

Title	時空間階層システムに対する分散最適制御とその分散型エネルギー管理システムへの応用
Sub Title	Distributed and optimal control for dynamical systems with hierarchical structures and multi time-scale properties and its application to distributed energy management systems
Author	滑川, 徹(Namerikawa, Toru)
Publisher	
Publication year	2017
Jtitle	科学研究費補助金研究成果報告書 (2016.)
JaLC DOI	
Abstract	本研究では、時空間階層システムに対する分散型最適制御システム構築方法を提案し、その制御手法を分散型エネルギー管理システムへ応用し、提案手法の有効性を検証した。具体的には、複数の異なるタイムスケールを有するマイクログリッドシステムの分散的なロバスト安定化問題、複数の異なる空間スケールを有する大規模電力ネットワークの分散最適化制御問題、デマンドレスポンスによる系統周波数安定化問題に対して、分散制御やモデル予測制御、ロバスト制御に基づく解法を提案し、実際に分散型エネルギー管理システムに対して分散最適制御器を設計した。また数値実験および小型発電実験装置を用いた制御実験により提案理論の有効性を検証した。 The distributed and optimal control for large-scale dynamical systems with hierarchical structures and multi time-scale properties was investigated and some application technologies of the proposed control algorithms for distributed energy management systems were studied. First, a novel direct load control method to stabilize the system frequency was proposed. The proposed method utilized the consumers' controllable loads for load frequency control. Second, a load frequency control of a microgrid system was investigated based on static H-infinity control algorithm considering time-scale properties of generators. Then, hierarchical and cooperative model predictive control methodology for load frequency of large-scale electrical power network was studied. An efficient frequency control method was proposed considering economic dispatch and load frequency regulation. Finally, numerical simulation results and experimental results showed the effectiveness of the proposed approaches.
Notes	研究種目：基盤研究(C)(一般) 研究期間：2014～2016 課題番号：26420426 研究分野：制御・システム工学
Genre	Research Paper
URL	https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=KAKEN_26420426seika

慶應義塾大学学術情報リポジトリ(KOARA)に掲載されているコンテンツの著作権は、それぞれの著作者、学会または出版社/発行者に帰属し、その権利は著作権法によって保護されています。引用にあたっては、著作権法を遵守してご利用ください。

The copyrights of content available on the Keio Associated Repository of Academic resources (KOARA) belong to the respective authors, academic societies, or publishers/issuers, and these rights are protected by the Japanese Copyright Act. When quoting the content, please follow the Japanese copyright act.

平成 29 年 5 月 29 日現在

機関番号：32612

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420426

研究課題名 (和文) 時空間階層システムに対する分散最適制御とその分散型エネルギー管理システムへの応用

研究課題名 (英文) Distributed and Optimal Control for Dynamical Systems with Hierarchical Structures and Multi Time-Scale Properties and Its Application to Distributed Energy Management Systems

研究代表者

滑川 徹 (Namerikawa, Toru)

慶應義塾大学・理工学部 (矢上) ・教授

研究者番号：30262554

交付決定額 (研究期間全体) : (直接経費) 3,900,000 円

研究成果の概要 (和文) : 本研究では、時空間階層システムに対する分散型最適制御システム構築方法を提案し、その制御手法を分散型エネルギー管理システムへ応用し、提案手法の有効性を検証した。具体的には、複数の異なるタイムスケールを有するマイクログリッドシステムの分散的なロバスト安定化問題、複数の異なる空間スケールを有する大規模電力ネットワークの分散最適化制御問題、デマンドレスポンスによる系統周波数安定化問題に対して、分散制御やモデル予測制御、ロバスト制御に基づく解法を提案し、実際に分散型エネルギー管理システムに対して分散最適制御器を設計した。また数値実験および小型発電実験装置を用いた制御実験により提案理論の有効性を検証した。

研究成果の概要 (英文) : The distributed and optimal control for large-scale dynamical systems with hierarchical structures and multi time-scale properties was investigated and some application technologies of the proposed control algorithms for distributed energy management systems were studied.

First, a novel direct load control method to stabilize the system frequency was proposed. The proposed method utilized the consumers' controllable loads for load frequency control. Second, a load frequency control of a microgrid system was investigated based on static H-infinity control algorithm considering time-scale properties of generators. Then, hierarchical and cooperative model predictive control methodology for load frequency of large-scale electrical power network was studied. An efficient frequency control method was proposed considering economic dispatch and load frequency regulation. Finally, numerical simulation results and experimental results showed the effectiveness of the proposed approaches.

研究分野：制御・システム工学

キーワード：分散制御 最適制御 階層システム エネルギー管理システム マルチタイムスケール 負荷周波数制御 マイクログリッド

1. 研究開始当初の背景

再生可能エネルギー大量導入の社会的要請に伴い、現状の独占的電力事業形態の見直しと不十分な電力自由化の再検討の気運が高まっている。大規模電力ネットワークの構成要素には、発電設備などの機械-電気系だけではなく、エネルギー送配網、エネルギー情報網、そして電力マーケット（需要者、供給者、ISO）のような経済システムも含まれる。ダイナミカルシステムの視点から考察すると、負荷周波数制御系は、50Hz(60Hz)を常時維持するために数 10 ミリ秒周期でフィードバック制御が必要であり、電力分配には数分間での最適化が行われる。一方で、デマンドレスポンスで電力価格により電力需要の制御をする際には、30 分～1 時間単位での価格更新が行われる。このように、マルチ時間周期のダイナミクスの混在系となっており、従来の単一周周期での最適化の仕組みが使えない。

大規模電力ネットワークを空間階層システムとして表現すると、エネルギー管理区域を構造化し、上位層が下位層を管理する階層構造を採用することにより、隣接区域との相互連繋が可能となり、最適な資源分配が可能となる。社会システムの大規模複雑化に伴い、空間階層システム表現とその制御技術が益々重要となっている。

2. 研究の目的

本研究では複数の異なるタイムスケール、複数の異なる空間スケールを有する大規模複雑ダイナミカルシステムをマルチタイムスケール最適化問題とマルチ空間スケール最適化問題を統合した時空間階層システムの分散最適化問題として定義する。

分散制御理論に基づく制御系設計法を提案し、システムの安定性と最適性を理論的に示す。更には数値実験と小型発電実験装置を組み合わせた検証実験を行い、有効性を検証する。

3. 研究の方法

まず、異なるタイムスケールを有するシステムに対して、有限時間区間の最適化問題として定式化する。この際に問題となるのは、有限時間区間の予測問題を解く必要が生じることである。それぞれのタイムスケールシステムに対して、時間発展方程式を解き、各時間軸で同期させながら、干渉部分について結果の整合性を確認する。次に有限時間区間の最適化問題を、分散型モデル予測制御問題として定式化する。

次に、時空間階層システムとして全体システムを記述し、時空間階層システムに対する分散型最適制御システムを設計する。各エリ

ア間の情報結合を情報縮約、情報拡大の写像として表現し、分散階層制御器の設計を行う。まず、システムの拡大、縮小の定義を行い、拡大条件、縮小条件を導出する。更には階層制御器の構造を明らかにし、これをマルチタイムスケール問題に適用し、情報構造とダイナミクスを有する制約条件付き大規模最適化問題をラグランジュ緩和と双対分解を用いて新規のアルゴリズムを導出し、これに階層構造と、システムの拡大・縮小写像を用いた分散最適制御を構築する。

最後に、分散型エネルギー管理システムのシミュレーションモデルを作成し、提案分散制御則を適用する。また実験設備を構築し、本研究で開発された分散最適制御アルゴリズムの実証実験を行う。提案する実験設備は、複数台の小型同期発電機、太陽電池、風力発電機、誘導負荷により構成される。

以上により、本研究の最終目標である、時空間階層システムに対する分散最適制御の有効性を示すとともに、頑健で高信頼性を有する分散協調型エネルギー管理システムを実現する。

4. 研究成果

(1) 大規模電力ネットワークの重複情報を用いた分散階層制御

大規模電力ネットワークに対して、状態と入力に関する重複情報を用いた分散階層制御法を提案した。まず、状態や入力を含むサブシステムが重複する階層システムを構築し、階層システムと元のシステムとの関係性を示した。このとき構築した階層システムと元のシステムの状態や評価出力の遷移が同じになる条件を導出し、更に階層システムに対する分散制御器を設計し、元のシステムに対応するように制御器を縮小した。この際に設計した制御器を元のシステムに適合する条件を導出した。更には分散型電源を含む複数エリアが連結した電力ネットワークの系統周波数制御問題に対して、提案手法を適用し、分散階層制御器を設計した。数値シミュレーションにより、分散階層制御器がシステムを安定化でき、周波数変動が所望の領域に抑えられていることを示した。

(2) 静的 H_{∞} 制御によるマルチタイムスケール性を有するマイクログリッドの負荷周波数制御

時空間階層システムの 1 つであるマルチタイムスケール性を有する風力発電機と蓄電池を含むマイクログリッドに対して、 H_{∞} 制御を基とした負荷周波数制御法を提案した。再生可能エネルギーの導入により、エネルギーネットワークにおいて需給バランスを維持することがより困難になっているが、この対策として、火力・水力発電機に、蓄電池などの分散型電源を組み合わせることや、新たな制御手法の適用が期待されている。本

研究では、ディーゼル発電機と蓄電池のタイムスケールの違いを考慮した一般化プラントを構成し、静的 H_{∞} 制御器を設計した。また静的 H_{∞} 制御設計の繰り返し計算において生じる、過大な制御入力をもたらすゲインを回避するための LMI 条件を示し、静的 H_{∞} 制御へと組み込んだ。数値シミュレーションにおいては、PI 制御器と比較することで、周波数変動の抑制と蓄電池残容量変化の抑制を示した。また、発電機と可変抵抗を用いた制御実験においても、提案手法によって周波数変動を抑制できることを示した。

(3) 分散型空調管理システムの最適制御

階層構造を有する分散型空調管理システムの分散制御法として、主双対有効制約法に基づく最適管理手法を提案した。省エネ化および快適性を両立させた大規模な HVAC(空調管理)の最適化と運用を、中央管理室のみで集中制御を行う場合には中央管理室の計算コスト負担が大きくなる。そこで通信コスト抑制可能な手法として主双対有効制約法を用いた分散型空調管理システムの提案を行った。具体的には、まず分散型空調管理 HVAC システムに対して、モデル予測制御を考慮した評価関数を設定し、主双対有効制約法を用いた最適計算アルゴリズムを提案した。また数値実験により提案手法の有効性を検証した。

(4) 階層協調型モデル予測制御を用いた電力システムの周波数制御

経済的で効率的な周波数制御としてモデル予測制御を基にした分散予測最適制御手法を提案した。まず、複数の電力系統が接続されている大規模電力ネットワークの状態空間表現を導出した。次に、階層協調型モデル予測制御を用いた周波数制御を構成している経済負荷配分と協調型モデル予測制御を用いた周波数制御手法を提案した。上位階層では経済負荷配分問題をコストの最小化問題として定式化した。下位階層では負荷周波数制御問題を隣接系統との協調型モデル予測制御問題として扱い、繰り返し型の最適化手法を提案した。数値実験では、提案手法と従来手法とを周波数変動の抑制・燃料費の観点で比較することで、提案手法の有効性を示した。

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 15 件)

- ①名取 滉平, 須田 貴俊, 滑川 徹, リチウムイオンバッテリー充電率推定のための周波数応答データを用いたパラメータ初期値推定, 計測自動制御学会論文集, 査読有, Vol.53, No.1, 2017, 112-120
DOI:10.9746/sicetr.53.112

- ②Tomoki Ishikawa, Takaaki Kojima, and Toru Namerikawa, Short-Term Wind Power Prediction for Wind Turbine via Kalman Filter Based on JIT Modeling, Electrical Engineering in Japan, 査読無, Vol.198, No.3, 2017, 86-96
DOI:10.1002/eej.22888

- ③入田 隆, 篠原 巧, 滑川 徹, コード信号と交渉ゲームを用いた スマートグリッドにおけるリプレイ攻撃の検出, 計測自動制御学会論文集, 査読有, Vol.52, No.9, 2016, 498-506
DOI: 10.9746/sicetr.52.498

- ④池上 裕人, 永見 健太郎, 滑川 徹, マatching理論に基づくアグリゲータによるメカニズムデザインを用いた電力需要管理, 計測自動制御学会論文集, 査読有, Vol.52, No.11, 2016, 589-596
DOI:10.9746/sicetr.52.589

- ⑤高村 俊, 平中 拓人, 滑川 徹, 階層協調型モデル予測制御を用いた電力システムの周波数制御, 計測自動制御学会論文集, 査読有, Vol. 52, No.11, 2016, 597-604
DOI : 10.9746/sicetr.52.597

- ⑥滑川 徹, 藤田 政之, 座談会: 分散協調型エネルギー管理システム -2020 年を見据えて-, 計測と制御, 査読無, Vol.55, No.7, 2016, 539-546
DOI:10.11499/sicej1.55.539

- ⑦Tatsuya Mukai, Shunsuke Igari and Toru Namerikawa, Optimal Energy Management for Smart Grid System Considering Battery Characteristics, Electrical Engineering in Japan, 査読無, Vol.194, No.1, 2016, 18-26
DOI: 10.1002/eej.22774

- ⑧井山 仁志, 須田 貴俊, 西頭 昌明, 瀬戸 洋記, 向井 正和, 滑川 徹, ゲインスケジューリングモデル予測制御による HEV の燃費最適化, 計測自動制御学会論文集, 査読有, Vol.52, No.1, 2016, 1-10
DOI: 10.9746/sicetr.52.1

- ⑨入田 隆, 滑川 徹, コード信号を含む出力を用いたスマートグリッドにおけるリプレイ攻撃の検出, 計測自動制御学会論文集, 査読有, Vol.51, No.12, 2015, 822-828
DOI: 10.9746/sicetr.51.822

- ⑩増井 健治, 高村 俊, 滑川 徹, 発電機の応答速度を考慮した H_{∞} 制御に基づくマイクログリッドの負荷周波数制御, 計測自動制御学会論文集, 査読有, Vol.51, No.8,

2015、570-578
DOI: 10.9746/sicetr.51.570

- ⑪ Yoshihiro Okawa and Toru Namerikawa, Distributed dynamic pricing based on demand-supply balance and voltage phase difference in power grid, Control Theory and Technology, 査読有、Vol.13、No.2、2015、90-100
DOI: 10.1007/s11768-015-4131-5
- ⑫ Yuki Miyano and Toru Namerikawa, Optimal Pricing Algorithm in the Electricity Market with Battery and Accumulator and Demand-Supply Balancing, Electrical Engineering in Japan, 査読無、Vol.191、No.4、2015、8-18
DOI: 10.1002/eej.22698
- ⑬ 石川友規, 小嶋昂明, 滑川 徹, JIT モデリングに基づくカルマンフィルタによる短期風力発電量予測、電気学会論文誌 C、査読有、Vol.135、No.1、2015、81-89
DOI: 10.1541/ieej.iss.135.81
- ⑭ 向井 達哉, 猪狩 俊介, 滑川 徹, バッテリー特性を考慮したスマートグリッドの最適エネルギー管理、電気学会論文誌 C、査読有、Vol.134、No.12、2014、1862-1868
DOI: 10.1541/ieej.iss.134.1862
- ⑮ Toru Namerikawa and Yasuhiko Hosoda, H_{∞} Filter-Based Short-Term Electric Load Prediction Considering Characteristics of Load Curve, Electronics and Communications in Japan, 査読無、Vol.97、No.12、2014、1-10
DOI: 10.1002/ecj.11558

〔学会発表〕(計 32 件)

- ① 滑川 徹, システム制御技術と超スマートシティ構築、第 4 回制御部門マルチシンポジウム(招待講演)、2017 年 3 月 6 日~9 日、岡山大学(岡山県・岡山市)
- ② 篠原 巧, 滑川 徹, サイバーフィジカルシステムにおける完全ステルス攻撃、第 4 回制御部門マルチシンポジウム、2017 年 3 月 6 日~9 日、岡山大学(岡山県・岡山市)
- ③ 武藤 啓太, 大川 佳寛, 滑川 徹, アグリゲータによる需要家の電気機器別需要量調整のための最適電力価格決定、第 4 回制御部門マルチシンポジウム、2017 年 3 月 6 日~9 日、岡山大学(岡山県・岡山市)
- ④ 大川 佳寛, 滑川 徹, 電力潮流を考慮した動的電力価格決定における受動性に基づく安定性解析、第 4 回制御部門マルチシン

ポジウム、2017 年 3 月 6 日~9 日、岡山大学(岡山県・岡山市)

- ⑤ 篠原 巧, 滑川 徹, サイバーフィジカルシステムにおける False Data Injection Attack の検出、第 59 回自動制御連合講演会、2016 年 11 月 10 日~12 日、北九州国際会議場(福岡県・北九州市)
- ⑥ 永見 健太郎, 大川 佳寛, 滑川 徹, 電力市場におけるリグレットマッチングを用いた需給量調整、第 59 回自動制御連合講演会、2016 年 11 月 10 日~12 日、北九州国際会議場(福岡県・北九州市)
- ⑦ Kentaro Nagami and Toru Namerikawa, Optimal Pricing Algorithm to Suppress Voltage Rise Caused by Reverse Load Flow in Power Distribution Grid, SICE Annual Conference 2016 (国際学会)、2016 年 9 月 20 日~23 日、つくば国際会議場(茨城県・つくば市)
- ⑧ Takuto Hiranaka, Hyungbo Shim, and Toru Namerikawa, SoC regulator and DOB-based Load Frequency Control of a Microgrid by Coordination of Diesel Generator and Battery Storage, 2016 IEEE Multi-Conference on Systems and Control (国際学会)、2016 年 9 月 19 日~22 日、Buenos Aires (Argentina)
- ⑨ Shun Takamura, Toru Namerikawa, Hierarchical and Cooperative Model Predictive Control for Load Frequency of Power Network, 35th Chinese Control Conference, 2016 年 7 月 27 日~29 日、Chengdu(China)
- ⑩ 池上 裕人, 滑川 徹, マッチング理論に基づくアグリゲータによるメカニズムデザインを用いた電力需要管理、第 3 回 SICE 制御部門マルチシンポジウム、2016 年 3 月 7 日~10 日、南山大学(愛知県・名古屋市)
- ⑪ 大川 佳寛, 滑川 徹, 状態及び入力制約を考慮したアグリゲータによる需要家群の最適電力需要削減配分、第 3 回 SICE 制御部門マルチシンポジウム、2016 年 3 月 7 日~10 日、南山大学(愛知県・名古屋市)
- ⑫ 須田 貴俊, 滑川 徹, 通信コストを考慮した分散型空調管理システム、第 3 回 SICE 制御部門マルチシンポジウム、2016 年 3 月 7 日~10 日、南山大学(愛知県・名古屋市)
- ⑬ 滑川 徹, 分散型電力価格決定の基本メカニズム、AGI セミナー(招待講演)、2016 年 2 月 08 日、北九州市立大学(福岡県・北九州市)

- ⑭Kenji Masui and Toru Namerikawa, Load Frequency Control of a Microgrid based on H^∞ Control Considering Response Speed of Generators, The 54th IEEE Conference on Decision and Control (国際学会), 2015 年 12 月 15 日~18 日、大阪府立国際会議場 (大阪府・大阪市)
- ⑮Yoshihiro Okawa and Toru Namerikawa, Regional Demand-Supply Management based on Dynamic Pricing in Multi-period Energy Market, The 54th IEEE Conference on Decision and Control (国際学会), 2015 年 12 月 15 日~18 日、大阪府立国際会議場 (大阪府・大阪市)
- ⑯大川 佳寛, 滑川 徹, 蓄電設備の充放電を考慮したネガワット取引に基づく分散型電力需給管理、第 58 回自動制御連合講演会、2015 年 11 月 14 日~15 日、神戸大学 (兵庫県・神戸市)
- ⑰滑川 徹, 飯野 穰, 畑中 健志, 次世代都市インフラシステム構築に向けたシステム制御の可能性、第 58 回自動制御連合講演会、2015 年 11 月 14 日~15 日、神戸大学 (兵庫県・神戸市)
- ⑱入田 隆, 滑川 徹, コード信号を付加したスマートグリッドにおけるリプレイ攻撃の検出、第 58 回自動制御連合講演会、2015 年 11 月 14 日~15 日、神戸大学 (兵庫県・神戸市)
- ⑲Yoshihiro Okawa and Toru Namerikawa, Distributed Dynamic Pricing with Alternating Decision Making of Market Players, SICE Annual Conference 2015 (国際学会), 2015 年 7 月 28 日~30 日、Hangzhou (China)
- ⑳Takashi Irita and Toru Namerikawa, Decentralized Fault Detection of Multiple Cyber Attacks in Power Network via Kalman Filter, The 14th European Control Conference (国際学会), 2015 年 7 月 15 日~17 日、Linz (Austria)
- ㉑Yoshihiro Okawa and Toru Namerikawa, Dynamic Electricity Pricing via the H -infinity Control Considering Uncertainties in Market Participants' Behavior, The 14th European Control Conference (国際学会), 2015 年 7 月 15 日~17 日、Linz (Austria)
- ㉒Ryutaro Sato and Toru Namerikawa, Power System Stabilization by Direct Load Control Based on Strategy-Proofness and Individual Rationality, 2015 American Control Conference (国際学会), 2015 年 7 月 1 日~3 日、Chicago (USA)
- ㉓須田 貴俊, 滑川 徹, ∞ フィルタを用いた日射量予測および MPC を用いた HVAC の最適運用、第 59 回システム制御情報学会研究発表講演会、2015 年 5 月 20 日~22 日、中央電気倶楽部 (大阪府・大阪市)
- ㉔滑川 徹, エネルギーネットワークの分散協調制御、第 2 回 制御部門マルチシンポジウム (招待講演)、2015 年 03 月 06 日、東京電機大学 (東京都・足立区)
- ㉕大川 佳寛, 滑川 徹, マルチタイムスケール動的電力価格に基づく地域別電力需給管理、第 2 回 制御部門マルチシンポジウム、2015 年 03 月 06 日、東京電機大学 (東京都・足立区)
- ㉖入田 隆, 滑川 徹, カルマンフィルタを用いた複数のサイバー攻撃における電力網の分散故障診断、計測自動制御学会システム・情報部門学術 2014 講演会、2014 年 11 月 23 日、岡山大学 (岡山県・岡山市)
- ㉗増井 健治, 滑川 徹, 発電機の応答速度を考慮した静的 H^∞ 制御に基づくマイクログリッドの負荷周波数制御、計測自動制御学会システム・情報部門学術 2014 講演会、2014 年 11 月 23 日、岡山大学 (岡山県・岡山市)
- ㉘滑川 徹, 制御理論とパワーネットワーク, エネルギー経済、SICE 産業応用部門 2014 年度大会 (招待講演)、2014 年 11 月 12 日、東京工業大学 (東京都・目黒区)
- ㉙Tomoharu Suehiro and Toru Namerikawa, Hierarchical Control of Power Networks by using Overlapping Information, 14th International Conference on Control, Automation and Systems, 2014 年 10 月 24 日、Gyeonggi-do (Korea)
- ㉚Yoshihiro Okawa and Toru Namerikawa, Dynamic Pricing Considering Constraints of Power Grids, SICE Annual Conference 2014, 2014 年 09 月 12 日、北海道大学 (北海道・札幌市)
- ㉛Hitoshi Iyama and Toru Namerikawa, Fuel Consumption Optimization for a Power-Split HEV via Gain-Scheduled Model Predictive Control, SICE Annual Conference 2014, 2014 年 09 月 10 日、北海道大学 (北海道・札幌市)
- ㉜高村 俊, 滑川 徹, 状態推定に基づく重複情報を用いた電力系統の分散階層周波数

制御、第 58 回システム制御情報学会研究
発表講演会、2014 年 05 月 22 日、京都テル
サ(京都府・京都市)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計 0 件)

○取得状況(計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.namerikawa.sd.keio.ac.jp/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

滑川 徹

慶應義塾大学・理工学部・教授

研究者番号： 30262554