

タイトル	ウィンドファーム制御装置を活用した乱流風況での風力発電機の運転
抄録	<p>山間部に建設された風力発電設備に潜在する乱流による問題について考察し、その対策としてウィンドファーム制御装置を用い、乱流の自動判定と発電出力の抑制制御とを組み合わせることで風力発電機の過渡的な異常停止の頻度を軽減し、また出力抑制運用にも関わらず発電電力量を維持出来ることを確認した。この乱流の自動判定には IEC61400-1 で定義される乱流強度値ではなく風況と風車の運転状態から直感的に判断できる設定パラメータを用いた。これにより調整の際にも分析や統計的計算の必要なく速やかに運用状態を変更することが出来る。また主軸受に損傷が発生した風力発電機にこのウィンドファーム制御を適用することで冬期の運転継続においても軸受振動の拡大を軽減し安定した風況では定格運転を継続することも出来た。</p> <p>This study considers the problems caused by turbulence in which is latent in wind power generation facilities constructed in mountainous areas. As a solution, a wind farm control system is used to reduce the frequency of transient abnormal trips of wind turbines by combining automatic detection of turbulence and power curtailment control. It was confirmed that the energy production can be maintained regardless of the control operation. For this automatic detection of turbulence, it used setting parameters that can be intuitively decided from wind conditions and wind turbine operating conditions, rather than turbulence intensity values defined in IEC61400-1. As a result, it was possible to quickly change the operational status without the need for analysis or statistical calculations at site adjustments. In addition, by applying this wind farm control to a wind power generator with damaged main bearings, it was possible to reduce the increase in bearing vibration even during operation in winter, and to operate in rated operation under stable wind conditions.</p>
著作者	山田敏雅, 薬師宏治 ^{*1} , 池田史晃 ^{*2} , 野沢亨介 ^{*2} , 小林孝士 ^{*2}
所属機関	<p>東芝エネルギーシステムズ株式会社 エネルギー・アグリゲーション事業部 風力発電技術部</p> <p>^{*1}東芝エネルギーシステムズ株式会社 DX統括部 デジタルサービスオペレーションセンター</p> <p>^{*2}東芝エネルギーシステムズ株式会社 府中工場 発電システム制御部</p>
責任著者	山田敏雅
eメール	toshimasa.yamada@toshiba.co.jp
キーワード	風力発電, 風車, 乱流, IEC61400-25, ウィンドファーム制御, 出力抑制, 転がり軸受, JIS1518, JIS1562
引用文献	<p>1) Edward Hart¹ 他, A review of wind turbine main bearings: design, operation, modelling, damage mechanisms and fault detection, Wind Energ. Sci., 5, 105–124, 2020, eawe</p> <p>2) IEC TS 61400-25-71 Edition 1.0 2019-09 Wind energy generation systems – Part 25-71: Communications for monitoring and control of wind power plants – Configuration description language</p>

はじめに

日本国内において山岳地帯の高原や尾根などが事業計画に見合った発電電力量を見込める風況のエリアと判断され各地で風力発電所の建設適地として選択されてきた。また日本の気候の特徴として冬場の西高東低の気圧配置による風況が年間平均風速の数値を押し上げており、これが夏場には低風速で十分な発電機会が得られないことを補う形となっている。図1はこの典型的な例として1台の風力発電機（以降、風車）の1か月毎の平均風速の1年間の推移とそのうちの8月、1月の風速出現の分布

を示したものである。8月に低気圧による強風が起こってはいるが6月から9月にかけておよそ6m/s以下の平均風速に対し、12月から2月にかけては9m/s以上の平均風速となっている。分布をみても8月は6m/s前後の頻度が高いのに対して1月では12m/s前後での風速の頻度が高いことがわかる。

一方で風車の機体は価格競争力の観点から日本国内においても欧米製の採用が主流でありその仕様はIEC61400-1にて規格化されているが、その土台となっている考え方は大西洋近辺の偏西風による風況の中で培わ

れた技術に基づいていると考えられる。特に機器の寿命計算は年間平均風速に基づいて算出されており、日本国内の山岳部の立地条件に冬期の風況が重なった場合には図1で示すように年間平均風速とは大きく異なる風況が数日間継続し、そのことが風車に与える影響はまだ十分な実績は得られていないと考えられる。

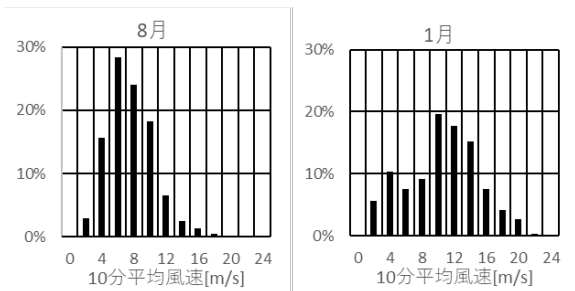
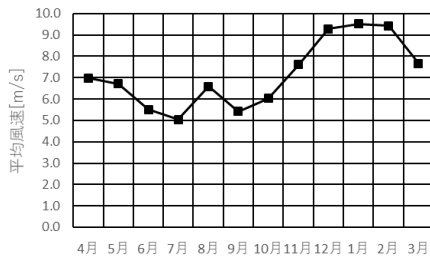


図1) 国内の年間平均風速と夏・冬の風速分布

IEC61400-1 の考え方を日本国内の風力発電所に当てはめると Normal 乱流モード条件を超える Extreme 乱流モード状況が冬期の風況で発生する。これは終局強度計算においては設計範囲内であるが(図2)、頻繁に発生した場合には風車の過速度保護トリップ、ナセル振動保護トリップといった一般的な保護機能による運転中断が繰り返される。

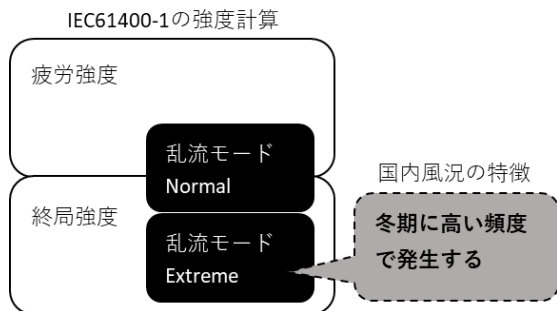


図2) IEC61400-1 の強度計算と国内風況との関連

そのような場合、トリップ後の再起動過程ではローター低速回転の不安定な運転を乱流下で繰り返すことになり、増速機や主軸受の寿命を急激に短くする原因を発生させ得ると考えられる。主軸受や増速機は微小な剥離が一旦発生すれば、安定した風況での運転中でも損傷が拡大していくために、金属表面のマイクロクラックのよう

な僅かな事象がきっかけでも損傷に至る。またこういった僅かな事象を回避するための強度計算は困難である。この IEC61400-1 の Extreme 乱流モードに相当する風況は台風などの接近がなくとも風車周囲の地形に起伏があれば発生する。日本国内の好風況のエリアとして山間部の尾根が選ばれることが、その風上に位置する尾根や谷間によって乱流風が発生したり、吹き上げ風となってブレードに不均一な風荷重を与えることに結び付いていると考えられる。

図3は乱流による風速・風向の8月と1月の例である。それぞれ単一計器の10秒間移動平均値であるが8月の風速に急激な変動はないのに対し、1月は頻繁に10m/s以上の変化幅を持つ風速変動が起きている。風向でも8月は瞬間的に計測値が動くことはあっても平均はほぼ一定なことにに対し、1月は30°近い変動が発生していることが解る。

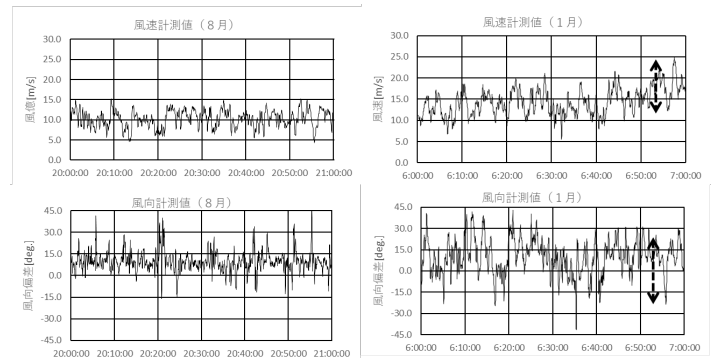


図3) 乱流の例

また風車の主軸支持に使われる転がり軸受は重量によるラジアル荷重だけではなくブレードの揚力および抗力によるスラスト荷重も受ける。更には上述の乱流風や吹き上げ風を受けた場合にはモーメント力による荷重も受けることになり、軸受の転動体とレールの接触面の繰り返し荷重による寿命計算だけでは想定できないマイクロクラックのような事象に至る可能性がある。これは風車の設計で想定した機器寿命を大幅に縮めるものであり、損傷時の改修工事には大型重機も必要となることから発電事業への影響も小さくない¹⁾。従って、過速度保護トリップ、ナセル振動保護トリップのような高風速乱流下での不規則回転、変動荷重を伴う運転を極力回避する運転制御が必要である。

尚、転がり軸受の寿命計算は JIS1518 にて定義されているが、寿命として計算出来るのは転動体とレールの動等価荷重に基づく繰り返し疲労強度計算であり(図4)、以下のような風車特有の条件はこの範囲を外れてしまう

ことが想像される。

- ・ 20 年間で要求される機器寿命
- ・ 長翼ブレードに起因するモーメント力
- ・ 温度環境、断続運転などによる境界潤滑状態

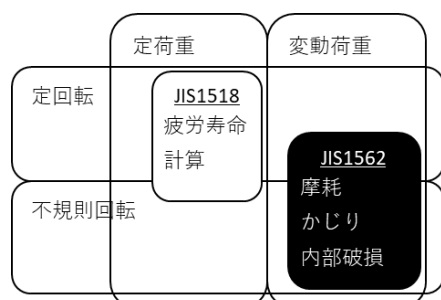


図4) JIS1518, JIS1562 の故障モードと風車主軸受で発生する損傷要因

ウィンドファーム制御装置

ウィンドファーム制御装置は風力発電所の系統連系点の有効電力、無効電力を調整する目的で設置され、発電所内の各風車の発電出力を任意に抑制することで、風速の変動に因って変動する発電出力に対し上限や変化率の制限を与えることができる。これを実現するために風車個々の出力制御機能に対して上限値を指令値として送信しており、連続制御とすればこの指令値を常時調整することもできる。

この出力上限値が与えられた場合には各風車は定格出力を維持するために動作するブレードの迎え角制御（ピッチ制御）を定格出力ではなく目標上限値に従って動作させ、ブレードに受ける風荷重を減らすことで出力を抑制する。連系点の有効電力・無効電力を制御する要求機能は IEC61400-25 のうちの IEC61400-25-2 Annex に提示されており日本国内の系統の下げ代不足対策としての出力抑制運用においても機種に依ってはこの機能が応用されている。また IEC61400-25 は通信のプロトコルと情報モデル、情報サービスを規定したものであり、この規格に則れば風車の機種型式に依らずウィンドファーム制御装置で一括の出力調整が可能となる。つまりウィンドファーム制御装置が風車メーカーの製品ではなくとも風車と直接通信が可能となる。また異なる制御ネットワークが風車・SCADA 間のネットワークに混入することを避ける場合にはゲートウェイを設ける構成も可能である²⁾。

今回用いたウィンドファーム制御装置は発電所運開後に追設した設備であり、東芝エネルギーシステムズ(株)

の TOSMAP-LXTM を適用。従来は火力発電所の監視制御向けに適用されていたシステムを最低限の構成で構築したもので、エンジニアリングコンソールを別置きにすれば小型ラックで床置き出来る設備である。基本機能は系統からの出力抑制指令の対応であり、今回の乱流対策のソフトウェア機能追加と調整の一連の作業は全て遠隔作業にて改造を行った。IEC61400-25 通信の実装には当該システムの IEC61850 クライアント機能を適用し、風車側の制御装置である Bachmann 製 PLC の MMS サーバとの通信を実現した。

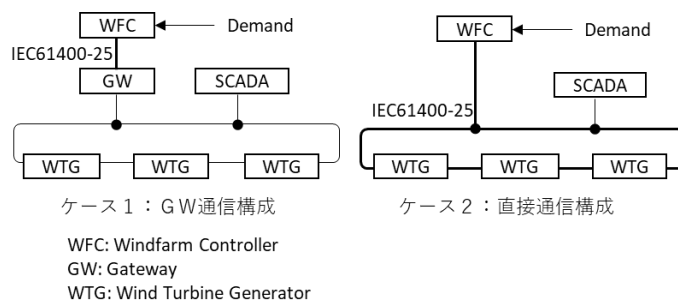


図5)ウィンドファーム制御装置システム構成

乱流対策機能

ブレードの迎え角を風を逃がす方向に調整すると翼効率は低下するがその分風車にかかる風荷重も低減する。これにより発電出力の抑制と合わせて乱流風による風車支持構造への負担も軽減する。

風車の支持構造強度に対して明らかに過負荷となる風況の場合には風向風速を判定値にして風車を停止させる（セクタマネジメント）が一般的である。これは建設時のサイト認証で風況調査および設計検討結果に基づいて定義される。これは発電を完全に停めてしまうために発電電力量を維持するためには最低限の停止範囲にせざるを得ない。地形によっては建設時には判断が難しかった乱流条件が運転を開始してから上述のトリップの頻発などで明らかになる場合があるが、それに対してセクタマネジメントの適用範囲を運開後に新たに設けることは発電電力量の観点で困難である。これをウィンドファーム制御の出力抑制機能を活用すればリアルタイムに風況を読み取り出力抑制に切り替えることが出来、発電は停止しないので機器の負担を重視した条件で運転しても発電機会損失は最低限に抑えることができる（図6）。

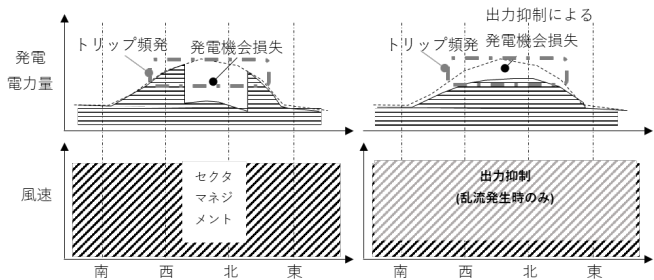


図6)セクタマネジメントと出力抑制の違い

今回用いた乱流検知の主な演算を式1に示す。定数 C , D_s を調整可能な設定パラメータとし前述の乱流強度の定義は用いていない。一定時間 T の中で $F(v)$ の積算値が C を超えた場合に乱流が継続している風況と判定する。またこれらの設定パラメータは風速、乱流条件で場合分けし、且つ風車1基ごとに調整している。これは風車ナセルの風速計で計測できる風速の変動と風車の挙動とを一般化することは同じサイト内であっても困難であることから、風車毎に風況と過速度、ナセル振動などの運転状態に合わせた設定変更を可能とした。これにより乱流強度を分析したりパラメータ値を計算する必要がないため、例えば試運転調整時などで出力が想定より強く抑制されていると評価した場合に風速値のトレンドを見ながら C と D_s の値をその場で緩和することも可能である。尚、この判定に基づく出力抑制指令値も風速帯に沿った固定値を設定することで出力抑制が機能している時間を判別しやすくしている。

$$\sum_0^T F(v) > C \quad (\text{式1})$$

$$F(v) = 1 : \frac{|\Delta v|}{v} \geq D_s$$

$$F(v) = 0 : \frac{|\Delta v|}{v} < D_s$$

C :乱流判定カウント閾値 D_s :乱流評価値

$F(v)$:乱流検知カウンタ T :乱流判定時間

v :風速

また出力抑制指令値の決定には統計モデルによる風速予測値 (\hat{v}) を使用している (式2)。この予測演算にはリアルタイム制御に適用するために演算処理を軽く出来る簡易的な統計モデルを用いている。統計モデルの代わりに移動平均値を用いても類似の効果は得られるが、その場合は風速が長い周期で上昇下降するような風況ではどの風速帯で運転しているのか適切な判定が原理的に出来ない。出力抑制設定値 (P_{SET}) は風速予測値 (\hat{v}) と風速変化量 (Δv) の関数としているが風速の値自体が突変

を伴うために連続した関数である必要はない。

$$P_{DMD} = P_{SET}(|\Delta v|, \hat{v}) \quad (\text{式2})$$

P_{DMD} : 出力抑制指令値

P_{SET} : 出力抑制設定値 \hat{v} : 風速予測値

乱流対策の効果の評価指標としたのは、前述の風車の保護機能による過速度保護トリップ、ナセル振動保護トリップといった運転の中断が繰り返される頻度の低減である。従って過速度やナセル振動が発生しやすい風況を分析しその傾向をパラメータ化して実機調整を行った。図7はこの一例であるがセクタマネジメントは適用していない機体である。

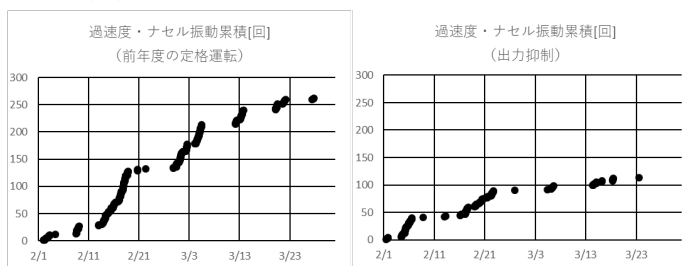


図7) 出力抑制適用前後のトリップ回数

出力抑制運用は抑制をしなかったと仮定した場合と比較すれば発電出力は低下してしまったことになるが、トリップに因る停止を回避しながら運転を継続できたことにもなる。図8は出力抑制運転と風速見合い出力での運転の比較例である。

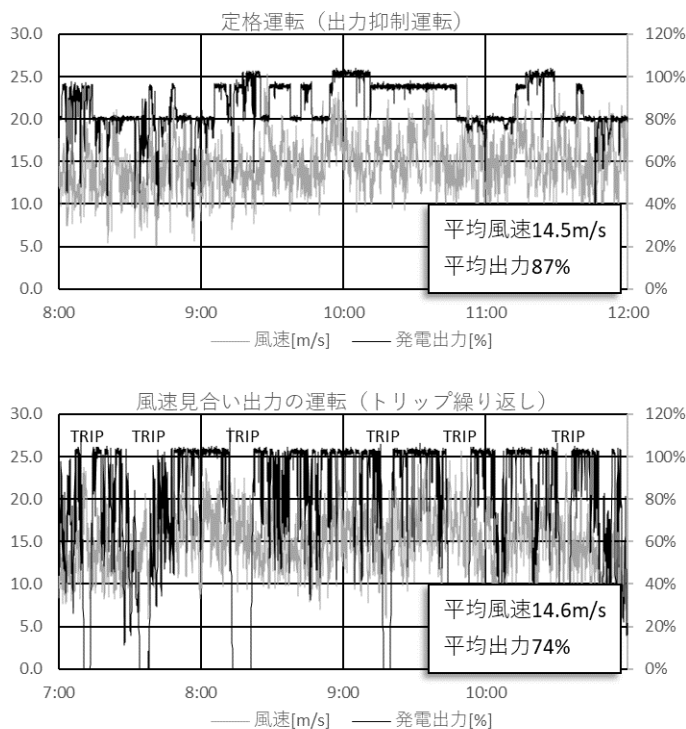


図8) 出力抑制運転と風速見合い出力での運転

風速見合い運転では定格風速以上の風速ではピッチ制御により風荷重を逃がしながら定格出力で運転し、それ未満の風速では風荷重を逃がすことなく風速に見合った出力での運転となる。この例では4時間の平均風速がほぼ同じで出力抑制運転では乱流状態に合わせて出力上限を切り替えることでトリップを抑止して運転することで定格の87%にあたる電力量を維持した。トリップが連続する場合にはこの例で74%となったように2~3割の損失が想定され、風況や機器状態、監視体制などにも依存するため一概には言えないがこの例では出力抑制をした方が大きい電力量を維持したことになる。尚、この例は乱流強度も平均値がそれぞれ0.18と0.19でほぼ同じ風況である。

主軸受損傷の進展抑止

図9は主軸受損傷による振動がCMS（Condition Monitoring System）にて検知されたあとにウィンドファーム制御で出力抑制を自動調整しながら運転継続させた例である。損傷による振動は10月半ばに始まり11月半ばに異音と明らかな振動値の変化も確認され、12月には強い低気圧を受けるなどのきっかけで上昇し始め1月には急激に上昇している。2月から乱流自動判定による出力抑制対策を投入し出力の自動調整を開始した。これによって振動値の急激な上昇が軽減され、4月以降に風況が弱まったところで全体的に振動値が収まった。尚、この2月の運転状況は日毎の最大風速も25m/sを超える日が少なくない厳しい風況であったにも関わらず稼働率ではほぼ100%を維持している。

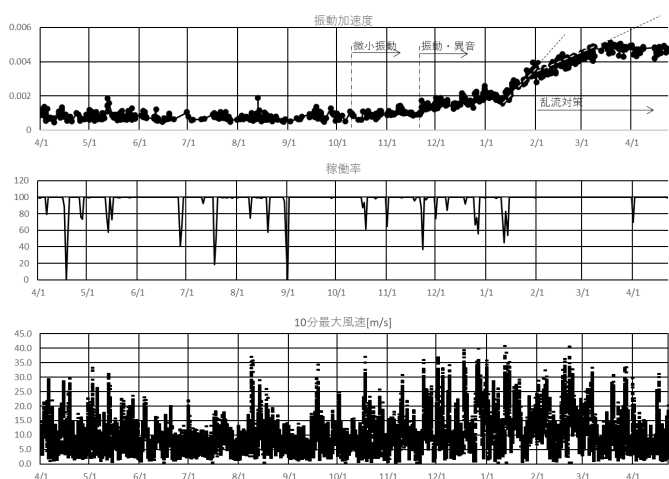


図9) 主軸受損傷前後の運転状態

この後、主軸受交換を行い運転を再開し、各部の振動

値は損傷前と同レベルに戻っておりドライブトレインに不具合なども見られていない。

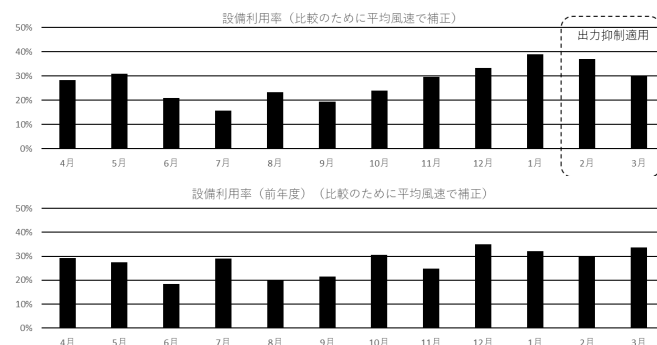


図10) 設備利用率の比較

図10は当該年度と前年度の設備利用率の比較を示す。設備利用率の条件を揃えるために平均風速で概算補正している。この損傷した状態での運転継続の間の売電電力量は前年度実績と比べても遜色なく、出力抑制による売電機会損失を無視できる範囲に留めているといえる。保守目的の停止などもあり効果が設備利用率に一意に表れている訳ではないが、出力抑制を適用した2月、3月の設備利用率に出力抑制がマイナスの影響になる結果は見られない。

まとめ

山間部に建設された風力発電設備に潜在する乱流の問題について、ウィンドファーム制御装置を用いて実機にて出力抑制をリアルタイムに制御する機能を搭載。この制御機能の設定調整には風車の運転状態から直感的に判断できるパラメータを用いることで分析や統計計算なく速やかに運転状態を変更することが出来る。この制御機能による乱流風況での風車運転の発電電力量における効果、および主軸受に損傷が発生した風車の冬期運転継続の実績を得ることが出来た。

参考文献

- 1) Edward Hart1 他, A review of wind turbine main bearings: design, operation, modelling, damage mechanisms and fault detection, Wind Energ. Sci., 5, 105–124, 2020, eawe
- 2) IEC TS 61400-25-71 Edition 1.0 2019-09 Wind energy generation systems – Part 25-71: Communications for monitoring and control of wind power plants – Configuration description language