

**최대 전력 추종을 위한 디지털 퍼지 제어기 설계**

성화창\*, 박진배\*, 유태일\*\*, 주영훈\*\*,  
\*연세대학교 전기전자공학과, \*\*군산대학교 전자정보공학과

**Development of the Digital Fuzzy controller for Maximum Power Tracking**

Hwa Chang Sung, Jin Bae Park, Young Hoon Joo and Tae Il Yoo  
\*Department of Electrical and Electronic Engineering, Yonsei University  
\*\*School of Electronic and Information Engineering, Kunsan National University

**Abstract** - 본 논문에서는 하이브리드 발전 시스템에서의 최대 전력 추종을 위한 디지털 퍼지 제어기 설계를 목표로 한다. 하이브리드 발전 시스템은 풍력과 태양광, 두 개의 발전 시스템으로 구성된다. 각 발전기에서 전압과 전류는 일반적으로 비선형 관계에 있기 때문에, 퍼지 모델 기반 제어를 사용하여 비선형성을 효율적으로 제어하게 된다. 그리고 마이크로프로세서 기반 제어 시스템의 구축을 위하여 최신 디지털 재설계 기법을 사용, 디지털 퍼지 제어기를 설계하게 된다. 마지막으로 제안된 플랫폼을 통한 실험으로써 본 논문의 우수성을 입증하고자 한다.

**2. 본 문**

**2.1 태양광 및 풍력 발전 시스템**

일반적으로 태양광 및 풍력 발전 시스템은 다음과 같이 복잡한 비선형 요소를 가지고 있다. 기본적으로 태양광과 풍력 발전 시스템은 각각의 V-I 관계에서 비선형성을 보이게 된다. 나머지 파라미터 값들은 논문 [7]을 참고 하였다.

- 태양광 발전 시스템의 비선형 동역학 방정식

$$\begin{aligned} \dot{v}_{pv} &= \frac{i_{pv}}{C} - \frac{i_s}{C} u_{pv} \\ i_s &= -\frac{v_b}{L} + \frac{v_{pv}}{L} u_{pv} \\ i_{pv} &= n_p I_{ph} - n_p I_{rs} \left( e^{\frac{q(v_{pv} + i_{pv} R_s)}{n_s k T}} - 1 \right) \end{aligned} \quad (1)$$

- 풍력 발전 시스템의 비선형 동역학 방정식

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \begin{bmatrix} \dot{i}_q \\ \dot{i}_d \\ \dot{\omega}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} g_1 \\ g_2 \\ g_3 \end{bmatrix} u_w \\ &= \begin{bmatrix} -\frac{r_s}{L} i_q - \omega_c i_d + \frac{\omega_c \sigma_{cr}}{L} \\ -\frac{r_s}{L} i_d + \omega_c i_q \\ \frac{P}{2J} (T_t - \frac{3}{2} P_{sr} i_q) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{\pi v_b i_q}{3\sqrt{3}L\sqrt{i_q^2 + i_d^2}} \\ -\frac{\pi v_b i_d}{3\sqrt{3}L\sqrt{i_q^2 + i_d^2}} \\ 0 \end{bmatrix} u_u \\ i_w &= \frac{\pi}{2\sqrt{3}} \sqrt{i_q^2 + i_d^2} u_w \end{aligned} \quad (2)$$

위와 같은 복잡한 비선형성을 제어하기 위해 본 논문에서는 Takagi-Sugeno (T-S) 퍼지 시스템을 이용한다. T-S 퍼지 시스템은 국소 선형 상태 공간 방정식들의 convex 조합된 형태를 가진다. 이러한 퍼지 시스템은 Lyapunov 안정도 관점에서 안정도를 판별할 수 있으며 LMI를 이용해서 편리하게 제어 이득을 얻을 수 있는 장점을 가진다. 최대 전력 추종기 설계를 위해서 각각의 서브 발전 시스템, 즉 태양광과 풍력의 전력 시스템은 다음과 같이 표현될 수 있다.

- 태양광 발전 시스템의 전력

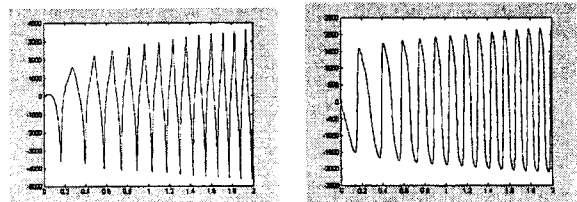
$$P_s = i_s v_b \quad (3)$$

- 풍력 발전 시스템의 전력

$$P_w = \frac{\pi v_b}{2\sqrt{3}} \sqrt{i_q^2 + i_d^2} u_w \quad (4)$$

그림 2가 최대 전력 추종을 위한 퍼지 제어기 개발을 위한 전체 제어 시스템을 나타낸다.

**2.2. 퍼지 모델링**



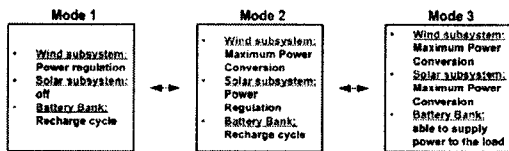
**<그림 3> V-I 비선형 특성**

**1. 서 문**

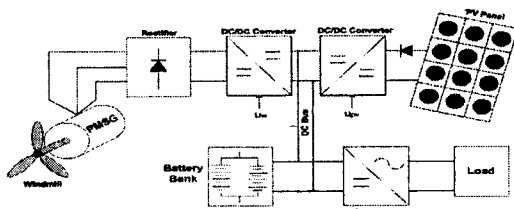
핵 연료와 화석 연료의 급격한 소비 상승에 기인한 자원 부족으로 인해 대체 에너지 기술이 전 세계에 많은 관심을 끌고 있다. 단일 대체에너지를 이용한 발전 방식은 날씨에 따라 에너지 공급부족 현상을 야기 시킬 수 있으며 추가적으로 디젤발전기를 사용해야 한다. 하이브리드 발전 시스템은 단일 대체에너지를 이용한 발전 방식과 달리 에너지 공급 부족 현상을 줄일 수 있으며, 에너지 저장장치를 공유함으로써 단일 발전 시스템에서 사용하는 외부 디젤 발전기를 사용하지 않는다는 장점이 있다. 그러나 이러한 하이브리드 발전 시스템을 실용화하기 위해서는 여러 가지 문제가 발생한다. 그 문제점과 본 과제에서 해결하고자 하는 제어 방법은 다음과 같다:

1) 풍력과 태양광 발전기에서 V-I(전압-전류) 특성은 비선형 관계를 보여주기 때문에, 본 과제에서는 퍼지 모델 기반 제어를 사용하여 비선형 제어기를 설계한다. 2) 마이크로프로세서 기반 제어 시스템을 손쉽게 구현하기 위해서 본 과제에서는 디지털 재설계 기법을 통해 디지털 퍼지 제어기를 설계한다. 3) 하이브리드 발전 시스템에서 최대 전력 추종과 배터리 상태를 일정하게 유지하기 위해서 그림 1과 같이 세 가지 모드 상태에서 제어 목적이 변한다. 이를 해결하기 위해 본 과제에서는 하이브리드 발전시스템에 필요한 스위칭 디지털 제어기를 설계한다.

최종적으로, 본 과제에서는 그림 2와 같은 두 개의 서브 발전 시스템 (풍력과 태양광 발전시스템)으로 구성된 하이브리드 발전 시스템의 구현을 위한 디지털 퍼지 제어기를 개발하는 것을 목표로 한다.

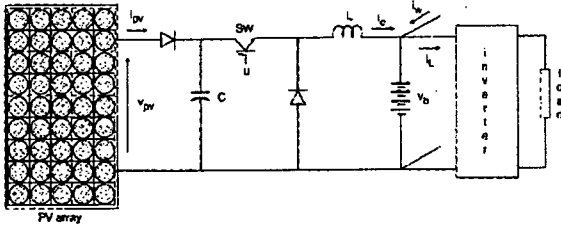


**<그림 1> 하이브리드 발전 시스템의 상황별 제어 목적**



**<그림 2> 제안된 하이브리드 발전 시스템**

주어진 태양광과 풍력 발전 시스템은 비선형성을 가지고 있기 때문에, 다음과 같은 퍼지 시스템으로의 모델링이 필요하다. V-I가 가지고 있는 비선형성은 다음 두 그래프에서 알 수 있다, 퍼지 모델링의 경우 그림 3과 같이 비선형성을 가지는 파라미터들의 최대, 최소치를 기준으로 하여 각각의 멤버십 함수값을 통한 가중치로써 비선형성을 해석하게 되며 태양광 발전의 구체적인 모델링 과정은 다음 그림을 바탕으로 하여 아래의 식과 같이 표현된다.



〈그림 4〉 태양광 시스템의 구조도

Photovoltaic System:

$$\begin{cases} \dot{X}_1 = A + X_2 Bu \\ \dot{X}_2 = B + X_1 Bu, \end{cases} \text{ for } X_1 \in [X_{1min}, X_{1max}], X_2 \in [X_{2min}, X_{2max}]$$

Fuzzy Modeling:

$$\begin{cases} R^1: \text{IF } X_1(t) \text{ is } \Gamma_1^1 \text{ and } X_2(t) \text{ is } \Gamma_2^1, \text{ THEN } \dot{X}(t) = A + B_1 x(t)u. \\ R^2: \text{IF } X_1(t) \text{ is } \Gamma_1^1 \text{ and } X_2(t) \text{ is } \Gamma_2^2, \text{ THEN } \dot{X}(t) = A + B_2 x(t)u. \\ R^3: \text{IF } X_1(t) \text{ is } \Gamma_1^2 \text{ and } X_2(t) \text{ is } \Gamma_2^1, \text{ THEN } \dot{X}(t) = A + B_3 x(t)u. \\ R^4: \text{IF } X_1(t) \text{ is } \Gamma_1^2 \text{ and } X_2(t) \text{ is } \Gamma_2^2, \text{ THEN } \dot{X}(t) = A + B_4 x(t)u. \end{cases}$$

where

$$\Gamma_1^1 = \frac{-x_2 + x_{2max}}{x_{2max} - x_{2min}}, \Gamma_1^2 = \frac{x_2 - x_{2max}}{x_{2max} - x_{2min}}, \Gamma_2^1 = \frac{-x_1 + x_{1max}}{x_{1max} - x_{1min}}, \Gamma_2^2 = \frac{x_1 - x_{1max}}{x_{1max} - x_{1min}}. \quad (5)$$

여기서  $X_1$ 이 가리키는 것은 태양 전지 내에서의  $v_{pv}$ 의 움직임이며,  $X_2$ 가 가리키는 것은  $i_b$ 의 움직임이다. 각각은 입력  $u$ 에 관계하여 비선형 관계를 유지하고 있으며, 4개의 퍼지 규칙으로 표현될 수 있다. 구현된 퍼지 규칙에서 알 수 있듯이, 태양광 시스템의 기본적 형태는 입력에 따른 affine 구조가 포함되며, 이에 따라 T-S 퍼지 규칙 결론부에 affine 파라미터가 나타나게 된다. 연속시간에서의 affine T-S 퍼지 시스템의 안정도를 고려하기 위하여 수치적인 블록 최적화 기법을 사용하게 된다. 그리고 안정도 조건은 선형 행렬 부등식 (LMIs) 형태로 변환되어 나타나게 되는데, 일반적인 LMI 조건이 아닌, 이차안정도 조건으로서 표현된다. 따라서 연속시간에서의 안정도 조건은 반복 LMI 조건으로서 드러나며, 다음 정리는 연속시간 affine T-S 퍼지 시스템 안정도를 표현한다.

정리 1: 행렬  $P=P^T>0$ ,  $\tau_{i0}$  가 존재하고  $F_i$  와  $\sigma_i$  가 충분한 공간을 가질때, 다음과 같은 LMIs 가 만족한다면 연속시간 affine T-S 퍼지 시스템은 점진적으로 안정하다[5].

$$\Lambda = \begin{pmatrix} \Lambda_{11} & \Lambda_{21}^T & 0 & 0 & F_i^T & F_j^T & PB_i & PB_j \\ \Lambda_{21} & \Lambda_{22} & \sigma_i^T & \sigma_j^T & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_i & -I & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_j & 0 & -I & 0 & 0 & 0 & 0 \\ F_i & 0 & 0 & 0 & -I & 0 & 0 & 0 \\ F_j & 0 & 0 & 0 & 0 & -I & 0 & 0 \\ B_i^T P & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1/2I & 0 \\ B_j^T P & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1/2I \end{pmatrix} < 0. \quad (6)$$

여기서 각 파라미터의 값은 아래와 같다.

$$\Lambda_{11} = A^T P + P A + A_i^T P + P A_i + Y_i^T Y_i + Y_n^T Y_n - Y_i^T (B_i^T P + F_i) - (B_i^T P + F_i)^T Y_i - Y_i^T (B_j^T P + F_j) - (B_j^T P + F_j)^T Y_n + z_i^T z_i$$

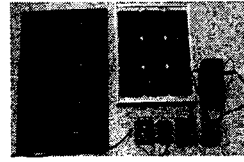
$$+ z_j^T z_j - z_i^T B_i^T P - P B_i z_i - Z_i^T B_j^T P - P B_j z_j - \sum_{q=1}^n \tau_{i0}^q J_{i0}^q$$

$$\Lambda_{21} = (\mu_i + \mu_j)^T P + y_i^T z_i + y_j^T z_j - \sigma_i^T z_i - \sigma_j^T z_j - y_i^T B_i^T P$$

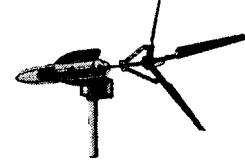
$$- y_j^T B_j^T P - y_i^T B_j^T P - \sum_{q=1}^n \tau_{i0}^q \mu^T v_{i0}^q$$

$$\Lambda_{22} = y_j^T y_i + y_i^T y_j - y_i^T \sigma_j - \sigma_j^T y_i - y_j^T \sigma_i - \sigma_i^T y_j - \sum_{q=1}^n \tau_{i0}^q v_{i0}^q \quad (7)$$

모의실험을 통해서 검증된 제어기를 사용하여 다음 그림과 같은 간단한 실험 장비를 구성하여 연구 과제의 결과를 검증한다.

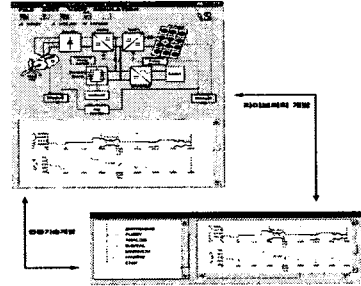


〈그림 5〉 광전지 실험 시스템



〈그림 6〉 풍력 발전 실험 시스템

개발된 제어 알고리즘의 실적용을 위해서 아래 그림과 같은 제어 시뮬레이터를 제작한다.



〈그림 7〉 시뮬레이터 및 실험 화면

### 3. 결 론

본 논문에서는 두 개의 서브 발전 시스템 (풍력과 태양광 발전 시스템)으로 구성된 하이브리드 발전 시스템의 구현을 위하여 디지털 퍼지 제어기 개발을 목표로 한다. 기본적으로 풍력과 태양광 발전 시스템의 경우 비선형성을 가지고 있기 때문에, 비선형 제어에 많은 강점을 가지는 T-S 퍼지 모델 기반의 제어기를 설계하여 효율성을 높이고자 하였다. 그리고 마이크로프로세서 기반 디지털 도구 사용의 극대화를 위해, 지능형 디지털 재설계 기법을 이용하여 디지털 퍼지 제어기를 설계하게 된다.

본 논문에서 제안하고자 하는 시스템은 전체 시스템의 일부이며 궁극적으로는, 하이브리드 발전 시스템에서 최대 전력 추종과 배터리 상태를 일정하게 유지하기 위해서 세 가지 모드 상태에서 변화하는 제어 목적을 만족하는 제어기 설계를 목표로 한다. 이를 해결하기 위해 하이브리드 발전시스템에 필요한 스위칭 기법을 도입하여 디지털 제어기를 설계하는 것이 최종 목표이다.

감사의 글: 본 연구는 산업자원부 지원에 의하여 기초전력연구원 (과제관리번호: R-2005-7-102) 주관으로 수행된 과제임.

### 참고 문헌

- [1] F. Valenciaga and P. F. Puleston, "Supervisor control for a stand-alone hybrid generation system using wind and photovoltaic energy," IEEE Trans. Energy Conversion, vol. 20, no. 2, pp. 398-405, 2005.
- [2] T. Senjyu, T. Nakaji, K. Uezato, and T. Funabashi, "A hybrid power system using alternative energy facilities in isolated island," IEEE Trans. Energy Conversion, vol. 20, no. 2, pp. 404-414, 2005.
- [3] T.F. Wu, C.H. Chang, and Y.H. Chen, "A fuzzy-logic-controlled single-stage converter for PV-powered lighting system applications," IEEE Trans. Industrial Electronics, vol. 47, pp. 287-296, 2000.
- [5] E. Kim, and S. W. Kim, "Stability analysis and synthesis for an affine fuzzy control system via LMI and ILMI: Continuous Case," IEEE Trans. Fuzzy Systems, vol. 10, No. 3, pp. 391-400, 2002.
- [6] T.J. Liang, and J.F. Chen, "Theoretical and experimental analyses of photovoltaic systems with voltage and current-based maximum power-point tracking," IEEE Trans. Energy Conversion, vol. 17, pp. 514-522, 2002.
- [7] F. Valenciaga, P. F. Puleston and P. E. Battaiotto, "Power control of a photovoltaic array in a hybrid electric generation system using sliding mode techniques," IEE Proc. -Control Theory Appl., Vol. 148, No. 6, Nov. 2001