

태양광 발전 시스템의 강인 디지털 재설계

성화창*, 박진배*, 탁명환**, 주영훈**

* 연세대학교 전기전자공학과, ** 군산대학교 전자정보공학부

Robust Digital Redesign of Photovoltaic Power System

Hwa Chang Sung*, Jin Bae Park*, Myung Hwan Tak**, Young Hoon Joo**

* Department of Electrical and Electronic Engineering, Yonsei University,

** School of Electronic and Information Engineering, Kunsan National University

Abstract - 본 논문에서는 태양광 발전 시스템에 대한 강인 디지털 재설계 방안에 대해 다루고자 한다. 다른 신재생에너지 시스템과 마찬가지로 태양광 발전 시스템은 비선형 동적 방정식으로 구성되며, 주위 환경의 영향에 민감하게 반응한다. 이에 대한 해석을 위해 본 논문에서는 강인 퍼지 이론을 이용하여 시스템의 비선형성 및 불확실성을 해결하게 된다. 또한, 디지털 재설계 이론을 바탕으로 하여 디지털 기기 사용에 적합한 환경을 구성할 수 있는 계기를 마련하게 된다.

1. 서 론

정부의 녹색 에너지 성장 정책에 발맞추어 최근 신재생 에너지 자원에 대한 관심이 급격히 증가하고 있다. 더 이상 석유 자원에 의존할 수 없는 에너지 포화 상태에 도달한 지금에서 신재생 에너지가 가지고 있는 무궁무진함은 새로운 전력 대안으로서의 가능성을 엿보게 해준다. 그러나 이러한 가능성에도 불구하고 현재 실용화 되고 있는 신재생 에너지 발전은 전체 에너지 비중에서 얼마 되지 않는다. 에너지 관리 공단에서 2007년 발표한 자료에 따르면, 우리나라 신재생 에너지 공급률은 2.28%에 지나지 않는 것으로 나타나 있다.

이에 대한 이유 중 하나가 바로 신재생 에너지 발전의 복잡성에 기인한다. 실제로 대부분의 신재생 에너지는 복잡한 비선형 동적 방정식으로 나타내어지며, 기존의 선형 제어 이론으로 시스템을 분석, 동작하기에는 많은 한계를 지니고 있다. 또한, 신재생 에너지 자체가 환경으로부터 얻어지는 에너지인 만큼, 수많은 환경적 변화요소에 민감하게 반응할 수밖에 없다. 이런 상황에 대한 고려를 통해 신재생 에너지 발전 기술의 활용성을 높인다면, 보다 좋은 에너지 기술원으로서의 신재생 에너지를 활용할 수 있을 것이다.

본 논문에서는 위와 같은 상황에 대한 해결책으로 강인 퍼지 이론을 사용하고자 한다. 시스템의 비선형적 동적 방정식의 해석을 위해 시스템 해석에 강인한 퍼지 이론을 도입함으로써 보다 정확한 시스템 모델링을 가능하게 한다. 그리고, 주변 환경적 요소를 각 파라미터의 불확실성을 통해 드러냄으로써 강인한 안정도를 보장받게 된다. 또한, 디지털 재설계 방안을 통해 전체 시스템을 디지털 기기 사용에 적합한 환경을 구성할 수 있는 계기를 마련하고자 한다. 고려된 신재생 발전 시스템은 태양광 발전 시스템으로 현재 우리나라 신재생 에너지 중 가장 많은 관심과 연구가 진행되고 있는 분야이다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 퍼지 시스템 및 태양광 시스템에 대한 분석을 하게 된다. 3장에서는 강인 디지털 재설계 방안을 연구 및 시뮬레이션을 수행하게 되며, 4장에서는 결론이 소개된다.

2. 퍼지 시스템 및 태양광 시스템 분석

2.1 Takagi-Sugeno (T-S) 퍼지 시스템

다음과 같은 비선형 시스템을 고려하자.

$$\dot{x}_c(t) = f(x_c(t), u_c(t)) + \Delta f(x_c(t), u_c(t)) \quad (1)$$

여기서 $x_c(t) \in R^n$ 는 상태 벡터를 의미하며, $u_c(t) \in R^m$ 는 입력 벡터를 의미한다. 그리고 $\Delta f(x_c(t), u_c(t))$ 는 시스템이 가지고 있는 불확실성을 나타내며, 점자 'c'는 아날로그 제어, 'd'는 디지털 제어를 의미한다. 위의 식은 다음과 같은 퍼지 모델로 나타내어 질 수 있다.

$$R^i: IF z_i(t) \text{ is } \Gamma_1^i \text{ and ... and } z_n(t) \text{ is } \Gamma_n^i \\ THEN \dot{x}_c(t) = (A_i + \Delta A_i)x_c(t) + (B_i + \Delta B_i)u_c(t). \quad (2)$$

여기서 R^i 는 i 번째 규칙을, $z_h(t)$ 는 h 번째 전건부 변수를 의미하며, A_i 와 B_i 는 적절한 크기를 지닌 실제 행렬이며, ΔA_i 와 ΔB_i 는 시스템이 포함하고 있는 불확실성을 의미한다. 해당 불확실 파라미터는 다음과 같은 놈 바운드로 정의 될 수 있다.

$$[\Delta A_i \ \Delta B_i] = D_i F_i(t) [E_{1i} \ E_{2i}] \quad (3)$$

여기서 $F_i(t)^T F_i(t) \leq I$ 이다. Γ_h^i 는 i 번째 규칙에서 h 번째 전건부 변수의 퍼지 집합이다. 중심값-평균 비퍼지화, 곱셈 추론, 싱글톤 퍼지화를 이용하면 식 (2)는 다음과 같이 표현된다.

$$\dot{x}(t) = \sum_{i=1}^r \mu_i(z(t)) ((A_i + \Delta A_i)x(t) + B_i u(t)) \quad (4)$$

여기서

$$\omega_i(z(t)) = \prod_{h=1}^n \Gamma_h^i(z_h(t)), \quad \mu_i(z(t)) = \frac{\omega_i(z(t))}{\sum_{i=1}^r \omega_i(z(t))}$$

시스템의 안정화를 위한 아날로그 제어기는 다음과 같이 제안된다.

$$R^i: IF x_i(t) \text{ is } \Gamma_1^i \text{ and ... and } x_n(t) \text{ is } \Gamma_n^i \\ THEN u_c(t) = \sum_{i=1}^r K_c^i x_c(t). \quad (5)$$

여기서 K_c^i 는 아날로그 제어 입력을 나타낸다.

2.2 태양광 시스템 및 퍼지 모델링

일반적으로 태양광 시스템은 다음과 같은 복잡한 비선형성을 지니고 있다.

$$\dot{v}_{pv} = \frac{i_{pv}}{C} - \frac{i_s}{C} u_{pv} \quad (6)$$

$$\dot{i}_s = -\frac{v_b}{L} + \frac{v_{pv}}{L} u_{pv} \quad (7)$$

$$i_{pv} = n_p I_{ph} - n_p I_{rs} \left(e^{\frac{q(v_{pv} + i_{pv} R_s)}{n_s A_s K T}} - 1 \right) \quad (8)$$

여기서 $v_b = E_b + v_c + (i_o - i_L)R_b$ 로 나타내어지며, 이는 배터리에서의 전압을 의미한다. i_L 의 경우 측정된 값으로 시뮬레이션에 있어서는 임의로 정해진다. 본 논문에서는 주어진 (6)-(8)에 대한 퍼지 모델링을 통해 해당 비선형성에 대한 해석을 전제로 하여 강인 디지털 재설계를 제안하게 된다. 이를 위하여 식 (6)-(7)에 나와 있는 변수를 각각 $x_1 = V_{pv}$, $x_2 = I_o$ 로 지정하게 된다. 그리고 비선형 변수들에 대한 변위를 두어 결정된다. 이를 통해 다음 식이 얻어진다.

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{e^{q/\eta_s AKT}}{C} x_1 \\ \frac{R_b}{L} x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{x_2}{C} \\ \frac{x_1}{L} \end{bmatrix} u_{pv} + \begin{bmatrix} \frac{\eta_p I_{ph} + \eta_p I_{rs}}{C} \\ -\frac{E_b - i_L R_b}{L} \end{bmatrix} \quad (9)$$

시스템 (9)에서는 총 두 가지 비선형 요소가 존재하며, 따라서 다음과 같은 4개의 퍼지 규칙을 가진 시스템으로 나타내어진다.

$$R^i: IF z_1(t) \text{ is } \Gamma_1^i \text{ and } \dots \text{ and } z_2(t) \text{ is } \Gamma_n^i \\ THEN \dot{x}_c(t) = (A_i + \Delta A_i)x_c(t) + (B_i + \Delta B_i)u_c(t) + v_i \quad (10)$$

여기서 $i \in I_4$ 이며, ΔA_i 와 ΔB_i 는 시스템 상수가 지니고 있는 파라미터에서의 10 % 변화 값을 나타내며, v_i 는 affine 상수를 나타낸다. 각 요소들은 다음과 같이 나타내어진다.

$$A_i = \begin{bmatrix} -\frac{e^{q/\eta} AKT}{C} x_1 \\ \frac{R_b}{L} x_2 \end{bmatrix}, v_i = \begin{bmatrix} \frac{\eta_p I_{ph} + \eta_p I_{rs}}{C} \\ -\frac{E_b - i_L R_b}{L} \end{bmatrix}, B_1 = \begin{bmatrix} -\frac{x_{2min}}{C} \\ \frac{x_{1min}}{L} \end{bmatrix} \\ B_2 = \begin{bmatrix} -\frac{x_{2max}}{C} \\ \frac{x_{1min}}{L} \end{bmatrix}, B_3 = \begin{bmatrix} -\frac{x_{2min}}{C} \\ \frac{x_{1max}}{L} \end{bmatrix}, B_4 = \begin{bmatrix} -\frac{x_{2max}}{C} \\ \frac{x_{1max}}{L} \end{bmatrix}.$$

3. 강인 디지털 재설계

다음과 같은 디지털 시스템을 고려해보자.

$$\dot{x}_d(t) = \sum_{i=1}^r \mu_i(z(t))((A_i + \Delta A_i)x_d(t) + (B_i + \Delta B_i)u_d(t)) \quad (11)$$

시스템 (11)에 대한 퍼지모델 기반 제어기의 경우 퍼지 규칙을 통해 식 (5)와 유사한 형태로 구성되며, K_d^i 는 i 번째 규칙에서 결정되어야 할 디지털 제어 이득 행렬로 비퍼지화 된 제어 입력은 다음과 같다.

$$u_d(t) = \sum_{i=1}^r \mu_i(z(t))K_d^i x_d(kT) \quad (12)$$

디지털 재설계 문제는 디지털 제어기 (12)을 구성하기 위해 매 샘플링 순간 $t \in (kT, kT+T]$ 마다 (4)와 (11)의 페루프에 대한 상태 집합이 이루어져야 하며, 이는 T-S 퍼지 모델의 이산화 모델을 통해 수식적으로 증명된다. 그러나 T-S 퍼지 시스템은 본질적으로 비선형성 및 불확실성을 내포하고 있기 때문에, 이산화 결과를 블록 조합의 형태로 해석한 뒤 디지털 재설계 기법을 적용하게 되며, 따라서 i 번째 발화도 $\mu_i(z(t))$ 는 시간 구간 $t \in (kT, kT+T]$ 동안 $t = kT$ 에서의 값으로 근사화 될 수 있다는 가정이 필요하다. 즉, $\sum_{i=1}^r \mu_i(z(t))A_i$ 와

$\sum_{i=1}^r \mu_i(z(t))B_i$ 는 시간구간 $t \in (kT, kT+T]$ 에서 상수 행렬로 근사화 될 수 있다. 이와 같은 이론을 바탕으로, 디지털 퍼지 기반 페루프 시스템에 대한 이산화를 수행하면 다음과 같은 결과를 얻게 된다.

$$x_d(kT+T) = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r \mu_i(z(t))\mu_j(z(t))(\overline{G}_i + \overline{H}_i K_d^i)x_d(kT) \quad (13)$$

여기서 $\overline{G}_i = G_i + \Delta G_i$, $G_i = e^{A_i T}$, $\Delta G_i = \delta_i F_i(t)\epsilon_{1i}$, $\delta_i = \frac{1}{2}(G_i - I)A_i^{-1}D_i$, $\epsilon_{1i} = E_{1i}(G_i + I)$, $\overline{H}_i = H_i + \Delta H_i$, $H_i = (G_i - I)A_i^{-1}B_i$, $\Delta H_i = \delta_i F_i(t)\epsilon_{2i}$, $\epsilon_{2i} = (2E_{2i} + E_{1i}H_i)$. 마찬가지로 연속시간 퍼지 모델 시스템 (4)에 대한 이산화 결과는 다음과 같다.

$$x_c(kT+T) = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r \mu_i(z(t))\mu_j(z(t))(\widehat{G}_i + \widehat{H}_i K_c^i)x_c(kT) \quad (14)$$

여기서 $\widehat{G}_i = e^{(A_i + B_i K_c^i)}$,

$$\Delta \widehat{G}_i = \frac{1}{2}(\widehat{G}_i - I)(A_i + B_i K_c^i)^{-1}(\Delta A_i + \Delta B_i K_c^i)(\widehat{G}_i + I) \quad \text{이다.}$$

디지털 재설계를 위해서는 1) 식 (13)과 (14)의 상태 집합; 2) 디지털 시스템 (13)의 안정화의 두 가지 조건이 만족되어야 한다. 이는 Lyapunov 안정도 조건에 대한 유도를 통해 다음 정리로 나타나게 된다.

정리 1: 행렬 $Q = Q^T > 0$, M_i 와 상수 τ_{ij} , σ_{ij} 가 존재할 때, 다음 선형 행렬 부등식이 만족한다면, 식 (13)은 점진적으로 안정하다.

$$\begin{bmatrix} -\gamma Q & * & * & * \\ \widehat{G}_{ij}Q - G_i Q - H_i M_j & \tau_{ij} D_{ij} - I & * & * \\ \epsilon_{ij} Q & 0 & -\sigma_{ij} I & * \\ -\epsilon_{1i} Q - \epsilon_{2i} M_j & 0 & 0 & -\sigma_{ij} I \end{bmatrix} < 0 \quad (15)$$

$$\begin{bmatrix} -4Q & * & * & * \\ G_i Q + H_i M_j + \widehat{G}_j Q + H_j M_i & \tau_{ij} D_{ij} - Q & * & * \\ \epsilon_{1i} Q + \epsilon_{2i} M_j & 0 & -\sigma_{ij} I & * \\ \epsilon_{1j} Q + \epsilon_{2j} M_i & 0 & 0 & -\sigma_{ij} I \end{bmatrix} < 0 \quad (16)$$

증명: 페이지 제한으로 생략한다. ■

정리 1을 바탕으로 수행한 시뮬레이션 결과는 아래와 같다.

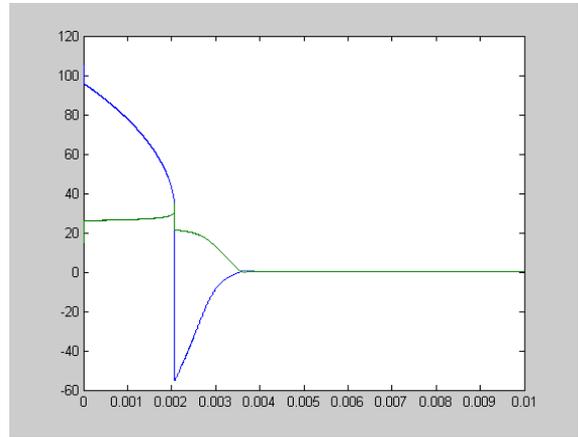


그림 1. 태양광 발전 시스템 궤적

4. 결 론

본 논문에서는 태양광 발전 시스템에 대한 강인 디지털 재설계 방안에 대해 다루었다. 비선형적 동적 특성을 지니고 있는 태양광 발전 시스템에 대해 퍼지 모델링 및 제어기 설계를 통해 안정도를 보장받게 되었으며, 불확실성에 대한 해석을 추가로 수행하였다. 그리고 강인 디지털 재설계 방안에 대한 전개를 통해 선형 행렬 부등식 형태의 정리를 얻게 되었다. 정리된 이론을 통해 시뮬레이션을 수행하였다.

[감사의 글]

이 논문은 2009년도 교육인적자원부 BK21사업의 일환인 연세대학교 전기전자공학부 TMS 사업단의 지원과 산업자원부 전력기반조성사업 센터의 고급인력양성사업을 통한 연세 대학교 계통적용 신 전력기기 연구센터의 지원으로 수행되었습니다.

[참고 문헌]

- [1] Y. H. Joo, G. Chen, and L. S. Shieh, "Hybrid state-space fuzzy model-based controller with dual-rate sampling for digital control of chaotic systems", IEEE Trans. Fuzzy Systems vol. 7, pp. 394-408, 1999
- [2] H. J. Lee, J. B. Park, and G. Chen, "Robust fuzzy control of nonlinear systems with parametric uncertainties", IEEE Trans. Fuzzy Systems vol. 9, pp. 369-379, 2001
- [3] H. J. Lee, H. B. Kim, Y. H. Joo, W. Chang, and J. B. Park, "A new intelligent digital redesign for T-S fuzzy systems: Global approach", IEEE Trans. Fuzzy Systems vol. 12, pp. 274-284, 2004