

2023 年度 若手・女性研究者奨励金 レポート

研究課題	電力システムの安定度改善のための VSG-GFM インバータの構築—Fuzzy-PID-VSG 制御による GFM インバータの構築—
キーワード	①仮想同期発電機 ②Fuzzy-PID-可変慣性制御 ③GFM インバータ

研究者の所属・氏名等

フリガナ 氏 名	サトウ タカマサ 佐藤 孝政
配付時の所属先・職位等 (令和 5 年 4 月 1 日現在)	北海道科学大学工学部電気電子工学科・助教
現在の所属先・職位等	無所属
プロフィール	2018 年 3 月北見工業大学大学院工学研究科電気電子工学専攻を修了後、北海道電力株式会社に入社。電力会社在籍中に北海道全域停電（ブラックアウト）を経験。2022 年 4 月に北見工業大学大学院工学研究科寒冷地・環境・エネルギー工学を修了（工学博士）。主に再生可能エネルギー電源に関する研究に従事。

1. 研究の概要

カーボンニュートラルの達成に向けて、太陽光発電のようなインバータを介して連系する電源（以下、インバータ電源）が増えている。インバータ電源は一般的には慣性力や同期化力を持たないため、同期発電機が相対的に減少することで系統安定度が低下することが懸念されている。その対策の一つとして、インバータ電源に同期発電機と同様の特性を持たせる仮想同期発電機制御に関する研究が進められている。仮想同期発電機制御は様々な手法が提案されているが、本研究では**Fuzzy-PIDアルゴリズムを導入した仮想同期発電機制御方式（図1 以下、Fuzzy-PID-VSG）を採用し、それを自立運転が可能なGrid Forming（以下、GFM）インバータに導入した**。Fuzzy-PID-VSGでは、制動・慣性・同期化力の三成分にて同期機を模擬しているが、特徴の1つとして三成分をそれぞれ独立して制御することが可能であることが挙げられる。本研究では、**三成分が独立して制御が可能な点について注目して、仮想同期発電機の慣性の値を系統の状況に合わせて変更する可変慣性制御（以下、Fuzzy-PID-可変慣性VSG制御）に発展させ**、系統安定度の改善効果について検証した。同期発電機のみで構成される系統モデルとその同期発電機の1台を同容量のGFMインバータ電源に置き換えた系統モデルをそれぞれ用意し、更に仮想同期発電機の慣性値が固定値と可変値のケースを用意し、大規模ウィンドファームが脱落する系統事故を想定した過渡解析における各ケースの周波数特性を評価した。

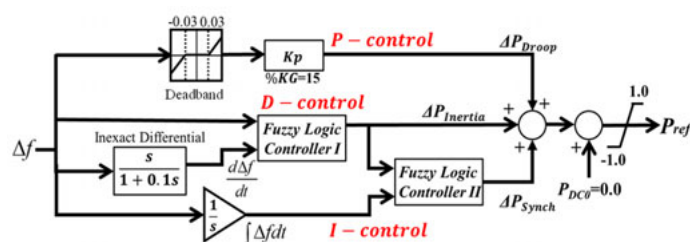


図1 Fuzzy-PID-VSG

2. 研究の動機、目的

現在、カーボンニュートラルの観点より、世界的に再生可能エネルギーの連系量が増加しており、日本でも 2030 年までには全体の 13~14% に増加させる計画がある。それに伴い、系統における慣性力不足の問題が議論され始め、実際に 2016 年の南オーストラリアで慣性力不足による大停電を引き起こしている。その対策としてインバータ電源に同期発電機の特性を仮想的に取り入れる仮想同期発電機制御が世界的に研究されるようになった。しかし、その多くが同期発電機の模擬に注目しており、インバータ電源の応答性能と同期発電機の安定供給性能の両者のメリットを活かした検討はほとんどされていない。**本研究の Fuzzy-PID 可変慣性 VSG 制御は、インバータ電源が持つ高い応答性能と同期発電機が持つ地絡事故直後といった過渡状態時における電力の安定供給性能を両立することが理論上は可能であり、その研究成果は今後益々需要が高まる再生可能エネルギー電源の導入促進に役立つものと考えている。**

3. 研究の結果

〈3-1〉 解析モデル

IEEE 標準モデルである 3 機 9 母線系統を参考に、図 2 に示す電力系統モデルを構築した。本系統は火力プラントを想定した 2 つの同期発電機 (SG1-200MVA-LFC、SG2-200MVA-GF)、GFM インバータ電源 (VSG-200MVA)、ウィンドファーム (SCIG-100MVA、かご型誘導発電機で構成) および 3 つの負荷 (Load A、B、C) 等で構成される。GFM インバータ電源を水力プラント想定同期発電機 (SG3-200MVA-LFC) に換装した系統も用意した。本系統の F 点で 3 線地絡故障発生、0.1 秒後に故障線除去、その 0.8 秒後に再閉路、1.6s 時に FRT (Fault Ride Through) 要件に準じてウィンドファームの運転継続・解列を行う故障解析を行った。

GFM インバータ電源の制御モデルを図 3 に示す。また、仮想同期発電機制御の入力信号となる有効電力指令値の算出方法として、本研究では図 4 (a) :Fuzzy-PI 制御および (b) :Fuzzy-PID 可変慣性制御を採用した。Fuzzy-PI 制御および Fuzzy-PID 可変慣性制御の P-control では、系統周波数偏差を系統定数であるゲインを介することで制御信号 ΔP_{droop} が決定される。I-control では、周波数偏差とその積分の 2 信号を Fuzzy Logic Controller I に入力して Fuzzy の出力特性に基づいて制御信号 ΔP_{synch} が決定される。初期出力に ΔP_{droop} と ΔP_{synch} を加算した信号 Output Power Order が図 3 の有効電力目標値としてフィードバックされる。D-control では、周波数偏差とその不完全微分の 2 信号を Fuzzy Logic Controller II に入力して Fuzzy の出力特性に基づいて制御信号 $\Delta P_{inertia}$ が決定される。そして、得られた信号は図 3 の慣性定数値 M にフィードバックされ、慣性が系統周波数とその微分値に応じて可変となるような構成となっている。

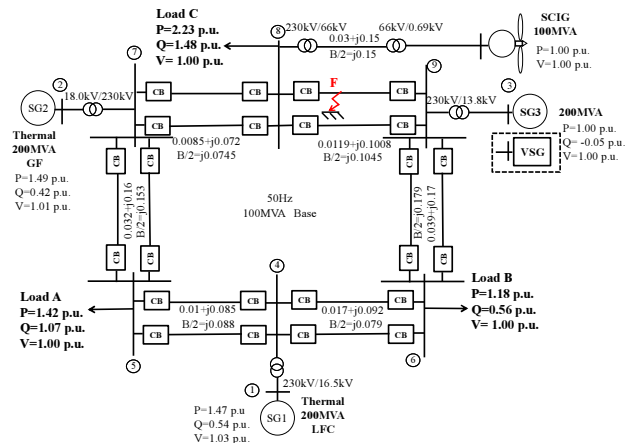


図 2 Power system model

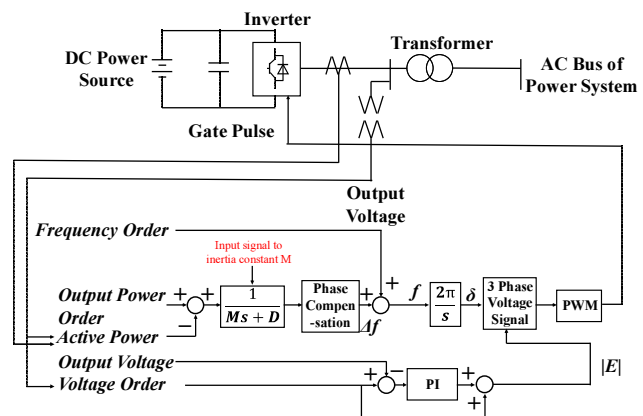
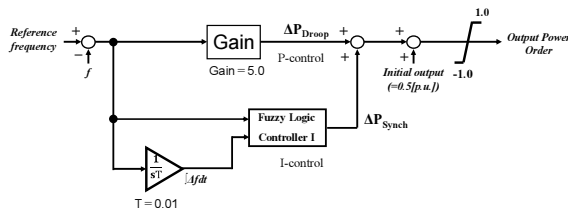
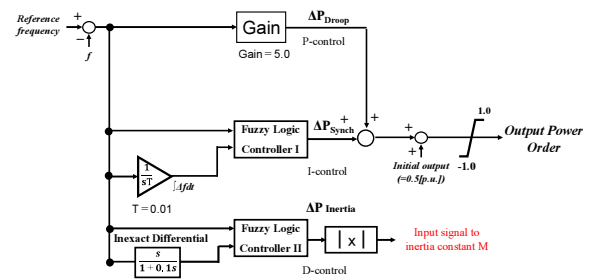


図 3 Control model of inverter



(a) Case2、3 : Fuzzy-PI control model



(b) Case4 : Fuzzy-PID variable inertia control model

図4 Active power control system

〈3-2〉解析結果

Fuzzy-PID 可変慣性制御の有効性を確認するにあたり以下の4ケースで検証を行い、各ケースの周波数応答を比較・考察した。

Case 1 : SG3 を連系

Case 2 : PI 制御 VSG (図4(a) 固定慣性 $M=0.2$) を連系

Case 3 : PI 制御 VSG (図4(a) 固定慣性 $M=16.0$) を連系

Case 4 : Fuzzy-PID-可変慣性 VSG 制御 (図4(b)) を連系

図5にSCIGの端子電圧、図6に系統周波数のグラフを示す。図5より事故発生後、全てのケースでFRT要件を満たせずウィンドファームが系統より解列することが確認された。図6より、従来の水力プラント想定同期発電機を連系したCase1では、系統周波数が47Hz近くまで低下したのに対して、VSGを連系したCase2、3、4は周波数変動が抑制されているのが確認できる。特に、提案制御法であるFuzzy-PID-可変慣性VSG制御を用いたCase4は、VSGの慣性値が変化することで、どのケースよりも変動が小さく50Hzに回復する時間が最も早くなる結果となった。

以上より、**Fuzzy-PID-可変慣性 VSG 制御は系統周波数に応じて慣性値が変化する応答性から、周波数変動抑制の効果が高いことが確認**された。

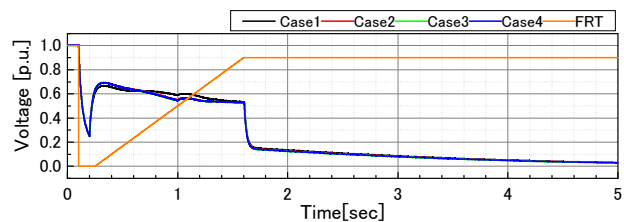


図5 SCIG terminal voltage and FRT characteristics

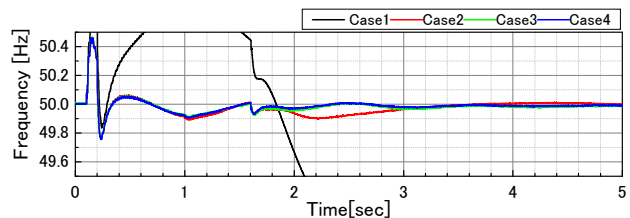


図6 System frequency

4. 研究者としてのこれからの展望

電力会社に勤務していた頃に体験したブラックアウトは、私の人生の中で非常に衝撃的なものでした。電気機器類は全て使えず建物内の水道も止まり、かろうじて乾電池で動かすことができる家電で回りと助け合って過ごしたのを昨日のように覚えており、質の良い電気が多くの人の手を介して各家庭・企業に届けられているありがたさを忘れないようにしています。日本は世界的に見ても停電が少なく、プラグをコンセントに挿せば手軽に質の良い電気をいつでも使用できます。一方で、現在カーボンニュートラルへの取り組みとして再生可能エネルギー電源の拡大が進められています。カーボンニュートラルと安定した電力システムの両立は解決すべき課題がたくさんありますが、今後も仮想同期発電機制御をはじめとした再生可能エネルギー電源の拡大に向けた研究活動を継続し、日本、世界中の誰もが安定した電力を使用し続けられることを大きな目標として、電力分野へ貢献できるように努力していきます。

5. 支援者（寄付企業等や社会一般）等へのメッセージ

この度は、2023 年度若手・女性研究者奨励金に採択していただきまして、誠にありがとうございます。また、関係者各位ならびにご寄付をいただきました皆様には心よりお礼申し上げます。太陽光発電や風力発電といった再生可能エネルギー電源の存在が世間では一般的になった中、再生可能エネルギー拡大に向けた課題の 1 つである系統が持つ慣性力・同期化力不足の認知度はまだまだ低いと考えております。本研究テーマであります仮想同期発電機制御は再生可能エネルギー電源の拡大を促進させていく中で不可欠な要素であり、今後は過電流対策や協調制御といった、より詳細な箇所の検証が必要と考えております。今後も仮想同期発電機制御に関する研究を進めていき、研究成果をフィードバックしていきたいと考えております。今後ともどうぞよろしくお願いいたします。