制御方式の異なる2種類の風力発電システムの性能比較*

斉藤 純 夫^{*1}, 関 塚 智^{*2}佐藤 健 一^{*2}, 佐藤 有 信^{*3}Performance Comparison of Two Wind Turbine Generator Systems
Having Two Types of Control MethodsSumio SAITO^{*4}, Satoshi SEKIZUKA,

Kenichi SATO and Arinobu SATO

^{*4} System Development Department, Wind Energy Division, New and Renewable Energy Group,
Ebara Corporation, 11-1 Haneda Asahi-cho, Ohta-ku, Tokyo, 144-8510 Japan

The purpose of this paper is to gain a greater understanding of the performance of practical wind turbine generating systems with differing output power controllers and controlling means for wind turbine speed. Use of operating wind turbines is practical for investigating the relations of wind speed, output power, and electric parameters including voltage and current under respective power generating conditions. Subjected wind turbines, both equipped with an asynchronous power generator, are located at two sites and are defined as Wind turbine A and Wind turbine B in this study, respectively. Their performance differences are examined by measuring wind speed and electric parameters. Wind turbine A controls the output power by varying blade angles while a wound-rotor induction generator controls the turbine speed. Wind turbine B performs output power control by stalling the blades, and a squirrel-cage induction generator with two speeds by change of poles is adopted for the turbine speed control. The study suggests that both wind turbines have a clear linkage between current and output power fluctuations. Comparison of the fluctuations to wind speed fluctuation, although they are triggered primarily by wind speed fluctuation, clearly indicates the specific behaviors inherent to the respective turbine control mechanisms.

Key Words: Wind Turbine, Wind Turbine Generator System, Propeller Type Wind Turbine, Power Control, Constant Speed Wind Turbine, Variable Speed Wind Turbine, Wind Speed, Induction Generator, Asynchronous Generator, Power Performance, Power Curve, Acoustic Noise

1. ま え が き

現在世界中で多くのプロペラ形水平軸風車が稼動しているが、そこで使用されている発電機は、かご形または巻線形誘導発電機に代表される非同期発電機と同期発電機に大別され、その種類に応じて適用される風車出力および発電機回転数の制御方式が異なる^{(1)~(3)}。

風車は非一様で非定常性の強い風況下で稼動することが多いため、特に日本のように複雑な山岳部の多い地形に設置する場合には、風車の制御システムの違いにより風力発電システム内の電気的および機械的の各諸量が風速の状況にどう影響されるかを評価しておくことは、風車の運転上、極めて重要である。

風力発電システム全体の挙動を評価するには、モデル機を用いて諸データを取得することも一つの方法である⁽⁴⁾⁽⁵⁾。しかし、風車出力制御および発電機回転数

の制御方式を組み込んだ実際の風力発電システムの特徴を把握するためには、実機の風車をそのまま利用して、風況と有効電力、電圧および電流等の電気的諸量との関係を、風車の各出力状態において検討しておくことも実務上有効な手法である⁽¹⁾。さらに、これらの評価結果は、地形に応じて変化する風況により、どの制御方式の採用が適切であるかの判断材料にもなるもの⁽¹⁾と考える。

そこで、今回、ともに非同期の発電機を備えた2箇所の実機サイトを対象に、風車出力および発電機回転数の制御方式の異なる2種類の風力発電システムの特徴を評価することに主眼を置いて諸データを取得した。具体的には、風況および電気的ならびに機械的の諸量等との関連を評価し、あわせてそれら二つの風力発電システムの特徴の違いについても考察した。

2. お も な 記 号

D: ロータ直径 m

f: IGBT 周波数 Hz

H: ハブ高さ(地表からロータ中心までの鉛直距離) m

I: 電流 A

* 原稿受付 2004年3月11日。

^{*1} 正員, (株)在原製作所(☎144-8510 東京都大田区羽田旭町11-1)。^{*2} (株)在原製作所。^{*3} エコ・パワー(株)(☎108-0075 東京都港区港南2-12-32)。

E-mail: saito.sumio@ebara.com

Table 1 Specification of tested wind turbines

Specification		Wind turbine A	Wind turbine B
Power control	Blade	Variable pitch type	Stall type
	Generator	Wound-rotor induction generator	Squirrel-cage induction generator
Nominal rated power		450 kW	750/200 kW
Rated wind speed		11.5 m/s	16 m/s
Cut-in wind speed		2.5 m/s	4 m/s
Cut-out wind speed		25 m/s	25 m/s
Rotor diameter		45.8 m	48.2 m
Hub height		50 m	45 m
Rotor speed		14~29 rpm	22/15 rpm
Gear ratio		1:45.5	1:67.5

N : 発電機回転数 rpm (or min^{-1})

P : 有効電力 kW

V_1 : 風況ポールの風速 m/s

V_2 : ナセル上の風速(新規設置の風速計による風速) m/s

3. 対象風車の仕様

表1に対象風車の仕様を示す。両者の風車は、設置場所は異なるが、ともに北海道内のサイトに設置されている。

風車Aは定格出力が450 kWで、カットイン風速は2.5 m/sである。翼は3枚で、その角度を変化させることで風車出力を制御するいわゆる可変ピッチ翼で、これに接続する発電機は可変速運転制御が可能な非同期の巻線形誘導発電機である。

一方、風車Bは定格出力が750 kWで、カットイン風速は4 m/sである。翼は3枚で、翼先端がストール(失速)を起こして出力を制御する方式を採用し、発電機は極数変化により2段階に回転数を変えることが可能な非同期のかご形誘導発電機である。

4. 測定方法

図1は計測項目とその計測システムの系統を示したものである。ナセル上には既存の風速計のほかにプロペラ形の風向風速計を新たに設置し、50 m高さの風況観測ポールにおける風速値との比較を行った。また、発電機回転子の回転数、有効電力、電圧、電流およびナセル内外の騒音等すべての測定諸量は、0.1 sごとにサンプリングし、データレコーダ(波形記録装置)に記録した。さらに、風車Aについては、Insulated Gate Bipolar Transistor(絶縁ゲートバイポーラトランジスタ)(以下、IGBTと呼ぶ)により可変速制御を

Fig. 1 Measurement system

行っているため、各風車出力時におけるIGBT周波数についても測定を行った。

風車の性能を測定する場合、「JIS C 1400-12(2002)風力発電システム-風車の性能計測方法」⁽⁶⁾に準拠するように配慮したが、下記の点についてはその条件を満たしてはいない。

(1) 風車Aは海岸に面した小高い多少傾斜した丘の上に設置されている。地形の状況から、風況観測ポールを同じサイトに設置した2台の風車の中間地点に設置せざるをえなかったため(計測は2台のうちの1台について実施)、風車とポールとの間隔は $1.7D$ しかとれず、文献(6)の推奨値である $2.5D$ を満たしてはいない。そのため定量的な評価は現時点では不明ではあるが、測定データには多少の誤差が付加されているものと考えられる。

(2) 風車Bは海岸近くのほぼ平坦な地形のところに設置されている。ハブ高さは45 mであるが、風車周囲の地形が多少傾斜していることから、風況ポールの風速計の設置位置は風車Bの高さの48 mに相当している。そのため、ハブ高さから $\pm 2.5\%$ 以内に設置するという条件からは多少はずれている。

両サイトとも、計測した時点においては風況ポール位置での主風向は、風車の影響を受けない向きであり、上記以外の測定項目についてはすべて文献(6)に準拠している。

5. 結果および考察

5.1 風況ポールとナセル上での風速との比較

実機風車の運転制御は、ナセル上での風速をもとに行われているが、その風速値は翼やナセル形状の影響を受けることが予想される。そこでそれらの影響を受けない位置での風況ポールでの風速値と比較し、両者の関係を評価しておくことは、実務上重要と考える。

図2は風車Aと風車Bについて、風況ポールと新たにナセル上に設置した風速計により測定した風速値

Fig. 2 Wind speed comparison between on meteorological mast and on nacelle

Fig. 3 Turbulence intensity

との比較を示す。

図2中には、両者の風速計により測定した値が等しい場合を直線で表示したが、風車Aおよび風車Bとも、高風速域で多少、ナセル上の風速値が大きく現れているものの、全体的には、極めてよい相関性が認められる。両者の相関係数を算出すると、風車Aの場合は、0.976に、また、風車Bの場合は0.972となっている。

図3は風車Aおよび風車Bの場合について、乱れ強度を風況ボールの風速に対して示したものである。

文献(7)では、乱れ強度については風車でのハブ高さにおける平均風速を用いて評価しているが、本報では図2に示したように、風況ボールと新たにナセル上に設置した風速計による風速値との相関がよいことから、以下の議論では、基準となる風速としては、統一して風況ボールでの値を採用することにした。

乱れ強度は、10 minに測定した風速変動データの標準偏差を平均風速で割った値を百分率表示したもの

である⁽⁷⁾。

風車Aの場合、低風速領域においては乱れ強度は増加しているが、測定した風速の範囲内においては、IEC乱流モデルの低い乱れ特性のカテゴリーであるClass Bの値よりも低い値を示している。風車Bについても風車Aと同様な傾向ではあるが、風速が大きい領域での乱れ強度は風車Aよりは多少大きくなっている。

5・2 性能曲線(風況ボールの風速との関係) 図4は風車Aと風車Bについて風車の性能曲線、すなわち有効電力と風況ボール風速との関係を1 min平均データにて表示し、あわせて5・3節で述べる各出力時の計測点も併記した。

さらに、風車Aについては、翼のピッチ角の変化についても併記した。ピッチ角の制御は、定格出力の約3/4出力にあたる風速 $V_1 \approx 9 \text{ m/s}$ より始まり、定格風速(11.5 m/s)時では約 10° に、さらに定格風速を超える領域では約 $10 \sim 25^\circ$ のピッチ角度となっている。

Fig. 4 Power curve

Fig. 5 Waveforms of several parameters at near rated operation condition

5・3 各諸量の時系列変化

5・3・1 定格出力近傍における各諸量の時間的変化

図5(a), (b)は風車Aと風車Bについて、定格出力近傍における有効電力、電流、風況ポール上の風速、ナセル上の風速および発電機回転子の回転数の各諸量の30minの時間的変化を示したものである。風車A

については、このほかにIGBTの周波数変化も表示した。

このときの風車Aの風況ポールでの平均風速は11.1m/s、乱れ強度は5.5%、一方、風車Bでは平均風速は14.7m/s、乱れ強度は11.7%である。

風車Aと風車Bとを比較すると、有効電力の変動

に極めて特徴的な相違が見られるため、本報においては両者の比較がしやすいように、定格出力に対する有効電力の変動割合で評価した。

すなわち、風車 A の有効電力は約 400 kW の出力に対し、その変動は極めて小さく、約 $\pm 2.5\%$ の変動幅であるのに対し、風車 B の場合はその変動が大きく、定格出力の 750 kW に対し約 $\pm 20\%$ の変動幅を示している。

電流値の変動は有効電力のそれと明確な類似性があり、風速の変動と比較すると、それらの変動は一次的には風速の変動に起因しており、風速の変動に対する有効電力の変動の割合は風車 A のほうが風車 B の場合より小さい。

風速変動に関しては、風車 A と風車 B の両者とも、ナセル上風速と風況ボール風速とは、極めて強い相関が見られ、両風車とも、ナセル上の風速波形には高周波成分がのっている。これはナセル上の風速値には、その前方にある翼の影響を受け、翼を通過した流れに大きな乱れ成分がのり、風速変動が大きく現れたものと考えられる。

風車 A については、発電機回転子の回転数は約 1200 rpm でほぼ一定値を示しており、この値は同期回転数である 1000 rpm を上回っているため、回転子の周波数を一定に保つため、相対的に余剰分の周波数である約 10 Hz 分を IGBT を介して系統に供給している。

上述のように、ナセル上の風速波形には大きな変動が見られ、さらにそれに高周波成分がのっているが、IGBT による周波数制御により風車の出力制御を行っているため、回転子回転数および有効電力の波形には風速変動の影響が現れにくいものと考えられる。

5・3・2 定格出力の約 1/2 近傍における各諸量の時間的変化 図 6 は風車 A について、定格出力の約 1/2 近傍における各諸量の 30 min の時間的変化を示す。このときの風況ボールでの平均風速は 7.6 m/s、乱れ強度は 14.4% である。

この状態では、発電機回転子の回転数が同期回転数である 1000 rpm を中心に(図 6 中、一点鎖線で記載)、約 ± 200 rpm の幅で変動している。この回転数と IGBT の周波数の時間的変動とを比較すると、回転数が 1000 rpm 以上の状態では、回転子回転数の時間的変化は IGBT 周波数の変化と同じであるのに対し、1000 rpm 以下の状態では、IGBT 周波数の変化は回転子回転数の時間的変化の波形を反転させた形となっている。

これは、1000 rpm の回転数を境に、それ以上の回

Fig. 6 Waveforms of several parameters at near 1/2 rated operation condition (Wind turbine A)

転数領域では回転子の余剰周波数分を IGBT を介して系統に供給しているのに対し、それ以下の回転数領域では系統から IGBT を介し、不足周波数相当分を回転子に供給していることを表している。

この定格出力の約 1/2 近傍の状態では、上述の制御状況にもかかわらず、有効電力と電流の波形は発電機回転子の回転数の波形と時間的に類似の変動を示しており、それらの変動幅は定格出力時の波形と比べると大きい。

図示は省略したが、定格出力の約 1/4 近傍の状態では、有効電力、電流および発電機回転子の回転数変動は、約 1/2 定格出力近傍のそれぞれの値と比べ多少小さくなっている。

5・4 発電機の可変速運転制御

5・4・1 風況ボール風速と発電機回転数との関係について 図 7(a), (b) は風車 A と風車 B について、風況ボールにおける 1 min 平均の風速に対する発電機回転子の回転数の変化を示したもので、図 7 中には定格出力を含む各出力時の状態も記載した。

風車 A の場合、風速 V_1 が約 6 m/s において定格出力の約 1/4 近傍の状態を示しており、この風速より小

(a) Wind turbine A

(b) Wind turbine B

Fig. 7 Generator speed vs. wind speed on meteorological mast

さい $V_T \approx 2.5$ m/s までの領域では、回転子の回転数は $N \approx 700$ rpm 一定の状態をベースに多少のばらつきをもった挙動を示している。

風速が $V_T \approx 2.5$ m/s より小さい範囲では、回転子の回転数は風速の変化に対し、ほぼ比例の関係を、また、風速が約 6 m/s より大きい領域でも同様に風速の増加につれて回転数も増加している。しかし、両者の風速領域においては、風況ポール風速に対する回転子回転数の変化の割合は異なっていることがわかる。すなわち、風速が $V_T \approx 2.5$ m/s より小さい範囲では、発電をせずに翼車が自由に回転している状態にあたり、風速に対する回転子回転数の変化の傾きは大きく、風速が約 6 m/s より大きい領域では、その傾きは小さい。しかし、全体的に見ればどちらも零点に向かう直線に近い関係を示している。

さらに風速が増加し、約 10 m/s より大きい領域、すなわち定格出力を超えた領域では回転数が一定の $N = 1200$ rpm となっている。

一方、風車 B の場合には2種類の極数変化、すなわち $N = 1000$ rpm と 1500 rpm の二つの作動状態のみであり、風速 8 m/s 以上では $N = 1500$ rpm 一定の状態を、また、それ以下の風速では、風車の運転状況に応じ、 $N = 1000$ rpm あるいは 1500 rpm の運転状態を示している。

5.4.2 IGBT 周波数と発電機回転数および有効電力との関係(風車 A について) 次に、風車 A について、風況に応じて変化する可変速運転の状況をより詳細に考察する。

図 8 は IGBT 周波数と発電機回転子の回転数との関係を示す。図 8 中には、前述の各出力における運転点を併記したが、同期回転数 1000 rpm を境に、縦軸に記載した回転数の大きい領域は定格出力の約 1/2 以

Fig. 8 Generator speed vs. IGBT frequency (Wind turbine A)

上の状態に、また、回転数の小さい領域はそれ以下の出力状態にあたる。そして、IGBT の周波数は同期回転数 1000 rpm を中心にその絶対値は等しく、上下対称の直線となっている。

そこで回転子の回転数が同期回転数 1000 rpm 以下の状態とそれ以上の状態での IGBT による回転数制御の概要を模式的に示すと図 9 を得る。

図 9(a) は回転子の回転数が 1000 rpm (50 Hz) 以下の状態(ここでは、一例として、 $N = 700$ rpm の場合)では、低い回転数に対応する周波数の不足分の周波数である 15 Hz を系統から IGBT を経由して回転子に供給している状態を示している。

一方、図 9(b) に示すように回転子の回転数が 1000 rpm (50 Hz) 以上の状態(ここでは例として $N = 1200$ rpm の場合)では、一定周波数である 50 Hz を保つために、相対的に余剰周波数である 10 Hz を IGBT を経由して系統に供給している。

次に、図 10 は IGBT 周波数と有効電力との関係を示したものであるが、基本的には図 8 と同様な図の傾

Fig. 9 Examples of generator speed control by IGBT

Fig. 10 Output power vs. IGBT frequency (Wind turbine A)

(a) Wind turbine A

(b) Wind turbine B

Fig. 11 Acoustic noise outside nacelle

(a) Wind turbine A

(b) Wind turbine B

Fig. 12 Acoustic noise inside nacelle

向を示す。しかし、同期運転点である約 200 kW をはさんで上下の曲線の傾向は対称ではないが、これは発電状態において、発電機回転子の回転数と有効電力との関係が非線形であるためと考えられる。

5・5 ナセル内外の騒音と風況ポール風速との関係
風力発電システムの騒音測定方法については、文献(8)にその具体的内容が記載されている。その中では音響および風速等の測定位置や音響測定の具体的項目が記載されているが、この規格に基づいて実施された

実例は少ないのが現状である⁽⁹⁾。

本報では5・4節までの議論のように制御方式の異なる風力発電システムの特性把握に主眼をおいて記述したが、さらに両者の特性を比較する因子として、ナセル内外の騒音についても検討を加えた。

もちろん、騒音の測定に関しては、上述のように種々の規定があるが⁽⁹⁾、ここでは両者の風力発電システムの比較が簡単に行えるように、屋外については風車タワーの鉛直中心からロータ高さ H にロータ直径

の半分 $D/2$ を加えた直線距離にあたる基準位置一箇所で計測を行った。また、騒音発生源の一つと考えられるナセル内の騒音についても、参考までに測定した。

図 11 は風車 A と風車 B について、屋外における騒音に関し、風況ポールでの風速に対する等価騒音レベル L_{Aeq} の変化を示したものである。

風車 A と風車 B の結果を比較すると、風速が零近傍では、等価騒音レベルはともに約 40 dB であるが、風速の増加に伴い騒音値は増加している。このとき、両風車とも、定格出力の約 1/4 近傍の出力時には約 50 dB を、さらに定格出力時には約 60 dB の値を示している。

これより風車 A と風車 B において、定格出力が異なるにもかかわらず、定格出力に対する割合が同じである各出力時においては、ほぼ同じ騒音値を示しているということは興味深い。

次に、ナセル内の騒音についても同様に風車 A と風車 B の結果の比較を図 12 に示す。

両者ともカットイン風速以上では、ほぼ同じような騒音レベルの変化を示しており、体格の大きい風車 B のほうがわずかながら騒音レベルの絶対値が大きい程度である。

しかし、図 11 と比較すると両風車とも、全体的にはナセル内の騒音レベルは屋外のそれと比べ、約 30 dB 大きく現れている。

6. あ と が き

制御方式の異なる2種類の風力発電システムにおいて、実機サイトにおける風況および電気的諸量を計測することにより、両者の特性の違いを考察した。

その結果、それぞれの風力発電システムにおける諸量は、風況の変化に応じ、それぞれの制御方式により特徴的な挙動を示すことが明らかになった。

それらを列記すると以下ようになる。

(1) 風況ポールと新たにナセル上に設置した風速計により測定した風速値を比較すると、風車 A と風車 B とも、高風速域で多少、ナセル上の風速値が大きく現れているものの、全体的には、極めてよい相関性が認められる。両者の相関係数を算出すると、風車 A の場合は、0.976、また、風車 B の場合は 0.972 であった。

(2) 定格出力時の有効電力の変動は、風車 A の場合、約 400 kW の出力に対し、約 $\pm 2.5\%$ である。これに対し、風車 B の場合は 750 kW の出力に対し、約 $\pm 20\%$ の変動を示している。この違いは上述のよう

な両者の制御方式の違いによるものと考えられる。

(3) 風車 A については、定格出力以下の領域では、有効電力と電流の波形は、発電機回転子の回転数の波形と時間的に類似の変動を示しており、それらの変動幅は定格出力時の波形と比べると大きい。

この場合、IGBT 周波数は同期回転数の 1 000 rpm を中心にその絶対値は等しく、上下対称の直線となっている。これは回転子回転数が 1 000 rpm (50 Hz) 以下の状態では、低い回転数に対応する周波数の不足分の周波数を系統から IGBT を経由して回転子に供給し、一方、発電機回転数が、1 000 rpm (50 Hz) 以上の状態では、一定周波数である 50 Hz を保つために、相対的に余剰周波数分を IGBT を経由して系統に供給するという制御方式を示している。

(4) 両風車とも、電流値の変動は有効電力の変動と明確な類似性があり、かつ、それらの変動は一次的には風速の変動に起因している。

(5) 屋外における騒音については、両風車の定格出力が異なるにもかかわらず、定格出力に対する割合が同じである各出力時においては、ほぼ同じ騒音値を示している。

また、両風車とも、全体的にはナセル内の騒音レベルは屋外のそれと比べ、約 30 dB 大きく現れている。

文 献

- (1) 今村博・ほか3名、複雑地形における風況測定と風力タービン性能評価に関する研究(第1報、竜飛ウィンドパークにおける NEDO-500 kW 機の性能評価)、機論, 64-626, B (1998), 3323-3329.
- (2) Mülles, S., Deicke, M. and De Doncker, R. W., Doubly Fed Induction Generator Systems for Wind Turbines, *IEEE Ind. Appl. Magazine*, (2002), 26-33.
- (3) Hefmann, W. and Okafor, F., Doubly-Fed Full-Controlled Induction Wind Generator for Optimal Power Utilisation, *Proc. PEDS '01 Conf* (2001), 1-7.
- (4) 今村博・沼尻智宏・黒川淳一、斜め流入風における水平軸風車周りの流れに関する研究、第50回ターボ機械協会総会講演会論文集, (2003), 79-84.
- (5) 長谷川豊・ほか3名、水平軸風車ロータ空力特性に及ぼす流入風乱れ特性の影響、風力エネルギー, 25-4 (2001), 73-76.
- (6) JIS C 1400-12: 2002, 風力発電システム-第12部: 風車の性能計測方法, (2002), 日本規格協会.
- (7) JIS C 1400-1: 2001, 風力発電システム-第1部: 安全要件, (2001), 日本規格協会.
- (8) JIS C 1400-11: 2001, 風力発電システム-第11部: 騒音測定方法, (2001), 日本規格協会.
- (9) 二井義則, JIS に基づく風力タービン騒音測定結果について、新発電システムの標準化に関する調査研究, 成果報告書, 第3部, 風力発電, 社団法人日本電機工業会, (2003), 652-660.