

令和 3 年 4 月 8 日現在

機関番号：32663

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2019～2020

課題番号：19K23521

研究課題名(和文) 先進的系統連系インバータが具備すべき電力系統の過渡安定貢献特性の解析および指標化

研究課題名(英文) Analysis and indexing of transient stability contribution characteristics of the power system required for advanced grid-connected inverters

研究代表者

平瀬 祐子 (Hirase, Yuko)

東洋大学・理工学部・准教授

研究者番号：50843778

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)：「仮想同期発電機(VSG)制御」と呼ばれる連系インバータの制御手法(同期発電機の動揺方程式をプログラム上で模擬し、蓄電池エネルギーを慣性エネルギーとして疑似的に利用する制御手法)をMATLAB/Simulink上のモデルとして作成し、大規模システムのシミュレーション回路を作成した。負荷/発電電力変動が生じた場合の系統周波数の変化について調査を行った。また、系統安定化のために要求される分散電源の特性を決定づけるパラメータを指標化する目的で、IEEE9BUSの3機モデルを使い、各電源の種々のトルクの詳細分析と、慣性中心周波数と制御パラメータと時間の相関関係を可視化した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

電力系統にインバータ連系される静止形の分散電源が大量導入されると、慣性力をもつ回転形の同期発電機の比率が相対的に減り、系統全体の安定度が低下する。この事実は、分散電源に利用される再生可能エネルギーの利用を妨げるため、再エネ電源の普及と電力の安定かつ安全な供給を両立しなくてはならない。さらに、インバータ電源の制御変数や機器定数はメーカ開示されないことや、天候や時間に左右される再エネ電源が接続と解列を任意に行うことで系統の状態が常に変化することなども、再エネ電源の普及を妨げている。本研究成果のインバータ挙動の指標を基に、系統事業者が連系インバータに必要な十分な要求を制定することが可能になる。

研究成果の概要(英文)：A simulation model for MATLAB/Simulink of grid-connected inverter and battery were created. The inverter equipped a control method called "virtual synchronous generator (VSG) control", which is a control method that simulates the swing equation of a synchronous generator on a program. The storage battery was used to mimic the inertial energy of the inverter. The large-scaled system consists of the above model was created to investigated the system frequency behavior when load/generated power fluctuations occur. In addition, for the purpose of indexing the parameters that determine the characteristics of the distributed power sources required for system stabilization, detailed analysis of various torques of each power supply, and the correlation between time, center of inertial frequency, and control parameters was visualized. IEEE 9 bus model was used.

研究分野：パワーエレクトロニックシステム

キーワード：慣性力 分散電源 インバータ連系 指標

1. 研究開始当初の背景

- (1) 電力系統にインバータ連系される静止形の分散電源が大量導入されると、慣性力をもつ回転形の同期発電機の比率が相対的に減り、系統全体の安定度が低下する。この事実は、分散電源に利用される再生可能エネルギーの利用を妨げるため、再エネ電源の普及と、電力の安定かつ安全な供給を両立が求められる。
- (2) さらに、インバータ電源の制御変数や機器定数はメーカー開示されないことや、天候や時間に左右される再エネ電源が接続と解列を任意に行うため系統の状態が常に変化することなども、再エネ電源の普及を妨げている。

2. 研究の目的

本研究では、電力系統の過渡動揺の物理的・数学的理論を明らかにし、電源の特性や系統の構成に依存しないインバータ連系要件を系統管理者が策定するための指針作りを行う。

3. 研究の方法

- (1) 「仮想同期発電機(VSG)制御」と呼ばれる連系インバータの制御手法(同期発電機の動揺方程式をプログラムし、蓄電池エネルギーを慣性エネルギーとして疑似的に利用する制御手法)を MATLAB/Simulink 用のモデルとして作成し、さらにこれを用いた大規模系統シミュレーション用基本回路を作成する。
- (2) IEEE9BUS の 3 機モデルを使い、系統安定化のために要求される分散電源の特性を決定づけるパラメータについて指標化する。
  - ① 各電源の種々のトルクについて詳細に分析する。
  - ② 慣性中心周波数、制御パラメータ、および時間の相関関係を可視化する。

4. 研究成果

(1) 先進的インバータに搭載する系統安定化貢献機能として、カワサキ形 VSG 制御を採用する。これは、提案者が川重テクノロジーに所属していたときに発表した制御手法で、商用化された数少ない手法の 1 つであるが、種々存在する VSG 制御の中でもカワサキ形 VSG を採用した理由は、最小数のパラメータで有効電力・周波数制御と、無効電力・電圧制御を行うことが可能だからである。カワサキ形 VSG 制御インバータの接続図と制御ブロック図を図 1 と図 2 に示す。図 1 の (a), (b), (c) はそれぞれインバータ、蓄電池、制御部を表している、(c) が図 2 に相当する。図 2 の (a), (b), (c) はそれぞれ有効電力・周波数制御部、仮想インピーダンス制御部、無効電力・電圧制御部である。

上記カワサキ形 VSG 制御を搭載したインバータを MATLAB/Simulink 用のライブラリモデルとして作成し、このライブラリ回路の動作を確認するために、無限大母線に接続したときのシミュレーション回路を作成した(図 3)。図 4 は確認のためのシミュレーション試験結果である。シミュレーション開始 1 秒でインバータの電源をオンにし、3 秒から 7 秒の間で指令値の変更に従って出力電力が変化し、9 秒で無限大母線系統が停電しても、自立電源として負荷給電を無瞬断継続している。これらは VSG 制御の基本動作であり、作成したライブラリ回路が正しく機能していることを表している。

(2) 次に、無限大母線ではなく主電源となる同期発電機と連系させる。図 5 は、各電源の特性を決定づけるパラメータについて指標を得るためのシミュレーション回路で、IEEE9Bus 標

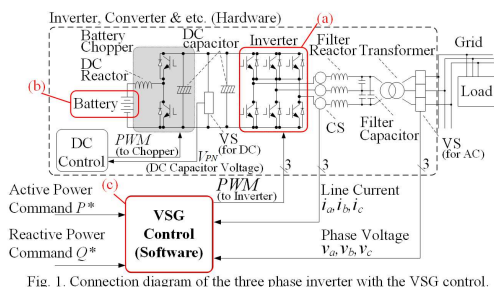


図 1. VSG 制御搭載インバータの接続図。

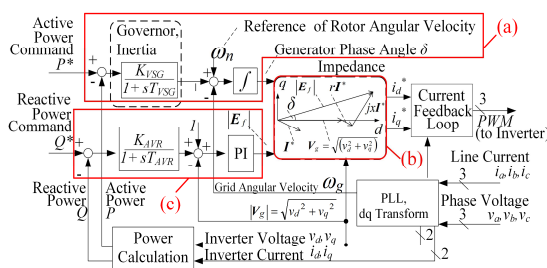


図 2. VSG 制御ブロック図。

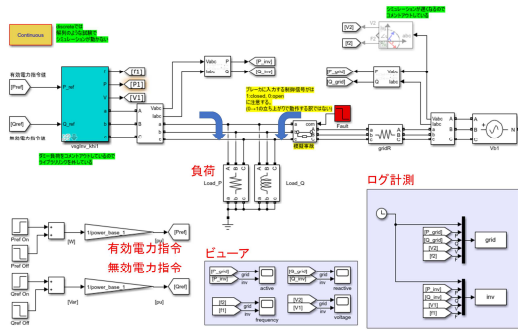


図 3. 一機無限大系統回路.

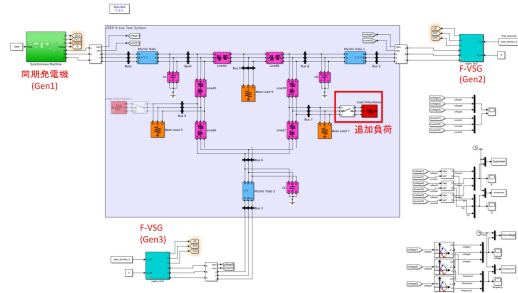


図 5. IEEE9BUS 系統.

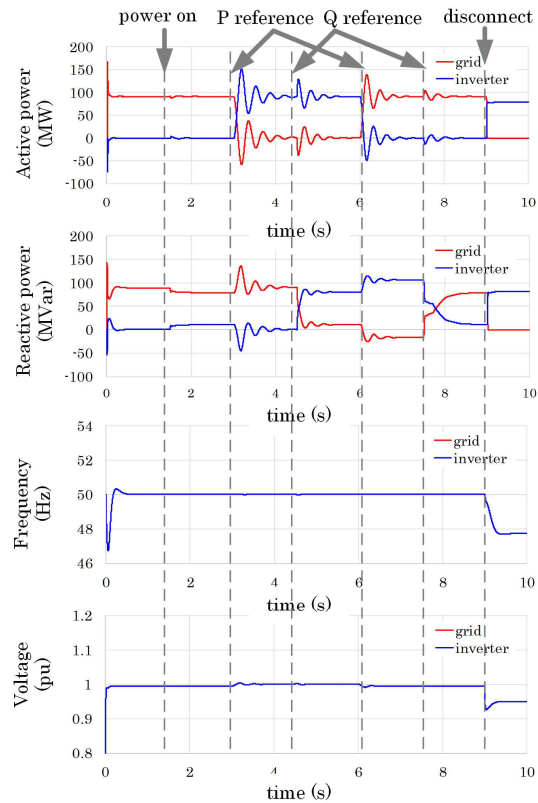


図 4. VSG 制御の動作確認結果.

準モデルを使用した。これは 3 機モデルであり主電源 1 機と分散電源群(VSG インバータ 2 機)を想定している。実際の系統には、3 機よりも多数の分散電源が接続されるが、本研究では、分散電源がすべて同一の VSG 制御を搭載しているという想定であるため、それらが縮約可能であることを考慮した。縮約後に 1 機ではなく、分散電源 2 機としたのは、分散電源間の干渉やコヒーレンシの検証等を、今後の課題としているためである。

① 主電源も VSG インバータも同期発電機の特徴を持っており、系統周波数の動揺を決定するのは各発電機の機械トルクであるため、まずトルク解析を行なった。図 5 のシミュレーション回路を使ってシミュレーションを行い、各発電機の内部相差角を測定し、機械トルクを慣性トルク、減衰トルク、同期化トルクと、さらに垂下特性の効果によるトルクに分解した。ただし、シミュレーションログデータをそのまま微分操作すると、シミュレーション上で計測誤差が大きく増幅された。このため、シミュレーションデータの間引きを行った。間引き後はサンプル点数が少ないものの、データ変動の傾向は損なわれていない。

図 6 は各電源の相差角およびその 1 階微分、2 階微分の過渡応答を示したもので、図 7 は機械トルクを各種トルクに分解した結果である。相差角の 1 階微分は、発電機出力端の周波数そのものであり、図 6 と図 7 の傾向が一致していることから、負荷変動直後の過渡応答範囲の系統周波数に、各発電機の機械トルクが、中でも、図 7 の緑色の線で表されている慣性トルクの影響が

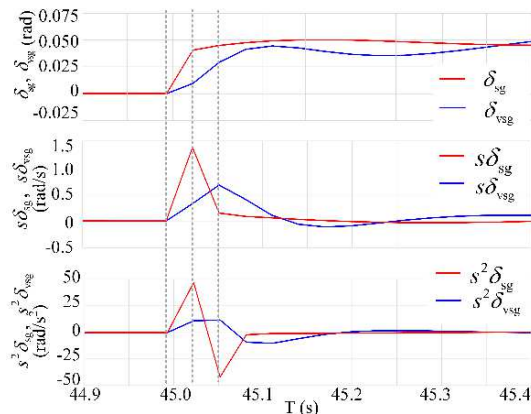


図 6. 相差角過渡応答.

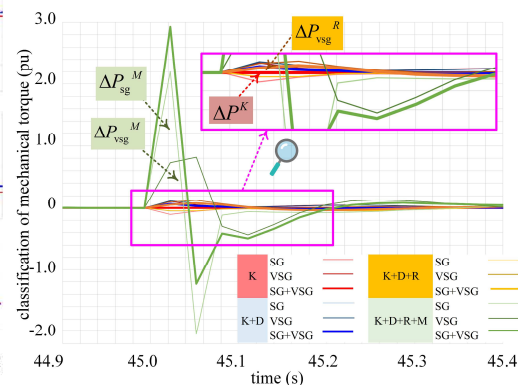


図 7. トルク分解結果.

大きく寄与していることが証明された。

② 次に、慣性中心周波数の変動と、発電機パラメータの比(主電源/分散電源群)と、時間の相関関係を可視化する。慣性中心周波数とは、各発電機間の動揺を除いた、系統全体にベース量として存在する周波数動揺の成分である。本研究の場合、慣性中心周波数は主電源と分散電源群の出力端周波数の重心的な様相を示すことになる。

図8は、負荷変動直後の慣性中心周波数偏差の様相が、発電機パラメータを変更した場合にどのように変化するかを調べた結果である。左上、右上、左下、右下の順に、VSGの単位慣性定数、VSGの仮想インピーダンス、VSGの垂下特性定数、主電源のガバナ時定数の比を変更している。また図9は、各パラメータ比と時間を2つの軸にとり、慣性中心周波数偏差を可視化したものである。左上、右上、左下、右下のパラメータの内容については図8と同様である。

負荷変動直後では、各電源の周波数は差異が見られず、その後しばらく経って、単位慣性定数を大きく設定する方が各電源の周波数変動を回復させる傾向が見られた。また、負荷変動直後の各発電機出力端における周波数偏差では、インピーダンスの影響が大きく表れ、各試験で共通の実インピーダンスの影響が支配的であることが判る。

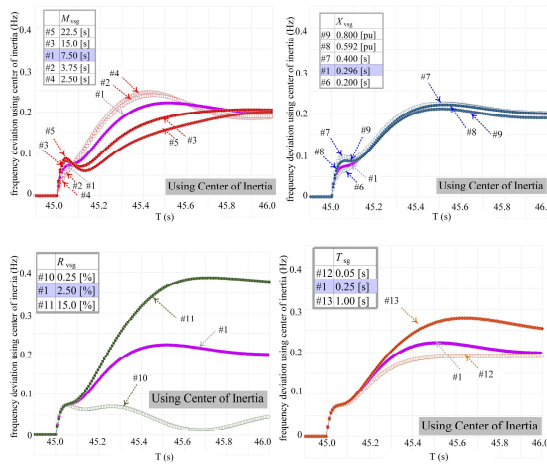


図8. 慣性中心周波数偏差。

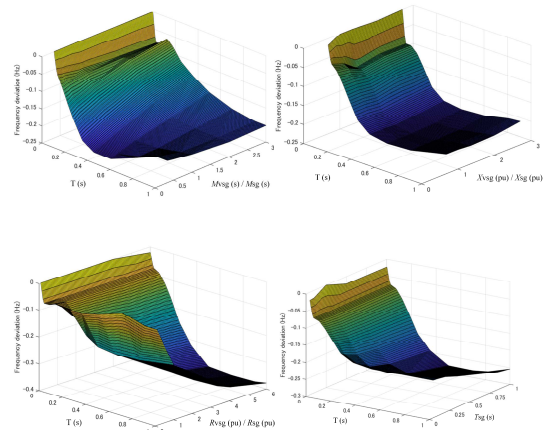


図9. 各パラメータと時間の相関。

図10は負荷変動直後から慣性中心周波数までの bode 線図を表し、図11は極ゼロ配置図を表している。左上、右上、左下、右下のパラメータの内容については図8、9と同様である。これらの図でも、VSGの単位慣性定数を大きく設定することで周波数偏差を抑制できること、仮想インピーダンスの影響が小さいことが判る。また、3種類の顕著な振動極群があることが判る。多くのパラメータは値を大きくすると、極は原点に近づく。これは、共振周波数が低下しても振動が持続する傾向があることを示している。

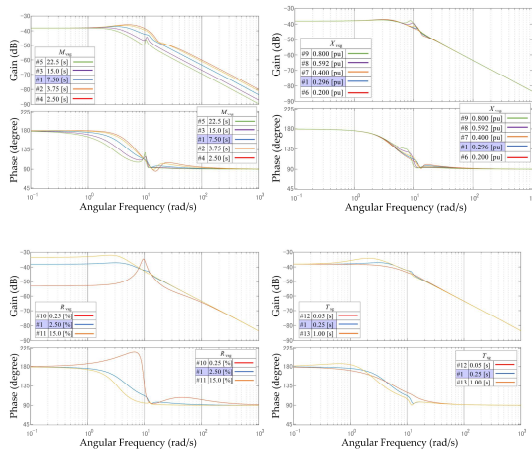


図10. 慣性中心周波数の bode 線図。

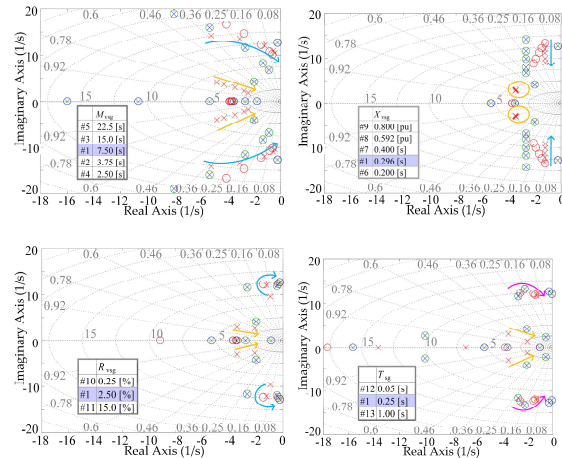


図11. 慣性中心周波数の極ゼロマップ。

以上の結果より、本研究の成果を以下に要約する。これらの成果は、系統管理者が連系インバータに課する連系要求事項を制定する際の指標となり得る。

- － 従来の同期発電機に加えて進的インバータを含む電力系統では、各電源のさまざまな機械的トルクによって系統周波数が変動する。
- － 複数電源系統の各電源の端子電圧での周波数は、電源の機器定数と制御変数の影響を強く受けるため、「慣性中心周波数」の概念を導入した。
- － システム周波数の時間領域と周波数領域における特性は共に、機械トルクの種類(減衰、慣性、同期トルク、垂下特性の効果)に応じて異なる。
- － 機器定数/制御定数と時間の両方に強く依存する周波数偏差を、3D グラフを使用して指標化した。さらに、振動強度と減衰時間を評価するために、システムの極ゼロ配置を明らかにした。
- － 複数電源系統は、主電源と分散電源群からなる 2 機モデルに縮約できる。周波数変動特性は、これら 2 機の機器定数/制御変数の比率によって決定される。

当初の計画では、回転形発電機とインバータ電源を接続した実験室サイズシステムで実測する予定であったが、Covid-19 の影響で誘導電動発電機やその他の付属部品の移設が遅れ、かつキャンパス入構規制に伴って実験補助員も確保できなかった。今後の社会情勢が回復後は、上記実験システムを立ち上げ、シミュレーション結果と実証試験結果との整合性を確認する予定である。また、それらのシステムにロバスト制御や最適化制御を搭載し、過渡特性だけでなく定常特性も視野に入れた検証を進める予定である。

以上

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Yuko Hirase	4. 巻 1-4
2. 論文標題 Guidelines for required grid-supportive functions in grid-tied inverters with distributed energy resources	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IET Energy Systems Integration	6. 最初と最後の頁 236-245
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1049/iet-esi.2019.0022	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 -

1. 著者名 Hirase Yuko, Ohara Yuki, Bevrani Hassan	4. 巻 6
2. 論文標題 Virtual synchronous generator based frequency control in interconnected microgrids	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Energy Reports	6. 最初と最後の頁 97 ~ 103
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.egy.2020.10.044	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 -

1. 著者名 Hirase Yuko, Uezaki Kazusa, Orihara Dai, Kikusato Hiroshi, Hashimoto Jun	4. 巻 14
2. 論文標題 Characteristic Analysis and Indexing of Multimachine Transient Stabilization Using Virtual Synchronous Generator Control	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Energies	6. 最初と最後の頁 366 ~ 366
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/en14020366	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5件（うち招待講演 2件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 市川拓巳、平瀬祐子
2. 発表標題 電力系統の小擾乱に対する 多慣性電源同期化力の影響に関する考察
3. 学会等名 令和2年電気学会全国大会（東京電機大学）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yuko Hirase
2. 発表標題 Development History and Prospects of Virtual Synchronous Machine (VSM)
3. 学会等名 1st International Forum on Future Vision and New Technology Energy (Daejeon, Korea) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yuki Ohara, Yuko Hirase, Hassan Bevrani
2. 発表標題 Interconnected Microgrids Frequency Control Using Extended Virtual Synchronous Generators
3. 学会等名 令和2年 電気学会 電力・エネルギー部門大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 上崎和沙, 大内和樹, 平瀬祐子, 織原大, 喜久里浩之, 橋本潤
2. 発表標題 仮想同期発電機制御による多機系統過渡安定度分析と指標化
3. 学会等名 令和3年電気学会全国大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yuko Hirase, Yuki Ohara, Hassan Bevrani
2. 発表標題 Virtual Synchronous Generator Based Frequency Control in Interconnected Microgrids
3. 学会等名 2020 7th International Conference on Power and Energy Systems Engineering (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020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
--	---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------