

令和 4 年 4 月 23 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02352

研究課題名(和文) 海流・潮流発電装置の安全性と経済性を両立させる制御

研究課題名(英文) A Control Balancing the Safety and the Economy of Ocean Current Turbine

研究代表者

高木 健 (Takagi, Ken)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・教授

研究者番号：90183433

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,300,000円

研究成果の概要(和文)：新しい再生可能エネルギーとして開発が進められている水中浮遊式海流発電装置は、海流に含まれる流速変動により生じる動揺運動を回避して安全性を確保する制御が実施されているが、将来はこの安全性確保と出力増加・品質向上による経済性向上を両立させなければならない。本研究では制御システムが安全性を担保しつつ経済性向上を可能にするためにどのような評価関数による最適制御がコスト削減に適しているのかを明らかにすることを目的として実施した。この目的を達成するため、制御シミュレーションコードを確立するとともに、このシミュレーション結果と海流の長期予測結果を利用して生涯の経済性を考慮した最適制御を得る方法論を構築した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

水中浮遊式海流発電装置は水中でタービンに働くスラスト力と浮力の釣合いで一定水深を保ち、一点係留により流れの方向変化にも対応するいわゆる第3世代の海洋再生可能エネルギーである。また、浮体の動揺制御をタービンブレードのピッチ角制御だけで行う方式もとてもユニークな考えである。このような制御にモデル予測制御を応用する例は他に無く、かつ経済性をも向上させる試みは学術的に大きな意義がある。一方、海流発電は我が国近海の特色である黒潮を利用する方法として期待されており、離島の電源供給など社会的意義が高い。本研究はこのような発電方式の早期実現に大きく貢献するものである。

研究成果の概要(英文)：The submerged floating ocean current turbine, which is being developed as a new renewable energy, is controlled to avoid the motion caused by a fluctuation of the flow contained in the ocean current and to ensure safety. However, it is necessary to achieve both the safety and the economic improvement by increasing output and improving quality in the future. The purpose of this study was to clarify what kind of evaluation function is suitable for cost reduction to enable the control system to improve the economy and the safety at the same time. To achieve this goal, we established a control simulation code and constructed a methodology to obtain optimal control considering lifetime economics by using this simulation result and long-term prediction result of ocean current.

研究分野：船舶海洋工学

キーワード：海流発電 再生可能エネルギー モデル予測制御 水中浮遊式

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

潮流・海流発電は太陽光や風力と較べると短期の流速変動が少ないため、安定電源としての利用が期待されており、我が国では黒潮を利用した海流発電プロジェクトが進められている。このような海の流れによるエネルギーは大部分が水深 50m 以上の海域であり、浮体式や水中浮遊式の発電装置が計画されている。国際的には、これらは次世代のコンセプトとされ、今後の発展が期待されている。水中浮遊式は水中姿勢を制御しなければならないが、台風をやり過ごせるという大きなメリットがあり、東アジア海域に向いている。

海流発電プロジェクトでは、浮遊式のコンセプトが使われている。浮遊式はタービンが受けるスラスト力と係留張力と浮力のバランスにより水中で一定水深を保っているが、海流に含まれる乱流成分や波浪による流速変動により、装置全体が動揺運動を起こす。発電装置としては動揺運動回避による安全性向上と変動流中での出力増加・品質向上による経済性向上を両立させることが求められているが、両立を目指した研究は存在しない。

発電装置には浮力調整装置とタービンブレードのピッチ角調整装置がついている。また、発電機は制御装置により、トルク調整が可能である。これらにより、装置の安全性確保の制御が可能なが分かっている。一方で、風力発電においてはブレードのピッチ角制御と発電機制御器によりブレードに加わる荷重の変動を減らすとともに、出力最大化の制御が行われている。浮体式・浮遊式ではこのような制御は未だ試されていないが、原理的には運動制御と両立が可能はらずである。このような現状から、安全性と経済性を両立する制御システムの構築が求められている。

2. 研究の目的

「現在提案されている浮遊式海流発電装置で安全性と経済性を両立する制御システムの構築が可能か」という問いに答えるため、2 MW 級の海流発電装置を例として、運動・発電シミュレーター上に制御システムを構築し、実海域の様々な環境条件を入力としてシミュレーションを実施し、制御システムが安全性を担保しつつ経済性向上が可能かを明らかにするのが第一の目的である。また、「どのような評価関数による最適制御がライフタイムでの単位発電出力当たりのコスト (LCOE) を最小とするのか」という問いに答えるため、シミュレーション結果と海流の長期予測結果を利用して LCOE を算出する方法論を構築し、どのような評価関数による最適制御が LCOE 削減に適しているのかを明らかにすることが第二の目的である。

3. 研究の方法

本研究では、NEDO 事業で概念設計が実施された 2 MW 級の海流発電装置を具体的な例として、以下の項目を実施した。また、運動・発電シミュレーターは前記事業で開発した運動・発電シミュレーターを利用した。

(1) 制御手法の構築

発電機及び制御系のモデル化を実施した。これについては、風力発電ですでに実施されているモデル化を利用する。ただし、海流発電と風力発電では回転数やトルクが異なるので、増速機や制御系のモデル化について、既存の発電機の特長なども調査して決定した。

次に、多くの制約条件のもとでの最適制御を構築し易い「モデル予測制御」による制御シミュレーションを MATLAB Simulink を利用して構築した。これには、現有の運動・発電シミュレーターを利用し、運動と発電の同時制御を実装した。制御の入力値としてはブレードピッチ角、発電機トルクを用いた。また評価関数としては対称運動系 (上下揺れ、前後揺れ、縦揺れは連成している) と反対称運動系 (船首揺れ、左右揺れ、横揺れは連成している) 発電電力と発電機回転数変動の組み合わせを考えた。

制御シミュレーションの検証を行うために、風力発電の分野でタービンモデルとして用いられている穴開き円板をタービンローターの替わりに使用する実験手法を開発し、模型海流発電装置に装着する。これを用いて、シミュレーション結果の検証に用いる。

(2) LCOE を最小とする制御方法の探査

海流の環境条件については、NEDO 事業の成果を利用して環境条件を与えることとした。この環境条件の下で、安全性指標と出力指標に対する感度マトリックスの調査を実施した。この感度マトリックスは CAPEX・OPEX と関係するので、海流発電装置がライフタイムで遭遇する環境条件の出現する確率を与え、LCOE と安全性指標で定義される総合評価関数を最小化する制御パラメタを求めた。

4. 研究成果

(1) 制御手法の構築

Simulink を用いて様々な制御パラメタによる制御シミュレーションを実施した。Fig.1 はその一例で、Yaw 運動を最小にする制御パラメタの場合の時系列である。この時、同時に出力の最大化や出力変動の最小化も実施している。ただし、全ての制御出力はトレードオフの関係にある

ので、制御パラメタの値により、トレードオフの関係も変化する。それらの変化具合についても多くのシミュレーションを実施して傾向を掴んだ。

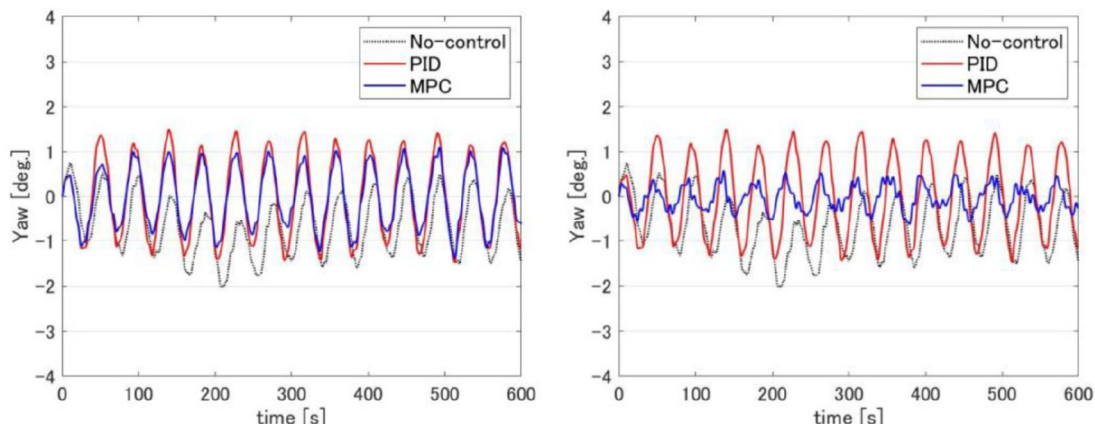


Fig.1 Yaw を最も小さくする制御パラメタの場合の時系列の比較

さらに、浮遊式海流発電装置で用いられるブレードピッチ角によるスラスト力制御を、穴開き円板の回転による抗力制御で代替するモデルを開発した。まず、複雑なタービンのピッチ角制御を簡単な回転円板の面積変化により抗力変化で代替する手法を開発した。これを既製品や3Dプリンター利用の部品を用いてインハウスで製作した小型の模型に装着し、模型の重心・浮心位置と係留索の関係等の改善を実施した後、ステップ応答を用いたシステム同定により、揚力を加味した運動方程式の妥当性を確認した。また、制御実験により、定格流速付近では円板面積方式により浮体の制御が可能であることを示した。これにより、簡易的な円板面積方式による安価な制御実験装置はほぼ完成した。なお、既製品や3Dプリンターの利用により、当初想定した価格の半分以下の価格で目的を達成した。

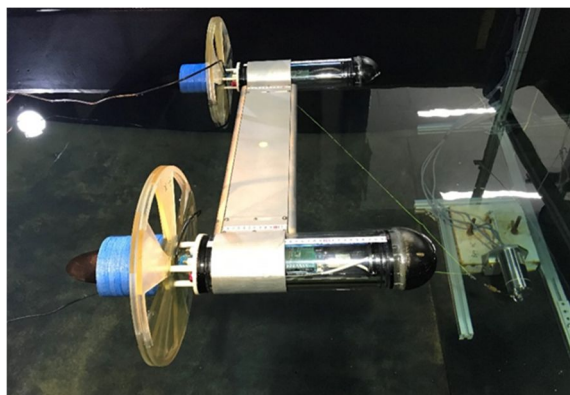


Fig.2 回転円板を装着した小型模型

(2) LCOE を最小とする制御方法の探査

安全性と経済性を両立させる制御を達成するために、モデル予測制御を利用して多入力・多出力制御のシミュレーションを実行するとともに、その制御パラメタを流速毎に選択する方法を提案した。具体的な評価項目としては、係留系の疲労、船首揺の分散、ブレードピッチ角の分散を安全性の指標として選んだ。そして、これらの指標によって予想されるダメージをコストに置き換えることにより、生涯における発電による収入とコストの比の問題として定式化した。定式化においては、3種類の制御シナリオを考え、各流速において前述のシミュレーションで最適な制御パラメタを求めた。このようにして求めた、制御パラメタを用い、生涯において遭遇する流速の確率密度分布に従って、生涯で最もコストの小さくなる制御シナリオを流速毎に選択する手法を提案した。このような手法をシミュレーションで検討した結果、低流速では異なる制御シナリオによる差は小さく、経済性を重視すれば良いが、定格流速以上の速度域においては、異なる制御シナリオを選択する必要があることが分かった。

このように、様々なダメージを考慮することにより、流速毎に適した制御シナリオを選ぶ方法を提案できた。しかし、制御シナリオの選択において定義したコスト関数は大胆な仮定に基づいて安全性をコストに置き換えたものであるため、コスト比の値や、運動の分散と故障率の関係などは精査しなければならない。また、各要素部品の安全率も制御シナリオの選択に大きくかかわってくる。これらは今後の課題である。

< 引用文献 >

- NEDO (2011-2014) : 風力等自然エネルギー技術研究開発 / 海洋エネルギー技術研究開発 / 次世代海洋エネルギー発電技術研究開発 / 水中浮遊式海流発電、(東京大学、(株)IHI、(株)東芝、(株)三井物産戦略研究所)
- NEDO (2014-2017) : 風力等自然エネルギー技術研究開発 / 海洋エネルギー技術研究開発 / 海洋エネルギー発電システム実証研究 / 水中浮遊式海流発電、((株)IHI : 以下再委託 東京大学、(株)三井物産戦略研究所)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Sato, A., Kanoh, H. and Takagi, K.	4. 巻 225
2. 論文標題 Control of a Twin-Turbine Submerged Floating System in turbulent flow	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Ocean Engineering	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 加納大義、高木健、佐藤淳之
2. 発表標題 乱流中の浮遊式海流発電装置の制御
3. 学会等名 日本船舶海洋工学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高木 健
2. 発表標題 海流発電装置の安全性と経済性を両立させる制御
3. 学会等名 第29回海洋工学シンポジウム、日本船舶海洋工学会・日本海洋工学会
4. 発表年 2022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	巻 俊宏 (Maki Toshihiro) (50505451)	東京大学・生産技術研究所・准教授 (12601)	

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