

NEDO 500 kW 風力発電機のシステム同定とモデリング

小玉 成人*・松坂 知行**・山田 佐佳***

System Identification and Modeling of The NEDO 500 kW Wind Generator

Naruhito KODAMA, Tomoyuki MATSUZAKA and Sayoshi YAMADA

Abstract

The 500 kW wind generator was developed as one of NEDO's projects, and it has been operated at TAPPI wind park since October in 1996. Since then several tests on its performance have been made so far. This paper presents the modeling of the machine by using system identification and analytical method, and the dynamic behavior of the machine through simulation based on the model.

キーワード：システム同定，モデリング，風力発電機，風車制御 (system identification, modeling, wind generator, windmill control)

1 はじめに

風力エネルギーは再生可能な環境を汚染しないエネルギーであるという事やエネルギー資源が枯渇しない等の利点がある。我が国においても，NEDO のプロジェクトにより 500 kW の大型風車が開発され，1996 年 10 月より竜飛ウィンドパークにおいて運転が開始された。周知のように風力発電機は出力変動が大きいため，出力安定化を行うための制御方法の開発が必要となってくる。このためには風力発電機の正確なモデリングが必要不可欠である。

本研究では NEDO 500 kW 機を用いてこれまで行われてきた種々の試験により採取されたピッチ実角，ピッチ指令角，出力，地上風速の四つのデータを用い，システム同定と解析的手法によって NEDO 機のモデリングを行なった。このモデルを基に周波数応答，各種ガストに対する時間応答を求めこの風車の基本特性を明らかにしたので報告する。

2. 風力発電機

2.1 風車の構成

NEDO 機の構成を図 1 に示す。NEDO 機は定格出力 500 (kW)，ハブの高さ 38 (m)，ブレード長 19 (m) 3 枚羽根構成であり，出力の制御はピッチ角を変えることにより行われる。また，発電機は 4 極の誘導発電機である。今回の試験では風車の前方風速を測るため 40 (m) 前方

に風速計を設けている。さらに，ナセル上の風速計も併用し風速を測定している。

2.2 風速

図示のように，ブレードの最低位と最高位の差が 19 ～ 57 (m) と大きく異なるためウィンドシェアの影響が無視できない。低い位置での風速と高い位置での風速はべき乗則によって変わるので，高さ h における風速は次式で表される¹⁾。

$$V_w = V_{wh} \left(\frac{h}{H} \right)^n \dots\dots\dots (1)$$

ここで

H : ハブの高さ V_{wh} : ハブの高さでの風速

n : 地形によって変わる係数

ウィンドシェアによる影響を考慮するため，実際の出力の動特性と比較し，その結果ブレードの 9/10 の位置を代表的風速と想定することにした。すると，代表点の位置 h は回転角 θ とともに変化し，次式となる。

$$h = H \left(1 + \frac{9}{20} \sin \theta \right) \dots\dots\dots (2)$$

このため八戸，(1) 式は次式となる。

$$V_w = V_{wh} \left(1 + \frac{9}{20} \sin \theta \right)^n \dots\dots\dots (3)$$

この風速の微小変化は次式で表される。

$$\begin{aligned} \Delta V_w &= \frac{\partial V_w}{\partial V_{wh}} \Delta V_{wh} + \frac{\partial V_w}{\partial \theta} \Delta \theta \\ &= \Delta V_{wh} \left(1 + \frac{9}{20} \sin \theta \right)^n \\ &= n \Delta V_{wh} \left(1 + \frac{9}{20} \sin \theta \right)^{n-1} \frac{9}{20} \cos \theta \dots\dots\dots (4) \end{aligned}$$

平成 10 年 12 月 21 日受理

* 八戸工業大学 大学院後期課程 学生

** 八戸工業大学 情報システム工学研究所 教授

*** 東北電力株式会社

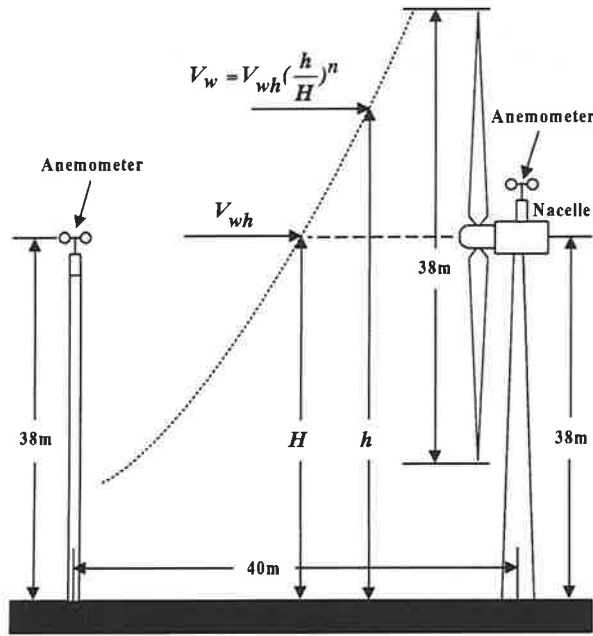


図1 風車の構成及びウィンドシェア

θ は、一つのブレードと水平軸との角度であり NEDO 500kW 機にはブレードが3枚あるため一枚のブレードで代表させ、次式で表した。

$$\theta = 3\Omega t \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここで Ω は風車の角速度である。風速は風車の回転とともにウィンドシェアにより変動するのでブレードのトルクはこの影響を受けて変動する。また、今回は地上風速とナセル風速間で相関を取り、相関の最も高くなった時間差を風速計から風車前面までの風の到達する時間と考えた。そしてこの時間差の分だけ地上風速を時間的に進ませたデータを風車前面の風速 と考える事にした。

2.3 風車トルク

風車によるトルク T_w は次式で与えられる。

$$T_w = \frac{C_p(\lambda, \beta) V_w^3 \rho A}{2\Omega} \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここで

V_w : 風速 ρ : 空気密度 A : 風車の回転断面積

Ω : 風車の回転角速度 C_p : 出力係数 λ : 周速比 C_p は周速比 とピッチ角 β の関数であり、多項式で表すことにした²⁾。ここで、周速比 λ とピッチ角 β を変化させたときの出力係数 C_p の変化を図2に示す。このように出力係数はピッチ角が増加するほど出力係数のピーク値は小さくなり、また、ある λ で最大値が存在する。

2.4 発電機

前述のように発電機としては誘導発電機を用いている。発電機はピッチ制御により回転数を定格スリップに維持するように運転されるが、風は常に変動しているた

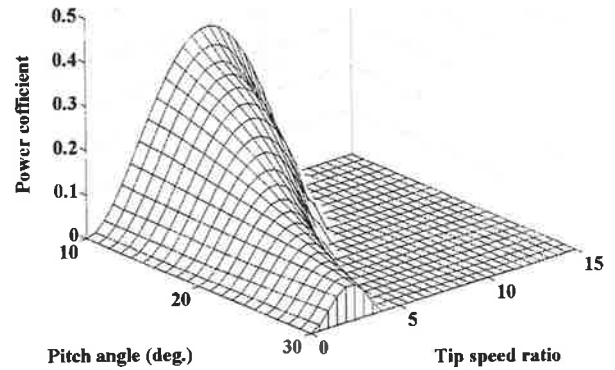


図2 出力係数

め、回転数は定格スリップ近辺で常に変動する。したがって、動作方程式は厳密には d-q 軸変換法を用いて微分方程式で表されるが、電気的過渡現象は機械的過渡現象と比較して無視できるため、定常状態を表す次式により与えられる。

$$T_g = 3 \frac{s V^2 r_2}{\omega ((r^2 - s r_1)^2 + s^2 (x_1 + x_2)^2)} \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここで

V : 相電圧 r_1, r_2 : 一次、二次抵抗

x_1, x_2 : 一次、二次リアクタンス

s : スリップ

ω : 発電機の電氣的角速度 (= $GP\Omega$)

さらに、(3) 式を動作点の付近で線形化すると次式のよう簡単な式で表される。

$$T_g = K_g \Omega \quad \dots\dots\dots (8)$$

ここで

K_g : 定数

2.5 ピッチ制御器

制御系は出力の設定値と実出力の差を制御偏差とし、この値を演算し油圧シリンダに加える。油圧シリンダの出力がブレードのピッチ角を変え、出力を制御する。この制御系は後述するように制御偏差からピッチ角指令値を計算する出力制御系 G_1 とピッチ角指令値をピッチ実角に変換するピッチ駆動系 G_{pc} の二つの伝達関数から成るシステムで表される。

3. 風力発電機のモデリング

3.1 風車と発電機のモデリング^{1),3),4)}

本節では、風車及び発電機のモデリングを行う。風車の動特性は次式で表される。

$$T_w = J \frac{d\Omega}{dt} + T_g \quad \dots\dots\dots (9)$$

動作点を中心とする微小変化に対する式は次式で表される。

$$\Delta T_w = J\Delta\dot{\Omega} + \Delta T_g \quad \dots\dots\dots(10)$$

風車トルクと発電機トルクの微小変化は (6), (8) 式から

$$\Delta T_w = \gamma\Delta\Omega + \alpha\Delta V + \delta\Delta\beta \quad \dots\dots\dots(11)$$

$$\Delta T_g = K_g\Delta\Omega \quad \dots\dots\dots(12)$$

$$\therefore J\Delta\dot{\Omega} = (\gamma + K_g)\Delta\Omega + \alpha\Delta V + \delta\Delta\beta \quad \dots\dots\dots(13)$$

(13) 式より, $\Delta\beta=0$ のとき風速から角速度までの伝達関数 G_v が, $\Delta V=0$ のときピッチ実角から角速度までの伝達関数 G_θ が導かれる。ここで, α, γ, δ はそれぞれ (14) ~ (16) 式で表される。

$$\gamma = \frac{\partial T_w}{\partial \Omega} = -K_w C_p \frac{V^3}{\Omega} + K_w R \frac{V^2}{\Omega} \frac{\partial C_p}{\partial \lambda} \quad \dots\dots\dots(14)$$

$$\alpha = \frac{\partial T_w}{\partial V} = 3K_w C_p \frac{V^2}{\Omega} - K_w \Omega V \frac{\partial C_p}{\partial \lambda} \quad \dots\dots\dots(15)$$

$$\delta = \frac{\partial T_w}{\partial \beta} = K_w \frac{V^3}{\Omega} \frac{\partial C_p}{\partial \beta} \quad \dots\dots\dots(16)$$

ここで

$$K_w = \rho A / 2 \quad \dots\dots\dots(17)$$

上記の α, γ, δ 等は動作点が決まればすべて解析的に求められる。

3.2 制御系のモデリング

制御系は油圧系, 機械系等複雑な因果関係を持っているので解析的に求めるのは困難である。そこでシステム同定手法を用いてモデリングを行ない, ARMAX モデルにより表すことにした。

ARMAX モデルは次式で示される。

$$\hat{y}(k) = \frac{B(q^{-1}, \theta)}{A(q^{-1}, \theta)} u(k-d) + \frac{C(q^{-1}, \theta)}{A(q^{-1}, \theta)} e(k) \quad \dots\dots\dots(18)$$

ここで,

$\hat{y}(k)$: 予測された出力 q^{-1} : 時間遅れ演算子

θ : モデル係数を含むベクトル $u(k)$: 入力

$e(k)$: ホワイトノイズ

$$A(q^{-1}, \theta) = 1 + a_1 q^{-1} + \dots + a_{na} q^{-na}$$

$$B(q^{-1}, \theta) = b_1 q^{-1} + \dots + b_{nb} q^{-nb} \quad \dots\dots\dots(19)$$

$$C(q^{-1}, \theta) = 1 + c_1 q^{-1} + \dots + c_{nc} q^{-nc}$$

である。また, モデルの同定には図 9 に示すアルゴリズムを用い (20) 式の評価関数を最小化するようにした。

$$J_N(\theta, Z^N) + \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N 0.5 L(q^{-1}) \varepsilon_k^2(\theta) \quad \dots\dots\dots(20)$$

ここで,

ε_k : 予測誤差 Z^N : 計測されたデータ

N : 与えられたデータの数

$L(q^{-1})$: 残差フィルタ

まず, 始めに制御偏差からピッチ角指令値の出力制御系の伝達関数 G_1 の同定を行なった。4096 点の入出力

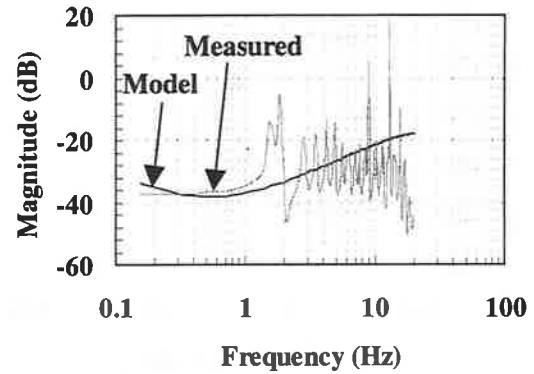


図 3 G_1 の利得特性の比較

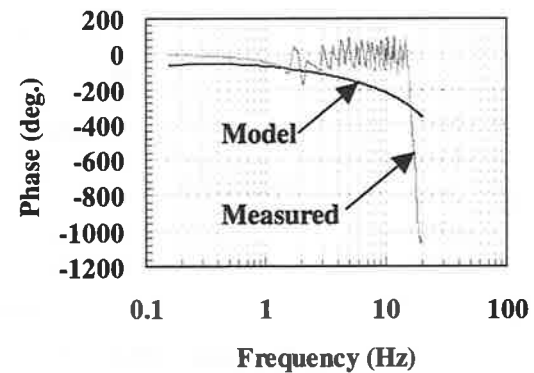


図 4 G_1 の位相特性の比較

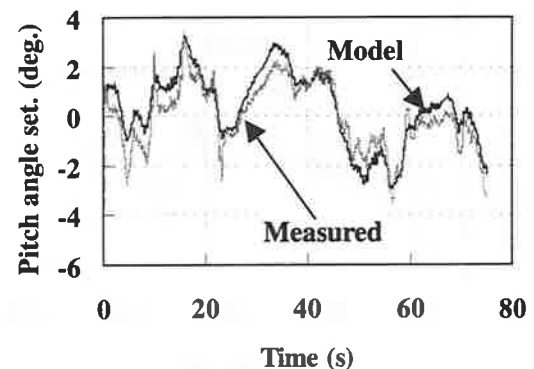


図 5 G_1 の同定結果の比較

データを用いて出力制御系の動作を実現しうる最小の次数を試行錯誤で $na=3, nb=3, nc=0, nk=1$ と決定しモデル同定を行ない次式を得た。

$$G_1(s) = \frac{s^3 K_{1a} + s^2 K_{1b} + s K_{1c} + K_{1d}}{s^3 + s^2 K_{1e} + s K_{1f} + K_{1g}} \quad \dots\dots\dots(21)$$

構築されたモデルと実測値の利得特性及び位相特性の比較をそれぞれ図 3, 図 4 に示す。また時間応答の比較を図 5 に示す。利得特性及び位相特性はほぼ一致している。また, 図 5 に示されるように大きく変化する部分ではずれが見られる場合もあるが, 他の部分ではほぼ一致しており, このモデルが妥当なモデルであることがわかる。次に, ピッチ角指令値からピッチ実角の伝達関数の同定を

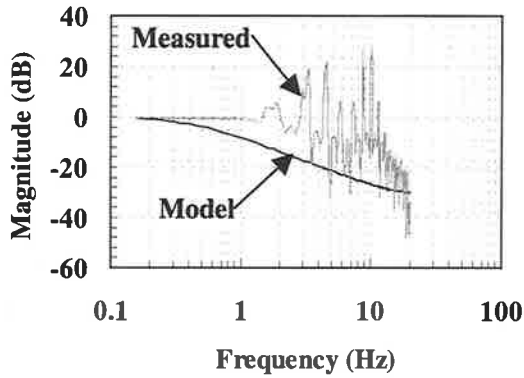


図6 G_{pc} の利得特性の比較

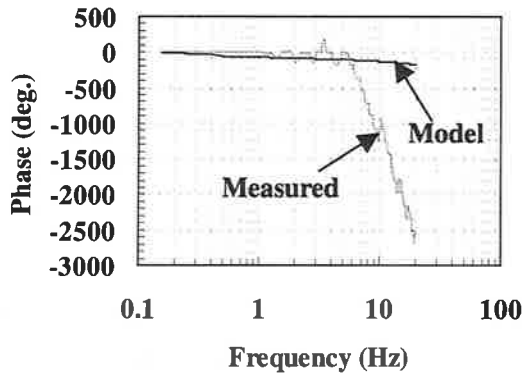


図7 G_{pc} の位相特性の比較

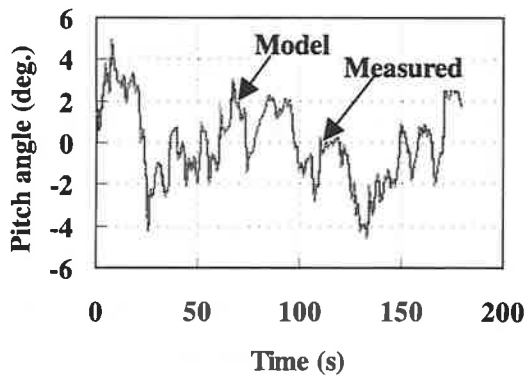


図8 G_{pc} の同定結果の比較

行なった。データ数は7,168点の入出力データを用いた。その結果次式で示されるモデルを得た。

$$G_{pc}(s) = \frac{K_{pa}}{sK_{pb} + K_{pc}} \quad \dots\dots\dots (22)$$

このモデルと実測値の利得特性及び位相特性の比較を図6、図7に示す。また、時間領域における比較を図8に示す。周波数応答を比較してみるとほぼ一致していると言える。また、時間領域においては図8に示されるようにほとんどの部分で一致しておりこのモデルが十分妥当なモデルである事がわかる。

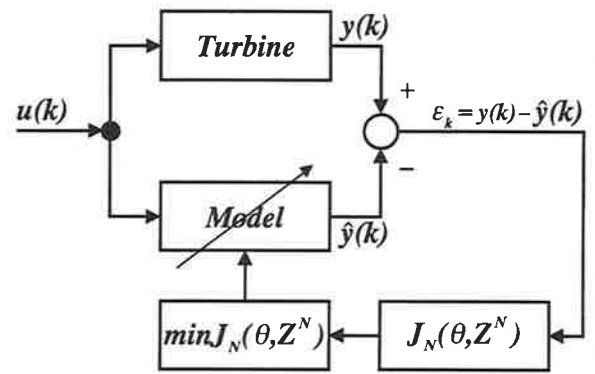


図9 同定アルゴリズム

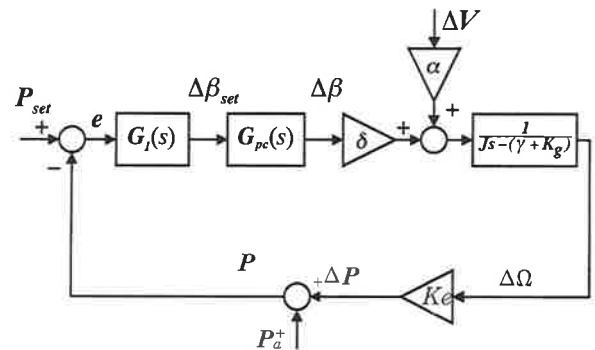


図10 全体のブロック図

3.3 全体のブロック図

全体のブロック図は前述した制御系の伝達関数 G_l と G_{pc} 及び3.1節で述べた風車の動特性の式より求められ(23)、(24)式により表される風速から角速度までの伝達関数 G_v とピッチ実角から角速度までの伝達関数 G_θ により図10に示すように表される。

ここで

P_{set} : 出力設定値 P_a : 発電機平均出力

$\Delta\beta_{set}$: ピッチ角指令値 $\Delta\beta$: ピッチ実角

ΔV : 風速 $\Delta\Omega$: 角速度 P : 発電機出力

ΔP : 発電機出力の微小変化 e : 制御偏差

また、 G_v は前述した解析的手法の他に Box-Jenkins モデルにより構築してもほぼ同様なものとなりこのモデルの妥当性が確認された。

$$G_v = \frac{\alpha}{sJ - (\gamma + K_g)} \quad \dots\dots\dots (23)$$

$$G_\theta = \frac{\delta}{sJ - (\gamma + K_g)} \quad \dots\dots\dots (24)$$

また、 α, γ, δ は図11～13に示すように風速及びピッチ角により変化する。図示のように、これらの値は一つの動作点を中心にピッチ角と風速により大きく変化するため、風車の制御系ではパラメータが変動することが分かる。

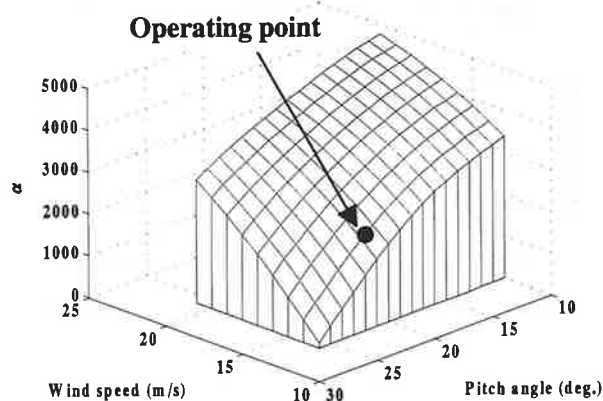


図 11 風速及びピッチ角と α との関係

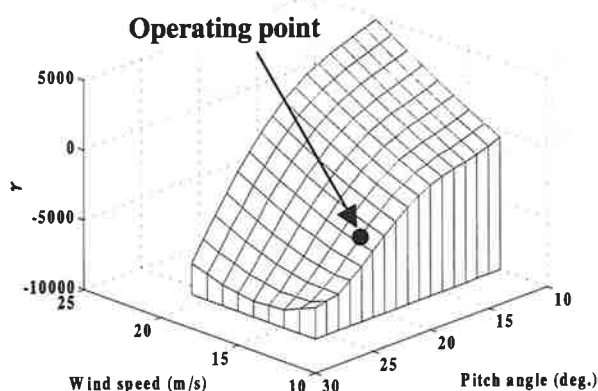


図 12 風速及びピッチ角と γ との関係

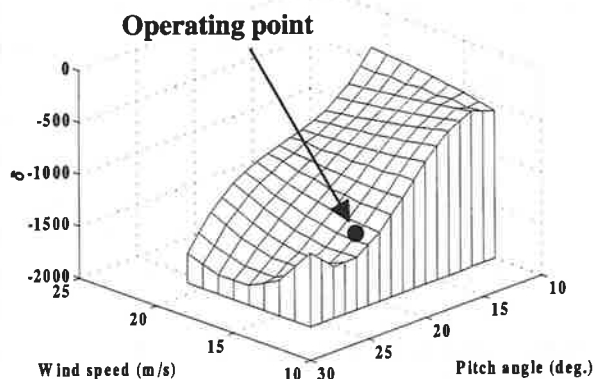


図 13 風速及びピッチ角と δ との関係

4. 風力発電機の特性解析

4.1 周波数特性

ここで、構築したモデルを用いて周波数応答を求めるために風速から出力までの閉ループ伝達関数を求めると図 10 より (25) 式のようになり、計算すると (26) 式のように 6 次の伝達関数となる。

$$G_{cl}(s) = \frac{K_e G_v}{1 + K_e G_\theta G_{pc} G_1} \dots (25)$$

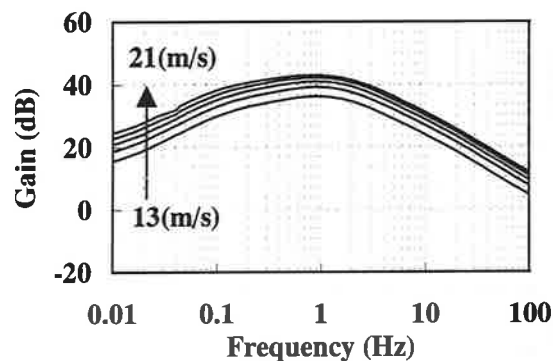


図 14 風速/出力間の利得特性

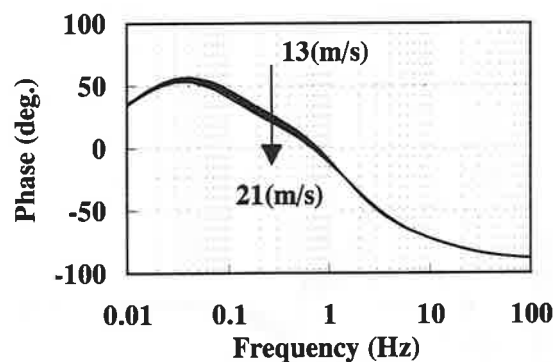


図 15 風速/出力間の位相特性

$$G_{cl}(s) = \frac{s^5 K_{cta} + s^4 K_{ctb} + s^3 K_{ctc}}{s^6 K_{ctlg} + s^5 K_{ctlh} + s^4 K_{ctli}} + \frac{s^2 K_{ctld} + s K_{ctle} + K_{ctf}}{s^3 K_{ctlj} + s^2 K_{ctlk} + s K_{ctll} + K_{ctlm}} \dots (26)$$

そこで、平均風速を 2(m) 毎に 13~21(m/s) と変化させて周波数応答を求めると、利得特性、位相特性はそれぞれ図 14、図 15 に示されるようになる。

4.2 モデルによる過渡応答シミュレーション

次に風力発電機の過渡特性を調べるために、実際に現れる典型的な種々のガストを入力し、モデルの過渡応答を求めた。各種ガスト入力を図 16 に示す。まず、(a) は振幅 1(m/s) の入力を 2.5 秒間加えたステップ状のガストであり、このときの平均風速を 2(m/s) 毎に 13~21(m/s) と変化させた場合の応答を図 17 に示す。図よりわかるように風力発電機の立ち上がりは速く、立ち下がりには遅いことが分かる。この他に入力が零となると、大きくリバウンドしていることが分かる。

これは、制御系と風車のパラメータが動作点により大きく変化するためではないかと思われる。また、平均風速が大きいくほど風速の変動に敏感に反応することも分かった。さらに、図 16(b) 正負の正弦波状ガストを入力した場合の応答を図 18 に示す。このとき正の方向に変動した振幅と負の方向に変動した振幅を比べると負の方向に変動したときの振幅が大きくなっていることが分か

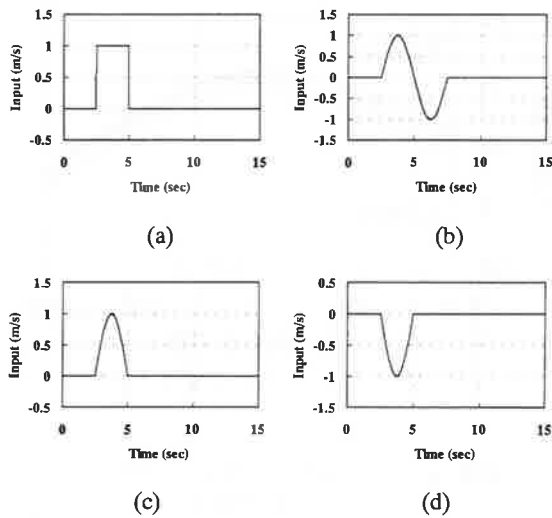


図16 各種ガスト入力

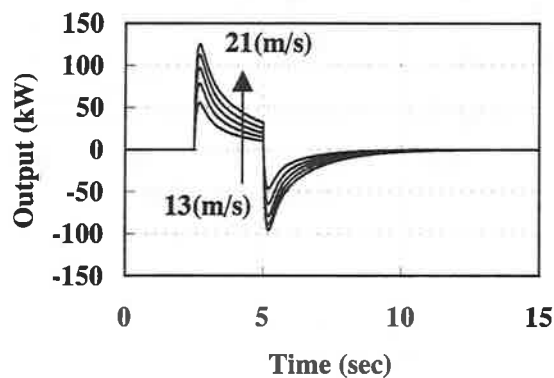


図17 ステップ状ガスト応答

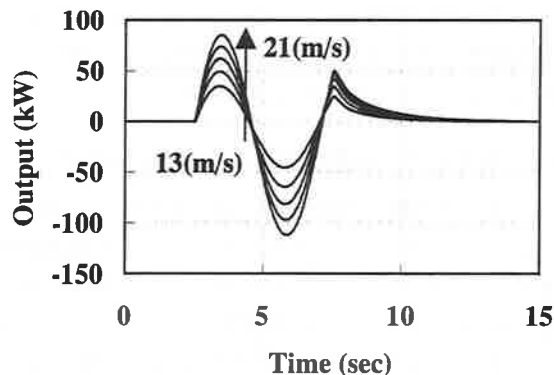


図18 正負の正弦波状ガスト応答

る。また、図16(c), (d)の正の正弦波状ガスト入力, 負の正弦波状ガスト入力のそれぞれの入力に対する応答を19~20図に示す。このとき両方の応答には正負の差以外は見られず入力が正負どちらに変動しても同じ応答をすることが分かる。

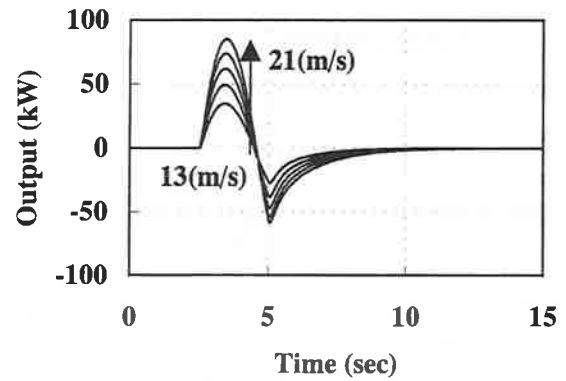


図19 正の正弦波状ガスト応答

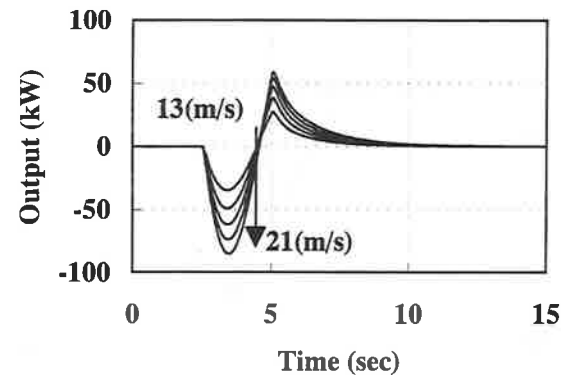


図20 負の正弦波状ガスト応答

5. まとめ

本研究では, 実測したデータと解析的な手法を用い, また, ウインドシェアによる高さ方向の風速の変化も考慮に入れ NEDO 500 kW 機のモデル構築を行った。このモデルにより風力発電機の周波数特性, 及び風速, ピッチ角によるパラメータへの影響などを明らかにすることができた。また, 各種ガストに対する時間応答を求めることができた。今後はこのモデルを基に日本の複雑な地形の影響で大きく変動する出力の安定化方法について研究したいと考えている。最後に, 本研究のデータは, 本学土屋教授の御支援と NEDO の好意により提供を受けたものであり, 感謝申し上げます。

参考文献

- 1) O. Wasynczuk, D.T. Man, J.P. Sullivan: Dynamic Behavior of A Class of Wind Turbine Generators During Random Wind Fluctuations, IEEE Trans. Power Apparatus Syst., Vol. PAS-100, No.6, 2837/2845 (1981)
- 2) 松坂, 土屋: 「風力発電機の出力変動安定化制御に関する研究」, 電学論 B, Vol. 117, No. 5, 625/633 (1997)
- 3) Lewis Kendall, Mark J Balas, Yung Jae Lee, and Lee Jay Fingersh: Application of Propotional-Integral and Disturbance Accommodating Control to Variable Speed Variable Pitch Horizontal Axis Wind Turbine,

- Wind Engineering, Vol. 21, No. 1, 21/38 (1997)
- 4) N. Sh. Bao, Q.X. Chen and T. Jiang: Modelling and Identification of a Wind Turbine, Wind Engineering, Vol. 20, No. 4, 203/218 (1996)
- 5) Lennart Ljung 著, 足立修一 監訳: 「システム同定ツールボックス ユーザーズガイド」, サイバネットシステム株式会社 (1996)
- 6) 小玉, 松坂, 山田: 「風力発電機のシステム同定とモデリング」, 電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会資料 PE-98-108・PSE-98-98, 1998