計測自動制御学会東北支部 第 195 回研究集会(2001.6.22)

資料番号 195-12

風力発電の系統連系時の出力変動

Power Variation of a Wind Generator connecting to Power System.

○小玉 成人*, 松坂 知行*, 猪侯 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 機械情報技術学科 小玉成人. Tei.: (0178)25-8269, Fax.: (0178)25-2008, 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^{123,4}。一方、風力発電機の入力は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[®]、最適制御法によるもの[®]、また最 近ではファジィ制御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^{&®}。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 ッチ制御を行なわずピッチ角を 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 風車および発電機

風車によるトルクT_#は一般的に(1)式で与えられ る²。

ここに

 $V_{\mu}(t)$:風速 ρ :空気密度

A:風車の回転断面積

Ω(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³。

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、ビ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、電気的過渡 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。

 $T_{g} = -3 \frac{sV^{2}r_{2}}{\omega_{0}((r_{2} - sr_{1})^{2} + s^{2}(x_{1} + x_{2})^{2})} \dots \dots (2)$ ここで $V: 相電圧 r_{1,r_{2}} : -次, 二次抵抗$ $x_{1,x_{2}} : -次, 二次リアクタンス$ $\omega_{0} : 発電機の電気的角速度(= GpQ)$ $G: ギア比 p: 極対数 T_{g}: 発電機トルク$ 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。

 $T_g(t) = K_g \Omega(t)$ 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。

$$T_{w}(t) = J\left(\frac{d\Omega(t)}{dt}\right) + T_{g}(t) \qquad (4)$$

ここで

」: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。

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

ここで

Δβ(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 $G_0(s)$ が以下のように求められる。

$$G_V(s) = \frac{1}{sJ - (\gamma + K_g)}$$
(6)

$$G_s(s) = \frac{1}{sI - (\gamma + K_s)}$$

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。制御偏差からビッチ角指令値を求める出力制御系G₁(s)と、ピッチ角を変えるビッチ駆動系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。

$$G_1(s) = \frac{s^3K_1 + s^2K_2 + sK_3 + K_4}{s^3 + s^2K_5 + sK_6 + K_7} \dots (8)$$

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



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 Δβ_{set}(t):ピッチ角指令値の微少変化

P(t):発電機出力 e(t):制御偏差

 $\Delta P(t)$:発電機出力の微少変化 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 a(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¹⁹。

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ビッチ角か ら実効風速を計算する次式を求めた。

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

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¹⁶。

$$\Delta \hat{\mathcal{V}}_{w}(s) = \left(\frac{J}{K_{c} \alpha T} \left(1 - \frac{1}{sT + 1}\right) \right)$$
$$K_{c} \alpha (sT + 1) \int \Delta P(s) - \frac{\delta}{\alpha (sT + 1)} \Delta \beta(s) \cdots (11)$$

ここに

T:疑似微分の時定数

 $G(s) = \frac{1}{s^2 + bs + c}$

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(H2)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。



.....(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。

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。

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。

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

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

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

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。

$$\dot{z}(t) = A_{p}z(t) + B_{p}e(t) \cdots (20)$$

$$A_{p} \begin{bmatrix} A & 0 & GC_{d} \\ B_{v}C & A_{v} & 0 \\ B_{d}D_{v}C & B_{d}C_{v} & A_{d} \end{bmatrix} \quad B_{p} = \begin{bmatrix} B \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

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, R*,は経験的に決定される。

$$J_{d} = E[z^{T}(t)Q_{p}z(t) + e^{T}(t)R_{p}e(t)] \cdots (21)$$
$$Q_{p} = \begin{bmatrix} Q_{0} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

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¹⁰。

 F_s : フィードバックゲイン F_r : 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。

 $A_p^T X + XA_p - XB_p R_p^{-1} B_p^T X + Q_p = 0 ...(20)$ 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

風は、プラスに変化する場合とマイナスに変化す る場合があるので、プラス、マイナスおよびプラス・ マイナスの3つの場合について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 図6~図11に正弦波状のガスト(突風)を入力したと きの古典的制御、状態フィードバック制御、提案す る確率最適制御の発電機出力を比較した結果を示す。 それぞれの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12、 図13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、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 14、図 15 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 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 影響も大きくなり、図14、図15ではn=0.168(竜飛 ウィンドパークの場合)で、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16、図17 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。

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 16 古典的制御法を用いた場合の出力(n=0.100)



図17 確率最適制御を用いた場合の出力(n=0.100)

5.2 動作点が異なる場合の考察

つぎに、ゲインを算出したときの動作点から実際 の動作点が変化し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1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、動作点が変化し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2の結果を得た。表より、動作点が変化した場合 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っ 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。

| | 最大值 (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1 動作点の変化による制御効果への影響(動作点 18(m/s))

表2 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 |

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種々の シミュレーションを行った。

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、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滅衰や 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思われる。

参考文献

 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 HAWI", Proc. of EWEC, PAKT1, 85 (1991)
- (7) R.Chedid et al.; "Intelligent control for wind energy conversion systems", Wind Eingineering, 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)