

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) Research related to wind turbine maintenance management support for long-term safe operation (Part 2)*¹

○川島 泰史*², 内田 孝紀*³, 永岩 慶一朗*⁴, 永井 利昌*⁵, 古賀 和宏*⁶, ハワード* ペンローズ*⁷

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

1. 緒言

各国で化石燃料への依存度を下げる戦略としてクリーンエネルギーの需要が高まる一方、わが国においては自然エネルギーを利用した風力発電設備の多くが設計寿命を迎えようとしており、事業者は長期的な利用を見据えた設備利用シナリオの見直しを迫られている。特に次世代エネルギーとして期待が高まる洋上風力発電では、経済効率優先の普及促進フェーズから実証利用フェーズに移行する段階にあり、風力発電所の長期稼働における技術的安全性の確保と、陸上風力発電での知見を最大限活かした信頼性・収益性の維持および設備利用率の向上に資する予防保全の着実な実践など、論調の変化に対応していく必要がある。本報では、国内外の風力産業を取り巻く社会的背景を考慮し、ある予防保全ツールの技術的可能性について提案する。

2. 研究対象風車の概要

運転開始から10年を超え、設備の老朽化あるいは故障の増加が今後懸念される串木野れいめい風力発電所(2012年11月運開)において、風力発電設備に関する状態基準保全の実効性と効果を高めることを目的に、当社および協力会社が保有する高度デジタル技術の実用性検証を実施した。本研究は、(株)九電グループ企業である株式会社 設備保守センターの協力の下、風車5号機を対象として行ったものである(図1および2、表1参照)。



図1 現場の写真(著者が2023年6月28日撮影)

表1 串木野れいめい風力発電所の概要

	1号機~10号機(計10基)
風車メーカー(型式)	日立製作所(HTW2.0-80)
定格出力	2,000kW
風車の高さ(地面~ハブ中心)	60m
翼(ブレード)の直径	80m

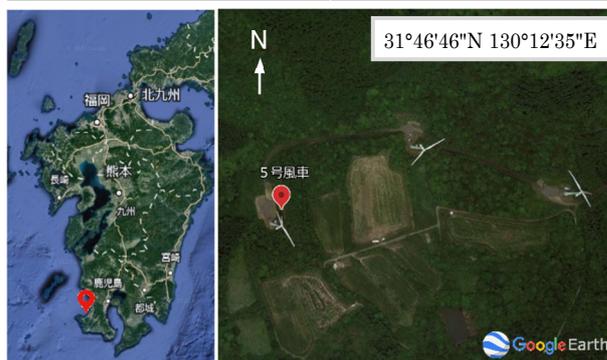


図2 串木野れいめい風力発電所(Google Earthによる)

3. わが国における風車の故障と風土、風況の因果関係

風力発電設備の故障は、欧米に比べて過酷とされるわが国の風土や風況条件との因果関係が強いことが示唆されており、その一方で発生要因が原因不明とされるケースも少なからず存在する。このような場合、メーカーなどにしか分からないブラックボックス部分が存在するために、故障原因の究明と技術的根拠の認識が十分でないまま、設備業者が個別対応しているのが現状である。

数ある発電設備の中でも、風車は絶えず変動を繰り返す自然的外力の影響を強く受けながら、自らも回転運動によって、構成機器は多様なストレス(電氣的、機械的、化学的など)にさらされ続け、性能あるいは機能の低下、経年劣化などの潜在的リスクを伴っている。更に、台風や季節差など変化の激しい非定常環境下では、オペレーション上の制約や需要変動に追従した出力調整が考慮される中で、起動または停止が頻繁に起こることによって、風車構成機器に過剰なストレスの蓄積が生じ、想定外の寿命低下や突発故障の発生に繋がっていることが予想される。

*1 令和5年12月1日「第45回風力エネルギー利用シンポジウム」にて講演

*2 会員、西日本技術開発(株)(〒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)

*3 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)

*4 非会員、アジア創研産業(株)(〒102-0083東京都千代田区麹町7-7セット東京ビル3F、連絡先 : k.nagaiwa@asia-souken.co.jp)

*5 非会員、(株)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)

*6 会員、西日本技術開発(株)(〒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)

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

実際に起きている現実として、串木野れいめい風力発電所では、複雑地形上に設置された風車において風速約 9m/s の最大効率運転時で、且つ乱流強度が高い場合には、発電電力量の低下や風車故障のリスクが大きくなることが分かっている。¹⁾ 更に、複数の風車群で形成されるウインドファームでは、風車ウエイク(風車風下で生じる風速の欠損や風の乱れ)の影響も考慮すべきことが近年の研究からも明らかになっている。このことから、風車発電設備の適正な維持管理を推進するうえでは、風況による変動性リスクを把握すると共に、発電量の安定化を念頭に置いた定量的なリスクアセスメント(リスクの洗い出しとグレーディング)の実施と、オペレーションへの反映が一段と重要になっている。

4. 風車構成機器の故障劣化モデルと信頼性重視保全の適用

一般的な風車は、高いタワーの上部に据えられたナセルに、変圧器(ナセル内またはタワー基部)・制御装置・発電機・カップリング・多段増速機・主軸・ブレードを有するハブ(ローター)で構成されている。また、風力発電システムは自然エネルギーを起源とした、機械系、電気系、制御系が結合し、相互に作用する複雑な機構モデルと考えることができる(図3参照)。

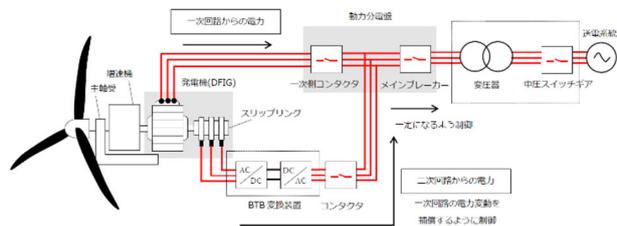


図3 一般的な風力発電システム (DFIGモデル)

単純な機械システムおよび部品は、運用期間中の経時的な消耗や変質などによって故障に至ることが一般的な理解であり、このことは信頼性工学でもバスタブ曲線として説明されている。しかしながら、産業界で使用されるシステムは複雑に構成されることが通常であり、経年劣化よりも偶発的なトラブルが発生する確率の方が高い²⁾。

本論文の共著者である、米国 MotorDoc 社が電力メンテナンス企業 Shermco 社と共同で実施した統計調査³⁾では、米国国内で 2003 年から 2015 年に設置された 1.5MW から 3MW までの風車 430 基について、設備診断技術に基づいた 1,400 以上のデータ分析を行ったところ、発電機から動力伝達装置までの間に 940 点以上の故障あるいは故障に繋がる潜在不良の存在が確認された。また、診断後の点検結果に基づいた故障の程度についても統計が取られており、初期段階の故障であり、放置すると悪化の懸念がある“C-要経過観察”と診断された結果が全体の 4 割を占めていることが分かった(図4および5参照)。紙面の都合で詳細は割愛するが、この取り組みでは、顕在化したトラブルの属性が機械的故障と判断された場合であっても、実際には電気的なストレス要因に起因する障害であることが証明されて

いる。この結果は、次項で説明する新しい設備診断技術によって裏付けられ、2020年に米国風力エネルギー協会(ACP,旧 AWEA)で公表された貴重なデータである。

このように、持続可能での確な維持管理を推進するためには、問題の原因を特定し、対策を講じて再発を防止するためのプロセスの導入が不可欠である。

欧米諸国では、信頼性重視保全(RCM; Reliability Centered Maintenance)と呼ばれる保全方式が産業界に広く採用されており、わが国でも社会的重要度と高い安全性、信頼性が要求される原子力産業や航空機産業などで用いられている。風力発電産業においても、リスク情報の活用と共に、信頼性重視のメンテナンスを積極的に採用するなど、発電効率を最大限引き出す環境の構築が求められる。

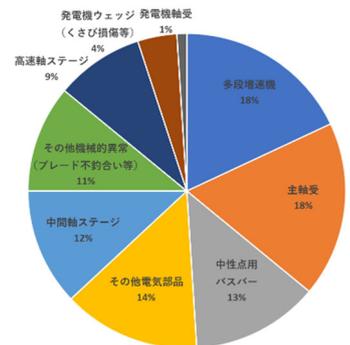


図4 米国国内での調査結果

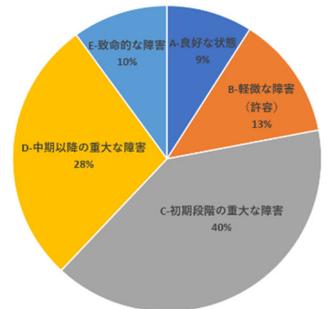


図5 風車故障程度の割合

5. 風力発電設備における電気信号解析技術 ESA(Electric Signature Analysis)の適用

ここでは、我々が現在進めている風力発電設備の保全合理化や稼働率向上に繋がる、新しい設備診断技術の概要を説明する。設備診断技術とは、『設備の現在の状態量を把握して、異常あるいは故障に関する原因および将来への影響を予知・予測し、必要な対策を見出す技術』と定義され、状態基準保全方式(CBM; Condition Based Maintenance)を支える技術的支柱として認知されている。なお、風力発電設備では、SCADA(Supervisory Control And Data Acquisition)と呼ばれる稼働監視システムが導入されているが、SCADAで得られる運転諸データと、設備診断技術が提供するデータおよびパラメータは解析学的アプローチやサンプリングレートなどの点において一線を画したものと位置付けられる。

一般に認知された設備診断技術として、振動・温度・潤滑油・超音波などがあり、人間の五感が定性的な判断である一方、客観的なデータ収集によって定量的判断を提供する手法である。また、専門領域毎にさまざまな解析学的アプローチが研究および考案され、それぞれの特性を活かした診断法として確立されている。当該技術は1980年代から国内でも生産プラントやインフラ施設で実用化が進み、近年では風力発電設備においてもオンライン状態監視システム CMS(Condition Monitoring System)として、振動計やひずみ計などのセンシングによる利活用が始まっている。

我々の研究グループでは、風車のメンテナンス支援技術開発を目的として、風力発電が盛んな欧米での活用が進んでいる新しい設備診断技術に着目し、本年度より国内での検証を開始した。この技術は、電気信号解析技術(ESA; Electric Signature Analysis)と呼ばれ、1985年に米国オークリッジ国立研究所(ORNL; Oak Ridge National Laboratory)が開発した技術として業界に認知されている。その起源は原子力発電所の電動弁の状態監視(運転時の負荷挙動、軸受やギアの故障など)を行う手法の確立に始まり、振動計や温度計などの設備に接近した測定手法を取らず、電気室にあるMCC(モーターコントロールセンター)などから電流および電圧データを非侵襲的に取得することにより、遠隔かつオンラインでの診断を可能としている。設備状況に応じた保全作業の実施に寄与できることから、従来手法に並ぶ設備診断技術としての理解が深まっている⁴⁾。なお、ESAは電気情報を用いる観点で、電動機単体の検査技術と捉えられがちであるが、本来は負荷装置(ポンプや送風機など)や機械部品の状態評価を目的として開発されたという経緯が正しい歴史認識である。

風力業界においては、MotorDoc社が2003年からESAの適用研究を開始したことを皮切りに、また国内ではアジア創研産業株式会社の取組みによって、風力発電システムでも同等の機能を提供することが示されており、電気・機械工学に基づく科学的根拠と実証に裏付けされた技術であること、設置の簡便性や現場アクセスの利便性が高く評価されている。米国風力エネルギー協会が取り纏めた要綱・要領集⁵⁾には、ESAがCMS技術のひとつに含まれ、利活用が推奨されている。本研究では、特定の設備診断システムを用いて、風車5号機の診断を行った。次項にその概要と結果の一部を示す。

6. リアルタイムデータアナライザ EMPATH™による発電機診断(実測データ解析)

アジア創研産業株式会社では、風力発電機の診断にエンパス(EMPATH™; Electric Motor Performance Analysis & Trending Hardware)と呼ばれる設備診断システムを取り扱っている。製品の外観を図6に示す。



図6 EMPATH™システム一式

EMPATH™は、フラマトム社(Framatome, 旧アレバNP)の米国原子力部門(NPC; Nuclear Parts Center division)がORNLからライセンスを取得した製品で、1990年代初期に市場投入された。アジア創研産業株式会社は、日本国内の販売代理店として同製品を取り扱うと共に、

ESAに関する技術サービスを独自提供している。また、MotorDoc社はESAおよびEMPATH™を米国国内でいち早く展開するなど、風力に限らず産業界全般で数々の有益な研究業績を挙げている⁶⁾。

同製品は、リアルタイムデータアナライザに接続された専用の電流センサーと電圧プローブからデータを収集し、ESAソフトウェアによって状態監視および設備診断を行うオートマチックシステムである。本研究では、運転中の電流および電圧データを、タワー基部(一部のメーカーや機種においてはナセル内)の制御盤から取得した。接続状況の一例を図7に示す。



図7 タワー基部での測定状況

EMPATH™は、高分解能と多チャンネルを有した高精度の計測システムであり、ナセル内の非同期発電機の電流および電圧データをそれぞれ3点ずつ、タワー基部にて約50秒間の測定によって診断を行う。通常は、診断時の突風発生や風速変動の影響を考慮し、3回の繰り返し測定を実施する。すなわち、装置の接続からデータ収集までを合わせても5分から10分程度で現場作業が完結する。当該発電機は定格1,400Vの高電圧のため、制御盤内にある計器用変成器より電圧データを収集した。また、1相あたり複数本のケーブルで送電されることから、電流センサーはその内の1本にクランプした。なお、当該製品は常設監視機能を有し、所定のネットワーク環境に接続することで比較的簡単にオンライン状態監視システムの実装が可能となっている。

ESAは、発電機そのものに加え、発電機に連結される多段増速機からブレードに至るまでの回転機械の変動が、固定子と回転子に存在する空隙内の磁場に影響を与えることにより、電源電圧と運転電流に反映されるという科学的事実に基づいた技術である(図8参照)。

EMPATH™では、交流信号の電流と電圧に含まれる変動成分をスペクトル解析によって各周波数成分に分離することで、収集した時系列データの時間的変化の振幅と周波数成分の混在傾向から、発電機の磁気的なアンバランスによる障害(中性点用バスバーやスリップリングなどの損傷など)から軸受や歯車など不良箇所の特定まで、幅広くカバーすることができる。5号機の診断では、図9に示すような発電機軸受の劣化兆候を早期に特定し、整備計画への反映に貢献した。また、電気-機械結合系のねじり振動(副同期共振 SSR: Sub-Synchronous Resonance)の特徴も現れており(図10参照)、今後は次項に示す風況シミュレーションとの連携強化を図り、データ解析による事象解明と維持管理支援のソリューション開発を目指す考えである。

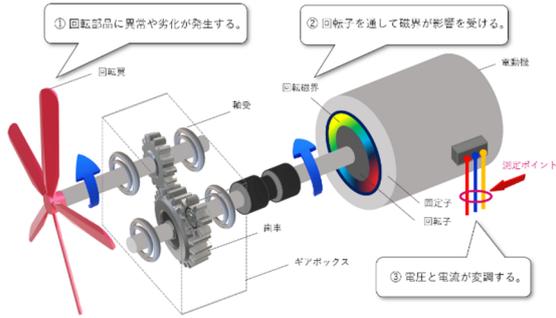


図 8 電気信号解析技術の理論概念図



図 9 スペクトル解析による発電機軸受の故障周波数検出

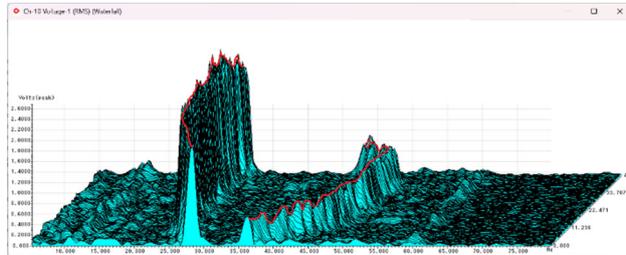


図 10 発電機振動の 3D ウォーターフォール図

7. RIAM-COMPACT®ソフトウェアによる風況診断(3次元気流解析)

西日本技術開発株式会社では、風車近傍の地形起伏の変化を起源として発生する、風の乱れや風車干渉(ウエイク)に対して非定常・非線形風況シミュレータRIAM-COMPACT®を用いることによって、観測地点の風況特性評価(ウインドリスクの影響調査)を実施している。また、九州大学(内田准教授)と共に、風況特性がもたらす風車構成機器への局所的負荷の影響を特定するための共同研究を継続的に行っている。本報では、串木野れいめい風力発電所における、地形性乱流の影響が比較的大きいと推察される風車5号機に対して、当該シミュレーション技術により風況の実態を視覚的に再現することによって、前述した診断結果との因果関係を考察した。

図11に、風車5号機に進入する南南西風の場合におけるベクトル図(瞬間場)を示す。当該結果によると、風車の下端からタワー基部の間で、大きな速度欠損が確認された。一般的に、速度シアは5~7程度の経験則的なべき法則に従う分布が前提となっているが、当該結果では大きく逸脱した分布となっている。このことから、風況が風車の振動発生を助長あるいは誘発し、構成機器の疲労強度に影響を及ぼすことが予想される。

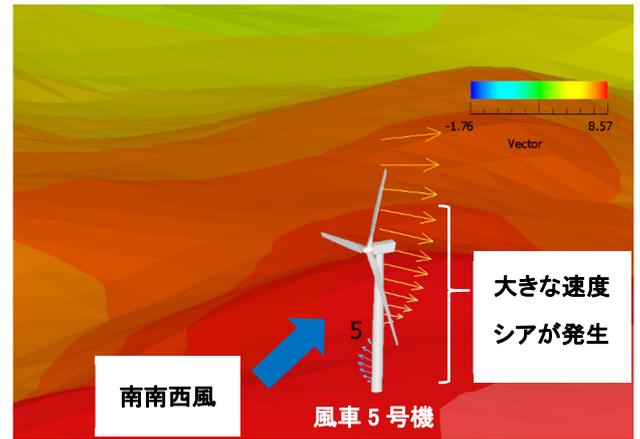


図 11 南南西風時、風車 5 号機地点における速度ベクトル図(瞬間場)

8. 結言

風力発電設備の局所的な劣化状況等の予測に、RIAM-COMPACT®を用いて解析された3次元気流解析データと、風車機器の状態を定量的に評価可能な設備診断技術の相互連携を図ることにより、今後も拡大する風力発電市場に技術面で貢献し、事業者側の視点に立った研究を進めていきたい。

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。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) T.Uchida and Y.Kawashima, New Assessment Scales for Evaluating the Degree of Risk of Wind Turbine Blade Damage Caused by Terrain-Induced Turbulence, energies 2019,12
- 2) Moubray, J. Reliability-Centered Maintenance, 2nd ed., Industrial Press: New York, NY, USA, 2000
- 3) Kevin Alewine and Howard W Penrose, Field Experiences Utilizing Electrical Signature Analysis to Detect Winding and Mechanical Problems in Wind Turbine Generators, 2020 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC) , 2020
- 4) Howard W Penrose, Practical Electrical and Current Signature Analysis of Electrical Machinery and Systems, Success By Design, USA, 2022
- 5) American Clean Power Association, Gearbox Operations Playbook, <https://cleanpower.org/>,2023
- 6) Howard W Penrose, Evaluation of DFIG Wind Turbine Generator and Transformer Conditions with Electrical Signature Analysis, 2022 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC), 2022