2016/11.
- 8) Takamasa Sato, Atsushi Umemura, Rion Takahashi, and Junji Tamura : Frequency Control of Power System with Large Scale Wind Farm Installed by Using HVDC Transmission System , The 19th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS 2016), DS4G-4-6 (5 pages), 2016/11.
- 9) Linda Sartika, Marwan Rosyadi, Atsushi Umemura, Rion Takahashi, Junji Tamura : Stabilization of PMSG based Wind Turbine under Network Disturbance by using New Buck Controller System for DC-Link Protection , The 5th IET International Conference on Renewable Power Generation (RPG) 2016, P2 (5 pages), 2016/09.
- 10) Linda Sartika, Marwan Rosyadi, Atsushi Umemura, Rion Takahashi, Junji Tamura : Cooperated Stabilizing Control of PMSG based Grid Connected Wind Farm , Proc. of the 2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE2015), (7 pages), 2015/09.

〔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)

北海道科学大学・工学部・教授

研究者番号：30364243

### (3)連携研究者

なし

### (4)研究協力者

木元 伸一 (KIMOTO SHIN-ICHI)

久保 宏 (KUBO HIROSHI)

井出 一正 (IDE KAZUMASA)

木村 守 (KIMURA MAMORU)

ロシャディ・マルワン

(ROSYADI MARWAN)