

小型風力発電システムの簡易モデル化および発電電力推定

田村智弘*, 山田誠治*2

Simplified Modeling and Estimation of Generated Power for the Small Wind Turbine Generator System Tomohiro Tamura, Seiji Yamada

小型風力発電機用コントローラの制御性能の改善を効率的に行い、小型風力発電システムの事業化に際して必要となる発電電力予測を行うために、風速変動に対する風車の応答性と負荷の動的特性を考慮した簡易なモデル化を行い、具体的な小型風力発電システムについてパラメータ設定を行った。また、これらの簡易モデルとパラメータを用いてコントローラなしおよびありの場合についてシミュレーションによる発電電力推定を行った結果、その値はフィールド実験値と比較的良く一致しており、モデル化が妥当であることが分かった。

1. 緒言

現在、地球温暖化への取り組みが喫緊の課題となっており、二酸化炭素を排出しない再生可能エネルギーの利用が世界的に進められている。一方、東日本大震災（2011年）や熊本地震（2016年）などの大地震、毎年大きな被害をもたらす台風や集中豪雨等による風水害では、広い地域で停電が発生し、被災者を受け入れる避難施設などでの独立型電源の必要性が高まっている。

このような背景に対し、当センターでは身近な再生可能エネルギーとして風力エネルギーに着目し、風力発電システムの開発に取り組んでいる。これまでに小型直線翼垂直軸型風車におけるブレードの仕様やレイノルズ数が風車性能へ及ぼす影響の調査¹⁻³⁾、電力系統に接続しない独立型の小型風力発電システムおよびコントローラ⁴⁾の開発等を行ってきた。コントローラ開発において残された課題の一つに制御性能の改善がある。これを効率的に行うには計算機によるシミュレーションを用いる方法があるが、それには、風速変動に対する風車の応答性を考慮した小型風力発電システムのモデル化が必要である。これに対し、市販のパワーエレクトロニクス用電気回路シミュレーションソフトウェアを用いる方法があるが、これらに導入されている風車モデルは、一般的には水平軸型風車を対象としており、垂直軸型風車に適用するにはパラメータ設定等の課題が多い。

一方、将来的な事業化に向けては、小型風力発電システム導入検討時の設置場所での発電電力予測が重要となってくる。発電電力予測は、予め風力発電機の長期に渡るフィールド実験を実施し、その結果（実測出力曲線）を用いて行う方法⁵⁾が一般的である。本方法は多くの時間と費用が掛かり、フィールド実験結果において想定した性能が得られなかった場合には、仕様や設計変更を行い、再度フィールド実験を行う必要があるため、製品開発の遅れや追加の費用が生じ、事業化に支障を来す。また、本方法は小型風力発電システムの平均特性を用いる方法であり、小型風力

発電システムの動的な特性が反映されないため、風速変動が大きい場合、発電電力予測精度が低下することが考えられる。さらに流体モデルや気象モデルを用いた数値シミュレーションによる予測方法⁶⁾もあるが、小型風力発電システムが主に設置される地上付近での風車周りの流れ場は複雑であり、実用的には予測精度や計算時間に課題がある。

そこで、本研究では、風速変動に対する風車の応答性と負荷の動的特性を考慮した小型風力発電システムのモデル化および発電電力推定のためのシミュレーションを行った。

2. 小型風力発電システムのモデル化

2・1 小型風力発電システムの構成要素

本研究では、電力系統に接続せず、発電した電力をバッテリーに充電する独立型の小型風力発電システムを対象とした。図1にモデル化の対象となる小型風力発電システムの構成を示す。本システムは、風車、発電機、風車の制御とバッテリーへの充電を行うコントローラおよびバッテリーから構成される。本モデル化に際しては、構成要素ごとにできるだけ簡単なモデル化を試みる。

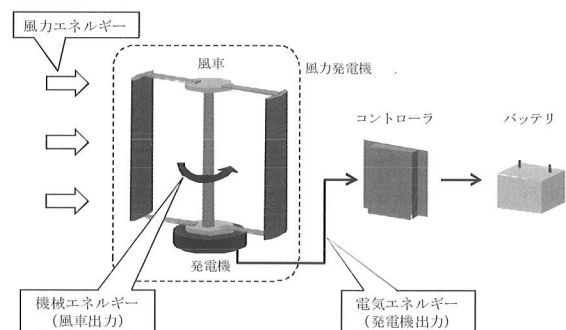


図1 小型風力発電システム(独立型)の構成

2・2 風車のモデル化

2・2・1 風車の運動方程式

風車の運動方程式を式(1)に示す。

$$J \frac{d\omega}{dt} = T_{wr} - T_g \quad (1)$$

* 企業支援部設計制御グループ

*2 経営管理部経営企画グループ

ここで、 $T_{wt}[Nm]$ は風によって風車に作用する回転トルク、 $T_g[Nm]$ は発電機トルク、 $J[kgm^2]$ は風車および発電機の慣性モーメント、 $\omega[rad/s]$ は回転角速度である。 T_g は、発電機から取り出す電力によって変化する。

風によって風車に作用する T_{wt} および出力 $P_{wt}[W]$ を式(2) および(3)に示す。

$$T_{wt} = \frac{1}{2} \rho A r C_T(\lambda, \theta) U^2 \quad (2)$$

$$P_{wt} = \frac{1}{2} \rho A r C_p(\lambda, \theta) U^3 \quad (3)$$

ここで $\rho[kg/m^3]$ は空気密度、 $U[m/s]$ は風速、 $A[m^2]$ は受風面積、 $C_T(\lambda, \theta)$ はトルク係数、 $C_p(\lambda, \theta)$ は出力係数である。 λ は周速比でブレード周速度 $r\omega$ と風速の比 $\lambda=r\omega/U$ 、 θ はアジマス角である。

2・2・2 風車の平均トルク・出力特性

図2に風洞実験により測定した小型直線翼垂直軸型風車（風車回転半径 $r=0.3m$ 、ブレード幅 $b=0.6m$ 、翼弦長 $c=0.15m$ 、翼枚数 $N=2$ 枚、翼型 NACA6520）の平均トルク・出力特性を示す。図より C_T および C_p は λ の関数であり、 λ の増加とともに大きくなり、最大値を取った後に減少する。 C_T および C_p の最大値 $(C_T)_{max}$ および $(C_p)_{max}$ は風速の増加と共に大きくなり、 $(C_T)_{max}$ を取る周速比 $(\lambda_T)_{max}$ は 1.4 でほぼ一定

であるが、 $(C_p)_{max}$ を取る周速比 $(\lambda_p)_{max}$ は大きくなる傾向を示す。ところで、垂直軸型風車は、ブレードのアジマス角によって相対風速およびそれに対する迎角が変動するため、風からブレードが受ける力による正味の回転トルク T_{wt} は変動する。風車のモデル化において、厳密には C_T および C_p はアジマス角 θ の関数となる。一方、実際に発電への寄与が大きくなる $U \geq 4m/s$ の領域で、最大出力付近の周速比における風車の回転周期 T は、後述のフィールド実験で用いた風車の回転半径 $r=0.5m$ のとき、 $T < 0.52sec$ であることから、モデルの単純化のため、風車トルク T_{wt} の θ 依存性を無視することとする。

2・2・3 風車特性のレイノルズ数依存性

小型風車の平均トルク・出力特性はレイノルズ数に依存する³⁾。レイノルズ数を $Re_r=2Ur/\nu$ (ν は動粘性係数) とおくと、同一形状の風車の平均特性は U と r に依存することになる。実際の風車の運転時と風洞実験時の Re_r を等しいとおくと、

$$\frac{2U_a r_a}{\nu} = \frac{2U_m r_m}{\nu}$$

となる。ここで、添字 a は実風況下での運転時、 m は風洞実験時を表す。これより、式(4)が得られる。

$$U_m = \frac{r_a}{r_m} U_a \quad (4)$$

モデル化で使用する風速は、実風速に対して式(4)を用いて補正する。

2・3 発電機のモデル化

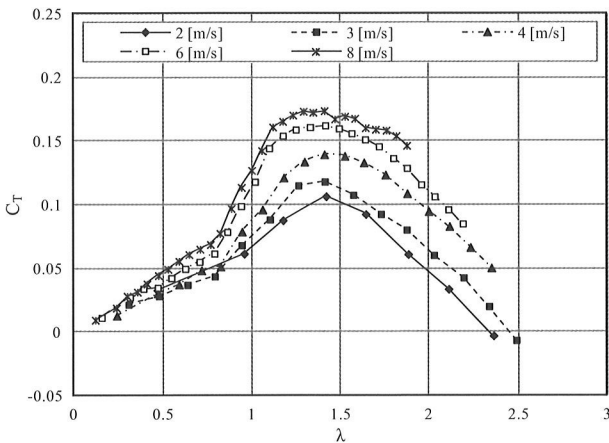
モデル化の対象とした発電機は、永久磁石同期発電機であり、発電した三相交流は整流器（ダイオードブリッジ）により整流される。本発電機は、物理モデルを用いた詳細なモデル化が可能⁷⁾であるが、モデルが複雑であることやパラメータの推定が容易でないため、ここでは簡単化のため、発電機と整流器の組み合わせを単純な直流発電機（直流モータと同等）としてモデル化した。図3に発電機モデルの概略図を示す。

直流発電機を回転させる発電機トルク T_g と電気回路に流れる電流 $I_1[A]$ は、式(5)、(6)の関係となる。

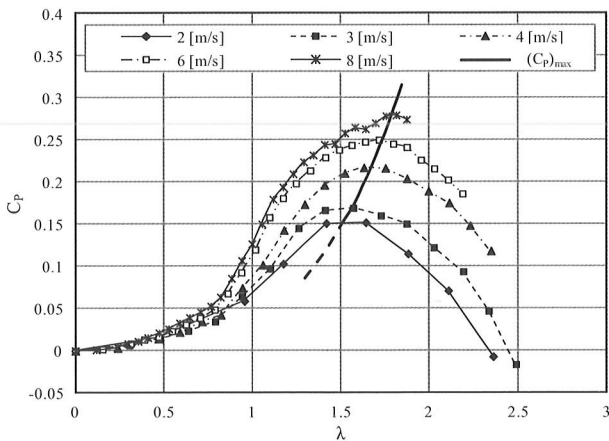
$$T_g = K_T \cdot I_1 \quad (5)$$

$$I_1 = \frac{E_r}{R + r_g} \quad (6)$$

ここで $K_T[Nm/A]$ はトルク係数、 $E_r[V]$ は発生する電圧（モータ



(a)トルク特性



(b)出力特性

図2 風洞実験により測定した小型直線翼垂直軸型風車の平均トルク・出力特性

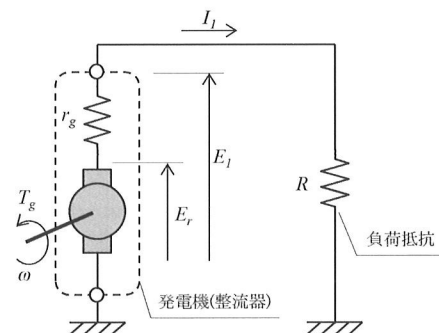


図3 発電機モデルの概略図

タにおける逆起電力), $r_g[\Omega]$ は発電機の内部抵抗に整流器の損失等を含めた抵抗, $R[\Omega]$ は発電機に接続される負荷抵抗である. また, 逆起電力係数を $K_E[\text{Vs/rad}]$ とすると, E_r は式(7), 発電機の出力電圧(整流器により整流された電圧) $E_1[\text{V}]$ は, 式(8)となる.

$$E_r = K_E \cdot \omega \tag{7}$$

$$E_1 = E_r - r_g \cdot I_1 \tag{8}$$

なお, K_T, K_E, r_g の値は, 発電機単体の値ではなく, 発電機と整流器の組み合わせにおける値となる.

2・4 バッテリーのモデル化

風力発電機で発電した電力を蓄えるバッテリーに用いた鉛蓄電池は, 動的な特性や充電状態(SOC)を考慮したモデルも多く提案されている⁸⁾が, 単純化するため, 定電圧源と抵抗(内部抵抗)の組み合わせとしてモデル化した. 図4にバッテリーモデルの概略図を示す.

バッテリーの内部抵抗を $R_b[\Omega]$, 定電圧源の起電力を $E_b[\text{V}]$, 充電時に流れる電流を $I_2[\text{A}]$ とすると, 端子間電圧 $E_2[\text{V}]$ は式(9)で表わされる.

$$E_2 = R_b \cdot I_2 + E_b \tag{9}$$

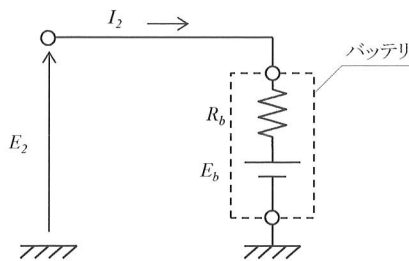


図4 バッテリーモデルの概略図

2・5 コントローラのモデル化

2・5・1 電気回路モデル

風車の回転速度を制御するコントローラの電気回路には降圧チョップ回路を用いた. コントローラに接続する発電機, バッテリーを含めた電気回路モデルの概略図を図5に示す. チョップ回路の一次(発電機)側に流れる電流 $I_1[\text{A}]$, 二次(バッテリー)側に流れる電流 $I_2[\text{A}]$, 電圧 $E_2[\text{V}]$ は式(10)~(12)のようになる.

$$I_1 = D \cdot I_2 \tag{10}$$

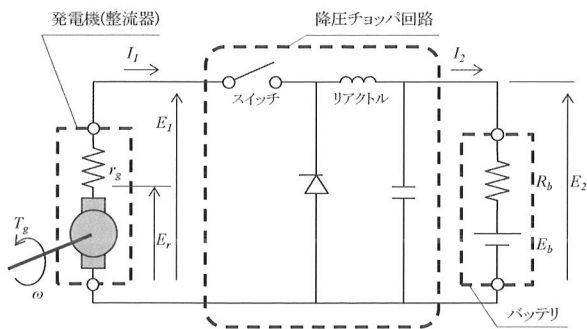


図5 電気回路モデルの概略図

$$I_2 = \frac{1}{R_b} (E_2 - E_b) \tag{11}$$

$$E_2 = \frac{D \cdot R_b}{R_b + D \cdot R_b} \left(E_r + \frac{r_g}{R_b} E_b \right) \tag{12}$$

ここで, D はスイッチのデューティ比(スイッチング周期に対するオン時間の割合)である. 式(5)および式(10)より, D を変化させることで T_g の大きさを変化させ, 目標とする回転速度になるよう制御できることがわかる. なお, チョップ回路は, スwitchのデューティ比およびスイッチング周期の動作条件により回路のリアクトルに流れる電流が0とならず連続で流れる電流連続モード, 電流が0になる期間が発生する電流不連続モードの2つの状態が存在するが, それぞれのモードへの遷移を考慮したモデルは複雑⁹⁾となるため, ここでは電流連続モードのみについてモデル化する.

2・5・2 制御モデル

制御モデルのブロック線図を図6に示す. 本モデルは, 風速 U と風車の回転角速度 ω から得られた周速比 λ と目標周速比 λ_{ref} との差から調整器(PI調整器)により制御量を計算し, チョップ回路におけるスイッチのデューティ比 D を求める. この D を用いて, 式(10)および式(12)から I_1 および E_2 が求められる.

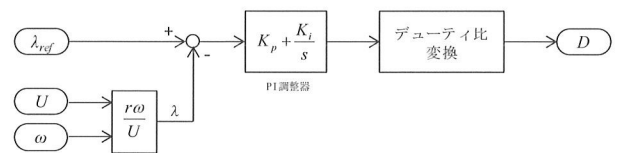


図6 制御モデルのブロック線図

2・6 システム全体のモデル化

小型風力発電システムを構成する要素のモデルを組み合わせたシステム全体のモデルの概略図を図7に示す. 本システムは, 風車モデル(トルク特性)および風車や発電機等の慣性モーメントから成る機械システム部, 発電機モデル, バッテリーモデル, 電気回路モデルおよび制御モデルから成る電気システム部により構成される. フィールド実験により得られた風速の時系列データ U を入力とし, 動的シミュレーションを実行することにより, 発電電力 $P[\text{W}]$ および風車の回転角速度 ω 等が得られる.

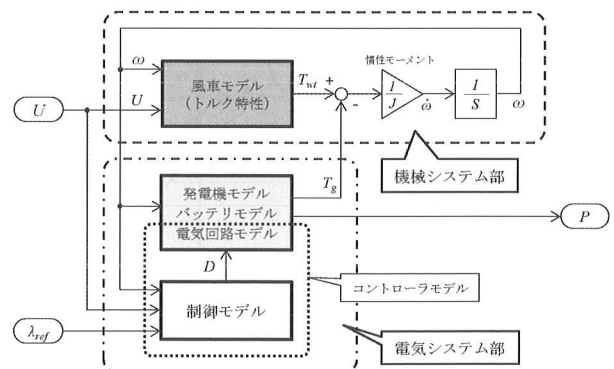


図7 システム全体のモデルの概略図

3. 小型風力発電システムのパラメータ設定

先に定義したモデルを用いて小型風力発電システムのシミュレーションを行うため、次のようにモデルの特性値(パラメータ)を設定した。

3・1 小型風力発電システムの仕様

図8にモデル化の対象とした小型風力発電システムの外観を示す。本システムを用いたフィールド実験を行い、風速、発電電力等のフィールドデータの収集を行った。

風車は回転半径 $r=0.5\text{m}$ 、ブレード幅 $b=0.8\text{m}$ 、翼弦長 $c=0.25\text{m}$ 、ブレード枚数 $N=2$ 枚、翼型 NACA6525 の小型直線翼垂直軸型風車(定格出力 147W(風速 10m/s 時))である。発電機はスカイ電子(株)製 SKY-HR160 (定格出力 100W (500rpm 時))、バッテリーは(株)ジーエス・ユアサ製小型制御弁式鉛蓄電池 PE12V7.2 (公称電圧 12V, 定格容量 7.2Ah) である。風速の測定には、Davis 社製#7911 の風速計を用いた。また、コントローラは、発電機トルクを変化させるために電流を制御してバッテリーに充電する降圧チョッパ回路と、この回路の制御装置(日本ナショナルインスツルメンツ(株)製 cRIO-9102 他)から構成される。

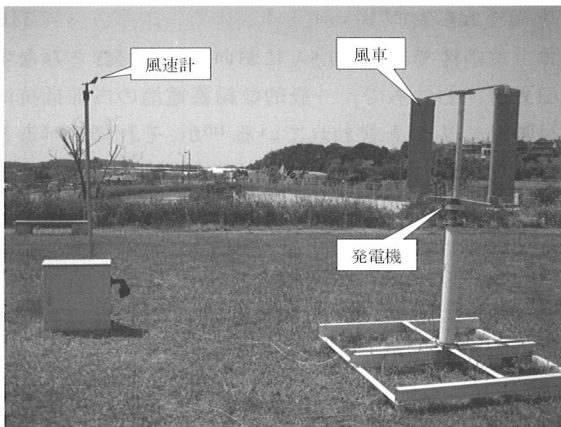


図8 小型風力発電システムの外観

3・2 風車モデルのパラメータの設定

3・2・1 慣性モーメント

風車および発電機それぞれの慣性モーメントは、三次元 CAD のモデルおよび実測した質量により求めた。その結果、それらの合計の慣性モーメントは、 $J=0.504\text{kgm}^2$ であった。なお、その約半分はブレードによるものである。

3・2・2 トルク係数

翼型 NACA6525 の平均トルク特性および出力特性は $\lambda > 1.2$ において、NACA6520 の特性と比較的類似の傾向を示すことから、異なる風速による風洞実験データを有する NACA6250 の平均特性をモデルに用いた。

トルク係数 C_T のモデル化においては、その風洞実験データを区間に分けて多項式近似し、各風速について周速比 λ に対する C_T の値の関係をテーブル化した。図9に多項式近似したトルク係数を示す。

3・3 発電機モデルのパラメータの設定

3・3・1 トルク係数

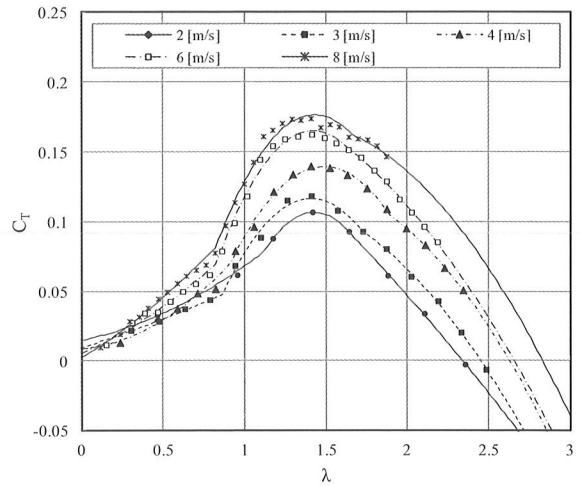


図9 多項式近似したトルク係数

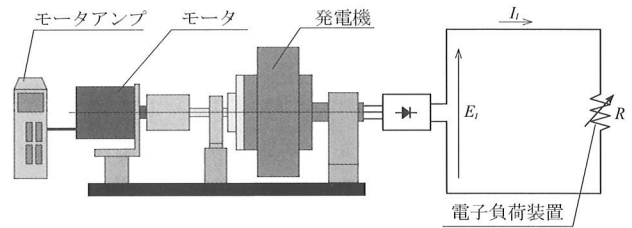


図10 発電機モデルのパラメータ設定のための実験装置

発電機モデルのパラメータ設定のために用いた実験装置を図10に示す。実験装置は、発電機、モータ、モータアンプおよび電子負荷装置から構成される。モータにより発電機を回転させた時のモータ設定トルク(≒発電機トルク T_g)に対する電気回路に流れる電流 I_1 を測定した。電子負荷装置は(株)ケンウッド TMI 製 PEL301-201, モータは三菱電機(株)製 HC-KFS43, モータアンプは三菱電機(株)製 MR-J2S-40A を用いた。

実験においては、モータアンプに設定する T_g を変化させ、一定回転速度になった時の I_1 を測定した。なお、発電機に接続した電子負荷装置の抵抗値は、後述する 3・4 の結果よ

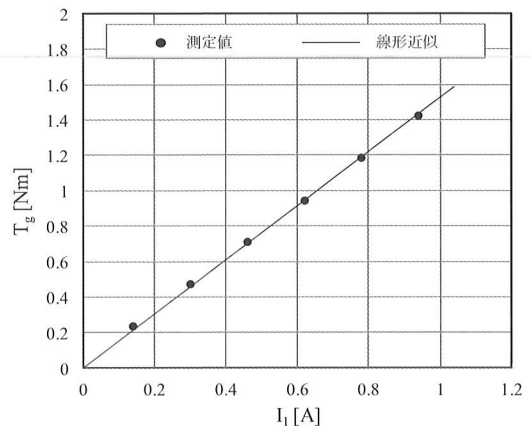


図11 電気回路に流れる電流と発電機トルクの関係

り $R=5\Omega$ とした。

図 11 に電気回路に流れる電流と発電機トルクの関係を示す。式(5)から、これらの関係について原点を通る線形関数で近似し、その直線の傾きから、トルク係数 $K_T=1.527\text{Nm/A}$ を求めた。

3・3・2 逆起電力係数

逆起電力係数 K_E は、発電機の無負荷運転状態での回転角速度 ω と整流器からの発電機の出力電圧 E_1 の関係から求めた。実験装置は 3・3・1 と同様とし、電子負荷装置は開放状態とした。実験は、回転速度 500rpm まで 100rpm ごとに E_1 を測定した。なお、 ω はモータアンプの表示値から得た。

図 12 に回転角速度と発電機の出力電圧の関係を示す。式(7)から、これらの関係について、原点を通る線形関数で近似し、その直線の傾きから、逆起電力係数 $K_E=1.735\text{Vs/rad}$ を求めた。

3・3・3 発電機抵抗

式(7), (8)より、発電機抵抗 r_g は式(13)のように表される。

$$r_g = \frac{K_E \cdot \omega - E_1}{I_1} \quad (13)$$

3・3・1 の実験により測定した I_1 , E_1 , ω および 3・3・2 より得た K_E から、式(13)により r_g を求めた。図 13 に電気回路に流れる電流と発電機抵抗の関係を示す。これらの関

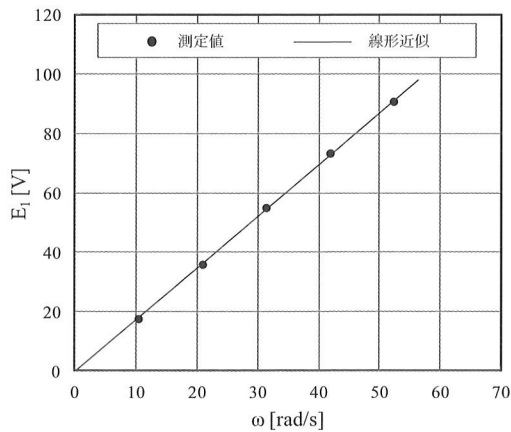


図 12 回転角速度と発電機の出力電圧の関係

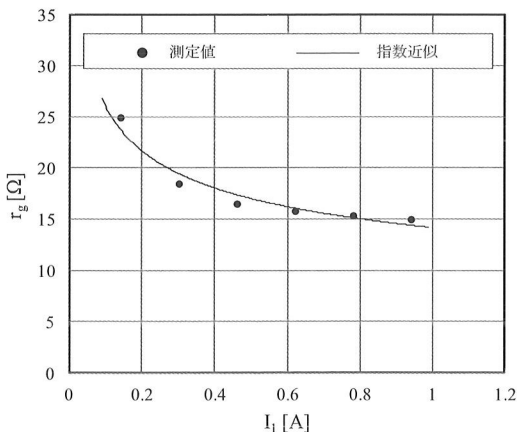


図 13 電気回路に流れる電流と発電機抵抗の関係

係について、指数関数で近似し、発電機抵抗を式(14)のように求めた。

$$r_g = 14.14 \cdot I_1^{0.264} \quad (14)$$

3・4 バッテリモデルのパラメータ設定

式(9)より、バッテリーの内部抵抗 R_b は式(15)のように表される。

$$R_b = \frac{E_2 - E_b}{I_2} \quad (15)$$

フィールド実験で測定したバッテリー端子間電圧 E_2 および充電時に流れる電流 I_2 から、式(15)により R_b を求めた。図 14 に充電時に流れる電流とバッテリーの内部抵抗の関係を示す。なお、起電力 E_b は測定開始時の端子間電圧とした。図の $I < 0.5\text{A}$ の領域において、 I_2 に対する R_b の時系列変化を見てみると、 I_2 が増加する場合（実線矢印）と減少する場合（破線矢印）とで R_b の大きさが異なる特性（ヒステリシス）が確認された。一方、電力の推定においては、電流の大きな領域の影響が大きいことから、ここではヒステリシスは考慮せずモデル化することとした。これらの関係について、指数関数で近似し、バッテリーの内部抵抗を式(16)のように求めた。

$$R_b = 3.748 \cdot I_2^{-0.471} \quad (16)$$

なお、本条件では、 $I > 0.5\text{A}$ において、 $R_b \approx 5\Omega$ とみなすことができる。ところで、一般的な鉛蓄電池の内部抵抗は数ミリ～数十ミリ Ω とされている¹⁰⁾が、それに比べると大きな値となっており、使用したバッテリーは、かなり劣化していた可能性が考えられ、この場合は内部抵抗が高くなることが知られている¹¹⁾。

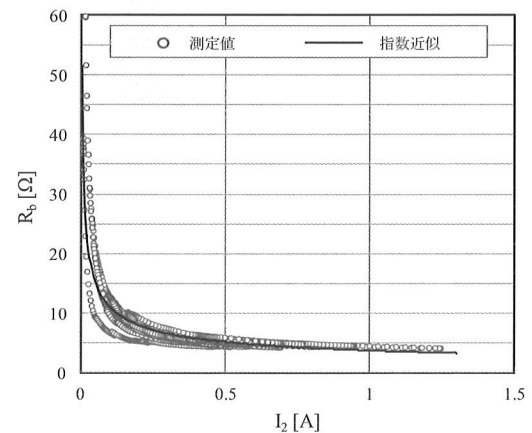


図 14 充電時に流れる電流とバッテリーの内部抵抗の関係

4 発電電力の推定

4・1 発電電力推定シミュレーションの方法

前節までに求めた小型風力発電システムのモデルとパラメータを用いた発電電力推定のシミュレーションを行うため、数値解析ソフトウェア Matlab/Simulink (MathWorks 社製) を使用した。コントローラを用いず発電機とバッテリーを直接接続した場合（コントローラなし）とコントローラにより周速比制御を行う場合（コントローラあり）の2つ

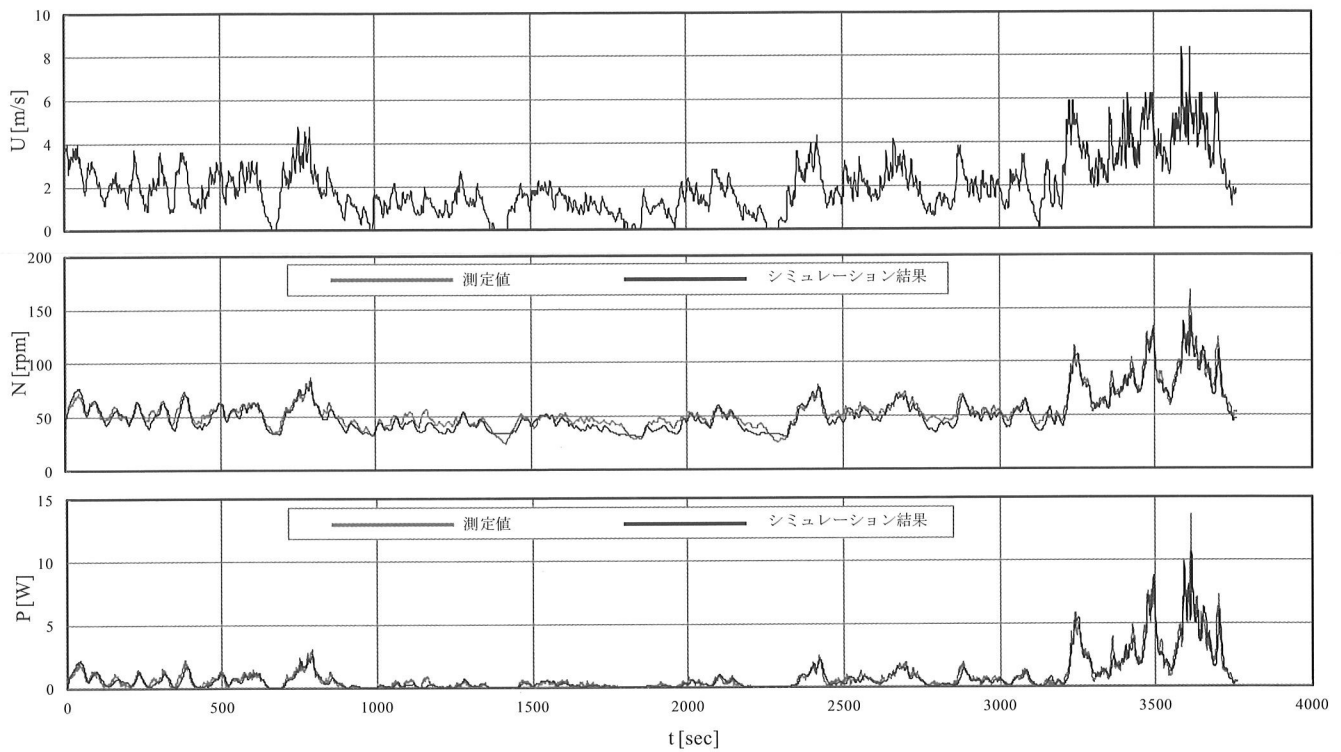


図 15 コントローラなしの場合における測定値およびシミュレーション結果
(上：風速，中：回転速度，下：発電電力)

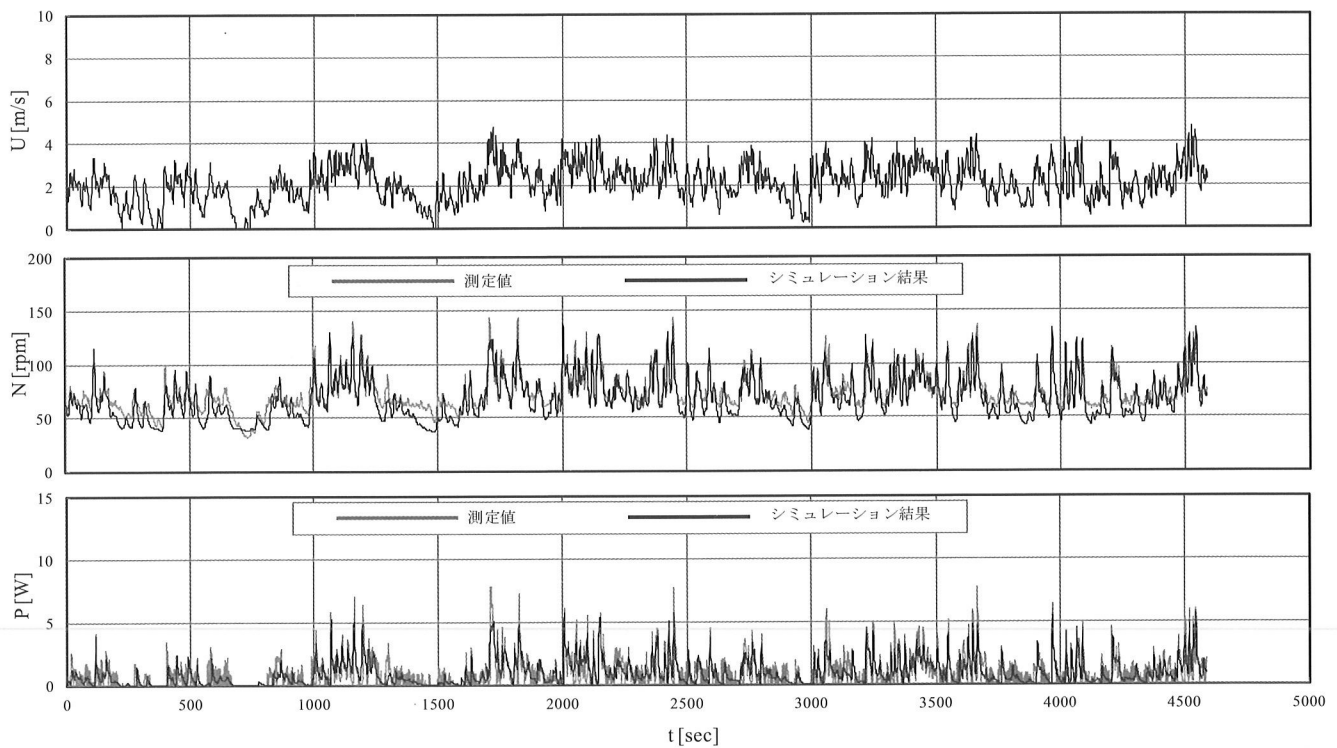


図 16 コントローラありの場合における測定値およびシミュレーション結果
(上：風速，中：回転速度，下：発電電力)

の場合をシミュレーションの対象とした。シミュレーションでは、フィールド実験で得られた風速 U の時系列データ (サンプリング周期 1sec) を入力として用いた。

4・2 シミュレーション結果

4・2・1 コントローラなし

コントローラなしの場合における、風速 U 、風車の回転速度 N 、発電電力 P の測定値 (灰色) およびシミュレーション結果 (黒色) の時系列データを図 15 に示す。風車の回転速度は、フィールド実験における測定値とシミュレーションによる推定値は、風速が 1m/s 以下の低い領域以外は概

ね一致している。また、発電電力については、一部で両者の差異はあるものの、全体的にフィールド実験値と推定値の変化傾向は比較的良く一致している。この時、フィールド実験における発電電力量 0.881Wh に対して、シミュレーション結果は 0.836Wh であり、その差異は-5.2%であった。

4・2・2 コントローラあり

コントローラありの場合における、風速 U 、風車の回転速度 N 、発電電力 P の測定値（灰色）およびシミュレーション結果（黒色）の時系列データを図 16 に示す。風車の回転速度は、コントローラなしの場合と同様に、風速が 1m/s 以下の低い領域以外は概ね一致している。また、発電電力については、一部で両者の差異はあるものの、全体的にフィールド実験値と推定値の変化傾向は比較的良く一致している。このときフィールド実験における発電電力量 1.236Wh に対して、シミュレーション結果は 1.116Wh であり、測定値との差異は-9.7%であり、コントローラなしの場合に比べて誤差が大きくなっている。これは、電気回路モデルのモデル化精度および制御モデルの制御パラメータ設定精度などのコントローラモデル精度によるものと考えられる。

以上のことから、本研究開発のモデル化は妥当であることが分かる。

5. 結 言

- (1) 風速変動に対する風車の応答性と負荷の動的特性を考慮した小型風力発電システムの構成要素および全体システムについて簡易なモデル化を行い、具体的な小型風力発電システムに対してパラメータ設定を行った。
- (2) コントローラなしおよびありの場合について、シミュレーションによる発電電力推定値は、フィールド実験値と比較的良く一致しており、モデル化が妥当であることが分かった。

今後は、更に多くのフィールド実験データを用いて制御モデルの調整を行うことにより、予測精度を向上することが課題である。

参考文献

- 1) Yamada, S., Tamura, T. and Mochizuki, S.: Effects of Wing Section on Mean Characteristics and Temporal Torque Variation for a Small Straight-Bladed Vertical Axis Wind Turbine, *Journal of Fluid Science and Technology*, **6**(6), p. 875-886 (2011).
- 2) 山田誠治, 田村智弘, 望月信介: 小型直線翼垂直軸型風車の性能へ及ぼすブレード取付角の影響, 山口県産業技術センター研究報告, **25**, p. 1-6 (2013).
- 3) 山田誠治, 田村智弘, 望月信介: 小型直線翼垂直軸型風車の性能へ及ぼすレイノルズ数の影響およびそれに基づく近似モデル化, 山口県産業技術センター研究報告, **26**, p. 5-9 (2014).
- 4) 田村智弘, 山田誠治: 小型風力発電機用汎用コントローラの開発, 山口県産業技術センター研究報告, **25**, p. 15-20 (2013).
- 5) JIS C1401-12-1, 風車-第 12-1 部: 発電用風車の性能試験方法, 日本規格協会 (2010).
- 6) 牛山泉: 風車工学入門 第 2 版, 森北出版, p. 44-45 (2013).
- 7) 武田洋次, 松井信行, 森本茂雄, 本田幸夫: 埋込磁石同期モータの設計と制御, オーム社, p. 9-13 (2001).
- 8) ユシバル・フェリ, 原津裕之, 佐藤光裕, 若尾真治, 近藤圭一郎, 松岡孝一, 川松達弥: 周波数応答を用いた鉛蓄電池の特性表現手法, 電気学会論文誌 A, **122**(8), p. 715-721 (2002).
- 9) 金東海: パワースイッチング工学, オーム社, p. 54-58 (2003).
- 10) トランジスタ技術編集部編: 電池応用ハンドブック, CQ 出版社, p. 103 (2005).
- 11) 大越哲郎, 山田恵造, 平沢今吉, 宮崎英樹, 江守昭彦: 鉛蓄電池状態検知技術の開発, 新神戸テクニカルレポート, **14**, p. 7-12 (2004).