

潮流発電システムにおける力率一定最大出力点追従制御方式 -年間発電電力量を最大とする増速比と発電機容量の検討-

MPPT Control Scheme with a Constant Power Factor for a Tidal Current Power Generation System -Study on the Gear Ratio and Generator Capacity for Maximizing Annual Generated Energy -

○佐藤美波¹, 辻健太郎², 直井和久², 塩野光弘²*Minami Sato¹, Kentaro Tsuji², Kazuhisa Naoi², Mitsuhiro Shiono²

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 at the maximum power point tracking control scheme with a constant power factor. This paper showed the gear ratio and the rated capacity of generator which will allow maximizing annual 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の予測可能な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二重給電誘導発電機(DFIG)を接続した最大出力点追従(MPPT)制御方式で運転する潮流発電システムにおいて, 発電機が過負荷とならず年間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してきた^[1].

近年, 系統連系された風力および太陽光発電において, 系統電圧変動対策として 0.85 以上の力率一定制御で運転している発電システムに関する検討が行われている^{[2][3]}.そこで, 本稿では, DFIG を用いた潮流発電システムの一次側力率を 1.00 一定にして, MPPT 制御方式で運転した場合, 発電機が過負荷とならず年間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. 本検討で使用されるダリウス形水車は流向に関係なく一方向に回転するため, 流速を絶対値として考えると図 1 のようになる. 今回使用するデータは 2003 年の 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における流速の推定値である^[4]. 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. 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. 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 $F_p(v_j \leq v \leq v_{j+1})$ は(1)式となる.

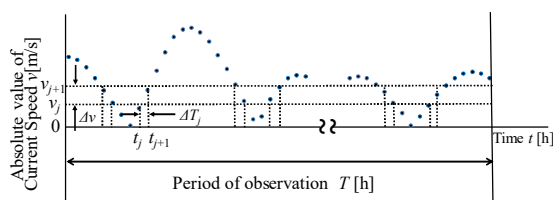


Figure 1. Examples of tidal current speed

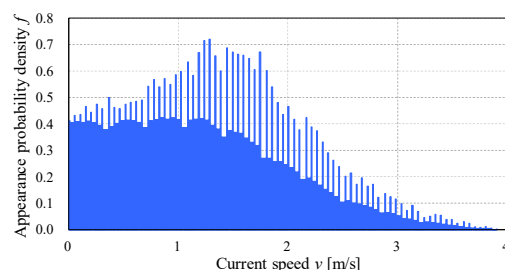


Figure 2. Appearance probability density function

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

ここで $\Delta T_j = t_{j+1} - t_j$ であり, $\sum \Delta T_j$ は観測期間 T (2003 年 1 月から 12 月までの 1 年間) において v_j から v_{j+1} における時間の総和である. また, 出現確率密度関数 $f(v)$ は(2)式となる.

$$f(v) = F_p(v_j \leq v \leq v_{j+1}) / \Delta v \quad (2)$$

ただし, $0 \leq v \leq v_m, \Delta v = v_{j+1} - v_j$ である. また, v_m は観測期間 T における最大流速 (=3.9 m/s) 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, Δv は 0.01 m/s である.

3. 潮流発電システム

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_{T0} : 水車出力, ω_r : 水車回転角速度, a : 増速比, P_{G1} : 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である. また P_1, P_2 は発電機に入力する方向を正とする.

式(3)は DFIG の電圧方程式であり, 回転座標系 $d-q$ 座標軸で表現したものである. ただし, q 軸は d 軸に対して 90deg 遅れと定義し, v_{d1}, v_{q1} : 一次 d, q 軸電圧, i_{d1}, i_{q1} :

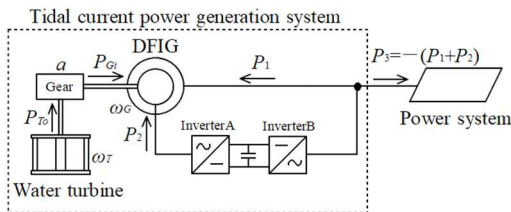


Figure3. Tidal current power generation system

$$\begin{bmatrix} v_{d1} \\ v_{q1} \\ v_{d2} \\ v_{q2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_1 + PL_{s1} & X_{s1} & PM & X_M \\ -X_{s1} & r_1 + PL_{s1} & -X_M & PM \\ PM & sX_M & r_2 + PL_{s2} & sX_{s2} \\ -sX_M & PM & -sX_{s2} & r_2 + PL_{s2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{d1} \\ i_{q1} \\ i_{d2} \\ i_{q2} \end{bmatrix} \quad (3)$$

一次 d, q 軸電流, v_{d2}, v_{q2} :二次 d, q 軸電圧, i_{d2}, i_{q2} :二次 d, q 軸電流, r_1, r_2 :一次, 二次抵抗, L_{s1}, L_{s2} :一次, 二次自己インダクタンス, M :励磁インダクタンス, X_{s1}, X_{s2} :一次, 二次自己リアクタンス, X_M :励磁リアクタンス, $P: d/dt, s$:すべりである.二次側諸量は全て一次側換算値とする.

本検討の潮流発電システムは式(3)により求まる二次供給電圧の大きさおよび周波数を制御することにより発電機回転速度の制御を行う。

次に一次側力率を一定制御するにあたって,一次側力率 $\cos\theta_1$ は式(4)となる。

$$\cos\theta_1 = i_{q1} / \sqrt{i_{d1}^2 + i_{q1}^2} \quad (4)$$

従来は i_{d1} 一定 MPPT 制御を行った結果, $\cos\theta_1$ は流速によって 0 から 0.85 まで変化した^[1].しかし,風力および太陽光発電では入力変動による系統電圧変動対策として 0.85 以上の力率一定制御が行われている.そこで,本検討では,流速の変化に対して $\cos\theta_1=1.00$ 一定に制御する方式を用いる。

4. 最適化問題の定式化

図 3 の潮流発電システムが流速の変化に対して,一次側力率を一定にして MPPT 制御方式で運転する場合において,年間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 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(5)式となる。

$$W(a, S_B) = S_B T \int_{v_0}^{v_m} P_3(v) f(v) dv \quad (5)$$

ただし, v_0 :発電開始流速[m/s], v_m :観測期間 T における最大流速[m/s]である。

(5)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 の値によっては一次電流 I_s , 二次電流 I_r または二次供給電圧 E_r が定格を超えるおそれがある.このため, I_s, I_r, E_r が定格範囲内(1pu)に収まる必要があり, これらを保証するため(6)式を制約条件とする。

W を最大とする a と S_B を求める問題は, (5)式を目的関数, (6)式を不等式制約条件とする最適化問題となる。

$$\left. \begin{aligned} h_1(a, S_B) &= I_s - 1 \leq 0 \\ h_2(a, S_B) &= I_r - 1 \leq 0 \\ h_3(a, S_B) &= E_r - 1 \leq 0 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

今回不等式制約条件つき最適化問題を解く手法として乗数法^[5]を適用する.(5)式の目的関数と(6)式の不等式制約条件より,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(7)式のように定義され, Q を最小にする a と S_B が最適解になる。

$$Q(a, S_B, \mathbf{L}, \Psi) = -W + \sum_{i=1}^3 \psi_i (h_i + l_i) + \frac{1}{\gamma} \sum_{i=1}^3 (h_i + l_i)^2 \quad (7)$$

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

5. 結果

水車と DFIG のパラメータを表 1 に示す. 力率 1.00 一定とした MPPT 制御方式で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 の結果を表 2 に示す。

Table1. Specifications of DFIG and water turbine

DFIG		Water turbine	
Rated voltage [V]	200	Number of blades n	3
Number of pole	6	Height h [m]	1.6
Frequency [Hz]	50	Diameter d [m]	1.6
Stator resistance r_1 [pu]	0.054	Solidity σ	0.179
Rotor resistance r_2 [pu]	0.078		
Stator leakage inductance L_{l1} [pu]	0.100		
Rotor leakage inductance L_{l2} [pu]	0.100		
Exciting inductance M [pu]	1.754		
Power factor of generator $\cos\theta_1$	1.00		

Table2. Results of gear ratio and rated capacity of generator

Optimum gear ratio a	23.96
Rated capacity of generator S_B [kVA]	11.83
Rated capacity of inverter S_{BI} [kVA]	11.83
Annual generated energy W [MWh]	9.71
Cut-in current speed v_0 [m/s]	0.94

表 2 より, 力率 1.00 一定とした MPPT 制御方式で運転した場合の年間発電電力量を最大とする増速比 a は 23.96, 発電機の定格容量 S_B は 11.83kVA となった.上記の値で運転した場合の発電システムの年間発電電力量 W は 9.71MWh となった。

6. まとめ

今回は, DFIG を用いた潮流発電システムの一次側力率を 1.00 一定にして, MPPT 制御方式で運転した場合, 発電機が過負荷とならず年間発電電力量を最大とする増速比と発電機の定格容量を明らかにした。

参考文献

- [1] 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 年電気設備学会全国大会,pp.81-82(2013)
- [2] 川口 他:「風力発電所連系時の連系点力率一定制御による電圧変動対策」平成 19 年電気学会全国大会,p.98(2007)
- [3] 河野 他:「長距離配電線に対応したメガソーラー発電の無効電力制御による電圧変動抑制の実証試験」2016 年四国電力,四国総合研究所研究期報 105,pp.43-51(2016)
- [4] 大阪湾海上交通センター,
<http://www6.kaiho.mlit.go.jp/osakawan/>
- [5] 志水 清孝:「システム最適化理論」, コロナ社 (1976)