

令和 6 年 6 月 13 日現在

機関番号：23201

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K04552

研究課題名（和文）多次元性・消散性に基づく次世代電力ネットワークのマルチスケールロバスト制御系設計

研究課題名（英文）Multi-Scale Robust Control System Design for Next-Generation Power Grids Based on Multi-Dimensional Systems and Dissipativity

研究代表者

小島 千昭 (Kojima, Chiaki)

富山県立大学・工学部・准教授

研究者番号：00456162

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）：本研究課題では、考える次世代電力ネットワークに適したモデリングの枠組みとして、ネットワーク化デスクリプタシステム、非線形ODE（常微分方程式）モデル、数理最適化に基づくモデルの3つのアプローチから検討を行った。さらに、それらのモデルに基づく電力ネットワークに関する消散性などの性質を明確化した。さらに、実際の電力ネットワークへの応用の観点から、ロードヒーティングを含む配電ネットワークの制御、シュタッケルベルグゲームに基づきEVの最適な充電量と充電価格を決定する交渉アルゴリズムなどに関して、理論とシミュレーションの両面から検討を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究課題では、ネットワーク化デスクリプタシステム、非線形ODEモデル（多次元性）、数理最適化に基づき、次世代電力ネットワークのダイナミクスの本質を明確化し、想定される制御系設計に有効な統一的モデリングの枠組みを確立した点に学術的意義がある。また、これらの枠組みは北陸地方で典型的に想定されるロードヒーティングを含む配電ネットワークの制御や地域マイクログリッドにおけるEVの最適充電量・価格の交渉アルゴリズムまで展開し、このような地方における超スマート社会の望ましい姿を提示した点に社会的意義が存在する。

研究成果の概要（英文）：In this research project, we have investigated three approaches as a modeling framework suitable for next-generation power networks: a networked descriptor system, a nonlinear ODE (ordinary differential equation) model, and a model based on mathematical optimization. Moreover, we have clarified the basic properties of the power networks related to these models. We have also carried out the control of power distribution networks, including road heating. In addition, toward an application to actual power networks, we have studied the negotiation algorithm to determine the optimal charging amount and charging price of electric vehicles based on the Stackelberg game from both theoretical and simulation viewpoints.

研究分野：システム制御理論と電力・エネルギーへの応用

キーワード：電力ネットワーク マイクログリッド デスクリプタシステム 多次元システム 数理最適化 ロードヒーティング 電気自動車

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

超スマート社会には、全ての人間が物理的・精神的の両面で安心した生活を享受できる基盤が求められる。超スマート社会におけるエネルギー、交通、水道などのインフラの中で、電力ネットワークは全てのインフラを駆動する根幹をなす。しかし、送電や配電のネットワークや個別の電力機器など部分的な議論はされているものの、統一的な視点で全体をとらえレジリエンスまで一貫して保証するロバスト制御系設計の体系は、確立されていなかった。これらの背景は、(1) 大規模システムの制御系設計、(2) 電力ネットワークの制御の2つの側面から詳しくまとめること、以下の通りに説明できる

- (1) 大規模システム制御系設計：次世代電力ネットワークを含む大規模システムの制御系設計は、国外と国内の両方で盛んに提案されている。しかし、これらの枠組みは、1次元システム(常微分方程式)を前提とするものであり、今後想定される電気自動車の走行充電や豪雪地域で重要となるロードヒーティングなどの制御で想定される電圧の空間変化を表現できず適用可能性に問題点を孕んでいた。
- (2) 電力ネットワークの制御：電力システム工学の研究は、その分野が始まって以来個別の要素技術のつなぎ合わせとなっており、本研究で考える統一的な枠組みを視野に入れていない。現状の単なる継続では、(次世代電力ネットワークを含む)将来的な電力ネットワークの急速な進展に追いつくことができず、抜本的なパラダイムシフトが必要であった。

2. 研究の目的

「1. 研究開始当初の背景」を受けて、本研究課題では、次世代電力ネットワークに関する以下の3点を達成し、ロバスト性からレジリエンスまでの一貫した保証を目的とした。

- (1) 電線路の多次元性(偏微分方程式で表される時間・空間など複数の独立変数を持つシステム)に基づき、次世代電力ネットワークのダイナミクスの本質を明確化し、想定される制御系設計に有効な統一的モデリングを確立する。
- (2) 電力機器の消散性(エネルギー収支に関する性質)に基づき、再生可能エネルギーや電力機器による変動に対して全体の安定性を達成するマルチスケールロバスト制御系設計の理論を構築する。
- (3) ロバスト性(不確かさに対して頑健となる性質)が破綻しつつある典型的な緊急事象を想定し、その事象ごとの診断技術と有意な時間で平常時に回復させるレジリエンス(平常時への回復)の保証技術を導出する。

3. 研究の方法

本研究課題では、考える次世代電力ネットワークに適したモデリングの枠組みとして、ネットワーク化デスクリプタシステム、非線形 ODE (常微分方程式) モデル、数理最適化に基づくモデルの3つのアプローチから検討を行った。さらに、それらのモデルに基づく基礎的な性質の明確化や制御系設計の枠組みとしてロードヒーティングを含む配電ネットワークの制御やシュタッケルベルグゲームに基づき EV の最適な充電量と充電価格を決定する交渉アルゴリズムなどに関する検討を行った。具体的には、以下の項目(1)-(4)で説明される。

- (1) ネットワーク化デスクリプタシステムに基づく送電ネットワークのモデリング：送電ネットワークに対して、各負荷を配電ネットワークの縮約と考え、各発電機・負荷をデスクリプタシステムによって、非均質なダイナミクスの記述を行った。さらに、発電機として太陽光発電が連携した場合や電気自動車が負荷として接続した場合のモデリングの検討も行った。
- (2) 非線形 ODE モデルの基礎的な性質：準備的な取り組みとして、送配電線上の電圧分布を記述する非線形 ODE モデルに基づき、電気自動車の充放電を考慮した配電電圧分布を確率微分方程式に基づき解析した。さらに、非線形 ODE モデルによって記述される配電ネットワークに対して、全体のシステムの電圧サブシステムと位相サブシステムの分解に基づき、それらの消散性を明確化した。
- (3) ロードヒーティングを含む配電ネットワークのモデリングと制御：項目(2)で行った非線形 ODE モデルの配電ネットワークへの応用として、ロードヒーティングを含む配電ネットワークへの適用を行った。まず、配電ネットワークを非線形 ODE モデルによって記述し、ケーブル表面温度の過渡的な変化、地中の熱拡散や地表の融雪も含む数理モデルを提案した。さらに、このロードヒーティングシステムの数理モデルが研究代表者・分担者のオリジナルである項目(1)のネットワーク化デスクリプタシステムによって記述できることを示した。最後に、ロードヒーティングを含む配電ネットワークに対して、配電損失の低減化と効率的な融雪を同時に達成するスイッチング制御を提案した。

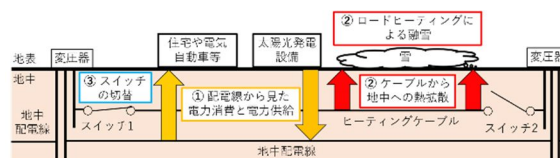


図 1: ロードヒーティングを含む配電ネットワークの概念図

- (4) EV や PV を含む地域マイクログリッドの最適化モデル：太陽光発電，電気自動車や蓄電池を含む送電ネットワークに対して，数理最適化に基づきエリア間の最適な電力融通を検討し，全体の運用コストの導出を行った．また，太陽光発電，電気自動車や蓄電池を含む配電ネットワークに対して，数理最適化に基づき各充電スポットに対する最適な電力配分のアルゴリズムを導出した．本成果は，第 65 回自動制御連合講演会にて発表を行った．最後に，太陽光発電，電気自動車や充放電スポットを含む配電ネットワークに対して，シュタッケルベルグゲームに基づき EV の最適な充電量と充電価格を決定する交渉アルゴリズムを導出した．

4. 研究成果

本研究課題の成果は，「3. 研究の方法」での切り分けに対応させて，以下の項目(1)-(4)の通りに説明される．

- (1) ネットワーク化デスクリプタシステムに基づく送電ネットワークのモデリング：送電ネットワークに対して，デスクリプタシステムによる非均質なダイナミクスの表現を導いた．本成果に関しては，国内学会において現状の取り組みを紹介した．この成果は，本研究課題で想定する送配電ネットワークに Plug&Play（構成要素の着脱があったとしてもシステムの基本的な特性は保持される性質）を付与することに意義がある．
- (2) 非線形 ODE モデルの基礎的性質：非線形 ODE モデルに基づく電気自動車の充放電を考慮した配電電圧分布に関する解析を行った．本成果は，電子情報通信学会英文論文誌 Nonlinear Theory and Its Applications と電気学会研究会にて発表した．さらに，非線形 ODE モデルによって記述される配電ネットワークの消散性を明確化した．特に，従来の配電ネットワークにおける電圧降下などの典型的な現象のメカニズムの解明や送電損失の低減化に関する知見を与えた点に関しては，これまでの電力システムにおける研究では得られなかったことである．本成果は，国際会議 IFAC World Congress 2023 にて発表を行った．
- (3) ロードヒーティングを含む配電ネットワークのモデリングと制御：(2)で行った非線形 ODE モデルの配電ネットワークへの応用として，ロードヒーティングを含む配電ネットワークの数理モデルに対しては，電気自動車や負荷を含むような配電システムに対する数値シミュレーションを通じて，その妥当性や有効性を検証した．本成果は電子情報通信学会の英文論文誌 Nonlinear Theory and Its Applications に掲載された．さらに，このロードヒーティングシステムのネットワーク化デスクリプタシステムについては，今後の制御系設計に向けた理論基盤となるものであり，計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウムにて発表を行った．最後に，ロードヒーティングを含む配電ネットワークに対するスイッチング制御は，電気自動車などの負荷を含むような配電ネットワークに対する数値シミュレーションを通じて，その妥当性や有効性を示した．本成果は，第 67 回システム制御情報学会研究発表講演会において発表を行った．

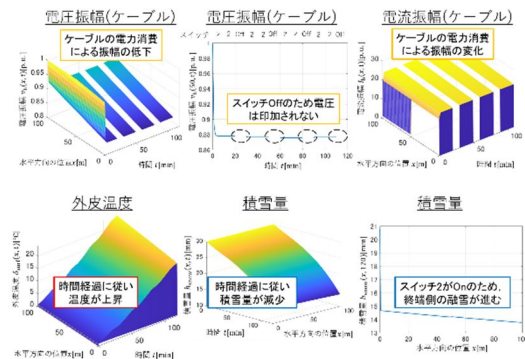


図 2: スwitching 制御・融雪のシミュレーション検証

- (4) EV や PV を含む地域マイクログリッドの最適化モデル：送電ネットワークに対するエリア間の最適な電力融通と全体の運用コストに関する成果は，計測自動制御学会第 10 回制御部門マルチシンポジウムにて発表を行った．さらに，配電ネットワークにおける各充電スポットに対する最適な電力配分のアルゴリズムに対しては，富山県射水市を想定したマイクログリッドに対するシミュレーションを通じてその有効性を示した．本成果は，第 65 回自動制御連合講演会にて発表を行った．最後に，配電ネットワークに対するシュタッケルベルグゲームに基づく EV の最適な充電量・価格の交渉アルゴリズムについては，数値シミュレーションを通じてその有効性を検討し，第 66 回自動制御連合講演会にて発表した．

なお，研究代表者の学内での新学科の立ち上げや令和 2 年度当初より発生した新型コロナウイルスへの大学内外への対応のため，新たな形式の授業の準備や学内業務が突発的に発生した．また，研究の遂行や発表の面においても当初予定していた学会参加による情報収集や研究打ち合わせなどの定期的な遂行することが困難となった．このため，当初予定していたマルチスケールロバスト制御系設計とレジリエンスの保証技術については，十分な時間やエフォートを配当できず満足いく成果，および対外発表には至らなかった．この項目に関しては，研究代表者今後の取り組みを通じて，学术论文や国際会議による対外成果へと結び付けていきたいと考えている．

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Muto Yuya, Kojima Chiaki, Okura Yuki	4. 巻 14
2. 論文標題 Mathematical modeling of road heating system with underground distribution line based on nonlinear ODE model	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Nonlinear Theory and Its Applications, IEICE	6. 最初と最後の頁 378 ~ 402
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/nolta.14.378	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 Haruki Tadano, Yoshihiko Susuki, Atsushi Ishigame	4. 巻 13
2. 論文標題 Asymptotic assessment of distribution voltage profile using a nonlinear ODE model	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nonlinear Theory and Its Applications, IEICE	6. 最初と最後の頁 149-168
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/nolta.13.149	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 -

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 1件／うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Yuya Muto
2. 発表標題 Modeling of Road Heating Systems with Underground Distribution Lines Based on Nonlinear ODE Model
3. 学会等名 2022 International Symposium on Nonlinear Theory and Its Applications (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Chiaki Kojima
2. 発表標題 Dissipativity of nonlinear ODE model of distribution voltage profile
3. 学会等名 The 22nd IFAC World Congress (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 武藤佑弥
2. 発表標題 非線形ODEモデルに基づく地中配電線を用いたロードヒーティングシステムのモデリング
3. 学会等名 システム制御情報学会第66回研究発表講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 小島千昭
2. 発表標題 太陽光発電を有するマイクログリッドにおけるEV充電スポットへの最適電力配分
3. 学会等名 第65回自動制御連合講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小島千昭
2. 発表標題 非線形ODEモデルにおける電圧分布に関する消散性
3. 学会等名 計測自動制御学会第10回制御部門マルチシンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 永山悠
2. 発表標題 太陽光発電・電気自動車を導入したスマートグリッドの運用コスト最適化
3. 学会等名 計測自動制御学会第10回制御部門マルチシンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 武藤佑弥
2. 発表標題 ロードヒーティングを含む配電システムのモデリングとスイッチング制御
3. 学会等名 システム制御情報学会第67回研究発表講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 武藤佑弥, 小島千昭
2. 発表標題 ネットワーク化デスクリプタシステムに基づくロードヒーティングシステムによる地中の熱拡散のモデリング
3. 学会等名 計測自動制御学会第9回制御部門マルチシンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小島千昭
2. 発表標題 消散性に基づくネットワーク化デスクリプタシステムの安定性解析と電力系統への応用
3. 学会等名 電子情報通信学会 2020年7月 高信頼制御通信研究会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 多々納春樹, 薄良彦, 石亀篤司
2. 発表標題 確率微分方程式によるEV充放電を考慮した配電電圧分布の解析
3. 学会等名 電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

researchmap: 小島千昭
https://researchmap.jp/chiaki_kojima
富山県立大学工学部電気電子工学科システム制御分野
https://www.pu-toyama.ac.jp/IS/SC/index.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
研究分担者	薄 良彦 (Susuki Yoshihiko) (40402961)	京都大学・工学研究科・准教授 (14301)	

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