

# 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

関塚 智\* 斉藤 純夫\*\* 佐藤 有信\*\*

## Comparative Study on the Performance of Two Wind Turbine Generator Systems

by Satoshi SEKIZUKA, Sumio SAITO, & Arinobu SATO

A comparative study was made on the performance of two actual wind turbine generator systems, both being asynchronous but each with a different control system (different power output and speed control). It was found that fluctuations in the electric current matched power output fluctuations for both systems. As for wind speed fluctuations, differences were found depending on the type of control system. The following discusses this study in detail.

**Keywords:** Wind turbine, Wind turbine generator system, Propeller type wind turbine, Power control, Constant speed wind turbine, Variable speed wind turbine, Wind speed, Induction generator, Power curve, Acoustic noise

### 1. ま え が き

近年、国内外において多数の風力発電システムが導入され、発電機としては巻線形誘導発電機あるいはかご形誘導発電機に代表される非同期発電機か、永久磁石型あるいは巻線励磁型の同期発電機が採用されている<sup>1~3)</sup>。

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氣的及び機械的各諸量が風速の状況にどのように影響されるかを評価しておくことは、風車の運用上、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<sup>4, 5)</sup>。しかし、風車出力制御方式及び発電機回転速度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、電圧及び電流などの電氣的諸量との関係を、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<sup>と考える<sup>1)</sup></sup>。

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、風車出力制御方式及び発電機回転速度制御方式の異なる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おき、風況と電氣的及び機械的諸量などとの関連を評価し、併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 (Insulated Gate Bipolar Transistor : 絶縁ゲートバイポーラトランジスタ) 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
$N$ : 発電機回転速度	$\text{min}^{-1}$
$P$ : 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

表に対象風車の仕様を示す。風車A及び風車Bは、設置場所は異なるが、ともに北海道内に設置されている。風車Aは定格出力が450 kWで、カットイン風速は2.5

\* 新エネルギー事業本部 風力発電事業統括 技術部  
\*\* 同 同 システム事業推進室 工学博士  
\*\* エコ・パワー(株) 技術管理部

表 対象風車の仕様

Table Specifications of tested wind turbines

仕様 Specifications		風車A Wind turbine A	風車B Wind turbine B
出力制御 Power control	翼 Blade	可変ピッチ方式 Variable pitch type	ストール方式 Stall type
	発電機 Generator	巻線形誘導発電機 Wound-rotor induction generator	かご形誘導発電機 Squirrel-cage induction generator
定格出力 Nominal rated power	$P_n$	450 kW	750/200 kW
定格風速 Rated wind speed	$V_n$	11.5 m/s	16 m/s
カットイン風速 Cut-in wind speed	$V_i$	2.5 m/s	4 m/s
カットアウト風速 Cut-out wind speed	$V_o$	25 m/s	25 m/s
ロータ直径 Rotor diameter	$D$	45.8 m	48.2 m
ハブ高さ Hub height	$H$	50 m	45 m
ロータ回転速度 Rotor speed	$N$	14~29 $\text{min}^{-1}$	22/15 $\text{min}^{-1}$

m/sである。翼は3枚で、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あり、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、翼先端をストール（失速）させることにより出力を制御する方式を採用し、接続する発電機は極数変化により2段階に回転速度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、より低風速で起動する精度の高い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（写真）。また、発電機回転子の回転速度、有効電力、電圧、電流及びナセル内外の騒音などすべての測定諸量は、0.1秒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。更に、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と称す）により可変速制御を行っているため、各風車出力時におけるIGBTの出力周波数についても測定を行った。

今回の風車の性能測定については、大半の測定項目は、JIS C 1400-12 (2002)「風力発電システム－第12部：風

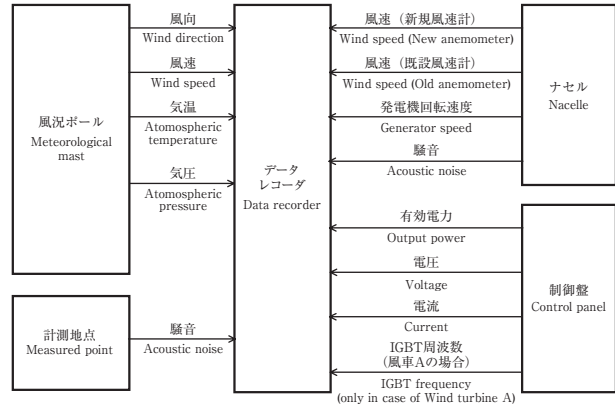


図1 計測システム  
Fig. 1 Measurement system



04-115 01/205

写真 計測状況（風車A）  
Photo Measurement point (wind turbine A)

車の性能計測方法」<sup>6)</sup>に準拠しているが、次の点についてはその条件を若干満たしてはいない。

(1) 風車Aは地形の状況から、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1.7 Dしかとれず前記JIS規格の推奨値である2.5 Dを満たしてはいない。

(2) 風車Bはハブ高さが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±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。

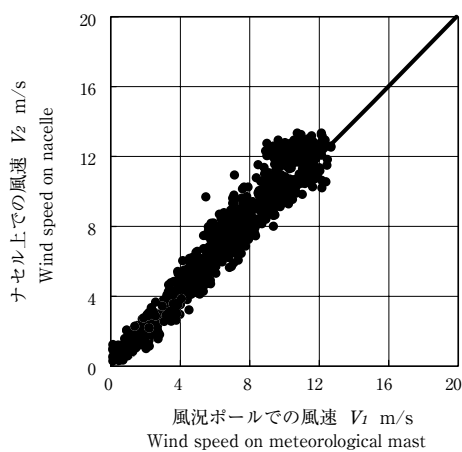
## 5. 結果及び考察

### 5-1 風況ポールとナセル上での風速との比較

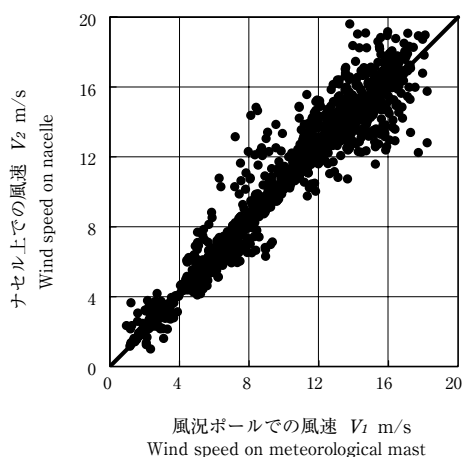
図2は風車Aと風車Bについて、風況ポールと新たにナセル上に設置した風速計により測定した風速値との比較を示す。

図中には、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及び風車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、全般的に、極めて良い相関性が認められる。

図3は一例として、風車Aの場合についての乱れ強度を風況ポールの風速に対して示したものである。文献<sup>7)</sup>では、乱れ強度についてはハブ高さにおける平均風速を



(a) 風車A  
(a) Wind turbine A



(b) 風車B  
(b) Wind turbine B

図2 風況ポールとナセル上での風速の比較  
Fig. 2 Wind speed comparison between meteorological mast and nacelle

用いて評価しているが、本報では図2に示したように、風況ポ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

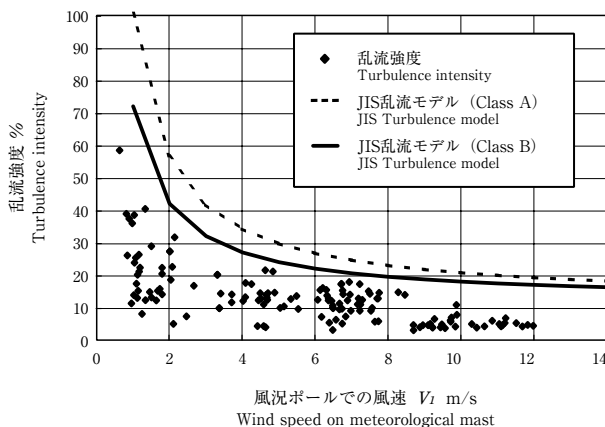
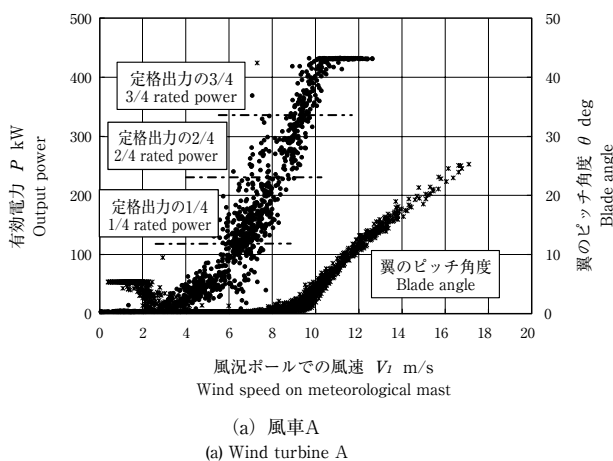
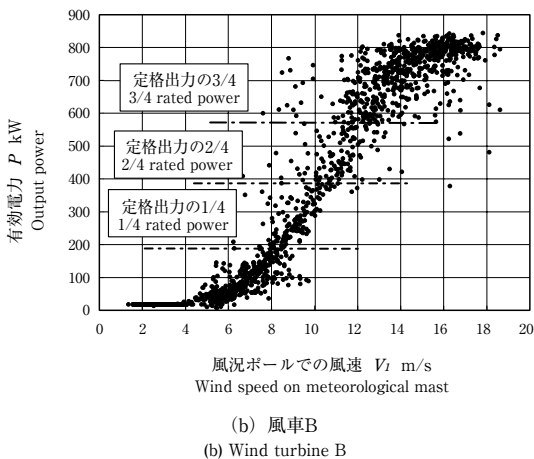


図3 乱流強度  
Fig. 3 Turbulence intensity



(a) 風車A  
(a) Wind turbine A



(b) 風車B  
(b) Wind turbine B

図4 性能曲線  
Fig. 4 Power curve

なる風速としては、風況ポールでの値を統一して採用することにした。

乱れ強度は、10分間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<sup>7)</sup>。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、JIS C 1400-1 (2001)「風力発電システム-第1部:安全要件」の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。

図示は省略したが、風車Bについても同様な傾向の結果であった。

### 5-2 性能曲線 (風況ポ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ポール風速との関係を1分平均データで表示し、次項で述べる各出力時の計測点も併記した。

更に、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  $V_1 \approx 9$  m/s から始まり、定格風速 (11.5 m/s) 時では約  $10^\circ$  に、更に定格風速を超える領域では約  $10^\circ \sim 25^\circ$  のピッチ角度となっている。

### 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变化

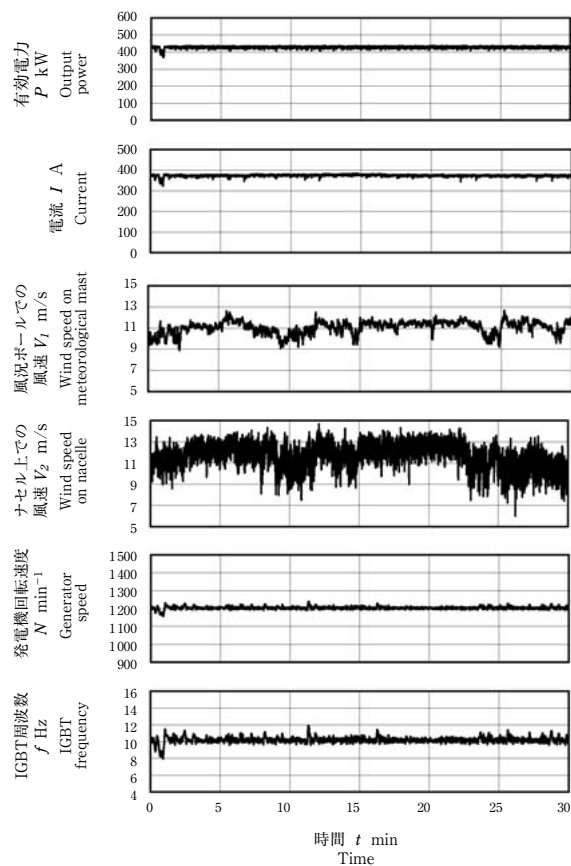
図5 (a) (b) は風車Aと風車Bについて、定格出力近傍における有効電力、電流、風況ポール上の風速、ナセル上の風速及び発電機回転子の回転速度の各諸量の30分間の時間的变化を示したものである。風車Aについては、このほかにIGBTの周波数変化も表示した。

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。

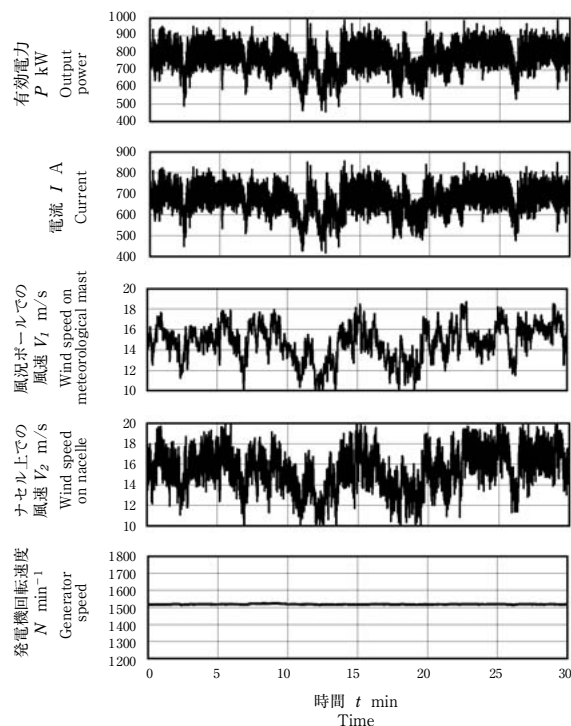
すなわち、風車Aの有効電力は約400 kWの出力に対し、その変動は極めて小さく、約  $\pm 2.5\%$  の変動幅であるのに対し、風車Bの場合はその変動が大きく、定格出力の750 kWに対し約  $\pm 20\%$  の変動幅を示している。

電流値の変動は有効電力の変動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いるということが理解できる。

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ポール風速とは、極めて良い相関がみられ、両風車とも、ナセル上の風速波形には高周波成分が存在している。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生じ、風速変動が大きく現れたものと考えられる。



(a) 風車A  
(a) Wind turbine A



(b) 風車B  
(b) Wind turbine B

図5 定格出力近傍における各諸量の時間的变化  
Fig. 5 Waveforms of several parameters at near rated operation condition

風車Aについては、発電機回転子の回転速度は約  $1200 \text{ min}^{-1}$  でほぼ一定値を示しており、この値は同期回転速度である  $1000 \text{ min}^{-1}$  を上回っているため、回転子の周波数が一定に保たれることにより、相対的に余剰分の周波数である約  $10 \text{ Hz}$  分をIGBTを介して系統に供給している。

前述のように、ナセル上の風速波形には大きな変動がみられ更に高周波成分が存在しているが、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、回転子回転速度及び有効電力の波形には風速変動の影響が現れにくいと考えられる。

### 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分間の時間的変化を示す。この状態では、発電機回転子の回転速度が同期回転速度である  $1000 \text{ min}^{-1}$  (図6中、一点鎖線で記載) を中心に、約  $\pm 200 \text{ min}^{-1}$  の幅で変動している。

この回転速度とIGBTの周波数の時間的変動とを比較すると、回転速度が  $1000 \text{ min}^{-1}$  以上の状態では、回転

子回転速度の時間的変化はIGBT周波数の変化と同じであるのに対し、 $1000 \text{ min}^{-1}$  以下の状態では、IGBT周波数の変化は回転子回転速度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、 $1000 \text{ min}^{-1}$  の回転速度を境に、それ以上の回転速度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、それ以下の回転速度領域では系統から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速度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、電流及び発電機回転子の回転速度変動は、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 風況ポール風速と発電機回転速度との関係について

図7(a)(b)は風車Aと風車Bについて、風況ポールにおける1分平均の風速に対する発電機回転子の回転速度の変化を示したもので、図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  $6 \text{ m/s}$  において定格出力の約1/4近傍の状態を示しており、この風速より小さい  $V_1 \div 2.5 \text{ m/s}$  までの領域では、回転子の回転速度は  $N \div 700 \text{ min}^{-1}$  一定の状態を基に多少のばらつきをもった挙動を示している。

風速が  $V_1 \div 2.5 \text{ m/s}$  より小さい範囲では、回転子の回転速度は風速の変化に対し、ほぼ比例の関係を示し、発電をせずに翼車が自由に回転している状態にあたる。また、風速が約  $6 \text{ m/s}$  より大きい領域でも同様に風速の増加につれて回転速度も増加している。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速度の変化の割合は異なっていることがわかる。

更に風速が増加し、約  $10 \text{ m/s}$  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速度が一定の  $N = 1200 \text{ min}^{-1}$  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  $N = 1000 \text{ min}^{-1}$  と  $1500 \text{ min}^{-1}$  の二つの作動状態だけであり、風速  $8 \text{ m/s}$  以上では  $N = 1500 \text{ min}^{-1}$  で一定の状態を、また、それ以下の風速では、風車の運転状況に応じ、 $N = 1000$  あるいは  $1500 \text{ min}^{-1}$  の運転状態を示している。

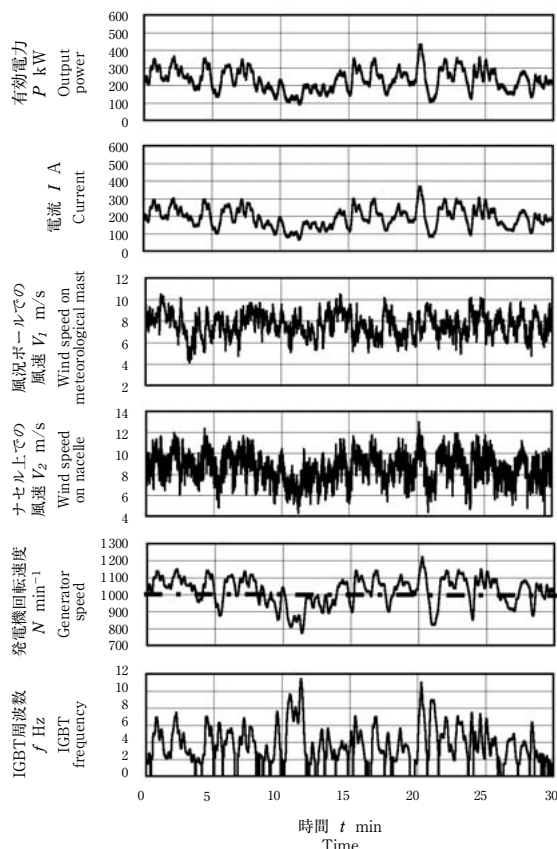
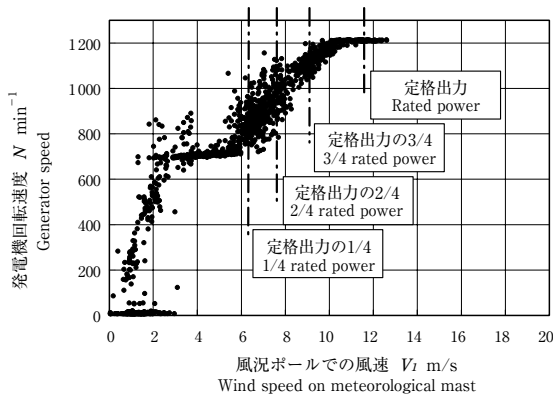
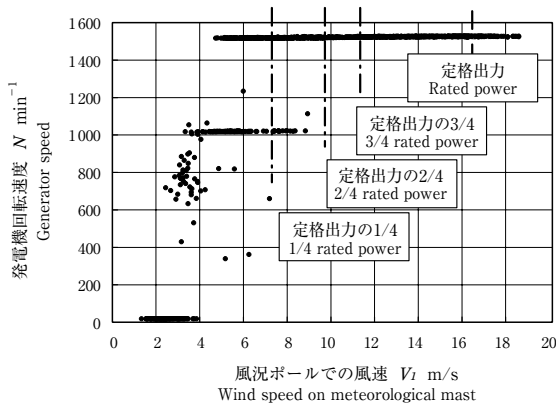


図6 定格出力の1/2近傍における各諸量の時間的変化 (風車A)  
 Fig. 6 Waveforms of several parameters at near 1/2 rated operation condition (Wind turbine A)



(a) 風車A  
(a) Wind turbine A



(b) 風車B  
(b) Wind turbine B

図7 発電機回転速度と風況ポールでの風速の比較

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

#### 5-4-2 IGBT周波数と発電機回転速度及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速度との関係を示す。図中には、前述の各出力における運転点を併記したが、同期回転速度 $1000 \text{ min}^{-1}$ を境に、縦軸に記載した回転速度の大きい領域は定格出力の約1/2以上の状態に、また、回転速度の小さい領域はそれ以下の出力状態にあたる。IGBTの周波数は同期回転速度 $1000 \text{ min}^{-1}$ を中心に絶対値は等しく、上下対称の直線となっている。

そこで回転子の回転速度が同期回転速度 $1000 \text{ min}^{-1}$ 以下の状態とそれ以上の状態でのIGBTによる回転速度制御の概要を模式的に図9に示す。

図9(a)は回転子の回転速度が $1000 \text{ min}^{-1}$  ( $50 \text{ Hz}$ )以下の状態 (ここでは、一例として、 $N = 700 \text{ min}^{-1}$ の

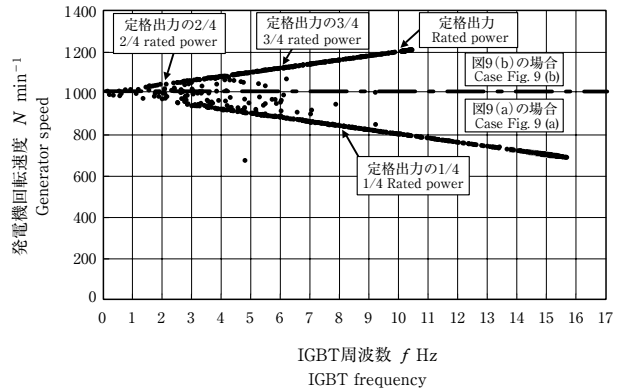
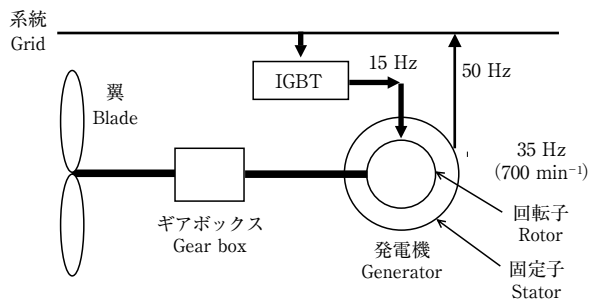
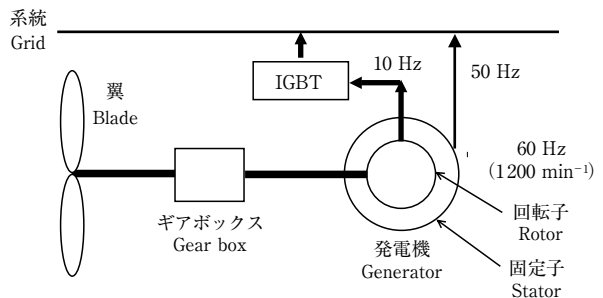


図8 発電機回転速度とIGBT周波数の比較 (風車A)

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



(a) 発電機回転速度  $N < 1000 \text{ min}^{-1}$   
(a) Generator speed  $N < 1000 \text{ min}^{-1}$



(b) 発電機回転速度  $N > 1000 \text{ min}^{-1}$   
(b) Generator speed  $N > 1000 \text{ min}^{-1}$

図9 IGBTによる発電機回転速度制御の一例

Fig. 9 Examples of generator speed control by IGBT

場合) では、低い回転速度に対応する周波数の不足分の周波数である $15 \text{ Hz}$ 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速度が $1000 \text{ min}^{-1}$  ( $50 \text{ Hz}$ )以上の状態 (ここでは、例として $N = 1200 \text{ min}^{-1}$ の場合) では、一定周波数である $50 \text{ Hz}$ を保つために、相対的に余剰周波数である $10 \text{ Hz}$ 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速度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、JIS規格<sup>8)</sup>に具体的内容が記載されている。その中では音響及び風速など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2001年3月制定のため、この規格に基づいて実施された事例は少ないのが現状である<sup>9)</sup>。

本報では前項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置いて記述したが、更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。

騒音の測定に関しては、JIS規格文献<sup>8)</sup>、文献<sup>9)</sup>があるが、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のロータ高さ $H$ 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1箇所での計測を行った。また、参考までにナセル内の騒音についても測定した。

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 (A)であるが、風速の増加に伴い騒音値は増加している。この時、両風車とも、定格出力の約1/4近傍の出力時には約50 dB (A)を、更に定格出力時には約60 dB (A)の値を示している。

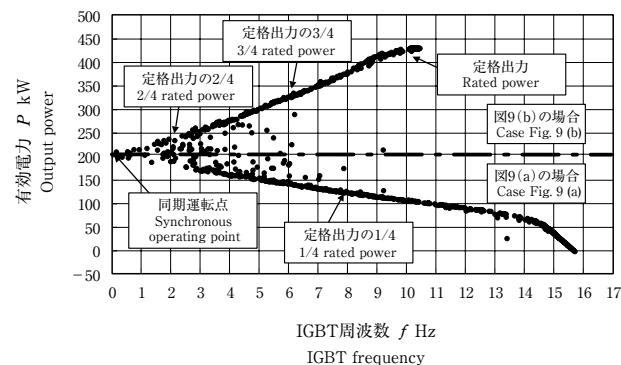


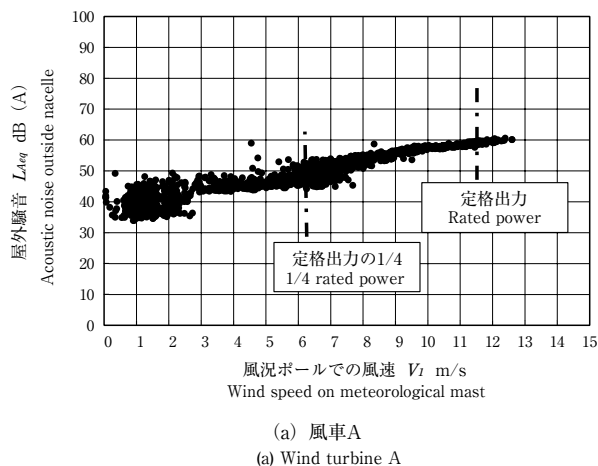
図10 有効電力とIGBT周波数の比較 (風車A)  
Fig. 10 Output power vs. IGBT frequency (Wind turbine A)

これにより風車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。

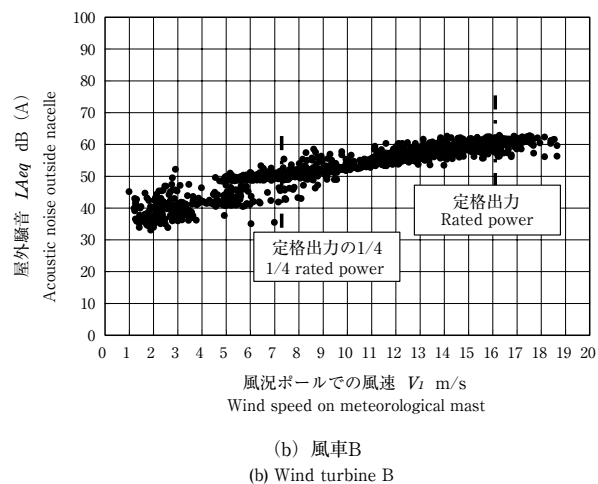
次に、ナセル内の騒音についても同様に風車Aと風車Bの結果の比較を図12に示す。

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、ロータ直径の大きい風車Bのほうがわずかではあるが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 (A)大きく現れている。また、風速8 m/sにおけるナセル内騒音の設計値は風車Aが99.1 dB (A)、風車Bが98.5 dB (A)となっており、両者とも設計値より若干良い値となっている。



(a) 風車A  
(a) Wind turbine A



(b) 風車B  
(b) Wind turbine B

図11 屋外騒音  
Fig. 11 Acoustic noise outside nacelle

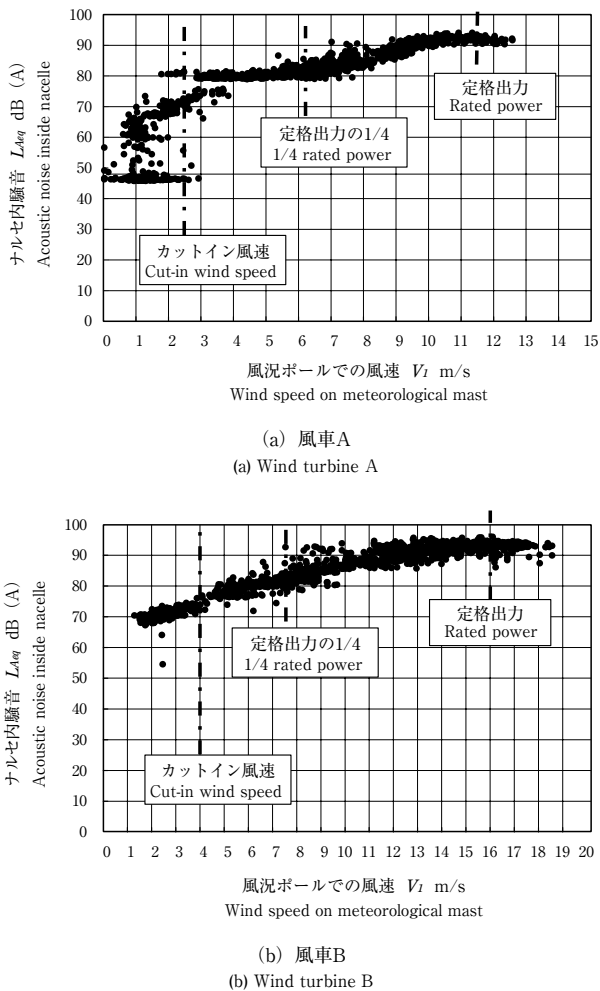


図12 ナセル内騒音  
Fig. 12 Acoustic noise inside nacelle

## 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及び電気の諸量等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、制御方式の相違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精度の高い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、極めて良い相関性が認められる。
- (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±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±20%の変動

を示している。この違いは前述のような両者の制御方式の違いによる。

(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速度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周波数は同期回転速度の $1000 \text{ min}^{-1}$ 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。これは回転子回転速度が $1000 \text{ min}^{-1}$  (50 Hz) 以下の状態では、低い回転速度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、発電機回転速度が、 $1000 \text{ min}^{-1}$  (50 Hz) 以上の状態では、系統周波数である50 Hzを保つために、相対的に余剰周波数分は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と比べ、約30 dB (A) 大きく現れている。

## 参考文献

- 1) 今村他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, 竜飛ウインドパークにおけるNEDO-500 kW機の性能評価), 日本機械学会論文集 (B編), 64-626, (1998) p.3323-3329.
- 2) Müller, S, Deicke, M, Doncker, R.W.De, Doubly Fed Induction Generator Systems for Wind Turbines, IEEE Industry Applications Magazine, May/June (2002), p.26.
- 3) Hofmann, W, Okafor, F, Doubly-Fed Full-Controlled Induction Wind Generator for Optimal Power Utilisation, PEDS '01 Conference Proceedings, p.1.
- 4) 今村, 沼尻, 黒川, 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, (2003-5), p. 79-84.
- 5) 長谷川他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, p.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, 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, 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, 日本規格協会.
- 9) 二井, 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, (2003-3), p.652-660.