

フィードフォワード制御による風力発電機の 出力変動安定化制御

松坂知行*・土屋敬一**

Power Stabilization of a Wind Generator by Introducing a Feed Forward Control Scheme

Tomoyuki MATSUZAKA* and Keiichi TUCHIYA**

Abstract

Pitch control of wind generators is usually made by the feed back control concept. However, the feed back signal, which is utilized to compensate the disturbance such as wind speed variation, is delayed due to the large rotor inertia of system, and consequently, the control strategy to keep the generated power at constant value is not effective only with the feed back control policy. This problem becomes serious where wind generators are installed in mountainous and rough complex terrain, and there are lots of wind turbulences in wind stream due to the geographical features. If large amounts of fluctuation are penetrated in power flow, this will have an effect on power system operation. TAPPI wind park at Tsugaru peninsula in Aomori prefecture is built in such a site and large amounts of power variations have been observed so far. Hence, this paper presents a new control strategy to reduce the power fluctuations by introducing feed forward control.

1. ま え が き

風力発電機は、変動する風力エネルギーにより駆動されるので、出力を一定にするためフィードバックによるピッチ角制御が行われるが、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。特に日本の風力発電所は、竜飛ウインドパークを初めとして、非常に起伏の激しい山地に設置されることが多いので風の乱れが多く、このことが出力に大きな変動を与える原因になっている。変動が大きい場合には系統に影響を与える可能性も出てくるので、接続できる発電機の容量を制限したり、連系装置を設置し

なければならぬため、発電機の設置台数を減らしたり連系装置の費用を考慮しなければならぬことが可能ならば系統への注入率の制限や連系装置の費用の問題が解決できると思われる。

ところで風力発電機の適切な制御を行う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、制御機構などの機械系、電気系から構成され、システム全体が複雑であるため、従来モデリングが十分検討されているとは云い難い。特に風力エネルギーから出力までの全体の伝達特性に関しては研究がほとんど行われていないのが現状である。そこで筆者らは風力発電機全体のモデリングの方法を研究し、このモデルを実観測データを用いて妥当性を検討した。また出力変動を抑制する方法としてフィードフォワード制御を導入し、この方法が有効であることをシミュレー

平成7年12月15日受理

* 八戸工業大学 情報システム工学研究所 教授

** 東北電力研究開発センター 主幹研究員

ションにより確認したので報告する。

2. 風力発電機のモデリング

使用される風力発電機としては、同期発電機、誘導発電機があるが、本稿で述べる運転方式は、現在最も広く採用されている誘導発電機による一定速運転の系統連系による風車発電機である。具体的には竜飛ウインドパークで用いられている風車発電機を対象とした。

2.1 風車による取得エネルギー

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。

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

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。

$$C_p(\lambda, \beta) = \lambda C_t = \lambda \{ c_1(\beta)\lambda + c_2(\beta)\lambda^2 + c_3(\beta)\lambda^3 \} \quad (2)$$

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

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

C_p を図示すれば図1のようになる。

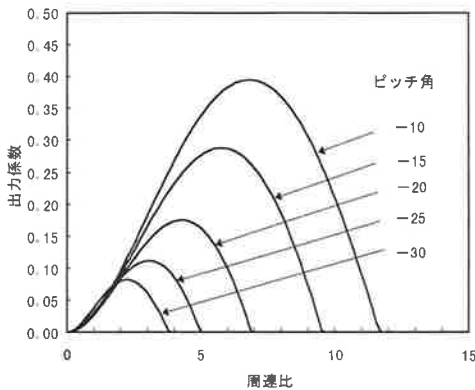


図1 風車出力係数

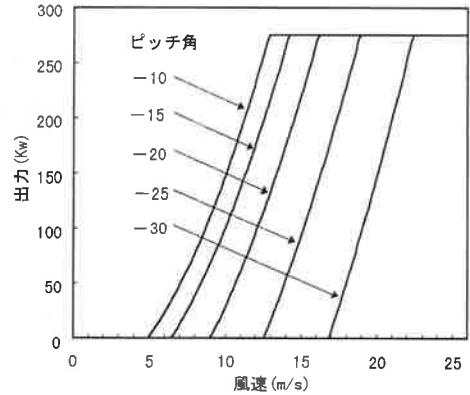


図2 風車出力曲線

つぎに(1),(2),(3)式より P_w は β, Ω, V_w の関数になるので、

$$P_w = f(\beta, \Omega, V_w) \quad (5)$$

と表すことができる。一方 P_w は誘導発電機の出力に等しく、また誘導発電機の出力は回転数 Ω で決まるので、(5)式は

$$P_w = g(\beta, V_w) \quad (6)$$

と表すことができる。具体的には(7),(8)式のように記述でき、図で表せば図2のようになる。

$$P_w = \alpha_1(\beta) + \alpha_2(\beta) V_w^2 \quad (7)$$

$$\left. \begin{aligned} \alpha_1(\beta) &= \alpha_{10} + \alpha_{12}\beta + \alpha_{13}\beta^2 + \alpha_{14}\beta^3 \\ \alpha_2(\beta) &= \alpha_{20} + \alpha_{22}\beta + \alpha_{23}\beta^2 + \alpha_{24}\beta^3 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

2.2 風車のピッチ角制御

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) 風速による制御則

(a) 風速が起動風速以下の場合

V_w のとき、ピッチ角 β_c で一定にし風エネルギーを逸らすことにより、風車を停止させる。

(b) 風速が起動風速から定格風速の範囲の場合

$5 \leq V_w \leq 12.5$ のとき、ピッチ角 $\beta_f = -10$ 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。

(c) 定格風速から停止風速の範囲の場合

$12.5 \leq V_w \leq 24$ のとき、ピッチ角の制御は $P_w = 275(\text{Kw})$ で定格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 (7) 式を解くことによって求められ、具体的には (9) 式の関係式で表される。

$$\beta_m = \beta_{m0} + \beta_{m1} V_w + \beta_{m2} V_w^2 \quad (9)$$

(d) 停止風速以上

$V_w \geq 24$ で風車を停止させるため、(a) と同じように $\beta_c = -90$ とし風エネルギーを逸らす。

図3はケース (b), (c) における風速とピッチ角の関係を示す。

(2) 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。また風車の受ける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、これを書き換えることにより次の関係式が得られる。

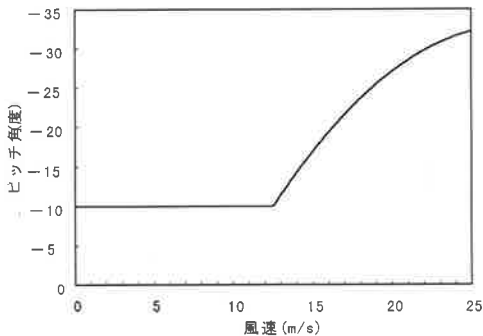


図3 風速とピッチ角の関係

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

$$\beta = k(P_w, V_w) \quad (11)$$

(6), (10), (11) 式は風の変動のない静的状態で成立するものである。いま発電機出力が P_{ws} 、ピッチ角が β_s と観測されたとすれば、変動している風速の下での有効風速 \hat{V}_w は (10) 式を用いて

$$\hat{V}_w = h(P_{ws}, \beta_s) \quad (12)$$

と推定するのが妥当であろう。この推定方法は、風車の慣性により回転速度が平滑化されるため、統計的なノイズ成分が除かれ、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ピッチ角を (11) 式を用いて以下のように求める。

$$\beta = k(P_{w0}, \hat{V}_w) \quad (13)$$

なおこの式は具体的には (9) 式で与えられる。

(3) 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} 、ピッチ角を β_0 、風速 V_w 、をとする。(7) 式より

$$P_{w0} = \alpha_1(\beta_0) + \alpha_2(\beta_0) V_w^2 \quad (14)$$

が成り立つ。さらに出力が 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、

$$P_{w0} + \Delta P_{w0} = \alpha_1(\beta_0 + \Delta\beta) + \alpha_2(\beta_0 + \Delta\beta) V_w^2 \quad (15)$$

が成り立ち、(14), (15) 式から

$$\begin{aligned} G(\beta) &= \frac{\Delta\beta}{\Delta P_{w0}} \\ &= \frac{\alpha_1(\beta_0)}{P_{w0}\alpha_1'(\beta_0) + \alpha_1(\beta_0)\alpha_2'(\beta_0) - \alpha_2(\beta_0)\alpha_1'(\beta_0)} \end{aligned} \quad (16)$$

が導かれる。この式には風速が含まれていないので (16) 式から求められる $\Delta\beta$ は風速に関係なく、出力を定格に維持するために必要なピッ

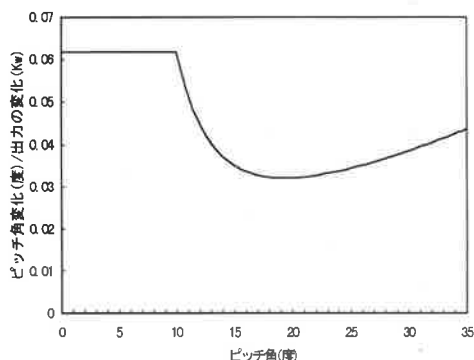


図4 ピッチ角と $\frac{d\beta}{dP_w}$ の関係

チ角の制御量を与える。図4は(16)式を図示したもので、ピッチ角の値により制御量が変化することがわかる。

2.3 誘導発電機

風力発電機はピッチ制御により回転数が定格スリップに維持されるが、変動する風エネルギーにより駆動されるので、回転数は定格スリップ近辺で常に変動している。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表現されるが、電氣的過度現象は機械的な過度現象に比較して無視できるので、以下の定常状態を表す方程式で十分である。

$$P_g = \frac{-3V^2s(1+s)R_2}{(R_2 - sR_1)^2 + s^2(X_1 + X_2)^2} \quad (17)$$

エネルギー損失を無視すれば、 $P_g = P_w$ となる。

3. 風力発電機の制御

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。

(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

$$J = \frac{d\Omega}{dt} = T_w - T_g \quad (18)$$

が成立する。両辺に Ω を乗じると

$$\frac{J}{2} \frac{d}{dt}(\Omega^2) = \Omega(T_w - T_g) \quad (19)$$

$$P_w - P_g$$

よって

$$\Omega = \sqrt{\frac{2}{J} \int_0^t (P_w - P_g) dt} \quad (20)$$

となる。 P_w は(1)式、 P_g は(17)式で与えられる。

(2) ピッチ角制御の速度制限

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るので単位時間当たりの変化量を制限する必要がある。このため後述するブロック図ではリミット付き積分器で表すことにした。

(3) ピッチ角のPD制御

ピッチ角の制御は比例+微分制御で行っている。

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) F_{nsW} は2.2の(a)~(d)で述べたように風速 V_w により $\beta_c, \beta_f, \beta_m$ にピッチ制御の指令値を切り替える。

(b) ピッチ制御では指令値を受けて、油圧機構に伝え、ブレードピッチ角を変える。この制御は3.2で述べた考え方のようリミット付

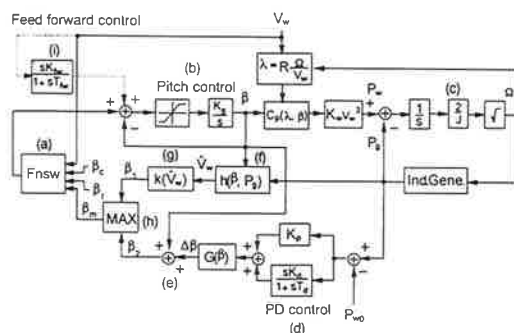


図5 制御系のブロック図

き積分器で表される。

(c) P_w と P_g の差を積分し, 3.1 で述べたようにして新たな風車角速度が計算される。

(d) 定格出力 P_{w0} 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 (16) 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_w から (12) 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 (13) 式により求める。

(h) MAX は β_1, β_2 の内絶対値の大きい方を求める。大きい方を選択するのは, ピッチ角が大きい方がより安全なためである。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。

4. 風力発電システムのシミュレーション

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を比較した。風速のデータはナセル上に設置された風速計で採取した。

図6はシミュレーション結果と実測値の比較である。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。なおシミュレーションは Matlab/Simulink で実行した。

つぎに図6で分かるように風力発電機の出力の変動は非常に大きい。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, 風速の変化に対して位相遅れが生じ, 発生電力にオーバーシュートが生じるためである。

そこでフィードフォワード制御の導入を提案する。その方法として, 図5のピッチ制御のブロック図のピッチ制御器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

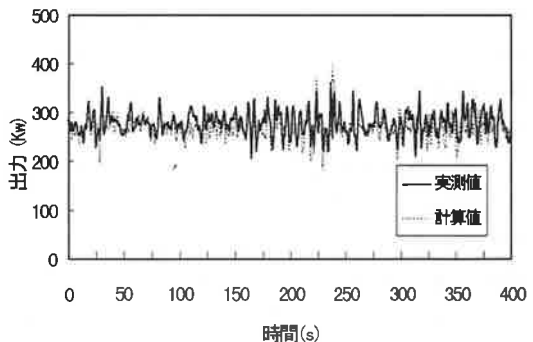
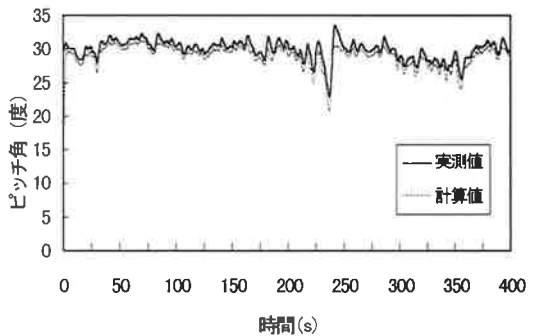
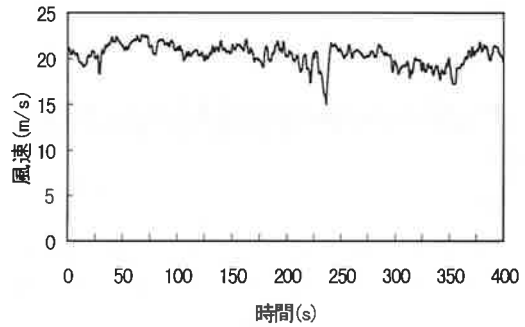


図6 シミュレーションと実測値の比較

ためである。この要素として図5 (i) のような位相進み要素を導入した。また定数 K_{fw} , T_{fw} の値はシミュレーションにより決定した。

図7はシミュレーション結果を示す。図から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。また図には示して

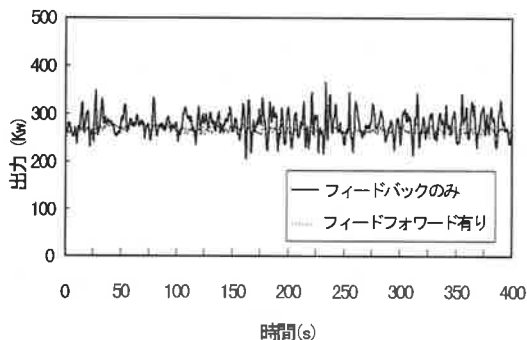


図7 フィードフォワード制御の効果

いないが、ピッチ角の制御入力もフィードフォワード制御を加えない場合に比較して、過剰な入力が増えられていないことが確認された。

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の導入を提案し、シミュレーションの結果、出力変動を大幅に減少させることが確認できた。出力変動を減少させることができれば、系統への注入率を増加させることができ、離島などで行われているディーゼル発電機とのハイブリット運転も推進可能であろう。またフィードフォワード制御の導入により、フィードバック制御のときに発生したブレードへのストレスが軽減されることが予想され、風車の耐久性も伸びるものと考えられる。また、この方法はソフトウェアのみの変更で可能であるため、価格の増加にならず極めて有用な方法と考えられ、今後実機で確かめていきたいと思う。

なお本研究は本学プロジェクト研究の一環として行ったものである。

6. 参 考 文 献

- (1) 土屋, 松坂他:「風力発電システムの運転特性シミュレーション」, 電学論 B, 113, 7, 752.
- (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, 1995年10月.
- (3) 松坂, 土屋:「フィードフォワード制御による風力発電機の出力変動安定化」, 第17回風力エネルギー利用シンポジウム, p.197-200, 1995年11月.

7. 記 号

風車

P_w	風力エネルギー
C_p	出力係数
λ	周速比 = $R \frac{\Omega}{V_w}$
	R = 風車半径, Ω = 回転角速度, V_w = 風速
A	風車回転時の断面積 = πR^2
ρ	空気密度
β	ピッチ角
c_{ij}	定数 ($i=1\sim 3, j=0\sim 4$)
α_{ij}	定数 ($i=1\sim 2, j=0\sim 4$)
$\beta_{m0}, \beta_{m1}, \beta_{m2}$	定数
J	慣性モーメント
T_w	風車トルク
P_w	風車による空力エネルギー
Ω	回転角速度

誘導発電機

V	相電圧
s	スリップ
R_1, R_2	一次, 二次抵抗
X_1, X_2	一次, 二次リアクタンス
T_g	電氣的トルク
P_g	電氣的出力

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制御

<u>制御系</u>		K_{fw}, T_{fd}	フィードフォワード制御
K_d, T_d	PD 制御器定数		定数
K_β	ピッチ制御器積分定数	K_w	定数 = $\rho A / 2$