

웨이브 에너지 발전 시스템의 네트워크 퍼지 제어

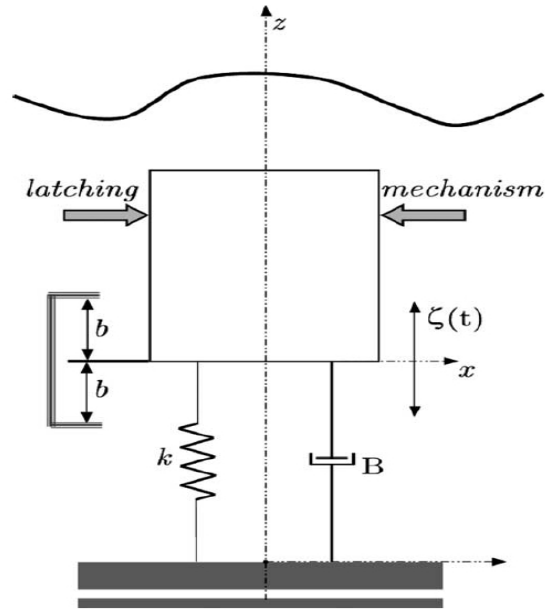
송민국\*, 박진배\*, 주영훈\*\*  
연세대학교\*, 군산대학교\*\*

Networked Fuzzy Control for Wave Energy Converter System

Min Kook Song\*, Jin Bae Park\*, Young Hoon Joo\*\*  
Yonsei University\*, Kunsan National University\*\*

**Abstract** - 본 논문은 웨이브 에너지 발전 시스템의 네트워크 제어기 설계에 대해서 논의한다. 기계적인 오실레이터의 움직임 운동 방정식의 해를 구하면서, 시스템의 에너지 손실의 효율성을 향상 시키기 위하여 퍼지 제어 기법을 도입한다. 다양한 초기 조건에서의 바다의 움직임 방정식의 해를 수치적으로 해석하기 위하여, 손실되는 에너지의 크기는 알 수 있다고 가정한다. 네트워크 상에서 발생하는 시간 지연을 모델링하며, 전체 웨이브 에너지 발전 시스템은 시간 지연을 가지는 웨이브 에너지 네트워크 제어 시스템이 된다. 제안하는 퍼지 제어기와 웨이브 에너지 발전 시스템은 같은 퍼지 멤버쉽 함수를 가지게 모델링한다. 전체 네트워크 폐루프 시스템의 안정도를 분석하고, 웨이브 에너지 발전 시스템을 안정화 시키는 퍼지 제어기 설계를 위한 충분조건을 유도한다. 시간 지연을 가지는 네트워크에서 퍼지 제어 기법을 이용하여 웨이브 에너지 시스템의 에너지 손실을 파악한다.

본 논문에서는 그림과 같은 웨이브 에너지 발전 시스템을 고려한다.



<그림 1> 웨이브 에너지 발전 시스템

웨이브 에너지 발전 시스템의 운동 방정식은 다음과 같다.

$$(M+\mu)\ddot{\zeta}(t) + \sum_{i=1}^N I_i^R(t) \dot{\zeta}(t) + (B+Gu(t))\zeta(t) + k\zeta(t) + k\zeta(t-d(t)) = F_{ex}(t)$$

$$\dot{I}_i^R(t) = \beta_i^R(t)I_i^R(t) - \beta_i^L I_i^L(t) + \alpha_i^R \zeta(t)$$

$$\dot{I}_i^L(t) = \beta_i^L(t)I_i^L(t) + \beta_i^L I_i^R(t) + \alpha_i^L \zeta(t)$$

Takagi-Sugeno(T-S) 퍼지 모델은 다음과 같은 퍼지 규칙을 사용하여 웨이브 에너지 발전 시스템을 나타낸다.

Rule *i* :

$$IF z_1 \text{ is } \Gamma_1^i, \dots, \text{ and } z_n \text{ is } \Gamma_n^i, \quad (1)$$

$$THEN \dot{x}(k) - D\dot{x}(k-g(k)) = Ax(k) + A_d x(k-\tau(k)) + Bu(k), \quad (1 \leq i \leq r)$$

여기서  $\Gamma_h^i (h=1,2,\dots,c)$ 는 *i*번째 규칙에서 *h*번째 전반부 변수의 퍼지 집합이며, *c*는 퍼지 규칙의 개수를 표시한다. *A*, *A<sub>d</sub>*, *B*, *C*와 그리고 *D*는 알려진 차원의 행렬이며,  $z_h(t)$ 는 *h*번째 전반부 변수의 퍼지 집합이며, *r*는 퍼지 규칙수를 나타낸다.

퍼지 규칙과 함께 (1)에서 사용된 퍼지 모델을 바탕으로 퍼지 제어기의 퍼지 규칙은 다음과 같다.

Rule *i* :

1. 서 론

웨이브 에너지 발전 시스템에 관한 연구가 지속적으로 이루어지고 있다. 일반적으로 웨이브 에너지 발전 시스템은 다른 신재생 에너지 발전 시스템에 비해 그 연구가 미흡한 분야이지만, 자원의 보유량과 날씨나 위치에 따른 제약 조건이 다른 신재생 에너지 발전에 비해 작기 때문에 발전 가능성이 큰 분야이다. 현재까지의 웨이브 에너지 발전 시스템은 표준적인 발전 시스템이 개발 완료된 분야가 아니기 때문에 다양한 형태와 방법에 따른 웨이브 에너지 발전 시스템이 개발 발전되고 있다 [1-4]. 그러나, 어떠한 웨이브 에너지 발전 시스템이 개발되더라도 웨이브 에너지 발전 시스템 자체는 네트워크에 의해서 지상에서 제어해야 하는 단점이 존재한다. 따라서, 이러한 웨이브 에너지 발전 시스템을 제어하기 위한 네트워크 제어 시스템이 필요하다. 특히 웨이브 에너지 발전 시스템 자체는 복잡한 비선형 발전 시스템이므로, 퍼지 제어를 통해서 비선형 제어를 수행할 수 있다. 네트워크 제어 시스템에는 시스템의 구조적 특성상 시간 지연 현상 및 데이터 손실이 발견된다. 이러한 시간 지연 및 데이터 손실을 포함한 네트워크 제어 시스템은 시간지연에 의해 시스템의 성능이 떨어지고, 심지어는 시스템이 불안정해 질수도 있다.

따라서 본 연구에서는 지금까지의 연구에서 다루지 못한 네트워크 제어 시스템을 이용한 웨이브 에너지 발전시스템의 안정도 분석 및 제어기 설계를 연구한다. 기계적인 오실레이터의 움직임 운동방정식의 해를 구하면서, 시스템의 에너지 손실의 효율성을 향상 시키기 위하여 퍼지 제어 기법을 도입한다. 다양한 초기 조건에서의 바다의 움직임 방정식의 해를 수치적으로 해석하기 위하여, 손실되는 에너지의 크기는 알 수 있다고 가정한다. 네트워크 상에서 발생하는 시간지연 현상과 데이터의 양(버퍼의 용량 제한)에 대한 가정아래에서 네트워크 제어 시스템의 기능을 향상 시킨다. 실제적으로 제어기에서 받을 수 있는 데이터의 양은 한정적이며 이러한 조건도 시스템의 안정도 및 제어기 설계에 고려할 중요한 변수중 하나이다. 전체 네트워크 폐루프 시스템의 안정도를 분석하고, 웨이브 에너지 발전 시스템을 안정화 시키는 퍼지 제어기 설계를 위한 충분조건을 유도한다. 시간 지연을 가지는 네트워크에서 퍼지 제어 기법을 이용하여 웨이브 에너지 시스템의 에너지 손실을 파악한다.

2. 본 론

$$\begin{aligned} &IF z_1(t) \text{ is } \Gamma_1^+, \dots, \text{ and } z_n(t) \text{ is } \Gamma_n^+, \\ &THEN u(t) = K_i x_e(t) \\ &\quad \dot{x}_e = \hat{A}x_e(t) + \hat{B}u(t) \end{aligned} \quad (2)$$

중심값-평균 비퍼지화, 곱셈추론, 싱글톤 퍼지화를 사용하면 퍼지 추론 규칙 (2)의 전역 동특성은 다음과 같이 표현된다. 전체 버퍼의 용량 제한을 고려한 퍼지 네트워크 시스템 시스템은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r \mu_i(x(t)) \mu_j(x(t)) [A_i x(t) \\ &\quad + B_i K_j x(t) + A_{0i} x(t - \tau(t)) + D_{1i} \dot{x}(t - d(t))] \\ x(t) &= \phi(t), \quad t \in \{-\tau - \max\{d, \tau\}, \dots, 0\}. \end{aligned} \quad (3)$$

본 논문에서는 웨이브 에너지 발전 시스템을 위한 네트워크 퍼지 시스템 (7)의 안정도를 판별하고 제어기 이득값을 설계하고 네트워크 퍼지 제어기 이득 값  $K_i$ 를 설계하기 위한 조건을 유도한다.

**정리 1.** 시간 지연을 가지는 퍼지 네트워크 제어 시스템 (3)은 다음의 행렬 부등식이 만족하는 행렬  $X = X^T > 0$ ,  $E_i (i = 1, 2, 3)$ ,  $\bar{K}_j (j = 1, 2, \dots, r)$ ,  $Y_{i1}, \bar{Z}_i = \bar{Z}_i^T > 0$ ,  $X_i = X_i^T > 0$ 가 존재한다면, 다음의 제어기 이득 값을 이용하여 제어가능하다.

$$K_i = \bar{K}_i X^{-T}$$

$$\begin{bmatrix} \Psi d_1 \bar{X} A_i^T + d_1 N_j^T B_i^T - I & \bar{Y}_{i1} - B_i N_j & \bar{X} E_i^T + \bar{K}_j^T E_{ib}^T \\ * & \bar{X}_{i2} + \rho H - 2d_1 \bar{X} & \bar{Y}_{i2} - d_1 B_i N_j & 0 \\ * & * & \bar{Z}_{i1} + \bar{Z}_{i2} - \frac{1}{\rho} H & \bar{K}_j^T E_{ib}^T - I \\ * & * & * & -I \end{bmatrix} < 0 \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} \bar{X}_{i1} & \bar{Y}_{i1} \\ * & \bar{Z}_{i1} \end{bmatrix} > 0$$

$$\begin{bmatrix} \bar{X}_{i2} & \bar{Y}_{i2} \\ * & \bar{Z}_{i2} \end{bmatrix} > 0 \quad (5)$$

증명) 공간의 제약으로 생략. ■

### 3. 모의 실험

주어진 웨이브 에너지 발전 시스템에 네트워크 퍼지 제어를 이용하여 시스템의 에너지 손실에 대하여 논의한다. 웨이브 에너지 발전 시스템의 성능을 파악하기 위하여 랜덤 파도에서의 에너지 손실에 대하여 먼저 논의한다. 랜덤 파도는 다음과 같이 발생시킨다.

$$S(w) = \frac{A}{w^5} \exp(-\frac{B}{w^4})$$

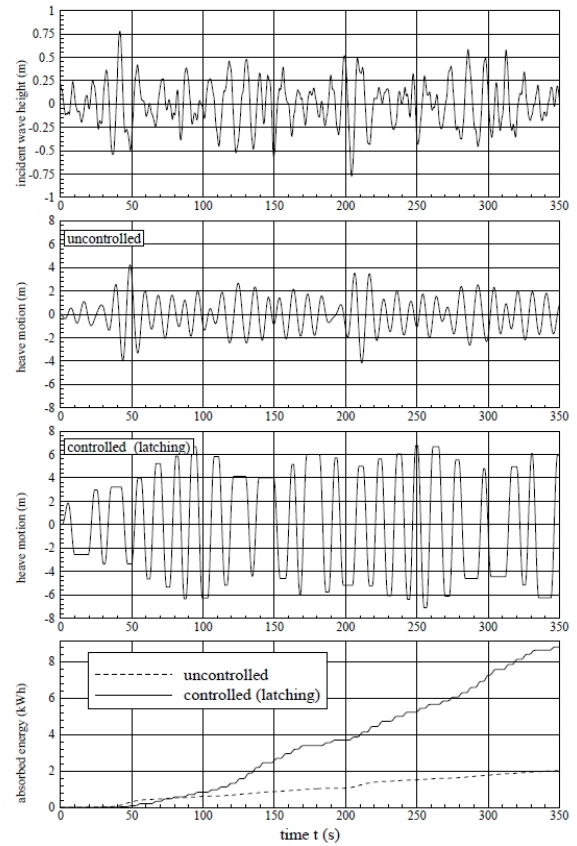
여기서,  $A = \frac{173}{T_1^4} H_{1/3}^2$  이고,  $B = \frac{691}{T_1^4}$ ,  $T_1$ 은 파크 주기를 의미하며,  $H_{1/3}$ 은 파도의 최고 높이를 의미한다. 파도의 분포는 0.01rad/s에서부터 3rad/s사이의 300구간을 기준으로 랜덤 페이즈 발생 함수를 이용하여 발생시킨다.

시간 지연 현상과 비선형 퍼지 모델링 과정을 통한 손실을 고려하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다. 퍼지 제어를 통하여 웨이브 에너지 발전 시스템의 움직임 부분을 크게 향상시킬 수 있다. 즉, 들어오는 파도에 의해서 웨이브 에너지 발전 시스템의 바디의 움직임을 충분히 확보할 수가 있다. 웨이브 에너지 발전 시스템은 지상에서 떨어진 거리에 설치하기 때문에 본 연구에서와 같은 네트워크 제어가 필요하며, 모의실험 결과를 다음의 그림을 통하여 확인할 수 있다.

### 4. 결 론

본 논문은 웨이브 에너지 발전 시스템의 네트워크 제어기 설계에 대해서 논의하였다. 기계적인 오실레이터의 움직임 운동 방정식의 해를 구하면서, 시스템의 에너지 손실의 효율성을 향상 시

키기 위하여 퍼지 제어 기법을 도입하였다. 네트워크상에서 발생하는 시간 지연을 모델링하였으며, 전체 웨이브 에너지 발전 시스템은 시간 지연을 가지는 웨이브 에너지 네트워크 제어 시스템이 되었다. 전체 네트워크 페루프 시스템의 안정도를 분석하고, 웨이브 에너지 발전 시스템을 안정화 시키는 퍼지 제어기 설계를 위한 충분조건을 유도하였다.



〈그림 2〉 제어기 설치 유무에 따른 웨이브 에너지 발전 시스템의 움직임 분석 결과

[감사의 글]

본 연구는 2011년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술연구원 20103020070070의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.

[참고 문헌]

- [1] A. babarit, G. Duclos, and A. H. Clement, "Comparison of latching control strategies for a heaving wave energy device in random sea," Applied ocean research, vol. 26, pp. 227-238, 2004.
- [2] A. Babarit, A. H. Clement, "Optimal latching control of a wave energy device in regular and irregular waves", vol. 28, No. 2, pp. 77-91, 2006.
- [3] N. M. kimoulakis, A. G. kladas and J. A. Tegopoulos "Power Generation Optimization From Sea Waves by Using a Permanent Magnet Linear Generator Drive," IEEE Magnet, vol. 44, No. 6, pp. 1530-1533, 2008.
- [4] N. M. kimoulakis, A. G. kladas and J. A. Tegopoulos, "Cogging Force Minimization in a Coupled Permanent Magnet Linear Generator for Sea Wave Energy Extraction Applications," IEEE Magnet, vol. 45, No. 3, pp. 1246-1249, 2009.
- [5] B Chen, X Liu, and S Tong., "Robust fuzzy control of nonlinear systems with input delay," Chaos Sol and Frac, vol. 37, No.3, pp. 894-901, 2006