風力発電システムのシミュレーションと基本特性
Study on simulations and elementary
characteristics of a windmill generator system

鈴木 茂 行^{*}
Takayuki SUZUKI

SUMMARY

The world energy problem has stimulated interest in the application of wind power. The attempts have been made to develop wind power systems as auxiliary supplies for local energy.

The main motivation for this study is to clarify the performance of a wind power system. In this paper, the performance has been analyzed by means of analog simulation. From the results of the simulation, it is seen that the characteristics are affected considerably nature of wind and each parameter of a wind power system.

1. まえがき

現代文明を支えている最も重要な構成要素としてエネルギーがある。昭和48年の第一次石油ショック以来、従来の化石エネルギーの代替エネルギーの一つとして、自然エネルギーの利用についても研究・開発が急速に進められている。自然エネルギーの中でも風力エネルギーは普遍性に富み地球上で豊富であり、エネルギー・アナリシスの面からも比較的エネルギー比が大きいと言われて

いるため、¹⁾多くの国から注目され研究開発が行われている。風エネルギーの利用法としては、農林・水産における利用、民生利用、通信電源等の比較的パワーが小さいものの利用法と、²⁾従来の電力系統に連係するためのパワーの大きな場合とがある。前者の実用例は我国でも多くなってきているが、後者についてはまだ十分開発されていないのが現状である。そして、今後の本格的な利用のためには、風力エネルギーシステムの不安定性や経

* 徳島大学工学部 教授 Member of JAWE, Prof. Dept. of Elect. Eng'ng, Tokushima Univ.

(昭和57年10月15日受理)

済的技術問題等まだ解決されなければならない点も数多く残っている。

本論文では、風力発電システムのアナログシミュレーションを行い、風の性質およびシステムパラメータ（風車トルク係数（出力係数）、負荷形態および慣性モーメント等）が特性にどのような影響を与えるかについて基本的な検討を行なっている。特に、従来の研究が平均風速に対して解析検討されているのに比して、本論文は風の性質すなわち風の変動周波数、風速変動幅も考慮して、風力発電システムの動特性についても基礎的な検討を行なっている。

その結果、システムパラメータや風の特徴が風力発電システムに与える影響が明確になったので以下に報告する。

2. アナログシミュレーション

通常、風力発電システムの基本方程式は次式で表わされる。³⁾

$$T_w = \frac{1}{2} \rho A C_T(\lambda) V_w^2 \quad (1)$$

$$T_w = J \frac{dN}{dt} + T_g + fN + T_c \quad (2)$$

(1)式は風車の発生トルク方程式であり、(2)式は負荷トルク方程式である。なお、風車と負荷の間には増速するための伝達装置が挿入される場合もあるが、その時の速度は風車側に換算する。ここで上式の各記号は次の通りである。

T_w : 風車発生トルク ($N \cdot m$), ρ : 空気密度 ($N \cdot s^2 / m^4$), R : 風車半径 (m), A : 風車受風面積 (m^2), $C_T(\lambda)$: 風車トルク係数, V_w : 風速 (m/s), J : 風車および負荷の慣性モーメントの和 ($N \cdot m \cdot s^2 / rad$), T_g : 負荷トルク ($N \cdot m$), T_c : クーロン摩擦トルク, f : 粘性摩擦係数 ($N \cdot m / rad / s$) である。

また、風車出力 P_w および負荷出力 P_g は

$$P_w = \rho A C_p(\lambda) V_w^3 / 2 \quad (3)$$

$$P_g = T_g N \quad (4)$$

である。ここで、 $C_p(\lambda)$: 風車出力係数である。風車出力係数 $C_p(\lambda)$ と風車トルク係数 $C_T(\lambda)$ との関係は、

$$C_p(\lambda) = \lambda C_T(\lambda) \quad (5)$$

であり、周速比 λ は次式で定義されている。

$$\lambda = RN / V_w \quad (6)$$

以上の風力発電システムの基本方程式で、風車トルク係数 C_T は周速比によって大幅に変動し、負荷トルクは負荷形態によって速度の関数として変化するために、非線形微分方程式となる。そこで、風力発電システムの特性を検討する場合に、次のパラメータを取り上げることとする。

(a) 風車トルク係数（風車出力係数）⁴⁾

これは、風車の種類、翼の形状、ピッチ角等で大幅に変動するので、Fig.1 のような代表的な風

Fig.1 風車トルク係数
(Windmill rotor torque coefficient)

車トルク係数について検討する。

(b) 負荷トルク^{5)~8)}

負荷トルクは次式で表わされるものについて検討する。

$$T_g = K_{t1} N \quad (7)$$

$$T_g = K_{t2} N^2 \quad (8)$$

なお、負荷トルク T_g が速度 N に比例する場合は、発電機に抵抗あるいはバッテリーが接続された場合であり、負荷トルクが速度の2乗に比例する場合は、発電機の界磁電流制御を行なった場合や直

Fig.2 風力発電システムのアナログシミュレーション

Analog simulation of windmill generator system

接熱変換器を使用した場合に対応している。

(c) 慣性モーメント

これは、風車翼の材質や負荷形態（例えば増速装置の増速比や発電機の回転子の大きさ等）によって変わる。

(d) 風の性質⁹⁾

周知のように風は時間に対して大幅に変動するので、風の性質の中で、平均風速、風速の変動振幅および変動周波数の変化について検討する。この場合の風速 V_w は次式で表わされる。

$$V_w = V_{w0} + V_a \sin ft \quad (9)$$

ここで、 V_{w0} ：平均風速(m/s)、 V_a ：風速変動振幅(m/s)、 f ：変動周波数(Hz)である。

さて、(1)式、(2)式、(6)式と(7)式あるいは(8)式を用いてアナログシミュレーションするとFig.2(a)、(b)となる。(具体的なシミュレーション方法については付録を参照して下さい。)同図(a)は負荷トルクが $T_g = K_{t1}N$ の場合で(以後これを負荷Aとする。)、(b)図は負荷トルクが $T_g = K_{t2}N^2$ の場合(これを負荷Bとする。)である。なお、シミュレーションに用いた各パラメータの値をTable 1に表にしている。

Table 1 システムパラメータ
(System parameter)

ρ	: 1.204 Ns ² /m ⁴
R	: 1 m
J	: 0.1-0.5 Nms ² /rad
f	: 0.004 Nm/rad/s
T_c	: 0.5 Nm
K_{t1}	: 0.05-0.4 Nm/rad/s
K_{t2}	: 0.0005-0.004 Nm/rad/s ²

なお、シミュレーションはデジタル計算機でも出来るが、風車トルク係数 C_T の設定の容易さ、演算速度の速さの点からアナログシミュレーションで行なっている。

Fig.3 負荷トルク係数—出力特性(負荷A)
(Effect of output torque coefficient on generator power)

Fig.4 負荷トルク係数—出力特性(負荷B)
(Effect of output power coefficient on generator power)

3. 定常特性

本節では、前節のアナログシミュレーションを用いて、風車トルク係数および負荷トルク形態によって、平均風速（風速が時間に対して変動していない場合）時の風力発電システムの定常特性がどのように変化するかを明らかにする。

まず、風速一定で風車トルク係数をパラメータにして、負荷トルク A ($T_g = K_{t1}N$) の場合の負荷トルク係数 K_{t1} と出力の関係を図示したのが Fig.3 である。同図より負荷トルク係数が大きくなっても出力は必ずしも大きくはならず、出力を最大にする負荷トルク係数が存在することが分る。また、同図 (b) より風車トルク係数 C_T の最大値が同一でも、その最大値が周速比の小さい所で現われるほど出力が小さいことが分る。従って、平均風速が大きな場合は風車のブレードピッチを

Fig.5 負荷トルク係数—出力特性
(Effect of output torque coefficient on generator power)

変えて負荷トルク係数の最大値が周速比の大きな箇所で見られるようにすべきである。負荷トルク B ($T_g = K_{t2}N^2$) の場合における負荷トルク係数 K_{t2} と出力の関係が Fig.4 に図示してある。同図からこの場合も負荷トルク A の場合と同様な特性であることが分る。たゞ、 $K_{t2} \geq 0.001$ の範囲では負荷トルク A の場合ほど負荷トルク係数 K_{t2} によって出力が変化しないことが分る。

Fig.5 に風速をパラメータとした場合の負荷トルク係数と出力の関係を図示してある。同図 (a) からも負荷トルク係数に対して最大出力が存在することが分る。最大出力は風速が大きくなるほど負荷トルク係数の大きな箇所で見えている。一方負荷トルク B の場合もほぼ同様な傾向を示しているが、その最大出力はほぼ同一の負荷トルク係数で見えている。

次に負荷トルク係数を一定にして風速と出力の

Fig.6 風速—出力特性 (負荷 A)
(Relation between wind-speed and generator power)

Fig. 7 風速—出力特性（負荷 B）

（Relation between wind-speed and generator power）

関係を図示したのが Fig. 6, Fig. 7 である。Fig. 6 (a) および Fig. 7 (a) より風車トルク係数がパターン A で変化するとき、風速の増加とともに出力が増加しているが、Fig. 6 (a) では風車トルク係数の最大値の位置が周速比に対して変化しても比較的影響が少ないことが分る。

Fig. 8, Fig. 9 は風速を一定にして負荷を変化させた場合の風車速度と出力の関係を図示してある。同図より出力を最大にする風車速度が存在していることがよく分る。この場合も風車トルク係数 C_T がパターン B の形で変化するとき、最大風車トルク係数の位置が周速比の小さい所で現われる場合に、風車速度、出力とも低くなることが分る。

Fig. 8 風車速度—出力特性（負荷 A）

（Relation between shaft speed and generator power）

Fig. 9 風車速度—出力特性（負荷 B）

（Relation between shaft speed and generator power）

以上の解析結果を要約すると次の様になる。

- (1) 任意の風速時に最大出力が得られる負荷トルク係数 K_{t1} , K_{t2} が存在する。
- (2) 負荷トルク係数が小さい場合には、風車トルク係数 C_T の値が零になる周速比の位置を大きな値にすれば (Fig.1 (b) の C_T 参照), 大きな出力を得ることが出来る。
- (3) 負荷トルク A ($T_g = K_{t1}N$) と負荷トルク B ($T_g = K_{t2}N^2$) を比較すると、負荷トルク B の場合は、一度負荷トルク係数を最大出力が得られるように設定すれば、最大出力は風速変化の影響を受けない。すなわち、負荷トルク B の場合には風速変化にかかわらず常に最大出力が得られるようにすることが出来る。

4. 風速変動時特性

通常風は変動しているので、風力発電システムの特性は定常状態を仮定した平均風速に対する検討ばかりでなく、風速が変動した場合に出力がいかに関与されるかについても検討する必要がある。そこで、本節では風車トルク係数がパターン A の C_{T3} の場合 (これが一般的なプロペラ形風車の場合) について、風速の変動および負荷トルク係数や慣性モーメントが変化した場合の風力発電シ

Fig.10 風速変動周波数に対する平均出力特性 (負荷 A)

(Effect of frequency of windspeed on generator power)

Fig.11 風速変動周波数に対する平均出力特性 (負荷 B)

(Effect of frequency of windspeed on generator power)

テムの特性について述べる。

Fig.10 および Fig.11 は風速を (9) 式と仮定した場合に、風速の変動周波数 f が変化した時に、変動周波数の一週期の平均出力が変動周波数によっていかに変化するかを示している。負荷トルク A が Fig.10 で、負荷トルク B が Fig.11 であるが、両方とも変動周波数の振幅 V_a が小さい場合はその周波数にかかわらず平均出力はほぼ一定であるが、その振幅 V_a が大きくなると変動周波数が 0.1 ~ 1 Hz の範囲で減少することが分る、しかし、1 Hz 以上の変動周波数領域ではその平均出力はほぼ一定となっている。これは、変動周波数が低い所では風速変化に対して風力発電システムは追従して運転されているが、変動周波数が高い領域では、システムの応答が風速の変化に追従しなくなるために出力が低下している。また、負荷トルク B の場合が、負荷トルク A に比較して平均出力の減少の割合が少ないことが分る。

次に、風速の変動周波数振幅 V_a が平均出力にいかに関与するかを示したのが、Fig.12, Fig.13 である。同図より、変動周波数が高い場合は振幅が大きくなっても、それほど平均出力は増加しないが、変動周波数が低い場合には平均出力がその振幅 V_a が 6 (m/s) の時に平均風速に対して

Fig.1.2 風速変動振幅—平均出力特性
(負荷A)

Fig.13 風速変動振幅—平均出力特性
(負荷B)

(Relation between wind-speed
amplitude and generator power)

約20%増加していることが分る。従って、通常風力発電システムの出力を平均風速に対して計算しているが、自然風で風力発電システムを運転している実際の場合には、その出力が大きくなることが分る。

Fig.14とFig.15は負荷トルク係数(K_{t1} と K_{t2})が変化した場合の平均出力を図示してある。負荷トルク係数の出力に与える傾向は平均風速の場合とはほぼ同様であり、最大出力を与える負

Fig.14 負荷トルク係数 K_{t1} —平均出力特性
(Effect of output torque
coefficient K_{t1} on generator power)

Fig.15 負荷トルク係数 K_{t2} —平均出力特性
(Effect of output torque
coefficient K_{t2} on generator power)

荷トルク係数が存在することが分る。

最後に、慣性モーメントによって平均出力がどのように変化するかを示したのがFig.16とFig.17である。Fig.16は負荷トルク形態がAの場合で、慣性モーメントの値によって平均出力が大幅に変化することが分る。それに対して、負荷トルクBの場合(Fig.17)は慣性モーメントが変化しても平均出力はそれほど変化していないことが理解される。また当然のことであるが、慣性モーメントが小さい場合ほど、高い変動周波数範囲

Fig.16 風速変動周波数—平均出力特性
(負荷A, 慣性モーメントパラメータ)
(Effect of frequency of wind-
speed on generator power)

Fig.17 風速変動周波数—平均出力特性
(負荷B, 慣性モーメントパラメータ)
(Effect of frequency of wind-
speed on generator power)

まで平均出力が大きくなっていることが分る。

5. むすび

以上、本論文では、風力発電システムの基本特性を明らかにするためにアナログシミュレーションを行い、その出力特性に対して風速の変動や風車トルク係数、負荷トルク係数および慣性モーメントの変化がいかに影響を与えるかについて検討を行なった。その結果、次の結論を得た。

- (1) 負荷トルク形態は、そのトルクが速度の2乗に比例する場合の方が風エネルギーの利用率は良くなる。
- (2) 負荷トルク形態は速度の2乗に比例する場合が、失速などの不安定状態が生じ難い。
- (3) 負荷トルク係数のある値で最大出力状態が生じるので、風速に対して負荷トルク係数を調整することが望まれる。
- (4) 風力発電システムの利用率を上昇させる為には、風車等の強度が十分であれば慣性モーメントは出来るだけ小さくする方がよい。
- (5) 風力発電システムの出力等を計算する場合には、現在主に平均風速で行われているが、自然

風の場合は風速が大幅に変動するので、その出力が平均風速の場合より大きくなることに注意すべきである。

以上の結果は、風力発電システムを製作する場合には十分参考になると考えられるが、今後は自然風の場合についても十分検討を加えるとともに、利用効率のよい風力発電システムを実現するための制御法等についても検討・開発する必要がある。

参考文献

- 1) 茅陽一編；エネルギーアナリシス，電力新報社，昭和55年2月，pp91-92
- 2) 陰山照男；風力発電式通信用電源，電子通信学会誌，Vol.64, No10, 1981, 10 pp1061-1063
- 3) 本間琢也編；風力エネルギー読本，オーム社，昭和54年8月，pp51-64
- 4) 鈴木，川人，沖津；風車トルク係数の測定法，計測自動制御学会論文集，Vol.18, No2 昭和57年2月，pp167-172
- 5) BOLTON, H. R. and NICODEMOU, V. C. ; Operation of self-excited generators

- for windmiii application, Proc. IEE
Vol.129 Pt. B No 9, 1979, pp.815-820
- 6) SUZUKI, T., OKITSU, H. and
KAWAHITO, T.; Characteristics of a
small wind-power system with DC generator. (付7)式を用いてアナログシミュレーションを
Proc. IEE, Vol.129, Pt. B No 4, 1982,
pp217-220
- 7) 鈴木, 沖津; 風力発電-蓄電池システムの特
性について, 日本風工学会誌 Vol.13
昭和57年7月, pp7-14
- 8) 鈴木, 沖津, 川人; 小規模風力発電システム
の特性について, 風力エネルギー, Vol.5
No 2, 1981, 12, pp9-14
- 9) 本間琢也編; 風力エネルギー読本, オーム社,
昭和54年8月, pp113-139

$$\frac{dX_n}{dt} = 1.261 C_T(X_\lambda) X_V^2 - (K_{t1} + 0.004) \\ \times 3.33 X_n - 0.083 \quad (\text{付7})$$

行なったのがFig.2(a)である。

同様にして, 負荷トルクBの場合のアナログシ
ミュレーションのための方程式は換算係数を同一
として次式となる。

$$\frac{dX_n}{dt} = 1.261 C_T(X_\lambda) X_V^2 - 66.67 K_{t2} X_n^2 \\ - 0.013 X_n - 0.083 \quad (\text{付8})$$

上式を用いたアナログ演算回路がFig.2(b)であ
る。

【付 録】

アナログシミュレーションについて

負荷トルク形態がAの場合において, その風力
発電システムの方程式は(1)式, (2)式から
次式となる。

$$J \frac{dN}{dt} = \frac{1}{2} \rho A R C_T(\lambda) V_w^2 - K_{t1} N \\ - fN - T_c \quad (\text{付1})$$

上式にTable 1の各値を代入すると次式となる。

$$\frac{dN}{dt} = 6.304 C_T(\lambda) V_w^2 - (K_{t1} + 0.004) \\ \times 3.33 N - 1.667 \quad (\text{付2})$$

また, 周速比 λ は

$$\lambda = \frac{N}{V_w} \quad (\text{付3})$$

である。上式を10Vのアナログ計算機で演算さ
せる為に, 次の換算係数を設定する。

$$\text{速度} \quad X_n = N / 20 \quad (\text{付4})$$

$$\text{風速} \quad X_V = V_w / 2 \quad (\text{付5})$$

$$\text{周速比} \quad X_\lambda = \lambda / 10 \quad (\text{付6})$$

以上より, (付2)式は次式となる。