

최대 전력 추종을 위한 디지털 퍼지 제어기 설계

Development of the Digital Fuzzy Controller for Maximum Power Tracking

성화창¹, 주영훈², 박진배¹, 유태일²

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

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

요 약

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 제어기를 사용하여 비선형성을 효율적으로 제어하게 된다. 그리고 마이크로프로세서 기반 제어 시스템의 구축을 위하여 최신 디지털 재설계 기법을 사용, 디지털 퍼지 제어기를 설계하게 된다. 마지막으로 제안된 플랜트를 통한 실험으로써 본 논문의 우수성을 입증하고자 한다.

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.

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

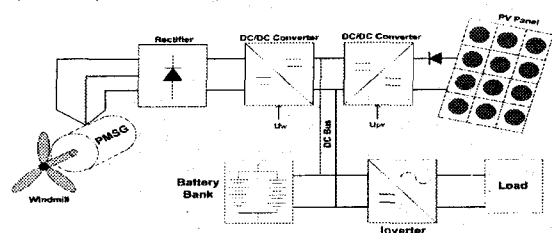


그림 1 제안된 하이브리드 발전 시스템

2. 태양광 및 풍력 발전 시스템

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

다:

- 태양광 발전 시스템의 비선형 동역학 방정식

$$\begin{aligned} \dot{V}_{PV} &= \frac{i_{PV}}{C} - \frac{i_s}{C} u_{PV} \\ \dot{i}_s &= -\frac{V_b}{L} + \frac{V_{PV}}{L} u_{PV} \\ i_{PV} &= n_p I_{ph} - n_p I_{rs} \left(e^{\frac{q(V_{PV} + i_{PV} R_s)}{n_s A_c K T}} - 1 \right) \end{aligned} \quad (1)$$

- 풍력 발전 시스템의 비선형 동역학 방정식

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

위와 같은 복잡한 비선형성을 제어하기 위해 본 논문에서는 Takagi-Sugeno (T-S) 퍼지 시스템을 이용한다. 해당 퍼지 모델링은 다음과 같다.

- 태양광 발전 시스템의 퍼지 모델링

Photovoltaic System:

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

Fuzzy Modeling:

- R¹: IF X₁(t) is Γ₁¹ and X₂(t) is Γ₂¹, THEN Ẋ(t) = A + B₁x(t)u.
- R²: IF X₁(t) is Γ₁¹ and X₂(t) is Γ₂², THEN Ẋ(t) = A + B₂x(t)u.
- R³: IF X₁(t) is Γ₁² and X₂(t) is Γ₂¹, THEN Ẋ(t) = A + B₃x(t)u.
- R⁴: IF X₁(t) is Γ₁² and X₂(t) is Γ₂², THEN Ẋ(t) = A + B₄x(t)u.

where

$$\Gamma_1^1 = \frac{-x_1 + x_{1max}}{x_{1max} - x_{1min}}, \Gamma_1^2 = \frac{x_1 - x_{1min}}{x_{1max} - x_{1min}}, \Gamma_2^1 = \frac{-x_2 + x_{2max}}{x_{2max} - x_{2min}}, \Gamma_2^2 = \frac{x_2 - x_{2min}}{x_{2max} - x_{2min}}$$

풍력 발전 시스템의 경우 역시 태양광 발전 시스템과 유사한 형태로 퍼지 모델링이 수행된다. 그러나 (2)에서 알 수 있듯이, 기본적인 플랜트 상의 비선형성 이외에 입력 값에 걸린 비선형성 역시 고려해 주어야 하기에, 총 16개의 퍼지 모델이 구성된다. (본 논문에서는 지면관계상 생략하도록 한다.)

수행된 퍼지 모델을 통해 비선형성을 지닌 플랜트에 대한 안정도 조건을 다음과 같이 구해 낼 수 있다. 문제는 태양광과 풍력 시스템 모두 affine term을 지니고 있다는 점이며, 따라서 다음 이론이 필요하다.

이론 1 행렬 $P = P^T > 0$, τ_{ijq} 가 존재하고 F_i 와 σ 가 충분한 공간을 가질 때, 다음과 같은 LMIs가 만족한다면 연속시간 affine T-S 퍼지 시스템은 점진적으로 안정하다[5].

$$\Lambda = \begin{pmatrix} \Lambda_{11} & \Lambda_{21}^T & 0 & 0 & F_i^T & F_j^T & PB_i & PB_j \\ \Lambda_{21} & \Lambda_{22} & \sigma_i^T & \sigma_j^T & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_i & -I & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_j & 0 & -I & 0 & 0 & 0 & 0 \\ F_i & 0 & 0 & 0 & -I & 0 & 0 & 0 \\ F_j & 0 & 0 & 0 & 0 & -I & 0 & 0 \\ B_i^T P & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1/2I & 0 \\ B_j^T P & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1/2I \end{pmatrix} < 0. \quad (3)$$

여기서 각 파라미터의 값은 아래와 같다.

$$\Lambda_{11} = A_i^T P + PA_i + A_j^T P + PA_j + Y_i^T Y_i + Y_j^T Y_j - Y_i^T (B_i^T P + F_i) - (B_i^T P + F_i)^T Y_i - Y_j^T (B_j^T P + F_j) - (B_j^T P + F_j)^T Y_j + z_i^T z_i + z_j^T z_j - z_i^T B_i^T P - PB_i z_i - z_j^T B_j^T P - PB_j z_j - \sum_{q=1}^n \tau_{ijq} T_{ijq}$$

$$\Lambda_{21} = (\mu_i + \mu_j)^T P + y_i^T z_i + y_j^T z_j - \sigma_i^T z_i - \sigma_j^T z_j - y_i^T B_i^T P - y_j^T B_j^T P - y_i^T B_i^T P - y_j^T B_j^T P - \sum_{q=1}^n \tau_{ijq} \mu^T y_q$$

$$\Lambda_{22} = y_i^T y_i + y_j^T y_j - y_i^T \sigma_j - \sigma_j^T y_i - y_j^T \sigma_i - \sigma_i^T y_j - \sum_{q=1}^n \tau_{ijq} v_{ijq}$$

3. 디지털 재설계 기법

본 과제에서는 하이브리드 발전 시스템의 제어를 컴퓨터 기반으로 하기 위해서 디지털 제어를 설계한다. 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 제어를 직접 설계하는 과정으로써, 본 논문에서 설계하고자 하는 디지털 퍼지 제어기의 목적에 가장 잘 부합한다.

디지털 재설계 기법은 선형 시스템을 위한 디지털 제어를 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.

$$\begin{aligned} R^i: & \text{IF } z_1(t) \text{ is about } \Gamma_i^1 \text{ and } \dots \text{ and } z_p(t) \text{ is about } \Gamma_i^p \\ & \text{THEN } \frac{d}{dt} x(t) = A_i x(t) + B_i u(t). \end{aligned}$$

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 전

반부 변수이고 $\Gamma_i^h, (i, h) \in I_q \times I_p$ 은 퍼지 집합이다.

아날로그 퍼지 모델 기반 제어기의 설계는

IF-THEN Form:

$$\begin{aligned} &\text{IF } z_i(t) \text{ is } F_i^1 \text{ and } \dots \text{ and } z_n(t) \text{ is } F_n^1 \\ &\text{THEN } u_c(t) = -K_c x_c(t), \quad i = 1, 2, \dots, q \end{aligned}$$

Defuzzified Form:

$$u_c(t) = -K_c(\mu)x_c(t) \quad (4)$$

과 같으며, K_{ci} 피드백 게인을 의미한다. 설계된 제어기를 통해 나타난 아날로그 시스템은 다음과 같다. 선형 시스템의 이산화 기법을 적용하여 일반적으로 다음과 같이 이산화 된다.

$$\begin{aligned} R_i: &\text{IF } z_1(kT) \text{ is about } \Gamma_{i1} \text{ and } \dots \text{ and } z_p(kT) \text{ is about } \Gamma_{ip} \\ &\text{THEN } x(kT+T) = G_i x(kT) + H_i u(kT) \end{aligned}$$

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 오차가 발생한다. 본 연구에서는 이산화 된 아날로그 제어기와 디지털 제어기 간의 전역적 접근으로의 상태 매칭을 통해 지능형 디지털 재설계 기법을 완성하게 된다. 그리고 선형 행렬 부등식을 이용한 효율적인 수치 접근법을 통해 해를 구하게 된다. 즉, 디지털 제어 시스템의 안정성 및 독립 설계 조건이 그 목적이며, 그와 동시에 시스템 전체의 안정도 역시 보장되어야 한다. 본 논문에서는 전역적 상태 집합과 안정도 보장을 위한 효율적 접근을 위해 각각의 문제를 설정하였고, 그 첫 번째는 다음과 같다.

문제 1-1 (안정도 조건)[3]: 만약 양 한정 대칭 행렬 Q , 반 양한정 대칭 행렬 O , 상수 행렬 F_i , 가 존재 한다면 다음 두 식은 만족 될 수 있다.

$$\begin{bmatrix} -Q + (q-1)O & * \\ G_i Q + H_i U_i & -Q \end{bmatrix} < 0, \quad i, j \in I_q \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} -Q - O & * \\ \frac{G_i Q + H_i U_j + G_j Q + H_j U_i}{2} & -Q \end{bmatrix} < 0, \quad i, j \in I_q \quad (6)$$

다음 두 번째 문제에서는 전역적 접근을 통한 상태 집합 문제로서, 앞에서 T-S 퍼지 기반으로 설계되어 이산화 되어진 두 페루프 시스템 사이의 아날로그 게인과 디지털 게인 사이의 매칭이 나타내어 진다.

문제 1-2 [3] : 이산화 되어진 디지털 페루프 시스템의 안정화를 위하여, 주어진

아날로그 게인 K_{ci} 와 찾고자 하는 디지털 게인 K_{di} 사이의 상태 집합 문제는 다음과 같은 선형 작용소의 norms 최소화 하는 볼록 최적화 문제로 구성된다.

Minimize γ subject to

$$\| \Phi_{ij} - G_i - H_i K_j \| < \gamma, \quad i, j \in I_q$$

$$\begin{bmatrix} -\gamma Q & * \\ \Phi_{ii} Q - G_i Q - H_i U_j & -\gamma I \end{bmatrix} < 0, \quad i, j \in I_q$$

여기서 $\Phi_{ii} = \exp(A_i + B_i K_c^j)$ 이다.

증명: 참고문헌 [3]를 참고하라.

4. 시뮬레이션 구성

개발된 제어 알고리즘의 실적용을 위해서 다음과 같이 제어 시뮬레이터를 제작한다.

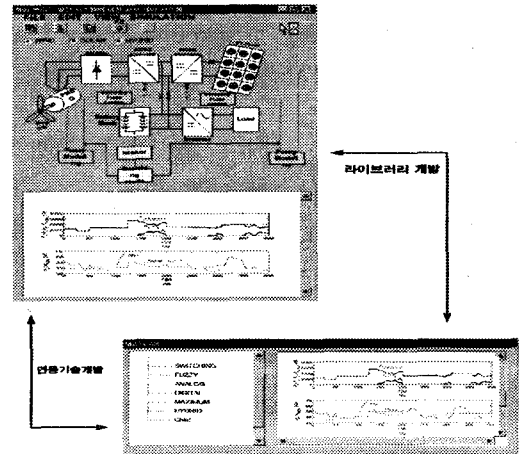


그림 2. 시뮬레이터 및 실험 화면

태양광 발전 시스템에 있어서 디지털 재설계를 위한 아날로그 이득 값은 아래 표와 같다.

표 2 태양광 발전의 아날로그 이득값

$K_c\{1\}$	$1.0e^{-0.01}[-0.3800 \quad -0.1536]$
$K_c\{2\}$	$1.0e^{-0.04}[-0.2230 \quad -0.1093]$
$K_c\{3\}$	$1.0e^{-0.04}[-0.4550 \quad -0.1851]$
$K_c\{4\}$	$1.0e^{-0.04}[-0.2172 \quad -0.1036]$

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.

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

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] Ho Jae Lee, Hagbae Kim, "A New Intelligent Digital Redesign for T-S fuzzy systems: Global Approach", IEEE Trans. Vol. 12, No2, April 2004.
- [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] 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] 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.