可変速風力発電システムにおける
メカニカルガバナの運転特性*河村 俊次^{*1}, 松宮 輝^{*1}, 筒井 康賢^{*1}
山根 隆志^{*1}, 糸岡 幸男^{*2}, 水谷 八郎^{*1}
二井 義則^{*1}, 五反田 哲郎^{*2}The Operating Characteristics of a Mechanical Governor
for a Variable-Speed Wind Turbine GeneratorShunji KAWAMURA, Hikaru MATSUMIYA, Yasukata TSUTSUI,
Takashi YAMANE, Yukio KUMEOKA, Hachiro MIZUTANI,
Yoshinori NII and Tetsuro GOTANDA

This paper describes the operating characteristics of a mechanical governor installed for blade pitch control, rotor speed control and generator power control in a variable-speed wind turbine generator system (VWTG). The VWTG is equipped with a 2-bladed teetered rotor of 15-meter in diameter and a 22-kW generator. Since the centrifugal forces of the weight-elements of the governor are utilized as direct control forces, the control are performed firmly and rapidly. The operation data show that the governor works satisfactorily to regulate rotor rotational speed and the generator power within the designed range of operation.

Key Words: Fluid Machine, Mechanical Governor, Wind Turbine Generator, Variable-speed Operation, Pitch Control

1. 結 言

風車開発の基本的な課題は、エネルギー密度が低くかつ不規則性をもった風エネルギーからいかに効率よく安定した出力を取り出すかにある。風車は変動する風況の下で、たえず空力的な衝撃荷重や重力による機械的な繰返し荷重を受け振動を発生する。したがって、この変動風に対して柔軟に対応できる風車を設計することは、システム全体の安全性や信頼性、経済性を高めるうえできわめて重要なことである。

可変速風力発電システムは、変動風況下で効率的に安定した出力を得るための有力な方法である⁽¹⁾。また通常用いられるブレードピッチ制御は、変動風に柔軟に対応させるための大切な構成要素である。ピッチ制御は、風車ロータの回転数を運転範囲内に制御するとともに、予測し得ない突風や負荷喪失からロータの過回転を防ぎ、ブレードや発電機の損傷を防止する重要な機能を担っている。ブレードピッチの可変機構には、油圧サーボ方式や電気制御方式、機械制御方式などがある⁽²⁾。本報は、ロータ直径 15 m、出力 15 kW の可変

速風力発電システムのピッチ制御機構に用いたメカニカルガバナの運転特性について述べる。

2. 記 号

N : 発電機回転数 rpm
 P : 発電機出力 kW
 $\bar{P}$: 1 min 平均発電機出力 kW
 V : 風速 m/s
 $\bar{V}$: 1 min 平均風速 m/s
 $\bar{V}_{2s}$: 2 sec 平均風速 m/s
 ΔV : ガスト時の風速上昇 m/s
 G : ガスト係数 $= \Delta V / \bar{V}_{2s}$
 β : ピッチ角 °
 $\dot{\beta}$: ピッチ角変化速度 °/s
 $\Delta\beta$: ピッチ角変化量 °
 τ : ピッチ角の応答遅れ時間 s
 T : 時間 s

3. 実験装置と実験方法

図 1 は、機械技術研究所構内に建設した水平軸形試験研究用風車⁽³⁾(略称 WINDMEL 風車)の全景である。

WINDMEL 風車は、可変速運転システムを取り入

* 原稿受付 平成元年 9 月 7 日。

^{*1} 正員、工業技術院機械技術研究所 (〒305 つくば市並木 1-2)。^{*2} 工業技術院機械技術研究所。

れているため発電機の回転数変動を定格の37.5～187.5%の範囲で許容する。また大形風車の技術概念であるティータードハブ機構を導入している。今回の特性は、タワーの風下側にロータ配置したダウンウィンド形風車での運転結果である。

WINDMEL 風車の基本諸元を表1に示す。

風車フィールドの風況は、風車タワーから23 m隔てた高さ15 mの所に超音波式の風速・風向計を設置し、瞬時値を測定している。運転に伴う発電機回転数、出力、ブレード応力、ピッチ角などの測定値は、風速、風向値とともに任意のサンプリング時間(最小10 ms)でデータレコーダに収録しパーソナルコンピュータで処理している。

メカニカルガバナは、各ブレードの根元部に取付け

られている(図1)。ガバナは、ロータ回転に伴う遠心力を直接ピッチ制御の物理量として利用している。そのためピッチ制御のための補助動力源は不要である。図2(a)、(b)にメカニカルガバナの概略を示す。ガバナは、ロータの回転に伴って遠心力を発生させるカウンタウエイト、メインウエイトとそれに反発するガバナスプリングなどで構成されている。

図2(a)はカウンタウエイト系の構造図である。カウンタウエイトは、ブレード軸を固定するステムにアームを介して22.5°の取付角で固定されている。ロータが回転すると遠心力を発生し、その結果、ブレードをフェザ方向に制御する。カウンタウエイトの質量は17.5 kgf, ロータ軸からウエイト重心までの距離0.522 m, カウンタアームの長さは0.505 mである。

図1 風車の全景

表1 風車の基本諸元

Performance	
Rated Power	15 kW
Rated Wind Speed	8 m/s
Cut-in Wind Speed	3.5 m/s
Cut-Out Wind Speed	25 m/s
Max. Wind Speed	60 m/s
Rotor	
Location of Rotor	Downwind
Hub Type	Teetered
Diameter	15 m
Number of Blades	2
Material of Blades	GFRP
Transmission	
Gear Type	Parallel + Bevel
Coupling	Flexible
Generator	
Type	Induction
Rotational Speed	1800 rpm (Variable)
Rated Power	22 kW
Control	
Speed Control	Variable Pitch (Mechanical Governor)
Yaw Control	Free-Yaw
Brake	Hydraulic Brake
Electricity	AC/DC/AC
Tower	
Type	Mono-Pole
Hub Height	14.7 m
Material	Steel

図2 メカニカルガバナの概略

図2(b)にメインウエイト-ばね系の構造図を示す。ロータが回転することによって、メインウエイトにも遠心力が作用しカウンタウエイトと同様の働きをする。ガバナスプリングの反発力は、メインウエイト、アーム、ロッドを介して、ピッチベアリングのインナレースに伝えられ、ブレードを反フェザ方向にピッチ角を変化させる。したがって、ガバナ全体としては、両ウエイトに加わる遠心力とばね力との釣合いのもとにピッチ角が決定され、それに応じて回転数制御および出力制御が自動的に行われる。ガバナは、定格回転数以下では初期設定ピッチ角を維持するように設計されている。ブレードの初期ピッチ角は、ロータ周速比に対し高いパワー係数が得られる5°に設定されている。またメインウエイトの質量は、13 kgfである。

風車ブレードのピッチ角は、ロータ回転軸に直交するピッチベアリングのアウトレースとインナレースとの相対回転角をポテンショメータで検出し差動アンプを介して計測している。

なお本システムのロータ空力特性と発電機負荷特性のもとでのメカニカルガバナの基本設計と特性解析については別報で報告した⁽⁴⁾。

4. 実験結果と考察

4.1 風車の出力特性 図3は、強風下でサンプリング時間100 msで収録した風速の瞬時値とそのときの発電機出力の観測データ2000個をプロットしたものである。図3のように発電機出力は、風速に対して幅広く分散している。これは変動風況に対する風車ロータの回転遅れや風向追尾遅れ、風速計とロータ面との空間的相違などが原因しているためである。

図4は、低速域から高速域まで数多く取得した観測データを基に風速に対する発電機出力を1 min 平均値で整理したものである。図4は、高風速域になるほど値が分散する傾向にあるが風速8 m/sにおける風車出力は、 14 ± 3 kW でほぼ設計値に近い性能が得られている。

4.2 ガバナの動作特性 WINDMEL 風車のメカニカルガバナは、本風車のピッチ制御を行う唯一の装置であり弱風、強風を問わず確実な回転数制御、出力制御を遂行しなければならない。

図5(a)~(c)は、弱風、中風、強風時のガバナの動作特性を示す計測例であって、風速と発電機回転数およびピッチ角の時間変化が記録されている。

図5(a)は、定格風速8.0 m/s以下での発電機回転数とピッチ角の動作波形である。波形が示すように、発電機回転数が定格1800 rpm 以下であるためピッチ

角はロータ回転に同期した周期的な変動を除いて初期設定角5°を維持して運転している。ピッチ角出力波形の周期的な振動は、ロータ回転に同期したティータ運動に基づくものである。

図5(b)は、風速がほぼ8~12 m/s域の波形であり、発電機回転数の上昇に伴いピッチ角を最高20°まで変化させて発電機が定格回転数になるように制御している。また定格風速付近における発電機回転数は、ほぼ定格値を保って運転されている。

図5(c)は、強風時で変動の激しい6~16 m/sの風速域での出力波形である。ピッチ角は、定格以上の風速では迅速にピッチ角をフェザ方向に立ち上げ、定格以下の風速では速やかに初期設定角に復帰させて、発電機回転数を定格付近に維持するように制御している。

なお運転時の風速の変動周波数は5 Hz 以下⁽⁵⁾であり、また時間変化率は、最高約4.0 m/s²であった。

図6は、ガストの大きさとピッチ角変化の関係を観測データから整理したものである。横軸のガスト係数Gは、ガストを受けて発電機の回転数が増加する以前

図3 風速と発電機出力の観測データ

図4 1 min 平均発電機出力

の風速約 2 sec 間の平均値で、ガスト時の風速上昇を除いたものとして定義した。ガスト前の平均風速が定格風速の 8 m/s 以下の場合と定格以上の場合をそれぞれ記号を変えて図示した。

結果は、ガスト係数が大きくなるほどピッチ角の変化量が大きくなり、良好なピッチ制御が行われている。なお、ガスト係数が一定でも、平均風速が定格風速以上のほうが定格風速以下の場合よりもピッチ角変化量は大きくなっており、風速に対し柔軟に対応してい

ることを示している。

図 7 は、発電機回転数に対するピッチ制御の動作状況を示すもので、比較的風速変動の激しい風況の下で取得した 15 000 個の実測データをプロットしたものである。結果が示すように、発電機回転数に対するピッチ角は、定格回転数を境にほぼ 5~20° の範囲で変化しており、発電機の回転上昇を定格の 125 % 以内に抑

(a)

(b)

(c)

図 5 ピッチ角の時間変化出力波形例

図 6 ガストに対するピッチ角変化量

図 7 発電機回転数とピッチ角の観測データ

図 8 発電機回転数に対するピッチ制御遅れ時間

図 9 ピッチ制御遅れ時間の定義

え、システムが安全に運転されていることを示した。

図 8 は、発電機回転数に対するピッチ制御の遅れ時間を図示したものである。なお遅れ時間は、図 9 のように定義した。結果は、発電機回転数が高くなるほど短くなっており、その範囲はほぼ 0.5～2.1 s である。

図 10 は、取得した風況の異なる数日のデータから発電機回転数に対するピッチ制御の動作速度を図示したものである。図 10 のように定格回転数から最高 2 200 rpm まで発電機回転数が大きくなるほどピッチ角を敏速に変化させている。取得した風況でのピッチ角の変化速度は、最高 6.8°/s であった。

5. 結 論

ティータードハブ機構を備えた 15 kW 可変速風力発電システムによって、風車のピッチ制御を担うメカニカルガバナの運転特性を得た。

得られた結果を要約すると以下のとおりである。

(1) 実証運転での発電機出力は、ほぼ設計値に近い値が得られた。

(2) メカニカルガバナは、ピッチ角を定格回転数を境に 5～22°の範囲で変化させ、ロータの回転上昇を

図 10 発電機回転数に対するピッチ角の変化速度

定格値の 125 % 以内に抑えてシステムを柔軟、安全、確実に制御した。

(3) 発電機回転数の変化に対するピッチ制御の遅れ時間は、ほぼ 0.5～2.1 s で回転数が高いほど小さかった。またピッチ角の変化速度は、回転数にほぼ比例しており最大 6.8°/s であった。

以上のことからメカニカルガバナは、補助動力のいらない自動的なピッチ制御装置として可変速風力発電システムへの利用価値は高いと考えられる。

文 献

- (1) Matumiya, H., ほか 4 名, *Proc. AWEA Wind Power*, 88, (1988), 135-154.
- (2) 風力エネルギー読本, (1979), 33, オーム社.
- (3) 松宮・ほか 2 名, *シヤンシャインジャーナル*, 9-1(1988), 14.
- (4) 松宮・ほか 2 名, *機論*, 56-529, C (1990), 2373.
- (5) 山根・ほか 5 名, *機論*, 56-530, C (1990), 2533.