

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 14 日現在

機関番号：16101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420258

研究課題名(和文)分散形エネルギー源の大量導入と電力系統の安定性を両立する自励式電力変換器制御

研究課題名(英文) Power System Stabilization by Self-Commutated Power Converter Control under High Penetration of Distributed Energy Resources

研究代表者

北條 昌秀 (HOJO, Masahide)

徳島大学・ソシオテクノサイエンス研究部・教授

研究者番号：10314840

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：自然エネルギー利用電源の導入を行いつつ電力系統の安定性を維持するため、それら電源に使われる電力変換器の出力電圧を微調整して電源間の出力電力のバランスを実現し、電力系統の安定性を向上する方法を提案した。その有用性を確かめるために、自然エネルギー利用電源を積極的に活用した小規模電力系統モデルを対象に詳細なシミュレーションを行った結果、負荷変動に対して周波数と電圧の変動を同時に抑制可能なことを確かめることができた。

研究成果の概要(英文)：Increasing installations of distributed energy resources, a lot of self-commutated power converters for their utility interface have been installed to a power system. However, the power system may be unstable because the static power converter used to trade the active power at its own discretion by synchronizing its output voltage with the one at the point of common coupling. In order to stabilize the power system, this research project proposes a phase-shifting control of its output voltage, which simply realizes an active power exchange between the power sources to stabilize the power system. The distributed energy resources equipped with the proposed control are verified in a typical model of small-scale power system by simulation study. It has been confirmed that the proposed control can reduce both frequency and voltage variations under a load variation.

研究分野：電力システムへのパワーエレクトロニクス応用

キーワード：自励式電力変換器 自然エネルギー利用電源 同期発電機 同期化力 電圧位相

1. 研究開始当初の背景

近年、太陽光発電や風力発電といった自然エネルギー利用電源の導入拡大が急速に進んでおり、大容量の設備も導入されてきていることは周知の事実である。これら設備の多くは、自励式電力変換器を用いて電力系統に連系される。しかし、通常、これらの変換器は、各装置が発電可能電力に基づく所望の有効電力を電力系統に注入するよう制御されるため、電力系統との協調性が乏しく、このまま電源全体における変換器比率が高まると電力系統の安定性が著しく損なわれることになる。

最も簡単な対策としては、こうした自然エネルギー利用電源の出力過多が原因で電力系統の安定性に問題が生じる状況において単純に出力を抑制する方法が挙げられるが、最善の策とはいえない。そもそも、電力系統は同期発電機を主たる電源とし、仮に電力系統に外乱が加わったとしても、同期発電機が持つ慣性エネルギーを背景にして、発電機群が互いに有効電力を授受することによって周波数の安定性を保つことができる同期化力というメカニズムがあった。そこで、自励式電力変換器が持つ制御性の高さを十分に活用して、あたかも同期発電機のように振る舞わせる、いわゆる仮想同期発電機という考え方が研究開始当時、注目されはじめたところであった。その制御系の構築方法には様々な提案がなされていたが、自然エネルギー利用電源の導入が急速に進むなかで、これらにどのような仕様の同期発電機特性を付与するか、また、回転機のように大きな慣性を持たず、かつ過電流に対して十分な耐量のない自励式電力変換器ベースの電源にかなる慣性を模擬させるべきか、など、課題が残されていた。

2. 研究の目的

上述の課題に対して、本研究計画では、自然エネルギー利用電源に用いられる自励式電力変換器の出力電圧位相を適時微量にシフトすることで電源間の有効電力の授受を実現するという単純な方式に基づき、電力系統の周波数変動を抑制する方法を提案した。一般に、交流電気システムでは電圧位相の進んでいる方から遅れている方に有効電力の流れが生じる。そこで、図1のように、基準周波数、ここでは60Hzの基準位相に対して、仮に電力システムに周波数低下が発生して自励式電力変換器の設置端電圧の位相が遅れたような場合には、これより少し進んだ位

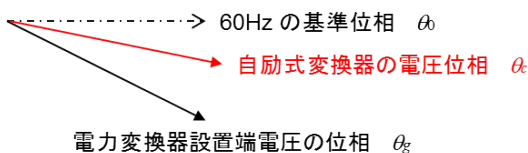


図1 提案制御の概念図

相に変換器の出力電圧位相を設定し、電力系統から変換器側へ有効電力を流して両者の同期を回復する方式を提案した。

この制御方式は、基準位相と電力変換器設置端電圧位相の間のいかなる場所に変換器出力電圧位相を設定するかによって、変換器の貢献度合いを調整することが可能である。すなわち、単一の制御ゲインの増減によって簡単に周波数制御への貢献度を調整できるところに本研究の独創的な特徴がある。

また、制御対象は自然エネルギー利用電源の導入拡大に伴って刻々と変化する電力システムであるため、正確なモデルの構築それ自体にも困難を伴う。提案制御は、制御対象の正確なモデル化の下での理論的な制御系設計を行わないため、最大の制御効果が得られるとは限らないが、システム構成の変化にも柔軟で、変換器制御系設計が個別に実施でき、自律制御が可能で、自然エネルギー利用電源の利用拡大に伴って電力変換器の台数が増えても再調整が不要である点も特色の一つである。

さらに、他の類似の制御系に比べても、微分要素を持たないため、実際の計測環境下でのノイズ等の干渉にも強く、制御系の安定性にも優れている。

以上、期待される提案制御の特徴と制御効果を明らかにするために、自然エネルギー利用電源の電源構成比率が高い具体的な電力系統モデルを構成して提案制御を適用し、詳細な計算機シミュレーションを行って、提案制御の有用性を立証することが本研究の目的である。

3. 研究の方法

研究の立ち上げに際して、電力変換回路技術者の間で広く使われていて、検証結果の信頼性が高いシミュレーション環境を構築した。その上で、一般的な電源及び負荷により構成される、標準的な電力系統モデルを構築し、各種機器定数等パラメータの検討を行った。その制御対象モデルを用いて、提案する自励式変換器の電圧位相制御の詳細なシミュレーション解析を行いながら検証を進めることとした。同時に、類似研究の動向調査も綿密に行うこととした。

まず、安定性・自律性・独立設計という提案制御の3つの特徴を立証する目的で、簡単な電力系統モデルでシミュレーションを行って、提案制御の基本特性を検証した。

本研究構想の実現には、回転中の同期発電機が持つ慣性エネルギーに相当するエネルギー蓄積要素を自然エネルギー利用電源が備える必要がある。現実の自然エネルギー利用電源の導入状況を鑑みると、その電源と同容量相当の蓄電設備が平滑化の目的で併設されることも多い。また、過渡時にこのエネルギー授受を行うためには、自励式電力変換器自身にも十分な容量、すなわち過電流に耐えられる冗長的な電流耐量等が求められる。

実際、自然エネルギー利用電源は出力変動が必至であるため、電力変換器には少なからず空き容量は必ず存在すると見込んで良い。したがって、提案技術の適用範囲を広げるために、蓄電池併設の有無、空き容量の大小に応じた制御系の複数仕様の検討を行った。さらに、種々の負荷条件下での有用性についても検討を行った。

4. 研究成果

まず、提案制御の最大の特徴である、単一の制御ゲインの増減によって簡単に周波数制御への貢献度を調整できることについて、マイクログリッドを対象として瞬時値ベースのシミュレーションを行って基本動作特性を確認することができた。マイクログリッドとは、自然エネルギー利用電源などの分散電源と、その近傍に設置された負荷で構成される地域的な小規模電力系統のことで、自励式電力変換器を用いた電源の比率が高く、回転機形発電機の発電電力に近い構成を取るような構成も考えられる。従って、提案制御の用途に適した電力系統の一つとして考えられる。回転機形発電機には化石燃料を用いるディーゼル発電機を想定し、自然エネルギー利用電源を模擬した自励式電力変換器の出力を大きく設定したモデル系統を構築した。そこで、負荷変動を模擬したところ、周波数低下が再現されたが、この下で提案制御を適用した場合には、その単一制御ゲインの調整によって周波数変動の抑制効果が見られることを確かめた。その成果の一部を査読付き論文として雑誌論文にて公表した。

そして、自然エネルギー利用電源の一例として太陽光発電システムを選び、提案制御を実装する方法について検討をした。通常、太陽光発電システムは、太陽電池から最大出力が得られるように、太陽電池の動作電圧を制御している。しかし、提案制御を実現するためには、短時間とはいえ、それよりも大きな出力有効電力が要求されることになる。これに対応できるよう、蓄電池を併設することで提案制御を実現することにした。シミュレーションを行って、提案制御の効果を確認し、その成果を電気学会研究会（タイ王国バンコク市開催）で発表し、電気学会研究会資料に論文として成果を残した。

一方、電力系統では電力品質の確保も重要な課題の一つである。仮に基準値よりも高い電圧になると、自励式電力変換器の保護を目的として、自然エネルギー利用電源や蓄電池システムは、その運転を停止して自らを切り離すよう振る舞う場合がある。特に、マイクログリッドのような小規模な電力系統では、電源の振る舞いがマイクログリッド全体に波及する可能性もあり、注意を要する。そこで、提案制御に加えて、電力系統の電圧を一定範囲に維持する制御を同時に行うようにした。具体的には、提案制御では出力電圧の位相を図1のように調整したのに加えて、そ

の振幅を同時に調整して、負荷端子の電圧を一定範囲に収めることができるように、提案制御を改良した。しかしながら、この両者は干渉が生じる場合がある。そこで、両者の協調を図り、周波数変動抑制と電圧変動抑制の両立が可能なことを明らかにした。

図2は、その結果の一例である。グラフは、上から下へ順に、周波数、電圧、2種類の電源（回転機形発電機である同期発電機 SG と自励式電力変換器利用電源 INV）の出力有効電力、出力無効電力、出力電流を表している。なお、比較のために図3には提案制御を適用しなかった場合の結果を示す。負荷変動の直後の周波数と電圧の変動を比べると、図2の方が改良型提案制御によって変動量が小さく抑制できていることがわかる。このように、良好な制御効果が得られることをシミュレーションで確かめて、これらの成果の一部を研究会論文としてまとめて発表した。

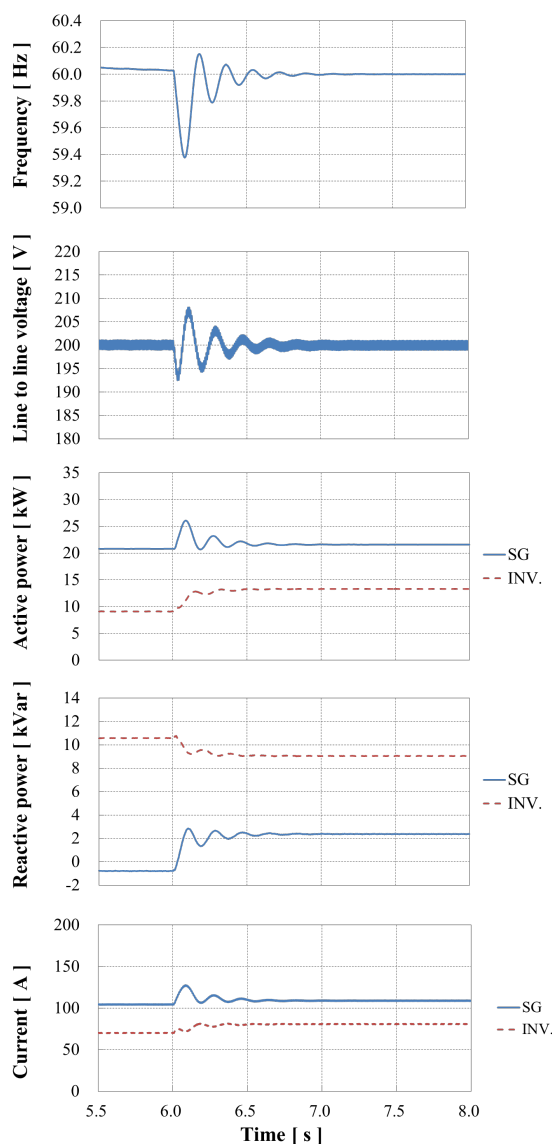


図2 改良型提案制御の効果

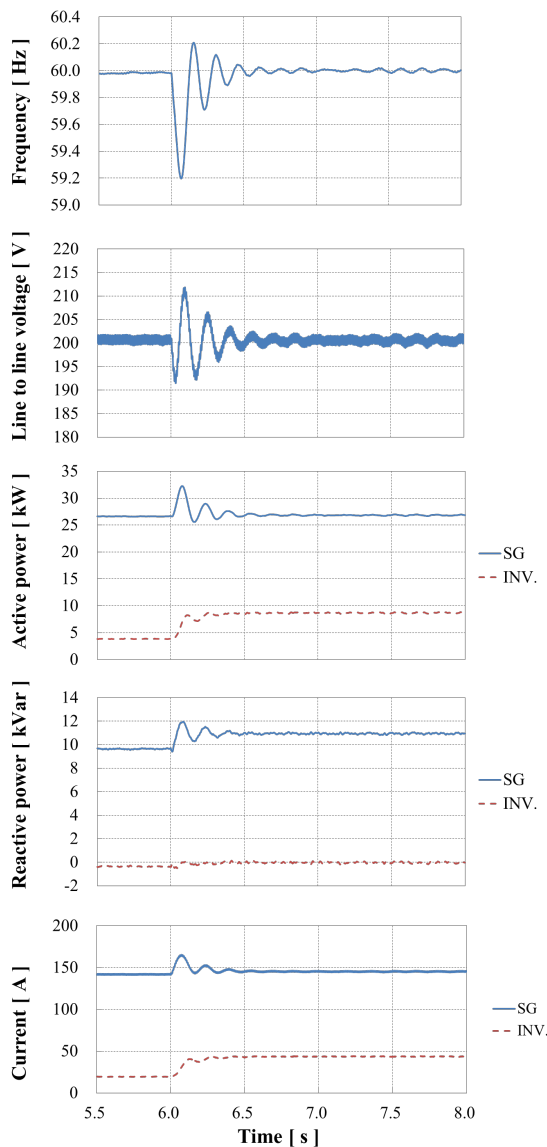


図3 提案制御を適用しない場合の結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計3件)

相田 晃輝, 北條 昌秀, 山中 建二, 植田 喜延, 舟橋 俊久、分散電源用自励式変換器による同期化力向上制御の検討、電気学会研究会資料、査読無、Vol. PE(PSE, SPC)-16、No.036 (56、75)、pp.95~99、2016年

Masahide Hojo, Ryo Ikeshita, Kenji Yamanaka, Yoshinobu Ueda and Toshihisa Funabashi, "Frequency Regulation in a Microgrid by Voltage Phasor Regulation of a Photovoltaic Generation Unit," 査読無、The Papers of Technical Meeting, IEE JAPAN, Vol. PE(PSE)-15, No.002(024), pp.1-5, 2015.

Masahide Hojo, Ryo Ikeshita, Yoshinobu Ueda and Toshihisa Funabashi, "Phasor

Control of Converter Output Voltage for Frequency Regulation," 査読有, Journal of Power and Energy Engineering, Vol.2, No.7, pp.19-27, 2014.
DOI: 10.4236/jpee.2014.27003

〔学会発表〕(計1件)

相田 晃輝、北條 昌秀、山中 建二、系統連系インバータの出力電圧位相制御における負荷端子電圧調整法の検討、電気学会電力・エネルギー部門大会、2014年9月10日、同志社大学京田辺キャンパス(京都府京田辺市)

〔その他〕

ホームページ

<http://pub2.db.tokushima-u.ac.jp/ERD/person/10717/work-ja.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

北條 昌秀 (HOJO, Masahide)

徳島大学・大学院ソシオテクノサイエンス研究部・教授

研究者番号：10314840

(2) 研究分担者

山中 建二 (YAMANAKA, Kenji)

徳島大学・大学院ソシオテクノサイエンス研究部・助教

研究者番号：40641155