

第I部門

2024年9月6日(金) 10:40 ~ 12:00 会場 A104(川内北キャンパス講義棟A棟)

耐風・風工学(2)

座長：木村 吉郎（東京理科大学）

11:00 ~ 11:10

[I-329] 風車制御によるスパー型浮体式洋上風力発電システムの浮体動揺と風車荷重低減に関する研究

*本間 慶太¹、菊地 由佳¹、石原 孟¹ (1. 東京大学大学院工学系研究科)

キーワード：ブレードピッチ位置制御、ナセル加速度フィードバック制御、スパー型浮体、動揺解析

本研究では、スパー型浮体の風車—浮体—係留の連成解析モデルを構築するとともに、各種制御アルゴリズムが浮体動揺および風車荷重に与える影響を評価した。まず、ブレードピッチ位置の浮体式用PI制御を適用した場合、着床式用PI制御の場合と比較して、ピッチ方向の浮体動揺およびタワー基部モーメントの最大値が低減し、ロータ回転数および発電量低下が解消されることを示した。次に、ナセル加速度フィードバック（NAF）制御による付加減衰を定量的に評価するとともに、NAF制御の適用により、ピッチ方向の浮体動揺およびタワー基部モーメントの最大値、ロータ回転数および発電量の標準偏差が低減することを示した。

風車制御によるスパー型浮体式洋上風力発電システムの浮体動揺と風車荷重低減に関する研究

東京大学 学生会員 ○本間 慶太
 東京大学 正会員 菊地 由佳
 東京大学 正会員 石原 孟

1. はじめに

浮体式洋上風力発電の導入が期待されている中、スパー型浮体のコスト低減のため、発電時の風車制御による浮体動揺低減と風車荷重低減が重要である。一般的な可変速・ブレードピッチ制御の風車において、定格出力以降は、トルクを一定に、ブレードピッチ角制御によりロータ速度を一定に制御し、発電量を一定とする。その際、浮体式風車に着床式と同じゲインを適用すると、浮体動揺が増加することが知られており¹⁾、浮体式用風車の制御ゲインの評価が必要である。また、着床式風車では、風車タワーの振動を低減するため、ナセル加速度フィードバック(NAF)制御が提案されているが²⁾、スパー型浮体に適用された場合のメカニズムを説明する必要がある。

そこで、本研究では、風車—浮体—係留の連成解析モデルを構築し、ブレードピッチのPI制御が浮体動揺と風車荷重に与える影響を定量的に評価する。次に、NAF制御をスパー型浮体に適用し、動揺低減メカニズムを示すとともに、浮体動揺と風車荷重の低減量を定量的に評価する。

2. 浮体式用PI制御による浮体動揺と風車荷重の低減

標準5MW風車を搭載したOC3 Hywind スパー型浮体¹⁾の風車—浮体—係留の連成解析モデルを構築し、Orcaflexを用いて動揺解析を行った。PI制御では、発電機の定格回転数と実際の回転数との偏差に対して、次式で示すブレードピッチ角制御を実施する。

$$\Delta\theta = K_p\Delta\Omega_g + K_I \int_0^t \Delta\Omega_g dt \quad (1)$$

ここで、 θ はブレードピッチ角、 K_p は比例ゲイン、 K_I は積分ゲイン、 $\Delta\Omega_g$ は発電機の回転数の偏差である。比例ゲインと積分ゲインは、次式に基づいて設定した³⁾。

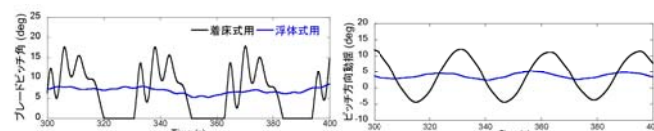
$$K_p = \frac{2 I_D \Omega_0 \zeta_\varphi \omega_{\varphi n}}{r \left[-\frac{\partial P}{\partial \theta}(\theta=0) \right]} GK(\theta) \quad (2)$$

$$K_I = \frac{I_D \Omega_0 \omega_{\varphi n}^2}{r \left[-\frac{\partial P}{\partial \theta}(\theta=0) \right]} GK(\theta) \quad (3)$$

ここで、 I_D はロータと発電機の慣性モーメントの和、 Ω_0 はロータ回転数、 ζ_φ は制御系の減衰、 $\omega_{\varphi n}$ は交差ゲイン周波数、 r はギア比、 P は発電量、 $GK(\theta)$ はゲイン修正係

数である。 $\omega_{\varphi n}$ は共振を避けるために、構造物の支配的な振動モードの固有周期より低い必要がある。着床式用PI制御では、 $\omega_{\varphi n}$ は支配的な振動モードである風車タワーの1次固有周波数2.01rad/sの0.3倍から0.6rad/sと評価される^{3),4)}。一方、浮体式用PI制御では、支配的な振動モードは浮体のピッチ運動となるため、 $\omega_{\varphi n}$ はピッチ方向固有周期0.22rad/sを下回る0.2rad/sとした。

構築したモデルを用いて、発電時シミュレーション(乱流条件：平均風速14 m/s、乱れ強度7.1%、不規則波条件：有義波高2.05m)を実施した。図1に着床式用および浮体式用PI制御を適用したブレードピッチ角とピッチ方向の浮体動揺の時系列を示す。また、図2に統計値の比較を示す。浮体式用PI制御を適用した場合、着床式用PI制御を適用した場合と比較して、ブレードピッチ角の変動速度が緩やかになり、ピッチ方向の浮体動揺の最大値は13.2°から5.9°まで55%低減した。それに伴い、タワー基部モーメントの最大値は43%低減した。また、浮体動揺増加によるロータ回転数と発電量の低減が解消された。



(a) ブレードピッチ角 (b) ピッチ方向浮体動揺
 図1 発電時シミュレーションによる予測値の時系列

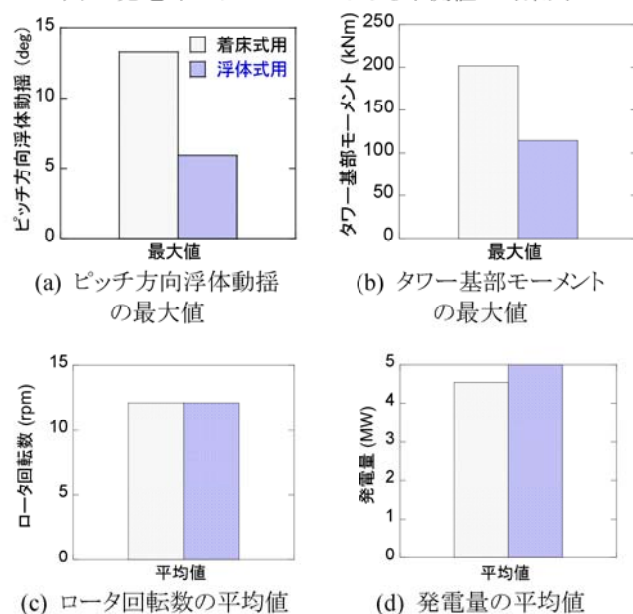


図2 着床式と浮体式用PI制御適用時の統計値の比較

キーワード ブレードピッチ位置制御, ナセル加速度フィードバック制御, スパー型浮体, 動揺解析
 連絡先 〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1 東京大学大学院工学系研究科 TEL 03-5841-1146

3. ナセル加速度フィードバック制御による浮体動揺と風車荷重の低減とそのメカニズムの解明

前節で示したブレードピッチ角制御に、ナセル速度を入力とする NAF 制御を次式で示すように適用する。

$$\Delta\theta = K_p\Delta\Omega_g + K_I \int_0^t \Delta\Omega_g dt + k_{px}\Delta\dot{x} \quad (4)$$

ここで、 k_{px} は NAF 制御ゲイン、 $\Delta\dot{x}$ は観測値 $\dot{x}$ に対するナセル速度の目標値 $\dot{x}_0$ の偏差である NAF 制御ゲイン k_{px} は、文献 5) より、ピッチ方向のシステム運動方程式と発電機の回転方向の運動方程式から導出される状態方程式より、ロータ回転数とナセル速度の連成項が 0 となるように次式で評価され、今回の風車モデルでは -0.07 と算出された。

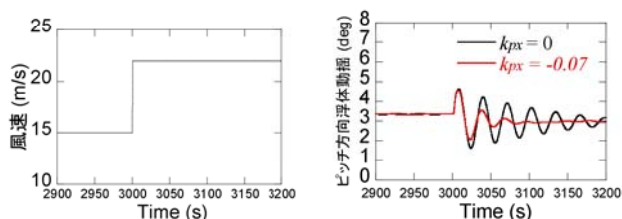
$$k_{px} = \frac{\partial Q}{\partial v'} \left(\frac{\partial Q}{\partial \theta} \right)^{-1} \quad (5)$$

ここで、 Q はロータのトルク、 v' はナセル速度に対する風速の差である。

NAF 制御による浮体動揺低減メカニズムについて分析する。浮体システムのピッチ方向の運動方程式に式 (4) における NAF 制御に関する項を代入することにより次式を得る。

$$\begin{aligned} m\ddot{x} + c\dot{x} + kx &= T(\theta_0) + \Delta\theta \frac{\partial T}{\partial \theta} \Big|_{\theta=\theta_0} \\ &= T(\theta_0) - \frac{\partial T}{\partial \theta} \Big|_{\theta=\theta_0} k_{px} \dot{x} \end{aligned} \quad (6)$$

ここで、 T はスラスト力である。 k_{px} の関数となる最終項は速度に比例し、 $(\partial T / \partial \theta) |_{\theta=\theta_0}$ と k_{px} が負であるため、 $(\partial T / \partial \theta) |_{\theta=\theta_0} k_{px}$ は正となり、右辺に移項することで付加減衰として作用することが分かる。付加減衰の効果を定量的に評価するために、図 3(a) に示す 15m/s から 22m/s に増速する一様風を作用させ、浮体システムを自由振動させた。図 3(b) に示すように NAF 制御を適用しなかった場合と適用した場合のシステム減衰比はそれぞれ 0.05、0.29 となり、NAF 制御により空力減衰比 0.24 が付加されることを示した。



(a) 入力風速の時系列 (b) ピッチ方向浮体動揺
図 3 NAF 制御による付加減衰の評価

NAF 制御を適用したモデルを用いて、前節と同様の発電時シミュレーションを実施した結果を図 4 に示す。NAF 制御を適用した場合、適用しなかった場合と比較して、ピッチ方向の浮体動揺の最大値は 5.9° から 4.5° まで 23% 低減した。それに伴い、タワー基部モーメントの最大値は 11% 低減した。また、ロータ回転数と発電量の

の平均値は変化せず、標準偏差はそれぞれ 22% 低減した。発電量を損なうことなく、浮体動揺および風車荷重を低減することができることが分かる。

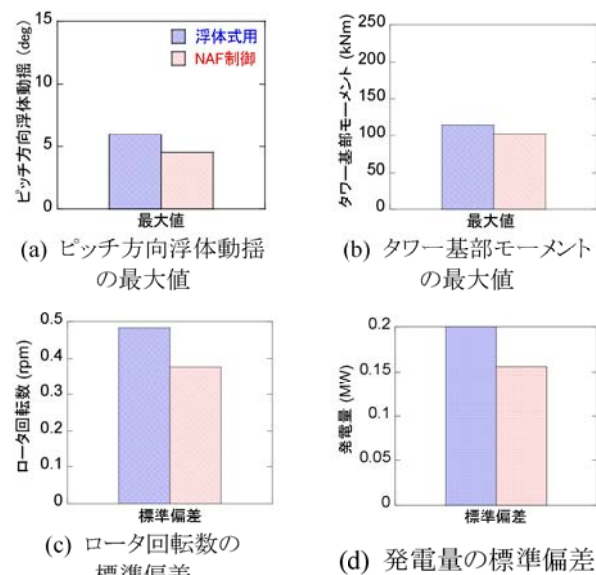


図 4 NAF 制御適用有無による予測値の比較

4. まとめ

本研究では、風車—浮体—係留の連成解析モデルを構築するとともに、各種制御アルゴリズムが浮体動揺および風車荷重に与える影響を評価し、以下の結論を得た。

- 1) 浮体式用 PI 制御を適用した場合、着床式用 PI 制御を適用した場合と比較して、ピッチ方向の浮体動揺およびタワー基部モーメントの最大値は、55% および 43% 低減し、ロータ回転数および発電量低下が解消されることを示した。
- 2) ナセル加速度フィードバック (NAF) 制御による付加減衰を定量的に評価するとともに、NAF 制御の適用により、ピッチ方向の浮体動揺およびタワー基部モーメントの最大値が 23% および 11% 低減し、ロータ回転数および発電量の標準偏差が 22% 低減することを示した。

参考文献

- 1) J. Jonkman, Definition of the Floating System for Phase IV of OC3, 2010.
- 2) A. Yamaguchi, I. Yousefi and T. Ishihara, Reduction in the Fluctuating Load on Wind Turbines by Using a Combined Nacelle Acceleration Feedback and Lidar-Based Feedforward Control, Energies 2020, 13, 17, 4558, 2020
- 3) J. Jonkman et al., Definition of a 5-MW Reference Wind Turbine for Offshore System Development, 2009.
- 4) 土木学会, 風力発電設備支持構造物設計指針・同解説, 2010.
- 5) Nikhar J. Abbas et al., A reference open-source controller for fixed and floating offshore wind turbines, WES, 7, 53–73, 2022