

NEDO 500kW 大型風力発電機のモデリング

Modeling of a 500kW Wind Generator of NEDO Project

○小玉 成人*, 松坂 知行*, 山田 佐佳**

○Kodama Naruhito*, Tomoyuki Matsuzaka*, Sayoshi Yamada**

*八戸工業大学, **東北電力

*Hachinohe Institute of Technology, **Tohoku Electric Power Company

キーワード：システム同定(System Identification), モデリング(Modeling), 風力発電機(Wind generator),
風車制御(Windmill Control)

連絡先：〒031 八戸市妙字大開 88-1 八戸工業大学情報システム工学研究所 松坂研究室
小玉成人, Tel.: (0178)25-3111, Fax.: (0178)25-1691, E-mail: naru@stud.hi-tech.ac.jp

1. 前書き

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。そのため、米国や欧州諸国において実用化が推進されており、我が国においても電力会社、自治体を中心に導入が促進されつつある。また、NEDOのプロジェクトにより 500kW 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。しかし、米国や欧州諸国とは違い日本の地形は複雑で起伏が大きく、このため風の乱れが大きくなり出力の変動もまた大きくなる。そこで出力安定

化の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 500kW 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てきたピッチ実角、ピッチ指令角、出力、ナセル風速、地上風速の五つのデータを用い、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。また、実測値とシミュレーション結果を時間応答や周波数応答などによって比較し、妥当なモデルである事を確認したので報告する。

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)、ブレードの長さ 19(m)であり、発電機は誘導発電機で 4 極である。また、40(m)前方の高さ 38(m)にも風速計を設けており地上風速はここで測定している。

2.2 風速

このように、ブレードの最低位と最高位の差が 19~57(m)と大きいためウィンドシェアの影響が無視できない。これにより、低い位置での風速と高い位置での風速が違った値となるので h における風速は次式で表される²⁾。

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

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値

ウィンドシェアによる影響を考える上でブレードの 3/4 の位置を代表的風速と仮定すると h は次式で表される。

$$h = H \left(1 + \frac{3}{8} \sin \theta \right) \dots \dots \dots (2)$$

このため、(1)式は次式となる。

$$V_w = V_{wh} \left(1 + \frac{3}{8} \sin \theta \right)^n \dots \dots \dots (3)$$

この風速の微小変化は次式で表される。

$$\begin{aligned} \Delta V_w &= \frac{\partial V_w}{\partial V_{wh}} \Delta V_{wh} + \frac{\partial V_w}{\partial \theta} \Delta \theta \\ &= \Delta V_{wh} \left(1 + \frac{3}{8} \sin \theta \right)^n \\ &\quad + n \Delta V_{wh} \left(1 + \frac{3}{8} \sin \theta \right)^{n-1} \frac{3}{8} \cos \theta \dots (4) \end{aligned}$$

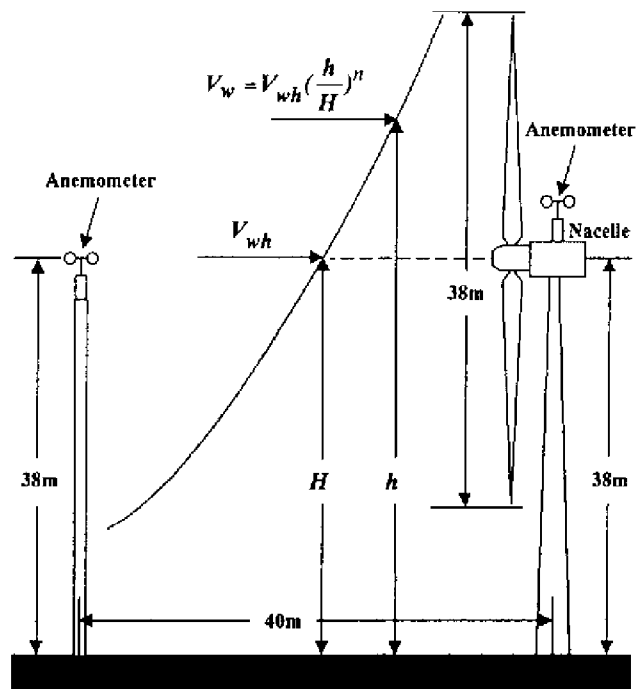


図 1 風車の構成及びウィンドシェア

θ は、ある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。

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

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測定した。そしてこの時間差の分だけ地上風速を進ませたデータを風車前面の風速 V_{wh} 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。

$$T_w = \frac{C_p V^3 \rho A}{2\Omega} \dots \dots \dots (6)$$

ここで

V : 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
 C_p は周速比 λ とピッチ角 β の関数であり、多項式を用いて近似した¹⁾。

2.4 発電機

前述のように発電機に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、電氣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。

$$T_g = -3 \frac{sV^2 r_2}{\omega((r_2 - sr_1)^2 + s^2(x_1 + x_2)^2)} \dots (7)$$

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となり簡単な式で表される。

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

2.5 ピッチ制御器

制御系は制御偏差によりピッチ角指令値が決定されると、この指令値を受けて図 2 に示される油圧シリンダによってブレードのピッチ角が変わり、出力が制御される。この制御系は制御偏差からピッチ角指令値を表す出力

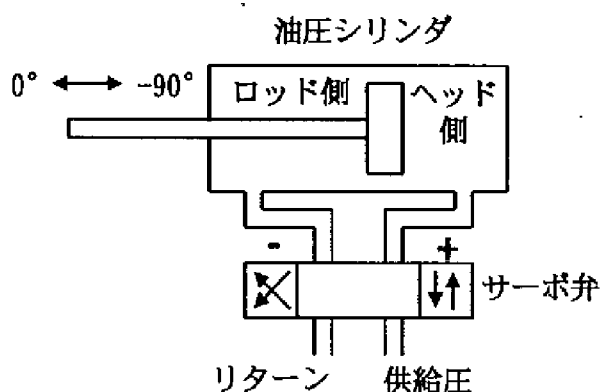


図2 ピッチ駆動用油圧シリンダ

制御系 G_p とピッチ角指令値からピッチ実角を表すピッチ駆動系 G_{pc} の二つの伝達関数が直列結合した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^{2), 3), 4)}

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。

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

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。

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

風車トルクの微小変化に対する(11)式と発電機のトルクの微小変化に対する(12)式より(13)式が得られる。

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

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

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

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

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

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

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

ここで

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

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ためシステム同定手法を用いてモデリングを行なった。本研究では MATLAB のシステム同定ツールボックスを用い ARMAX モデルを構築した。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 点のデータを用いてモデル同定を行ない次式を得た。

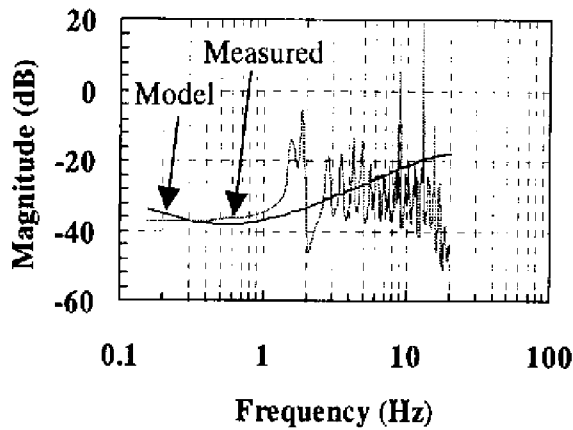


図3 G_1 の利得特性の比較

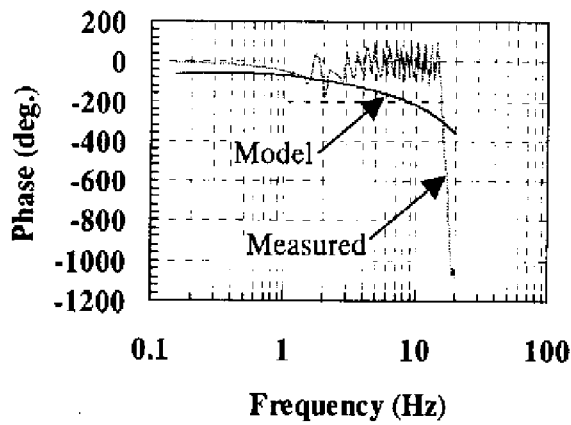


図4 G_1 の位相特性の比較

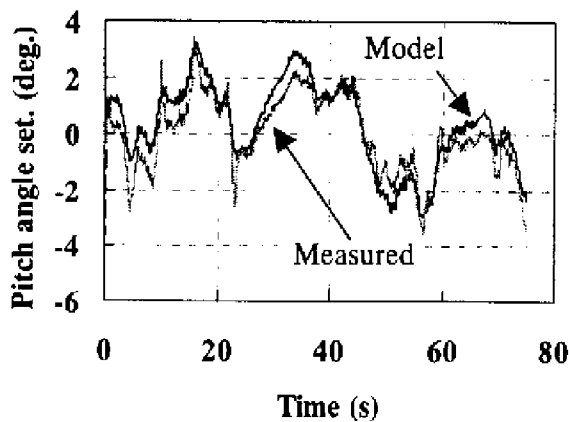


図5 G_1 の同定結果の比較

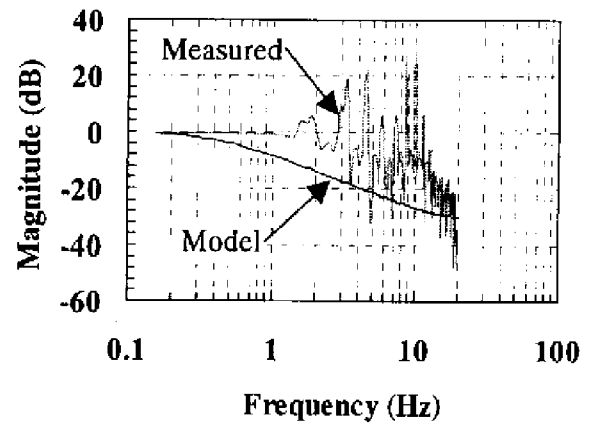


図6 G_{pc} の利得特性の比較

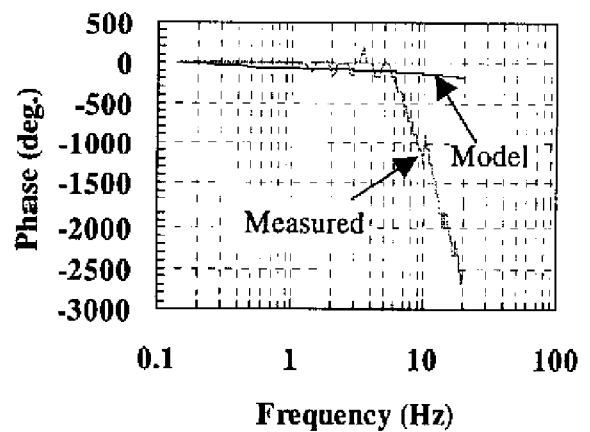


図7 G_{pc} の位相特性の比較

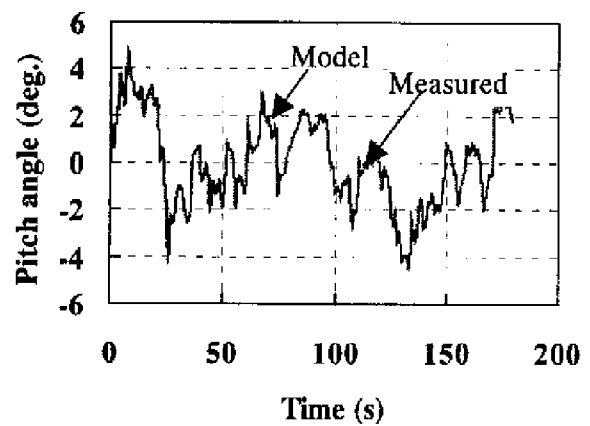


図8 G_{pc} の同定結果の比較

$$G_1(s) = \frac{s^3 K_{1a} + s^2 K_{1b} + s K_{1c} + K_{1d}}{s^3 + s^2 K_{1e} + s K_{1f} + K_{1g}} \dots (18)$$

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。また時間応答における比較を図5に示す。利とこ特性及び位相特性において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事がわかる。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行なった。データ数は多い方がより一致したため 7168 点データを用いた。その結果次式で示されるモデルを得た。

$$G_{\theta} = \frac{K_{\theta a}}{sK_{\theta b} + K_{\theta c}} \dots\dots\dots(19)$$

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。

3.3 全体のブロック図

全体のブロック図は制御系の伝達関数 G_I 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(20), (21)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 9 に示すように表される。

$$G_v = \frac{\alpha}{sJ - (\gamma + K_g)} \dots\dots\dots(20)$$

$$G_{\theta} = \frac{\delta}{sJ - (\gamma + K_g)} \dots\dots\dots(21)$$

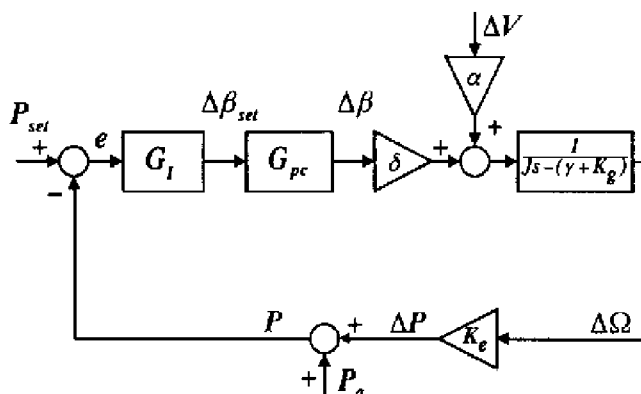


図 9 全体のブロック図

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

4. 風力発電機の特性格析

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伝達関数を求めると次式のようなになる。

$$G_{cl} = \frac{s^5 K_{cla} + s^4 K_{clb} + s^3 K_{clc}}{s^6 K_{clg} + s^5 K_{clh} + s^4 K_{cli}} \frac{s^2 K_{clid} + sK_{clic} + K_{clf}}{s^3 K_{clj} + s^2 K_{clk} + sK_{cll} + K_{clm}} \dots\dots(22)$$

周波数応答を求めると、利得特性が図 10 に、位相特性が図 11 に示されるように得られる。

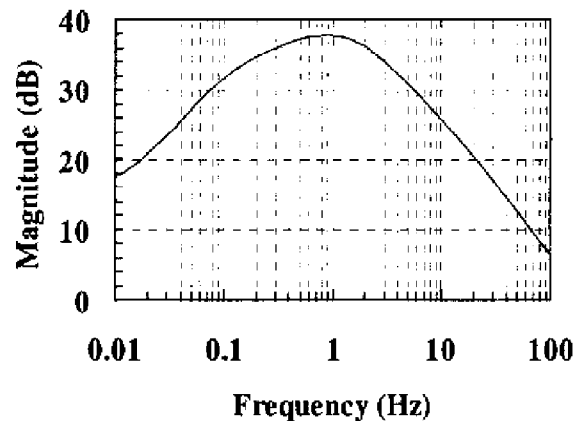


図 10 風速/出力間の利得特性

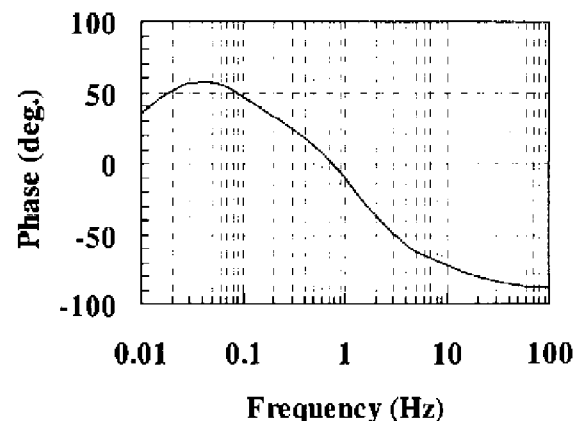


図 11 風速/出力間の位相特性

まず、利得特性を見てみるとこのシステムは0.1~2(Hz)付近にピークがありこの周波数帯で最も敏感に応答する事がわかる。また、このような形の特性になるのは周波数が低い領域では制御系が十分に動作し周波数が高い領域ではシステムが追従できないためであり、風車の特性はこのような特性となる事が知られている。次に、位相特性は利得特性のピークのところで位相が逆転^りしておりこの部分で位相が揺れている事がわかる。また、利得特性が0(dB)に近づいても位相の遅れは180(deg.)以下であるのでこのシステムが安定なシステムである事がわかる。

4.2 周波数応答における比較

次に、時間領域ではノイズが多く直接比較は難しいので実測値とモデルによるシミュレーション結果を周波数領域で比較する。

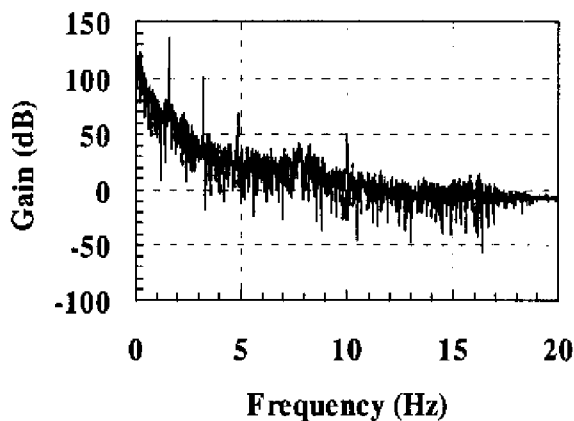


図12 シミュレーション結果の周波数応答

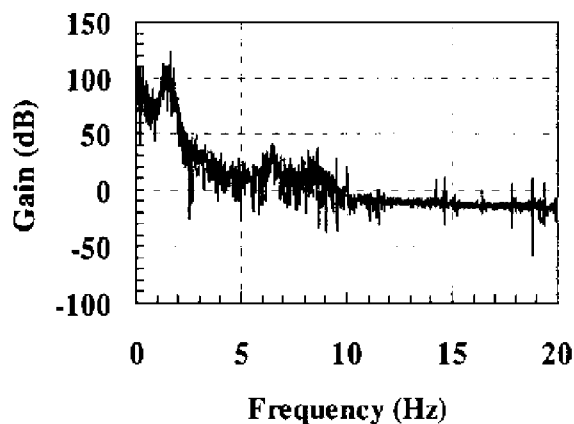


図13 実測値の周波数応答

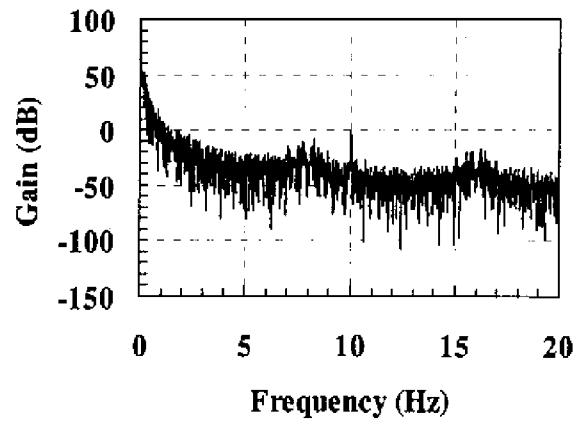


図14 地上風速の周波数応答

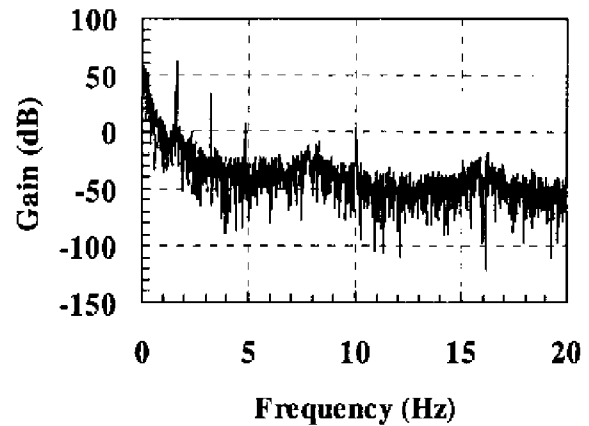


図15 推定した風速の周波数応答

作成したモデルを用いてシミュレーションした結果にFFTをかけた結果を図12に実測値の周波数応答を図13に示す。また、(4)式を用いて推定した風速の周波数応答は1.6(Hz)の部分にピークが見られる事がわかる。シミュレーションした結果の周波数応答も推定した風速により実測値の周波数応答と同じく1.6(Hz)にピークが見られた。この1.6(Hz)の変動は定格角速度32(rpm)は0.5333(rps)でありこれにブレードの数をかけたものである。また、シミュレーション結果と実測値の全体的な特性を比較してもほぼ等しくなり今回のモデルが妥当なものである事がわかる。なお、参考までに風車に加えた風のスペクトルを図14、15に示す。ほとんど特性は一致しており、推定風速が風車の前面の風速と考えて良いことを示している。

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 NEDO500kW機のモデル構築を行った。その結果、周波数成分を比較すると実際のシステムに近い特性が得られ作成したモデルが妥当である事がわかった。今後は風車前面の風速のナセル風速からの推定を行ない、このモデルを用いて様々な制御方法による出力変動の抑制を行なっていきたいと考えている。最後に、本研究のデータは NEDO 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) 松坂、土屋：「風力発電機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)
- 2) 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)
- 3) Lewis Kendall, Mark J Balas, Yung Jac Lee, and Lee Jay Fingersh: Application of Proportional-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)