OS2-12 変動風中における鉛直軸風車の過渡応答 (一定回転数および一定トルク条件)

Transient Response of a Vertical Axis Wind Turbine in the Change of Wind Speed (Conditions of Constant Revolution or Constant Torque)

○正 康 仁勝 (鳥取大学)
正 原 豊 (鳥取大学)
正 林 農 (鳥取大学)

藤本 裕己 (鳥取大学)
正 河村 哲也 (お茶の水女子大学)

In-Seung KANG, Tottori University, 4-101 Koyama-cho, Tottori 680-8552

Yuuki FUJIMOTO, Tottori University

Yutaka HARA, Tottori University

Tetuya KAWAMURA, Ochanomizu University, 2-1-1 Ohtuska, Bunkyo-ku, Tokyo 112-8610

Tsutomu HAYASHI, Tottori University

Abstract

In order to analyze the transient response of a vertical axis wind turbine to change of wind speed, the response has been analyzed under the condition of either constant rotational speed or constant load torque. Wind that instantaneously increases like a step was generated as the input power. In the case of constant load torque condition, effective torque of the wind turbine abruptly increased up to the value on the torque curve of the final wind speed, with turbine rotational speed kept almost constant. After that, the effective torque decreased along the torque curve to reach the final state.

Key Words: Wind turbine, Transient response characteristics, Unsteady wind, Desert environment wind tunnel

1. はじめに

直線翼鉛直軸風車(VAWT)は、その特性が風向変化の影響を受けにくいこと、発電機を地面近くに設置できること、翼の速度が一樣であること、翼の製造コストが安価になること、抗力型風車(サボニウス風車など)に比較して高効率になることなどから風力発電用として最近注目されている風車の一つである。しかし、自己起動が困難なこと、ローターの高さが低いので大気境界層内の幾分低風速部分で働くなどの短所がある。鉛直軸風車は風向変化には影響されにくい、自然風の瞬間々々の風速変化に対しては当然ながら影響を受ける。本研究では、風速変化に対する直線翼鉛直軸風車の基本的な過渡応答特性を明らかにすることを目的とし、一定回転数条件と一定負荷トルク条件の2つの状態の下で、 V_0 の風速から急に V_1 の風速に増加するステップ状の突風に対する鉛直軸風車の過渡応答特性を解析した。

2. 実験装置

本実験では、対称翼である NACA 0015 翼(翼弦長: $c=0.14$ m)を用いた直線翼鉛直軸風車を使用した。翼枚数は4枚、ローター直径は0.7m、ローター高さは0.7mである。風車ローターの慣性モーメントは $I=0.8[\text{kgm}^2]$ である。図1に実験システムの概念図を示す。実験に使用した風洞は風速変化が激しいと予想される世界各地の沙漠環境において活躍する風車

Fig.1 Experimental setup

の開発を行うことを目的として鳥取大学に設置した沙漠環境風洞である⁽¹⁾⁽²⁾。本風洞は吹出口寸法が1.5m×1.5mのエッフェル型風洞であり、送風機のピッチ角を変化させることで、ステップ状の突風などの変動風を発生することが可能である。過渡応答実験で、回転数を一定に保つ場合は、トルク検出器(小野測器, SS-050)の負荷側にはインバータ制御の誘導モータ(三菱電機, ZKB-2.5HBN)を結合した。一方、一定負荷トルク条件を作る場合には、誘導モータに換えてパウダーブレー

キ(三菱電機, ZA-0.6Y)を結合し、その電流を制御して負荷トルクが常に一定になるように制御した。主流の風速はピトー管とI型熱線プローブを用いて風洞出口で計測を行った。

3. 過渡応答特性の概要

本研究ではステップ状に急激に風速が増加する突風に対する鉛直軸風車のトルクおよび回転数変化の応答特性を明らかにする。図2に風速が V_0 から V_1 に増加するステップ状の突風の模式図を示す。図3の $Q-N$ 線図は、2つの風速 V_0, V_1 ($V_0 < V_1$)における風車のトルク特性曲線を模式的に示す。一般に風車の最大効率を与えるトルク Q は回転数(N [rpm])の2乗に比例する⁽³⁾。したがって、風力発電機の制御としては、図3の破線に示すように各風速の最大出力に対応するトルク点が動作点となるように制御することが理論的に最適である。本研究では基本的な風車ローターの応答特性を調べるために、その第1段階として、一定回転数条件と一定負荷トルク条件の2つの状態に分解して解析した。風速が V_0 から V_1 に増加するステップ状の突風に対して、風速 V_0 での風車の初期状態を回転数 N_0 、実効トルク Q_0 と仮定すると、一定回転数条件($N=N_0$)では、時間に対する実効トルク Q の変化は図3中の左に示す[A]のグラフのような立ち上がり曲線を示す。一方、一定負荷トルク条件($T_L=\text{一定}$)では、時間に対する回転数(角速度)の変化は図3中の下に示す[B]のグラフのような立ち上がり曲線を示す。

風車ローターに作用する力の概念を図4に示す。風車ローターの運動方程式は次式で表わされる。

$$I \frac{d\omega}{dt} = Q - T_L \quad (1)$$

$$Q = T_W - T_B \quad (2)$$

ここで、 I は風車ローターの慣性モーメント、 ω は風車の回転角速度であり、 t は時間を表す。したがって、 $d\omega/dt$ は風車ローターの角加速度である。式(1)の右辺第1項の Q は、式(2)に示すように、ローター回転トルク T_W からローターを支持するベアリング等による抵抗トルク T_B を引いた値であり、本研究ではこれを実効トルクと称して式(2)で定義する。式(1)の第2項の T_L は発電機などによる負荷トルクであり、本研究では、誘導モータやパウダーブレーキなどが発生するトルクである。また、負荷の慣性モーメントが風車ローターの慣性モーメントに比べて十分に小さく無視できる場合には、 T_L は図4におけるトルク検出器が出力する値でもある。なお、 T_W の符号は風車の回転方向をプラスと定義するが、 T_B および T_L の符号は風車の回転方向と逆の方向をプラスと定義する。

一般に T_W は風速 V (m/s)と回転角速度 ω (rad/s)の関数であり、 T_L は発電機を仮定すれば、その負荷抵抗 R が一定の場合は ω に比例する⁽⁴⁾。また T_B は温度依存性などを無視すれば、 ω のみに依存する関数と考えられる。一定回転数条件 $\omega=\omega_0$ であるならば、 $d\omega/dt=0$ であるので、式(1)は

Fig.2 Schematic diagram of step wind

Fig.3 Transient responses of a wind turbine in step wind (conditions of constant revolution or constant torque)

Fig.4 Schematic diagram of forces acting on a rotor

$$Q(V, \omega_0) = T_W(V, \omega_0) - T_B(\omega_0) = T_L(R, \omega_0) \quad (3)$$

となる。一方、一定負荷トルク状態を作り出し実験を行う場合には、式(1)において $T_L=\text{一定}$ の条件を課すことになり、風速 V の変化に伴う実効トルク $Q(V, \omega)$ の変化が入力となり、慣性モーメント I に依存した回転数変化が出力として得られることが予想される。

4. 実験結果

4.1 一定回転数条件

本研究では風車の初期状態を、風速 10m/s における最大出力点、すなわち回転数 N が約 360 rpm、実効トルク Q が約 0.68 Nm の状態とし、ステップ状の突風の風速変化幅 ΔV を 0.5, 1.0, 1.5, 2.0m/s の 4 段階に変化させて実験を行なった。一定回転数条件において 10m/s から 11m/s にステップ状に増加する突風を入力したときに得られた負荷トルク T_L 、風速 V および回転数 N の変化を図 5 に示す。この図 5 において横軸は風がステップ状に増速する時刻を原点とした時間 t である。この実験では一定回転数条件を作り出すためにインバータ制御の誘導モータを用いているが、回転力の増加に伴い、誘導モータに若干のすべりが生じ、時間 0s ~ 2s の間において回転数が 2rpm 程度増加した。回転数が一定であれば、流れ場のつくり出す風車を廻そうとする力に対して風車は速応して、高いトルクに短時間 (2s 以内) に到達することを意味している。この回転数が変化した時間 0s ~ 2s では式(1)に基づいて負荷トルク T_L に慣性力 $\frac{2\pi}{60} I \frac{dN}{dt}$ を加えることにより、実効トルク Q の値を求めることができる。

$$Q - T_L = \frac{2\pi}{60} I \frac{dN}{dt} \quad (4)$$

この $Q - T_L$ が風車を加速させる原動力であり、風車が増速して流れになじんだ後は、式(3)に示すように T_L は Q に一致して、一定回転数(約 364rpm)に落ち着く。ノイズ成分を除去するために約 0.48ms ごとに移動平均した T_L および N の値を用いて実効トルク Q を求めた結果を図 6 に示す。実効トルク Q の時間変化を詳細に調べると、求めた実効トルクは風速変化の開始時刻 $t = 0$ s よりも約 0.15 s 遅れた時刻から増加し始める。これは風速の計測位置である風洞吹出口から風車の回転軸までの距離が 1.5 m あるため、風速変化計測時間と風車のトルク計測時間にずれがあるためである。実効トルク Q の変化時間は風車周囲の流れ場が一樣な流れに達するに必要な時間に相当すると考えられる。実効トルク Q の変化時間 τ_Q を、 Q の変化幅 ΔQ の 10% から 90% までに要する時間と定義して各実験結果について τ_Q を求めた。表 1 に一定回転数条件における実験結果をまとめる。風速の変化幅 ΔV に依らず実効トルク Q の変化時間 τ_Q は 0.15s 以下の短い時間であり、風車に、より高いトルクを生じる風車周りの流れ場は、ステップの崩れを勘案しても、主流風速の増加に対する遅れはほとんど無く形成されていると考えられる。一定回転数条件において、風速 10m/s から 11m/s に増加するステップ状の突風を入力したときの実効トルク Q の変化過程を風車のトルク特性曲線とともに示すと図 7 の矢印のようになり、その変化時間は極めて短い。

4.2 一定負荷トルク条件

図 8 に一定負荷トルク条件においてステップ状の突風を入力したときに得られる、図 3 の [B] 図に対応する風車の回転数増加の応答の例を示す。この例では風速は約 10 m/s から 11 m/s にステップ状に増加させたが、負荷トルク T_L はパウダー

Fig.5 Response of load torque(T_L) to the step wind in the constant revolution condition

Fig.6 Response of effective torque(Q) to the step wind in the constant revolution condition

Fig.7 Change of effective torque Q in the constant revolution condition

Table1 The change time of effective torque(τ_Q) and the change widths(ΔQ)

ΔV (m/s)	0.5	1.0	1.5	2.0
τ_Q (s)	0.152	0.131	0.131	0.133
ΔQ (Nm)	0.14	0.23	0.34	0.45

Fig. 8 Response of rotational number to the step wind in the constant load torque condition

Fig. 9 Change of effective torque Q in the constant load torque condition

Fig. 10 Change of effective torque Q in the constant load torque condition

Table 2 Time constants of rotational number (τ_N) and the change widths (ΔN)

ΔV (m/s)	0.5	1.0	1.5	2.0
τ_N (s)	19.8	20.8	18.7	18.2
ΔN (rpm)	53	95	134	160

ブレーキにより約 0.68 Nm の値に一定に保った。図 8 に示すように、風速がステップ状に増加した時、回転数は指数関数的に増加し、1 次遅れの応答を示している。この回転数 N の変化を用いて、式(4)により実効トルク Q の変化を求めた。図 9 に実効トルク Q の変化を、横軸に時間 t をとった場合(a)と、横軸に回転数 N をとった場合(b)について示す。また、図 10 は、図 9(b)の a に N に対する Q の変化を初期風速 $V_0=10 \text{ m/s}$

と増速後の風速 $V_1=11 \text{ m/s}$ における風車トルク特性曲線に重ねてプロットした図である。図 9 と図 10 より実効トルク Q の変化は、初期風速状態 (10 m/s) の一定トルク値上の点 a からほぼ一定回転数状態を保ったまま短時間に増加して風速 11 m/s のトルク曲線にのり (b 点)、そのトルク曲線に沿いながら最終状態 ($V=11 \text{ m/s}$ のトルク曲線上の $Q=0.68 \text{ Nm}$ の状態、c 点) に到達する過程をとる。表 2 に一定負荷トルク条件における回転数増加の時定数 τ_N の値を示す。 τ_N は風速の増分 ΔV に関係なく、 τ_N はほぼ一定である。一定回転数条件における実効トルク変化の立ち上がり時間 τ_Q と比べてかなり大きな値である。時定数 τ_N の値は、風車の慣性モーメント I に大きく影響され、慣性モーメント I が大きいほど時定数 τ_N も大きくなると考えられる。

5. おわりに

本研究では、ステップ入力 of 風速増加に対する鉛直軸風車のトルクの過渡応答特性を回転数一定および負荷トルク一定の 2 つの条件に分けて解析を行った。一定回転数条件の実験結果から、風車周りの流れ場は主流風速の増加に対してほとんど遅れ無く、より強いトルクを発生する流れ場になることがわかった。一方、一定負荷トルク条件の実験からは、風車の実効トルクはステップ入力に対して、初期風速 V_0 のトルク状態からほぼ一定回転数を保ったまま風速増加後の V_1 のトルク特性曲線に一挙にのり、そのトルク曲線にほぼ沿いながら最終状態に落ち着く経過をたどることが示された。

謝辞 本研究で使用した沙漠環境風洞は平成 12~14 年度の文部科学省科学研究費補助金(地域連携推進研究費)によって設置した。また、本研究は 21 世紀 COE プログラム「乾燥地科学プログラム」の一部として実施した。ここに記し、感謝の意を表す。

参考文献

- (1) 林 農, 平成 12 年度 - 14 年度科学研究費補助金 (地域連携推進研究費)「砂漠化防止・沙漠緑化に活躍する新技術風車の研究開発」研究成果報告書, 2003
- (2) 林 農, 原 豊, 康 仁勝, 加藤 優, 藤本 裕己, 若良二, 田川 公太朗, 神近 牧男, 沙漠環境風洞の特性計測 (定常風と脈動風), 鳥取大学工学部研究報告第 37 巻, pp. 89-106, 2007 [http://akebia.jim.tottori-u.ac.jp/reports/repot_J.html]
- (3) 鳥谷 隆, 大屋 裕二, 渡辺 公彦, マイクロ風車の風速変動に対する応答, 第 27 回風力エネルギー利用シンポジウム, pp. 207-210, 2005
- (4) 松岡 順一, 坂本 東男, 中西 昭男, 坂本 文夫, 西沢 良史, 牛山 泉, 高性能 Nd 系希土類磁石を使った風力発電機の開発, 第 22 回風力エネルギー利用シンポジウム, pp. 206-209, 2000