

平成30年6月25日現在

機関番号：25301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26420425

研究課題名(和文) 電力システムの過渡安定性解析と制御系設計の手法

研究課題名(英文) New Analysis and Control Design Methods for the Transient Stability of Electric Power Systems

研究代表者

忻 欣(Xin, Xin)

岡山県立大学・情報工学部・教授

研究者番号：70293040

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、複数台の発電機からなる電力システムを対象とし、研究対象の非線形動特性を用い、その過渡安定性に関する新しい解析法と制御系設計法を確立している。以下の成果が得られた。1) 発電機の動揺方程式の構造などを活かして、発電機群の同期に関する新たな条件を示した。2) 二乗和計画を用いた新たなリアプノフ関数を設計し、それらに基づいて、安定平衡点の吸引領域をより正確に推定し、電力システムの過渡安定性を解析した。3) 代表極に着目した電力システムの安定化制御器の設計法を提案した。4) 記述関数法を用いて、共通構造台に設置された複数台のメトロノームの同期現象に関する解析するとともに、実験検証を行った。

研究成果の概要(英文)：In this research, new analysis and control design methods for the transient stability of electric power systems consisting of multiple generators are established by using the fundamental nonlinear dynamics of the systems. The following results are obtained. 1) New conditions concerning the synchronization of the generators were presented by using the swing equation of the generators. 2) New Lyapunov functions were designed by using the sum of squares program and estimating more precisely the regions of attraction of the stable equilibrium points of the power systems, which yields a better analysis of the transient stability of the systems. 3) Design methods of stabilization controller of the power systems were proposed by focusing on the representative pole. 4) New analysis methods on the synchronization phenomena of multiple metronomes mounted on the common bases were achieved by using the describing function method, and experimental verifications were carried out.

研究分野：制御工学

キーワード：電力システム 過渡安定性 発電機群 同期現象解析 二乗和計画

1. 研究開始当初の背景

今後、電力システムにおいては、既存設備を最大限に活用していくことから、システム運用条件が現状よりも一層厳しくなることに加え、様々な分散型再生可能エネルギー源が既存の電力システムに大量に連系されようとしているため、より大規模・複雑・高不確実になりつつある電力システムを、いかに安定性を確保しながら、高効率に運用するかは非常に重要な課題である。

電力システムを安定に運用するためには、同期運転、電圧、周波数などに関する安定性を保つ必要がある。特に、同期運転の安定性、すなわち、同期安定性が失われて同期ができない状態は、電力システムの崩壊につながる懸念があるため、避ける必要がある。

定態安定性(緩やかな負荷変化が生じても安定に送電できる)に対して、発電機を含む非線形システムに対して、通常は所定の動作点近傍における線形近似モデルを用い、固有値解析により論じられる。しかし、過渡安定性(系統事故等のような急激で、大きな外乱が生じてもおお同期を保って送電できる)に対して、線形近似モデルによる解析・設計が必ずしも有効とはいえないため、リアプノフ関数によるエネルギー関数法が知られているが、発電機などの簡易モデルを用いることが多く解析精度に欠け、所望の性能達成を保証するのが難しい。このため、過渡安定性については、今まではシミュレーション解析が中心であり、解析的に扱い可能な手法はまだ確立されていない。

発電機群からなる電力システムは多自由度の結合振動子と見なせることに加え、非駆動関節を有する劣駆動ロボットはアクチュエータの故障(一種の大きな外乱)によって生じたシステムも見なせることから、研究代表者らの多自由度劣駆動ロボットの制御系の解析・設計ならびにシステムの不確かさや外乱を考慮できるロバスト制御に関する研究経験を、電力システムの過渡安定性解析と制御系設計に活用できると考え、本研究を着想した。

2. 研究の目的

より大規模・複雑・高不確実になりつつある電力システムを、いかに安定性を確保しながら、高効率に運用するかは非常に重要な課題である。本研究では、複数台の発電機からなる電力システムを対象とし、その実用上最も重要な課題の1つである過渡安定性について、研究代表者らが多自由度劣駆動ロボットに対する非線形制御系の解析・設計とロバスト制御に関する研究経験を活かして、保守性が少ない同期と過渡安定に関する条件を与え、その過渡安定性に関する新しい解析法を確立するとともに、電力システム安定化装置に関する設計法を確立することを目的と

する。

3. 研究の方法

本研究では、複数台の発電機からなる電力システムを対象とし、研究対象の非線形動特性を用い、その過渡安定性に関する新しい解析法と制御系設計法を確立する。具体的には、

- 1) 発電機の動揺方程式の構造などを活かして、発電機群の同期に関する新たな条件を導出する。
- 2) 二乗和計画を用いた新たなリアプノフ関数を設計し、それらに基づいて、安定平衡点の吸引領域をより正確に推定し、電力システムの過渡安定性を解析する。
- 3) 代表極に着目した電力システムの安定化制御器を設計する。
- 4) 記述関数法を用いて、共通構造台に設置された複数台のメトロノームの同期現象に関する解析するとともに、実験検証を行う。

4. 研究成果

1) 発電機群の同期に関する研究

発電機群の動揺方程式は2次の蔵本モデルであることから、発電機群の同期条件を研究するため、その蔵本モデルの平衡点に関する研究を行った。発電機が3台の場合に蔵本モデルの平衡点が最大6個存在することを解析的に示し、発電機が4台の場合にその平衡点が14個以下となることを解析的に示すとともに、10個存在する数値例を与えている。また、平衡点の安定性に着目して、3台の発電機群、4台の発電機群の場合に、同期位相差が90度を越える数値例を与えて、発電機群が同期するための従来の十分条件が保守性を持つことを示している。

また、n台の発電機群の同期条件を研究するため、発電機群の非均一蔵本モデルを用いてその同期するための新たな必要条件を与えている。これは従来の研究と異なり、発電機間の相互作用が最大となる位相差を解析的に定めることで導出した。発電機が3~5台の場合に対して、シミュレーションにより、従来の必要条件の緩さを大幅に改善したことを明らかにし、提案した必要条件の有効性を示している。理論的な考察と数値シミュレーションの両方により、導出した必要条件が既存の条件より優れていることを示している。

2) 電力システムの過渡安定性に関する解析

多項式系に対して、二乗和(SOS)計画に基づく制御系解析・設計は近年注目を浴びている。また、多項式系でない電力系の二乗和計画による安定性解析の試みは行われている。電力システムの過渡安定性の解析方法と

して、数値的にシステム軌跡を積分せずに安定平衡点の吸引領域を推定するため、二乗和計画を用いたリアプノフ関数の構築法が提案されている。しかし、その構築法では、以下の2つの問題点があった。問題1は、そのリアプノフ関数を導出する際のパラメータの決定方法に関して与えられていない。問題2は、その構築法の計算アルゴリズムは複雑である。そのため、問題1に対しては、同時摂動最適化法を用いたそのパラメータの決定方法を提案している。そして、複数の電力システムを用いてその提案法の有効性を示している。問題2に対しては、そのアルゴリズムを単純化し、計算量が少ないリアプノフ関数の改良した構築法を提案している。そして、複数の電力システムを用いてその提案法の有効性を示している。

3) 電力システムの安定化制御器の設計

n 台の発電機群を対象とし、エネルギーに着目したリアプノフ関数を設計し、それに基づく発電機の角速度による安定化制御則を導出するとともに、閉ループシステムの代表極(システムの時間応答に最も影響を与える極)に着目し、即応性のよい適切なゲインの選定法を提案している。また、三機無限大母線システムに対して、数値シミュレーションから、従来の方法より、閉ループシステムが安定性と高い即応性を有していることを示している。

4) メトロノーム群の同期現象に関する研究

発電機群の動揺方程式と共通の構造体に設置された複数のメトロノームの運動方程式に共通点があることに着目し、台車と水平吊り台にそれぞれ設置された n 台のメトロノームの同期現象に関する研究を行った。メトロノームに関する研究の多くは、実験・数値シミュレーションによる結果の検討を主に行っており、理論的な解析はあまり行われていない。その原因として、メトロノームの衝撃トルクは角度と角速度による不連続関数で表されるため、扱いの困難なことが考えられる。そこで、本研究では、記述関数法を用いてメトロノーム群の同期現象の解析にはじめて成功した。具体的には、まず、不連続関数である衝撃トルクに対してその記述関数を導出し、それを用いて、同期時のメトロノーム群の振舞いを理論的な解析し、同期後に出現しうる基本調波の振動周波数、振幅、および位相差の性質を示している。つぎに、2、3、4 台の場合に対して、数値計算により解析結果の妥当性を検証し、その解析の精度が高いことを示している。

また、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、そのモデルのパラメータを同定した。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との関係の二つの観点から、実験結果とモデルの応答を比較し、モデルの有効性を検

証した。

さらに、メトロノームの同期現象に関する従来の研究では、メトロノームが台車や単吊台に設置されているものが多いことから、2重吊台上の2台のメトロノームを対象とした。メトロノームが発生させるトルクを、記述関数を用いて近似し、対象システムの振る舞いを解析し、各吊台の紐と各メトロノームの針の振幅、位相、振動周波数を解析的に示すとともに、数値シミュレーションによりその解析の精度が高いことを確認できている。

5) 関連する基礎理論研究

本研究の理論面を下支えする、いくつかの多自由度の非駆動関節を持つロボットシステムに関する研究を行った。具体的には、垂直平面に運動する根元関節のみが駆動である3リンク型劣駆動ロボットの大域的な安定化制御と解析、 n リンク劣駆動ロボットが真上平衡点における可制御性と可観測性などである。

本研究で確立した電力システムの過渡安定性の解析法と制御系設計法は、従来の解析・制御手法の保守性を大きく改善し、その過渡安定性を大きく向上させるものと考えている。また、本研究は、電力システムの同期メカニズムの解明に対しても貢献するとともに、スマートグリッドに関する研究の発展に対しても貢献していると信じている。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計10件)

- (1) S. Izumi, H. Somekawa, X. Xin, and T. Yamasaki: Estimation of regions of attraction of power systems by using sum of squares programming, Electrical Engineering, online on May 2018.
- (2) X. Xin, Linear strong structural controllability and observability of an n -link underactuated revolute planar robot with active intermediate joint or joints, Automatica, Vol. 94, pp. 436-442, 2018.
- (3) X. Xin, Necessary and sufficient conditions for linear strong structural control-ability and observability of n -link underactuated planar robot with multiple active intermediate links, IET Control Theory & Applications, Vol. 11, No. 12, pp. 1873-1883, 2017.
- (4) 泉晋作, 櫻原康介, 忻欣, 山崎大河, 村岡慶紀: メトロノームモデルのパラメータ同定, システム制御情報学会論文誌, Vol. 30, No. 5, pp. 191-196, 2017.
- (5) Y. Liu, X. Xin*, Global motion analysis of energy-based control for 3-link planar robot with a single actuator at the first joint, Nonlinear Dynamics, Vol. 88, No. 3, pp.

- 1749-1768, 2017.
- (6) Q. Wang, C. Sun, and X. Xin: Robust consensus tracking of linear multiagent systems with input saturation and input-additive uncertainties, *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, Vol. 27, No. 14, pp. 2321–2472, 2017.
- (7) Y. Liu, X. Xin*, Controllability and observability of an n-link planar robot with a single actuator having different actuator-sensor configurations, *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 61, no. 4, pp. 1129-1134, 2016.
- (8) Y. Liu and X. Xin*: Set-point control for folded configuration of 3-link underactuated gymnastic planar robot: New results beyond the swing-up control, *Multibody System Dynamics*, Vol. 34, No. 4, pp. 349-372 , 2015.
- (9) Y. Liu and X. Xin*: PD control for global stabilization of an n-TORA system, *Journal of Vibroengineering*, Vol. 17, No. 6, pp. 1712-1763, 2015.
- (10) Y. Liu and X. Xin*: Stable stabilizing controllers for remotely driven Acrobot: Existence and design methods, *SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration*, Vol. 8, No. 6, pp. 396-403, 2015.
- [学会発表](計 35 件)
- (11) T. Shimohashi, X. Xin, S. Izumi, and T. Yamasaki, New results of synchronization condition of the non-uniform Kuramoto oscillators, *Proceedings of the 37th Chinese Control Conference*, Wuhan, 2018.7.
- (12) X. Xin, M. Ono, S. Izumi, T. Yamasaki, and K. Zhang, Angular momentum based stabilizing control of underactuated multi-link planar robots with last active joint, *Proceedings of 2018, American Control Conference*, Milwaukee, 2018.6.
- (13) X. Xin, M. Ono, S. Izumi, and T. Yamasaki, New results of angular momentum based stabilizing control of the Acrobot, *Proceedings of the 56th IEEE Conference on Decision and Control*, pp. 5809-5814, Melbourne, 2017. 12.
- (14) X. Xin, Y. Muraoka, S. Izumi, T. Yamasaki, Analysis of synchronization of n metronomes on a hanging plate via describing function method without assumption on amplitudes of metronomes, *Proceedings of the 36th Chinese Control Conference*, Dalian, pp. 1129-1134, 2017.7.
- (15) X. Xin, Y. Muraoka, S. Hara, S. Izumi, T. Yamasaki, New characterization and classification of synchronization of multiple metronomes on a cart via describing function method, *Proceedings of the 20th IFAC World Congress*, pp. 9860-9865, Toulouse, 2017.7.
- (16) T. Shimohashi, X. Xin, S. Izumi, T. Yamasaki, Synchronization conditions of the non-uniform Kuramoto model, *Proc. of SICE International Symposium on Control Systems*, 1A3-4, 2017.3.
- (17) X. Xin, Controllability and observability of an n-link underactuated planar robot with different actuator-sensor configurations: Active intermediate joint or joints, *Proceedings of the 55th IEEE Conference on Decision and Control*, pp. 821–826, Las Vegas, 2016.12.
- (18) X. Xin, Controllability and observability of n-link underactuated planar robot with multiple active intermediate links, *Proceedings of the 55th IEEE Conference on Decision and Control*, pp. 6697–6702, Las Vegas, 2016.12.
- (19) Y. Muraoka, X. Xin, S. Izumi, T. Yamasaki, Analysis of synchronization of two metronomes hanging from a plate via describing function approach, *Proceedings of the 35th Chinese Control Conference*, pp. 1110–1115, Chengdu, 2016.7
- (20) X. Xin, New results for controllability and observability of an n-link underactuated planar robot with different actuator–sensor configurations, *Proceedings of the 35th Chinese Control Conference*, pp. 6386–6371, Chengdu, 2016.7.
- (21) X. Xin, T. Kikkawa, Y. Liu, Analytical solutions of equilibrium points of the standard Kuramoto model: 3 and 4 oscillators, *Proceedings of 2016 American Control Conference*, pp. 2447–2452, Boston, 2016.7.
- (22) X. Xin, Y. Muraoka, S. Hara, Analysis of synchronization of n metronomes on a cart via describing function method: New results beyond two metronomes *Proceedings of 2016 American Control Conference*, pp. 6604–6609, Boston, 2016.7.
- (23) Y. Liu, X. Xin, On controllability and observability of n-link planar robot with a single actuator having different driving configurations, *Proceedings of the 54th IEEE Conference on Decision and Control*, pp. 1477–1482, Osaka, 2015.12.
- (24) Y. Liu, X. Xin, PD control for global stabilization of an n-TORA system, *Proceedings of SICE Annual Conference 2015*, pp. 964-969, Hangzhou, 2015.7.
- (25) X. Xin, Y. Liu, Analysis of synchronization phenomena of two metronomes on a cart using describing function approach, *Proceedings of 2015 American Control Conference*, pp. 1345–1350, Chicago, 2015.7.

- (26) K. Sumida, X. Xin, and T. Yamasaki: Optimal PD control design via dominant pole assignment for a class of TORA systems, 2014 IEEE/SICE International Symposium on System Integration, Tokyo, pp. 257-262, 2014.
- (27) K. Sumida, X. Xin, and T. Yamasaki: Design of optimal PD control gains for a TORA: Dominant pole assignment, 2014 IEEE 7th International Workshop on Computational Intelligence and Applications, Hiroshima, pp. 35-39, 2014.11.
- (28) X. Xin, Y. Liu, C. Sun, Design and analysis of energy-based controller for 3-Link robots with a single actuator, Proceedings of the 19th IFAC World Congress, pp. 8241-8246, Cape Town, 2014.8.
- (29) Y. Liu, X. Xin, M. Yamakita, Simultaneous control of energy and actuated variable of 3-link planar robot with underactuation degree two and its application. Proceedings of the 33rd Chinese Control Conference, pp. 2281-2286. Nanjing, 2014.7.
- (30) Y. Liu, X. Xin, J. Wu, On n-Link planar revolute robot: Motion equations and new properties, Proceedings of the 11th World Congress on Intelligent Control and Automation, pp. 3284-3289, Shenyang, 2014.6.
- (31) 下橋誉之, 忻欣, 泉晋作, 山崎大河: 非均一蔵本振動子が同期するための必要条件について, 第 26 回計測自動制御学会中国支部学術講演会 鳥取, pp. 121-122, 2017.11.
- (32) 泉晋作, 三浦星, 村岡慶紀, 忻欣, 山崎大河: 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, 第 60 回自動制御連合講演会, 調布, pp. 634-635, 2017.11.
- (33) 染川浩輝, 忻欣, 泉晋作, 山崎大河: 二乗和計画問題を用いた電力システムの吸引領域推定, 第 25 回計測自動制御学会中国支部学術講演会, 東広島, pp. 168-169, 2016.11.
- (34) 松岡恭司, 忻欣, 泉晋作, 山崎大河: 吊台上のメトロノームの同期: 吊台の構造と同期モードの関係, 第 25 回計測自動制御学会中国支部学術講演会, 東広島, pp. 164-165, 2016.11.
- (35) 下橋誉之, 忻欣, 泉晋作, 山崎大河: 非均一蔵本モデルの同期条件に関する研究, 第 59 回自動制御連合講演会, 北九州, pp. 1279-1282, 2016.11.
- (36) 村岡慶紀, 忻欣, 泉晋作, 山崎大河: 水平吊り台に設置された 3 台のメトロノームの同期モード解析: 振幅の異なるモードの解析, 第 59 回自動制御連合講演会, 北九州, pp. 1274-1278, 2016. 11.
- (37) 泉晋作, 唐川裕也, 忻欣, 山崎大河: 太陽光発電システムを有する電力システムの安定性解析, 第 59 回自動制御連合講演会, 北九州, 11 月 10 ~ 12 日, pp. 242-243, 2016.
- (38) 村岡慶紀, 忻欣, 山崎大河, 泉晋作: 台車に設置された 3 台のメトロノームの同期現象に関する解析, 第 24 回計測自動制御学会中国支部学術講演会, 岡山, pp. 124-125, 2015.11.
- (39) 村岡慶紀, 忻欣, 山崎大河, 泉晋作: 水平吊り台に設置された 2 台のメトロノームの同期モードに関する解析: 機械パラメータによる同期モードの変化の調査, 第 17 回 IEEE 広島支部学生シンポジウム, 岡山, pp. 34-36, 2015.11.
- (40) 室谷龍太郎, 忻欣, 山崎大河, 泉晋作: 代表極に着目した三機無限大母線システムの制御器設計, 第 17 回 IEEE 広島支部学生シンポジウム, 岡山, pp. 47-49, 2015.
- (41) 村岡慶紀, 忻欣, 山崎大河: 水平吊り台に設置された 2 台のメトロノームの同期モードに関する解析, 第 14 回「運動と振動の制御」シンポジウム, 宇都宮, C208, 2015.6
- (42) 村岡慶紀, 忻欣, 山崎大河, 角田薫: 水平吊り台に設置された 2 台のメトロノームの同期現象に関する解析, 第 23 回計測自動制御学会中国支部学術講演会, 福山, 2014.11.
- (43) 谷本圭吾, 忻欣, 山崎大河: 1 つの駆動関節を有する劣駆動倒立振子の可制御性に関する研究, 第 16 回 IEEE 広島支部学生シンポジウム, 広島, 2014.11.
- (44) 小野真, 忻欣, 山崎大河, 角田薫: 角運動量を用いた Acrobot の安定化制御について, 第 16 回 IEEE 広島支部学生シンポジウム, 広島, 2014.11. (2015 年度計測自動制御学会中国支部奨励賞)
- (45) 角田薫, 忻欣, 山崎大河: 代表極配置による TORA の最適 PD ゲインの設計, 第 57 回自動制御連合講演会, pp. 1674-1677, 2014.11.

〔その他〕

ホームページ等

<http://crl.cse.oka-pu.ac.jp/publishment.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者 忻欣 (Xin Xin)

岡山県立大学・情報工学部・教授

研究者番号: 70293040