

潮流発電システムにおける最大出力点追従制御方式 -山登り法を用いた速度制御モデルの構築- MPPT Control Method for the Tidal Current Power Generation System - Design of the Speed Control Model using Hill Climbing Searching -

○勝亦良介¹, 辻健太郎², 直井和久³, 塩野光弘³, 鈴木勝行³

*Ryosuke Katsumata¹, Kentaro Tsuji², Kazuhisa Naoi³, Mitsuhiro Shiono³, Katsuyuki Suzuki³

Abstract: We examine the control of that maximum power point tracking (MPPT) for tidal current power generation system. We proposed speed control using hill climbing searching. This paper shows the principle of the speed control and the design of the speed control model.

1. はじめに

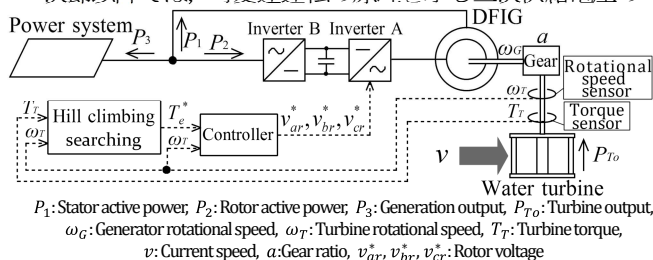
現在主流である発電方式の代替エネルギーとして、再生可能エネルギーが注目されている。潮流は再生可能エネルギーの一種であり、その流速が周期的に変化するため、潮流発電では発電電力を予測しやすい点が風力発電や太陽光発電に比べて有利である。これまでに我々は、ダリウス形水車とかご形誘導発電機を接続した定速運転方式の潮流発電システムの発電電力量を検討した^[1]。この方式では年間設備利用率が約 10%となり太陽光発電の年間設備利用率 12%^[2]よりわずかに低い程度の結果となった。潮流発電システムでは、潮流の流速ごとに最大水車出力を得る回転速度が異なる。そこで辻らは設備利用率を更に高めることを目的として二次励磁巻線形誘導発電機(DFIG)による可変速運転方式を提案してきた^[3]。著者らは流速を検出し、既知の水車特性から最大水車出力を得る回転速度を推定し最大出力点追従(MPPT)制御を行う手法を提案した。この手法では速度制御に必要な既知の水車特性と実際の水車特性に差異がある場合及び流速の測定値に誤差がある場合、運転点は最大出力点と偏差を生じる。また、海中の過酷な環境下にある流速計は早期の劣化が予想されシステムの構成上、不利である。このため、これらに起因する年間設備利用率の低下が予想される。

本研究では流速計の設置が不要で、水車特性が未知であっても容易に MPPT 制御可能な山登り法による速度制御を提案する。本稿ではシミュレーションによりその有効性を検証するために、山登り法を用いた速度制御モデルを構築したので報告する。

2. 潮流発電システム

図1に提案する山登り法を用いた MPPT 制御を行う潮流発電システムの構成図を示す。発電機はその二次供給電圧で回転速度を制御可能な DFIG を採用した。速度制御は山登り法により発電機トルク目標値を与え、それに応じた二次供給電圧をインバータ A で印加させ可変速運転を行う。

次節以降では、可変速運転の原理を示し二次供給電圧の



P_1 : Stator active power, P_2 : Rotor active power, P_3 : Generation output, P_{To} : Turbine output, ω_G : Generator rotational speed, ω_T : Turbine rotational speed, T_T : Turbine torque, v : Current speed, a : Gear ratio, v_{ar}^* , v_{br}^* , v_{cr}^* : Rotor voltage

Fig.1. Tidal current power generation system

決定方法について述べる。

2. 1. 可変速運転原理

発電機回転角速度 ω_G は次の運動方程式より決定される。

$$J \frac{d\omega_G}{dt} = T_T' - T_e \quad (1)$$

ただし、 J :発電機及び水車の慣性モーメント、 T_T' :水車トルクの発電機側換算値、 T_e :発電機トルクである。ここで水車トルク T_T は水車に流入する流速 v 、水車回転角速度 ω_T により決まる受動的な量である。従って、任意に ω_G を変化させるにはそれに応じた発電機トルク T_e をとるように発電機トルク特性を変化させる。いま T_e は発電機各部の電流を用いて、

$$T_e = pM(i_{qs}i_{dr} - i_{ds}i_{qr}) \quad (2)$$

と表される。ただし、 i_{ds}, i_{qs} :一次 d, q 軸電流、 i_{dr}, i_{qr} :二次 d, q 軸電流、 M :励磁インダクタンス、 p :極対数である。

さらに $i_{ds}, i_{qs}, i_{dr}, i_{qr}$ は、DFIGの電圧方程式により発電機各部の電圧と次式に示す関係をとる。

$$\begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \\ v_{dr} \\ v_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_1 + pL_{s1} & X_{s1} & PM & X_M \\ -X_{s1} & r_1 + pL_{s1} & -X_M & PM \\ PM & sX_M & r_2 + pL_{s2} & sX_{s2} \\ -sX_M & PM & -sX_{s2} & r_2 + pL_{s2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} \quad (3)$$

ただし、 v_{ds}, v_{qs} :一次 d, q 軸電圧、 v_{dr}, v_{qr} :二次 d, q 軸電圧、 r_1, r_2 :一次及び二次抵抗、 L_{s1}, L_{s2} :一次及び二次自己インダクタンス、 X_{s1}, X_{s2} :一次及び二次自己リアクタンス、 X_M :励磁リアクタンス、 s :すべり、 P :微分演算子 d/dt である。

ここで、一次側相電圧の実効値を E_1 とする対称三相電圧に保たれていると仮定すると一次電圧 v_{ds}, v_{qs} は、

$$v_{ds} = 0 \quad (4)$$

$$v_{qs} = \sqrt{3}E_1 \quad (5)$$

なる一定の値をとる。これより $i_{ds}, i_{qs}, i_{dr}, i_{qr}$ は、二次供給電圧 v_{dr}, v_{qr} 及びすべり s で決定され、これらによって発電機回転速度 ω_G は制御可能となる。

2. 2. 二次供給電圧の決定

ここでは、発電機トルク目標値 T_e^* に対する二次供給電圧の決定方法について述べる。二次供給電圧は(3)式の 3, 4 行目より定常状態を考慮して、

$$v_{dr} = sX_M i_{qs} + r_2 i_{dr} + sX_{s2} i_{qr} \quad (6)$$

$$v_{qr} = -sX_M i_{ds} - sX_{s2} i_{dr} + r_2 i_{qr} \quad (7)$$

となる。二次供給電圧を導出するには発電機各部の電流 $i_{ds}, i_{dr}, i_{qs}, i_{qr}$ を求める。

二次側インバータ容量低減のため、励磁電流となる無効電流は全て一次側から供給する。故に一次 d 軸電流 i_{ds} は、

$$i_{ds}^* = -\sqrt{3}E_1 X_{s1} / (r_1^2 + X_{s1}^2) \quad (8)$$

とする。また上記のことから、二次側無効電流である二次 d

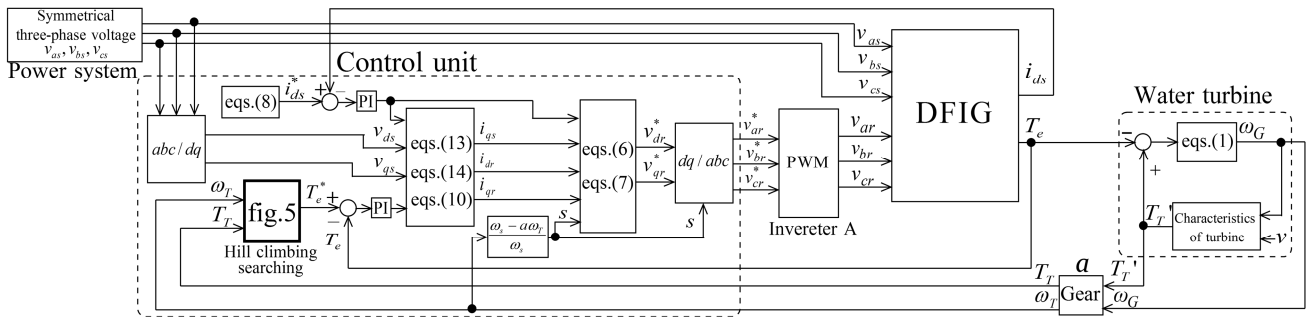


Fig.2. Simulation model of tidal current power generation system

軸電流 i_{dr} の大きさは無視できるほど小さくなるので $i_{dr} = 0$ とすると発電機トルク T_e は(2)式より、

$$T_e = -pM i_{ds} i_{qr} \quad (9)$$

となり i_{qr} は発電機トルクの目標値 T_e^* 及び i_{ds}^* を用いて

$$i_{qr} = -T_e^* / pM i_{ds}^* \quad (10)$$

と与えることができる。さらに一次電圧は(3)式の 1, 2 行目より定常状態を考慮して、

$$v_{ds} = r_1 i_{ds} + X_{s1} i_{qs} + X_M i_{qr} \quad (11)$$

$$v_{qs} = -X_{s1} i_{ds} + r_1 i_{qs} - X_M i_{dr} \quad (12)$$

となるので、 i_{qs} , i_{dr} は、上式と(4),(5)式より i_{ds}^* , i_{qr} を用いて

$$i_{qs} = -(r_1 i_{ds}^* + X_M i_{qr}) / X_{s1} \quad (13)$$

$$i_{dr} = -\{(r_1^2 + X_{s1}^2) i_{ds}^* + r_1 X_M i_{qr} + \sqrt{3} E_1 X_{s1}\} / X_M X_{s1} \quad (14)$$

となる。以上により求めた i_{ds} , i_{qs} , i_{dr} , i_{qr} 及びすべり s を(6),(7)式に代入すれば二次供給電圧が決定される。ただし、すべり s は既知量で決定することが出来ないため制御量を直接入力している。この速度制御モデルを含む潮流発電システムのシミュレーションモデルを図 2 に示す。

3. 山登り法による MPPT 制御

前章までに回転速度は、発電機トルクにより制御可能なことを示し、任意の発電機トルクを生じさせる二次供給電圧の決定方法を述べた。本章では、発電機トルクの目標値を決定するために潮流発電システムにおける発電機トルクと回転速度の関係を示し、MPPT 制御を実現する山登り法による速度制御のロジックを述べる。

3. 1. 山登り法の動作原理

山登り法は、運転点をわずかに変化させその応答から極値を探索する方法である。水車出力は図 3 のように回転速度に対して山なりの変化をとるために山登り法が適用できる。図に山登り法の動作例を示す。回転速度を ω_1 から ω_2 にわずかに増加させ、出力が増加した場合は ω_2 を維持し(Case 1)、出力が減少した場合は回転速度を ω_1 よりわずかに減少させ ω_3 にする(Case 2)。この動作を繰り返すことにより最大出力点(MPP)を探索する。

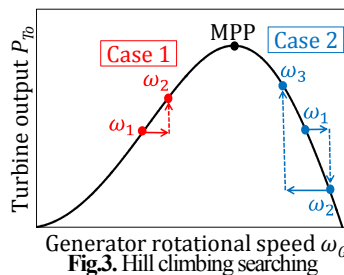


Fig.3. Hill climbing searching

3. 2. 発電機トルクと回転速度の関係

図 4 に発電システムの運転点の例を示す。発電機回転角速度 ω_G は、水車トルク T_T と発電機トルク T_e が交わる点(運転点)で決定される。ただし、その点における各々のトルクの傾きが次式を満たす場合のみ安定である。

$$\frac{\partial T_T}{\partial \omega_G} < \frac{\partial T_e}{\partial \omega_G} \quad (15)$$

このため本制御では、(15)式を満たすように発電機トルク T_e

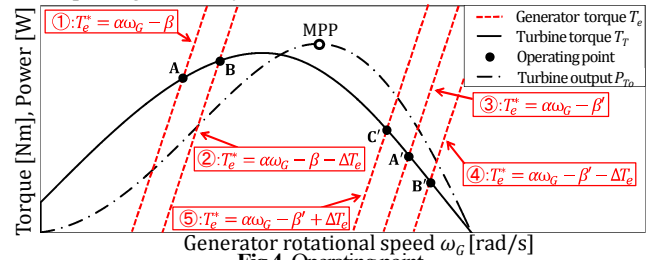


Fig.4. Operating point

に傾き α を与える。ここで β , β' は定数である。例えば、発電機トルク T_e が特性①の場合、運転点は A となる。次に、回転速度をわずかに増加させるため T_e^* の特性を①から②に変化させるよう T_e^* に ΔT_e (正值) を減算し、運転点を A から B に移動させる。これは図 3 の Case 1 に相当する。また、運転点を A' から B' に移動させた後、出力が減少し図 3 の Case 2 に相当する場合、回転速度を減少させる。このため特性を④から⑤に変化させるよう T_e^* に ΔT_e を加算し運転点を B' から C' に移動させる。

3. 3. 山登り法による速度制御のロジック

最後に、前項までに述べた山登り法による発電機トルクの制御を実現するためのフローチャートを図 5 に示す。まず初期状態における水車出力 P_{T01} を測定する(Step 1)。次に回転速度をわずかに増加させるため T_e^* に ΔT_e を減算する(Step 2)。回転速度変化後の水車出力 P_{T02} を測定(Step 3)し、比較を行う(Step 4)。増加した場合は現状を維持し、減少した場合は回転速度を減少させるため T_e^* に ΔT_e を加算する(Step 5)。上記 Step 1~5 の動作を繰り返すことにより最大水車出力を得る回転速度に到達させる。

Fig.5. Flowchart of hill climbing searching

4. まとめ

本稿では、山登り法を用いた MPPT 制御を行う潮流発電システムの速度制御モデルを検討した。回転速度を発電機トルクで制御可能であることを述べ、速度制御モデルを含む潮流発電システムのシミュレーションモデルを構築した。また、山登り法によって MPPT 制御を実現する速度制御のロジックを示した。今後は提案したモデルにより流速に対する応答を検討する予定である。

参考文献

[1] K.naoi et al. "Study of Gear Ratio in Tidal Current Power Generation System", Proceedings of the Twenty-first International Offshore and Polar Engineering Conf., pp.735-742, (2011)
 [2] 経済産業省, 資源エネルギー庁:「日本のエネルギー2010」, <http://www.enecho.meti.go.jp/topics/energy-in-japan/energy2010html/index.htm>
 [3] 辻ほか:「巻線形誘導発電機を用いた潮流発電装置における速度制御システムと増速比の検討」電学論 B, vol.134, No.3, pp.256-266, (2014)