

直線翼鉛直軸風車のステップ風に対する過渡応答について*
(一定回転数条件および一定トルク条件)林 農*¹, 康 仁 勝*²
原 豊*¹, 河 村 哲 也*³Transient Response of a Straight-Bladed Vertical Axis Wind Turbine
to Step Wind
(At Constant Rotational Speed or Constant Torque)Tsutomu HAYASHI*⁴, In-Seung KANG,
Yutaka HARA and Tetuya KAWAMURA** Tottori University, Department of Applied Mathematics and Physics,
4-101 Koyama-Minami, Tottori-shi, Tottori, 680-8552 Japan

In order to know the transient response of a straight-bladed vertical axis wind turbine to change of wind velocity, the response has been analyzed under the condition of either constant rotational speed or constant load torque. Wind that instantaneously increased like a step was generated as the input power. The rotational speed of a wind turbine was controlled by an induction motor in the former condition. On the other hand, the load torque was kept by a powder brake in the latter condition. Experiments under the condition of a constant rotational speed revealed the flow around a rotor followed the wind velocity change of the main flow very quickly. 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 velocity, with turbine rotational speed kept almost constant. After that, the effective torque decreased along the torque curve of final wind level to reach the final stage.

Key Words: Wind Energy, Wind Turbine, Transient Response, Step Wind, Desert Environment Wind Tunnel

1. 結 言

直線翼を備えた鉛直軸風車(VAWT)は、その特性が風向変化の影響を受けにくいこと、発電機を地表面近くに設置できること、翼の長手方向に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⁽¹⁾。この揚力を主要な駆動力とする直線翼を備えた鉛直軸風車は、よく知られたダリウス風車⁽²⁾から派生した風車であり、イギリスの Musgrove⁽³⁾が開発したH型風車が発電用の直線翼鉛直軸風車としての初期の風車であると考えられる。一般に揚力駆動の鉛直軸風車は、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⁽¹⁾。国内では、関らにより直線翼鉛直軸風車の研究が1976年頃より始められており、鉛直軸

風車用の反転平均線を持った翼型が開発された⁽⁴⁾。最近話題の建造物と融合した風車やビルの屋上に設置する風車では、激しい風速・風向変化や高い乱れ強度の自然環境、高い安全性と低い騒音の人間環境に対処することが求められ⁽⁵⁾、風車にとっては厳しい条件となっている。しかし、鉛直軸風車は本質的に性能が風向に影響され難いことや、H型鉛直軸風車がビル屋上で発生が予想される吹き上げ風に対して、出力の増加が期待されるという報告⁽⁶⁾もあり、これらの環境に適切な風車として、多くの小型鉛直軸風車の開発が進められている。

鉛直軸風車は風向変化には影響されにくいですが、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。水平軸風車に関しては、風速変化に対する推論がなされているが実験はなく⁽⁷⁾、鉛直軸風車の変動する風に対する応答性に関する研究は全くされていない。そこで本研究では、風力発電用風車の最適制御を念頭に置いて、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、一定回転数の条件と一定負荷トルクの条件の二つの状態の下で、 V_0 の風速から急に V_1 の風速に増加するステ

* 原稿受付 2007年7月23日。

¹ 正員, 鳥取大学工学部(☎ 680-8552 鳥取市湖山町南4-101)。² 正員, 鳥取大学大学院工学研究科。³ 正員, お茶の水女子大学人間文化創成科学研究科(☎ 112-8610 東京都文京区大塚2-1-1)。

E-mail: hayashi@damp.tottori-u.ac.jp

ップ状の突風に対する鉛直軸風車の過渡応答特性を実験的に解析した。

2. 実験装置

本実験では、対称翼である NACA 0015 翼(翼弦長: $c = 0.14 \text{ m}$)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 0.7 m , ローター高さは 0.7 m で, 風車ローターの慣性モーメントは $I = 0.8 \text{ kgm}^2$ である。実験システム概念図を図1に示す。実験に使用した風洞は風速変化が激しいと予想される沙漠環境において活躍する風車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⁽⁶⁾。本風洞は出口寸法が $1.5 \text{ m} \times 1.5 \text{ m}$ 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。風車ローターの風洞出口に対するブロッケージ比は約22%であり, 風車ローターの設置位置は, 風車が存在しない場合において風速分布が一樣である範囲(出口下流 1.5 m において $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 内に十分収まるように配慮してある(風車受風面積/一樣風領域=49%)。

本実験の過渡応答実験で, 風車の回転数を一定に保つ条件では, 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(停止保持ブレーキ付, 三菱電機, SF-JRB 0.75kW)を直結した。一方, 一定負荷トルクの条件の場合には, ブレーキ付誘導モータをそっくり取りはずして, 一定トルクを保証するためのパウダーブレーキ(三菱電機, ZA-0.6Y)を直結し, 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。なお, トルク計とパウダーブレーキの慣性モーメントの和は $1.59 \times 10^{-3} \text{ kgm}^2$ であり, 風車ローターの慣性モーメント $I = 0.8 \text{ kgm}^2$ の0.2%以下となり無

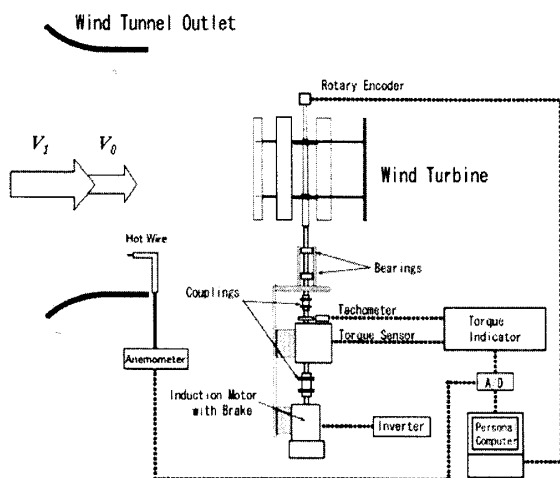


Fig.1 Experimental setup

視できる。主流の風速は校正したピトー管と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, 風速がステップ状に急激に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実験的に解析する。風洞出口において風速が V_0 から V_1 に増加するステップ状の突風の模式図を図2に示す。

この風が風洞出口の下流 1.5 m のところに置かれた直線翼鉛直軸風車に衝突する時に, 風車の発生するトルクおよび回転数変化から過渡応答特性を調べようとするものである。二種類の風速 V_0, V_1 ($V_0 < V_1$) における風車の回転数に対するトルク特性曲線である $Q-N$ 線図を図3に模式的に示す。一般に風車の最大効率すなわち最大出力を与えるトルク Q は回転数 N の二乗に比例するとされている⁽⁷⁾。

したがって, 風力発電機の制御としては, 図3中の破線に示すように各風速の最大出力点(図中の $P-N$ 線図上の P_{0max} および P_{1max} の点)に対応する $Q = CN^2$ 曲線上のトルク点が動作点となるように制御することが理

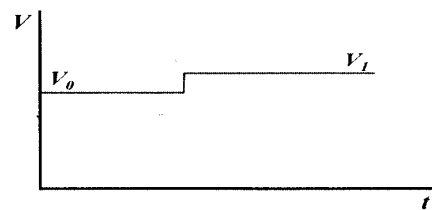


Fig.2 Schematic diagram of step wind

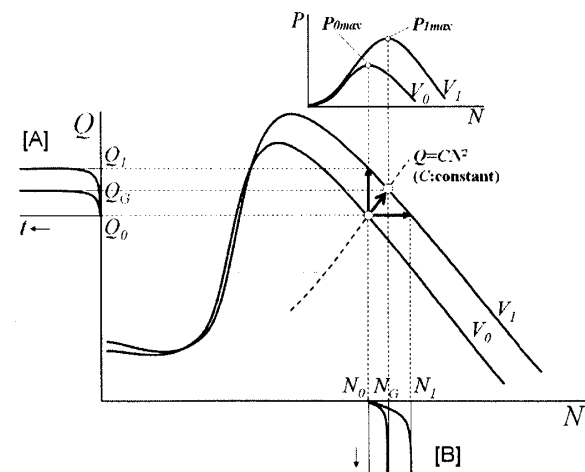


Fig.3 Transient responses of a wind turbine in step wind (Conditions of constant rotational speed or constant torque)

論的に最適である。しかし、発電機の特性に左右されることなく、風速変動に対する風車の過渡応答に関する一般特性を明らかにするために、回転数を変えない場合のトルク変化と、風速が急変する時に自由に回転数が増減しながらどのようにトルクが増減するかの二通りに分けて実験的に解析を試みた。

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 、実効トルクを 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]のグラフのように時間の増加と共に Q_1 に漸近する立ち上がり曲線を示す。一方、一定負荷トルク条件 ($T_L=Q_0$ =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]のグラフのように時間増加と共に N_1 に漸近する立ち上がり曲線を示す。実際の発電機を制御は $Q=CN^2$ 曲線上を動くように操作されるので、本来の立ち上がり曲線は Q_0 および N_0 に漸近する曲線を呈するはずである。しかし、ここでは基本的な特性を明らかにするために回転数一定とトルク一定の条件に分けたので、 Q_1 および N_1 に漸近する立ち上がり曲線を用いて風車の過渡応答特性の解析を試みるものである。

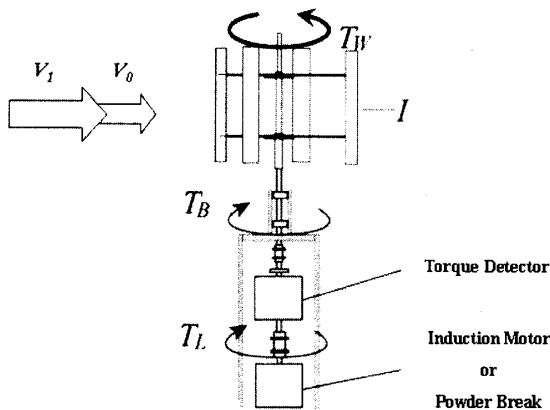


Fig.4 Schematic diagram of forces acting on a rotor

風車ローターに作用する力の概念を図4に示す。この図にしたがうと、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 はローター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)の右辺第一項の Q は、式(2)に示すように、流れ場が風車ローターを回転せしめようとする回転トルク 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 を差し引いた値であり、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)の第二項の T_L は負荷トルクであり、本来発電機が発生するトルクであるが、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。

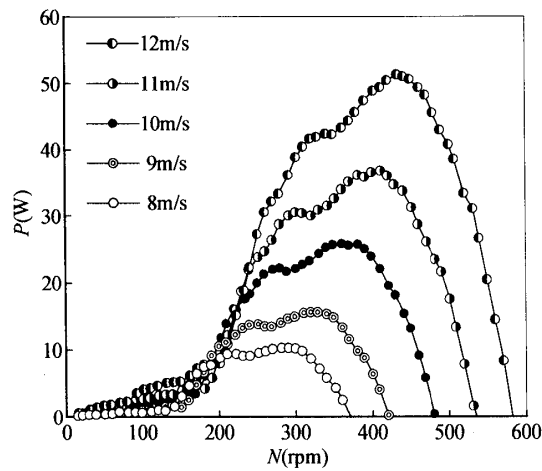
一般に T_W は風速 V (m/s) と回転角速度 ω (rad/s) の関数であり、 T_L は発電機を仮定すれば、その負荷抵抗 R が一定の場合は ω に比例する⁷⁾。また T_B は温度依存性などを無視すれば、 ω のみに依存する関数と考えられる。一定回転数条件 $\omega=\omega_0$ =一定であるならば、 $d\omega/dt=0$ であるので、式(1),(2)は次式を満足する。

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

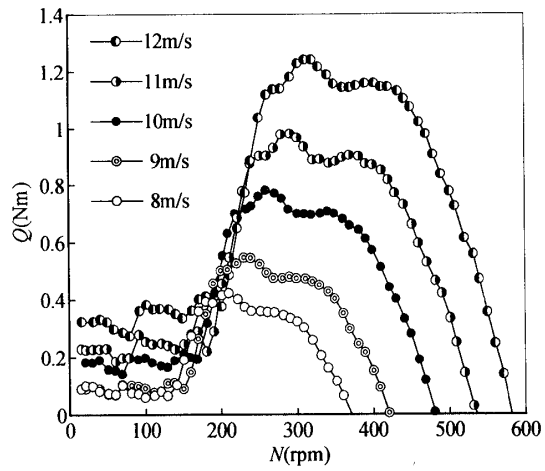
4. 供試風車の特性曲線

風の速度変動に対する風車の応答特性を調べる前に、実験に用いる直線翼鉛直軸風車の性能試験を行った。風速 8m/s~12 m/s の範囲で 1m/s きざみで定常流中に置いた時に得られた出力特性を図5(a)に、トルク特性を図6(a)に示す。供試風車の特性曲線は、速度が大きくなればほぼ相似的に出力、トルク共に大きくなっている。また、これらの特性曲線は出力特性、トルク特性ともに最高点を頂点とする独立峰でなく、二つの極大点を持つ連続的な双頭曲線を示すのは極めて特徴的である。これはトルク特性曲線の最大頂点において、回転する翼が動的失速現象 (Dynamic-Stall) を起こしていることによるものと推測される⁽¹⁰⁾。

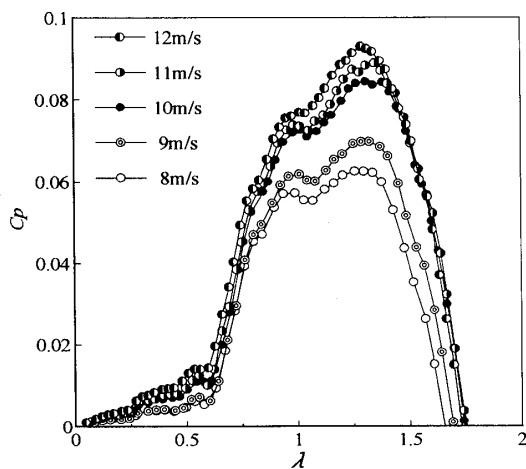
風車特性を $P-N$ および $Q-N$ 曲線に代わって、周速比 λ (=周速度/風速) と出力係数 C_p (図5(b)) およびトルク係数 C_q (図6(b)) で表わせば、トルク特性の最大値の位置の周速比は風速によらず $\lambda \approx 0.98$ であり、出力特性の最大出力を示す位置の周速比も風速に依らず $\lambda \approx 1.37$ であるので、この両点での風車ロ



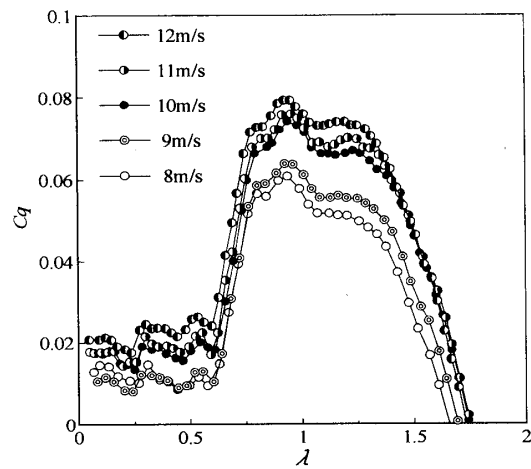
(a) Power of a wind turbine



(a) Torque of a wind turbine



(b) Power coefficients of a wind turbine



(b) Torque coefficients of a wind turbine

Fig.5 Characteristic curves of power

Fig.6 Characteristic curves of torque

ローター周りの流れは風速の大きさに関わらず相似状態にある。この時、相対速度と翼弦長に対するレイノルズ数は $Re=2.2\sim 22.3\times 10^4$ の範囲にある。文献(9)で言及されているように、周速比が小さい範囲では、ローターに組み込んだ翼が一回転する間に回転角のいずれかの位置で、通常剥離する迎角より大きな迎角まで剥離が遅らされ且つ揚力も増大する、いわゆる動的失速現象が生じている。この現象の確認には、数値計算などの方法によって、ローターの一回転あたりの出力係数とトルク係数を求めることによって確認することが可能であるので別途研究することにして、ここでは指摘することのみに留める。さらに、本論文では、風車の運転制御のための過渡現象の把握を目的としているため、特性曲線の最大出力点よりも右側の右下がり特性部分における現象を対象とすることになるので、動的失速現象の詳細については取り扱わない。

5. 実験結果

本研究では突風が吹く前の低速流 V_0 における風車の初期状態を、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、出力 P は 26W、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 の四段階に変化させて実験を行なった。一般に、実際の風車の制御は最高効率点よりもやや右側の右下がり特性曲線上で行われるとされているので、出力が最大出力点の 80% である高回転数状態 (N = 約 410 rpm, Q = 約 0.5 Nm) を初期状態とする実験も行なった。なお、風車の性能試験における定常流の風洞出口の風速 8m/s~12m/s は風車の回転数によらず常に一定であり、ステップ風の基準風速は風車の作動状態に影響されないことを確認した。

5・1 一定回転数条件 風車を一定回転数で回し続けながら、風速が10m/sから11m/sにステップ状に増加する突風を吹き込んだときに得られた負荷トルク T_L 、風速 V および回転数 N の状態変化を図7に示す。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。負荷トルク T_L は僅か2~3秒で最高値に近づき、5秒以内にほぼ最大値に漸近している。これは、ステップ状に急上昇する風による流れ場のつくり出す風車を回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に到達することを意味している。その際に2rpm程度の僅かな回転数増加が見られるのは、この実験では一定回転数条件を作り出す目的でインバータ制御の誘導モータを用いたために、回転力の増加に伴い、誘導モータに若干のすべりが生じたためである。

風車ローター周りの流れが変化した後、少し遅れて負荷トルク T_L が上昇している。負荷トルク T_L の変化時間 τ_T をその全変化幅 ΔT_L の10%から90%に到達するまでの立ち上がり時間と定義して、 τ_T の結果を表1に示す。風速の変化幅 ΔV に依らず負荷トルク T_L の立ち上がり時間 τ_T は約2sの短い時間であり、風車ローターに、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、回転数が一定であれば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。

一方、偶然であるが誘導モータにすべりが生じたために、回転数の変化から式(1)を用いて実効トルク Q を計算することができる。次節5・2で詳述する方法の計算によって求めた τ_Q も表1に併記する。風車ローター周囲の流れ場が一樣な流れに達するに必要な時間は実効トルク Q の変化時間 τ_Q に相当すると考えられる。この計算によって得られた実効トルク Q は負荷トルク T_L の立ち上がり時間 τ_T の1/10以下の短い時間であり、風車ローター周りの流れは瞬間的に高速流の流れ場に変化するものと考えられる。

なお、計算によって得られた実効トルク Q および実験結果の負荷トルク T_L ともに風速変化の開始時刻 $t=0$ sよりも約0.15s遅れた時刻から増加し始める(図7)。これは風速の計測位置である風洞出口から風車の回転軸までの距離が1.5mあるため、風速10m/sでは0.15sかかるためである。

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静的トルク特性曲線の上を示すと図8の矢印のようになり、その変化時間は極めて短い。

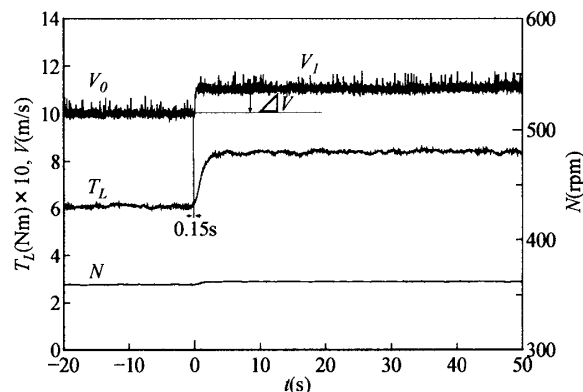


Fig.7 Response of load torque (T_L) to the step wind in the constant revolution condition

Table 1 Time constants of torques (τ_T , τ_Q) and the change widths of torque (ΔQ)

ΔV (m/s)	0.5	1.0	1.5	2.0
τ_T (s)	1.98	2.07	1.87	1.81
τ_Q (s)	0.152	0.131	0.131	0.133
ΔQ (Nm)	0.14	0.27	0.34	0.45

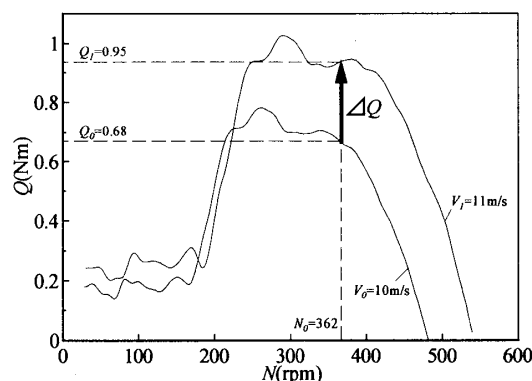


Fig.8 Change of effective torque Q in the constant revolution condition

5・2 一定負荷トルク条件 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図9に示す。この例では風速は約10m/sから11m/sまでステップ状に増加させたが、負荷トルク T_L はパウダブレーキにより約0.68Nmの値に一定に保った。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、一次遅れの応答を示している。ここで、回転数の変化時間の目安として、回転数の変化幅 ΔN の63.2%に至るまでの時間を時定数 $\tau_{N63.2}$ 、回転数が立ち上がる始点での勾配から求めた時定数を τ_{N0} として二つの時定数を定義して、結果を表2に比較する。 τ_{N0} と $\tau_{N63.2}$ は一致していない。このことは、ステップ入力

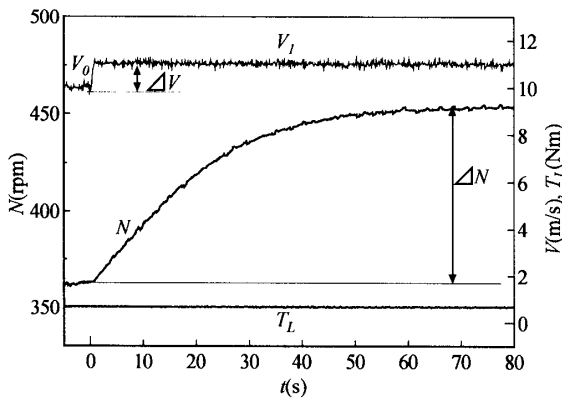


Fig.9 Response of rotational speed to the step wind in the constant load torque condition

Table2 Time constants of rotational speed (τ_N) and the change widths (ΔN), $T_L=0.68\text{Nm}$

V_i (m/s)	10.5	11.0	11.6	11.9
τ_{N0} (s)	25.4	25.3	24.6	24.2
$\tau_{N63.2}$ (s)	20.2	20	16.7	17.3
ΔN (rpm)	49	85	117	153

に対する応答が単純な一次遅れではなく、何らかの原因で崩れた遅れであることを意味している。

なお、ステップの刻み ΔV は0.5, 1.0, 1.5, 2.0 m/sになるように計画したが、風洞による風速変化はそれ程厳密には操作できず、結果として $V_0=10.0$ m/sを基点として、 $V_i=10.5, 11.0, 11.6, 11.9$ m/sとなった。

このステップ風が吹く瞬間に生じている実効トルク Q の値は、式(1)の慣性力 $I(d\omega/dt)$ の項に、図9の回転数 N の時間変化の勾配から読み取った値を代入して求めることができる。すなわち、

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

得られた実効トルク Q の時間変化のグラフを、プロットの時間間隔を2.5sにして、図10に示す。風速のステップ上昇に即応して、 $t=0$ に於いて実効トルク Q は瞬間的に増加し、その増加幅は風速変化幅に比例して大きい。このことは、風車ローターを取り巻く流れの状態が、低速流から素早く高速流による流れ状態へ移行することを意味している。一旦瞬間的に増加した実効トルク Q は経過時間に従ってなだらかに減少して、最終的な実効トルク $Q=0.68$ へ漸近的に収束する。一方、負荷トルク T_L を最高効率点の80%出力になる点の負荷トルク、すなわち $V_0=10.0$ m/s基点の負荷トルク

ク T_L をパウダーブレーキにより約0.50Nmの一定に保った場合、実効トルク Q の時間変化のグラフは図11に示すように、 $t=0$ において勢いよく立ち上がり、かなり早く実効トルク $Q=0.50$ へ漸近的に収束している。風車を回転させようとする実効トルク Q の時間経過に代えて、横軸を時々刻々変化する回転数に置き換え

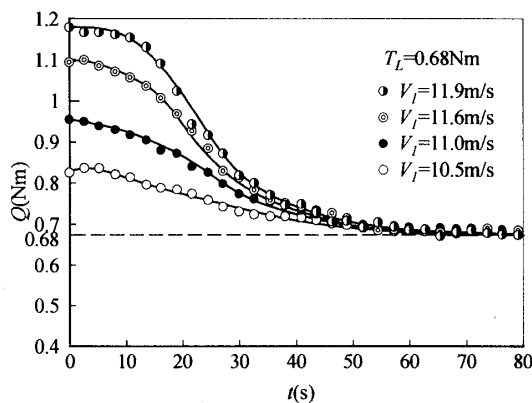


Fig.10 Change of effective torque Q in the constant load torque condition ($T_L=0.68\text{Nm}$)

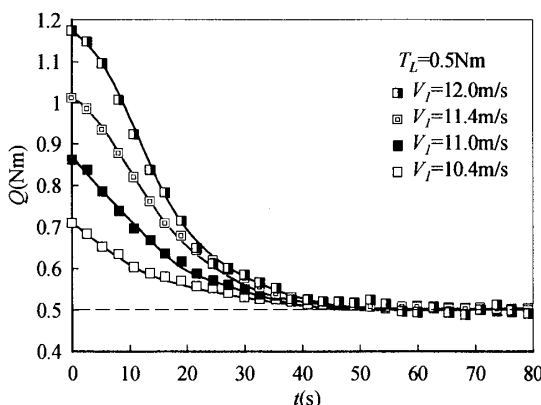


Fig.11 Change of effective torque Q in the constant load torque condition ($T_L=0.5\text{Nm}$)

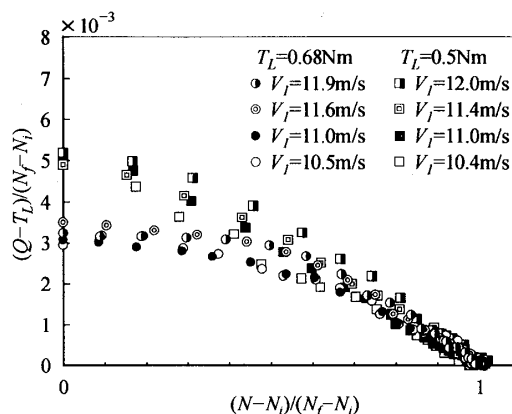


Fig.12 Change of effective torque Q vs the rotational speed of the wind turbine

た関係を図12に示す。ただし、横軸は回転数の初期値 N_i と最終値 N_f との差 ($N_f - N_i$) で無次元化し、縦軸は実効トルク Q と負荷トルク T_L の差を ($N_f - N_i$) で除した値である。理論解析によれば、縦軸はさらに、風車の慣性モーメントと時定数の比 I/τ で除すことによって無次元量となることが分かっているが、慣性モーメント I の違いによる影響を明らかにする実験によって詳細を示すので、ここでは回転数変化による直接的な結果 ($N_f - N_i$) のみによって除した値を用いて比較した。図中のプロット点の間隔は全て2.5sであるけれども、回転数で表した図12ではプロットの間隔は回転数の増加とともに徐々に狭まっている。これは初め急上昇したトルクは、実効トルクを下げながら回転数を

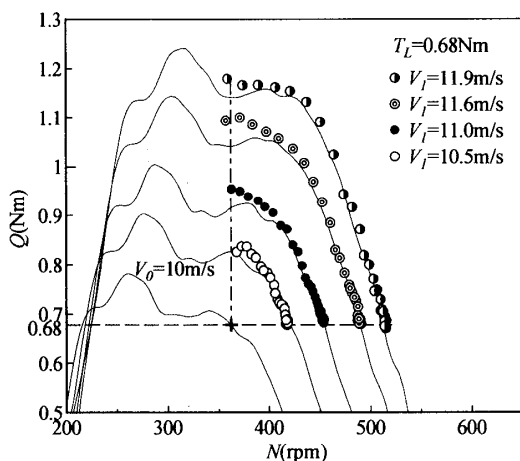


Fig.13 Change of effective torque Q on the Q - N diagram ($T_L=0.68\text{Nm}$)

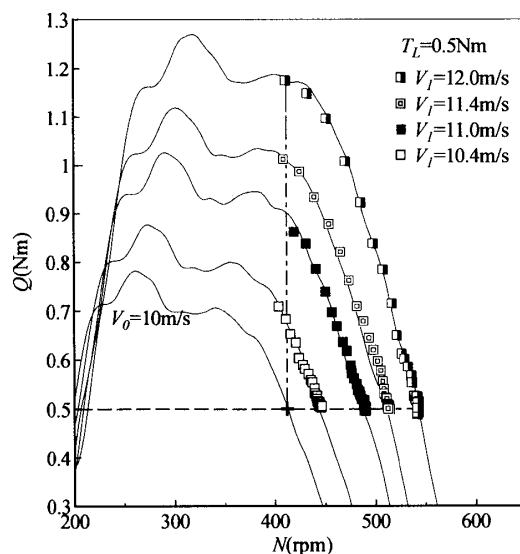


Fig.14 Change of effective torque Q on the Q - N diagram ($T_L=0.5\text{Nm}$)

急速に増加させるが、さらに回転数が増加するに従ってゆっくり最終回転数に近づく状態を示している。

実際の直線翼鉛直軸風車で起こっている状況を解り易く説明するために、図13および図14に、風車のトルク特性曲線上に実効トルクの変化過程を重ねてプロットして示した。両図において初期風速 $V_0=10\text{m/s}$ から 12m/s までのほぼ 0.5m/s おきの過渡特性を、風車トルク特性曲線に重ねてプロットしてある。図13は $V_0=10\text{m/s}$ の最高出力点 ($P_{\max}=26\text{W}$, $N=360\text{rpm}$, $Q=0.68\text{Nm}$) を基点として、図14は最高出力点の80%出力点 ($P=20.8\text{W}$, $N=410\text{rpm}$, $Q=0.5\text{Nm}$) を基点としてステップ風に晒した時の過渡応答推移を示す。

実効トルク Q の変化は、初期風速状態 (10m/s) の回転数状態をほぼ一定に保ったまま極めて短時間に上昇して風速変化後の静的なトルク曲線の近傍に一気に増加し、その後、回転数を増しながらゆっくりと、あたかも静的トルク特性曲線をたどるかのように移行しながら最終状態に落ち着いている。これらの経過はステップ状に風速を変化させた場合の結果であるけれども、自然風中では、段階的に風速が上昇するのでなく連続的に風速が変化するであろうから、準静的平衡状態を保ちながら推移するものと予想される。

6. 結 語

本研究では、発電用風車の制御を念頭において、ステップ状の風速増加に対する直線翼鉛直軸風車のトルクおよび出力の過渡応答特性について、回転数一定および負荷トルク一定の二つの条件に分けて解析を行った結果、次の結論を導くことができた。

- (1) 一定回転数の条件において、ステップ状の突風が吹き込んだ時、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なく、より強いトルクを発生する流れ場になる。
- (2) 一定負荷トルクの条件では、ステップ状の突風に対して風車の実効トルクは、初期風速のトルク状態からほぼ一定回転数を保ったまま高風速のトルク特性曲線の近傍に一気に増加し、その後、回転数を徐々に増加しながら、静的トルク特性曲線をたどるかのよう移行しながら最終状態に落ち着く経過をたどる。

謝 辞

本研究は、文部科学省科学研究費補助金(地域連携推進研究費)、21世紀COEプログラム“乾燥地科学プログラム”, 昭和電機株式会社の支援のもとに行われました。ここに記して深く感謝いたします。

文 献

- (1) Paraschivoiu, I., *Wind Turbine Design with Emphasis on Darrieus Concept*, Polytechnic International Press, (2002), pp.37-41, pp.377-381, pp.101-146.
- (2) South, P. and Rangi, R., NRC's Vertical Wind Turbine, *Agricultural Engineering*, Vol.55, No.2 (1974), pp.14-16.
- (3) Musgrove, P. J., The Variable Geometry Vertical Axis Windmill, *Proceedings of Cambridge Wind Energy Systems Symposium*, Organised by Brit. Hydromech. Res. Assoc., Cranfield (1976), Paper C7
- (4) Seki, K., Research and Development of High-Performance Airfoil Sections for Vertical Axis Wind Turbine at Low-Reynolds Number, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol.57, No.536(1991), pp.1297-1304.
- (5) Bussel, G.J.W. and Mertens, S.M., Small Wind Turbines for the Built Environment, *The Fourth European & African Conference on Wind Engineering*, (2005), Paper #210.
- (6) Mertens, S., Kuik, G. and Bussel, G., Performance of an H-Darrieus in the Skewed Flow on a Roof, *Transactions of the ASME, Journal of Solar Energy Engineering*, Vol.125 (2003), pp.433-440.
- (7) Karasudani, T., Watanabe, K. and Ohya, Y., On the Response of a Micro Wind Turbine to Wind-Speed Change, *Reports of Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University*, Vol.127 (2004), pp.69-73.
- (8) Hayashi, T., Hara, Y., Kang, I., Kato, M., Fujimoto, Y., Waka, R., Tagawa, K. and Kamichika, M., Measurements of the Wind generated by Desert Environment Wind Tunnel (Constant Speed Wind and Periodically Varying Wind), *Reports of the Faculty of Engineering Tottori University*, Vol.37 (2007), pp.89-106.
(http://akebia.jim.tottori-u.ac.jp/reports/repot_J.html)
- (9) Strickland, J. H., A Review of Aerodynamic Analysis Methods for Vertical-Axis Wind Turbine, *Proceedings of the 5th ASME Wind Energy Symposium*, (1986), pp.7-17.