

長期的な安全運用を目的とした風車維持管理支援に関わる研究(その3) Research related to wind turbine maintenance management support for long-term safe operation (Part 3)*¹

○永岩 慶一郎*², 川島 泰史*³, 内田 孝紀*⁴, 古賀 和宏*⁵, 永井 利昌*⁶, ハワード ペンローズ*⁷

Keiichiro NAGAIWA, Yasushi KAWASHIMA, Takanori UCHIDA, Kazuhiro KOGA, Toshimasa NAGAI, and Howard W Penrose

1. 緒言

再生可能エネルギーとしての風力資源の有効活用は、我が国のエネルギー自給率を将来的に高めるだけでなく、カーボンニュートラルの実現や持続可能な社会の構築において極めて重要な役割を果たしている。近年、その大規模な特性と立地条件の柔軟性から洋上風力発電が注目されているが、その発展には陸上風力発電で得られた知見を活かし、特に運用・保守(O&M)の課題を克服することが不可欠である。これにより、我が国の環境条件に適した風力発電の開発を促進し、持続可能なエネルギー供給の確保に向けた基盤を築くことが期待されている。

我々の研究グループでは、日本特有の山岳部などの複雑な地形によってもたらされる地形性乱流や風車の背後に形成される風車ウエイクが陸上風車の保守および運用に与える影響とその課題を明らかにすることを目的として、実フィールドを対象とした数値風況シミュレーション技術および設備診断技術(Condition Monitoring System)を用いた実証研究を継続している。本稿は第3回目の報告として、我々の主力技術である電気信号解析技術(Electrical Signature Analysis)に焦点を当て、風力発電における当該技術の技術的特徴を解説するとともに、鹿児島県串木野れいめい風力発電所で得られた具体的な成果を報告するものである。

2. 洋上展開に関わる陸上風力の重要性

運転・保守(O&M)コストは、風力発電所のライフサイクルコスト全体の約3分の1を占めるとされており、O&Mの信頼性は風力発電事業の長期的な安定性と効率的な運用に直接影響を与える。経済産業省の調達価格等算定委員会が実施した調査¹⁾によると、陸上風力発電のO&Mコストの中央値は1.35万円/kW/年である。一方、米国NREL(国立再生可能エネルギー研究所)の報告²⁾では、O&Mコストは15~27ドル/kW/年(洋上では40~60ドル/kW/年)とされている。米国と日本では電気事業を取り巻く環境が異なるため、この差を一概に比較することはできないが、一般的に日本の風力発電のコストは国際水準よりも高いとされている。

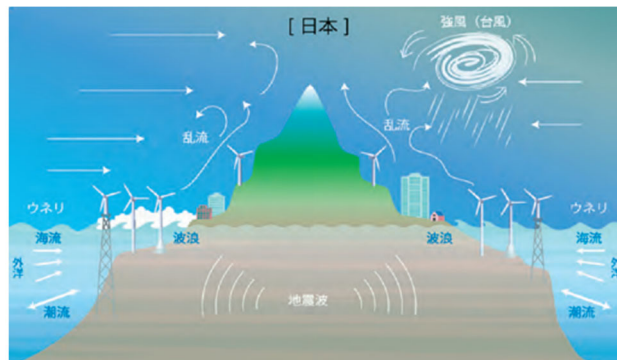


図1 日本の風力発電と気象条件等の模式図³⁾

このことを踏まえ、洋上風力発電の展開を見据えたO&Mコストの低減は、我が国にとって避けて通れない重要な課題である。

一方で、日本特有の地理的条件や気象条件等を反映した、陸上(ニアショアを含む)での運用データやノウハウは、洋上環境における風車の信頼性向上およびコスト削減の基盤となり得ることは言うまでもなく、これらを身をもって体験してきた我が国の強みでもある。図1を参考に日本における陸上の風況特性を概観すると、地形や地物の影響を受けた乱流現象(地形性乱流)や風車の後方に形成される副次的な乱流現象(風車ウエイク)の影響が顕著に現れることが特徴的である。また、離岸距離の短いニアショアにおいては、沿岸部にある崖や海岸段丘などの地形の影響を含め、陸風が吹いている場合には陸上の条件とほぼ一致する。一方、洋上の場合には陸上の地形の影響はほとんど無視できるが、限られた海域に多数の風車が林立することによる風車ウエイクの相互干渉など乱流のリスクは依然として存在する。さらに、東アジア特有の大型台風や過酷な海況にも適応する必要があり、O&Mの信頼性確保には欧米の方式をそのまま適用するのではなく、日本固有の要件を満たすものである必要がある。

3. 研究対象風車の概要

我々が研究対象とした串木野れいめい風力発電所は、鹿児島県いちき串木野市に位置し、2012年11月

*1 令和6年11月29日「第46回風力エネルギー利用シンポジウム」にて講演

*2 会員、㈱TRIPOD(〒807-0853福岡県北九州市八幡西区鷹見台4-1-15-2、連絡先:k.nagaiwa@tripd.jp)

*3 会員、西日本技術開発㈱(〒810-0004福岡市中央区渡辺通2-1-82 電気ビル共創館7F、連絡先:y-kawashima@wjec.co.jp)

*4 会員、九州大学応用力学研究所(〒816-8580春日市春日公園6-1、連絡先:takanori@riam.kyushu-u.ac.jp)

*5 会員、西日本技術開発㈱(〒810-0004福岡市中央区渡辺通2-1-82 電気ビル共創館7F、連絡先:kaz-koga@wjec.co.jp)

*6 非会員、㈱設備保守センター(〒810-0011福岡市中央区高砂2-10-1 九電グループビル7F、連絡先:nagai@setubi-hosyu.co.jp)

*7 非会員、MotorDoc LLC(403 Eisenhower Ln S, Lombard, IL 60148, USA、連絡先:info@motordoc.com)

に運転を開始した南九州地域を代表する風力発電所のひとつである。当該発電所は株式会社九電工によって運営され、株式会社設備保守センターが保守管理の中心的な役割を担っている。また、発電所の地理的条件として特筆すべきは、いちき串木野市の中心部から南東に広がる弁財天山の存在である。これまでの一連の研究成果に基づき、我々は標高 519m の弁財天山によって形成される剥離流（地形性乱流）に起因する風ストレスが、大型風車の発電成績ならびに動力伝達系統の健全性に大きな影響を与えていることを突き止めた。詳細については、前回までの報告^{4), 5)}を参照されたい。

4. 地形性乱流が大型風車の運転性能およびメンテナンスに与える影響

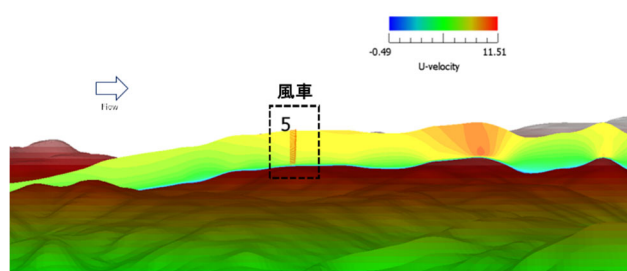


図 2 風車5号機の非定常・非線形風況シミュレーション

図 2 は、九州大学応用力学研究所の内田孝紀教授が開発した、数値風況診断ソフトウェア RIAM-COMPACT®（リアム・コンパクト）を用いて、西日本技術開発株式会社が風車 5 号機の風況解析を行った結果である。本稿では静止画を使用しているため直感的な理解が難しいかもしれないが、シミュレーションでは風車の南南西に位置する谷地形の起伏の変化が起源となり、そこから発生した風の乱れ（地形性乱流）が確認できる。南南西の風が発生した場合、谷地形から剥離流が形成され風車はカオス的な乱流成分の影響をより強く受けるため、受風面近傍では流速の運動量交換が活発化する。その結果、受風面には不均一な風荷重が連続的に作用すると考えられる。これにより、風車ブレードから発電機に至るまでの軸回転やヨーイングの旋回運動には不規則な振動や偏重した負荷が生じる可能性が高まる。このような影響は、ブレードの疲労寿命の低下を引き起こすだけでなく、主軸の偏心や軸受、歯車などで構成される動力伝達系統における摩擦や衝突の影響を強める懸念がある。加えて、これらの要因は発電効率の低下を招き、これらの影響が排除されない場合、メンテナンスコストの増加につながる可能性がある。

5. 電気信号解析技術 (Electrical Signature Analysis) の適用

風車の動力伝達系統は、外部ストレスとしての風況、長期間の回転運動に伴う自然発生的な経年劣化、メンテナンス行為等による人為的な変化の影響を常に受けている。また、これらの影響が蓄積されることで、風車の発電能力を支える動力伝達系統の寿命や耐久性に悪

影響を及ぼす可能性が高まる。これは例えば、動力伝達の基盤を形成する軸受や歯車などの機械要素が、所定の機能を喪失する可能性を意味する。軸受は、回転運動を支え摩擦を最小限に抑える役割を果たし、風車の安定した運転を可能にする。また、歯車は動力を効率的に伝達し、発電機に適した速度で回転運動を制御する役割を担っている。これらの機械要素が劣化や損傷を引き起こすと、摩擦や振動が増加し、最終的には重大な故障につながる恐れがある。

一般社団法人日本風力エネルギー協会 (JWEA) の米国版にあたるアメリカンクリーンパワー協会 (ACP) は、風力産業におけるエンジニアやマネージャーが維持管理の信頼性向上と、風車のパフォーマンスを最大化することを目的として、2023年に「Gearbox Operations Playbook (動力伝達系統の運用と保守に関するガイドライン)」⁶⁾を発刊した。この中では、動力伝達系統の性能を監視し、潜在的な故障を予測する技術として幾つかの設備診断技術が紹介されており、そのひとつに電気信号解析技術 (ESA; Electrical Signature Analysis) が含まれている。本ガイドラインの発刊に多大な貢献を果たした、MotorDoc LLC の代表である、Howard W. Penrose 博士は、IEEE (米国電気電子学会) シカゴ支部の元会長や ACP の副会長など、数々の重要な役職を歴任した上級エンジニアである。振動分析や電気信号解析技術などの高度な設備診断技術において豊富な知識と経験を持ち、風力発電を含む広範な産業設備の信頼性向上に寄与する具体的な手法を数多く提案⁷⁾してきたことでも知られている。同氏の協力のもと、我々は国内で初めて電気信号解析技術を用いた長期間の実証研究を開始した。この研究は、実践的な応用を通じて、国内の風力発電に対する設備診断技術の有効性を評価するものであり、今後の実務における重要な基盤となると考えている。

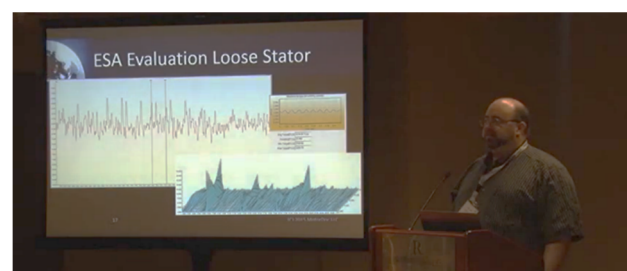


図 3 2019 年 IEEE 会議にて講演を行う Penrose 博士

6. 電気信号解析技術の基本原則

電気信号解析技術 (ESA) は、風力発電機から得られる電圧および電流の波形を解析することにより、電力品質の実態把握、電気的特性の分析、ならびにブレード、主軸軸受、増速機といった機械要素の健全性を評価するマルチタスク型の予知保全技術である。本技術は、振動や潤滑油など従来の設備診断技術とは異なり、動力制御盤から得られる電気的情報に基づき、現場機器に対して非侵襲的にアプローチすることが可能であり、簡便かつ包括的な状態監視ソリューションを提供する。

1980年初頭に米国のオークリッジ国立研究所(ORNL)により、原子力発電所の安全保護システムで使用される電動バルブのモーター、軸受、歯車からなる駆動装置の問題を、電気室の動力制御盤から診断することを目的として研究が開始され、その後は産業界での実用化が進むにつれて理論的な解釈も進展したことで、振動分析などと並ぶ設備診断技術として、その技術的地位が確立された。欧米でこそ知名度が高い技術ではあるが、国内ではまだ広く認知されておらず、我々の取組みを通してその普及と技術の発展が進むことを期待している。

本研究に使用した測定システムは、仏原子炉メーカーフラマトム社(Framatome Inc.)の米国原子力部門(NPC)が開発したエンパス(EMPATTM)と呼ばれる独自システム(図4)であり、高分解能かつ高精度な計測性能を備えている。図5に示すように、一般的な風力発電システムは、変圧器、制御装置、発電機などの電気系統と、遊星歯車を備えた3段式(または2段式)の増速機、1つまたは2つの大型軸受を有する主軸、そして可変ピッチ機構を備えたブレードを保持するハブからなる機械要素で構成される。これらの構成部位の回転周期は広範囲にわたり、さらに各部は複数の振動モード(高次の固有周波数や高調波成分など)を持つことがあるため、劣化や異常を特定する信号同士が近接している場合には、適切な信号分解能がないと誤診や偽陽性が生じる可能性がある。

例えば、ブレードが19rpmで回転する場合、主軸回転の固有周波数は0.317Hz($19\text{rpm} \div 60$)である。このとき、主軸に芯ずれがあると仮定すると、高次成分として0.633Hz($0.317\text{Hz} \times 2$)が生じる。次に、6極60Hzの非同期誘導発電機が超同期速度の1208rpmで動作する状態を考える。この場合、回転子が回転する際に固定子の磁極を通過する頻度(極通過周波数)は0.798Hz($((1208\text{rpm} - 1200\text{rpm}) \div 60 \times 6\text{極})$)となる。この周波数はPPF(Pole Pass Frequency)と呼ばれ、発電機内の磁束変化を表し、電気的事象や機械的事象を特定するための重要な指標として取り扱われる。つまり、観測されると予想される2つのピーク波形の差は0.165Hzであり、この差を明確に区別するためには、二つの波形ピークがスペクトル表現で重ならず個別に識別されるだけの十分なデータ解像度が必要となる。エンパスは、診断1回につき48秒間の測定を行うことで、0.01Hz以上の分解能を有し、最大6kHzの有効スペクトル範囲(F_{MAX})を提供する。これにより、低周波数から高周波数に至るまで、安定したデータ解像度と正確な不良個所の特定が可能となる。表1は、エンパスで評価が可能な項目であり、それぞれに関連する欠陥や障害を検出することができる。



図4 EMPATTMシステム一式と電流測定の様子

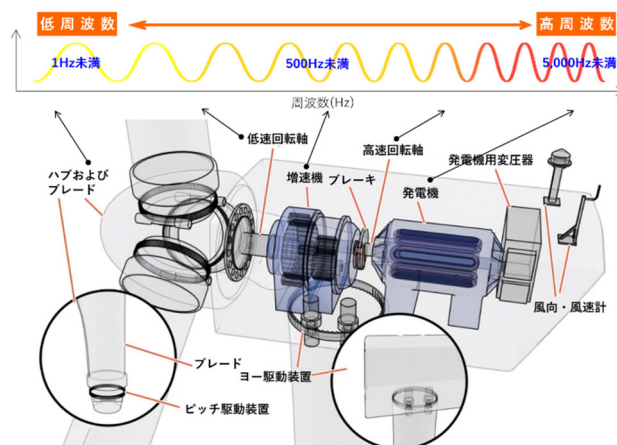


図5 一般的な風車の動力伝達系統と周波数範囲

表1 電気信号解析技術で評価が可能な劣化・損傷

- 発電機 - 軸受 - 中性点用バスバー - コレクタリング - 回転子(静的偏心・動的偏心) - 固定子(楔劣化・脱落など)
- 増速機 - 高速軸軸受 - 中速軸軸受 - 中空軸軸受 - 遊星歯車軸受 - 高速・中速・太陽歯車 - 遊星歯車、内歯車
主軸軸受
- ブレード - 軸偏心(ミスアライメント) - 摩耗や雷害による損傷(アンバランス)

7. 串木野れいめい風力発電所での実証結果

串木野れいめい風力発電所には、計10基の風車が設置されており、この地域の年間風向は主に西北西から北北東の間に集中していることが特徴である。今回の調査対象とした5号機では、主風向の方位に他の風車が立地していないため、風車ウエイクの影響を無視することができ、風車が受ける風ストレスは地形起伏に伴う風の乱流の影響が支配的であると考えられる。風況解析データが示したとおり、風車5号機のブレードは偏重した風ストレスを受けており、10年を超える風車設備の高経年化に加え、シミュレーション上でも動力伝達系統への影響(繰返し応力による疲労蓄積)が懸念される結果となった。

第2回目の報告では、発電機軸受の劣化をエンパスによって事前検出したことについて説明したが、今回は軸受交換後の改善効果の確認に加えて、部品交換と点検の実施によって正常な状態(ベースライン)に移行したと見なせる風車に対して、風況が風車機器へ及ぼす影響とその因果関係を考察することを目的とした。そのため、図6のようにエンパスを風車内地下ピットに常設化し、約1か月間の連続モニタリングを実施した。

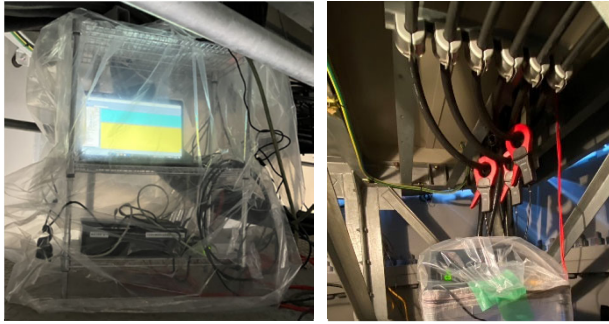


図 6 風車内地下ピットでの連続モニタリングの様子

電気信号解析技術の特徴のひとつに、電圧と電流を同時に取得することによって求められる有効電力をパワースペクトルとして表し、回転部位の固有周波数に対応する任意のピーク波形から読み取ったkW振幅値を、機器状態に等価なエネルギーロスとして定義できる点がある。つまり、発電機の出力に対して、回転部位の劣化や損傷などによって消費される電力(ワット損)を求めることができる。また、これに設備の稼働時間およびCO₂排出係数を乗じることで消費電力量(kWh)やCO₂排出量との関連付けができ、診断結果をメンテナンスの信頼性を示す指標(KPI)として利用することができる。劣化や異常に伴う損失や保守の効果が数値化されることによって、O&Mの信頼性はさらに高まると考えることができる。

図7は、軸受交換前後のパワースペクトル波形を重ね合わせたものである。軸受交換前の診断では、軸受を構成する部品のうち、保持器および転動体の問題が検出された。軸受交換後は、それぞれの固有周波数の波形ピークが減少していることが確認できた。ここで、軸受交換前の総エネルギーロスは6.39kWであり、当該風車の設備稼働率を仮に90%とした場合の年間稼働時間は約7,884時間であるから、陸上風力発電の発電コストを20円/kWhとすると、軸受異常によって消費される年間コストは1,007,575円として求められる。さらに、軸受交換後は0.53kWに低下したことから、予知保全によるコスト削減効果は205,335円となり、年間CO₂排出抑制量は約20t-CO₂(排出係数 $4.38 \times 10^{-4} \text{ t-CO}_2/\text{kWh}$ の場合)となる。

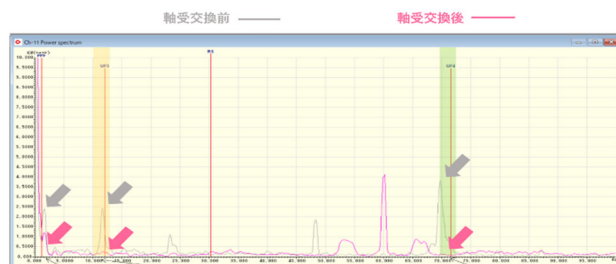


図 7 電力スペクトル波形による軸受交換前後の比較

最後に、連続モニタリングで得られたエネルギーロスの変化を、風向および風速の関係として示したグラフを図8にそれぞれ示した。左図の極座標では、風向とエネルギーロスを紐づけることで、風ストレスの方位観を俯瞰的に把握することができる。また、右図に示す風速との関係においては、定格風速8m/sを境に近似直線の相関関係が反転していることが分かる。つまり、風車の性能曲線

と対比して捉えると、電気信号解析技術は定格風速と運転効率の関係を客観的かつ定量的に説明している。

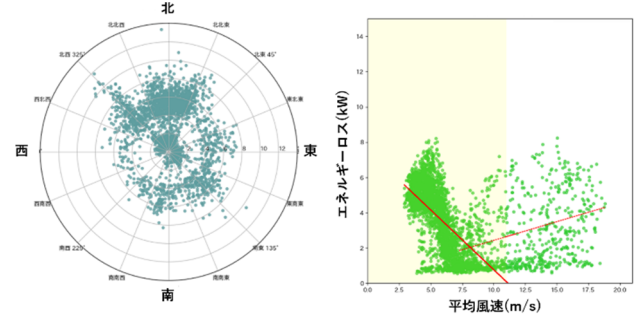


図 8 電気信号解析技術によるエネルギーロスの傾向

8. 結言

風力発電技術は、ここ数十年で電気、機械、材料、制御工学の分野において目覚ましい進歩を遂げてきた。しかしながら、これらの進歩にもかかわらず、運用および保守の面では依然として信頼性の問題が残っている。発電性能の低下、構成機器の損傷、さらには運用および保守担当者の安全リスクを未然に防ぐために、風力発電システムの信頼性と効率性を向上させつつ、全体的なメンテナンスコストを削減する方法を今後も探求していく。

謝 辞

本資料の作成にあたり、技術資料の提供およびご助言をいただいたMotorDoc社のHoward W Penrose博士、Framatome社のLew McKeague氏ならびにVedat T. Ataman氏に感謝の意を表する。また、串木野れいめい風力発電所地点でのデータ計測にご協力いただいた、(株)九電工殿および(株)設備保守センター殿に深謝する。

参 考 文 献

- 1) 経済産業省 調達価格等算定委員会, 令和5年度以降の調達価格等に関する意見, Mar, 2023
- 2) Tyler Stehly, Patrick Duffy, and Daniel MulasHernando, 2022 Cost of Wind Energy Review, National Renewable Energy Laboratory, Dec, 2023
- 3) 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構, NEDO30年始:エネルギー・環境技術、産業技術への取り組み, Nov, 2010
- 4) 川島 泰史, 内田 孝紀, 古賀 和宏, 山下 晃太, 永井 利昌, 長期的な安全運用を目的とした風車維持管理支援に関わる研究(その1), 第 44 回風力エネルギー利用シンポジウム, Dec, 2022
- 5) 川島 泰史, 内田 孝紀, 永岩 慶一郎, 永井 利昌, 古賀 和宏, Howard W Penrose, 長期的な安全運用を目的とした風車維持管理支援に関わる研究(その2), 第 45 回風力エネルギー利用シンポジウム, Dec, 2023
- 6) American Clean Power Association, Gearbox Operations Playbook, <https://cleanpower.org/>, 2023
- 7) Howard W Penrose, Practical Electrical and Current Signature Analysis of Electrical Machinery and Systems, Success By Design, USA, Nov, 2022