

풍속 예측모델 기반 풍력발전단지의 퍼지 모델링 및 강인 안정도 해석

Fuzzy Modeling and Robust Stability Analysis of Wind Farm based on Prediction Model for Wind Speed

이 덕 용, 성 화 창, 주 영 훈*

(Deogyong Lee¹, Hwa Chang Sung², and Young Hoon Joo^{3,*})

¹Department of Water Resources Management, Gimje Campus of Korea Polytechnic V

²Department of Electrical and Electronics Engineering, Yonsei University

³Department of Control and Robotics Engineering, Kunsan National University

Abstract: This paper proposes the fuzzy modeling and robust stability analysis of wind farm based on prediction model for wind speed. Owing to the sensitivity of wind speed, it is necessary to study the dynamic equation of the variable speed wind turbine. In this paper, based on the least-square method, the wind speed prediction model which is varied by the surrounding environment is proposed so that it is possible to evaluate the practicability of our model. And, we propose the composition of intelligent wind farm and use the fuzzy model which is suitable for the design of fuzzy controller. Finally, simulation results for wind farm which is modeled mathematically are demonstrated to visualize the feasibility of the proposed method.

Keywords: intelligent wind farm, variable speed wind turbine, prediction model for wind speed, least-square method, fuzzy model

I. 서론

2011년 일본에서 발생한 후쿠시마 원전발전 사고 후유증의 여파는 2여년이 지난 지금까지 계속되고 있다. 반대급부의 결과로 보다 안전하고 청정한 발전방식에 대한 국민들의 열망이 계속되고 있는 가운데, 풍력발전 단지 조성에 대한 국가적 정책이 다시금 주목받고 있다. 특히, 기존의 고정속도에 기반한 풍력터빈과 달리 가변속도 풍력터빈을 기반으로 한 발전 시스템은 2000년 초반부터 연구되기 시작하였으며, 현재까지도 활발히 토의되고 있는 분야이다 [1-13]. 그러나 제어적 관점에서 바라보면, 개별 풍력터빈에 대한 연구는 많이 진행되고 있지만, 가변속 풍력터빈을 기반으로 한 풍력발전단지에 대한 연구는 아직 많이 진행되고 있지 않다. 특히, 가변속 풍력터빈의 분석에 있어 가장 중요한 점이 외부 풍속에 대한 해석인데, 이를 실제 동적방정식에서 해석한 연구는 많이 없는 실정이다.

기존 가변속 풍력터빈 및 풍력단지 조성에 대한 연구는

다음과 같다. 논문 [1]에서는 개별 풍력발전기의 효율적 배치에 대한 내용을 다루고 있으며, 이는 각 개별 터빈에서 도출되는 발전량에 비례하여 구성된다. 이를 좀 더 체계화시켜 군집(cluster) 형태로서의 풍력 터빈을 구성한 내용이 논문 [2]이다. 또한, 논문 [3]에서 알 수 있듯이, 풍속 및 풍향에 따른 풍력 터빈의 적절한 배치를 통해 국내 실정에 맞는 지능형 풍력발전단지를 구성함으로써 어느 정도 해결이 가능할 것으로 예상된다. 세 번째 문제의 경우 역시 앞선 연구인 [4-6]을 통해 제어 이론이 제안되었으며, 실증실험을 통한 검증이 필요한 시점이다. 논문 [6]에서 언급된 것과 같이 가변속 풍력발전 터빈을 기반으로 한 풍력발전 단지에 대한 연구가 수행되었음을 알 수 있다. 해당 논문들에서 언급한 내용을 토대로 현재 풍력발전단지 조성에 있어 가장 중요한 것은 가변속 풍력터빈을 기반으로 한 풍력발전 개체들의 적절한 배치 및 계통연계에 대한 안정성 분석임을 알 수 있다. 논문 [7]의 경우 여기서 한 걸음 더 나아가 외부 바람에 대한 모델링의 필요성을 역설하고 있다. 이는 외부 속도에 따라 터빈의 속도가 변화하는 가변속 모델의 해석에 새로운 접근법이 될 수 있다.

앞서 살펴본 내용을 바탕으로, 본 논문에서는 풍속 예측 모델 기반 풍력발전단지의 퍼지 모델링 및 강인 안정도 해석 기법을 제안하고자 한다. 기존 연구의 경우, 가변속 풍력터빈 기반 풍력발전단지 구성에 대한 개념적 연구 위주로 수행되었지만, 풍속 예측 모델에 기반한 해석은 자세히 다루지 않았다. 또한, 발전단의 해석에 있어 풍속 예측 모델을 동적방정식에 포함한 해석 역시 이루어지지 않았다.

* Corresponding Author

Manuscript received August 13, 2013 / revised October 4, 2013 / accepted November 19, 2013

이덕용: 한국폴리텍V대학 김제캠퍼스, 수자원관리과

(ldy9150@kopo.ac.kr)

성화창: 연세대학교 전기전자공학과(casfirspear@yonsei.ac.kr)

주영훈: 군산대학교 제어로봇공학과(yhjoo@kunsan.ac.kr)

※ 본 연구는 2012년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제(No. 20124010203240)와 2011년 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단 지역혁신인력양성사업의 지원을 받아 수행된 연구임.

이를 해결하기 위하여, 본 논문에서는 최소자승법에 기반한 풍속 예측모델을 제안하고, 이를 실제 가변속 풍력터빈에 적용한 동적 방정식을 제안하게 된다. 그리고, 단일 개체 풍력터빈을 제어하는데 사용되었던 강인 퍼지 이론을 보다 발전시켜 풍력발전 단지에 적용할 수 있도록 한다. 또한, 그리드 연결성을 고려한 풍력발전단의 구성을 위해 가변속 풍력터빈 개체간의 상호연결성(interconnection)을 통한 풍력단지 모델을 제안하게 된다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II 장에서는 지능형 풍력발전 터빈 특징 및 최소자승법에 기반한 풍속 예측모델을 개발하게 된다. III 장에서는 T-S 퍼지 시스템 및 강인 제어기 설계에 대한 연구를 수행하게 되며, IV 장에서는 풍력발전단지에 대한 모델링을 바탕으로 하여, 이에 대한 퍼지 모델링 및 가상 제어 시뮬레이션을 수행하게 되며, 마지막 V 장에서는 결론을 제시하며 본 논문은 마무리 하게 된다.

II. 풍력 터빈 해석 및 풍속 예측 모델

1. 개별 풍력 터빈 분석

기존의 개별 풍력발전 터빈의 경우 다음 두 가지 문제점을 지니고 있다[5,6].

- a) 수시로 변하는 바람의 움직임을 반영하지 못했기에 현실 풍력발전에 대한 적용의 어려움.
- b) 터빈의 속도가 고정되어 있다는 것은 최상의 전력을 획득하는 것이 특정 속도에서만 가능하다는 것을 의미하므로 효율성이 낮음.

해당 문제점을 보완하기 위하여, 가변터빈이 고려된 풍력발전 모델에 대한 연구가 진행 되어 왔으며, 이는 고정된 속도의 터빈을 사용하는 것에 비해 1) 높은 에너지 창출, 2) 그리드 연결 수 감소, 3) 사용 부품에 대한 유연성 등의 강점을 지니고 있다[1]. 문제는 가변속도가 고려된 풍력터빈의 경우 동역학 방정식의 해석이 매우 어렵다는 단점이 있으며, 모델을 구성하는 파라미터 관계 역시 외부의 불확실성의 영향아래 놓여있다. 이는 풍력발전시스템의 운영에 있어 불안정성으로 이어지기 때문에 해결방안의 모색이 요구된다. 더군다나, 지능형 풍력발전 단지의 구성의 경우 한 개체의 안정성만을 목표로 하는 것이 아니라, 다 개체 모델에 대한 통합 안정성을 고려해야 하기 때문에 안정성의 문제는 더욱 커지게 된다.

본 장에서는 지능형 풍력발전 단지의 구성을 위하여 우선적으로 그림 1과 같은 개별 풍력 발전장치에 대한 분석을 수행하고, 이를 다 개체로 확장할 수 있는 방안에 대해 연구하고자 한다. 우선 다음 식을 고려해 보자.

$$\begin{aligned} Q_A - Q &= J_T \dot{\omega}_t \\ Q - Q_E &= J_G \dot{\omega}_g \end{aligned} \quad (1)$$

$$Q = Q_s + Q_D = K_S \int_0^t (\omega_t - \omega_g) dt + B_S (\omega_t - \omega_g)$$

여기서 Q_A 는 바람의 토크(torque)를 나타내며, ω_t 는 풍력터빈 각속도를 말하며, Q_E 는 샤프트의 토크를, ω_g 는 발전기 각속도를 의미한다. 또한, K_S 는 샤프트의 탄력도(compliance)

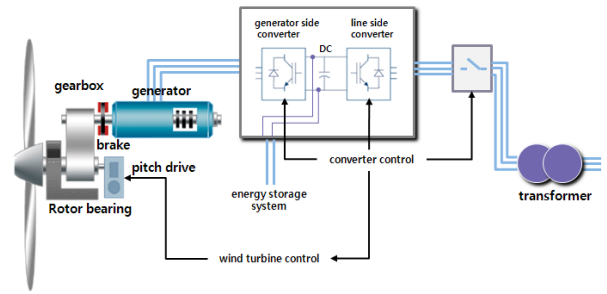


그림 1. 개별 풍력 발전 터빈.

Fig. 1. Individual wind turbine.

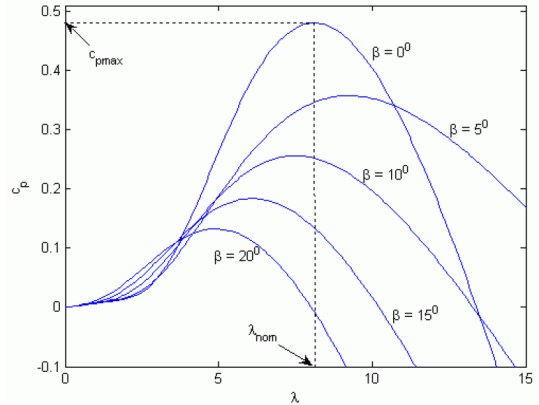


그림 2. 풍속에 따른 $C_p(\lambda)$ 곡선.

Fig. 2. $C_p(\lambda)$ curve according to wind speed.

를 나타내며, B_S 는 샤프트의 감쇠(damping)를 나타내고 J_T 와 J_G 는 각각 터빈과 발전기의 관성을 나타내며, Q 는 샤프트의 토크를 의미한다.

바람으로부터 얻어지는 전력은 다음과 같다.

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

여기서 ρ 는 공기의 비중율, R 은 날의 길이, V_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.

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

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 있으며, V_w 라는 바람의 속도에 반비례하는 것을 알 수 있다.

참고 1: 식 (2)와 (3)에서 $C_p(\lambda)$ 의 경우 외부의 풍속에 따른 풍력터빈의 전력 계수로, 풍력발전 터빈이 가지고 있는 비선형성을 나타내고 있다. 해당 수치의 분석을 위해 기존 논문들의 경우 그림 2에서 나타난 전력 계수 곡선을 통

해 특정 값을 지정하거나 [1-3], 선형화를 통한 단순 파라미터 전환으로 해석하였다[5,6].

2. 최소자승법 기반 풍속 예측 모델 개발

본 절에서는 비선형 파라미터 $C_p(\lambda)$ 의 보다 정확한 해석을 위해 풍속예측모델을 제안하게 되며, 제안된 모델을 기반으로 새로운 동적 방정식을 설계하게 된다. 앞서 언급했듯이, $C_p(\lambda)$ 의 경우 풍속에 반비례하는 특성을 가지는 비선형 파라미터로, 시간에 따라 변화하는 특성을 지니고 있지만, 실제 대부분의 풍력터빈 해석에 있어 고정된 값으로 설정하게 된다. 풍속에 대한 구체적 해석을 위해 아래의 수식을 고려해보자[7].

$$V_w = V_{wB} + V_{wG} + V_{wA} + V_{wN} \quad (4)$$

여기서 V_{wB} 는 기본 풍속을 의미하며, V_{wG} 는 돌풍 (Gust), V_{wA} 는 경사 값, 그리고 V_{wN} 은 외부 노이즈를 의미한다. 본 논문에서는 V_{wB} 와 V_{wA} 의 분석을 통해 보다 정확한 풍속모델을 고려하고자하며, 이를 수식적으로 풀어내기 위해 최소자승법을 사용하게 된다. 해당 기법의 경우 기본적으로 연속적인 시간상에서 이루어지는 풍속 모델을 해석하기 위한 방안으로, 이전 풍속의 변화량에 따른 기울기를 사용자의 설정에 따른 이산시간으로 나누어 산정하게 되며, 이를 통해 특정 시간 이후의 풍속을 예측하게 된다. 좀 더 구체적으로, 풍력속도에 대한 기울기 $a(k)$ 는 이전 시간 T_{pre} 초에서 형성된 풍력속도에 영향을 받게 되며, 이를 정리하면 다음과 같은 식으로 구성된다[11].

$$a(k) = \frac{T_{pre} \sum_{n=1}^{T_{pre}} n V_w(k-n) - \sum_{n=1}^{T_{pre}} n \sum_{n=1}^{T_{pre}} V_w(k-n)}{T_{pre} \sum_{n=1}^{T_{pre}} n^2 - \left(\sum_{n=1}^{T_{pre}} n \right)^2} \quad (5)$$

여기서 k 는 현재의 시간을 의미하며, $V_w(k-n)$ 은 n 간격 이전의 풍력속도를 의미한다. 만약 T_{pre} 값이 30초로 산정된다면, 위의 식의 전개는 아래와 같다.

$$a(k) = \sum_1^{30} \frac{29-2(n-1)}{4495} V_w(k-n) \quad (6)$$

이를 통해 다음 풍속 $V_w(k+T_f)$ 는 다음과 같이 계산되어 진다[11].

$$V_w(k+T_f) = V_w(k) + T_f a(k) \quad (7)$$

여기서 T_f 값은 예측 시간으로 다양하게 설정되어 질 수 있다. 해당 식을 통해 구해진 풍속의 경우 이후 수행될 시뮬레이션의 중요 입력 값으로 작용하게 된다. 해당 입력은 풍력발전단지를 퍼지 모델로 구성함에 있어 주요 변수로 작용하게 되며, 이는 $C_p(\lambda)$ 곡선을 해석하는데 있어 핵심적인 역할을 수행하게 된다.

3. 풍속예측모델 기반 동적 방정식

고정된 $C_p(\lambda)$ 값을 바탕으로 한 기존의 풍력터빈 방정식을 아래와 같다[5].

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} \frac{(\gamma - B_s)}{J_T} & \frac{B_s}{J_T} & \frac{1}{J_T} \\ \frac{B_s}{J_G} & -\frac{B_s}{J_G} & \frac{1}{J_G} \\ K_S & -K_S & 0 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{J_G} \\ 0 \end{bmatrix} u \quad (8)$$

여기서 $x^T = [\omega_t \ \omega_g \ Q_S]$, $u = Q_E$ 이며, γ 는 식 (1)과 (2)를 바탕으로 하여 $\frac{1}{2} \rho A R^3 \frac{C_q(\lambda)_{\min/\max}}{\lambda^2} \omega_t$ 로 계산되었다. 이를 좀 더 분석하기 위해 아래 식을 고려해 보자.

$$\dot{\omega}_t = \frac{1}{J_T} \left(\frac{1}{2} \rho A R^3 \frac{C_q(\lambda)}{\lambda^2} \omega_t^2 - Q_S - B_S(\omega_t - \omega_g) \right) \quad (9)$$

여기서 $C_q(\lambda) = \frac{C_p(\lambda)}{\lambda}$ 로, 이는 식 (3)에 의해 다음과 같이 계산된다.

$$C_q(\lambda) = \frac{C_p(\lambda)}{\lambda} = \frac{V_w C_p(\lambda)}{R \omega_t} \quad (10)$$

식 (10)을 통해 (8)을 재구성하면 아래와 같다.

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} \frac{C_p(\lambda) V_w^3}{J_T R^3 \omega_t^2} & \frac{B_s}{J_T} & \frac{1}{J_T} \\ \frac{B_s}{J_G} & -\frac{B_s}{J_G} & \frac{1}{J_G} \\ K_S & -K_S & 0 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{J_G} \\ 0 \end{bmatrix} u \quad (11)$$

식 (11)의 분석 및 시뮬레이션을 위해서는 퍼지 모델에 대한 해석이 필요하며, 이는 III, IV 장에서 수행하게 된다.

III. 지능형 제어기법 제안

본 장에서는 논문 [6]에서 개발한 풍력터빈에 대한 강인제어이론을 제안한다. 다음 비선형 시스템 식을 고려해 보자.

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

식 (12)에서 $x(t) \in R^n$ 는 상태 벡터를 $u(t) \in R^m$ 는 입력 벡터를 의미하며, 이는 아래와 같은 퍼지 모델 기반 새로운 시스템으로 구성될 수 있다.

$$R^i: IF \ z_i(t) \text{ is } \Gamma_1^i \text{ and } \dots \text{ and } z_n(t) \text{ is } \Gamma_n^i \quad (13)$$

$$THEN \ \dot{x}(t) = (A_i + \Delta A_i) x(t) + (B_i + \Delta B_i) u(t)$$

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 벡터이다. 본 논문에서 제안된 강인제어 기법의 해석을 위하여 시스템에 추가적인 불확실성 파라미터를 추가하게 되며 이는 식 (13)에 나타난 ΔA_i 와 ΔB_i 이다. 불확실 파라미터 ΔA_i 와 ΔB_i 는 가정 1을 통해 재구성 된다.

가정 1 [5]: 불확실성을 나타내는 두 행렬 ΔA_i 와 ΔB_i 는 아래와 같은 행렬식으로 구성될 수 있다.

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

여기서 D_i , E_i 와 E_{2i} 는 파악된 실수 행렬이며, $F_i(t)$ 는 파악되지 않는 파라미터로, $F_i(t)^T F_i(t) \leq I$ 의 특징을 지니고 있다.

식 (13)에 중심값-평균 비퍼지화, 곱셈 추론, 싱글톤 퍼지화를 사용하면 개루페 형태의 퍼지 식 구성이 가능하다.

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

여기서

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

구성된 시스템은 아래 제어기를 통해 페루프로 전환된다.

$$R^i: IF \ z_i(t) \text{ is } \Gamma_1^i \text{ and } \dots \text{ and } z_n(t) \text{ is } \Gamma_n^i \quad (15)$$

$$THEN \ u(t) = K_i x(t).$$

여기서 비퍼지화 출력 값은 다음과 같다.

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

앞선 식에서 알 수 있듯이, 각 변수에 해당하는 파라미터에 특정 변화 값을 줌으로써 전체 시스템이 가지고 있는 불확실성을 표현하게 되며, 이는 기존 논문 [5]에서의 이미 시도되었다. 본 논문에서는 [5]에서의 논의를 확장하여 보다 넓은 범위의 안정도 해석을 시도하게 되며, 이를 활용하여 아래의 정리를 구성해 볼 수 있다.

정리 1: $\| \dot{h}_p \| \leq \phi_p$, $\phi_p \geq \rho$ ($\rho = 1, 2, \dots, r$)를 고려하자. 식 (14)와 (16)을 통해 구성된 퍼지시스템은 $\Xi_i = \Xi_i^T$, $\Gamma_i > 0$, H_i , L_i , N_i , M_i , X_i 에 대해 다음 부등식이 성립하며, 이를 통해 제어입력을 구할 수 있다.

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

$$\omega_{ij} + \omega_{ji} < v_{ij} + v_{ji}^T, \quad v_{ij}, v_{ji} < 0 \quad (18)$$

여기서 v_{ij} 는 $i < j$ 에서 다음과 같이 나타난다.

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

그리고 (17)과 (18)에서 나타난 ω_{ij} 는 아래와 같다.

$$\omega_{ij} = \begin{bmatrix} \varpi_{ij} + \varpi_{ij}^T & * & * & * \\ \Gamma_i - H_j^T + L_j A_i^T & -L_j - L_j^T & * & * \\ E_{1i} H_j^T + E_{2i} K_j^T & 0 & -\epsilon_{ij}^T I & * \\ D_i + D_i^T & 0 & 0 & -\epsilon_{ij}^T I \end{bmatrix},$$

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

증명: 다음과 같은 PDLF (Parameter Dependent Lyapunov

Function)을 고려해보자.

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

$$= \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r \mu_i(z(t)) \mu_j(z(t)) \bar{x}^T [\theta_{ij} + \theta_{ij}^T + \eta_{ij} + \eta_{ij}^T] \bar{x} \quad (19)$$

여기서, $\bar{x} = \Gamma^{-1}(x)x$, $\theta_{ij} = (A_i + \Delta A_i)\Gamma(x) + \Gamma(x)(A_i + \Delta A_i)^T$, $\eta_{ij} = (B_i + \Delta B_i)K_j + K_j^T(B_i + \Delta B_i)^T$ 이다. 식 (19)을 풀기 위하여, 다음 보조정리를 활용하자.

보조정리 1 [5]: 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 보조정리 2-(1)과 동일 문제:

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

보조정리 1을 이용하여 풀게 되면 아래와 같은 부등식을 얻을 수 있게 된다.

$$\zeta_{ij} + \begin{bmatrix} \Delta A_i H_j^T + H_j \Delta A_i + \Delta B_i K_j + K_j^T \Delta B_i^T & * \\ 0 & 0 \end{bmatrix} < 0$$

여기서 H_i 는 일반 행렬이며,

$$\zeta_{ij} = \begin{bmatrix} \theta_{ij} + \theta_{ij}^T + \eta_{ij} + \eta_{ij}^T - \dot{I}(x) + \Xi_{ij} & * \\ \Gamma(x) - H_i^T + L_j A_i^T & -L_j - L_j^T \end{bmatrix}$$

이다. 가정 1에서 언급한 불확실성 파라미터의 성질 $F_i(t)^T F_i(t) \leq I$ 을 활용하여, 위의 식은 아래와 같이 재구성 될 수 있다.

$$\zeta_{ij} + [(E_i H_j^T + E_i K_j^T) \ D_i] \begin{bmatrix} \epsilon^{-1} I & 0 \\ 0 & \epsilon^{-1} I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_i^T H_j + E_i^T K_j \\ D_i^T \end{bmatrix} < 0$$

위의 식에 Schur complement 적용을 통해 정리 1과 같은 선형행렬 부등식 결과를 얻을 수 있다. \square

참고 2: 정리 1은 참고문헌 [5]에서 다른 정리에 비해 완화된 Lyapunov 조건을 사용함으로써 좀 더 넓은 범위의 안정도 영역을 확보할 수 있을 것으로 기대된다.

IV. 풍력발전단지의 퍼지 모델링 및 시뮬레이션

풍력발전단지 조성을 위한 계통 연계에 있어 수식 상의 복잡성을 줄이기 위해 두 개의 개별 풍력터빈에 해당하는 상호 연결(interconnection) 시스템을 사용한다. 그러면, 식 (11)로 표현된 단일 개체 풍력시스템 2개를 상호 연결한 시스템은 두 개의 비선형 파라미터 $C_p(\lambda)$ 와 $1/\omega_i^2$ 를 가지고 있으며, 이는 다음과 같이 상호 연결된 행렬로 구성된 4개의 퍼지 규칙으로 표현될 수 있다[5].

$R^i: IF \ z_1(t) \text{ is } \Gamma_1^i \text{ and } z_2(t) \text{ is } \Gamma_2^i$

$$THEN \ \dot{x}(t) = A_1 x(t) + B_1 u(t) + \sum_{j=1}^4 f_{ij}^1 x_j(t)$$

R^2 : IF $z_1(t)$ is Γ_1^i and $z_2(t)$ is Γ_2^i

$$\text{THEN } \dot{x}(t) = A_2 x(t) + B_2 u(t) + \sum_{j=1}^4 f_{ij}^2 x_j(t)$$

R^3 : IF $z_1(t)$ is Γ_1^i and $z_2(t)$ is Γ_2^i

$$\text{THEN } \dot{x}(t) = A_3 x(t) + B_3 u(t) + \sum_{j=1}^4 f_{ij}^3 x_j(t)$$

R^4 : IF $z_1(t)$ is Γ_1^i and $z_2(t)$ is Γ_2^i

$$\text{THEN } \dot{x}(t) = A_4 x(t) + B_4 u(t) + \sum_{j=1}^4 f_{ij}^4 x_j(t)$$

여기서

$$A_1 = \begin{bmatrix} \frac{z_{2\min} V_w^3}{J_T R^3 z_{1\min}} & \frac{B_s}{J_T} & \frac{1}{J_T} \\ \frac{B_s}{J_G} & -\frac{B_s}{J_G} & \frac{1}{J_G} \\ K_S & -K_S & 0 \end{bmatrix},$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} \frac{z_{2\min} V_w^3}{J_T R^3 z_{1\max}} & \frac{B_s}{J_T} & \frac{1}{J_T} \\ \frac{B_s}{J_G} & -\frac{B_s}{J_G} & \frac{1}{J_G} \\ K_S & -K_S & 0 \end{bmatrix},$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} \frac{z_{2\max} V_w^3}{J_T R^3 z_{1\min}} & \frac{B_s}{J_T} & \frac{1}{J_T} \\ \frac{B_s}{J_G} & -\frac{B_s}{J_G} & \frac{1}{J_G} \\ K_S & -K_S & 0 \end{bmatrix},$$

$$A_4 = \begin{bmatrix} \frac{z_{2\max} V_w^3}{J_T R^3 z_{1\max}} & \frac{B_s}{J_T} & \frac{1}{J_T} \\ \frac{B_s}{J_G} & -\frac{B_s}{J_G} & \frac{1}{J_G} \\ K_S & -K_S & 0 \end{bmatrix},$$

$$B_1 = B_2 = B_3 = B_4 = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{J_G} \\ 0 \end{bmatrix}$$

그리고 $\sum_{j=1}^4 f_{ij}^j x_j(t)$ 은 개별 풍력발전 터빈간의 상호 연결을 의미하며, 식 (11) 상에 표현된 첫 번째 비선형 파라미터 $C_p(\lambda)$ 와 ω_t 의 비선형성을 퍼지모델 기반 해결하기 위해, $(z_1, z_2) \in [M_1, M_2]$ 를 가정하여, 다음과 같은 선형의 부분함수로 표현 가능하게 된다.

$$f(z_{1\min}, z_{1\max}) = \left(\sum_{i_2=1}^2 \mu_{i_2} g_{i_2}(z_{1\min}, z_{1\max}) \right) z_{2\max}, \quad (20)$$

여기서 $g_1(z_{1\min}, z_{1\max}) = M_1$, $g_2(z_{2\min}, z_{2\max}) = M_2$, $\mu_1 = I_1^2$,

$\mu_2 = I_2^2$ 그리고 멤버쉽 함수는 $I_1^2 = \frac{-z + M_2}{M_2 - M_1}$, $I_2^2 =$

$\frac{z - M_1}{M_2 - M_1}$ 이다. 해당 멤버쉽 함수 구성을 통해 전체 비선

형 시스템에 대한 연결성이 보장되며, 정리 1을 통한 제어기 설계 여기 용이해지게 된다. 또한, 가정 1에서 가정한 불확실성은 시뮬레이션을 위해 다음과 같이 10% 불확실성을 생각한다.

$$D_i = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & D_i \end{bmatrix}, \quad D_i' = \begin{bmatrix} 0.1 & 0 & 0 \\ 0 & 0.1 & 0 \\ 0 & 0 & 0.1 \end{bmatrix}, \quad E_{1i} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & E_{1i} \end{bmatrix},$$

$$E_{1i}' = \begin{bmatrix} 0 & a & 0 \\ a & 0 & 0 \\ 0 & b & 0 \end{bmatrix}, \quad E_{2i} = [0]_{3 \times 1}$$

초기 값 $x_0(t) = [-1; -10; 10]$ 로 설정하였으며, 앞서 퍼지 모델링 기법을 통해 연결된 2개의 풍력 터빈 모델을 퍼지 규칙으로 나타내었고, III 장에서는 이에 적합한 제어기를 설계하였다. 설계된 제어기의 효용성을 알아보기 위해 이번 절에서는 시뮬레이션을 수행하게 된다. 시뮬레이션에 사용된 각 파라미터의 수치는 논문 [2]와 [6]을 참고하였으며, 고려된 두 개의 풍력 터빈은 각각 3개의 날을 가진 600KW 모델이다. 초기 값은 $K_S = 100 \text{ Nm/s/rad}$ 이다. 설계된 제어기를 통한 퍼지 제어 이득은 다음과 같다.

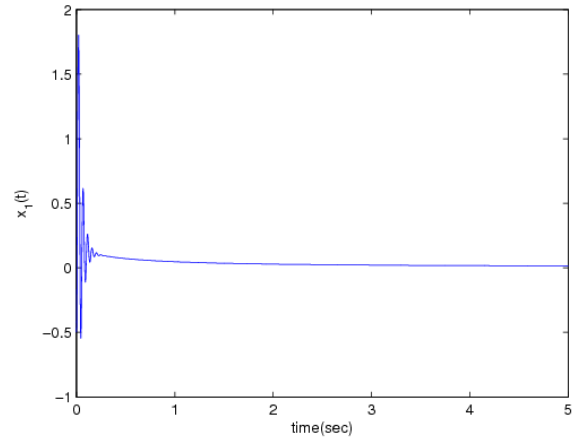


그림 3. 2개체 풍력터빈 x_1 안정화 결과.

Fig. 3. x_1 trajectory of dual wind turbine.

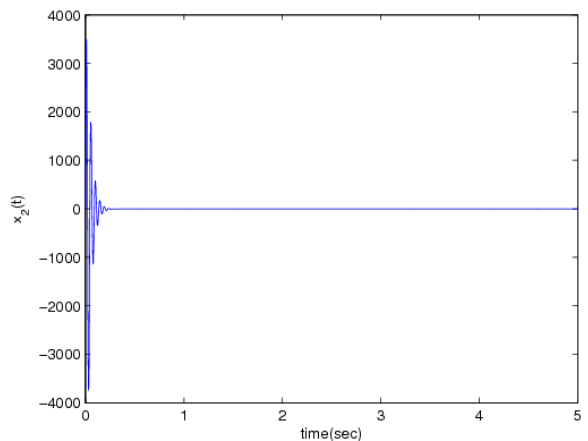


그림 4. 2개체 풍력터빈 x_2 안정화 결과.

Fig. 4. x_2 trajectory of dual wind turbine.

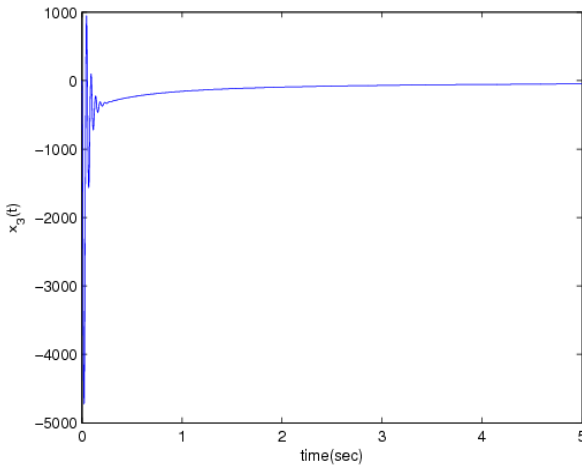


그림 5. 2개체 풍력터빈 x_3 안정화 결과.

Fig. 5. x_3 trajectory of dual wind turbine.

$$K_1 = 1.0e+007 \begin{bmatrix} 8.7387 & 0.0002 & 0.0026 \end{bmatrix}$$

$$K_2 = 1.0e+007 \begin{bmatrix} 8.6536 & 0.0002 & 0.0025 \end{bmatrix}$$

$$K_1 = 1.0e+008 \begin{bmatrix} 8.7377 & 0.0003 & 0.0026 \end{bmatrix}$$

$$K_2 = 1.0e+008 \begin{bmatrix} 8.6441 & 0.0003 & 0.0025 \end{bmatrix}$$

얻어진 입력 값 K_1 - K_4 를 통해 시스템의 강인 안정도 결과를 분석하였으며, 그림 3-5와 같은 안정도 그래프를 얻을 수 있었다. 주목할 점은, 기존의 단일개체 풍력발전 시스템과는 다르게 본 논문에서 고려된 풍력발전 시스템의 경우 퍼지모델에 기반 한 지능형 풍력발전단지 계통연계 분석 및 풍속 예측모델 개발에 대해 다루었다.

V. 결론

본 논문에서는 풍속 예측모델 기반 지능형 풍력발전 단지의 퍼지 모델링 및 강인안정도 해석에 대해 다루었다. 상호연결성을 고려한 퍼지 모델링을 통해 풍력발전단지 구성을 제안하였으며, 최소자승법에 기반 한 풍속 예측모델을 제안하였다. 그리고 비선형적 구조를 가지고 있는 다 개체 풍력발전시스템을 해석하기 위해 T-S 퍼지 모델링 기법을 적용하여 새로운 모델을 창출하였으며, 안정도 해석을 위한 방안 마련을 위해 강인 제어기 설계를 선형행렬부등식 형태로 나타내었다. 그리드 연결로 구성된 풍력발전단지의 파라미터에 외부 불확실성으로 인한 변화를 10% 고려하였으며, 이에 대한 시뮬레이션을 통해 제안된 기법의 우수성을 증명하였다.

REFERENCES

- [1] A. S. Dobakhshari and M. Fotuhi-Firuzabad, "A reliability model of large wind farms for power system adequacy studies," *IEEE Energy Conversion*, vol. 24, no. 3, pp. 792-801, 2009.
- [2] Y. Ma, T. Runolfsson, and J. N. Jiang, "Cluster analysis of wind turbines of large wind farm with diffusion distance method," *IET Renewable Power Generation*, vol. 5, no. 2, pp. 109-116, 2011.
- [3] W. M. Lin and C. M. Hong, "Intelligent approach to maximum power point tracking control strategy for variable-speed wind turbine generation system," *Energy*, vol. 35, pp. 2440-2447, 2010.
- [4] 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.
- [5] J. K. Kim and Y. H. Joo, "Fuzzy modeling and stability analysis of wind power system with doubly-fed induction generator," *Journal of Korean Institute of Intelligent Systems (in Korean)*, vol. 22, no. 1, pp. 56-61, 2012.
- [6] S. Skolthanart, "The modeling and control of a wind farm and grid connection in a multi-machine system," Ph.D. Dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University, 2009.
- [7] C. Supriyadi A. N, I. Ngamroo, Sarjiya, Tumiran, and Y. Mitani, "Design of robust power system stabilizer in an interconnected power system with wind power penetrations," *Wind Power*, S M Mueyen (Ed.), 2010.
- [8] H. C. Sung, J. B. Park, and Y. H. Joo, "Robust observer-based fuzzy control for variable speed wind power system: LMI approach," *Int. Journal of Control, Automation, and Systems*, vol. 9, no. 6, pp. 1103-1110, Dec. 2011.
- [9] H. C. Sung, Y. H. Joo, and J. B. Park, "Switching digital fuzzy controller for hybrid generation system for using wind and photovoltaic energy," *Journal of Korean Institute of Intelligent Systems (in Korean)*, vol. 16, no. 6, pp. 670-676, Dec. 2006.
- [10] S. J. Kim, S. H. Kim, and Y. H. Joo, "Development of matlab-based variable torque simulator for wind turbine systems," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 16, no. 4, pp. 396-402, 2010.
- [11] A. Yona, T. Senjyul, F. Toshihisa, and C. Kim, "Very short-term generating power forecasting for wind power generator based on time series analysis," *Smart Grid and Renewable Energy*, vol. 4, pp. 181-186, 2013.
- [12] D. H. Lee, M. H. Tak, and Y. H. Joo, "Linear Matrix inequality approach to local stability analysis of discrete-time Takagi-Sugeno fuzzy systems," *IET Control Theory and Applications*, vol. 7, no. 9, pp. 1309-1318, Jul. 2013.
- [13] H. C. Sung, J. B. Park, Y. H. Joo, and K. C. Lin, "Robust digital implementation of fuzzy control for uncertain systems and its application to active magnetic bearing system," *International Journal of Control, Automation, and Systems*, vol. 10, no. 3, pp. 603-612, Jun. 2012.



이 덕 용

1990년 한국방송통신대학 전자계산학과 졸업(이학사). 1998년 군산대학교 산업대학원졸업(공학석사). 1981년~2006년 한국산업인력공단 직업전문학교 교사. 2006년~현재 한국폴리텍V대학 김제캠퍼스 수자원관리과 부교수. 관심분야는 지능형로봇, 인간-로봇 상호작용, 지능 제어, 로봇 비전, 지능형 감시 시스템, 풍력 발전 제어.



성 화 창

2005년 연세대학교 전기전자공학과 졸업. 2007년 동 대학원 석사 졸업. 2012년 현재 동 대학원 박사졸업(공학박사). 관심분야는 지능제어, 지능형 디지털 재설계, 전력 계통 제어.



주 영 훈

1982년, 1984년, 1995년 연세대학교 전기공학과 졸업(공학사, 공학석사, 공학박사). 1986년~1995년 (주)삼성전자 자동화연구소 책임연구원. 1998년 2월~1999년 1월 미국 휴스턴대학 전기 및 컴퓨터공학과 박사후박사과정. 2009년 한국지능시스템학회 회장. 1995년~현재까지 군산대학교 제어로봇공학과 정교수. 현재, 제어·로봇·시스템학회 지능시스템연구회장, Int. Journal of Control, Automation, and Systems (IJCAS) Editor-in-Chief, 대한전기학회 부회장, 대한전기학회 정보제어부문 회장. 관심분야는 지능형로봇, 인간-로봇 상호작용, 지능 제어, 로봇 비전, 지능형 감시 시스템, 풍력 발전 제어등.