論文

ファジィ制御を用いた 風力発電システムの最大電力点の探索[†]

千住 智信* 高市 潤也* 上里 勝実*

地球における化石燃料の保存と自然環境の保全の重要性の要求から、自然エネルギーの開発が近年期待されている。最も期待されている自然エネルギーの一つは、風力エネルギーである。風力エネルギーシステムでは、発電機で発電される電力が最大となる最適動作点が存在する。さらに、風力エネルギーは時間と共に変化し、さらに希薄であるという特徴を有している。時々刻々変化する風力発電システムにおいて、最適動作点を探索して効率的にエネルギーを得るためには、最大電力点の追従制御が必要である。

本論文は、発電機から効率的に最大電力を得るために、ファジィ制御を用いて風力発電システムの最大電力点の追従制御法を提案している。提案する制御法は、発電機の出力電力の情報を用いて最大電力点を推定し、メンバシップ関数はチョッパの通流率と出力電力に関して構成されている。複雑な計算や数学モデルを用いることなく、本制御法により最大電力点における風力発電システムの運転が可能になる。

キーワード：風力発電システム、最大電力点、ファジィ制御、降圧チョッパ

1. まえがき

1973年の石油ショックとその後の石油の高騰にともない、世界各国でエネルギー源の多様化に関する研究開発が行われるようになった。また、近年は健全な自然環境の保全のために二酸化炭素を排出しない自然エネルギーの有効利用が求められている。これまで太陽熱、太陽光、風力、潮力、波力、地熱などの新しいエネルギー源の研究開発が行われてきた。これらの新しいエネルギー源の中で風エネルギーは、安全・クリーンで普遍性に富む等の利点から有望なものの一つと考えられている[1,2]。

風エネルギー利用の主力としては風力発電が考えられるが、自然風は空間・時間により大きく変動するため、発電システムを安定で、有効に利用する方法を開発することが重要である。つまり、

風車と発電機を組み合わせた風力発電システムは、発電電力が最大となる最適動作点(最大電力点)が存在するため、不規則かつ希薄な風力エネルギーを有効に利用するためには発電機を常に最適動作点で動作させる必要がある。しかし、風力発電システムは、非線形性が強く、さらにシステムのパラメータも状況に応じて変化することを考えれば、その数学モデルに基づいて厳密に最適動作点を決定することは困難であると思われる。

本論文では、負荷としてバッテリーを接続した風力発電システムについて、降圧チョッパ回路を用いて発電機の負荷状態を等価的に変化させ、最大電力点を電力情報だけにより探索する方法を提案する。チョッパの通流率の決定には、現在広い領域で応用が進められているファジィ制御を用いており、本システムは高速に最大電力点を探索できる特長を有している。この手法は、発電電力のみに注目するため、複雑な計算を行うことなく最大電力点を探索できる。本論文では、この手法の有用性をシミュレーションと実験により示している[3]。

[†] Maximum Output Power Point Tracking Control of Windmill Power System by Fuzzy Control

* Tomonobu SENJYU, Jynya TAKAICHI and Katsumi UEZATO
琉球大学 工学部電気電子工学科
Faculty of Engineering, University of the Ryukyus

2. 風力発電システム

本章のシミュレーションで想定した風力発電システムの構成図を図1に示す。風車に直流発電機を直結した風力発電システムであり、発電機の出力は降圧チョップパを介してバッテリーに接続している。風車の慣性は非常に大きいことから、発電機の電圧方程式は以下のように表せる。

$$K_v N = R_a I_a + V_b + E_b \quad (1)$$

ただし、 K_v ：発電機起電力定数、 N ：回転速度、 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 ：発電機側から見た等価的なバッテリー電圧

また、(1)式より発電機出力は以下のように表現できる。

$$P_g = \frac{(K_v N - V_b - E_b) E_b}{R_a} \quad (2)$$

ここで、風車の回転速度は以下の微分方程式[4,5]を解くことにより得られる。

$$\begin{aligned} \frac{dN}{dt} = \frac{1}{(J_w + J_g)} & \left\{ -K_{r2} N^2 - (K_{r1} V_w + f_g) N \right. \\ & + \frac{1}{2} \rho \pi R^3 V_w^2 - K_{r0} V_w^2 - T_c \\ & \left. - \frac{K_t (K_v N - E_b - V_b)}{R_a} \right\} \quad (3) \end{aligned}$$

ただし、 J_w ：風車の慣性モーメント、 J_g ：発電機の慣性モーメント、 K_{r0}, K_{r1}, K_{r2} ：風車損失係数、 f_g ：粘性摩擦係数、 T_c ：クーロン摩擦トルク、 ρ ：空気密度、 R ：風車半径、 V_w ：風速、 K_t ：トルク係数

(1)、(3)式を用い、風速をパラメータとしてバッテリー電圧 E_b を0から70(V)まで変化したときの、発電機出力 P_g の変化を図2に示す。図2より、風速に応じて発電機出力 P_g が最大になるバッテリー電圧が存在する。つまり風力発電システムは、風速に応じて電力が最大となる最適動作点を持ち、風力エネルギーを有効に利用するためには最適動作点で風力発電システムを動作させる必要がある。

本論文では、降圧チョップパの通流率を変化させることによって発電機から見た等価的な負荷状態

を変化させ、システムを異なる動作点において動作させた時の電力差 (ΔP_g) を比較しながら、最大電力点を探索する制御法(本論文では電力比較法と呼ぶことにする)を用いる。つまりバッテリー電圧を ΔE_b 増加させた場合に、発電電力 P_g が増加すればバッテリー電圧をさらに ΔE_b 増加させ、 P_g が減少すればバッテリー電圧を $-\Delta E_b$ 減少させる。またバッテリー電圧を $-\Delta E_b$ 減少させた場合に、 P_g が増加すれば、さらにバッテリー電圧を $-\Delta E_b$ 減少させ、 P_g が減少すればバッテリー電圧を ΔE_b 増加させて最大電力点を探索する。本論文では、 ΔE_b を直接制御するのではなく、チョップパを用いて通流率 α を制御することにより、発電機側から見た等価的なバッテリー電圧 E_b を制御している。本論文では発電機側から見た負荷電圧 E_b と負荷端の電圧 E'_b を用いており、両者の関係は次式により表すことができる[6]。

$$E'_b = \alpha E_b \quad (4)$$

ΔE_b は間接的な制御入力であり、最終的な制御入力であるチョップパの通流率制御により等価的に制御することが可能である。

本制御法は最大電力点の探索に必要な情報が発

図1 風力発電システムの構成図

図2 発電機出力対バッテリー電圧特性

電電力のみであるため、ハードウェアの構成が簡単になるという利点を有する。しかし、バッテリー電圧の変化幅 ΔE_b が固定されていれば最適動作点の探索時間や探索後の発電電力の脈動に大きく影響するため、この値の選定には十分注意しなければならない。この制御法の具体的問題とファジィ制御を用いた解決法は3章で述べることにする。

3. 最大電力点探索法の特徴

3.1 電力比較法

本節では、上記の電力比較法のアルゴリズムを使用した最大電力点探索のシミュレーションを行う。ここで、シミュレーションに用いた各パラメータを表1に示す。

通流率 α の変化分 $\Delta\alpha$ を0.02, 0.06として最大電力点探索のシミュレーションを行った結果を図3に示す。太線が $\Delta\alpha=0.02$ 、細線が $\Delta\alpha=0.06$ の場合である。ただし、風速 V_w は12(m/sec.)一定で、発電電力の最大値(902 W)の1%に相当するノイズを発電電力情報に加え、サンプリング周期は3(sec.)とした。

$\Delta\alpha$ が0.02の場合は発電電力の脈動は小さいが、最大電力点へ追従するために約90秒ほど要している。そこで $\Delta\alpha$ を0.06と大きく設定すると、短時間で最大電力点が探索可能となる。しかし、 $\Delta\alpha$ が大きいため最大電力点探索後の電力脈動が大きくなるという問題がある。

3.2 ファジィ制御を用いた最大出力点探索法

本節では、電力比較法の問題点を解決するために、ファジィ制御[7]により $\Delta\alpha$ を可変制御する手法を提案する。ファジィ制御を用いた本制御法は、 $\Delta\alpha$ の大きさを状況に応じて変化させる方法であり、電力比較法による最大電力点探索法の一拡張法である。

ファジィ制御は、制御対象に対する人間の知識(通常“if 前件部、then 後件部”形式で表現)を利用してシステムを制御する方法である。

本論文で提案する方法は風力発電システムの特

表1 風車に関するパラメータ

風車半径 R (m) : 0.95, 風車慣性モーメント J_w (Nmsec. ² /rad.) : 0.312, 風車損失係数 K_{f0} : 1.60804, 風車損失係数 K_{f1} : -0.03435, 風車損失係数 K_{f2} : 0.00299, 発電機慣性モーメント J_g (Nmsec. ² /rad.) : 0.0026, 粘性摩擦係数 F_g (Nm/rad/sec.) : 0.00401, クーロン摩擦トルク T_c (Nm) : 0.541, 起電力係数 K_b (V/rad./sec.) : 0.432, トルク係数 K_t (Nm/A) : 0.432, ブラシ電圧降下 V_b (V) : 2.0, 電機子抵抗 R_a (Ω) : 0.34, 空気密度 ρ (Nsec. ² /m ⁴) : 1.204

(a) 発電電力 P_g (W)

(b) 通流率 α

(c) 回転速度 N (rad/s)

図3 電力比較法を用いた最大電力点の探索

性を考慮して最大電力点探索法をファジィルール化し、チョップの通流率 α の変化分 $\Delta\alpha$ をこのルールによって可変制御することにより高速に最大電力点を探索する方法である。

可変の $\Delta\alpha$ を決定するためのメンバシップ関数を図4(a)、図4(b)、ファジィルールを表2に示す。図4(a)が電力の変化分 ΔP_g に関するメンバシップ関数であり、図4(b)がバッテリー電圧の変化分 ΔE_b に関するメンバシップ関数である。

電力の変化分 ΔP_g の正負と大きさ及び等価的なバッテリー電圧の変化分 ΔE_b の正負を前件部として、通流率の変化分 $\Delta \alpha$ を決定している。ファジィルールは次のように表現される。

$$\text{if } \Delta P_g \text{ is } Q_j \text{ and } \Delta E_b \text{ is } H_k \\ \text{then } \Delta \alpha_n^i = f_i(x) = C_i g(x) \quad (5)$$

$$\text{但し, } g(x) = \frac{1}{1 + h e^{-x}}, \quad x = a_1 |\Delta P_g| + a_2 |\Delta E_b|,$$

C_i : ルールに従って定める係数, $g(x)$: シグモイド関数, $1 < i < 15$, $1 < j < 5$, $1 < k < 3$

最終的な推論結果は(6)式で表される重み付平均により決定される。

$$\Delta \alpha_n = \frac{\sum_{i=1}^{15} w_i f_i(x)}{\sum_{i=1}^{15} w_i} \quad (6)$$

ただし、 w_i は前件部の適合度であり前件部変数が二つあるため、全体の適合度は、各メンバシップ関数の適合度の積で定義する。

(5), (6) 式中の添字 i はファジィルールの指定を一般的に表すために用いている。つまり、 $\Delta \alpha_n^i$ は、表2中の i 番目のファジィルールで推論された通流率の変化を表し、 w_i は(7)式で表すように、ファジィルール R_i の二つの前件部の適合度の積を

表2 ファジィルール

Rule	ΔP_g	ΔE_b	$\Delta \alpha_n^i$
R^1	PB	P	f_1
R^2	PB	Z	f_2
R^3	PB	N	f_3
R^4	PS	P	f_4
R^5	PS	Z	f_5
R^6	PS	N	f_6
R^7	Z	P	f_7
R^8	Z	Z	f_8
R^9	Z	N	f_9
R^{10}	NS	P	f_{10}
R^{11}	NS	Z	f_{11}
R^{12}	NS	N	f_{12}
R^{13}	NB	P	f_{13}
R^{14}	NB	Z	f_{14}
R^{15}	NB	N	f_{15}

表している。

例えば、前件部変数 $\Delta P_g = x_1$ 、 $\Delta E_b = x_2$ に対するルール R^i の適合度 w_i は(7)式のようにになる。

$$w_i = Q_j(x_1) H_k(x_2) \quad (7)$$

本論文のファジィ制御は、15のルールで構成されているので制御量を決定するためには推論結果を非ファジィ化する必要があり、(6)式を用いて計算している。

最終的なチョッパの通流率 α_{n+1} は(6)式から求められた $\Delta \alpha_n$ を現在の通流率 α_n に加えて(8)式のように求める。

$$\alpha_{n+1} = \alpha_n + \Delta \alpha_n \quad (8)$$

しかし、ファジィ制御で用いるファジィルールやメンバシップ関数の系統的で効果的な決定法は今のところ無いので、最良な制御規則獲得のためには最終的に試行錯誤に頼らなければならない。この点がファジィ制御の欠点であり、制御規則の自動チューニングや制御対象のファジィ同定法が精力的に研究されている現状である。

上記の制御アルゴリズムを用いて最大出力点を探索したシミュレーション結果を図5に示す。ただし、風速 V_w は 12 (m/sec.) 一定であり、最大電力 (902 W) の 1% の大きさに相当するノイズを加え、

サンプリング周期は3(sec.)である。また、ファジィ制御で用いた後件部の各係数は、 $a_1=a_2=0.01$, $h=1000$, $a=3.0$, $b=3.5$, $c=20$, $d=40$, $e=1.1$, $f=1.2$, $C_1=0.3$, $C_2=2.4$, $C_3=12$, $C_4=18$ である。これらの値は前述の比較法と同等の探索時間が得られた時のパラメータ値であり、シミュレーションにより試行錯誤的に決定した。

図5において太線がファジィ制御を用いた場合で、細線が3.1節で述べた電力比較法($\Delta\alpha=0.06$)を用いた場合である。同図よりファジィ制御と電力比較法は、同等の探索時間であるが、前者の場合は最大電力点探索後の通流率 α や回転速度 N の脈動が小さくなっていることがわかる。以上のシミュレーション結果より、提案した制御法の有効性が確認できる。

上述のシミュレーションでは、風速一定時の最適動作点探索について検証した。自然界の風速は一般に瞬時に変化するため、実システムに本手法を適用するためには、この変化に提案手法が対応できる必要がある。そこで、風速急変時の本手法の有効性を示すため、シミュレーションにより風速がステップ状に変化した時の本手法の最大電力点探索の有効性をシミュレーションで確認した。

図5 最大電力点探索制御

図6のシミュレーションでは、 $t=200$ (s)で風速を12(m/s)から8(m/s)へステップ状に減少し、 $t=400$ (s)で再び風速を8(m/s)から12(m/s)へステップ状に増加した。同図から理解できるように、風速の大幅な変化に対しても本手法は高速に新しい最適動作点を探索できるため、自然風のような大幅な風速変動に対しても常に最適動作点を高速に探索できる。従って、実システムで提案手法は有効に機能すると考えられる。

なお、 ΔP_g 及び ΔE_b の変化に対する $\Delta\alpha_n$ の推論結果を図7の3次元図で示す。

図6 最大電力点探索制御

図7 通流率変化分 $\Delta\alpha_n$ の推論

4. 実験による検証

前章ではシミュレーションによって、提案する制御法の有効性を確認した。本章では実験により提案する制御法の有効性を検証するが、先ず初めに実験で用いた制御回路について述べる。

4.1 実験回路

図8に実験装置の構成図を示す。実際の風車の代わりに直流他励電動機を用いて風車を模擬している。また、実験は直流電動機に一定電機子電流を流して、発電機の入力トルクを一定にした条件のもとで行った。この条件は、風力一定時における風力発電を模擬しているため、最大電力点探索の妥当性を実験により簡単に検討することができる。

降圧チョップパ[8]を用いた風力発電システムの電力制御回路を図9に示す。チョップパ制御のためのスイッチング素子としてはMOS-FET(2SK 829:最大定格 $V_{DS}=500\text{ V}$, $V_{GS}=\pm 20\text{ V}$, $I_D=\pm 15\text{ A}$)を用い、チョッピング周波数は25 kHzを選定した。

システムは、まずバッテリー側の電圧 E_b 、電流 I_a をA-Dコンバータを通してコンピュータに取り込む。 I_a と E_b は、ノイズの影響を低減するため、ローパスフィルタを通した値を用いる。ローパスフィルタのカットオフ周波数は約22 Hzである。 I_a と E_b を乗算することによりバッテリーへ充電される電力を計算できる。ファジィ推論により最終的に決定されたチョップパの通流率 α はD-Aコンバータを通してパルス発生回路へ伝達され、MOS-FETのゲートを点弧する。

4.2 実験結果

前章で述べた制御法を用いて、風力発電システムの最大出力追従制御法を実験により検証する。入力トルク一定のもとでチョップパの通流率 α を0.1から0.9まで変化した場合の発電機出力 P_g を図10に示す。

図10を見ると、通流率 $\alpha=0.2$ 付近で発電機出力 P_g が最大になることがわかる。また、2章で示

図8 実験装置の構成図

図9 電力制御回路

図10 発電機出力 P_g 対 通流率 α

した $\Delta\alpha$ 一定の電力比較法によるアルゴリズムを用いて最大電力点を探索した場合の実験結果を図11に示す。細い実線が $\Delta\alpha=0.02$ の場合で、太い実線が $\Delta\alpha=0.06$ の場合である。ただし、探索している様子が明確にわかるように α の初期値を0.8とした。

図11より、 $\Delta\alpha$ が小さいと最大電力点探索後の電力脈動は小さくなるが収束するまでに時間がかかり、逆に $\Delta\alpha$ を大きくすると収束は速くなるが、その後の電力脈動が大きくなって、シミュレーションの場合と同じ問題を生じることがわかる。

$\Delta\alpha$ の変化幅を一定にして制御を行うと、電力比較法では上述のような問題を生じることが実験結果よりわかる。そこで、3.2節で述べたファジィ

図11 電力比較法を用いた最大電力点の探索

図12 ファジィ制御を用いた最大電力点の探索

推論を用いて、状況に応じて $\Delta\alpha$ の大きさを決定する方法の有効性を実験で検証する。

図12にファジィ制御を用いた場合と、 $\Delta\alpha$ が一定の電力比較法を用いた場合の最大電力点探索の実験結果を示す。細い実線が電力比較法($\Delta\alpha=0.06$)、太い実線がファジィ制御を用いた場合の実験結果を示している。ただし、そのとき用いた後件部関数、メンバシップ関数、ファジィルールは3章のシミュレーションの場合と同じである。また、ファジィ制御で用いた後件部の各係数は、 $a_1=a_2=0.0001$, $h=500$, $a=0.2$, $b=0.5$, $c=1.0$, $d=1.5$, $e=0.0025$, $f=0.005$, $C_1=5$, $C_2=15$, $C_3=33$, $C_4=35$ である。これらの値は良好な探索結果が得られたときの値であり、実験により試行錯誤的に求めた。

図12より最大電力点探索に要する時間は二つの探索手法とも同程度であるが、ファジィ制御を用いると探索後の発電機出力 P_g 、通流率 α 、回転数 N の脈動が抑制できることがわかる。以上の

実験結果から、本制御法を用いることにより複雑なシステムモデルを扱うことなく、風力発電システムを最適動作点で運転できることが確認できた。

5. むすび

本論文では、風力発電システムの最大電力点探索制御法としてファジィ制御を用いた方法を提案し、シミュレーションと実験により、その有効性を検証した。その結果、提案する制御法は複雑なシステムモデルを取り扱うことなく、検出が容易な情報のみにより最大電力点を探索できることが確認できた。また、風速が急変しても本手法により最適動作点が高速に探索できることを示した。従って、実システムにおいて有効な最大電力点の探索が実現できると思われる。しかし、実験の際に検出された電力情報には大きなノイズが含まれることがあるので、その対策(フィルタ等)が不十分であれば最大電力点探索の性能に影響することがあるので注意されたい。

また良好な探索結果を得るためには、実験を繰り返し行い、試行錯誤的に各後件部係数を決定する必要がある。従って、今後の課題としては、ノイズに対する対策や、現在、試行錯誤的に決定している後件部係数、あるいはそれを含む後件部関数の自動調節法の開発などが挙げられる。なお、本論文は、直流発電機を用いた風力発電システムを研究の対象としたが、提案する探索法の考えは他の発電機(誘導発電機等)に対しても適用可能である。また、本論文の風力発電システムは系統と連系してないが、論文中の制御法は系統連系システムに対しても有効であると考ええる。

参 考 文 献

- [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] 千住，他：「ファジィ制御による太陽電池の最大電力点の探索」，電気学会論文誌 D, 114, 9, 843-848(平6)
- [4] 鈴木，他：「風車シミュレータ」，計測自動制御学会論文集，24, 9, 68~74(1988)
- [5] 鈴木，他：「多翼型風車発電システムの特性」，電気学会論文誌 B, 108, 9, 415~422(昭63-9)
- [6] 電気学会半導体電力変換方式調査専門委員会編：「半導体電力変換回路」，オーム社(1987)
- [7] 菅野：「ファジィ制御」，日刊工業新聞社(昭63)
- [8] 「チョッパ制御ハンドブック」：電気学会(昭51)

(1994年7月15日 受 付)

(1994年11月9日 再受付)

[問い合わせ先]

〒903-01 沖縄県中頭郡西原町字千原1番地

琉球大学工学部電気電子工学科

千住 智信

☎：098-895-2221(内)3292

☎：098-895-4377

E-mail：b985542@tec.u-ryukyu.ac.jp

著 者 紹 介

千住 智信 (せんじゅう とものぶ)

琉球大学 工学部電気電子工学科

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、1993年10月 同大学工学部改組に伴い1994年10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、アドバンスト制御を導入した電動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。

上里 勝実 (うえざと かつみ)

琉球大学 工学部電気電子工学科

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、1993年10月 同大学工学部改組に伴い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。

高市 潤也 (たかいち じゅんや)

(株)パブコック日立

平成6年3月 琉球大学工学部電気工学科卒業。平成6年4月 (株)パブコック日立入社。在学中は、主に風力発電システムに関する研究に従事。

Maximum Output Power Point Tracking Control of Windmill Power System by Fuzzy Control

by

Tomonobu SENJYU, Jynya TAKAICHI and Katsumi UEZATO

Abstract :

The increasing importance of fuel saving and conservation of natural environment in the world has been responsible for a revival of interest in so-called "natural energy". One of the most expected future natural energy is wind power. The wind power system has optimum operating point which extracts available maximum power from generator. Moreover, the wind power varies with time and is sparse. Therefore, the wind power system requires the maximum power point tracking control of generator to obtain electric energy as large as possible.

This paper proposes the maximum power point tracing control of wind power system with step-down chopper by using fuzzy control to obtain the maximum output power from generator. This method only uses the output power information, and membership functions consist of duty factor α and output power. Therefore, this control method can track maximum power point without complicated calculation and mathematical model.

Keywords : Windmill Power System, Maximum Output Power Point, Fuzzy Control, Step-Down Chopper

Contact Address : **Tomonobu SENJYU**

Faculty of Engineering, University of the Ryukyus

Senbaru Nishihara Nakagami Okinawa 903-01 Japan

TEL : 098-895-2221 (ex) 3292

FAX : 098-895-4377

E-mail : b985542@tec.u-ryukuy.ac.jp