可変ピッチマイクロ風力発電機のモデリング および適応極値制御手法による出力最適化制御*

石井千春^{*1}, 橋本洋志^{*2}, 大森浩充^{*3}

Modeling of Variable Pitch Micro Wind Turbine and Its Output Optimization Control with Adaptive Extremum Control Scheme

Chiharu ISHII^{*4}, Hiroshi HASHIMOTO and Hiromitsu OHMORI

^{*4} Department of Basic Engineering in Global Environment, Kogakuin University,
2665-1 Nakano-cho, Hachioji-shi, Tokyo, 192-0015 Japan

In this paper, an output optimization control of variable pitch wind turbines is discussed. Based on adaptive extremum control scheme proposed by Krstić et al., such a pitch control system that maximizes output of wind turbines below rated wind speed, and regulates output of wind turbines above rated wind speed is proposed for variable pitch wind turbines. In order to apply the designed control system to practical wind turbines, first, a two-blades micro wind turbine with variable pitch structure was manufactured and modeling was performed through the wind tunnel experiment. Second, computer simulator was created based on the determined mathematical model of the wind turbine, besides the control system was applied to the simulator and effectiveness of the proposed control system is verified through the simulation works. Finally, to evaluate the practical use of the control system, experimental works were carried out for the manufactured wind turbine.

Key Words: Motion Control, Mechatronics and Robotics, Nonlinear Control, Variable Pitch Wind Turbines, Adaptive Extremum Control

1. はじめに

近年, 地球環境に優しいクリーンエネルギーの一つとして風力エネルギーが注目されてから, 風力発電の需要が急激に高まってきている。風力を発電に利用した風力発電機は, 風という再生可能な無尽蔵のエネルギーを電気エネルギーに変換できるものとして期待されている。風力発電技術で最も重要な要素は, 風力エネルギーをいかに効率よく機械, そして電気エネルギーに変換するかである。風力発電機には, 大きく分けて定速回転風力発電機と可変速風力発電機との二種類がある。双方の風力発電機に対して, これまでに定格風速以上での生成電力の均一化, および定格風速以下での最大エネルギー生成のための風車出力の最大化に関する多くの研究が行われてきた⁽¹⁾。最近では, 定格風速以下でのエネルギー獲得の改善, および定格風速以

上での機械的負荷の緩和などの利点から, 定速回転風力発電機に比べ可変速風力発電機が広く用いられるようになった。これまでの研究では, 定格風速以上で生成電力を制限するために主にピッチ角制御が用いられ, PID 制御, 適応制御, 最適制御, ファジィ制御などが応用されてきた。しかしながら, ほとんどの風力発電機の制御系設計において, 風車の空力学モデルを定常状態作用点にて線形近似したモデルに対して線形制御系が構成されている^{(2),(3)}。これは, 風という不確定性変動を有する信号を外部入力に持つシステムに対して適切な方法とは言い難い。文献(4)は, 風力発電機に対するロータ回転速度の目標値追従制御に非線形制御手法が用いられている数少ない例である。

本論文では, 風速が変化しても風車が風エネルギーを最大限に得られるようにブレードのピッチ角を制御する制御系に注目する。従来, このような制御系を構成するためには風速を測定し, 風速に応じて風車の最大出力が得られるロータの回転数に追従制御を行う方式が用いられている。しかし, 風速の測定値は測定場所によってばらつきがあり, 不明瞭であることが多い。一方, 非線形システムに対してある評価関数を定義し,

* 原稿受付 2003年2月6日。

^{*1} 正員, 工学院大学工学部 (〒192-0015 八王子市中野町 2665-1)。

^{*2} 東京工科大学バイオニクス学部 (〒192-0982 八王子市片倉町 1404-1)。

^{*3} 慶應義塾大学理工学部 (〒223-8522 横浜市港北区日吉 3-14-1)。

E-mail: c-ishii@cc.kogakuin.ac.jp

その値を最大または最小に制御する方法に極値制御手法がある。文献(5)は文献(6)の適応極値制御手法を改良し、受動性条件を有する非線形動的システムに対する極値適応制御手法の一構成法を提案した。また、その有効性を検証するためにピッチ角制御による風力発電機の出力最大化問題に適用し、数値例により良好な結果を報告している。そこで本論文では、適応極値制御手法⁽⁶⁾を適用して、風況に応じてピッチ角を適応的に変化させることにより、風車出力が常に最大となるように制御し、風からのエネルギー獲得の高効率化を実現する制御系の一構成法を提案する。これにより、風速の測定を行わずに風車出力（発電量）のみの情報で出力最大化が実現でき、より実用的であるといえる。

本論文は、実機に対する極値制御手法の有効性を実証することを目的としている。そのためにまず、実際に可変ピッチマイクロ風力発電機を製作し、出力係数の測定実験を行い、文献(7)の方法に基づきモデリングを行う。得られたモデルからシミュレータを作成して、その信頼性を検証し、シミュレータに対して適応極値制御手法を適用した制御系による出力最適化制御のシミュレーションを行う。最後に、提案した制御系を製作した可変ピッチマイクロ風力発電機に応用した実験結果を報告する。

2. 風力発電機のモデリング

2.1 風力発電機モデル 風車により風から得られる風車出力 P_W は次式で与えられる。

$$P_W = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 C_P(\lambda, \beta) v^3 \quad (1)$$

ここで、 ρ は空気密度、 π は円周率、 R は風車半径、 $C_P(\lambda, \beta)$ は出力係数、 λ は周速比、 β はピッチ角、 v は風速である。また、周速比 λ は次式で与えられる。

$$\lambda = R \frac{\omega}{v} \quad (2)$$

ここで、 ω は風車回転角速度である。風力発電機の運動方程式は、次式で与えられる。

$$J \frac{d\omega}{dt} + D\omega = T_W - T_G \quad (3)$$

ここで、 J は風車慣性モーメント、 D は摩擦トルク係数、 T_W は風車トルク、 T_G は発電機による電気トルクである。また、 P_G を発電機出力とすると、 $P_W = T_W \cdot \omega$ 、 $P_G = T_G \cdot \omega$ の関係式と(3)式より、次式を得る。

$$J \frac{d}{dt}(\omega^2) + D\omega^2 = P_W - P_G \quad (4)$$

2.2 出力係数の測定実験 本研究用に可変ピッチ機構を有する直径0.6[m]の2枚ブレード可変ピッチ水平軸マイクロ風車を製作した。その外観図を図1に示す。

Fig. 1 Variable Pitch Wind Turbine System

可変ピッチ機構にはヘリコプターのテールロータに使用されているPCプレートの仕組みを応用し、図2に示されるように、モータの回転によりボールねじ上に垂直に装着されたPCプレートが前後に動き、PCプレートとブレードの付根を連結しているリンクが押し引きされ、ピッチ角の調整を行うことができる。

Fig. 2 Variable Pitch Structure

製作した風力発電機のモデリングを行うため、出力係数を測定する風洞実験を行った。風速6[m/s]において、ピッチ角度を0°～30°まで2.5°ずつ変化させ、各々のピッチ角度に対して、トルク、回転数を測定し、出力係数 C_P を算出した。出力係数 C_P は周速比 λ とピッチ角 β の関数で与えられ、本論文では実験による測定値から、出力係数 $C_P(\lambda, \beta)$ を次式のような多項式関数で近似した。

$$C_P(\lambda, \beta) = \sum_{i=0}^5 c_i(\beta) \lambda^i \quad (5)$$

ここで、 $c_i(\beta) = \sum_{j=0}^5 c_{ij} \beta^j$ 、 c_{ij} ($i, j = 0 \sim 5$)は定数である。また、本研究で用いる風車は、無負荷時にはピッ

チ角 $\beta = 0^\circ$ のとき、風のエネルギーを最大限に受けるようになっている。図3に最小二乗法により多項式近似した $C_P(\lambda, \beta)$ 曲線を示す。

Fig. 3 $C_P(\lambda, \beta)$ -Curve

2.3 シミュレータの作成 同定実験を行い、風力発電機の運動方程式における物理パラメータである風車慣性モーメント J 、および摩擦トルク係数 D の値を求め、(4)式の風力発電機の運動方程式に基づき、Matlab Simulinkを用いてシミュレータを作成した。モデリングの信頼性を評価するため、風速6[m/s]時のシミュレータにおけるロータ回転速度の定常値と風洞実験による測定値を比較した(図4)。図4より、シミュレータおよび測定値はほぼ同様の挙動を示しており、モデリングの正確さを検証できたといえる。

Fig. 4 Evaluation of Simulator Behavior

3. 極値制御系の構成法

システムに課せられた効率・収益・損失などを一つの評価関数として表現し、その評価関数の値を最大もしくは最小に維持するように、積極的に可操作変数を変化させる制御手法を極値制御という。

次の一般的な一入力一出力非線形システムを考える。

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x, u), & x \in R^n, u \in R \\ y = h(x), & y \in R \end{cases} \quad (6)$$

ただし、 $x \in R^n$ は状態、 $u \in R$ は入力、 $y \in R$ は出力であり、 $f(\cdot), h(\cdot)$ は滑らかな関数である。

次の仮定は極値探索問題において重要な仮定である。

仮定 次式を満足する $\theta^* \in R$ が存在する。

$$\frac{\partial(h \circ l)}{\partial \theta}(\theta^*) = 0, \quad \frac{\partial^2(h \circ l)}{\partial \theta^2}(\theta^*) < 0$$

$$y(t) = h \circ l(\theta) \equiv h(l(\theta))$$

制御目的は、出力 y が最大になるように可調整パラメータ θ をオンライン調整することである。つまり、推定値 $\hat{\theta}$ を最適値 θ^* に近づけるように制御を行えば出力 y は最大になる。よって、この手法を風力発電機に応用すれば、風速に応じて能動的にピッチ角 β を制御することにより、風車が風のエネルギーから最大の出力を獲得することが期待できる。

本論文では、文献(6)のKrstićの提案した適応極値制御手法を風力発電機の出力最大化制御に用いる。Krstićの極値探索フィードバックループを図5に示す。

Fig. 5 A Peak Seeking Feedback Scheme

図5の制御系は次式のように記述される。

$$\dot{x} = f(x, \alpha(x, \hat{\theta} + a \sin \omega t)) \quad (7)$$

$$\dot{\hat{\theta}} = k\zeta \quad (8)$$

$$\dot{\zeta} = -\omega_l \zeta + \omega_l(y - \eta)a \sin \omega t \quad (9)$$

$$\dot{\eta} = -\omega_h \eta + \omega_h y. \quad (10)$$

ここで、 $\frac{s}{s + \omega_h}$ は高域通過フィルター、 $\frac{\omega_l}{s + \omega_l}$ は低域通過フィルター、 k は積分ゲインである。

この制御系の基本的なアイデアは、システムの制御信号に周期的なテスト信号(正弦波 $a \sin \omega t$)を加え、その応答波形を出力側で観察することにより、対象となる非線形システムの勾配情報を入手し、最大となる点を探索するというものである。

対象システムにはダイナミクスが含まれているので、テスト信号となる外乱信号には十分に振幅が小さく、かつ十分に周波数の低い擾動を用いる。外乱 $a \sin \omega t$ は θ^* の両側で出力 y にも周期的な応答を与える。高域通過フィルター $\frac{s}{s + \omega_h}$ により、 y の直流成分を除去した信号と $a \sin \omega t$ は、仮定から $\hat{\theta} < \theta^*$ なら同相、 $\hat{\theta} > \theta^*$ なら逆相となる。この2つの（近似的な）正弦波の積から低域通過フィルター $\frac{\omega_l}{s + \omega_l}$ により、直流成分を抽出する。この直流成分 ζ の符号が積分器 $\hat{\theta} = \frac{k}{s} \zeta$ に、 $\hat{\theta}$ が θ^* に近づく方向を与える。Krstić は、ある条件のもとで (6) 式のシステムに対する図5のフィードバック系の安定性を平均化手法解析により、ラージオーダー $O(\cdot)$ を用いて証明している。

4. シミュレーション

前節の極値制御手法を適用して出力最適化制御を行うわけであるが、実際の風力発電機には発電機容量により定格出力が定められているので、ここでの制御目的は、定格風速以下では風車出力を最大化し、定格風速以上では定格出力に維持して風車を運転させることである。

定格風速以上のときに風車出力 P_W を定格出力 P_{Wo} に一致させるようなピッチ角制御を実現させるため、文献(5)と同様、次の出力関数を導入する。

$$y = -\frac{1}{P_{Wo}}(P_W - P_{Wo})^2 + P_{Wo} \quad (11)$$

これより、図6のような制御系を構成する。

Fig. 6 Proposed Control System

この場合、可調整パラメータがピッチ角 β となり、その推定値は

$$\hat{\beta} = k\zeta \quad (12)$$

で与えられる。

なお、本シミュレーションでは発電機にコアレス発電機（定格出力 35[W]）を使用することを想定し、作成

したシミュレータより本風力発電機の定格風速および定格出力を決定する。発電機の特性能曲線を図7に示す。 P_{Gin} は発電機への入力、 P_{Gout} は発電機からの出力を表している。

Fig. 7 Power Curves of the Generator

本論文では、 P_{Gout} を発電機出力 P_G のモデルとして採用し、風車回転角速度 ω の二次の多項式で近似し、シミュレータに組み込んだ。また、発電機のエネルギー損失は無視する。これより、 $P_W = P_G$ となる。シミュレータにおいて、風速がおおよそ 13[m/s] の時に、20[W] の風車出力が得られた。これより、本可変ピッチ風力発電機の定格風速を 13[m/s]、定格出力 P_{Wo} を 20[W] と決定した。制御パラメータは $\omega_h = 1$, $\omega_l = 0.01$, $k = 100$, 周期外乱は $0.1 \sin t$, ピッチ角の初期値は 10° とし、以下の風速に対してそれぞれシミュレーションを行った。また、比較のためそれぞれにおいて、ピッチ角を $\beta = 10^\circ$ に固定した状態でのシミュレーションも行った。

- (a) 定格風速以上（風速 14[m/s]）
- (b) 定格風速以下（風速 12[m/s]）

作成したシミュレータに対して行ったシミュレーション結果を図8、図9に示す。図8の定格風速以上の時には、極値制御を行った場合、風車出力 P_W はかなりオーバーシュートしているものの最終的には定格出力 20[W] にレギュレートされていることがわかる。また、図9の定格風速以下の時には、極値制御を行った場合、ピッチ角は最終的に 14.63° に収束して風車出力は 9.458[W] となり、 $\beta = 10^\circ$ にピッチ角を固定した場合よりも大きな出力が得られている。この値が最大値となっているかを調べるため、ピッチ角度を 1° ずつ変化させてピッチ角を固定した状態でのシミュレーションを繰り返した。このときのピッチ角と風車出力の関係を図10に示す。図10より、出力が最大となるようなピッチ角は約 15° となっており、極値制御を行った場合の最終的なピッ

Fig. 8 Simulation Results (Above Rated)

Fig. 9 Simulation Results (Below Rated)

Fig. 10 Beta-Power Curve

チ角度とほぼ一致していることがわかる。また、双方ともピッチ角は初期角度から急激に大きくなり、風車出力の収束に伴いピッチ角も収束している。以上の結果から、シミュレーションにおいて本制御系の有効性が確認できたといえる。

5. 制御実験

前節のシミュレーション結果を受けて、製作した実機に対して出力最適化制御実験を行う。実際の風力発電機には発電機容量により定格出力が定められているので、ここでの制御目的も前節と同様である。このため、ここでも(11)式の出力関数を利用する。

図1の可変ピッチマイクロ風車に、石田製作所製マイクロ風車用風力発電機E002(定格出力25[W])を搭載した。また、本実験で使用する可変ピッチ風力発電機はモータによりピッチ角を動作しているため、実際の制御入力(本制御系においては可調整パラメータそのもの)はピッチ角を操作するモータに加える電圧とした。発電機の定格出力 P_{W0} は25[W]である。実験条件は、風速13[m/s]一定とする。これは、本実験装置では定格風速以下に相当する。実験で利用する風洞の構造上、これ以上の風速で実験を行うには安全性に問題があり、定格風速以上での実験は断念した。

制御パラメータは、 $a \sin \omega t = 1.5 \sin 0.5t$, $\omega_h = 20$, $\omega_l = 1.0$, $k = 0.1$, ピッチ角の初期値は 35° とした。理論上、テスト周期信号の振幅 a の値は小さい値のほうが好ましいが、本実験装置におけるモータにおいては振幅がある程度以上にならないとモータが反応せず、テスト信号に対する応答を観測することができなかったため、試行錯誤的に実験を繰り返し、モータが反応するできるだけ小さい値とした。また、ボールねじの可動範囲には限界があるので、電圧制御入力 v があまり大きくならないよう制限するため、積分器ゲイン k は小さく選んだ。実験結果を図11に示す。

Fig. 11 Experimental Results (Below Rated)

図11より、風車出力は最終的に約10.6[W]付近に収束し、ピッチ角も 42.5° 付近に収束している。この値が最大値となっているかを調べるため、同じ風速13[m/s]

においてピッチ角度を 2.5° ずつ変化させながらピッチ角を固定した状態での実験を繰り返した。このときのピッチ角と風車出力の関係を図12に示す。

Fig. 12 Beta-Power Curve (Below Rated)

図12より、出力が最大となるようなピッチ角は約 42.5° となっており、極値制御を行った場合の最終的なピッチ角度と一致している。実験結果、図11と定格風速以下時のシミュレーション結果、図9を比較してみると、シミュレーションに比べて実験では実験開始後の出力およびピッチ角の変化が小さい。これは、実験においては積分ゲインがかなり小さかったため、可調整パラメータ（制御入力）を大きく変化させられなかったためである。また、実験においてもある時間からは出力もピッチ角も急激に大きくなり、双方ともある値に収束している。この点はシミュレーションとほぼ同じ傾向が観察できる。収束している値が実験とシミュレーションでは異なっているが、これは実験とシミュレーションで発電機の仕様および風速が異なっているためである。また、図11の出力の図において、過渡的に大きな発電量が得られているところがあるが、これはバッテリーが十分に蓄電されておらず、一時的に負荷が下がってしまったためであると考えられる。

しかしながら、実験を繰り返し行っているうちに本制御系が風速の乱れや測定器のノイズに非常に敏感であることがわかり、実験中の状態の変化によっては、実験時間内に収束が確認できなかったこともあった。このことから、本制御系のロバスト性を調べるために、4章の定格風速以下時のシミュレーションにおいて、より自然の風の状態に近づくよう、風速に平均0、分散1の白色雑音を加えて再度シミュレーションを行ったところ、実験と同様に出力が一定値に収束しない結果が観察された。しかしながら、試行錯誤的に制御パラメータ ω_h , ω_l , k を調整したところ、一定値への収束を確認することができた。これらの結果を図13に示す。

したがって、制御パラメータの選定により制御系の

Fig. 13 Simulation Results (Wind Speed with White Noise)

ロバスト性を向上させることが可能であると考えられるが、前述のように、本実験においては実験装置の機構的な制約により制御パラメータの選定範囲が制限されてしまうため、*これ以上の制御性能の改善は断念した。

6. 結論

本論文では、可変ピッチ風力発電機に対し、適応極値制御手法を用いて定格風速以下では風車出力を最大化し、定格風速以上では定格出力に維持するような制御系を構成し、シミュレーションおよび実験を行い、提案した制御系の動作を確認した。本手法により測定困難な風速の情報を用いず、また定格風速上下で制御則を切り替えることなく出力最適化制御を行うことができる。しかしながら、商用の風力発電機への応用には克服すべき点が多く、その一つには風車出力が最大値に収束するまでの整定時間が長くかかることが挙げられる。この理由として、可変ピッチ風力発電機においては、ピッチ角が変化してから出力が変化するまでの反応時間が比較的長く、さらに今回製作した実験装置の機構的な制約により、制御パラメータの選定範囲が制限されてしまい、十分な即応性が得られなかったことが考えられる。また、シミュレーションの結果から、制御パラメータの調整により制御系のロバスト性を改善できることが確認されたが、現状においては制御系の設計仕様にロバスト性の補償が明確に取り入れられていないため、制御パラメータの調整は試行錯誤的に行うしかない。

これらを克服するため、現在機構的な制約を受けず、またピッチ角に比べて出力の変化も速いと思われる界磁電流による風力発電機の出力最適化制御に本制御系の適用を検討している。また、理論面においては、風速の乱れや測定器ノイズなどの外乱がシステムに与える影響を抑制する、外乱抑制仕様を制御系の設計仕様に定式化して組み込み、ロバスト性を考慮した制御パラメータの調整法を導出するよう解析を行っている。

なお、本研究の成果の一部は、科学研究費（奨励研究A：課題番号 12750189）の助成による。また、実験を補助いただいた足利工業大学の卒業生達に感謝の意を記す。

参考文献

- (1) S.A. De La Salle, D. Reardon, W.E. Leithead and M.J. Grimble: Review of Wind Turbine Control, *Int. Journal of Control*, Vol.52, No.6, pp.1295-1310, 1990.
- (2) M. Steinbuch: Optimal Multivariable Control of a Wind Turbine with Variable Speed, *Wind Engineering*, Vol.11, No.3, pp.153-163, 1987.
- (3) P. Novak, T. Ekelund, I. Jovik and B. Schmidt-bauer: Modeling and Control of Variable-Speed Wind-Turbine Drive-System Dynamics, *IEEE Control Systems*, Vol.15, No.4, pp.28-38, 1995.
- (4) Y.D. Song and B. Dhinakaran: Nonlinear Variable Speed Control of Wind Turbines, *Proc. of IEEE Int. Conf. Control Applications*, pp.814-819, 1999.
- (5) 成田 憲彦, 小松 真, 大森 浩充: 適応極値制御手法を用いた風力発電機の出力最大化制御, 電気学会産業応用部門大会, 1999
- (6) M. Krstić and H.H. Wang: Stability of Extremum Seeking Feedback for General Nonlinear Dynamic Systems, *Automatica*, Vol. 36, pp.595-601, 2000.
- (7) 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, 電気学会論文集B分冊, Vol.117, No.5, pp.625-633, 1997.
- (8) C. Ishii: Output Optimization Control of Variable Pitch Wind Turbines with Adaptive Extremum Control Scheme, *Proc. of IEEE Int. Conf. on Information Technology in Mechatronics*, pp.303-307, 2001.