最小分散制御を用いた風力発電機のピッチ角制御による出力電力変動の抑制

正員 千住 智信* 学生員 坂元 良成*
 正員 浦崎 直光* 非会員 比嘉 広樹*
 正員 上里 勝実* 正員 舟橋 俊久**

Output Power Control of Wind Turbine Generator by Pitch Angle Control using Minimum Variance Control

Tomonobu Senjyu*, Member, Ryosei Sakamoto*, Student Member, Naomitsu Urasaki*, Member, Hiroki Higa*, Non-member, Katsumi Uezato*, Member, Toshihisa Funabashi**, Member

In recent years, there have been problems such as exhaustion of fossil fuels, e.g., coal and oil, and environmental pollution resulting from consumption. Effective utilization of renewable energies such as wind energy is expected instead of the fossil fuel. Wind energy is not constant and windmill output is proportional to the cube of wind speed, which cause the generated power of wind turbine generators (WTGs) to fluctuate. In order to reduce fluctuating components, there is a method to control pitch angle of blades of the windmill. In this paper, output power leveling of wind turbine generator by pitch angle control using an adaptive control is proposed. A self-tuning regulator is used in adaptive control. The control input is determined by the minimum variance control. It is possible to compensate control input to alleviate generating power fluctuation with using proposed controller. The simulation results with using actual detailed model for wind power system show effectiveness of the proposed controller.

キーワード：ピッチ角制御，風力発電機，出力電力変動，最小分散制御

Keywords: pitch angle control, wind turbine generator, output power fluctuation, minimum variance control

1. まえがき

近年，エネルギー資源として大量消費されてきた石炭・石油などの化石燃料の枯渇や，エネルギー消費に起因する環境汚染が問題となっている。化石燃料代替エネルギーとして風力エネルギーなどの自然エネルギーの有効利用が注目されている。その中でも風力発電については，新エネルギー・産業技術総合開発機構による補助金制度や電力会社による電力購入時の優遇政策等の成立により急速に導入量が増加している。しかし，風力エネルギーは不規則であり風車出力は風速の3乗に比例するため，風速変動により出

力も大きく変動する。風力発電の電源構成比率が十分小さければその出力変動による周波数変動はほとんどない。しかし，その比率が大きくなると連系システムの周波数変動は大きくなる。したがって，風力発電機の大量導入時には電力系統に影響を及ぼすことが懸念され，その対策が必要である⁽¹⁾。蓄電設備を用いた対策が近年提案されているが⁽²⁾⁽³⁾，設備コストの増加をもたらすため，蓄電容量低減のために風力発電機側での対策も求められている。そこで，風力発電機単体での対策として，風車のブレードピッチ角の制御により定格風速以上において，風車が発生するトルクを制御することによって出力変動を抑制するピッチ角制御が大型機で採用されている。ピッチ角の制御に関する報告として，バックステッピング法を用いた手法⁽⁴⁾やフィードフォワード制御を用いた手法⁽⁵⁾がある。しかしながら，これらの制御は風力発電システムにおけるパラメータ測定誤差を考慮していない。また風力発電設備で発生するウィンドシアの効果を考慮していない。

そこで本論文では，ウィンドシアの効果及びパラメータ測定誤差を考慮したピッチ角制御による風力発電機の出力電力変動抑制法を提案する。提案手法は，文献(5)に示さ

* 琉球大学

〒903-0213 沖縄県中頭郡西原町字千原 1 番地

University of the Ryukyus

1, Senbaru, Nisihara-cho, Nakagami, Okinawa 903-0213

** (株) 明電舎

〒103-8515 東京都中央区日本橋箱崎町 36 番 2 号リバーサイドビル

Meidensha Corporation

Riverside Building 36-2, Nihonbashi, Hakozaiki-cho, Chuo-ku, Tokyo 130-8515

れているピッチ角制御系で対処できない出力偏差を、適応制御の一手法であるセルフチューニングレギュレータ (Self Tuning Regulator : STR) を用いてオンラインでパラメータ同定し、同定値に基づいて常に出力偏差を小さくするように最小分散制御 (Minimum Variance Control : MVC) によりピッチ角制御量を補償する。従って、パラメータ測定誤差及びウィンドシェアが生じた場合でもその出力偏差を補償することが可能である。さらに風力発電機のような非線形性が強いモデルを直接的にモデル化することとを避け、同定されたパラメータを用いて出力偏差方程式として表すことにより比較的低次数で制御器構成が可能である。本手法により決定されたピッチ角制御法を用いれば、風力発電システムのウィンドシェアやパラメータ測定誤差が生じた場合でも出力電力変動を抑制できることをシミュレーションにより確認している。

2. 風力発電システム

図 1 に風力発電システムの構成図を示す⁽⁵⁾⁻⁽⁷⁾。定格出力 P_{go} と発電機出力 P_g の偏差を求め、ピッチ角制御系を通じてピッチ角指令値を求める。そして油圧サーボ系によりブレードを駆動し出力電力 P_g の平準化をはかる。

2.1 風車及び発電機 風車から取り出し得る風車出力 P_w は以下の式で与えられる⁽⁵⁾⁻⁽⁸⁾。

$$P_w = \frac{C_p(\lambda, \beta) V_w^3 \rho A}{2} \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 V_w : 風速、 ρ : 空気密度、 A : 風車の回転断面積、 C_p は出力係数である。出力係数 C_p は以下の式で近似できる⁽⁵⁾。

$$C_p(\lambda, \beta) = c_1(\beta)\lambda^2 + c_2(\beta)\lambda^3 + c_3(\beta)\lambda^4 \dots \dots \dots (2)$$

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

ここで $c_{10} \sim c_{34}$: 定数、 β : ピッチ角、 λ は風車の性能を表すために、風車のブレード先端速度と風速の比として定義される周速比であり、以下の式で与えられる。

$$\lambda = \frac{R\omega}{V_w} \dots \dots \dots (4)$$

ここで、 ω : 風車の回転角速度、 R は風車の半径である。風車の回転角速度 ω は以下の風車の動特性式で与えられる⁽⁵⁾。

$$\omega^2 = \int \frac{2}{J} (P_w - P_g) dt \dots \dots \dots (5)$$

ここで、 J は風車の慣性モーメントである。風車の回転角速度 ω より、すべり s は以下の式で与えられる。

$$s = \frac{\omega_o - \omega}{\omega_o} \dots \dots \dots (6)$$

ここで ω_o は同期角速度であり、風車の回転角速度 ω が同期角速度以上で回転すると、 $s < 0$ となり誘導発電機は発

図 1 風力発電システム

Fig. 1. Wind generator system.

図 2 風車と発電機のシステム構成図

Fig. 2. System configuration of windmill and generator.

電機動作となる。

風力発電機としてかご形誘導発電機を用いる。風力発電機は慣性の大きい風車と結合されているので、電氣的過渡現象は無視でき、発電機出力 P_g は下式で表現できる⁽⁵⁾。

$$P_g = \frac{-3 V^2 s (1 + s) R_2}{(R_2 - s R_1)^2 + s^2 (X_1 + X_2)^2} \dots \dots \dots (7)$$

ここで、 V : 相電圧、 s : すべり、 R_1 : 固定子抵抗、 R_2 : 回転子抵抗、 X_1 : 固定子リアクタンス、 X_2 : 回転子リアクタンスである。

定常状態において、エネルギー損失を無視すれば $P_w = P_g$ となり、 P_w は以下の式で近似できる⁽⁵⁾。

$$P_w = a_1(\beta) + a_2(\beta) V_w^2 \dots \dots \dots (8)$$

$$a_1(\beta) = \alpha_{11} + \alpha_{12}\beta + \alpha_{13}\beta^2 + \alpha_{14}\beta^3$$

$$a_2(\beta) = \alpha_{21} + \alpha_{22}\beta + \alpha_{23}\beta^2 + \alpha_{24}\beta^3$$

ここで $\alpha_{11} \sim \alpha_{24}$ は定数である。

以上で与えられた式より、風車及び発電機のシステムを図 2 のように構成する。風速 V_w 及び風車の回転角速度 ω より、(4) 式の周速比 λ を求める。 λ とピッチ角 β より、(2) 式の出力係数 C_p 及び (1) 式の風車出力 P_w と発電機出力 P_g を求める。(5) 式より、風車出力 P_w と発電機出力 P_g の偏差に基づいて風車の回転角速度 ω を求める。(6) 式よりすべり s を求める。最後に、(7) 式より発電機出力 P_g を求める。

2.2 ピッチ角制御系 ピッチ角制御量 $G(\beta)$ は、ピッチ角 β が 10 度以上、90 度未満の時、以下の式で与えられる⁽⁵⁾。また、ピッチ角 β が 0 度以上、10 度未満の時、各々の風速に対して下式のピッチ角 10 度で固定した $G(\beta)$ で与えられる。

$$G(\beta) = \frac{\Delta\beta}{\Delta P} = \frac{1}{A_1 + A_2 V_w^2} \dots \dots \dots (9)$$

$$A_1 = \alpha_{12} + 2\alpha_{13}\beta + 3\alpha_{14}\beta^2$$

$$A_2 = \alpha_{22} + 2\alpha_{23}\beta + 3\alpha_{24}\beta^2$$

(9) 式は風速 V_w に依存するので、定格風速 12.5 m/s から停止風速 24 m/s まで変化させると、図 3 のようになる。ピッチ角制御は風速域に応じてピッチ角を選択する。図 4 の風

図 3 ピッチ角の制御量

Fig. 3. Control quantity of pitch angle.

図 4 風車出力特性

Fig. 4. Windmill output power curve.

図 5 ピッチ角制御系

Fig. 5. Pitch angle control system.

図 6 油圧サーボシステム

Fig. 6. Hydraulic servo system.

車出力曲線⁽⁵⁾より起動風速から定格風速の (b) 領域では風車エネルギーが最も大きくなるピッチ角 $\beta = 10$ 度で固定する。また定格風速から停止風速の (c) 領域では風車のエネルギーが定格出力を越えないようにピッチ角を調節する。起動風速以下及び停止風速以上の (a) 及び (d) 領域でピッチ角を $\beta = 90$ 度で固定する。

図 5 にピッチ角指令値 β_{CMD} を決定するピッチ角制御系を示す。図 5 に示すように、定格出力 P_{go} と発電機出力 P_g の偏差 e を PD 制御器に入力し、PD 制御器の出力信号 ΔP 及び (9) 式で求められたピッチ角の制御量 $G(\beta)$ との積によってピッチ角の変動分 $\Delta\beta$ を求める。 $\Delta\beta$ にピッチ角 β を加えることにより新たなピッチ角指令値 β_{CMD} 決定する。ここで図 5 中の Table2D は、図 3 の特性を表すルックアップテーブルであり、風速とピッチ角より $G(\beta)$ を一意に決定している。

2.3 油圧サーボ系 図 6 に油圧サーボシステム⁽⁵⁾を示す。本来、油圧サーボ系は機械系の様々な動作や非線形によって非常に複雑であるが、1 次遅れ系で模擬できる⁽⁵⁾⁻⁽⁷⁾。ピッチ角の司令値 β_{CMD} にはリミッターを設け、10 度～90 度の範囲を越えないよう制限をかけている。

3. 制御システム

本論文で提案する STR による適応制御システムを図 7 に示す。ここで、 $P_{go}(k)$ は定格出力、 $P_g(k)$ は発電機出力、 $e(k)$ は発電機出力偏差、 $u_2(k)$ は STR の制御入力、 k はサンプリング数である。(10) 式はピッチ角制御系で補償できない出力偏差の方程式をあらわす。

$$Ae(k) = q^{-d}Bu_2(k) + w(k) \dots \dots \dots (10)$$

$$A = 1 + a_1q^{-1} + \dots + a_nq^{-n}$$

$$B = b_0 + b_1q^{-1} + \dots + b_mq^{-m}$$

ここで、 d はむだ時間、 q^{-1} はシフトオペレータ、 $w(k)$ は平均値 0、分散 σ^2 の白色雑音、 n および m はモデル次数である⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。(10) 式に対して、出力偏差の分散及び制御入力

図 7 適応制御を用いたピッチ角制御システム

Fig. 7. Pitch angle control system using adaptive control.

を考慮した評価関数 J_1 は次式で与えられる。

$$J_1 = E[e^2(k+d) + \Lambda u_2^2(k)] \dots\dots\dots (11)$$

ここで、 $E[\cdot]$ は期待値（空間平均）を表し、 Λ は重み係数である。上式はサンプリング数を k としたとき、 d サンプリング先の出力偏差 $e(k+d)$ と現時点 (k) における制御入力 $u_2(k)$ の二乗に重み Λ を掛けた和の期待値を表している。よって J_1 を最小とするような制御入力 $u_2(k)$ は、 d サンプリング先の出力偏差 $e(k+d)$ を小さくすることが可能である。また上式は、重み係数 Λ により STR の入力 $u_2(k)$ の変化に制限をかけ、STR の制御入力 $u_2(k)$ の発散を防ぐことができる。(11) 式の J_1 を最小とするような制御入力を求めると次式を得る。

$$\left\{ BR + \frac{\Lambda}{b_0} \right\} u_2(k) = -He(k) \dots\dots\dots (12)$$

ここで R, H は多項式であり (13) 式の Diophantine 方程式により一意に決定される。

$$\begin{aligned} 1 &= AR + q^{-d}H \dots\dots\dots (13) \\ R &= 1 + r_1q^{-1} + \dots + r_{d-1}q^{-(d-1)} \\ H &= h_0 + h_1q^{-1} + \dots + h_{n-1}q^{-(n-1)} \end{aligned}$$

Diophantine 方程式により一意に決定された多項式 R, H より、(12) 式の一般化最小分散制御に基づいた制御入力 $u_2(k)$ を求めることができる。

しかし、実際に STR の制御入力 $u_2(k)$ を計算するためには、(10) 式における偏差方程式パラメータ $a_i, b_j, (1 \leq i \leq n, 0 \leq j \leq m)$ を同定することが必要である。そこでパラメータ同定法として最も一般的に用いられている最小二乗法を用いる。最小二乗法による未知パラメータの同定は、次の評価関数 J_2 を最小にするパラメータベクトル θ を求めることである⁽⁹⁾。

$$\begin{aligned} J_2 &= \sum_{k=0}^N w(k)^2 \\ &= \sum_{k=0}^N \{e(k) - z^T(k)\theta\}^2 \dots\dots\dots (14) \end{aligned}$$

ここで、 $\theta, z(k)$ は以下のベクトルである。

$$\begin{aligned} \theta^T &= [-a_1 \ -a_2 \ \dots \ -a_n \ b_0 \ b_1 \ \dots \ b_m] \\ z^T(k) &= [e(k-1) \ e(k-2) \ \dots \ e(k-n) \\ &\quad u_2(k-d) \ u_2(k-d-1) \ \dots \ u_2(k-d-m)] \end{aligned}$$

$\partial J_2 / \partial \theta = 0$ において θ の推定値 $\hat{\theta}$ を求めると、最終的に次式が与えられる。

$$\begin{aligned} \hat{\theta}(N) &= \hat{\theta}(N-1) - \frac{P(N-1)z(N)}{1 + z^T(N)P(N-1)z(N)} \\ &\quad \times [z^T(N)\hat{\theta}(N-1) - e(N)] \dots\dots\dots (15) \end{aligned}$$

ここで、 $P(N)$ は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} P(N) &= P(N-1) \\ &\quad - \frac{P(N-1)z(N)z^T(N)P(N-1)}{1 + z^T(N)P(N-1)z(N)} \\ &\quad \dots\dots\dots (16) \end{aligned}$$

(15), (16) 式が逐次繰り返し最小二乗法のアルゴリズムとなり、パラメータ同定がオンラインで可能となる。

同定パラメータがある値に収束しない最悪条件が発生するとピッチ角制御系が不安定となることがある。提案手法は、図7からわかるように従来のピッチ角制御系の制御入力 u_1 に補助入力として u_2 を加えるため、 u_2 を常にモニターし不安定になる状況になれば u_2 を遮断すれば系の安定性を失うことはない。本論文における同定パラメータの収束判断は、出力偏差 e が0近傍に収束し、かつパラメータ a, b の値がある値に収束しているかどうかで判断している。また、提案制御器は u_1 を決定する制御器の種類にかかわらず適用できるため、既存の風力発電設備への適用も比較的容易である。

4. シミュレーション結果及び考察

本論文で提案した最小分散制御を用いたピッチ角制御法の有効性を検証するために文献(5)で用いられているシス

図8 従来システム

Fig. 8. Conventional system.

表1 シミュレーションパラメータ

Table 1. Simulation parameters.

Parameters of Windmill	
blade radius R	14 m
inertia coefficient J	62993 kg·m ²
air density ρ	1.225 kg/m ³
Parameters of Induction generator	
rated output P_g	275 kW
phase voltage V	400 $\sqrt{3}$ V
stator resistance R_1	0.00397 Ω
stator reactance X_1	0.0376 Ω
rotor resistance R_2	0.00443 Ω
rotor reactance X_2	0.0534 Ω
Control parameters	
weighting factor λ	100
deadtime order d	2
model order n	3
model order m	3

図9 ノミナル時のシミュレーション結果

Fig. 9. Simulation result with nominal parameters.

テムモデル及びパラメータを用いて、シミュレーションを行った。提案手法の比較対象となる従来システムを図8に示す。シミュレーションは、パラメータ測定誤差が存在しないノミナル時である場合とパラメータ測定誤差が生じた場合の2つの条件で行われた。パラメータ測定誤差として、風車の性能や特徴によって決定される(3)式の $c_{10} \sim c_{34}$ の変動(ノミナル値の150%)を想定した。実際の風力発電

を正確に模擬するため、本論文では風車タワーのウィンドシェアの影響も考慮した。シミュレーションで用いた風車、誘導発電機、制御器のパラメータを表1に示す。なお制御器のサンプリング周期は $T_s = 1 \text{ ms}$ とし、STRのパラメータ Λ 、次数 m, n 等の値は、シミュレーション結果に基づき良好な制御が達成できる値に設定した。出力電力平準化の評価関数として次式の出力偏差の二乗積分値を用いる。

(a) Wind speed V_w and generated power P_g

(c) Pitch angle β and pitch angle command β_{CMD}

(b) Output power error e , output torque T_w , and performance index J_3

(d) Control input u_1 and control input u_2

(e) Identified parameters

図 10 パラメータ測定誤差時のシミュレーション結果

Fig. 10. Simulation result with error measurement for parameters.

$$J_3 = \int (P_{go} - P_g)^2 dt \dots\dots\dots (17)$$

4.1 ノミナル時のシミュレーション結果 パラメータ測定誤差が無い場合の風速変動シミュレーション結果を図 9 に示す。ここで、実線が提案制御法を用いた場合の結果、点線が文献 (5) の制御法を用いた場合の結果である。シミュレーションでは、図 9(a) に示すような風速変動を発生

させた。図 9(a) 及び図 9(b) より、提案手法を用いた場合は、最小分散制御器から誘導発電機の出力変動と逆の制御入力 u_2 を適切に与えることにより出力電力の変動を抑制し、ほぼ定格出力一定に保たれていることがわかる。また、図 9(c) および図 9(d) より、出力電力変動を適切に抑制する制御入力 u_2 が確認でき、図 9(e) より同定パラメータが短時間で収束していることが確認できる。図 9(c) のピッチ角

が振動的なのはウィンドシェアが発生するためである。中型・大型風車になるとピッチ角の僅かな差でも出力は大きく変化するため、従来手法による制御ではピッチ角がウィンドシェアなどの高い周波数成分に追従できず、出力が激しく変動するが、提案手法は適切な制御入力 u_2 を与えているので、ウィンドシェアなどの高周波数成分に対しても、ピッチ角が出力変動に対して追従し、ウィンドシェアの影響を受けず出力電力を良好に抑制できていることが確認できる。

4.2 パラメータ測定誤差時のシミュレーション結果
パラメータ測定誤差が生じた場合の風速変動シミュレーション結果を図 10 に示す。ここで、実線が提案制御法を用いた場合のシミュレーション結果、点線が文献(5)の制御法を用いたシミュレーション結果である。本シミュレーションでは、 $c_{10} \sim c_{34}$ の出力係数をノミナル値の 150% とし、これをパラメータ測定誤差とした。図 10(a) 及び図 10(b) より、パラメータ変動が発生しているにもかかわらず、従来手法より提案手法を用いた場合は出力電力の変動を抑制していることがわかる。出力係数 C_p のパラメータ ($c_{10} \sim c_{34}$) をノミナル値の 150% にしているため、図 10(b) に示すように従来手法はノミナル時と比較して、評価関数 J_3 が大きくなっている。提案手法では、適切な制御入力 u_2 を与えることによって、評価関数 J_3 はノミナル時とほぼ変わらずに出力電力の変動を抑制している。図 10(e) からわかるようにパラメータが短時間で収束しているため、出力電力偏差 e が抑制され、パラメータ測定誤差時においても最小分散制御器の有効性がわかる。

5. む す び

本論文では大型風力発電機の出力電力変動抑制に有効なピッチ角制御の補償に最小分散制御を用いた風力発電機のピッチ角制御法を提案した。提案手法は出力偏差を同定器を用いてオンライン同定し、常に制御偏差を小さくするように MVC により制御入力を補償している。従って、パラメータ測定誤差が生じた場合でも、その出力偏差を補償することが可能である。実行したシミュレーションにおいて、パラメータ測定誤差発生時でも出力偏差方程式のパラメータをオンライン同定可能で、さらに出力電力変動の抑制を確認できた。

(平成 16 年 2 月 23 日受付, 平成 16 年 6 月 18 日再受付)

文 献

- (1) 甲斐隆章:「風力発電の系統連系について」, 電気学誌, Vol.124, No.1, pp.27-31 (2004-1)
- (2) T. Senjyu, T. Kinjo, K. Uezato, and H. Fujita: "Terminal Voltage and Output Power Control of Induction Generation by Series and Parallel Compensation Using SMES", *T. IEE Japan*, Vol.123-B, No.12, pp.1522-1529 (2003-12) (in Japanese)

- 千住智信・金城達人・上里勝実・藤田秀紀:「直並列補償型 SMES による風力発電機の端子電圧および出力電力制御」, 電学論 B, 123, 12, pp.1522-1529 (2003-12)
- (3) T. Senjyu, T. Kinjo, K. Uezato, and H. Fujita: "Output Power Levelling of Wind Power Generation System by ECS Energy Storage System", The Papers of joint Technical Meeting on power Engineering and Power Systems Engineering, *IEE Japan*, pp.67-773 (2003) (in Japanese)
- 千住智信・金城達人・上里勝実・藤田秀紀:「ECS 電力貯蔵装置による風力発電システムの出力電力平準化」, 電気学会電力技術・電力系統技術合同研究, PE-03-190/PSE-03-201, pp.67-73 (2003)
- (4) O. Kanna, S. Hanba, S. Asato, and K. Yamashita: "A Method of Stabilization of a Wind Generator Power Using Backstepping Algorithm", *T. IEE Japan*, Vol.117-B, No.12, pp.1513-1519 (1997-12) (in Japanese)
- 漢那長武・半場 滋・安里貞夫・山下勝己:「Backstepping 法を用いた風力発電機の出力安定化制御」, 電学論 B, 117, 12, pp.1513-1519 (1997-12)
- (5) T. Matsuzaka and K. Tsuchiya: "Study on Stabilization of a Wind Generation Power Fluctuation", *T. IEE Japan*, Vol.117-B, No.5, pp.625-633 (1997-5) (in Japanese)
- 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」, 電学論 B, 117, 5, pp.625-633 (1997-5)
- (6) N. Kodama, T. Matsuzaka, and S. Yamada: "Modeling and Analysis of the NEDO 500 kW Wind Generator", *T. IEE Japan*, Vol.120-B, No.2, pp.210-218 (2000-2) (in Japanese)
- 小玉成人・松坂知行・山田佐佳:「NEDO 500 kW 風力発電機のモデリングと特性解析」, 電学論 B, 120, 2, pp.210-218 (2000-2)
- (7) K. Sato, N. Gibo, and K. Takenaka: "Study on Model of Wind Turbine Generator", The Papers of joint Technical Meeting on Power Engineering and Power Systems Engineering, *IEE Japan*, PE-03-150/PSE-03-161, pp.67-72 (2003-9) (in Japanese)
- 佐藤孝二・宜保直樹・竹中 清:「風力発電機モデルに関する検討」, 電気学会電力技術・電力系統技術合同研究, PE-03-150/PSE-03-161, pp.67-72 (2003-9)
- (8) 牛山 泉: 風車工学入門, 森北出版 (2002)
- (9) 金井喜美雄: ロバスト適応制御入門, オーム社 (1990)
- (10) T. Senjyu, H. Miyazato, and K. Uezato: "Quick and Precise Position Control of Ultrasonic Motors Using Hybrid Control", *T. IEE Japan*, Vol.115-D, No.11, pp.1333-1340 (1995-11) (in Japanese)
- 千住智信・宮里 裕・上里勝実:「ハイブリッド制御による超音波モータの高速・精密位置決め制御」, 電学論 D, 115, 11, pp.1333-1340 (1995-11)

千 住 智 信 (正員) 1963 年生。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 月同大学工学部電気工学科助手, 1994 年 11 月より同大学工学部電気電子工学科助教授, 2001 年 4 月より同大学工学部電気電子工学科教授, 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

ンクス機器ならびに自然エネルギーの開発に従事。計測自動車制御学会会員, IEEE 会員, IEE 会員。

坂 元 良 成 (学生員) 1981 年生。2004 年 3 月 琉球大学工学

部電気電子工学科卒業。同年 4 月同大学大学院理工学研究科博士前期課程電気電子工学専攻入学, 現在に至る。主として風力発電機のピッチ角制御に関する研究に従事。

浦崎直光（正員）1973年生。1996年3月琉球大学工学部電気工学科卒業。1998年3月同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月より同大学工学部電気電子工学科助手、現在に至る。博士（工学）。主として永久磁石同期電動機ドライブに関する研究に従事。IEEE 会員。

上里勝実（正員）1940年生。1972年3月鹿児島大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程修了。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、1994年10月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。

比嘉広樹（非会員）1968年生。1992年3月琉球大学工学部電子・情報工学科卒業。1994年3月同大学院工学研究科修士課程電気・情報工学専攻修了。1997年3月東北大学大学院工学研究科博士後期課程電子工学専攻修了。同年4月より同大学工学部電気電子工学科助手、現在に至る。博士（工学）。主としてパルススキップ制御を用いたDC-DCコンバータに関する研究に従事。IEEE 会員。

舟橋俊久（正員）1951年生。1975年名古屋大学工学部電気工学科卒業。同年4月（株）明電舎入社。現在に至る。博士（工学）。英国技術士（Chartered Engineer）。主として電力、系統解析、分散型電源に関する研究に従事。IEEE シニア会員。IEE 会員。