

潮流発電システムにおける水車出力一定制御方式
 一巻線形誘導発電機の一次・二次有効電力およびシステムの発電電力の検討一

Constant Turbine Output Control Method for the Tidal Current Power Generation System

- Study on the Stator and Rotor Active Power of the Doubly Fed Induction Generator and System Generated Power -

○辻健太郎¹, 直井和久², 塩野光弘², 鈴木勝行²

*Kentarō Tsujii¹, Kazuhisa Naoi², Mitsuhiro Shiono², Katsuyuki Suzuki²

Abstract: We proposed the tidal current power generation system which can be controlled to variable speeds. The generator is a doubly fed induction generator. Tidal current power generation system is operated on constant turbine output control method. This paper shows the gear ratio and the rated capacity of generator which maximize generated energy. Also, this paper investigates the stator and rotor active power of the doubly fed induction generator and the generated power of the system in the case of using the gear ratio and the rated capacity of generator 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。その中の一種である潮流は、流速が一日の中で周期的に変化する。そのため、潮流発電では発電電力を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、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において、発電機が過負荷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、我々は年間設備利用率をさらに高めることを目的として、可変速制御を行うことができる巻線形誘導発電機(DFIG)を用いたダリウス形水車による潮流発電システムを提案した。このシステムが最大出力点追従(MPPT)制御方式で運転する場合、発電機が過負荷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^[3]。その結果、年間設備利用率は約 14% となり定速運転方式の約 10% を上回ることを確認した。

本稿では、潮流発電システムが水車出力一定制御方式で運転する場合、発電機が過負荷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。求めた増速比と発電機の定格容量を用いた場合、DFIG の一次、二次有効電力およびシステムの発電電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。その流速変化は図 1 のようになる。

流速を確率変数とする出現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。ここで、ダリウス形水車は流向に関係なく一方向に回転

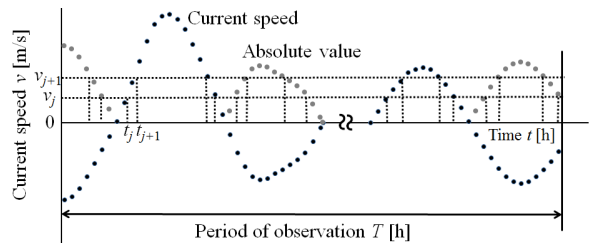


Figure 1. Examples of the tidal current speed

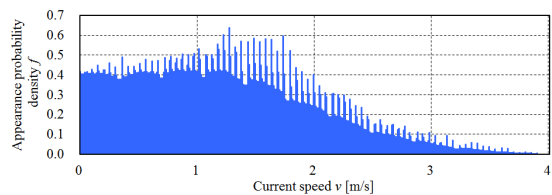


Figure 2. Appearance probability density function

するので、流速を絶対値として考える。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。

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

ただし、 $\Delta v = |v_{j+1}| - |v_j|$ 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、流速範囲は $0 \leq v \leq |v_m|$ 、 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、今回使用する流速データでは $|v_m| = 3.9\text{m/s}$ となる。

3. 水車出力一定制御方式

DFIG を用いた潮流発電システムの構成を図 3 に示す。ただし、 P_{Tb} : 水車出力、 ω_T : 水車回転角速度、

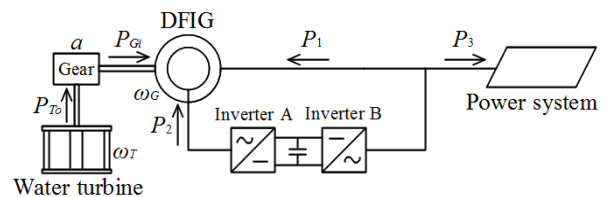


Figure 3. Tidal current power generation system

1 : 日大理工・院(後)・電気 2 : 日大理工・教員・電気

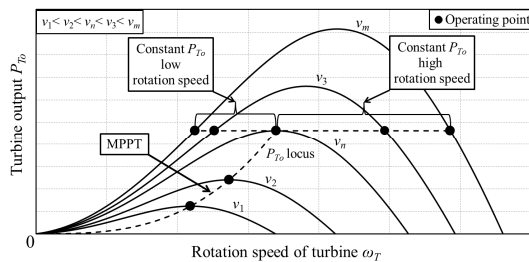


Figure 4. Characteristics of turbine output by constant P_{To} control method

a : 増速比, P_{Gi} : 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, P_3 : システムの発電電力(=-(P_1+P_2))である。また, P_1, P_2 は発電機に入力する方向を正とし, 発電機の電氣的諸量は発電機の定格容量 S_B を基準とする単位法表記とする。

図 4 に P_{To} 一定制御方式における動作点を示す。図 4 に示すように, P_{To} 一定制御方式は一次電流 I_s または二次供給電圧 E_r が定格(1pu)となる流速 v (定格流速 v_n)までは MPPT 制御で運転を行い, v_n 以上の流速において P_{To} 一定となる動作点に制御する方式である。 P_{To} 一定制御は, v_n において最大水車出力を示す回転速度に対して低回転速度側または高回転速度側に制御する方式が考えられる。しかし, 高回転速度側に制御を行うと, 二次巻線の誘導起電力が増加するため, 二次インバータ容量が大きくなると考えられる。そのため, 本検討では低回転速度側 P_{To} 一定制御方式について検討する。以後, 低回転速度側 P_{To} 一定制御方式を P_{To} 一定制御方式と定義する。

v_n 以上の流速において P_{To} 一定制御を行うと, I_s が定格を超えるおそれがある。したがって, v_m 以下の流速で I_s が定格を超える場合はその流速で発電を停止する。以後, 発電することができる最大の流速を発電最大流速 v_{max} と定義する。

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。

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

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, 潮流発電システムが P_{To} 一定制御方式で運転する場合, 定格流速 v_n を境に制御方式が変化するため, W は不連続となる。そこで, 不連続関数の最大化問題を解く手法として遺伝的アルゴリズム(GA)を適用する。

4. 結果

発電機が過負荷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際に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。表 2 に示す年間設備利用率 C_F とは, 1 年間定格出力で連続運転した場合の発電電力量に対する W の比と定義する。また, 表 2 の増速比と発電機の定格容量を用いた場合の v_0 から v_{max} 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 5 に示す。ただし, 図中の値は表 2 に示す S_B を基準とした単位法

Table 1. Specifications of DFIG

| 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_{μ} [pu] | 1.754 |

Table 2. Results of gear ratio and generator capacity

| | |
|---|-------|
| Optimum gear ratio a | 28.59 |
| Rated capacity of generator S_B [kVA] | 9.28 |
| Rated capacity of inverter A S_{Bt} [kVA] | 6.29 |
| Annual generated energy W [MWh] | 10.58 |
| Annual capacity factor C_F [%] | 15.45 |
| Generation starting speed v_0 [m/s] | 0.79 |
| Generation maximum speed v_{max} [m/s] | 3.90 |

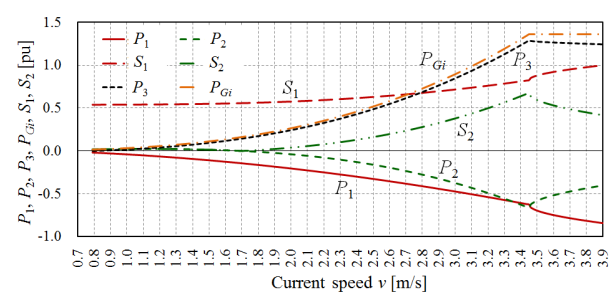


Figure 5. Results of calculation

表記であり, $v_n=3.45$ m/s である。

図 5 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 1.70m/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 は流速がおよそ 3.17m/s 以上では発電機の定格容量(1pu)を超える。しかし, S_1 は最大約 1.00pu, S_2 は最大約 0.68pu で定格以内となる。その結果, P_3 は最大約 1.29pu となる。これは上述したように, P_3 が一次側からだけでなく, インバータを介して二次側からも取り出せるためである。また, 表 2 より, P_{To} 一定制御方式の C_F は約 15% となり, 定速運転方式の約 10%^[1] および MPPT 制御方式の約 14%^[3] を上回る。

5. まとめ

今回は, DFIG を用いた潮流発電システムが水車出力一定制御方式で運転する場合, 発電機が過負荷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た。また, 求めた増速比と発電機の定格容量を用いた場合, DFIG の一次, 二次有効電力およびシステムの発電電力について検討を行った。

その結果, システムの発電電力は一次側からだけでなくインバータを介して二次側からも取り出すことができることを確認した。また, 年間設備利用率は約 15% となり, 定速運転方式および MPPT 制御方式を上回ることを確認した。

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/energy2010/html/index.htm>
 [3] K. Tsuboi et al. "Study on the Gear Ratio for a Tidal Current Power Generation System Using the MPPT Control Method", Proceedings of the Twenty-fourth International Ocean and Polar Engineering Conf., pp.568-574 (2014)
 [4] 大阪湾海上交通センター, <http://www6.kaiho.mlit.go.jp/osakawan/>