洋上風力発電を支える風況解析技術と HVDCシステム技術

Technologies for Wind Condition Analysis and HVDC Systems Underpinning Offshore Wind Power Generation

飯尾 尚隆 IIO Naotaka 岡山 芙有子 OKAYAMA Fuko 谷山 賀浩 TANIYAMA Yoshihiro

カーボンニュートラルの実現に向け,洋上風力発電の導入拡大が期待されている。これを実現するためには,設置場所で の発電量予測のための風況調査や,洋上から陸上までの長距離を効率良く送電する技術などが必要になる。

東芝エネルギーシステムズ(株)は、その強みである風況解析技術や洋上から効率良く送電するための直流送電(HVDC: High Voltage Direct Current)システムの開発を進めている。風況解析では、これまでの陸上での経験も生かし、洋上 風況計測や、数値流体解析(CFD)を用いて風車後流(ウエイク)の3次元構造のような風況を把握した。また、HVDC システムでは、国内外での実績を生かし、洋上風力発電向けHVDCに適したモジュラーマルチレベル方式の自励式変換器 (MMC: Modular Multilevel Converter)を開発するとともに、多端子HVDCで必要となる直流遮断器(DCCB: Direct Current Circuit Breaker)の試作器による電流遮断試験で大電流・高速遮断を達成した。

With the aim of realizing carbon neutrality in Japan, the introduction of offshore wind power generation systems is expected to further expand on a large scale from now on. This situation has given rise to the need for technologies to survey wind conditions in order to predict the amount of power generation at installation sites, as well as to realize high-efficiency power transfer over long distances from marine locations to land.

Toshiba Energy Systems & Solutions Corporation is aiming to realize an offshore wind power generation system by making use of the following proprietary technologies: (1) an offshore wind condition analysis technology cultivated through its accumulated technologies for the measurement and analysis of wind conditions at onshore sites, and (2) a high-voltage DC (HVDC) power transmission system that can efficiently transfer power from offshore sites. Applying computational fluid dynamics (CFD) analysis using wind condition data measured at a quasi-offshore site, we have confirmed that this analysis technology provides a precise understanding of wind conditions such as the three-dimensional structure of wakes behind wind turbines. We have also developed a modular multilevel voltage-source converter (VSC) suitable for HVDC systems for offshore wind power generation systems, as well as a prototype DC circuit breaker (DCCB) necessary for multiterminal HVDC systems that has achieved high-current and high-speed cutoff performance in current breaking tests.

1. まえがき

カーボンニュートラルの一翼を担う有力な再生可能エネル ギーとして,我が国においても洋上風力発電が注目されてい る。大規模な洋上風力発電システムを実現するには,経済 性の観点から,洋上における風況を精度良く調査し,設置 場所での発電量を正確に予測する必要があり,また,発電 した電力を大きな接続可能量を持つ上位の送電系統まで長 距離送電し接続する必要がある。

東芝グループでは、長年培ってきた陸上風力発電向けの 風況解析技術⁽¹⁾や、HVDCシステム技術を生かし、洋上風 カシステムへの開発展開を加速している。洋上風力発電の 規模の大きさや設置環境の特殊性に適合させた洋上風況計 測・解析技術開発を進めるとともに、洋上風力システムに適 用するHVDCシステムに要求される変換器や直流遮断器な どの主回路機器開発に取り組んでいる。 ここでは、これらの洋上における風況解析技術やHVDC システム技術など、今回開発した技術について述べる。

2. 実サイトでの風況観測と洋上風況解析手法の検討

洋上風力発電のための風況評価には,洋上風況計測手法 の確立,及び大気安定度とウエイクの評価が重要なポイント となる。当社は,国立大学法人九州大学,日立造船(株) との3者共同研究を実施し,秋田県の雄物川風力発電所 (以下,雄物川WFと略記)で洋上風況を計測し,計測 データの分析及び解析結果の検証を行うことで,より高精 度な洋上風況解析手法の開発を進めている。

2.1 鉛直LiDARによる疑似洋上風況計測

雄物川WFは南北の海岸線に沿った平たんな地形にあり, 陸風(北北東から南南東)と海風(南南西から北北西)が 区別しやすいことから,疑似洋上サイトとして風況評価手法 構築の拠点としている。



D:風車のローター直径 HH:風車のハブ高さ

図1. LiDAR設置位置及び計測期間

2台の鉛直LiDARを用いて、流入風とウエイクを計測した。

Positions of light detection and ranging (lidar) devices and measurement periods

まず、このサイトの風況を把握するため、図1の流入風計 測及びウエイク計測1の位置に鉛直LiDAR (Light Detection And Ranging)を設置した。1日の高度別風速推移を 確認した結果、陸風は日中に低高度風速が高高度風速より も大きくなり、海風は日中に高度ごとの風速差がやや拡大す るという、陸風と海風で異なる傾向が見られた(図2)。ま



図2.1日の高度別風速推移

設置したLiDARによる計測結果で、陸風と海風で異なる傾向が見られた。

Daily changes in wind speeds of sea breeze and land breeze by measurement height



*ハノ 高さの 風速 ぐ 規格化

図3. 方位別の平均風速鉛直プロファイル

16方位の平均風速鉛直プロファイルで特徴的な,西方位と南東方位のプロ ファイルを確認したところ,南東方位でウエイクによる風速欠損が見られた。 Vertical profiles of average wind speed by wind direction sector

た,西方位からの海風は高度による風速差のない鉛直プロファイルが確認されるとともに,2号機のウエイクが吹いてくる方位となる南東方位では,ローター受風面で風速が減少する事象が捉えられた(図3)⁽²⁾。

2.2 ウエイクの3次元構造の把握

ウエイクによる風速欠損は画一的なものではなく,図4の ように3次元構造を持つが、LiDARで得られる風速は、そ の計測原理からレーザー射出方向の平均値を示すため、風 車への疲労強度評価などには正しい解釈とならない可能性 がある。そこで、同サイトの1号機と2号機の中間位置で、 風車間を結ぶ方位とその方位から45°ずらした方位に各 1台、計2台のLiDARを設置し、ウエイクの計測及びCFD



V_r:LiDARの視線方向。数値は方位角(°)

図4. ウエイクの3次元構造

風車間のウエイクは、画一的ではなく3次元構造を持つため、LiDARの視 線方向で風速計測結果が異なる。

Three-dimensional structure of wake produced between wind turbines

特

集



図5. LiDARの視線風速から算出した風速と鉛直方向で算出した風 速の,高度別風速差の解析結果

LiDARの四つの視線風速から算出した風速 u_{wl} と、z軸(鉛直方向)上の 1点から得られる風速 u_{wz} との差は、高度によって異なることが分かる。 Results of simulations of differences between wind speeds calculated from lidar viewing and vertical directions

との比較評価を行った。図5はCFDの結果で、LiDARの 視線方向を0~89°に変化させたときの高度別速度成分 u_{wl} とLiDARを中心とした円柱座標系のz軸(鉛直方向)上の 速度 u_{wz} との差 Δu_w を示している。高度80mでは u_{wl} は u_{wz} と比較して過小評価され、120mでは過大評価されること が分かり、風車の回転角度 θ_r が45°となる場合に風速差が 最大となる。また、高度40mでは風速差が小さく、200m では速度差が生じない結果となった。これは、図4に示す LiDAR設置位置における、2台のLiDARを用いた計測結果 の傾向と良い一致が確認できており、LiDARを用いてウエイ クを計測する際は、設置方向を考慮する必要があることが 示唆された⁽³⁾。

2.3 大気安定度を考慮した流入風とウエイクの同時計測

洋上における風況を評価・再現する際に考慮しなければ ならないのが、大気安定度である。大気安定度は、大気 の垂直方向の混合・拡散のしやすさを示し、地形に起因し た乱流が少ない洋上では風況に大きな影響を与える。当社 は、図1の流入風計測及びウエイク計測2の位置にLiDAR を設置することで、大気安定度を考慮した流入風とウエイク の同時計測を実施した。計測期間の都合上、今回は陸風 だけの評価結果を示す。また、大気安定度を推定する手段 としては、ECMWF(欧州中期予報センター)から提供され る気象再解析モデル"ERA5"⁽⁴⁾を用い、2号機位置におい てLiDAR計測期間と同期間のERA5データを使用した。

ウエイク風向の風速を大気安定度が"安定"と"中立"の 場合で比較すると、図6に示すように、安定の場合に風速 欠損が大きくなっていることが分かった。これは、大気が安



*ハブ高さの風速で規格化

図6. 異なる大気安定度での陸風ウエイク

大気安定度によって、風速欠損の程度が異なることが分かる。 Profiles of wakes produced by land breeze under stable atmosphere and neutral atmospheric stability

定であることでウエイクの回復効果が小さくなるためと考えら れる。これにより、ERA5を用いて大気安定度別に計測デー タを分類することは、妥当であることが示唆された⁽²⁾。

今後も、LiDARやスキャニングLiDARなどのリモートセンシング機器を用いて沿岸及び洋上の複数のサイトにおける 風況計測を実施する計画があることから、引き続き洋上風 況計測手法の確立や、大気安定度とウエイク評価のための 解析技術の開発を進めていく。

3. HVDCシステム技術

洋上風力システムの実現に向け,洋上ウインドファーム群 を電源とした大電力を陸上系統などへ長距離にわたり供給 するには,送電損失などの面から,HVDCシステムによる送 電が有利である。当社は,国内の電力会社向けHVDCプ ロジェクトの全てに参画しており,HVDCにおいて国内トッ プ^(注1)の納入実績がある。この経験を生かして,洋上風力 システム向けのHVDCシステムの主回路機器開発に取り組 んでいる。

3.1 MMCの適用

HVDCシステムに適用する交直変換装置は,自励式変換 装置と他励式変換装置に大別され,自励式変換装置では 自己消弧型の半導体素子の動作により,交流電源に依存 しない運転が可能である。今後,交直変換装置が洋上風 力電源だけと連系する場合など,不安定な交流電源との連



IEGT : Injection Enhanced Gate Transistor

図7. MMCの基本回路構成

チョッパーセルを多段接続し、高電圧化に適した構成となっている。Basic circuit diagram of VSC

系においては、自励式変換装置の適用が主流となると考え られる。当社は、自励式変換装置において、更なる高耐圧 化やフィルターレス化に適したMMCを開発した(図7)⁽⁵⁾。 MMCでは、従来の2レベルなどのPWM(パルス幅変調) 変換器と異なり、チョッパーセル単位に低電圧のコンデン サーを設けてチョッパーセルを多段に直列接続することで、 変換器の高電圧化が容易になる。また、各チョッパーセル によるスイッチング動作で、交流側に正弦波に近い電圧波 形を発生させることで変換器が発生する高調波を大幅に低 減でき、フィルターレス化による敷地面積の削減に貢献で きる。当社は、このMMCを適用した国内初^(注2)の自励式 HVDCシステムを、新北海道本州間連系設備に納入した (図8)。この技術を生かして、今後の洋上風力システム用 MMCの設計を進めている。

3.2 DCCBの開発

洋上風力システムなど,分散型電源から高信頼・高効率 で陸上若しくは離島に送電する構成として,図9に示すよう な,多端子の構成としたHVDCシステムが注目されている。 既に,海外で数件の導入例があり,今後,我が国でも洋上 風力発電の普及に伴ってその適用が見込まれる。

多端子HVDCシステムは、直流事故による影響が他端 子へ波及することを抑えるために、事故線路を高速に遮断 して事故区間を分離するDCCBが必要な場合がある。当社 は、定常損失の低減や数ms以下の高速遮断を実現するた

(注2) 2019年3月時点,当社調べ。



図8. MMCを適用した自励式変換装置 新北海道本州間連系設備として採用された,HVDCシステムに適用した MMC方式の自励式変換装置である。 VSC for HVDC systems



AC:交流 DC:直流

図9. 多端子HVDCシステムの構成例

分散する風力発電の電力を,高信頼・高効率で陸上に供給する。 Example of configuration of multiterminal HVDC system

めに,常時は機械遮断部に通電し,事故時には半導体遮断部に転流して遮断するハイブリッド方式のDCCBを提案した(図10)⁶⁶。

ハイブリッド方式DCCBの40 kV試作器を製作し,電流 遮断試験を実施した。遮断指令後約2 msで機械遮断部 の電流を半導体遮断部に転流し,遮断指令後2.9 msで事 故電流ピーク14.9 kAを半導体遮断部で遮断した。この試 験結果から,開発目標とした"遮断電流8 kA以上-裁断時 間5 ms以下"を大きく上回る大電流・高速遮断を達成した (図11)。この成果を基に,製品化に向けて高電圧化・低 コスト化の開発を進めている。



図11. ハイブリッド方式 DCCB の40 kV 試作器による電流遮断試験 結果

遮断指令後の半導体遮断部への転流動作と、半導体遮断部による2.9 ms での遮断を確認した。

Results of current breaking performance tests on prototype 40 kV hybrid DCCB

4. あとがき

今後の洋上風力発電の導入に向け,洋上風況解析技術,及びHVDCシステム技術について述べた。発電側及び送電側の技術を熟知し,洋上風力で発電した電力を系統側に供給するために必要なこれらの開発成果を生かして,洋上風力システムの早期実現に向けて取り組んでいく。

この研究で、DCCBの開発成果は、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)の委託業 務「次世代洋上直流送電システム開発事業」で得られたも のである。

文 献

- 谷山賀浩, ほか.風力発電システムの最新技術.東芝レビュー.2019, 74, 1, p.13-17. <https://www.global.toshiba/content/dam/ toshiba/migration/corp/techReviewAssets/tech/review/2019/ 01/74_01pdf/a04.pdf>,(参照 2021-03-25).
- (2) 深谷侑輝,ほか. "実サイトにおける風車後流の影響評価 ~その5:海風 と陸風によるウェイク性状の評価~". 第42回風力エネルギー利用シン ポジウム予稿集.オンライン開催,2020-11,日本風力エネルギー学会. 2020, p.33-36.
- (3) 白 志仁, ほか. "実サイトにおける風車後流の影響評価 ~その6:ライ ダー視線方向によるウェイク計測結果に対する考察~". 第42回風力エ ネルギー利用シンポジウム予稿集.オンライン開催, 2020-11, 日本風 力エネルギー学会. 2020, p.45-48.
- (4) European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF).
 "ERA5". ECMWF. https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era5, (参照 2021-01-12).
- (5) 新井卓郎, ほか. HVDC用高電圧・大容量マルチレベル変換器. 東芝 レビュー. 2014, 69, 4, p.16-19.
- (6) Koyama, Y. et al, Operation and Experimentation of a Current Commutated Hybrid DC Circuit Breaker for HVDC Transmission Grids. IEEJ Journal of Industry Applications. 2019, 8, 5, p.835– 842.





飯尾 尚隆 IIO Naotaka



岡山 芙有子 OKAYAMA Fuko 東芝エネルギーシステムズ(株) グリッド・アグリゲーション事業部 風力発電技術部 Toshiba Energy Systems & Solutions Corp.



谷山 賀浩 TANIYAMA Yoshihiro
 東芝エネルギーシステムズ(株)
 エネルギーシステム技術開発センター 機械技術開発部
 日本機械学会会員
 Toshiba Energy Systems & Solutions Corp.