

風力発電システムの開発を支える基盤技術

船橋 茂久
Funabashi Shigehisa

田中 行平
Tanaka Kohei

木村 守
Kimura Mamoru

渡邊 昌俊
Watanabe Masatoshi

再生可能エネルギーの主力である風力発電は、近年、世界的に導入が進んでおり、今後は特に洋上風力発電の拡大が期待されている。洋上大型風車は、陸上風車以上に高信頼性、省メンテナンスなどが求められてくる。これらのニーズに応えるために、現在開発中の洋上5 MWダウンウィンド風車「HTW5.0-126」に対して、信頼

性評価技術や各種の解析技術を活用して、ドライブトレインや発電機などの信頼性向上、およびダウンウィンドの特徴を生かした冷却システムの開発を行っている。さらに、ブレード設計技術を開発して、次世代に向けた風車ブレードの高信頼、高出力化をめざしている。

1. はじめに

近年、地球温暖化などの環境問題を解決するため、再生可能エネルギーへの期待が高まっている。特に風力発電は、太陽光発電と並んでその中心と目されており、世界的に導入が進んでいる。今後の進展が期待される洋上風力発電は、陸上に比べて好風況が望めることに加え、騒音や大型部品の輸送などの課題が軽減されるため、風車の大型化には好適である。一方で、洋上であるがゆえに高信頼性、省メンテナンスなどは今まで以上に求められる。

ここでは、日立グループが洋上大型風車として開発中の5 MW風車「HTW5.0-126」に適用可能なドライブトレイン、永久磁石発電機、冷却システムの開発に用いている技術とその開発状況、および、ブレード設計技術から導かれる発電量増加の方向性について述べる。

2. ドライブトレインの信頼性向上技術

2.1 2軸受外輪駆動方式

5 MW大型風車のドライブトレインは、信頼性を向上させるため、2軸受外輪駆動方式の適用を検討している。この方式では、ブレードに加わる風力はハブ、回転主軸、増速機を介して発電機に回転力のみ伝達され、風荷重とブレードの自重は固定主軸で支持される。さらに、ミスアライメントを吸収するため、回転主軸は低剛性な形状としている。構成部品の構造設計には構造解析を適用して強度を

確認し、実験でその信頼性を検証している。

ドライブトレインの模型試験装置を図1に示す。この装置ではハブ、回転主軸、固定主軸、軸受の精密な $\frac{1}{5}$ 模型を製作し、油圧シリンダによって軸方向、径方向の負荷を与え、回転主軸の支持構造の高さ調整でミスアライメントを与えた試験を実施している。これにより、特に主軸の変形挙動を評価、検証している。

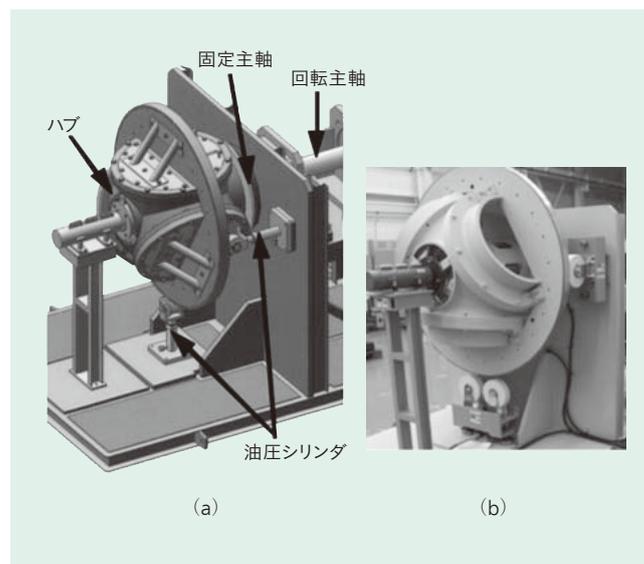


図1 | ドライブトレイン $\frac{1}{5}$ 模型試験

試験装置の模式図を(a)に、外観を(b)に示す。回転主軸は発電機に寄与する回転トルクを、固定主軸は風荷重やブレードの自重を分担する構成となっている。

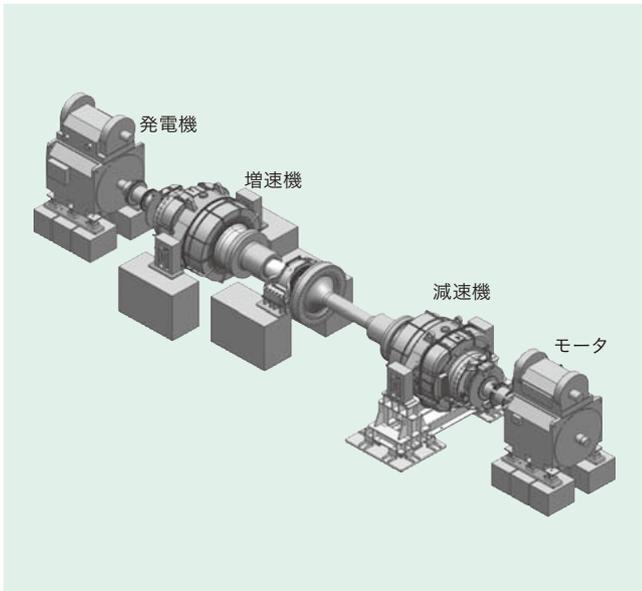


図2 | Back-to-Back試験の構成

右側の駆動側発電機（モータ）により、左側の発電側を回転させて、各種の運転条件での信頼性試験を実施する。

2.2 Back-to-Back試験

ドライブトレインの製品試験では、2対の発電機、増速機、PCS (Power Conditioning System) を対向させたBack-to-Back試験を実施し、多様な運転条件での振動・応力計測などにより、信頼性を検証している(図2参照)。ここでも増速機ベースを移動することで、ミスアライメントを変化させたときの特性についても評価している¹⁾。

3. 大容量永久磁石発電機の信頼性向上技術

3.1 高冷却クローバー構造

大容量風車用発電機には高出力密度化による小型・軽量化が求められる。このため、近年、永久磁石発電機を採用する例が増えてきている。しかし、永久磁石は高温になる

と減磁してしまうために、運転時の温度管理(冷却)が重要である。

耐温性を高めるためには、ネオジウム磁石にレアアースであるディスプロシウムを添加するのが一般的であるが、さらに日立グループでは、永久磁石を保持した回転子に冷却性能を高めるための通風路を設けた、クローバー構造を考案した²⁾。

クローバー構造は永久磁石を保持した回転子の回転軸方向に複数の極間通風路を設けた構造であり、その通風路を流れる気流によって、冷却性能を高めるものである。流体解析による通風、風損の解析や、電磁界解析による新構造での発電機性能予測を駆使して2 MW永久磁石発電機を設計、試作評価し、従来の二次励磁発電機に比べて30%の小型化を実現している[図3(a), (b)参照]。

3.2 5 MW機用永久磁石発電機

HTW5.0-126への適用をめざして、大容量の永久磁石発電機を開発した。中速ドライブトレイン向けの仕様は、36極、定格回転数440 rpm、出力5,460 kWである。現行の2 MW風車HTW2.0-80に比べて低回転であるため、さらに高い回転子の冷却性能が要求されるが、クローバー構造回転子により解決している。

開発にあたっては極数増加、大容量化に対応し磁石レイアウトなどを改めて検討し、組立性向上のための工夫なども盛り込んでいる[図3(c)参照]。

4. 自然風を生かしたパッシブ冷却技術

HTW5.0-126はダウンウィンド方式を採用しているため、ナセル先端部が風に対して最上流部に位置する。この特徴を生かしてパッシブ(ファンレス)冷却システムを検

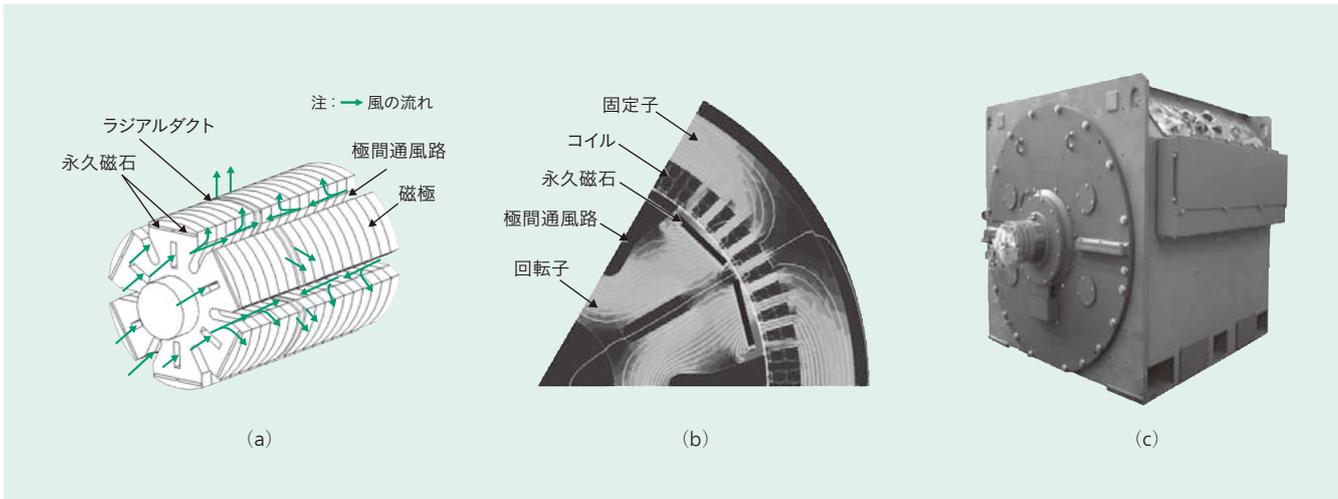


図3 | クローバー構造を有した永久磁石発電機

回転子周りの風の流れを(a)に、磁界解析で得られた磁力線図を(b)に示す。従来のラジアルダクトに加え、回転子を軸方向に貫く極間通風路を設けることにより、磁石周りの冷却性能を向上させた。(c)は、これらの技術を適用して今回開発した5 MW用発電機の外観である。

討している。

発電機、増速機の冷却水の熱を外気に放出させるラジエータをナセルの上流側に配置する。これによりロータブレードで減速される前の自然風を効果的に取り込み、効率よい冷却を図る〔図4 (a) 参照〕。

冷却に必要な風量を得るために重要なナセル形状は、流体解析を活用して決定した〔図4 (b) 参照〕。風に対してナセルの投影面内にラジエータを納めることで、ナセルに作用する風荷重を抑制するうえでも効果的な構成となっている¹⁾。

5. ブレード設計技術

5.1 風車ブレードの状況

2014年現在、欧州では直径約160 m、出力7 MW級の大型風車の稼働準備が進められている。EWEA (European Wind Energy Association) などが2015年ごろにブレード直径約180 m、出力10 MW級の風車が運転開始するであろうと予測するなど(2008年時点)、風力発電の大型化は着実に進んでいる。

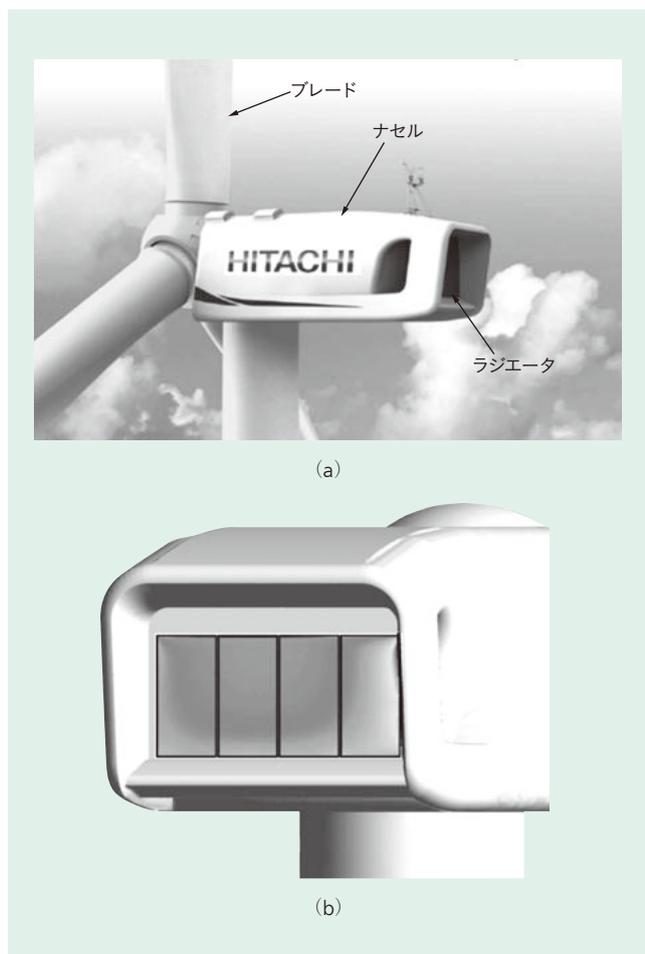


図4 | パッシブ冷却システム

ラジエータを配したナセルの外観を(a)に、流体解析によって得られたラジエータを流れる空気の風速分布を(b)示す。ナセル形状の工夫により、ファンレスでも均一で良好な空気の流入を実現できる。

一方、量産機として流通している風車では、低風速での発電量確保を目的とし、長大ブレードを採用した改良機が市場投入されている。可能な限り大きな発電量を実現するためのブレード大型化の方向性は顧客利益最大化をねらったものであり、風力発電事業における顧客志向製品開発の重要性を示すものである。

5.2 風車ブレード設計

ブレードは、気流を受けることでそのエネルギーをブレード回転力に変換する。ブレードが受ける曲げ方向力と回転方向力の概略を図5に示す。

曲げ方向力は、風下方向にブレードをたわませる力で、発電機回転軸とブレードの締結部に曲げモーメントを作用させ、風車の信頼性に大きな影響を与える。回転方向力は回転軸を回す力であり、大きいほど出力は大きくなる。発電による売電収入とO&M (Operation and Maintenance) 費の低減が利益回収に大きく関わるため、ブレードには高信頼性(曲げ力低減)と高出力(回転力増加)が要求される。

ブレード設計はBEM (Blade Element Momentum theory)³⁾法により実施している。設計パラメータは、ブレードの根元から先端までの断面における翼型とその性能テーブル、コード(翼弦)長、厚み、仕事量(揚力)などがあり、翼素運動量理論をもとに空力性能を満たす設計パラメータ選定を行い、翼型断面形状を決める。さらに、さまざまな運転条件下でブレードが受ける力を見積もり、静強度、疲労強度を満足する内部構造を決める。この一連の計算を最適化システムと組み合わせ、高信頼性(曲げ力低減)と高出力(回転力増加)の双方を満足する設計探索を行った結果を図6に示す⁴⁾。Ctは曲げ力の無次元数であるスラ

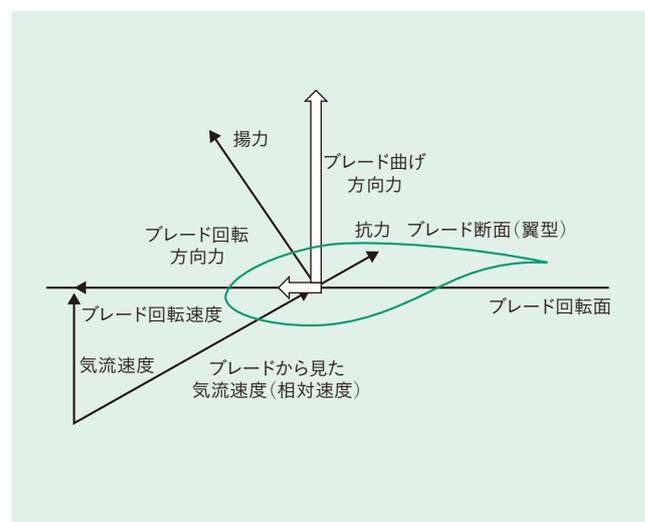


図5 | 発電用ブレード断面における速度と力の関係

ブレード断面は翼型であり、揚力が大きく、抗力が小さいものが選定される。大型風車では気流速度に対してブレード回転速度が大きく、揚力の多くはブレードを風下方向に曲げる力として作用する。

スト係数, C_p は出力の無次元数であるパワー係数である。

同図(a)に示すように設計探索により, 出力重視(C_p 大)から, 信頼性重視(C_t 小)までさまざまな解が得られる。 C_p が一番大きいA点と, C_t が小さいためにブレード長さを10%長くしても曲げ力が同等となるB点のブレード形状を同図(b)に示す。A点からB点への C_p の減少に対し, ブレードを長くした効果の方が大きいため, 同一風況, 最大出力制限下でブレードAよりもブレードBの方が7%程度, 年間発電量を多くすることができる。

ここでは一例を示したが信頼性と発電量のトレードオフ設計を顧客要求と照らし合わせて展開することで, 再生可能エネルギー分野の一翼を担っていく。

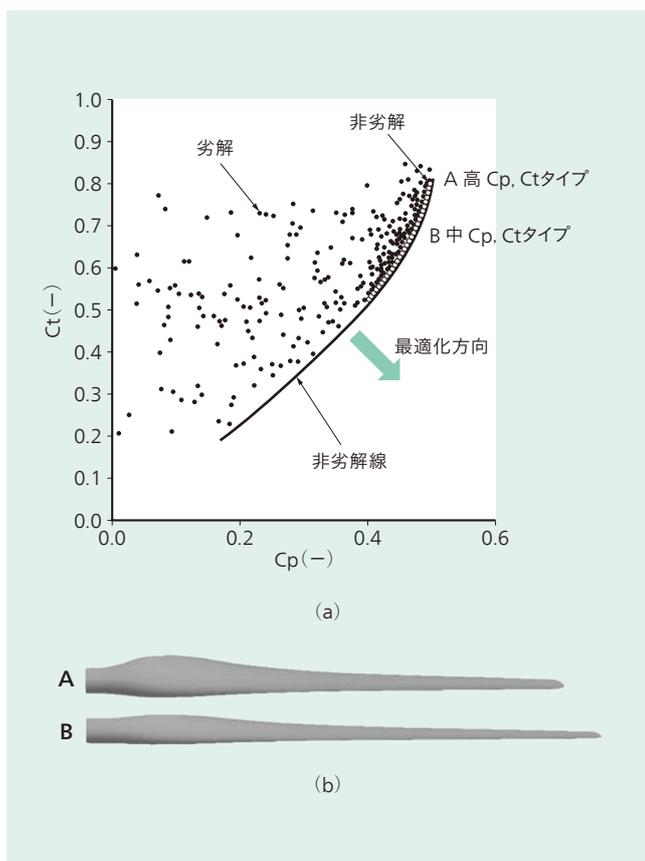


図6 | 発電用ブレード最適設計探索結果

信頼性に関わるスラスト係数 (C_t) 最小, 出力に関わるパワー係数 (C_p) 最大を目的関数とした2目的最適設計の探索結果を示す。この結果では形状Bは同一風速で曲げ力を形状Aと同等としたものである。 C_p が小さい分ブレード断面の翼型コード長が短く, C_t が小さい分, ブレード長を10%ほど長くできるため, 「スレンダーブレード」となっている。

6. おわりに

ここでは, 現在開発中の洋上大型風車に適用可能なドライトレイン, 永久磁石発電機, 冷却システムとその開発に適用している技術, および, ブレード設計技術から導かれる発電量増加の方向性について述べた。

日立グループは, このほかにも, 計測・モニタリング技術や風車システム制御などの技術開発に取り組んでおり, これらの適用によって, 高信頼高効率の風力発電システムの開発に寄与していくことが, 地球環境に配慮したエネルギーの拡大につながると考えられる。

参考文献

- 1) M. Saeki, et al.: Concept of the HITACHI 5MW Offshore Downwind Turbine, EWEA2014 Annual Event, PO.ID15 (2014.3)
- 2) 木村, 外: 極間通風回転子を用いた大容量風力発電向け永久磁石発電機の検討, 電気学会論文誌D, Vol.133, No.8, 821~827 (2013.8)
- 3) Tony Burton, et al.: Wind Energy Handbook, 2nd Edition, WILEY (2011.6)
- 4) 渡邊, 外: 最適化手法を用いた風力発電用ブレード設計, 第21回茨城講演会講演論文集 (2013.9)

執筆者紹介



船橋 茂久

日立製作所 日立研究所 エネルギー・環境研究センタ 応用エネルギーシステム研究部 所属
現在, 大型風力発電向け冷却システムの研究開発に従事
日本機械学会会員



田中 行平

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, 大型風力発電の構造信頼性に関する研究開発に従事
工学博士
日本機械学会会員



木村 守

日立製作所 日立研究所 エネルギー・環境研究センタ 応用エネルギーシステム研究部 所属
現在, 大型風力発電向け発電機システムの研究開発に従事
工学博士
電気学会会員



渡邊 昌俊

日立製作所 日立研究所 エネルギー・環境研究センタ 応用エネルギーシステム研究部 所属
現在, 大型風力発電向けブレード空力設計技術の研究開発に従事
工学博士
日本機械学会会員