

令和 6 年 5 月 30 日現在

機関番号：17104

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04025

研究課題名（和文）観測データに基づく低慣性電力システムオンライン統合制御

研究課題名（英文）Coordinated online control of low inertia power system based on measurement data

研究代表者

渡邊 政幸（WATANABE, Masayuki）

九州工業大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：90398115

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,300,000円

研究成果の概要（和文）：低慣性電力システムの安定化方策として、エネルギー貯蔵の容量制約を考慮した仮想慣性制御方式を構築した。擾乱発生後の周波数変化に応じて機能を切り替える出力制御方式、エネルギー貯蔵の残量モニタリングによる同期発電機との協調制御方式、感度分析に基づく制御パラメータ決定方法、ロバスト制御適用による制御器設計、非整数階制御器の適用、および制御パラメータ最適化手法を検討し、その有効性をシミュレーションによって明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

電力システムに大量に連系される電力変換器連系型電源を積極的に系統制御に参加させる場合における、その制御方式および同期発電機との協調制御方式の設計問題に対して、効率的・効果的な設計方法を検討したものである。限られたエネルギーで最大限の効果を発揮する制御器の設計方法の有効性を検証できたことから、低慣性電力システムの周波数安定性を向上してシステム全体の特性を改善できる方法としての利用が期待される。

研究成果の概要（英文）：A method to design the virtual inertia control considering the constraint of the energy storage has been developed for stabilizing the low inertia power system. This study has investigated some approaches: the output control by switching the algorithm based on frequency deviations after the disturbance, the coordinated control with synchronous generators by monitoring the state of charge of the energy storage, the control parameter design based on the sensitivity analysis, the controller design by applying the robust control, the application of the fractional order controller, and the optimization of the control parameters. The effectiveness of these approaches has been demonstrated by the numerical simulations.

研究分野：電力系統工学

キーワード：電力システム 低慣性 仮想慣性

1. 研究開始当初の背景

再生可能エネルギー主力電源化の実現に向けて太陽光発電等の自然変動電源の大量導入が加速し、電源の急速な多様化に伴うシステムの複雑化、特性の変化や不確定性の増大は確実に進んでいる。導入拡大を支える次世代型電力ネットワーク構築のためには、ハードウェア面でのインフラ整備に加えて、安定運用に関わるソフトウェア面においても革新が求められている。

特性面の変化を考えると、従来から用いられる同期発電機の特徴として回転部分がつま大きな慣性力によって、系統擾乱発生時においても回転部でのエネルギーの蓄積・放出によってもとの状態に戻ろうとする作用(同期化力)を有し、システムの周波数を維持し安定化しようとする効果がある程度期待できる。一方で、電力変換装置(PCS: Power Conditioning Subsystem)を介して連系される太陽光発電システムや蓄電池システム等は、この慣性力を有しておらず系統擾乱に対する安定化に寄与しない。こうした電源の割合の増加に伴ってシステム全体の慣性力が低下する問題が議論されており(F. Milano, *et al.*, 2018 Power Systems Computation Conference, 2018)、定常時における周波数変動への影響や、特に擾乱発生後の連鎖的な発電機脱落による大規模停電(ブラックアウト)が懸念される。一方で、PCSに同期発電機と同様の特性を持たせるVSG(Virtual Synchronous Generator)制御の活用も期待されている(H. Bevrani, *et al.*, Microgrid Dynamics and Control, Wiley, 2017)。

2. 研究の目的

今後電力システムにおいて確実に増加する電力変換器連系型電源の大量導入シナリオ下における電力システムの特性変化に対し、供給信頼度向上のための方法として電力システムオンライン制御手法を構築する。電力動揺特性の変化、特に同期状態を保ちもとの状態に戻ろうとする能力の低下や慣性力の低下によるシステム不安定化に対して、本研究では、電力変換器連系型電源の制御によって仮想的に同期発電機と同等の慣性力を補償させる制御により、システムを安定化し信頼性を向上するための制御手法を構築し、多様な電源が導入された電力システムにおける信頼度向上のための制御方法の有用性を明らかにする。

3. 研究の方法

主に電力システムモデル(図1)を用いたシステムシミュレーションによって検討を進めた。電力変換器連系型電源の増加に伴う動揺モードの不安定化に対し、高い制御性能を有し状態変化に対しても有効なロバスト性を有する制御器の設計方法を構築し、有効性を検証した。このとき、制御器としてVSG機能を有する蓄電池システム等の利用を想定し、同期発電機との協調制御アルゴリズムを構築して効果を検証した。

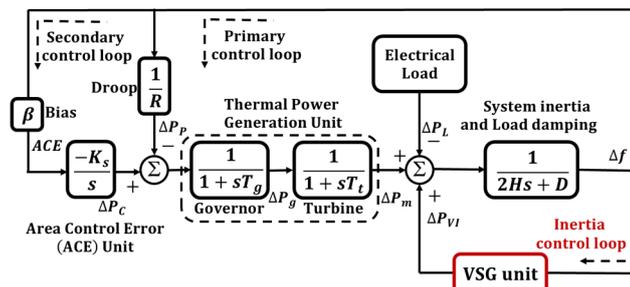


図1 電力システムモデル

4. 研究成果

(1) 仮想慣性制御における出力制御方式ならびに制御パラメータの決定方法の構築

仮想慣性制御においてはエネルギー貯蔵が必要であり、その貯蔵量によって出力が制約を受けることから、電力システムにおける擾乱発生後の周波数変化に応じて機能を切り替える出力制御方式を構築した。具体的には、擾乱発生直後にエネルギー貯蔵から最大限出力することで周波数変動を効果的に抑制し、周波数が回復したところで同期発電機と同等の慣性力を補償する機能に切り替えを行う制御方式である。低慣性状態を模擬したモデルシステムを用いて有効性を検証した結果、擾乱発生時における周波数最大偏差と周波数変化率の改善効果が確認できるとともに(図2)、切り替え制御によって必要とするエネルギーを抑制できることが確認できた。

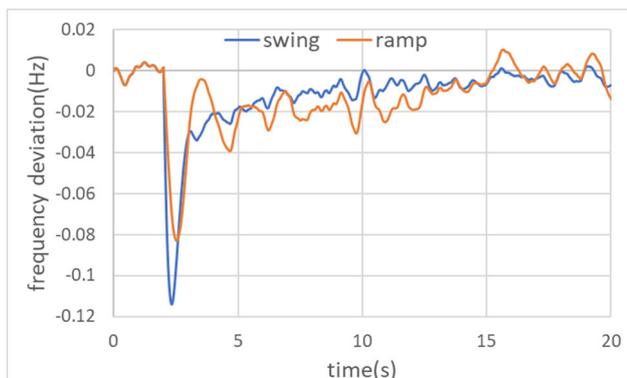


図2 出力制御方式の違いによる周波数変化の比較

また、本制御においては制御パラメータによって制御性能が大きく変化することから、感度分

析に基づくパラメータ決定方法を検討した。慣性力を高めることで擾乱発生時の周波数変動を抑制できる一方で、回復までに時間を要しダンピング性能が低下するため適切なパラメータ調整が必要となっている。制御パラメータと周波数最大偏差の相関に基づく感度を定義することで、慣性力とダンピング性能をともに補償するパラメータ決定方法を構築した。モデルシステムを用いたシミュレーションによりその有効性が確認できた。

(2) 仮想慣性制御と同期発電機の協調制御方式およびコントローラ設計方法の構築

仮想慣性制御に必要なエネルギー貯蔵は有限であり、システム擾乱発生後にその容量不足によって仮想慣性制御が突然停止することで第二のシステム擾乱発生の要因となる。そこで、エネルギー貯蔵の残量をモニタリングすることにより出力が消失する前に徐々に小さくするロジックを導入することで、同期発電機からの出力にスムーズに移行させる協調制御方式を構築した。低慣性状態を模擬したモデルシステムを用いて有効性を検証した結果、擾乱発生時における仮想慣性制御による周波数最大偏差と周波数変化率の改善効果を発揮するとともに、容量制約によって生じる影響を軽減できることが確認できた(図3)。

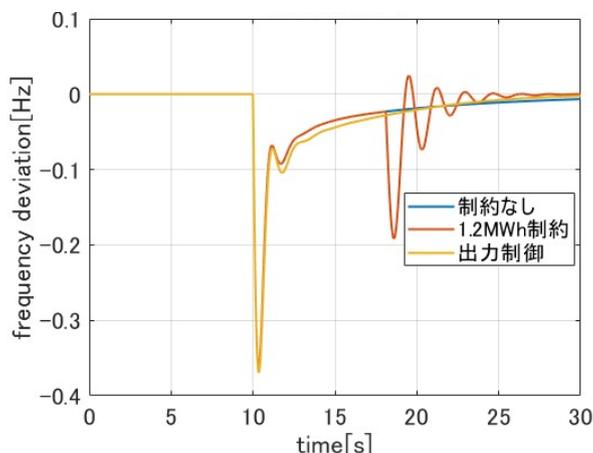


図3 協調制御方式によるシステム擾乱の抑制

また、本制御においては付随するコントローラによって制御性能が大きく変化することから、電力システムにおける不確実性に対しても性能を保証できるロバスト制御の適用によるコントローラ設計方法の構築を進めた。 H 無限大制御理論を適用し、制御対象および重み関数を含む一般化プラントを利用したコントローラ設計方法において、制御性能を決定付ける重み関数の設定方法について検討した。加えて、非整数階制御器と制御パラメータ最適化手法の適用によるコントローラ設計方法も検討し、高い制御性能を有することをシミュレーションによって明らかにした。

(3) エネルギー貯蔵の容量を考慮した制御パラメータ最適化設計方法の構築

エネルギー貯蔵の容量制約下において最大限の制御効果を得るためには、適切な制御パラメータの選定が不可欠である。そこで、システム擾乱発生時における周波数変化率の最小化を目的関数とした最適化問題を定式化し、シンプルな手法として知られる粒子群最適化を適用して、システムの不確実性に対しても性能を保証できるロバスト性を有する制御パラメータを決定する方法を構築した。ここでは、外部ノイズやシステムパラメータの変動に対してロバスト性を有するPID(比例積分微分)制御を適用して最適化を試みた。シミュレーションによって有効性を検証した結果、定めた容量において所望の制御性能を有することが確認できた(図4)。

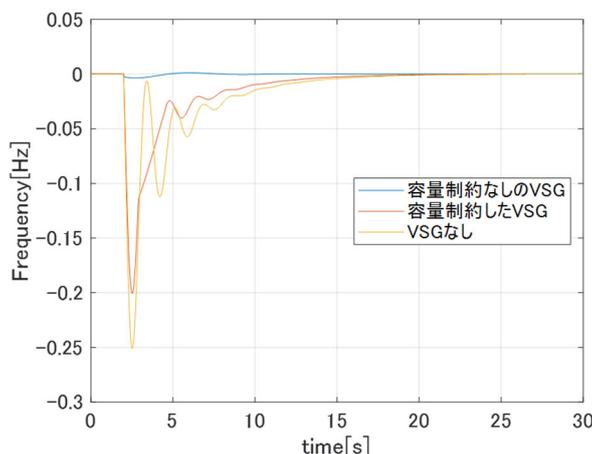


図4 容量制約の有無による周波数変化

以上のとおり、エネルギー貯蔵の容量制約を考慮した仮想慣性制御方式を構築した。電力システムにおける擾乱発生後の周波数変化に応じて機能を切り替える出力制御方式、エネルギー貯蔵の残量モニタリングによる同期発電機との協調制御方式、感度分析に基づく制御パラメータ決定方法、ロバスト制御適用による制御器設計、非整数階制御器の適用、および制御パラメータ最適化手法を検討し、その有効性をシミュレーションによって明らかにした。限られたエネルギーで最大限の効果を発揮する制御器の設計方法を検討したものであり、低慣性電力システムの周波数安定性を向上できる方法としての利用が期待される。

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 3件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Emad A. Mohamed, Mokhtar Aly, Masayuki Watanabe	4. 巻 10
2. 論文標題 New Tilt Fractional Order Integral Derivative with Fractional Filter (TFIDFF) Controller with Artificial Hummingbird Optimizer for LFC in Renewable Energy Power Grids	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Mathematics	6. 最初と最後の頁 1-33
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/math10163006	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 該当する

1. 著者名 Amira Hassan, Mokhtar Aly, Ahmed Elmelegi, Loai Nasrat, Masayuki Watanabe, Emad A. Mohamed	4. 巻 6
2. 論文標題 Optimal Frequency Control of Multi-Area Hybrid Power System Using New Cascaded TID-PI D μ N Controller Incorporating Electric Vehicles	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Fractal and Fractional	6. 最初と最後の頁 1-29
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/fractalfract6100548	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 該当する

1. 著者名 Emad A. Mohamed, Mokhtar Aly, Ahmed Elmelegi, Emad M. Ahmed, Masayuki Watanabe, Sayed M. Said	4. 巻 10
2. 論文標題 Enhancement the Frequency Stability and Protection of Interconnected Microgrid Systems Using Advanced Hybrid Fractional Order Controller	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 111936-111961
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/ACCESS.2022.3216212	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 該当する

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 行武 亨, 西谷壽祥, 渡邊政幸
2. 発表標題 感度分析による仮想同期発電機の制御パラメータ設計
3. 学会等名 2022年度（第75回）電気・情報関係学会九州支部連合大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 西谷壽祥, Thongchart Kerdphol, 渡邊政幸, 三谷康範
2. 発表標題 低慣性電力系統における仮想同期発電機の出力制御方式の検討
3. 学会等名 2021年度(第74回)電気・情報関係学会九州支部連合大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Toshiki Nishitani, Thongchart Kerdphol, Masayuki Watanabe, Yasunori Mitani
2. 発表標題 Switching Control Method of Virtual Synchronous Generator after the Disturbance in Low Inertia Power System
3. 学会等名 9th International Symposium on Applied Engineering and Sciences (国際学会)
4. 発表年 2021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
---------	---------