

이중여자 유도발전기 기반 풍력발전 시스템의 퍼지 모델링 및 안정도 해석

Fuzzy Modeling and Stability Analysis of Wind Power System with Doubly-fed Induction Generator

김진규 · 주영훈⁺
Jin Kyu Kim and Young Hoon Joo⁺

군산대학교 제어로봇공학과

요 약

본 논문에서는 이중여자 유도발전기 기반 가변속도 풍력발전 시스템의 퍼지 모델링 및 안정도 해석에 관하여 다루고자 한다. 일반적인 풍력발전 시스템은 복잡한 비선형성 기반 동적방정식으로 구성되며, 플랜트를 구성하는 각 파라미터 수치 역시 주변 환경에 의해 변화할 여지가 있다. 풍력발전 시스템의 해석을 위하여 본 논문에서는 비선형성 및 불확실성에 강인한 퍼지 제어 기법을 기반으로 제어이론을 구성하고자 한다. 이중여자 유도발전기 기반 풍력발전 시스템의 퍼지 모델링 및 시스템 안정화를 위한 퍼지 제어기 설계 기법이 제안된다. 해당 제어 기법은 리아푸노프 기반 안정도 해석에 의해 접근 안정도를 보장받게 되며, 가상 시뮬레이션을 통한 시스템 효율성을 입증하게 된다.

키워드 : 가변속도 풍력발전 시스템, 이중여자 유도 발전기, 강인 안정성, 퍼지 모델링, 리아푸노프 안정도.

Abstract

This paper propose the robust stability algorithm for controlling a variable speed wind power system which based on doubly-fed induction generator (DFIG). The control object in the wind power system enables the rotor to rotate without any physical contact by using magnetic force. Generally, the system dynamics of the wind power system has severe nonlinearity and uncertainty so that it is not easy to obtain the control objective. For solving these problems, we propose the fuzzy modelling and robust control algorithm for wind power system. The sufficient conditions for robust controller are obtained in terms of solutions to linear matrix inequalities (LMIs). Simulation results for wind power system based on DFIG are demonstrated to visualize the feasibility of the proposed method.

Key Words: Variable speed wind power system, doubly-fed induction generator (DFIG), robust stability, fuzzy modeling, Lyapunov stability.

1. 서 론

고도의 산업 성장과 인구성장에 따른 급증된 에너지 소비는 화석연료 고갈 문제와 결부되어 미래의 에너지원에 대한 대책마련을 시급히 요구하게 되었다. 또한 화석연료를 통한 전력생산에서 발생하는 이산화탄소를 비롯한 많은 화합물들은 환경에 대한 위협을 가하고 있으며, 원자력 발전 역시 일본에서 일어난 지진의 여파로 인해 이전과 같은 신뢰도를 얻지 못하는 상태이다. 이와 같은 문제점에 주목하여, 많은 연구기관에서

범지구적 차원의 대책 마련에 힘쓰고 있으며, 그에 따른 가장 좋은 해결책으로 각광받고 있는 것이 태양력, 풍력, 파력등의 신재생 에너지 자원을 이용한 발전시설 개발이다. 이러한 대체 에너지를 이용한 설비는 비교적 높은 초기 투자의 장애요인에도 불구하고, 화석 에너지의 고갈문제와 환경의 오염문제에 대한 핵심 해결 방안이라는 측면에서 선진국을 비롯한 수많은 나라에서 정부 주도하에 과감한 보급 및 연구정책을 추진하고 있다. 또한, 기존의 에너지 공급방식과 달리 지방 분산화 정책으로 전환하는 시점에서 환경, 교통, 안보 등을 고려한 로컬 (local) 자원의 활용 측면에서도 적극적인 추진이 이루어지고 있다 [8]. 이 가운데서도 풍력발전 시스템은 다른 발전 시스템에 비해 그 연구가 활발히 진행되고 있으며, 그에 따른 많은 연구 성과물 역시 발표되고 있다 [1-3], [5-9].

풍력발전 시스템은 풍력 터빈을 기반으로 하여 외부의 바람에 따른 발전이 이루어지게 된다. 전통적으로 대부분의 풍력 터빈 발전 시스템은 발전이 시작하는 순간과 끝나는 순간을 제외하고는 이중여자 유도발전기 (doubly-fed induction generator: DFIG)가 기반이 된 고정된 터빈 속도를 가정하고 연구가 이루어져 왔

접수일자 : 2011년 11월 19일
심사(수정)일자: 2011년 11월 19일
게재확정일자 : 2012년 2월 2일

⁺ 교신저자

감사의 글 : 본 연구는 2011년도 교육과학기술부와 한국연구재단 지역혁신인력양성사업에 의해 수행된 연구 결과임.

본 논문은 2011년도 지능시스템학회 추계 학술대회 우수논문으로 선정되어 본 논문지에 게재됨.

다 [1-3]. 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 [8]. 이와 같은 문제점을 해결하기 위하여, 제안된 방안이 외부 바람에 따라 터빈의 속도를 변화시키는 가변속도 풍력발전 시스템이다. 가변속의 경우 정속운전에 기반 한 풍력발전 시스템에 비해 속도 제어 범위가 넓고 회전자에 설치되는 인버터의 용량도 작아지며 낮은 풍속에서 더 많은 움직임을 흡수할 수 있다는 장점이 있다 [7]. 그러나 실제통과의 연계에 있어 가장 큰 문제점으로 지적받고 있는 것은 시스템 플랜트 자체의 복잡성과 외부 환경적 요소에 대한 고려이다.

서두에 언급된 풍력발전 시스템의 실제적 플랜트 제어에 있어서 큰 문제 중 하나는 시스템에 존재하는 비선형성 및 불확실성에 대한 해석을 어떻게 할 것인가이다. 플랜트 구성요소들이 보여주는 비선형적 움직임은 가장 쉽게는 선형적인 움직임으로 치환되어 해석되고 있지만, 이는 시스템의 가장 최소한의 요소만으로 구성되어 있다는 가정이 필요하기 때문에 실제라고 보기는 어렵다. 이를 극복하기 위하여 제안된 많은 이론 중 하나가 퍼지이론이다. 특히, Takagi-Sugeno (T-S) 모델은, 다른 시스템 모델링 기법에 비해 비선형 시스템과 매우 유사한 형태의 움직임을 보여 줌으로써 제어의 용이성을 높였다는 평가를 받고 있다 [5, 7-8].

본 논문에서는 앞서 고찰된 내용을 바탕으로 하여, 가변속도 풍력발전 시스템의 퍼지 모델링 및 강인 안정성에 대한 연구를 수행하고자 한다. DFIG 시스템과 연계된 풍력발전 시스템 구성요소들의 동적방정식은 비선형성을 기반으로 표현되며, 본 논문에서는 이를 T-S 퍼지 모델로 해석된 후, 부분적 선형 모델로 변환하는 과정을 수행하게 된다. 이를 통해 풍력발전 시스템은 제어기 설계에 용이한 형태로 전환되며, 주어진 시스템은 리아푸노프 (Lyapunov) 안정도 분석에 의해 안정도 가능성을 살펴보게 된다. 그리고 외부 환경에 의한 변화를 파라미터의 변환 범위로 설정하여 해석하게 되며, 이는 시스템의 안정도에 큰 영향을 미치는 요소로 판단하여 강인 제어의 기법으로 해석하게 된다. 전체 식은 선형행렬부등식 형태로 나타나게 되며, 시뮬레이션을 통해 제안된 기법의 우수성을 증명하게 된다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2절에서는 풍력발전 시스템의 특성 및 모델에 관하여 알아본다. 3절에서는 T-S 퍼지 시스템을 수학적으로 표현하게 되며, 제어기 설계를 하게 되며, 구성된 시스템의 안정도 가능성을 연구하게 되며 4절에서는 시뮬레이션을 수행하게 된다. 마지막 5절에서는 결론을 제시하게 된다.

2. 이중여자 유도발전기 기반 풍력발전 시스템 구성 및 퍼지 모델링

일반적으로 이중여자 유도발전기라는 명칭은 동작원리에 따른 분류이다. 서론에서 언급한 입력으로 작용한 리덕턴스에 대한 힘을 통해 동작하는 풍력발전 시스템은 '능동형'이며, 코일에 콘덴서와 저항을 추가하여

LCR 회로를 구성하고 회로의 공진주파수보다 조금 높

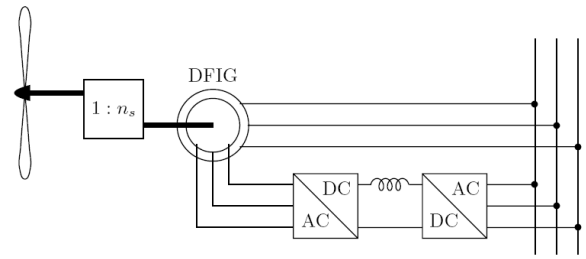


그림 1. 이중여자 유도 발전기
Fig 1. Doubly-fed induction generator

은 주파수 전압을 인가함으로써 별도의 제어 입력 없이 안정한 부상을 하는 것이 '권선형'이다 [7]. 권선형 풍력발전 시스템의 경우 센서 및 제어기가 필요 없다는 측면에서 구조적 장점을 지닐 순 있으나, 감쇠가 매우 적다는 점 때문에 적용분야가 매우 제한되어 있다. 반면, 이중여자 유도발전기는 동작 유무에 있어 권선형에 비해 우위를 점하고 있으나, 소모 전력 및 손실 전력에 있어 약점이 있기 때문에 보완책이 필요한 실정이다. 이러한 측면에서 제안된 것이 이중여자 유도발전기 기반 풍력발전 시스템이며, 서두에서 언급한 전력연계 제어 시스템의 메인파트로 활발히 연구되고 있다. 그림 1은 DFIG 기반 풍력발전 시스템 구조를 나타내어 준다 [1].

일반적인 풍력발전 시스템의 움직임과는 달리, DFIG 기반 풍력발전 시스템은 발전기에 기반하여 해석이 되며, 등가회로 구성에 있어서도 이와 같은 현상이 반영되어 구성된다. 그림 1에서 보여 지는 그림이 이중여자 유도발전기 기반 풍력발전 시스템의 등가회로 구성도이며, 시스템 동적 방정식은 다음과 같다 [5]:

$$\begin{aligned}
 \frac{di_{ds}}{dt} &= D[R_s L_r i_{ds} + (\omega_s - \omega_r) L_m^2 i_{qs} - \omega_s L_s L_r i_{qs} \\
 &\quad - R_r L_m i_{dr} - \omega_r L_r L_m i_{qr} - L_r u_{ds} + L_m u_{dr}] \\
 \frac{di_{qs}}{dt} &= D[-(\omega_s - \omega_r) L_m^2 i_{ds} + \omega_s L_s L_r i_{ds} + R_s L_r i_{qs} \\
 &\quad + \omega_r L_r L_m i_{dr} - R_r L_m i_{qr} - L_r u_{qs} + L_m u_{qr}] \\
 \frac{di_{dr}}{dt} &= D[-R_s L_m i_{ds} + \omega_r L_s L_m i_{qs} + R_r L_s i_{dr} \\
 &\quad + \omega_s L_m^2 i_{qr} - (\omega_s - \omega_r) L_s L_r i_{qr} + L_m u_{ds} - L_s u_{dr}] \\
 \frac{di_{qr}}{dt} &= D[-\omega_r L_s L_m i_{ds} - R_s L_m i_{qs} - \omega_s L_m^2 i_{dr} \\
 &\quad + (\omega_s - \omega_r) L_s L_r i_{dr} + R_r L_s i_{qr} + L_m u_{qs} - L_s u_{qr}]
 \end{aligned} \tag{1}$$

여기서 $\omega_r = p\Omega_d$ 는 전기적 회전속도, Ω_d 는 발전기의 회전속도, $\omega_s = \frac{d\theta_s}{dt}$ (rad/s)는 여자 주파수, R_s 와 R_r 은 여자와 회전자 저항, L_m 와 L_r 은 여자와 회전자의 인덕턴스를 의미한다. 식 (1)로부터 얻어진 발전기 파라미터를 기반으로 풍력 터빈의 속도를 변화 시킴으로써 외부의 변화에 강인한 발전 시스템을 구성하게 된다. 그림 1에서 보여지듯이, DFIG가 기반이 된 가변속도 풍력발전 시스템이 발전을 하게 되며, 컨버터와 인버터 간의 연계를 통해 전력을 공급하게 된다. 이에

대한 수식은 다음과 같이 표현 된다 [8].

$$\begin{aligned} Q_A - Q &= J_T \dot{\omega}_t \\ Q - Q_E &= J_G \dot{\omega}_g \\ Q &= Q_s + Q_D = K_S \int_0^t (\omega_t - \omega_g) dt + B_S (\omega_t - \omega_g) \end{aligned} \quad (2)$$

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. DFIG가 기반이 되어 바람으로부터 얻어지는 전력은 아래 수식과 같이 표현된다.

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

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

$$\lambda = \frac{R\omega_t}{w} \quad (4)$$

식 (3)과 (4)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. 최대 전력 계수인 C_{pmax} 는 $\lambda = \lambda_{opt}$ 일 때 나타나며, 이때 풍력 터빈 발전 모델에서 최적화된 전력을 생산하게 되는 것이다. 식 (3)과 (4)에서 Q_A 는 ω_t 와 w 의 두 변수에 대한 비선형성을 보이게 되며, 그러한 관계가 표현된 식은 다음과 같이 표현 된다.

$$Q_A = \frac{1}{2} AR C_q(\lambda) \omega^2 \quad (5)$$

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

$$C_p(\lambda) = \lambda C_q(\lambda) \quad (6)$$

앞서 전개된 내용을 바탕으로 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 (3)에서 ω_t 는 $\dot{\omega}_t = \frac{1}{J_T} (Q_A - Q)$ 와 같이 표현된다. 여기서 Q_A 는 (5)와 (6)을 활용, 다음과 같이 나타내어진다.

$$Q_A = \frac{1}{2} \rho AR C_q(\lambda) \omega^2 = \frac{1}{2} \rho AR C_q(\lambda) \frac{R^2 \omega_t^2}{\lambda^2}$$

$$= \frac{1}{2} \rho AR^3 \frac{C_q(\lambda)}{\lambda^2} \omega_t^2 \quad (7)$$

식 (7)을 활용하면, ω_t 에 대해 비선형성을 지닌 다음과 같은 상태 방정식을 얻게 된다.

$$\dot{\omega}_t = \frac{1}{J_T} \left(\frac{1}{2} \rho AR^3 \frac{C_q(\lambda)}{\lambda^2} \omega_t^2 - Q_s - B_S (\omega_t - \omega_g) \right) \quad (8)$$

두 번째로 ω_g 는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \dot{\omega}_g &= \frac{1}{J_G} (Q - Q_E) \\ &= \frac{1}{J_G} (Q_s + B_S (\omega_t - \omega_g)) - \frac{1}{J_G} Q_E \end{aligned} \quad (9)$$

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

$$Q_s = K_S \int_0^t (\omega_t - \omega_g) dt = K_S \omega_t - K_S \omega_g \quad (10)$$

요약하건대, (8)-(10)는 풍력 터빈의 속도가 고려된 동적 방정식이며, (8)에서 비선형성을 지니고 있음을 알 수 있다. 또한, 식 (8)에서 계산되는 $C_q(\lambda)$ 라는 변수는 함수로 표현되는 값이며 일정 값에서 최적 지점을 가지고 있다. 그러나 항상 최적 값을 유지 할 수 없기 때문에, 그 부근에 대한 바운드를 주는 것이 타당할 것이다. 그리고 (10)에서 나타내어진 Q_s 의 경우는 적분 값으로 표현 되었으며, 적분 상수가 고려되지 않은 상태로 나타내어 졌기에, 이 역시 적절한 바운드를 주는 것이 필요하다. 이러한 파라미터 불확실성이 고려된 모델은 다음과 같이 정리된다.

$$\dot{x}(t) = \begin{bmatrix} \frac{(\gamma - B_s)}{J_T} & \frac{B_s}{J_T} & \frac{1}{J_T} \\ \frac{B_s}{J_G} & -\frac{B_s}{J_G} & \frac{1}{J_G} \\ \frac{K_S}{J_G} & -K_S & 0 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{J_G} \\ 0 \end{bmatrix} u \quad (11)$$

여기서 $x^T = [\omega_t \ \omega_g \ Q_s]$, $u = Q_E$ 이며, γ 는 식 (8)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. (11)에서 알 수 있듯이, 첫 번째 변수 ω_t 에서 비선형 성을 보이게 되며 이는 다음과 같은 퍼지 집합으로 표현하게 된다.

참고 1 디지털 디바이스 활용을 위해 구성된 퍼지 함수들은 [4]에 제안된 기법을 통해 이산화가 수행된다.

3. 강인 안정도 해석 방안

퍼지 모델은 IF-THEN을 사용하여 시스템을 묘사

하기 위한 접근 방법으로 퍼지 집합을 이용하여 시스템을 모델링하는 것이다. 비선형 시스템은 다음과 같이 나타내어질 수 있다.

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

여기서, $x(t) \in R^n$ 는 상태 벡터를 $u(t) \in R^m$ 는 입력 벡터를 의미한다. 위의 식 (12)는 다음의 퍼지 모델 식으로 표현 가능하다.

$$\begin{aligned} R^i: IF z_i(t) \text{ is } \Gamma_1^i \text{ and ... and } z_n(t) \text{ is } \Gamma_n^i \\ THEN \dot{x}(t) = (A_i + \Delta A_i)x(t) + (B_i + \Delta B_i)u(t). \end{aligned} \quad (13)$$

여기서, R^i 는 i 번째 퍼지 규칙을, $z_h(t)$ 는 h 번째 전건부 변수를 의미하며, A_i 는 상태 벡터, B_i 적절한 크기를 지닌 입력 벡터이며, ΔA_i 와 ΔB_i 는 시스템에 포함된 파라미터 불확실성을 의미한다. Γ_h^i , i 번째 규칙에서 h 번째 전건부 변수의 퍼지 집합이다. 중심값-평균 비퍼지화, 곱셈 추론, 싱글톤 퍼지화를 사용하면 식 (13)는 다음과 같은 전역 동특성 식으로 나타나게 된다.

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

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 강인 제어를 위해 다음과 같은 퍼지 제어가 제안된다.

$$\begin{aligned} R^i: IF z_i(t) \text{ is } \Gamma_1^i \text{ and ... and } z_n(t) \text{ is } \Gamma_n^i \\ THEN u(t) = K_i x(t). \end{aligned} \quad (15)$$

여기서, 비퍼지화 출력 값은 다음과 같다.

$$u(t) = - \sum_{i=1}^r \mu_i(z(t)) K_i \left(\sum_{j=1}^r \mu_j(z(t)) X_j \right)^{-1} x(t). \quad (16)$$

제어기 (16)은 기존 퍼지 시스템에서 사용되는 PDC 형태에서 좀 더 완화된 안정도 조건 보장하는 것으로, 대칭조건이 없는 행렬 X_j 가 퍼지 규칙에 추가로 들어가게 된다. 시스템 불확실성을 해결하기 위해, 불확실 파라미터 ΔA_i 와 ΔB_i 는 다음의 가정 1을 통해 재구성된다.

가정 1 : 식 (13)의 불확실성을 나타내는 두 행렬 ΔA_i 와 ΔB_i 는 다음과 같이 나타내어진다.

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

여기서, D_i , E_{1i} 와 E_{2i} 는 이미 알고 있는 실수 행렬이

며, $F_i(t)$ 는 모르는 행렬로 $F_i(t)^T F_i(t) \leq I$ 와 같은 특성을 지니고 있다.

식 전개의 원활함을 위해 다음 세 가지 보조정리를 고려해 보자.

보조정리 1 [4]: 어떤 적절한 공간을 지닌 실수 행렬 $A_1 = A_1^T$, A_2 , $A_3(t)$, 그리고 A_4 에서 다음의 부등식을 가정하자.

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

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

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

보조정리 2 [6]: 다음 두 문제는 동일하다.

(1) 양한정 행렬 P 를 다음에서 찾는 문제:

$$T + PA^T + AP < 0$$

(2) 양한정 행렬 P 와 일반행렬 L , H 에 대하여 2-(1)과 동일 문제:

$$\begin{bmatrix} T + HA^T + AH^T & * \\ P - H^T + LA^T & -L - LT \end{bmatrix} < 0$$

보조정리 3 [6]: 다음 두 문제는 동일하다.

(1) 대칭행렬 P 를 다음에서 찾는 문제:

$$\begin{bmatrix} T_1 + A^T P A & * \\ T_2 & T_3 \end{bmatrix} < 0$$

(2) 대칭행렬 P 와 일반 행렬 L , H 에 대하여 3-(1)과 동일 문제:

$$\begin{bmatrix} T_1 + A^T L_1 + L_1 A & * & * \\ T_2 + L_2 A & T_3 & * \\ -L_1 + H^T A & -L_2^T P - H & -H^T \end{bmatrix} < 0$$

이와 같은 정리를 통해 다음의 선형 행렬 부등식 기반 강인 안정도 조건을 유도해 낼 수 있다.

정리 1: $\| \dot{h}_p \| \leq \phi_p$, $\phi_p \geq \rho$ ($\rho = 1, 2, \dots, r$)를 고려하자. 식 (14)과 (16)을 통해 구성된 이산시간 퍼지 시스템은 $\Xi_i = \Xi_i^T$, $\Gamma_i > 0$, H_i , L_i , N_i , M_i , X_i 에 대해 다음 부등식이 성립하며, 이를 통해 제어 입력이 찾아진다.

$$\Gamma_p - \Xi_i > 0, \quad \omega_{ij} + \omega_{ji} < v_{ij} + v_{ji} \quad (17)$$

여기서,

$$\omega_{ij} = \begin{bmatrix} \varpi_{ij} & * & * & * \\ \Gamma_i - H_j^T + L_j A_i^T & -L_j - L_j^T & * & * \\ E_{1i} H_j^T + E_{2i} K_j & * & -\epsilon_{ij}^T I & * \\ D_i^T & * & * & -\epsilon_{ij}^T I \end{bmatrix},$$

$$\varpi_{ij} = -\sum_{\rho=1}^r \dot{\theta}_{\rho} (\Gamma_{\rho} + \Xi_i) + A_i H_j^T + H_j A_i + B_i K_j + K_j^T B_i^T$$

$$v_{ij} = \begin{bmatrix} v_{11} & * & \dots & * \\ v_{21} & v_{22} & \dots & * \\ \vdots & \vdots & \ddots & * \\ v_{r1} & v_{r2} & \dots & v_{rr} \end{bmatrix}.$$

증명: 연속시간에서의 파라미터 관계된 리아푸노프 함수 [6]를 기반으로 이산 시간에서의 전개는 다음과 같다.

$$V(t+1) = x(t+1)\Gamma^{-1}(x)x(t) + x(t)\Gamma^{-1}(x)(t+1) - x^T(t)\Gamma^{-1}(x)\Gamma(x+1)\Gamma^{-1}(x)x(t)$$

$$= \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r \mu_i(z(t))\mu_j(z(t))\Gamma^{-1}(x)x(t)[\theta_{ij} + \theta_{ij}^T + \eta_{ij} + \eta_{ij}^T]\Gamma^{-1}(x)x(t).$$

(18)

여기서, $\theta_{ij} = (A_i + \Delta A_i)\Gamma(x) + \Gamma(x)(A_i + \Delta A_i)^T$, $\eta_{ij} = (B_i + \Delta B_i)K_i + K_i^T(B_i + \Delta B_i)^T$ 이다. 식 (18) 다음의 등가식으로 전개되어 진다.

$$\zeta_{ij} + \begin{bmatrix} \Delta A_i H(x)^T + H(x)\Delta A_i + \Delta B_i K_i + K_i^T \Delta B_i^T & * \\ 0 & 0 \end{bmatrix} < 0.$$

여기서,

$$\zeta_{ij} = \begin{bmatrix} \theta_{ij} + \theta_{ij}^T + \eta_{ij} + \eta_{ij}^T - \dot{\Gamma}(x) + \Xi_{ij} & * \\ \Gamma(x) - H(x)^T + L(x)A(x)^T - L(x) - L(x)^T \end{bmatrix}$$

이다.

Schur 정리 및 보조 정리 1-3을 통해 우리는 정리 1과 같은 선형행렬부등식을 구할 수 있다.

4. 시뮬레이션 결과

2장에서 구성한 DFIG 기반 풍력발전 시스템의 퍼지 모델에 3장에서 제안된 강인 안정도 기법을 적용하여 이번 장에서는 해당 시스템의 안정도 결과를 나타내보고자 한다. 10% 불확실성에 대한 강인 안정도 해석을 위해 비선형 행렬을 다음과 같이 정의하게 된다.

$$D_i = \begin{bmatrix} 0.1 & 0 & 0 \\ 0 & 0.1 & 0 \\ 0 & 0 & 0.1 \end{bmatrix}, E_{1i} = \begin{bmatrix} a & b & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & c \end{bmatrix}, E_{2i} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

정리 1에서 언급된 LMI 식 (17)에 대한 활용을 통해 DFIG 기반 풍력발전 시스템에 적용함으로써 우리가 목표로 한 강인 안정도 문제를 해결 할 수 있다. 초기

값 설정은 $x_0(t) = [-1; -10; 10]$ 로 설정하였으며, 아래와 같은 제어 입력 값을 산출해 낼 수 있다.

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.

$$K_1 = 1.0e+004 \begin{bmatrix} 9009.3 & 0.5 & 2.4 \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$K_2 = 1.0e+004 \begin{bmatrix} 8094.3 & 0.5 & 2.1 \end{bmatrix} \quad (20)$$

언어인 입력 값 K_1 에서 K_2 를 통해 시스템의 강인 안정도 결과를 분석하였으며, 아래와 같은 안정도 그래프를 얻을 수 있었다. 그림 2-4을 통해 알 수 있듯이, 설계된 제어기는 DFIG 기반 풍력발전 시스템의 안정도 보장을 위해 정상적으로 작동하였음을 알 수 있다. 이는 시스템을 구성하고 있는 핵심 파라미터의 불확실성을 10% 고려한 결과물로, 이전과는 다른 비선형성이 고려된 강인 안정도 해석이라는 점을 주목할 필요가 있다. 특히 유사 플랜트에 대한 이전의 안정도 결과 해석과의 비교를 수행했음을 알 수 있다. 제안된 기법은 실선으로 표현되었으며, 기존의 기법은 점선으로 표현되었다. 해당 비교에서 알 수 있듯이, 기존 강인 안정도 결과에 비해 제안된 기법이 평형점에 좀 더 빠른수렴 속도를 보이는 것을 확인 할 수 있다.

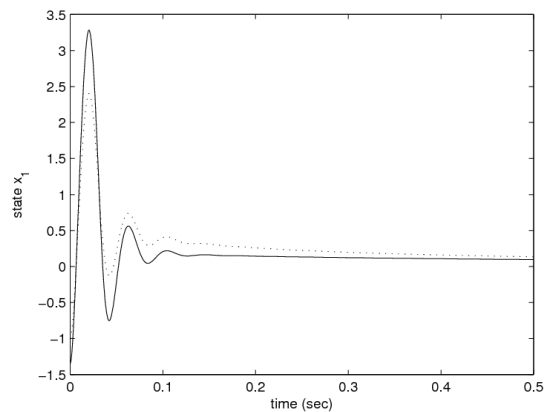


그림 2. 풍력발전 시스템 x_1 궤적
(실선: 제안된 기법, 점선: 논문 [8])
Fig. 2 Trajectory of x_1 in Wind Power System based on DFIG
(solid line: proposed method, dotted line: [8])

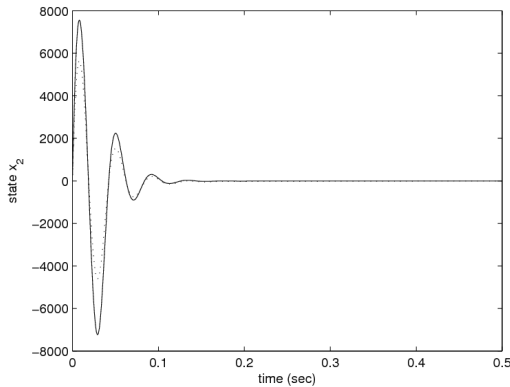


그림 3. 풍력발전 시스템 x_2 궤적
(실선: 제안된 기법, 점선: 논문 [8])
Fig. 3 Trajectory of x_2 in Wind Power System based on DFIG
(solid line: proposed method, dotted line: [8])

5. 결론

본 논문에서는 DFIG 기반 풍력발전 시스템 해석 및 강인 안정도 분석에 대해 다루어 보았다. 비선형적 구조를 가지고 있는 DFIG 기반 풍력발전 시스템을 해석하기 위해 T-S 퍼지 모델링 기법을 적용하였으며, 시스템의 강인 안정도 해석 방안을 LMI 형태로 나타내었다. 실제 DFIG 기반 풍력발전 시스템을 구성하고 있는 파라미터로 시스템을 구성하였으며, 재해석된 퍼지 모델에 적합한 제어기를 설계를 통해 시스템의 안정도를 증명해 보았다. 마지막으로 시뮬레이션을 통해 제안된 기법의 우수성을 증명하였다.

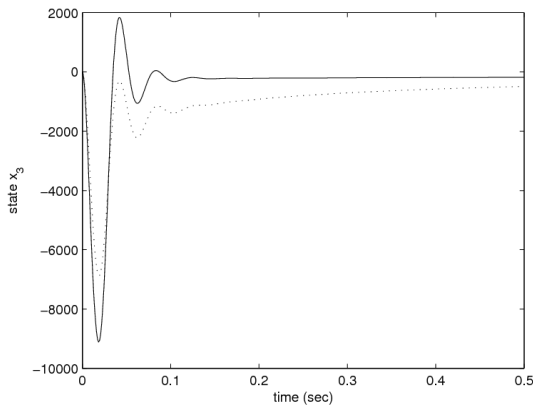


그림 4. 풍력발전 시스템 x_3 궤적
(실선: 제안된 기법, 점선: 논문 [8])
Fig. 4 Trajectory of x_3 in Wind Power System based on DFIG
(solid line: proposed method, dotted line: [8])

참 고 문 헌

[1] L. Yang, Z. Xu, and Z. Y. Dong, "Oscillatory

stability and eigenvalue sensitivity analysis of a DFIG wind turbine system", IEEE Trans. Energy Conversion, vol. 26, no. 1, pp. 328-339, 2011.

[2] G. Tsurakis, B. M. Nomikos, and C. D. Voumas, "Effect of wind parks with doubly fed asynchronous generators on small-signal stability", Electr. Power Syst. Res., vol. 79, pp. 190-200, 2009.

[3] 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

[4] H. C. Sung, D. W. Kim, J. B. Park, and Y. H. Joo, "Robust digital control of fuzzy systems with parametric uncertainties", Fuzzy Set & System. vol. 161, pp. 919-933, 2010.

[5] P. Ledesma and J. Usaola, "Doubly fed induction generator model for transient stability analysis". IEEE Trans. Energy Convers., vol. 20, no. 2, pp. 388-397, 2005

[6] X. H. Chang and G. H. Yang, "Relaxed stabilization conditions for continuous-time Takagi-Sugeno fuzzy control system", Information Science, vol. 180, pp. 3273-3287, 2010.

[7] 최장영, 장석명, "이중여자 유도발전기에 의한 가변속 풍력 발전시스템의 동특성 해석", 대한전기학회 논문지, vol. 55, no. 6, pp. 325-336, 2006.

[8] 성화창, 박진배, 주영훈, "강인 퍼지 이론을 이용한 풍력 터빈의 가변 속도 제어", 한국지능시스템학회 논문지, vol. 18, no. 1, pp. 1-6, 2008.

[9] 노경수, 김태호, "이중여자 유도발전기를 이용한 가변속 운전과 정속운전 풍력발전시스템의 운전특성 비교", 대한전기학회 논문지, vol. 58, no. 7, pp. 1313-1320, 2009.

저 자 소 개



김진규(Jin Kyu Kim)

2007년 군산대 전자정보공학부 졸업.
2009년 동 대학원 전자정보공학부 졸업(공학석사),
2011년 현재, 동 대학원 전기전자제어 공학과 박사과정.

관심분야: 지능형 제어, 로봇 비전등.
Tel : 063-469-4706
E-mail : kjk3242@kunsan.ac.kr



주영훈(Young Hoon Joo)

2011년 제 21권 제 6호 참조