

フィードフォワード制御の導入による 風力発電機の出力変動抑制方策

Control Strategy for Power Fluctuations of a Wind Generator by using Feed Forward Control Scheme

○松坂 知行*、土屋 敬一**

Tomoyuki Matsuzaka*, Keiichi Tuchiya**

*八戸工業大学、**東北電力

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

キーワード：風力発電機(Wind generator)、出力変動(Power fluctuations)、フィードフォワード制御(Feed forward control)

連絡先：〒031 八戸市大字妙字大開 8 8 - 1 八戸工業大学情報システム工学研究所

松坂 知行、Tel : (0178)25-8139、Fax : (0178)25-1691、E-mail : tom@hachi.hi-tech.ac.jp

1. まえがき

風力発電機は、常に変動する風力エネルギーにより駆動されているので、出力変動が大きい。通常出力を一定に維持するため、フィードバックによるピッチ角制御で対応しているが、風車の慣性が非常に大きいため、風力エネルギーの変動が激しい場合には、ピッチ制御を適切に行わないと出力の変動を抑えることが困難になる。特に、起伏の激しい山地に設置されている風力発電機では、風の乱れが多いため、出力に大きな変動が生ずる。このため、風力発電機を小容量の電力系統に接続した場合、系統に影響を与える可能性が出てくるので、適切な運転方法を考慮しなければならない。このような出力変動は、複数の風力発電機を同一注入点に接続することにより、全体としては出力変動を平滑化することができる。しかし、この場合でも風車群に突風が同時に加えられた場合や、あるいは大容量の風力発電機を離島などの、小容量の単独系統や配電線に接続し

ている場合には、配電線の負荷に与える影響は無視できない。

本論文は、出力変動を抑えるためのピッチ角の制御方法を提案するものである。そのために、まづ竜飛ウインドパークで用いられている風力発電機のモデリングを行い、実観測データを用いてこのモデルを妥当性を検討した。つぎに、フィードフォワード制御の導入をこのモデルに適用し、出力変動を抑制する方法として、有効であることをシミュレーションにより確認したので報告する。

2. 風車発電機のモデリング

風力発電機の制御方策をを検討するためには、風力発電機全体のモデルを構築する必要がある。風力発電機は風車、発電機、制御機構などから構成されるので、以下これらの構成要素と相互の関係について述べる。

2.1 風車

風車により得られる風力エネルギー P_w は次式のように与えられる^{(1), (2)}。

$$P_w = C_p V_w^3 \rho A / 2 \dots \dots \dots (1)$$

ここで

V_w : 風速 ρ : 空気密度 A : 風車の回転

断面積

C_p は出力係数と呼ばれ、次式で定義される周速比 λ とピッチ角 β の関数になる。本稿では以下の多項式を用いて近似した。

$$C_p(\lambda, \beta) = c_1(\beta)\lambda^2 + c_2(\beta)\lambda^3 + c_3(\beta)\lambda^4 \dots \dots (2)$$

$$\lambda = R \frac{\Omega}{V_w} \dots \dots \dots (3)$$

ここで

R : 風車半径 Ω : 風車の回転角速度

また $c_1(\beta)$ 、 $c_2(\beta)$ 、 $c_3(\beta)$ は以下のように表される。

$$\left. \begin{aligned} c_1(\beta) &= c_{10} + c_{11}\beta + c_{12}\beta^2 + c_{13}\beta^3 + c_{14}\beta^4 \\ c_2(\beta) &= c_{20} + c_{21}\beta + c_{22}\beta^2 + c_{23}\beta^3 + c_{24}\beta^4 \\ c_3(\beta) &= c_{30} + c_{31}\beta + c_{32}\beta^2 + c_{33}\beta^3 + c_{34}\beta^4 \end{aligned} \right\} \dots \dots (4)$$

ここで $c_{10} \sim c_{34}$ は定数である。

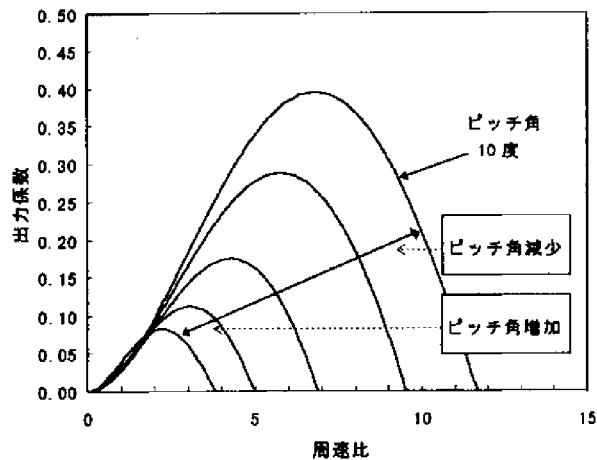


Fig. 1 Power coefficient

図1に出力係数を示す。出力係数は周速比とピッチ角に関して図示のように変化し、ピッチ角が増加するにつれて出力係数のピーク値は減少する。

なおピッチ角は通常マイナスで表示されるが、本稿では便宜上プラスで表示してある。図2は出力 P_w と風速 V_w 、ピッチ角 β との関係を示し、同じ風速

に対し、ピッチ角を増加すると出力は減少し、ピッ

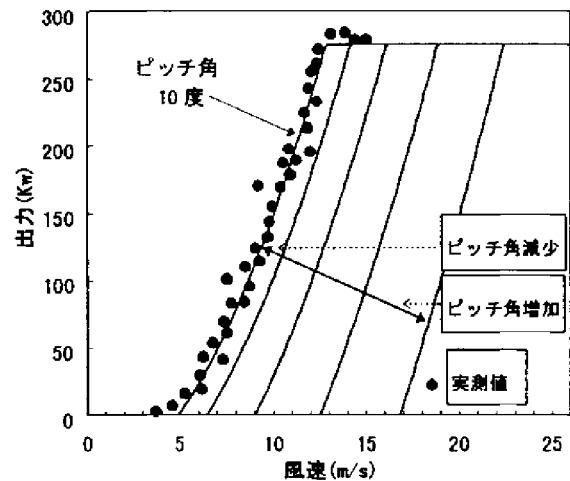


Fig. 2 Power characteristics

チ角を減少させると出力が増加することを表している。また特定のピッチ角に対する出力曲線は(5)、(6)式から計算できる。

$$P_w = a_1(\beta) + a_2(\beta)V_w^2 \dots \dots \dots (5)$$

ここで $a_1(\beta)$ 、 $a_2(\beta)$ は以下のように表される。

$$\left. \begin{aligned} a_1(\beta) &= \alpha_{10} + \alpha_{11}\beta + \alpha_{12}\beta^2 + \alpha_{13}\beta^3 \\ a_2(\beta) &= \alpha_{20} + \alpha_{21}\beta + \alpha_{22}\beta^2 + \alpha_{23}\beta^3 \end{aligned} \right\} \dots \dots (6)$$

ここで $\alpha_{10} \sim \alpha_{23}$ は定数である。

いまピッチ角 10 度一定のときの実測値と計算値を比較すれば、両者は図示のように一致することが分かる。実測値はデータを 10 分間平均して求めたものである。

2.2 風速によるピッチ角の制御則

つぎにピッチ角の制御方法について述べる。一般に一定速運転の風車のピッチ角の制御は、風速が起動風速以下、起動風速から定格風速、定格風速から停止風速、停止風速以上までの四つの範囲に分けて考えることができる。竜飛ウインドパークの風車では、風車のピッチ制御は以下のようにして行われる。

(1) 風速が起動風速以下

$V_w \leq 5$ のとき、すなわち起動風速以下のときは、安全のためピッチ角を $\beta_c = 90$ 度という一定の値に

押さえ、突風の際にも風車トルクが発生しないようにする。

(2) 風速が起動風速から定格風速の範囲

風速が $5 \leq V_w \leq 12.5$ のとき、ピッチ角を $\beta_f = 10$ 度で一定にし、風車が風エネルギーを最大限に受けるようにする。

(3) 定格風速から停止風速の範囲

風速が $12.5 \leq V_w \leq 24$ のとき、定格出力 $P_{w0} = 275$ (kW) の一定値に維持するようにピッチ角を制御する。ピッチ角と風速の関係は(6)式を解くことによって求められ、このときのピッチ角 β_m は具体的には(8)式で近似できる。

$$\beta_m = \beta_{m0} + \beta_{m1} V_w + \beta_{m2} V_w^2 \dots \dots \dots (7)$$

ここに β_{m0} 、 β_{m1} 、 β_{m2} は定数である。

(4) 停止風速以上

風速が $V_w \geq 24$ のとき風車を停止させる。このときは(1)と同じようにピッチ角を $\beta_c = 90$ とし風エネルギーを逸らす。

図3はケース(1)～(4)における風速とピッチ角の関係を示す。図中の実測値は10分間の平均値を求めたもので、計算値と一致していることが認められた。なお制御に用いられる風速の計測は、タワー上に設置されている風速計で行っている。

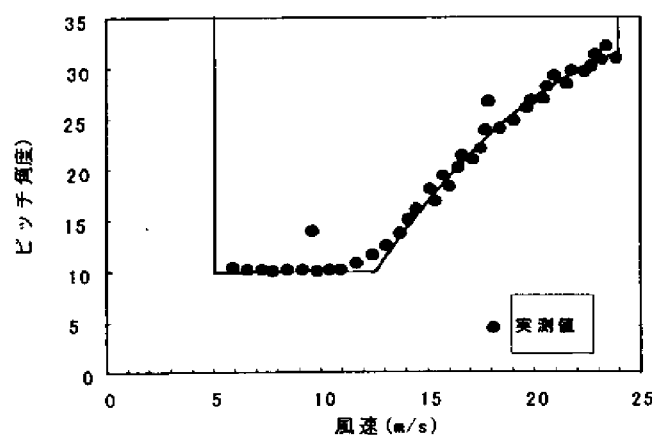


Fig.3 Pitch angle vs. wind speed

2.3 実効風速の推定

上述の制御則は、風の変動の無い静的状態における制御則であり、実際の風車は、常に変動する風の中で動作している。また風車前面の風速の実測は困

難であるため、実際に観測される出力、ピッチ角のデータから以下のようにして実効風速を推定する。

P_w 、 β 、 V_w の関係は(6)式により決定されるが、

これをある関数 f で表せば

$$P_w = f(\beta, V_w) \dots \dots \dots (8)$$

また風速 V_w 、ピッチ角 β もある関数 g 、 h を用いて

$$V_w = g(P_w, \beta) \dots \dots \dots (9)$$

$$\beta = h(P_w, V_w) \dots \dots \dots (10)$$

のように表せる。(8)、(9)、(10)式は風の変動の無い静的な場合に成立するものである。しかし実際の風車は常に変動する風速の下で動作しているため、図3の出力曲線にそってピッチ角を制御するためには、変動する風速から何らかの方法で、静的な状態に近い実効風速を推定する必要がある。いまある時点 k で観測された発電機出力を P_w^k 、ピッチ角を β^k とすると実効風速 \hat{V}_w^k は(9)式を用いて

$$\hat{V}_w^k = g(P_w^k, \beta^k) \dots \dots \dots (11)$$

と推定するのが妥当であろう。この推定方法は、風車の慣性により出力、ピッチ角の観測値から統計的なノイズ成分が軽減されるので、推定値はより定常的な値に近くなる。この推定値をもとに、定格出力 P_{w0} を維持するために必要な、 $k+1$ 時点のピッチ角 β^{k+1} は次式のように求められる。

$$\beta^{k+1} = h(P_{w0}, \hat{V}_w^k) \dots \dots \dots (12)$$

2.4 出力変化に対するピッチ角の制御量

つぎに定格出力における、出力変化に対するピッチ角変化 $\Delta\beta/\Delta P_{w0}$ について述べる。いま定格出力を P_{w0} 、そのときのピッチ角を β_0 、風速を V_w とすると(6)式より

$$P_{w0} = a_1(\beta_0) + a_2(\beta_0) V_w^2 \dots \dots \dots (13)$$

が成り立つ。さらに同じ風速で、出力が ΔP_{w0} だけ変化したときのピッチ角の変化を $\Delta\beta$ とすれば、

$$P_{w0} + \Delta P_{w0} = a_1(\beta_0 + \Delta\beta) + a_2(\beta_0 + \Delta\beta) V_w^2 \dots \dots (14)$$

が成り立ち、(13)、(14)式から

$$G(\beta_0) = \frac{d\beta}{dP_{w0}} = \frac{a_2(\beta_0)}{P_{w0}a_1'(\beta_0) + a_2(\beta_0)a_1'(\beta_0) - a_1(\beta_0)a_2'(\beta_0)} \quad (15)$$

が導かれる。(15)式から求められる $\Delta\beta$ は、出力を定格に維持するために必要なピッチ角の制御量を与える。図4は(15)式を図示したもので、ピッチ角の値により制御量に変化することがわかる。なお $\beta_0 \leq 10$ では $G(\beta_0)$ は一定である。

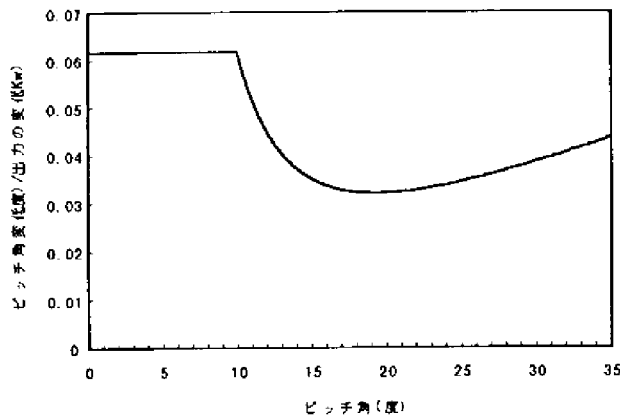


Fig. 4 Pitch angle deviation vs. power deviation

以上で各要素の記述を終わったので、動的制御を含めた風力発電機全体の制御方法について述べる。

3. 風力発電機の運転と制御

風力発電機の運転方式には、大きく分けて一定速運転、可変速運転、固定ピッチ角運転方式などがある。一定速運転は同期速度、あるいは同期速度近辺で一定速度で運転する方式で、系統連系の場合には、同期発電機では同期速度、誘導発電機では定格出力を与える一定スリップで運転するため正確な速度制御が必要になる。一方可変速運転方式⁽⁴⁾は、風車の最大効率を維持しつつ、発電機の回転速度を可変速度で運転する方法で、系統に連系する場合、発電機速度と系統周波数の整合をとる必要があるため、通常パワーエレクトロニクス装置を用いる。この方式は厳密にピッチ角を制御する必要がないが、イン

バータ、コンバータなどの設置費用が増えるのが欠点である。また固定ピッチ角運転方式は、起動風速から停止風速の範囲まで固定ピッチ角で運転され、停止風速以上では風車のブレードのひねりやチップペーンなどを利用して風車の制御を行う方式である。

また通常このような運転方法を実現するには、風の方位に風車を正対させるためのヨー制御、固定ピッチ制御以外の風車では回転速度を制御するためのピッチ制御が必要になる。本稿で述べる竜飛ウインドパークの風車発電機は、一定速運転であり、ヨー制御、ピッチ角制御の機能をもっている。また以下のモデルでは風車が常に、ヨー制御により風の方位に追随し、正対しているものとする。

3.1 ロータの駆動方程式

風車トルクを T_w 、発電機による電氣的トルクを T_g 、風車発電機の慣性モーメントを J 、回転角速度を Ω とすれば

$$J \frac{d\Omega}{dt} = T_w - T_g \quad (16)$$

が成立する。両辺に Ω を乗じると

$$\frac{J}{2} \frac{d}{dt} (\Omega^2) = P_w - P_g \quad (17)$$

となる。 P_w は(1)式、 P_g は(18)式で与えられる。

$$P_g = \frac{-3V^2 s(1+s)R_2}{(R_2 - sR_1)^2 + s^2(X_1 + X_2)^2} \quad (18)$$

3.2 風力発電機の制御系^{(4), (5)}

図5は制御系全体のブロック図を示す。ブロック図の説明は以下の通りである。

(a) 2.2の(1)~(4)で述べたように、風速 V_w にあわせて β_c 、 β_f 、 β_m の中からピッチ制御の指令値を選択する必要がある。この選択は、風速がある時間持続したことを検出した上で行われ、Fnswはこの切り替えを行う。

(b) ピッチ制御では指令値を受けて、油圧サーボ機構に伝え、ブレードピッチ角を変える。この制御は、風車のピッチ角を急速に変えると、ブレードにスト

レスがかかり、疲労を加速することと、油圧サーボ機構のパワーに限界があるので、単位時間当たりの変化量を制限している。ブロック図ではリミッタ付き積分器で表されている。

(c) P_w と P_g の差を積分し、(17)式にしたがって風車角速度が計算される。

(d) 定格出力 P_{wo} と現在の発電機出力 P_g の差を PD 制御器に加える。

(e) 現在のピッチ角を用いて、PD 制御器の出力を(15)式により補正し、新たなピッチ角指令値 β_2 を求める。

(f) 現在のピッチ角 β と発電機出力 P_g から(11)式により実効風速を推定する。

(g) 上で得られた実効風速から、新たなピッチ角指令値 β_1 を(12)式により求める。

(h) MAX は β_1 、 β_2 の中の大きい方を求める。大きい方を選択する理由は、ピッチ角が大きい方が、風車をより安全な方向（停止する方向）に制御するためである。なお風速の変動が小さい場合は β_1 が支配的であり、変動の大きい場合は PD 制御の微分器の出力が大きくなるので β_2 が支配的になる。

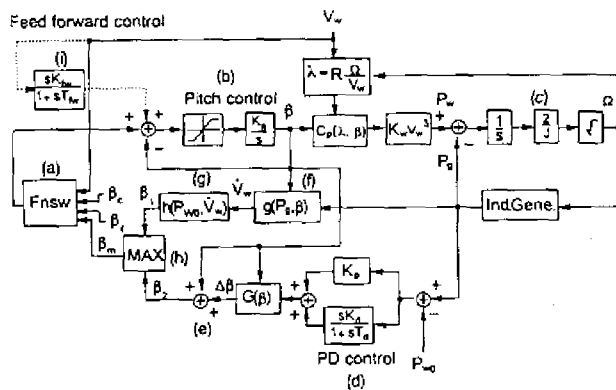


Fig.5 Block diagram of control system

4. シミュレーション

つぎにモデルの妥当性を調べるために実測値とシミュレーション結果とを比較した。

4.1 風速の計測

この場合、瞬時風速の実測値をどの位置で測定す

るかが問題になる。風車の前面で風速を計測すれば、風速計により風が乱れてしまうので、精密に測定するためには風車軸に内蔵した特別な風速計を設置する必要がある。しかし、竜飛ウインドパークの風車にはこのような風速計の組み込みが困難であるため、風速の計測は、風車の起動停止を行うためにナセル上に設置された風速計で採取した。図6にこれを示す。

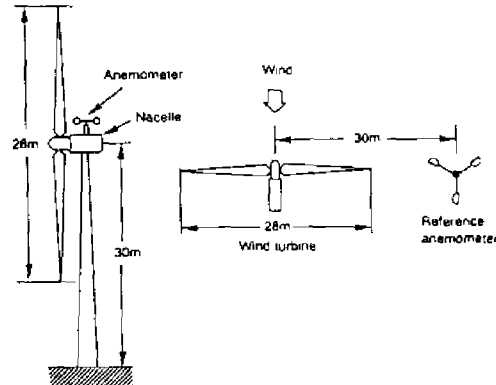


Fig.6 Measuring method of wind speed

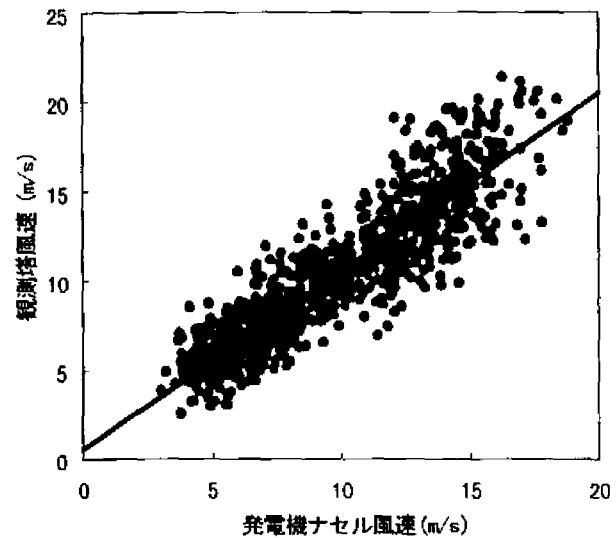


Fig.7 Correlation of wind speed measurements

この風速計は風車の後方に設置されているため、風車の回転による風の乱れを受けるのではないかと、いう危ぐがあった。そこで図示のように新たに観測用風速計を設置し、正対する風向を選んで二つの風速計のデータを比較した。その結果を図7に示す二つのデータは相関係数 0.9015 であり、十分相関が認められた。また発電機のナセルの風速を x 、観測

用風速計の風速を y とすると最小二乗法による近似式は

$$y = 0.9995x + 0.5638 \dots \dots \dots (19)$$

となる。そこでこの式を用いて x から y を推定し、この値を瞬時風速と見なすことにした。

以上でナセル上の風速計のデータが利用可能であることが分かったので、この風速を図6の入力データ V_w として用い、シミュレーションを行った

4.2 実測値とシミュレーション結果の比較

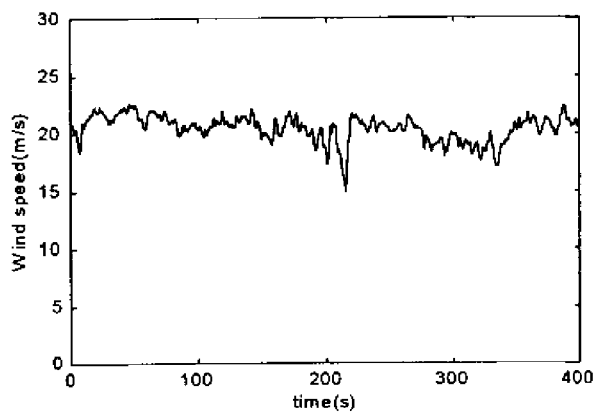


Fig.8 Wind speed

図8は入力として用いた風速で、大きさは15(m/s)~23(m/s)で、定格風速を超えており、したがって図9に示すように、ピッチ角は10度以上で制御されている。図9は出力を示す。この図から分かるように、出力の変動が非常に大きく、定格は275(kW)であるが、220(kW)~340(kW)の範囲で変動している。

風力発電機は、もともと変動の大きい風力エネル

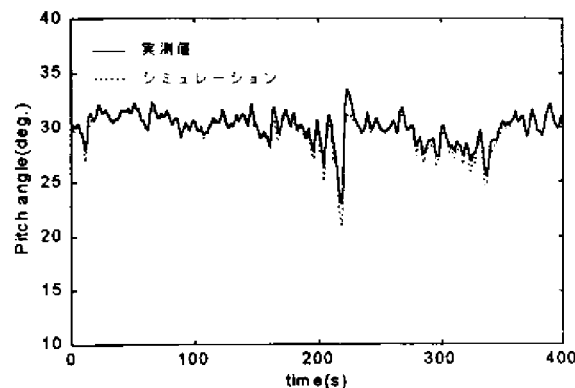


Fig.9 Pitch angle

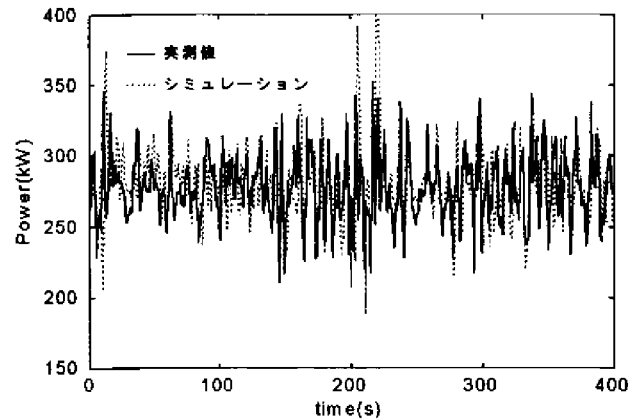


Fig.10 Power

ギーで駆動されているため、出力の変動は大きくなるが、加えて竜飛ウインドパークでは、風力発電機は起伏の激しい地形に設置されているので風の乱れが大きく、このことが出力の変動をさらに大きなものにしてている。図9、図10には実測値とシミュレーション結果との比較を示しているが、図から分かるように実測値とシミュレーション結果はほぼ一致し、モデリングの妥当性が示されたものと思われる。なお部分的に不一致のところがあるが、これは風向の変動によるものと思われる。

つぎに、風力発電機の出力変動の大きい原因の一つに制御系の構成が挙げられる。その理由は、風力発電機は慣性モーメントが非常に大きいので、フィードバック制御だけでは位相遅れが生じ、発生電力にオーバーシュートが生じるためである。すなわち、フィードバック信号は位相が遅れるため、風の変化に追いつかない。一方速く追随させるための方法として油圧サーボ機構のパワーを上げる方法があるが、重量、価格の問題から実用的ではない。そこでフィードフォワード制御の導入を提案する(1), (2), (6)。

このとき、フィードフォワード信号をどこから取り出すかという問題があるが、幸い4.1で述べたようにナセル上の風速計が風車の受ける風速と相関があるので、この風速をフィードフォワード信号として用いることにした。この風速は、風車の出力よりも素早く風速の変化を検出するので、フィードフォ

ワード信号として適当である。その方法として、図5のブロック図のように、位相進み要素を通して、ピッチ制御のブロックの加算点に風速をフィードフォワードすることにした。フィードフォワードによりピッチ角制御の位相を進めるのが目的である。

4.3 風力発電機の周波数応答

つぎに、フィードフォワード要素の設計法を考えるため、風力発電機の周波数応答を検討することにした。その方法としては、図5のブロック図で、風速 V_w の振幅を1(m/s)一定とし、周波数を0.02(Hz)~10(Hz)まで変化させ、周波数特性を調べた。その結果を図12に示す。この図で、利得は

$$20 \log(\Delta P_g / \Delta V_w) \dots \dots \dots (20)$$

を示し、位相は $\Delta P_g / \Delta V_w$ の位相差を示す。

この図から分かるように、この風力発電機は0.3(Hz)の周波数で振幅がピークになる。またこの周波数より低い場合も、高い場合も利得は減衰する。この理由は、風の周波数が低い場合には、風車と制御系を含めたシステム全体の応答が風の変化に追従するため、出力の変動が少ないことを示し、風の周波数が高い場合には、風の変動が風車の慣性モーメントにより吸収され、出力の変動が小さくなることを意味している。この中間の0.3(Hz)では風の変動にตอบสนองし易いため、利得が大きくなる。

一方位相は、0.3(Hz)以下では出力の方が進み、0.3(Hz)以上では遅れている。また0.3(Hz)では位相差はない。

そこで出力の変動を抑えるためには、0.3(Hz)における利得を下げるようにした。このため、図5(i)のような位相進み要素において、 $f = 0.3(\text{Hz})$ のとき

$$\left. \begin{array}{l} \omega T_{pw} \leq 1 \\ K_{pw} / T_{pw} = 10 \end{array} \right\} \dots \dots \dots (21)$$

となるように T_{pw} を選び、最終的にはミュレーションで決定した。図11には、フィードフォワード要素

を加えた場合の周波数特性も示してある。図から分かるように、利得はピーク時で約30(dB)下がっている。

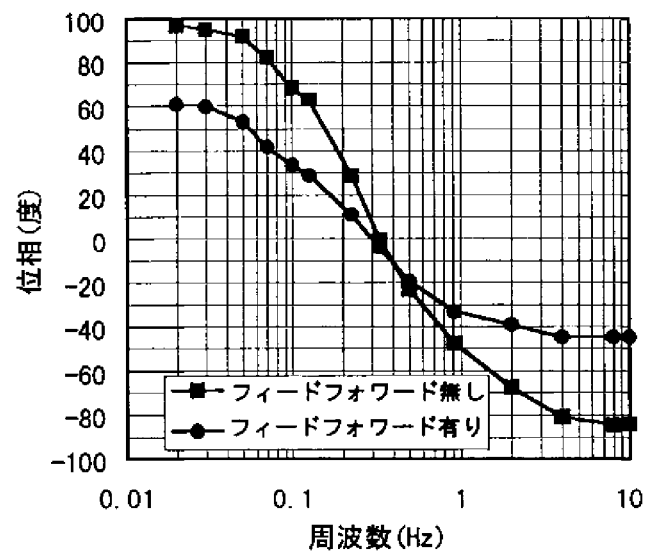
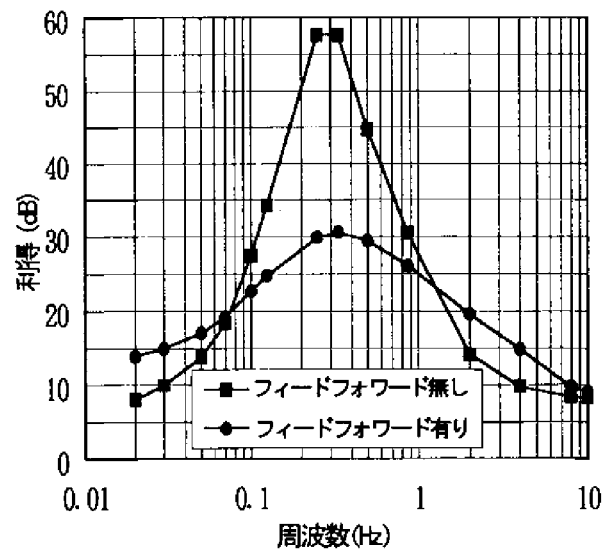


Fig. 11 Frequency characteristics of wind generator

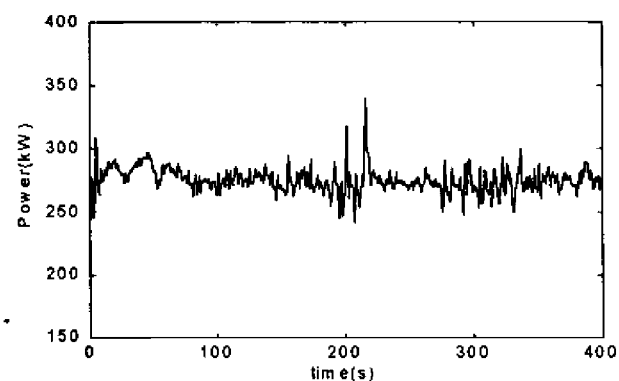


Fig. 12 Power with feed forward

4.4 フィードフォワード制御の導入効果

図 12 は、図 8 の風速を加えた場合の出力のシミュレーション結果である。図 10 と比較すれば分かるように、出力の変動はきわめて小さくなっており、フィードフォワード制御の効果が顕著に現れていることが分かる。なお図 12 において、フィードフォワード制御を加えた場合でも変動が大きい部分があるが、これは位相進み要素の利得が、周波数の低いところで小さくなるために、フィードフォワード制御の効果が減少するためである。

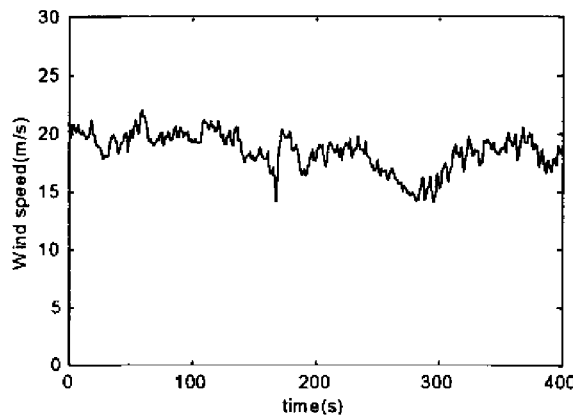


Fig. 13 Largely fluctuating wind speed

つぎに図 13 は、図 8 よりも変動が大きい場合の風速で、図 14 はそのときの出力の実測値、図 15 はフィードフォワード要素を加えた場合の出力のシミュレーション結果である。図示のようにこの場合も出力の変動はきわめて小さくなっており、フィードフォワード制御の効果が現れていることが分かる。

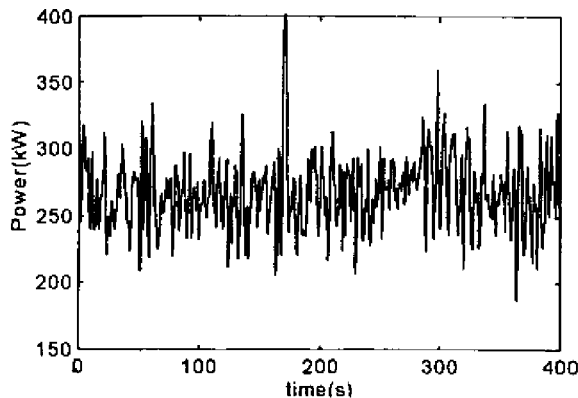


Fig. 14 Power without feed forward

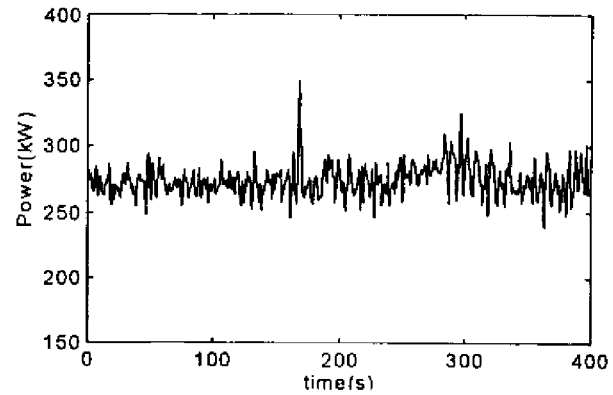


Fig. 15 Power with feed forward

5. まとめ

以上竜飛ウインドパークの風力発電機をもとにして精緻なモデルを構築し、実測値とシミュレーションを比較し、モデルの妥当性を確認した。このモデルをもとにして、風速を入力とし、発電機出力を出力として周波数特性を明らかにした。この結果周波数特性は、特定の風速の周波数で利得がピーク値を示し、この周波数の風速に対して変動しやすいことが分かった。この変動の原因は、風車の慣性モーメントが大きいため、フィードバック制御だけではピッチ角の修正動作が遅れるためである。そこで、風力発電機の出力変動を抑制するための方法としてフィードフォワード制御を導入し、ピッチ角制御の位相を進める方法を提案した。これにより利得のピーク値を下げ、出力変動を大幅に減少できることをシミュレーションの結果確認できた。本稿で提案された方法を用いれば、将来単機容量の大きい風力発電機を小容量の配電線に注入した場合でも、風速の変動に対する出力変動を抑えることができ、系統運用への影響も少なくする上で有効な制御方法と考える。またピッチ角制御に要する制御エネルギーを増加させる必要もない。

なおフィードフォワード要素の最適構成法、最適パラメータ決定法、制御系全体を含めた安定性などの検討は今後の課題である。また現段階ではシミュレーションであるため、今後実機で確かめていく

い。

また本研究の一部は、八戸工業大学プロジェクト研究の支援を頂いたものである。

参考文献

- (1) 松坂、土屋：「フィードフォワード制御による風力発電機出力変動安定化」、第17回風力エネルギー利用シンポジウム、197/200 (1995)
- (2) 松坂、土屋：「風力発電機のモデリングと制御に関する研究」、電力技術研究会資料、PE-95-135、37/47 (1995)
- (3) T.Matsuzaka, K.Tuchiya: "A variable wind generating system and its test results", Proc. of European Wind Energy Conference, part two, 608/612 (1989)
- (4) 土屋、松坂、山田、佐久間、猪股：「風力発電システムの運転特性シミュレーション」、電学論B113-7, 752/759 (1993)
- (5) T.Matsuzaka, K.Tuchiya.: "Performance and Power Generation Estimation of TAPPI Wind park", Proc. Of Beijing Int. Conference on Wind Energy", D1/D6 (1995)
- (6) T.Matsuzaka, K.Tuchiya.: "Power Fluctuation Stabilization of a Wind Generator by using Feed forward Control", Book of abstract EUWEC'96, p14.17, Goteborg, (1996)
(Proceedings to be published)