

# 制御方式の異なる2種類の風力発電システムの過渡的性能

関塚 智\* 岡崎 裕\*\* 斉藤 純夫\*\*

## Transient Characteristics of Two Wind Turbine Generator Systems having Two Types of Control Methods

by Satoshi SEKIZUKA, Hiroshi OKAZAKI, & Sumio SAITO

This is sequel of a previous paper on the results of an on-site study on two wind turbine generator systems, for which two control methods had been used and compared. In this sequel, the results of a comprehensive performance evaluation on transient characteristic for various electric parameters, versus transitions in power output, are discussed.

**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, Asynchronous generator, Power curve

### 1. まえがき

現在、多くのプロペラ形水平軸風車が世界中で稼働しているが、その風力発電システムにおける発電機として同期発電機か、あるいは巻線形誘導発電機やかご形誘導発電機に代表される非同期発電機が使用され、その種類に応じて適用される風車出力及び発電機回転速度の制御方式が異なる<sup>1-3)</sup>。

風車は非一様で非定常性の強い風況下で稼働することが多いため、特に日本のように山岳部の多い地形に設置する場合、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、重要である。

これらの技術的背景から、別報<sup>4)</sup>では制御方式の異なる2種類の実機サイトにおける風力発電システムについて、定常時における風況及び電氣的諸量等の関係を明ら

かにし、制御方式の違いによる特徴的な性能の違いについて考察した。

風況は定常時にも絶えず変化しているが、特に、風車始動時や停止時を含め、風車の出力急変時においては、定常時と比べ、より大きな風況の変化が伴うため、各電氣的諸量の過渡的挙動を把握しておくことは、風力発電システムの特徴を全体的に評価する上でも重要である。

そこで、本報では、別報<sup>4)</sup>で示した制御方式の異なる2種類の風力発電システムについて、風車始動時を含め、風車の出力変化時における各電氣的諸量を測定し、あわせて過渡的変化時の性能についても検討を加えた。

### 2. おもな記号

$D$	: ロータ直径	.....	m
$E$	: 電圧	.....	V
$f$	: IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) 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	.....	min <sup>-1</sup>
$P$	: 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

\* 株荏原由倉ハイドロテック

\*\* 風水力機械カンパニー 風力発電事業室 技術計画グループ

\*\* (現) 東京工業高等専門学校 機械工学科 工学博士 教授  
(元) 株荏原製作所 新エネルギーカンパニー 風力・太陽光発電事業部

(1) 機械学会論文集 (B編), 71巻702号, (2005-2).

(2) Journal of Environment and Engineering (電子版), Vol.2, No.1, (2007).

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 $\text{min}^{-1}$

### 3. 対象風車の仕様

表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で、高圧線に連系されている。

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枚でそのピッチ角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は計測項目とその計測システムの系統を示したものであり、前報<sup>4)</sup>と同様の方法により測定した(写真)。

具体的には、風速の測定は、タワー上部に配置され発電機や減速機等を格納しているナセルの上部に新たに設置したプロペラ形の風向風速計と、50 m高さの風況観測ポールに設置した風向風速計を用いて行った。また、風車の出力変化を伴う過渡的現象が系統にどのような電気的影響を及ぼすかを両風車について比較、検討するため、発電機回転速度、有効電力、電圧、電流等すべての測定諸量を、0.1秒ごとにサンプリングし、データレコーダ

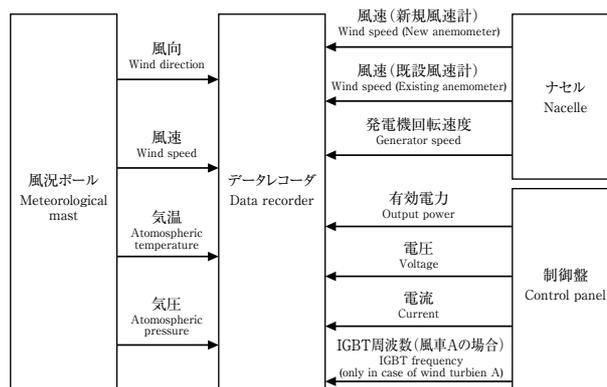


図1 計測システム  
Fig. 1 Measurement system



07-62 01/216

写真 計測状況(風車B)  
Photo Measurement scene (Wind turbine B)

(波形記録装置)に記録した。風車Aについては、可変速制御を行うため回転子の回転数を検出し、電源周波数に相当する周波数と比較してその差分を調整している。この調整は、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<sup>4)</sup>)を用いた周波数制御装置により電気的に行われているので、風車出力時におけるIGBTの周波数についても測定を行った。

### 5. 結果及び考察

#### 5-1 風車Aの定常時及び過渡的变化時の性能

##### 5-1-1 定常時の性能曲線

図2は風車Aの定常時の性能を、風況ポールにおける風速と有効電力との関係について、1分平均データとして示したものである。図2には前報<sup>4)</sup>と同様、定格出力に対して、1/4、2/4及び3/4の各出力点を記載し、あわ

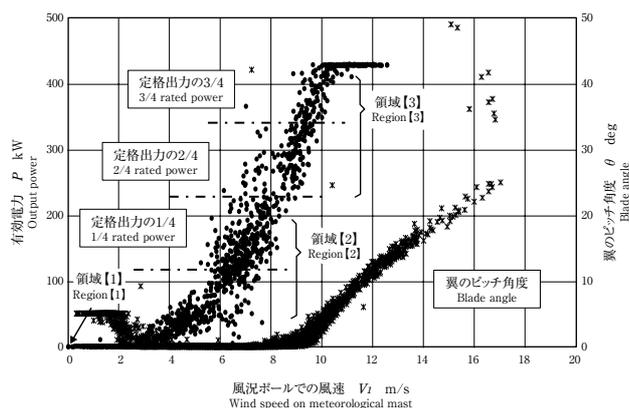


図2 性能曲線 (風車A)  
Fig. 2 Power curve (Wind turbine A)

せて以下の三つの運転領域に区分した。

領域【1】：カットイン風速以下の領域

領域【2】：カットイン風速から発電機回転速度が同期回転速度 ( $N = 1000 \text{ min}^{-1}$ ) となるまでの領域

領域【3】：発電機回転速度が同期回転速度 ( $N = 1000 \text{ min}^{-1}$ ) の状態から定格出力までの領域

### 5-1-2 過渡的变化時の性能

(1) 風車出力が0 kWから立ち上がる時 (領域【1】から領域【2】に変化する時) の過渡的性能

図3は風車出力が0 kWから立ち上がる時の有効電力、電流等の各電気的諸量と風況ポール及びナセル上風速の過渡的变化を発電機回転速度の変化とあわせて、0.1秒ごとのデータとして示したものである。

カットイン風速に達するまでは (領域【1】)、ナセル上の風速は平均でも3 m/s以下であり、その状態では、発電機回転速度は700~900  $\text{min}^{-1}$ の範囲で変動している。しかし、この状態までは図示は省略したが、発電機回転速度が停止状態から立ち上がる場合の挙動と同様、有効電力の発生は見られない。

カットイン風速時において、有効電力は約120 kW、電流は約90 Aの瞬時の変化を示しているが、電圧の変化はほとんど見られない。また、IGBT周波数も瞬時に変化し、このとき、発電機回転速度は900  $\text{min}^{-1}$ より700  $\text{min}^{-1}$ に急変している。

それ以降の風速値は時間の経過に伴い約8 m/s程度まで増加しているため、有効電力も徐々に増加し始め、図3に示した最終の状態では、約150 kW (定格出力の約30%) の値を示している (領域【2】)。

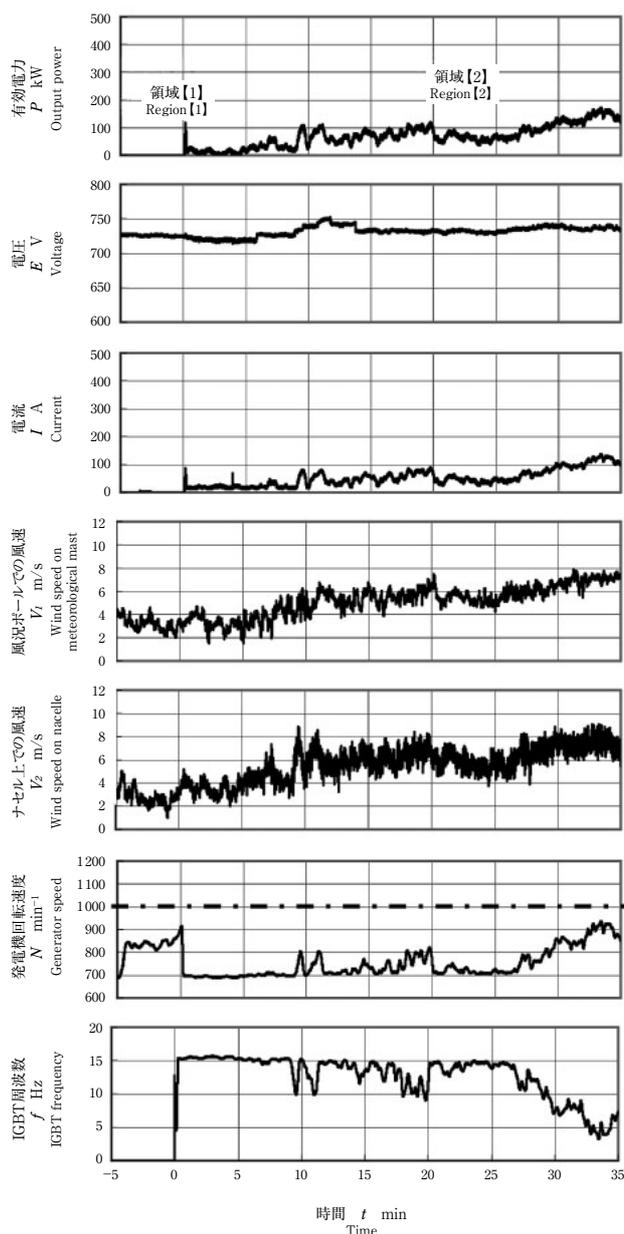


図3 風車出力が0 kWから立ち上がる時の各諸量の波形 (風車A)  
Fig. 3 Waveforms of parameters in output power starting from  $P=0 \text{ kW}$  (Wind turbine A)

この変化の過程では、有効電力と電流の時間的変動波形は、極めて類似の変化を示しており、これらは風況ポール及びナセル上風速の時間的変動とも密接な関係にあることが分かる。

IGBT周波数の変化については、カットイン風速以降、発電機回転速度が700  $\text{min}^{-1}$ 時には15 Hzの周波数の値を示しており、この状態では同期回転速度である1000  $\text{min}^{-1}$  (図3中、一点鎖線で記載) との差に相当する不足周波数分を系統から発電機回転子に供給している。更に風速が増加すると、IGBT周波数の変化は発電機回転速度の変

化に応じ、回転速度の増減とは逆の応答をしている<sup>4)</sup>。

(2) 風車出力が領域【2】から領域【3】に変化する場合の過渡的性能

図4は風車出力が約100 kWの状態(領域【2】)から約200 kW急増し、領域【3】の状態まで変化するときの有効電力、電流等の各電気的諸量と風況ポール及びナセル上風速の変化とあわせ、発電機回転速度ならびにIGBT周波数の時間的変化についても示したものである。

この変化の過程においては、過渡的には有効電力は約100 kWの状態から360 kWの状態まで変化し、また、電流の時間的変動波形も約80 Aから300 Aを超える値

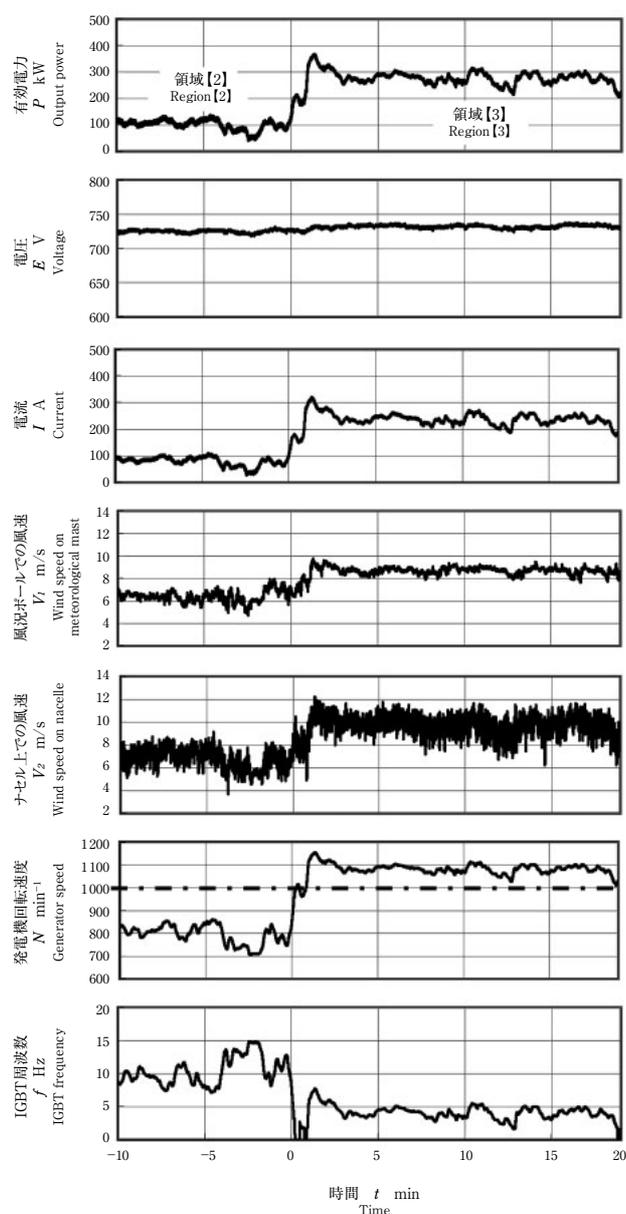


図4 風車出力が急増する時の各諸量の波形 (風車A)

Fig. 4 Waveforms of parameters during a sudden change in output power (Wind turbine A)

にまで変化しているが、風車B(後述)と比べると瞬時的な変化とはなっていない。更に、電圧波形については約725 Vからほとんど変化していない。前述の風車出力が0 kWから立ち上がる時の過渡的变化と同様、有効電力と電流の時間的変動波形は、極めて類似の変化を示しており、これらは一次的には風速の時間的変化と密接に関連していることが分かる。

IGBT周波数の変化については、発電機回転速度が約800 min<sup>-1</sup>時(領域【2】)には、同期回転速度である1000 min<sup>-1</sup>(図4中、一点鎖線で記載)との差に相当する不足周波数分である約10 Hzを系統から発電機回転子に供給していることになり、発電機回転速度の変動波形を逆にした変動波形を示している。

一方、同期回転速度である1000 min<sup>-1</sup>を超えた領域【3】では、発電機回転速度は約1100 min<sup>-1</sup>となっており、ここでは電源周波数である50 Hzを保つために、相対的に余剰周波数である約5 HzをIGBTを介して系統に供給している。このとき、IGBT周波数は、発電機回転速度の時間的変化と同じ変化をしている<sup>4)</sup>。

このほか、図示は省略したが、定格出力時から風車出力が約100 kWの状態へと減少する場合についても、有効電力、電流等の各電気的諸量と風況ポール及びナセル上風速の変化並びに発電機回転速度とIGBT周波数の時間的変化の挙動は、出力が減少するというを除けば、基本的には上述の風車出力が急増する場合と同様な変化を示すことが明らかとなった。

### (3) 過渡的变化の軌跡

図2に示した風車性能結果は、ばらつきを含んだものであるため、その平均的な性能曲線を図5に示し、あわせて発電機回転速度及びIGBT周波数との関連も含めた線図として表示した。

そしてそれらの線図上に、前述の風車出力が0 kWから立ち上がる状態の場合(領域【1】から領域【2】に変化する場合)と、風車出力が約100 kWの状態から約200 kW急増する場合(領域【2】から領域【3】に変化する場合)の各諸量の過渡的变化時の軌跡を併記した。

風車出力が0 kWから変化し始める直前の状態、すなわち発電機回転速度が約900 min<sup>-1</sup>を示す状態を起点とし、それ以降の有効電力、発電機回転速度及びIGBT周波数の時間経過による推移を○印で記載した。図5中のプロットに併記の数値は、0 kWから変化し始めたときの時間を分単位で表示したものである。また、同様に、風車出力が約100 kWの状態から急増する場合についても、各物理量の過渡的变化時の軌跡を●印で記載した。

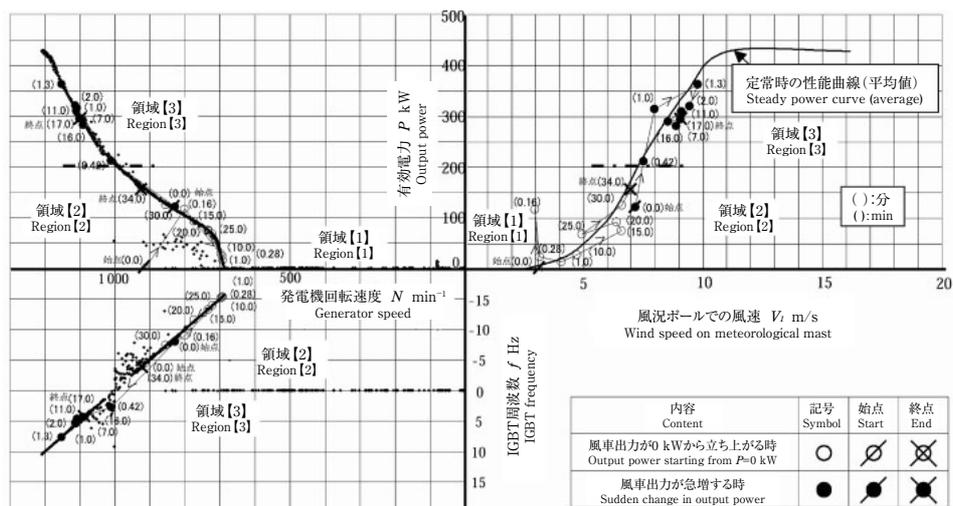


図5 過渡的变化の軌跡 (風車A)  
Fig. 5 Loci of operating points in output power transition (Wind turbine A)

風況ポールにおける風速に対する有効電力の軌跡については、起点となる時間の直後は、定常的な風車の性能曲線からは多少ずれてはいるが、それ以降の時間の経過による性能の変化は、多少の幅はあるものの、ほぼ定常曲線に沿った軌跡を描いている。

一方、発電機回転速度と有効電力及び発電機回転速度とIGBT周波数との関係を示す曲線においては、過渡的变化時のどの物理量とも定常曲線上にのった軌跡を描いている。このとき、IGBT周波数は、領域【2】では不足分を回転子に供給するためマイナスで、また、領域【3】では余剰分を系統に供給するためプラスで表示した。

上述のように、風速の変動に伴う有効電力、発電機回転速度及びIGBT周波数等の各物理量の変化は、ある時間範囲内の変動を検知し、その平均的処理を行うことにより制御しているため、準定常的な変化として考えることができるものと言える。

### 5-2 風車Bの定常時及び過渡的变化時の性能

#### 5-2-1 定常時の性能曲線

図6は風車Bの定常時の性能を、1分平均データとして、風況ポールにおける風速と有効電力との関係について示したものである。図6には前報<sup>4)</sup>と同様、定格出力に対して、1/4、2/4及び3/4の各出力点も併記した。

#### 5-2-2 過渡的变化時の性能

(1) 発電機回転速度が停止状態 ( $N=0 \text{ min}^{-1}$ ) からP6状態 ( $N=1000 \text{ min}^{-1}$ ) を経てP4状態 ( $N=1500 \text{ min}^{-1}$ ) へ変化するときの過渡的性能

図7は発電機回転速度が停止状態 ( $N=0 \text{ min}^{-1}$ ) から、 $1000 \text{ min}^{-1}$  (以下、この状態を、P6状態と呼ぶ) を経

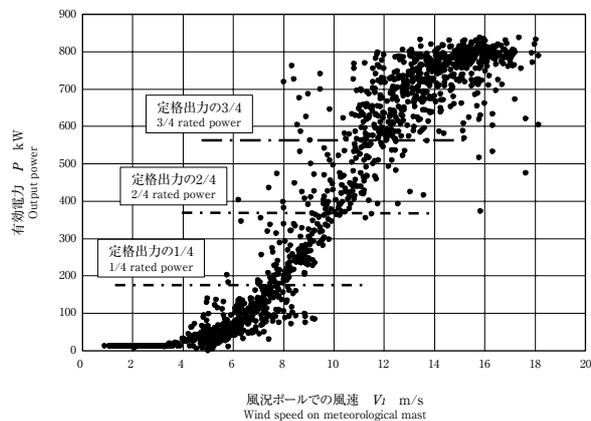


図6 性能曲線 (風車B)  
Fig. 6 Power curve (Wind turbine B)

て、 $1500 \text{ min}^{-1}$  (以下、この状態を、P4状態と呼ぶ) へ変化するときの各電氣的諸量及び風況ポールとナセル上風速の過渡的变化を発電機回転速度の変化とあわせて示したものである。

風況ポールとナセル上風速の時間的変化の波形は、風速値も含め極めて類似の変化を示しており、有効電力が発生し始める以前の状態で風況をみると、風速値が5~10 m/sの状態であることが分かる。

より詳細に風速波形をみると、風速が5 m/sを超え、10 m/s近くになった時点で発電機回転速度が瞬時に $250 \text{ min}^{-1}$ まで立ち上がり、回転速度は一度低下した後、2分程度の中に、P6状態の回転速度である $1000 \text{ min}^{-1}$ まで急上昇している。

発電機回転速度がP6状態の回転速度 ( $N=1000 \text{ min}^{-1}$ ) になった瞬間に、有効電力は約150 kW (定格出力750 kW

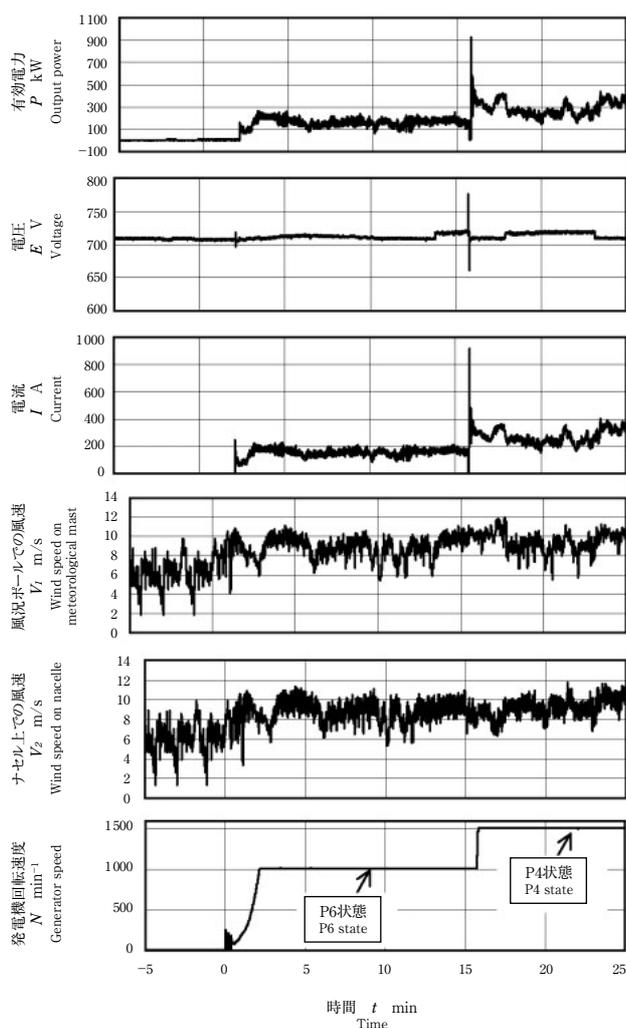


図7 発電機回転数が停止状態からP6状態 ( $N=1000 \text{ min}^{-1}$ ) を経てP4状態 ( $N=1500 \text{ min}^{-1}$ ) へ変化する時の各諸量の波形 (風車B)

Fig. 7 Waveforms of parameters in generator run-up to P4 state ( $N=1500 \text{ min}^{-1}$ ) via P6 state ( $N=1000 \text{ min}^{-1}$ ) (Wind turbine B)

の約20%に相当)に、また、電流は約250 A (定格電流700 Aの約36%)に瞬時に立ち上がっている。このとき、電圧波形にも715 Vに対し、 $\pm 10 \text{ V}$ の瞬時変動がみられ、風車Aと比べると、各電気的諸量の変動は大きい。有効電力と電流の時間波形は、類似の変化を示しており、両者の相関が極めて強いことが分かる。

これ以降、風速値が約7~10 m/sを多少超える範囲で変動している領域は、発電機はP6状態を保持し、回転速度は一定の $1000 \text{ min}^{-1}$ となっている。

上記の風速値が保持された後は、発電機回転速度はP6 ( $1000 \text{ min}^{-1}$ ) からP4 ( $1500 \text{ min}^{-1}$ ) 状態に変化し、風速値が10 m/sをはさんで約 $\pm 2 \text{ m/s}$ の状態の間ではP4状態を保持している。

P6からP4状態に変化する際に、有効電力は瞬時に

900 kWまで変化し、また、電流に関しても同様に、920 A (定格電流の約1.3倍)の突入電流値を示している。また、電圧波形については、715 Vに対し $\pm 60 \text{ V}$ の変化を示している。これを風車Aの領域【2】から領域【3】における変化時の挙動と比較すると、極めて大きな瞬時的な変化となっている。

P4状態で稼動しているときにも、有効電力と電流の時間変動波形は、極めて類似の変化を示しており、風車Aと同様、これらは風況ポール及びナセル上の風速の時間変動とも密接な関連があることが分かる。

(2) 発電機回転速度がP4状態 ( $N=1500 \text{ min}^{-1}$ ) からP6状態 ( $N=1000 \text{ min}^{-1}$ ) に変化するときの過渡的性能

図8は発電機回転速度がP4状態 ( $N=1500 \text{ min}^{-1}$ ) か

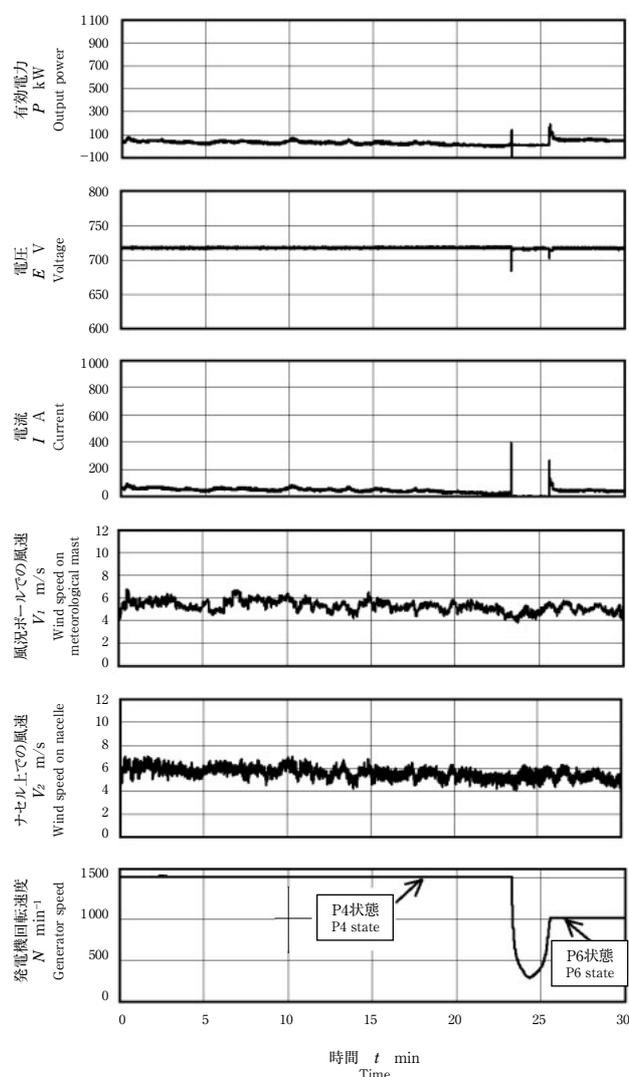


図8 発電機回転数がP4状態 ( $N=1500 \text{ min}^{-1}$ ) からP6状態 ( $N=1000 \text{ min}^{-1}$ ) に変化するときの各諸量の波形 (風車B)

Fig. 8 Waveforms of parameters from P4 state ( $N=1500 \text{ min}^{-1}$ ) to P6 state ( $N=1000 \text{ min}^{-1}$ ) (Wind turbine B)

らP6状態 ( $N=1000 \text{ min}^{-1}$ ) に変化するときの過渡的性能を示したものである。

発電機がP4の状態 ( $N=1500 \text{ min}^{-1}$ ) では、風速が5 m/s以上の風況を示しているが、風速の減少に伴い、有効電力及び電流値は徐々に減少している。風速が約5 m/s程度にまで減少すると、発電機回転速度はP4状態 ( $N=1500 \text{ min}^{-1}$ ) から解列され、P6状態 ( $N=1000 \text{ min}^{-1}$ ) に変化するが、この際、P6状態へ並列させるときの大きな電気的変動を極力抑えるため、一度、発電機回転速度は300  $\text{min}^{-1}$ にまで減少し、その後、再び増加して1000  $\text{min}^{-1}$ のP6状態に達する。

有効電力は発電機回転速度がP4 ( $N=1500 \text{ min}^{-1}$ ) 状態から解列する際に、瞬時に出力零をはさんでプラス及びマイナス側に変化している。更に、P6状態に並列する際に、有効電力は200 kWまで急増し、その後、約50 kW一定となりP6の運転状態となる。

電流に関しては、発電機をP4状態から解列する際には、約400 Aまで瞬時の突入電流が発生し、また、P6状態に並列する際には、約270 Aまで瞬時電流が発生している。

電圧については、発電機のP4状態からの解列時及びP6状態への並列時には、約715 Vの一定電圧に対し、それぞれ約35 V及び10 Vの瞬時の電圧低下を示している。

(3) 過渡的变化の軌跡

図6に示した風車性能結果は、ばらつきを含んだものであるため、その平均的な性能曲線を図9に示し、あわせて発電機回転速度との関連も含めた線図として表示した。そしてそれらの線図上に、前述の発電機回転速度が停止状態 ( $N=0 \text{ min}^{-1}$ ) からP6状態 ( $N=1000 \text{ min}^{-1}$ )

を経て、P4状態 ( $N=1500 \text{ min}^{-1}$ ) へ変化する過渡的变化時の軌跡を○印で示した。また同様に、P4の運転状態 ( $N=1500 \text{ min}^{-1}$ ) からP6状態 ( $N=1000 \text{ min}^{-1}$ ) に変化するときの過渡的变化時の軌跡を●印で記載した。

図9中のプロットに併記の数值は、○印の場合には発電機回転速度が急増し始める点を時間的起点とし、それ以降の有効電力及び発電機回転速度の変化の軌跡を分単位で表示したものである。また、●印の場合には、図8に示した時間スケールのとおり、発電機回転速度が一定 ( $N=1500 \text{ min}^{-1}$ ) の状態を保持しているときのある時点での状態を起点とし、それ以降の各物理量の変化の軌跡を同様に記載した。

風車Aの場合の図5と比較すると、風速の変化に対する有効電力及び発電機回転速度の変化の軌跡は、定常的な風車の性能曲線からは離れた状態で推移していることが分かる。これは風車の回転速度を2種類の回転速度 (P4及びP6状態) だけで制御しているため、風速の変化に対する発電機回転速度の変化は急激であり、これに伴う各物理量の制御性は風車Aの場合よりは多少劣るためと考えられる。

このように、風車Bの場合には、風車Aと比べ定常的な性能曲線からのずれは大きく、準定常的な変化からは外れた挙動を示している。

6. 結論

制御方式の異なる2種類の風力発電システムにおいて、前報<sup>4)</sup>で実機サイトにおける風況及び電気的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結果を踏まえ、本報では、風車始動時や停止時を含む風車

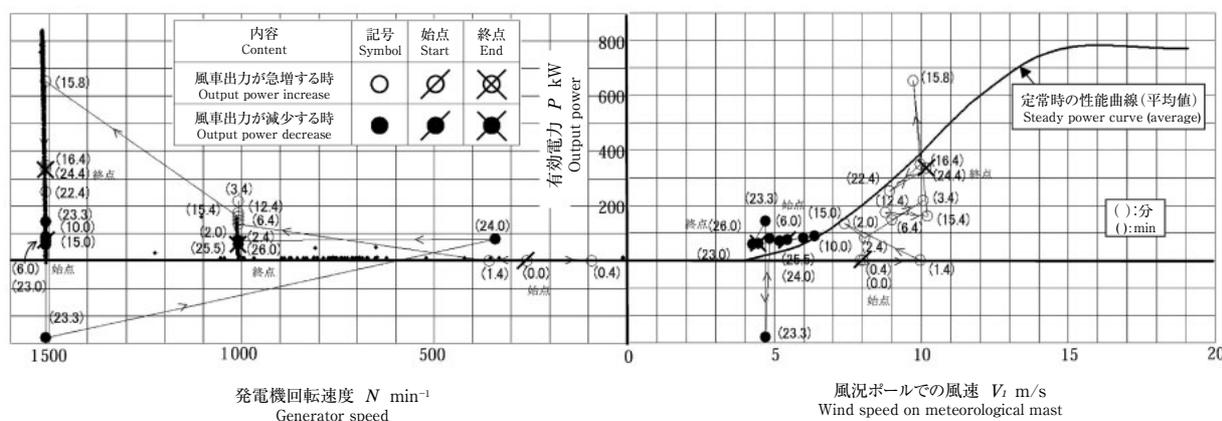


図9 過渡的变化の軌跡 (風車B)  
Fig. 9 Loci of operating points during output power transition (Wind turbine B)

出力急変時の過渡的性能の変化の挙動を検討した。

その結果、明らかになった点を列記すると次のとおりである。

(1) 風車A（巻線形誘導発電機を用いた可変速運転制御方式）と風車B（かご形誘導発電機を用いたストール制御方式）を比較すると、風車Aの方が、風車始動時の各電氣的諸量の瞬時的な変化の値は小さく現れている。例えば、系統に及ぼす電圧変動についてみれば、風車Aの方が小さくなっている。

(2) 風車A及び風車Bとも、風車の出力変化を伴う過渡的变化においても、有効電力と電流の時間変動波形を比較すると、極めて類似の変化を示しており、これらは風速の時間変動とも密接な関連があることが明らかになった。

(3) 風車始動時及び停止時を含め、風車の出力変化を

伴う過渡的变化については、風車Aの場合は準定常的な変化として評価できるが、風車Bの場合には定常的な性能曲線からのずれが大きく、準定常的な変化からは外れた挙動を示している。

#### 参考文献

- 1) 今村博, 松宮輝, 土屋敬一, 山田佐佳, 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, De Doncker.R.W., Doubly Fed Induction Generator Systems for Wind Turbine, IEEE Industry Applications Magazine, May/June 2002, p.26-33.
- 3) Hofmann.W, Okafor.F, Doubly-Fed Full-Controlled Induction Wind Generator for Optimal Power Utilisation (2001), p.1-7.
- 4) 斉藤純夫, 関塚智, 佐藤健一, 佐藤有信, 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, 日本機械学会論文集 (B編), 70-700, (2004) p.3174-3181, (論文No.04-0222).

