

진동 수주형 파력발전 시스템의 최대 전력 추출을 위한 임펄스 터빈의 최대 효율 추종 제어기 설계

송승관, 박진배  
연세대학교, 전기전자 공학부

Control strategy of an impulse turbine for oscillating water column wave energy converter under irregular waves

Seung-Kwan Song, Jin-Bae Park  
Yonsei University

**Abstract** - 진동 수주형 파력발전 시스템(oscillating water column wave energy converter)의 효율을 증대할 수 있는 터빈의 최대 효율 추종 제어기를 제안한다. 진동 수주형 파력발전 시스템은 캡처 챔버(capture chamber)와 터빈, 발전기로 구성되어 있으며 발전기 말단에 연결된 저항의 값을 제어 입력으로 삼는다. 본 논문에서는 파력발전 시스템의 캡처 챔버와 터빈의 동역학 모델에 대해 소개하고, 터빈의 최대 효율 추종 제어기의 안정성을 증명하고 이를 JONSWAP 모델의 비규칙 파랑 조건하에서 시뮬레이션 하여 제어기 성능을 입증한다.

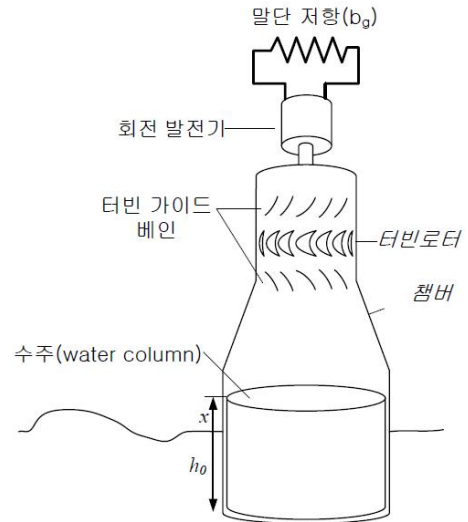
1. 서 론

해양 에너지는 풍력, 태양광 등과 함께 고갈될 염려와 오염문제가 없는 청정 에너지원이다. 파력에너지는 해양 에너지의 많은 비중을 차지하고 있지만, 다른 에너지원에 비해 낮은 에너지 밀도와 진동성, 그리고 불규칙성으로 인해 전력 생산으로 상용성을 확보하기가 쉽지 않다. 그러나 최근 해상 풍력이 각광을 받으면서 해상 풍력과 연계된 해상풍력-파력 복합발전과 외해 양식 시설물과 연계한 파력 발전 장치에 대한 연구가 활발히 진행 중이다.

진동 수주형 파력발전 시스템은 상용화 레벨에 근접한 파력발전 장치 중 하나로, 챔버-터빈-전기발전기로 구성된다. 이 시스템은 챔버 내의 수주의 진동을 파도의 대표주기에 맞춰 파도 에너지의 흡수를 극대화하고, 챔버 내의 수주(water column)의 왕복 운동에 의한 압력 변화로부터 터빈의 회전을 유도하여 전기를 생산한다. 따라서 이 장치의 효율은 크게 파력을 공기의 유동 에너지로 바꾸는 챔버 단(stage)의 효율과 공기의 유동 에너지를 회전 운동에너지로 변환하는 터빈의 단의 효율에 주로 영향을 받게 된다. 터빈은 파력에너지의 특성에 맞게 왕복하는 공기의 흐름에도 단방향으로만 회전하도록 설계된 웰스 터빈(Wells turbine) 또는 임펄스 터빈(Impulse turbine)을 사용하는데, 이 터빈은 회전수 대비 유동 속도의 비에 의해 결정되는 유동 계수(flow coefficient)에 의해 효율이 결정된다. 일반적으로 소수력에서 사용되는 터빈은 설계 단계에서부터, 터빈의 회전 속도와 효율을 고려하여 설계가 되며, 터빈의 효율이 가장 높은 구간에서 운영되지만 파력발전기에서 사용하는 터빈은 파도의 진동성과 불규칙성으로 인해 터빈을 통과하는 공기의 유량과 터빈 양단의 압력차가 수시로 바뀌며 터빈의 회전 속도 또한 변동하기 때문에 유동 계수가 수시로 바뀌어 터빈의 높은 효율을 보장하기가 쉽지가 않다. 따라서 터빈의 안정적이면서 높은 변환 효율을 유지하기 위한 연구가 진행되어 왔다.

Falcão는 웰스 터빈이 장착된 진동수주형 파력발전 시스템이 터빈의 회전수에 따라 얻을 수 있는 출력에 대한 모델링을 정립하였고, 주파수 영역에서의 파도 확률 모델을 적용하여 얻게 되는 출력에 대해 분석함으로써, 효율적인 운용 방안을 제시하였다[1]. 단 이 모델은 주파수 영역에서의 파도 모델을 적용하였기 때문에, 단시간의 효율에 대해서는 다룰 수 없다는 한계를 지니며, 터빈의 일정한 회전속도를 가정하였기 때문에 파도 모델이 수시로 바뀌는 실제 해양 환경에 적용할 수 없다는 한계를 지닌다.

따라서 본 논문에서는 불규칙 파랑 환경에서 실시간으로 터빈의 최적 효율을 유지하는 제어기를 제안한다. 속이 빈 실린더 형태의 챔버에 임펄스 터빈과 이상적인 회전형 발전기가 달려있는 모델을 도입하고, 발전기의 말단에 연결된 부하를 제어함으로써, 터빈이 항상 최고의 효율을 유지할 수 있음을 시뮬레이션을 통해 입증한다.



〈그림 1〉 진동 수주형 파력발전 시스템의 개요도

2. 진동수주형 파력발전 시스템의 모델링

파력발전 시스템은 다음과 같이 표현된다.

$$(M + \mu(\infty))\ddot{x} + k_h x + F_{rad} + \Delta p_c \cdot a_c = F_{exc} \quad (1)$$

$x$ 는 수주의 변위이며,  $M$ 은 챔버 내에 갇혀있는 수주의 질량,  $\mu(\infty)$ 는 파도의 진동수 무한대일 때 부가질량,  $k_h$ 는 부력에 의한 스프링계수,  $F_{rad}$ 는 방사감쇄력,  $\Delta p_c$ 는 챔버 내의 압력 변화,  $a_c$ 는 챔버의 수선면적, 그리고  $F_{exc}$ 는 기진력(excitation force)이다. 각 변수들은 다음과 같은 수식으로 표현된다.

$$M = \rho_w a_c (h_0 + x),$$

$$\Delta p_c = \Delta p_t \operatorname{sgn}(\dot{x}) + \frac{1}{2} \rho_a \left\{ \left( \frac{a_c}{a_r} \right)^2 - 1 \right\} \dot{x}^2,$$

$$F_{exc} = \int_{-\infty}^{\infty} A(\tau) f_{exc}(t - \tau) d\tau,$$

$$F_{rad} = \int_0^t K(t - \tau) \dot{x}(\tau) d\tau,$$

$$K(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} B(\omega) \cos(\omega t) d\omega.$$

$h_0$ 는 챔버의 평균 수주 높이,  $\Delta p_t$ 는 터빈 양단의 압력차,  $a_r$ 는 터빈의 단면적,  $A(\tau)$ 와  $B(\tau)$ 는 시간영역에서의 기진력과 방사감쇄력의 임펄스(impulse) 함수이다. 터빈 양단의 압력차  $\Delta p_t$ 에 의해 터빈의 로터는 회전하게 되며 다음의 터빈 방정식을 따른다[2].

$$\Delta p_t = C_a \cdot \beta \cdot \frac{1}{a_r} [V_x^2 + (r_r \cdot \Omega)^2], \quad (2)$$

$$\tau_t = C_t \cdot \beta \cdot r_r \cdot [V_x^2 + (r_r \cdot \Omega)^2], \quad (3)$$

$$\eta_t = \tau_t \cdot \omega \cdot (\Delta p_t \cdot Q)^{-1} \quad (4)$$

$C_a$ 와  $C_t$ 는 터빈의 압력과 토크 계수이며,  $r_r$ 은 로터의 평균 반지름을 의미하며,  $V_x (= a_d/a_r \cdot \dot{x})$ 는 터빈의 단면을 통과하는 공기의 유속,  $\Omega$ 는 로터의 각속도를 의미한다 그 외의 변수들은 다음과 같이 정의된다.

$$\beta = \frac{1}{2} \rho_a b_r l_r n_r, \quad (5)$$

$$\phi = V_x \cdot (r_r \cdot \Omega)^{-1}, \quad (6)$$

$$Q = V_x \cdot a_r \quad (7)$$

$\beta$ 는 터빈의 구조와 크기에 관련된 변수로 이루어진 상수로  $\rho_a$ 는 공기 밀도,  $b_r$ 은 로터 블레이드의 높이  $l_r$ 은 블레이드 코드 길이,  $n_r$ 은 블레이드 숫자를 의미한다.  $\phi$ 는 유동계수를 의미하며  $Q$ 는 시간당 터빈을 통과하는 유량을 의미한다.

식 (3)으로 로터의 공급된 토크는 터빈을 회전 시키며 다음의 식처럼 표현된다.

$$J\dot{\Omega} = \tau_t - b_g \Omega \quad (8)$$

$J$ 는 터빈의 회전관성,  $b_g$ 는 말단에 연결된 부하저항에 의해 공급되는 터빈의 감쇄계수를 의미한다.

### 3. 터빈의 최대 효율 운용 제어기 설계

터빈의 효율은 식 (4)와 같이 정의되며 이는 그림 2와 같은 그래프와 같은 특성을 지닌다. 그림 2에서 볼 수 있듯이 터빈의 효율은  $\phi = 1.05$ 에서 0.4325의 최대값을 갖는 것을 알 수 있는데, 따라서 유동 계수를 1.05로 유지한다면 터빈의 최대 효율을 보장할 수 있는 것이다. 문제는 식 (6)에서 알 수 있듯이,  $V_x$ 가 파도에 따라 지속적으로 변하는 양수라는 것이다. 따라서 우리는  $\phi$ 가  $\phi_d (= 1.05)$ 로 수렴하는 제어기를 제시한다.

$$b_g = \frac{1}{\Omega} \left\{ k_p \tilde{\Omega} + \gamma \tanh \left( \frac{\gamma \tilde{\Omega}}{\epsilon} \right) \right\} \quad (9)$$

여기서  $k_p$ 와  $\epsilon$ 는 임의의 양의 상수이며  $\gamma = J \max(\dot{\Omega}_d) + \max(\tau_t)$ 이며,  $\tilde{\Omega} = \Omega - \Omega_d$ 이다.  $\Omega_d$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\Omega_d(V, \phi_d) = \frac{V_x}{r_r \phi_d} \quad (10)$$

$\Omega_d$ 는  $V_x$ 에 따라 시변하는 값으로,  $V_x$ 가 물리적인 시변의 한계량을 갖기 때문에  $\dot{\Omega}_d$ 도 최대값이 존재하며 따라서  $\gamma$ 가 정의될 수 있다. 제어기의 목적은  $\tilde{\Omega}$ 을 0으로 수렴시키는 것이며 리아프노프 함수는 다음과 같이 정의된다.

$$V = \frac{1}{2} J \tilde{\Omega}^2 \quad (11)$$

이 리아프노프 함수의 시간에 대한 미분 함수에 (9)를 대입하게 되면 다음과 같이 전개된다.

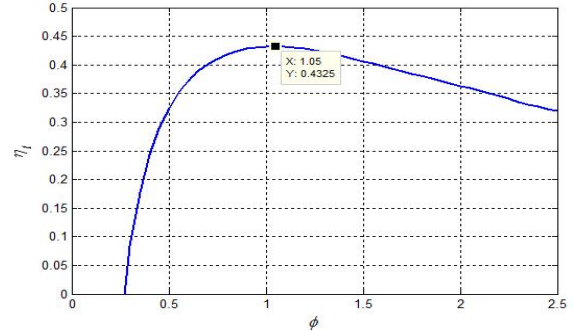
$$\begin{aligned} \dot{V} &\leq -k_p \tilde{\Omega}^2 + 0.2785\epsilon \\ &= -\frac{2k_p}{J} V + 0.2785\epsilon \end{aligned} \quad (12)$$

따라서  $\tilde{\Omega}$ 는 균등하고 궁극적으로 유계됨을 보장한다.

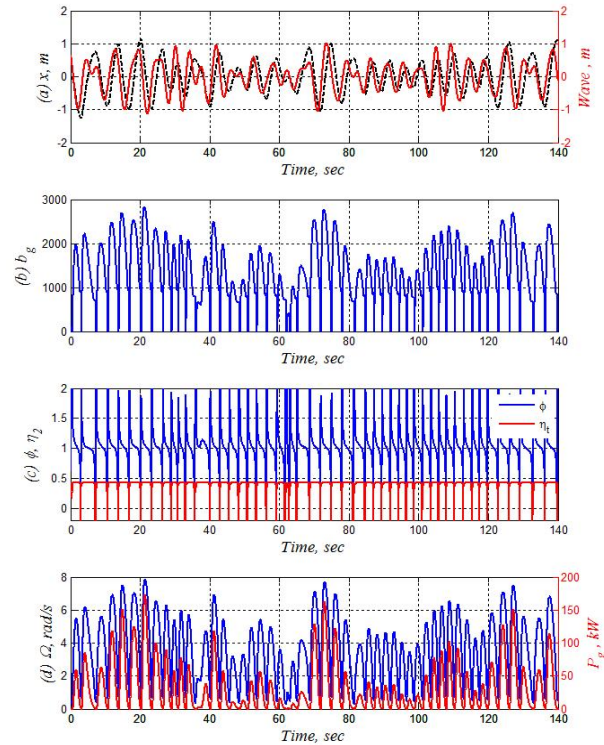
### 4. 시뮬레이션 결과

앞에서 언급한 모델링을 기반으로 비규칙 파랑 조건에서 시뮬레이션을 수행하였다. Runge kutta 방법을 이용하여 시간 영역에서 수행하였으며 샘플링 타임은 0.1초, 전체 시뮬레이션 시간은 140초이다. 챔버의 지름은 5미터, 터빈의 지름은 3미터로 가정하였으며 로터의 평균 반지름 2.9미터, 높이는 0.1미터, 코드길이는 0.2미터이고, 블레이드 날개 수는 100개이다. 로터의 회전 관성은  $200 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 이며, 파도는 파고 2m, 파크

주기 6초인 JONSWAP 파도 모델을 적용하였다[3]. 그림 3은 시뮬레이션 결과로 (a)에서 볼 수 있듯이, 불규칙한 파도모델이 적용되었으며, (9)에 따라 (b)와 같은 제어신호가 형성되었고, 결과적으로 (c)에서 볼 수 있듯이,  $\eta_t$ 가 거의 일정하다는 것을 볼 수 있다.  $\eta_t$ 가 규칙적으로 음의 값에서 그이 수직에 가까운 기울기로 최대 효율로 수렴하는 것을 볼 수 있는데, 이는  $V_x$ 가 주기적으로 0의 값을 갖기 때문에 생기는 결과이다.



〈그림 2〉 임펄스 터빈의 효율



〈그림 3〉 불규칙 파랑 조건에서의 시뮬레이션 결과

### 4. 결 론

본 논문에서는 진동수주형 파력발전기의 효율을 증대할 수 있도록, 터빈의 효율이 항상 최대값을 유지할 수 있는 제어기를 제안하였으며, JONSWAP 모델의 불규칙한 파랑환경에서 제어기가 잘 작동함을 시뮬레이션을 통해 입증하였다.

### [참 고 문 헌]

- [1] A. de O Falcão, "Control of an oscillating-water column wave power plant for maximum energy production," Applied Ocean Research, vol. 24, no. 2, pp. 73-82, 2002.
- [2] H. Maeda, S. Santhakumar, T. Setoguchi, M. Takao, Y. Kinoue, and K. Kaneko, "Performance of an impulse turbine with fixed guide vanes for wave power conversion," Renewable Energy, vol. 17, no. 4, pp. 533-547, 1999.
- [3] Y. Goda, Random seas and design of maritime structures, World Scientific, 2010.