

5 MWダウンウィンド風車および 洋上風力用浮体式変電設備の開発

清木 莊一郎
Kiyoki Soichiro

坂本 潔
Sakamoto Kiyoshi

稲村 慎吾
Inamura Shingo

飛永 育男
Tobinaga Ikuo

佐伯 満
Saeki Mitsuru

横山 和孝
Yokoyama Kazutaka

日立は、再生可能エネルギーの拡大という社会的要求に応えるため、洋上ウィンドファームに適用できる機器の開発を進めている。風力発電設備については、これまでの2 MWダウンウィンド風車の経験を基に、信頼性を高めた5 MWダウンウィンド風車の開発を行っている。実証機

は現在商用運転に移行しているが、本稿では試運転で実施された性能・機能試験の内容および結果について述べる。また、遠浅な海岸が少ないわが国においては浮体式の洋上ウィンドファームが有望であるが、そこで必要になる浮体式変電設備の開発状況についても記述する。

1. はじめに

化石燃料の枯渇問題や、地球温暖化問題、エネルギーミックスの観点より、再生可能エネルギーに対する社会的要求が高まっている。再生可能エネルギーの中でもコスト競争力が高い風力発電は世界的に導入が進められており、特に洋上ウィンドファームは、陸上適地の減少や、風速が高くまた安定していること、騒音などの環境問題が発生しにくいことなどの優位性があり、国内外で多くの計画が立てられている。

日立では、上記のような社会的要求に応えるべく、風力発電設備を開発してきた。2005年には2 MWダウンウィンド風車HTW2.0-80の実証機を設置し、これまでに国内に累計96台を設置している。2010年には同機を国内初の外洋に7機設置し、2013年は8機増設した。2013年には国内初、世界でも3例目となる浮体式洋上発電設備を長崎沖に1機、福島沖に1機設置した¹⁾。

日立では現在、より経済性が高い5 MWダウンウィンド風車HTW5.0-126を開発している。実証機は2015年3月に茨城県神栖市の沿岸の陸上に建設され、2015年9月に商用運転を開始した。開発コンセプト¹⁾や開発プロセス²⁾については既報のとおりであるが、ここでは実証機で実施されている性能・機能試験について述べる。

また、遠浅な海岸が少ないわが国においては浮体式の風力発電設備や変電設備が必要になる。世界初の浮体式洋上変電設備の開発状況についても述べる。

2. HTW5.0-126の基本仕様および特徴

HTW5.0-126は、台風が来襲する日本やその周辺地域の環境を考慮し、極値風速はIEC (International Electrotechnical Commission) のクラスIを上回る55 m/sで設定した。また、ロータ位置は、暴風停電時に優位性があり、また容易にタワーとのクリアランスを確保でき、日立のこれまでの風車開発の経験を生かせるダウンウィンド風車とした。基本スペックを表1に、実証機の外観を図1に示す。

構造的には、信頼性を高めるため、中速ギアドライブ方式、2軸受外輪駆動方式主軸、パッシブ冷却方式を採用していることに特徴がある。

表1 | HTW5.0-126基本仕様

陸上の系統と接続する海底ケーブルの経済性を考え、出力電圧は33 kVとした。

定格出力	5,000 kW
ロータ直径	126 m
ブレード枚数	3
ロータ位置	ダウンウィンド
チルト角	-8 deg
出力制御	ピッチ・可変速
コーニング角	5 deg
極値風速	55 m/s
平均風速	10 m/s
乱流カテゴリ	A
増速比	約1:40
発電機種別	永久磁石同期発電機
PCS方式	フルコンバータ

注：略語説明 PCS (Power Conditioning System)



図1 | HTW5.0-126実証機外観

茨城県神栖市に2015年3月に設置され、各種性能・機能試験が行われている。

3. HTW5.0-126の実証実験

3.1 発電性能試験

HTW5.0-126実証機の近傍に、風車のハブ高さと同じ90 m高さの風況マストを設置しパワーカーブを評価している。サイト平面図および風況マスト側面図を図2に示す。風況マストは風車の西南西約300 mの地点に設置し、風速および風向の高さ分布や大気圧、気温、湿度を計測している。

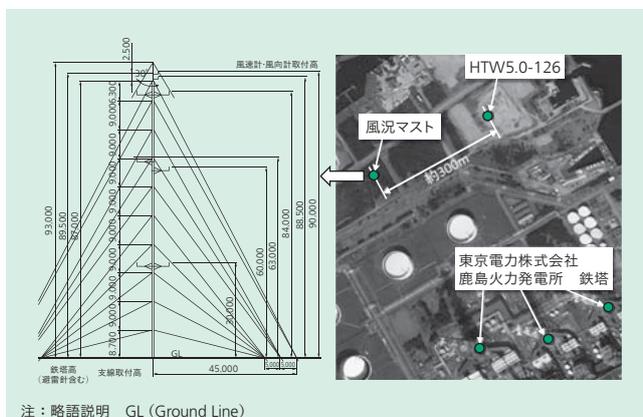


図2 | HTW5.0-126実証機サイト平面図および風況マスト側面図

発電性能把握のため、実証機の近傍に風況マストを建設し風速などを計測している。実証機サイト平面図はGoogleマップ³⁾より引用した。

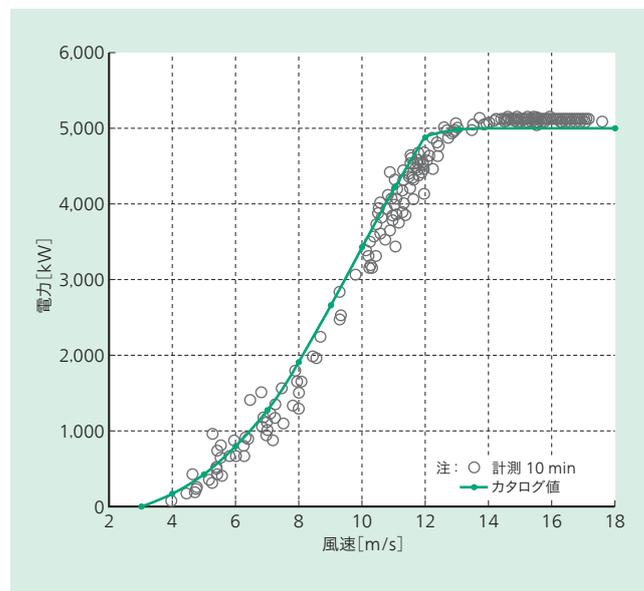


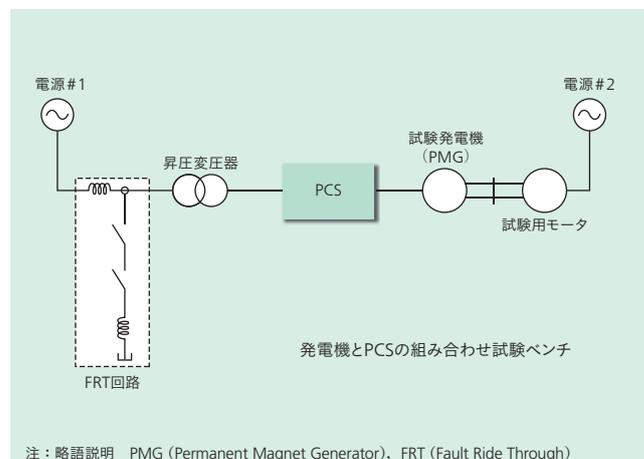
図3 | パワーカーブ実測値

風況マストの風車ハブ高さの風速と電力との相関を描いたもの。事前に想定していたカタログ値に近い性能が得られている。

計測されたパワーカーブを図3に示す。ここで、風車の南側には東京電力株式会社鹿島火力発電所の鉄塔があるため、風向が南のデータは解析対象から除外した。現在運転方法を調整中だが、事前想定値に近い性能が得られることを確認した。

3.2 系統事故時運転継続試験

5 MWダウンウィンド風力発電システムHTW5.0-126は、系統事故により瞬時電圧低下が発生しても、系統電圧低下レベルと電圧低下時間が規定の範囲内にある場合は、解列することなく運転を継続するFRT (Fault Ride Through) 機能を標準装備している。本機能は、発電機とPCS (Power Conditioning System) の組み合わせ工場試験を実施し、要求仕様を満たすことを確認している。図4が



注：略語説明 PMG (Permanent Magnet Generator), FRT (Fault Ride Through)

図4 | 工場試験構成 (FRT機能確認)

試験対象の発電機を試験用モータで駆動し、PCSの系統出力側に電圧低下を模擬するFRT回路を設けている。

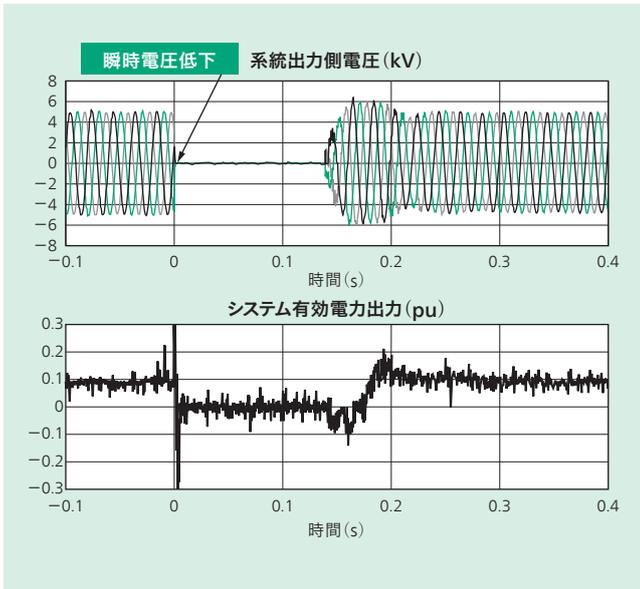


図5 | FRT機能試験波形例

電源電圧が0 Vまで低下し0.15 s間継続した例を示す。電圧復帰後0.1 s以内に発電出力は回復している。

工場試験の構成である。FRT回路により、系統事故時の電圧低下を模擬した。図5に工場試験波形例を示す。系統電圧の復帰後、日本国内の規定⁴⁾で定められた期間内に発電出力が回復することを確認している。

さらに、系統事故時の運転継続試験は、HTW5.0-126実証機においても実施している。実証機における確認試験は、電力会社に接続するための連系変電所と風車との間にFRT回路を挿入し、風力発電システム全体の挙動を確認するもので、2015年度中の終了を予定している。

3.3 冷却性能試験

HTW5.0-126実証機において、ナセル冷却、タワー冷却は、ラジエータにファンを設けないパッシブ冷却方式を採用し、冷却に必要な風量を得るためのナセル形状やラジエータ配置について、流体解析を活用して設計した。

実証機の負荷運転時における、ナセル冷却システムとタワー冷却システムの、ラジエータ通過後の冷却水温度（外気基準）とナセル風速との相関を、図6に示す。同図より、ナセル風速が高いときに、冷却水温度が低く冷却効率が高くなる傾向が得られ、冷却システムの設計妥当性を検証することができた。

3.4 荷重評価試験

風車の設計においては、空力弾性解析により風車各部・各断面における荷重を算出し、それを入力条件として詳細モデルに対する応力をFEM (Finite Element Method) などにより算出し、強度評価を行う。したがって、風車の構造健全性の評価には、上流となる荷重の検証を行うことが重

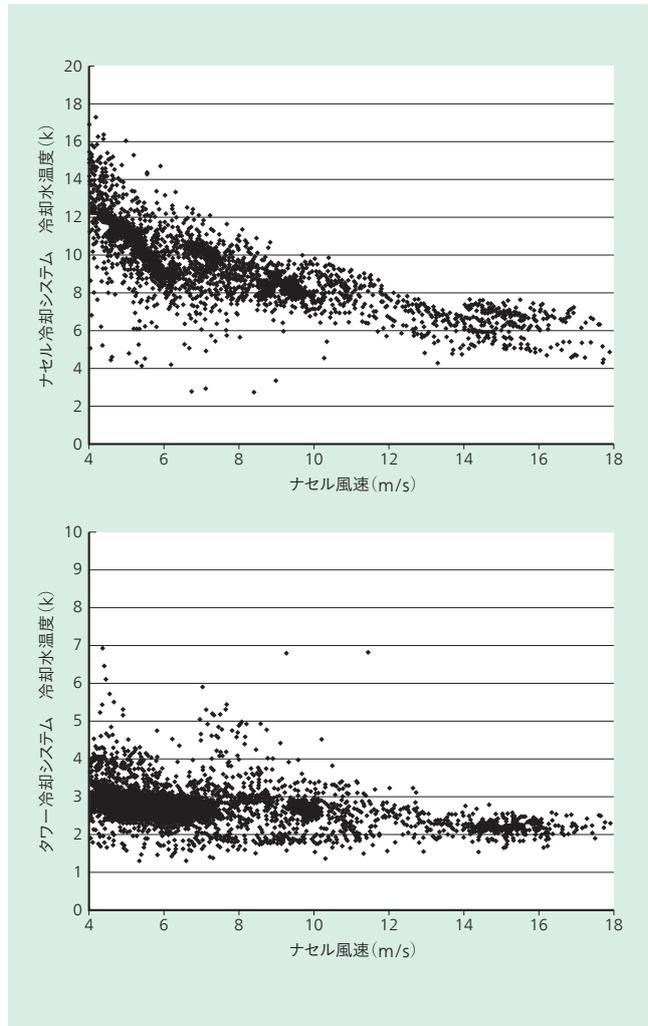


図6 | 冷却水温度とナセル風速との相関図

ナセル冷却システムおよびタワー冷却システムにおいて、ナセル風速が高いときに、冷却水温度が低く冷却効率が高くなる傾向が得られた。

要となる⁵⁾。

現在、風車各部の荷重を検証中であるが、ここではブレードルート部のフラップ方向曲げモーメント（以下、「フラップ曲げ」と記す。）についての検証結果を示す。計測はフラップ方向の正圧側および負圧側に設置した歪みゲージにより行い、それらの差分を2で割ることで等価に加わる遠心力などの影響を除去し、さらに換算係数を掛けることで曲げモーメントを算出した。

発電時におけるフラップ曲げの評価結果を図7および図8に示す。図7は10分間データに対する平均値、最大値、最小値、標準偏差であり、図8はDEL (Damage Equivalent Load) である。図中の「計測」は実測値、「設計」は空力弾性解析ソフトウェアBLADED⁶⁾を用いた設計値である。数値は10 m/sにおけるDELの設計値との比とした。

DELは式(1)により算出した。

$$R_{eq} = (\sum R_i^m \cdot n_i / n_{eq})^{1/m} \quad (1)$$

ここで、 R_{eq} : DEL, R_i : 疲労荷重スペクトルにおける i 番目のビンの荷重幅, n_i : 疲労荷重スペクトルにおける i 番目のビンの繰返し回数, n_{eq} : 等価繰返し回数 (600), m : 材質の S-N (Stress - Number of cycles to failure) 曲線の傾きである。

図7の平均値は実測値と設計値でよく一致しており、空力弾性解析は実機の静的な挙動をよく再現できているといえる。また、最大値は実測が設計よりも小さく、最小値は実測が設計よりも大きく、それに連動して図8の疲労荷重

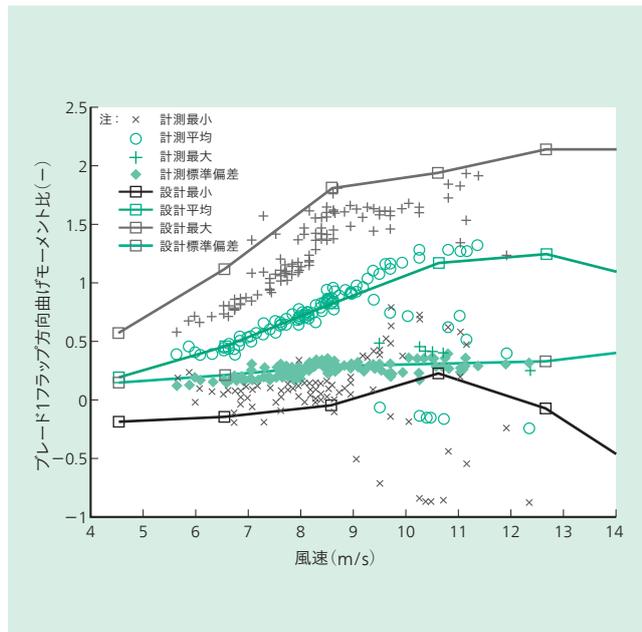


図7 | ブレードルート部フラップ方向曲げモーメント統計値
10分間平均風速に対してブレードフラップ曲げの10分間統計値を图示したものである。

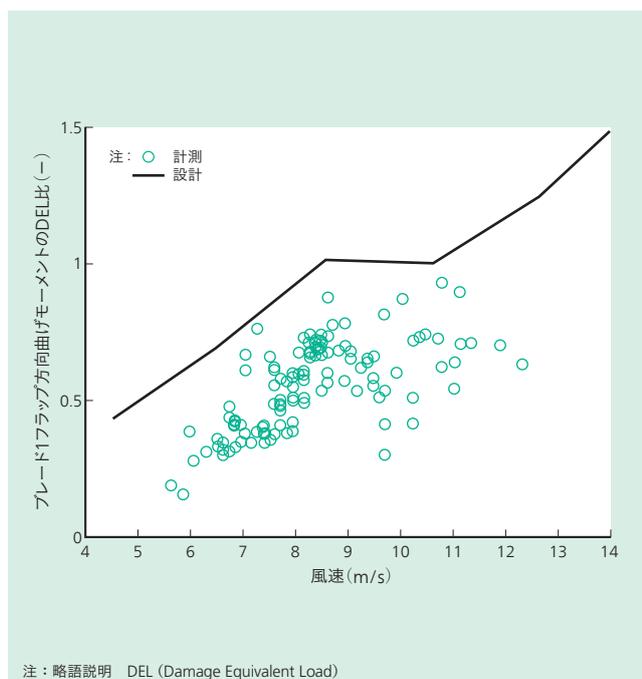


図8 | ブレードルート部フラップ方向曲げモーメント疲労荷重
10分間平均風速に対してブレードフラップ曲げの10分間疲労等価荷重を图示したものである。

は実測が設計よりも小さい。フラップ曲げの DEL については発電時が支配的であり、フラップ曲げの影響が大きい部位の疲労については問題ない可能性が高い。

4. 洋上風力用浮体式変電設備の実証実験

日本近海は欧州の北海と違い遠浅の海が少ないために浮体式が有力とされている。ここでは資源エネルギー庁の実証研究事業として運用されている2011年度福島復興浮体式洋上ウィンドファーム実証研究について紹介する。洋上変電所外観を図9に示す。

4.1 洋上変電所機器の振動試験

昨今の変電設備は、過去の大地震の経験を生かし耐震性の高い製品となっているが、浮体式は数十年に一度の台風発生時に対する揺れに加えて、常時揺動する状況で使用される。本事業では揺れに対する性能検証として、設計段階で十分な検討を行い開閉器 (66 kV ガス絶縁開閉装置, 24 kV 真空絶縁開閉装置) 類は、実際に加震機に乗せて性能を確認した。主変圧器 (66 kV, 25 MVA) は重量が 50 t を超え、対応できる加震機が極めて少ないため、揺れに相当する加速を変圧器の傾きに置き換えることで模擬し性能を確認した (図10参照)。

揺れ以外では、海上に設置するために塩害による発錆 (せい)・損傷の懸念がある。陸上設備との違いは保守性にある。陸上施設では補修塗装や作業を最適に行える環境を整えることは容易であるが、海上では制約があることを考慮に入れて設計する必要がある。実際に屋外に設置されている機器は変圧器のみであるが、薄板材を使用するラジエータは溶融亜鉛鍍金 (めっき) および亜鉛溶射を行いメンテナンスが少ない方法をとっている。



図9 | 洋上変電所外観

変電所規模は66 kV1回線受電, 変圧器出力は25 MVAとなっている。変電設備は上部デッキ内に収納されている。場所は福島県小名浜沖で手前が変電所, 奥が日立2 MW風車である。(写真提供: 福島洋上風力コンソーシアム)



図10 | 変圧器傾き試験

日立製作所国分事業所にて行った変圧器傾き試験の様子を示す。

4.2 実証実験

2013年10月受電以降、約2年間の運用実績となり、何度か大きな台風も経験しているが、動揺によるトラブルおよびその他トラブルもなく運転を続けている。屋外に露出されている変圧器に関しても塩害の影響は想定レベルに収まっている。今後は将来に向けたコスト低減・設計評価を実施していく予定である。

5. おわりに

本稿では、5 MWダウンウィンド風車HTW5.0-126性能・機能試験の内容や結果および浮体式変電設備の開発状況について述べた。

今後は、騒音なども含めた性能・機能試験をさらに実施し、特性の把握や改善を図る。また、新たな制御方法の検証にも取り組む。それらを通じて高性能・高信頼性の機器を社会に提供していく。

謝辞

5 MW洋上風力発電機HTW5.0-126の開発においては、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)よりご支援いただき、感謝申し上げます。

福島復興・浮体式ウィンドファーム実証研究事業においてはコンソーシアム各位よりご協力いただいております。お礼申し上げます。

参考文献など

- 1) 佐伯, 外: 5 MW洋上風車および2 MW浮体式洋上風車の技術開発, 日立評論, 96, 5, 341~346 (2014.5)
- 2) 飛永, 外: 日立製作所5MW機の技術開発, 実証, 今後の展開, 風力エネルギー, Vol.39, No.1, pp.93-96 (2015)
- 3) Googleマップ, <https://www.google.co.jp/maps>
- 4) 日本電気技術規格委員会, 系統連系規程JEAC9701-2012 (2012)
- 5) International Electrotechnical Commission, Wind turbine generator systems - Part 13: Measurement of mechanical loads, IEC TS 61400-13:2001, First edition (2001.6)
- 6) GL Garrad Hassan, Bladed, Version4.4.0.121 (2014.8)

執筆者紹介



清木 莊一郎

日立製作所 電力システム社 日立事業所 風力発電システム部 所属
現在, 風車の開発業務に従事
日本風力エネルギー学会会員



坂本 潔

日立製作所 電力システム社 日立事業所 風力発電システム部 所属
現在, 風車の開発業務に従事
博士(工学)
電気学会会員



稲村 慎吾

日立製作所 電力システム社 日立事業所 風力発電システム部 所属
現在, 風車の開発業務に従事
博士(工学)
電気学会会員



飛永 育男

日立製作所 電力システム社 日立事業所 風力発電システム部 所属
現在, 風車の開発業務に従事
日本風力エネルギー学会会員



佐伯 満

日立製作所 電力システム社 日立事業所 所属
現在, 風車開発プロジェクトに従事
技術士(電気電子部門)
電気学会会員



横山 和孝

日立製作所 エネルギーソリューション社
ソリューションシステム事業部 電源システム部 所属
現在, 国内・海外の受変電システムの拡販に従事
技術士(電気電子部門)