

PS-39 浮体式洋上風力発電施設のブレードピッチ制御に関する研究

洋上再生エネルギー開発系 *羽田 絢、國分 健太郎、中條 俊樹、石田 茂資

1. はじめに

現在、世界規模で風力エネルギー利用の取り組みが行われているが、我が国では陸上の適地が少ないことから、洋上風力発電、なかでも浮体式洋上風力発電（以下、FOWT）に関する研究開発が多く行われている。FOWTの効果的な運用のためには、制御手法が重要な課題のひとつである。

一般的に、風車における制御はブレードピッチ角を用いたローター回転数の制御、発電機の制御、方位角制御の3つからなっており、これらを適切に運用することで安定した発電を達成している。これらの内、ブレードピッチ角を用いたローター回転の制御については、陸上風車の手法をそのままFOWTに適用することが困難だといわれている。その理由は、スラスト変動が浮体応答を増幅させる可能性があるためである。

本研究ではFOWTのピッチ運動とローター回転数の相互作用に着目しつつ、現代制御理論に基づいた制御を適用した数値計算を実施し、ローター回転数変動と浮体応答の両者を安定化できることを示した。

2. 現代制御理論

2.1 現代制御理論の概要

現代制御理論とは、周波数応答を用いて設計を行なう古典制御理論を、より理論的かつ数学的に発展させたものである。状態の概念と微分方程式を導入することにより、対象となるモデルの可制御性や可観測性などに対して解答を与え、制御可能な場合は最適化による理論的な設計法を導入することができる。本研究では、過渡応答の改善とロバスト安定化を目的として、最適レギュレータ制御と H_{∞} 制御の導入を試みた。

2.2 対象モデルと状態方程式の導出

本研究で対象とするFOWTは、浮体部分はスパー型、風車部分は米国再生可能エネルギー研究所（以下 NREL）が解析用に設計した5MW風車とした。浮体の喫水は93.8mで、4条のカテナリー係留を有する。浮体の概要を図-1に、FOWTの主要目を表-1に示す。また、想定している水深は150mである。

対象モデルに現代制御を施すにあたり、浮体のピッチ方向運動とローターの回転運動に関する2種類の運動方程式を導出した。式(1)は浮体のピッチ運動について記述したものであり、 ζ が浮体ピッチ角、 m はFOWTの慣性モーメント、 c は減衰力係数、 k は復原モーメント係数、 L_H はハブ高さ、 T はスラスト荷重、 w_f は波浪

外力である。一方式(2)はローター回転に関する方程式であり、 η がローター回転数、 I が慣性モーメント、 D が減衰力係数、 N がローター回転方向のトルクである。

スラスト及びトルクについてはNRELの開発したAeroDynを用い、翼素運動量理論に基づく計算結果を風速とブレードピッチ角で線形化して使用した。本研究で用いた線形化では、相対風速が8~13m/s、ブレードピッチ角が0deg~8degの範囲内で変動することを想定した。

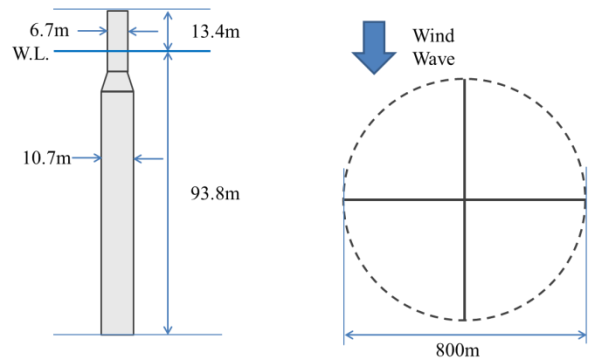


図-1 浮体概要図（左）、係留配置（右）

表-1 モデル主要目

item	value	unit
Rotor diameter	120	m
Rated wind Speed	11.4	m/s
Rated rotor speed	12.1	rpm
Hub height	90	m
Draft	93.8	m
Displacement	8,100	ton

$$m\ddot{\zeta} + c\dot{\zeta} + k\zeta = L_H T(U, \beta, \dot{\zeta}) + w_f \quad (1)$$

$$I\dot{\eta} + D\eta = N(U, \beta, \dot{\zeta}) \quad (2)$$

2.3 最適レギュレータ制御

最適レギュレータ制御（以下 LQ 制御）とは過渡特性の改善能力に優れた制御則である。多入力を持つ可制御なn次元線形システムに対し、1.状態を目標状態である零状態にすること、2.そのためのエネルギーの消費を少なくすることを目的とし、評価関数を定義する。式(3)において、被積分関数の第1項が状態に関する評価の項であり、第2項が入力に関する評価の項である。行列Q、Rは設計者がそれぞれ準正定、正定の条件下

で自由に設定できる重み行列である。

この制御重みについては、ブレードピッチ角の範囲、一定以上のローター回転数の維持、浮体ピッチ運動振幅の3条件をもとに設定を行なった。

$$J = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} (x^T(t)Qx(t) + u^T(t)Ru(t))dt \quad (3)$$

2.4 H ∞ 制御

H ∞ 制御は、1. ロバスト安定化（数値モデルと実際の制御対象に誤差があっても制御対象を安定化するコントローラ的设计）と、2. 周波数領域で制御仕様が記述できるという2点が特徴であり、またこれらが比較的容易に行えることにより応用の範囲が広い。プラントの伝達関数を用いて記述されるH ∞ ノルムを定義し、これを用いた記述によってコントローラ的设计が可能になる。

H ∞ 制御の重みについては FOWT のピッチ運動に関する固有周期を用いて設定を行なった。

3. 数値シミュレーション

3.1 シミュレーション概要

数値シミュレーションは MathWorks の SIMULINK¹⁾ 上で実施した。FOWT の挙動については上述した線形モデルを用いた計算で傾向を確認した後、NREL の開発した風車挙動解析ソフトウェア FAST²⁾ を組み込んだシミュレーションを実施した。なお、本研究で使った FAST は公開されているものに粘性減衰影響を考慮できるように当所で修正を加えたものである。

3.2 波浪中応答特性

計算条件として、一樣な風速（11.4m/s）と波高 5m の規則波を与えた。また、波周期は 18sec~24sec とした。これは比較的発生頻度の小さい波周期であるが、制御の効果を検証するために、ピッチ運動の固有周期である 24sec 付近を選択したものである。

シミュレーション結果を図-2~4 に示す。図-2 より制御を加えることによって浮体ピッチ運動を大きく低減できることがわかった。特に、H ∞ 制御を導入した場合は、検討範囲内において振幅 1deg 未満を達成できた。図-3 のローター回転数に着目すると、周期 18sec 近傍では制御なしの方が小さい応答となっているものの、長周期では制御によって応答を低減できており、浮体運動とローター回転数の両者の応答低減を達成できたといえる。

その一方で、ブレードピッチ角の振幅は本モデルの想定範囲（0deg~8deg）を超えている（図-4）。また、実海域で発生頻度の高い波周期は、運動の固有周期よりもかなり短いことが一般的である。今後はより実践的な制御範囲の設定を行うなど、モデルと制御両者の高度化を実施していく予定である。

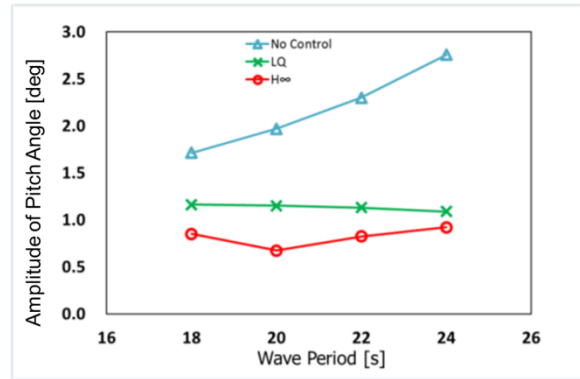


図-2 浮体ピッチ運動

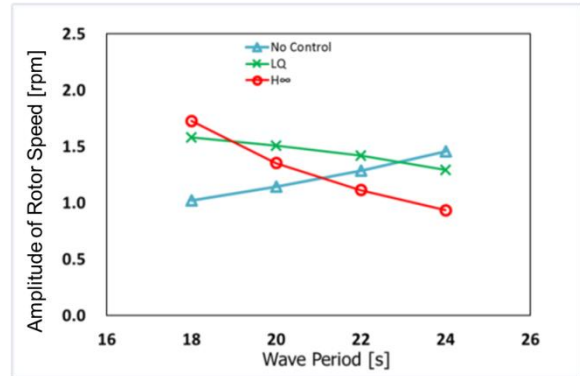


図-3 ローター回転数

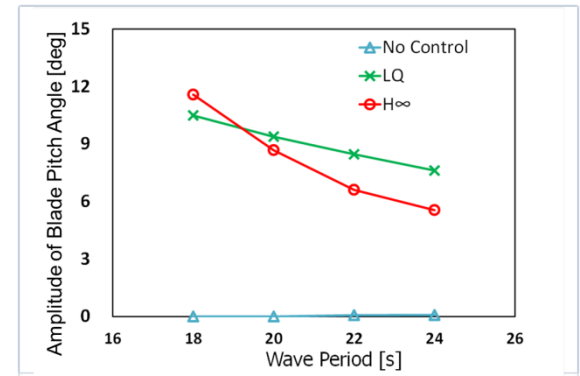


図-4 ブレードピッチ角

4. まとめ

1. FOWT のローター回転数と浮体ピッチ運動に関する線形モデルを作成し、二種類の現代制御（LQ 制御、H ∞ 制御）を利用した数値計算を実施した。
2. ピッチ運動の固有周期における上記2項目の同時低減を目的とした制御パラメータを設定した。その結果、ブレードピッチ角の制御により、目的とする低減効果が得られることを確認した。

参考文献

- 1) SIMULINK : <http://www.mathworks.co.jp/products/simulink/>
- 2) FAST : <http://wind.nrel.gov/designcodes/simulators/fast/>