

令和 6 年 6 月 3 日現在

機関番号：24405

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K04539

研究課題名（和文）分散最適化を用いた浮体式洋上ウィンドファームの制御

研究課題名（英文）Floating offshore wind farm control with distributed optimization

研究代表者

原 尚之（Hara, Naoyuki）

大阪公立大学・大学院工学研究科 准教授

研究者番号：10508386

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）：浮体式洋上風車およびウィンドファームにおける制御の高度化について研究をおこなった。主に取り組んだ内容は、次の3項目である：1)ウィンドファームにおける分散最適化、2)風車の荷重抑制制御、3)スケールモデルによる荷重抑制制御の検証。1)に関しては、風速が定格風速以下の動作領域における最大電力の達成を目的とした制御、および、定格風速以上の動作領域における協調的なピッチ角制御について研究を実施した。2)に関しては、個別ピッチ角制御や予見制御を用いた荷重抑制制御を検討した。3)に関しては、風車スケールモデルを用いて、ウィンドファームを想定した状況における個別ピッチ角制御の有用性を検証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

持続可能な社会実現のために、カーボンニュートラルの達成が喫緊の課題となっており、発電分野においては、再生可能エネルギーの導入拡大が急務となっている。特に、我が国においては、適地が限られる陸上風力に比べ、洋上風量の導入ポテンシャルが大きい。多数の洋上風車を設置するウィンドファームにおいては、そのファーム全体の性能を考慮できる協調的制御手法が必要となる。また、個々の洋上風車の疲労荷重抑制も、メンテナンスをするためのアクセスが限定的な洋上風車においては、重要である。取り組んだ研究は、これらの点に関するものであり、今後の洋上風車の発展に向けた基盤的研究にあたる。

研究成果の概要（英文）：We conducted research on advanced control of floating offshore wind turbines and wind farms. In particular, we focused on the following topics: 1) distributed optimization in wind farms, 2) load mitigation in wind turbines, and 3) validation of load mitigation control using a wind turbine scale model. Regarding 1), we considered a maximum power tracking control below the rated wind speed and cooperative pitch control above the rated wind speed regions. Regarding 2), we evaluated the load mitigation control using individual pitch control and preview control. Regarding 3), we validated the individual pitch control considering a wind farm scenario.

研究分野：制御工学，制御応用

キーワード：風力発電 分散最適化 スケールモデル 荷重抑制 ブレードピッチ制御

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

持続可能な社会の実現のため、カーボンニュートラルの達成が急務であり、発電分野においては、再生可能エネルギーの導入拡大が必要不可欠である。狭いエリアに多数の風車をまとめて設置するウィンドファームは、コストメリットの点から導入が図られ、大規模な洋上ウィンドファームが現れている。このようなウィンドファームにおいては、風車相互間の干渉が存在するため、ファーム全体を考慮した協調的な最適化が必要であるとともに、個々の風車の疲労荷重抑制が重要となる。洋上風車の導入が進むにつれて、海底に設置した基礎の上に風車を設置する「着床式」から浮体の上に風車を設置する「浮体式」の導入量が増えると予想される。浮体式洋上ウィンドファームを想定した協調的な制御法や個別風車の荷重抑制制御法については、あまり検討がなされていなかった。また、それら制御法の実験的な検証についても、将来の実現可能性を評価する上で重要であるが、報告がほとんどなかった。

2. 研究の目的

研究目的は、浮体式洋上ウィンドファームにおける制御法の開発であり、つぎの3項目について検討をおこなった。

(1) 分散最適化に基づく浮体式洋上ウィンドファームの制御

多数の風車を設置するウィンドファームでは、ウィンドファーム全体の性能を考えた協調的な制御が必要である。特に、風車の数が増えるにつれ、集中型の制御の実現が難しくなることも起こり得る。そこで、分散協調的な制御法の適用が必要である。

(2) 風車の疲労荷重抑制制御

ウィンドファームにおいては、上流側(風上側)の風車が動作することにより、下流側の風車へは、風速低下や乱流強度の増加した風が流入する。この結果、下流側の風車では、荷重が増大する可能性がある。また、上流側の風車についても、ウェイクステアリング(Yaw角度を変え、後流を偏向させる)をおこなう場合に、不均一な荷重が生じる。従って、これらの荷重抑制をはかることが必要である。

(3) スケールモデルを利用したウィンドファームを想定した条件下での制御法の評価

荷重抑制を図る制御法としては、個別ピッチ角制御を利用することが効果的である。ウィンドファームを想定した条件下で、個別ピッチ角操作可能なスケールモデルを用い、荷重抑制の性能を実験的に評価する。

3. 研究の方法

研究課題(1)~(3)それぞれについて、以下に分けて記す。

(1) 分散最適化に基づく浮体式洋上ウィンドファームの制御

ウィンドファームにおける個々の風車を、「エージェント」とみなし、各エージェントが近傍エージェント(風車)との情報のやり取りにより、ウィンドファーム全体の性能を最適化するような制御をおこなう。特に、近年発展が著しい分散最適化手法を適用し、ウィンドファームにおける分散制御手法を開発する。また、小型のIoTデバイス複数台用いお互いに通信させ、分散制御手法の概念実証(PoC: Proof of Concept)をおこなう。

(2) 風車の疲労荷重抑制制御

荷重抑制を図るために効果的な個別ピッチ制御器を用いることにより荷重抑制を図る。個別ピッチ制御器は、MBC変換に基づいた制御則により設計をする。また、風速の予見情報を利用できる場合、予見制御を活用し荷重抑制を図る。評価に関しては、NREL(National Renewable Energy Laboratory)の風車シミュレータFASTを利用しおこない、荷重抑制の性能を評価する。

(3) スケールモデルを利用したウィンドファームを想定した条件下での制御法の評価

個別ピッチ角制御可能なスケールモデルおよび共通ピッチ制御機構を有するスケールモデルの2基を用いウィンドファームを想定した実験をおこなう。2基の風車を同時に扱う必要があるため、効率的な実験遂行のため計測・制御機器として、高速な信号処理システムを整備し実験をおこなう。上流側の風車に関しては、後流を偏向させるウェイクステアリングをおこなった場合の荷重特性を調べる。下流側については、上流側風車の影響をどの程度うけるか調査する。

4. 研究成果

研究課題(1)～(3)それぞれについて、以下に分けて記す。

(1) 分散最適化に基づく浮体式洋上ウィンドファームの制御

浮体式洋上ウィンドファームを想定し、複数基の浮体式洋上風車に対し、分散協調的に電力制御を達成するブレードピッチ角制御法を開発した。また、ウィンドファームにおける電力最大化のための分散最適化アプローチの概念実証をおこなった。小型のIoTデバイス(micro:bit)を複数台使い、相互に無線で情報交換をおこなわせ、分散協調的に電力最大化を達成させる動作点の計算ができることを確認した。以上の成果は、「浮体式」洋上ウィンドファームに対する分散制御法の基礎的な知見を与えるとともに、分散最適化理論の実システム適用に向けた応用事例としての位置づけもある。

(2) 風車の疲労荷重抑制制御

MBC変換を導入した個別ピッチ角制御器を用い、風速の予見情報が利用できる場合に、予見制御を利用することにより、従来の共通ピッチ制御角制御の性能を上回る荷重抑制効果があることを確認した。また、既に構成されているPI制御器によるピッチ制御系に予見制御器を付加する方法を検討し、その荷重抑制効果を検証した。また、ウィンドファームを想定し、上流側の風車がヨーステアリングをおこなった場合に、個別ピッチ制御により荷重抑制効果が得られることを確認した。下流側の風車に関しては、偏向した後流がロータ面に不均一な荷重を与えることから、風速に水平シア成分が存在する場合の検討をおこない、この場合でも個別ピッチ角制御が荷重抑制に効果的であることを確認した。ただし、ブレードピッチの動作が過敏になる傾向があるため、どの程度まで個別ピッチ角制御を導入するかは、ブレードピッチ機構の制約を加味したうえで、検討しておく必要がある。

(3) スケールモデルを利用したウィンドファームを想定した条件下での制御法の評価

ウィンドファームを想定し2基の風車を用いたスケールモデル試験をおこなった。その結果、ウェイクステアリングによるヨー角度を変更した上流側の風車においては、個別ピッチ角制御による荷重抑制の効果が実験的に確認できた。一方、実験環境の都合上、浮体式での評価ができなかったこと、また、下流側の風車に対する影響については、検討が不十分であるため、大型送風機が利用可能な水槽設備や風洞を利用するなど環境を整えたうえでの評価が必要である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 3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 津屋朋花, 原尚之, 小西啓治	4. 巻 142
2. 論文標題 風速の予見情報を用いた浮体式洋上風車の個別ブレードピッチ角制御	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 電気学会論文誌C	6. 最初と最後の頁 1008/1020
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejieiss.142.1008	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 津屋朋花, 原尚之, 小西啓治	4. 巻 56
2. 論文標題 予見する風速を用いた浮体式洋上風車スケールモデルのブレードピッチ角制御	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 計測自動制御学会論文集	6. 最初と最後の頁 299/309
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.9746/sicetr.56.299	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 橋本航, 林直樹, 原尚之, 高井重昌	4. 巻 56
2. 論文標題 浮体式洋上ウィンドファームにおける総発電量の調整を考慮した分散ブレードピッチ角制御	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 計測自動制御学会論文集	6. 最初と最後の頁 395/402
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.9746/sicetr.56.395	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 林直樹, 原尚之	4. 巻 14
2. 論文標題 ウィンドファームの分散協調制御	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 電子情報通信学会 基礎・境界ソサイエティ Fundamentals Review	6. 最初と最後の頁 170/180
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/essfr.14.3_170	査読の有無 無
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17件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 8件）

1. 発表者名 山出裕平, 原尚之, 小西啓治
2. 発表標題 浮体式洋上風車の浮体形式の違いによる動揺特性の比較 - 可制御性グラミアンによる定量的評価 -
3. 学会等名 第45回風力エネルギー利用シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Naoyuki Hara, Yuhei Yamade, Keiji Konishi
2. 発表標題 Comparison of Motion Characteristics of Floaters for Offshore Wind Turbines by Using Controllability Gramian of Linear Systems
3. 学会等名 ASME 43rd International Conference on Ocean, Offshore & Arctic Engineering (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 窪田凌征, 原尚之, 二瓶泰範, 小西啓治, 杉谷栄規
2. 発表標題 ウィンドファームにおける風車ピッチ制御による疲労荷重抑制に関するスケール模型実験
3. 学会等名 令和6年電気学会 電力・エネルギー部門大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Naoyuki Hara
2. 発表標題 Basics of Wind Turbine Control
3. 学会等名 SICE Annual Conference 2022 (Workshop 2: Control and Optimization for Advanced Wind Energy Systems) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Naoki Hayashi
2. 発表標題 Distributed Optimization in Cooperative Control of Wind Farms
3. 学会等名 SICE Annual Conference 2022 (Workshop 2: Control and Optimization for Advanced Wind Energy Systems) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yasunori Nihei
2. 発表標題 Scale Model Testing for Floating Offshore Wind Turbines
3. 学会等名 SICE Annual Conference 2022 (Workshop 2: Control and Optimization for Advanced Wind Energy Systems) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 原尚之
2. 発表標題 浮体式洋上風車の高度ブレードピッチ角制御器設計
3. 学会等名 海洋エネルギーシンポジウム2022 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山本舜大, 原尚之, 小西啓治
2. 発表標題 低リソースIoT デバイス上でのモデル予測制御 micro:bit によるコンセプト検証
3. 学会等名 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 津屋朋花, 原尚之, 小西啓治
2. 発表標題 風速とウィンドシアの予見情報を用いる浮体式洋上風車のブレードピッチ角制御
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 T. Tsuya, N. Hara, and K. Konishi
2. 発表標題 Add-on preview compensator for GSPI-based blade pitch controller in floating offshore wind turbines
3. 学会等名 2021 5th IEEE Conference on Control Technology and Applications (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 ミスレアー アレクサンドル, 原尚之, 林直樹, 小西啓治
2. 発表標題 Micro:bit implementation of distributed optimization algorithm for wind farm power maximization
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 H. Tanabe, N. Hara, and K. Konishi
2. 発表標題 State estimator for floating offshore wind turbines and performance evaluation
3. 学会等名 ASME 2020 39th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 T. Tsuya, N. Hara, and K. Konishi
2. 発表標題 Blade pitch controller design using wind preview information for reduction of wind turbine loads
3. 学会等名 SICE Annual Conference 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 M. Yu, N. Hara, and K. Konishi
2. 発表標題 Blade pitch controller design based on model reference adaptive control for floating offshore wind turbines
3. 学会等名 SICE International Symposium on Control Systems 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 津屋朋花, 原尚之, 小西啓治
2. 発表標題 風速の予見情報を用いた個別ブレードピッチ角制御
3. 学会等名 第63回自動制御連合講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 橋本航, 林直樹, 高井重昌, 原尚之
2. 発表標題 学習ベースモデル予測制御による風車の荷重を考慮したウィンドファームの協調的有效電力制御
3. 学会等名 第63回自動制御連合講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 津屋朋花, 原尚之, 小西啓治
2. 発表標題 風速の予見情報による補償をもつPI制御器を用いた浮体式洋上風車のブレードピッチ角制御
3. 学会等名 第42回風力エネルギー利用シンポジウム
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
研究分担者	二瓶 泰範 (Nihei Yasunori) (00470055)	大阪公立大学・大学院工学研究科・准教授 (24405)	
研究分担者	林 直樹 (Hayashi Naoki) (80637752)	大阪大学・大学院基礎工学研究科・准教授 (14401)	

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