

# フィードフォワード/フィードバックを併用した 確率最適制御による風力発電機の出力変動抑制

小 玉 成 人\*, 松 坂 知 行\*\*

## The power variation control of a wind generator using probabilistic optimal control by combining feed forward control with feed back control

Naruhito KODAMA and Tomoyuki MATSUZAKA

### Abstract

Wind generators are driven by stochastically fluctuating wind speeds, and hence the output power varies much, particularly in the site where generators are built in a mountainous and rough complex terrain. A pitch control strategy was carried out with the conventional PID control previously, but recently modern control schemes such as adaptive control, LQG optimal control, fuzzy control have been proposed. This paper presents a new control scheme based on probabilistic optimal control, including feed forward control from wind speed. The simulation results showed that the proposed controller could reduce to approximately one third of covariance of power variations.

キーワード：風力発電機，モデリング，出力変動，確率最適制御，フィードフォワード

### 1. ま え が き

風力エネルギーは再生可能で環境を汚染しないエネルギーであるという観点から米国や欧州諸国をはじめ、近時我が国においても電力会社、自治体をはじめ導入が進んでいる。一方風力発電機の駆動入力には常に変動する自然風であるため出力に大きな変動が生じ、このような変動を抑制するためには風車、制御系を含めた全体の動特性を把握した制御系の設計が重要である<sup>(1),(2)</sup>。

これまでの風力発電機の制御法は古典的なPID制御に基づくものが多かったが<sup>(3),(4),(5),(6)</sup>、近時適応制御法によるもの<sup>(7)</sup>、最適制御法によるもの<sup>(8)</sup>、また最近ではファジィ制御<sup>(9)</sup>なども提案されている。さらに定格風速以下の出力の補足効率を上げるための可変速制御なども試行されている<sup>(10),(11)</sup>。

一方我が国における風力発電の設置場所は竜飛ウィンドパークに見られるように、海外に比較して起伏の多いところが多い。このため風の乱れやウィンドシェアが生じ、大型風力発電機では出力変動が大きくなる。このような変動をフィードバック制御だけで抑制することは困難であるため、筆者等はこれまでフィードバックとフィードフォワードを併用する方法を提案してきた<sup>(12),(13),(14)</sup>。本稿は、風力発電機を不規則な入力エネルギーで駆動される系と捉え、風力発電機を確率最適制御系として定式化し、フィードバックとフィードフォワードの併用による新たな制御系の構築法を提案する。本稿

で提案する制御法をNEDOの500kW機の風力発電機で同定したモデルに適用したところ、出力変動を大幅に抑制できることをシミュレーションで確認できたので報告する。

### 2. 風力発電機

まず今回の研究の対象としているNEDO 500kW機の主な構成について述べ、次に風車のピッチ角制御、風車及び発電機について説明する。最後にこの風車システムのモデリングについて述べる。

〈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)の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り、さらに風車の出力は東北電力の系統に連系されている。また、ナセル上に風速計を設置し、ナセルの高さでの風速を測定できるようにしている。

〈2.2〉 風車のピッチ角制御 風車の出力曲線は図2に示すとおりである。ピッチ制御は起動風速以下の領域(a)、起動風速以上定格風速以下の領域(b)、定格風速以上停止風速以下の領域(c)、停止風速以上の領域(d)の4つの領域に分けられる。以下にこれらの領域におけるピッチの制御法を説明する。

(1) 起動風速以下の場合 (領域 (a))

風速が起動風速5(m/s)以下の場合、突然の強風にも耐えられるようにピッチ角を90(deg.)一定にし風車トルクが発生しないようにしている。

平成12年12月21日受理

\* 八戸工業大学大学院 電気電子専攻 後期課程

\*\* 八戸工業大学 システム情報工学科 教授

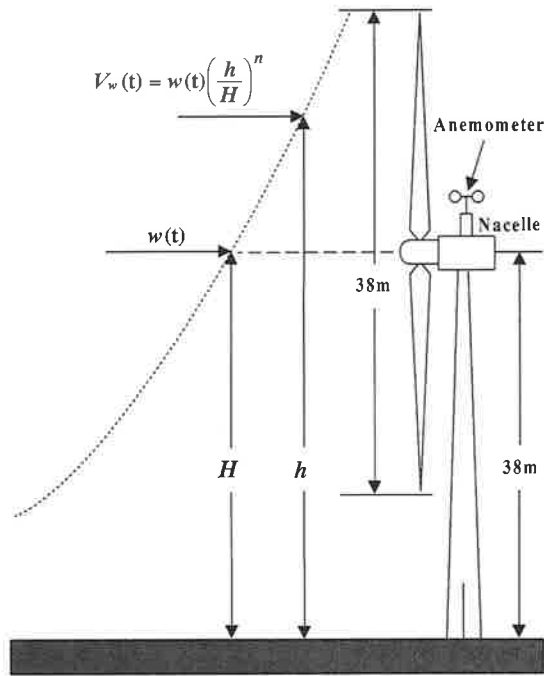


図1 風車の構成  
Fig. 1. Structure of the windmill.

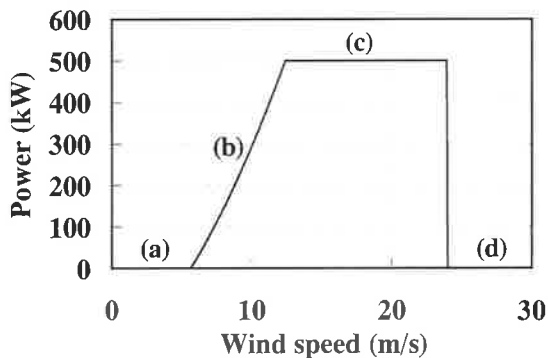


図2 風車の出力曲線  
Fig. 2. Power characteristics.

(2) 起動風速以上定格風速以下の場合（領域 (b)）  
起動風速 5 (m/s) から定格風速 12.5 (m/s) まではピッチ制御を行わずピッチ角を 10 (deg.) 一定にし風車が風エネルギーを最大限に受けるようにしている。

(3) 定格風速以上停止風速以下の場合（領域 (c)）  
風速が定格風速 12.5 (m/s) から停止風速 24 (m/s) の場合、発電機出力を 500 (kW) 一定に保つためにピッチ角を制御する。

(4) 停止風速以上の場合（領域 (d)）  
風速が停止風速 24 (m/s) 以上の場合、領域 (a) の場合と同様に風車トルクが発生しないようにピッチ角を 90 (deg.) 一定にしている。

なお、本稿で提案する制御法策は領域(c)を対象としている。

〈2.3〉 風車及び発電機 風車によるトルク  $T_w$  は一

般的に (1) 式で与えられる<sup>(3)(13)</sup>。

$$T_w(t) = \frac{C_p(\lambda(t), \beta(t)) V_w^3(t) \rho A}{2\Omega(t)} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 $V_w(t)$ : 風速、 $\rho$ : 空気密度、 $A$ : 風車の回転断面積、 $\Omega(t)$ : 風車の機械的角速度、 $C_p$ : 出力係数、 $\lambda(t) = R\Omega(t)/V_w(t)$ : 周速比、 $R$ : 車の半径

$C_p$  は周速比  $\lambda$  とピッチ角  $\beta(t)$  の関数であり、多項式近似を用いて表される<sup>(1),(2)</sup>。

また、発電機トルクの式は動作点（同期速度）の付近で線形化すると次式のような簡単な式で近似できる<sup>(1),(2)</sup>。

$$T_g(t) = K_g \Omega(t) \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 $k_g$ : 定数

〈2.4〉 モデリング 次に、この風車システムのモデリングについて述べる。まず始めに、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。

$$T_w(t) = J \left( \frac{d\Omega(t)}{dt} \right) + T_g(t) \dots\dots\dots (3)$$

ここで

$J$ : 風車の慣性モーメント

(1)~(3)式より、風力発電機の角速度、風速、ピッチ角の微小変化に対する関係式が以下のように導かれる<sup>(1),(2)</sup>。

$$J \Delta \dot{\Omega}(t) = (\gamma + K_s) \Delta \Omega(t) + \alpha \Delta V_w(t) + \delta \Delta \beta(t) \dots\dots (4)$$

ここで

$\Delta \beta(t)$ : ピッチ角の微小変化、 $\Delta V_w(t)$ : 風速の変化、 $\Delta \Omega(t)$ : 角速度の変化

また、 $\alpha, \gamma, \delta$  はそれぞれピッチ角や角速度、風速などの変化に対する係数であり、これらの値は動作点が決定すればすべて解析的に求められる<sup>(1),(2)</sup>。よって (4) 式よりピッチ角が一定 ( $\Delta \beta(t) = 0$ ) の時つまり風速が起動風速以上定格風速以下 (図2の領域 (b)) の場合の風速から角速度までの伝達関数と、風速が一定  $G_w(s)$  の時のピッチ角から角速度までの伝達関数  $G_\theta(s)$  が以下のように求められる。

$$G_v(s) = \frac{\alpha}{sJ - (\gamma + K_s)} \dots\dots\dots (5)$$

$$G_\theta(s) = \frac{\delta}{sJ - (\gamma + K_s)} \dots\dots\dots (6)$$

つぎに、制御系のブロック図を図3に示す。制御偏差からピッチ角指令値を求める出力制御系  $G_1(s)$  と、ピッチ角を変えるピッチ駆動系  $G_{pc}(s)$  は、油圧系・機械系等の複雑な因果関係やピッチ角などによって変化する非線型性を持っているため解析的に求めることができず、システム同定手法を用い (7), (8) 式で表される伝達関数を得た<sup>(1),(2)</sup>。

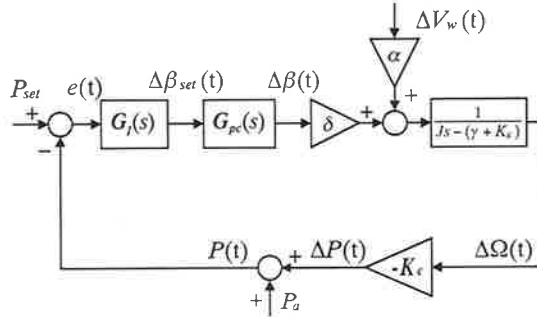


図3 風力発電機の制御系  
Fig. 3. Control system

$$G_f(s) = \frac{s^3 K_1 + s^2 K_2 + s K_3 + K_4}{s^3 + s^2 K_5 + s K_6 + K_7} \quad (7)$$

$$G_{pc}(s) = \frac{K_8}{s + K_9} \quad (8)$$

ここで

$P_{set}$ : 出力設定値,  $P_a$ : 発電機平均出力,  $\Delta\beta_{set}(t)$ : ピッチ角指令値の微小変化,  $P(t)$ : 発電機出力,  $e(t)$ : 制御偏差,  $\Delta P(t)$ : 発電機出力の微小変化,  $K_e$ : 定数

本制御系では, 出力設定値  $P_{set}$  から実出力  $P(t)$  を引く事により制御偏差  $e(t)$  を求め, この値からピッチ角指令値  $\Delta\beta_{set}(t)$  を計算する。そして, 油圧シリンダによりブレードのピッチ角  $\Delta\beta(t)$  を変え, 風力発電機の出力を制御している。

### 3. 制御方策

つぎに本稿で提案する制御方策について述べる。まず風車システムを, 不規則に変動する風速を入力とする確率制御系と考える。さらにフィードバックとフィードフォワードを併用する確率制御系として風車システムを定式化し, 評価関数を最小化する最適制御系を構成する。

〈3.1〉 風速の計測 フィードフォワード制御を行うためには風速の検出が必要となる。この場合2つの方法が考えられる。

(1) 直接計測による方法 この方法はダウンウインド型の風車に適用する方法である。ダウンウインド型の風車ではタワーまたはナセル上に設置された風速計により, 風車に乱されことなく風車の前面風速を計測することができる。したがって前面風速の計測は比較的容易である。しかしながらダウンウインド型の風車の数は少ない。

(2) 風速オブザーバによる方法 この方法はアップウインド型の風車に適用する方法である。この型の風車では, 風車の前面風速を測定することが困難であるため, なんらかの方法で風速を推定することが必要になる。しかし風車に作用する風速を正確に求めることは必ずしも

表1 相関  
Table 1. Correlation.

	data1	data2	data3	data4	data5
相関係数	0.9112	0.8606	0.7824	0.7555	0.7513

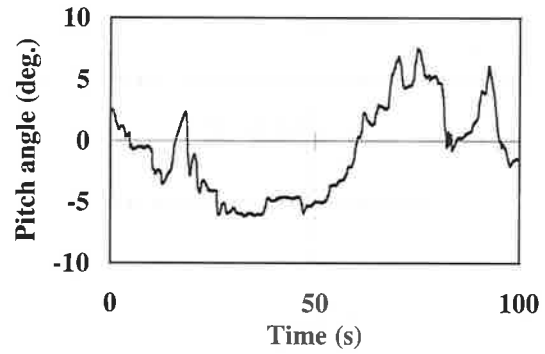


図4 ピッチ角  
Fig. 4. Pitch angle.

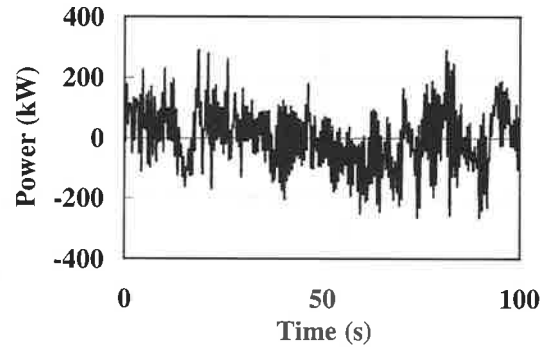


図5 発電機出力  
Fig. 5. Generated power.

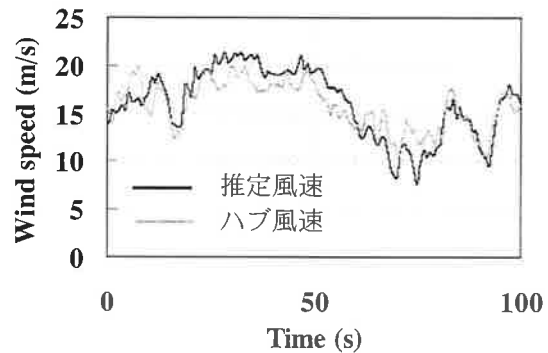


図6 ハブ風速との比較  
Fig. 6. Hub wind speed and estimated wind speed.

容易なことではない。そこで, 本稿では風力発電機そのものを用いた作用風速の推定方法を提案するものである。基本的には風力発電機の動的モデルと, 制御のために実測されるピッチ角, 出力を用いて風速の観測器を構

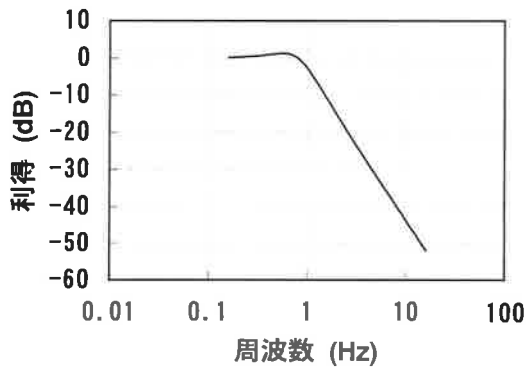


図7 フィードフォワード伝達関数  
Fig.7 Feed forward transfer function

成し、観測器の出力から作用風速を求める方法である<sup>(17)</sup>。本方法を NEDO 500 kW 機の同定モデルに適用した結果、ハブ上で測定された実測値とほぼ一致し、風車に作用する風速として妥当であることが確認できた。この風速の推定を行う方法を風速オブザーバと呼ぶことにする。

つぎに、風速の観測器の構築を行う。(4)式をもとに風車に作用する風速は、発電機出力と実ピッチ角から次式を用いて逆算することができる。

$$\Delta V_w(s) = \frac{sJ + (\gamma K_g)}{K_e \alpha} \Delta P(s) - \frac{\delta}{\alpha} \Delta \beta(s) \quad \dots\dots (9)$$

ここに、 $K_e$ : 定数、 $\Delta P(s) = K_e \Delta \Omega(s)$ : 発電機出力  
しかし、このままでは微分を含んでしまうために実現が困難であり、またノイズの影響を受けやすくなってしまう。そこで、(9)式の微分の近似として次式に示す疑似微分を用いた観測器を提案する。

$$\begin{aligned} \Delta \hat{V}_w(s) &= \left( \frac{J}{K_e \alpha T} \left( 1 - \frac{1}{sT+1} \right) + \frac{r + K_g}{K_e \alpha (sT+1)} \right) \Delta P(s) \\ &\quad - \frac{\delta}{\alpha (sT+1)} \Delta \beta(s) \end{aligned} \quad (10)$$

ここに、 $T$ : 疑似微分の時定数

得られた観測器を用い、図4,5に示す実測されたピッチ角と発電機出力より作用風速を推定した。その結果を図6に示す。図示のように、ハブ上の風速とほぼ一致している。また、他のデータ区間に対しても風速の推定を行い、それぞれ相関を計算した結果を表1に示す。これらの結果から推定した風速が風車に作用する風速として妥当であると思われる。

### 〈3.2〉 フィードフォワード伝達関数

推定した風速をフィードフォワードするにはフィードフォワード伝達関数が必要である。そこで、推定風速をどのようにフィードフォワードするかを表すフィードフォワード伝達関数を導入する。前節のフィードフォワード伝達関数を求める時と同様に、フィードフォワ

ード伝達関数は前面風速から実効風速までの伝達関数を調整して求められる。この調整では、ウィンドシェアによる変動まで含めてフィードフォワードするとピッチ角の制御頻度が限界を超えてしまうため、ウィンドシェアの1.6 (Hz) の成分をほとんどフィードフォワードしないようにしている。図7にそのゲイン特性を示し、このフィードフォワード伝達関数は (11) 式で表される。

$$G(s) = \frac{a}{s^2 + bs + c} \quad \dots\dots\dots (11)$$

### 〈3.3〉 状態オブザーバ

つぎに、最適制御を行うには全状態を知ることが必要である。しかし、風車システムの全状態のうち観測可能であるのは風車のピッチ角及び発電機の出力のみである。そこで、その他の部分の状態を推定するオブザーバが必要となる。そこで、風車システムの制御系に対して最小次元オブザーバを次式のように構成した。

$$\dot{x}_p(t) = A_{ob1}x_p(t) + A_{ob2}\Delta\beta(t) + B_{ob}e(t) \quad \dots\dots (12)$$

$$\hat{x}_c(t) = C_{ob}x_p(t) + D_{ob1}\Delta\beta(t) \quad \dots\dots\dots (13)$$

$$A_{ob1} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -K_7 - L_1K_8 \\ 1 & 0 & -K_6 - L_2K_8 \\ 0 & 1 & -K_5 - L_3K_8 \end{bmatrix}$$

$$A_{ob2} = \begin{bmatrix} K_9L_1 + (-K_7 - L_1K_8)L_3 \\ K_9L_2 + L_1 + (-K_6 - L_2K_8)L_3 \\ K_9L_3 + L_2 + (-K_5 - L_3K_8)L_3 \end{bmatrix}$$

$$B_{ob} = \begin{bmatrix} K_4 - K_1K_8L_1 \\ K_3 - K_1K_8L_2 \\ K_2 - K_1K_8L_3 \end{bmatrix}$$

$$C_{ob} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$D_{ob1} = [L_1 \quad L_2 \quad L_3 \quad 1]^T$$

ここで、

$x_p$ : オブザーバの状態変数

$\hat{x}_c$ : 制御系の状態の推定値

$y_1$ : 制御系の可観測な状態

$L = [L_1 \quad L_2 \quad L_3]^T$ : オブザーバゲイン

よって、風車システムの全状態の推定値はこの制御系の状態推定値に残りの状態を付加した次式で表される。

$$\hat{x}(t) = \hat{x}_c(t) + D_{ob2}\Delta P(t) \quad \dots\dots\dots (14)$$

$$D_{ob2} = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 1]^T$$

### 〈3.4〉 制御系構築<sup>(15),(17)</sup>

まず、図3の風力発電機システムの入力を制御偏差  $e(t)$  および実効風速  $\Delta V_w(t)$ 、システムの入力を発電機出力  $\Delta P(t)$ 、システムの観測可能な状態を実ピッチ角  $\Delta\beta(t)$  及び発電機出力として状態方程式表現に変換し、以下のような形の式を得る。

$$\dot{x}(t) = A_x(t) + B \begin{bmatrix} e(t) \\ \Delta V_w(t) \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (15)$$

$$y(t) = Cx(t) \quad \dots\dots\dots (16)$$

次に風速オブザーバは風力発電機システムの観測可能な変数がピッチ角と発電機出力であるので、次のような状態方程式に変換される。

$$\dot{\hat{V}}(t) = A_v \hat{V}(t) + B_v \begin{bmatrix} \Delta\beta(t) \\ \Delta P(t) \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (17)$$

$$\Delta \hat{V}_w(t) = C_v \hat{V}(t) + D_v \begin{bmatrix} \Delta\beta(t) \\ \Delta P(t) \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$A_v = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T} \end{bmatrix}$$

$$B_v = \begin{bmatrix} -\frac{\delta}{\alpha T} & \frac{(\gamma + K_\alpha)T - J}{K_\alpha \alpha T^2} \end{bmatrix}$$

$$C_v = [1]$$

$$D_v = \begin{bmatrix} 0 & \frac{J}{K_\alpha \alpha T} \end{bmatrix}$$

フィードフォワード伝達関数は (19), (20) 式に示す状態方程式に変換される。

$$\dot{w}_s(t) = A_d w_s(t) + B_d \Delta \hat{V}_w(t) \quad \dots\dots\dots (19)$$

$$\Delta V_s(t) = C_d w_s(t) \quad \dots\dots\dots (20)$$

$$A_d = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -c & -b \end{bmatrix}$$

$$B_d = \begin{bmatrix} 0 \\ a \end{bmatrix}$$

$$C_d = [1 \quad 0]$$

つぎに、推定風速  $\Delta \hat{V}_w(t)$  はある周波数まで一定の周波数特性を示すので、以下の性質を満たす白色性雑音と考える。

$$E[\Delta \hat{V}_w(t)] = 0 \quad \dots\dots\dots (21)$$

$$E[\Delta \hat{V}_w(t) \Delta \hat{V}_w^T(\tau)] = VW(t) \delta(t - \tau) \quad \dots\dots (22)$$

但し、 $\delta(t)$  はディラックのデルタ関数、 $E[\cdot]$  は数学的期待値、 $VW(t)$  はパワースペクトル密度を示す。

ここで状態変数を (23) 式のように拡張すると、拡大システムが (24) 式のように求められる。

$$z(t) = \begin{bmatrix} x(t) \\ \hat{V}(t) \\ w_s(t) \end{bmatrix} \quad (23)$$

$$\dot{z}(t) = A_p z(t) + B_p e(t) \quad \dots\dots\dots (24)$$

$$A_p = \begin{bmatrix} A & 0 & GC_d \\ B_v C & A_v & 0 \\ B_d D_v C & B_d C_v & A_d \end{bmatrix}$$

$$B_p = \begin{bmatrix} B_1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

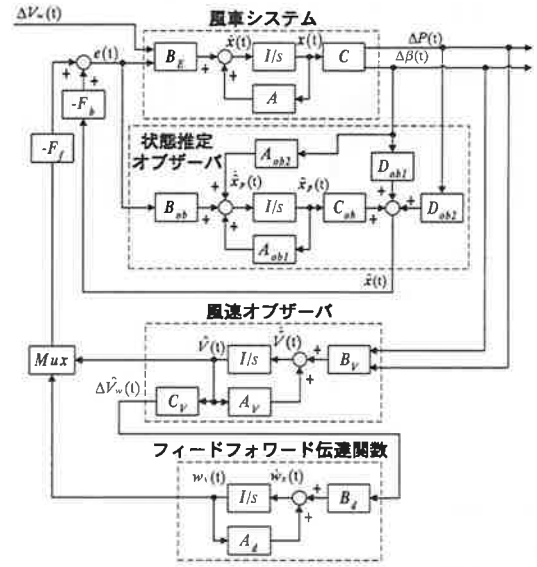


図8 確率最適制御のブロック図

Fig. 8 Block diagram of probabilistic optimal control

$$\text{ただし } B = [B_1 \quad B_2]$$

つぎに、この拡大システムに対して2次形式の評価関数を(25)式のように定める。 $Q_p, R_p$  は経験的に決定される。

$$J_d = E[z^T(t) Q_p z(t) + e^T(t) R_p e(t)] \quad \dots\dots\dots (25)$$

$$Q_p = \begin{bmatrix} Q_0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

上式の評価関数に対して、これを最小にする最適制御入力とは以下のように求められる。

$$e(t) = -F_b x(t) - F_f \begin{bmatrix} \hat{V}(t) \\ w_s(t) \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (26)$$

$$[F_b \quad F_f] = F = R_p^{-1} B_p^T X$$

ここで

$F_b$ : フィードバックゲイン

$F_f$ : フィードフォワードゲイン

ただし、 $e(t)$  は制御偏差であり、 $X$  は以下のリカッチ方程式の一意正定解として与えられる<sup>(16)</sup>。

$$A_p^T X + X A_p - X B_p R_p^{-1} B_p^T X + Q_p = 0 \quad \dots\dots (27)$$

これらの式を用い、確率最適制御のブロック図は図8のように求められる。

#### 4. シミュレーション

次に図8のブロック図を用いてシミュレーションを行い、時間応答、周波数応答のほか定量的な比較を行い本制御方策の有効性を確かめた。

##### <4.1> 時間応答

まず始めに時間応答を示す。図9、図10は従来の古典的制御を用いた場合と確率最適制御を用いた場合のシ

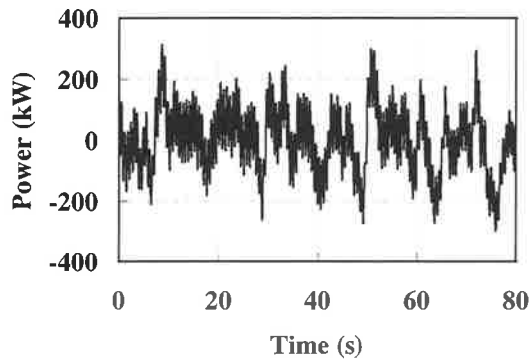


図9 従来の制御法を用いた場合の発電機出力  
Fig. 9 Generated power with conventional controller

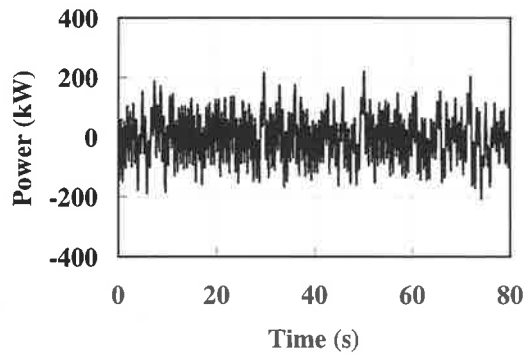


図10 確率最適制御を用いた場合の発電機出力  
Fig. 10 Generated power with probabilistic optimal controller

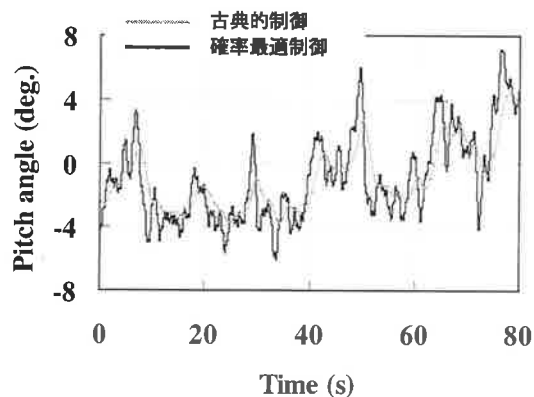


図11 ピッチ角制御の比較  
Fig. 11 Comparison of controlled pitch angle

ミュレーション結果の比較である。図示のように、ウィンドシェアによる細かな変動はほとんど抑制されていないが、本来の風速の主成分である低い周波数成分の変動に対しては、確率最適制御を行った方が変動が非常に小さくなっており、出力の変動がかなり抑制されていることがわかる。

ここで、図9、図10の発電機出力はある基準値からの変動分であり、0 (kW) は定格出力 500 (kW) に相当する。

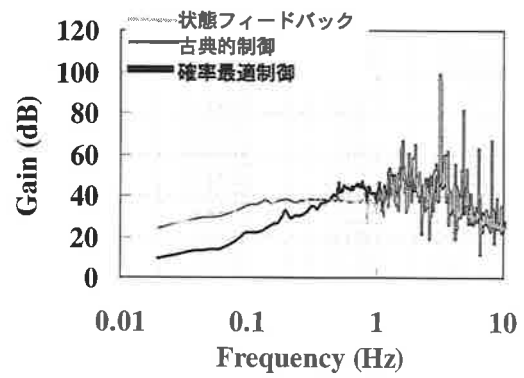


図12 前面風速から発電機出力までの利得特性  
Fig. 12 Gain characteristics from wind speed to generated power

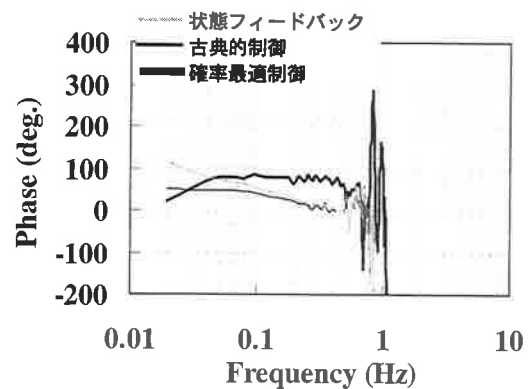


図13 前面風速から発電機出力までの位相特性  
Fig. 13 Phase characteristics from wind speed to generated power

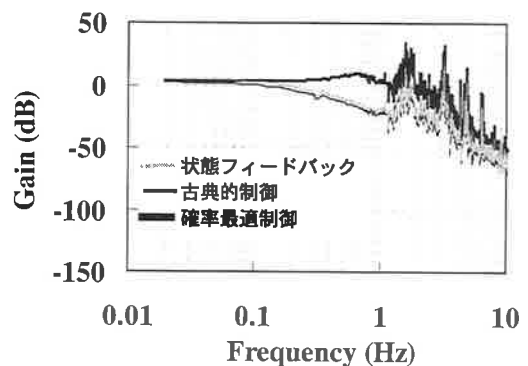


図14 前面風速からピッチ角までの利得特性  
Fig. 14 Gain characteristics from wind speed to pitch angle

また図11に確率最適制御制御と従来の制御方法のピッチ角の比較を示す。図からわかるように、前者の位相が進んでおり後者の制御方法より応答性が良いことがわかる。そのため、フィードフォワードの効果により出力変動が抑制されている。

#### 〈4.2〉 周波数応答

つぎに、前面風速から発電機出力までの周波数応答の比較を行った。この結果を図12、図13に示す。図から分

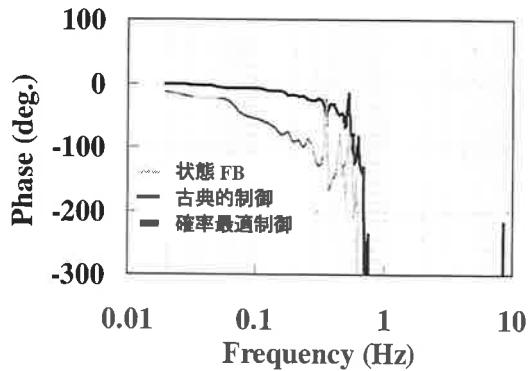


図 15 前面風速からピッチ角までの位相特性

Fig. 15 Phase characteristics from wind speed to pitch angle

表 2 風速が測定できない場合の定量的な比較

	最大値 (kW)	分散	最大値が 100kW を超える割合 (%)
従来の制御	313.3630	$12.008 \times 10^3$	36.2213
確率最適制御	191.9703	$6.5716 \times 10^3$	25.1916

表 3 最大値の比較 (単位: kW)

	n=0	n=0.100	n=0.130	n=0.168
従来の制御	229.2495	279.2244	294.3074	313.3630
確率最適制御	137.9510	157.4091	172.7409	191.9703

表 4 分散の比較

	n=0	n=0.100	n=0.130	n=0.168
従来の制御	$8.3310 \times 10^3$	$9.6112 \times 10^3$	$10.521 \times 10^3$	$12.008 \times 10^3$
確率最適制御	$1.6872 \times 10^3$	$3.4266 \times 10^3$	$4.6232 \times 10^3$	$6.5716 \times 10^3$

表 5 最大値が 100 (kW) を超える割合 (単位: %)

	n=0	n=0.100	n=0.130	n=0.168
従来の制御	26.4245	29.2236	31.7561	36.2213
確率最適制御	2.2659	8.2306	14.1286	25.1916

かるように、確率最適制御を用いた方が従来の制御法を用いたものより、低周波領域においてゲインが低下していることがわかる。このことは、風速の主な周波数成分での出力変動を抑制することに有用であることが言える。また、前面風速からピッチ角までの周波数応答を測定した結果を図 14、図 15 に示す。古典的制御法と状態フィードバック制御法および確率最適制御法の位相特性を比較してみると、確率最適制御を用いた方が古典的制御および状態フィードバック制御を用いたものより位相が進んでおり、フィードフォワード制御の効果により、フィードバックで検出される前にピッチ角が制御され、この結果出力変動が抑制されていると思われる。

#### 〈4.3〉 定量的な比較

より具体的に比較するために、確率最適制御法と古典的制御法に対して地表粗度  $n$  を変えながら、発電機の出力変動の最大値と分散および最大値が 100 kW を超える割合の比較を行い、その結果を表 2、表 3、表 4 に示す。表より最大値で約 1/1.6、分散で約 1/1.8、最大値が 100 kW を超える割合で約 1/1.4 になっていることが分かる。またこれらの結果から定量的に比較しても確率最適制御の有効性が確認できた。また、他のデータ区間でもほぼ同様の結果が得られた。

## 5. 結 論

本稿では、フィードフォワードとフィードバックを併用した風力発電機の制御系を提案した。本制御系を実現するためには風車前面風速の計測が必要であるが、風車の前面風速を測定することは必ずしも容易ではない。そこで本稿では、風車そのものを用いて前面風速を推定する方法を提案し、風速オブザーバと名付けた。つぎに風車、制御系、風速オブザーバを含めた拡大系を定式化し、確率最適制御系を構築した。この制御系をもとに、実測値を用いてシミュレーションを行い、時間応答、周波数応答および定量的な面から比較し、本制御系が風力発電機の出力変動抑制に有効であることを示した。また、ピッチ角の制御についても、時間応答および前面風速からピッチ角までの周波数応答結果から、確率最適制御を用いた方が古典的制御法を用いたものより位相が進んでおり、フィードフォワード制御の効果的であることが示された。

また、動作点が異なる場合の考察も行い、動作点の変化による制御効果の低下は少ないことが分かった。

また、風速を直接計測してフィードフォワードする方法は風速オブザーバを介してフィードフォワードするよりも出力変動の抑制が大きいが、風速を直接計測できるダウンウィンド型やロータ軸上に風速計の設置された風力発電機システムは数少ない。したがって、本稿の風速オブザーバによる風速のフィードフォワードとフィードバックによる出力変動抑制法は現実的な提案である。

最後に本研究は、八戸工業大学プロジェクト研究により支援されたものである。また諸データは NEDO より提供されたものである。ここに感謝の意を表する次第である。

## 参考文献

- (1) Naruhito Kodama, Tomoyuki Matsuzaka, Sayoshi Ya-mada: "Modeling and analysis of the NEDO 500 kW wind generator", Proc. of NESC '99, Osaka, 235 (1999)
- (2) 小玉成人, 松坂知行, 山田佐佳: 「NEDO 500kW 風力発電機のモデリングと特性解析」, 電学論 B, Vol. 120-B,

- No.2, 210 (2000)
- (3) O. Wasynczuk, D.T. Man, J.P. Sullivan: "Dynamic behavior of a class wind turbine generators during random wind fluctuations", IEEE Trans. Power Apparatus Syst., Vol. PAS-100, 2837 (1981)
  - (4) E.N. Hinrichsen, P.J. Nolan: "Dynamics and stability of wind turbine generators", IEEE Trans. Power Apparatus Syst., Vol. PAS-101, 2460 (1982)
  - (5) P.M. Anderson, Anjan Bose: "Stability simulation of wind turbine systems", IEEE Trans. Power Apparatus Syst., Vol. PAS-102, 3791 (1983)
  - (6) E.N. Hinrichsen: "Controls for variable pitch wind turbine generators", IEEE Trans. Power Apparatus Syst., Vol. PAS-103, 3791 (1984)
  - (7) E A Bossanyi: "Adaptive pitch control for a 250 kW wind turbine", Proc. of British Wind Energy Conference, 85 (1987)
  - (8) W.E. Leithead et al.: "Optimal control and performance of constant speed HAWT", Proc. of EWEC, PART1, 85, (1991)
  - (9) R. Chedid et al.: "Intelligent control for wind energy conversion systems", Wind Engineering, Vol. 22, No. 1, 1 (1998)
  - (10) Tomoyuki Matsuzaka, Keiichi Tuchiya: "A variable wind generating system and its test results", Proc. of European Wind Energy Conference, part two, 608 (1989-7)
  - (11) Andrew Miller et al.: "A variable speed wind turbine power control", IEEE Trans on EC, Vol. 12, No. 2, June, 181 (1997)
  - (12) Tomoyuki Matsuzaka, Keiichi Tuchiya: "Power fluctuation Stabilization of a wind generator by using feed forward control", Proc. of EUWEC'96, Goteborg, 898 (1996)
  - (13) 松坂知行, 土屋敬一: 「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 (1997)
  - (14) Naruhito Kodama, Tomoyuki Matsuzaka, Keiichi Tuchiya, Shinnji Arinaga: "Power Variation Control of A Wind Generator by Using Feed Forward Control.", World Renewable Energy Congress-V, 847 (1998)
  - (15) 小玉成人, 松坂知行, 猪股登: 「確率的最適制御による風力発電機の出力変動抑制」, 電力技術・電力系統技術研究会資料, PE-99-102, PSE-99-99, 91 (1999-9)
  - (16) 野波健蔵, 西村秀和, 平田光男: 「MATLAB による制御系設計」, 東京電機大学出版局, 63 (1998) 榎本義一, 添田喬, 中溝高好: 「確率システム制御の基礎」, 日新出版, 51 (1987)
  - (17) Naruhito Kodama, Tomoyuki Matsuzaka, Noboru Inomata, "Power Variation Control of a Wind Turbine Generator using Probabilistic Optimal Control, including Feed-Forward Control from Wind Speed", Wind Engineering, Volume 24, No. 1, pp. 13-23, 2000.