

풍력과 태양에너지를 이용한 하이브리드 발전 시스템을 위한 디지털 퍼지 제어기 개발

Development of the Digital Fuzzy Controller for a Hybrid Power System Using Wind and Solar Energy

성화창¹, 주영훈², 박진배³, 김도완¹

¹ 서울시 서대문구 연세대학교 전기전자공학과
E-mail: {casfirspear, dwkim}@control.yonsei.ac.kr

² 전북 군산시 미룡동 군산대학교 전자정보공학부
E-mail: yhjoo@kunsan.ac.kr

³ 서울시 서대문구 연세대학교 전기전자공학과
E-mail: jbpark@yonsei.ac.kr

요 약

본 논문에서는 두 개의 서브 발전 시스템 (풍력과 태양광 발전 시스템)으로 구성된 하이브리드 발전 시스템의 구현을 위한 디지털 퍼지 제어기를 개발한다. 풍력과 광전자 발전기에서 V-I 특성은 비선형 관계를 보여주기 때문에, 비선형 시스템 제어에 많은 장점을 가진 퍼지 모델 기반 제어기를 사용한다. 그리고 마이크로프로세서 기반 제어 시스템 구현하기 위해서 본 과제에서는 디지털 재설계 기법을 통해 디지털 퍼지 제어기를 설계하게 된다. 마지막으로, 하이브리드 발전 시스템에서 최대 전력 추종과 배터리 상태를 일정하게 유지하기 위해서 세 가지 모드 상태에서 제어 목적이 변화하도록 시스템을 구성하게 된다.

Key Words : 풍력과 태양광 발전 시스템, 하이브리드 발전 시스템, 퍼지 모델 기반 제어기, 디지털 재설계 기법.

1. 서 론

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.

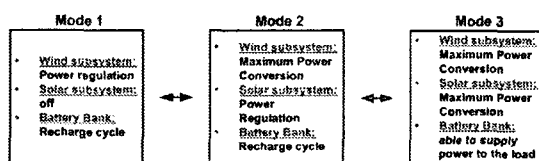


그림 1 하이브리드 발전 시스템의 상황별 제어 목적

그러나 이러한 하이브리드 발전시스템을 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 제어기를 사용하여 비선형 제어기를 설계한다.

2) 마이크로프로세서 기반 제어시스템을 손쉽게 구현하기 위해서, 본 과제에서는 디지털 재설계기법을 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 발전시

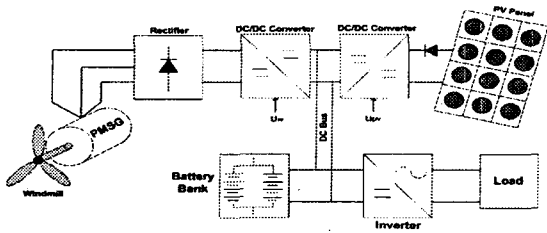


그림 2 제안된 하이브리드 발전 시스템

시스템)으로 구성된 하이브리드 발전 시스템의 구현을 위한 디지털 퍼지 제어기를 개발하는 것을 목표로 한다.

2. 태양광 및 풍력 발전 시스템

일반적으로 태양광 및 풍력 발전 시스템은 다음과 같이 복잡한 비선형 요소를 가지고 있다:

- 태양광 발전 시스템의 비선형 동역학 방정식

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

- 풍력 발전 시스템의 비선형 동역학 방정식

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

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 판별 할 수 있으며 LMI를 이용해서 편리하게 제어 이득 을 얻을 수 있는 장점을 가진다. 최대 전력 추종기 설계를 위해서 각각의 서브 발전 시스템, 즉 태양광과 풍력의 전력은 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.

3. 디지털 재설계 기법

본 과제에서는 하이브리드 발전 시스템의 제어를 컴퓨터 기반으로 하기 위해서 디지털 제어기를 설계 한다. 설계 기법으로는 지능형 디지털 재설계 기법을 적용한다. 최근 마이크로프로세서 기반 컴퓨터의 급속한 발달로 인해 디지털 기반 제어에 관한 많은 이론들이 등장하고 있다. 그중, 디지털 재설계 기법의 경우 기존의 아날로그 플랜트에 디지털 컨트롤러를 직접 설계함으로써, 디지털이 가지는 많은 장점들 - 저렴한 가격, 유연적인 활용, 높은 퍼포먼스 - 등을 활용한 좋은 예이다. 그중에서도 지능형 디지털 재설계 기법은 비선형 시스템을 T-S 퍼지 시스템으로 동정한 후, 디지털 제어기를 직접 설계하는 과정으로써, 본 논문에서 설계하고자 하는 디지털 퍼지 제어기의 목적에 가장 잘 부합한다.

디지털 재설계 기법은 선형 시스템을 위한 디지털 제어기를 효율적으로 설계할 수 있는 기법으로서, 연속 시간 시스템과 이산 시간 시스템의 응답 특성을 정합함으로써 미리 설계된 연속 시간 제어기를 디지털 제어기로 변환한다. 구체적으로, 다음과 같은 연속시간 퍼지 시스템은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} R^i: & \text{IF } z_1(t) \text{ is about } \Gamma_1^i \text{ and } \dots \text{ and } z_p(t) \text{ is about } \Gamma_p^i \\ \text{THEN } & \frac{d}{dt} x(t) = A_i x(t) + B_i u(t). \end{aligned}$$

여기서, $R_i, i \in I_q = \{1, 2, \dots, q\}$ 은 i 번째 퍼지 규칙, $z_h(t), h \in I_p = \{1, 2, \dots, p\}$ 은 h 번째 전방부 변수이고 $\Gamma_{i,h}^h, (i, h) \in I_q \times I_p$ 은 퍼지 집합이다. 선형 시스템의 이산화기법을 적용하여 일반적으로 다음과 같이 이산화 된다.

$$R_i: \text{IF } z_1(kT) \text{ is about } \Gamma_1^i \text{ and } \dots \text{ and } z_p(kT) \text{ is about } \Gamma_p^i \\ \text{THEN } x(kT+T) = G_i x(kT) + H_i u(kT)$$

여기서

$$G_i = \exp(A_i T), \quad H_i = (G_i - I) A_i^{-1} B_i.$$

위에서 살펴본 퍼지 시스템의 이산화 과정은 선형 시스템의 경우를 그대로 도입했기 때문에 다음과 같은 오차 e_1, e_2 가 발생한다.

$$e_1 = T^2 \left| \left(\frac{1}{2!} \left(\sum_{i=1}^q \theta_i(zkT) A_i \right)^2 - \frac{1}{2!} \sum_{i=1}^q \theta_i(zkT) A_i^2 \right) + \dots \right|_2 = \alpha(T^2)$$

$$e_2 = \left| \left(\sum_{i=1}^q \theta_i(zkT) G_i - I \right) \left(\sum_{i=1}^q \theta_i(zkT) A_i \right)^{-1} \left(\sum_{i=1}^q \theta_i(zkT) B_i \right) - \sum_{i=1}^q \theta_i(zkT) H_i \right|_2 = \alpha(T)$$

본 세부 과제에서는 위와 같은 오차를 줄이는 정확한 이산화 기법 개발 또한 목표로 한다.

4. 시뮬레이션 구성

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

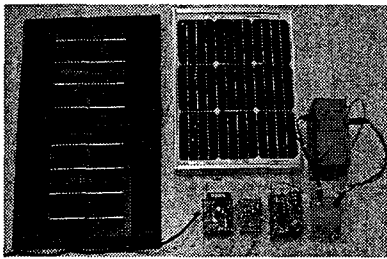


그림 3. 광전지 실험 시스템

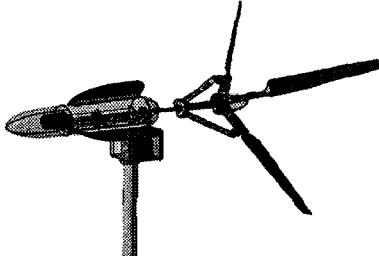


그림 4. 풍력 발전 실험 시스템 개발된 제어 알고리즘의 실적용을 위해서 다음과 같이 제어 시뮬레이터를 제작한다.

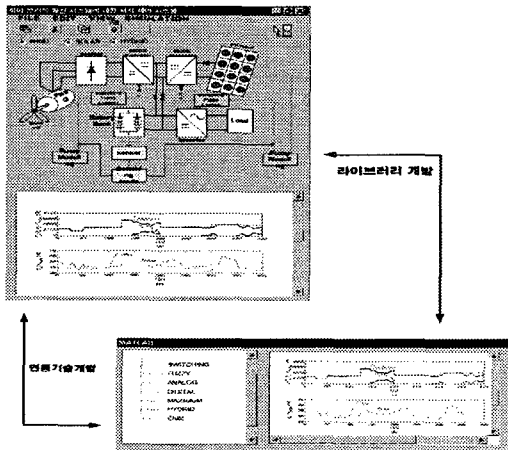


그림 5. 개발 하고자 하는 시뮬레이터 및 실험 화면

5. 결론 및 향후 과제

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 제어를 설계하여 효율성을 높이고자 하였다. 그리고 마이크로프로세서 기반 디지털 도구 사용의 극대화를 위해, 지능형 디지털 재설계 기법을 이용하여 디지털 퍼지 제어를 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 제어를 설계하는 것이 최종 목표이다.

참 고 문 헌

- [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.

- [4] E. Koutroulis, K. Kalaitzakis, and N.C. Voulgaris, "Development of a microcontroller-based, photovoltaic maximum power point tracking control system," *IEEE Trans. Power Electronics*, vol. 16, pp. 46-54, 2001.
- [5] Y.C. Kuo, T.J. Liang, and J.F. Chen, "Novel maximum-power-point-tracking controller for photovoltaic energy conversion system," *IEEE Trans. Industrial Electronics*, vol. 48, pp. 594-601, 2001.
- [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] K.K. Tse, M.T. Ho, H.S.-H. Chung, and S.Y. Hui, "A novel maximum power point tracker for PV panels using switching frequency modulation," *IEEE Trans. Power Electronics*, vol. 17, pp. 980-989, 2002.
- [8] T. Noguchi, S. Togashi, and R. Nakamoto, "Short-current pulse-based maximum-power-point tracking method for multiple photovoltaic-and-converter module system," *IEEE Trans. Industrial Electronics*, vol. 49, pp. 217-223, 2002.
- [9] Y. C. Kuo, T. J. Liang, and J. F. Chen "A high-efficiency single-phase three-wire photovoltaic energy conversion system," *IEEE Trans. Industrial Electronics*, vol. 50, pp. 116-122, 2003.