

風力発電の系統連系時の出力変動抑制シミュレーション

Power Variation of a Wind Generator connecting to Power System.

○小玉 成人*, 松坂 知行*, 猪俣 登**

○Kodama Naruhito*, Tomoyuki Matsuzaka*, Inomata Noboru**

*八戸工業大学, **東北電力

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

キーワード: 確率最適制御(Probabilistic optimal control), フィードフォワード制御(Feed-Forward control),
風力発電機(Wind generator), 風車制御(Windmill Control)

連絡先: 〒031-8501 八戸市妙字大開 88-1 八戸工業大学 システム情報工学科

小玉成人, Tel.: (0178)25-8099, Fax.: (0178)25-1691, E-mail: naru@hi-tech.ac.jp

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という観点から米国や欧州諸国をはじめ、我が国にでも実用化が推進されている。また、NEDO のプロジェクトの一つとして 500kW の大型風力発電機が開発され、竜飛ウィンドパークで諸特性の試験が行われ、それらのデータをもとに様々な研究がなされている^{1,2,3,4)}。一方、風力発電機の入力是不規則に変動する自然風であるため、風車出力が変動してしまう。この結果、大容量の系統に接続した場合にはそれほど問題にならないが、離島などの小容量の系統に接続した場合には、電圧変動や周波数変動などを引き起こしてしまう。特に、日本では欧米諸国と異なり、

複雑でかつ起伏の大きい地形に風車が設置されることが多いため風の変動が大きくなり、その結果出力変動も大きく、電力系統への連系上重要な問題のひとつとなっている。そのため、このような出力変動を抑制する制御法の開発が必要である。これまでの出力変動抑制のため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、近時適応制御法によるもの⁵⁾、最適制御法によるもの⁶⁾、また最近ではファジィ制御なども提案されている⁷⁾。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^{8,9)}。しかし、前述したように日本では海外と比較して地形の複雑さによる出力の変動が大きく、フィードバック制御だけ

では抑制することが困難である。また、可変速制御ではパワーエレクトロニクス回路を用いるため制御系が高価であるということなどの問題がある。そこで、本研究では従来より出力変動を抑制するための制御法としてフィードバックとフィードフォワードを併用した確率最適制御を提案してきた。

本稿では、提案する制御系の有効性を確認するために種々のシミュレーションを行った結果を示す。まず、時間領域での比較を行なうため、ガスト(突風)を入力し、その結果から本制御法が非常に優れていることが示された。また、周波数領域からも本制御方策の有効性を確認するため、入力風速からピッチ角までの周波数応答を求め、ゲインの減衰や位相の遅れが少なくなっていることがわかった。さらに、実測値を入力してシミュレーションを行ない、本制御法の効果を確認した。また、ウィンドシェアの少ない離島や洋上での発電を想定してシミュレーションを行ない、さらに高い効果が得られることを確かめた。この他、本制御系の動作点の変化に対する影響を調べ、多少の効果の差は見られるものの総じて効果があることを確かめた。以上の結果から、本制御系が系統連系時の電圧変動や周波数変動の抑制に有効であることがわかったので報告する。

2. 風力発電機

2.1 風車の概要

NEDO 機の外形を図 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)の四つの領域に分け

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。

(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。

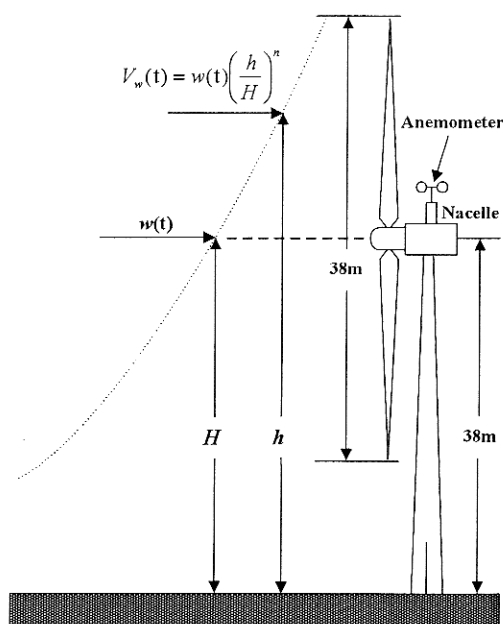


図 1 NEDO 機の外形

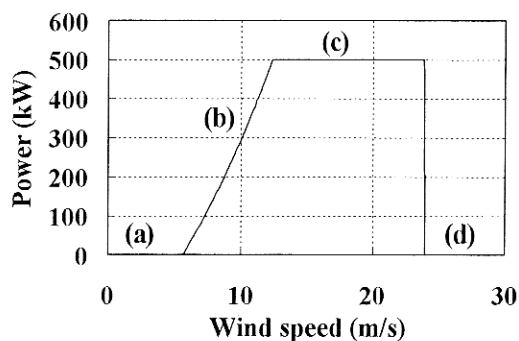


図 2 風車の出力曲線

(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 風車および発電機

風車によるトルク T_w は一般的に(1)式で与えられる²⁾。

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

ここに

$V_w(t)$: 風速 ρ : 空気密度

A : 風車の回転断面積

$\Omega(t)$: 風車の機械的角速度

$\lambda(t) = R\Omega(t) / V_w(t)$: 周速比

C_p : 出力係数 R : 風車の半径

C_p は周速比 λ 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²⁾。

つぎに、発電機トルクの式について説明する。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、ピッチ角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。

$$T_g = -3 \frac{sV^2 r_2}{\omega_0((r_2 - sr_1)^2 + s^2(x_1 + x_2)^2)} \dots\dots\dots (2)$$

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

ω_0 : 発電機の電氣的角速度 ($= Gp\Omega$)

G : ギア比 p : 極対数 T_g : 発電機トルク

s : スリップ

さらに、(2)式を動作点(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¹⁰⁾。

$$T_g(t) = K_g \Omega(t) \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 K_g : 定数

3. 風力発電機のモデリング

3.1 風車・発電機系のモデリング

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・発電機系のモデリングを行う。風車の動特性は次式で表される。

$$T_w(t) = J \frac{d\Omega(t)}{dt} + T_g(t) \dots\dots\dots (4)$$

ここで

J : 風車の慣性モーメント

(1)、(3)、(4)式より、風力発電機の角速度、風速、ピッチ角の微少変化に対する関係式が以下のように導かれる¹⁰⁾。

$$J\Delta\dot{\Omega}(t) = (\gamma + K_g)\Delta\Omega(t) + \alpha\Delta V_w(t) + \delta\Delta\beta(t) \dots\dots (5)$$

ここで

$\Delta\beta(t)$: ピッチ角の微少変化

$\Delta V_w(t)$: 風速の変化 $\Delta\Omega(t)$: 角速度の変化

また、 α, γ, δ 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¹⁰⁾。よって(5)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 $G_v(s)$ と、風速が一定($\Delta V_w(t) = 0$)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。

$$G_v(s) = \frac{\alpha}{sJ - (\gamma + K_g)} \dots\dots\dots (6)$$

$$G_\theta(s) = \frac{\delta}{sJ - (\gamma + K_g)} \dots\dots\dots (7)$$

3.2 制御系のモデリング

つぎに、風力発電機の制御系のモデリングを行った。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 $G_l(s)$ 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(8)、(9)式で表される伝達関数を得た¹⁰⁾。

$$G_1(s) = \frac{s^3 K_1 + s^2 K_2 + s K_3 + K_4}{s^3 + s^2 K_5 + s K_6 + K_7} \dots\dots\dots (8)$$

$$G_{pc}(s) = \frac{K_8}{s + K_9} \dots\dots\dots (9)$$

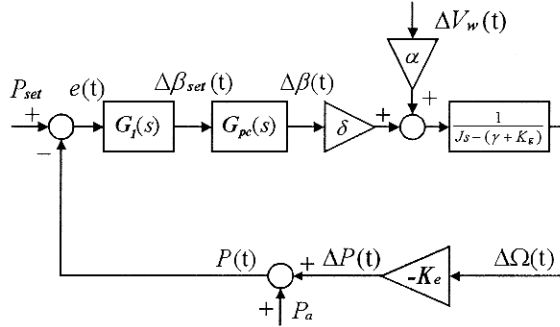


図3 風力発電機の制御系

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。

4. 出力変動を抑制する制御方策

4.1 風速オブザーバ

つぎに本研究で提案してい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¹⁶⁾。

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。そこで、発電機そのものを風速計として実効風速を求める風速オブザーバを構築する。まず、(5)式をもとに発電機出力および実ピッチ角から実効風速を計算する次式を求めた。

$$\Delta V_w(s) = \frac{sJ + (\gamma + K_g)}{K_e \alpha} \Delta P(s) - \frac{\delta}{\alpha} \Delta \beta(s) \dots\dots\dots (10)$$

ここで

$\Delta \hat{V}_w(s)$: 推定風速

しかしながら、この式は微分を含んでいるため実現することが困難であり、またシステムノイズに敏感になってしまう。そこで、(10)式の代わりに次式に示すような疑似微分を用いたオブザーバを提案する¹⁵⁾。

$$\Delta \hat{V}_w(s) = \left(\frac{J}{K_e \alpha T} \left(1 - \frac{1}{sT + 1} \right) + \frac{\gamma + K_g}{K_e \alpha (sT + 1)} \right) \Delta P(s) - \frac{\delta}{\alpha (sT + 1)} \Delta \beta(s) \dots\dots\dots (11)$$

ここに

T : 疑似微分の時定数

4.2 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。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。ウィンドシェアによる変動までも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。そこで、このウィンドシェアによる1.6(Hz)の成分を減衰させ、ほとんどフィードフォワードしないように調整している。図4にそのゲイン特性を示す。また、フィードフォワード伝達関数は(12)式で表される。

$$G(s) = \frac{a}{s^2 + bs + c} \dots\dots\dots (12)$$

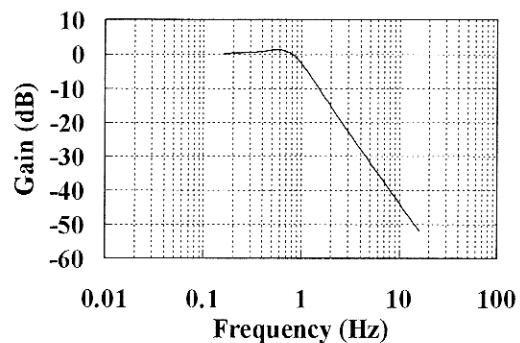


図4 フィードフォワード伝達関数

4.3 制御系の構築

以上の結果をもとに、制御系の構築を行う。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 $\Delta V_w(t)$ 、システムの出力を発電機出力 $\Delta P(t)$ 、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(13)、(14)式を得る。

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + B_E \begin{bmatrix} e(t) \\ \Delta V_w(t) \end{bmatrix} \dots\dots\dots (13)$$

$$y(t) = Cx(t) \dots\dots\dots (14)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -K_7 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -K_6 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -K_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K_8 & -K_9 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -K_e \frac{\delta}{J} & \frac{\gamma + K_g}{J} \end{bmatrix}$$

$$B = [K_4 \quad K_3 \quad K_2 \quad K_1 K_8 \quad 0]^T$$

$$G = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & K_e \frac{\alpha}{J} \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$B_E = [B \quad G]$$

観測可能な変数はピッチ角と発電機出力であるので(11)式は次のような状態方程式に変換される。

$$\dot{\hat{V}}(t) = A_v \hat{V}(t) + B_v \begin{bmatrix} \Delta\beta(t) \\ \Delta P(t) \end{bmatrix} \dots\dots\dots (15)$$

$$\Delta \hat{V}_w(t) = C_v \hat{V}(t) + D_v \begin{bmatrix} \Delta\beta(t) \\ \Delta P(t) \end{bmatrix} \dots\dots\dots (16)$$

$$A_v = [-1/T]$$

$$B_v = [-\delta/(\alpha T) \quad ((\gamma + K_g)T - J)/(K_e \alpha T^2)]$$

$$C_v = [1] \quad D_v = [0 \quad J/(K_e \alpha T)]$$

フィードフォワード伝達関数は(17)、(18)式に示す状態方程式に変換される。

$$\dot{w}_s(t) = A_d w_s(t) + B_d \Delta \hat{V}_w(t) \dots\dots\dots (17)$$

$$\Delta V_s(t) = C_d w_s(t) \dots\dots\dots (18)$$

$$A_d = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -c & -b \end{bmatrix} \quad B_d = \begin{bmatrix} 0 \\ a \end{bmatrix} \quad C_d = [1 \quad 0]$$

ここで状態変数を(19)式のように拡張すると拡大システムが(20)式のように求められる。

$$z(t) = \begin{bmatrix} x(t) \\ \hat{V}(t) \\ w_s(t) \end{bmatrix} \dots\dots\dots (19)$$

$$\dot{z}(t) = A_p z(t) + B_p e(t) \dots\dots\dots (20)$$

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

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(21)式のように定める。 Q_p 、 R_p は経験的に決定される。

$$J_d = E[z^T(t)Q_p z(t) + e^T(t)R_p e(t)] \dots\dots\dots (21)$$

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

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は以下のように求められる¹⁶⁾。

$$e(t) = -F_b x(t) - F_f \begin{bmatrix} \hat{V}(t) \\ w_s(t) \end{bmatrix} \dots\dots\dots (22)$$

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

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(13)式中の制御偏差であり 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。

$$A_p^T X + X A_p - X B_p R_p^{-1} B_p^T X + Q_p = 0 \dots\dots (20)$$

これらの式を用い、確率最適制御のブロック図は図5のように求められる。

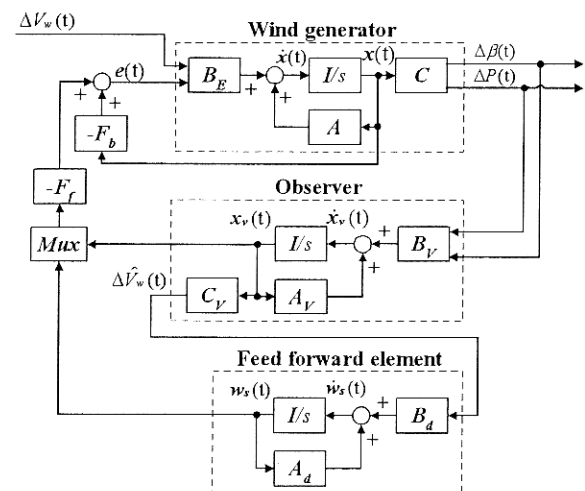


図5 確率最適制御のブロック図

5. 出力変動抑制シミュレーション

5.1 シミュレーション結果

(a) ガストに対する抑制効果

まず始めに正弦波状のガスト(突風)を入力した場合の時間領域でのシミュレーションを行なった。図5のブロック図を用いて古典的制御、状態フィードバック制御および提案する制御法の発電機出力を比較した結果を図6、図7に示す。図からわかるように他の二つの制御方法に比べて本制御法の出力変動は小さい。これは、風速オブザーバが風速の変化を素早く補足できるためであると思われ、提案する制御系が有効であることが示された。

(b) 周波数応答

つぎに、周波数領域での特性を調べてみた。図8、図9は古典的制御法、状態フィードバック、確率最適制御の入力風速からピッチ角までの周波数応答の比較である。古典的制御と状態フィードバック制御および確率最適制御の周波数応答を比較してみると、確率最適制御を用いた方が他の制御方を用いたものより位相が進んでおり、即応性に優れていることがわかる。この理由として、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。このことから周波数応答の面からも本制御法の有効性が確かめられた。

(c) 実風速を用いたシミュレーション

さらに、実測した風速を入力してシミュレーションを行った。図10、図11は確率最適制御を用いた場合と従来の古典的制御を用いた場合の比較である。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、確率最適制御を用いた場合に変動が大幅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。

また、離島や洋上などのウィンドシェアによる影響の少ない場所での発電を想定しシミュレーションを行った。ウィンドシェアは地表との摩擦が原因で高さによって風速が変わる現象であり、ウィンドシェアによる影響は図1の地表粗度 n の値により変

化し、 n の値が大きいほどその影響も大きくなる。表1に地形と地表粗度の関係を示す。図10、図11での地表粗度は $n=0.168$ (竜飛ウィンドパークの場合：丘陵) で、表から洋上などの場合には $n=0.100$ 程度である。そこで、 $n=0.100$ としてシミュレーションを行なった。その結果を図12、図13に示す。図より、ウィンドシェアの少ない離島などでは分散を約1/3にまで減少させることができ非常に効果的であることが示された。

表1 地形と地表粗度

地形	地表粗度 n
滑面/開けた水面	0.1
平坦/穏やかなうねり	0.15
丘陵	0.2
低い山系	0.25
高い山系	0.30

これらの結果から、提案する制御方法は出力変動抑制に効果があることが確かめられた。しかし、ウィンドシェアによる高周波成分は機械的な限界によりピッチ角制御では取り除くことが困難である。よって、この高周波成分を除去するにはパワーエレクトロニクス回路などを用いれば良いと思われる。

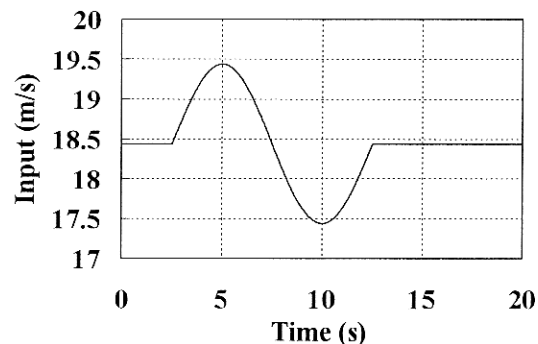


図6 ガスト入力

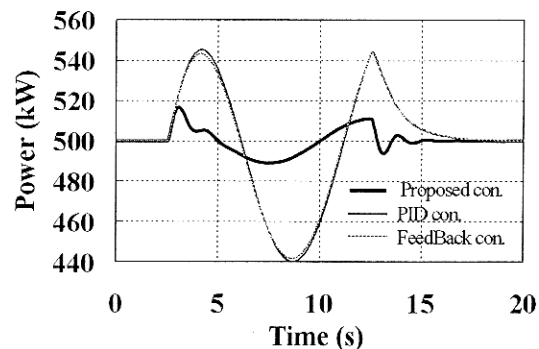


図7 発電機出力(ガスト入力時)

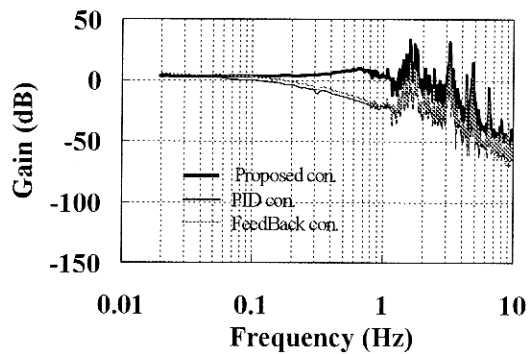


図8 入力風速からピッチ角までの利得特性

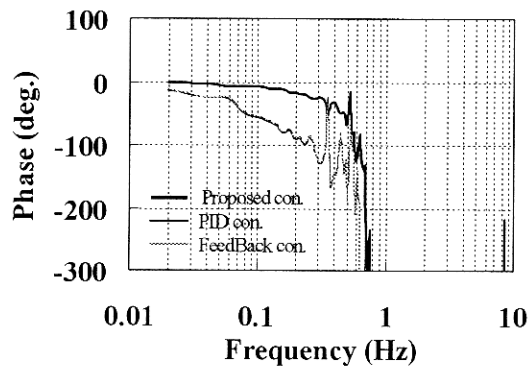


図9 入力風速からピッチ角までの位相特性

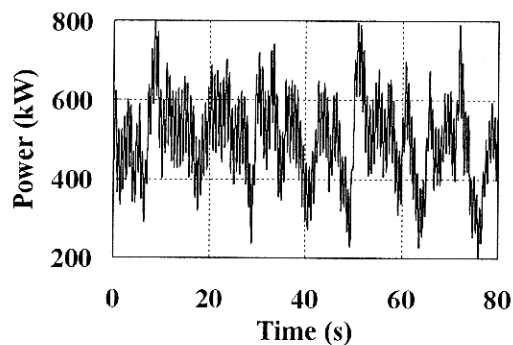


図10 古典的制御法を用いた場合の出力(丘陵)

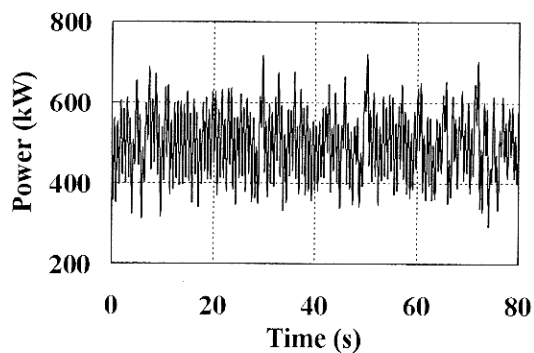


図11 確率最適制御を用いた場合の出力(丘陵)

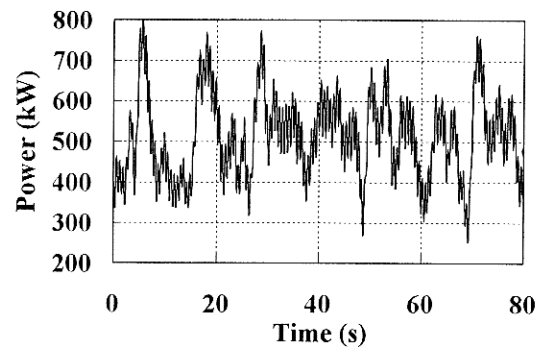


図12 古典的制御法を用いた場合の出力(洋上)

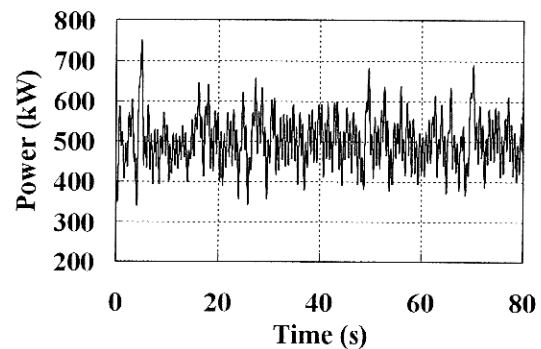


図13 確率最適制御を用いた場合の出力(洋上)

5.2 動作点が変わる場合の考察

つぎに、ゲインを算出したときの動作点から実際の動作点が変わってしまったときの制御効果への影響について述べる。検討する範囲は、実用上風速 14(m/s)から 18(m/s)までの範囲とした。まずは、実際の動作点が 18(m/s)の場合について考え、古典的制御と確率最適制御の動作点の変化が無い場合および動作点が 14(m/s)のときに計算されたゲインを用いた場合の3つの比較を行なった。このときのシミュレーション結果を表2に示す。表から最大値以外の分散、最大値が 100kW を超える割合では逆に良くなっており、動作点が変わった場合にも風力発電機の出力変動抑制に対して本制御系が十分に有効であることがわかる。また、先ほどの場合とは逆に実際の動作点が 14(m/s)で動作点が 18(m/s)のときに計算されたゲインを用いた場合にもシミュレーションを行い表3の結果を得た。表より、動作点が変わった場合には、他の値は減少しているが分散はほとんど減少していない。これは元の波形の変動成分が小さかつ

たためと考えられるが、今後検討していく必要があると思われる。しかしながら、全てにおいて値は小さくなっており、効果が十分にあると言える。

6. まとめ

本研究では、風力発電機の出力変動を抑制する制御方策として、従来より提案しているフィードバックとフィードフォワードを併用した確率最適制御による制御系に対して種々のシミュレーションを行なった。この制御系を構築するために、システム同定手法を用いて風力発電機システムの同定を行った。また、入力風速を推定するために風力発電機そのものを風速計とした風速オブザーバを提案した。つぎに、提案する制御系の効果を確認するために、構築した制御系をもとに時間領域および周波数領域での検討を行った。

始めに、時間領域での本制御系の有効性を確認するために、ガスト入力に対する古典的制御法、状態フィードバック制御、確率最適制御の3つの制御法によるシミュレーションを行なった。その結果、出

力変動は非常に小さくなっており、本制御法が優れていることが示された。つぎに、周波数領域からも検討するため、古典的制御法、状態フィードバック制御、確率最適制御の3つの制御法の周波数応答を求め比較を行ない、本制御法を用いるとゲインの減衰や位相の遅れが小さくなることが確認できた。さらに、実測値を入力してシミュレーションを行ない、従来の古典的制御法と比較して出力変動の分散を約1/2に抑制できることを確認した。また、ウィンドシェアによる影響の少ない離島での発電や現在注目されているオフショア発電(洋上発電)を想定してシミュレーションを行ない、さらに高い効果が得られることを確かめた。

以上の結果からフィードバックとフィードフォワードを併用した確率最適制御が風力発電機の出力変動抑制に有効であることが分かった。これにより、電力系統へ連系した場合にも電圧変動や周波数変動を抑制できるのではないかとと思われる。

表2 動作点の変化による制御効果への影響(動作点 18(m/s))

	最大値 (kW)	分散	最大値が 100kW を超える割合 (%)
古典的制御 (PID 制御)	313.3630	12.008×10^3	36.2213
確率最適制御 (動作点 18(m/s)でゲインを計算)	191.9703	6.5716×10^3	25.1916
確率最適制御 (動作点 14(m/s)でゲインを計算)	217.4707	6.5432×10^3	23.6255

表3 動作点の変化による制御効果への影響(動作点 14(m/s))

	最大値 (kW)	分散	最大値が 100kW を超える割合 (%)
古典的制御 (PID 制御)	169.3746	2.7991×10^3	5.7314
確率最適制御 (動作点 14(m/s)でゲインを計算)	111.3578	2.0284×10^3	0.7664
確率最適制御 (動作点 18(m/s)でゲインを計算)	128.9888	2.5691×10^3	2.2992

参考文献

- (1) T.Matsuzaka, and K.Tuchiya; "Power fluctuation Stabilization of a wind generator by using feed forward control", Proc. of EUWEC'96, Goteborg, 898 (1996)
- (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 (1997)
- (3) N. Kodama, T. Matsuzaka, K. Tuchiya, S. Arinaga: "Power Variation Control of A Wind Generator by Using Feed Forward Control.", World Renewable Energy Congress-V, 847 (1998)
- (4) 猪俣, 千葉, 山田, 土屋:「NEDO 500kW 風力発電機の騒音特性 (その1)」, 電気関係学会東北支部連合大会, 2A-10, (1998-8)
- (5) E A Bossanyi; "Adaptive pitch control for a 250 kW wind turbine", Proc. of British Wind Energy Conference, 85 (1987)
- (6) W.E.Leithead et al.; "Optimal control and performance of constant speed HAWT", Proc. of EWEC, PART1, 85 (1991)
- (7) R.Chedid et al.; "Intelligent control for wind energy conversion systems", Wind Engineering, Vol.22, No.1, 1 (1998)
- (8) T.Matsuzaka, K.Tuchiya; "A variable wind generating system and its test results", Proc. of European Wind Energy Conference, part two, 608 (1989-7)
- (9) Andrew Miller et al.; "A variable speed wind turbine power control", IEEE Trans on EC, Vol.12, No.2, June, 181 (1997)
- (10) 小玉, 松坂, 猪股:「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)
- (11) N. Kodama, T. Matsuzaka, S. Yamada: "Modeling and analysis of the NEDO 500 kW wind generator", Proc. of NESC'99, Osaka, 235 (1999)
- (12) 小玉, 松坂, 猪股:「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)
- (13) N.Kodama, T.Matsuzaka, N.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, 13, (2000)
- (14) 小玉, 松坂, 猪股:「確率最適制御による風力発電機の出力変動抑制」, 電学論 B, Vol.121-B, No.1, 22 (2001)
- (15) 小玉, 松坂, 猪股, "風力発電機に作用する風速の推定", 電学論 B, Vol.120-B, No.7, 1018, (2000)
- (16) 野波, 西村, 平田:「MATLAB による制御系設計」, 東京電機大学出版局, 63 (1998)