

## AWS형 파력발전 시스템의 최대전력추종 알고리즘 개발

성화창\*, 박진배\*, 주영훈\*\*

연세대학교 전기전자공학과\*, 군산대학교 로봇제어시스템 공학과\*\*

### Development of Maximum Power Point Tracking Algorithm for AWS-type Power System

Hwa Chang Sung\*, Jin Bae Park\*, Young Hoon Joo\*\*  
Yonsei University\*, Kunsan National University\*\*

**Abstract** - 본 논문에서는 AWS형 파력발전 시스템의 최대전력 추종(Maximum Power Point Tracking: MPPT)을 위한 알고리즘 개발 기법에 대한 제안을 하고자 한다. AWS형 파력발전 시스템은 2004년 포르투갈에서 제안된 파도에너지 변환장치로, 해저에 위치하여 전력을 생산하는 특징을 지니고 있다. 파도의 상하 운동에 맞추어 AWS의 주요 부위인 본체가 움직이기 때문에 전력 생산량이 일정치 못하며, 특히 계절 및 환경에 따른 영향을 많이 받게 된다. 이러한 문제점을 해결하기 위한 방법으로, 신재생 발전에서 많이 활용되는 MPPT 제어 기법을 제안하게 된다. 제안된 기법의 활용을 통해 AWS형 파력발전 시스템의 전력 생산성 향상 및 전력 안정도에 대한 연구를 수행하게 된다.

#### 1. 서 론

화석연료의 고갈에 따라 대두된 에너지 문제의 심각성은 시간이 지남에 따라 점점 더 심해지고 있다. 이를 해결하기 위한 방안으로 정부 차원에서 연구되고 있는 것이 태양광과 풍력으로 대표되는 신 재생에너지이다. 해당 연구들은 이미 발전 단가가 구축되어 전력 생산이 이루어지고 있으며, 많은 연구자들에 의한 추가 연구 역시 활발히 진행되고 있다. 그러나 늘어나는 전력 수요를 감당하기 위해서는 좀 더 다양한 전력 생산기반을 갖추어야 할 필요성이 있으며, 해양에너지에 주목하기 시작한 이유도 바로 이 때문이다. 현재 해양에너지에서 연구되고 있는 분야는 조력, 해양 온도차, 파력발전 등으로 구분되고 있으며, 본 논문에서 다루고자 하는 것은 파도의 힘을 이용한 발전 시스템 구축이다.

AWS형 파력발전 시스템은 2004년 포르투갈 (그림 1 참조)에서 처음 제안된 발전 기법으로 해저에 부착된 본체와 가동부에 위치한 선형 영구자석 발전기(linear permanent magnet generator: LPMG)로 구성되어 있다. 파도의 상하 운동에 따라 움직이는 LPMG에 의해 전력 생산이 가능케 되며, 해저에 위치해 있다는 장점으로 인해 태풍 등에 의해 유실될 염려가 없다는 장점이 있다. 문제는 -다른 신 재생발전 시스템 구축에서도 마찬가지로 지적된 사안이지만- 파도의 불안정한 움직임 때문에 전력 생산량이 일정치 못하며, 이는 곧 전력 불안정성이 발생할 수 있다는 우려를 낳게 된다는 점이다.

본 논문에서는 기구적 혹은 설계적 측면이 아닌 제어 이론적 접근을 통해 이와 같은 문제점을 해결할 수 있는 방안을 찾고자 한다. 풍력발전에서 주로 연구되었던 최대전력추종(maximum power point tracking: MPPT)은 실시간으로 변화하는 바람에 대해 제어 입력을 조절함으로써 전력 생산량을 최대화하는 기법이다. 파도의 움직임에 의해 생산되는 전력이 결정되는 파력발전의 경우도 MPPT 기법의 활용성이 충분할 것으로 판단되어 진다. 해당기법의 활용을 통해 개선된 AWS형 파력발전 시스템을 구축하고자 하는 것이 최종 목표이다.

#### 2. 시스템 및 전력추종 개요

##### 2.1 AWS형 파력발전 시스템

AWS형 파력발전 시스템은 속이 빈 실린더(cylinder), 덮개(lid) 그리고 부유물(floater)로 구성되어 있으며, 실린더 안은 공기로 가득 찬 채 바닥에 고정되어 있으며, 파도에 따라 부유물은 수직 상하운동을 하게 된다. 파도가 밀려오면 파도의 무게에 따라 압력이 발생하게 되고 이는 실린더 하향운동으로 진행되며, 이러한 상하 움직임에 맞추어 내부에 존재하는 LPMG가 전력을 발생시키게 되는 형태이다. 파도의 힘에 의해 작동하는 발전시스템이기 때문에, 파도의 주거나 파고의 크기가 클수록 발전량은 증가하며, 내부 LPMG 구성을 얼마나 효율적으로 하는가에 따라 높은 발전량이 기대되기도 한다. AWS형 파력발전 시스템은 파도의 상하 움직임에 따라 전력을 생산하는 기기인 만큼, 파도의 최고/최저점에 따른 전력 생산량의 차이가 현저히 드러나게 된다. 다시 말하면, 파도의 최고/최저점에 맞추어 AWS가 움직이게



<그림 1> AWS형 발전시스템 모델 (포르투갈, 2004)

된다면 더욱 효과적인 전력 생산을 가능케 할 수 있다는 것이다.

##### 2.2 퍼지규칙에 기반 한 전력추종

일반적인 전력 추종(power regulation) 문제는 다음과 같은 제어 목적(control objective)으로 나타내어진다.

$$P_i - P_d \rightarrow 0 \text{ as } t \rightarrow \infty \quad (1)$$

여기서  $P_d$ 는 이상적인 전력(desired power)을 의미한다. 비선형성을 효율적으로 고려할 수 있는 다음과 같은 Takagi-Sugeno (T-S) 퍼지시스템을 고려하자. 퍼지 시스템은 IF-THEN 규칙의 결합으로 구성되어 있다.

$$\begin{aligned} R^i: & \text{IF } z_1(t) \text{ is } F_1^i \text{ and } \dots \text{ and } z_n(t) \text{ is } F_n^i \\ & \text{THEN } y(t) = A_i x(t) + B_i u \end{aligned} \quad (2)$$

여기서  $R^i$ 는  $i$  번째 규칙,  $z_h(t)$ 는  $h$  번째 전건부 변수를 의미한다. 중심값-평균 비퍼지화, 곱셈 추론, 싱글톤 퍼지화를 사용하면 시스템 (2)의 전역 동특성은 다음과 같이 표현 된다:

$$\dot{x} = \sum_{i=1}^q h_i(z(t))(A_i x(t) + B_i u(t)) \quad (3)$$

여기서

$$w_i(z(t)) = \prod_{j=1}^n F_{ji}(z_j(t)), h_i(x) = \frac{w_i(z(t))}{\sum_{i=1}^q w_i(z(t))}$$

$$h_i(x) \geq 0, \sum_{i=1}^q h_i(z(t)) = 1$$

추정 오차(regulation error)는 아래와 같이 구성된다.

$$\tilde{x}(t) = x(t) - x_d(t) \quad (4)$$

양변에 시간 미분을 취해주면,

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) = & \sum_{i=1}^q h_i(z(t))A_i x(t) - \sum_{i=1}^q h_i(z(t))A_i x_d(t) \\ & + \sum_{i=1}^q h_i(z(t))B_i u(t) + \sum_{i=1}^q h_i(z(t))A_i x_d(t) - \dot{x}_d(t) \end{aligned}$$

여기서 제어 입력을 아래와 같이 설정 된다.

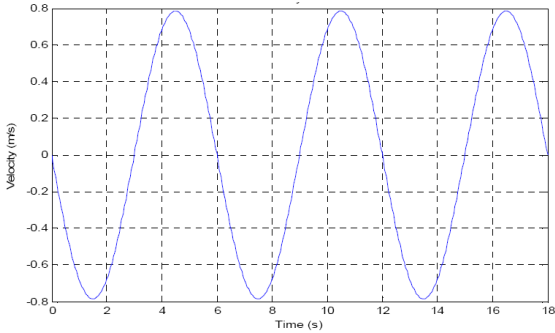
$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^q h_i(z(t))B_i u(t) = & \sum_{i=1}^q h_i(z(t))B_i u(t) \\ & - \sum_{i=1}^q h_i(z(t))A_i x_d(t) + \dot{x}_d \end{aligned}$$

따라서 전력 추종문제는 다음과 같이 퍼지 시스템에 대한 안정화 문제로 귀결된다.

$$\dot{x}(t) = \sum_{i=1}^q h_i(z(t))A_i \tilde{x}(t) - \sum_{i=1}^q h_i(z(t))B_i u(t) \quad (5)$$

여기서  $\tilde{x}(t)$ 를 안정화 시킨다는 것은 시스템의 궤적  $x(t)$ 가 이상 궤적  $x_d(t)$ 를 따라간다는 것을 의미한다. 식 (1)에서의  $P_d$ 가  $x_d(t)$ 에 해당하며,  $P_i$ 는  $x(t)$ 에 대응된다.

### 3. AWS형 파력발전 시스템에서의 MPPT



<그림 2> 1.5m 높이에서의 파도 속도 변화

AWS형 파력발전 시스템에서의 최대전력추종을 위해 우선적으로 고려되어야 할 사항은 파도의 특성이다. 본 논문에서는 파도의 높이가 1.5m, 웨이브 주기가 6초인 파도 특성을 고려하게 되며, 그림 2는 해당 파도의 정점 속도 (peak velocity) 변화를 나타낸다. 이는 아래의 식에 의해 결정된다.

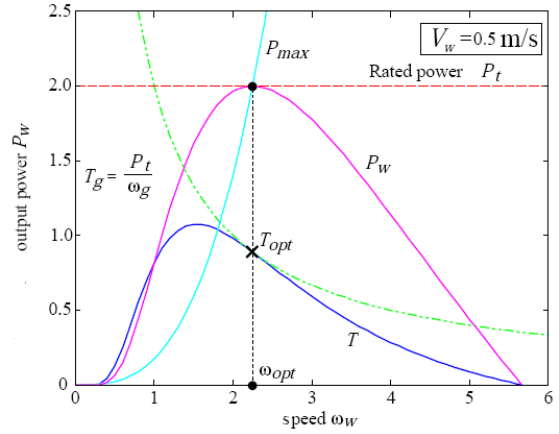
$$w_c = \frac{\pi H_0}{T_0} \quad (6)$$

여기서  $H_0$ 는 파도의 높이,  $T_0$ 는 파도 주기를 나타내며,  $w_c$ 는 파도의 정점 속도를 나타낸다. 제안된 파도에 의해 움직이는 LPMG의 변위 값에 따라 키네틱 에너지  $\Delta E$ 가 발생하며, 해당 변위 움직임을  $w_{min}$ 과  $w_{max}$ 로 정의한다. 이때,  $\Delta E$ 는 다음과 같이 계산된다.

$$\Delta E = \frac{1}{2} J_{eq} (w_{max}^2 - w_{min}^2) \quad (7)$$

여기서  $J_{eq}$ 는 운동변환상수이다.  $\Delta E$ 는 시간함수와의 계산을 통해  $P_t$ 로 나타나며, 최대전력에 대한 값은 앞서 설정되었듯이  $P_d$ 로 표현된다. 일반적인 발전 시스템에서  $\Delta E$ 를 통해 생산되는 전력 값  $P_t$ 의 경우 발전기 토크에 관한 상관함수로 재해석된다. 반면, AWS형 파력발전 시스템의 경우 발전기 형태가 회전자 기반이 아닌 선형움직임 기반이기 때문에 속도에 대한 back force 값으로 계산된다. 본 논문에서는 back force에 대한 값을 기존의 토크와 유사한 값으로 가정하여 MPPT에 대한 이론을 전개하고자 한다. 이는 식 (5)에 대입되는 입력 값으로, 다음 식으로 표현된다.

$$\Delta T = T_g - T_{g,opt} \quad (8)$$



<그림 3> 0.5m/s의 파도 움직임에 따른 MPPT

$$\Delta V_w = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t V_w dt - V_w \quad (9)$$

여기서  $\Delta T$ 는 back force 값에 대한 대응값  $T_g$ 의 변화량을 의미하며, 이는 기존 발전 시스템에서의 토크 값 변화량과 유사하다. 그리고  $\Delta V_w$ 는 앞으로 예측되는 파도의 변화량으로, 그림 2에서 설정된 변위 및 시간에 따라 계산되어진다. 식 (8)과 (9)를 통해 계산된 AWS형 파력발전 시스템의 0.5m/s에서의 MPPT 움직임은 그림 3과 같이 나타내어진다. 해당 그림에서 살펴볼 수 있듯이,  $T_g$ 는 발전 기댓값  $P_t$ 와 파도 높이  $w_g$ 에 의해 계산되며,  $w_g$  값에 따라 곡선 형태의 움직임을 보여주게 된다. 최대 전력 기댓값을 충족하기 위한  $T_g$ 와  $w_g$ 의 적정 값은 각각  $T_{opt}$ 와  $w_{opt}$ 로 나타나며, 해당 값을 충족하기 위한 곡선이 연파랑의 증가함수 곡선으로 표현된다. 퍼지 규칙에 기반 하여 세워진 안정화 해석으로 전환된 식을 통해 제어 입력 값을 통해, 그림 3과 같은 최대 전력을 추종하는 움직임을 보이고자 하는 것이 최종 목표이다.

### 4. 결 론

본 논문에서는 AWS형 파력발전 시스템의 MPPT를 위한 알고리즘 개발 기법에 대한 제안을 퍼지 규칙에 기반 한 기법 설정을 통해 제안하였다. 전력추종문제는 퍼지 안정도 문제로 전환하여 재해석 되었으며, 일정 파도의 움직임에 따른 전력 생산량 변화를 나타내었다. 이를 통해 파도 속도에 따른 MPPT 변화를 추종해 보았으며, 안된 기법의 활용을 통해 AWS형 파력발전 시스템의 전력 생산성 향상 및 전력 안정도에 대한 연구를 수행하게 된다.

### 감사의 글

본 연구는 2011년도 두뇌한국21 사업과 2011년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원 (KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다. (No. 20103020070070)

### [참 고 문 헌]

- [1] A. A. Schacher, "Novel Control Design for a Point Absorber Wave Energy Converter", Thesis for Masters of Science, Oregon State University, June, 2007
- [2] M. G. S. Prado, F. M. Damen, and H. Polinder, "Modeling and Test Results of the archimedes Wave Swing", Proc. of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy, vol. 220, no. 9, pp. 855-868, 2006
- [3] W. Feng, Z. Xiao-Ping, J. Ping, and M. Sterling, "Modeling and Control of AWS-Based Wave Energy Conversion System Intergrated into Power Grid", IEEE Transactions on Power Systems, vol. 23, no. 3, pp. 1196-1204, 2008