様　式　Ｃ－１９、Ｆ－１９－１、Ｚ－１９　（共通）

科研費
KAKENHI

科学研究費助成事業　　研究成果報告書

令和　４ 年　５ 月 １７ 日現在

機関番号：１２６１２
研究種目：研究活動スタート支援
研究期間：2019～2021
課題番号：１９Ｋ２３５０９

研究課題名（和文）次世代電力系統の安定運用のための潮流設計理論

研究課題名（英文）Power Flow Design Theory for Stable Operation of Next-Generation Grids

研究代表者
定本　知徳（Sadamoto, TOMONORI）

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・助教

研究者番号：４０８３９９６６

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）：本研究では第一に，安定度の高い潮流を設計する手法を与えた．燃料費等の経済的最適性をできるだけ保ちつつも安定度を効率良く向上できるという特徴を持ち，ベンチマークモデルを用いた多数のケーススタディを通してその有効性が示された．第二に，時々刻々変化する潮流目標に追従可能な制御器設計法の確立を目指して，運用データのみから効率良く設計する手法を提案し，ベンチマークモデルを通じてその有効性を検証した．

研究成果の学術的意義や社会的意義
太陽光発電所が突然停止しても家庭や職場に電気を送りつづけるためには電力システムの安定度を高く保つ必要があります．安定度は，電力の流れかた（潮流）と電力システム内に多数存在する制御器設定に大きく依存しています．本研究では，経済的なコストを可能な限りおさえつつも安定度の高い潮流状態を実現する方法と制御器の効率よい設計法をそれぞれ提案し，実際の電力システムを模擬したシミュレータを用いて有効性を検証しました．

研究成果の概要（英文）：Power systems must maintain high stability against disturbances such as lightning strikes or temporary photovoltaic generator dropouts. The stability is highly dependent on power flow and controllers of the system. In this research, we first propose a method for designing power flow such that the stability is high while keeping the economic cost (e.g., fuel cost) as small as possible. Second, for re-designing controllers to follow the (time-varying) power flow target, we propose a computationally-friendly method of designing controllers using only operational data. The effectiveness of these methods is demonstrated through several case studies using a benchmark model.

研究分野：制御工学

キーワード：制御理論　電力システム　スマートグリッド　潮流計算

※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、研究者個人に帰属します。

１．研究開始当初の背景

低炭素社会の実現に向けて再生可能エネルギー（以下，再エネ）の普及が急速にすすんでいる．しかし，再エネ導入量の増加に伴い電力系統の慣性が低下するため，系統は不安定になりやすいことが指摘されている[1]．そのため，再エネ大量導入下においては，安定な電力供給が可能な系統運用手法の確立が急務である．系統運用は，どこでどの程度発電しどのように送電するかを表す系統全体の電力の流れ（以下，潮流状態）を適切な時間間隔で予め計画し，都度その計画値を達成するよう行われる．こうした系統運用時の安定度は，計画された潮流状態次第で大きく変化する．実際，ベンチマークモデルを用いた申請者らによる研究では，図１に示すように，潮流状態 A は B に比べて落雷発生時の系統周波数変動が振動的（安定度が低く）なっている．安定度が低いと停電等の大事故が引き起こされやすくなるため，十分な安定度を有する潮流状態の設計は，次世代電力系統の運用において極めて重要となる．さらに，需要家の電力消費や再エネ出力変動に伴って，望ましい潮流状態は時々刻々と変化する．慣性力の低下によりこの変動は速く・大きくなることが懸念されるため，この変化に対応可能な制御性能の強化も併せて重要となる．

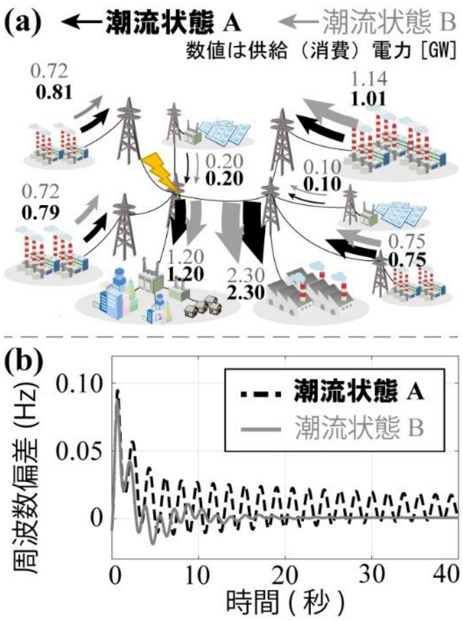

図１：(a)２種類の潮流状態　(b)落雷に対する系統周波数変動の違い

２．研究の目的

本研究の目的は以下の二点である．

(1) 次世代電力系統のための安定度保証付き潮流設計法の考案

(2) 時々刻々と変化する所望の潮流状態への追従性能を強化する制御器設計法の考案

３．研究の方法

(1) はじめに，エネルギー散逸率（以下，散逸率）という指標に基づく潮流設計法の考案を目指す．ベンチマークモデルを用いた数値シミュレーションにより有用可能性を検証し，難しい場合には散逸率に近しい別の指標を用いた設計法へと修正する．

(2) 電力システムは大規模かつ複雑であるため，詳細な数理モデルを前提とした制御器設計法は適さない．そこで，潮流や周波数等の大量のデータのみを用いて効率良く制御器設計が可能なデータ駆動型手法を開発する．

４．研究成果

(1) 散逸率に基づく潮流状態全体の特徴づけを行った．しかしながら，実データを基にしたベンチマークシミュレータを用いて考案法の有効性を検証したところ，散逸率の保守性が高く，適用可能な電力系統が極めて限られるとの結果が得られた．そのため，H2 ノルムと呼ばれる指標に基づく安定度の高い潮流再設計法を提案した．これは散逸率と同様にシステムのエネルギー減少率を測る指標のひとつである．提案法は次の 2 つのステップからなる．

① 経済的に最適な潮流状態を通常の最適潮流計算（OPF）により導出

② 経済最適性を可能な限り担保しつつ H2 ノルムが小さくなるように潮流状態を修正

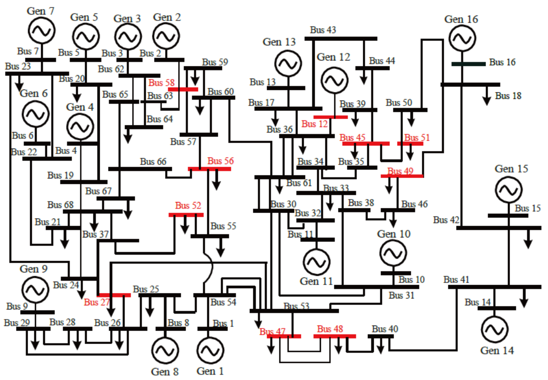

図２：68-バス テストシステムと呼ばれるベンチマークモデル

提案法を図 2 に示すベンチマークモデルを用いて検証した．具体的には，図中の赤線で示されるバスのいずれか一つに太陽光発電プラントが接続された状況を想定し，FRT 要件に沿った出力変動が発生した際の系統周波数および電圧の減衰性能が高くなるように（すなわち H2 ノルムが小さくなるように）潮流状態を修正し，有用性を検証した．図３は，56 番バスに太陽光発電プラントが導入された際の経済最適な潮流状態における電圧変動および修正潮流状態におけるそ

れを示しており，修正によって減衰性能が強化されていることが確認できる．太陽光発電プラントの導入箇所や，潮流修正の際の拘束条件（修正可能な発電機の数，出力有効・無効電力の上下限等）を様々に変更しても多くのケースにおいても同様の結果が得られ，燃料コストの増加分が 0.2%未満に抑えられており，経済最適性と安定性の両立が可能であることが示された．

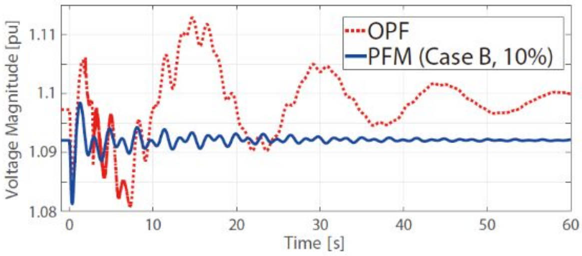

図３：経済最適な潮流状態における電圧変動（赤線）および修正潮流状態における変動（青線）

(2)　データ駆動型制御手法として近年注目を集めている強化学習の殆どは大量の試行錯誤に基づくデータをオフラインで処理・学習するものであり，時々刻々変化する潮流状態への追従には向いていない．そこで，まず第一に，すべての状態が計測可能であるという前提のもと，少ないデータで高速に制御器設計が可能な学習手法を新たに提案した．提案法は 25 個の発電機からなる電力システムのベンチマークモデルを用いて検証した．図４の上段は，従来型の学習手法を用いた場合の全発電機の周波数すべりの応答を示している．0 に収束しているとき，所望の潮流状態が達成されていることを示している．この例では，18 秒程度のデータ収集の後，対象が大規模であるため制御器の学習に 140 秒程度を要したことを示している．これに対し，提案法では同じデータに対して 6 秒で学習が完了しており，その結果として素早く所望の潮流状態へ向かっていることが確認できる．

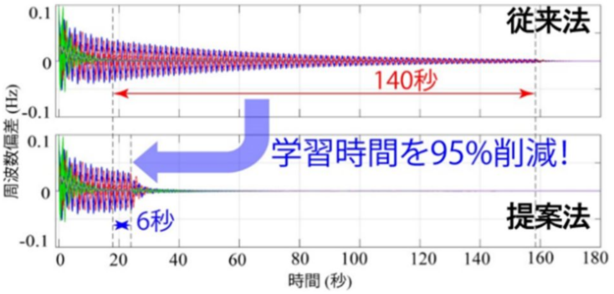

図４: (2)の状態フィードバック型学習手法の数値的検証結果

しかしながら，実際の電力システムにおいてすべての状態を計測することは困難である．そこで，フェーザ計測装置等によって計測可能可能な一部のセンサ情報のみから高速に学習・制御が可能な手法へと拡張を行った．具体的には，入出力の履歴が疑似的に内部状態とみなせることを用いて，入出力履歴フィードバック型制御器の学習法を与えた．さらに，履歴長を表すパラメータを調整することで設計対象とするシステムの次元が陰的に調整可能であることを示した．これにより，対象システムが大規模であっても，入出力ポート数が少ない等，入出力の観点から低次元なシステムとみなせる場合には履歴数を小さくとって学習を行っても良好な結果を得ることができる．さらに，提案法は１回の実稼働データのみで学習可能であるという特徴をもつ．これは，繰り返し実験が不要であることから，電力システムに代表される実稼働中のシステムに対する学習制御手法として有用であると期待できる．提案法の有効性は，図１の 68-バス テストシステムを用いて検証した．図５は，１番発電機の周波数すべりの応答を示しており，0 に収束しているときに所望の潮流状態が達成されていることをあらわす．赤点線で示すように制御を行わない場合の周波数滑りの収束速度に比べて，青線や黄色点線で示すように，提案法を用いることで収束速度を大幅に向上できることが確認された．さらに，これらの制御結果は，理想的に最適な制御器を用いた場合の応答（緑点線）とほぼ等しいことが確認できる．また，ここでは約 1.3 秒間のデータのみを用いて 0.08 秒で学習が完了しており，事実上リアルタイムでの学習が可能になっている．

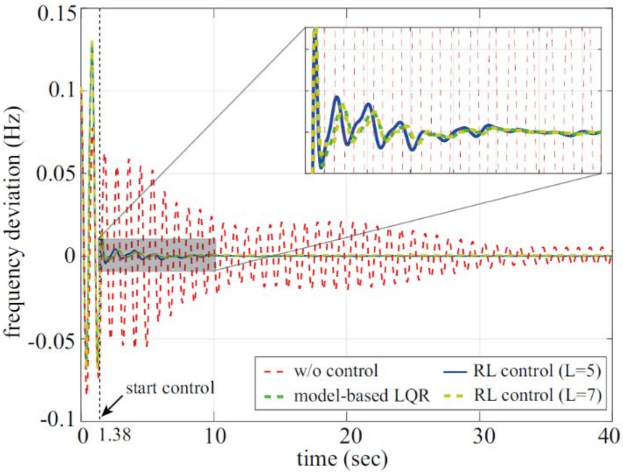

図５: (2)の入出力フィードバック型学習手法の数値的検証結果

＜参考文献＞

[1] K. Farid et al, IEEE Power and Energy Magazine, vol.9, no.3, pp. 62-71, 2011

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　2件／うちオープンアクセス　0件）

１．著者名 Inoue Masaki、Sadamoto Tomonori、Arahata Mitsuru、Chakrabortty Aranya	４．巻 12
２．論文標題 Optimal Power Flow Design for Enhancing Dynamic Performance: Potentials of Reactive Power	５．発行年 2021年
３．雑誌名 IEEE Transactions on Smart Grid	６．最初と最後の頁 599～611
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TSG.2020.3019417	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

１．著者名 平井卓実，定本知徳	４．巻 65
２．論文標題 未知な部分観測システムに対するワンショットな強化学習	５．発行年 2021年
３．雑誌名 システム制御情報学会論文誌	６．最初と最後の頁 235-242
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 －

１．著者名 Sadamoto Tomonori、Chakrabortty Aranya	４．巻 1
２．論文標題 Fast Real-Time Reinforcement Learning for Partially-Observable Large-Scale Systems	５．発行年 2020年
３．雑誌名 IEEE Transactions on Artificial Intelligence	６．最初と最後の頁 206～218
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TAI.2021.3058228	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕　計2件（うち招待講演　0件／うち国際学会　0件）

〔図書〕　計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

次世代電力系統の安定化へ新たな可能性 －電力の"流れ"の制御が鍵－
https://www.uec.ac.jp/news/announcement/2020/20200827_2727.html

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			
米国	North Carolina State University			