

강인 퍼지 이론을 이용한 풍력 터빈의 가변 속도 제어

Variable Speed Control of Wind Turbines Using Robust Fuzzy Algorithm

성화창*, 박진배*, 주영훈**

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

* 연세대학교 전기전자공학과

** 군산대학교 전자정보공학부

요 약

본 논문에서는 퍼지 이론을 이용한 풍력 터빈의 변화 속도 제어에 대해 다루고자 한다. 일반적인 풍력 터빈의 변화 속도는 복잡한 비선형성으로 나타내어지며, 플랜트를 구성하는 각 파라미터의 수치 역시 불확실하다. 이와 같은 복잡성을 해결하기 위하여, 우리는 비선형성 및 불확실성에 강인한 퍼지 제어 이론을 제안하고자 한다. 우선 풍력 터빈의 변화 속도에 대한 정확한 퍼지 모델링을 수행하게 된다. 그리고 재해석된 Takagi-Sugeno (T-S) 퍼지 모델에 적합한 제어기를 설계하게 되며, 리아푸노프 안정도에 기반 한 시스템의 안정도를 증명하게 된다. 마지막으로, 가상 시뮬레이션을 통해 제안된 기법의 효율성을 입증하게 된다.

Abstract

In this paper, we present the robust fuzzy algorithm for variable speed control of wind turbines. Generally, the plants of wind turbines are consisted of complex nonlinearities, and the parameters of variable speed of wind turbines are represented as uncertain terms. For solving these complexity, we propose the robust fuzzy algorithm. At first, the exact fuzzy modeling are performed for variable speed of wind turbines. Next, we design the fuzzy controller for reanalyzed T-S fuzzy model of the wind turbines, then, we prove the stability of the plant through the Lyapunov stability theorem. At last, an example is included for visualizing the efficiency of the proposed technique

Key Words : 풍력 터빈, 가변 속도 제어, 리아푸노프 안정도, 퍼지 모델링, Takagi-Sugeno (T-S) 퍼지 모델.

1. 서 론

고도의 산업 성장과 인구 증가에 따른 급증된 에너지 소비는 현 시점을 살아가는 우리에게 많은 고민을 던져주고 동시에 위협마저 주고 있다. 당장의 석유 자원 고갈도 문제지만, 석유 자원을 태웠을 때 발생하는 CO₂를 비롯한 많은 화합물들은 인류의 미래를 위협하는 가장 큰 문제가 되고 있다. 이에 따라 범지구적 차원에서 많은 대책이 논의 되고 있으며, 그에 따른 가장 좋은 해결책으로 각광받고 있는 것이 태양력, 풍력, 조력 등의 대체 에너지 자원을 이용한 발전 시설 개발이다. 이러한 대체 에너지를 이용한 설비는 비교적 높은 초기 투자의 장애 요인에도 불구하고, 화석 에너지의 고갈 문제와 환경 문제에 대한 핵심 해결 방안이라는 측면에

서 선진국을 비롯한 수많은 나라에서 정부 주도하에 대체 에너지에 대한 과감한 보급 정책과 연구 정책을 추진하고 있으며, 에너지 공급 방식이 중앙 공급 식에서 지방 분산화 정책으로 전환하는 시점에서 환경, 교통, 안보 등을 고려한 Local 자원의 활용 측면에서도 적극 적인 추진이 이루어지고 있다 [4]. 이 가운데서도 풍력 발전 시스템은 다른 발전 시스템에 비해 그 연구가 활발히 진행되고 있으며, 그에 따른 많은 연구 성과물도 발표되고 있다 [3]-[7], [9]-[12].

풍력 발전 시스템은 풍력 터빈을 기반으로 하여 외부의 바람의 속도에 따른 발전이 이루어지게 된다. 전통적으로 대부분의 풍력 터빈 발전 시스템은 발전이 시작하는 순간과 끝나는 순간을 제외하고는 고정된 터빈의 속도를 가정하고 연구가 이루어져왔다 [3], [6]. 그러나 고정된 속도에서의 움직임을 가정하는 것은 수시로 변하는 바람의 움직임을 생각해 볼 때 실제 적용에는 적합하지 않다. 또한, 터빈의 속도가 고정되어 있다는 것은 최상의 전력을 획득하는 것이 특정 속도에서만 가능하다는 것을 의미하기 때문에 그 효율성이 떨어진다 [10].

이와 같은 문제점을 해결하기 위하여, 터빈의 속도가 변수로 고려된 풍력 발전 모델에 대한 연구가 진행되어 왔다 [4], [5], [7], [9]-[12]. 고정된 속도의 터빈을 사용하는 것에 비해 터빈의 속도 변화가 고려된 모델은 1) 높은 에너지 창출 2) 사용 부품에 대한 유연성 3) 그리드 연결 수 감소 등의 장점

접수일자 : 2007년 11월 10일

완료일자 : 2008년 1월 20일

감사의 글 : 이 논문은 2008년도 두뇌한국21사업에 의하여 지원되었음.

본 연구는 산업자원부 전력기반조성사업센터의 고급인력 양성사업을 통한 연세대학교 계통 적용 신 전력기초연구센터의 지원으로 수행되었습니다(과제번호: 2007-8-0741).

을 가지고 있다 [4]. 그림 1의 구조가 터빈의 속도가 고려된 모델의 동작 과정이다. 그림에서 알 수 있듯이, 바람의 속도에 따라 rotor dynamics와 drive trains 등의 작동을 거쳐 발전이 이루어지게 된다. 그러나 이 같은 모델의 동역학 방정식은 대부분 심각한 비선형 성을 지니고 있으며, 모델을 구성하는 파라미터 관계 역시 외부의 영향을 많이 받는다 [4],[6]. 이러한 문제점은 발전 시스템의 불안정성으로 이어지면, 그로 인한 제어의 심각한 문제를 야기 시킨다는 점에서 반드시 해결되어야 한다. 많은 논문에서 풍력 발전 시스템의 비선형성과 불확실성을 해결하기 위해 연구되어 왔다. 그러나 논문 [10]에서는 비선형을 선형화 기법을 통해 불완전하게 해결하였으며, [11]에서는 퍼지 (fuzzy) 기법을 도입하였으나 모델 자체의 비선형성에 대해서는 다루지 않았다. 그리고 논문 [4], [9]에서는 파라미터 불확실성에 대한 언급이 전혀 이루어지지 않았다.

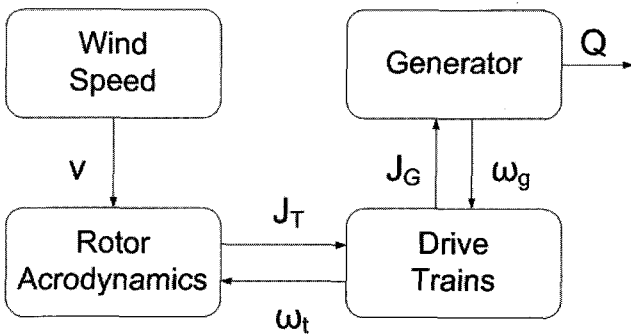


그림 1 풍력 발전 구조
Fig 1 Wind power scheme

본 논문에서는 강인 퍼지 제어 기법을 이용한 풍력 터빈 시스템의 안정도에 대해 논의하고자 한다. 제안된 풍력 터빈 시스템은 터빈의 속도 변화가 고려된 모델로써, 기존의 획일화 된 속도만 고려된 모델보다 현실 적용 면에서 우수하다. 또한 강인 퍼지 제어 기법을 도입함으로써, 풍력 발전 시스템이 가지는 비선형성 및 불확실성을 해결하고자 하였다. 구성된 전체 시스템은 리아푸노프 (Lyapunov) 식을 기반으로 하여 안정도 증명이 이루어지게 된다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2절에서는 풍력 터빈의 변화 속도 모델링 및 이에 대한 퍼지 모델링을 다루게 된다. 3절에서는 강인 퍼지 제어 기법을 제안하며 4절에서는 간략한 시뮬레이션 결과를 보이게 된다. 마지막으로 5절에서는 결론을 제시함으로써 논문을 마무리하게 된다.

2. 풍력 터빈의 변화 속도 모델에 대한 퍼지 모델링

풍력 발전기의 모델링에 있어 중점을 두어야 할 것은 외부 풍력의 속도 변화에 대한 유연한 대처이다. 이에 대한 해결책으로 제시된 것이 풍력 터빈의 속도를 변화 시킴으로써 외부의 변화에 강인한 발전 시스템을 이루는 것이다. 본 논문에서 고려하고자 하는 풍력 터빈의 변화 속도 모델은 풍력 발전 시스템은 외부 풍력의 변화에 따라 변화된 발전 움직임을 보이게 된다. 그림 2에서 보이는 것이 언급된 사항이 고려된 풍력 발전 시스템의 구조적 다이어그램이다 [5].

좀 더 구체적으로, 풍력 터빈의 변화된 속도가 고려된 모델 방정식은 다음과 같이 표현 된다 [4,10].

$$\begin{aligned} Q_A - Q &= J_T \dot{\omega}_t \\ Q - Q_E &= J_G \dot{\omega}_g \\ Q &= Q_s + Q_D = K_S \int_0^t (\omega_t - \omega_g) dt + B_S (\omega_t - \omega_g) \end{aligned} \quad (1)$$

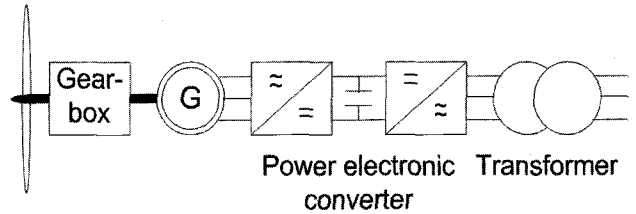


그림 2 풍력 터빈 시스템
Fig 2 Wind turbine system

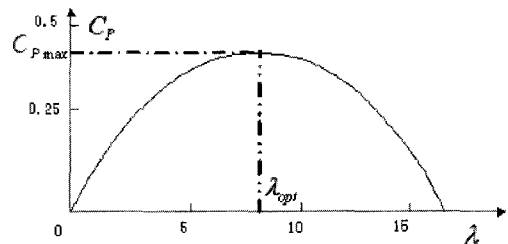


그림 3 전력 계수 곡선
Fig 3 Power coefficient curve

여기서 Q_A 는 바람의 토크 (torque)를 나타내며, ω_t 는 풍력 터빈 동작 시 회전자 (rotor)를 말하며, Q_E 는 샤프트의 토크를, ω_g 는 발전 각 속도를 의미한다. 또한, K_S 는 샤프트의 탄력도 (compliance)를 나타내며, B_S 는 샤프트의 감폭 (damping)을 나타내고 J_T 와 J_G 는 각각 터빈과 발전기의 관성을 나타내며, Q 는 샤프트의 토크를 의미한다.

바람으로부터 얻어지는 전력은 다음과 같다.

$$P_t(\omega, \lambda) = \frac{1}{2} \pi \rho R^2 C_p(\lambda) \omega^3 \quad (2)$$

여기서 ρ 는 공기의 비중을, R 는 날의 길이를, w 는 바람의 속도를 의미하며 C_p 는 터빈의 전력 계수를 의미한다. 그리고 프로펠러 날개의 끝 속도의 비율을 의미하는 λ 는 다음의 비선형 식으로 나타내어진다.

$$\lambda = \frac{R\omega_t}{w} \quad (3)$$

식 (2)와 (3)에서 알 수 있듯이, 고려된 풍력 발전기에서 얻어지는 전력은 $C_p(\lambda)$ 라는 변수에 따라 달라지며, $C_p(\lambda)$ 는 λ 라는 또 다른 함수에 의해 정의되고 있음을 알 수 있다. 이 둘 간의 관계를 표현한 그래프는 그림 3과 같이 보여진다 [4], [7], [10]. 그림에서 알 수 있듯이, 최대 전력 계수인 C_{pmax} 는 $\lambda = \lambda_{opt}$ 일 때 나타나며, 이때 풍력 터빈 발전 모델에서 최적화된 전력을 생산하게 되는 것이다. 식 (2)와 (3)에서 Q_A 는 ω_t 와 w 의 두 변수에 대한 비선형성을 보이게 되며,

그러한 관계가 표현된 식은 다음과 같이 표현 된다.

$$Q_A = \frac{1}{2} ARC_q(\lambda)w^2 \quad (4)$$

여기서 $C_q(\lambda)$ 는 변화하는 토크 계수 함수로써 다음의 함수식을 가지게 된다.

$$C_p(\lambda) = \lambda C_q(\lambda) \quad (5)$$

참고 1 식 (4)와 (5)를 통해 식 (1)을 분석해 보면, 풍력 터빈의 변화된 속도가 고려된 모델 방정식은 심각한 비선형성을 가지고 있게 된다. 대부분의 논문에서는 이러한 비선형성을 선형화 기법 (linearization)을 통해 접근하였지만, 이러한 방법들은 비선형성에 대해 직접적으로 다루지는 않았다.

지금까지 전개된 내용을 고려하여 풍력 터빈의 새로운 모델을 얻는 것이 가능하다. 여기서 우리는 풍력 터빈의 비선형성과 파라미터 불확실성의 두 가지 측면을 모두 고려하여 모델에 반영하고자 한다. 상태 변수는 ω_t , ω_g 그리고 Q_S 세 가지이며, 각각은 다음과 같이 계산된다. 우선 첫 번째 변수 ω_t 에 대해 생각해 보자. 식 (1)에서 ω_t 는 $\dot{\omega}_t = \frac{1}{J_T}(Q_A - Q)$ 와 같이 표현된다. 여기서 Q_A 는 (4)와 (5)를 활용, 다음과 같이 나타내어진다.

$$\begin{aligned} Q_A &= \frac{1}{2} \rho AR C_q(\lambda) w^2 = \frac{1}{2} \rho AR C_q(\lambda) \frac{R^2 \omega_t^2}{\lambda^2} \\ &= \frac{1}{2} \rho AR^3 \frac{C_q(\lambda)}{\lambda^2} \omega_t^2 \end{aligned} \quad (6)$$

식 (6)을 활용하면, ω_t 에 대해 비선형성을 지닌 다음과 같은 상태 방정식을 얻게 된다.

$$\dot{\omega}_t = \frac{1}{J_T} \left(\frac{1}{2} \rho AR^3 \frac{C_q(\lambda)}{\lambda^2} \omega_t^2 - Q_S - B_S(\omega_t - \omega_g) \right) \quad (7)$$

두 번째로 ω_g 는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \dot{\omega}_g &= \frac{1}{J_G} (Q - Q_E) \\ &= \frac{1}{J_G} (Q_S + B_S(\omega_t - \omega_g)) - \frac{1}{J_G} Q_E \end{aligned} \quad (8)$$

여기서 Q_E 는 시스템의 입력으로 동작하게 된다. 마지막으로, Q_S 는 다음과 같이 나타내어진다.

$$\begin{aligned} Q_S &= K_S \int_0^t (\omega_t - \omega_g) dt \\ &= K_S \omega_t - K_S \omega_g \end{aligned} \quad (9)$$

요약하건대, (7)-(9)는 풍력 터빈의 속도가 고려된 동적 방정식이며, (7)에서 비선형성을 지니고 있음을 알 수 있다. 또한, 식 (7)에서 계산되는 $C_q(\lambda)$ 라는 변수는 함수로 표현되는 값이며 그림 3에서 알 수 있듯이, 일정 값에서 최적 지점을 가지고 있다. 그러나 항상 최적 값을 유지 할 수 없기 때문에, 그 부근에 대한 바운드를 주는 것이 타당할 것이다. 그리고 (9)에서 나타내어진 Q_S 의 경우는 적분 값으로 표현되었으며, 적분 상수가 고려되지 않은 상태로 나타내어 졌기에,

이 역시 적절한 바운드를 주는 것이 필요하다. 이러한 파라미터 불확실성이 고려된 모델은 다음과 같이 정리된다.

$$\dot{x}(t) = \begin{bmatrix} \frac{(\gamma - B_s)}{J_T} & \frac{B_s}{J_T} & \frac{1}{J_T} \\ \frac{B_s}{J_G} & -\frac{B_s}{J_G} & \frac{1}{J_G} \\ K_S & -K_S & 0 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{J_G} \\ 0 \end{bmatrix} u \quad (10)$$

여기서 $x^T = [\omega_t \ \omega_g \ Q_S]$, $u = Q_E$ 이며, γ 는 식 (7)에서의 $\frac{1}{2} \rho AR^3 \frac{C_q(\lambda) + \Delta a}{\lambda^2} \omega_t$ 를 나타내며, Δa 는 $C_q(\lambda)$ 가 지니고 있는 불확실 부분을 나타낸다. (10)에서 알 수 있듯이, 첫 번째 변수 ω_t 에서 비선형 성을 보이게 되며 이는 다음과 같은 퍼지 집합으로 표현하기 위해 다음의 이론을 이용하게 된다.

이론 1 [2]: $x \in [M_1, M_2]$ 를 가정하자. 비선형 함수

$$f(x, y) = xy \quad (11)$$

는 다음과 같은 선형의 부분 함으로 표현 가능하다.

$$f(x, y) = \left(\sum_{i_2=1}^2 \mu_{i_2} g_{i_2}(x, y) \right) y,$$

여기서 $g_1(x, y) = M_1$, $g_2(x, y) = M_2$, $\mu_1 = \Gamma_1^2$, $\mu_2 = \Gamma_2^2$ 그리고 $\Gamma_1^2 = \frac{-x + M_2}{M_2 - M_1}$, $\Gamma_2^2 = \frac{x - M_1}{M_2 - M_1}$ 이다.

이론 1을 통해 (10)은 다음의 두 가지 퍼지 함수로 나타내어진다.

$$\text{Rule 1: IF } x(t) \text{ is } M_1 \text{ THEN } \dot{x} = A_1 \begin{bmatrix} \omega_t \\ \omega_g \\ Q_S \end{bmatrix}$$

$$\text{Rule 2: IF } x(t) \text{ is } M_2 \text{ THEN } \dot{x} = A_2 \begin{bmatrix} \omega_t \\ \omega_g \\ Q_S \end{bmatrix}$$

여기서 A_1 과 A_2 는 각각 $\omega_t \in [M_1, M_2]$ 값에 따른 γ_1 과 γ_2 를 가지게 되며, 그에 따른 멤버십 함수는 $\Gamma_1 = \frac{-x + M_2}{M_2 - M_1}$,

$\Gamma_2 = \frac{x - M_1}{M_2 - M_1}$ 로 표현된다.

3. 강인 퍼지 제어

다음의 비선형 동적 방정식을 고려해 보자.

$$\dot{x}(t) = f(x(t), u(t)) \quad (12)$$

여기서 $x(t) \in R^n$ 는 상태 벡터를, $u(t) \in R^m$ 는 입력 벡터를 나타낸다. 본 논문에서는 비선형성을 효율적으로 고려할 수 있는 Takagi-Sugeno (T-S) 퍼지 시스템을 고려하고자 한다. 퍼지 시스템은 다음의 IF-THEN 규칙의 결합으로 구성되어 있다.

$$\begin{aligned} R^i: \text{IF } z_1(t) \text{ is } F_1^i \text{ and } \dots \text{ and } z_n(t) \text{ is } F_n^i \\ \text{THEN } y(t) = (A_i + \Delta A_i)x(t) + (B_i + \Delta B_i)u(t) \end{aligned} \quad (13)$$

여기서 R^i 는 i 번째 규칙, $z_h(t)$ 는 h 번째 전건부 변수를

의미하며, A_i, B_i 는 일반 행렬을 ΔA_i 와 ΔB_i 는 불확실 행렬을 나타낸다. 중심 값-평균 비퍼지화, 곱셈 추론, 싱글톤 퍼지화를 사용하면 시스템 (13)의 전역 동특성은 다음과 같이 표현 된다:

$$\dot{x} = \sum_{i=1}^q h_i(z(t))((A_i + \Delta A_i)x(t) + (B_i + \Delta B_i)u(t)) \quad (14)$$

여기서

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

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

시스템의 안정화를 위해 다음과 같이 IF-THEN 규칙으로 재구성 된 퍼지 시스템의 각 규칙에 해당하는 제어기를 설계 하게 된다.

$$R^i: \text{IF } z_1(t) \text{ is } F_1^i \text{ and ... and } z_n(t) \text{ is } F_n^i \text{ THEN } u(t) = K_i x(t) \quad (15)$$

비퍼지화 된 결과는 다음과 같다.

$$\dot{x} = \sum_{i=1}^q \sum_{j=1}^q h_i(z(t))h_j(z(t))((A_i + \Delta A_i) + (B_i + \Delta B_i)K_j)x(t) \quad (16)$$

다음의 리아푸노프 함수를 고려하자.

$$V(t) = x(t)^T P x(t) \quad (17)$$

식 (17)에 대한 시간 미분 식 $\dot{V}(t)$ 가 음 한정 행렬 식이 되어야 시스템이 안정하다는 것이 리아푸노프 식이다. 이와 같은 이론을 통해 (16)은 다음과 같이 나타내어질 수 있다.

$$(A_i + \Delta A_i + (B_i + \Delta B_i)K_j)^T P + P(A_j + \Delta A_j + (B_j + \Delta B_j)K_i) + PZ_{ij}P < 0 \quad (18)$$

여기서 $1 \leq i \leq j \leq q$ 이다. 식 (18)을 풀기 위해 다음의 가정을 도입하자.

가정 1 [1-3]: 불확실성을 나타내는 행렬 ΔA_i 와 ΔB_i 는 다음과 같이 나타내어진다.

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

여기서 D_i, E_{1i} 와 E_{2i} 는 알고 있는 실수 행렬이며, $F_i(t)$ 는 모르는 행렬로 $F_i(t)^T F_i(t) \leq I$ 와 같은 특징을 지니고 있다.

가정 2 [1-3]: 어떤 적절한 공간을 지닌 실수 행렬 $A_1 = A_1^T, A_2, A_3(t)$, 그리고 A_4 에서 다음의 부등식을 가정 하자:

$$A_1 + A_2 A_3(t) A_4 + A_4^T A_3(t) A_2^T < 0$$

여기서 $A_3(t)$ 는 $A_3(t)^T A_3(t) \leq I$ 를 만족할 때, 어떤 $\varepsilon > 0$ 에 대해 필요충분조건으로 다음을 만족한다.

$$A_1 + [\varepsilon^{-1} A_4 \ \varepsilon A_2] \begin{bmatrix} \varepsilon^{-1} A_4 \\ \varepsilon A_2^T \end{bmatrix} < 0$$

가정 1과 2를 통해 (18)은 다음과 같이 풀린다.

$$\Phi_{ij} + [(E_{1i} + E_{2i}K_j + E_{1j} + E_{2j}K_i)^T \ PD_i + PD_j] \begin{bmatrix} \varepsilon_{ij}^{-1} I \ 0 \\ 0 \ \varepsilon_{ij} I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{1i} + E_{2i}K_j + E_{1j} + E_{2j}K_i \ 0 \\ (PD_i + PD_j)^T \ 0 \end{bmatrix} < 0$$

여기서 $\Phi_{ij} = A_i^T P + PA_j + B_i^T K_j^T P + PB_j K_i + PZ_{ij}P$ 이다. Schur 식을 통해 우리는 다음의 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \Phi_{ij} & * & * \\ E_{1i} + E_{2i}K_j + E_{1j} + E_{2j}K_i & -\varepsilon_{ij} I & * \\ D_i^T P + D_j^T P & 0 & -\varepsilon_{ij}^{-1} I \end{bmatrix} < 0 \quad (19)$$

양변에 대각 행렬 $diag[P^{-1} \ I \ I]$ 를 곱해주면, 식 (19)는 다음의 행렬 부등식 (Linear Matrix Inequality: LMI)으로 나타내어진다.

$$\begin{bmatrix} \psi_{ij} & * & * \\ E_{1i} Q + E_{2i} M_i + E_{1j} Q + E_{2j} M_j & -\varepsilon_{ij} I & * \\ D_i^T + D_j^T & 0 & -\varepsilon_{ij}^{-1} I \end{bmatrix} < 0 \quad (20)$$

여기서 $Q = P^{-1}, \psi_{ij} = QA_i^T + A_j Q + M_j^T B_i^T + B_j M_i + Z_{ij}, M_i = K_i P^{-1}$ 를 나타낸다. 식 (20)을 통해 식 (16)이 안정하다는 것을 알 수 있으며, 이는 다음 절에서의 시뮬레이션을 통해 증명하게 된다.

4. 시뮬레이션 결과 및 고찰

앞서 2장에서 퍼지 모델링 기법을 통해 비선형 풍력 터빈 모델을 퍼지 규칙으로 나타내었고, 3장에서는 이에 적합한 제어기를 설계하였다. 설계된 제어기의 효용성을 알아보기 위해 이번 절에서는 시뮬레이션을 수행하게 된다. 다음은 시뮬레이션에 사용된 각 파라미터의 수치를 나타낸 것이다. 고려된 풍력 터빈은 3개의 날을 가진 600KW 모델이다.

$$J_T = 40000 \text{ kg } m^2, \ J_G = 65 \text{ kg } m^2, \ K_S = 100 \text{ Nms/rad}$$

$$B_S = 1800 \text{ Nms/rad}, \ R = 35 \text{ m}, \ \rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$$

위의 파라미터를 이용하여 시뮬레이션을 수행하였으며, 초기 값은 $K_S = 100 \text{ Nms/rad}$ 이다. 설계된 제어기를 통한 퍼지 제어 이득은 다음과 같다.

$$K_1 = 1.0e+004 \begin{bmatrix} 9936.7 & 0.4 & 2.7 \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$K_2 = 1.0e+004 \begin{bmatrix} 9181.6 & 0.4 & 2.4 \end{bmatrix} \quad (22)$$

그림 4-6은 각각 제어된 풍력 터빈 모델의 상태 변수들의 궤적을 나타낸 것이다. 그림 3에서 나타내어진 $C_q(\lambda)$ 가 지니는 불확실성의 정도는 10%를 가정하였으며, 초기 값은 $x(0) = [-1 \ 1 \ 1]^T$ 으로 설정하여 실험이 이루어졌다. 그림 4-6에서 알 수 있듯이, 설계된 제어기를 통해 비선형 풍력 터빈 모델의 안정화를 가능케 하였으며, $C_q(\lambda)$ 가 지니는 불확실성에도 불구하고 안정된 결과를 보여 줌을 알 수 있다.

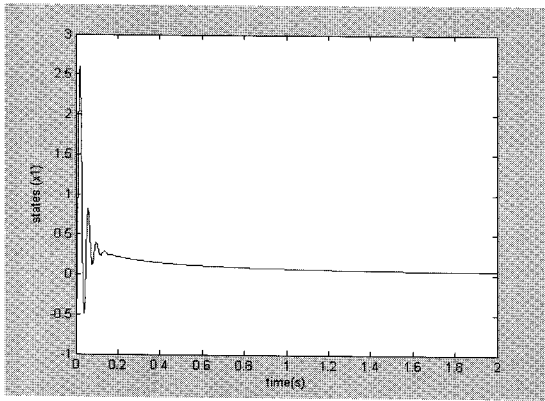


그림 4 안정화 된 x_1 의 궤적

Fig 4 The state x_1 of the controlled system

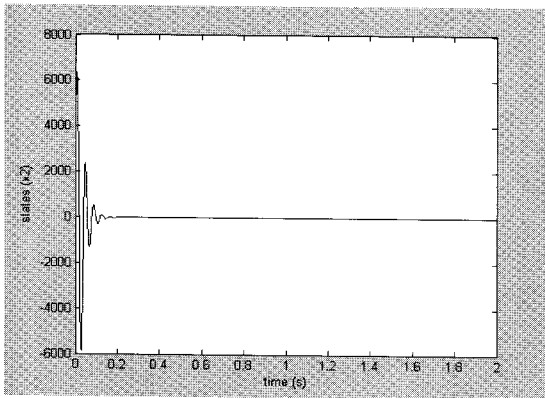


그림 5 안정화 된 x_2 의 궤적

Fig 5 The state x_2 of the controlled system

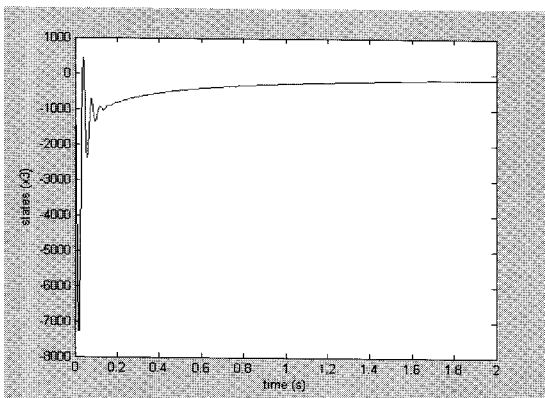


그림 6 안정화 된 x_3 의 궤적

Fig 6 The state x_3 of the controlled system

5. 결 론

본 논문에서는 퍼지 이론을 이용한 풍력 터빈의 변화 속도 제어에 대해 다루었다. 앞서 살펴보았듯이, 풍력 터빈의 변화 속도는 비선형성으로 나타내어지며, 플랜트를 구성하는 각 파라미터의 수치 역시 불확실하다는 것을 알 수 있다. 우

리는 이런 어려움을 풀기 위하여, 비선형성 및 불확실성에 강인한 퍼지 제어 이론을 제안하였다. 우선 풍력 터빈의 변화 속도에 대한 정확한 퍼지 모델링을 수행하였으며, 재해석된 T-S 퍼지 모델에 적합한 제어기를 설계하게 되며, 리아푸노프 안정도에 기반 한 시스템의 안정도를 증명해 보았다. 그리고 시뮬레이션을 통해 제안된 기법의 우수성을 증명하였다.

Reference

- [1] H. J. Lee, J. B. Park, and G. Chen, "Robust fuzzy control of nonlinear system with parametric uncertainties," IEEE Trans. Fuzzy Syst. vol. 9, pp. 369-379, Apr. 2004.
- [2] H. J. Lee, H. B. Kim, and J. B. Park, "A new intelligent digital redesign for T-S fuzzy systems: global approach," IEEE Trans. Fuzzy Syst. vol. 12, no. 2, 2004.
- [3] 성화창, 주영훈, 박진배, "풍력과 태양에너지를 이용한 하이브리드 발전시스템 구현을 위한 스위칭 디지털 퍼지 제어기 개발," 퍼지 및 지능 시스템 학회 논문지, vol. 16, no. 6, pp. 670-676, 2006.
- [4] R. Novak, T. Ekelund, I. Jovik, "Modeling and control of variable-speed wind-turbine drive-system dynamics," IEEE control systems, vol. 15, no. 1, pp. 91-96, 1995.
- [5] M. M. Hand and M. J. Balas, "Non-linear and linear model based controller design for variable-speed wind turbines," pp. 1-8. NREL Report No. CP-500-26244.
- [6] E. S. Abdin and W. Xu, "Control design and dynamic performance analysis of a wind turbine-induction generator unit." IEEE Trans. Energy Conversion, vol. 15, no. 1, pp. 91-96, 2000.
- [7] Y. D. Song, B. Dhinakaran, and X. Y. Bao, "Variable speed control of wind turbines using nonlinear and adaptive algorithm," Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, vol. 85, pp. 293-308, 2000.
- [8] Y. H. Joo, L. S. Shieh, and G. Chen, "Hybrid state-space fuzzy model-based controller with dual-rate sampling for digital control of chaotic systems," IEEE Trans. Fuzzy Syst., vol. 7, no. 4, pp. 394-408, 1999
- [9] B. Boukhezzer and H. Siguerdidjane, "Nonlinear control of variable speed wind turbines for power regulation," Proc. IEEE Conference on Control Applications. Canada, pp. 114-119. 2005.
- [10] X. Yang, X. Liu and Q. Wu, "Integral fuzzy sliding mode control for variable speed wind power system." Proc. IEEE International Conference on Automation and Logistics, China, pp. 1289-1294, 2007.
- [11] M. Perales, J. Peres, F. Barrero, J. Mora, E. Galvan, and J. M. Carrasco, "Fuzzy logic control of a variable speed, variable pitch wind turbine,"

in IECON'99 Proc, vol, 2, pp. 614-618. 1999.

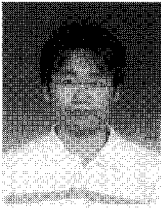
- [12] A. Tapia, G. Tapia, J. X. Ostolaza, and J. R. Saenz, "Modeling and control of a wind turbine driven doubly fed induction generator," IEEE Trans. on energy conversion, vol. 18, no. 2, pp. 194-204, 2003.
-



박진배 (Jin Bae Park)

제 17권 6호(2007년 12월호) 참조

저 자 소개



성화창(Hwa Chang Sung)
2005년 8월 연세대학교 공학사
2007년 2월 연세대학교 공학석사
2007년 3월~현재 연세대학교 전기전자공
학과 박사과정



주영훈(Young Hoon Joo)

제17권 6호(2007년 12월호) 참조

Phone : 02-2123-2773

Fax : 02-362-4539

E-mail : casfirspear@control.yonsei.ac.kr