

# フィードフォワード制御を併用した風力発電機の確率最適制御

## Probabilistic Optimal Control of Wind Generator using Feed Forward Control of Wind Speed.

○小玉 成人\*, 松坂 知行\*, 猪股 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), モデリング(Modeling), 風力発電機(Wind generator),  
出力変動(Power variation)

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 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. はじめに

風力発電機の駆動入力は常に変動する自然風であり、また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大きいところが多い。これらのため風の変動が大きくなることやウィンドシェアが生じることにより大型風力発電機では出力変動が大きくなる。しかし、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。そこで本稿では、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ものである。実際に、本稿で提案する制御方法を 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

#### 2.1 風車の構成

今回研究の対象とした 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。

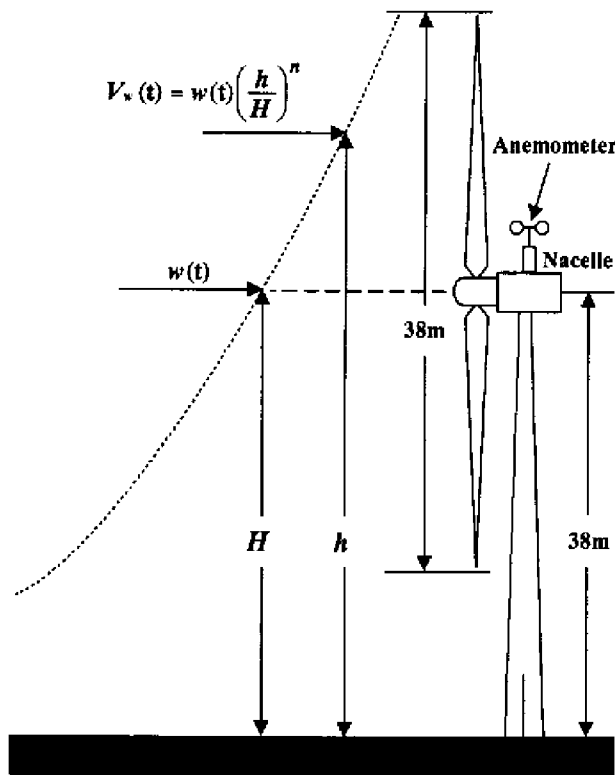


図1 風車の構成

Fig.1. Structure of the windmill.

## 2.2 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。

### (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。

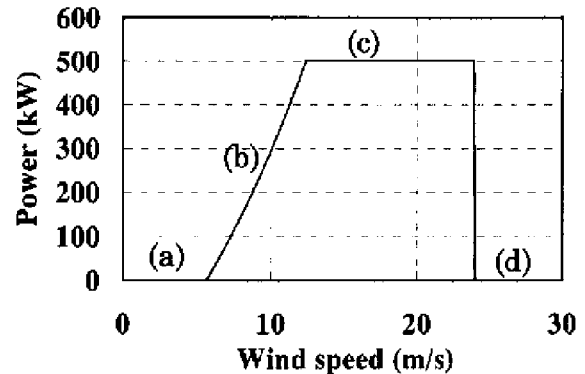


図2 風車の出力曲線

Fig.2. Power characteristics.

## 2.3 風車および発電機

風車によるトルク  $T_w(t)$  は一般的に(1)式で与えられる<sup>3,13)</sup>。

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

ここに

$\Omega(t)$  : 風車の機械的角速度  $V_w(t)$  : 風速

$A$  : 風車の回転断面積  $R$  : 風車の半径

$\rho$  : 空気密度  $C_p$  : 出力係数

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

$C_p$  は周速比  $\lambda(t)$  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>。

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

ここで

$K_g$  : 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

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。

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

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導かれる<sup>1,2)</sup>。

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

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  $G_v(s)$  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。

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

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

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>。

$$G_1(s) = \frac{s^3 K_1 + s^2 K_2 + s K_3 + K_4}{s^3 + s^2 K_5 + s K_6 + K_7} \quad (7)$$

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

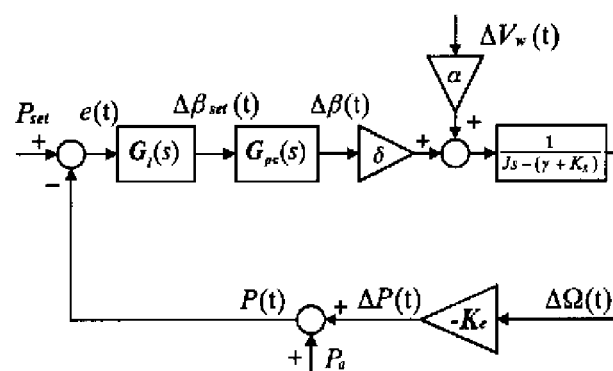


図3 風力発電機の制御系

Fig.3. System of the wind generator.

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

$\Delta P(t)$  : 発電機出力微小変化  $K_e(t)$  : 定数

よって、平均風速を想定し、この平均風速からの微小風速変化  $\Delta V_w(t)$  から出力  $\Delta P(t)$  までの閉ループ伝達関数  $G_{cl}(s)$  を求めると、次式のような6次の伝達関数となる。

$$G_{cl}(s) = \frac{s^5 K_{cla} + s^4 K_{clb} + s^3 K_{clc}}{s^6 K_{clg} + s^5 K_{clh} + s^4 K_{cli}} \frac{s^2 K_{cld} + s K_{cle} + K_{clf}}{s^3 K_{clj} + s^2 K_{clk} + s K_{cll} + K_{clm}} \quad (9)$$

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

#### 3.1 風速オブザーバ

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。

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、(4)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。

$$\Delta \hat{V}_w(s) = \frac{sJ + (\gamma + K_g)}{K_e \alpha} \Delta P(s) - \frac{\delta}{\alpha} \Delta \beta(s) \quad (10)$$

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。

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

ここに

$T$  : 疑似微分の時定数

### 3.2 フィードフォワード伝達関数

推定した風速はウィンドシェアの影響による特定の周波数成分の変動が含まれている。そこで、このウィンドシェアの影響を減らすために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および実効風速から求められ、図4にそのゲイン特性を示

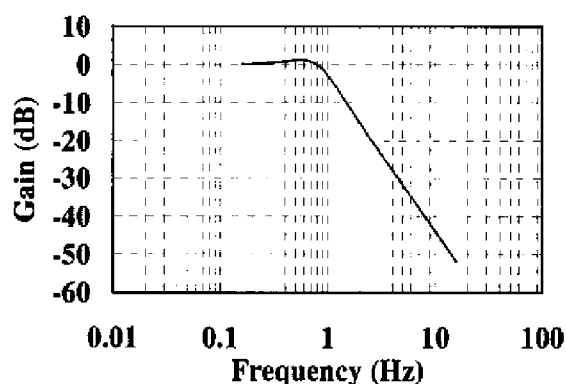


図4 フィードフォワード伝達関数

Fig.4. Feed forward transfer function.

す。また、フィードフォワード伝達関数は(12)式で表される。

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

### 3.3 確率最適制御

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(13)、(14)式を得る。

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

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

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

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

$$G = \left[ 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad K_e \frac{\alpha}{J} \right]^T$$

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

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

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。

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

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

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

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

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

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。

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

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

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

ここで状態変数を(17)式のように拡張すると拡大システムが(18)式のように求められる。

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

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

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

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。 $Q, R$  は経験的に決定される。

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

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

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。

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

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

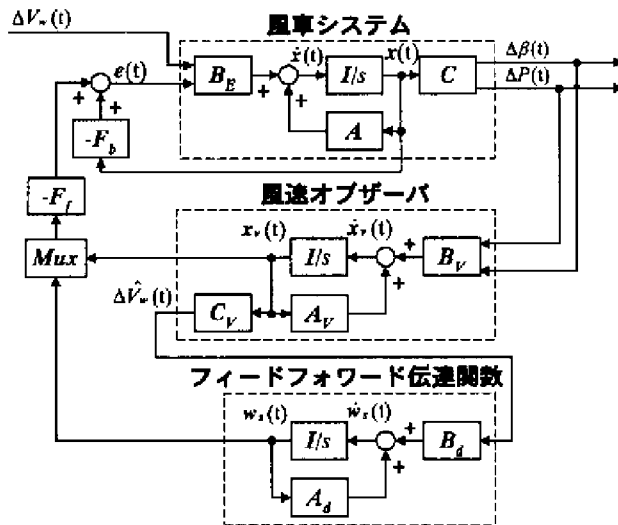


図5 確率最適制御のブロック図

Fig.5. A block diagram of probabilistic optimal control.

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。

$$A_p^T X + X A_p - X B_p R_p^{-1} B_p^T X + Q_p = 0 \quad (23)$$

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。

#### 4. シミュレーション

次に図5のブロック図を用いて提案する制御方法と従来の制御方法を比較するため、実測した風速を入力してシミュレーションを行った。図6、図7は確率最適制御を用いた場合のシミュレーション結果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。さらに、ウィンドシェアの影響を変化させながらシミュレーションを行った。風速の変化は次式で示される。

$$V_w(t) = w(t) \left( \frac{h}{H} \right)^n \quad (24)$$

ここで、 $n$  は地表の粗度により決定される定数である。この粗度を変えながらシミュレーションを行った結果を表1、表2に示す。これらの結果から、提案する制御方法が出力変動抑制に効果がある事が分かる。

ここで、図6、図7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8に提案する制御方法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、前者の方が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。

さらに、入力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9に示す。図から、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

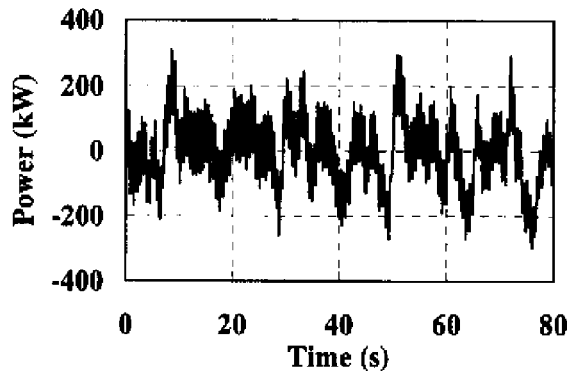


図6 従来の制御法を用いた場合の発電機出力  
Fig.6. Power variation with classical control scheme.

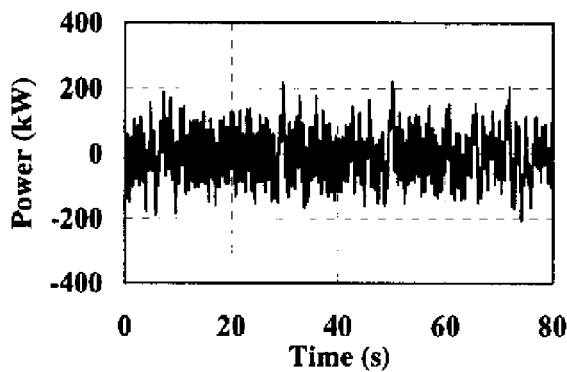


図7 確率最適制御を用いた場合の発電機出力  
Fig.7. Power variation with the proposed control

ことに有用であることが言える。

なお、図6,7,8と図9は $n$ が0.168のときの結果である。

## 5. まとめ

本稿では、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

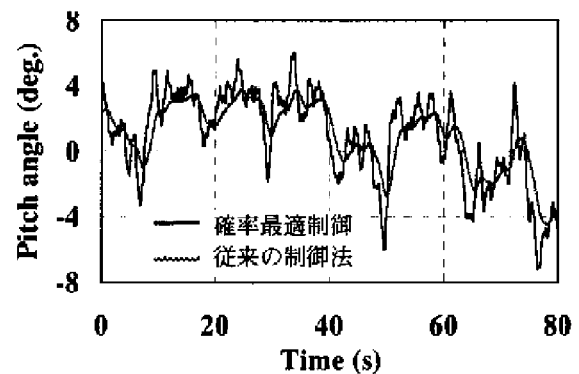


図8 ピッチ角の比較  
Fig.8. Comparison of pitch angle.

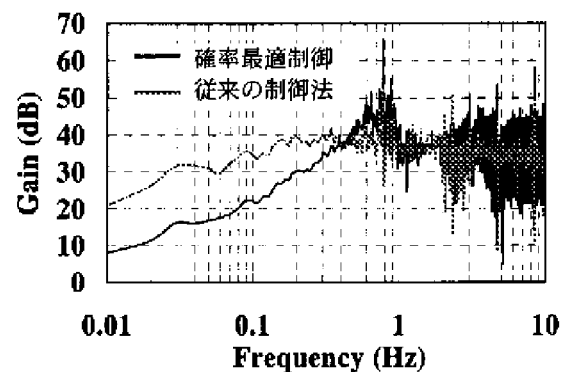


図9 周波数応答の比較  
Fig.9. Comparison of frequency response.

表1 発電機出力が100(kW)を超える割合

Tab. 1. Comparison of the probability that the power will exceeded 100(kW).

	$n=0$	$n=0.100$	$n=0.130$	$n=0.168$
従来の制御法	30.92 (%)	34.14 (%)	36.04 (%)	40.29 (%)
確率最適制御	5.54 (%)	10.45 (%)	14.55 (%)	21.90 (%)

表2 分散の比較

Tab. 2. Comparison of variance.

	$n=0$	$n=0.100$	$n=0.130$	$n=0.168$
従来の制御法	$8.733 \times 10^3$	$9.985 \times 10^3$	$10.88 \times 10^3$	$12.34 \times 10^3$
確率最適制御	$2.413 \times 10^3$	$3.803 \times 10^3$	$4.764 \times 10^3$	$6.329 \times 10^3$

フィードフォワードの併用による制御系の構築法を提案した。フィードフォワード伝達関数と風速オブザーバ、風力発電機を組み合わせた拡大系として確率最適制御系を構成し、実測値を入力してシミュレーションを行った。この結果、従来の古典的制御法と比較して大幅に出力変動を抑制できることを確認できた。

近時風力発電機の大型化とともに、離島などの弱小系統との連系では風力発電機の出力変動が問題になっているが、本制御法が一つの提案となるものと思われる。

## 参考文献

- (1) N.Kodama, T.Matsuzaka, S.Yamada: "Modeling and analysis of the NEDO 500 kW wind generator", Proc. of NESC'99, Osaka, 235 (1999)
- (2) 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)
- (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) T.Matsuzaka, K.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) T.Matsuzaka, and K.Tuchiya; "Power fluctuation Stabilization of a wind generator by using feed forward control", Proc. of EUWEC'96, Goteborg, 898 (1996)
- (13) 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)
- (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, 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)
- (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)
- (17) 樺木, 添田, 中溝: 「確率システム制御の基礎」, 日新出版, 51 (1987)

## 付録

$$L = [7.9986 \times 10^3 \quad 2.6915 \times 10^3 \quad 1.2665 \times 10]^T$$

### 付録1 風車システムの定数

$$J = 31800(\text{kgf} \cdot \text{ms}^2)$$

$$K_g = -6.4339 \times 10^5(\text{kgf} \cdot \text{ms})$$

$$K_e = 2.1711 \times 10^6(\text{kgf} \cdot \text{m})$$

$$\alpha = 2.3711 \times 10^3, \quad \gamma = -7.6762 \times 10^3$$

$$\delta = -1.7140 \times 10^3$$

(動作点：風速 18.436(m/s) ピッチ角 25.158(deg.))

### 付録2 各伝達関数のパラメータ

表 A1  $G_1(s)$  のパラメータ

Tab. A1. Parameter of  $G_1(s)$ .

$\kappa_1$	$-7.6610 \times 10^4$	$\kappa_5$	$2.6693 \times 10^2$
$\kappa_2$	$3.217 \times 10^3$	$\kappa_6$	$8.4607 \times 10^2$
$\kappa_3$	4.5443	$\kappa_7$	$7.8347 \times 10$
$\kappa_4$	8.1120		

表 A2  $G_{pc}(s)$  のパラメータ

Tab. A2. Parameter of  $G_{pc}(s)$

$\kappa_8$	2.2181	$\kappa_9$	2.2304
------------	--------	------------	--------

表 A3 フィードフォワード伝達関数のパラメータ

Tab. A3, Parameter of feed forward transfer function.

$a$	25.2662	$c$	25.2662
$b$	5.0265		

### 付録3 評価関数の重み、最適利得、オブザーバゲイン

$$Q_0 = \text{diag}[0.01 \quad 0.01 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 100]$$

$$R_p = 0.1$$

$$F_f = [1.4953 \times 10^2 \quad 1.7487 \times 10^3 \quad 2.5155 \times 10^2]$$

$$F_b = [3.2475 \times 10^{-1} \quad 1.4094 \quad 1.9940 \\ 7.7356 \times 10^2 \quad 2.6180]$$