

令和 5 年 6 月 19 日現在

機関番号：30108

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04448

研究課題名(和文)再生可能エネルギー電源による電力系統安定化制御システムの構築

研究課題名(英文) Construction of Power System Stabilization Control System Using Renewable Energy Sources

研究代表者

矢神 雅規 (Yagami, Masaki)

北海道科学大学・工学部・教授

研究者番号：30364243

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,200,000円

研究成果の概要(和文)：可変速風力発電の慣性応答と太陽光発電の無効電力制御を組み合わせた系統安定化制御システムを構築した。系統周波数と回転速度から有効電力を、各電源の端子電圧から無効電力の制御量を決定するアルゴリズムを実装し、系統擾乱時の過渡安定度を向上させると共に系統電圧・周波数変動の抑制を試みた。さらに、可変速風力発電の系統安定化効果と信頼性を高めるために、deloaded運転を組み合わせた系統安定化制御モデルを構築した。系統事故を想定したシミュレーション解析により、発電機動揺が抑制されると共に系統周波数変動が抑制されることを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

電力系統の慣性力低下問題に対応しつつ再生可能エネルギー電源のさらなる普及を目指し、再生可能エネルギー電源のみで構成する電力系統安定化制御システムを構築した。将来的には海外のように脱FIT(Feed-in Tariff)設備の売電収入減をアンシラリーサービス収入で補填できるような制度改善も想定されるため、再生可能エネルギー電源の導入に弾みをつける施策にも成り得ることから、本研究は学術性と実用性の両面で意義を有していると考えられる。

研究成果の概要(英文)：In this project, a power system stabilization control system has been constructed, which is composed of inertial response control of variable speed wind generator and reactive power control of photovoltaic system. The algorithm to determine the control amount of active power from the system frequency measured in the local area and the rotor speed of the wind generator, and the control amount of reactive power from the terminal voltage of each power source are implemented to the stabilization control system. Furthermore, to enhance the power system stability and the reliability of variable speed wind power generator, the system stabilization control model combining deloaded operation of the variable speed wind generator has been constructed. Through the simulation analysis considering power system faults, it is confirmed that the generator transient oscillations and the system frequency variations are suppressed effectively by the proposed control method.

研究分野：電力システム

キーワード：系統安定度 再生可能エネルギー 同期発電機

1. 研究開始当初の背景

脱炭素化の要請の高まりを背景に、太陽光発電や風力発電等の再生可能エネルギー電源の導入が進められている。しかし、再生可能エネルギー電源の系統連系量が増えると同期発電機の割合が相対的に減少するため、慣性力や同期化力が減少することによる系統安定度の低下が懸念される。この慣性力低下問題の対策として同期調相機や MG (電動機 - 発電機) セットの設置、系統増強などの対策が検討されているが、いずれも系統運用側の対策であり設置・保守コストの面で課題がある。また、蓄電池やこれを併設した再生可能エネルギー電源に慣性応答 (電力系統の需給変動を回転エネルギーが吸収するような発電機動作) させる手法も検討されているが、定常時の蓄電池は基本的には待機運転となるため、発電事業者の経済的負担が大きいという課題がある。そこで本研究では、慣性力低下問題に対応しつつ再生可能エネルギー電源のさらなる普及と蓄電池容量の最小化を目指し、再生可能エネルギー電源で構成される系統安定化制御システムを構築する。

2. 研究の目的

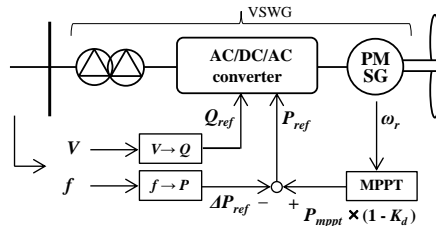
本研究では、ウインドファームを構成する可変速風力発電を大規模なフライホイールエネルギー貯蔵装置のように動作させて慣性の入出力量を制御 (慣性応答) し、太陽光発電の無効電力制御による電圧制御と組み合わせることで、再生可能エネルギー電源のみで構成する系統安定化制御システムを構築する。なお、可変速風力発電のエネルギー保有量を増やすために deloaded 運転 (低負荷運転) する場合の安定化効果も検証する。

3. 研究の方法

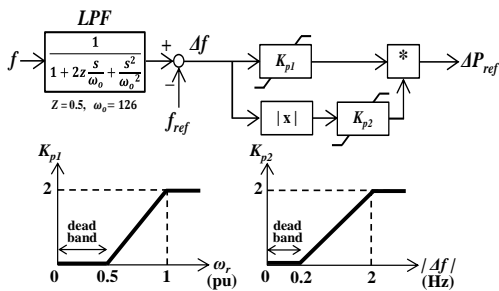
制御モデルを構築し、送電線短絡事故を想定したシミュレーションにより系統安定化効果を検証する。なお、シミュレーションには瞬時値ベースで解析できる PSCAD/EMTDC を使用した。

(1) 制御モデル

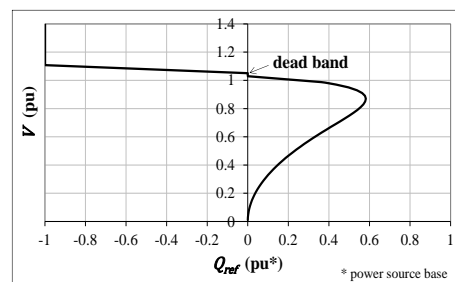
図 1 に可変速風力発電 (VSWG) の制御モデルを示す。永久磁石同期発電機 (PMSG) を採用した可変速風力発電が電力変換器および変圧器を介して連系されている。電力変換器は指令値に基づいて有効電力と無効電力を制御する一般的な制御モデルであるが、有効電力指令値 P_{ref} の決定プロセスに安定度を向上させるための制御系 (周波数 droop 特性) を持たせている。この制御系には周波数および発電機回転数で決まる不感帯域があり、その条件下では $P_{ref} = P_{mppt}$ (K_d は deload 率でここでは 0 とする) となり風速に基づく最大電力点追従制御が行われる。一方、擾乱等により不感帯域を逸脱する条件下では $P_{ref} = P_{mppt} - \Delta P_{ref}$ となり、周波数偏差を抑制するように有効電力指令値を決定する。 $\Delta P_{ref} > 0$ では回転数が上昇して運動エネルギーが蓄積されると共に、VSWG の出力が減ることで等価的に系統負荷が増えて同期発電機に減速力が作用する。一方、 $\Delta P_{ref} < 0$ であれば回転数の運動エネルギーが放出されるため回転数は減少するが、VSWG の出力が増えることで系統負荷が減り、同期発電機に加速力が作用する。このように系統負荷を出力制御の分だけ等価的に増減できるため、擾乱時の過渡動揺の抑制が期待できる。また、無効電力目標値 Q_{ref} は端子電圧 V から (c) 図の特性に基づき決定する。太陽光発電 (PV) の Q_{ref} についても同様であるが、電力変換器の制御時定数を調整して VSWG との制御干渉を回避している。



(a) 可変速風力発電モデル



(b) 周波数-有効電力特性



(c) 電圧-無効電力特性

図 1 制御モデル

(2) 電力系統モデル

図2は検証に用いた電力系統モデルである。IEEE標準モデルである3機9母線系統モデルを参考に構成した。SG1とSG2は火力発電を想定した同期発電機(500MVA)、PVとSG3は電力変換器を利用する電源と回転機電源の特性の違いや無効電力制御の効果を確認するために用意したPV(250MW)と火力発電を想定した同期発電機(250MVA)である。この電力系統においてSG1至近端の1回線で3線地絡(3LG)故障発生、70ms後に故障線除去、その1s後に再閉路とするシミュレーションを実施し、表1に示す各制御方式の効果を比較検証した。

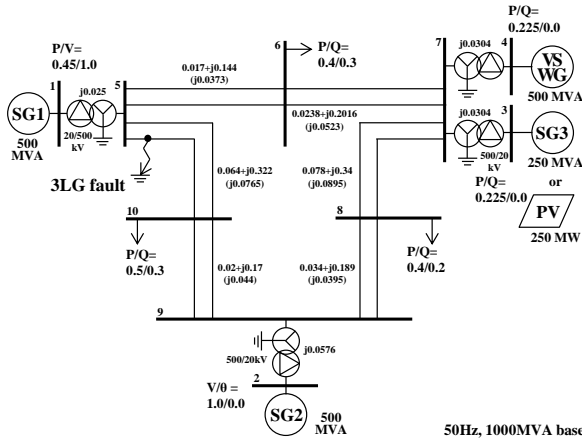


図2 電力系統モデル

表1 制御方法

Control method	
Case 1	Active power control of VSWG
Case 2	Active and reactive power control of VSWG
Case 3	Active power control of VSWG & reactive power control of PV

4. 研究成果

図3にSG3を連系した場合、図4にPVを連系した場合のシミュレーション結果を示す。どちらのケースもVSWGの有効電力制御だけでは十分に安定化されず、制御量が過大となり回転速度が大きく減少したが、無効電力制御を組み合わせることで安定化の効果が大きく向上した。さらに、PVの無効電力制御も加わることで安定性がさらに向上すると共に速度低下が抑制されることを確認した。

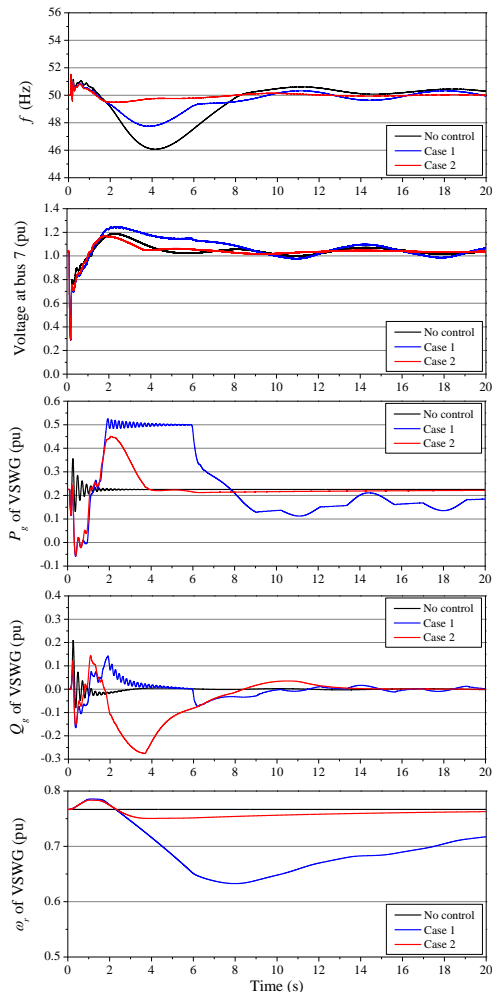


図3 SG3連系時の各種応答

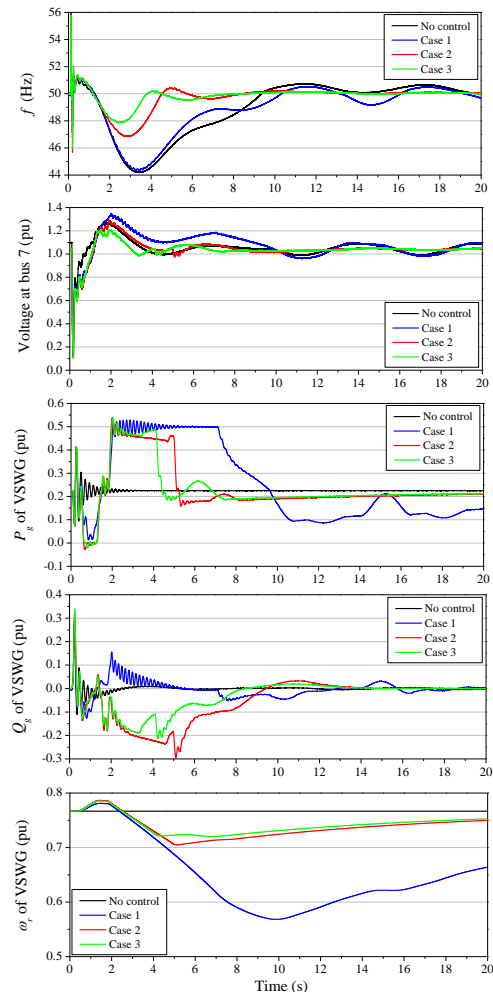


図4 PV連系時の各種応答

次に VSWG を deloaded 運転した場合のシミュレーション結果を示す。deloaded 運転とは、風車が受け取る風エネルギーの全てを電気エネルギーに変換するのではなく、一部を運動エネルギーの形で保有しながら発電する運転方法である。そのため、定常時の出力は減少するが、系統事故等により需給バランスが崩れた際には保有エネルギーの分だけ慣性応答の制御量を増やすことができるため、一般的な最大出力運転よりも安定度向上が期待できる。ただし、deload することで定常時の発電量が減少するため、VSWG をアンシラリーサービス設備として利用することが前提となる。

図 1(a) の K_d を 0.1~0.3 の範囲で変更し、VSWG を deloaded 運転させた場合の制御システムの安定化効果を検証した。なお、 K_d を変えると VSWG の出力が変わり負荷配分が変わるため、設定風速も変更していずれのケースも負荷配分が同じになるように調整している。図 5 に VSWG のパワーカーブ、図 6 に K_d の可変モデルを示す。deload 率が高いほど回転速度が増加する。

図 7 にシミュレーション結果を示す。 K_d の可変範囲が広いほど、すなわち deload 率が大きいほど周波数低下時の VSWG 出力が増え、周波数最下点 (Nadir) が改善されることを確認した。また、風車ブレードピッチ制御によりパワーカーブを変形して回転速度を高めることができるため、ピッチ制御と deloaded 運転を組み合わせることで、Nadir をより改善できる場合があることを確認している。

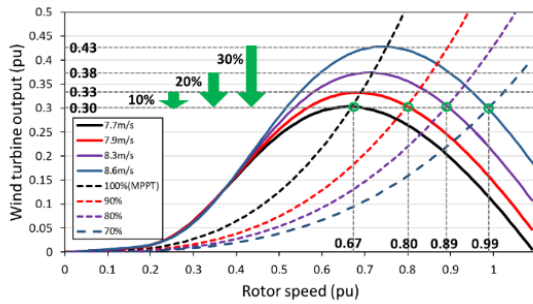


図 5 VSWG のパワーカーブ

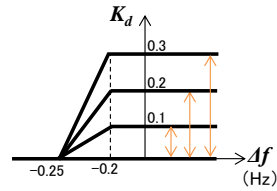


図 6 可変 K_d

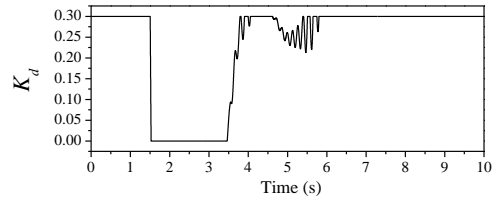
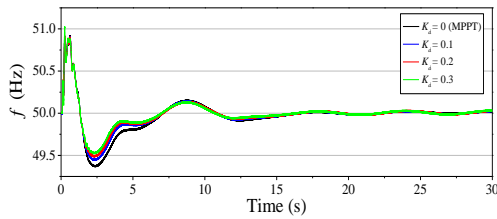


図 7 deloaded 運転時 ($K_d = 0 \sim 0.3$) の各種応答

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Yagami Masaki, Ichinohe Masanori, Tamura Junji	4. 巻 10
2. 論文標題 Enhancement of Power System Transient Stability by Active and Reactive Power Control of Variable Speed Wind Generators	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Sciences	6. 最初と最後の頁 8874 ~ 8874
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/app10248874	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 佐藤孝政, 矢神雅規, 高橋理音, 大原伸也, 吉原徹, 中山靖章
2. 発表標題 Fuzzy-PI 仮想同期発電機制御方式のGrid-Formingインバータによる系統安定度の改善
3. 学会等名 令和4年電気学会電力・エネルギー部門大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 泉 匠吾, 矢神 雅規, 一戸 昌則
2. 発表標題 可変速風力発電の有効・無効電力制御による系統安定度の改善
3. 学会等名 令和4年度電気・情報関係学会北海道支部連合大会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	一戸 昌則 (Ichinohe Masanori) (70806968)	北海道科学大学・工学部・准教授 (30108)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------