

FAST を用いた中型風車の制御の検討と評価

EXAMINATION AND EVALUATION OF MEDIUM WIND TURBINE SYSTEM USING FAST

メンドーサ* クリстьяン* 岩永 直己* 細見 雅生*
Christian Mendoza Naoki Iwanaga Masao Hosomi

風速の変動が大きい場合においても、安定した発電量で運用できるような、優れた制御手法の開発が必要である。そこで、ピッチ制御が重要な役割を担っている。そのため、本稿では風車シミュレーション (FAST) を用いて、ピッチ制御の遅れ、ピッチ PI 制御のパラメータ、風の乱れの強さがピッチ制御に及ぼす影響について解析を行い、実機風車との比較検討することにより発電機の応答や発電量に及ぼす影響を明らかにする。

キーワード：ピッチ制御, FAST, ピッチ制御の遅れ, 発電量

1. まえがき

風車の制御ではピッチ制御が重要な役割を担っている。効率的なピッチ制御によりブレードへの負荷を軽減し、長寿命化するなど安全性を高めることができる。そこで、ピッチ制御の検討を目的として FAST におけるピッチ制御の改良を行った²⁾。FAST には標準のピッチ制御関数が組み込まれているが、弊社風車開発時に設計したピッチ制御関数を組み込み、解析結果の比較を行った³⁾。また、ピッチ制御の遅れ、ピッチ PI 制御のパラメータ、風の乱れの強さがピッチ制御に及ぼす影響について解析を行い、比較検討を行った⁴⁾。

2. 概要

本研究では定格発電量 300kW の水平軸風車を対象とした。まず、風車を構成する要素について説明する。図-1 に示すように風車は、支持構造物であるタワー、回転翼となるブレード 3 枚、ブレードの接合中心となるハブ、発電機等が収納されているナセル、ブレードの回転を発電機に伝えるロータ軸で構成されている。

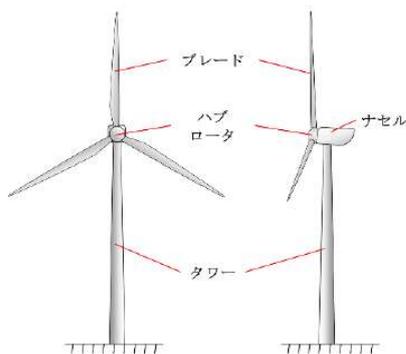


図-1 風車を構成する要素

風力発電を安全かつ効率的に行うためには、ブレードのピッチ制御やロータのトルク制御に対して有効な制御手法を個別に開発していく必要がある。

以上の背景に基づいて本研究では風力発電機 KWT300 を対象とし、風車シミュレーションを用いて制御手法が風力発電機の応答や発電量に及ぼす影響を明らかにし、より安全かつ効率的な制御手法を開発することを目的としている。

応答解析にはアメリカの国立再生可能エネルギー研究所 NREL (National Renewable Energy Laboratory) が開発している FAST (Fatigue Aerodynamics Structures and Turbulence) を使用し、計算条件は、国際的な技術規格であるノルウェー・ドイツ船級協会, DNV (Det Norske Veritas と Germanischer Lloyd が合併後、2021 年に社名を'DNV'に変更) のガイドライン⁵⁾に従っている。

3. 解析手法

FAST は図-2 に示す解析フローのように、風速時刻歴データを入力データとして、FAST と様々なモジュールとの計算を相互に行うことで、発電出力や荷重、構造変位などの時刻歴データを出力することができる。これを用いて解析対象風車のモデルを作成し、得られた解析結果を比較検討する。本解析では図-2 の入力風を設定する InflowWind、断面力を計算する ElastDyn、空気力を計算する AeroDyn、制御方法と発電量の計算を行う ServoDyn の 4 つのモジュールを用いた解析モデルを作成する。また、本解析で使用している FAST は OpenFAST v2.3.0 である⁶⁾。

* 環境インフラ本部 再生可能エネルギー部

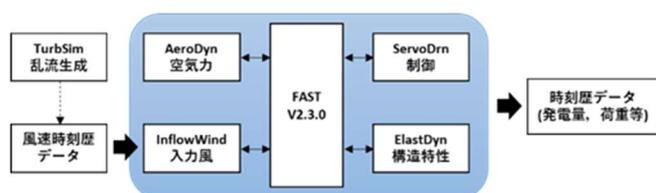


図-2 FASTの解析フロー

本解析の対象風車は、弊社が開発した KWT300 である。KWT300 は、ブレード 3 枚を持つプロペラ形水平軸風車であり、upwind 方式で定格出力 300kW である。ブレードのピッチ角は、油圧により 3 枚同時に同角度で制御している。特徴としては、乱れの強い風況や狭い道路、電力事情を最大限に考慮した日本型の風車である。主な仕様を表-1 に示す。

表-1 KWT300 の基本仕様

定格出力	300 [kW]
定格風速	11.5 [m/s]
定格回転数	40.5 [rpm]
カットイン風速	3.0 [m/s]
カットアウト風速	25 [m/s]
耐風速	70 [m/s]
ハブ高さ	41.5 [m]
ロータ直径	33 [m]

また、国際的に用いられている設計基準である IEC の条件を満足すると共に、日本特有の風の特性も考慮して、WTGS (Wind Turbine Generator System) クラスの条件を設定し、設計している。風の条件を決めるパラメータは、国内の地理的、気象的条件を考慮して、年平均風速をクラス II としながら基準風速と乱れ特性を IEC 基準より大きく設定している (表-2)。

表-2 WTGS クラスの設計基礎パラメータ

WTGS クラス	I	II	III	IV	駒井 KWT300 : II A+		
基準風速 V_{ref} m/s	50	42.5	37.5	30	50		
年平均風速 V_{ave} m/s	10	8.5	7.5	6	8.2		
乱れ 特性	A	/15	0.18	0.18	0.18	0.18	0.20
		a	2	2	2	2	1.5
	B	/15	0.16	0.16	0.16	0.16	—
		a	3	3	3	3	—

4. 解析モデルの改善

KWT300 においては、Grid 接続 (発電開始) から定格運転 (300kW) まではトルク制御による運転制御を行い、定格運転以後はピッチ制御による運転制御を行う。制御システム内部では Control zone 制御と呼称し、図-3 に示すように zone I と zone II においてロータ回転数に依存したトルク制御を行い、zone III の定格運転ではピッチ制御によるトルク一定制御を行う。

トルク制御は、ロータの回転数から目標トルク値を算出し

た後 PI 制御によるトルク値設定を行い、ピッチ制御は、ロータの定格回転数を目標値とした PI 制御によって目標ピッチ角を設定する (図-4)。

これらの実機の制御ロジックを FAST に組み込み、実機風車の再現シミュレーションを試みた。

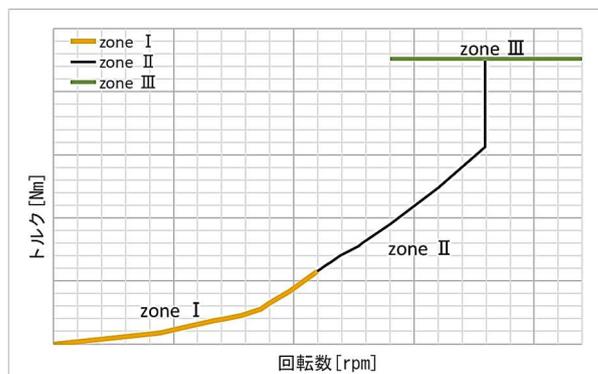


図-3 運転制御モデル

5. 実機風車挙動と解析モデルによる計算の比較

実機風車挙動と解析モデルの比較を行うため、実機風車の条件をシミュレーションで制御ロジックの組み込みを再現し、KWT300 の対風応答解析を行った。

5.1 解析条件と時系列

本解析は、実機風車の風条件を再現し、FAST のシミュレーションで得た解析結果と実機風車で得られた結果の比較を行った。風車の実測データからは 2020 年 5 月 10 日 18 時 21 分から 29 分の 500 秒間における統計量を用いた。検討した項目および時系列データを以下に示す。

図-5 に解析に使用した入力風データおよび、実機風車のピッチ角、発電量データを示す。風速 15m/s 以上で風速の変化に対してロータ回転数の定格を維持するためにブレードピッチ角を細かく調整していることが判る。また発電量は 300kW に対し ±50kW 程度の変動幅がある。

FAST のシミュレーションでは、制御ロジックを再現し、実機風車の風速を以下のように考慮しながら解析を行った。

実機風車との比較においては、風況ポールと風車のナセル上で計測した風速を用いている。風況ポールは実機風車から 2.5D 離れた位置に建設しており、実機風車のハブ高さと同じく 41.5m 高さの風速・風向を観測している。風車のロータに作用する時々刻々の風速は、ナセル上の方が正確に反映していると考えられるが、風速はロータの影響により低減するとともに、風速の変動の大きさも風況ポールでの計測値の方が正確であると考えられる。そこで、ナセル上における風速の計測値を式 (1) で補正した風速 $V_i(t)$ を実機に対応する解析では用いることにした。

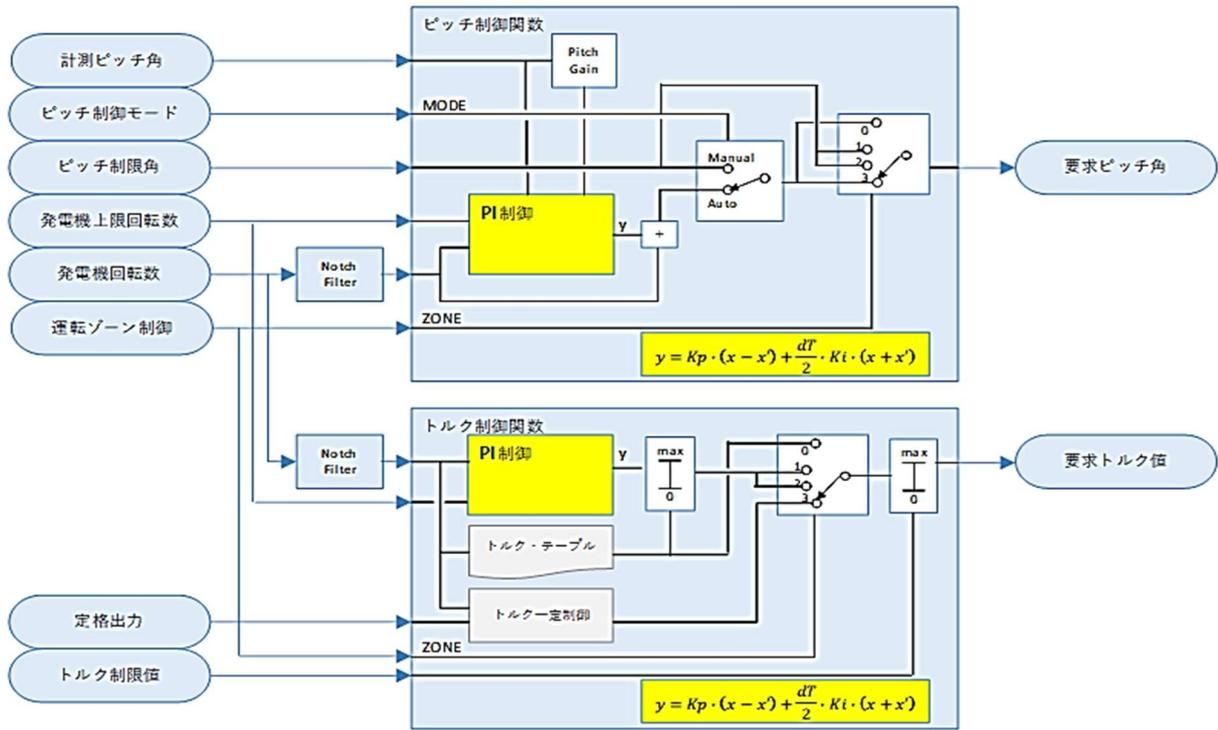


図-4 ピッチ・トルク制御ダイヤグラム

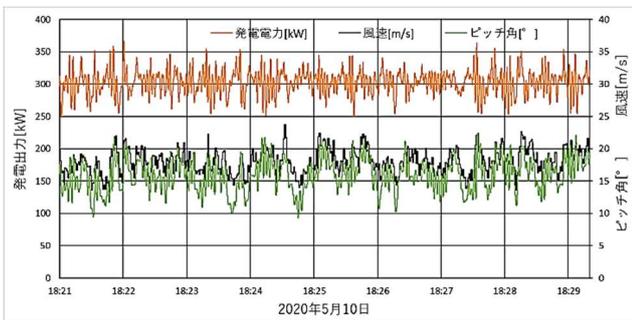


図-5 時系列データ（実機）

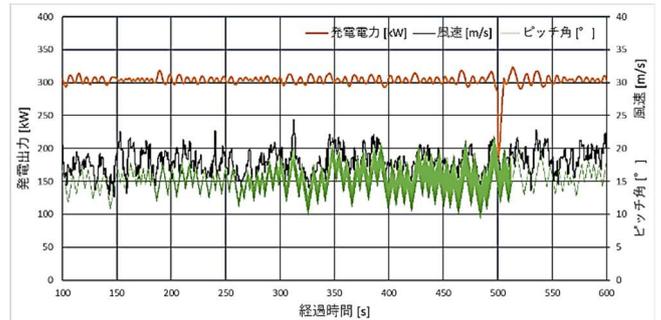


図-6 時系列データ（解析）

$$V_i(t) = (V_n(t) - \bar{V}_n) \times \frac{Std_{p-i}}{Std_{n-i}} + \bar{V}_p \quad (1)$$

ここで、

$V_n(t)$: 時刻 t における風車ナセル上の主流方向の風速

\bar{V}_n : ナセルの平均風速

Std_{n-i} : ナセルの風速の標準偏差

\bar{V}_p : 風況ポールの平均風速

Std_{p-i} : 風況ポールの風速の標準偏差

シミュレーション解析の結果の時系列を図-6 に示す。

5.2 解析結果の比較

解析結果と実機の比較を発電量，ロータ回転速度，ブレードのピッチ角度について，箱ひげ図を用いて図-7 に示す。

FAST と実機風車の発電量とロータ回転数の変動には差が見られるが，ピッチ角の制御範囲は似たものとなった．発電量とロータ回転数が FAST の解析結果では変動幅が小さいのは，この解析ではピッチ制御の時間遅れを全く考慮しておらず，実機風車の機械的な制御の遅れが反映されていないためと考えられる。

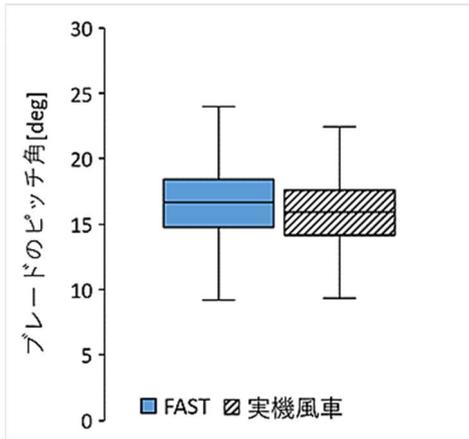
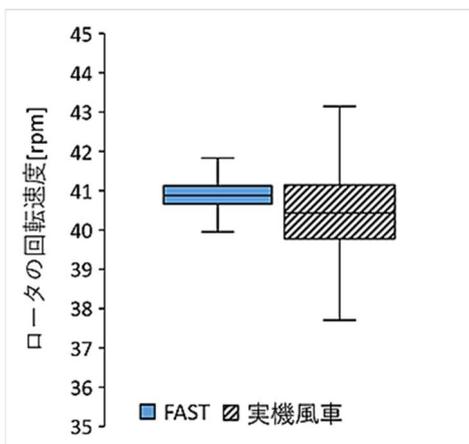
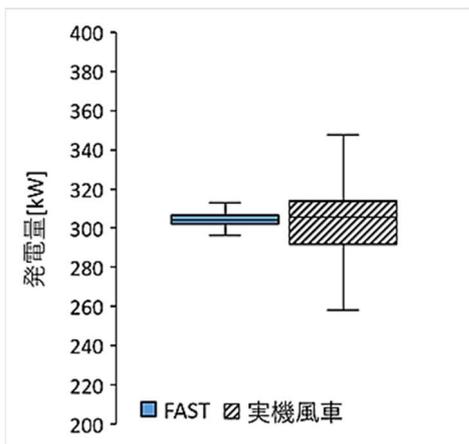


図-7 解析結果と実機風車の比較

6. 制御ロジック改良の検討

実機風車ではピッチ制御に油圧システムを用いており、制御命令をピッチ角の動作に伝達するまでの機械的な遅れがある。また、ピッチ制御関数に使用しているPI制御パラメータ (K_p) (式(2)参照) や気流の乱れの強さが解析結果に影響を及ぼしている可能性について以下のように検討を行った。

6.1 解析条件と結果の時系列

①ピッチ制御の遅れの影響

5章で使用した風速条件をFASTに入力し、ピッチ制御関数に遅れを与えた時の発電量へ影響を検討した。解析は、ピッチ制御遅れなし、ピッチ制御遅れがそれぞれ0.2秒、0.4秒、1.0秒ある場合を設定した。

図-8に、ピッチ制御の遅れがない場合とピッチ制御遅れが0.4秒の時の解析結果の時系列を示す。発電量出力の変動幅が大きくなり、プラス方向では実機風車の変動幅と一致した。しかし、発電出力のマイナス方向の変動幅が実機風車より大きくなっており、ピッチ制御関数の遅れにより、風車の運転ゾーン制御3から外れたことを示すものと考えられる。こうした差異が生じる原因については、さらに検討が必要である。

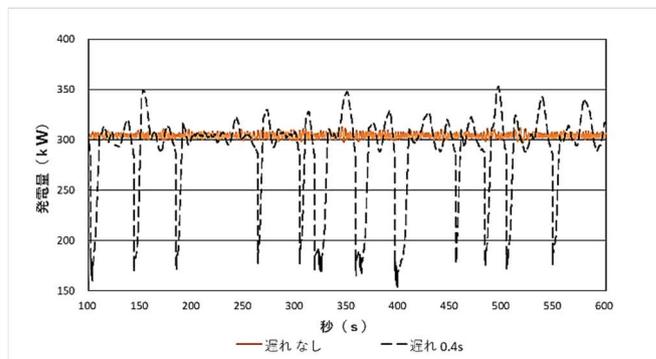


図-8 ピッチ制御の遅れの影響

②パラメータ K_p の影響

ピッチ制御関数は、図-4に示しているPI制御を使用している。ピッチ角計算の概略の式を以下に示す。

$$y = K_p \cdot (x - x') + \frac{dT}{2} \cdot K_i \cdot (x + x') \quad (2)$$

ここで、

y : 入力値

x, x' : 今回の出力値, 前回の出力値

K_p : 比例制御パラメータ

K_i : 積分制御パラメータ

dT : 制御タイミング

ここではパラメータ K_p の変化による影響を検討した。

解析条件は、 $K_p=0.048$ を基準値とし、 $K_p=0.012$ (1/4倍)、 $K_p=0.024$ (1/2倍)、 $K_p=0.096$ (2倍)、 $K_p=0.192$ (4倍)、および $K_p=0.384$ (8倍) とした。図-9に $K_p=0.048$ と $K_p=0.384$ における発電出力による比較結果を示す。結果は、 $K_p=0.384$ の時に発電量の変動幅がやや小さくなったが、発電出力の変動傾向には大きな違いがないことがわかった。

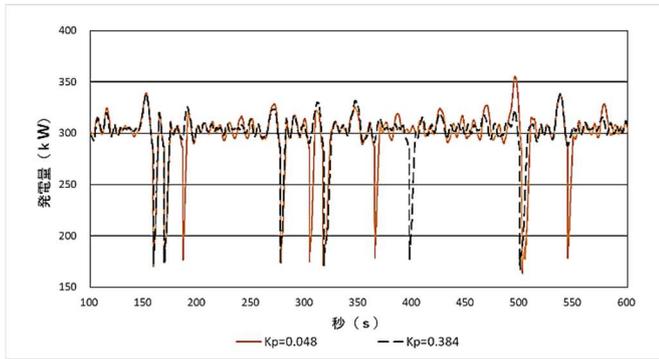


図-9 パラメータ K_p の影響

③乱れの強さの変化による影響

風速の乱れ強さの変化による発電量の影響を検討するため、解析に使用する入力風を、式(3)のように補正して解析を行った。

$$V_{i1}(t) = (V_n(t) - \bar{V}_n) \times \frac{Std_{p-i}}{Std_{n-i}} \times N + \bar{V}_p \quad (3)$$

ここで、

$V_{i1}(t)$: 乱れの強さの倍率を考慮した入力風速

N : 乱れの強さを変化させる倍率

乱れの強さの影響を確認するため、乱れの強さ 10%を初期値とし、乱れの強さ 3% (1/4 倍), 5% (1/2 倍), 20% (2 倍), および 30% (4 倍) の条件を設定した。

ここでは乱れの強さ 10%と 20%の解析結果を図-10 に示す。当然ではあるが、乱れの強さが 20%のときの方が、ピッチ制御の効果が小さくなるのがわかる。

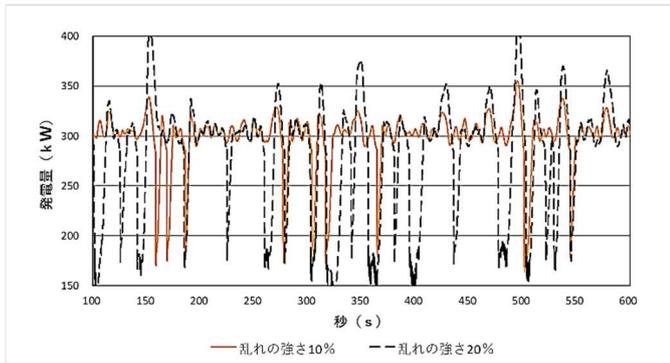


図-10 乱れの強さの影響

6.2 改良検討の解析結果の比較

解析結果と実機風車の発電量による比較を箱ひげ図で示す。

①ピッチ制御の遅れの影響

ピッチ制御の遅れによる発電量の影響を検討した。ピッチ制御の遅れ条件が、0 秒, 0.2 秒, 0.4 秒および 1.0 秒の場合を図-11 に示した。図よりピッチ制御の遅れが大きくなると、発電量の変動も大きくなるのがわかる。遅れなしの場合の発電量は、実機風車とは傾向が異なり、変動が非常に小さい。

図-8 でみたように、遅れを考慮した場合の解析では、定格出力より低い出力では、出力が大幅に小さくなる変動が生じる結果となっており、制御ロジックの修正が必要と考えている。一方、定格出力より大きい発電量については、制御の遅れがあるケースが実機風車の変動に近い。

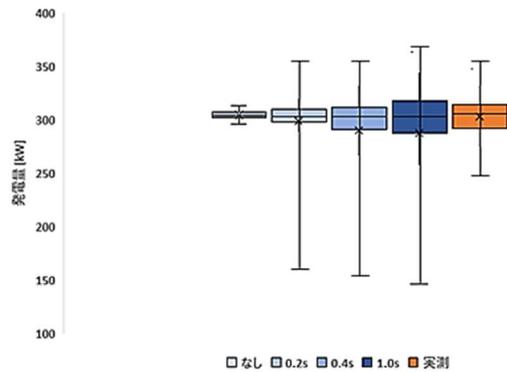


図-11 ピッチ制御の遅れの変更に伴う発電量の解析結果比較

②パラメータ K_p の影響

ピッチ制御関数の PI 制御パラメータの影響を検討した。乱れの強さを 10%に固定し、パラメータ K_p を変更した解析を行った結果を図-12 に示す。パラメータ K_p を変化させても、発電量の差に大きな変化はない。図-9 の時系列によると、パラメータ K_p を変化させると発電量の変動のタイミングに影響する傾向がみられる。制御遅れの設定を確定させた後に発電量の変動が実機と整合するようなパラメータの検討を今後行う予定である。

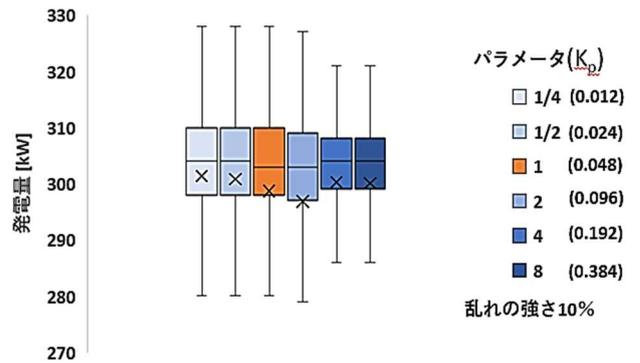


図-12 パラメータ変更に伴う発電量の解析結果比較

③乱れの強さの影響

ピッチ制御のパラメータ K_p を 0.048 に固定し、乱れの強さを 5 種類変化させて、発電量に及ぼす影響を検討した。図-13 より、乱れの強さを大きくすると、変動も大きくなるのがわかる。乱れの強さを大きくすると同じ平均風速の条件であっても、ある乱れの強さからは発電量の変動に非常に大きくなっている。実際の制御においては乱れの強さ 20%程度まで

は安定に制御を行えるように調整・改良が必要と考えている。

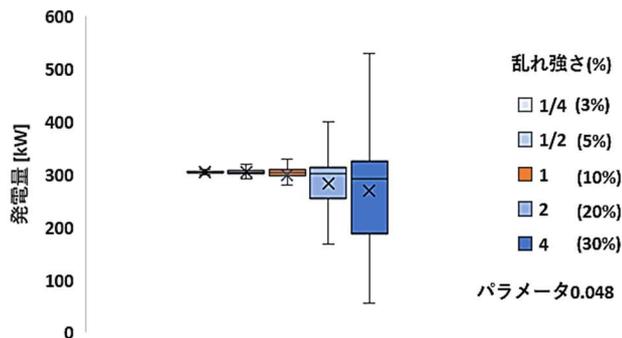


図-13 乱れの強さ変更に伴う発電量の解析結果比較

7. あとがき

本研究では、まず、解析モデルにおけるピッチ制御部分の改善を行い、実機風車と解析モデルの比較を行った。解析で入力する風速は、ナセル上風速を風車から 2.5D 離れた風況ポール上の風速を用いて補正して求めた。

①実機制御ロジック組込みの効果

- 実機風車の機械的制御の遅れを考慮しない場合は、FAST によるピッチ制御は、発電量などが実機風車より安定した結果となった。

②制御ロジック改良の検討

- ピッチ制御の機械的遅れの条件を加えることで実機風車の発電量変動に近い結果が得られた。
- 定格出力より低い出力では、出力が実機を大幅に下回る変動が生じたため、制御ロジックの修正が必要である。
- K_p の変化による影響は小さかったが、発電量の変動のタイミングに影響していることから、機械的制御の遅れの条件を確定させた後に、こうしたパラメータの最適化の検討が必要と考えている。
- 乱れの強さの変化は、発電量に及ぼす影響は大きい。実際の制御においても乱れの強さ 20%程度まで安定制御を行えるように調整・改良が必要と考えている。

謝辞

本研究を進めるにあたり、東京理科大学理工学部木村教授、および同研究室の学生の皆様には、終始ご指導を頂きました。また、多くの解析データをご提供頂きました。関係各位に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 木村吉郎, 鳥飼博史, 幽谷栄二郎, 細見雅生, 応答解析における風速の空間相関が風車ブレード応答に及ぼす影響と実測結果の比較検討, 第 39 回風力エネルギー利用シンポジウム, pp.335-338, 2017.12
- 2) 入江亮太, 中型風車のコントロールが応答や発電量に及ぼす影響の解析, 2020 年度東京理科大学大学院修士論文, 2021
- 3) 木村吉郎, 入江亮太, 岩永直己, 岩井憲一, 細見雅生, FAST を使ったピッチ制御の検討と評価, 第 43 回風力エネルギー利用シンポジウム, 2021
- 4) 猿橋海哉, FAST を用いた中型風車の応答解析の精度向上, 2021 年度東京理科大学大学院修士論文, 2022
- 5) Germanischer Lloyd Rules and Guidelines Industrial Services 2003
- 6) Jason M Jonkman, Marshall L. Buhl Jr, National Renewable Energy Laboratory, FAST User's Guide ,2005