

# 적응 슬라이딩모드 관측기를 이용한 조류발전 시스템의 속도 센서리스 제어

정해선\*, 나재두\*\*, 김영석\*

인하대학교 전기공학과\*, 인하공업전문대학 전기정보과\*\*

## Speed Sensorless Control of Tidal Energy System using an Adaptive Sliding mode Observer

Hae-Seon Jung\*, Jae-Du La\*\*, Young-Seok Kim\*

Inha University\*, Inha Technical College\*\*

### ABSTRACT

This paper presents the sensorless and MPPT control algorithm for a 100kW tidal energy system. The proposed algorithm is estimated the rotor position and generator speed using adaptive sliding mode observer. The vector control of generator at the machine side converter and the converter at the grid side are controlled to obtain maximum torque and to regulate unity power factor respectively. Psim simulation is used for validity of proposed control algorithm.

### 1. 서론

화석에너지의 고갈과 환경 보호에 대한 관심으로 인해서 기존 에너지원과는 다른 환경오염이 거의 없는 신재생 에너지에 대한 관심이 높아져 가고 있다. 이중에 조류발전은 타 에너지원과 비교해 볼 때 발전에 제한조건이나 단점을 거의 찾아볼 수 없으며, 국내 자연환경에 적용하기에 많은 장점을 지니고 있다.<sup>[1]</sup> 본 논문에서는 영구자석 동기 발전기의 Back to Back 컨버터를 이용한 조류발전 시스템으로 MPPT제어와 센서리스 알고리즘의 유효성 검토를 목표로 한다. 제안된 알고리즘은 PSIM 시뮬레이터를 사용한 시뮬레이션으로 그 타당성이 검증된다.

### 2. 조류발전 시스템

#### 2.1 조류발전 시스템

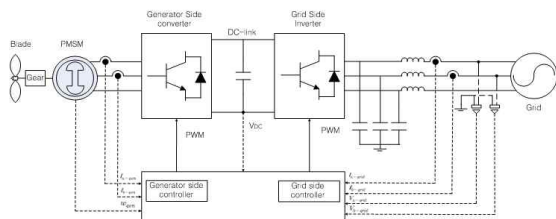


그림 1 가변속 조류발전 시스템

Fig. 1 A tidal energy system with variable rotational speed

그림 1은 조류발전 시스템을 도식화한 것으로서 PMSG를 제어하는 컨버터는 최적의 출력을 내기위해 회전자의 속도를 제어하고 계통측 인버터는 주파수 변환 및 역률제어를 수행한다.

#### 2.2 시스템 모델링<sup>[2]</sup>

조류발전 시스템에 입력되는 블레이드 에너지는 다음과 같다.

$$P_{blade} = \frac{1}{2} \rho V_{water}^3 C_p(\lambda) \quad (1)$$

주속비  $\lambda$ 는 식(2)와 같다.

$$\lambda = \frac{w_r R}{v} \quad (2)$$

여기서  $P_{blade}$ 는 조류 터빈에 포획되는 전력[W], A는 블레이드의 회전 단면적[m<sup>2</sup>],  $\rho$ 는 유체의 밀도로(1025[Kg/m<sup>3</sup>]),

$V_{water}$ 는 유속[m/sec],  $w_r$ 은 터빈의 회전속도, R은 블레이드의 반지름,  $C_p(\lambda)$ 는 블레이드의 출력계수로 주속비  $\lambda$ 의 함수로 식(3)과 같이 근사화 하였다.

$$C_p(\lambda) = a_6 \lambda^6 + a_5 \lambda^5 + a_4 \lambda^4 + a_3 \lambda^3 + a_2 \lambda^2 + a_1 \lambda + a_0 \quad (3)$$

$$a_0 = -2.0498, a_1 = 2.2641, a_2 = -0.8991, a_3 = 0.1949, a_4 = 0.0235$$

$$a_5 = 0.00147, a_6 = -0.0003718$$

터빈 블레이드의 회전면적과 유속밀도가 일정하므로 최대 전력 변환계수 ( $C_p$ )를 최대로 갖는 주속비  $\lambda$ 가 존재하고 이때의 블레이드 회전속도에서 최대의 출력을 얻게 된다.

#### 2.3 MPPT 제어<sup>[3]</sup>

MPPT알고리즘은 다음과 같은 제어과정을 가진다.

- 1.발전기 회전 속도의 초기 지령치를 결정하고 발전기 출력 파워를 측정한다.
- 2.지령 속도를 한단계 증가시키거나 감소시켜 그때의 속도와 출력 파워를 다시 측정한다.
- 3.출력파워와 속도의 변화에 따른  $\text{Sig}(\Delta P)$ 와  $\Delta w$ 를 계산한다.
4. $w_{ref}(n) = w_{ref}(n-1) + \text{Sig}(\Delta P)\Delta w$
- 5.최적의 운전점에 이를 때 까지 2~4의 과정을 반복.

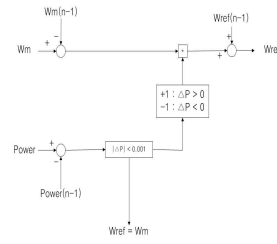


그림 2. MPPT알고리즘

Fig.2 The algorithm of MPPT

#### 2.4 발전기 모델링 및 적응 슬라이딩 모드 관측기<sup>[4]</sup>

고정자 좌표계 상에서 영구자석 동기기의 전압방정식을 전류에 대한 미분방정식으로 표현하면 다음과 같이 적을 수 있다.

$$\frac{d}{dt} \mathbf{i}_s = \mathbf{A} \mathbf{i}_s + \mathbf{B} \mathbf{v}_s + \mathbf{B} \mathbf{E}_s \quad (4)$$

여기서,  $\mathbf{i}_s = (i_d \ i_q)^T$ : 고정자 전류,  $\mathbf{v}_s = (v_d \ v_q)^T$ : 공급전압,

$\mathbf{E}_s = (E_D \ E_Q)^T$ : 역기전력,  $E_D = K_E \omega_r \sin \theta_r$ ,  $E_Q = -K_E \omega_r \cos \theta_r$ ,

$\mathbf{A} = (-R_s/L_s) \mathbf{I}$ ,  $\mathbf{B} = (1/L_s) \mathbf{I}$ ,  $K_E$ : 역기전력 상수

$R_s$ : 고정자 저항,  $L_s$ : 고정자 권선 인덕턴스,  $\mathbf{I} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$

수식 (4)에서 보면 시간에 따라 변동하는 변수로서 전압, 전류 이외에 위치에 대한 삼각함수와 속도항이 곱해져 있는 형태로 나타나는 역기전력 성분이 있음을 볼 수 있다. 따라서 전체 시스템은 비선형이 되기 때문에 선형화 시키고자 한 제어주기 내에서는 전동기의 속도가 거의 일정하다는 가정을 세운다.

식 (4)로부터 슬라이딩 모드 관측기는 다음과 같이 구성된다.

$$\frac{d}{dt} \hat{i}_s = A \hat{i}_s + B v_s + B E_s + K \quad (5)$$

여기서,  $A = (-R_s/L_s)I$ ,  $\hat{\cdot}$  : 추정값,  
 $K = \Phi S + \Psi$  : 관측기 입력

$$\Phi = \begin{bmatrix} \phi_{11} & 0 \\ 0 & \phi_{22} \end{bmatrix}, \Psi = \begin{bmatrix} \psi_1 \\ \psi_2 \end{bmatrix}$$

식 (5)에서는 전동기의 운동방정식이 포함되어 있지 않다. 따라서 속도에 대한 정보를 얻기 위해서 역기전력항을 고려해야 한다. 관측기의 슬라이딩 평면은 다음과 같이 추정전류와 실제전류의 오차로 정의 한다.

$$S = \begin{bmatrix} s_\alpha & s_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{i}_\alpha - i_\alpha & \hat{i}_\beta - i_\beta \\ \hat{i}_s - i_s & e_s = 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

전동기의 속도를 추정하기 위해 Lyapunov함수를 이용하면

$$V = \frac{1}{2} s^T S + \frac{(\hat{\omega} - \omega)^2}{2} \quad (7)$$

관측기 시스템의 안정도를 고려하여 리아푸노프 안정도이론을 적용하여 속도 추정식을 구하면

$$\hat{\omega}_r = -\frac{K_E}{L_s}(s_D \sin \hat{\theta}_r - s_Q \cos \hat{\theta}_r) \quad (8)$$

로 정리할 수 있다. 속도는 식 (8)을 적분 하여 구한다. 적응 슬라이딩 모드 관측기가 안정하기 위해 관측기 이득을 구하면

$$S^T A (\hat{i}_s - i_s) - \Phi S - \Psi < 0 \text{ 에서} \\ \phi > A \text{로부터,} \\ \phi_{11}, \phi_{22} > \frac{\hat{R}_s}{L_s} \quad (9)$$

$$S^T \Psi > 0 \text{로부터,} \\ \psi_i = \begin{cases} \alpha_i & \text{if } s_i > 0 \\ -\beta_i & \text{if } s_i < 0 \end{cases} \quad (10)$$

여기서,  $\alpha_i, \beta_i$ 는 양의 상수,  $i = 1, 2$

## 2.5 시뮬레이션

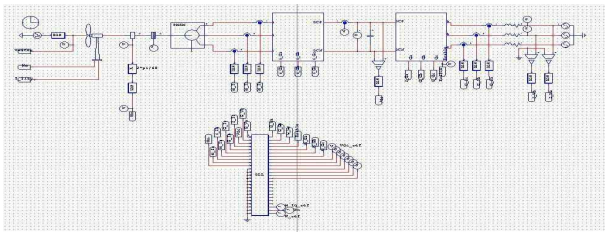


그림 3. Psim으로 구현한 시뮬레이션 블록도  
 Fig.3 Simulation block with Psim simulator

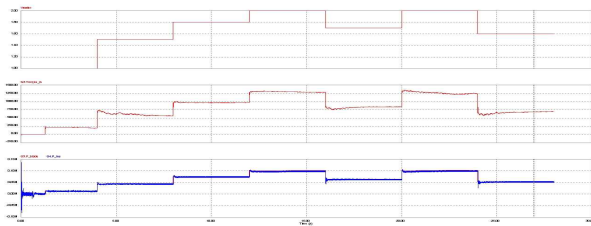


그림 4. (a) 유속변화, (b) 발전기 토크 (c) 출력파워  
 Fig.4 (a) The Velocity of fluid (b) Torque (c) Output Power

위의 파형은 유속이 변화하였을 때 발전기의 토크변화와 블레이드 출력 파워 계통의 출력 파워를 나타내었다. 유속이 변화함에 따라 출력 파워도 변화하는 것을 알 수 있다.

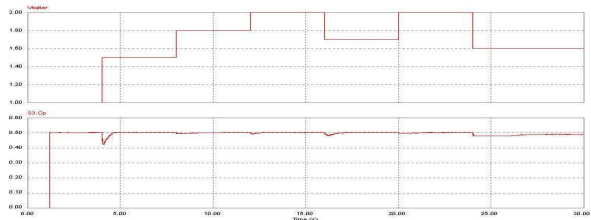


그림 5. (a) 유속변화 (b) power coefficient  
 Fig.5 (a) The Velocity of Fluid (b) power coefficient

그림 5.에서는 그림 4. 와 같이 유속이 변화하였을 때 파워 계수의 변화를 나타낸 것으로 유속 변화와 관계 없이 일정한 값으로 수렴하는 것을 알 수 있다.

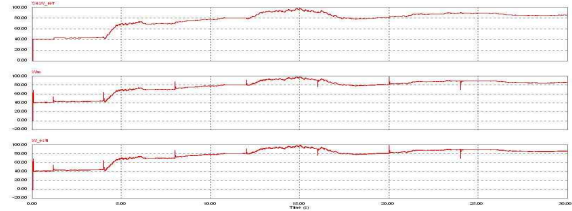


그림 6. (a) 발전기 속도 지령 (b) 실제속도 (c) 추정속도  
 Fig.6 (a) Generator speed ref. (b) Actual speed (c) Estimatiomed speed

그림 6에서는 발전기의 센서리스 제어 특성을 확인 할 수 있다. 정상 상태 뿐만 아니라 과도상태에서도 안정한 특성을 갖고 발전기의 실제속도와 일치하는 것을 확인 할 수 있다.

표 1. 터빈 및 발전기 파라미터  
 table 1. Turbine and generator parameter

터빈사양	발전기사양		
반경	4m	정격 파워	100 kW
최적 TSR	6.4716	역기전력	423V/krpm
최적 $C_p$	0.502	고정자저항	0.02
정격유속	2m/s	고정자인덕턴스	1mH
기어비	29	극 수	8

## 3. 결론

본 논문에서는 영구자석 동기발전기 조류발전 시스템의 Back-To-Back 컨버터를 이용한 조류 시뮬레이터 MPPT 알고리즘의 적합성과 센서리스 알고리즘을 테스트 하였다. 제한된 알고리즘을 통해 발전기 속도 센서의 가격적인 부담을 줄일 수 있으며 최대 파워를 출력하는 발전기의 최적지점에서 운전이 가능하므로, 발전기의 효율적인 운용과 가격적인 면을 고려하여 볼 때 경제성과 최대 전력을 출력하기 위한 합리적인 방법이라 말할 수 있겠다.

본 연구는 지식경제부 신재생에너지기술개발사업의 일환 (2006NOC02P0230102008)으로 수행되었습니다.

## 참고 문헌

- [1] 조철희, “조류발전 특성과 국내외 기술동향”, 한국태양에너지학회지, 6권 16호, pp.9-16, 2007.3
- [2] M. Chinchilla, S. Arnaltes, J. C. Burgos, “Control of Permanent-Magnet Generators Applied to Variable-speed Wind-Energy Systems Connected to the Grid”, IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 21, No. 1, PP130-135, 2006.2
- [3] I.Schiemenz, M.Stiebler, “Control of a Permanent Magnet Synchronous Generator Used in a Variable Speed Wind Energy Sytem”, Electric Machines and Drives Conference, pp 872-877, 2001
- [4] 한윤석, 김영석, “적응 슬라이딩 모드 관측기를 이용한 영구자석 동기전동기의 센서리스 속도제어”, 대한전기학회, 전기학회논문지, 제 51B권, 제 2호, pp 83-91, 2002.2