自然風下におけるアップ偏向式風力発電装置の出力特性と軸推力係数

正員 河本 映 (豊橋技科大)
 正員 藤倉 政 信 (豊橋技科大)
 正員 榊 原 建 樹 (豊橋技科大)
 正員 榎 本 茂 正 (豊橋技科大)

1. はじめに

風力発電機の回転数制御方式には、側翼式、アップ式、抵抗翼式、可変ピッチ式などがある⁽¹⁾。このうち、可変ピッチ制御方式は主に 100 kW 以上の大形風車に採用され、それらの動特性解析や実証試験が行われてきている⁽²⁾⁽³⁾。一方、10 kW 以下の小形風力発電機については、我が国では科学技術庁の「風トピア計画」で開発が進められ、そこにおいてアップ偏向式風力発電装置も試験されている。この回転数制御方式は単純・堅牢で、ロータ回転の姿勢状態が直視でき、またバランスウェイトの重量を変えることにより、容易に風車の出力特性をコントロールすることができるなどの特長を有している。

「風トピア計画」の調査結果⁽⁴⁾によると、アップ偏向式風力発電装置の発電効率は、実証試験地域にもよるが 11~16% と他の方式の風力発電装置に比べて幾分高い。また 20 m/s 程度の風速までは、ロータを強制的に停止させなくても、アップ制御のみで安全性は十分であり、6 年間にわたって損傷は全くみられなかったと報告されている⁽⁵⁾。

しかしながら、このような実績のあるアップ偏向式風力発電装置に関する詳細な研究は数少ない⁽⁶⁾。風速および風向が常に変動する自然風下では、アップ式風

車のロータ回転数、アップ角および風車方向が時間的に複雑に変化する。これらの動特性を理論的に解明することは、このタイプの風力発電装置の最適設計や効率向上などにとって重要である。

本論文では、アップ偏向式風力発電装置の自然風下における種々の特性を実測し、アップ偏向式制御の効果およびこの装置の動特性を解明するのに必要な風車の基礎的特性を得ることを目的としている。

以下、第2章では供試風力発電装置の概要を、第3章では計測システムを、第4章ではアップ角を拘束した場合の出力特性を、第5章ではアップ制御動作時の自然風に対する特性を、第6章ではアップ角拘束の場合の風車のトルク係数と軸推力係数とについて述べる。

2. アップ偏向式風力発電装置の概要

実験に使用したアップ偏向式風力発電装置の側面から見た概観を図1に示す。ただし、ロータ回転面が約 45° アップしている状態を示している。

供試風力発電装置は図示のように、ロータ回転軸が

図1 風力発電機の概観と各種検出器の位置

Fig. 1. Wind turbine generator and positions of sensors.

Power Output Characteristics and Coefficient of Thrust of Upside Yawing Wind Turbine Generator under Natural Wind Circumstances. By Teru Kawamoto, Member, Masanobu Fujikura, Member, Tateki Sakakibara, Member & Shigemasa Enomoto, Member (Toyohashi University of Technology).

河本 映：正員，豊橋技術科学大学

藤倉政信：正員，豊橋技術科学大学〔現在，富士電機（株）〕

榊原建樹：正員，豊橋技術科学大学

榎本茂正：正員，豊橋技術科学大学

表 1 供試風車の主要諸元
Table 1. Structure and dimension of UW TG.

ロータ翼形		付図参照
ロータ直径		3.8m
発電開始風速		3 m/s
運転限界風速		20 m/s
定格回転数		250 rpm
最大出力		1.8 kW
ロータ・尾翼中心間距離		2.8m
ロータハブの地上高		10m
バランスウェイトの位置（支持点から）		0.64m
重心位置	バランスウェイト「大」	6.7 cm, 33°
	バランスウェイト「小」	5.1 cm, 60°
（支持点からの距離と鉛直軸となす角）		

風車発電機の支点から偏心して取り付けられているため、風から受けるロータ軸推力とバランスウェイトによる反力とが平衡するように、ロータ回転面が上向き、すなわちアップ方向に傾く。ロータ回転面がアップすることにより、風方向から見たロータ回転面の面積が減少する結果、回転数が抑えられる。

実験にあたって、ロータのアップ動作をコントロールするバランスウェイトとして、予備実験で風速 10 m/s における出力が約 1 kW となるもの（「大」）、および約 0.7 kW となるもの（「小」）の 2 種類を用意した。それぞれの重さは、大：41.5 kg，小：34.5 kg である。なお、本装置の主要諸元と寸法を表 1 に示す。

ロータ軸に直結されている発電機は、直流 24 V 分巻（自励）発電機である。この発電機の負荷として、種々の抵抗値をもつ負荷抵抗を使用した。

発電機の出力電圧は風車の回転速度に応じて変化するため、発電機出力および軸トルクも変化する。従って、この風力発電装置全体としての特性を知るためには、まず発電機のみ特性を明らかにしておかねばならない。このため風車発電機を地上に下ろし、発電機のみ試験を実施した。

その結果の一つとして、図 2 に種々の負荷抵抗値に対する出力-回転速度特性を示す。同図によると回転速度が 100 rpm を超えると出力が発生し、回転速度の増加に伴って出力は緩やかな放物線を描いて上昇している。その上昇割合は負荷抵抗が小さくなるほど大きくなっている。一般に、負荷抵抗の値が変われば発電機の出力-回転速度特性が異なるため、同一風速においても風車発電機の出力が異なる⁷⁾。

これらの検討を行うため、本実験での負荷抵抗の値として 1.14 Ω（公称 500 W）、0.74 Ω（公称 800 W）、

図 2 供試風力発電機の出力-回転速度特性

Fig. 2. Power-rotational speed characteristics of wind turbine generator.

0.33 Ω（公称 1,800 W）の 3 種類を採用した。

3. 計測システム

ロータの回転速度を検出するための回転計を回転プレート、光電式検出器および F-V 変換回路で構成した。回転プレートは直径 20 cm の円板に 18 枚の反射テープを放射状にはり付けたものであり、この円板をロータ後面に同軸上に取り付けた。光電式検出器は、その先端と回転プレートの距離が約 5 mm となるように発電機の上部に取り付けた（図 1 参照）。F-V 変換回路に関しては、低回転でも精度良く計測できるように回路設計したところ、測定可能範囲は 10~600 rpm となった。

ロータ回転面と鉛直とのなす角度を測定するためのアップ角計としては、電位差計を採用し、それを尾翼の付け根に取付け、電位差計の軸がロータのアップ動作と線形連動するように工作した。すなわち、電位差計の取付け位置と風車発電機のアップ動作の支点とが平行四辺形の上辺の二つの頂点となるように軽量アングルとちょうつがいとで電位差計と側板とを幾何学的に連結した（図 1 参照）。

風速計としては、応答時間が 0.1 s の熱線風速計を採用し、ロータの回転により自然風が影響を受けない距離（約 3 m）を隔てて、ロータの風上に設置した。

以上の計測値、すなわち回転速度、アップ角、風速に、発電機の出力電圧と電流とを加えた合計五つの時系列データをインタフェースを介してマイクロコンピュータでサンプリングし、フロッピーディスクに転送するものとした。それと同時にペンレコーダにてモニタリングを行い、それらのデータを記録した。このような計測システムの構成図を図 3 に示す。

(a) アップ角 0°

(b) アップ角 40°

(c) アップ角 70°

図 4 アップ角一定の場合の出力-風速特性
(負荷抵抗 0.33Ω)

Fig. 4. Power-wind speed characteristics of UW TG at constant up-angle (Load resistance: 0.33Ω).

の幾つかを次節以下で示すが、これら一連の結果は同一実験によって得られたものである。

〈5・1〉 出力-風速 負荷抵抗が 0.74Ω 一定下に

(a) バランスウェイト「小」

(b) バランスウェイト「大」

図 5 出力-風速特性 (負荷抵抗 0.74Ω)

Fig. 5. Power vs. wind speed characteristics (Load resistance: 0.74Ω).

において、バランスウェイトを「小」および「大」とした場合の出力と風速との関係を図 5 に示す。各図中には 600 点のプロットがあるが、各プロットは 5 秒間の移動平均を示し、破線によりそれらの平均的傾向を示す。なお実線は図 4 と同じく、ロータ回転面が風方向に垂直の場合そこを通過する風エネルギーを示す。同図から次のことが言える。

(1) 出力の立上る風速は、バランスウェイトが「小」であっても「大」であってもほとんど差がない。

(2) バランスウェイトが「小」のとき、風速が 8 m/s 付近に達すると、出力は 0.5 kW に飽和する傾向にある。

(3) バランスウェイトが「大」のときは、風速が 10 m/s を超えても出力は増大し続け、1 kW を超えている。

このように、バランスウェイトの重量を適切に選ぶことにより、所望の出力-風速特性をもつ風力発電装置を得ることができる。

(a) バランスウェイト「小」

(b) バランスウェイト「大」

 図 6 アップ角-風速特性 (負荷抵抗 0.74Ω)

 Fig. 6. Up-angle vs. wind speed characteristics (Load resistance: 0.74Ω).

〈5・2〉 アップ角-風速 アップ制御式風力発電装置の制御動作は、アップ角の変化を測定することにより更に明確となる。負荷抵抗を 0.74Ω 一定としたときのアップ角と風速との関係を図 6 に示す。同図から次のことが言える。

(1) アップ動作を開始する風速は、バランスウェイトが「小」では 3.7 m/s 、「大」では 5.5 m/s とバランスウェイトが重いほど速くなっている。

(2) 風速が速くなるにつれてアップ角は増大しているが、その増加割合はバランスウェイトが「大」なるほど小さい。

(3) アップ角が 60° に達する風速は、バランスウェイトが「小」のとき 8 m/s 、「大」のとき外挿して 12 m/s とバランスウェイトが重くなるにつれて速いほうに移っている。

図 5 と図 6 とを同時に見てみると出力、アップ角、風速の相互の関係がわかる。例えば、図 5 (a) と図 6 (a) とを見ると出力が飽和する風速は 8 m/s であり、このとき風車は 60° アップして回転している。同様に (b) 図同士を見ると風速が 10 m/s を超えても、アップ角はまだ 44° であり、出力は増大し続けている。このように、この風力発電装置は風速の変動に対してアップ角を自らコントロールすることにより出力制御を行っている。

(a) バランスウェイト「小」

(b) バランスウェイト「大」

 図 7 出力-アップ角特性 (負荷抵抗 0.74Ω)

 Fig. 7. Power vs. up-angle characteristics (Load resistance: 0.74Ω).

〈5・3〉 出力-アップ角 図 5 の出力-風速特性と図 6 のアップ角-風速特性から得られる出力とアップ角との関係を図 7 に示す。同図は以下のことを示している。

(1) プロットのばらつきはバランスウェイトの「大」のほうが目立つ。例えば、アップ角が 30° のとき、プロットのばらつき幅は「小」で 300 W 、「大」で 500 W 程度となっている。このことはバランスウェイトが重くなるほど、この装置のアップ方向への慣性モーメントが大きくなり、そのため自然風の変動に対してアップ動作が追従しにくくなることを意味している。

(2) 出力はアップ角の増大と共にほぼ直線的に増大している。その増加割合はバランスウェイトの重いほうが大きい。

6. アップ制御式風車の基礎特性

第 4 章、第 5 章では、アップ制御式風力発電装置の運転時における平均的出力特性について述べたが、こ

の装置の自然風に対する時間的応答を理論的に解析するためには、この風車のアップ状態における基礎特性を把握しておかねばならない。本章ではこの風車のトルク係数と周速比との関係、および軸推力係数と周速比との関係について述べる。

〈6・1〉 トルク係数-周速比 自然風下で供試風車のトルク係数と周速比との関係を求める際、鈴木氏ら⁽⁸⁾の提案した手法を採用した。その手法は、風車トルクのある小時間幅における積分値が、風車の負荷システムの既知のパラメータと風車の回転速度の時系列データとから算出可能であることを前提とし、それらと風速の時系列データをもとに、小時間幅ごとに周速比に対するトルク係数の値を求めていくものである。

鈴木氏らの対象とした風車はロータ直径が1.9mであり、そのときの時系列データの標本間隔 h は 0.01 s、積分時間幅 D は 0.3 s であった。それに対し、ここで対象としているロータの直径は3.8mと長く、そのためロータの慣性モーメントが大きくなり、 $h=0.1$ s、 $D=1.0$ s とした。アップ角 θ を 0° から 70° まで 10° ごとに拘束して、各場合ごとに前述した手法を用いてトルク係数 C_T と周速比 λ との関係を求めた。それらのうち、 $\theta=0^\circ$ と 40° の場合の結果を図8に示す。 C_T - λ プロットのばらつきは相当あるものの、平均的傾向は従来から発表されている水平軸2枚翼プロペラ形風車の C_T - λ 特性と類似している。この平均的

図8 アップ角一定の場合のトルク係数-周速比特性

Fig. 8. Coefficient of torque vs. tip-speed-ratio characteristics at constant up-angles.

傾向が風車の運転安定領域においては直線で近似されるものとして、最小二乗法を用いてそれらの式を求めると図8の中の破線となる。その他のアップ角については既に発表されている⁽⁹⁾。

〈6・2〉 軸推力係数-周速比 アップ制御式風力発電装置では、風の強弱に伴ってロータ回転面がたえず変動している。従って、この動作を解析するためには、アップ動作を引き起こすもととなっている風車の軸推力を知っておかなければならない。

軸推力係数 C_F は一般に周速比 λ の関数であり、次式で定義される。

$$C_F = \frac{T_h}{0.5 \rho \pi R^2 V^2} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\lambda = \frac{\omega R}{V} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 T_h : 風車の軸推力 (N)、 ρ : 空気密度 (kg/m^3)、 R : ロータの回転半径 (m)、 V : 風速 (m/s)、 ω : ロータの回転速度 (rad/s)

ただし、(1)式が定義されるのは、アップ角が変化しないようにロータ回転面が拘束されている場合であって、本供試風車のようにロータ回転面が変化するような場合には、 C_F はアップ角 θ の関数ともなる。

軸推力係数 C_F を求めるには、軸推力 T_h を測定しなければならない。以下、その測定について述べる。尾翼の付け根に取付けておいたアップ角計の代わりにロードセルを取付け、風車のアップ動作と連動する側板とそのロードセルとを図9で示すようにロッドで連結した。ロータ回転面に作用する風力のロータ軸方向への分力、すなわち軸推力 T_h がロータ回転面のアップ方向へのモーメントになる。この T_h の時間的变化は、ロードセルの出力電圧を記録することにより得られる。ただし、ロードセルには風車発電機やバランス

図9 アップ式風力発電機の軸推力測定系

Fig. 9. Measurement system for thrust force of UWGT.

図 10 軸推力係数-周速比特性

Fig. 10. Coefficient of thrust vs. tip-speed-ratio characteristics.

ウェイトの重力が作用しているため、これらの力をベクトル的に引いておかねばならない。

アップ角 θ を 0° , 10° , 20° , 30° , 40° と拘束して、各場合において ω , V , T_h の時系列データを採り、それらを基に (1), (2) 式から軸推力係数と周速比との関係を求めた。それらのうち、 $\theta=0^\circ$, 40° の場合を図 10 に示す。同図において、プロット点はかなりの範囲にわたってばらついている。特に、 $\theta=0^\circ$ の場合が顕著である。

一方、軸推力係数と周速比との関係を理論的に求めることを試みた。まずロータのみを装置からはずし、ロータ中心から先端までの各部におけるブレード断面形状とピッチ角を測定した。その結果を付図 1 に示す。これらからその部分の軸推力を求めるには、揚力係数と抗力係数とが必要である。これらはブレードの断面形状に依存するものであって、空力計算ないし風洞実験などから求められるものである。ここでは、供試ブレードと類似の翼形をもつ Clark Y 翼形の揚力係数と抗力係数のデータ⁽¹⁰⁾を採用することとした。付録の手順に従いブレード各部の軸推力を積算することにより、ロータ全体としての軸推力 T_h を得、(1) 式により軸推力係数を求めた。その結果、軸推力係数 C_F と周速比 λ の関係は、運転安定領域においては“なだらかな丘”状の曲線を描くことが判明した。た

図 11 供試風車の軸推力-周速比特性

Fig. 11. Coefficient of thrust vs. tip-speed-ratio characteristics of UWGT.

だし、ロータ回転面が風向に対して直角の場合のみこのように計算できるのであって、ロータ回転面が風向に対して傾いているような場合には非常に複雑になる。そのような場合であっても、 C_F - λ 特性の形状自体が変わらないものと仮定し、実測値を参照して描いた C_F - λ 特性を図 11 に示す。

図 11 から次のことがわかる。

(1) アップ角 θ が一定であるならば、軸推力係数 C_F は周速比の増大と共に増加し、緩やかに最大値を呈した後、減少している。

(2) 実線で示す運転安定領域における $C_F(\lambda)$ は、ほぼ一定値をとるとみなしてもよい。

(3) その値はアップ角 θ の増大と共に、ほぼ比例的に減少している。

以上のように、軸推力係数 C_F は周速比 λ とアップ角 θ の関数、すなわち $C_F(\lambda, \theta)$ として表すことができた。この $C_F(\lambda, \theta)$ は前章で述べた $C_T(\lambda, \theta)$ と共に、アップ偏向式風力発電装置の動特性を記述する際に重要な特性となる。

7. ま と め

傾斜角計やロードセルを計測システムに組込むことによって、アップ偏向式風力発電装置の自然風に対する種々の特性を測定し、アップ制御の効果および本風車の基本性能の一つである軸推力係数を求めた。

得られた結果の要点を以下に列挙する。

(1) ロータ回転面をアップ方向に強制的に傾けていくと出力は急激に低下し、アップ角が 70° に達すると出力はほとんど得られない。

(2) アップ制御動作時における風速、アップ角および出力の相互関係が明らかとなった。例えば、バランスウェイトが「大」で風速が 10 m/s のときアップ角は 45° となり、そのとき出力は 1 kW となる。

(3) アップ式風車の軸推力係数を理論を参照のうえ実験値を処理して求めたところ、運転安定領域内では

周速比によってほとんど変わらず、アップ角の増大と共に比例的に減少することが判明した。

(昭和 61 年 6 月 27 日受付)

文 献

- (1) 本間, 他: 風力エネルギー読本, p. 64 (昭 59) オーム社
- (2) V. Nelson, et al.: "Power Variation with Pitch Setting for a Horizontal Axis Wind Turbine", *Wind Engineering*, 9, 88 (1985)
- (3) 森: 「風力エネルギーの開発」, 電学誌, 105, 215 (昭 60-3)
- (4) 科学技術庁計画局資源課: 「風トピア計画調査結果の概要」, 風力エネルギー, 4, 51 (昭 60-2)
- (5) 内藤: 「グリーンエナジー計画における風力利用技術」, 第 7 回風力エネルギー利用シンポジウム, p. 25, 日本科学技術振興財団 (昭 60)
- (6) K.H. Hohenemser & A.H.P. Swift: "Wind Turbine Speed Control by Automatic Yawing", *J. Energy*, 7, 237 (1983)
- (7) T. Suzuki, et al.: "Characteristics of a Small Wind Power System with D.C. Generator", *IEE Proc.*, 129-B, 217 (1982)
- (8) 鈴木, 他: 「風車トルク係数の測定法」, 計測自動制御学会論文集中, 18, 167 (昭 57)
- (9) 河本, 他: 「偏向制御式風車の偏向時トルク係数と出力係数」, 電学誌 B, 105, 888 (昭 60-10)
- (10) 牛山, 他: 小型風車ハンドブック, p. 109 (昭 60), ノマワ一社

付 録

軸推力 T_h 積算の手順 (単純翼素理論による)

回転中心より r の位置にあり, 微小長さ dr の翼素に作用する揚力 dL , 抗力 dD は,

$$dL = \frac{1}{2} C_L \rho W^2 c dr \quad \text{..... (付 1)}$$

$$dD = \frac{1}{2} C_D \rho W^2 c dr \quad \text{..... (付 2)}$$

ここに, C_L : 揚力係数, C_D : 抗力係数, ρ :

空気密度, c : 翼弦長

で与えられる。 W は翼素に対する風の相対速度で, ロータ角速度を ω , 風速を V とすると

$$W = \sqrt{V^2 + (r\omega)^2} \quad \text{..... (付 3)}$$

である。この翼素に働く軸推力 dT_h は, dL と dD の合力を回転軸方向とそれに直角な方向に分解したときの回転軸方向の成分であり,

$$dT_h = dL \cos \theta + dD \sin \theta \quad \text{..... (付 4)}$$

で与えられる。 θ は翼素に対する風の相対速度が回転方向となす角で

$$\theta = \tan^{-1}(V/r\omega) \quad \text{..... (付 5)}$$

(付 1), (付 2) 式の C_L , C_D は翼 (本論文の場合は Clark Y 翼形) の性能曲線より迎え角 α の関数として得られる。翼のピッチ角を β とすると, $\alpha = \theta - \beta$ で求められる。 C と β を実測し, (付 4) 式をブレード全長にわたって数値積分し, 更に翼枚数を乗ずればロータ全体の軸推力が求まる。

付図 1 供試風車のロータ断面図

app. Fig. 1. Cross section of UWTG rotor.