

令和元年6月20日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2018

課題番号：17K14643

研究課題名(和文) 現代制御理論を用いて振動低減を行う仮想同期発電機の制御に関する研究

研究課題名(英文) Studies on oscillation damping of virtual synchronous generators using modern control theory

研究代表者

劉 佳(Liu, Jia)

大阪大学・工学研究科・助教

研究者番号：00791922

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、電力系統に慣性を寄与する仮想同期発電機制御を用いたインバータ型分散電源について、現代制御理論によりその振動性を低減することを目的とした。そのため、極配置法を用いた状態フィードバック制御を提案し、そのチューニング方法および設計フローチャートを確立した。さらに、様々な運転モードと条件において提案制御の特性を解析・評価し、従来制御と比較した。その結果、提案制御が従来方法より速い応答を実現できると同時に、リップル・ノイズ耐性も優れていることを、理論解析およびシミュレーション・実験にて示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

再生可能エネルギー発電の大量導入により、同期発電機がどんどんインバータに切り替わっていく次世代の電力系統において、インバータの慣性補償機能が重要になる。それができる仮想同期発電機制御が振動しやすいが、本研究で提案した振動低減方法でその弱点をなくし、インバータ型分散電源の大量導入の土台を構築した。提案した設計方法と解析方法も、分散電源の研究において世界を先んじ、今後の研究開発の理論的基盤に寄与する。

研究成果の概要(英文)：Virtual synchronous generator (VSG) control is a promising control method for inverter-interfaced distributed generator, as it can provide inertia support for the power system. In this study, we try to propose a novel damping method adopting modern control theory, in order to alleviate the oscillatory feature of VSG-based inverter. This idea is realized by a solution based on state feedback control using pole placement, and its tuning method and design procedure are established. Moreover, the proposed method is analyzed and evaluated in various operation mode and under various conditions, and comparisons with existing methods are performed. As a result, from theoretical analyses and experimental results, we demonstrate that the proposed method has faster response than previous methods with outstanding ripple and noise attenuation ability.

研究分野：パワーエレクトロニクス

キーワード：インバータ 分散電源 仮想同期発電機 状態フィードバック 極配置 現代制御理論

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

(1) インバータ型電源の仮想同期発電機制御 従来の火力や水力発電では、同期発電機を通じて原動力を電力に変換する。同期発電機は回転子に慣性があり、その慣性が電力系統の周波数変動を抑制し、周波数の安定性に大いに寄与する。しかし、ほとんどの再生可能エネルギー発電の変換装置であるインバータはスイッチング素子により構成されるため、そのような慣性を持っていない。そのため、インバータ型分散電源の導入率の増加につれて、電力系統全体の慣性が減り、周波数が不安定になる恐れがある。そこで、インバータの制御系に同期発電機の動揺方程式を模擬するアルゴリズムを組み込み、DCリンクに接続された電力貯蔵装置に蓄えられたエネルギーを活用する仮想同期発電機（Virtual Synchronous Generator、VSG）制御をインバータに適用すれば、インバータに同期機と同様な慣性を与えることができ、系統の安定化に寄与することができる。

(2) 振動抑制制御の必要性 動揺方程式の導入によりインバータの出力電力と周波数が同期発電機と同じように振動しやすくなり、この振動によりインバータが過電流で停止する恐れがある。本研究では、現代制御理論を用いてVSG制御の振動特性を改良できる方法を検討し、電力系統に優しいインバータ型分散電源の導入方式を提案する。

### 2. 研究の目的

(1) 振動低減を行うVSG制御の提案 図1に示すように現代制御理論をVSG制御に組み込み、振動低減を行うインバータ型分散電源システムを構築する。そのため、インバータ型分散電源の状態空間モデルを構築し、適切な現代制御理論を適用する。

(2) 様々な運転モードにおける特性の評価 VSG制御を適用するインバータ型分散電源は系統連系だけでなく、一機または多機自立運転も可能である。各運転モードにおいて、提案制御の特性を解析し、シミュレーションおよび実験にて検証する。

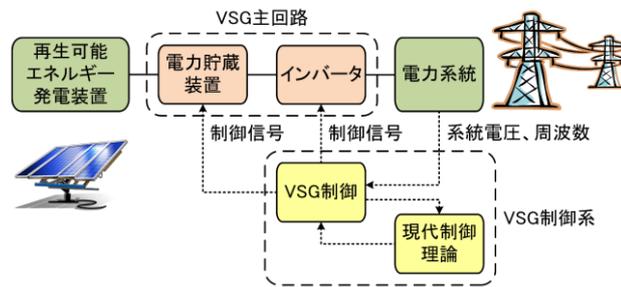


図1 現代制御理論のVSGへの組み込み

(3) 従来方法との比較 VSGの振動抑制方法については、文献①で提案

された Damper Windings Emulation（以下DWE）、文献②で提案された Damping Correction Loop（以下DCL）など従来方法も提案されている。本研究で提案した方法を従来制御と比較し、その優位性を示す必要がある。

### 3. 研究の方法

(1) 現代制御方式の選定 系統連系モードにおけるVSGの状態空間モデルを解析し、その閉ループ極の位置が振動に密接することがわかるため、極配置法を用いた状態フィードバック制御を適用することにした。

(2) モード間の状態空間モデルの定式変換法 系統連系モードで解析、設計を行った制御方法が、一機および多機自立運転モードでどのように振る舞うことを解明するため、モード間の状態空間モデルの定式変換法を提案した。

(3) 提案制御の検証 提案制御を検証するために、PSCAD/EMTDCを用いた計算機シミュレーションと、図2に示す2台のインバータに構成される実験回路にて検証した。

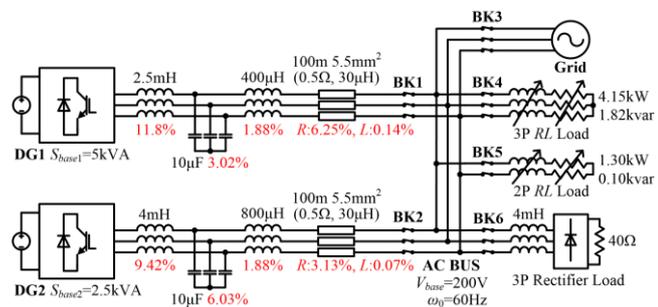


図2 実験システムの回路構成

### 4. 研究成果

(1) 極配置法を用いた状態フィードバック制御の提案 本研究の提案方法では、出力電力および仮想角周波数をフィードバックし、その和で制動電力を生成する。また制動電力の積分もフィードバックされ、制動電力に加える。出力電力は既存のVSG制御測定済み、仮想角周波数は内部変数のため、提案方法による新たな計測は要しない。また、制動電力の積分をフィードバックすることにより定常状態では制動電力を0にすることができ、VSGの動作点に影響しない。さらに、出力電力にローパスフィルタ（LPF）をかけない方法（以下SF）とかける方法（以下

SFLPF) の二種類を提案した。SF 法はフィードバックゲインの計算が簡単であるが、出力電力のノイズに影響されやすい。それに対し SFLPF は部分フィードバックのためゲインの計算が複雑になるが、リップル・ノイズ耐性が向上する。

(2) 提案制御のチューニング方法および設計フローチャートの確立 提案した SF 法と SFLPF 法は、

系統連系モードの閉ループ極を配置することにより振動減衰を行う方法であるため、所望の慣性と減衰係数を有する閉ループ極の配置位置の決め方を定式化した。それでも自由度が一つ余るため、その自由度を生かし、図 3 に示すように動的特性の最適化設計を検討した。また、フィードバックゲインの正しい数値解が得られない悪条件を避ける方法を確立し、提案制御の設計フローチャートを確立した。

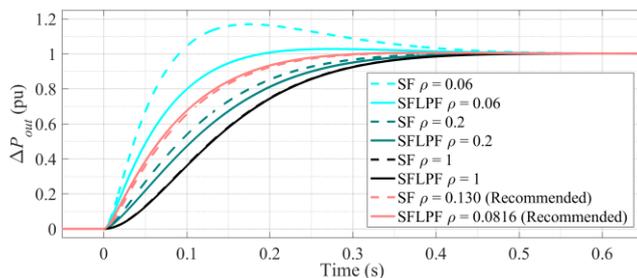


図 3 出力電力指令の追従応答のチューニング

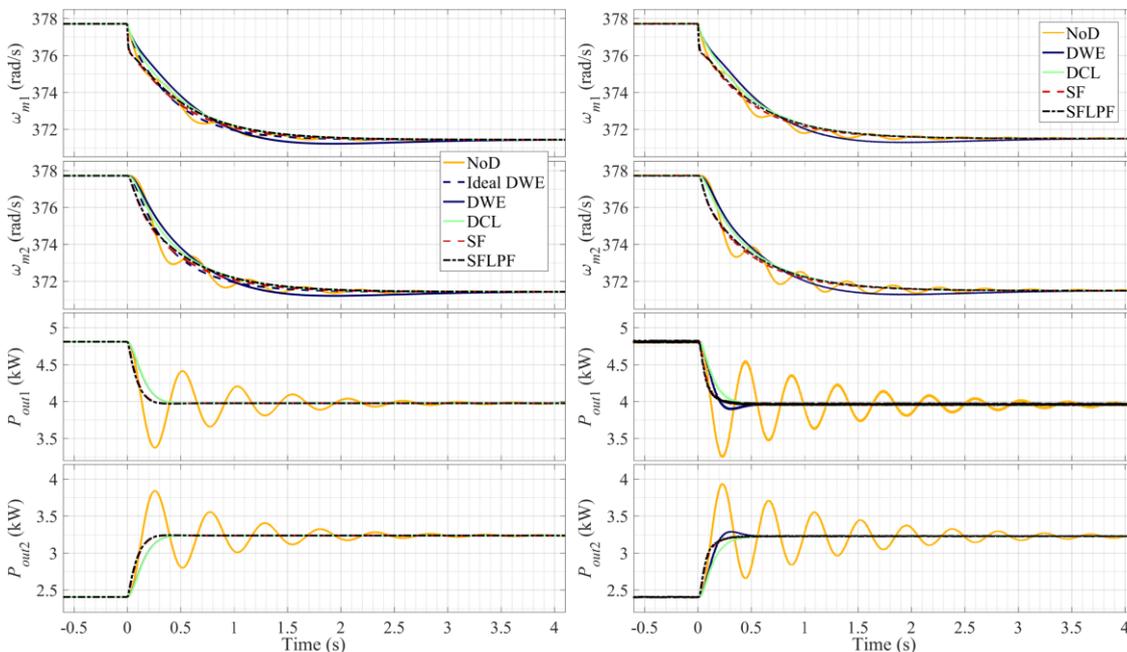


図 4 二機自立運転モード DG1 の電力指令値変更時の解析結果(左)と実験結果(右)

(3) 様々な運転モードにおける特性の評価 提案したモード間の状態空間モデルの定式変換法を用いて、SF 法と SFLPF 法のそれぞれの一機および多機自立運転モードにおける状態空間モデルを導出した。また、提案した定式変換法は提案制御のみならず、すべての多モード運転可能な分散電源に適用できることを確認した。さらに、多機自立運転モードの極は系統連系モードと一機自立運転モードの両方の特性を有することがわかった。最後に、様々な運転モードと条件において、状態空間モデルの定式変換法で導出した状態空間モデルで得られた動的応答の解析結果と実験結果を比較し、高度の一致性を確認した。例として、図 4 に二機自立運転モード DG1 の電力指令値変更時の解析結果と実験結果を示す。このように、すべての VSG 方法について実験結果により解析結果を検証した。

(4) 従来方法との比較 図 4 に示すように、振動低減制御なしの VSG 制御 (NoD) と比べ、提案した SF 法と SFLPF 法に十分な振動抑制効果があることがわかった。また、既存の DWE 法や DCL 法より、分散電源の出力電力の応答が速くなることがわかった (図中 SF 法と SFLPF 法の出力電力の応答が重なっている)。さらに DWE 法では角周波数の応答に望まないオーバーシュートが見られるが、提案制御の結果にはそのような問題が認められない。なお、図 5 に不平衡・高調波負荷による出力電力( $P_{out1}$ )にリップ

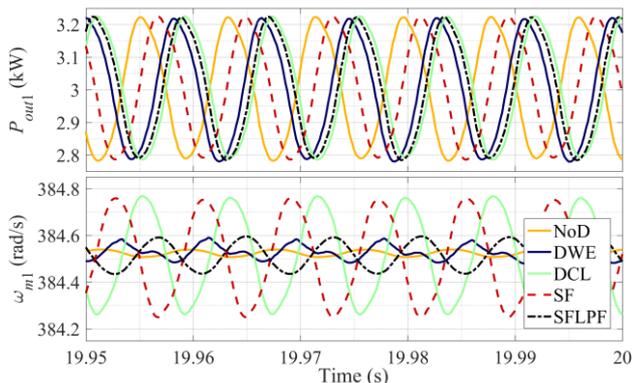


図 5 不平衡・高調波負荷によるリップル

ルが発生するとき、仮想角周波数の様子を示す。SF 法の場合はリップルが DCL 並みに大きいですが、SFLPF 法の場合リップルは DWE 法並みに低減できることがわかった。総じて、SFLPF 法は従来方法より速い応答を実現できると同時に、リップル・ノイズ耐性も優れているので、現時点で最も優れた VSG 振動低減方法と言える。

#### <引用文献>

- ① T. Shintai, Y. Miura, and T. Ise, "Oscillation damping of a distributed generator using a virtual synchronous generator," IEEE Trans. Power Del., vol. 29, no. 2, pp. 668-676, April 2014.
- ② S. Dong and Y. C. Chen, "Adjusting synchronverter dynamic response speed via damping correction loop," IEEE Trans. Energy Convers., vol. 32, no. 2, pp. 608-619, June 2017.

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 2 件)

- ① Jia Liu, Yushi Miura, and Toshifumi Ise, "A comparative study on damping methods of virtual synchronous generator control", Proceedings of EPE 2019 - ECCE Europe, 査読有, 印刷中.
- ② Jia Liu, Yushi Miura, and Toshifumi Ise, "A novel oscillation damping method of virtual synchronous generator control without PLL using pole placement", Proceedings of IPEC 2018 - ECCE Asia, 査読有, pp. 775-781.  
DOI: 10.23919/IPEC.2018.8508003  
(ほか 2 件査読中)

[学会発表] (計 1 件)

- ① 劉佳, 三浦友史, 伊瀬敏史: "極配置法による仮想同期発電機制御の振動抑制方法" 電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会, PE-17-101, PSE-17-101, pp.1-6 (2017)

#### 6. 研究組織

(1) 研究分担者 無

(2) 研究協力者

研究協力者氏名: 伊瀬敏史、三浦友史

ローマ字氏名: Toshifumi Ise, Yushi Miura

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。