

풍력과 태양 에너지를 이용한 하이브리드 발전시스템 구현을 위한 스위칭 디지털 퍼지 제어기 개발

Switching Digital Fuzzy Controller for Hybrid Generation System Using Wind and Photovoltaic Energy

성화창*, 주영훈**, 박진배*

Hwa Chang Sung*, Young Hoon Joo**, and Jin Bae Park*

* 연세대학교 전기전자공학과 ** 군산대학교 전자정보공학부

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. 또한 마이크로프로세서 기반 제어 시스템의 구축을 위하여 최신 디지털 재설계 기법을 사용하며, 디지털 퍼지 제어기를 설계하게 된다. 마지막으로 하이브리드 발전 시스템의 플랜트를 통한 실험으로써 본 제안 기법의 우수성을 입증한다.

Abstract

We present the development of the digital fuzzy controller for maximum power regulation. A hybrid system that comprises wind and photovoltaic generation subsystems, and battery bank is developed in this paper. We use Takagi-Sugeno (T-S) fuzzy model to deal with the power regulation problem, since each power generator has complex nonlinear terms. The problem for regulation control can be simplified into a stabilization one. Also, in order to utilize the advanced digital device, we perform the intelligent digital redesign method. Finally, the performance of the proposed controller is extensively assessed through computer simulation.

Key Words : 최대 전력 추종, 지능형 디지털 재설계, TS 퍼지 시스템, 하이브리드 발전 시스템.

1. 서 론

핵 연료와 화석 연료의 급격한 소비 상승에 기인한 자원 부족으로 인해 대체 에너지 기술 - 태양광, 풍력, 조력 발전 등 - 이 전 세계에 많은 관심을 끌고 있다. 단일 대체에너지를 이용한 발전 방식은 날씨 혹은 주변 상황에 따라 에너지 공급부족 현상을 야기 시킬 수 있으며 추가 적으로 디젤발전기를 사용해야 한다. 하이브리드 발전 시스템은 단일 대체에너지를 이용한 발전 방식과 달리 에너지 공급 부족 현상을 줄일 수 있으며 [1,3], 에너지 저장장치를 공유함으로써 단일 발전 시스템에서 사용하는 외부 디젤 발전기를 사용하지 않는다는 장점이 있다 [4,7]. 그러나 하이브리드 발전시스템의 구현에는 다음의 몇 가지 장애가 존재한다. 우선 풍력과 태양광 발전 시스템을 기반으로 한 하이브리드 발전 시스템에서의 V-I (전압-전류) 특성은 비선형 관계를 보여주기 때문에, 일반 제어기로 이를 제어하기가 쉽지 않다. 대부분의 발전 시스템 구현에 있어서 슬라이딩 기반 제어기를 설계 하였지만 [1,3,4,6,7], 이들은 시스템 내부의 비선형성에 대해서는 크게 고려하지 않았다. 그리고 주변 환경에 따라 두 발전 시

스템의 동작 효율은 달라지며, 상황에 따른 제어 목적을 설정해 주는 것이 필요하다. 참고문헌 [3,7,9]의 경우 하이브리드 시스템에서 하나의 제어 목적만을 설정하였다.

본 논문에서는 풍력 및 태양광 발전 시스템으로 구성된 하이브리드 발전 시스템의 구현에 있어서 현존하는 문제점을 분석하고 그 해결점에 대한 제어 방법을 제시하고자 한다. 구체적인 제어 목적은 크게 3가지로 설정 된다. 1) 풍력과 태양광 발전기에서 V-I 특성은 비선형 관계를 보여준다. 본 과제에서는 비선형 제어에 있어서 우수한 퍼지 모델 기반 제어기를 사용하여 비선형성을 해결하게 된다. 그리고 최대 전력 추종 문제를 퍼지 모델에 대한 안정도 문제로 변환하여 고려하게 된다. 2) 마이크로프로세서 기반 제어시스템을 구현하기 위하여 디지털 재설계기법을 이용 [2], 디지털 퍼지 제어기를 설계하게 된다. 3) 하이브리드 발전 시스템에서 최대 전력 추종과 배터리 상태를 일정하게 유지하기 위해서 상황에 따른 제어 목적이 변하게 된다 [1]. 본 과제에서는 각각의 발전시스템에 필요한 세 가지 상황에 대한 제어 목적에 맞는 제어기 설계를 연구한다. 최종적으로, 본 논문에서는 그림 1과 같은 풍력 및 태양광 발전으로 구성된 하이브리드 발전 시스템의 구현을 위한 디지털 퍼지 제어기를 개발하는 것을 목표로 한다.

접수일자 : 2006년 11월 17일

완료일자 : 2006년 11월 30일

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

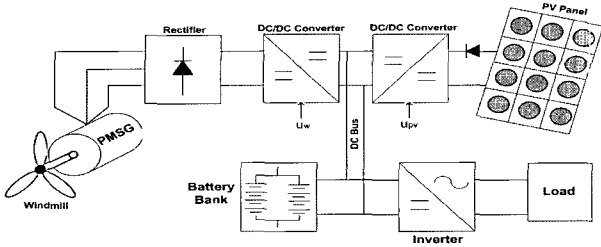


그림 1. 제안된 하이브리드 발전 시스템.
Fig 1. Electric generation hybrid system.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2절에서는 태양광 및 풍력 발전시스템의 비선형성을 다루기 위한 퍼지 모델링 및 안정화를 위한 제어기를 설계 하게 된다. 그리고 최대 전력 추종을 위한 퍼지 안정도 문제 변환을 위한 퍼지 시스템을 소개 하게 된다. 또한 가상의 시나리오에 따른 전력 추종을 보여 주게 된다. 3절에서는 디지털 재설계 방안을 통한 디지털 퍼지 제어기를 설계 하게 되며, 마지막으로 4절에서는 결론을 제시한다.

2. 최대 전력 추종을 위한 제어

2.1 태양광 및 풍력 발전 시스템

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

- 태양광 발전 시스템의 비선형 동역학 방정식

$$\begin{aligned} \dot{v}_{pv} &= \frac{i_{pv}}{C} - \frac{i_o}{C} u_{pv} \\ \dot{i}_s &= -\frac{v_b}{L} + \frac{v_{pv}}{L} u_{pv} \\ i_{pv} &= \eta_p I_{ph} - \eta_p I_{rs} \left(e^{\frac{q(v_{pv} + i_{pv} R_b)}{n_s A_c K T}} - 1 \right) \end{aligned}$$

여기서 $v_b = E_b + v_c + (i_o - i_L) R_b$ 로, 배터리에서의 전압을 의미하며, i_L 는 측정된 값으로 임의로 설정된다.

- 풍력 발전 시스템의 비선형 동역학 방정식

$$\begin{aligned} \dot{x} = \begin{bmatrix} \dot{i}_q \\ \dot{i}_d \\ \dot{w}_e \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} g_1 \\ g_2 \\ g_3 \end{bmatrix} u_w \\ &= \begin{bmatrix} -\frac{r_s}{L} i_q - w_e i_d + \frac{w_e \phi_{sr}}{L} \\ -\frac{r_s}{L} i_d + w_e i_q \\ \frac{P}{2J} (T_t - \frac{3}{2} \frac{P}{2} \phi_{sr} i_q) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{\pi v_b i_q}{3\sqrt{3} L \sqrt{i_q^2 + i_d^2}} \\ -\frac{\pi v_b i_d}{3\sqrt{3} L \sqrt{i_q^2 + i_d^2}} \\ 0 \end{bmatrix} u_u \end{aligned}$$

$$v_b = E_b + v_c + \left(\frac{\pi}{2\sqrt{3}} \sqrt{i_q^2 + i_d^2} u_x + i_f - i_L \right) R_b$$

위와 같은 복잡한 비선형성을 제어하기 위해 T-S 퍼지 시스템을 이용한다. 태양광 발전 시스템에서의 퍼지 모델링을 위하여 각 변수를 $x_1 = V_{pv}$, $x_2 = I_o$ 으로 지정한다. 그 결

과 다음 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{V}_{pv} &= \frac{i_{pv}}{C} - \frac{i_o}{C} u_{pv}, \quad \dot{i}_o = -\frac{v_b}{L} + \frac{x_1}{L} u_{pv} \\ i_{pv} &= \eta_p I_{ph} - \eta_p I_{rs} \left(e^{\frac{q V_{pv}}{\eta_s A K T}} - 1 \right), \quad v_b = E_b + (i_o - i_L) R_b \\ \dot{x} = \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -\frac{e^{q/\eta_s A K T}}{C} x_1 \\ \frac{R_b}{L} x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{x_2}{C} \\ \frac{x_1}{L} \end{bmatrix} u_{pv} + \begin{bmatrix} \frac{\eta_p I_{ph} + \eta_p I_{rs}}{C} \\ -\frac{E_b - i_L R_b}{L} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

퍼지 모델링을 위해 비선형 변수들에 대한 변위를 다음과 같이 두게 된다.

$$x_{1_{\min}} \leq \hat{x}_1 \leq x_{1_{\max}}, \quad x_{2_{\min}} \leq \hat{x}_2 \leq x_{2_{\max}}$$

총 2개의 비선형 변수가 존재하게 되며, 본 태양광 시스템은 총 4개의 퍼지 룰 기반 시스템으로 재구성 된다.

$$\begin{aligned} R^i: IF z_1(t) \text{ is } F_{1j} \text{ and } z_2(t) \text{ is } F_{2j} \\ THEN y(t) = A_i x(t) + B_i u + v_i \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 $i \in I_4$ 이며, v_i 는 affine 상수 이며, 시스템의 각 요소는 아래와 같다.

$$\begin{aligned} A_i &= \begin{bmatrix} -\frac{e^{q/\eta_s A K T}}{C} x_1 \\ \frac{R_b}{L} x_2 \end{bmatrix}, \quad v_i = \begin{bmatrix} \frac{\eta_p I_{ph} + \eta_p I_{rs}}{C} \\ -\frac{E_b - i_L R_b}{L} \end{bmatrix}, \quad B_1 = \begin{bmatrix} -\frac{x_{2_{\min}}}{C} \\ \frac{x_{1_{\min}}}{L} \end{bmatrix} \\ B_2 &= \begin{bmatrix} -\frac{x_{2_{\max}}}{C} \\ \frac{x_{1_{\max}}}{L} \end{bmatrix}, \quad B_3 = \begin{bmatrix} -\frac{x_{2_{\min}}}{C} \\ \frac{x_{1_{\max}}}{L} \end{bmatrix}, \quad B_4 = \begin{bmatrix} -\frac{x_{2_{\max}}}{C} \\ \frac{x_{1_{\min}}}{L} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

배터리 상태가 고려된 풍력 발전 시스템은 아래와 같다. (참고로 배터리 전압 v_c 의 경우 [1], [4]에 의하여 상수로 가정하였다.)

$$\begin{aligned} \dot{x} = \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -\frac{r_s}{L} x_1 - x_1 x_2 - \frac{\phi_{sr}}{L} x_3 \\ -\frac{r_s}{L} x_2 + x_1 x_3 \\ \frac{P}{2J} \left(\frac{3}{2} \frac{P}{2} \phi_{sr} x_1 \right) + \frac{1}{2} \frac{\rho_A C_P}{T S R^2} \left(\frac{2r}{P} \right)^2 x_2^2 \end{bmatrix} \\ &+ \begin{bmatrix} -\frac{\pi E_b}{3\sqrt{3} L} \frac{x_1}{\sqrt{x_1^2 + x_2^2}} - \frac{\pi^2 R_b}{18L} x_1 u \\ -\frac{\pi E_b}{3\sqrt{3} L} \frac{x_2}{\sqrt{x_1^2 + x_2^2}} - \frac{\pi^2 R_b}{18L} x_2 u \\ 0 \end{bmatrix} u \end{aligned} \quad (2)$$

위의 상태 방정식에서 알 수 있듯이 비선형 변수들은 총 5개로 구성되어 있으며, 그중 세 변수는 다음 변위를 가지게 된다.

$$x_{1_{\min}} \leq \hat{x}_1 \leq x_{1_{\max}}, \quad x_{2_{\min}} \leq \hat{x}_2 \leq x_{2_{\max}}, \quad x_{3_{\min}} \leq \hat{x}_3 \leq x_{3_{\max}}$$

복잡성을 지닌 나머지 비선형 변수에 대해서는 그림 2를 참고하게 된다. 그림 2에서 알 수 있듯이, 남은 두 비선형 변

수는 각각 \sin , \cos 함수를 나타내게 되며, 두 함수 성질에 의해 다음과 같은 변위를 가지게 된다.

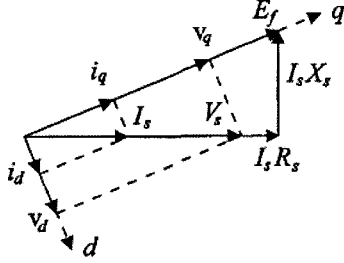


그림 2. i_q 와 i_d 간의 관계.
Fig 2. Relation of i_q and i_d .

$$0 \leq \frac{x_1}{\sqrt{x_1^2 + x_2^2}} \leq 1, 0 \leq \frac{x_2}{\sqrt{x_1^2 + x_2^2}} \leq 1 \quad (3)$$

그 결과 풍력 시스템의 경우는 다음과 같은 총 32개의 룰을 가진 퍼지 모델로 변환된다.

$$R^i: IF z_1(t) \text{ is } F_{1j} \text{ and } \dots \text{ and } z_5(t) \text{ is } F_{5j} \\ THEN y(t) = A_i x(t) + B_i u + C_i u^2$$

$$A_i = \begin{bmatrix} -\frac{r_s}{L} & -x_{3_{\min}} & \frac{\phi_{sr}}{L} \\ x_{3_{\min}} & -\frac{r_s}{L} & 0 \\ -\frac{P}{2J} \left(\frac{3P}{2} \phi_{sr} \right) & 0 & \frac{1}{2} \frac{\rho_A C_P}{TSR^2} \left(\frac{2r}{P} \right)^2 x_{3_{\min}} \end{bmatrix}, i=1, \dots, 18$$

$$A_j = \begin{bmatrix} -\frac{r_s}{L} & -x_{3_{\max}} & \frac{\phi_{sr}}{L} \\ x_{3_{\max}} & -\frac{r_s}{L} & 0 \\ -\frac{P}{2J} \left(\frac{3P}{2} \phi_{sr} \right) & 0 & \frac{1}{2} \frac{\rho_A C_P}{TSR^2} \left(\frac{2r}{P} \right)^2 x_{3_{\max}} \end{bmatrix}, j=18, \dots, 32$$

$$B_i = \begin{bmatrix} -\frac{\pi E_b}{3\sqrt{3}L} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, i=1, \dots, 8. B_j = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{\pi E_b}{3\sqrt{3}L} \\ 0 \end{bmatrix}, j=9, \dots, 16.$$

$$B_k = \begin{bmatrix} -\frac{\pi E_b}{3\sqrt{3}L} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, k=17, \dots, 24. B_l = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{\pi E_b}{3\sqrt{3}L} \\ 0 \end{bmatrix}, l=25, \dots, 32.$$

$$C_1 = \begin{bmatrix} \frac{\pi^2 R_b}{18L} x_{1_{\min}} \\ \frac{\pi^2 R_b}{18L} x_{2_{\min}} \\ 0 \end{bmatrix}, C_2 = \begin{bmatrix} \frac{\pi^2 R_b}{18L} x_{1_{\min}} \\ \frac{\pi^2 R_b}{18L} x_{2_{\max}} \\ 0 \end{bmatrix}, C_3 = \begin{bmatrix} \frac{\pi^2 R_b}{18L} x_{1_{\max}} \\ \frac{\pi^2 R_b}{18L} x_{2_{\min}} \\ 0 \end{bmatrix}, C_4 = \begin{bmatrix} \frac{\pi^2 R_b}{18L} x_{1_{\max}} \\ \frac{\pi^2 R_b}{18L} x_{2_{\max}} \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$C_1 = C_5 = C_9 = \dots = C_{29}, C_2 = C_6 = C_{10} = \dots = C_{30}, \\ C_3 = C_7 = C_{11} = \dots = C_{31}, C_4 = C_8 = C_{12} = \dots = C_{32}.$$

참고 1 풍력 시스템에서는 입력이 두 개가 존재하는데, 이는 배터리 상태가 고려된 풍력 시스템상의 특성으로, 실제 풍력 시스템에서 들어오는 입력 u 는 DC/DC 변환기의 duty cycle로 항상 양으로 존재하며, 값 자체의 단순 거동 제공이기 때문에 위의 구성은 가능하다.

2.2 T-S 퍼지 시스템

일반적인 전력 추종 (power regulation) 문제는 다음과 같은 제어 목적 (control objective)으로 나타내어진다.

$$P_i - P_d \rightarrow 0 \text{ as } t \rightarrow \infty \quad (4)$$

여기서 P_d 는 이상적인 전력(desired power)을 의미한다. 비선형성을 효율적으로 고려할 수 있는 다음과 같은 Takagi-Sugeno (T-S) 퍼지시스템을 고려하자. 퍼지 시스템은 IF-THEN 규칙의 결합으로 구성되어 있다.

$$R^i: IF z_1(t) \text{ is } F_1^i \text{ and } \dots \text{ and } z_n(t) \text{ is } F_n^i \\ THEN y(t) = A_i x(t) + B_i u \quad (5)$$

여기서 R^i 는 i 번째 규칙, $z_h(t)$ 는 h 번째 전건부 변수를 의미한다. 중심값-평균 비퍼지화, 곱셈 추론, 싱글톤 퍼지화를 사용하면 시스템 (5)의 전역 동특성은 다음과 같이 표현된다:

$$\dot{x} = \sum_{i=1}^q h_i(z(t))(A_i x(t) + B_i u(t)) \quad (6)$$

여기서

$$w_i(z(t)) = \prod_{j=1}^n F_{ji}(z_j(t)), h_i(x) = \frac{w_i(z(t))}{\sum_{i=1}^q w_i(z(t))}$$

$$h_i(x) \geq 0, \sum_{i=1}^q h_i(z(t)) = 1$$

추정 오차(regulation error)는 아래와 같이 구성된다.

$$\tilde{x}(t) = x(t) - x_d(t) \quad (7)$$

양변에 시간 미분을 취해주면,

$$\dot{\tilde{x}}(t) = \sum_{i=1}^q h_i(z(t)) A_i x(t) - \sum_{i=1}^q h_i(z(t)) A_i x_d(t) \\ + \sum_{i=1}^q h_i(z(t)) B_i u(t) + \sum_{i=1}^q h_i(z(t)) A_i x_d(t) - \dot{x}_d(t)$$

여기서 제어 입력을 아래와 같이 설정 된다.

$$\sum_{i=1}^q h_i(z(t)) B_i u(t) = \sum_{i=1}^q h_i(z(t)) B_i u(t) \\ - \sum_{i=1}^q h_i(z(t)) A_i x_d(t) + \dot{x}_d$$

따라서 전력 추종문제는 다음과 같이 퍼지 시스템에 대한 안정화 문제로 귀결된다.

$$\dot{\tilde{x}}(t) = \sum_{i=1}^q h_i(z(t)) A_i \tilde{x}(t) - \sum_{i=1}^q h_i(z(t)) B_i u(t) \quad (9)$$

여기서 $\tilde{x}(t)$ 를 안정화 시킨다는 것은 시스템의 궤적 $x(t)$ 가 이상 궤적 $x_d(t)$ 를 따라간다는 것을 의미한다. 각 시스템의 안정화를 위해 IF-THEN 규칙으로 재구성된 퍼지 시스템의 각 규칙에 해당하는 제어를 설계하게 되며, 비퍼지화 된 결과는 다음과 같다.

$$u_w = - \sum_{i=1}^q h_i(x) K_{wi} \tilde{x}(t). \quad (10)$$

제어기 (10)을 통해 풍력 시스템의 비선형성은 선형 형질 부등식 (Linear Matrix Inequality: LMI)으로 풀리게 되며 그 결과는 그림 3과 같다. 그러나 풍력 시스템과 달리, 태양광 시스템의 경우 affine 상수를 포함하고 있기 때문에 다음과 같은 제어기 구성이 필요하다.

$$u_{pv} = \sum_{i=1}^q h_i(x) (-F_{pv} \tilde{x}(t) - \sigma_i). \quad (11)$$

제어기 (11)를 통해 비선형성 및 affine 상수 문제를 해결하기 위하여 [5]에서 제시한 Iterative Linear matrix inequality (ILMI) 알고리즘을 이용하게 된다. 그림 4는 해당 알고리즘을 이용한 안정화 결과이다. (구체적인 알고리즘은 논문 [5] 참고바람.)

2.3 각 모드별 전력 추종

그림 5의 상황별 모드에서 알 수 있듯이, 주력 시스템은 풍력 시스템으로 작동하게 되며, 태양광 시스템은 모드 2에서 부터 동작하게 된다. 배터리 상황에 대해선 시스템 모델 자체에서 고려되었기 때문에 따로 언급하지는

않는다. 가상 시나리오를 설정하면 다음과 같다. 추종하고자 하는 전체 전압, 즉 Ptotal demand 는 3000W로 고정되어 있다. 그리고 시행되는 시뮬레이션은 상온에 가까운 온도 301.18K 이며 insolation 은 80mW/cm² 이다. 우선 모드 1에서 동작하게 되는 풍력 시스템의 전력 문제를 고려해 보자.

$$P_{w_{ref}} = P_{TotalDemand} = v_b(i_L + I_{b_{ref}}) \quad (12)$$

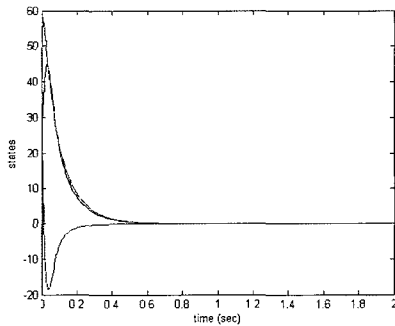


그림 3. 풍력 시스템 안정화 결과.
Fig 3. Stabilization of wind system.

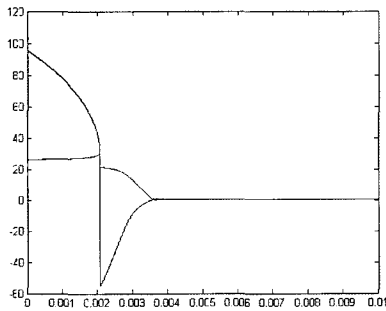


그림 4. 태양광 시스템 안정화 결과.
Fig 4. Stabilization of photovoltaic system.

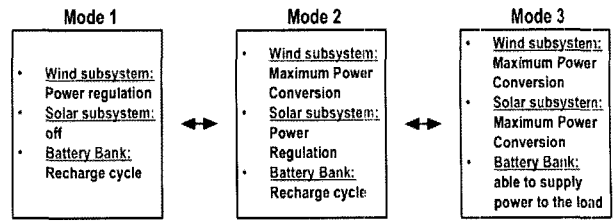


그림 5. 하이브리드 발전 시스템의 상황별 제어 목적.
Fig 5. Schematic description of the operation modes.

여기서 i_L 은 load 전류이며 2A로 고정되어 있다. 그리고 $I_{b_{ref}}$ 는 배터리 상태에서 오는 전압으로 역시 값이 일정하다. 이 모드에서 풍력 시스템은 전력 추종을 위해 움직이게 되고 그에 관계되는 변수는 v_b 이다. 그 궤적은 그림 6과 같다. 모드 2에서의 동작은 다음과 같다.

$$P_{w_{ref2}} = P_{w_{opt}} - P_{losses} = K_{opt} w_m^3 - \frac{3}{2}(i_q^2 + i_d^2)r_s \quad (13)$$

여기서 $K_{opt} = \frac{C_i(\lambda_{opt})\rho AR^3}{2\lambda_{opt}^2}$ 이며, λ_{opt} 는 풍력 시스템의 최대 전력에서의 속도 ratio를 의미하며, P_{losses} 는 손실된 전력을 의미한다. 2장에서 언급되었듯이, 본 논문에서는 전력 추종 문제를 안정화 문제로 변환하여 설명하였다. 따라서 안정화 문제가 해결됨으로 인해 다음과 같은 전력 추종 결과 역시 쉽게 구해질 수 있게 된다. 풍력 발전 시스템의 경우 전력에 관계하는 파라미터는 x_1 과 x_3 이며, 각 추종 값은 그림 7, 8과 같다. 이와 관계하여 모드 2에서는 태양광 발전 역시 이루어지게 되며, 그에 따른 동작을 살펴보자.

$$P_{s_{ref}} = P_{TotalDemand} - P_w = v_b(i_L + I_{b_{ref}} - i_w) \quad (14)$$

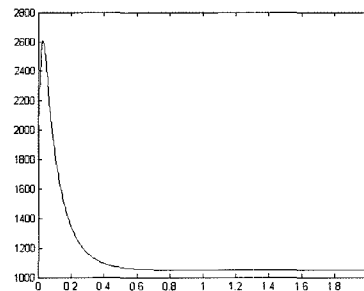


그림 6. 모드 1에서의 시간 응답.
Fig 6. Time response of mode 1.

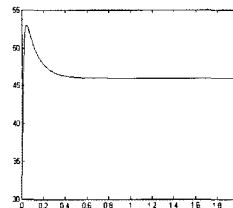


그림 7. x_1 추종 결과.
Fig 7. Regulation of x_1 .

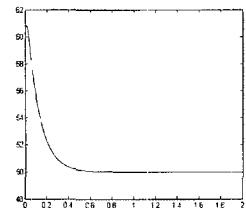


그림 8. x_3 추종 결과.
Fig 8. Regulation of x_3 .

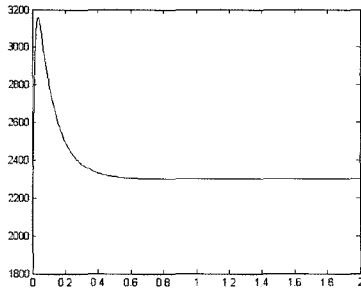


그림 9. 모드 2에서의 시간 응답
Fig 9. Time response of mode 2.

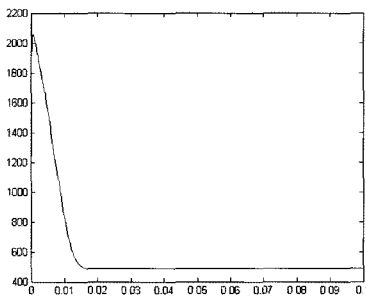


그림 10. 모드 2 태양광 시스템 궤적.
Fig 10. Time response of mode 2.

동작 식에서 유추할 수 있듯이, 태양광 발전은 전체 요구되는 전력 값에서 풍력 시스템이 최대 전력을 추종 하고도 모자란 전력을 추종하게 된다. 그에 따른 계산은 모드 2에서 이루어지는 최대 풍력 전압 추종에서부터 이루어지며, 그 궤적은 그림 10과 같다. 이로써 풍력 시스템과의 연계를 통한 최대 전력 추종이 이루어지게 된다. 모드 3에서는 배터리의 재충전 파트가 동작하게 되고, 풍력과 태양광 발전 시스템은 모드 2에서의 동작을 그대로 계속 진행하게 된다. 배터리의 재충전이 끝나면 다시 모드 1과 2를 번갈아 가며 전력을 발생시키게 된다.

3. 지능형 디지털 재설계

본 과제에서는 하이브리드 발전 시스템의 제어를 컴퓨터 기반으로 하기 위해서 디지털 제어기를 설계 한다. 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, 아날로그 퍼지 모델 기반 제어기 설계 후, 선형 시스템의 이산화 기법을 적용하여 일반적으로 다음과 같이 이산화 된다.

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

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

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 전 역적 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 전 역적 상태 집합과 안정도 보장을 위한 효율적 접근을 위해 각각의 이론을 설정하였고, 그 첫 번째는 다음과 같다.

정리 3-1 (안정도 조건)[2]: 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.

$$\begin{bmatrix} -Q + (q-1)O & * \\ G_i Q + H_i U_i & -Q \end{bmatrix} < 0, \quad i, j \in I_q \quad (15)$$

$$\begin{bmatrix} -Q - O & * \\ \frac{G_i Q + H_i U_i + G_j Q + H_j U_j}{2} & -Q \end{bmatrix} < 0, \quad i, j \in I_q \quad (16)$$

두 번째 이론에서는 전 역적 접근을 통한 상태 집합 문제 로써, 두페루프 시스템 사이의 아날로그 입력 값과 디지털 제어기 사이의 상태 집합이 나타내어진다.

정리 3-2 [2] : 이산화 되어진 디지털 페루프 시스템의 안정화를 위하여, 주어진 아날로그 입력 K_c^i 와 찾고자 하는 디지털 입력 K_d^i 사이의 상태 집합 문제는 다음과 같은 선형 작용소의 norms 최소화 하는 볼록 최적화 문제로 구성된다.

Minimize λ subject to

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

$$\begin{bmatrix} -\gamma Q & * \\ \Phi_{ii} Q - G_i Q - H_i U_j & -\gamma I \end{bmatrix} < 0, \quad i, j \in I_q \quad (17)$$

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

증명 : 참고문헌 [2]를 참고.

제안된 디지털 재설계 기법을 이용하여 일반 아날로그 제어가 아닌 디지털 퍼지 제어기가 설계되며, 설계된 제어기는 디지털 신호에서 아날로그 궤적과 유사하게 진행하게 된다. 아래 결과들이 디지털 퍼지 제어기를 사용한 궤적들이다. 본 논문에서는 하이브리드 발전 시스템의 주력 파트인 풍력 발전 시스템에 관한 지능형 디지털 재설계를 수행하였으며, 그 결과는 그림 11과 같다.

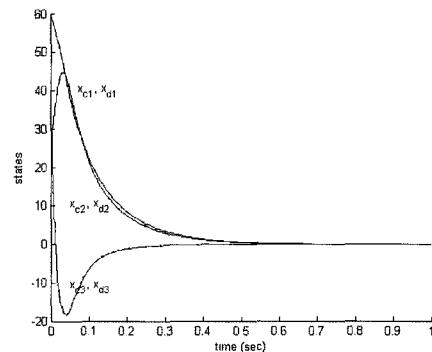


그림 11. 디지털 재설계 결과
Fig 11. The result of digital redesign

4. 결 론

본 논문에서는 두 개의 서브 발전 시스템 (풍력과 태양광 발전 시스템)으로 구성된 하이브리드 발전 시스템의 구현을 위하여 디지털 퍼지 제어를 제안하였다. 풍력과 태양광 발전 시스템의 경우 비선형성을 가지고 있기 때문에, 비선형 제어에 많은 강점을 가지는 T-S 퍼지 모델 기반의 제어를 사용하였다. 그리고 마이크로프로세서 기반 디지털 도구 사용의 극대화를 위해, 지능형 디지털 재설계 기법을 이용한 디지털 퍼지 제어를 설계하는 방법을 제시하였다.

본 논문에서는 하이브리드 발전 시스템에서 최대 전력 추종과 배터리 상태를 일정하게 유지하기 위해서 세 가지 모드에 따라 변화하는 제어 목적을 만족하는 제어를 설계하였으며 그에 따른 가상 시나리오를 전개하였다. 그리고 각 모드별 변환 문제를 해결하기 위해 하이브리드 발전시스템에 필요한 스위칭 기법을 도입하였으며, 디지털 재설계 기법을 이용, 디지털 제어를 설계하는 방법을 제안하였다. 제안된 방법의 우수성은 시뮬레이션을 통하여 증명하였다.

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] H. J. Lee, H. B. Kim, and J. N. Park, "A New Intelligent Digital Redesign for T-S fuzzy systems: Global Approach", IEEE Trans. Vol. 12, No2, April 2004.

[3] 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.

[4] 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.

[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] F. Valenciaga and P. F. Puleston, and P. E. Battaiotto, "Power control of a solar/wind generation system without wind measurement: a passivity/sliding mode approach," IEEE Trans. Energy Conversion., vol. 18, No 4. pp. 501-507, 2003.

[7] F. Valenciaga and P. F. Puleston, and P. E. Battaiotto, and R. J. Mantz., "Passivity/sliding mode control of a stand-alone hybrid generation system," IEE Proc. -Control Theory Appl., vol. 147, No. 6, pp. 680-686, 2000.

[8] H. J. Lee, J. B. Park and Y. H. Joo., "Robust

load-frequency control for uncertain nonlinear power systems: A fuzzy logic approach," Information Sciences., vol. 176, Issue. 23, pp. 3520-3537, 2006.

[9] A. M. Knight, G. E. Peters., "Simple wind energy controller for an expanded operating range," IEEE Trans. Energy Conversion., vol. 20, No. 2. 2005.

저 자 소 개

성화창(Hwa Chang Sung)
제 16권 5호(2006년 10월호) 참조

주영훈(Young Hoon Joo)
제 16권 5호(2006년 10월호) 참조

박진배(Jin Bae Park)
제 16권 5호(2006년 10월호) 참조