

令和 4 年 6 月 14 日現在

機関番号：24506

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2021

課題番号：20K14768

研究課題名（和文）アンシラリーサービス提供のためのコージェネレーションの協調制御

研究課題名（英文）Ancillary Services Provision by Coordinated Control of Combined Heat and Power Plants

研究代表者

星野 光（Hoshino, Hikaru）

兵庫県立大学・工学研究科・助教

研究者番号：30836292

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 1,800,000円

研究成果の概要（和文）：本研究課題では、地域熱供給システムに分散設置されたコージェネレーション（Combined Heat and Power; CHP）の協調制御によりアンシラリーサービスを提供、すなわち電力系統の周波数制御に参加するための手法について検討した。複数のCHPの総電気出力を指令値に追従させるとともに、蒸気供給ネットワークにおける蒸気流速および蒸気圧力が安全性の観点から望ましい仕様を満たすよう、これらの時間スケールの異なる応答を考慮した階層的な制御手法を開発し、その有効性を数値シミュレーションに基づき検証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

CHPをアンシラリーサービスの提供に用いるには、熱出力の変化が熱供給システムの運用に悪影響を与えないことを担保する必要があり、北欧や英国などで導入されている温水式の地域熱供給システムに関しては多数の研究例がある。しかし、わが国などアジア諸国で広く採用されている蒸気供給ネットワークに対する研究はほとんどなく、その応答を適切に考慮した制御、運用手法の確立が望まれている。本研究で得られた制御手法は蒸気供給ネットワークの応答を陽に考慮したものであり、上記のような制御、運用手法の確立に向けた基礎検討として有用であると考えられる。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this research project is to develop a coordinated control method of multiple Combined Heat and Power (CHP) plants for providing ancillary services (participating in frequency control of the power system). We have proposed a hierarchical control scheme to achieve tracking control of the total electrical output of CHP plants while managing multi-scale response of flow rates and the pressure in the steam supply network to satisfy safety specifications. Effectiveness of the proposed method has been examined through numerical simulations.

研究分野：制御応用

キーワード：コージェネレーション 地域熱供給 階層制御 モデル予測制御 非線形制御

1. 研究開始当初の背景

再生可能エネルギー源の大量導入に向けて、その発電出力の変動への対応が課題となっている。これまで電力システムの需給調整は、専ら系統運用者（旧一般電気事業者）が所有する大規模集中型の発電プラントによって行われてきたが、近年、コージェネレーション（Combinnd Heat and Power; CHP）などの分散型電源の需給調整への参加が期待されている。一般の電源がシステムの安定化に貢献することはアンシラリーサービスと呼ばれ、その提供を可能とする技術的、制度的な検討が積極的に進められている。

コージェネレーション（CHP）は小型ガスタービン等により電気と熱を同時に供給する電源であり、燃料流量の操作によって電気出力を調整できる。しかし、この際、熱出力も同時に変化するため、CHPをアンシラリーサービスの提供に用いるには、熱出力の変化が熱供給システムの運用に悪影響を与えないことを担保する必要がある。この点について、北欧や英国などで導入されている温水式の地域熱供給システムに関しては、短周期での変動の影響評価や、長周期での応答を考慮したCHPの運用最適化手法の開発などに関する研究が多数報告されている。しかし、わが国などアジア諸国で広く採用されている蒸気供給ネットワークに対する研究報告はほとんどなく、その応答を適切に考慮した制御、運用手法は確立されていない。

研究代表者らによるこれまでの研究により、蒸気供給ネットワークにおいては熱源の出力変動により蒸気流速と蒸気圧力が変化し、その際、蒸気圧力の変化は遅いのに対して蒸気流速の変化は比較的速く、CHPの電気出力の調整の影響が時間差のある応答として現れることがわかっている。そのため、このような蒸気供給ネットワークの複合的な時間スケールでの応答を踏まえた制御手法の開発が求められていた。

2. 研究の目的

本研究では、地域熱供給システムに分散設置されたコージェネレーション（CHP）の協調制御によりアンシラリーサービスを提供する手法を開発することを目的とする。具体的には、複数のCHPによる総電気出力を指令値に追従させるとともに、蒸気供給ネットワークにおける蒸気流速および蒸気圧力に関して安全性の観点から望ましい仕様を満たすよう、これらの時間スケールの異なる応答を考慮した階層的な制御手法を開発する。

3. 研究の方法

上記の目的を達成するため、本研究では以下の課題に取り組んだ。

(1) 電気および蒸気供給ネットワークのモデリング

制御対象となる複数のCHPで構成される電気および蒸気供給ネットワークの状態方程式モデルを導出する。研究代表者らがこれまで検討を行ってきた、2つのCHPで構成されるエネルギー供給系に対するモデルを拡張し、任意の数のCHPを有するネットワークを扱うことができるようにする。

(2) アンシラリーサービス提供のための階層的な制御手法の開発

CHPの出力変更に対して、電気供給ネットワークの応答と蒸気流速の時間変化はほぼ同じ時間スケールで変化し、蒸気圧力はそれよりも遅い時間スケールで変化することに着目し、図1に示すような階層的な制御構造を考える。下位に位置する追従制御器では、電気供給ネットワークから外部への連系点において流れ出す電力と、蒸気供給ネットワーク内における蒸気流速で決まる熱流速を制御量とし、それらを目標軌道へと追従させ、上位に位置する目標軌道生成器では、蒸気圧力の遅い時間変化を考慮し、その有界性を制約とした上で目標軌道の生成を行うような制御手法を開発する。

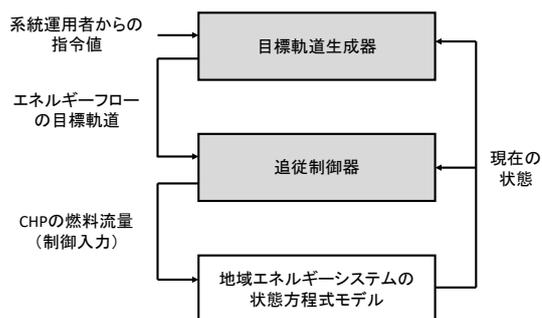


図1 提案する階層的な制御系

4. 研究成果

上記の2つの課題に対して、それぞれ以下の研究成果を得た。

(1) 電気および蒸気供給ネットワークのモデリング

制御対象である電気および蒸気供給ネットワークにおけるエネルギーの流れの時間的な変化を表す状態方程式モデルを導出した。研究代表者らがこれまで検討を行ってきた、2つのCHPで構成されるエネルギー供給系に対するモデルを拡張し、任意の数のCHPおよび負荷を想定した上で、木状構造を有する任意のネットワーク構造に対するモデルを導出した。

(2) アンシラリーサービス提供のための階層的な制御手法の開発

図1に示したような追従制御器と軌道生成器で構成される階層的な制御手法を検討した結果として以下の成果を得た。

- ① 電気供給システムと熱供給システムに対する統合的な追従制御器を非線形制御手法による出力レギュレーションを行う制御器とし、熱供給システムの安全性を確保するための軌道生成器を安全性に関わる制約を考慮したモデル予測制御器として、これらを組み合わせることで提案した階層的な制御を達成可能であることを示した。
- ② 追従制御器と軌道生成器を組み合わせる際の追従制御系の非線形特性の扱い方について検討し、軌道生成器により計算される予測軌道に基づいて、追従制御系の閉ループ特性を表すモデルの反復的な線形化および離散化を行う方法を提案した。
- ③ 上記の提案方法を2つのコージェネレーションで構成される地域エネルギーシステムのモデルへと適用し、提案手法の有効性を数値シミュレーションにより検証した。その結果、提案手法を用いることで、熱供給システムの安全性に関する制約条件を満たす範囲内で、アンシラリーサービスの提供のための発電電力指令値への追従が可能となることを示した。

さらに、提案する制御手法の安定性の理論的保証に向けた検討として、当初の計画にはなかった成果も得られた。

(3) 蒸気供給ネットワークの安定性解析に関する検討

本研究計画では提案する制御手法に関して数値シミュレーションによりその有効性を検証予定であった。これに加えて提案制御手法の安定性に関する理論的保証があることが望ましい。これに関連する検討として、蒸気ネットワークの安定性解析に関する検討を行った。具体的には、蒸気供給ネットワークと電気回路の対応に基づき電気回路論における安定性解析法を蒸気供給ネットワークに適用可能かどうかを検討した。非線形電気回路に対しては混合ポテンシャル関数という関数に基づき状態方程式を記述することで安定性解析が可能であることが知られており、本研究では電気回路との対応から蒸気供給ネットワークに対する混合ポテンシャルについて検討を行い、これを用いて状態方程式を記述可能な条件を導出した。今後この検討をさらに進め、提案する制御手法を改良することで、理論的な安定性の保証をとまなう制御手法を開発できる可能性がある。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 Hikaru Hoshino, T. John Koo, Yun-Chung Chu, Yoshihiko Susuki
2. 発表標題 Dynamic Modeling of Energy Flows in Integrated Electricity and Steam Supply Networks
3. 学会等名 第64回自動制御連合講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 丸賀 楽人, 星野 光, 古谷 栄光
2. 発表標題 電気回路との対応に基づくプロセスネットワークの解析法に関する一考察
3. 学会等名 第65回システム制御情報学会研究発表講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 丸賀 楽人, 星野 光, 古谷 栄光
2. 発表標題 電気回路との対応に基づくプロセスネットワークのモデリング 移流項を含む場合の一考察
3. 学会等名 第66回システム制御情報学会研究発表講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hikaru Hoshino, T. John Koo, Yun-Chung Chu, Yoshihiko Susuki
2. 発表標題 A Hierarchical Controller Design for Two-site Electricity and Steam Supply System Participating in Power System Frequency Regulation
3. 学会等名 第64回システム制御情報学会研究発表講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hikaru Hoshino, T. John Koo, Yun-Chung Chu, Yoshihiko Susuki
2. 発表標題 A Model Predictive Control Formulation for Tracking Control of Energy Flows in Two-site Electricity and Heat Supply System
3. 学会等名 第63回自動制御連合講演会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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		
中国	ASTRI		