

巻線形誘導発電機を用いた潮流発電装置における最大出力点追従制御方式
 一発電電力量を最大とする増速比および発電機容量の検討一

MPPT Control Method for a Tidal Current Power Generation System Using DFIG

- Study on the Gear Ratio and Generator Capacity for Maximizing Generated Energy -

○辻健太郎¹, 直井和久², 塩野光弘², 鈴木勝行²

*Kentarō Tsuji¹, Kazuhisa Naoi², Mitsuhiro Shiono², Katsuyuki Suzuki²

Abstract: Tidal current energy is more advantageous than other renewable energy, because of the tidal current is easy to predict the generated output. We proposed the tidal current power generation system which can be controlled to variable speeds. This paper shows the gear ratio and generator capacity which maximize generated energy and investigates active power of the tidal current power generation system using the gear ratio and generator capacity for maximizing generated energy.

1. はじめに

現在主流である発電方式の代替として、再生可能エネルギーによる発電方式が注目されている。潮流は再生可能エネルギーの一種であり、流速が一日の中で周期的に変化するため、潮流発電では発電電力が予測可能な点が太陽光発電や風力発電と比べて有利である。これまでに我々は、発電装置として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装置において、発電機が過負荷運転とならず発電電力量を最大とする増速比と発電機の定格容量について検討を行った^[1]。その結果、年間設備利用率は約 10% となり、太陽光発電の 12%、風力発電の 20%^[2]と比較し、太陽光発電よりわずかに低いと同程度となった。そこで年間設備利用率をさらに高めることを目的として、我々は可変速制御を行うことができる巻線形誘導発電機を用いたダリウス形水車による潮流発電装置を提案した。これまでに、この装置のモデルが流速の正弦波変化に対して、最大水車出力となる発電機回転速度に制御できることをシミュレーションにより確認した^[3]。

本稿では、最大出力点追従制御方式(MPPT 方式)で運転する巻線形誘導発電機を用いた潮流発電装置において、発電機が過負荷運転とならず発電電力量を最大とする増速比と発電機の定格容量を求める。そして、求めた増速比と発電機の定格容量を用いた場合における潮流発電装置の出力について検討を行ったので報告する。

2. 流速の出現確率密度関数

一般に潮流の流速と流向は約 6 時間毎に変化する。流速データの例としては 2003 年 1 月から 12 月までの海上保安庁海洋情報部による明石海峡中央付近の流速の推定値^[4]を用いる。その流速の変化は図 1 のようになる。

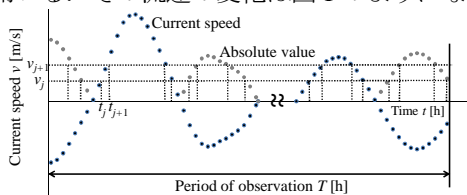


Figure 1. Current speed

流速を確率変数とする確率分布を求めるには、ある流

速 v_j が出現する時間 t_j を求める必要がある。データ間を線形補間し、流速 v_j, v_{j+1} における出現時間 t_j, t_{j+1} を求める。この処理は観測期間 T を通じて行う。ただし、ダリウス形水車は流向に関係なく一方向に回転するので、流速を絶対値として考える。したがって、観測期間 T において、流速 v が $|v_j| \sim |v_{j+1}|$ となる出現確率を $F(|v_j| \leq v \leq |v_{j+1}|)$ とすると、流速 $|v_j|$ における出現確率密度関数 $f(|v_j|)$ は(1)式となる。

$$f(|v_j|) = F(|v_j| \leq v \leq |v_{j+1}|) / \Delta v \quad (1)$$

ここで、 $\Delta v = |v_{j+1}| - |v_j|$ である。図 2 に求めた出現確率密度関数 $f(v)$ を示す。ただし、 $0 \leq v \leq |v_m|$, Δv は 0.01m/s である。また、 $|v_m|$ は観測期間 T における最大流速の絶対値であり、以後、絶対値記号を省略し v_m と表記する。

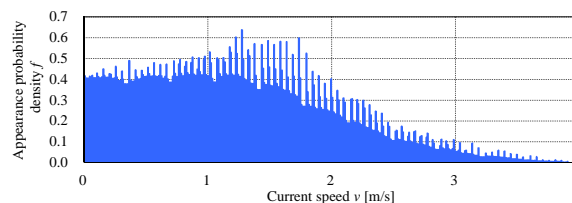


Figure 2. Appearance probability density function

3. 最適化問題の定式化^[5]

巻線形誘導発電機を用いた潮流発電装置の構成を図 3 に示す。

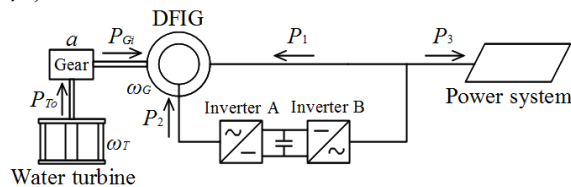


Figure 3. Tidal current power generation system

ただし、 P_{T0} : 水車出力、 ω_T : 水車回転角速度、 a : 増速比、 P_G : 発電機入力、 ω_G : 発電機回転角速度、 P_1 : 一次有効電力、 P_2 : 二次有効電力である。 P_1, P_2 は発電機に入力する方向を正方向とし、 $P_3 (= -(P_1 + P_2))$ は DFIG とインバータから成るシステムの出力と定義する。

今回は、図 3 の発電装置が流速の変化に対して、MPPT 方式で運転した場合に、発電電力量を最大とする増速比 a と発電機の定格容量 S_B 求める。そして、求めた a と S_B

1: 日大理工・院(後)・電気 2: 日大理工・教員・電気

を用いた場合の P_1, P_2, P_3 について検討する.

観測期間 T における発電電力量 W は前節で述べた流速の出現確率密度関数 $f(v)$ を用いると(2)式となる.

$$W(a, S_B) = S_B T \int_{v_0}^{v_m} P_3(v) f(v) dv \quad (2)$$

ただし, v_0 : 発電開始流速である.

(2)式に示す W を最大とする a と S_B は, $\partial W/\partial a=0, \partial W/\partial S_B=0$ を解くことにより求められる. しかし, 求めた a と S_B の値によっては発電機の電流, 電圧が定格を超えるおそれがあり, これを保証するために(3)式を制約条件とする.

$$\left. \begin{aligned} h_1(a, S_B) &= I_{as} - 1 = \sqrt{(i_{qs}^2 + i_{ds}^2)/3} - 1 \leq 0 \\ h_2(a, S_B) &= I_{ar} - 1 = \sqrt{(i_{qr}^2 + i_{dr}^2)/3} - 1 \leq 0 \\ h_3(a, S_B) &= V_{ar} - 1 = \sqrt{(v_{dr}^2 + v_{qr}^2)/3} - 1 \leq 0 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

ただし, I_{as}, I_{ar} : 一次・二次電流の実効値, $i_{ds}, i_{qs}, i_{dr}, i_{qr}$: 一次・二次 d, q 軸電流, V_{ar} : 二次供給電圧の実効値, v_{dr}, v_{qr} : 二次 d, q 軸電圧である.

W を最大とする a と S_B を求める問題は, (2)式を目的関数, (3)式を不等式制約条件とする最適化問題となる. 不等式制約条件つき最適化問題には乗数法⁶⁾が適用できる. (2)式の目的関数と(3)式の制約条件より, スラック変数 l , ペナルティ定数 γ および Lagrange 乗数 ψ を用いると, 修正ペナルティ関数 Q は(4)式のように定義される.

$$Q(a, S_B, \mathbf{L}, \boldsymbol{\Psi}) = -W + \sum_{i=1}^3 \psi_i (h_i + l_i) + \frac{1}{\gamma} \sum_{i=1}^3 (h_i + l_i)^2 \quad (4)$$

ただし, $\mathbf{L}=(l_1, l_2, l_3)^T, \boldsymbol{\Psi}=(\psi_1, \psi_2, \psi_3)^T, \gamma$ は定数($\gamma > 0$)である.

乗数法の計算方法では, はじめに Q を最小とする \mathbf{L} を求める. $\partial Q/\partial l_i=0$ を満たす l_i が $l_i \leq 0$ となる場合 $l_i=0$ とし, $l_i > 0$ ならばそれはそのまま Q を最小にする l_i となり, $l_i = -\{h_i + (\gamma\psi_i/2)\}$ となる. 次に, Q を最小にする a, S_B は(5), (6)式を満たす必要がある.

$$\frac{\partial Q}{\partial a} = -\frac{\partial W}{\partial a} + \frac{2}{\gamma} \sum_{i \in I} \left(h_i + \frac{\gamma\psi_i}{2} \right) \frac{\partial h_i}{\partial a} = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial S_B} = -\frac{\partial W}{\partial S_B} + \frac{2}{\gamma} \sum_{i \in I} \left(h_i + \frac{\gamma\psi_i}{2} \right) \frac{\partial h_i}{\partial S_B} = 0 \quad (6)$$

ただし, $I=\{i | l_i > 0\}$ である. (5), (6)式を解くことにより Q を最小にする a と S_B を求めることができ, (7)式が成立する場合に反復計算を終了する.

$$\sum_{i=1}^3 (h_i + l_i)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial a} \right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial S_B} \right)^2 \leq \zeta \quad (7)$$

ただし, ζ は定数である. (7)式が成立しない場合には, Lagrange 乗数 $\boldsymbol{\Psi}$ を更新し, (4)式より再計算を行う.

4. 結果

発電電力量を最大とする増速比と発電機の定格容量を求める過程で用いた水車と発電機のパラメータを表1に, 増速比と発電機の定格容量の結果を表2に示す. また, 表2の増速比と発電機の定格容量を用いた場合の発電開始流速 v_0 から年間最大流速 v_m までの P_1, P_2, P_3, P_{Gi} , 一次・二次皮相電力 S_1, S_2 を図4に示す. ただし, 図中の値は表2に示す発電機の定格容量を基準とした単位法表記とする.

Table 1. Specifications of DFIG and water turbine

Water turbine	
Number of blades n	3
Height h [m]	1.6
Diameter d [m]	1.6
Chord length c [m]	0.3
Solidity σ	0.179
DFIG	
Rated voltage [V]	200
Number of pole	6
Frequency [Hz]	50
Stator resistance r_1 [pu]	0.054
Rotor resistance r_2 [pu]	0.078
Stator leakage reactance X_{l1} [pu]	0.100
Rotor leakage reactance X_{l2} [pu]	0.100
Exciting reactance X_M [pu]	1.754

Table 2. Results of gear ratio and generator capacity

Gear ratio a	25.2
Rated capacity of generator S_B [kVA]	9.93
Rated capacity of inverter $A S_{Bf}$ [kVA]	9.01
Annual generated energy W [MWh]	10.5
Annual capacity factor C_F [%]	14.4
Generation starting speed v_0 [m/s]	0.81
Annual maximum speed v_m [m/s]	3.90

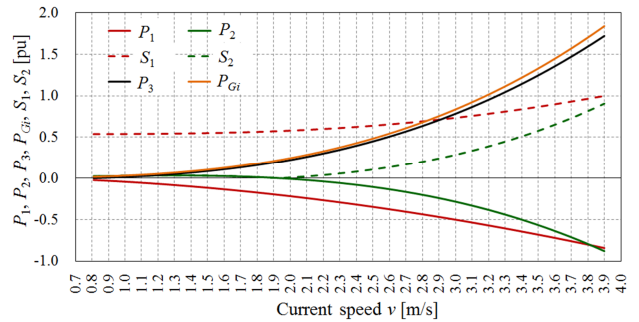


Figure 4. P_1, P_2, S_1, S_2, P_3 and P_{Gi}

図4より, P_1 は全ての流速において負となる. P_2 は流速がおよそ 1.93m/s 付近までは正となり, それ以上の流速では負となり, 二次側の電源つまりインバータを介して出力を取り出せる. また, P_3 は全ての流速において正となり, 流速がおよそ 3.26m/s 以上では発電機の定格容量 (1pu) を超える. しかし, 年間最大流速 v_m における S_1 は約 1.00pu, S_2 は約 0.91pu で定格以内となる. その結果, v_m における P_3 は約 1.72pu となり, P_{Gi} に対する P_3 の割合つまりシステム効率 η_s は約 94% となる. これは上述したように, P_3 が一次側からだけではなく, インバータを介して二次側からも出力を取り出せるため, η_s が高くなると推察できる. また, 表2より, MPPT 方式の C_F は約 14% となり, 定速運転方式の約 10%¹⁾を上回る.

5. まとめ

今回は, MPPT 方式で運転する巻線形誘導発電機を用いた潮流発電装置において, 発電機が過負荷運転とならず発電電力量を最大とする増速比と発電機の定格容量を求め, 求めた増速比と発電機の定格容量を用いた場合における潮流発電装置の出力について検討を行った. その結果, 発電機の出力は一次側からだけではなくインバータを介して二次側からも出力することができ, システム効率は年間最大流速において約 94% となることを確認した. また, MPPT 方式の年間設備利用率は約 14% となり, 定速運転方式を上回ることを確認した.

参考文献

- 田中 他:「潮流発電システムにおけるダリウス形水車の近似法からみた増速比の検討」, 平成25年電気学会全国大会講演論文集, vol.7, pp.47-48 (2013)
- 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>
- 勝亦 他:「潮流発電装置における最大出力点追従制御方式の検討—流速の正弦波変化に対する応答—」, 平成25年電気学会電力・エネルギー部門大会講演論文集, pp.12-5-12-6 (2013)
- 大阪湾海上交通センター, <http://www6.kaiho.mlit.go.jp/osakawan/>
- 辻 他:「潮流発電装置における最大出力点追従制御方式—発電電力量を最大とする増速比の検討—」, 2013年(第31回)電気設備学会全国大会講演論文集, pp.81-82 (2013)
- 志水 清孝:「システム最適化理論」, コロナ社 (1976)