永久磁石同期発電機を用いた風力発電システムの 最大出力点追従制御

正員 千住 智信* 非会員 浜野 拓也*
正員 浦崎 直光* 正員 上里 勝実*
正員 舟橋 俊久** 正員 藤田 秀紀***

Maximum Power Point Tracking Control for Wind Power Generating System Using Permanent Magnet Synchronous Generator

Tomonobu Senjyu*, Member, Takuya Hamano*, Non-member, Naomitsu Urasaki*, Member,
Katsumi Uezato*, Member, Toshihisa Funabashi**, Member, Hideki Fujita***, Member

Recently, Permanent magnet synchronous generator (PMSG) is used for wind power generating system. PMSG has the optimal d -axis current which generates maximum power. However, the conventional methods cannot achieve maximum power point operation since d -axis current is generally kept at zero. In this paper, a maximum power point tracking control for wind power generating system with PMSG is proposed. The proposed method optimizes the d -axis current as well as the rotor speed of the PMSG on-line so as to generate maximum power. The effectiveness of the proposed method is verified through digital simulations.

キーワード：風力発電，永久磁石同期発電機，最大出力点，弱め磁束，最適化

Keywords: wind power, permanent magnet synchronous generator, maximum power point, flux weakening, optimization

1. ま え が き

化石燃料の枯渇，環境問題より化石エネルギーに代わる新しいエネルギー源の開発が行われている。なかでもクリーンな風力エネルギーを用いた風力発電システムが注目されている。風力エネルギーはそのエネルギー密度が希薄であり，自然界において風力は時々刻々と変動し続けている。そのため，発電システムを安定かつ効率的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与えられた

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性を有する⁽¹⁾とともに，その出力特性は風速や運転条件に応じて大きく変化するため最適動作点を決定することは困難である。

ウインドファームのような発電機 1 機あたりの出力が 1000kW 程度の大型風力発電システムでは誘導発電機が用いられている。しかし，このような大型発電システムは設置場所や風況の制約，導入時のコストが高いなどさまざまな問題点がある。そこで近年では，出力が数百 W～数十 kW の小型風力発電システムが実用化されている。特に，永久磁石発電機を用いた可変速風力発電システムは励磁装置が不要であり，ギアレス機構で実装できるため構造の簡素化，低騒音等の利点を有している⁽²⁾。可変速永久磁石同期発電機の速度制御方式としてベクトル制御方式がある。永久磁石同期発電機は永久磁石で励磁するため，励磁成分である d 軸電流を零とするのが一般的である。しかしながら， d 軸電流を負値に制御することで，磁束が弱まり鉄損が減少することで効率を向上させることが可能である⁽³⁾。一方，風車は各風速において風車出力が最大となる風車回転速度が存在する⁽⁴⁾。したがって，与えられた風況において風力発電システムの出力を最大にするためには，風車特性と発電

*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 Nishihara-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 Hakozaki-cho

Chuo-ku, Tokyo 103-8515

*** 中部電力 (株)

〒 459-8522 名古屋市中区大高町字北関山 20-1

Chubu Electric Power Co., Inc.

20-1 Kitasekiyama, Ohdaka-cho Midori-ku, Nagoya 459-8522

機特性を考慮した最大出力点追従制御法が必要である。

本研究では、永久磁石同期発電機を用いた風力発電システムにおいて、与えられた風力エネルギーから最大の発電電力を得るための最適回転速度及び最適 d 軸電流の決定方法を提案する。提案手法において最適回転速度は風車の回転速度対出力特性から導出している。また、最適 d 軸電流は発電機の損失を最小化する非線形計画問題とし、その解法の一つであるパウエル法⁽⁶⁾により数値的に導出している。提案手法により決定される動作点において風力発電システムが最大出力となること、ならびにその動作点への追従性をコンピュータ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

〈2・1〉システム構成 本研究で対象とした風力発電システムの構成図を図1に示す。風車により得られた風力エネルギーは増速機 G (増速比 R_n) を介して発電機 PMSG (永久磁石同期発電機) へ伝達される。発電機 PMSG は出力が最大となるように最大出力点追従制御に基づいて PWM コンバータにより制御されている。PWM コンバータから出力される電力は PWM インバータを介して系統へ連系される。以下に風車入力から発電機出力までのエネルギーの流れを風車および発電機の基本方程式に基づいて説明する。

〈2・2〉風車の基本方程式 風速 V_w における風車入力トルク T_{wind} は次式となる⁽⁴⁾。

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

ただし、 R_o ：風車ブレード半径、 ρ ：空気密度

風車の一般的特性を表す指標として風車トルク係数 C_t や風車出力係数 C_p 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⁽⁶⁾⁽⁷⁾。

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

$$C_p = \lambda C_t \dots\dots\dots (3)$$

ただし、 ξ, ζ, γ ：風車のブレードの大きさや形、枚数やピッチ角によって定まる係数、 $\lambda = \frac{R_o \omega_w}{V_w}$ ：周速比、 ω_w ：風車回転速度

実際に風車から取り出せる風車出力トルク T_w は風車トルク係数 C_t を用いて次式で表せる。

$$T_w = \frac{1}{2} C_t \rho \pi R_o^3 V_w^2 \dots\dots\dots (4)$$

したがって、(1)式から(4)式を差し引くことで風車損失トルク T_f は次式で表すことができる。

$$\begin{aligned} T_f &= T_{wind} - T_w \\ &= \frac{1}{2} \rho \pi R_o^3 V_w^2 (1 - C_t) \dots\dots\dots (5) \end{aligned}$$

また、風車損失トルク T_f は以下のように近似することもできる。

図1 システム構成

Fig. 1. System configuration.

$$T_f = k_0 V_w^2 + k_1 V_w \omega_w + k_2 \omega_w^2 \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 k_0, k_1, k_2 は風車損失係数であり、(2)、(5)、(6)式から以下のように表現できる。

$$k_0 = \frac{1}{2} \rho S R_o (1 - \gamma) \dots\dots\dots (7)$$

$$k_1 = -\frac{1}{2} \rho S R_o^2 \zeta \dots\dots\dots (8)$$

$$k_2 = -\frac{1}{2} \rho S R_o^3 \xi \dots\dots\dots (9)$$

ただし、 $S = \pi R_o^2$ ：ブレード回転面積

風車入力トルク T_{wind} に関する風車の運動方程式は次式となる。

$$T_{wind} = J_w \frac{d\omega_w}{dt} + T_f + T_{lw} \dots\dots\dots (10)$$

ただし、 J_w ：風車の慣性モーメント、 T_{lw} ：風車の負荷トルク

また、風車出力トルク T_w に関する風車の運動方程式は次式となる。

$$T_w = J_w \frac{d\omega_w}{dt} + T_{lw} \dots\dots\dots (11)$$

風車出力 P_w は次式となる。

$$P_w = T_w \omega_w \dots\dots\dots (12)$$

風車回転速度 ω_w と発電機回転速度 ω_m には増速比 R_n を用いると次式の関係がある。

$$\omega_m = R_n \omega_w \dots\dots\dots (13)$$

〈2・3〉発電機の基本方程式 図2は固定子鉄損を考慮した永久磁石同期電動機の d - q 軸等価回路である。今回は永久磁石同期電動機に負の負荷トルク T_{lm} を加えることで発電機としているため各エネルギーの向きを電動機動作での向きを正方向としている。図2の等価回路に対する定常状態での電圧方程式は次式となる⁽⁸⁾。

$$v_d = R i_d - \omega_e L_q i_{qt} \dots\dots\dots (14)$$

$$v_q = R i_q + \omega_e (L_d i_{dt} + K_e) \dots\dots\dots (15)$$

ただし, v_d, v_q : d 軸, q 軸電圧, i_d, i_q : d 軸, q 軸電流, R : 電機子抵抗, L_d, L_q : d 軸, q 軸電機子インダクタンス, ω_e : 電気角速度, K_e : 起電力係数, i_{dm}, i_{qm} : d 軸, q 軸磁化電流

磁化電流 i_{dm}, i_{qm} は次式で表される.

$$i_{dm} = i_d - i_{di} \quad \dots\dots\dots (16)$$

$$i_{qm} = i_q - i_{qi} \quad \dots\dots\dots (17)$$

ここで, 鉄損電流 i_{di}, i_{qi} は等価回路より次式となる.

$$i_{di} = -\frac{\omega_e}{R_i} L_q i_{qm} \quad \dots\dots\dots (18)$$

$$i_{qi} = \frac{\omega_e}{R_i} (L_d i_{dm} + K_e) \quad \dots\dots\dots (19)$$

ただし, R_i : 鉄損抵抗

永久磁石同期電動機の運動方程式は次式となる.

$$T_m = J_m \frac{d\omega_m}{dt} + D_m \omega_m + T_{lm} \quad \dots\dots\dots (20)$$

ただし, J_m : 電動機の慣性モーメント, D_m : 電動機の制動係数, T_{lm} : 電動機の負荷トルク

永久磁石同期電動機を発電機として考えた場合の機械的入力 P_{in} と電気的出力 P_{out} の関係は次式となる.

$$\begin{aligned} P_{in} &= -T_m \omega_m \\ &= -(v_d i_d + v_q i_q) + R(i_d^2 + i_q^2) + R_i(i_{di}^2 + i_{qi}^2) \\ &= P_{out} + P_c + P_i \quad \dots\dots\dots (21) \end{aligned}$$

ただし, P_c : 銅損, P_i : 鉄損

図 2 永久磁石同期電動機の d - q 軸等価回路

Fig. 2. d - q axes equivalent circuit of permanent magnet synchronous motor.

最終的に, 定常状態における風車出力 P_w と発電機出力 P_{out} の関係は次式となる.

$$\begin{aligned} P_w &= -T_{lm} \omega_m \\ &= P_{in} + D \omega_m^2 \\ &= P_{out} + P_c + P_i + P_v \\ &= P_{out} + P_{loss} \quad \dots\dots\dots (22) \end{aligned}$$

ここで, $P_v (= D \omega_m^2)$ は制動作用による機械的損失であり, $P_{loss} (= P_c + P_i + P_v)$ は発電機的全損失の総和である.

3. 最大出力点の導出

表 1 および表 2 に本研究で用いた風力発電システムの各パラメータを示す. 本研究ではギアレス機構を想定するため, 増速比 R_n を 1.0 としている. 風速 $V_w = 8\text{m/s}$ 一定の定常状態において風車回転速度 ω_w と永久磁石同期発電機の d 軸電流 i_d を変化させた場合の風力発電システムの出力特性を図 3 に示す. 動作点 A (ω_w^{opt}, i_d^0) は d 軸電流 i_d を 0 一定とし, 風車回転速度 ω_w のみを最適化した場合である (従来手法). 一方, 動作点 B ($\omega_w^{opt}, i_d^{opt}$) は風車回転速度 ω_w と d 軸電流 i_d を最適化した場合である (提案手法). 図 3 において, 動作点 B は動作点 A より電気的出力 P_{out} が大きくなっており, 最大出力点となっている.

以下では前節で示した風車および発電機の基本方程式に基づいて最適回転速度 ω_w^{opt} および最適 d 軸電流 i_d^{opt} の決定方法について説明する.

〈3・1〉 回転速度の最適化 (1), (5), (6), (12) 式より定常状態における風車出力 P_w は風速 V_m に対して風車回転速度 ω_w の 3 次関数となる.

$$P_w = T_w \omega_w^3$$

表 1 風車パラメータ

Table 1. Windmill parameters.

風車パラメータ	
風車ブレード半径	$R_o = 0.95 \text{ m}$
慣性モーメント	$J_w = 0.312 \text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^2/\text{rad}$
空気密度	$\rho = 1.204 \text{ N}\cdot\text{s}^2/\text{m}^4$
風車損失係数	
k_0	1.61258
k_1	-0.01911
k_2	0.00124

表 2 発電機パラメータ

Table 2. Generator parameters.

電機子抵抗	$R = 0.57 \text{ } \Omega$
鉄損抵抗	$R_i = 240 \text{ } \Omega$
d 軸インダクタンス	$L_d = 7.73 \times 10^{-3} \text{ H}$
q 軸インダクタンス	$L_q = 2.28 \times 10^{-2} \text{ H}$
起電力係数	$K_e = 1.08 \times 10^{-1} \text{ V}\cdot\text{s}/\text{rad}$
慣性係数	$J_m = 1.15 \times 10^{-4} \text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^2/\text{rad}$
制動係数	$D_m = 1.00 \times 10^{-4} \text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}/\text{rad}$
極対数	$P = 6$
増速比	$R_n = 1.0$

図3 風力発電システムの出力特性 ($V_w = 8\text{m/s}$)
Fig. 3. Output power characteristics of wind power generating system.

図4 風車出力特性
Fig. 4. Windmill output power characteristics.

$$\begin{aligned} &= (T_{\text{wind}} - T_f)\omega_w \\ &= \left(\frac{1}{2}\rho\pi R_o - k_0\right)V_w^2\omega_w - k_1V_w\omega_w^2 - k_2\omega_w^3 \end{aligned} \quad (23)$$

図4は本研究で用いた風車の各風速における風車回転速度対風車出力特性である。これより各風速において風車出力 P_w が最大となる最適回転速度 ω_w^{opt} が存在することがわかる。 $dP_w/d\omega_w = 0$ より、風車出力 P_w が最大となる最適回転速度 ω_w^{opt} は次式のように解析的に求まる。

$$\omega_w^{\text{opt}} = \frac{-B + \sqrt{B^2 - AC}}{A} \quad (24)$$

$$\text{ただし、} A=3k_2, B=k_1V_w, C=(\frac{1}{2}\rho\pi R^3 - k_0)V_w^2$$

したがって、(13)式から永久磁石同期発電機の回転速度指令値 ω_m^* は次式のように決定することができる。

$$\omega_m^* = R_n\omega_w^{\text{opt}} \quad (25)$$

一例として、風速 $V_w = 8\text{m/s}$ 時の風車回転速度 ω_w の最適化結果を示す。(24)式に風速 V_w および各パラメータを代入し計算すると最適回転速度 ω_w^{opt} は以下の値となる。

$$\omega_w^{\text{opt}} = 84.0 \text{ rad/s} \quad (26)$$

図4より、決定された ω_w^{opt} は風速 $V_w = 8\text{m/s}$ において最大出力となる風車回転速度であることが確認できる。

図5 永久磁石同期発電機の損失特性
Fig. 5. Power loss characteristics of permanent magnet synchronous generator.

〈3・2〉 d 軸電流の最適化 図5は風車出力 P_w を一定 (風速 $V_w = 8\text{m/s}$ 一定、回転速度 $\omega_m = R_n\omega_w^{\text{opt}} = 84\text{rad/s}$ 一定) とし、永久磁石同期発電機の d 軸電流 i_d を 0A から -6A まで変化させた場合の永久磁石同期発電機の損失 P_{loss} ($= P_c + P_i + P_v$) の変化を示している。これより d 軸電流を最適化し、損失 P_{loss} を最小にすることで一定な発電機入力 $P_{\text{in}} (= P_w - P_v)$ に対して発電機出力 P_{out} が増加することがわかる。しかし損失 P_{loss} は d, q 軸電流 (i_d, i_q) の非線形関数であるため、 d 軸電流 i_d を解析的に最適化することは困難である。そこで、非線形計画問題の最適化手法の一つであるパウエル法を用いて d 軸電流 i_d を数値的に最適化する。

2章で示した発電機の入出力関係より、パウエル法における評価関数 $f(x)$ 、制約条件 $c_1(x)$ を以下のように設定する。

$$\begin{aligned} f(x) &= P_{\text{loss}} \\ &= R(i_d^2 + i_q^2) + R_i(i_{di}^2 + i_{qi}^2) + D\omega_m^2 \\ c_1(x) &= P_w - P_{\text{out}} - P_{\text{loss}} = 0 \end{aligned} \quad (27)$$

ここで、 $f(x)$ は発電機的全損失 P_{loss} であり、 $c_1(x)$ は風車出力 P_w から発電機の電氣的出力 P_{out} までのエネルギー保存制約である。ここで、発電機回転速度 ω_m には3.1節において決定された最適値が用いられる。

図6はパウエル法の最適化課程における d 軸電流 i_d 、評価関数 $f(x)$ および制約条件 $c_1(x)$ の推移を示している。なお、風車出力 P_w は図5の場合と同一である。図6(b)より、Step0 および Step2 で $f(x)$ の値が小さくなっているが図6(c)に示すように制約条件 ($c_1(x) = 0$) を満たしていないためにつぎの計算ステップへと進んでいる。最終的に Step7 において最適 d 軸電流 i_d^{opt} は以下の値になった。

$$i_d^{\text{opt}} = -4.20 \text{ A} \quad (28)$$

図5において、 $i_d = -4.2\text{A}$ および $i_d = 0\text{A}$ がそれぞれ図3における動作点Bおよび動作点Aであり、 d 軸電流 i_d を最適化することで、動作点Aと比較して発電機損失 P_{loss} が約 25W (定格の約6%) 減少している。なお、図

図 6 パウエル法による最適化課程

Fig. 6. Optimization process by Powell method.

図 7 各風速における最適動作点

Fig. 7. Optimal operating points for wind speed.

5からわかるように最適 d 軸電流 i_d^{opt} 付近では, d 軸電流 i_d に対して損失 P_{loss} の変化が小さくなっている。その結

図 8 風速 V_w 対出力 P_{out} 特性

Fig. 8. Output power characteristics for wind speed.

果, 図 3 に示す出力特性において d 軸電流 i_d に対する出力 P_{out} の差異が顕著に現れないことに注意されたい。

〈3・3〉 各風速における最適化結果 図 7 に風速 $V_w=3\sim 12$ m/s に対する最適回転速度 ω_w^{opt} および最適 d 軸電流 i_d^{opt} を示す。最適回転速度 ω_w^{opt} は風速 V_w に対してほぼ線形特性を有している。一方, 最適 d 軸電流 i_d^{opt} は風速 V_w に対して非線形特性を有していることが確認できる。

図 8 は各風速に対する発電機出力 P_{out} を示しており, d 軸電流 i_d を最適化することで $i_d = 0$ 一定の場合と比較して発電機出力 P_{out} が増加している。 d 軸電流 i_d を最適化することは永久磁石同期発電機の銅損 P_c と鉄損 P_i の和を最小にすることであり, 永久磁石同期発電機が高速回転する高風速時ほど鉄損 P_i が大きくなるため損失低減効果が顕著になっている。

4. 最大出力点追従制御

最大出力点追従のための風力発電制御システム構成を図 9 に示す。図 10 は図 9 において示されている回転速度 ω_m および d 軸電流 i_d の最適化システム構成部の詳細を示している。図 10 に示す最適化システムでは風速 V_w から風力発電システムが最大出力となる最適回転速度 ω_w^{opt} および最適 d 軸電流 i_d^{opt} をオンラインで決定している。永久磁石同期発電機は速度指令値 ω_m^* および d 軸電流指令値 i_d^* を各最適値に設定し, 速度および電流制御を行う。速度制御器および電流制御器には PI 制御器が用いられている。

図 9 に示す風力発電制御システム構成に基づいて風速のステップ変化に対する風力発電システムの追従制御シミュレーションを行った。表 3 は速度制御器および電流制御器のパラメータであり, 表 4 は各時刻 t における風速 V_w の設定値を示している。

風速 V_w のステップ変化に対する風力発電システムの時間応答を図 11(a)~(d) に示す。図 11(a), (b) は永久磁石同期発電機の回転速度 ω_m および d 軸電流 i_d であり, 図 7 に示した各風速 V_w に対する最適値 $\omega_m^{opt}(=R_n\omega_w^{opt})$ および i_d^{opt} に制御されている。図 11(c) は q 軸電流 i_q であり,

図 9 風力発電制御システム構成

Fig. 9. Generator control system configuration.

図 10 最適化システム構成

Fig. 10. Optimization system configuration.

表 3 制御器パラメータ

Table 3. Controller Parameters.

速度制御器 (PI 制御)	
比例ゲイン	$K_{P\omega} = 40$
積分ゲイン	$K_{I\omega} = 10$
電流制御器 (PI 制御)	
比例ゲイン	$K_{Pi} = 10$
積分ゲイン	$K_{Ii} = 5$

表 4 シミュレーション条件

Table 4. Simulation Conditions.

t [s]	0~60	~120	~180
V_w [m/s]	8	7	9

速度偏差 ($=\omega_m^* - \omega_m$) および d 軸電流指令値 i_d^* に応じて制御されている。ただし、永久磁石同期発電機が速度指令に追従するために電動機動作 ($i_q > 0$) となる可能性があるため、電流指令値に制限 ($i_q^* \leq 0$ かつ $i_d^* \leq 0$) を設けている。また、回転速度のステップ変化時 ($t = 60$ s) に q 軸電流 i_q が過大になっている。これは回転速度 ω_m の追従性を重視したためであり、システム全体に影響を及ぼす場合は、速度制御器のゲイン ($K_{P\omega}$, $K_{I\omega}$) を小さくするか、風速情報の検出に低域通過フィルタを追加することで過大電流を抑制することが可能である。図 11(d) は発電機出力 P_{out} であり、回転速度 ω_m のみを最適化した従来手法と比較して回転速度 ω_m および d 軸電流 i_d を最適化した提案手法は発電機出力 P_{out} が大きいことがわかる。なお、提案手法により得られた発電機出力 P_{out} は各風速 V_m における定常時での最大出力点と一致していることを確認している。

(a) 回転速度特性

(b) d 軸電流特性

(c) q 軸電流特性

(d) 出力特性

図 11 シミュレーション結果

Fig. 11. Simulation results.

5. む す び

本論文では、永久磁石同期発電機を用いた風力発電システムのエネルギーの入出力関係の定式化を行ない、最大出力点追従制御のための風車回転速度と発電機 d 軸電流の最適化を提案した。最適化された回転速度および d 軸電流で、風力発電システムを動作させることで、各風速において最大出力が得られることを示した。また、風速のステップ変化に対するシミュレーションを行い、風力発電システムが最大出力点に追従できることを確認した。

(平成 14 年 2 月 25 日受付, 同 14 年 8 月 15 日再受付)

文 献

- (1) 清水: 風力発電技術, パワー社, pp. 189-213 (1994)
- (2) S. Tamai, M. Kawamura, D. Itoh, Y. Kinpara, M. Inoue, T. Matsushita, and H. Nakayama: "Variable Speed Wind Generation System with PM Synchronous Generator", Proc. 1999 JIAS Conf., No. 250, pp. 111-112 (1999-8) (in Japanese)
玉井・川村・伊藤・金原・井上・松下・中山: 「永久磁石同期発電機を用いた可変速風力発電システム」, 平成 11 年電気学会産業応用部門大会講演論文集, No. 250, pp. 111-112 (1999-8)
- (3) モーター技術実用ハンドブック編集委員会 編: モーター技術実用ハンドブック, pp. 540-547, 日刊工業新聞社 (2001)
- (4) 本間: 風力エネルギー読本, pp. 61-64, オーム社 (1979)
- (5) 大野 豊・磯田和男: 新版 数値計算ハンドブック, pp. 658-674, オーム社 (1990)
- (6) T. Suzuki, T. Kamano, M. Fushimi, and H. Harada: "Windmill Simulator", T. SICE, Vol. 24. No. 9, pp. 960-966 (1988-9) (in Japanese)
鈴木・鎌野・伏見・原田: 「風車シミュレータ」, 計測自動制御学会論, 24, No. 9, pp. 960-966 (1988-9)
- (7) T. Suzuki, T. Kamano, and H. Harada: "Study on Characteristics of a Multi-Bladed Windmill Generator System", T. IEEE Japan, Vol. 108-B, No. 9, pp. 415-422 (1988-9) (in Japanese)
鈴木・鎌野・原田: 「多翼型風車発電システムの特性」, 電学論 B, 108, 9, pp. 415-422 (1988-9)
- (8) T. Senjyu, T. Hamano, N. Urasaki, and K. Uezato: "Maximum Power Tracking Control Method for Wind Power Generating System Using Permanent Magnet Synchronous Generators", Proc. Conf. of PES of IEEE, No. 235, pp. 671-672 (2001-8) (in Japanese)
千住・浜野・浦崎・上里: 「永久磁石同期発電機による風力発電システムの最大出力点追従制御法」, 平成 13 年電気学会電力・エネルギー部門大会, No. 235, pp. 671-672 (2001-8)

千住 智 信 (正員) 1963 年生。1998 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, アドバンス制御を導入した電動機とパワーエレクトロニクス機器ならびに自然エネルギーの開発に従事。計測自動制御学会会員, IEEE 会員。

浜野 拓 也 (非会員) 1977 年生。2002 年 3 月琉球大学工学部電気電子工学科卒業。同年 4 月株式会社富士通ゼネラル入社。現在に至る。在学中は風力発電システムの最大出力点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。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

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。工学博士。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

藤田 秀 紀 (正員) 1951 年生。1973 年 3 月名古屋大学工学部電気学科卒業。同年 4 月中部電力 (株) 入社。電力系統の運用に関する実務後, パワエレ・超電導技術の系統適用研究に従事。博士 (工学)。現在, 同社電力技術研究所研究主幹。1990 年電気学会進歩賞受賞。IEEE 会員。琉球大学客員教授。