

平成 30 年 6 月 1 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H03958

研究課題名(和文) 大量の再生可能エネルギーが導入された電力システムの革新的広域運用・安定化制御システム

研究課題名(英文) Innovative Wide-Area Operation and Stabilizing Control Systems in Power Systems with a Massive Integration of Renewable Energy Based Generations

研究代表者

横山 明彦 (YOKOYAMA, Akihiko)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・教授

研究者番号：30174866

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,800,000円

研究成果の概要(和文)：再生可能エネルギー電源が大量に連系され不安定化する電力システムを安定に運用にするために、系統内の広域的な計測情報を用いて、発電機設置PSSと送電線設置FACTS機器の制御を統合した適応型系統安定化システム、および大型系統蓄電池と多数の太陽光発電インバータの協調制御手法を提案し、計算機シミュレーションにより有効性を確認した。

次に、太陽光発電装置や電気自動車による周波数・電圧安定化制御の実現性を検証するために、送電系統の需給モデルと配電系統の潮流・電圧計算モデルをリアルタイムシミュレータに分担させ、それに、電気自動車等の実機インバータを接続したハイブリッド試験システムを構築し、有効性を確認した。

研究成果の概要(英文)：In order to operate stably a power system with uncertain power flows due to a massive integration of photovoltaic (PV) and wind power generations, an adaptive and integrated stabilizing system consisting of generator PSSs and transmission line FACTS devices, where wide-area-measured information is used, and an integrated control method of grid-side large-capacity batteries and many PV inverters were proposed and their effectiveness was made clear by digital simulations.

Next, a HIL (Hardware-in-the Loop) test system, where a real inverter of PV and/or electric vehicle (EV) are connected into a real time simulator with a power supply and demand balancing model in transmission network and a power flow and voltage calculation model in distribution network, was developed in order to test feasibility of the system frequency and voltage control by PV and/or EV and its effectiveness was made clear.

研究分野：電力システム工学

キーワード：電力システム 再生可能エネルギー WAMS PMU 安定性 蓄電池 電気自動車 系統安定化装置

1 . 研究開始当初の背景

最近, 大量の太陽光発電や風力発電などの天候に応じて出力が変動する再生可能エネルギー電源が電力系統に連系され, それによって系統が不安定化することが懸念されている。このような状況下で, 電力供給エリア間の地域連系線を介した電力授受を柔軟に行うことで, 偏在する再生可能エネルギーを広域で平準化し, 予備力の経済的確保や緊急時の運用制御への活用などを実現する電力系統の広域システム化が注目されている。大量の再生可能エネルギー電源が連系された電力系統の柔軟性と安定性を両立させる広域運用・安定化制御システムの実現には, 様々なプレーヤーにわたる発電設備や再生可能エネルギー電源がシステムに与える影響を状態検知し, 系統状態の変化に応じたシステムワイドな予備力共有, 需給調整, 周波数維持などの運用・制御方策を設計し, 発電機に設置されている系統安定化装置 (PSS : Power System Stabilizer) や送配電ネットワークの FACTS 機器 (パワエレ応用電力制御機器, Flexible AC Transmission System), 蓄電池などの多数台の制御デバイスを協調的にシステム安定化に貢献させることが不可欠となる。

広域での状態監視や運用・制御のための要素技術については, GPS (Global Positioning System) による時刻同期機能と交流電力の流れを支配する要素である位相角や電圧値, 電流値などの信号処理機能を特徴とした広域計測システム **WAMS (Wide Area Measurement System)** や発電所の制御デバイスに遠隔・プログラマブル制御機能を付加した **IED (Intelligent Electronic Device)**, これらをつなぐ広域情報通信の技術開発が進んでいる。広域状態検知 **WASA (Wide Area Situational Awareness)** や, 状態に応じた広域制御 **WACS (Wide Area Control System)** などの応用研究が世界的に進められているが, 電力系統への実用を視点においたシステム統合に関する研究は端緒にすぎたばかりである。

制御デバイスについては, 火力・水力・揚

水発電機の **PSS** に加えて, 運用・制御の柔軟性をもたらす **FACTS 機器** や **大型蓄電池**, システムの安定性の悪化要因として考えられる再生可能エネルギー電源 (太陽光発電や風力発電) に制御性を与える **連系インバータ**, また, ヒートポンプ給湯機・電気自動車などの **需要側の電力貯蔵デバイス** など, 電力系統に新しく導入される機器の制御も期待できる。これらの発電機側から需要家側までの装置を統合的に運用・制御可能な電力系統は, スマートグリッドと呼ばれ研究が進められているところである。

2 . 研究の目的

本研究では, 太陽光発電 (PV), 風力発電などの再生可能エネルギー電源が大量に導入され, 不安定化の可能性がある電力系統において, 広域計測・状態把握・制御技術を応用した広域運用・安定化制御システム (WAMS/WASA/IED /WACS) 構築を研究目的とする。

3 . 研究の方法

図 1 に示す WAMS/WASA/IED/WACS の構成と全体手法の概念に基づき, 以下の研究項目を実施し, 電力系統の革新的運用・安定化制御システムの理論を明確化する。

- (1) 電力情報ビッグデータからの特徴抽出とモデリング (WAMS/WASA)
- (2) 系統側デバイスによるシステムワイドでアダプティブな系統安定化制御システムの開発 (WAMS/IED/WACS)
- (3) 需要側の分散型制御デバイスによる系統安定化制御システムの開発 (WAMS/IED/WACS)

4 . 研究成果

以下に, 「3 . 研究の方法」に示した研究項目ごとに, 得られた研究成果をまとめる。

- (1) 電力情報ビッグデータからの特徴抽出とモデリング (WAMS/WASA)
再生可能エネルギーの大量導入による不安定化の兆候を検出するためには, 高速な安

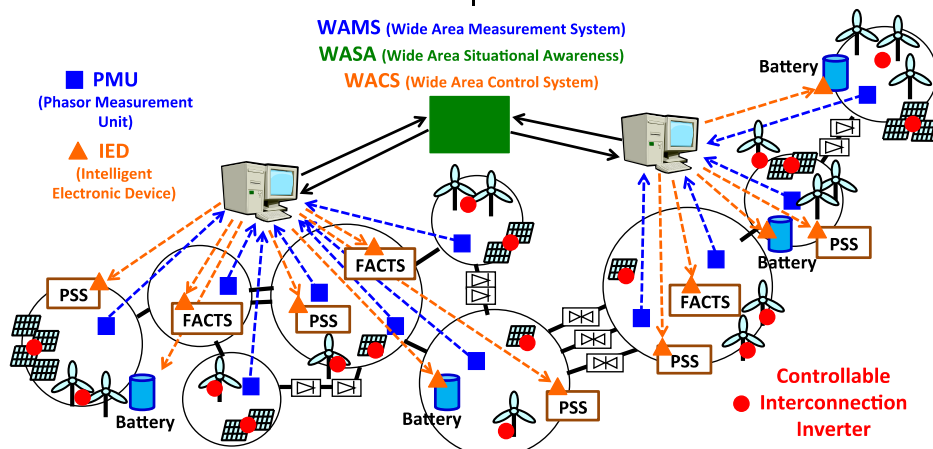


図 1 WAMS/WASA/IED/WACS の構成と全体手法の概念

定度監視システムが必要であるのに対し、従来の安定度解析手法である固有値解析は計算量が多いという課題がある。そこで、WAMSにより得られるリアルタイムでの広域計測データから、簡易的に長周期動揺の情報を抽出できる手法を開発した。

提案手法では、まず、再生可能エネルギーが大量導入された電力系統において、PMU (phasor measurement unit) により広域で同時計測される電圧位相角、有効電力潮流のデータ群から定常時および外乱発生時に支配的な特定動揺モードを抽出する。次に、特定したモードに対して、広域電力系統における地域間の連系の強さを表す同期化力係数と、動揺抑制効果を表す制動力係数を算出することによって、系統安定度を推定する。

図2に、太陽光発電(PV)の導入率を変動させ、モード抽出による推定係数から求めた固有値と同期化力係数 K_s の関係を示す。図2のように、モード抽出による推定係数から求めた固有値実部が減少して、安定化方面へ変化すると、同期化力係数は大きくなり、これもまた安定化方面へ変化している。このように、提案手法により算出した同期化力係数によって、安定度判別が可能であることを示した。

(2) 系統側デバイスによるシステムワイドでアダプティブな系統安定化制御システムの開発 (WAMS/IED/WACS)

電力系統の定態安定性と過渡安定性の向上を目的とし、広域情報を用いて、発電機設置のPSSと送電網内設置の可変直列コンデンサ(TCSC)を適応的かつ協調的に制御する手法の開発を行った。

提案手法の概念図を図3に示す。提案手法は、系統状態の変化に対して、どのTCSCを制御に選択するか決定し、そのTCSCが入った状態で適応型PSSの制御を最適化する。TCSCは、発電機の動揺エネルギーを表すエネルギー関数を用いて過渡安定性の向上を目的として制御され、適応型PSSは系統状態に対して入出力を適応的に変化させ、電力系統の動特性を模擬した線形システムの支配的な固有値を、選択的に安定領域に移動するように制御されている。その結果、全体として

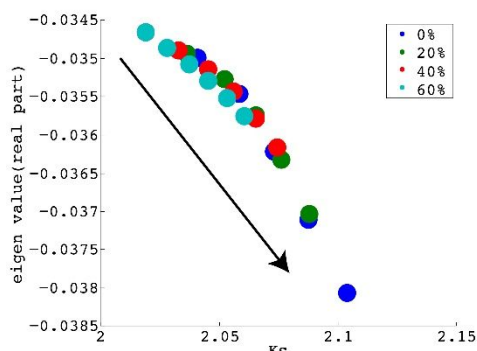


図2 固有値と同期化力係数の関係

定態安定性と過渡安定性の両方が効果的に向上できることを明らかにした。

図4に、系統事故時の発電機の相边角動揺の比較結果を示す。図4に示すように、何も対策を施さない場合と比較して、適応型PSS (APSS)とTCSCの協調制御によって、相边角動揺に対して高い安定化効果が得られることを示した。

さらに、系統側デバイスとして送電網内設置の大型蓄電池を制御対象とし、広域リアルタイム情報による過渡安定性の安定化手法を開発した。ここでは、PVの連系インバータとの協調により、系統事故時の過渡安定性と短時間電圧安定性の双方を向上できる系統安定化制御システムを開発した。

蓄電池による系統安定化制御手法では、計測データから系統側蓄電池出力の変化に対する発電機の出力変化(感度係数)を算出し、この出力感度と発電機の回転子角速度情報を利用することで、効果的に同期発電機の動揺を抑制できることを明らかにした。感度係数算出の際に、PVと負荷が連系された負荷供給系統の上位に位置する母線の電圧と電流をPMUによって計測し、その計測情報から、計測点以下をインピーダンスとして縮約し、考慮することで、PVの連系インバータによる安定化制御と蓄電池による安定化制御の協調を可能とした。

(3) 需要側の分散型制御デバイスによる系統安定化制御システムの開発 (WAMS/IED/WACS)

系統安定性向上のための制御を需要家側の分散型蓄電デバイス(電気自動車搭載を含

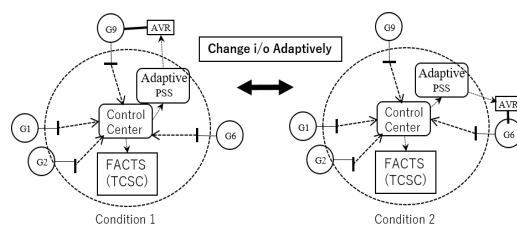


図3 PSSとTCSCの適応型制御システム

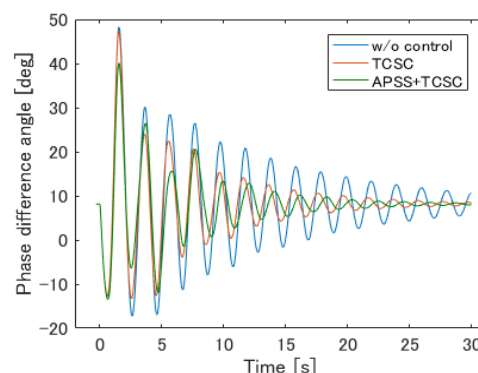


図4 適応型制御システム(APSS+TCSC)による発電機の相边角動揺の安定化の例

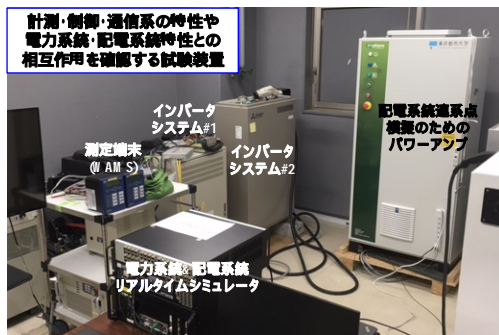


図5 分散インバータの試験システム

む) に分担させる場合には、分散型デバイスが連系する配電系統への影響を考慮することも必要となる。そこで、再生可能エネルギーが大量導入された電力系統をリアルタイムシミュレータに模擬・実装し、太陽光発電と分散型蓄電デバイス(電気自動車含む)に対して周波数・電圧安定性向上のための制御指令を生成・送信し、安定化制御の効果を実験的に検証できる試験環境を構築した。

構築した試験環境では、システム全体の需給を計算するモデルと、分散制御デバイスが接続される配電系統の局地的な潮流・電圧分布を計算するモデルをリアルタイムシミュレータに分担させることで、電力系統と配電系統を同時に考慮した統合制御手法の検証を可能にした。

新たに構築した試験環境を用いて、電力系統安定化に貢献しつつ、配電系統への影響を低減する太陽光発電・電気自動車のスマートインバータ制御を設計、検証した。周波数安定化のための有効電力制御と配電系統電圧管理のための無効電力制御に干渉は生じず、周波数・電圧の検出速度・精度も十分であり、また、系統特性とのハンチングや複数台制御時の問題も生じないことを確認した。太陽光発電・電気自動車インバータに制御手法を実装することで、系統安定化制御に貢献し得ることを明らかにした。図5に本研究で構成し、制御手法の検証に利用した試験システムの構成を示す。

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6件)

1. 太田豊, "電気自動車と再生可能エネルギーの協調", Technical Journal "Smart Grid", pp.8-13, 2017, 査読有
2. Yutaka Ota, "Integration of Renewables and Electric Vehicles into the Smart Grid -Innovative Energy Management Strategies and Implementation-", "Grid Integration of Electric Mobility, Springer Proceedings Book Series, pp.257-268, Chapter.21, DOI: 10.1007/978-3-658-15443-1_21, 2017,

査読有

3. K. Kawabe, Y. Ota, A. Yokoyama, and K. Tanaka, "Novel dynamic voltage support capability of photovoltaic systems for improvement of short-term voltage stability in power systems," IEEE Trans. Power Syst., Vol.32, No.3, pp.1796-1804, DOI: 10.1109/TPWRS.2016.2592970, 2017, 査読有
4. Ngoc Huynh Tran, Akihiko Yokoyama, "Development of Wide-Area Measurement Based Adaptive Controller Design for Power System Damping," 電気学会論文誌 B, Vol. 136-B, pp.118-128, DOI: 10.1541/ieejpes.136.118, 2016, 査読有
5. 河辺賢二, 松田一成, 田中和幸, 「太陽光発電 FRT 要件における出力復帰特性が電力系統の過渡安定度に与える影響解析」, 電気学会論文誌 B, Vol. 136-B, No.3, pp.236-244, DOI: http://doi.org/10.1541/ieejpes.136.236, 2016, 査読有
6. K. Kawabe and K. Tanaka, "Impact of dynamic behavior of photovoltaic power generation systems on short-term voltage stability," IEEE Trans. Power Syst., Vol.30, No.6, pp.3416-3424, DOI: 10.1109/TPWRS.2015.2390649, 2015), 査読有

[学会発表](計38件)

1. 櫻木政徳, 横山明彦, 天野博之, 太田豊, 河辺賢二, 「大規模系統における PSS と TCSC の協調最適化手法」, 電気学会 B 部門大会, 2018年9月12日-14日, 徳島大学(徳島県)(発表確定)
2. 櫻木政徳, 横山明彦, 天野博之, 太田豊, 河辺賢二, 「大規模系統における適応型 PSS と TCSC の協調制御手法に関する一考察」, 平成 30 年電気学会全国大会, 2018年3月14日-16日, 九州大学(福岡県)
3. S. Kamo, Y. Ota, T. Nakajima, K. Kawabe, and A. Yokoyama, "HIL test on Smart Inverter Control of Photovoltaic Generations and Electric Vehicles", The 7th Solar Integration Workshop, 2017年10月24日, ベルリン(ドイツ)
4. H. Toda, Y. Ota, T. Nakajima, K. Kawabe, and A. Yokoyama, "HIL Test of Power System Frequency Control by Electric Vehicles", The 1st E-Mobility Power System Integration Symposium, 2017年10月23日, ベルリン(ドイツ)

5. 加茂章太郎, 太田豊, 中島達人, "EVのスマートインバータ制御による配電システムの電圧管理の実証試験", 電気学会自動車・交通・電気鉄道合同研究会, 2017年9月29日, 電気学会会議室(東京都)
6. 戸田英邦, 太田豊, 中島達人, "電気自動車を用いた電力系統周波数制御の実証試験", 電気学会自動車・交通・電気鉄道合同研究会, 2017年9月29日, 電気学会会議室(東京都)
7. 河辺賢一, 太田豊, 横山明彦, 七原俊也, 田中和幸, "太陽光発電の進み力率運転時におけるインバータの電流制限方式の違いが短時間電圧安定性に与える影響", 電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会, 2017年9月21日-22日, 北見工業大学(北海道)
8. 加茂章太郎, 太田豊, 中島達人, 河辺賢一, 横山明彦, "太陽光発電のスマートインバータ制御による配電システムの電圧管理の実証試験", 平成29年電気学会B部門大会, 2017年9月5日-7日, 明治大学(東京都)
9. 櫻木政徳, 天野博之, 横山明彦, 太田豊, 河辺賢一, "広域情報を用いた適応型PSSとTCSCの協調最適化手法", 電気学会B部門大会, 2017年9月5日-7日, 明治大学(東京都)
10. 河辺賢一, 七原俊也, 太田豊, 横山明彦, "太陽光発電のDVS機能が過渡安定性に与える影響に関する感度係数を用いた一考察", 電気学会B部門大会, 2017年9月5日-7日, 明治大学(東京都)
11. M. Sakuragi, A. Yokoyama, H. Amano, K. Kawabe, Y. Ota, "Wide-area measurements based coordinated optimal tuning of wide-area PSS and TCSC controllers," Proc. of Int'l Conference on Electrical Engineering, 2017年7月4日-7日, Weihai (China)
12. K. Kawabe, T. Nanahara, and K. Tanaka, "Importance of considering induction motor load for studying impact of photovoltaic generation on transient stability of power systems," Proc. of IEEE PES PowerTech 2017, 2017年6月18日-6月22日, Manchester (UK)
13. 宮崎 駿, 横山 明彦, チャンドラ スレシ バルマ, "特定動揺モードにおける同期化力・制動力係数推定による簡易的安定度解析手法", 平成29年電気学会全国大会, 2017年3月15日-17日, 富山大学(富山県)
14. 犬飼良佑, 小出明, 河辺賢一, "太陽光発電連系時の過渡安定度の面からみた二次電池の設置点の決定手法", 平成29年電気学会全国大会, 2017年3月15日-17日, 富山大学(富山県)
15. 太田豊, "再生可能エネルギー, 電気自動車, 電力システムの協調制御手法の設計と実装", 電気学会全国大会パワーアカデミー成果報告会, 2017年3月15日, 富山大学(富山県)
16. 太田豊, "分散車載蓄電池のエネルギーマネジメントへの応用", 電気学会産業応用フォーラム, 2017年2月10日, 名古屋大学(愛知県)
17. 宮崎 駿, 横山 明彦, チャンドラ スレシ バルマ, "多機系統における同期化力係数推定を用いたモード別定態安定度把握の検討", 電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会, 2016年9月20日-21日, 福井工業大学(福井県)
18. 犬飼良佑, 河辺賢一, 田中和幸, "太陽光発電連系時の過渡安定度向上を目的とした二次電池の制御手法に関する検討", 平成28年度電気関係学会北陸支部連合大会, 2016年9月13日-14日, 福井工業大学(福井県)
19. 阪本将太, ノッフイントラン, 太田豊, 河辺賢一, 横山明彦, "WAMSを利用した適応型広域系統安定化制御", 電気学会B部門大会, 2016年9月7日-9日, 九州工業大学(福岡県)
20. 宮崎 駿, 横山 明彦, チャンドラ スレシ バルマ, "多機系統における同期化力係数推定を用いたモード別定態安定度解析の検討", 電気学会B部門大会, 2016年9月7日-9日, 九州工業大学(福岡県)
21. 犬飼良佑, 河辺賢一, 田中和幸, "太陽光発電連系時の過渡安定度向上を目的とした二次電池の制御手法に関する一検討", 電気学会B部門大会, 2016年9月7日-9日, 九州工業大学(福岡県)
22. 太田豊, "需要家側蓄電池の有効活用-Vehicle-to-Grid, Vehicle-to-Homeのポテンシャル-", 電気設備学会中部支部講習会「スマートグリッド構築に貢献する蓄電池技術」, 2016年7月28日, 東桜会館(愛知県)
23. 太田豊, "諸外国における電動車とスマートグリッドとの連携に関する状況", Japan Smart Community Alliance 次世代自動車・インフラ整備インターフェースの国際標準化に関するワークショップ, 2016年7月26日, 三菱総合同研究会研究所大会議室(東京都)
24. Y. Ota, "V2X Application for RES Integration", IEEE PES General Meeting, Panel Session: Advanced Applications of Dispatchable DER in a Smart Grid Environment, 2016年7月20日, ボストン(アメリカ合衆国)
25. K. Kawabe and K. Tanaka, "Impact of dynamic behavior of photovoltaic power generation systems on short-term voltage stability," Proc. of IEEE PES General Meeting, 2016

- 年7月17日-21日, Boston (USA)
26. K.Kawabe, Y. Ota, A. Yokoyama, and K. Tanaka, "Short-term voltage stability improvement by active and reactive power control using advanced fault ride-through capability of photovoltaic systems," Proc. of 19th Power Systems Computation Conference, 2016年6月20日-24日, Genoa (Italy)
 27. Y. Ota, "Integration of Renewables and Electric Vehicles into Smart Grid -Innovative Energy Management Strategies and Implementation-", 1st International ATZ Conference on Grid Integration of Electric Mobility, 2016年6月1日, Berlin (Germany)
 28. 太田豊, 薄良彦, "再生可能エネルギー大量導入時の電力システムのアンシラリーサービスの信号生成", システム制御情報学会研究発表講演会, 2016年5月25日, 京都テルサ (京都府)
 29. 阪本将太, 太田豊, 河辺賢一, 横山明彦, 「系統安定化に向けたオブザーバ付最適レギュレータによる広域電力系統制御」, 平成28年電気学会全国大会, 平成28年電気学会全国大会, 2016年3月16日-18日, 東北大学 (宮城県)
 30. S.Sakamoto, Y.Ota, K.Kawabe, A. Yokoyama, "Wide-area measurement controller design of optimal regulator with observer for stabilizing power system," Proc. of 2016 IEEJ P&ES- IEEE PES Thailand Joint Symposium, 2016年3月11日, Bangkok (Thailand)
 31. 太田豊, "電動自動車の充電・蓄電池利用の配電系統への影響評価とスマート充電制御の実装", 電気学会自動車研究会, 2016年2月5日, 名古屋大学 (愛知県)
 32. 阪本将太, ノッフイントラン, 太田豊, 河辺賢一, 横山明彦, 「WAMSを利用した適応型広域系統安定化制御」, 電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会, 2015年9月17日, 東北大学 (宮城県)
 33. 河辺賢一, 太田豊, 横山明彦, 田中和幸, 「太陽光発電の有効・無効電力の協調制御による過渡電圧安定度の安定化」, 電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会, 2015年9月17日, 東北大学 (宮城県)
 34. 宮崎 駿, 横山 明彦, チャンドラ スレン バルマ, 「多機系統における同期化力係数推定による簡易的定態安定度解析の検討」, 電気学会 B 部門大会, 2015年8月25日-27日, 名城大学 (愛知県)
 35. 河辺賢一, 田中和幸, 「FRT 機能付き太陽

光発電の常時進み力率運転による過渡電圧安定度の向上」, 電気学会 B 部門大会, 2015年8月25日-27日, 名城大学 (愛知県)

36. Shota Sakamoto, Ngoc Huynh Tran, Akihiko Yokoyama, "Wide-Area Measurement Controller Design of Multi-Input Adaptive PSS for Damping Inter-Area Mode," Proc. of ICEE 2015, 2015年7月5日-9日, Hong Kong (China)
37. Y. Ota, "Disturbance Detection of Wide Area Power Systems by use of Short-term Synchrophasor Data", Proceedings of IEEE PES PowerTech Conference 2015年7月2日, Eindhoven (Netherlands)
38. K. Kawabe and K. Tanaka, "Effect of reactive power control by photovoltaic power generation on short-term voltage stability," Proc. of IEEE PES PowerTech 2015, 2015年7月2日, Eindhoven (Netherlands)

〔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〕

東京都大学 HP :
<http://www.ee.tcu.ac.jp/labs/psl>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

横山 明彦 (Akihiko Yokoyama)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・教授

研究者番号: 30174866

(2) 研究分担者

太田 豊 (Yutaka Ota)

東京都市大学・工学部・准教授

研究者番号: 50372537

河辺 賢一 (Kenichi Kawabe)

東京工業大学・工学院・電気電子系・助教

研究者番号: 60634061

(3) 連携研究者

(4) 研究協力者