

潮流発電システムの発電電力量の検討
 -流速の出現確率密度関数を用いた方法-

Study on the Generated Energy for Tidal Current Generation System
 - Method using Appearance Probability Density Function of Tidal Current Speed -

○辻健太郎¹, 田中良平², 直井和久³, 塩野光弘³, 鈴木勝行³

*Kentaro Tsuji¹, Ryohei Tanaka², Kazuhisa Naoi³, Mitsuhiro Shiono³, Katsuyuki Suzuki³

Abstract: Tidal current energy is more advantageous than another renewable energy, because of the tidal current is easy to predict the generating power. The system uses Darrieus turbine and induction generator. But rotating speeds of generator and turbine are not conforming. Therefore the turbine is connected with the generator through the step-up gear. This paper is formulation of solving gear ratio for maximum generating power by appearance probability density function of tidal current speed.

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他の再生可能エネルギーに比べて有利である。本研究で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て使用するが、水車と発電機では動作回転数が異なるため、増速機を介して接続する。これまでに2003年1~12月の流速データを用いて最適増速比の検討^[1]を行った。この検討では、潮流の流速データを線形補間し、離散値である流速の出現確率を用いて最適増速比の検討を行った。

本稿では、出現確率を連続関数である出現確率密度関数に変更し、発電電力量の厳密解を求めることを考える。この場合に、発電機が過負荷とならず、発電電力量が最大となる増速比を求めるための定式化を行った。

2. 流速の出現確率と出現確率密度関数

一般に潮流の流速と流向は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^[2]を用いる。その流速の変化は図1のようになる。

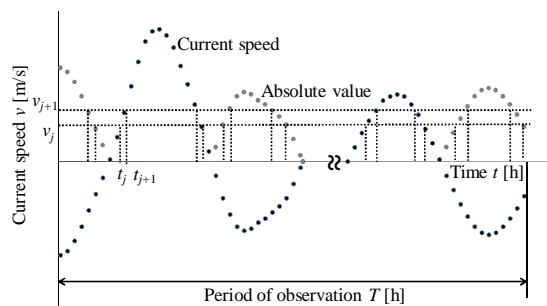


Figure 1. Current speed

ある流速 v_j から Δv だけ異なる流速を v_{j+1} とする。使用するデータが離散値であるので、データとデータの間を図2のように線形補間し、流速 v_j 、 v_{j+1} における時間 t_j 、 t_{j+1} を求

める。ここで垂直軸水車は流向によらず回転方向が一定なので流速は絶対値で考える。観測期間 T の時、流速 v が $|v_j| \sim |v_{j+1}|$ となる出現確率 $F(|v_j| \leq v \leq |v_{j+1}|)$ は(1)式となる。

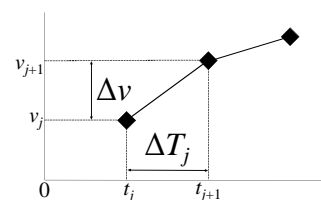


Figure 2. Linear interpolation

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

ここで、 $\Delta T_j = t_{j+1} - t_j$ であり、 $\sum \Delta T_j$ は観測期間 T において $|v_j|$ から $|v_{j+1}|$ における時間の総和である。

次に、出現確率密度関数 $f(v)$ を求める。まず、出現確率 $F(|v_j| \leq v \leq |v_{j+1}|)$ は、出現確率密度関数 $f(v)$ を用いて考えると(2)式となる。

$$F(|v_j| \leq v \leq |v_{j+1}|) = \int_{v_j}^{v_{j+1}} f(v) dv \quad (2)$$

ここで、 $v_j \doteq v_{j+1}$ ならば、出現確率密度関数 $f(v)$ は $|v_j| \sim |v_{j+1}|$ にわたり一定であると考えられる。よって、 $f(v) \doteq f(v_j) \doteq f(v_{j+1})$ となり、出現確率密度関数 $f(v_j)$ は(3)式となる。

$$f(v_j) = F(|v_j| \leq v \leq |v_{j+1}|) / \Delta v \quad (3)$$

図3、4に図1のデータから求めた出現確率 $F(v)$ 、出現確率密度関数 $f(v)$ を示す。流速 v は、 $0 \leq v \leq |v_m|$ 、 0.01m/s 刻みであり、 $|v_m|$ は最大流速である。

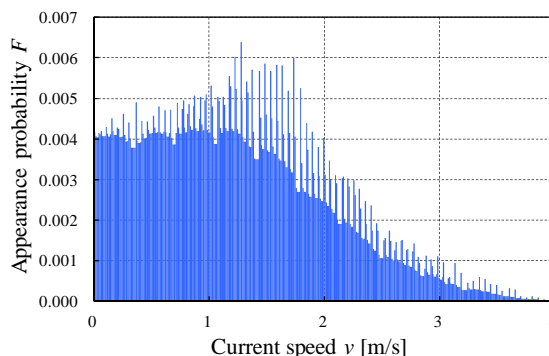


Figure 3. Appearance probability

1 : 日大理工・院(後)・電気 2 : 日大理工・院(前)・電気 3 : 日大理工・教員・電気

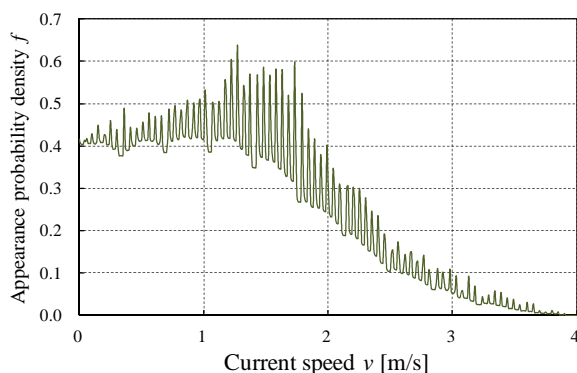


Figure 4. Appearance probability density function

図3, 4に示すように, 出現確率 $F(v)$ は流速 v に関して離散値となり, 出現確率密度関数 $f(v)$ は連続関数となる. また, 流速が低い範囲では出現確率 $F(v)$, 出現確率密度関数 $f(v)$ ともに高くなり, 流速が高くなるにつれて低くなる.

3. 最適化問題の定式化

潮流が水車へ流入する場合の水車入力 P_{Ti} は(4)式となる.

$$P_{Ti}(v) = 0.5\rho Av^3 \quad (4)$$

ただし, ρ : 流体密度[kg/m³], A : 水車の掃過面積[m²]

次に水車効率 C_p を考える. 文献[3]では, Heier 氏によって提案された以下の風車効率特性の近似式を, 水車効率特性の近似式としている.

$$C_p(\lambda) = \left(\frac{c_1 c_2}{\lambda} - c_1 c_2 c_9 - c_1 c_6\right) \exp(c_7 c_9 - \frac{c_7}{\lambda}) \quad (5)$$

ただし, λ : 周速比 ($\lambda=R\omega_T/v$), R : 水車半径[m], ω_T : 水車回転角速度[rad/s], $c_1 \sim c_9$: 定数である. そこで, 本検討でも水車効率 C_p は(5)式の近似式を用いる.

水車出力 P_{To} は(4)式の水車入力 P_{Ti} , (5)式の水車効率 C_p の積から(6)式となる.

$$P_{To}(\omega_T) = C_p(\lambda)P_{Ti}(v) \quad (6)$$

水車出力は増速機を介して発電機に入力されるが, 発電機入力を P_{Gi} として, 増速機の損失を無視できるものとする, (7)式となる.

$$P_{To}(\omega_T) = S_B P_{Gi}(s) \quad (7)$$

ただし, S_B : 発電機の定格容量[VA], $P_{Gi}: S_B$ を基準とした単位法表記, s : すべり

水車回転角速度 ω_T と発電機回転角速度 ω_G , 増速比を a とすれば(8)式の関係となる.

$$\omega_G = a\omega_T \quad (8)$$

すべり s は(8)式より(9)式となる.

$$s = (\omega_s - \omega_G) / \omega_s \\ = 1 - \omega_G / \omega_s = 1 - a\omega_T / \omega_s \quad (9)$$

ただし, ω_s : 同期速度[rad/s]

発電機入力 P_{Gi} は簡易等価回路を用いて(10)式となる.

$$P_{Gi}(s) = -\frac{1-s}{s} r_2 I_2^2 \quad (10)$$

右辺の負号は入力を正とするためである. 同様に発電機出力 P_{Go} は(11)式となる.

$$P_{Go}(v) = P_{Gi}(s) - (r_1 + r_2) I_2^2 - g_0 V^2 \quad (11)$$

ただし, r_1 : 一次抵抗[pu], r_2 : 二次抵抗[pu], I_2 : 二次電流[pu], g_0 : 励磁コンダクタンス[pu], V : 端子電圧[pu]

次に, 観測期間 T における, 発電電力量 W を求める. 文献[1]では, 発電機出力 P_{Go} , 発電開始流速 v_0 , 最大流速 v_m とし, (2)式の出現確率 $F(v)$ を用いると(12)式となる.

$$W(a, S_B) = S_B T \sum_{v_0}^{v_m} P_{Go}(v) F(v) \quad (12)$$

本検討では, 発電電力量 W の厳密解を得るために, (12)式中の流速の出現確率 $F(v)$ を(3)式の出現確率密度関数 $f(v)$ に変更する. そのため, 観測期間 T における, 発電電力量 W は(13)式となる.

$$W(a, S_B) = S_B T \int_{v_0}^{v_m} P_{Go}(v) f(v) dv \quad (13)$$

(13)式の発電電力量 W が最大となる増速比 a を求めるが, 発電機が定格出力を超えないための制約条件として, 次の関係式が成立する必要がある.

$$h(a, S_B) = S_B P_{Gi}(s_n) - P_{To}(v_m) \geq 0 \quad (14)$$

ただし, s_n は定格すべりである. しかし, 本検討では, 発電電力量 W は単調な凸関数であること, および不等式制約とする場合, 計算が複雑となるため(14)式を等式制約条件として扱う. よって, (13)式を目的関数, (14)式を等式制約条件として, 発電電力量 W を最大とする a 及び S_B を求める最適化問題となる. 等式制約下の最適化問題はラグランジュの未定乗数法により解くことができる. ラグランジュ乗数を γ とするとラグランジュ関数は(15)式となる.

$$L(a, S_B, \gamma) = W(a, S_B) + \gamma h(a, S_B) \quad (15)$$

制約条件 $h=0$ のもとで発電電力量 W が最大となるための必要条件は(16), (17), (18)式となる.

$$\partial L / \partial a = \partial W / \partial a + \gamma \partial h / \partial a = 0 \quad (16)$$

$$\partial L / \partial S_B = \partial W / \partial S_B + \gamma \partial h / \partial S_B = 0 \quad (17)$$

$$\partial L / \partial \gamma = h = 0 \quad (18)$$

(16)~(18)式を解くことにより, 最適増速比 a 及び発電機の定格容量 S_B を求めることができる.

4. まとめ

今回は流速の出現確率密度関数を用いた場合の潮流発電システムの発電電力量が最大で, かつ発電機が過負荷運転とならない最適な増速比を求めるための定式化を行った. 今後はこれらの式を用いて, 潮流発電システムの発電電力量が最大で, かつ発電機が過負荷運転とならない最適な増速比について検討していく予定である.

参考文献

- [1] 浅野(ほか): 「潮流発電システムの増速比と発電電力量の検討-流速の出現確率を用いた方法」, 平成 22 年電気学会電力・エネルギー部門大会論文集, pp.23-9-23-10, 2010
- [2] 大阪湾海上交通センター, <http://www6.kaiho.mlit.go.jp/osakawan/>
- [3] 田中(ほか): 「潮流発電システムの発電電力量の検討-Heier の式による効率特性の近似」, 平成 24 年度日本大学理工学部学術講演会, 掲載予定, 2012