

三菱高性能大形風力発電設備

Mitsubishi High Efficiency Large Capacity Wind Turbines

藤 川 卓 爾 岩 崎 信 顕 勝 呂 幸 男
 岩 永 洋 一 柴 田 昌 明



風力発電は無尽蔵で再生可能な風のエネルギーを利用した、二酸化炭素を排出せず環境に優しい発電システムとして近年世界的に急速に普及している。これまで風力発電システムは機器本体を含めた発電コスト低減と信頼性の向上が先行していたが、最近はこちらに加えて、電力システムへの影響を低減する技術として、風力エネルギーの変動を慣性エネルギーとして吸収し、出力変動を大幅に低減する可変速風車技術が注目されている。当社では、永久磁石式同期発電機を採用した新型可変速風車 MWT-S シリーズを開発し、2000年7月に世界で初めての実用検証風車を東北電力(株)竜飛ウインドパーク内に建設して、可変速風車の特徴である(1)出力変動の低減、(2)突入電流の低減、(3)低騒音化、(4)メンテナンス性の向上等について、東北電力(株)と共同で実機の検証試験を行い、それらの効果を確認した。また、風力発電の更なる経済性と信頼性の向上を目指して、現在低風速対応高性能1 000 kW誘導型や600 kW同期型及び2 000 kW同期型を開発している。これらの新機種は今年中に運転する予定である。

1. はじめに

近年の地球環境保全意識の高揚やエネルギー供給体制整備の中で、風力発電は環境に優しい再生可能な風のエネルギーを利用した発電システムとして、世界各地で建設が進んでいる。また、我が国でも新エネルギー開発推進の中で風力発電は大いに期待されており、一次エネルギー自給率向上も踏まえて政府は2010年での風力発電導入目標を300万kWへ拡大した。

2002年1月現在、世界で23 270 MWの風力発電設備が建設されており、2005年には総計58 000 MWの風力発電設備が設置されるとの予想も出ており、今後も飛躍的な建設増加が期待されている。

土地の有効利用やスケールメリットの観点から、風車技術の進歩を踏まえて風力発電装置は急速に大型化が進んでいる。僅か5、6年前には単機最大出力が500 kW程度であったものが、現状では単機出力600～1 000 kWの機種が主流である。さらに最近では単機出力2 000 kW以上の機器の開発及び実用化が行われている。

当社においても1980年に40 kW機、1982年に300 kW機、1996年にNEDO向け500 kW機を製作したのに続き、1999年には1 000 kW (1 MW) 機を開発して室蘭市祝津風力発電所に納入し、現在2 000 kW (2 MW) 機を開発している。

また、より細かく出力制御を行える電力システムに優しい可変速同期型風車の導入も進んでおり、当社は2000年に三菱電機(株)と共同開発した300 kW可変速ギャレス永久磁石式同期型風車を、2000年7月から東北電力(株)と竜飛ウインド

パークにて共同運転研究を実施している。また、現在600 kW同期型の試運転を進めている。

さらに、低風速域での市場ニーズを考慮し、低風速域用高性能1 000 kW (1MW) 風車も並行して開発している。

風力エネルギー利用技術及び当社の高性能風力発電設備の開発経緯と今後の風力発電設備の大形化について以下に紹介する。

2. 風力エネルギーについて

風力発電では風の速度エネルギーを効果的に翼の回転力に変換したのち、発電機を回して発電する。

今、空気質量 m 、速度 V とすると風の持つ運動エネルギーは次のようになる。

$$\text{風の運動エネルギー} = 1/2 m V^2$$

ここで、受風面積 A (m^2) の風車を単位時間 (s) に風速 V (m/s) で通過する風の運動エネルギーすなわち風力エネルギー P (W) は空気密度を ρ (kg/m^3) とすると次の式になる。

$$\text{風力エネルギー } P = 1/2 (\rho A V) V^2 = 1/2 \rho A V^3$$

このように、風力エネルギーは風速の3乗に比例する。

ここで、単位面積当たりの風力エネルギーを風力エネルギー密度 P_0 と呼び、日本の平地における1気圧15℃の空気密度 $\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$ を使用すると P_0 は図1のようになる。

一方、風力エネルギーの利用では風車自身による抵抗のため局所的な風速の変化が生じて、利用できる理論的上限值(ベッツの限界)は P_0 の59.3%である。実際はそこから更に機械損失等があるため、最終的に風車出力として利用できる

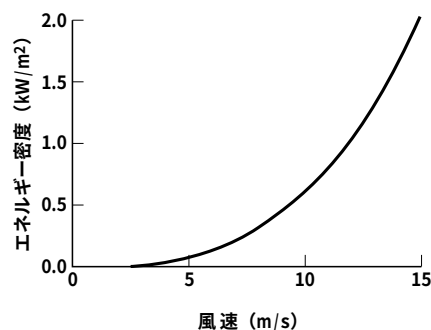


図1 風力エネルギー密度

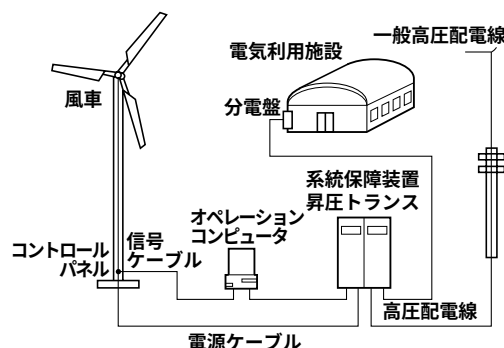


図2 風力発電システムの構成



図3 大規模風車の設置例

表1 近代風車の特徴

- | |
|--------------------|
| 1. 流体力学の適用 |
| →高性能化 |
| 2. 新材料の適用 |
| →FRP, 合金鋼の使用, 大形化 |
| 3. 発電への適用 |
| →立地の自由度大, 大規模化可能 |
| 4. 制御の高度化 |
| →フルスパンピッチ制御 ヨー自動制御 |



図4 米国テハチャピ風車



図5 東北電力(株)竜飛岬

エネルギーの比率（風車エネルギー係数）は更に低下し、現在の小形風車で約30%強、大形風車で約40%強である。

3. 風力発電システムの構成について

まず、典型的な大形風力発電システムの構成を紹介する。図2に示すように風車からの電力ケーブルは昇圧トランスを経由して高圧配電線等に系統連系される。風車からの信号ケーブルはオペレーションコンピュータに接続される。また、必要により、近くの電気設備への分電盤が設けられる。

大形風車の設置例を図3に示す。これは室蘭市祝津風力発電所に納めたもので、左側が490 kW機、右側が1 000 kW（1 MW）機である。1 000 kW（1 MW）機風車の概略寸法は翼直径が57 m、基礎から回転翼中心までの高さ（ハブ高さ）は60 mもあり、ジャンボ機並の大きさである。

自然エネルギーの中での風力発電の位置付けは水力発電等と比べ経済性の面では制約があるが、技術的にはかなり成熟してきている範疇に入る。

しかし、このような近代的大形風車が普及するまでには次のような長い経緯があった。

欧州では17世紀以前から風車を灌漑や製粉用として使用していたが、産業革命以降いわゆるオランダ型風車は急激に減少した。

しかし、エネルギー源確保の観点から1880年代後半から風による発電を研究する人々が現れてきたものの発展しなかった。

ところが、1970年代のオイルショックや酸性雨の被害を受けてから表1に示すような近代技術を意欲的に取り入れて風車を開発し、さらにその規模を大きくして経済性を向上するとともに、政府の支援も得て急激な普及が進んでいる。

4. 三菱風車の大形化経緯について

現在国内で唯一大形風車を製造している三菱重工での風車の大形化経緯を紹介する。

当社では、1980年に試験用の40 kW小形風力発電装置を長崎造船所香焼工場内に建設して以来、段階的に大形機の実用化へ向けた開発を進めてきた。1982年に九州電力(株)知名風力発電所向けに初の商用300 kW機を納入し、その共同実用化検証によって多くの知見、ノウハウを得た。その後、多量生産型商用機としてFRP翼アップウインド方式の250 kW風力発電装置を開発した。この風力発電装置はMWT-250の型式で現在までに800台以上製作されている。特に米国カリフォルニア州テハチャピの660台は同一機種種のウインドファームとしては世界最大を誇る(図4)。

1991年にはNEDO(新エネルギー・産業技術総合開発機構)の大形風力発電システムの開発がスタートした。当社は500 kW風力発電装置の設計から建設までを担当し、1996年10月に青森県竜飛岬(図5)に完成させ、その後の運転研究により複雑地形における風車の性能・信頼性の検証を行った。

一方、MWT-250の後継となる量産機MWT-450は、1996年1月に初号機をドイツのウインクラ社向けに納入した。この風車は、設計手法の確かさを証明する型式認定機関ジャーマニッシャーロイド(現GLWind)のサイト型式認定を、ヨーロッパ以外で初めて取得した。

この信頼度の高い設計手法を用いて、海外での更なる単機容量アップのニーズに対応するため、1998年に600 kWクラスのMWT-600の開発を行い、1999年米国に131台を納入したのを皮切りに、現在までに260台以上を納入し、商用運転を行っている。この600 kW機では、MWT-600 Mk が昨年

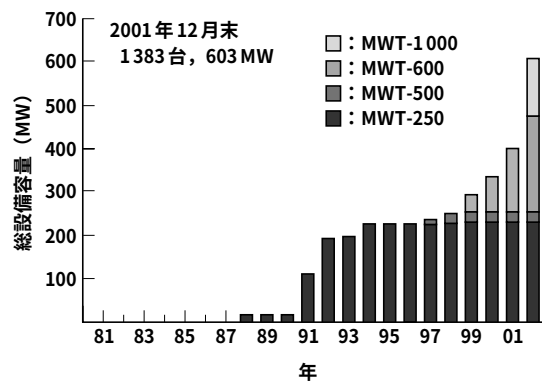


図6 受注納入実績

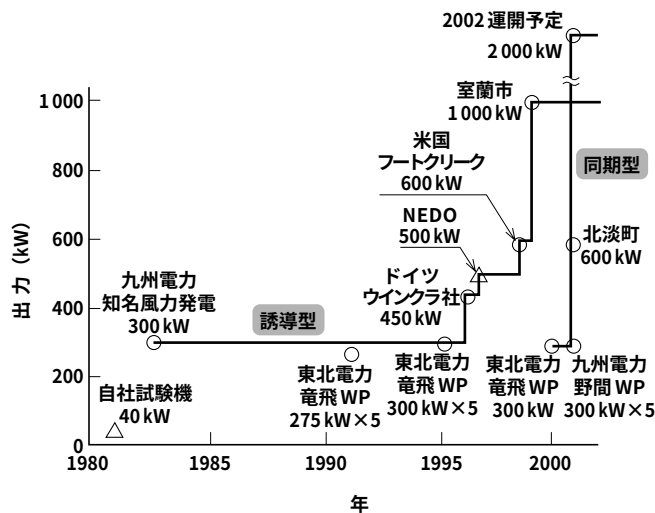


図7 大形風車開発経緯

(2001年) 国産機種で初めてGLWindより“風車クラス A”の設計認証を取得した。

ヨーロッパ競合他社が1 MW以上の大形風車の実用化を推進しているなか、当社でも1998年に1 MW風車の本格的開発に着手し、当時国内初の1 MW風車を1999年3月に納入して現在まで順調に運転を行っており、最近では米国向けに1 MW機の大量受注(130台)を達成している。2001年12月末時点の受注納入実績は1383台603 MWを超える(図6)。

さらに、2000年7月に電力系統にやさしい可変速ギヤレス永久磁石式同期型300 kW風車を三菱電機(株)と共同開発して社会の期待にこたえている。大形風車の開発経緯を図7に示す。

5. 大形風車の開発事例

ここでは大形風車開発時の主要な検討事項等について紹介する。

5.1 検討事項

大形機を開発するときの設計検討項目を表2に示す。

5.2 MWT-2000Sの基本仕様及び特徴

現在開発しているMWT-2000 S同期型風車の基本仕様、体格を他機種と併せて表3、図8に、主要特徴を以下に示す。

ロータは3枚のGFRP翼で構成され、ロータ直径は75 m

表2 風車開発時設計検討項目

(1) 風車の概念設計
(2) 性能検討と翼の開発
(3) 風況シミュレーションの確立
(4) 翼、ロータヘッド、主軸、歯車、発電機、保安装置、制御装置、タワー、基礎等の静的強度、動的強度の検討
(5) 20年以上の寿命とこれを維持するためのメンテナンス方法の確立

表3 同期型風車基本仕様

形 式	MWT-300S	MWT-600S	MWT-2000S (2002年運開予定)
定格出力 (kW)	300	600	2000
ロータ直径 (m)	30	45	75
回転数 (rpm)	16~46	10~34	8~24
定格風速 (m/s)	14.5	13.0	13.0
カットイン風速 (m/s)	2.5	2.5	2.5
カットアウト風速 (m/s)	25.0	25.0	25.0
受注納入実績 (台)	7	1	—
出力合計 (kW)	2050	600	—

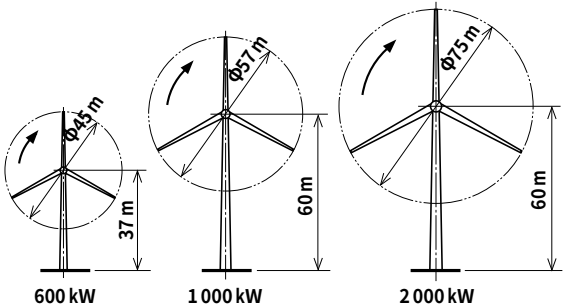


図8 大形風車の体格

である。定格風速は13 m/s、カットイン・カットアウト風速はそれぞれ2.5 m/s・25 m/s (10分平均風速)である。また、ロータ回転数は8~24 rpmの可変速方式としている。出力制御方式は可変ピッチ制御及びパルスウィズモジュレーション(PWM)方式による電力制御であり、翼ピッチ角はロータヘッド内の電動機により風速に応じて最適制御する。風力エネルギーは翼からロータヘッド、主軸を経て発電機に伝達される。また、発電機は永久磁石式多極同期発電機で、系統連系はAC-DC-AC方式を採用して電力制御を行っている。

MWT-2000 Sの主な技術的特徴を次に示す。

- ①実績のある300~1000 kW機の基本設計をベースとした信頼性の高い構造
- ②翼先端のシャープニングによる風切り音の低減、また、ギヤレス化及び発電機の防音支持による機械音の2 dB(A)以上の低減
- ③翼根部に30~40%厚肉翼型改良適用による空力性能向上
- ④翼(GFRP製)の大形化・軽量化及び台風時の強風にも耐える高強度の両立
- ⑤大電力トランジスタを用いたPWM方式による系統併入時の突入電流抑制と出力変動(±3%)の制御

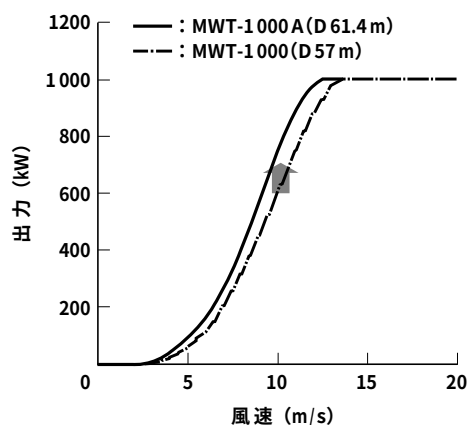


図9 新1 MW風車のパワーカーブ

- ⑥可変速永久磁石式多極同期発電機の採用による低風速時の性能を平均5%アップ
- ⑦ギヤレス化とピッチ制御の電動化により、油設備を縮小して保守性を大幅に向上

5.3 高性能MWT-1000 A風車の開発方針と概要

現在鋭意製作を進めている高性能低風速域向1000 kW風車の基本仕様と体格は十分な実績のあるMWT-1000を踏襲している。

今回、低風速での高性能化を狙って新長翼化設計を行った。

この新機種は当初は米国の低風速地域への適用を目的としていたが、最近の国内低風速地域での風力発電開発の増加に伴い、国内へも積極的に投入することにした。

新機種MWT-1000Aのパワーカーブと従来機のものとの比較を図9に示すが、風速10 m/sで25%以上の性能向上が図られている。

6. 今後の大形風車の動向

前項で大形風車の開発を紹介したが、現在世界の最大機は2 MWより更に大きくなっているため、当社も次世代5 MW級風車の検討を始めている。また、そこでは大出力化による経済性追求のみならず、風に由来する出力の変動をいかに軽減するかの技術開発も必要となってくる。

これらの技術開発課題を周辺技術も含めて表4に整理し、これからの風力発電新時代を切り開いていきたい。

- (1) 本体は高性能かつ大容量機とし、さらに平準化効果を持たせて、より出力安定度を高める。
- (2) 保守性のよい機械にする。
- (3) 洋上を含めて周辺設備の最適化を図る。
- (4) 風車の信頼性評価手法を開発し、より高度な経済運用を図る。
- (5) ウィンドファームでの系統連系高度化を図る。この高度化では周波数変動や電圧変動及び高調波発生への対策を配慮する。また、電力系統との連系部では負荷平準化に蓄電池の併設や、フライホイール電力貯蔵装置の併用等を考える。さらに、大規模系統連系としては可変速風車を多用し、場合によってはディーゼル機関とのハイブリットとしたり、あるいは調整用電源の確保や系統内他電源の運用の適

表4 風力発電での技術開発課題

風車本体側の開発事項

- (1) 高効率翼形
- (2) 大容量機
- (3) 保守性の向上
- (4) 多数設置・集合設置（ウィンド・ファーム化）による高出力化、高レベルでの平準化
- (5) 合理的洋上集合設置（ウィンド・ファーム化）方法
- (6) 簡便で高信頼度性能評価法
- (7) 多極同期高圧型発電機

電力系統側の開発事項

- (1) 蓄電池併設運転の効率化
- (2) 他の電源とのハイブリット運転
- (3) 系統内運用の適合理化
- (4) 多目的利用運転
- (5) 直流送電

合化を図ることが必要となろう。

当社では現時点で、これらの中のいくつかは実証設備で安定した運用実績を得ているので、今後順次紹介していきたい。

7. ま と め

今回は当社の大形風車の開発経緯と現状を紹介した。風力発電設備は今後ますます大形化・高性能化していくと予想される。まず、風況の良い地点での大規模ウィンドファームが普及し、さらに大規模風力発電所としての洋上ウィンドファームの普及が進むと考える。また、それらの普及推進の中で認証制度の活用や高度系統連系技術及び負荷を平準化する系統調整技術の開発を並行して進めていくことも大切である。

今、風力発電は世界中で大きく成長していこうとしている。

当社はこれらの社会の期待にこたえるよう、今後とも技術開発と製品提供を行っていく所存である。

参 考 文 献

- (1) 高塚汎ほか、1 MW風力発電装置の開発、三菱重工技報 Vol.37 No.1 (2000) p.22～25
- (2) 猪股登ほか、永久磁石式風力発電装置の実証運転、日本機械学会流体工学部門講演会論文集 (2001) p.1312～1315
- (3) 長田勇ほか、ギヤレス可変速風力発電装置の開発、三菱重工技報 Vol.38 No.2 (2001-3) p.100～103



藤川卓爾
原動機事業本部
タービン技術部長
工博



岩崎信頭
原動機事業本部
タービン技術部
タービンサービス技
術課主席



勝呂幸男
長崎造船所
風車プロジェクト室
長



岩永洋一
長崎造船所
風車プロジェクト室
主席



柴田昌明
技術本部
長崎研究所
振動研究室主席