

風車の制御器に関する基礎的事項について

烏谷, 隆
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

大屋, 裕二
九州大学応用力学研究所

<https://doi.org/10.15017/27076>

出版情報：九州大学応用力学研究所所報. 138, pp.23-32, 2010-03. Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University

バージョン：

権利関係：



風車の制御器に関する基礎的事項について

烏谷 隆*, 渡辺 公彦*, 大屋 裕二*

(2010年1月29日受理)

Basic Theory for the Controller of a Wind Turbine

Takashi KARASUDANI, Kimihiko WATANABE and Yuji OHYA

E-mail of corresponding author: karasu@riam.kyushu-u.ac.jp

Abstract

We theoretically and experimentally study on basic ideas to control a wind turbine by power electronic devices. We assume that the aerodynamic properties of a blade are given by a torque coefficient, which is a function of a tip speed ratio only. We assume that a multi-pole synchronous generator can be expressed by an interior resistance, an inductance, the rate of induced voltage and the number of waves per unit rotation, and a controller consists of a rectifier and a variable resistance. Experimental results show that the behavior of a generator can be described well by the four electrical constants. To control the rotational speed of a turbine, the value of the resistance must be adjusted properly. We derive formulas for the value of the resistance for optimum control as a function of the four electrical constants and the output power of the turbine.

Key words: wind turbine, torque coefficient, controller by power devices, optimum control, synchronous generator

1. はじめに

化石燃料の大量消費に伴う大気汚染や地球温暖化などの環境問題に対処するため、化石燃料の消費を抑制することが求められている。このため代替エネルギーとして、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図られている。風力エネルギーは風車による風力発電として世界中で広く利用されるようになってきた。最近では、身近にあるエネルギー源として、市街地や住宅地の街灯や非常灯などの局所電源として利用されるようになって来ている。

風力発電として風車から電力を取り出すとき、取り出せる電力は、風速に依存するのは当然であるが、翼の回転数によっても異なる。風速が一定の条件で考えると、風車から取り出せる電力は回転数が零のとき零になり、負荷を掛けることなく自由に回転させた時も零になる。通常、回転数による風車出力の変化は、回転数が零と自由回転数のあいだで最大値を持つ一山関数になる。最大値となる回転数は風速により異なり、風速が大きくなると回転数も大きくなる。

このような出力特性を持つ風車を、変動する風のもとで運転するとき、風車からなるべく多くの電力を取り出すには風速に合わせて回転数を適切に調整しなければならない。この調整を行うのが制御器である。制御器は風速の変化に応じて翼に掛ける負荷を変化させ、出力が最大となる回転数になるように作動している。

近年、パワーエレクトロニクスの発展には著しいものがあり、風車の制御においても FET や IGBT などの電力制御素子が利用されるようになって来た¹⁾。このような半導体素子を用いた制御にはいくつかの手法がある。

小型の風力発電機でよく用いられているのは、発電機からの3相交流出力を整流器により直流に変換した後負荷を接続する方法である²⁾。負荷としては、ヒータ、充電機、電気機器などがある。ヒータあるいは充電機の場合は消費電力の調整あるいは充電制御のために、DC/DC 変換器を負荷の前に挿入する必要がある。電気機器の場合は DC/AC 変換器 (インバータ) を機器の前に挿入して AC100V (あるいは 200V) に変換することがほとんどである。この場合、負荷として系統に接続することも可能である。

別の方法としては、インバータを用いる方法がある³⁾。最近、モータを効率よく運用するために多くのインバータが用いられている。効率がよい理由の一つは、駆動物体の制動時にモータを発電機として利用することにある。制動時に発電した電気を電源に戻す (回生動作) ことで消費電力を抑制している。この回生動作を利用して風車の制御を行っている。この方式の進化形として、直流に変換しない AC/AC 変換器 (マトリックスコンバータ) を用いて系統連携を行うことも試行されている。

電力制御素子を利用した制御器を用いない方法も試みられている。この方法では、発電機の特性を回転数

* 九州大学応用力学研究所

に応じて変更することで, 風速に応じて翼に掛かる負荷を調整できるようにしている⁴⁾.

いずれの方式においても, 翼に掛かる負荷トルクは発電機が発生する電圧と発電機を流れる電流により規定される. 発電機が発生する電圧は翼の回転数により定まるため, 最大出力を得るように, 制御器は電圧に応じて電流値を調整することになる. 制御では, 風車の空力特性と発電機の特性にもとづいて, どのように調整すればよいかの問題となる. 本論文では, 空力特性と発電機の特性の関係, 制御器が要求される動作を実行するために必要な電圧と電流の関係を求める.

第2章では風車の空力特性について制御に必要な要点を述べる. 第3章では制御器の動作の解析に必要な発電機の特性と制御回路の電気回路について検討する. 制御の方式にかかわらず, 制御にとって必要なことは電圧と電流の関係であるので, 制御回路としては整流器と負荷抵抗より成るとしている. 第4章では, 第3章の制御回路の下で, 風車より取り出しうる最大電力について検討する. 第5章では風車から最大出力を引き出すために必要な負荷のかけ方について検討する. 第6章では風速に応じてどのように制御するのかを検討する. 高風速において出力を抑制するストール制御についても検討する. 風車を安全に運転するためには風速の急な増速に対処しなければならない. 第7章では風速の急な増加による翼トルクの増加について検討する. 第8章は第4,5章で導出した式を検証するため実験と市販の回路シミュレーションソフトによる結果と比較する. 第9章にまとめを記す. 風車の空力特性, 発電機の特性を仮定して制御器を具体的に設計する手順について Appendix で例示する.

2. 風車翼の空力特性

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. 風速が変化したとき翼の周りの流れは, 過渡的状态を経て風速に応じた流れになる. しかしながら, 風車の運動を解析するとき, この過渡的状态を無視して静的な空力係数を用いて議論することができる. この準静的近似が成立すると期待されるのは, 風速が変化したときに翼まわりの風の流れは, 翼の回転速度と比較して, 速やかに過渡的状态から風速に応じた状態の流れになると予想されることによる.

過渡的状态が無視できるためには, 風速の変動に対しても条件が課される. 風速の変動周期は過渡的状态の時間より長くなければならない. すなわち, 風が翼を通過する時間より長いことが要請される. このことより, 小型風車においては, 準静的近似は風速の変動が数十Hz程度より緩やかである時に成立する.

準静的近似が成立するときは, よく知られているように, 空力特性は主として周速比 λ ($\equiv R_w \omega / U$: R_w は翼の半径, ω は翼の回転角速度, U は近寄り風速)に依存する.

風速が U の時, 翼が発生するトルク T_w と出力 P_w は λ の関数であるトルク係数 $C_q(\lambda)$ と出力係数 $C_p(\lambda)$ を使って, 次のように書ける.

$$T_w = C_q(\lambda)(1/2)\rho\pi R_w^3 U^2 \quad (1)$$

$$P_w = C_p(\lambda)(1/2)\rho\pi R_w^3 U^3 \quad (2)$$

式(1),(2)の R_w は翼の半径, 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,

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

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.

$$C_p(\lambda) = C_q(\lambda)\lambda \quad (4)$$

翼が発生するトルクと翼の回転数の関係から, 周速比の変化に対する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(翼が静止している時)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_q 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. Fig.1の C_q で与えられるような一山形状をしてい期待される.

式(4)より出力係数はトルク係数と周速比の積であるので, トルク係数が一山関数であるときは, λ_q より大きな周速比 λ_p で最大値を取る一山関数になる. まとめると, トルク係数と出力係数の形状は Fig.1の模式図で表すことができる.

以降の章では上述のような空力係数で規定されている風車について, 翼の能力を最大限引き出すために必要な発電機の特性とその制御の方法について検討する. 空力係数が与えられたときに, どのようなことに注意して発電機を選定すればよいか, 制御器の設計を行うと良いかを検討する.

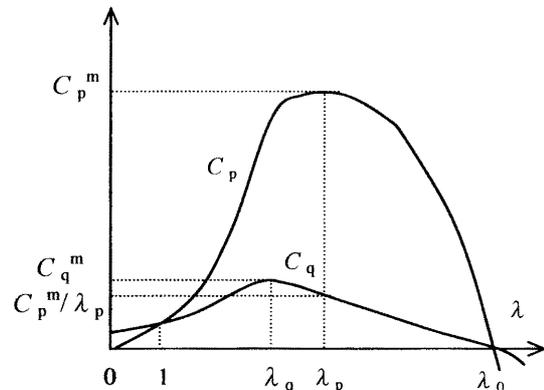


Fig.1. Schematic diagram of torque and power coefficients C_q and C_p vs. tip speed ratio λ .

3. 発電機の特性と制御回路のモデル化

発電機には永久磁石を用いた3相同期発電機を使用する. また, 制御器には整流器と可変抵抗器を用いる. 同期発電機の電気特性を表す定数には, 軸の1回転当たりの出力相電圧 κ_ω , 相内部抵抗 r , 相内部インダクタンス L と軸が1回転したとき電気振動として振動する回数 n がある. インダクタンスは軸の位置により異なるが, 直流に変換するため軸の位置は重要ではないので L には平均値を用いる. インバータによる制御を検討するときは, 軸の位置による違いを考慮に入れる必要がある³⁾. 電気振動の回数は発電機に用いられている磁石の磁極数の半分になる. これら4つ定数により同期発電機の電気的特性は表すことができる.

風力発電機はFig.2のようにモデル化できる。翼は回転角速度 ω で発電機の軸を回す。軸には永久磁石が取り付けられている。また、磁石の周りにはコイルが配置されている。回転する磁石による電磁誘導によりコイルには電圧が発生する。コイルには電気抵抗とインダクタンスがあるので、発電機は回転に比例した電圧を発生する電圧源、抵抗、インダクタンスでモデル化できる。

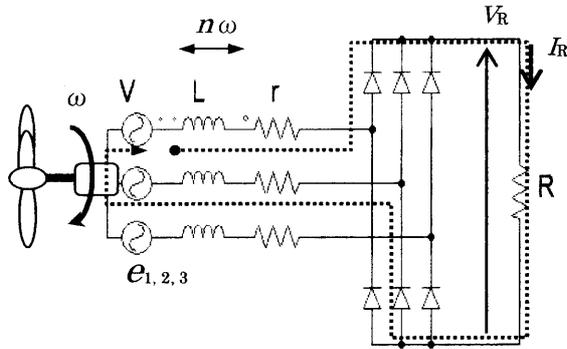


Fig.2 An electric circuit model of a wind turbine. The generator is modeled by voltage sources, interior resistances and inductances. The load is modeled by a resistance.

発電機で発生する電気は三相交流である。発生した三相交流は全波整流器により直流に変換される。変換された電気は蓄電池に蓄えられたり抵抗などの電気機器で消費されたりする。ここでは負荷抵抗 R で消費されたとした。

三相の電圧波形と整流後の波形を Fig.3 に示す。図の縦軸は電圧を、横軸は時間を表している。各相の波形はゼロを中心とした正弦波であり、整流後の波形は60[V]付近にある脈動波形である。Fig.3 では負荷抵抗が充分大きく内部抵抗とインダクタンスによる電圧降下はない時の様子を示している。

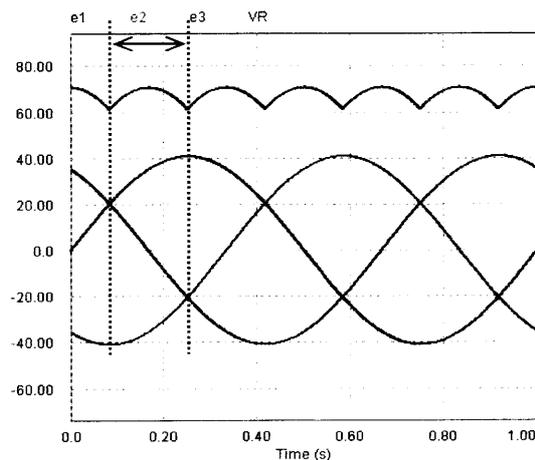


Fig.3 Rectified wave forms simulated by PSIM simulator of Powersim Inc.

Fig.2 において点線で示されている電流が流れている状態は、Fig.3 では両矢印で示している区間に対応している。この状態が周期的に繰り返されるので、この区間について検討する。

相電圧を

$$\begin{cases} e_1 = \sqrt{2}V \sin(n\omega t) \\ e_2 = \sqrt{2}V \sin(n\omega t - 2\pi/3) \\ e_3 = \sqrt{2}V \sin(n\omega t - 4\pi/3) \end{cases} \quad (5)$$

とすると (V は実効値) ,

整流電圧の平均値は

$$\begin{aligned} V_D &= \frac{1}{\pi/3} \int_{\pi/6}^{3\pi/6} (e_1 - e_2) d(n\omega t) \\ &= \frac{1}{\pi/3} \int_{\pi/6}^{2\pi/3} \sqrt{3} \sqrt{2}V \sin(\theta) d\theta \\ &= \frac{3\sqrt{6}}{\pi} V \cong 2.34 V \end{aligned} \quad (6)$$

となる。Fig.3 の例では、ピーク電圧 $\sqrt{2}V$ は40[V]であるので、 V_D は約66[V]になる。

回路のインピーダンスは

$$Z = \sqrt{(2r + R)^2 + (2n\omega L)^2} \quad (7)$$

となるので、

負荷抵抗を流れる平均電流は

$$I_R = V_D / Z \quad (8)$$

内部抵抗と負荷抵抗により消費される電力は

$$\begin{aligned} P &= (2r + R) I_R^2 \\ &= \left(\frac{3\sqrt{6}}{\pi} \right)^2 \frac{(2r + R)}{(2r + R)^2 + (2n\omega L)^2} \end{aligned} \quad (9)$$

と見積もることができる。脈動する電圧・電流による電力を平均電圧・電流の積で見積もっているため、実際の値より小さめになっている。但し、三相交流では全波整流後の電圧の平均値と実効値の差は0.15%以下であるので、その差は小さい。

風車の回転角速度と発電機の相電圧の関係は $V = k_\omega \omega$ となるので、発電機が翼に掛けるトルクは

$$T = \frac{P}{\omega} = \left(\frac{3\sqrt{6}}{\pi} \right)^2 \frac{(2r + R) k_\omega^2 \omega}{(2r + R)^2 + (2n\omega L)^2} \quad (10)$$

となる。制御器の役割は、回転数に応じて負荷抵抗を調整して発電機が翼に掛けるトルクを事前に設定された値にすることである。

4. 発電機より取り出し可能な電力の最大値

発電機の電気特性 k_ω , r , L , n を元に、抵抗を負荷としたときに負荷により取り出し可能な電力の最大値を求める。この値が負荷抵抗を用いた制御器で得ることができる電力の最大値である。

負荷抵抗により消費される電力 P_R は (8) 式より、

$$\begin{aligned} P_R &= R I_R^2 \\ &= \frac{R V_D^2}{(2r + R)^2 + (2n\omega L)^2} \end{aligned} \quad (11)$$

となる。発電機の電気特性を固定したとき、式 (11) が最大となる時の負荷抵抗の値を R_m とすると、

$$R_m = 2\sqrt{r^2 + (n\omega L)^2} \quad (12)$$

となる。この結果は、負荷抵抗による電力消費が最大となるのは、その抵抗値が相当り内部インピーダンスの2倍に等しいときであると言い換えることができる。また、負荷抵抗の調整ではこれ以上の電力を得

ることはできない. この時, 内部抵抗も含めた全消費電力は

$$P_{mr} = \left(\frac{3\sqrt{6}}{\pi}\right)^2 \frac{\kappa_{\omega}^2 \omega^2}{4\sqrt{r^2 + (n\omega L)^2}} \quad (13)$$

となる. また, 全電力に対する負荷抵抗により取り出さる電力の比 ε (効率) は

$$\varepsilon = \frac{R_m}{2r + R_m} \quad (14)$$

となる. 内部抵抗が小さくて負荷抵抗が大きいほど効率は良くなる.

注意すべきことは, 式 (13) は負荷抵抗による消費電力が最大となる時の全消費電力であり, 全消費電力が最大となるときではないことである. 全消費電力が最大となる時の負荷抵抗 R_M に対する条件は次式と

$$2r + R_M = 2n\omega L \quad (15)$$

なる.

また, この時の全消費電力 P_{Mr} は

$$P_{Mr} = \left(\frac{3\sqrt{6}}{\pi}\right)^2 \frac{\kappa_{\omega}^2 \omega^2}{4nL} \quad (16)$$

となる. また, この時のトルク T_M は

$$T_M = \frac{P_{Mr}}{\omega} = \left(\frac{3\sqrt{6}}{\pi}\right)^2 \frac{\kappa_{\omega}^2}{4nL} \quad (17)$$

となる. このトルク値が, 負荷抵抗を用いた制御器による制御において, 発電機が出さる最大のトルクである. 但し, トルクが最大となるのは回転角速度が式

(15) を満たすときであり, 抵抗が増加すると最大となる角速度も増加する. また, 条件式 (15) はトルクの式 (10) において, 分母をなしている抵抗の項とインダクタンスの項が互いに等しい条件になっている.

翼のトルクがこの値を超えるときは, 制御器により翼の回転を制御することはできず(短絡は $R=0$ に対応), 翼のトルクがこの値に減少するまで翼の回転速度は増加していくことになる.

5. 風車の出力に対応した消費電力となる時の負荷抵抗値

翼のピッチ角が固定されている風車では風速に応じて回転速度を調整して出力係数が最大となる周速比を保つような制御を行う(最適制御). この最適制御ではトルクを角速度の二乗に比例するように調整するため, 「オメガ二乗制御」と呼ばれている. 負荷抵抗を用いた制御では負荷の抵抗値を変化させて, 風車の出力と負荷による消費電力が等しくなるようにする.

負荷抵抗の調整には限界があるので, 制御器により制御可能な条件について検討する. 翼の出力を P_w とし式 (9) に代入し, 負荷抵抗 R について解くと R の二次方程式になる. R が虚数でない解を持つ条件(二次方程式の判別式が正)として, P_w が全消費電力の最大値 P_M より小さいという次式が導かれる.

$$P_w < \left(\frac{3\sqrt{6}}{\pi}\right)^2 \frac{\kappa_{\omega}^2 \omega^2}{4nL} \quad (18)$$

この条件は翼のトルクが最大トルク T_M より小さいことと同等である.

風車の出力と発電機の特性が式 (18) を満たすとき, 風車の出力と消費電力が等しくなるために必要な負荷抵抗の値 R_0 は, 二次方程式の正値解として,

$$R_0 = \frac{(V_D^2 - 4rP_w) + \sqrt{V_D^4 - (4P_w n\omega L)^2}}{2P_w} \quad (19)$$

となる.

風車の出力に対する負荷抵抗による消費電力の比を制御器の効率と定義すると, この値は全消費電力に対する負荷抵抗による消費電力であるので, 式 (14) と同じ表式になる.

6. 風速に応じて風車を制御する

通常, ピッチ角が固定された風車は風速に応じて三段階で制御される.

- I $0 \sim U_i$ --- 無負荷
- II $U_i \sim U_f$ --- 最適制御
- III $U_f \sim U_0$ --- ストール制御

ここで, U_i は翼が回り出して出力を得られるようになる風速でカットイン風速である. U_f は定格出力を出すときの風速で定格風速, U_0 は風車を停止させる風速でカットアウト風速である.

段階 I は, 風速が零から翼が回転して出力をとれるようになるまでの風速である. この段階では負荷を掛けることはしない.

II の段階では風車の回転数を, 出力係数が最大となる周速比に維持するように負荷を調整する. Fig.1 より, 周速比を λ_p とすると, 風速 U と周速比より回転角速度 ω_p は, R_w を翼の半径とすると,

$$\omega_p = \frac{\lambda_p U}{R_w} \quad (20)$$

となる. また, この時の翼出力 P_w は, 出力係数の最大値を C_p^m とすると, 式 (2) で与えられる. 式 (20) の ω_p と P_w を式 (19) に代入すると負荷抵抗の値が定まる. 負荷抵抗の値が定まると, 式 (8) より, 負荷抵抗を流れる電流値 I_R を求めることができる. 負荷抵抗を流れる電流値が定まると, 電流値と負荷抵抗値の積より負荷抵抗に掛かる電圧が分かる. このようにして, 最適に制御された時の電圧と電流の関係を導くことができる.

最適制御をするためには, 制御器は最適に制御された時の電圧と電流の関係を式あるいは電圧と電流の組として記憶しておく必要がある. 最適制御を実行するには, 負荷抵抗に掛かっている電圧値と回路を流れる電流値をモニターする. そして, 最適制御時の電圧と電流の関係より適当な電流値を求め, その電流値になるように負荷抵抗の値を調整する.

III の段階の制御は, 定格風速を超えたときに風車にどのような動作をさせるのかによる. 制御器が扱える電力容量は定格出力を基準にしており, 安全のため余裕を見ているとはいえ, 定格出力を大きく超えた電力は扱うことができない. 定格風速を超える高風速時には風車を止めることも一つの方法であるが, 高風速時においても制御器が扱える容量内に出力を抑制することが行われている.

風速が増加するにも係わらず出力を制御器の容量内に抑えるためには, 翼の出力を抑制する必要がある. Fig.1 の空力係数において, 最高の出力係数値を示す周速比 λ_p より小さい側と大きい側で係数値は減少している. λ_p より大きい側では翼の回転数が定格時の回転数より大きくなり, 翼に大きな遠心力が掛かることに

なるので安全を確保するのが困難になる。このため、出力を抑制するためにこの領域を利用することは適切ではない。出力の抑制には λ_p より小さい側が利用される。特に λ_q より小さい領域では出力係数は急激に減少するため、出力を抑制するには効果的である。係数が急減少する原因は、流れが剥離し揚力が減少するためであり、この領域を利用する制御法は「ストール制御」と呼ばれている。

ストール制御を行うには、風速の増加につれて周速比を減少させる必要がある。制御の方法としては2つの方法が考えられる。一つは負荷抵抗に掛かる電圧が所定の値を超えないようにする方法である。もう一つは回転数が所定の値を超えないようにする方法である。いずれの方法においても、ストール時には回路を流れる電流が最適制御時より多くなるため、発電機の内部抵抗による発熱が大きくなる。そのため、発電機を過剰に加熱しないように注意しなければならない。

回転角速度を定格角速度に維持したときの回路の状態を評価する手順について検討する。この場合、電圧と電流だけでなく回転数もモニターする必要がある。最初に、風速と角速度より周速比を求める。次に、求めた周速比に対応する出力係数の値を事前に得ている空力係数のデータより求め、翼の出力を求める。この出力を定格出力に近い値とするためには、IIの最適制御において定格風速に近づくとつれて周速比を最適な λ_p より小さくして λ_q に近づけておく。求めた出力より、前章(4)の方法で負荷抵抗と電流を求める。このようにして電圧と電流を予測することができる。

7. 風速の急増速によるトルクの増加

風速の増減に応じて4.5節の方法で負荷を調節することにより風車を適切に制御することができる。しかし、翼の応答速度よりも風速の増加が急激であるときは、増加を検知することはできないので、負荷の調整は行われぬ。そのため、翼の発生するトルクと負荷によるトルクの差が大きくなる。この大きなトルク差による回転速度の増加を抑えるためには発電機は大きなトルクを発生しなければならない。翼の応答時間 τ_u (応答速度の逆数)は次式で評価できる⁵⁾。

$$\tau_u = \frac{I\lambda_p^2}{(3/2)\rho\pi R_w^4 C_p(\lambda_p)U} \quad (21)$$

I は発電機を含めた翼の慣性モーメントである。

風速が急激に ΔU 増加したときにトルクがどの程度増加するかを見積もる。風速の変化に要する時間が応答時間より短いので、回転速度の変化は小さい。そのため、風速の増加により周速比は減少する。減少を $\Delta\lambda$ とすると、翼の発生するトルク T_w' は

$$T_w' = C_q(\lambda_p - \Delta\lambda)(1/2)\rho\pi R_w^3(U + \Delta U)^2 \quad (22)$$

と表せる。

$\lambda_q < \lambda_p$ であるので、減少によりトルク係数は増加する。トルクの増加量を大き目に見積もるため、 $\Delta\lambda$ の減少により周速比が λ_q になると仮定する。出力係数が最大値をとる付近では係数値は緩やかに変化するので、トルク係数が最大になるときの周速比 λ_q における出力係数 $C_p(\lambda_q)$ と最大の出力係数 $C_p(\lambda_p)$ との差は小さいと近似できるので、次式が成り立つ。

$$\frac{C_q(\lambda_q)\lambda_q}{C_q(\lambda_p)\lambda_p} \equiv \eta (\cong 1.0) \quad (23)$$

この近似式を用いると、式(22)は次のように表せる。

$$\begin{aligned} T_w' &\equiv C_q(\lambda_q)(1/2)\rho\pi R_w^3 U^2 (1 + 2\Delta U/U) \\ \frac{T_w'}{T_w} &\equiv \eta \frac{\lambda_p}{\lambda_q} (1 + 2\frac{\Delta U}{U}) \end{aligned} \quad (24)$$

式(24)より、 λ_p と λ_q の比を1.3~1.6程度、高風速(8~10[m/s])時の風の変動を20%程度と想定すると、トルクの増加は1.6~2.2倍になると予想される。この結果、風速の急な増加に対しても回転数を安定的に制御するためには、発電機は定格トルクの、余裕を見て、2.5倍以上のトルクを発生できる必要がある。

ストール制御時に風速が急増速したときのトルクの増加は次のように評価できる。ストール制御は回転数をほぼ一定に保つ制御になっている。そのため、風速が急増速したときのトルクは増速後の風速におけるトルク値に等しい。このため、増速した風速がストール制御のできる風速内ならば安定的に制御することができる。ストール制御可能な範囲を超えときは機械的ブレーキなどを用いて制動をかけなければならない。

8. 導出した式の検証

前章までに導かれた式を二つの方法で検証する。一つはパワーエレクトロニクス向けのシミュレーションソフトによる結果との比較、もう一つは2つの発電機を用いて実験した結果との比較である。シミュレーションソフトは市販ソフトのデモ版(PSIM8.0.3, Powersim Inc.)を使用した⁶⁾。PSIMではダイオードは理想的なスイッチとして扱われている。そのため整流器による損失は考慮されていない。同期発電機は(株)ホクト技研製(1kW 定格)、(株)安川モートル製(2.3kW 定格)である。それぞれの電気特性は次のようになっている。

ホクト技研 1kW

$$\begin{aligned} r &: 0.93[\Omega] \\ L &: 0.00050[H] \\ \kappa_\omega &: 1.34[V/(\text{rad/s})] \\ n &: 20 \end{aligned}$$

安川モートル 2.3kW

$$\begin{aligned} r &: 0.63[\Omega] \\ L &: 0.0103[H] \\ \kappa_\omega &: 1.25[V/(\text{rad/s})] \\ n &: 3 \end{aligned}$$

実験では発電機の軸とモータ(安川モートル 6.3kW)の軸を接続し、モータをインバータ制御することで回転数を所定の値に設定した。回転数は小野測器の非接触回転計で測定した。発電機からの出力を三相全波整流器で整流した後、抵抗器につないだ。抵抗器に流れる電流と抵抗器にかかる電圧を測定した。電圧の測定には東洋テクニカ製のマルチメータ 2000、電流の測定には日置製のテスターを用いた。回転数と抵抗値を変化させ電流と電圧を測定した。

実験、計算式、PSIMによる結果をFig.3,4に回転数と電流・電圧の関係として示す。凡例の“Cal”は式(7)、(8)より求めた結果を示している。“PSIM”はシミュレーション結果である。

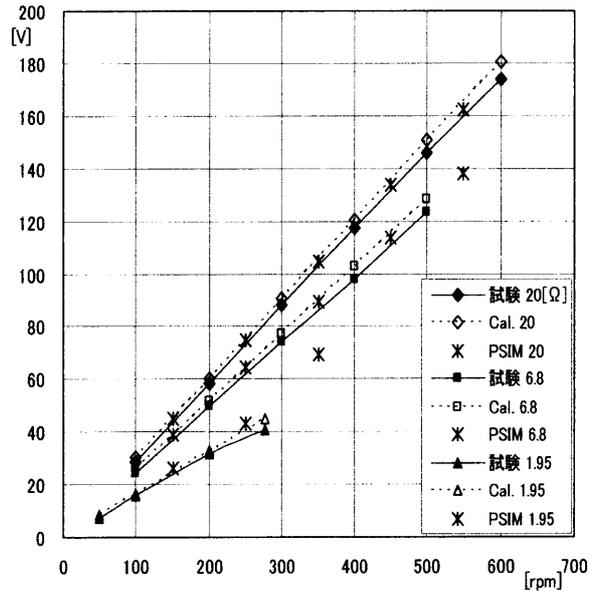
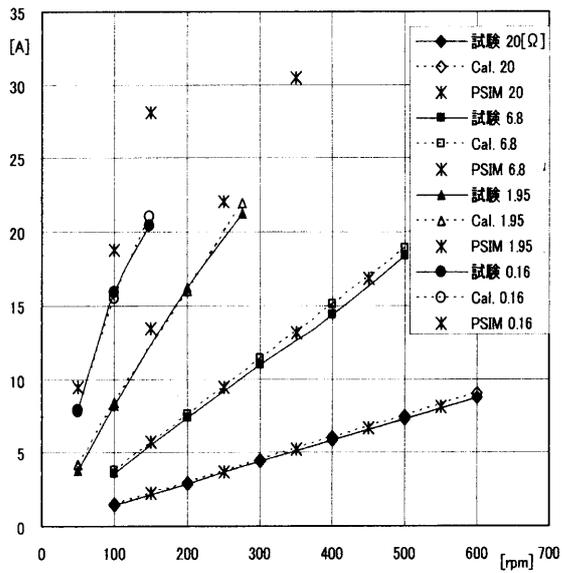


Fig.3 Experimental results for the relations between rotational speed and current / voltage for the HOKUTO 1.0 kW generator. The results calculated by the formulas and the results simulated by PSIM are also given. They show good agreement each other.

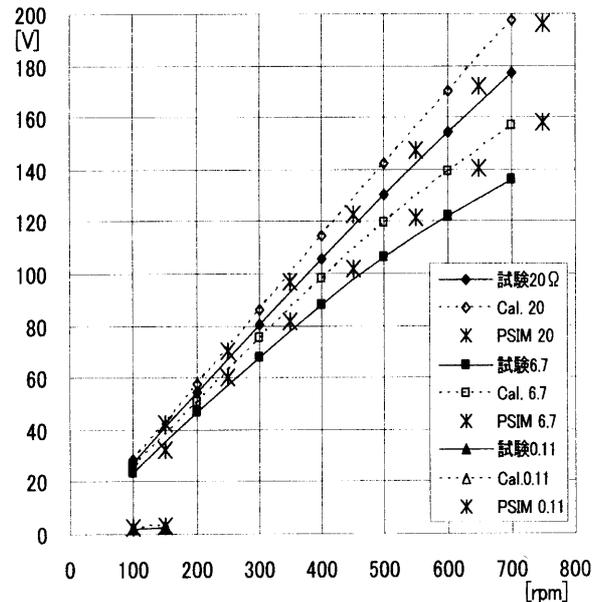
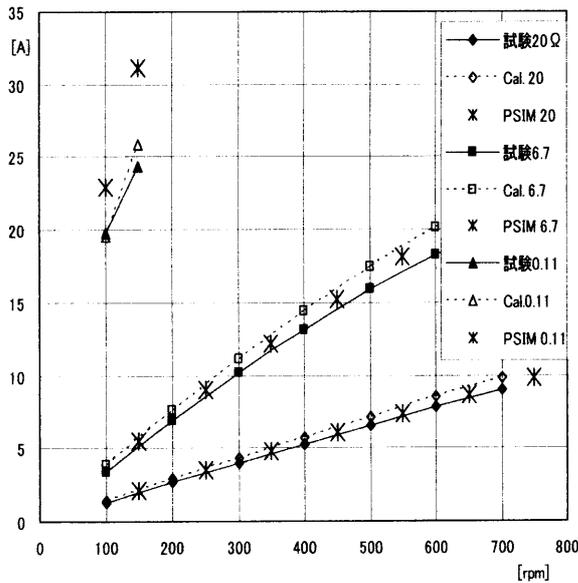


Fig.4 Experimental results for the relations between rotational speed and current / voltage for the YASKAWA 2.3 kW generator. The results calculated by the formulas and the results simulated by PSIM are also given. Experimental results are a little small at high frequencies.

実験結果と計算・PSIMによる結果は良い一致を示している。特にホクト技研の発電機に対しては非常に良く一致している。安川モータの発電機に対しては高回転になると電流・電圧とも実験の方が小さくなる傾向がある。ホクト技研の発電機は永久磁石とコアレスのコイルで構成されており、内部抵抗による損失のみを考慮すれば充分よく再現できることを示している。一方、安川モータの発電機は永久磁石を埋め込んだ回転子と電磁鋼板のコアに巻かれたコイルで構成され

ている。高回転になるとコイルの内部抵抗だけでなく、ここでの解析では考慮していないコアによる磁氣的損失を無視できなくなるものと思われる。

いずれにしても、前章で導いた式は600[rpm]程度まで実験結果をよく再現しており、負荷抵抗の調整により風車を制御するときの状況は4つの電気特性を基に予測することができる。

9. まとめ

風力発電機の電氣的制御に関して、その基礎となる理論について考察した。風車翼のピッチ角は変わらないと仮定し、翼の空力特性を 1 組の出力係数とトルク係数で表した。発電機は 3 相電源でモデル化し、その電氣的特性は相電圧、相内部抵抗、相内部インダクタンスと軸が 1 回転したときの電氣振動数の 4 個の定数で表した。制御器は発電機から出力される電流を整流し負荷抵抗に流すものとしてモデル化した。

翼には空力特性により決まる風による回転を駆動するトルクと負荷抵抗による消費電力で止まる回転を抑制するトルクが作用する。制御器の主な役割は、負荷の抵抗値を変化させることで負荷トルクを調整し、翼の回転数を適当な値に維持することである。トルク係数と発電機の定数より負荷抵抗の調整によって制御できる風速範囲を決める式を導いた。さらに、制御に必要な負荷トルク値を与える負荷抵抗の値を求める式を導いた。

導いた式を検証するため、コアのない同期発電機とコアのある同期発電機について試験を行った。コアのない発電機では導出した式と良い一致を示した。コアのある発電機では回転数が大きくなるにつれ導出式との違いが大きくなった。

風速の急増加に対して安全に制御するために必要なトルクについて見積もった。また、高風速時に出力を抑制するストール制御について検討し、ストール制御をするために必要なトルクについて見積もった。

Appendix

風車の空力特性と発電機の電氣的特性が与えられたとき、本論文の考察を制御器の設計にどのように適用するのかを具体的に示す。2 つの例について記す。

風車の仕様としては、翼半径が 1.25[m]、翼と発電機を合わせた慣性モーメントは 9.6[kg \cdot m²]、トルクおよび出力係数は Fig.A1 に示す通りである。周速比 4.5、定格風速 10.5[m/s]で定格回転数 360[rpm]、定格出力 3[kW]、定格トルク 80[Nm]である。

事例 1

ホクト技研の 1kW 発電機を 3 個並列に接続して、上述した風車に対応した時の制御について検討する。3 並列にしたときの発電機の特性は、8 章の 1kW の特性より、次のようになる。

ホクト技研 3kW

r : 0.31[Ω]

L : 0.00017[H]

κ_{ω} : 1.34[V/(rad/s)]

n : 20

最初に、発電機のトルクと翼のトルクの比較を行い、この発電機で制御可能な風速と回転数の範囲を把握する。Fig.A2 に風速毎に示した回転数と翼トルクの分布を示す。図中に破線“T(R=0)”で示した線は、式(10)で $R=0$ とおいた負荷抵抗をゼロにしたときの発電機トルクである。負荷抵抗を大きくしていくと破線の傾きは小さくなるので、翼トルクがこの破線より下側にある領域が制御可能な領域となる。但し、この破線は発電機には際限なく電流を流せると仮定したときのトルク

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) 例えば、大野榮一：パワーエレクトロニクス入門、オーム社、(2006)。
- 2) 例えば、久保大二郎：マイクロ風力発電機の設計と製作、CQ出版社、(2007)。
- 3) (株)安川電機 編：インバータドライブ技術 第3版、日刊工業新聞社、(2006)。
- 4) 塩田剛、井坂勉、関和希：CCレス方式風力用発電装置の開発（風力発電システムと発電機の整合性に関する研究）、日本風力エネルギー協会誌、32, No.2, pp.117-122, (2008)。
- 5) 烏谷隆、大屋裕二、渡辺公彦：小型風車の風速および負荷の変動に対する応答について、日本風力エネルギー協会誌、31, No.2, pp.120-123, (2007)。
- 6) 野村弘、藤原憲一郎、吉田正伸：PSIMで学ぶ基礎パワーエレクトロニクス、電気書院、(2007)。

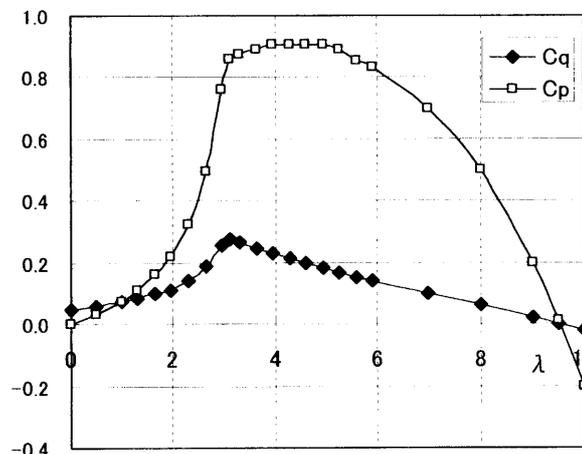


Fig.A1 Torque and power coefficients for the 3kW wind turbine.

曲線であるので、どの程度の回転まで制御可能かは発電機に流せる最大電流に依存する。

次に、風車を周速比 4.5 で運転したときの翼出力と発電機から取り出し可能な出力について、式(2)、(11)、(13)による検討結果を Fig.A3 に示す。Fig.A3 では翼出力が“Pw”、負荷抵抗により取り出し得る最大電力が“Pm”、負荷抵抗と内部抵抗による最大電力が“Pmr”である。この回転数領域では(定格出力は含まれている)、負荷抵抗による電力消費の方が翼出力より常に大きいので、抵抗値の調整により制御することができる。

周速比 4.5 を維持するように, 風速に合わせて負荷を変化させて回転数を調節したとき(最適制御時)の出力と風速&回転数の関係を Fig.A4 に示す. この時の負荷抵抗に掛かっている電圧値と負荷抵抗を流れる電流値の関係を Fig.A5 に示す. 制御器は検出した電圧値に対してこの図に対応する電流値を流すように負荷を調整すれば, 周速比を 4.5 に維持することができる. 翼出力に対する負荷抵抗により取り出し得る電力の比(効率)は, 風速の増加につれて低下していく. 低風速域では 90%以上であるが, 風速 10[m/s]ではおよそ 86%になる.

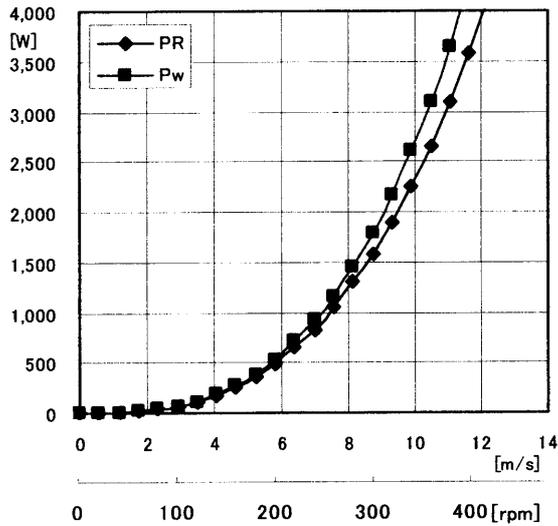


Fig.A4 Power curves vs. wind speed / rotational speed for optimum control at $\lambda=4.5$.

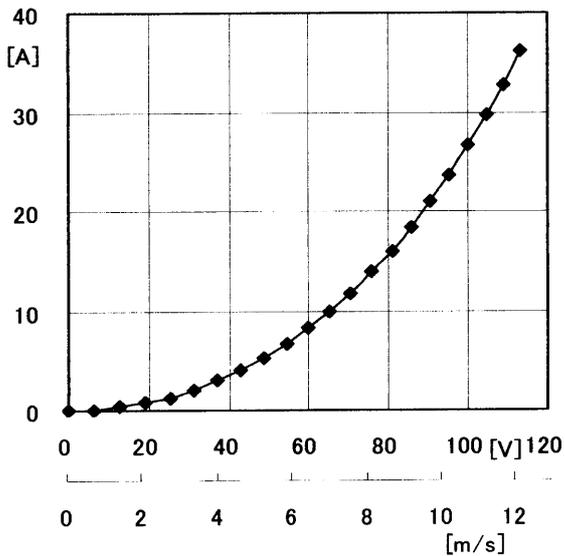


Fig.A5 Relation between the voltage of load / wind speed and the current at $\lambda=4.5$.

風速 11[m/s]以上では回転数を 280[rpm]に維持するようにストール制御をかけたときの出力と風速の関係を Fig.A6 に示す. この時に翼が発生するトルクを Fig.A7 に示す. 出力の図より, 風速 12[m/s]以上の領域においておよそ 3[kW]の出力を維持できることが分かる. このストール制御では, 風速 12[m/s]のときに周速比が 3.1(トルク係数が最大値を取る)になるように,

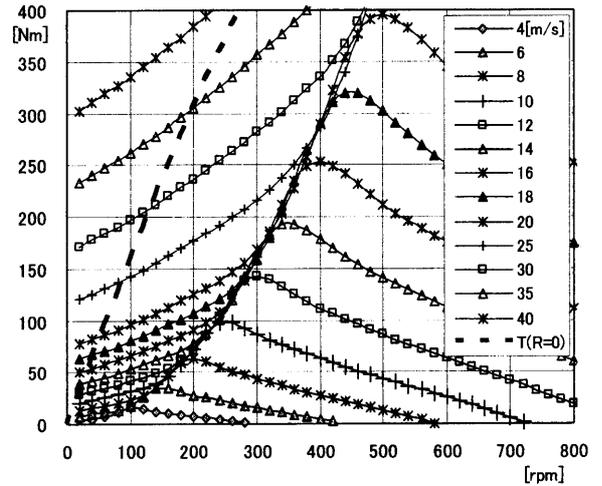


Fig.A2 Torque curves vs. rotational speed. The curves of the rotor are given for several wind speeds. The curve of the generator with no load is also given.

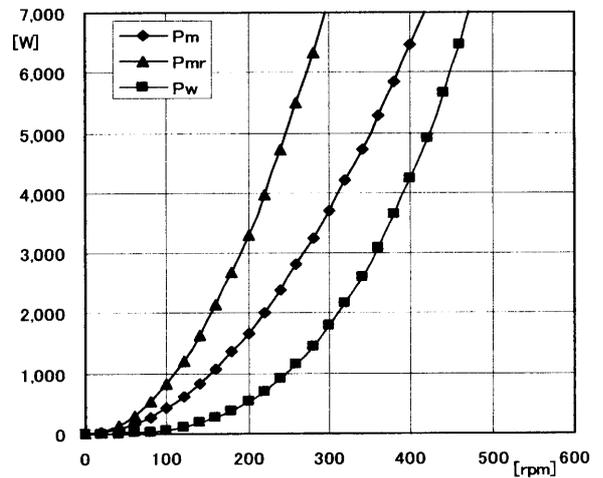


Fig.A3 Power curves vs. rotational speed for output of the wind turbine, maximum power of a load and maximum power of a load and internal resistances.

風速の増加につれて徐々に小さくしている. この時, 翼のトルクは最大 160[Nm]程度になる. Fig.A2 より, 発電機は 200[rpm]で最大 300[Nm]のトルクを掛けることができるので, 風速の変動に対してもストール状態を維持できると期待される. しかしながら, ストール状態では“Pr”で表されている発電機の内部抵抗による電力消費が 1[kW]以上有るため発電機の発熱に注意しなければならない.

風車の応答時間は式(21)と風車の仕様より,

$$\tau_u = \frac{15.4}{U} \quad [s] \quad (A1)$$

となる. 定格風速 10.5[m/s]ではおよそ 1.5 秒の応答時間になる. 風はこの時間よりもっと短い時間で変化するので, (6)章の議論が成り立つ. 増速量を 20%, $\lambda_q=3.1$ として式(24)に当てはめると,

$$\frac{T_w}{T_w} \cong \frac{4.5}{3.1} (1 + 2 * 0.2) = 2.0 \quad (A2)$$

となる.

Fig.A2 よりトルクの変化を求めると, 80[Nm] (10.5[m/s], $\lambda=4.5$)から 155[Nm] (12.6[m/s], $\lambda=3.1$)にな

る。およそ 1.9 倍であり、式(21)による見積もりは当を得ている。

20%の増速により周速比は 4.5 から 3.75 になり、トルク係数が最大値をとる 3.1 にはならない。定格風速を超える風速になるときはストール制御に移行するため、周速比をトルク係数が最大となる周速比より小さくする。この過程で λ_q を通過することになるので、ストール領域に移行するためには式(21)で見積もれるトルクが必要である。すなわち、(21)式は安定して(風速の変動速度にかかわらず)ストール制御を行うために必要なトルクを表している。ホクト技研の発電機は定格回転において定格トルクの 6 倍以上大きな負荷トルクを発生することが可能であり、ストール状態に速やかに移行できると期待される。

事例 2

安川モートル製の 6.3[kW]発電機を用いた時の制御について検討する。発電機の特性は次のとおりである。

安川モートル 6.3kW

r : 0.378[Ω]

L : 0.0168[H]

κ_ω : 1.76[V/(rad/s)]

n : 3

Fig.A8 が発電機のトルクと翼のトルクの比較である。風速毎に示した回転数と翼トルクの分布を示す。短絡時の発電機トルクは破線“T(R=0)”で示している。この発電機が出すことができる最大トルクは 84[Nm]であるので、84[Nm]以下で破線の右側にある領域が制御可能な領域である。

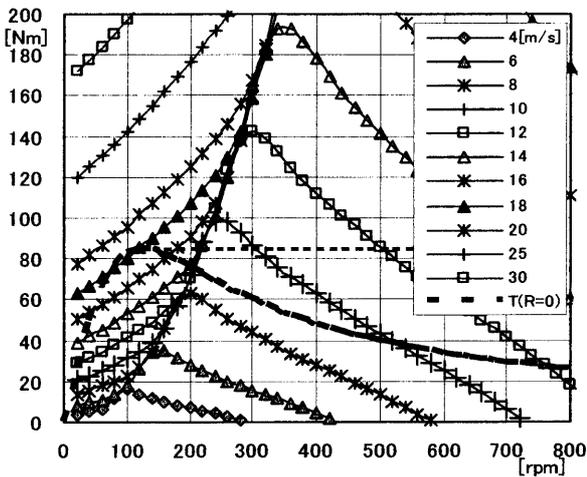


Fig.A8 Torque curves vs. rotational speed. The curves of the rotor are given for several wind speeds. The curve of the YASKAWA 6.3kW generator is given.

Fig.A9 に周速比 4.5 で運転したときの翼出力と発電機から取り出し可能な出力を示す。回転数が 360[rpm]以上では翼の出力が発電機の出力を上回る。そのため、これ以上の回転数領域では周速比 4.5 を維持することはできず、周速比は 4.5 以上になる。

Fig.A10 に、周速比を 4.5 に維持するように風速に合わせて負荷を変化させて回転数を調節したときの出力と風速の関係を示す。風速が 10.5[m/s]以上では負荷の調整では周速比を 4.5 に維持することはできない。

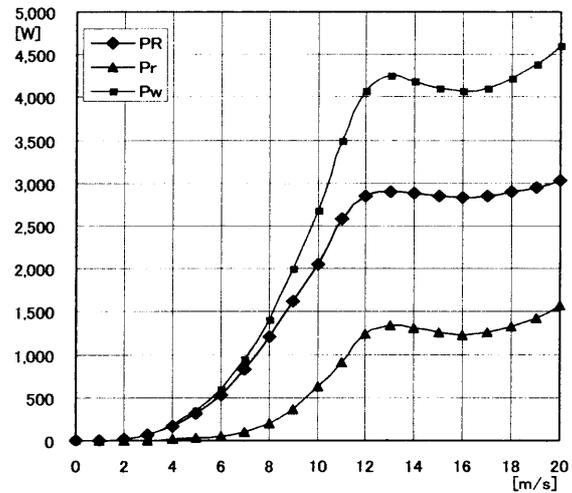


Fig.A6 Power curves vs. wind speed for optimum and stall control. In stall control state, the rotational speed is maintained at 280[rpm].

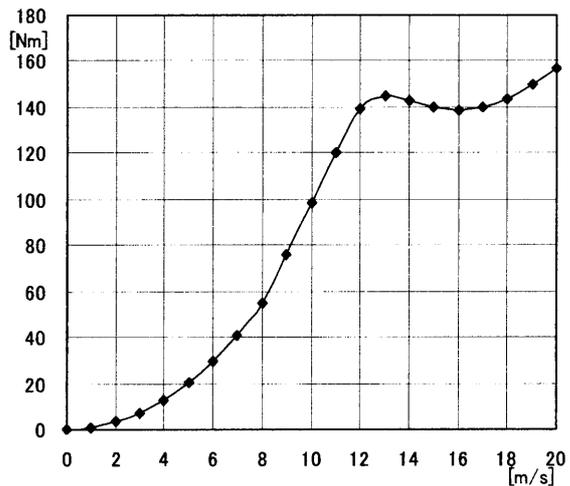


Fig.A7 Relation between torque and wind speed for optimum and stall control.

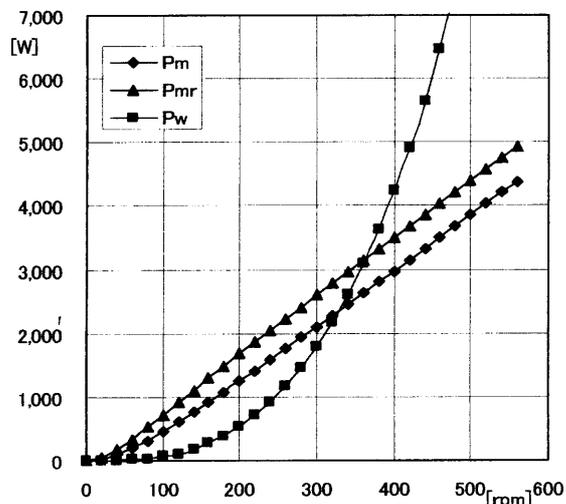


Fig.A9 Power curves vs. rotational speed. Output power of wing becomes larger than the power of the generator over the rotational speed 360[rpm].

Fig.A11 は、周速比を 4.5 に維持するときの負荷抵抗に掛かっている電圧値と負荷抵抗を流れる電流値の関係である。8[m/s]あるいは100[V]を超える風速域では、電圧値に対する電流値が二値となる。そのため、周速比 4.5 の最適制御が可能な風速は 9[m/s]程度までである。この領域で二値となる理由は、電流値の増大により内部抵抗による電圧降下が大きくなり負荷抵抗に掛かる電圧が小さくなるためである。

この発電機を用いたストール制御では、定格風速においてトルクの最大値が発電機の出せる最大値を超えているため、事例 1 と同様にはできない。なるべく高回転数でなるべく高風速まで制御できることを目標とする。

トルク分布図 Fig.A8 より、回転数を 100~200[rpm] に維持すると風速 16~17[m/s]まで制御可能であると予想できる。維持する回転数を 150[rpm]に設定して計算した結果を Fig.A12 に示す。この時の電流値は最大 27[A]程度である。ストール状態で 600~800[W]の出力が期待できる。また、内部抵抗による発熱は 200[W]程度である。

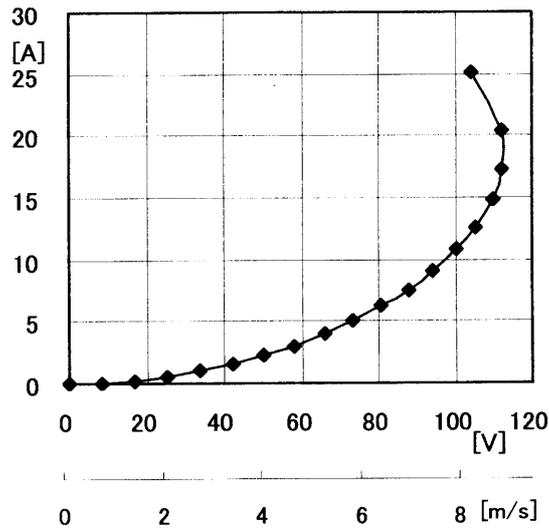


Fig.A11 Relation between the voltage of load / wind speed and the current at $\lambda=4.5$.

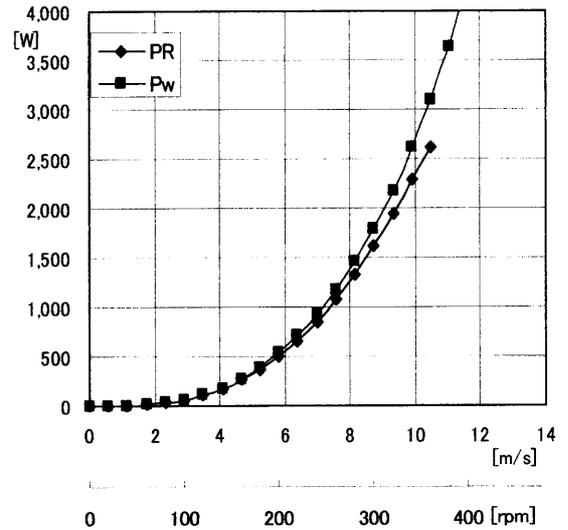


Fig.A10 Power curves vs. wind speed / rotational speed for optimum control at $\lambda=4.5$. Positive value of the load cannot get over 10.5 [m/s].

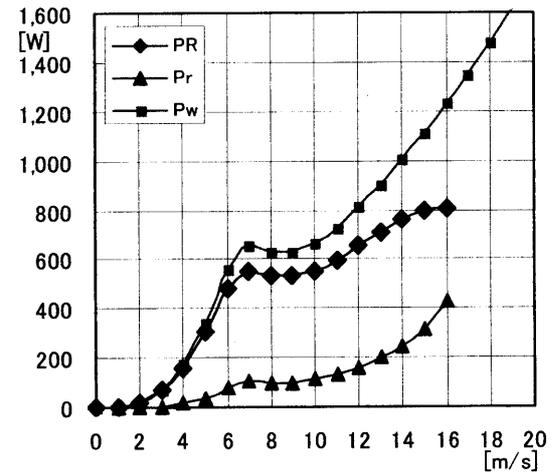


Fig.A12 Power curves vs. wind speed for stall control for YASKAWA6.3kW generator. In stall state, the rotational speed is 150[rpm].