出力特性の同定情報に基づく 風力発電システムの最大出力点探索制御

正員 千住 智信 (琉球大)

正員 徳村 政也 (沖縄電力)

正員 上里 勝実 (琉球大)

Tracking Control of Maximum Power Point for Windmill Power System by Identification of Output Characteristic
Tomonobu Senjyu, Member (University of the Ryukyus), Masaya Tokumura, Member
(Okinawa Electric Power Co., Inc.), Katsumi Uezato, Member (University of the Ryukyus)

In recent years, exploitation of natural energy by saving fossil energy is being reconsidered. One of the expected sources of natural energy for the future is wind energy, which has been actively studied as a substitute source of energy for the world. However, the wind energy is influenced by geographic and weather conditions, so that the generating power varies with time. Therefore, in order to make the windmill generator system to extract available maximum power from wind energy, this paper proposes a tracking control method of maximum power operating point using the recursively least square method with forgetting factor. The proposed method is simple since it identifies the system parameters and controls the actual rotor speed by means of a PI controller. The system parameters are identified by using the information for generating power and windmill speed. We verify the effectiveness of the proposed control method with numerical simulations and experiments.

キーワード: 風力発電, 最大出力点, 最適動作点, 繰返し最小二乗法, 二分法

1. まえがき

1970年代の二度にわたるオイルショック以降、石油、石炭の化石エネルギーから、風力・太陽光・水力などの自然エネルギー源の開発や、有効利用のための研究がヨーロッパ諸国をはじめ世界各国で積極的に行われてきた⁽¹⁾。特に我国は化石エネルギーが乏しいため、自然エネルギーの有効利用法を開発することが将来のエネルギー確保に重要である。また、最近では地球的規模の環境問題に関連して、自然エネルギーの積極的活用が再び関心を集めている。

風力エネルギーは自然エネルギーの中でもエネルギー密度は希薄であるが、化石燃料を使用しないクリーンなエネルギーであることから、良風地域では将来有望なエネルギー源として期待されている。風力エネルギー利用の主形態としては、風車を用いた風力発電が考えられるが、自然風は空間・時間により不規則に変動するため、発電システムを安定で有効に利用することが重要課題である。特に、風力発電システムでは風力エネルギーから発電電力を効率的に取り出すために、最適動作点(最大出力点)で常にシステムを運転することが望まれる。しかし、風力発電プラントは一般に非線形出力特性を有するとともに、その特性は風速

や運転条件(風車のブレードピッチ等)に応じて大きく変化する⁽²⁾ため最適動作点を決定することは困難である。

上記の理由により、現在まで種々の最大出力点追従制御法が提案されている。風力発電システムのパラメータを予め測定して風力エネルギーに応じて最大出力点に追従する運転法がこれまで提案^(3,4)されているが、一般にパラメータ測定誤差や変動に対しては無力である。一方、この問題に対処するため、未知パラメータを山登り法で求める方法が提案⁽⁵⁾されている。しかし、システムの出力特性まで同定することは一般に困難である。

風力発電システムの出力特性は、最大出力点追従制御に限らず風車や発電機の選定、あるいはシステムの性能評価や運転に重要な情報であるため、オンラインで測定できることが望ましい。そこで、筆者らはファジー制御を用いて風力発電システムのパラメータを一切使用せずに最大出力点の運転を可能にする手法を最近提案⁽⁶⁾したが、この手法よりも制御則がより明確にできる最小二乗法を用いて発電システムを常に最大出力点で運転できる制御法を本論文で提案する。

本論文は、測定困難な個々の機器パラメータをオンライ

ンで同定せず、最小二乗法を用いて風力発電システムの出力特性を同定器で直接同定することにより、発電システムを常に最大出力点で運転できる。提案手法では、直接検出可能な発電機出力と発電機回転速度のみの情報に基づいて出力特性を表すパラメータを同定し、同定されたパラメータに基づいて最大出力点をオンラインで推定する。そして、PI制御を用いた直流発電機の界磁電圧制御により、出力電力が最大になる回転速度へ発電機を速度を追従させる。このため、風車や発電機に関する事前情報(パラメータ)は一切必要なく、風力発電システムの特長変化に対しても十分対応できる能力を提案手法は有している。また、直接出力特性を同定するため、本手法は風力発電システムの性能評価にも有用である。

2章では、風力発電システムの出力特性式の基本式を導出する。3章では、システムの出力特性をモデル化し、4次のシステム方程式で表されることを示す。その出力特性式に基づき繰返し最小二乗法によりシステムの出力特性を表すパラメータ同定法を示し、最大出力点の推定法とPI制御器を用いた直流発電機の追従制御法を示す。4章では、風速が一定あるいは変化する場合でも提案手法を用いれば最大出力点を探索できることをシミュレーションにより示している。5章では、提案手法を風力発電シミュレータに実装し、風力発電システムの出力特性の同定と最適動作点への追従制御が可能であることを実験により示す。

2. 風車及び発電システムの基本方程式

本章では、先ず風車の特性を表す基本式を示し、次に本論文で対象にする直流発電機を用いた風力発電システムの出力特性式を導出する。

本論文で検討した風力発電システムの構成図を図1に示す。発電機は直流発電機を使用し、負荷として鉛蓄電池を用いた。最大出力点は発電機の回転速度 N 、電機子電流 I_a と負荷電圧 E_b より計算された発電電力 P_g を用いて決定される。また、発電機の最適動作点への追従は界磁巻線へ印加する界磁電圧 V_{fG} をチョッパの通流率 α を変化して制御する。発電機軸には風車の回転速度を増加するための増速ギアが設置されており、発電機の回転数 N は風車の回転数 N_w にギアの増速比 R_n を掛けた値である ($N = R_n N_w$)。本論文では、5章において風力発電シミュレータを用いて提案手法の有効性を検証することを考慮し ($N = N_w$)、 $R_n = 1$ として以後のシステムの関係式を記述する。

本研究では風力発電システムの発電機として直流発電機を検討の対象とした。これは、本論文で提案する最大出力点探索制御法の理解を容易にすることと、小規模風力発電システムにおいては直接直流が得られる直流発電機のシステムが価格的に低廉な場合もあるためである。大容量の風力発電システムでは発電機の保守や価格の面から専ら誘導発電機が採用されており、本手法を応用して発電機回転速度-発電機出力特性を同定できれば、誘導発電機の出力をインバータ等により制御して最大出力点を探索できる。

図1 システム構成図

Fig. 1. Schematic configuration of windmill power system.

(2.1) 風車の基本方程式 風車ブレードの半径を R とするとブレードの回転面積 S は πR^2 となる。風速 V_w の風がその風車を吹き抜けた場合、空気密度を ρ とすると、風のもつエネルギーがすべて風車の回転トルクとして変換されたとすれば、入力トルク T_{in} は次式で表される^(1,2)。

$$T_{in} = \frac{1}{2} \rho \pi R^3 V_w^2 \dots \dots \dots (1)$$

風車トルク係数と呼ばれる係数 C_t を用いて実際に風車から取り出せるトルク T_w を表すと次式になる。

$$T_w = \frac{1}{2} C_t \rho \pi R^3 V_w^2 \dots \dots \dots (2)$$

ただし、 C_t : 風車トルク係数

この風力トルクを受けたときの風車の運動方程式は次式で表せる^(7,8)。

$$T_w = J_w \frac{dN}{dt} + T_l \dots \dots \dots (3)$$

ただし、 J_w : 風車の慣性モーメント、 N : 回転速度、 T_l : 負荷トルク

風車の一般的特性を表す指標として風車出力係数 C_p や風車トルク係数 C_t があり、プロペラ形風車の場合には以下の式で近似できる^(7,8,9)。

$$C_t = \xi \lambda^2 + \zeta \lambda + \gamma \dots \dots \dots (4)$$

$$C_p = \lambda C_t \dots \dots \dots (5)$$

ただし、 ξ, ζ, γ : ブレードの大きさや形、枚数やピッチ角により定まる係数、 $\lambda = \frac{RN}{V_w}$: 周速比

また、本論文で使用されるトルク係数の近似式は文献(9)の実測結果に基づいて近似されたものであり、トルク係数 C_t や出力係数 C_p は0から1の範囲にある。

風車の損失トルク T_f は、文献(8)の風車速度対損失特性より以下のように近似できる^(7,8)。

$$T_f = K_0 V_w^2 + K_1 V_w N + K_2 N^2 \dots \dots \dots (6)$$

ただし、 K_0, K_1, K_2 : 風車損失係数

表1 シミュレーションで用いたパラメータ
および直流発電機の定格

Table 1. System parameters and rated values for DC generator used in simulations.

$R = 0.95\text{m}, J_w = 0.312\text{Nmsec}^2, K_0 = 1.60804,$
 $K_1 = -0.03435, K_2 = 0.00299, J_g = 0.0026\text{Nmsec}^2,$
 $F = 0.00401\text{Nm/rad/sec}, T_c = 0.541\text{Nm},$
 $K_v = 0.432\text{V/rad./sec}, K_t = 0.432\text{Nm/A},$
 $V_b = 2.0\text{V}, R_a = 0.34\Omega, \rho = 1.204\text{Nsec}^2/\text{m}^4$

直流発電機の定格

定格電機子電圧: $V_r = 24\text{V}$, 定格電機子電流: $I_r = 15\text{A}$
 定格速度: $N_r = 800\text{rpm}$, バッテリー電圧: $E_b = 60\text{V}$

ここで, (1) 式, (2) 式より上式の T_f は次式で表せる.

$$T_f = T_{in} - T_w = (1 - C_t)T_{in} \quad (7)$$

また, (4), (6), (7) 式から風車損失係数 $K_0 \sim K_2$ は次式になる.

$$K_0 = \frac{1}{2}\rho SR(1 - \gamma) \quad (8)$$

$$K_1 = -\frac{1}{2}\rho SR^2\zeta \quad (9)$$

$$K_2 = -\frac{1}{2}\rho SR^3\xi \quad (10)$$

(7) 式を (3) 式へ代入すると, 風車のトルク方程式は次式となる.

$$T_{in} = J_w \frac{dN}{dt} + T_f + T_l \quad (11)$$

一方, 発電機として直流発電機を用いた時の負荷トルク方程式は最終的に (12), (13) 式で表せる.

$$T_l = J_g \frac{dN}{dt} + FN + T_c + T_g \quad (12)$$

$$T_g = K_t I_a \quad (13)$$

ただし, J_g : 発電機の慣性モーメント, F : 粘性摩擦係数, T_c : クーロン摩擦トルク, T_g : 発電機出力トルク, K_t : 発電機トルク係数, I_a : 電機子電流

(2.2) 発電機の出力方程式 図1の直流発電機の電機子電圧方程式は次式のようになる.

$$K_v(\alpha)N = R_a I_a + L_a \frac{dI_a}{dt} + V_b + E_b \quad (14)$$

ただし, $K_v(\alpha)$: 発電機起電力定数, R_a : 発電機電機子抵抗, I_a : 電機子電流, V_b : ブラシ電圧降下, E_b : バッテリー電圧

ここで, $J_n = J_w + J_g$ とおくと, 慣性モーメントに関する速度微分項 $J_n(dN/dt)$ は, (14) 式を用いて次のように示すことができる.

$$J_n \frac{dN}{dt} = J_n \frac{d}{dt} \left\{ \frac{1}{K_v(\alpha)} (R_a I_a + L_a \frac{dI_a}{dt} + V_b + E_b) \right\} \quad (15)$$

図2 回転速度 対 発電機出力特性

Fig. 2. Rotor speed - generator output power characteristics.

電機子インダクタンスは一般に, $5 \sim 15\text{mH}$ であり, 電機子抵抗は 0.34Ω であるから, 上式より, L_a に関する微分項 $L_a(dI_a/dt)$ の影響が慣性モーメント J_n に関する速度微分項 $J_n(dN/dt)$ の影響に比べてかなり小さいことが分かる (電機子時定数 L_a/R_a が小さい). したがって, 以降の式においては, (14) 式を (16) 式の形で考慮していくことが可能である.

$$K_v(\alpha)N = R_a I_a + V_b + E_b \quad (16)$$

5 章に述べるように, PI 制御器でチョップの通流率 α を制御することにより直流発電機の界磁電圧を制御するため, 界磁磁束の飽和を考慮して, $K_v(\alpha)$ はチョップの通流率 α の非線形関数とする. 最終的に, このような項が出力特性の式 ((23) 式参照) に現れるが, オンラインで出力特性を直接同定する本システムにおいて, 本項が追従制御の本質的問題となることはない.

発電電力 P_g は次式のように表現できる.

$$P_g = \frac{(K_v(\alpha)N - V_b - E_b)E_b}{R_a} \quad (17)$$

ここで, 回転速度 N は (1), (6), (11) 式と (16) 式を用いて得られる以下の微分方程式を解くことにより求められる.

$$\frac{dN}{dt} = \frac{1}{J_n} \left\{ -K_2 N^2 - (K_1 V_w + F)N + \frac{1}{2}\rho\pi R^3 V_w^2 - K_0 V_w^2 - T_c - \frac{K_t(K_v(\alpha)N - E_b - V_b)}{R_a} \right\} \quad (18)$$

また, 定常状態を考えれば, 下式の関係が成立する.

$$T_w = FN + T_c + T_g \quad (19)$$

文献 (9) より, 風車トルク係数 C_t は (20) 式で表される.

$$C_t = 1 - \frac{2(K_0 V_w^2 + K_1 V_w N + K_2 N^2)}{\rho\pi R^3 V_w^2} \quad (20)$$

(2), (20) 式より T_w は下式で表される.

$$T_w = \frac{1}{2} \rho \pi R^3 V_w^2 - (K_0 V_w^2 + K_1 V_w N + K_2 N^2) \quad (21)$$

(13), (19), (21) 式より電機子電流 I_a は (22) 式で表される.

$$I_a = \frac{1}{K_t} \left\{ -K_2 N^2 - (K_1 V_w + F) N + \left(\frac{1}{2} \rho \pi R^3 - K_0 \right) V_w^2 - T_c \right\} \quad (22)$$

(16), (22) 式より発電機出力 P_g は次式で表される.

$$P_g = \left[K_v(\alpha) N - \frac{R_a}{K_t} f(N, V_w) - V_b \right] \frac{f(N, V_w)}{K_t} \quad (23)$$

$$\text{ただし, } f(N, V_w) = -K_2 N^2 - (K_1 V_w + F) N + \left(\frac{1}{2} \rho \pi R^3 - K_0 \right) V_w^2 - T_c$$

(23) 式から得られる発電機出力 P_g と回転速度 N の定常特性を図 2 に示す. システムのパラメータは表 1 の値を用いた. 以後, シミュレーションにおいてもこのパラメータを用いることにする.

3. 最大電力点追従制御

(3.1) 繰返し最小二乗法によるパラメータ同定
(23) 式のパラメータが全て測定できれば風速を検出して最大出力点が解析的に求められる. しかし, (23) 式には多数の機器パラメータが含まれており, パラメータ測定誤差やシステム運転時のパラメータ変動が予想される. このため, オンラインでその値を個々に直接測定することは困難である. そこで, (23) 式を (24) 式のように表現することにより, オンライン情報 (N, P_g) のみでパラメータ $C_4 \sim C_0$ を同定することを考える. 以下に, 忘却係数を導入した繰返し最小二乗法のアルゴリズムを示す.

$$P_g(k) = C_4 N^4(k) + C_3 N^3(k) + C_2 N^2(k) + C_1 N(k) + C_0 \quad (24)$$

$\mathbf{p}(k) = (P_g(k)), \mathbf{c}^T(k) = (C_4 \ C_3 \ C_2 \ C_1 \ C_0), \mathbf{\Omega}^T(k) = (N^4(k) \ N^3(k) \ N^2(k) \ N(k) \ 1)$ とおき, (24) 式をマトリクス表示すると次式となる.

$$\mathbf{p}(k) = \mathbf{\Omega}^T(k) \mathbf{c}(k) \quad (25)$$

忘却係数を β とし, 評価関数 J を次式のように与える.

$$J = \sum_{i=0}^k \beta^{k-i} (\mathbf{p}(k) - \mathbf{\Omega}^T(k) \mathbf{c}(k))^2 \quad (0 < \beta < 1) \quad (26)$$

評価関数 J を最小にする $\mathbf{c}(k)$ が同定値 $\hat{\mathbf{c}}(k)$ である. $\partial J / \partial \mathbf{c} = 0$ より同定値 $\hat{\mathbf{c}}(k)$ を求めると下式になる^(10,11).

$$\hat{\mathbf{c}}(k) = \hat{\mathbf{c}}(k-1) - \frac{\mathbf{\Gamma}(k-1) \mathbf{\Omega}(k) (\mathbf{\Omega}^T(k) \hat{\mathbf{c}}(k-1) - \mathbf{p}(k))}{\beta + \mathbf{\Omega}^T(k) \mathbf{\Gamma}(k-1) \mathbf{\Omega}(k)} \quad (27)$$

図 3 $\hat{N}^*$ の推定結果

Fig. 3. Output characteristics and estimation of $\hat{N}^*$.

表 2 図 4~図 6 で用いたシミュレーション条件

Table 2. Simulation conditions used in Figs. 4~6.

($N_1(0)=80, N_2(0)=120$)

ノイズ	T_s	β	K_P	K_I
1%	3sec.	0.99	1×10^{-3}	2×10^{-6}

ただし, $\mathbf{\Gamma}(k) = \beta \mathbf{\Gamma}(k) + \mathbf{\Gamma}(k) \mathbf{\Omega}(k) \mathbf{\Omega}^T(k) \mathbf{\Gamma}(k-1)$,
 $\mathbf{\Gamma}(0) = \varepsilon_0 \mathbf{I}_5, \varepsilon_0 = 5.000 \gg 0, \hat{\mathbf{c}}^T(0) = (0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0)$

(27) 式の同定則は, β を小さくすれば古いデータの影響を小さくすることができ, 時変パラメータにも対応できる.

図 3 は表 1 の機器定数を用いて計算された出力特性と $V_w=12\text{m/s}$ の条件で (27) 式を用いて (24) 式に基づいて得られた推定出力特性 (図 4 のシミュレーションにおける時刻 $t=200$ 秒で最小二乗法を用いて推定された出力特性) を示している. 図中の N^* と $\hat{N}^*$ は, 風速 12m/s の条件で発電機の最大出力 P_g^* が得られる回転速度と最小二乗法で同定された出力特性を用いて得られた発電機出力を最大にする回転速度の推定値をそれぞれ表しており, $\hat{N}^*$ が N^* に一致すれば正確な同定が達成されたといえる. 図 3 からわかるように, 同定された出力特性と (23) 式を用いて計算された出力特性はほぼ一致 (すなわち, $N^* = \hat{N}^*$) しており, パラメータ同定が妥当であることを示している.

(3.2) 最大出力点の推定 風力発電システムの出力特性が同定できれば, 次に最大電力が得られる最適動作点 $\hat{N}^*$ を求める必要がある. 図 3 からわかるように出力特性に最大値が存在するため, 二分法を用いれば図 3 の推定された出力特性から最大電力が得られる回転速度 $\hat{N}^*$ を求めることができる. (24) 式からもわかるように, 同定されたパラメータを用いた出力特性は 4 次式で表される. 例えば, 風速 $V_w = 12\text{m/s}$ の場合, $\hat{N}^*$ を求めることは図 3 の推定出力曲線で最大電力が得られる回転速度を求める問題である. 従って, 最大出力点は, (24) 式を N で 1 回微分して零にな

図4 シミュレーション結果

Fig. 4. Simulation results.

る条件で求められる。

$$P'_g(k) = 4C_4 N^3(k) + 3C_3 N^2(k) + 2C_2 N(k) + C_1 = 0 \dots \dots \dots (28)$$

二分法を用いて最大出力点を決定するため、初期値として回転速度 $N_1(0)$, $N_2(0)$ をその解 $\hat{N}_n^*$ の左右に選定し、 $N_1(m)$, $N_2(m)$ 間を二等分する点 N_n を求める。そして(29), (30) 式の二分法のアルゴリズムを使って $N_1(m)$, $N_2(m)$ を更新し、 N_1 と N_2 の差がある値以下になるまで繰り返せば最終的に最大出力を得る回転速度 $\hat{N}^*$ が求められる。

$$P'_g(k)_{\{N_1(m)\}} \times P'_g(k)_{\{N_n(m)\}} > 0 \rightarrow N_n = N_1 \quad (29)$$

$$P'_g(k)_{\{N_1(m)\}} \times P'_g(k)_{\{N_n(m)\}} < 0 \rightarrow N_n = N_2 \quad (30)$$

二分法による計算法は計算アルゴリズムが簡単であり、解の範囲を限定できるため複数の解を有する方程式で目的の解のみを得る場合便利である。

〈3.3〉 最適動作点への追従制御 最適動作点 $\hat{N}^*$ が二分法により求められれば、最終的に発電機の回転速度を最適動作点へ追従させればよい。そこで本論文では、PI 制御により界磁電圧を調整して間接的に発電電力を制御することにより回転速度 N を $\hat{N}^*$ に追従させる。チョッパの通流率 α は (31) 式の PI 制御器で制御される。界磁電圧を等価的に変化して動作点 (N) を制御する。

図5 図4のパラメータ同定結果

Fig. 5. Parameter identification results for Fig. 4.

$$\Delta\alpha = K_P \Delta N + K_I \int \Delta N dt \dots \dots \dots (31)$$

ここで、 K_P : 比例ゲイン、 K_I : 積分ゲイン、 $\Delta N = \hat{N}^* - N$

良好な追従制御を達成するためには、この制御器のゲイン特性が重要である。同定器が急激な特性変化を高速に同定できない場合は最適動作点への追従に支障を与えるため、高速追従制御を期待して高周波域までハイゲインに設定することは避けなければならない。次章で、系全体のゲイン線図を用いて本追従制御系の周波数特性を示す。

なお、本システムでは、バッテリー電圧が高く発電機の回転速度が低い場合は最大出力点を追従できないこともある。これは、界磁電圧の制御により電機子回路の電力を制御しており、広範囲にわたり電機子の出力電圧を制御できないためである。この問題を避けるために、界磁電圧一定で電機子回路に降圧・昇圧チョッパを取り付けて本論文で提案し

図6 図5から得られる3次元出力特性

Fig. 6. 3-dimensional output characteristics for Fig. 5.

た制御アルゴリズムにより出力電力を制御すれば、このような制約は発生しない。ただし、この方式は直接発電電力を制御するため、界磁電圧制御方式より電力変換装置容量の増加と制御システムの高価格化をもたらすことになる。

4. シミュレーションによる検証

本論文で示した最小二乗法による同定則を用い、風速一定 (12m/s) のもとで最大出力点の追従制御を行ったシミュレーション結果を図4~図6に示す。発電機出力には最大電力の1%に相当するノイズを加え、制御前 ($t = 0 \sim 50$ 秒) は通流率を単調増加させ、 $t = 50$ 秒から提案する制御法を用いている。シミュレーションで用いた条件を表2に示す。

図4からわかるように最大出力値 P_g^* への追従、最適回転速度 $\hat{N}^*$ の推定、そして回転速度 N の $\hat{N}^*$ への追従も良好である。図5にパラメータ同定結果、図6に3次元で表した推定出力特性をそれぞれ示している。 β を表2の値より小さくしても P_g^* への追従は達成できるが、パラメータ同定値が乱れるため、 $\hat{N}^*$ に脈動を生じた。さらに、サンプリング周期を変更しても良好なパラメータ同定が可能で、システムは最大出力点を追従できることを付記しておく。

次に、風速を正弦波状に変化した場合のシミュレーション結果を図7に示す。風の振幅 4m/s で周期を 300 秒としたときの結果である。 P_g^* への追従は同定の乱れにより完璧ではないが、システム運転上ほとんど問題無いといえる。

本追従制御系の特性評価は、図8のゲイン線図を用いて検討することができる。ここで、過渡時において、界磁電流と磁束の変動は電機子電流等の回路現象とは異なり非常に緩やかであり (界磁時定数は大)、動作遅れは非常に小さいため、本システムの追従制御系の周波数特性を考える上で、(16) 式の非線形項は暫定的に定格運転時の電圧係数 K_f を用いて一次遅れなし要素とした線形項 $K_f N$ を用いることができる。したがって、系全体の特性評価を行うことが可能となった。

回転速度制御に用いる PI 制御器の比例ゲイン K_P 、および積分ゲイン K_I は表2の値を用いた。図8は、表2の K_P 、 K_I のゲインを用いて描いた追従制御系全体のゲイン

図7 シミュレーション結果

Fig. 7. Simulation results.

図8 本システムのゲイン線図

Fig. 8. Gain diagram for system.

線図 (実線) と、比例ゲイン K_P を変化した場合のゲイン線図を示している。

同図より、交差周波数 (Crossover Frequency 約 0.0002763(rad/s)) における本制御系のゲイン特性の傾斜がおおよそ -20 [dB/sec] となっており、制御系として適当な安定性を得ていることがわかる。また、ゲイン調整に対しては、 K_P を大きくすると交差周波数が大きくなり速応性が増すと考えられるが、 K_P を表2の値より大きく設定すると系が不安定となり、逆に小さくすると N の $\hat{N}^*$ への追従が悪くなるのが理解できる。

5. 実験による検証

(5.1) 実験システム 図9に、界磁回路に降圧チョップを用いた風力発電シミュレータの構成図を示す。直流機の M-G セットにより構成されている。直流電動機で風車を模擬している。本供試機の定格を表3に示す。PI 制御器

図9 風力発電シミュレータ構成図

Fig. 9. Block diagram of wind power simulator.

図10 実験システムの静特性

Fig. 10. Static characteristic of experimental system.

や同定のためのパラメータは表2の値を使用した。風速一定の状態を模擬するため、モータ側の界磁電圧 V_{FM} 、電機子電流 I_a を一定制御している。また、発電機の電機子側に負荷として鉛蓄電池を4個直列に接続している ($E_b=49V$)。システムの制御は、まずモータの回転速度 N とバッテリー側の電圧 E_b' 、電流センサから検出される負荷電流 I_L をA/Dコンバータを通してコンピュータに入力する。ただし、 E_b' はA/Dコンバータの入力電圧範囲が $\pm 10V$ のため分圧して入力している。次に、前章のアルゴリズムにしたがってコンピュータによって演算された通流率 α をD/Aコンバータを通してチョッパ回路へ出力し、発電機の界磁電圧 V_{FG} を制御する。チョッパ回路のスイッチング素子は、パワー MOS-FET (2SK829 最大定格 $V_{DS} = 500V$, $V_{GS} = \pm 20V$, $I_D = \pm 15A$) を用いた。演算された通流率 α がD/Aコンバータを通してパルス発生回路へ、またパルス発生回路から点弧回路を通り、通流率 α の信号としてMOS-FETのゲートを点弧する。

図11 実験結果

Fig. 11. Experimental results.

表3 供試M-Gセットの定格

Table 3. Rated values for M-G set used in experiments.

直流電動機	
定格電機子電圧：	80V
定格電機子電流：	7.06A
定格界磁電流：	0.36A
定格速度：	1750 rpm
直流発電機	
定格電機子電圧：	160V
定格電機子電流：	1.65A
定格界磁電流：	0.16A
定格速度：	1750 rpm
バッテリー電圧：49V	

〈5.2〉 実験結果 図10は風速一定時を想定した供試風力発電シミュレータの静特性を示している。この特性は、チョッパの通流率 α を0.1から0.9まで単調増加したときの静特性である。この静特性から、 P_g が最大となる最適な発電機回転速度 N^* が存在することがわかる。本実験では、図10の P_g - N 出力特性からシミュレーションと同様な手法でパラメータ $C_4 \sim C_0$ を同定し、二分法を用いて決定された最適動作点 $\hat{N}^*$ に回転速度 N が追従するようにPI制御器でチョッパの通流率を制御する。

図11は、チョッパの通流率 α を単調に増加し、時刻 $t = 400$ 秒から提案する制御法を用いた場合の実験結果である。発電電力 P_g は、制御開始後、短時間で最大出力値に

図 12 図 10 のパラメータ同定結果

Fig. 12. Parameter identification results for Fig. 10.

一致することがわかる。当然システムに関するパラメータ情報は、一切使用していないことに注目されたい。図 12 は、図 11 の実験で得られたパラメータ同定結果である。 $t = 300$ 秒で $C_4 \sim C_1$ はほぼ一定値に収束している。 C_0 は収束までに時間を要するが、最低次の係数であることから二分法で最適動作点を求める際のデータとして使用することはないので ((31) 式参照)、この同定値が最適動作点の推定に影響することはない。

6. むすび

本論文では、風力発電システムを高効率で運転する一制御法としてシステムの出力特性を直接同定して最適動作点を推定する方法を提案した。また、シミュレーションと実験により、機器パラメータを測定することなく、発電機出力と発電機回転速度情報から発電機を最適動作点で運転できることを示した。風力発電システムの出力特性は、繰返し最小二乗法を用いて同定されるため、事前にシステムのパラメータを測定する必要がない。実システムでは、運転状態 (ブレードピッチ制御) によりシステムパラメータが大きく変化するため、本手法のようにオンラインで出力特性を同定できる最適動作点追従制御法は実システムの運用に有用であるといえる。また、出力特性のパラメータ同定結果は、風力発電システムの故障診断への応用も考えられるが、この事項については将来検討予定である。

(平成 7 年 6 月 19 日受付, 平成 8 年 6 月 26 日再受付)

- (1) 本間琢也 編:「風力エネルギー読本」, オーム社 (昭 54)
- (2) 牛山 泉, 三野 正洋 共著:「小型風車ハンドブック」, パワー社 (昭 55)
- (3) H. R. Bolton & V. C. Nicodemou: "Operation of Self-Excited Generators for Windmill Application", Proc. Instn. Elect. Engrs., 126, No.9(1979)
- (4) G. A. Smith: "Electrical Control Methods for Wind Turbines", Wind Engineering, 13, No.2 (1989)
- (5) 川人, 鈴木:「出力電流制御による風力発電システムの電力最大化」, 電学論 B, 114, 3, pp.283-289 (平 6-3)
- (6) Tomonobu Senjyu and Katsumi Uezato: "Maximum Power Point Tracker for Windmill Power Station Using Fuzzy Control," Proceedings of 1995 International Power Electronics Conference (IPEC-Yokohama '95), Vol.1, Yokohama, pp.177-182, April 3-7 (1995).
- (7) 鈴木, 他:「風車シミュレータ」, 計測自動制御学会論文集, VOL.24, NO.9, pp.68~74(1988)
- (8) 鈴木, 他:「多翼型風車発電システムの特性」, 電学論 B, 108, 9, pp.415~422(昭 63)
- (9) 鈴木, 他:「風車トルク係数の測定法」, 電気関係学会四国支部連大 (昭 55-11)
- (10) 鈴木:「適応制御の基礎」, コンピューtrol, No.32, pp.7~14, コロナ社 (1990-10)
- (11) 相良, 他:「システム同定」, 計測自動制御学会 (昭 56-2)

千住 智 信 (正員) 1963 年 5 月 2 日生。1988 年 3 月琉球大学大学院工学研究科修士課程電気・情報工学専攻修了。同年 4 月琉球大学工学部電気工学科助手, 1994 年 11 月電気電子工学科助教授として現在に至る。博士 (工学)。同期機の安定性ならびに制御に関する研究, FACTS 機器の制御, アドバンスド制御を導入した同期機とパワーエレクトロニクス機器の制御ならびに自然エネルギーの開発に従事。計測自動制御学会, IEEE 会員。

徳村 政 也 (正員) 1970 年 8 月 30 日生。1995 年 3 月琉球大学工学部電気工学科卒業。同年 4 月沖縄電力 (株) 入社。現在に至る。在学中は風力発電に関する研究に従事。

上里 勝 実 (正員) 1940 年 2 月 5 日生。1972 年 3 月鹿児島大学大学院工学研究科電気工学専攻修了。同年 5 月琉球大学理工学部電気工学科助手, 助教授を経て, 1986 年 5 月同大学工学部教授, 1993 年 10 月同大学工学部電気電子工学科教授として現在に至る。工学博士。主として電気機器の過渡安定性および制御の研究, 自然エネルギーの有効利用に関する調査・研究に従事。計測自動制御学会会員。