

ファジー関数を用いた風車制御モデルが発電出力と 荷重に与える影響に関する研究*

The effect of control algorithm with a Fuzzy function on the power and loading of a wind turbine

山口 敦** イマーン ヨウセフィー 石原 孟**
Atsushi YAMAGUCHI Iman YOUSEFI Takeshi ISHIHARA

1. はじめに

最近の風力発電設備においては発電機のトルクとブレードのピッチ角を制御することにより定格風速以下では発電効率を最大にするとともに、定格風速以上では発電出力を一定にすることが行われている。通常、実風車の制御アルゴリズムは風車の性能に直結することから各風車メーカーの高度な秘密事項であるため、公開されていない。一方で、風力発電設備支持物に作用する荷重を検証する際や、支持物に関する研究を行う際には具体的な制御モデルに基づくことが不可欠である。また、浮体式洋上風力発電設備においては、風車の制御が浮体動揺や荷重に大きな影響を与えることから、標準的な風車制御モデルが求められている。

現在までに、提案された一般的な制御モデルとしては、Hansen et al.[1] によるものがある。このモデルはJonkman et al.[2] によって実装され、ソースコードが公開され、世界中で広く使われている。また、我が国の土木学会の荷重指針においても、荷重評価のための標準的な制御モデル[3]が提案されているが、制御モデルの詳細が不明であるという問題点がある。また、これらの標準制御モデルを実風車に適用して、観測データにより検証した例は少なく、実風車の制御モデルの代わりに用いることができるかどうかはわかっていない。

本研究では、銚子沖 2.4MW 風車を対象として、今までに公開されている標準風車制御モデルを適用した場合の問題点を明らかにするとともに、改良標準風車モデルを提案し、これらの問題点を解決する。また、タワーの加速度を利用してピッチ制御を利用して付加減衰を与える手法を適用し、タワーおよびブレードに作用する荷重にどのような影響を与えるか明らかにする。なお、銚子沖 2.4MW 風車の制御以外の部分のモデル化については、文献[4]を参照されたい。

2. ベースライン標準風車モデル

本研究では Jonkman et al. [2] によって実装されているモデルをベースライン標準風車モデルとした。このモデルはソースコードが公開されており、詳細な点まで明らかにされている。この制御モデルは、ロータ回転数とブレードピッチ角に応じて異なる制御が行われている。図 1 にベースラインモデルにおける制御方法概要を示す。ロータ回転数が定格以上の場合、PI 制御によってピッチ制御を行うとともに、発電機のトルクは常に定格トルクを指令値とする。この制御領域を領域 3 と呼ぶ。また、ロータ回転数が定格の 94%未満の場合には、発電効率が最大となるようにトルク指令値を与えると同時にピッチ角指令値としては常に 0 を与える。この制御領域を領域 2 と呼ぶ。さらに、ロータ回転数が定格の 94%以上で定格回転数未満の場合には、ピッチ角指令値としては 0 度を与えるが、発電機のトルク制御は、領域 2 と領域 3 との間を線形内挿した値を指令値とする。この制御領域を領域 2.5 と呼ぶ。さらに、ブレードピッチ角が 1°以上の場合には発電機回転数に関わらず、常にブレードの PI 制御を行う領域 3 とする。

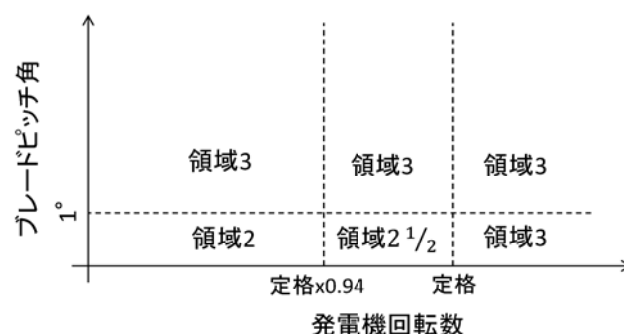


図1 ベースラインモデルの制御方法の概要

図2には領域2と領域2.5における発電機のトルク制御を示す。領域2においては、常に最大効率となる

*平成29年12月7日第39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

ように(1)式によって発電機回転数に応じたトルクが指令値として与えられている。

$$Q = \frac{\pi \rho R^5 C_{pOpt}}{2r^3 \lambda_{Opt}^3 \eta_M} \Omega_G^2 \quad (1)$$

また、領域 3 においては常に定格回転数に対して定格トルクが与えられている。ここで、定格回転数と定格トルクの関係は(1)式を満たさないため、領域 2 と領域 3 を連続的につなげるには工夫が必要となる。Jonkman et al.では、領域 2 と領域 3 の間に領域 2.5 を導入し領域 3(定格トルク・定格回転数)と(1)式で表される領域 2 の間を直線で結んでいる。(図 2)

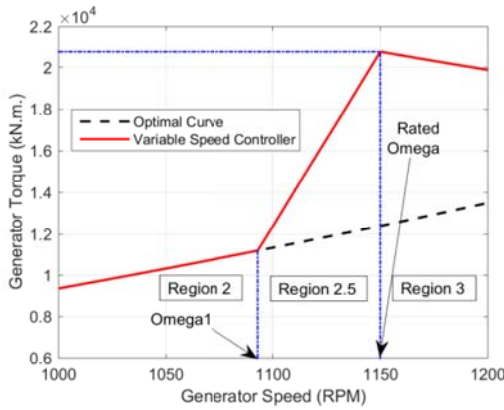


図 2 制御領域 2 と 2.5 における発電機回転数とトルクの関係

3. 本研究で提案する制御モデル

ベースラインモデルを銚子 2.4MW 風車に適用し、動解析を行った結果、いくつかの問題点が明らかになったため、改良を行った。本節ではそれについて述べる。

3.1 トルク制御におけるファジー関数

図 3 に示すように、ベースラインモデルでは、制御領域 2 と制御領域 2.5 の接続部において、発電機回転数の関数としての発電機トルクが滑らかに変化していないため、制御領域 2 と 2.5 にまたがるような低風速の際にロータ回転数の振動が発生する。本研究では制御領域の境界において発電機トルクの変動をなめらかに与えるため、ファジー関数を用いた。本研究の手法では、発電機トルク Q は(3)式で与えられる。

$$Q = \frac{W_2 Q_{R2} + W_{2.5} Q_{R2.5} + W_3 Q_{R3}}{W_2 + W_{2.5} + W_3} \quad (3)$$

ここで、 Q_{R2} 、 $Q_{R2.5}$ 、 Q_{R3} はそれぞれ、元々の制御領域でのトルク指令値であり、 W_2 、 $W_{2.5}$ 、 W_3 は重み関数である。

ファジー関数を用いてトルク指令値を与えることにより、ロータ回転数の不自然な振動を回避することが可能になった。

3.2 制御領域 2.5 におけるピッチ制御

ベースラインモデルを用いて定格風速よりやや高い平均風速 16m/s のシミュレーション(図 4)を実施した際、ピッチの振動が見られた。これは、制御領域 3 と制御領域 2.5 の間の切り替えが頻繁に発生したためと考えられる。銚子沖 2.4MW 風車においては、制御領域 2.5 において負のピッチ角となっており、この領域においてピッチ制御を行わないと、この例のように定格風速よりやや高い風速域においてピッチの振動が発生する(図 4(b))。

本研究では、制御領域 2.5 においてもピッチ制御を行うとともに、ピッチ角の最低値のモデルとして(2)式を提案した。

$$\theta_{min} = \begin{cases} \min \left(\frac{\theta_s - \theta_{s-1}}{\omega_s - \omega_{s-1}} (\omega - \omega_{s-1}) + \theta_{s-1}, 0 \right) & \omega < \omega_s \\ \min \left(\frac{\theta_{s+1} - \theta_s}{\omega_{s+1} - \omega_s} (\omega - \omega_s) + \theta_s, 0 \right) & \omega \geq \omega_s \end{cases} \quad (2)$$

ここで、 ω_{s-1} 、 ω_s 、 ω_{s+1} はそれぞれ風速 9m/s、10m/s、11m/s の時の発電機回転数であり、 θ_{s-1} 、 θ_s 、 θ_{s+1} はそれぞれ風速 9m/s、10m/s、11m/s の時の最低ピッチ角である。

3.3 ピッチ制御における PI ゲイン値

ベースラインモデルでは、ブレードピッチ角の PI 制御における比例ゲインと積分ゲインを、Hansen et al.[1]に基づいて求めている。このゲインの計算方法は

$$K_p = \frac{2I_{drivetrain} \Omega_0 \zeta_{\varphi} \omega_{\varphi n}}{N_{gear} \left(-\frac{\partial P}{\partial \theta} \right)} \quad (4)$$

$$K_I = \frac{2I_{drivetrain} \Omega_0 \omega_{\varphi n}^2}{N_{gear} \left(-\frac{\partial P}{\partial \theta} \right)} \quad (5)$$

となっている。

一方、吉田[3]は、ループ整形法により PI ゲインを求める手法を提案している。本研究では、ループ整形法により PI ゲインを求めることとした。本研究で用いたゲインを用いることにより、平均風速 24m/s のケース(図 5)において、ロータ回転数の変動が抑えられていることがわかる(図 5(c))。

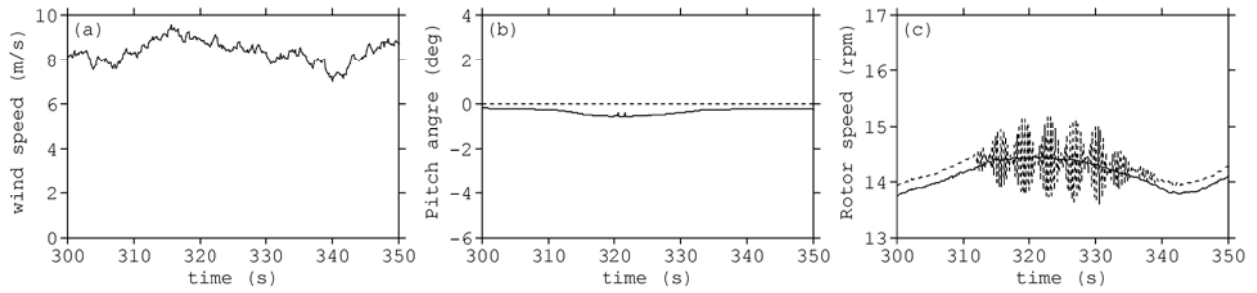


図3 平均風速 8m/s の際の(a)風速; (b)ピッチ角, (c)ロータ回転数

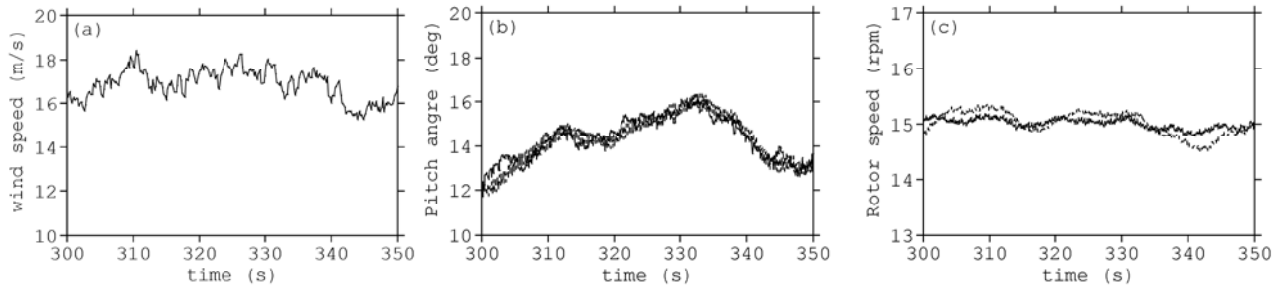


図4 平均風速 16m/s の際の(a)風速; (b)ピッチ角, (c)ロータ回転数

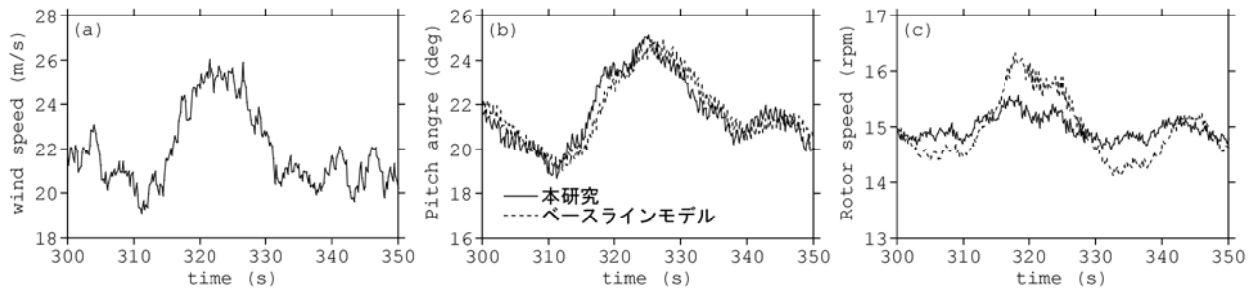


図5 平均風速 24m/s の際の(a)風速; (b)ピッチ角, (c)ロータ回転数

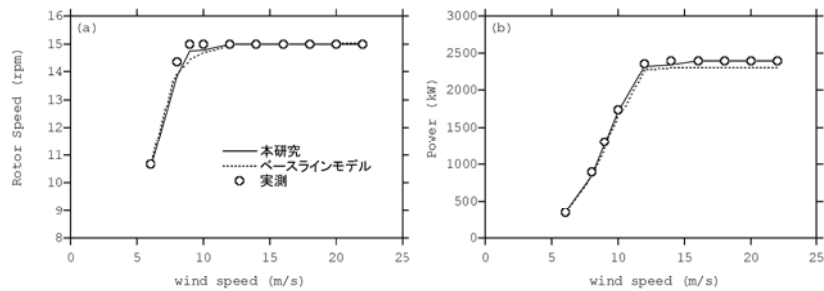


図6 風速別の(a)回転数, (b)出力の予測値と観測値の比較

3.4 実測による検証

以上本研究で提案した制御モデルが実風車のシミュレーションに用いることができるか、検証した。検証には銚子沖の観測タワーで観測された風速と、風車で計測された出力の値を用いた。図6にその結果を示すが、ベースラインモデルと比較して、定格出力より低

い風速域において発電量の平均値がよく推定できていることがわかる

4. ピッチ制御による付加減衰

Leith et al.[5] によりピッチ制御を利用してタワーに付加減衰を与える手法が提案されている。風車タ

ワの振動を 1 自由度と仮定すると、ナセルの前後方向の運動は(5)式のように記述できる。

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F_{th}(\theta) \quad (6)$$

ここで、 $F_{th}(\theta)$ はピッチ角の関数としてのスラスト力である。ピッチ角を $\Delta\theta$ 変化させると、(5)式は

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F_{th}(\theta) + \frac{\partial F_{th}}{\partial \theta} \Delta\theta \quad (7)$$

となる。計測されたナセルの加速度からナセル速度を数値積分により計算し

$$\Delta\theta = \alpha \dot{x} \quad (8)$$

となるようにピッチ角を変更させると、(7)式は

$$m\ddot{x} + \left(c - \frac{\partial F_{th}}{\partial \theta} \alpha\right) \dot{x} + kx = F_{th}(\theta) \quad (9)$$

となり、付加減衰を与えることができる。本研究ではこの方法に従い、ナセルにおける加速度を利用してフィードバックを行った。

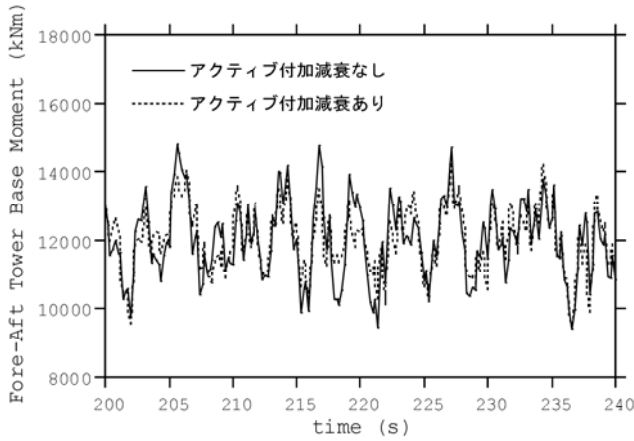


図 7 加速度フィードバックによる付加減衰の例

この時のタワー基部前後方向のモーメントの時刻歴を図 7 に示す。付加減衰により振動が抑えられていることがわかる。さらに、定格風速付近の 14m/s とカットアウト直前の 22m/s に対して前後方向のタワー基部モーメントの標準偏差とフラップワイズのブレード基部モーメントの標準偏差を比べたものを図 8 に示す。タワーに付加減衰を与えることによって、高風速時のタワー基部モーメントの標準偏差が減少しているが、ブレード基部モーメントの標準偏差は全く変化していないことがわかる。このことから、ブレードのピッチ制御を用いて付加減衰を与える手法は有用であることがわかった。

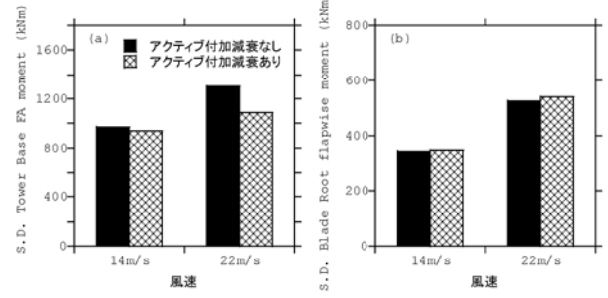


図 8 (a) タワー基部モーメントの標準偏差と (b) フラップワイズブレード基部モーメントの標準偏差

5. まとめ

本研究ではファジー関数を用いた風車制御モデルを提案するとともに、ナセル加速度を用いたフィードバック制御を行い、以下の結論を得た。

- 1) 制御領域 2.5 においてピッチ制御を行うとともに、トルク制御に際してファジー関数を用いることによって、ロータ回転数の変動を抑えることが可能であることを示した。
- 2) ループ整形法により求めたゲインを用いることにより、回転数の変動を抑えることが可能であることを示した。
- 3) ピッチ制御によってタワーに付加減衰を与える手法が有効であることを示した。

謝辞

本研究は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託業務で得られた研究成果である。関係者の皆様に感謝の意を表す。

参考文献

- [1] M. H. Hansen, A. Hansen, T. J. Larsen, S. Øye, P. Sørensen and P. Fuglsang, Control design of a pitch-regulated, variable speed wind turbine, Risø National Laboratory, Risø-R-1500(EN), 2005.
- [2] J. Jonkman, S. Butterfield, W. Musial and G. Scott, Definition of a 5-MW reference wind turbine for offshore system development, National Renewable Energy Laboratory, NREL/TP-500-38060, 2009.
- [3] 吉田和信：ループ整形法による PID 補償器の設計，第 52 回システム制御情報学会研究発表講演会，2008
- [4] 山口敦，プラサンティ ウィディヤシ サリ，石原孟：風力発電設備支持物に作用する発電時の荷重予測と実測による検証，第 23 回風工学シンポジウム論文集，pp. 133-138, 2014.
- [5] 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.