

# フィードフォワード制御を利用した浮体式洋上風車の変動風荷重低減に関する研究\*

Reduction of fluctuating load on floating offshore wind turbine by using feed forward control

山口 敦\*\* イマーン ユーセフィー 石原 孟\*\*  
Atsushi YAMAGUCHI Iman YOUSEFI Takeshi ISHIHARA

## 1. はじめに

ピッチ制御風車の定格風速以降のピッチ制御領域においてはスラスト力が風速の増大に伴って減少するため、減衰が負となり得る。陸上風車や着底式の洋上風力発電設備の場合には、風車タワーの1次固有振動数がピッチ制御の時間スケールと比較して短いため、負の減衰が発生することはないが、浮体式洋上風力発電設備の場合には浮体ピッチ運動の固有周期が長いこと、実際に減衰が負あるいは非常に小さくなり、浮体のピッチ動揺が大きくなることが指摘されており、その対応が検討されている[1][2][3]。

Jonkam et al. [1] はこの問題に対応するためにピッチ制御の比例ゲインと積分ゲインの計算に長い時間スケールを採用し、比例ゲインと積分ゲインの値を小さくすることによりこの問題を回避した。しかしながら、この手法ではピッチ制御の応答が遅くなるため、ロータ回転数の変動が大きくなり、定格回転数を大きく超えるロータ回転数が生じるといった問題点がある。

一方、陸上風車や着底風車においては、ナセルに設置された加速度計からのフィードバックを、通常の発電機回転数からのフィードバックループに加えることにより減衰を付加する手法が提案されている[4]。類似の手法として清木ら[2]はナセルに設置された傾斜計の応答をピッチ制御のフィードバックループに加えることにより、浮体動揺を低減させる制御を浮体式洋上風力発電設備の実機に実装した。

さらに、最近浮体式洋上風力発電設備の応答を改善する手法として、ドップラーライダーにより計測した風速を利用したフィードフォワード制御[5]が着目されているが、どのようにして計測した風速値を用いるのかについては、明らかにされていない。

そこで、本研究ではまず、IEA Task30 で例題として使用された浮体式洋上風車[6]を対象として、従来のゲインを低減してピッチ制御の応答速度を下げることに

より、浮体動揺を低減する手法をベースライン制御モデルとし、ナセル加速度からのフィードバックを利用する手法、および風速の計測値を利用したフィードフォワード制御を適用し、制御手法が風車応答に与える影響を明らかにするとともに、フィードフォワード制御で使用する風速の計測値の最適化を行う。

## 2. 本研究で使用した風車と制御手法

本節では本研究で比較した浮体式風力発電設備と制御手法について概説する。

陸上風車のピッチ制御では、通常PI制御が行われる。Hansen et al. [7] はPI制御のゲインとして下記の値を提案した。

$$K_P = \frac{2I_D \Omega_0 \zeta_\varphi \omega_{\varphi n}}{N_G \left( \frac{\partial P}{\partial \theta} \right)} \quad (1)$$

$$K_I = \frac{2I_D \Omega_0 \omega_{\varphi n}^2}{N_G \left( \frac{\partial P}{\partial \theta} \right)} \quad (2)$$

ここで、 $I_D$ はドライブトレインの慣性モーメント、 $\Omega_0$ は定格ロータ回転数、 $N_G$ はギア比である。 $\zeta_\varphi$ と $\omega_{\varphi n}$ はモデルパラメータであるが、陸上風車においては $\omega_{\varphi n}$ をタワー1次固有周期に対応する値を用いる。Jonkman et al. [1] は浮体式洋上風力発電設備において $\omega_{\varphi n}$ の値として浮体のピッチ運動の固有周期に対応する値を用い、PI制御のゲインを低減させた。

ナセル加速度を利用して付加減衰を与える制御については、Leithead et al.[4]によって提案された手法を用いた。この手法では、ナセル加速度を利用して減衰を付加する。風車をナセルの風方向並進運動のみの1自由度系としてモデル化すると、追加的なピッチ制御を含む運動方程式は下記ようになる。

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F_{th}(\theta) + \frac{\partial F_{th}}{\partial \theta} \Delta\theta \quad (3)$$

\*平成30年12月5日第40回風力エネルギー利用シンポジウムにて講演

\*\* 会員 東京大学大学院工学系研究科 〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1

ここで、 $m$ ,  $c$ ,  $k$ はそれぞれ系の質量, 減衰, 剛性,  $x$ はナセルの変位であり,  $F_{th}(\theta)$ はピッチ角の関数としてのスラスト力である. 右辺第2項は付加的に行うピッチ制御に伴うスラスト力の変化であり,  $\Delta\theta$ をナセル速度に比例する量として与えることにより減衰を付加することができる. この制御のブロック線図を図1に示す.

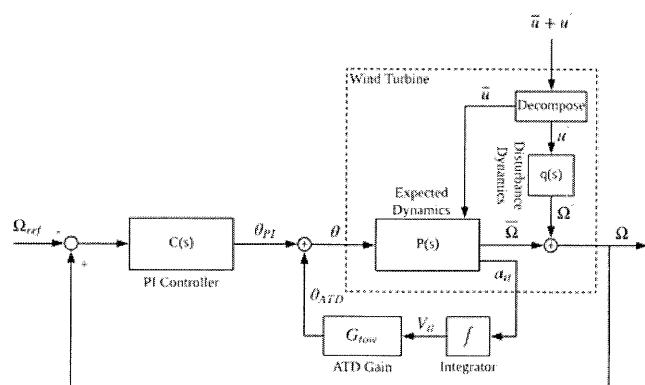


図1 ナセル加速度を利用した減衰付加制御のブロック線図

フィードバック制御ではシステムの応答を用いて制御を行うが, フィードフォワード制御ではシステムに対する入力を用いて制御を行う. 風力発電設備の場合, システムに対する入力の変動は主に風速変動であるため, ロータに流入する風速を事前に計測することによりフィードフォワード制御が可能になる. 本研究では風車のフィードフォワード制御として, Wright and Fingersh [5] によって提案された制御を用いた. この制御では, ロータ回転数の変動を抑制するために通常のPI制御ループに加え, ロータ回転数の変動をもたらす風速変動を予め計測し, 風速変動によるロータ変動をキャンセルするようにピッチ制御を行う. 図2にこの制御のブロック線図を示す.

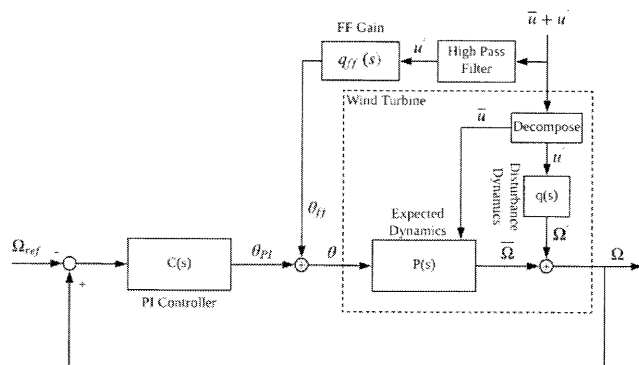


図2 フィードフォワード制御のブロック線図

フィードフォワード制御では事前に計測した風速変動によりピッチ角を予め制御することによりシステム

の応答が改善できると期待される.

### 3. 浮体式風車の応答に与える制御手法の影響

前節で説明した制御手法を用いて浮体式洋上風力発電設備に作用する荷重を評価した. 本例では風速14m/s, 不規則波に対する浮体式洋上風力発電設備の応答を評価した.

図3にそれぞれの制御手法を用いた場合のロータ回転数と浮体ピッチ動揺の標準偏差を, ベースライン制御モデルを用いた場合の値を用いて無次元化したものを示す. 加速度計を利用した減衰付加手法, フィードフォワード手法とも浮体のピッチ動揺の標準偏差は同じように低減する. 一方, ロータ回転数については, フィードフォワード制御を用いた場合には減少するが, 加速度を利用した減衰付加手法では増大することがわかる.

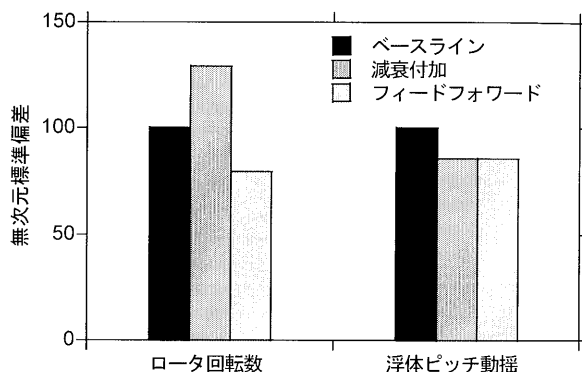


図3 ロータ回転数と浮体動揺の標準偏差に与える制御手法の影響

ナセル加速度を利用した減衰付加制御を利用した場合にロータ回転数の変動が増大する理由を説明する. 通常, ロータ回転数の変動はピッチ角による成分と風速変動 $U'$ による成分下記のように記述できる.

$$\Omega(s) = \theta(s)P(s) + U'(s)q(s) \quad (4)$$

また, ナセル加速度のフィードバックを利用した制御では, ピッチ角 $\theta$ は通常のPI制御に起因する成分 $\theta_{PI}$ と減衰付加制御に起因する成分 $\theta_{ATD}$ に分けられる.

$$\Omega(s) = \theta_{PI}(s)P(s) + \theta_{ATD}(s)P(s) + U'(s)q(s) \quad (5)$$

ナセル加速度のフィードバックを利用した制御では, ロータ回転数は下記のように記述できる. 減衰付加制御に起因するピッチ角はナセル速度 $V_{tt}$ を利用して次

のように記述できる.

$$\theta_{ATD}(s) = G_{tow}V_{tt}(s) \quad (6)$$

ナセルの速度はロータから見た場合には風速変動と捉えることができる.

$$V_{tt}(s) = U'(s) \quad (7)$$

式(6)と式(7)を式(5)に代入すると、次式が得られる.

$$\Omega(s) = \theta_{PI}(s)P(s) + U'(s)(G_{tow}P(s) + q(s)) \quad (8)$$

式(5)と式(8)を比較すると、風速変動に起因するロータ回転数の変動が $G_{tow}P(s)$ だけ増大していることがわかる. このため、加速度フィードバックを利用した制御では浮体のピッチ運動に対する減衰を付加することは可能であるが、ロータ回転数の変動が増大することがわかる.

一方、フィードフォワード制御の本来の目的はロータ回転数の変動を抑制することであるが、結果的に浮体動揺の低減に寄与している. 以下その理由について説明する. まず、風車搭載浮体をピッチ運動のみの1自由度系で近似する.

$$(I_M + A_r)\ddot{\xi} + (B_r + B_V)\dot{\xi} + (C_H + C_L)\xi = L_{HH}T \quad (9)$$

ここで、 $\xi$ は風車搭載浮体のピッチ角、 $I_M$ は風車搭載浮体のピッチ運動に関する慣性モーメント、 $A_r$ は浮体のピッチ方向の付加質量、 $B_r$ は造波減衰、 $B_V$ は線形化した粘性減衰、 $C_H$ は静水圧による復元力、 $C_L$ は係留索による復元力、 $L_{HH}$ はハブ高さ、 $T$ はロータに作用するスラスト力である. スラスト力は次式に示すように、ロータに対する相対風速 $V_r$ 、ブレードピッチ角 $\theta$ およびロータ回転数 $\Omega$ の関数である.

$$T = T(V_r, \theta, \Omega) \quad (10)$$

ロータ回転数が一定とすると、スラスト力は相対風速とブレードピッチ角のみの関数として記述することができる.

$$T = T(V_r, \theta) \quad (11)$$

議論を単純にするために、スラスト力がある風速・ピッチ角周りでテイラー展開する.

$$T(V_r, \theta) = T_0 - \frac{\partial T}{\partial V_r} \Delta V_r + \frac{\partial T}{\partial \theta} \Delta \theta \quad (12)$$

風車ナセルの変位は浮体ピッチ角とハブ高さを用いて次式のように書くことができる.

$$x = L_{HH}\xi \quad (13)$$

(12)式と(13)式を(9)式に代入し次式を得る.

$$\begin{aligned} \left( \frac{I_M + A_r}{L_{HH}^2} \right) \ddot{x} + \left( \frac{B_r + B_V}{L_{HH}^2} \right) \dot{x} + \left( \frac{C_H + C_L}{L_{HH}^2} \right) x \\ = T_0 - \frac{\partial T}{\partial V_r} \Delta V_r + \frac{\partial T}{\partial \theta} \Delta \theta \end{aligned} \quad (14)$$

ロータに対する相対風速は絶対風速 $V_a$ と浮体ピッチ運動に起因するナセルの速度 $\dot{x}$ の和として次式のように書くことができる.

$$V_r = V_a + \dot{x} \quad (15)$$

絶対風速が変動しないとすると、相対風速の変動は次式に示すように浮体のピッチ運動にのみ依存する.

$$\Delta V_r = \Delta \dot{x} \quad (16)$$

式(16)を式(14)に代入すると次式が得られる.

$$\begin{aligned} \left( \frac{I_M + A_r}{L_{HH}^2} \right) \ddot{x} + \left( \frac{B_r + B_V}{L_{HH}^2} \right) \dot{x} + \left( \frac{C_H + C_L}{L_{HH}^2} \right) x \\ = T_0 - \frac{\partial T}{\partial V_r} \Delta \dot{x} + \frac{\partial T}{\partial \theta} \Delta \theta \end{aligned} \quad (17)$$

初期に浮体運動が0と仮定すると、次式が成り立つ

$$\begin{aligned} \left( \frac{I_M + A_r}{L_{HH}^2} \right) \ddot{x} + \left( \frac{B_r + B_V}{L_{HH}^2} \right) \dot{x} + \left( \frac{C_H + C_L}{L_{HH}^2} \right) x \\ = T_0 - \frac{\partial T}{\partial V_r} \dot{x} + \frac{\partial T}{\partial \theta} \Delta \theta \end{aligned} \quad (18)$$

一方、フィードフォワード制御ではロータ回転数が一定となるように、ブレードピッチ角を次式に示すように制御する.

$$\theta = \theta_{PI} + q_{ff}(V_r - \bar{V}_r) \quad (19)$$

ここで、 $q_{ff}$ はフィードフォワードゲインである. 相対風速の変動に伴うブレードピッチ角の変化は次式で表すことができる.

$$\Delta \theta = q_{ff} \Delta V_r \quad (20)$$

式(19)と式(20)を式(18)に代入すると次式が得られる.

$$\begin{aligned} \left( \frac{I_M + A_r}{L_{HH}^2} \right) \ddot{x} + \left( \frac{B_r + B_V}{L_{HH}^2} \right) \dot{x} + \left( \frac{C_H + C_L}{L_{HH}^2} \right) x \\ = T_0 - \frac{\partial T}{\partial V_r} \dot{x} + q_{ff} \frac{\partial T}{\partial \theta} \dot{x} \end{aligned} \quad (21)$$

この式では、右辺第2項と第3項はナセルの速度 $\dot{x}$ に比例する減衰項であるため、左辺に移項すると次式となる.

$$\left(\frac{I_M + A_r}{L_{HH}^2}\right)\ddot{x} + \left(\frac{B_r + B_v}{L_{HH}^2} + \frac{\partial T}{\partial V_r} - q_{ff} \frac{\partial T}{\partial \theta}\right)\dot{x} + \left(\frac{C_H + C_L}{L_{HH}^2}\right)x = T_0 \quad (22)$$

$\frac{\partial T}{\partial \theta}$ は負であるため、この式から、フィードフォワード制御によって正の減衰が付加されていることがわかる。すなわち、ロータ回転数の変動を抑制することが目的のフィードフォワード制御は同時に浮体のピッチ運動に対して正の減衰を与えており、これによって浮体のピッチ運動の変動成分も抑えられていることがわかる。

#### 4. フィードフォワード制御の最適化

本節ではフィードフォワードに用いる風速の計測点の違いが浮体動揺とロータ回転数の変動に与える影響を明らかにした。Leithead et al. [4]はロータ半径の75%位置で周方向に3点の風速値を平均してフィードフォワード制御の入力としたが、本研究では風速の計測位置を周方向の風速計測点数と半径方向の位置を変化させて応答に与える影響を明らかにした。

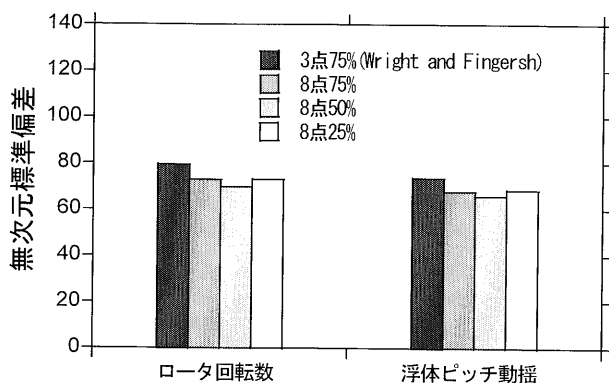


図4 ロータ回転数と浮体ピッチ動揺の標準偏差に与える風速の計測位置と点数の影響

図4には風速の計測位置を周方向の風速計測点数と半径方向の位置が浮体式洋上風力発電所の応答に与える影響を示す。周方向に風速の点数を増やし、8点での風速値を平均した方がロータ回転数および浮体のピッチ動揺の標準偏差が低減できることがわかる。

ブレードの半径方向の位置についてはブレード半径の50%で計測した場合に最も効果が高いことがわかる。これは半径が小さすぎるとロータ全体に作用する風速変動を十分に捉えられないのに対し、半径が大きすぎ

ると変動そのものが平均化されるため、最適点があると考えられる。

#### 5. まとめ

本研究では浮体式洋上風力発電設備に対しフィードフォワード制御を適用し、以下の結論を得た。

- 1) 浮体式洋上風力発電設備に従来のタワー加速度を利用して減衰を付加する制御を行うと、浮体ピッチ運動の変動は抑制されるものの、ロータ回転数の変動が増大する。
- 2) 風速の計測値を用いたフィードフォワード制御はロータ回転数の変動を抑制することを直接の目的としているが同時に浮体のピッチ運動に対して正の減衰を付加する効果があることを明らかにした。
- 3) フィードフォワードに使用する風速の計測は周方向の8点で、ブレード長さの50%の位置で行うのが最適であることを示した。

#### 参考文献

- [1] J. M. Jonkman, Influence of control on pitch damping of a floating wind turbine, 2008 ASME Wind Energy Symposium, Reno, Nevada, Jan. 7-10 2008
- [2] 清木荘一郎, 坂本潔, 角谷啓, 佐伯満, 5 MW ダウンウィンド風力発電システムの実証とスマート運転制御への展開, 日立評論, 99(02), 38-43, 2017.
- [3] H. Kakuya, S. Yoshida, I. Sato, T. Utsunomiya, Demonstration Results of Individual Blade Pitch Angle Control: Improving Power Performance of Floating Offshore Wind Turbine, Grand Renewable Energy 2018.
- [4] W. E. Leithead, S. Dominguez, and C. Spruce, Analysis of tower/blade interaction in the cancellation of the tower fore-aft mode via control. In: European Wind Energy Conference 2004.
- [5] A. D. Wright and L. J. Fingersh, "Advanced control design for wind turbines Part 1: Control design, implementation and initial tests," Technical report NREL/TP-500-42437, March 2008.
- [6] A. N. Robertson et al., OC5 Project Phase II: Validation of Global Loads of the DeepCwind Floating Semisubmersible Wind Turbine, Energy Procedia, 137, 38-57, 2017.
- [7] Hansen, M. H., Hansen, A., Larsen, T. J., Øye, S., Sørensen, and Fuglsang, P., Control Design for a Pitch-Regulated, Variable-Speed Wind Turbine, Risø-R-1500(EN), Roskilde, Denmark: Risø National Laboratory, January 2005.