

中形水平軸風車の動特性解析に関する研究*

(コンピュータシミュレーション結果とフィールド実験結果の比較)

清水 幸丸*¹, 笠原 秀晃*²
関 和 市*³, 古久保 憲 二*⁴

Dynamic Analysis of Middle Scale Horizontal Axis Wind Turbine (Comparison between results of computer simulation and field test)

Yukimaru SHIMIZU, Hideaki KASAHARA,
Kazuichi SEKI, and Kenji FURUKUBO

The paper describes dynamic analysis of middle scale horizontal axis wind turbine. The result of computer simulation is compared with that of field test. Both results agree well. Local circulation method is used to analyze rotation force as a part of simulation theory. The rotor diameter of turbine is 8.2 mφ and the rated output is 8 kW. As the results, the theory which is used in the paper is useful to calculate the wind power in any setting position of wind turbines.

Key Words: Fluid machinery, Horizontal axis wind turbine, Middle scale turbine, Dynamic analysis, Small computer control, Computer simulation, Field test

1. 結 言

近年、風力エネルギーの利用に関する研究と開発が進み、世界的に見ると数万台の中・大形風力発電装置が稼働している。しかし、高効率な風力発電装置を設計する場合、設置予定地点の風況に対する風車の動特性と、それに適した設計上の特徴およびコンピュータ制御の特性などを事前に明らかにしなければならない。同時に、装置を維持する費用を算出したり、発電電力量を事前に見積もる必要がある。そのためには、設置予定地点での風速を測定し、使用する風力発電装置の空力特性や発電特性などを任意に想定して、その風車の動特性および発電可能な電力量を理論的に解明することが必要である。

このような点を考慮し、本論文ではコンピュータ制御された中形水平軸風車発電装置について運動方程式をたて、これを解くことにより理論的な発電電力を求め、コンピュータ制御中の風車の動特性を明らかにす

ることを試みた。そして発電電力、発電電流、翼車回転数、および翼ピッチ角制御の理論値を、実際に自然風中でコンピュータ制御運転している直径8.2mの中形水平軸風車発電装置の測定値と比較検討した。その結果、本論文で用いた風力発電装置に対する理論は有効であることがわかった。翼車の空力解析には、局所循環法⁽³⁾⁽⁴⁾を使用した。

2. 記 号

- I_1 : 風車翼の慣性モーメント
- I_2 : 翼ロータ部の慣性モーメント
- I_3 : 主軸の慣性モーメント
- I_4 : 中間軸の慣性モーメント
- I_5 : 発電機軸の慣性モーメント
- I_6 : 2 kW 発電機の慣性モーメント
- I_7 : 8 kW 発電機の慣性モーメント
- R : 翼車半径
- r : 翼車回転面内の半径位置
- t : 時間
- U : 流入風速
- φ : アジマス角(図9参照)
- Ω : 翼車角速度 $= 2\pi/60 \times N$

* 平成元年11月8日 流体工学部門講演会において講演、原稿受付 平成元年5月11日。

¹ 正員、三重大学工学部 (〒514 津市上浜町 1515)。

² 学生員、三重大学工学部。

³ 准員、東海大学工学部 (〒259-12 平塚市北金目 1117)。

⁴ 准員、鈴木自動車工業(株)。

3. 実験装置および方法

図1は実験に用いた水平軸風車の全体図を示す。翼は3枚で、翼車を風車タワー上流側に置くアップウインド形である。また、翼ピッチ角はコンピュータ制御によって、パワーシリンダにより定格出力までは最大出力が得られるように、また、定格出力を超える状態では、過回転、過電圧、過電流にならないように、設定できる。翼車回転軸高さは地上から7.5 m、翼車直径は8.2 mである。風向制御はギヤードモータを用いてコンピュータで行った。風車タワーは、修理や暴風などの対策として可倒式となっている。タワーは中央部

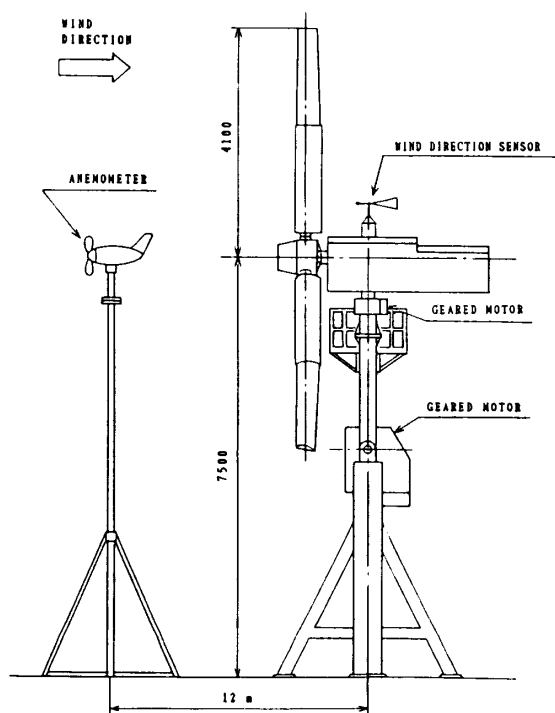


図1 風車の全体図および配置図

の軸を中心にして、ギヤードモータにより起倒できる。プロベラ形風速計は風車タワーから12 m離れた位置の、翼車回転軸と等しい高さに設置されている。

図2は風車ナセル内部と操作盤の関係を示す。翼車回転軸には、翼ピッチ角制御用パワーシリンダが接続されていて、コンピュータにより駆動される。翼車の回転は増速比1:9のギヤードボックスを介して主軸に伝達される。主軸には出力2 kW および8 kW の発電機が直列に接続されている。2台の発電機は電氣的に切換えられるようになっていて、穏やかな風況のときは2 kW 発電機を使用し、強風時には8 kW 発電機を使用する。これらの装置は主制御盤にて操作される。2 kW 発電機および8 kW 発電機の発電電力は、それぞれの発電機制御盤に入る。

図3は実験に使用した翼の諸元を示す。この翼は中央部で二分割された複合翼である。翼根部は等弦長翼で、材質にはジュラルミン JIS 2017 の薄板を使用し、翼内部に補強材が入れてありリベット止めされている。翼先端側半分はテーパ翼で、材質には木を使用し、その表面に強度を増すためのケブラー繊維が樹脂で巻き固めてある。さらに風速 8 m/s、周速比 5.4 の状態

表1 実験装置の回転部分の諸元

	質量 (Kg)	回転半径 (m)	慣性モーメント (Kg・m ²)	定格回転数 (rpm)
ブレード(1枚)	42.5	1.48	$I_1 : 93.092$	—
ブレードロータ部	140	0.163	$I_2 : 3.720$	—
主軸部	221	0.173	$I_3 : 6.614$	—
中間軸	90	0.072	$I_4 : 0.467$	—
発電機軸	51	0.066	$I_5 : 0.222$	—
2kW発電機	—	—	$I_6 : 3.3 \times 10^{-3}$	600
8kW発電機	—	—	$I_7 : 0.018$	900

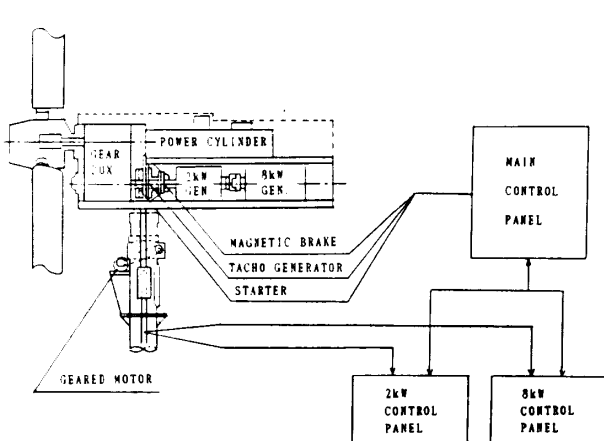


図2 風車ナセル内部および操作系接続図

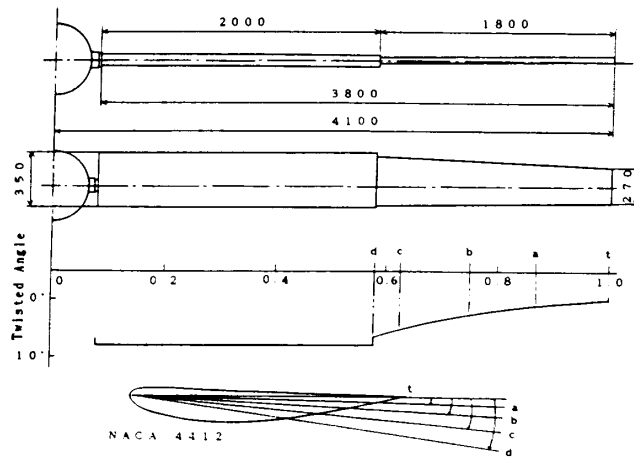


図3 翼諸元とねじり角分布

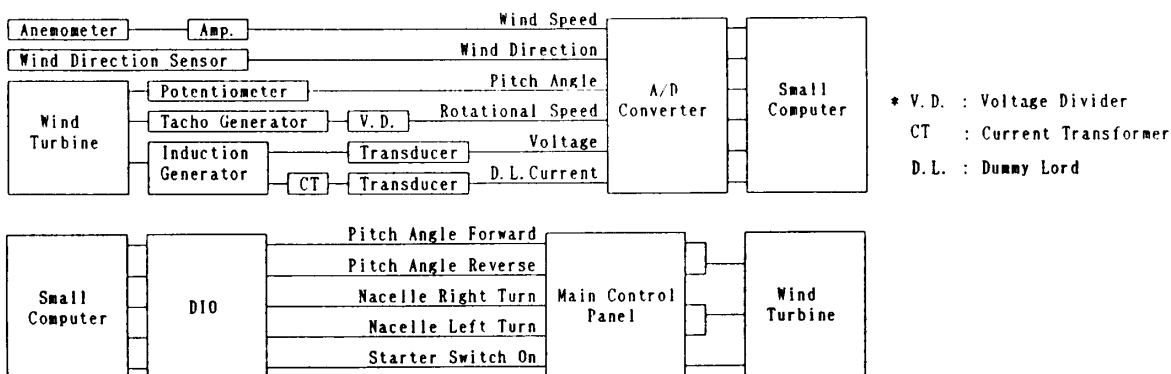


図 4 データ入力系および出力系のブロック線図

で、翼先端から 1.8 m までは最適迎角となるように適切なねじり角がつけられている。翼断面形状は、翼根部のジュラルミン製部分に NACA 4415 を、また翼先端部の木製部分に NACA 4412 を用いている。

表 1 は実験装置回転各部の諸元を示す。2 kW 発電機および 8 kW 発電機の定格回転数は、それぞれ 600 rpm および 900 rpm で、翼車回転数に換算するとそれぞれ 66.7 rpm および 100 rpm である。

図 4 には、本実験のデータ入力系および制御信号出力系のブロック線図を示す。プロベラ形風速計から風速、小形風向計から風向、タコジェネレータから翼車回転数、ポテンショメータから翼ピッチ角、そして 2 kW 発電機および 8 kW 発電機からは、それぞれの発電電圧および発電電流、以上 6 種類の測定データを DC 5 v 以下の信号に変換し、A-D 変換器を介してパーソナルコンピュータで処理する。処理データは記録と同時に風車制御プログラムに入力され、判断された各命令を DIO を介して主制御盤に送り、風車の翼ピッチ角制御、風向制御およびスタータ制御を行う。図 5 にコンピュータ制御の概要をフローチャートで示す。この制御プログラムは、大別して“高回転用制御ループ”、“低回転用制御ループ”、“風向制御”、“スタータ制御ループ”、の四つの部分からなる。これらは測定データに基づく種々の判断要素から、現在必要とされる処理を実行するが、発電運転中の制御には主に高回転用制御ループが実行されている。この制御ループは、およそ 1 s 間隔でループ処理を行う。なお、制御方法の詳細については別報(6)で述べているので、ここでは説明を省略するが、主要点を述べると次のようになる。前述したが、翼ピッチ制御では、回転数、電流、電圧のいずれか一つの値が、過回転、過電流、過電圧に近い値になった状態で、翼ピッチ角を変えてフェザリング状態にする方法を用いた。

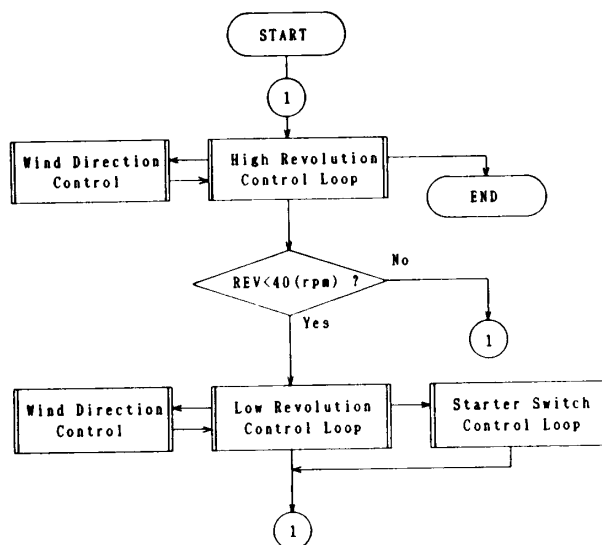


図 5 コンピュータ制御の概要

4. 実験結果の表示式

風車発電電力 P [W] は次式で表せる。

$$P = \sqrt{3} \times E \times i \times \cos \phi \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 E は発電電圧 (V)、 i は発電電流 (A)、 $\cos \phi$ は力率 (=1 に設計した) である。

発電電力に変換されるトルク T_p [N·m] は次式で表せる。

$$T_p = \frac{P}{\Omega} = \frac{60 \times P}{2\pi \times N} \dots\dots\dots (2)$$

図 6 は 2 kW 発電機および 8 kW 発電機の発電特性 (実験結果を整理して代表曲線で表した) をそれぞれ示す。実線は発電電流 i と翼車回転数 N [rpm] の関係を、破線はトルク T_p と N の関係をそれぞれ示す。2 kW が図 6 (a)、8 kW が図 6 (b) である。8 kW 発電機では翼車回転数が 69.2 rpm から 91.0 rpm の範囲で、その発電特性に履歴が生じる。 T_p と N の関係を実験

式で表すと次のようになる。

2 kW 発電機では

$$T_p = 1.37 \times N - 71.9 \quad (52.4 \leq N < 59.5) \dots (3)$$

$$T_p = 47.5 \times N - 2817 \quad (59.5 \leq N) \dots (4)$$

8 kW 発電機では、翼車回転数が 91.0 rpm に到達するまでは、

$$T_p = 1.40 \times N^2 - 304 \times N - 15726 \quad (85.1 \leq N) \dots (5)$$

翼車回転数が 91.0 rpm に到達後は、それ以上の範囲では式(5)と等しく、それ以下の範囲では、

$$T_p = -0.457 \times N^2 + 89.0 \times N - 3965 \quad (69.2 \leq N < 91.0) \dots (6)$$

である。また、 i と N の関係を実験式で表すと次のようになる。ただし、電圧は電圧調整器(AVR)でほぼ一定になる。

2 kW 発電機では、

$$i = 0.0448 \times N^2 - 4.844 \times N + 130.513 \quad (57.2 \leq N) \dots (7)$$

8 kW 発電機では、翼車回転数が 91.0 rpm に到達するまでは、

$$i = -0.0514 \times N^2 + 10.901 \times N - 555.306 \quad (85.1 \leq N) \dots (8)$$

翼車回転数が 91.0 rpm に到達後は、それ以上の範囲では式(8)と等しく、それ以下の範囲では、

$$i = -0.0267 \times N^2 + 4.717 \times N - 198.548 \quad (69.2 \leq N < 91.0) \dots (9)$$

図7には、風車軸系の機械損失トルク T_{ML} (N·m) および発電損失トルク T_{GL} (N·m) の検定実験結果をそれぞれ示す。 T_{ML} と N の関係式を実験式で示すと次式になる。

$$T_{ML} = 79.3 \times 10^{-3} \times N + 1.76 \dots (10)$$

発電損失トルク T_{GL} (N·m) は、発電機が発電し始めると生じる損失トルクで、次のようになる。

2 kW 発電機では、

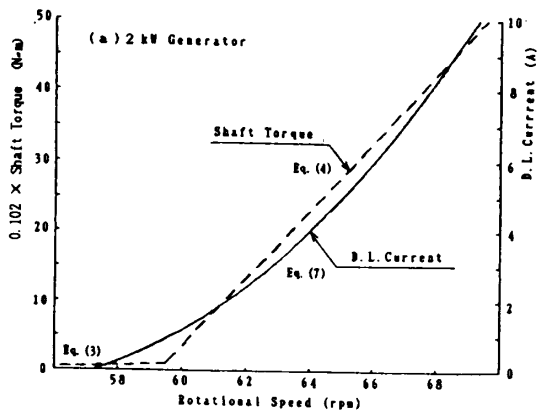
$$T_{GL} = 0.637 \times 10^{-3} \times P \dots (11)$$

8 kW 発電機では、

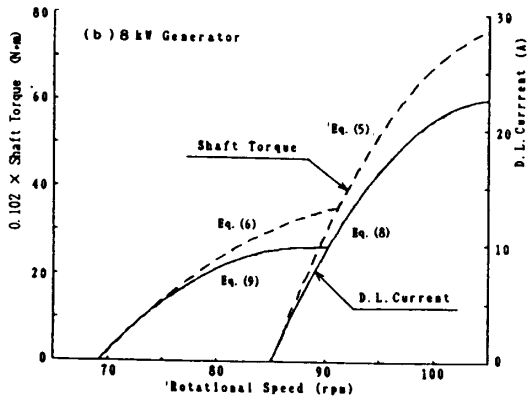
$$T_{GL} = 0.352 \times 10^{-3} \times P \dots (12)$$

5. 理論および解析法

5.1 運動方程式の解法 図8に風力発電装置の運動をモデル化した模型を示す。この図8において、風車軸の角速度を Ω_a 、中間軸の角速度を Ω_b 、そして発



(a) 2 kW 発電機



(b) 8 kW 発電機

図6 発電機の発電特性

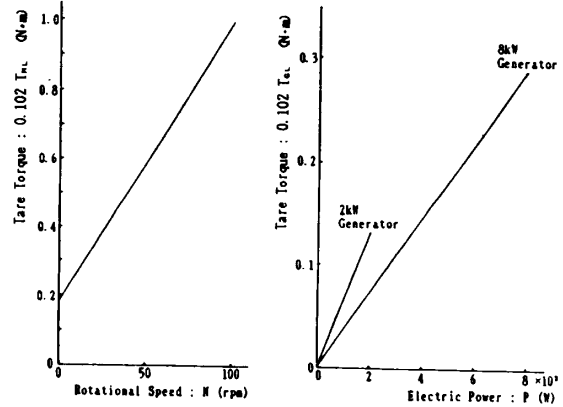


図7 実験装置の損失トルク

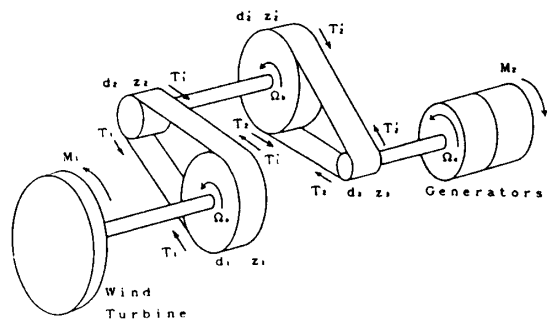


図8 運動方程式のモデル

電機軸の角速度を Ω_c とし、それぞれの軸に関する慣性モーメントを I_a, I_b, I_c , それぞれのプーリの直径を d_1, d_2, d_2', d_3 , その歯数を z_1, z_2, z_2', z_3 とする。 T_1, T_1', T_2, T_2' はベルトにかかる張力を示すもので、 $T_1 - T_1'$ を $F_1, T_2 - T_2'$ を F_2 とする。

各軸の運動方程式は次の3式ようになる。

$$I_a \frac{d\Omega_a}{dt} = M_1 - \frac{d_1}{2} F_1 \dots\dots\dots (13)$$

$$I_b \frac{d\Omega_b}{dt} = \frac{d_2}{2} F_1 - \frac{d_2'}{2} F_2 \dots\dots\dots (14)$$

$$I_c \frac{d\Omega_c}{dt} = -M_2 + \frac{d_3}{2} F_2 \dots\dots\dots (15)$$

ここで、 M_1 は風車の発生トルク、 M_2 は負荷トルクである。また、3本の軸の間には次の関係がある。

$$\Omega_b = \frac{d_1}{d_2} \Omega_a \dots\dots\dots (16)$$

$$\Omega_c = \frac{d_2'}{d_3} \Omega_b = \frac{d_1 d_2'}{d_2 d_3} \Omega_a \dots\dots\dots (17)$$

式(16)を t について微分し、式(14)に代入して Ω_b を消去。さらに、式(13)より F_1 を消去すると

$$\left\{ I_a + \left(\frac{d_1}{d_2} \right)^2 I_b \right\} \frac{d\Omega_a}{dt} = M_1 - \frac{d_2' d_1}{2 d_2} F_2 \dots\dots\dots (18)$$

式(17)を t について微分し、式(15)に代入して Ω_c を消去。さらに、式(18)より F_2 を消去すると

$$\left\{ I_a + \left(\frac{d_1}{d_2} \right)^2 I_b + \left(\frac{d_1 d_2'}{d_2 d_3} \right)^2 I_c \right\} \frac{d\Omega_a}{dt} = M_1 - \left(\frac{d_1 d_2'}{d_2 d_3} \right) M_2 \dots\dots\dots (19)$$

これが図8における風車軸に関する運動方程式である。ここで、

$$I_a = I_1 + I_2 + I_3, I_b = I_4, I_c = I_5 + I_6 + I_7, \Omega_a = \Omega$$

$$M_1 = T_i, \left(\frac{d_1 d_2'}{d_2 d_3} \right) M_2 = T_l$$

である。よって運動方程式は、

$$I \frac{d\Omega}{dt} = T_i - T_l \dots\dots\dots (20)$$

である。

I は全慣性モーメントであり、実験に使用した風力発電装置の場合、

$$\frac{d_1}{d_2} = \frac{z_1}{z_2} = 3.75, \frac{d_2'}{d_3} = \frac{z_2'}{z_3} = 2.4$$

であるので次式で表せる。

$$I = I_1 + I_2 + I_3 + 3.75^2 \times I_4 + 9^2 \times (I_5 + I_6 + I_7) \dots\dots\dots (21)$$

各部分の慣性モーメントの数値は表1に示してある。

T_i は翼車発生トルクであり、風速、翼車回転数そして翼ピッチ角を用いて局所循環法(LCM)により求められる。局所循環法の詳細は文献(3),(4)に記載されているので省略する。 T_l は次式で表される。

$$T_i = \sum_{b=1}^b \int_{r_0}^{R} \left\{ \rho U_k \Gamma_k \cdot \sin\left(\phi_k - \frac{v_{pk}}{U_k}\right) - \frac{1}{2} \cdot \rho U_k^2 l_{ck} \cdot C_D \left(\phi_k - \frac{v_{pk}}{U_k} - \theta_k\right) \times \cos\left(\phi_k - \frac{v_{pk}}{U_k}\right) \right\} r dr \dots\dots\dots (22)$$

ϕ_k : 流入角, v_{pk} : 先行翼の影響も考慮した全誘導速度の主流に垂直成分, U : 流入風速, C_D : 抗力係数, Γ_k : 翼素回りの循環, θ : 翼ピッチ角, 添字 k は翼素の番号 b : 翼枚数, r_0 : 内側翼端半径, l_{ck} : k 番めの翼素の翼弦長 T_L は全負荷トルクであり、発電電力に変換されるトルク T_p [式(3)~(6)], 発電損失トルク T_{GL} [式(11), (12)], 機械損失トルク T_{ML} [式(10)]を加算したものである。

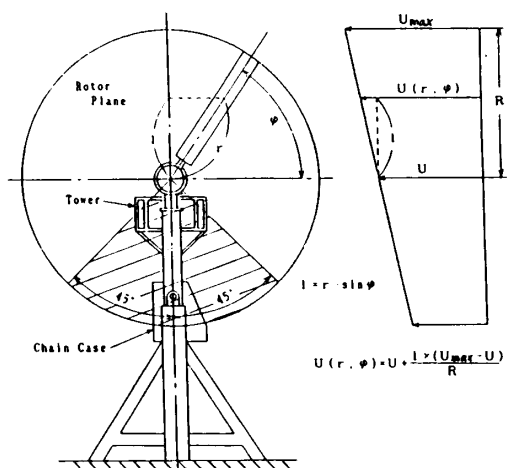
$$T_L = T_p + T_{GL} + T_{ML} \dots\dots\dots (23)$$

各負荷トルクは翼車回転数のみの関数なので、全負荷トルクも翼車回転数のみの関数として与えられる。

次にこの運動方程式の解法について述べる。

一般に、非線形の常微分方程式は解析解が求められない。この運動方程式も非線形の常微分方程式であるので、数値解を求めることにする。解法としては、四次のルンゲ・クッタ法を用いることにした。

5.2 風速のモデル 実際の自然風の流は複雑であるが、風車を設置している風況では、平均的に見ると地表面に近づくにつれて風速は遅くなり、逆に上



(a) 回転面の定義 (b) 速度分布近似

(c) タワーなどの影響による減速領域モデル

図9 地上風速分布の近似モデル

空にいくほど風速は速くなる。このことから、理論解析に当たっては流れを次のようにモデル化し、翼車回転面上の風速分布にした。

図9(b)には直線近似による速度分布のモデルを示す。測定風速 U に対して U_{\max} を経験的に決定し、任意の半径位置およびアジマス角における風速 $U(r, \varphi)$ を求める。測定風速としては、高さ7.5 m で測定した風速の実測値を用いる。本研究では $U_{\max} = 1.3 \times U$ (m/s) とした〔文献(2)参照〕。

風速タワー周囲の風速は、タワーおよびチェーンケースなどのせき止め効果により減速する。図9(a)の斜線部分、風車タワー中心線から両側 45° の範囲で減速すると仮定した。図9(c)はその際の実速度分布モデルである。図中の式に示すように減速率 k を設定し、この領域内では風速が減速するように計算を行った。本研究では、チェーンケースなどの影響が大きいと判断して $k=0.5$ と設定した。

6. 実験結果と考察

6.1 風車発電のコンピュータシミュレーション

本研究では、実際の風車をコンピュータ制御で運転し、各種の値を計測する。また、そのときの実測風速値を用いて理論的なコンピュータ制御を行う。この際、風車出力は局所循環法理論(LCM)を用いて求める。ここでは、これらの純理論の発電電力、発電電流、翼車回転数および翼ピッチ角を実測値と比較する。

コンピュータシミュレーションの方法は、まずシミュレーション開始時の各測定値(翼車回転数、翼ピッチ角、風速)を初期値として入力する。得られた理論翼車回転数と理論発電電流から、実際の風車制御プログラムに基づき、翼ピッチ角操作を計算上で再現する。その後は実測風速値と各理論値から、次の計算区間について順次、各値を求める。このようにして、理論上の風車制御による風車の動特性を予測するものである。このコンピュータシミュレーションでは、実際の風速を用いるので、その精度は風速測定値に大きく依存する。本研究では実測風速に、風車から12 m離れた位置に設置したプロペラ形風速計を使用した。このため、計算に使用した風速値と風車が受けている風速には、多少の違いが生じる場合がある。さらに、理論計算に用いる翼車回転面全体の速度分布は、図9に示すような簡略化した近似モデル風速分布であり、実際の乱れを伴った複雑な風速分布とは、ある程度異なる。したがって、理論値と実測値は、もともと100%一致することはない。

風力発電の場合、理想的には翼車回転数は一定とい

うことになっている。しかし、1台の風車を単独で運転する場合には、入力エネルギーである自然風が零から強風まで変化するので、風車の運転・停止の繰返しは避けられない。このため翼車回転数には、ある程度の回転数変動幅をもたざるを得ない。このような運転上の制約条件を考慮したうえで、以下の考察では発電電力、発電電流に加えて、翼車回転数と翼ピッチ角の実測値と理論値の比較も行う。

6.2 各種実測値とコンピュータシミュレーション値の比較 発電電力は、理論計算によって求められた翼車回転数 N を式(3)~(6)に代入して発電電力に変換されるトルク T_p を求め、式(2)から求められる。発電電流は、同様に N を式(7)~(9)に代入することによって求められる。

図10には、8 kW 発電機を使用して行った3 minの実験結果、およびそれに対応する理論値を示す。上から、発電電力、発電電流、風速、翼車回転数、そして翼ピッチ角である。風速を除き、実測値を細点線で、理論値を太線で表す。

発電電力および発電電流は30 s付近、130 s付近、150 s付近で良い一致を示す。また、80 sから100 sの区間、130 sから140 sの区間、155 s以降で理論値が実測値に比べて大きな値を示し、さらに20 s付近、115 s付近、140 s付近で両者の間にピーク値のずれが見られる。全体的に見ると理論値のほうが連続的でなめらかな出力特性を示す。

翼車回転数の理論値と実測値を比較する。両者の値

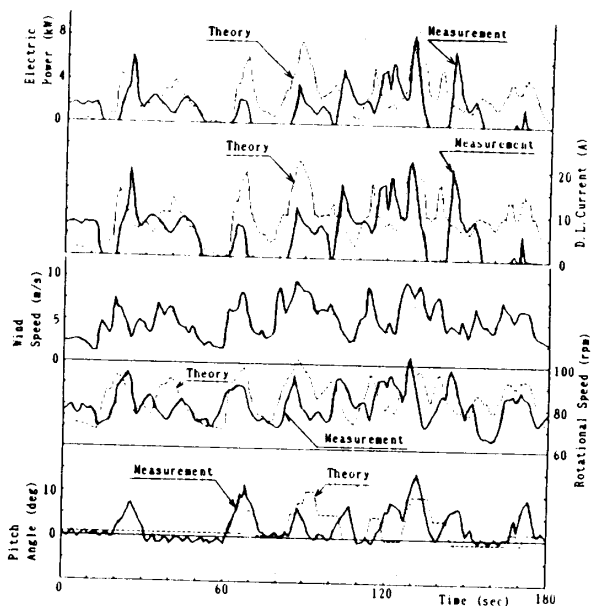


図10 8 kW 発電機の測定風速および発電電力、発電電流、翼車回転数、翼ピッチ角の実測値および理論値

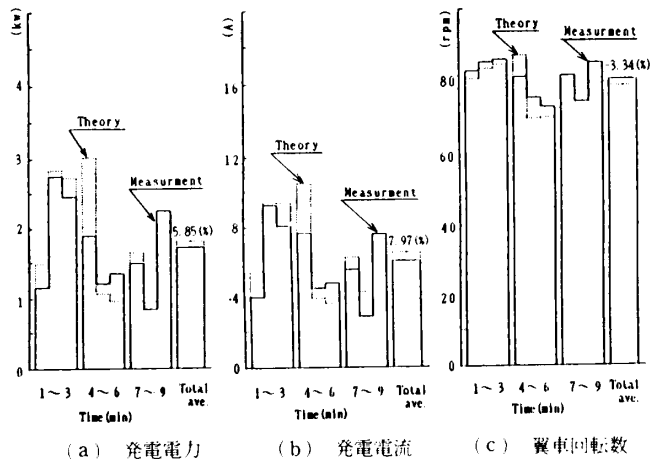


図 11 8 kW 発電機の理論および実測の平均値の比較

は電力、電流値よりいちだんと一致度が良くなる。しかし、ピーク値のずれはしばしば見られる。この理由の一つに、風車と風速計設置位置の約 12 m のずれが考えられる。すなわち、ある瞬間には風速計の風速と翼車回転面を通過する風速の間にずれが生じるためと考えられる。

つづいて、ピッチ角の値を検討する。理論、実測両者の傾向は全体的に良く似ているが、部分的には大きくずれる場合が生じる。さらに、理論値はあまり変動しないが、実際のピッチ角は絶えず小刻みに変動している。この理由は、実際のピッチ角制御は安全運転のため、翼車の過回転を極度に恐れ、神経質に、電流、電圧、回転数および風速の四者の値を検出し、それに基づいてピッチ角が決定されるようになっている。すなわち、その中のどれか一つの値でも安全運転の条件からはずれると、その値が安全側へ移るまでピッチ角を増加させる。また、発電量が減少すればなるべく増加するように、ピッチ角を減少させることになる。したがって、実際のピッチ角は絶えず小さな変動を繰り返す。これに対して理論ピッチ角は、同じ制御の情報である電流、電圧、回転数がともになめらかに変化するため、頻ばんな角度変化は必要でなくなる。

このように理論値と実測値は全体的、かつ平均的には、比較的良い一致が見られるが、個々には相違が生じてくる。この理由を再度述べなおすと次のようになる。実際の風車では、発電運転過程で、突風のために過電圧、過電流が発生する。しかも、これらの値はパルス的に鋭いピーク値を伴っている。発電装置は発電機保護のために過電圧・過電流時に、ブレーカをトリップ(負荷遮断)させるようにできている。ところが、風車発電では発電機系統をトリップさせると無負荷運転状態となり、極めて危険である。したがって、実際の運

転では簡単に過電圧・過電流でトリップしないように、各種ブレーカのトリップ容量を発電機焼損事故につながらない程度に調整する。それと同時に、万一トリップしてしまった場合には、風車が過回転にならないように、翼ピッチ角制御を行うようにコンピュータプログラムが作られている。この点の詳細については、別報⁶⁾を参照願いたい。コンピュータシミュレーションでは、ここで述べたパルスの過電圧・過電流対策用のブレーカ容量調節を考慮することができないので、理論値は比較的滑らかな値となり、実測値は変動の激しい値になる。しかも、実測値には、トリップ状態になり、それから再び復帰する動作が含まれてくるため、理論値と大きくくずれる場合が生じる。

なお、2 kW 発電機についても同様の結果が得られたので、ここでは省略する。

図 11 には 8 kW 発電機の発電電力、発電電流および翼車回転数の、1 min および 9 min の理論および実測の平均値の比較を行う。実測値を実線で、理論値を細点線で表す。9 min 平均については実測値に対する理論値の誤差を数値で示す。このように、1 min の平均値比較では部分的に大きな誤差が生じることがあるが、9 min の比較で見ると、両者は極めて良い一致を示す。すなわち、本研究で使用した理論解析法は長期的な風車性能の予測には有効であることがわかる。

7. 結 言

実際の中形水平軸風車の各設計資料(データ)と実測の風速測定値を使用して、コンピュータ制御中の風車の動特性を理論的に解析し、実験結果と比較した結果、次の結果を得た。

- (1) 風車発電装置をコンピュータ制御運転して得られた各種実測値と風車回転力を局所循環法を用いて理論解析した結果は、発電電力、発電電流および翼車回転数について比較的良く一致した。
- (2) 風速測定値と翼車回転面での実風速の差、および発電装置の機械調整のため、理論値と実測値に部分的な相違は不可避であるが、時間積分した出力の合計は両者良く一致する。したがって、ここで用いた理論は風車発電装置の出力予想に有用である。

文 献

- (1) Abbott, I. H. and Von Doenhoff, A. E., *Theory of Wing Section*, Dover Publication Inc.
- (2) 清水・ほか 5 名, 前置形および後置形水平軸風車に働く変動力に関する研究, 機論, 53-496, B(1987), 3722.
- (3) Azuma, ほか, An Extension of The Local Momentum Theory to the Rotors Operating in Twisted Flow Field.

1056

中形水平軸風車の動特性解析に関する研究

- Proc. 7th Europ. Rotorcr. Power. Lift Aircr. Forum*,
Paper No. 5(1981-9).
- (4) Nasu, K. and Azuma, A., An Experimental verification
of the local circulation method for a horizontal axis
wind turbine, *Res. Natur Energy*, 8(1984), 245-252.
- (5) 谷口, 機械力学, I 機構と運動, 養賢堂.
- (6) 清水・ほか4名, 可変ピッチ水平軸風車の発電に関する研
究, 風力エネルギー, 12-11(1988), 9-13.
-