

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 1 日現在

機関番号：12608

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2016

課題番号：15K18017

研究課題名(和文)太陽光発電インバータと系統側機器の協調による電力系統過渡安定化理論の開発

研究課題名(英文) Development of power system stabilization theory by coordinated control of photovoltaic generation systems and large-capacity batteries

研究代表者

河辺 賢一 (Kawabe, Kenichi)

東京工業大学・工学院・助教

研究者番号：60634061

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：近年、我が国で普及が進んでいる太陽光発電(PV)は、従来の大規模電源と系統事故時の動特性が異なり、大量普及により電力系統の各種安定性を損ねる恐れがある。本研究では、これまで系統事故時の制御対象でなかった蓄電池やPVのインバータを、広域リアルタイム情報等によって制御することで、運用状態の変化しやすい将来の電力系統運用環境下においても電力系統の各種安定性を安定化できる新たな理論を開発した。

研究成果の概要(英文)：Installation of solar photovoltaic(PV) power generation systems may deteriorates power system stability because the dynamic characteristic of the PV systems is different from that of conventional synchronous generators. In this research, a novel power system stabilizing theory has been developed to keep the stability of the power systems with large number of the PV systems. The proposed method controls the inverters of the PV systems and the large-capacity batteries that have never considered as controlled objects for the improvement of the power system stability. Use of real-time wide-area information is also considered in the proposed method to make the control system applicable to future power systems. Effectiveness of the method has been demonstrated by numerical simulations.

研究分野：電力システム工学

キーワード：電力システム 太陽光発電 二次電池 広域計測システム 過渡安定性 電圧安定性

1. 研究開始当初の背景

電力系統における事故後の過渡領域で進展する各種不安定現象に対する安定度を維持することは、安定的な電力供給のために必要不可欠な課題である。近年、我が国では太陽光発電 (PV) を始めとする分散型インバータ連系電源が急速に普及し始めているが、それらの電源は従来の大規模電源と系統事故時の出力特性が異なり、大量普及により各種安定度を損ねる恐れがある。

負荷地点に連系される PV は、特に負荷側の安定度問題である過渡電圧安定度に悪影響を与える恐れがあった。過渡電圧安定度問題は、同じ時間領域で進展する発電機の過渡安定度問題と比較すると研究途上であったのに対し、申請者はこれまで、過渡電圧不安定現象を明確に説明できる解析手法を開発した。さらに、この解析手法を利用した PV の系統影響評価に関する研究の結果、系統事故により PV がしばらく運転を停止する場合に、過渡電圧安定度が大きく損なわれることを明らかにした。これと並行して、PV 連系が基幹系統の過渡安定度にも悪影響を与える場合があることを明らかにした。

このように、PV 連系は電力系統の過渡的な安定度に悪影響を及ぼすことは明らかであり、今後の再生可能エネルギーの大量導入を可能とするためには、新たな系統安定化対策の開発が必須である。

PV 大量連系時の安定度維持・向上策として、事故時にも運転を停止しない FRT (Fault Ride Through) 機能をもつ PV インバータや二次電池の利用が考えられる。PV のインバータに無効電力制御機能を付加することで、負荷側の過渡電圧安定度の向上に高い効果をもつと予想される。ただし、この対策は動作地点が PV 設置点であるため、基幹系統側の過渡安定度の向上には効果が低い可能性がある。そのため、設置地点に柔軟性のある二次電池を系統側に設置・利用する方法についても検討の必要性がある。

また、将来の電力系統では再生可能エネルギーに起因する不確実性にも対応できる安定化制御システムの構築が求められ、それに対しては、GPS (Global Positioning System) による時刻同期機能をもつ位相計測装置を特徴とした WAMS (Wide Area Measurement System) などの技術開発が国内外で研究されている。

2. 研究の目的

本研究では、前項で述べた PV の系統影響解析に関する研究結果に基づき、開発途上の最新技術の利用も想定して、電力系統の安定化システムの基礎理論開発を目指す (図 1)。具体的には、太陽光発電の大量連系に起因する電力系統の過渡不安定現象に対して、系統用二次電池と太陽光発電インバータの協調

による系統安定化制御システムの理論構築を目的とする。

3. 研究の方法

本研究で構築を目指す制御システムの概念図を図 2 に示す。図中に示す 3 つの研究項目について、以下の順で実施した。

(1) PV インバータによる過渡電圧安定度の安定化手法の開発

申請者はこれまで、FRT 機能を持たない PV が系統事故によりしばらく運転を停止する場合に、負荷の過渡電圧安定度を損ねることを、独自に開発した解析手法を用いて明らかにしている。それらの研究成果から、緊急制御により事故時に系統から負荷への送電特性 (電力 VS 電圧特性) を高めることが有効な手段になり得ることを明らかにしている。それを実現するための安定化対策として、本研究では次の 2 つの制御手法を検討する。

常時進み定力率運転

平常時に進み力率で PV を運転し、遅れ無効電力を常時消費する運転状態にする。これにより、平常時電圧を維持するために並列される調相設備 (コンデンサ) 容量を増やし、PV 運転停止時には、負荷への送電特性の低下を緩和する効果が期待される。

DVS (dynamic voltage support) 機能

系統事故後に PV インバータから遅れ無効電力を発生することで、連系点電圧を維持する機能。系統事故時に運転継続可能な一部の PV にこの機能を持たせることで、その地域全体の送電特性を高める効果が期待される。

上記対策の安定化効果について、以下の方法で検討を進める。

まず、一負荷無限大母線系統 (大規模系統を縮約した無限大母線に、単一の負荷が連系された縮約系統) を用いて検証する。申請者がこれまでに開発した過渡電圧安定度の解析手法を適用することで、物理的な現象解明を行いながら安定化手法の開発とその効果の検証を進める。

次に、複数の発電機・負荷が連系された多

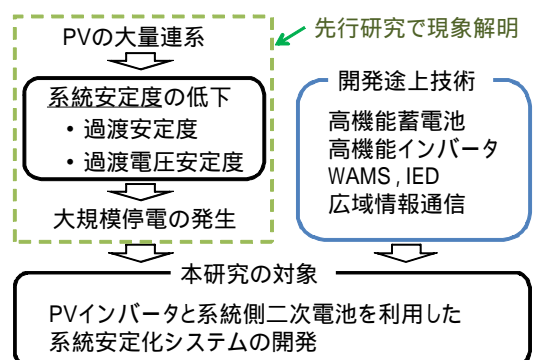


図 1 本研究と先行研究の位置づけ

機電力システムを用いて、実システムでの適用可能性を明らかにする。

解析ツールについては、これまでの研究で開発したものをベースとする。負荷モデルは誘導機と定インピーダンス等の並列モデルを適用し、PV モデルは申請者が開発した可変電流源モデルを適用する。

上記の安定化制御では多数台の PV を制御対象とするため、PV 自端の電圧情報等を制御入力とする制御手法を開発した。これまでの基礎検討で、インバータ制御系における有効電流・無効電流間の電流量配分アルゴリズムを開発する必要性を示しており、これに重点をおき検討を進める。

(2) 系統用二次電池による過渡安定度の安定化手法の開発

同期発電機の脱調現象に対しては、基幹系統に設置された二次電池を制御対象とした緊急時制御アルゴリズムを開発を目指し、以下の方法で検討を進める。

まず、前項で構築した多機電力システムモデルをベースとして、同期発電機の脱調現象が不安定様相となる系統条件を設定する。

次に、基幹系統に設置された系統用二次電池による系統安定化制御手法を開発する。これまでの研究で開発した WAMS による二次電池の制御手法を、PV 連系系統に適用可能な手法に拡張する。従来手法では、発電機の角速度情報や位相角情報を WAMS により収集し、発電機の動揺状態を表すエネルギー関数を指標とした制御ルールによって二次電池を制御した。本研究では、PV が連系された電力システムモデルに対して、エネルギー関数を指標とした制御ルールの適用を図る。

(3) PV インバータと二次電池の協調制御手法の開発

前項までに検討した PV インバータと二次電池の制御手法を統合する。負荷地域に連系された PV インバータは電圧安定化に、基幹系統に設置された二次電池は発電機の過渡安定化に利用することを想定するため、それぞれの安定化制御システム間で相互干渉が生じる可能性がある。相互干渉による安定化効果の低減がないか、誘導機負荷の加速状態

やエネルギー関数を指標として検証する。相互干渉が確認された場合には、二次電池の広域制御システムにおける系統モデル作成において PV の制御動作を反映することで干渉を防ぐ方法を検討する。

4. 研究成果

系統事故時の電圧安定性に対して、PV の連系インバータを利用した安定化手法として、常時進み力率運転と新型 DVS (dynamic voltage support) 機能の付加の二つの方法を開発し、シミュレーションによってその有効性を明らかにした。常時進み力率運転による方法では、系統平常時に PV を進み力率で運転することで、PV 発電時にも調相設備の並列容量を確保し、PV 運転停止時に電圧低下を緩和することを明らかにした。新型 DVS 機能の付加による方法では、電圧上昇幅の最大化を目的とした最適化問題の解に基づいて有効電力と無効電力の双方を出力することによって、無効電力のみを出力する従来の DVS 機能と比較して、より高い安定化効果を得られることを明らかにした。

系統事故時の同期発電機の過渡安定性に対して、系統側蓄電池を利用した安定化手法として、広域リアルタイム情報に基づく制御手法を開発し、計測装置によるシミュレーションによってその有効性を明らかにした。提案手法では、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。さらに、上述の PV 連系インバータによる安定化対策と併用した場合でも、互いに干渉することなく安定化効果を得られることを明らかにした。

このように本研究では、これまで系統事故時の制御対象でなかった蓄電池や PV のインバータを、広域リアルタイム情報等によって制御することで、運用状態の変化しやすい将来の電力システム運用環境下においても過渡電圧安定度と過渡安定度の双方を安定化できる新たな安定化理論を開発した。

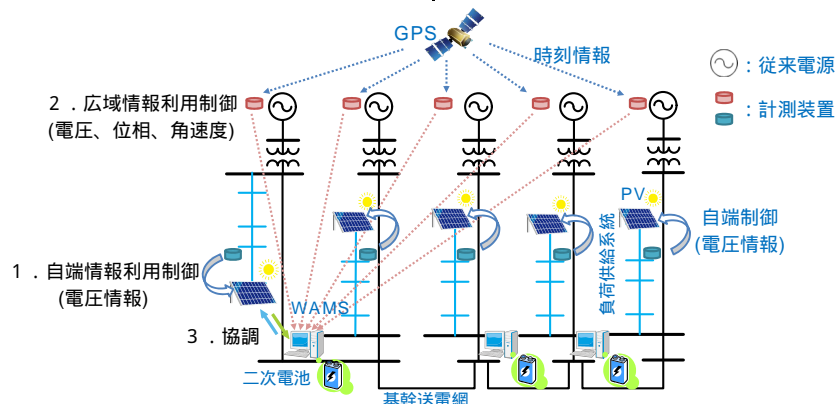


図2 提案する電力系統安定化システムの概要

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4件)

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

K. Kawabe, I. Matsuda, and K. Tanaka, "Impact of postfault active power recovery of photovoltaic power generation on transient stability," *Electrical Engineering in Japan*, Vol. 198, No. 4, pp. 26-36, DOI: 10.1002/eej.22939 (2017) (Translated Reprint), 査読有

河辺賢一, 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

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11件)

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*, 6 pages, Manchester (UK) (発表確定)

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*, 8 pages, 2016年6月20日-24日, Genoa (Italy)

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)

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)

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」, 平成29年電気学会B部門大会, 2 pages, 明治大学(東京都)(発表確定)

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)

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)

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」, 平成28年電気学会B部門大会, 2016年9月7日-9日, 九州工業大学(福岡県)

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」, 平成27年電気学会B部門大会, 2015年8月27日, 名城大学(愛知県)

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」, 平成27年度電気学会電力技術・電力系統技術合研, 2015年9月17日, 東北大学(宮城県)

犬飼良佑, 河辺賢一, 田中和幸, 「太陽光発電が連系された電力系統の過渡安定度向上を目的とした二次電池の設置場所に関する一考察」, 平成27年度電気関係学会北陸支部連合大会, 2015年9月12日-13日, 金沢工業大学(石川県)

[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]

ホームページ等

<http://www.pwrsys.ee.titech.ac.jp/research.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

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

(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

犬飼 良佑 (Inukai Ryosuke)