

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 5 日現在

機関番号：24403

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24561059

研究課題名(和文) 浮体式洋上風力発電システムの多目的最適制御による浮体動揺と発電出力変動の安定化

研究課題名(英文) Stabilization of power output fluctuation and floating platform motion of a floating offshore wind turbine-generator system by multi-objective optimization control

研究代表者

涌井 徹也 (Wakui, Tetsuya)

大阪府立大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：40339750

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：浮体式洋上風力発電システムにおいてトレードオフ関係にある発電出力の変動と浮体動揺を同時に抑制しうるシステムの多目的最適制御手法を開発した。まず、従来手法の改良として、翼ピッチ角操作による回転数制御系における制御パラメータの新たな調整指針を提案し、その有効性を明らかにした。さらに、浮体式システムを多入力多出力システムと捉え、翼ピッチ角の操作により定格発電出力を保持するだけでなく、発電機トルクの操作により浮体動揺を抑制する手法を開発した。数値シミュレーションを通して、開発手法の制御パラメータを適切に設定することで、従来の手法に比べて発電出力の変動と浮体動揺を大幅に低減できることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：In the present study, a multi-objective optimization control for floating offshore wind turbine-generator systems was developed to reduce both power output fluctuations and platform pitching motion through numerical analysis using the aeroelastic simulation model. First, a novel parameter setting of conventional rotor speed control based on collective pitch angle manipulation was developed and its effectiveness was clarified. Then, a novel multi-objective optimization control approach based on collective blade pitch manipulation and generator torque manipulation was developed. In this approach, the rated generator power is maintained by the blade pitch manipulation, and the generator torque is manipulated so as to maintain the platform motion speed at 0 m/s. The numerical simulation reveals the effectiveness of the developed approach to reduce both power output fluctuations and platform pitching motion, as compared with the conventional rotor speed control.

研究分野：エネルギーシステム工学

キーワード：洋上風力発電 浮体式洋上風力発電 多目的制御 最適制御 再生可能エネルギー

1. 研究開始当初の背景

化石燃料の使用によるCO<sub>2</sub>排出量の増加を低減するため、ウインドファーム(集合型風力発電設備)の建設が世界中で進んでいる。日本でも電力供給問題を背景に風力発電の大量導入が求められているが、ウインドファームの建設には良好な風況、広大な土地、大容量送電線、道路インフラの全てが必要になる。日本でこれらの条件を満たす場所は陸上では既に限界に達しつつあり、今後は建設場所を洋上に移行せざるを得ない状況にある。しかし、日本の沿岸部は数kmの離岸距離で水深が急激に深くなるという特徴がある。水深の深い洋上では海底に設備基礎を設置する『着床式』の導入は不可能であり、浮体上に風力発電設備を設置する『浮体式』を導入する必要がある。しかし、陸上や着床式と異なり、風力発電設備を含めた浮体が風や波の変動によって大きく動揺するため、浮体の安定化技術の確立が求められている。

洋上風力発電は欧州で導入が進んでいるが、遠浅な海域が広いために『着床式』が採用されている。これまでに様々な浮体が考案されているが、図1に示す「スパー型浮体」がコストの点から注目されている。スパー型浮体は風や波の変動に対する安定性が低いという欠点があり、浮体を「構造物」と見なした動揺解析や模擬実験などが行われている。しかし、浮体の動揺は浮体の形状や風・波の変動だけでなく、風力タービンの回転数や発電出力の変動の影響も大きく受けるため、風力タービンの空気力学特性、回転体としてのロータダイナミクス、制御特性なども考慮した浮体～風力タービン～発電機～制御系の連成解析を行う必要がある。

先行研究では、高風速域において定格出力を保持するために翼ピッチ操作を行うと、負性減衰の影響で浮体動揺の増幅が顕著になることが報告されている。その対策としてピッチ角の操作頻度を下げる制御アルゴリズムを提案しているが、浮体の安定性を保つために発電出力の変動の増大を許容しており、

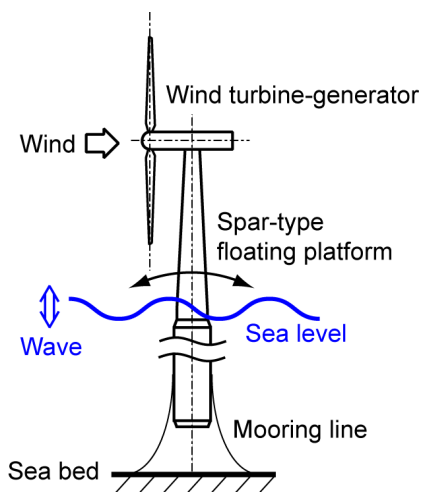


図1 スパー型浮体式洋上風力発電システム

『浮体の安定性』と『出力変動抑制』はトレードオフ関係にある。また、出力変動と浮体動揺をそれぞれ抑制するために、3軸独立ピッチ角操作による状態フィードバック制御の研究もおこなわれているが、制御信号の演算負荷が高く、また、多くのセンサを必要とするために実用性が乏しいといえる。

2. 研究の目的

本研究では、スパー型浮体式洋上風力発電システムにおいてトレードオフ関係にある発電出力の変動と浮体動揺を同時に抑制しうるシステムの多目的最適制御手法を浮体～風力タービン～発電機～制御系の連成解析を通して開発する。学術性だけでなく実用性を重視し、現在稼働中の陸上用風力発電システムと同程度の演算負荷での実装を可能とし、また、設置するセンサを極力抑えることにも着目する。

まず、従来の制御手法を最適化するために、翼ピッチ操作による回転数制御における制御パラメータの新たな調整指針を提案し、その有効性を明らかにする。さらに、浮体式システムを多入力多出力システムと捉え、翼ピッチの操作により定格発電出力を保持するだけでなく、発電機トルクの操作により浮体動揺を抑制する多目的制御手法を開発し、制御パラメータの調整指針を明らかにすることで、手法の最適化を行う。

3. 研究の方法

(1) 対象システム

図1に示すように、風力タービン・発電機はスパー型浮体の最上部に設置され、浮体は係留ラインによって海底に係留される。風力タービン・発電機は、図2に示すように、風力タービン、増速機、巻線型誘導発電機、コンバータ、インバータ、および制御装置から構成される。

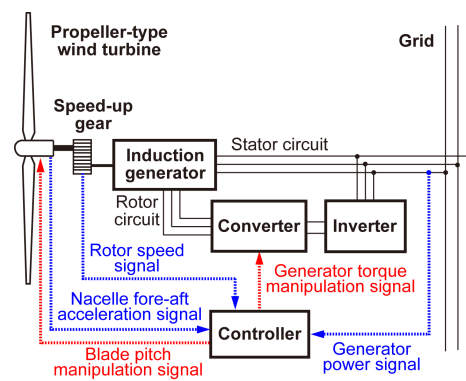


図2 風力タービン・発電機

(2) 連成解析シミュレーション

浮体～風力タービン～発電機～制御系の連成解析には、米国国立再生可能エネルギー研究所(NREL)が開発した汎用空力弾性解析ツールFASTを使用する。浮体式洋上風力発電システムの自由度は21で、浮体では6

自由度(サージ,スウェイ,ヒープ,ロール,ピッチ,ヨー)を考慮する.また,制御アルゴリズムについては独自に構築する.

### (3) 計算条件

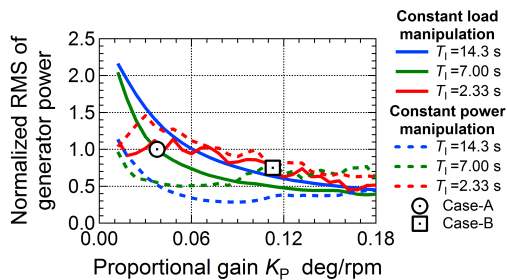
NREL が設計した風力タービンを対象とし,ローター直径は 126 m である.定格風速 11.4 m/s において 5 MW の定格出力を発生する.スパー型浮体はハブ高さが 90 m,喫水は 120 m で,3 本の係留ラインで海底に係留される.風力タービンへの流入風には離島で計測した風況データを使用し,高さ方向の風速分布(べき乗則)を考慮する.波入力に関しては, Pierson-Moskowitz spectrum model を用いて模擬データを作成する.

## 4. 研究成果

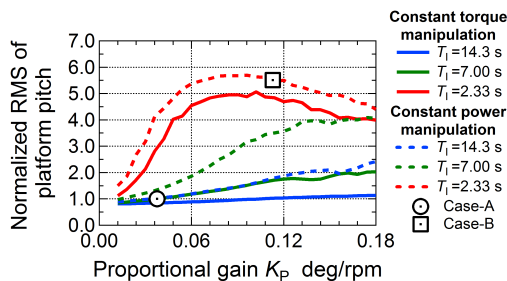
### (1) 回転数制御系の最適調整指針の検討

従来から浮体式システムの制御手法として検討されている翼ピッチ操作による回転数フィードバック制御系の制御パラメータの感度分析を行い,新たな最適調整指針を提案する.回転数フィードバック制御系では,設定値である定格回転数(12.1 rpm)と振動成分の除去のために一次遅れフィルタを介した回転数の偏差に基づいて,3枚の翼ピッチ角を同期させて操作する.制御演算には比例積分動作を用いる.発電機トルクの操作に関しては,定格トルクを保持する場合(一定トルク運転)と回転数の変化に応じて反比例させて定格出力を保持する場合(一定出力運転)を取り上げる.

回転数フィードバック制御系の比例ゲインおよび積分時間を変化させた時の浮体式システムの発電出力と浮体ピッチの2乗平均平方根(RMS)値を図3に示す.シミュレーション時間は 10,000 秒とし,RMS 値を算出



(a) 発電出力の RMS 値

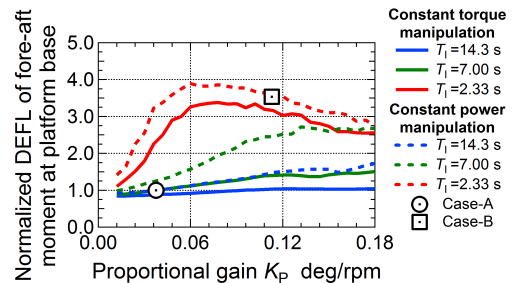


(b) 浮体動揺の RMS 値

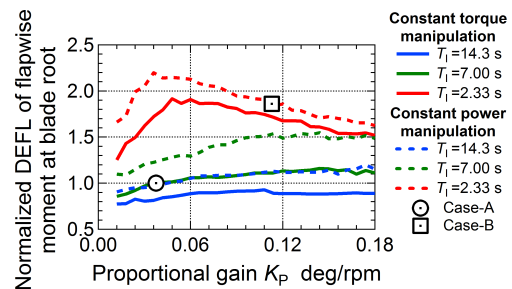
図3 発電出力と浮体動揺の RMS 値

するためのサンプリング間隔は発電出力が 1 分,浮体動揺が 1 秒である.図中のプロットは NREL が提案する回転数フィードバック制御系の調整指針であり,一定トルク運転を採用するケース A は浮体式システムを対象に,一定出力運転を採用するケース B は陸上設置システムをそれぞれ対象に提案されたものである.これより,比例ゲインが大きくなる,あるいは積分時間が短くなると,発電出力の RMS 値が小さくなるのに対して,浮体ピッチの RMS 値は大きくなっており,出力変動と浮体動揺のトレードオフ関係を確認できる.ここで,比例ゲイン:0.18 deg/rpm,積分時間:14.3 s となる制御パラメータ設定(以後,ケース S)に着目すると,浮体ピッチの RMS 値はケース A とほぼ同水準でありながら,出力変動が大幅に減少していることがわかる.

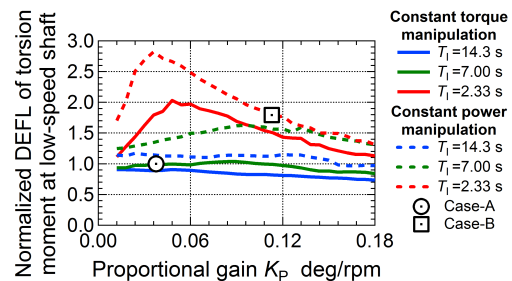
次に,ケース A, B, および S を対象に,浮体式システムの主要部の荷重特性を分析する.荷重特性は疲労等価荷重(DEFL)により評価する.タワー基部の前後曲げモーメント,翼根元部のフラップ方向曲げモーメント,および低速回転軸のねじりモーメントの DEFL を図 4 に示す.DEFL はケース A の結



(a) タワー根元部の前後方向ねじりモーメント



(b) 翼根元部のフラップ方向ねじりモーメント



(c) 低速回転軸のねじりモーメント

図4 疲労等価荷重特性

果で正規化している。いずれの DEFL も浮体動揺の大きなケース B がケース A よりも大きくなる。ケース S はタワー基部の前後曲げモーメントがケース A より 5% 増加するものの、翼根元部のフラップ方向曲げモーメントおよび低速回転軸のねじりモーメントがそれぞれ 5% および 26% 減少しており、その有効性を確認できる。

さらに、回転数フィードバック制御系の減衰振動特性を評価した結果、ケース S は制御系の固有周波数を浮体のピッチングの固有周波数よりも高くすることで翼ピッチ角操作を流入風速変化には追従させ、また、減衰係数を大きくすることで浮体動揺に伴う流入風速の変化への追従を抑えていることがわかり、新たな最適調整指針が得られた。

## (2) 多目的制御手法の検討

浮体式システムを多入力多出力システムと捉え、翼ピッチの操作により定格発電出力を保持するだけでなく、発電機トルクの操作により浮体動揺を抑制する多目的制御手法を開発する。高風速域で浮体動揺が大きくなるのは、翼ピッチの操作が浮体動揺に起因する流入風速に対しても追従するためである。そこで、浮体動揺に応じて発電機トルクを適切に操作することで、翼ピッチ角操作の追従を抑えることに着目する。すなわち、図 5 に示すように、発電出力と浮体動揺を同時に抑制するために、翼ピッチと発電機トルクを操作する多目的制御系を構築する。

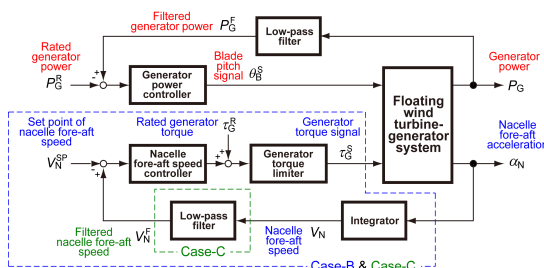
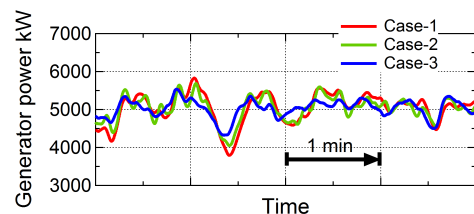


図 5 多目的制御系のブロック線図

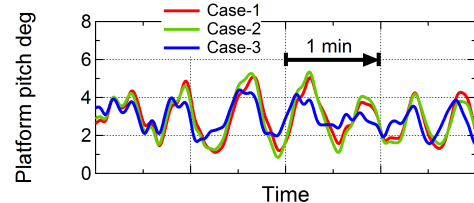
本制御系は二つの独立したフィードバック制御ループから構成されている。まず、3枚の翼ピッチを同期して操作することで従来手法のように回転数ではなく、発電出力を定格値に保持する発電出力制御を行う。また、浮体動揺速度が 0 m/s となるようにフィードバック制御を行うことで、浮体が風下側に動揺する時に動揺速度に応じて発電機トルクを増加させる。発電出力制御には比例積分動作を、浮体動揺速度制御には比例動作を用いる。また、波によって誘起される浮体動揺に発電機負荷トルクが追従しないように、一次遅れフィルタを介した浮体動揺速度を制御量とする。

多目的制御系を用いた浮体式システムの運転挙動のシミュレーション結果を図 6 に示す。発電機出力（制御量）、浮体ピッチ（制

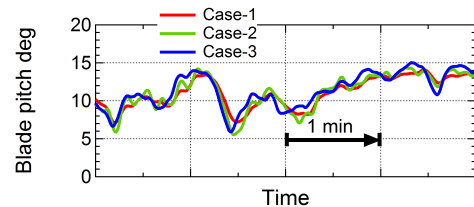
御量）、翼ピッチ（操作量）、発電機トルク（操作量）に着目する。図中、ケース 1 は発電出力制御のみを行う場合（発電機トルクは定格値で一定）、ケース 2 は多目的制御系を採用するものの、浮体動揺速度のための一次遅れフィルタを使用しない場合、ケース 3 は一次遅れフィルタを使用する場合をそれぞれ表す。いずれも事前の感度分析により、最適な制御パラメータに調整している。ケース 1 は従来手法におけるケース A と同様のパラメータ調整を行っているため、浮体動揺が良好に抑制されている。しかし、ケース 3 の発電出力と浮体ピッチの変動はケース 1 に比べて大幅に低減されており、多目的制御の有効性を確認できる。浮体が風下側（浮体ピッチが正の値）に動揺した時に発電機トルクを増加させると、発電機トルクと回転数の積である発電出力も増加するため、定格出力を保持するように翼ピッチが増加する。これにより、風力タービンから浮体に作用するスラスト力（推力）が減少することで浮体の動揺を抑制することができる。また、ケース 2 の発電出力と浮体ピッチの変動がケース 1 よりも大きくなることから、浮体動揺速度に対してフ



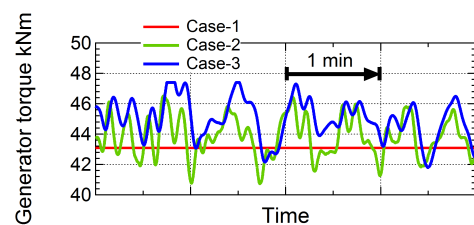
(a) 発電出力



(b) 浮体ピッチ

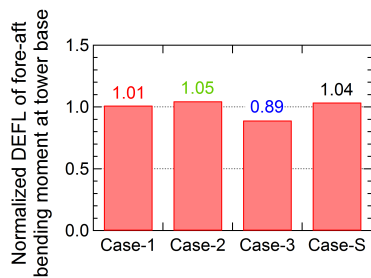


(c) 翼ピッチ

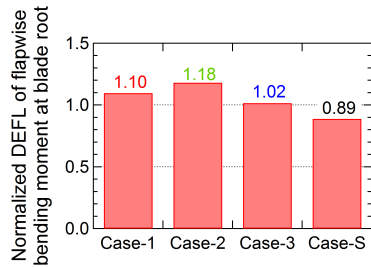


(d) 発電機トルク

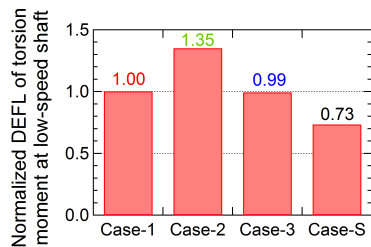
図 6 浮体式システムの運転挙動



(a) タワー根元部の前後方向ねじりモーメント



(b) 翼根元部のフラップ方向ねじりモーメント



(c) 低速回転軸のねじりモーメント

図7 疲労等価荷重特性

フィルタの挿入が必要であることもわかる。次に、ケース1, 2, 3およびSを対象に、浮体式システムの主要部のDEFL特性(タワー基部の前後曲げモーメント, 翼根元部のフラップ方向曲げモーメント, および低速回転軸のねじりモーメント)を図7に示す。浮体式システムでは、タワー基部の前後曲げ強度が最も厳しい設計要件となるが、ケース3のタワー基部の前後曲げモーメントのDEFLが他のケースに比べて大きく減少していることがわかる。これは浮体動揺の違いによるもので、ケース1に対して、ケース2の浮体動揺のRMS値はほぼ等しく、また、ケースSのRMS値は14%増加するのに対して、ケース3のRMSは16%減少することを確認している。翼根元部のフラップ方向曲げモーメントと低速回転軸のねじりモーメントはケース1とほぼ同水準である。浮体動揺速度にフィルタを使用しないケース2は翼根元部のフラップ方向曲げモーメントおよび低速回転軸のねじりモーメントがケース1よりも大幅に増加しており、疲労等価荷重の観点では不適切である。一方、ケースSのタワー基部の前後曲げモーメントはケース1と同水準であるが、翼根元部のフラップ方向曲げモーメントおよび低速回転軸のねじりモーメントが大幅

に低減することを明らかにした。

### (3) 得られた成果のまとめ

本研究で開発した浮体式システムの多目的制御手法は出力変動と浮体動揺の高い抑制効果を持つが、従来手法に比べて制御装置での演算負荷の増加はごく僅かであり、また新たに必要となるセンサも浮体動揺速度を測定するための加速度センサのみである。よって、実用性にも優れた手法であること考える。また、従来手法の制御パラメータを改良しても良好なシステム性能が得られることを明らかにし、浮体式洋上風力発電システムの実用化に有益な成果を得ることができた。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計6件)

- T. Wakui, M. Yoshimura, R. Yokoyama, Power and Platform Motion Controls Based on Combined Manipulation of Blade Pitch and Generator Torque in a Floating Offshore Wind Turbine-Generator System, Proc. of the International Conference on Power Engineering 2015, (2015), 査読有,掲載決定。  
 T. Wakui, M. Yoshimura, R. Yokoyama, Novel Control Parameter Setting for Rotor Speed of Spar-type Floating Offshore Wind Turbine-Generator System, Proc. of the EWEA Offshore 2015, (2015), Paper No. PO.055, 10 pages, 査読有。

[学会発表](計14件)

- 涌井徹也, 吉村親樹, 横山良平, 浮体式洋上風力発電システムの翼ピッチと発電機トルクの併用操作による出力および浮体動揺制御, 日本機械学会第93期流体工学部門講演会, 2015年11月7, 8日, 東京理科大学(東京), 講演予定。  
 涌井徹也, 吉村親樹, 横山良平, 浮体式洋上風力発電システムの動特性解析(回転数制御のパラメータ設定に関する考察), 日本風力エネルギー学会第36回風力エネルギー利用シンポジウム, 2014年11月28日, 科学技術館(東京)。  
 涌井徹也, 吉村親樹, 横山良平, 浮体式洋上風力発電システムの動特性解析(自然風況下での出力変動と浮体動揺の相関分析), 日本機械学会2014年度年次大会, 2014年9月10日, 東京電機大学(東京)。

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

涌井 徹也 (WAKUI Tetsuya)  
 大阪府立大学・大学院工学研究科機械系専攻機械工学分野・准教授  
 研究者番号: 40339750

(2) 研究協力者

吉村 親樹 (YOSHIMURA Motoki)  
 大阪府立大学・大学院工学研究科機械系専攻機械工学分野・博士前期課程