L-24

潮流発電システムにおける水車出力一定制御方式
ー発電最大流速と年間設備利用率に関する検討ー
Control Method of Constant Turbine Output for a Tidal Current Power Generation System
- Study on the Annual Capacity Factor and Generation Maximum Current Speed -

○辻健太郎 [1]，直井和久 [1]，塩野光弘 [1]
*Kentaro Tsuji[1], Kazuhisa Naoi[1], Mitsuhiro Shiono[1]

Abstract: We proposed a 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 control method of constant turbine output. The author has showed the gear ratio and the rated capacity of generator which maximize generated energy when the generation maximum current speed is the annual maximum current speed. This paper investigates the gear ratio and the rated capacity of generator which maximize generated energy when the generation maximum current speed is variable.

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，可変速制御を行うことができる二重給電誘導発電機(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および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 15%となり太陽光発電の 12%，風力発電の 20%[2]と比較し，太陽光発電の年間設備利用率を上回ることを明らかにした．

これまでは，年間最大流速を発電最大流速に設定して，発電電力量を最大とする増速比および発電機の定格容量を求めた．しかし，年間最大流速の発生する時間は僅かであり，年間最大流速に合わせた設備容量では経済的では無いことが考えられる．本稿では，発電最大流速を変化させた場合の年間設備利用率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 時間毎に変化し，その流速変化は図 1 のようになる．今回使用する流速データは 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[3]である．

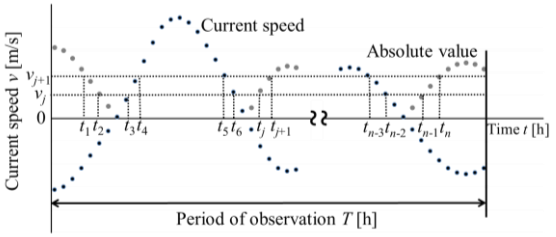

Figure 1. Examples of tidal current speed

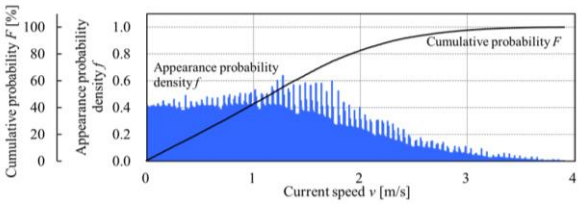

Figure 2. Appearance probability density and cumulative probability

図 1 より，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するので，流速は絶対値として考える．以後，流速の絶対値記号は省略する．観測期間 T において，流速 v が v_j～v_{j+1} となる出現確率を $F(v_j \leqq v \leqq v_{j+1})$ とすると，ある流速 v_j における出現確率密度関数 $f(v_j)$ は(1)式となる．

$$f(v_j) = F(v_j \leqq v \leqq v_{j+1})/\Delta v \qquad (1)$$

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 $f(v)$ および流速 0 から任意の流速 v まで積分した累積確率 $F(v)$ を示す．ただし，流速範囲は $0 \leqq v \leqq v_m$, Δv は 0.01m/s である．また，今回の流速データでは v_m=3.9m/s, $f(v_m)$=0.0046 であり，v_m の発生する時間は僅かである．したがって，v_m に合わせた設備容量では経済的では無いことが考えられる．

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_{To}：水車出力，ω_T：水車回転角速度，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 はシステムの発電電力である．また，発電機の電気的諸量は発電機の定格容量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または二次供給電圧が定格（1pu）となる流速 v（定格

１：日大理工・教員・電気

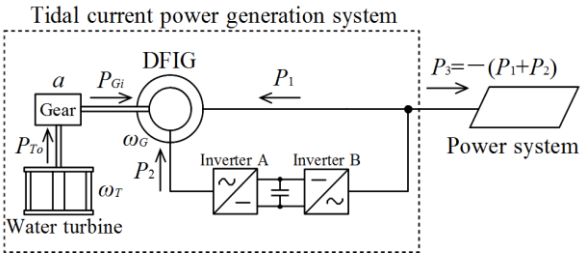

Figure 3. Tidal current power generation system

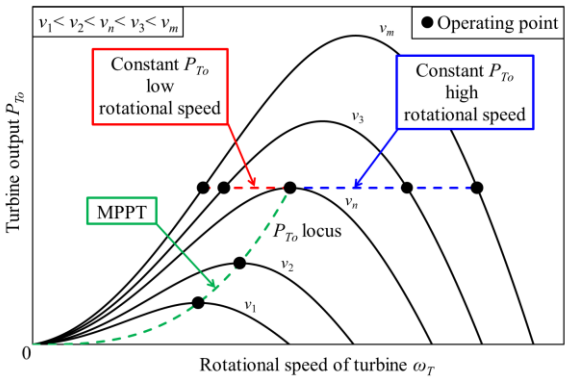

Figure 4. Characteristics of turbine output

流速 v_n と定義）までは最大出力点追従（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速側または高速側に制御する方式が考えられる．しかし，高速側に制御を行うと，発電機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．したがって，本検討では低速側 P_{To} 一定制御方式について検討する．

今回は，図 3 の発電システムが流速の変化に対して，P_{To} 一定制御方式で運転する場合に，発電電力量を最大とする増速比 a および発電機の定格容量 S_B を求める．

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．

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

ただし，v_0：発電開始流速，$v_{\max}$：発電最大流速である．(2)式に示す W を最大とする a および 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，P_{To} 一定制御方式で運転した場合，定格流速 v_n を境に制御方式が変化するため，$W(a,S_B)$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[4]を適用する．

4．結果

図 2 より，年間最大流速 v_m で運転する時間は僅かである．そこで，例えば累積確率 $F(v)$の 90%をカバーする流速の範囲で運転すると仮定した場合，その $F(v)$に相当する流速を(2)式の $v_{\max}$ とし，この流速以上では発電機を系統から解列しシステムを無負荷運転とする．

使用した水車と発電機のパラメータを表 1 に示す．

Table 1 Specifications of water turbine and 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 pairs p	3
Frequency f [Hz]	50
Stator resistance r_1 [pu]	0.054
Rotor resistance r_2 [pu]	0.078
Stator leakage inductance L_{l1} [pu]	0.100
Rotor leakage inductance L_{l2} [pu]	0.100
Excitation inductance M [pu]	1.754

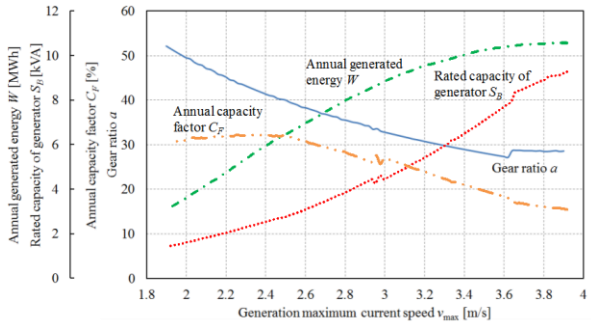

Figure 5. Result of calculation

また，累積確率 $F(v)$=80～100%となる流速，つまり(2)式の $v_{\max}$ を 1.9～3.9m/s に設定した場合の発電電力量を最大とする増速比 a，発電機の定格容量 S_B，年間発電電力量 W および年間設備利用率 C_F を図 5 に示す．ただし，図 5 に示す年間設備利用率 C_F とは，発電機が 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年間発電電力量 W の比と定義する．

図 5 より，$v_{\max}$ を低下させるにつれて，a は増加する傾向となり，S_B および W は減少する傾向となった．また，C_F は $v_{\max}$=2.24m/s において 32.29%となり，$v_{\max}$=3.9m/s における C_F よりも 16.84 ポイント増加することを明らかにした．

5．まとめ

今回は，水車出力一定制御方式で運転する DFIG を用いたダリウス形水車による潮流発電システムにおいて，発電最大流速を変化させた場合の年間設備利用率について検討を行った．その結果，発電最大流速を低下することにより年間設備利用率は増加し，最大 32.29%となることを明らかにした．

参考文献

[1] 辻　他：「潮流発電システムにおける水車出力一定制御方式－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－」，平成 26 年電気学会電力・エネルギー部門大会，pp.39-40 (2014)
[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/about/pamphlet/energy2010html/
[3] 大阪湾海上交通センター，http://www6.kaiho.mlit.go.jp/osakawan/
[4] 村瀬，小山，石田：「パソコンで学ぶ遺伝的アルゴリズムの基礎と応用」，森北出版 (1997)