

令和 2 年 7 月 1 日現在

機関番号：25301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K18124

研究課題名（和文）大規模電力ネットワークのスケラブル制御

研究課題名（英文）Scalable control of large-scale power networks

研究代表者

泉 晋作 (Izumi, Shinsaku)

岡山県立大学・情報工学部・助教

研究者番号：10757967

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、電力ネットワークを対象に、その規模に依存しない、すなわち「スケラブルな」制御器の設計理論の構築に取り組んだ。具体的には、すべての発電機に対して同じ構造を持つ制御器をスケラブル制御器と定め、フィードバック系の安定性の保証と良好な時間応答の実現を目的としたスケラブル制御器の設計問題を検討し、その解を与えた。また、関連するトピックとして、電力ネットワークの安定性解析法と同期現象について研究を進め、いくつかの成果を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

電力ネットワークの制御に関するこれまでの研究では、各発電機の制御器を「個別に」設計・実装することが主に考えられていた。しかし、発電機の数が多い場合、このような方法を用いると、制御器の設計・実装に多大な時間と労力がかかってしまう。一方、本研究で構築したスケラブル制御の枠組みには、1つの制御器を設計するだけで全発電機の制御器が得られる、各発電機に対して異なった制御器を組み込まなくてよい、といった利点がある。そのため、本研究の成果は、大規模な電力ネットワークの制御器の設計・実装にかかる時間と労力の削減につながるものと期待される。

研究成果の概要（英文）：This study has considered scalable control of power networks, that is, control under the constraint that controllers of all generators are the same. We have addressed a design problem of the same controllers to stabilize the resulting feedback system and to improve the performance in terms of the time response, and have presented a solution to the design problem. This result is useful to reduce time and effort spent in controller design and implementation for large-scale power networks. Besides, we have studied a stability analysis method of power networks and synchronization phenomena as related topics.

研究分野：制御工学

キーワード：電力ネットワーク スケラビリティ 安定性解析 二乗和計画 同期現象

1. 研究開始当初の背景

電力ネットワークは電力の発生から供給までを担うものであり、その制御は電力工学や制御工学の分野において重要な研究テーマとなっている。これは、電力ネットワークを高度に制御することで、電力をより安定的に供給でき、ライフラインの維持に貢献できるためである。また、最近では、化石燃料の枯渇や地球温暖化への対策として、再生可能エネルギーを導入する動きが活発化しているが、再生可能エネルギーの大量導入は電力ネットワークを不安定化させる恐れがあることが知られている。電力ネットワークの制御の研究には、こうした問題を解決することも期待されており、その重要性は今後さらに増すと予想される。

これまでの関連研究においては、電力ネットワークを構成する各発電機の制御器を「個別に」設計・実装することが主に考えられていた。しかし、発電機の数が多い場合、このような方法を用いると、制御器の設計・実装に多大な時間と労力がかかってしまう。たとえば、文献[1]で提案された方法を利用して100台の発電機の制御器を設計する場合、1) 制御器1を設計する、2) 制御器1を考慮して制御器2を設計する、3)...100) 制御器1~99を考慮して制御器100を設計する、という100もの手順が必要になってしまう。電力ネットワークは一般に大規模なシステムであることに加え、再生可能エネルギー等の導入によって今後その規模はさらに拡大すると考えられるため、このことは大きな問題になると考えられる。

2. 研究の目的

そこで本研究では、電力ネットワークの「スケーラブル制御」を考える。スケーラブル制御とは、対象とするシステムの規模に依存しない制御のことである。電力ネットワークのスケーラブル制御が実現されれば、発電機の数が多い場合であっても、その制御器の設計・実装を効率的に行うことが可能となり、それらにかかる時間と労力を削減できる。

本研究では、電力ネットワークを対象に、スケーラブル制御の理論的な枠組みの構築を目的とする。とくに、「電力ネットワークに対して有効かつスケーラブルな制御器は存在するか?」、「もし存在するならば、それはどのようにして設計すれば良いか?」という問いに答えることを目指す。また、結果として得られるフィードバック系の安定性を評価する方法を開発する。さらに、電力ネットワークでは発電機群が同期運転をしていることに着目し、同期現象の観点から制御にアプローチする方法を模索する。

3. 研究の方法

上記の目的を達成するために、つぎの方法で研究を進めた。

(1) スケーラブル制御器の設計理論の構築

複数の発電機からなる電力ネットワークを考え、すべての発電機の制御器が「同じ」構造を持つという制約を設ける。この制約により、1つの制御器を設計するだけで全発電機の制御器が得られることになり、ある種のスケーラビリティが保証される。このような制御器を本研究ではスケーラブル制御器と呼び、フィードバック系の安定性を保証し、かつ良好な時間応答を実現するスケーラブル制御器の設計問題を検討する。これを通して、2. で述べた問いに答える。

(2) 二乗和計画による安定性解析法の改良

電力ネットワークの安定性解析法として、二乗和計画を用いる方法[2]が知られている。これは、安定性解析において重要な役割を演じるリアプノフ関数を、数値最適化により効率的に求めるものであり、リアプノフ関数の探索にかかる時間と労力を削減できるという利点を持つ。しかし、大規模な電力ネットワークへの適用を考えた場合、解析法そのものが複雑である、発電機の物理パラメータの不確かさを考慮していない、といった問題がある。そこで、これらの問題を解決することを目指す。

(3) メトロノームの同期現象のモデル化

本研究では同期現象が見られる身近な例としてメトロノームに着目する。メトロノームの同期現象とは、ある物体の上に置かれた複数のメトロノームがその物体を介して相互作用し、針の振動リズムが徐々に揃っていくというものである。ここでは、研究の第一段階として、メトロノームの同期現象が観測できる実験装置を製作し、その実験データから同期現象を記述する数理モデルを構築する。



図1 製作した同期実験用の装置：台が水平方向に動くようになっており、一方のメトロノームの揺れが台を介してもう一方へ伝わり、同期（2つの針の振動リズムが揃う）が起こる。

4. 研究成果

本研究の主な成果は以下のようにまとめられる。

(1) スケラブル制御器の設計理論の構築

スケラブル制御の難しさは、すべての制御器が同じ構造を持つという制約により、よく知られた線形状態フィードバック制御理論が直接適用できない点にある。そこで本研究では、発電機の特長である制動力（発電機の動揺を抑える力）に着目し、各発電機の制動力を一様に強化するようなスケラブル制御器を提案した。そして、電力ネットワークのエネルギーと非線形制御理論を利用して、提案制御器によるフィードバック系の平衡点の安定性を解析した。その結果、元の電力ネットワークがある安定な平衡点を持つとき、提案制御器によってその平衡点の安定性が保たれることを示した。この結果の妥当性は、計算機シミュレーションにより確認した。

つぎに、フィードバック系の時間応答に関する性能向上を目的とした、提案制御器のゲインの設計法を開発した。具体的には、時間応答と制御にかかるコストを評価する指標として、フィードバック系の安定状態からの偏差と制御入力によって記述されるある評価関数を導入し、その値を小さくするようなゲインの設計法を提案した。計算機シミュレーションの結果、提案した設計法により、良好な時間応答を実現するゲインが得られることを示した。

(2) 二乗和計画による安定性解析法の改良

まず、従来の安定性解析法[2]が持つ複雑さの低減に取り組んだ。その結果、従来法では、4種類の二乗和計画問題を反復的に解かなければならなかったのに対し、本研究では、解くべき二乗和計画問題の数を半分に減らした、よりシンプルな解析法を提案し、その収束性を理論的に証明した。さらに、計算機シミュレーションを行い、提案法が単純化されたものであるにもかかわらず、従来法と同等以上の性能を実現することを確認した。

つぎに、従来法を各発電機の慣性定数と減衰係数が不確かな場合に拡張した。具体的には、ポリトープ表現と呼ばれる方法を用いて、物理パラメータの不確かさを考慮した電力ネットワークの表現を与え、それに基づいて二乗和計画による解析法を構築した。そして、得られた方法による解析結果に対して理論的な保証を与えた。計算機シミュレーションの結果、従来法を用いると物理パラメータの不確かさにより誤った解析結果が得られてしまう場合でも、本研究で得られた方法を用いると誤りのない解析結果が得られることを示した。

(3) メトロノームの同期現象のモデル化

まず、メトロノーム単体に対し、その振舞いを再現する数理モデルの構築に取り組んだ。モデルの構造は関連研究[3]のものと同様とし、実験データからモデルのパラメータを同定した。具体的には、パラメータの同定問題を、実験結果とモデルの応答の平均二乗誤差を最小化するパラメータの値を求める問題として定式化し、粒子群最適化と呼ばれる数値最適化法を用いてその解を求めた。そして、実験結果とモデルの応答を比較し、得られたパラメータの値を用いたモデルが実機の動作を再現することを確認した。

つぎに、同期実験のための装置として、図1のような、紐で吊るされた台と2台のメトロノームからなる実験装置を製作し、前述の結果を応用して、その振舞いを再現する数理モデルを構築した。そして、観測される同期現象に焦点を当て、その観点からモデルを検証した。具体的には、同期時のメトロノームの振舞いと、初期状態と出現する同期パターンの関係の2つの観点から、実験結果とモデルの応答を比較した。その結果、得られたモデルは、上記の2点に関して実機の特徴を捉えていることを示した。

<参考文献>

- [1] A. Dysko, W. E. Leithead, and J. O'Reilly: Enhanced power system stability by coordinated PSS design, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 25, No. 1, pp. 413-422 (2010)
- [2] M. Anghel, F. Milano, and A. Papachristodoulou: Algorithmic construction of Lyapunov functions for power system stability analysis, IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, Vol. 60, No. 9, pp. 2533-2546 (2013)
- [3] K. Czołczynski, P. Perlikowski, A. Stefanski, and T. Kapitaniak: Clustering and synchronization of n Huygens' clocks, Physica A, Vol. 388, No. 24, pp. 5013-5023 (2009)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6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 S. Izumi, H. Somekawa, X. Xin, and T. Yamasaki	4. 巻 100
2. 論文標題 Estimation of Regions of Attraction of Power Systems by using Sum of Squares Programming	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Electrical Engineering	6. 最初と最後の頁 2205-2216
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s00202-018-0690-z	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 泉晋作, 鴻上凌也, 忻欣, 山崎大河	4. 巻 31
2. 論文標題 吊台上のメトロノームの同期現象-モデルパラメータの同定と実験検証	5. 発行年 2018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 400-402
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.5687/iscie.31.400	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 泉晋作, 榎原康介, 忻欣, 山崎大河, 村岡慶紀	4. 巻 30
2. 論文標題 メトロノームモデルのパラメータ同定	5. 発行年 2017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 191-196
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.5687/iscie.30.191	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 S. Izumi, H. Somekawa, X. Xin, and T. Yamasaki	4. 巻 115
2. 論文標題 Analysis of Robust Transient Stability of Power Systems using Sum of Squares Programming	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 International Journal of Electrical Power & Energy Systems	6. 最初と最後の頁 105401
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.ijepes.2019.105401	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 -

〔学会発表〕 計12件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 6件）

1. 発表者名 S. Izumi, H. Somekawa, X. Xin, and T. Yamasaki
2. 発表標題 Analysis of Robust Transient Stability of Power Systems by using Sum of Squares Programming
3. 学会等名 57th IEEE Conference on Decision and Control (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 泉晋作, 染川浩輝, 忻欣, 山崎大河
2. 発表標題 二乗和計画による電力システムのロバスト吸引領域推定
3. 学会等名 第27回計測自動制御学会中国支部学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 泉晋作, 三浦星, 村岡慶紀, 忻欣, 山崎大河
2. 発表標題 2台のメトロノームの同期現象解析: 実機実験による検証
3. 学会等名 第60回自動制御連合講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 染川浩輝, 忻欣, 泉晋作, 山崎大河
2. 発表標題 二乗和計画問題を用いた電力システムの吸引領域推定
3. 学会等名 第25回計測自動制御学会中国支部学術講演会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 泉晋作, 西島健祐, 忻欣
2. 発表標題 電力システムのスケラブル制御
3. 学会等名 第62回自動制御連合講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S. Izumi, K. Nishijima, and X. Xin
2. 発表標題 Scalable Control of Power Networks
3. 学会等名 2019 International Symposium on Nonlinear Theory and Its Applications (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S. Izumi, K. Nishijima, and X. Xin
2. 発表標題 Design of Scalable Controllers for Power Systems
3. 学会等名 21st World Congress of International Federation of Automatic Control (国際学会)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

受賞：泉晋作，第60回自動制御連合講演会 優秀発表賞（2018.1.22），学会発表「2台のメトロノームの同期現象解析：実機実験による検証」に対して

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