九州大学学術情報リポジトリ
Kyushu University Institutional Repository

風速あるいは負荷の変動に対する風車の応答

烏谷，隆
九州大学応用力学研究所

大屋，裕二
九州大学応用力学研究所

渡辺，公彦
九州大学応用力学研究所

https://doi.org/10.15017/26839

出版情報：九州大学応用力学研究所所報. 133, pp.121-124, 2007-09. Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University
バージョン：
権利関係：

風速あるいは負荷の変動に対する風車の応答

烏谷 隆*, 大屋 裕二*, 渡辺 公彦*

(2007年7月26日受理)

On the Response of a Wind Turbine to Change of Wind Speed and Load

Takashi KARASUDANI, Yuji OHYA and Kimihiko WATANABE
E-mail of corresponding author: *karasu@ riam.kyushu-u.ac.jp*

Abstract

We studied on the response of small wind turbines to changes of wind speed and load. We assumed that the aerodynamic properties of a blade were described by a torque coefficient, which was measured in constant wind speed. The coefficient is a function of a tip speed ratio only. On some assumptions for the torque coefficient, we show that the value of tip speed ratio, which has the maximum torque, is smaller than the value of the tip speed ratio, which has the maximum output power. Response times for change of wind speed and load were given as a function of the torque coefficient and the moment of inertia of the blade and generator system. It is found that they are proportional to the moment of inertia and are reversely proportional to wind speed.

Key words: *wind turbine, torque coefficient, power coefficient, response time*

1. はじめに

化石燃料の消費を抑制するための一つの手段として，風力，太陽光，バイオマスなどの再生可能エネルギーを利用することが求められている．近年，風力は風車による風力発電として世界中で広く利用されており，多数の大型風車を備えたウインドファームが各地に設置され，風力エネルギーの利用拡大が進んできた．この結果，大型風車の設定に適した風環境の場所は少なくなってきて，浮体上に風車を設置する洋上風力発電などが計画されている．このようにパワープラントとして利用する一方で，身近にあるエネルギー源として利用することが図られている．市街地や住宅地の街灯や非常灯などの局所電源とすることが考えられている．この目的を達成するために安全で効率が良く低騒音の小型風車の開発が盛んに行われている．

このような用途を想定したとき，小型風車は風速の変動の激しい地域で使われることが多いと思われる．高い効率を発揮するように風車を制御するためには，風車が風速の変動に対してどのように応答するのかを知ることは大切である．また，負荷の変動が風車に及ぼす効果も知る必要がある．さらに，変動する風が出力に及ぼす影響を評価するためにも[1]，変動に対する応答を知ることは必要である．

第2章では議論の基礎となるトルク係数と出力係数についてその一般的性質について検討する．風速および負荷が変化したときの風車の振る舞いをそれぞれ第3，4章で検討する．第5章はまとめを記す．

2. トルク係数と出力係数の振る舞い

翼の運動を支配しているのは風による回転を促すトルクである．翼が発生するトルクは翼の周りの流れにより規定されるため，風速や回転数が変化するとそれに伴って変化する量である．以下では，風速を一定に保ち測定された翼の空力特性を基に議論する．この近似が成立すると期待されるのは，風速や風車の

*九州大学応用力学研究所

回転速度が変化したときに，翼まわりの風の流れは翼の回転速度に比較して速やかに定常状態の風の流れになると思われることによる．

翼まわりの流れが定常状態になるためにかかる時間は翼を風が通過する時間のオーダーと見なせる．この時間が，翼が1回転するために要する時間と比べて小さいならば，翼は常にほぼ定常風時の空力特性を示すものと期待できる．小型風車の翼の回転数は大きくみて1,000rpm程度であるため，1回転に要する時間は0.05sec程度より長い．翼は回転しているため，翼と風との相対速度には翼の回転速度が加わることになる．風車の出力は翼が掃引する面積に比例するため，面積の大きな割合を占める翼端領域が翼の空力特性を支配している．翼端領域は近寄り風速の数倍の回転速度を持っているため，この領域での相対速度は近寄り風速の数倍になる．近寄り風速が数m/sあれば，翼が一回転する間に風は数十cmほど通過することになる．この値は小型風車の翼幅より充分大きく，翼が1回転する間に翼周りの流れは定常状態の流れになると予想される．

定常近似が成り立つならば，よく知られているように，空力特性は周速比λ（$\equiv r\omega/U$：rは翼の半径，ωは翼の回転角速度，Uは風速）のみに依存する．翼が発生するトルクT_wと出力P_wは周速比の関数であるトルク係数$C_T(\lambda)$と出力係数$C_W(\lambda)$を使って，次のように書ける．

$$T_w = C_T(\lambda)(1/2)\rho\pi r^3 U^2 \qquad (1)$$

$$P_w = C_w(\lambda)(1/2)\rho\pi r^2 U^3 \qquad (2)$$

式（1,2）のρは空気密度である．

出力はトルクと角速度の積であるので，

$$P_w = T_w\omega \qquad (3)$$

式(1, 2, 3)より出力係数とトルク係数の間には次の関係式が成り立つ．

$$C_w(\lambda) = C_T(\lambda)\lambda \qquad (4)$$

翼が発生するトルクと翼の回転数の関係から，トルク係数の振る舞いに関して，一般に次のようなことが言える．周速比がゼロの時（静止している時）に小さな正値を持ち，λが大きくなる（回転数が大きくなる）につれて大きくなり最大値をとる（そのときの周速比をλ_Tとする）．その後減少し，回転が非常に速いときにはプロペラとして働くことになるので負の値に転じる．まとめると，$C_T(\lambda)$は次のような性質の関数であると期待できる．

1. $C_T(0)>0$
2. ある$\lambda_T>0$で$C_T(\lambda_T)$は最大値（極大）をとる
3. ある$\lambda_0>\lambda_T$で$C_T(\lambda_0)=0$
4. $0<\lambda<\lambda_T$：単調増加，$\lambda_T<\lambda<\lambda_0$：単調減少

トルク係数が上記のように振る舞う関数であるならば，出力係数との間に成り立つ関係式（4）より$C_W(\lambda)$について，次のことが言える

1. $C_W(0)=0$
2. $C_W(\lambda_0)=0$
3. あるλ_w（$0<\lambda_w<\lambda_0$）で最大値（極大）をとる．

また，式（4）よりλ_Tとλ_wの間に大小関係を導くことができる．式の両辺をλで微分して，$\lambda=\lambda_w$とおくと，

$$(\dot{f} \equiv df/d\lambda)$$

$$\dot{C}_T(\lambda_w) = -C_T(\lambda_w)/\lambda_w \qquad (5)$$

となる．

$\lambda_w>0, C_T(\lambda_w)>0$であるので，

$$\dot{C}_T(\lambda_w) < 0 \qquad (6)$$

一方，λ_Tで$C_T(\lambda_T)=0$, $0<\lambda<\lambda_T$間で単調増加であるので，この間で$\dot{C}_T(\lambda)>0$である．$\dot{C}_T(\lambda_w)$は負であるから

$$\lambda_T < \lambda_w \qquad (7)$$

の関係が要請される．

これらをまとめるとトルク係数と出力係数は Fig.1 の模式図で表すことができる．

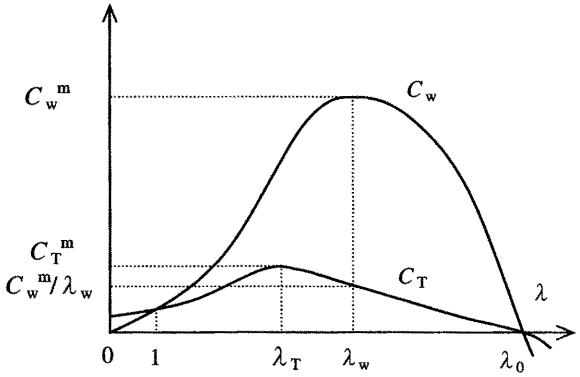

Fig.1. Schimatic diagram of torque and power coefficients C_T and C_w vs tip speed ratio λ.

T_wを用いると風車の運動方程式は次式のように書ける．

$$I\frac{d\omega}{dt} = T_w - T_L \qquad (8)$$

上式において，Iは慣性モーメント，T_Lは負荷による回転を抑制するトルクである．

この運動方程式と，上述した特徴を持つC_T，C_Wに基づいて風速あるいは負荷が変動した時に風車がどのように振る舞うのかを考察する．すなわち，ある動作点λ_pで運転している時

①風速の変化：$U \rightarrow U+\Delta U$

②負荷の変化：$T_L \rightarrow T_L+\Delta T_L$

に対して，風車がどのように応答するのかを調べる．

3．風速の変化に対する応答

風速がUから$U+\Delta U$に変化したときの風車の振る舞いを検討する．風速の増加ΔUにより，動作点（周速比）は

$$\Delta\lambda^U = \frac{r\omega}{U+\Delta U} - \lambda_p$$

$$\cong -\frac{\lambda_p}{U}\Delta U \qquad (9)$$

だけ移動する（小さくなる）．

一方，風速の増加によりトルクの変化ΔTは

$$\Delta T = \Delta T_w \cong \left.\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}U}T_w\right|_{\lambda_p} \Delta U$$

$$= \left\{\dot{C}_T(\lambda_p)(-\frac{r\omega}{U^2})U^2\xi + 2C_T(\lambda_p)U\xi\right\}\Delta U$$

$$= \xi U(2C_T(\lambda_p) - \lambda\dot{C}_T(\lambda_p))\Delta U \qquad (10)$$

$$\xi \equiv (1/2)\,\rho\pi r^3 \qquad (11)$$

となる．トルクの変化が正の時には，風速の増加に応じて角速度が増加することになる．このトルクの増加による時間Δt間の角速度の増加は，運動方程式より，

$$\Delta\omega \cong \frac{\Delta T}{I}\Delta t \qquad (12)$$

この角速度の増加により周速比は

$$\Delta\lambda^{\omega} \cong \frac{r\Delta\omega}{U} = \frac{r}{U}\frac{\Delta T}{I}\Delta t \qquad (13)$$

増加する．Uの増加によるλの減少，トルクの増大によるωの増加，ωの増加によるλの増加という，一連の動作で周速比が元の値に戻るとすると，戻るまでに要する時間Δt_Uは，λの変化が打ち消される時間として，

$$\Delta\lambda^U + \Delta\lambda^{\omega} = 0$$

$$-\frac{\lambda_p}{U}\Delta U + \frac{r}{U}\frac{1}{I}U\xi(2C_T(\lambda_p) - \lambda_p\dot{C}_T(\lambda_p))\Delta U\Delta t_U = 0$$

$$\Delta t_U = \frac{I\lambda_p}{\xi r(2C_T(\lambda_p) - \lambda_p\dot{C}_T(\lambda_p))U} \qquad (14)$$

元の動作点に回帰するまでに要する時間に対するこの表式は，以前導いた応答時間に一致しており[2]，風車の空力応答を特徴づける時間であることがわかる．

出力係数が最大値を示すλ_wを動作点とすると，式(5,11)より，応答時間は

$$\Delta t_U = \frac{I\lambda_w^2}{(3/2)\rho\pi r^4 C_w(\lambda_w)U} \qquad (15)$$

と簡潔に表すことができる．上でみてきたように，風速の増加に対してトルクの変化ΔTが正の時，動作点に戻るように作用するため，この動作点は安定である．

トルクの変化の正負は

$$D \equiv 2C_T(\lambda) - \lambda\dot{C}_T(\lambda) \qquad (16)$$

の正負による．

A) $\lambda >= \lambda_T$では$\dot{C}_T(\lambda) <= 0$であるので$D>0$となり，安定である．

B) $0 < \lambda < \lambda_T$におけるDの正負の判定は次のようにしてできる．

$$2C_T(\lambda_p) - \lambda_p\dot{C}(\lambda_p) = 0 \qquad (17)$$

正負を判定する動作点（λ_p, $C_T(\lambda_p)$）を通る2次曲線$C(\lambda)$を引く．Fig.2の実線がこれにあたる．この曲線は点λ_pで

となる．それゆえ，点λ_pにおける傾きが$C(\lambda)$より小さい点線の$C_T(\lambda)$は$D>0$となり，傾きが$C(\lambda)$より急な一点鎖線の$C_T(\lambda)$では$D<0$となる．

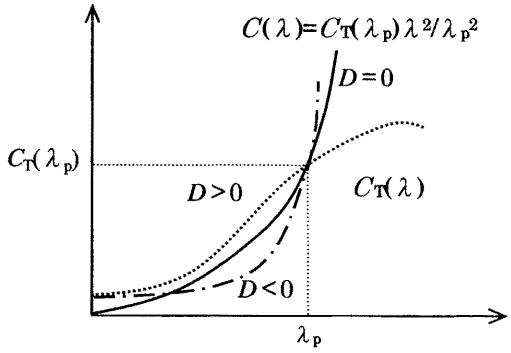

Fig.2. Judging the sign of D from the slope of a $C_T(\lambda)$ curve at working point λ_p.

トルク係数$C_T(\lambda)$は最大点λ_T近傍では上に凸で丸まっており，この領域では$C(\lambda)$より急な傾きを持つことはないので，$D>0$となり安定な動作点である．この近傍から離れたところでも$C_T(\lambda)$に急激な減少が無ければ$D>0$のままである．Dが負になるということは，風速が増加するとトルクが減少するということであるので非常に考えにくい状況である．そのため，通常Dはλの全領域で正になると思われる．

4．負荷の変化に対する応答

負荷が変化したときの風車の振る舞いを検討する．負荷がΔT_L増加したとき，回転させる正味のトルクが減少するため角速度が$\Delta\omega^R$変化（減少）したと仮定する．運動方程式より

$$\Delta\omega^R \cong -\frac{\Delta T_L}{I}\Delta t \qquad (18)$$

この変化による周速比の変化は

$$\Delta\lambda^R = \frac{r}{U}\Delta\omega^R \qquad (19)$$

この周速比の変化による翼が発生するトルクの変化は

$$\Delta T_w \cong \left.\frac{\mathrm{d}T_w}{\mathrm{d}\lambda}\right|_{\lambda_p} \Delta\lambda^R$$

$$= -\xi U^2\dot{C}_T(\lambda_p)\frac{r}{U}\Delta\omega^R \qquad (20)$$

となる．$\dot{C}_T<0$ならば翼の発生するトルクが増加して，負荷トルクの増加分とつり合うようになれば風車は定常に回転するようになる．つりあうまでに要する時間Δt_Rは，式(20)をΔT_Lに等しいとして，

$$\Delta t_R = \frac{-I}{\xi r\dot{C}_T(\lambda_p)U} \qquad (21)$$

となる．

式(20)より，$\dot{C}_T<0$ならば負荷トルクが増加したときに翼の発生するトルクも増加するため，周速比が$\Delta\lambda^R$減少した点が新たな動作点となる．$\dot{C}_T>0$ならば負荷トルクが増加したときは静止するまで翼の回転数は減少する．逆に負荷トルクが減少したときは，翼トルクが負荷

トルクにつりあう周速比になるまで回転数は増大する．このときの周速比はλ_Tよりも大きな値になる．負荷により動作点を定めることができるという意味で，$\dot{C}_T < 0$の領域は安定であり，$\dot{C}_T > 0$の領域は不安定である．

動作点λ_wは$\dot{C}_T(\lambda_w) < 0$であるので安定であり，応答時間は式(4),(5)より

$$\Delta t_R = \frac{I\lambda_w^2}{(1/2)\,\rho\pi r^4 C_w(\lambda_w)U} \tag{22}$$

となる．

実際の運転時には風速と負荷の両方の変動が有る．両者の変化に対して安定な$\dot{C}_T(\lambda_p) < 0$の領域で，負荷により定まる動作点に戻るように振る舞うので，安定に運転できる．第２章の式（7）で示したように，最高の効率を示す周速比λ_wは安定な領域内にある．これまでの結果より，風速変動と負荷変動に対する安定性に関する領域図をFig.3に示す．

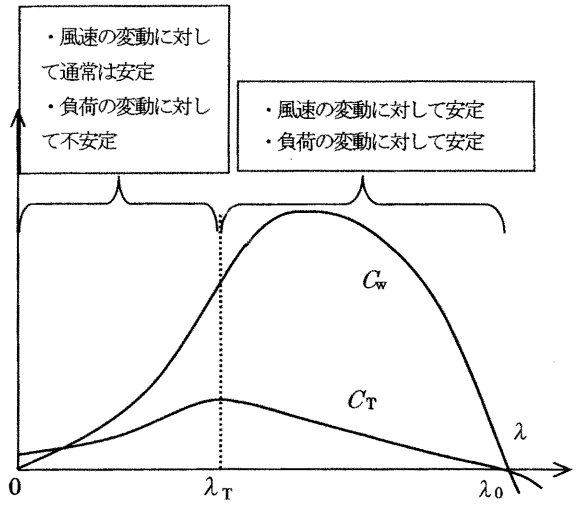

Fig.3. A drawing showing the relationship between stability and tip speed ratio.

5. まとめ

風車の空力特性を規定するトルク係数と出力係数について周速比によりどのように振る舞うのかを調べた．トルク係数が一山曲線で表すことができるならば，トルク係数が最大値を取る周速比は出力係数が最大値を取る周速比よりも常に小さいことが分かった．

トルク係数を基に風速および負荷が変動したときの風車の応答について考察した．風速の変動により動作点が変化したとき，元の動作点に回帰するまでの時間として風車の動特性を特徴づけた．また，負荷の変動に対しては，負荷により定まる動作点に移行するまでの時間により動特性を特徴づけた．これらの動特性を定める時間は風車の慣性モーメントに比例し，風速に反比例することが分かった．

謝　辞

一連の研究は，経済産業省大学発事業創出実用化研究開発事業，日本学術振興会科学研究費，吉田学術教育振興会，住友財団環境助成研究，原田記念財団流体機械自然科学研究，（株）九州電力，九州大学P&P研究プロジェクトの支援のもとに行われて来ました．ここに記して深く感謝いたします．

参考文献

(1)小型風車の変動風に対する特性ー野外試験結果ー：烏谷隆，大屋裕二，渡辺公彦，第28回風力エネルギー利用シンポジウム講演集，pp381-384, (2006).

(2)マイクロ風車の応答に関する小考：烏谷隆，大屋裕二，渡辺公彦，日本風力エネルギー協会誌, **30**, No. 2, pp113-116, (2006).