

## 潮流発電装置における最大出力制御方式の検討

### -回転子側インバータのスイッチング動作を考慮した制御システムモデルの構築-

#### Study on the MPPT Control Method for a Tidal Current Power Generation System

#### -Construction of a control system model considered on switching operation of the rotor side inverter -

○田中良平<sup>1</sup>, 辻健太郎<sup>2</sup>, 直井和久<sup>3</sup>, 塩野光弘<sup>3</sup>, 鈴木勝行<sup>3</sup>

\*Ryohei Tanaka<sup>1</sup>, Kentarou Tsuji<sup>2</sup>, Kazuhisa Naoi<sup>3</sup>, Mitsuhiro Shiono<sup>3</sup>, Katsuyuki Suzuki<sup>3</sup>

Abstract: Tidal current energy is more advantageous than other renewable energy sources, because the tidal current is easy to predict the generated output. We proposed the tidal current power generation system for variable speed control. The generator is a doubly fed induction generator. This paper shows the control system model considering the switching operation of the rotor side inverter using proposed tidal current power generation system.

### 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を予測しやすい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、潮流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電力量の検討を行った<sup>[1]</sup>。この方式では年間設備利用率が約 10% となり太陽光発電の年間設備利用率(12%)<sup>[2]</sup>よりわずかに低いが同程度の結果となった。そこで本研究では設備利用率を更に高めることを目的として巻線形誘導発電機による可変速運転方式を提案してきた<sup>[3]</sup>。これまでの方式では、水車出力と発電機回転角速度を目標値として、流速の変化に対し常に最大水車出力となるように水車を可変速制御する速度制御システムを構築し、流速のステップ応答<sup>[4]</sup>や正弦波変化に対する応答<sup>[5]</sup>を検討してきた。しかし、文献[4], [5]では半導体電力変換器であるインバータのスイッチング動作を考慮せず、理想的に動作していると仮定している。

そこで本稿では、これまでの可変速制御システムにおいて、二次励磁電源に PWM インバータを採用し、実際に回転子側(二次側)インバータのスイッチング動作を考慮した制御システムモデルを構築したので報告する。

### 2. 速度制御システムの検討<sup>[3]</sup>

巻線形誘導発電機を用いた潮流発電装置の構成を図 1 に示す。この装置が流速  $v$  の変化に対して、常に水車出力  $P_{T0}$  が最大となる発電機回転角速度  $\omega_G$  に制御可能な速度制御

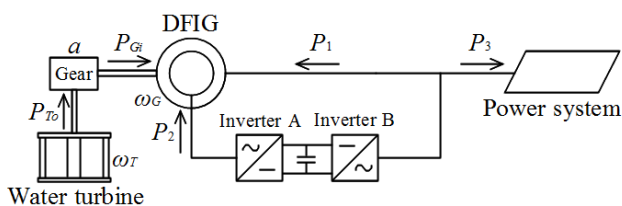


Fig.1. Tidal current power generation

を行う。ただし、 $P_{T0}$ : 水車出力、 $\omega_T$ : 水車回転角速度、 $a$ : 増速比、 $P_{Gi}$ : 発電機入力、 $\omega_G$ : 発電機回転角速度、 $P_1$ : 一次側有効電力、 $P_2$ : 二次側有効電力、 $P_3$ : 発電機出力である。 $P_1, P_2$  は発電機に入力する方向を正方向とした。

#### 2. 1. 最大水車出力とすべりの決定

掃過面積  $A$  の水車に流入する潮流エネルギーを水車入力  $P_{Ti}$  とすると、(1)式となる。

$$P_{Ti} = 0.5\rho A v^3 \quad (1)$$

ただし、 $\rho$ : 流体密度、 $A$ : 水車の掃過面積である。

流速  $v$  における最大水車出力  $P_{Tmax}$  は、(1)式の水車入力  $P_{Ti}$ 、水車の最大パワー係数  $C_{Pmax}$  の積から(2)式となる。

$$P_{Tmax} = C_{Pmax} P_{Ti} \quad (2)$$

流速  $v$  に対して、水車回転角速度  $\omega_{Tmax}$ 、発電機回転角速度  $\omega_{Gmax}$  は水車半径  $R$  と水車の最大パワー係数  $C_{Pmax}$  に対応する周速比  $\lambda_{max}$ 、増速比  $a$  より(3)式となる。

$$\left. \begin{aligned} \omega_{Tmax} &= v \lambda_{max} / R \\ \omega_{Gmax} &= a \omega_{Tmax} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

すべり  $s$  は(3)式を用いると(4)式となる。

$$s = 1 - \omega_{Gmax} / \omega_s = 1 - a \omega_{Tmax} / \omega_s \quad (4)$$

ただし、 $\omega_s$ : 同期角速度である。

(2), (4)式より求めた  $P_{Tmax}$  と  $s$  を目標値  $P_{Tmax}^*$ 、 $s^*$  とすると、それらに対応する一次側電流、二次側電流の目標値が求まる。次にこれらの値から二次側供給電圧を求める。

#### 2. 2. 二次側供給電圧の決定

誘導発電機の電圧方程式は回転座標系  $d$ - $q$  座標軸で表現すると(5)式となる。

$$\begin{pmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \\ v_{dr} \\ v_{qr} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_1 + PL_{s1} & X_{s1} & PM & X_M \\ -X_{s1} & r_1 + PL_{s1} & -X_M & PM \\ PM & sX_M & r_2 + PL_{s2} & sX_{s2} \\ -sX_M & PM & -sX_{s2} & r_2 + PL_{s2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{pmatrix} \quad (5)$$

ただし、 $v_{ds}, v_{qs}$ : 一次側  $d, q$  軸電圧、 $i_{ds}, i_{qs}$ : 一次側  $d, q$  軸電流、 $v_{dr}, v_{qr}$ : 二次側  $d, q$  軸電圧、 $i_{dr}, i_{qr}$ : 二次側  $d, q$  軸電流、 $r_1, r_2$ : 一次、二次抵抗、 $L_{s1}, L_{s2}, M$ : 一次、二次、励磁インダクタンス、 $X_{s1}, X_{s2}, X_M$ : 一次、二次、励磁リア

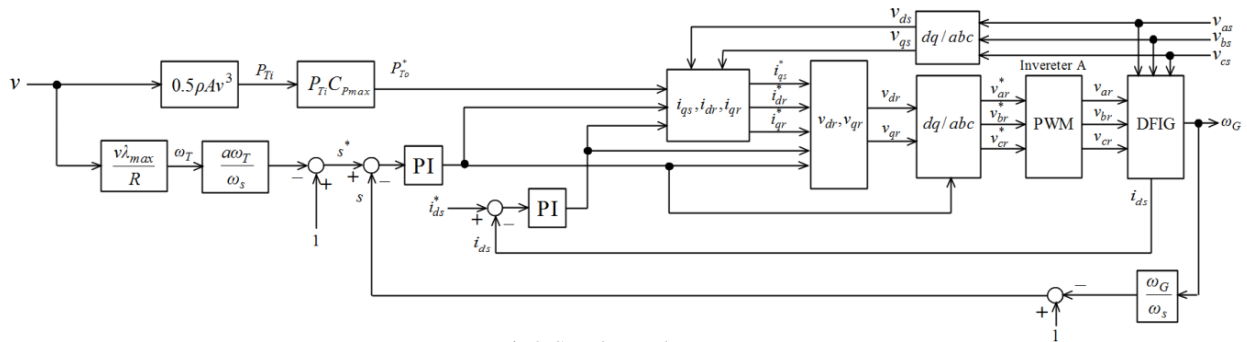


Fig.2. Speed control system

クタンズ,  $P: d/dt$ ,  $s$ : すべりである. 二次側諸量は全て一次側換算値とする.

二次側インバータ容量の低減のため, 励磁電流となる無効電流は一次側から供給する. そのため, 一次側  $d$  軸電流の目標値  $i_{ds}^*$  は(6)式となる.

$$i_{ds}^* = -\frac{\sqrt{3}E}{r_1^2 + X_{s1}^2} X_{s1} \quad (6)$$

ただし,  $E$ : 一次側相電圧の実効値である. ここで, 一次側電圧は定格電圧に保たれているものとする.

(2)式で求めた水車出力の目標値  $P_{Tmax}^*$  と発電機入力  $P_{Gi}$  は増速比の損失を無視できるものとするれば図1より次式が成立する.

$$P_{Tmax}^* = P_{Gi} = (1-s)X_M(i_{qs}i_{dr} - i_{ds}i_{qr}) \quad (7)$$

(4)式の  $s^*$ , 定常状態における(5)式の 1, 2 行, (7)式の  $P_{Gi}$  と  $P_{Tmax}^*$  の関係から, 一次側, 二次側電流の目標値  $i_{qs}^*$ ,  $i_{dr}^*$ ,  $i_{qr}^*$  が求まる.

二次側供給電圧  $v_{dr}$ ,  $v_{qr}$  は定常状態における(5)式の 3, 4 行の式より(8), (9)式となる.

$$v_{dr} = s^* X_M i_{qs}^* + r_2 i_{dr}^* + s^* X_{s2} i_{qr}^* \quad (8)$$

$$v_{qr} = -s^* X_M i_{ds}^* - s^* X_{s2} i_{dr}^* + r_2 i_{qr}^* \quad (9)$$

(8), (9)式より二次側供給電圧  $v_{dr}$ ,  $v_{qr}$  が求まる. 上式より各相電圧  $v_{ar}$ ,  $v_{br}$ ,  $v_{cr}$  を求め, インバータ A によってこれらの電圧を巻線形誘導発電機の二次巻線に加える.

### 2. 3. 運動方程式

発電機トルク  $T_e$  は, (7)式の発電機入力  $P_{Gi}$  を発電機回転角速度  $\omega_G$  で割ることにより得られ, 次式となる.

$$T_e = pM(i_{qs}i_{dr} - i_{ds}i_{qr}) \quad (10)$$

ただし,  $p$  は極対数である.

運動方程式は(11)式となる.

$$J \frac{d\omega_G}{dt} = T_T - T_e \quad (11)$$

ただし,  $J$ : タービンと発電機全体の慣性モーメント,  $T_T$ : タービントルクである. (11)式より  $\omega_G$  が求まる. 図2に速度制御システムの全体図を示す. 速度制御システムの補償装置は単純な PI 制御とした. シミュレーションは XTAP(eXpandable Transient Analysis Program)を用いる.

### 3. 回転子側インバータのモデルについて

前節までは制御システム全体について述べてきたが, ここでは回転子側インバーに当たるインバータ A のスイッチ

ング動作の方法について述べる. 図3にインバータ A のモデルを示す. インバータ A のスイッチング方法として IGBT 素子による PWM スwitching 方式を用いた. インバータ A の出力電圧は, 理想電圧源の直流電圧が正, 負として現れる. この矩形波をローパスフィルタに通過させ発電機の二次巻線に加える.

インバータ B は無効電力補償や電圧補償をすることができるが, 本検討では有効電力のみが入出力されているものとする. このため, インバータ A は図3に示すように理想電圧源より供給されるシステムモデルとした.

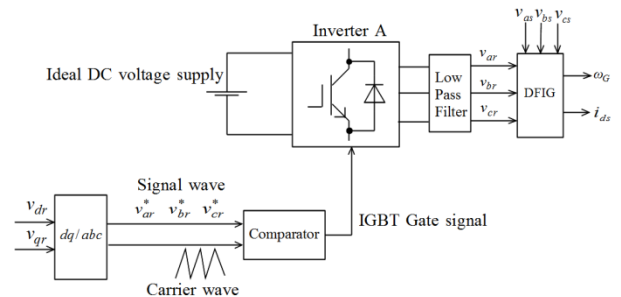


Fig.3. Model of Inverter A

## 4. まとめ

巻線形誘導発電機を用いて水車の可変速制御を行う潮流発電装置の速度制御システムについて検討を行った. 今回は潮流発電装置の速度制御システムにおいて, 二次励磁電源に PWM インバータを採用し, 実際に回転子側インバータのスイッチング動作を考慮した制御システムモデルを構築した.

今後は回転子側インバータのスイッチング動作を考慮した制御システムにおいて, 流速の変化に対する応答を検討する必要がある.

### 参考文献

- [1] 田中ほか: 「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)
- [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/energy2010html/index.htm>
- [3] 辻ほか: 「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制御方式の検討」, 平成 25 年電気学会全国大会講演論文集, vol.7, pp.45-46(2013)
- [4] 辻ほか: 「潮流発電装置の最大出力制御方式の検討-流速のステップ変化に対する応答-」, 平成 25 電気学会電力・エネルギー部門大会論文集, pp.12-3~12-4,(2013)
- [5] 勝亦ほか: 「潮流発電装置の最大出力制御方式の検討-流速の正弦波変化に対する応答-」, 平成 25 電気学会電力・エネルギー部門大会論文集, pp.12-5~12-6,(2013)