풍력발전단지의 출력변동저감을 위한 강인 퍼지 제어기 설계

Robust Fuzzy Controller for Mitigating the Fluctuation of Wind Power Generator in Wind Farm

성 화 창, 탁 명 환, 주 영 훈*

(Hwa Chang Sung¹, Myung Hwan Tak², and Young Hoon Joo²)

¹Yonsei University

²Kunsan National University

Abstract: This paper proposes the implementation of robust fuzzy controller for designing intelligent wind farm and mitigating the fluctuation of wind power generator. The existing researches are limited to individual wind turbine with variable speed so that it is necessary to study the multi-agent wind turbine power system. The scopes of these studies include from the arrangements of each power turbine to the control algorithms for the wind farm. For solving these problems, we introduce the composition of intelligent wind farm and use the T-S (Takagi-Sugeno) fuzzy model which is suitable for designing fuzzy controller. The control object in wind farm enables the minimizing the fluctuation of wind power generator. Simulation results for wind farm which is modelled as mathematically are demonstrated to visualize the feasibility of the proposed method.

KeyWords: intelligent wind farm, variable speed individual wind turbine, fluctuation, robust stability, nonlinearity, LMI (Linear Matrix Inequality)

I. 서론

핵 연료와 화석 연료의 급격한 소비문제는 자원 고갈의 위험성을 야기하고 있으며, 특히 자원매장량이 풍부하지 못한 우리나라에서 심각한 문제로 인식되고 있다. 이는 해결책으로서 제시되고 있는 대체 에너지 기술에 점차 많은 자본을 투자 하고 있는 이유이기도 하다. 대체에너지 기술 중 가장 각광을 받고 있는 기술이 풍력발전 시스템으로, 현재 활발한 연구가 국내외에서 진행되고 있다. 풍력발전산업은 스펙트럼이 넓기 때문에 고용효과가 큰 사업이며, 풍력발전 1MW 당 설치단가는 1.2m€ (우리나라는 1.5m€)로서 보급 용량이 매우 크고 이용률 20~30%로 발전량도 많다. 다른 재생 에너지원과 달리 육상, 해상 모두 설치 가능하다는 것도 큰 장점이 된다[7-9]. 그러나 기존의 풍력발전 시스템에서 가장 문제가 되었던 것은 단일 전원 (stand-alone)으로 구성된 풍력발전의 경우 설치비용이나 시스템 구성비용에 비해 효율이 떨어지며, 발전기로부터 나오는 소음공해 또한 상당하다. 특히 바람이 사시사철 다르게 불고, 산이 많은

우리나라의 지형에 미루어 볼 때, 풍력발전 시스템을 구성함에 있어서 일정 규모 이상의 발전 단지를 건설하는 것이 도시형 혹은 가정 형 발전 시스템 구성 보다 더 적합하다. 실제로도 우리나라에서 운용되고 있는 풍력발전 시스템은 대부분 단지를 이런 형태로 구성되어 있으며, 대표적인 곳이 강원도에 있는 풍력발전 단지이다.

풍력발전단지에 대한 관심은 최근 발표되고 있는 해외 논문의 경향에서도 그대로 드러난다. 논문 [1-3]은 풍력발전 단지 구성 및 제어에 관한 내용을 다루고 있다. 특히 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]이며, 논문 [3]에서는 전력 네트워크 구성에 있어 생길수 있는 출력변동에 대한 대비책으로 플라이휠(flywheel)을 사용하는 방안을 제시하고 있다. 국내 논문의 경우, [5]에서 언급된 것과 같이 가변속 풍력발전 터빈을 기반으로 한 풍력발전 단지에 대한 연구가 수행되었음을 알 수 있다. 그러나 제어적 관점에서 바라보면, 개별 풍력터빈에 대한 연구는 계속 진행되고 있지만[4,6], 이를 풍력발전단지로 발전시켜 진행되는 연구는 많지 않다는 점에서 문제점이 발생하게 된다. 풍력발전단지 구성에 대한 개념적 연구가 아닌 풍력발전단지의 군집형태를 수식적으로 모델링하고, 이를 제어하는 군집 제어 방안에 대한 연구는 아직 미흡한 실정이다. 또한, 발전 단지의 실제 운영에 있어 발생할 수 있는 출력변동에 대한 해결책 역시 제시되지 않았다는 점에 주목할 필요가 있다.

앞서 살펴본 내용을 바탕으로 하여, 본 논문에서는 지능

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2012. 11. 24., 수정: 2012. 12. 7., 채택확정: 2012. 12. 26.

성화창: 연세대학교 대학원 전기전자공학부(casfirspear@yonsei.ac.kr)

탁명환: 군산대학교 대학원 전자정보공학부(takgom@kunsan.ac.kr)

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

※ 본 연구는 2012년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제(No. 20124010203 240)임.

※ 본 논문은 2012년 ICROS 전북제주시부 학술대회에서 초안이 발표되었음.

형 풍력발전단지 구성에 대한 내용과 이를 수식적으로 모델링하는 방안, 그리고 구성된 발전단지를 제어할 수 있는 방안에 대해 연구하고자 한다. 특히, 제어파트에 있어서 사용되는 제어 이론은 단일 개체 풍력터빈을 제어하는데 사용되었던 강인 퍼지 이론을 기반으로 구성하게 되며, 풍력발전 단지 구성 역시 퍼지 이론을 바탕으로 하게 된다.

II. 지능형 풍력발전 단지 구성 방안

1. 개별 풍력터빈 분석을 통한 발전 단지 구성

풍력발전 시스템은 풍력 터빈을 기반으로 하여 외부의 바람의 속도에 따른 발전이 이루어지게 되며, 단일 형태의 풍력발전 시스템과 단지 형태의 발전 시스템으로 구분된다. 우리나라의 경우, 대부분의 발전 시스템이 계통과 연계되어 있고, 발전 시스템 구성에 관한 권한이 정부에 집중되어 있기 때문에 독립형 발전 시스템 보다는 단지 형태의 대규모 발전 시스템으로 구성하는 경향이 강하다. 문제는 독립형 발전 시스템에 비해 풍력발전 단지의 경우 구성면에서 많은 복잡성을 지니고 있다는 점이다. 1) 풍력발전 단지에 적합한 부지는 어떻게 구성되어야 하는지, 2) 개별 풍력발전 시스템을 어떤 식으로 배치해야 하는지, 3) 개별적 풍력 발전 시스템의 최대 효율과 구성된 발전단지 전체적 효율과는 어떤 상관관계를 지니는지, 그리고 4) 계통 연계를 고려한 전체 시스템의 효율적인 운용 방안은 무엇인지가 바로 그것이다.

전통적으로 대부분의 풍력 터빈 발전 시스템은 발전이 시작하는 순간과 끝나는 순간을 제외하고는 고정된 터빈의 속도를 가정하고 연구가 이루어져왔다. 그러나 고정된 속도에서의 움직임을 가정하는 것은 수시로 변하는 바람의 움직임을 생각해 볼 때 실제 적용에는 적합하지 않다. 또한, 터빈의 속도가 고정되어 있다는 것은 최상의전력을 획득하는 것이 특정 속도에서만 가능하다는 것을 의미하기 때문에 효율성이 떨어진다.

이와 같은 문제점을 해결하기 위하여, 터빈의 속도가 변수로 고려된 풍력 발전 모델에 대한 연구가 진행 되어 왔다. 고정된 속도의 터빈을 사용하는 것에 비해 터빈의 속도가 고려된 모델은 1) 높은 에너지 창출, 2) 그리드 연결 수 감소, 3) 사용 부품에 대한 유연성 등의 강점을 지니고 있다[1]. 그림 1의 구조가 터빈의 속도가 고려된 모델의 동작 과정이다. 그림에서 알 수 있듯이, 바람의 속도에 따라

그림 1. 개별 풍력 발전 터빈.
Fig. 1. Individual wind turbine.

그림 2. 지능형 풍력발전단지 구성 개념도.
Fig. 2. Diagram of intelligent wind farm.

rotor dynamics와 drive trains등의 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.

이러한 문제점은 발전 시스템의 불안정성으로 이어지면, 그로 인한 제어의 심각한 문제를 야기 시킨다는 점에서 반드시 해결되어야 한다. 또한 풍력발전기의 모델링에 있어 중점을 두어야 할 것은 외부 풍력의 속도 변화에 대한 유연한 대처이다. 이에 대한 해결책으로 제시된 것이 풍력 터빈의 속도를 변화시킴으로써 외부의 변화에 강인한 발전 시스템을 이루는 것이다. 그림 2의 경우 앞서 살펴본 가변속 개별 풍력발전 터빈을 기반으로 한 지능형 풍력발전 단지에 대한 개념도 이다. 그림에서 알 수 있듯이, 발전단지의 경우 총 4가지로 구성될 수 있는데, 개별 풍력터빈 그룹, 실제 설치 단지, 풍력 단지 제어기, 통합 네트워크 구성이 그것이다. 4개로 구성된 파트는 각각 독립적인 역할을 수행함과 동시에 상호 연관성을 지니고 운영된다[2].

2. 개별 풍력 터빈 배치

풍력발전 단지를 설치하는 데는 가장 큰 한계점 중 하나는 마땅한 장소가 부족하다는 점이다. 풍력발전기는 기본적으로 한 기가 100m가 넘을 정도로 크며, 이는 30-40층 높

그림 3. 풍력발전 단지 boundary.
Fig. 3. Boundary of wind farm.

그림 4. 바람에 따른 풍력발전 배치도.

Fig. 4. Wind turbine arrangement according to wind.

이의 빌딩에 해당된다. 당연히 차지하는 면적도 매우 넓으며, 우리나라처럼 국토 면적이 좁은 나라로서는 부지선정에 있어 많은 한계점을 지니고 있다. 어떤 장소에, 어떤 방식으로 풍력 발전기를 배치하는가에 따라 그 전력 생산량은 확연한 차이를 보이기 때문에 풍력 발전 단지 구성이 매우 중요하다. 본 논문에서는 이에 대한 해결책으로 그림 3과 같은 부지 선정을 우선으로 하고, 여기에 배치할 풍력 발전 시스템의 최적 배치에 대해 연구하게 된다. 이에 대한 연구는 그림 4와 같이 바람의 방향에 따라 풍력 터빈을 구성하게 된다.

III. 강인 퍼지 제어기 설계

본 절에서는 풍력 발전단을 제어하기 위한 제어기 설계를 연구하는 파트로, 논문 [6]에서 다룬 개별 풍력 터빈에 대한 강인 제어 이론을 발전시키게 된다. 우선, 일반적인 비선형 시스템을 고려해보면 아래와 같은 식에서 출발할 수 있다.

$$\dot{x}(t) = f(x(t), u(t)) \quad (1)$$

여기서 $x(t) \in R^n$ 는 상태 벡터를 $u(t) \in R^m$ 는 입력 벡터를 의미한다. 위의 식 (1)은 다음의 퍼지 모델 식으로 표현 가능하다.

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

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. 그리고 Γ_h^i , i 번째 규칙에서 h 번째 전건부 변수의 퍼지 집합이다. 중심값-평균 비퍼지화, 곱셈 추론, 싱글톤 퍼지화를 사용하면 식 (2)는 다음과 같은 전역 동특성 식으로 나타나게 된다.

$$\dot{x}(t) = \sum_{i=1}^r \mu_i(z(t))((A_i + \Delta A_i)x(t) + (B_i + \Delta B_i)u(t)) \quad (3)$$

여기서

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

시스템의 강인 제어를 위해 다음과 같은 퍼지 제어기가 제안된다.

$$R^i: IF \ z_i(t) \text{ is } \Gamma_1^i \text{ and ... and } z_n(t) \text{ is } \Gamma_n^i \\ THEN \ u(t) = K_i x(t). \quad (4)$$

여기서 비퍼지화 출력 값은 다음과 같다.

$$u(t) = - \sum_{i=1}^r \mu_i(z(t)) K_i x(t). \quad (5)$$

제어기 (5)은 병렬 분산 제어기 (parallel distributed control: PDC) 형태이며, 불확실 파라미터 ΔA_i 와 ΔB_i 는 다음의 가정 1을 통해 재구성 된다.

가정 1: 식 (5)의 불확실성을 나타내는 두 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 이미 알고 있는 실수 행렬이며, $F_i(t)$ 는 모르는 행렬로 $F_i(t)^T F_i(t) \leq I$ 와 같은 특징을 지니고 있다.

본 논문에서는 각 변수에 해당하는 파라미터에 특정 변화값을 줌으로써 전체 시스템이 가지고 있는 불확실성을 표현하게 되며, 이를 해결하기 위해 (5)와 같은 제어기를 설계하게 된 것이다. 식의 원활한 정리를 위해 다음 보조정리를 고려하자.

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.

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

앞서 살펴본 내용을 바탕으로 하여, 우리는 다음과 같은 정리를 이끌어 낼 수 있다.

정리 1: 행렬 $Q = Q^T > 0$, M_i 그리고 상수 σ_1 , σ_2 , σ_3 에 대해 다음의 선형 행렬 부등식이 만족한다면, 전체 구성된 식은 점진적으로 안정하다.

$$\begin{bmatrix} -4Q + \chi_{ij} & * & * & * \\ G_i Q + H_i M_j & \sigma_{ij} \rho_{ij} - Q & * & * \\ + G_j Q + H_j M_i & 0 & -\sigma_{ij} I & * \\ \epsilon_{1i} Q + \epsilon_{2i} M_j & 0 & 0 & -\sigma_{ij} I \end{bmatrix} < 0 \quad (6)$$

위 식 (6)에서, $\theta_{ij} = \hat{\delta}_{ij} \hat{\delta}_{ij}^T + \delta_i \delta_i^T$, $\rho_{ij} = \delta_i \delta_i^T + \delta_j \delta_j^T$ 이며 주어진 LMI가 만족한다면, 원점에 대해 안정하게 된다. 또한, 퍼지 제어 이득 값은 $K_d^i = M_i Q^{-1}$ 로 표현된다.

증명: 우선, 시스템의 안정도에 대해 검토하게 된다. 다음과 같은 리아푸노프 (Lyapunov) 식을 고려해보자.

$$V(x_d(t)) = x_d^T(t) P x_d(t) \quad (7)$$

여기서 P 는 양한정 행렬이다. 보조 정리 1에 의하여 $V(x_d(t))$ 의 시간에 대한 미분 함수는 다음과 같이 나타내어진다.

$$\begin{aligned} \dot{V}(x_d(t)) = & \sum_{i=1}^q \sum_{j=1}^q \mu_i(z(kT)) \mu_j(z(kT)) (G_i + H_i K_d^j + G_j \\ & + H_j K_d^i + \Delta G_i + \Delta H_i K_d^j + \Delta G_j + \Delta H_j K_d^i)^T P \\ & (G_i + H_i K_d^j + G_j + H_j K_d^i + \Delta G_i + \Delta H_i K_d^j + \\ & + \Delta G_j + \Delta H_j K_d^i) - 4P + P \chi_{ij} P < 0 \end{aligned}$$

위의 식은 Schur complement에 의해 다음과 같은 행렬 부등식으로 표현된다.

$$\begin{bmatrix} -4Q + P \chi_{ij} P & * \\ G_i Q + H_i K_d^j + G_j + H_j K_d^i & -P^{-1} \\ + \Delta G_i Q + \Delta H_i K_d^j + \Delta G_j + \Delta H_j K_d^i & \end{bmatrix} < 0 \quad (8)$$

식 (8)과 보조정리 1을 이용하면 LMI (6)을 구해낼 수 있다.

IV. 풍력발전단지 구성 및 시뮬레이션

가변속도 풍력터빈 시스템의 동적모델은 그림 5에 나타나 있으며 각 관성질량에 대하여, Newton 운동 방정식을 적용하면 다음의 식을 유도할 수 있다[6].

풍력 터빈의 비선형성과 파라미터 불확실성의 두 가지 측면을 모두 고려하여 모델에 반영하였으며, 상태 변수는 ω_t , ω_g 그리고 Q_s 세 가지이다. 각각은 다음과 같이 계산된다. 우선 첫 번째 변수 ω_t 에 대해 생각해 보자. 위의 식에서 ω_t 는 $\dot{\omega}_t = \frac{1}{J_T}(Q_A - Q)$ 와 같이 표현된다. 여기서 Q_A 를 활용, 다음과 같이 나타내어진다.

$$\begin{aligned} Q_A &= \frac{1}{2} \rho A R C_q(\lambda) \omega^2 = \frac{1}{2} \rho A R C_q(\lambda) \frac{R^2 \omega_t^2}{\lambda^2} \\ &= \frac{1}{2} \rho A R^3 \frac{C_q(\lambda)}{\lambda^2} \omega_t^2 \end{aligned} \quad (9)$$

그림 5. 풍력터빈 시스템의 동적모델.

Fig. 5. Dynamic model of wind turbine.

위의 식을 활용하면, ω_t 에 대해 비선형성을 지닌 상태 방정식을 얻게 된다.

$$\dot{\omega}_t = \frac{1}{J_T} \left(\frac{1}{2} \rho A R^3 \frac{C_q(\lambda)}{\lambda^2} \omega_t^2 - Q_s - B_s(\omega_t - \omega_g) \right) \quad (10)$$

두 번째로 ω_g 는 다음과 같이 표현된다.

$$\dot{\omega}_g = \frac{1}{J_G} (Q - Q_E) = \frac{1}{J_G} (Q_s + B_s(\omega_t - \omega_g)) - \frac{1}{J_G} Q_E \quad (11)$$

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

$$Q_s = K_S \int_0^t (\omega_t - \omega_g) dt = K_S \omega_t - K_S \omega_g \quad (12)$$

요약하자면, 위의 식 풍력 터빈의 속도가 고려된 동적 방정식이며, 여기서 비선형성을 지니고 있음을 알 수 있다. 또한, 해당 식에서 계산되는 $C_q(\lambda)$ 라는 변수는 함수로 표현되는 값이며 그림 5에서 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 위에서 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.

$$\dot{x}(t) = \begin{bmatrix} \frac{(\gamma - B_s)}{J_T} & \frac{B_s}{J_T} & \frac{1}{J_T} \\ \frac{B_s}{J_G} & -\frac{B_s}{J_G} & \frac{1}{J_G} \\ K_S & -K_S & 0 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{J_G} \\ 0 \end{bmatrix} u \quad (13)$$

식 (13)에서 볼 수 있듯이, 풍력터빈의 동적 방정식은 강한 비선형 함수들로 구성된다. 본 논문에서 우선적으로 기존 이론들을 연구하고 이를 바탕으로 풍력터빈의 비선형 동적 방정식을 유도한다. 그 후 이를 T-S 퍼지 모델로 바꾸어 퍼지 제어를 위한 바탕을 마련한다. 본장에서 구성한 풍력터빈 시스템의 퍼지 모델에 3장에서 제안된 강인퍼지 제어기 설계 기법을 적용하여 이번 장에서는 해당 시스템의 안정도 결과를 나타내보고자 한다.

그러나 서론에서 언급하였듯이, 그림 5에서 나타난 풍력 터빈 시스템의 경우 단일개체에 해당하며 이에 대한 배치를 그림 4와 같이 했을 경우 본 논문에서 추구한 지능형 풍력발전 단지가 구성될 수 있다. 즉, 5개의 개별 풍력발전 터빈을 적절히 배치하는 것이 매우 중요하며, 각 개체간의 관계는 다개체 연결시스템으로 구성된다. 그러나 5개의 풍력발전 시스템을 모두 그리드 (grid)로 연결할 시, 너무나 복잡한 형태의 구성이 되기 때문에, 일단 본 논문에서는 두 개의 풍력터빈에 해당하는 interconnection 시스템만을 구성하게 된다. 식 (13)으로 표현된 단일 개체 풍력 시스템을 다개체로 발전시킨 것으로 다음과 같은 interconnection 행렬

로 구성된 4개의 퍼지 규칙으로 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned}
 R^1: & \text{IF } x_1(t) \text{ is } \Gamma_1^i \text{ and } x_2(t) \text{ is } \Gamma_2^i \\
 & \text{THEN } \dot{x}(t) = A_1 x(t) + B_1 u(t) + \sum_{j=1}^4 f_{ij}^1 x_j(t) \\
 R^2: & \text{IF } x_1(t) \text{ is } \Gamma_1^i \text{ and } x_2(t) \text{ is } \Gamma_2^i \\
 & \text{THEN } \dot{x}(t) = A_2 x(t) + B_2 u(t) + \sum_{j=1}^4 f_{ij}^2 x_j(t) \\
 R^3: & \text{IF } x_1(t) \text{ is } \Gamma_1^i \text{ and } x_2(t) \text{ is } \Gamma_2^i \\
 & \text{THEN } \dot{x}(t) = A_3 x(t) + B_3 u(t) + \sum_{j=1}^4 f_{ij}^3 x_j(t) \\
 R^4: & \text{IF } x_1(t) \text{ is } \Gamma_1^i \text{ and } x_2(t) \text{ is } \Gamma_2^i \\
 & \text{THEN } \dot{x}(t) = A_4 x(t) + B_4 u(t) + \sum_{j=1}^4 f_{ij}^4 x_j(t)
 \end{aligned}$$

여기서 $\sum_{j=1}^4 f_{ij}^j x_j(t)$ 이 개별 풍력발전 터빈간의 연결을 의미하게되며, 이는 앞서 3장에서 제시된 정리 1에 의해 풀리게 된다. 그리고 $x^T = [\omega_t \ \omega_g \ Q_S]$, $u = Q_E$ 이며, γ 는 식 (8)에서의 $\frac{1}{2} \rho A R^3 \frac{C_q(\lambda) + \Delta a}{\lambda^2} \omega_t$ 를 나타내며, Δa 는 $C_q(\lambda)$ 가 지니고 있는 불확실 부분을 나타낸다. (13)에서 알 수 있듯이, 첫 번째 변수 ω_t 에서 비선형 성을 보이게 되며 이는 다음과 같은 퍼지 집합으로 표현하게 된다. 마지막으로, 10% 불확실성에 대한 강인 안정도 해석을 위해 가정 1을 활용하여, 비선형 행렬을 다음과 같이 정의하게 된다.

$$\begin{aligned}
 D_i &= \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & D'_i \end{bmatrix}, \quad D'_i = \begin{bmatrix} 0.1 & 0 & 0 \\ 0 & 0.1 & 0 \\ 0 & 0 & 0.1 \end{bmatrix}, \quad E_{1i} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & E'_{1i} \end{bmatrix}, \\
 E_{1i}' &= \begin{bmatrix} a & 0 & 0 \\ 0 & b & 0 \\ 0 & 0 & c \end{bmatrix}, \quad E_{2i} = [0]_{3 \times 1}
 \end{aligned}$$

초기 값 설정은 $x_0(t) = [-1; -10; 10]$ 로 설정하였으며, 아래와 같은 제어 입력 값을 산출해 낼 수 있다. 앞서 퍼지 모델링 기법을 통해 연결된 다개체 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 두 개의 풍력 터빈은 각각 3개의 날을 가진 600KW 모델이다.

$$\begin{aligned}
 J_T &= 40000 \text{ kg } m^2, \quad J_G = 65 \text{ kg } m^2, \quad K_S = 100 \text{ Nms/rad} \\
 B_S &= 1800 \text{ Nms/rad}, \quad R = 35 \text{ m}, \quad \rho = 1.225 \text{ kg/m}^3
 \end{aligned}$$

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

$$K_1 = 1.0e+008 \begin{bmatrix} 3.9275 & 0.0003 & 0.0014 \end{bmatrix}$$

$$K_2 = 1.0e+008 \begin{bmatrix} 3.7661 & 0.0003 & 0.0013 \end{bmatrix}$$

$$K_1 = 1.0e+008 \begin{bmatrix} 3.9123 & 0.0003 & 0.0014 \end{bmatrix}$$

$$K_2 = 1.0e+008 \begin{bmatrix} 3.7652 & 0.0003 & 0.0013 \end{bmatrix}$$

얻어진 입력 값 K_1 에서 K_4 를 통해 시스템의 강인 안정도 결과를 분석하였으며, 그림 6-8와 같은 안정도 그래프를 얻을 수 있었다. 주목할 점은, 기존의 단일개체 풍력발전 시스템과는 다르게 본 논문에서 고려된 풍력발전 시스템의 경우 1) 지능형 풍력발전단지의 모형을 바탕으로 구성되었다는 점; 2) 다개체 풍력발전 시스템에 대한 연결성을 고려하였다는 점; 3) 풍력발전단지의 군집 제어로서의 가능성을 보였다는 점으로 요약될 수 있다. 또한, 시스템을 구성하고 있는 핵심 파라미터의 불확실성을 10% 고려한 결과물로, 이전과는 다른 비선형성이 고려된 강인 안정도 해석이라는 점 역시 기존 논문들과의 차이를 형성하는 지점이다.

그림 6. 듀얼 풍력터빈 x_1 안정화 결과.

Fig. 6. x_1 trajectory of dual wind turbine.

그림 7. 듀얼 풍력터빈 x_2 안정화 결과.

Fig. 7. x_2 trajectory of dual wind turbine.

그림 8. 듀얼 풍력터빈 x_3 안정화 결과.

Fig. 8. x_3 trajectory of dual wind turbine.

V. 결론

본 논문에서는 지능형 풍력발전 단지 최적 구성 및 출력 변동저감을 위한 강인퍼지 제어기 설계에 대해 다루어 보았다. 지능형 풍력발전 단지 구성을 위한 전체 제어 시스템 구성 및 개별 풍력 터빈 배치를 위한 방안에 대해 제시하였으며, 비선형적 구조를 가지고 있는 다개체 풍력발전시스템을 해석하기 위해 T-S 퍼지 모델링 기법을 적용하였다. 그리고 다개체 풍력발전 단지의 강인 안정도 해석을 위한 방안 마련을 위해 강인 제어기 설계를 LMI 형태로 나타내었다. 듀얼 풍력터빈으로 구성된 시스템의 파라미터에 외부 불확실성으로 인한 변화를 고려해 10 % 만큼의 변화율을 주어 시스템을 재구성하였으며, 설계된 퍼지 모델에 적합한 제어기를 접목을 통해 시스템의 안정도를 증명해 보았다. 마지막으로 시뮬레이션을 통해 제안된 기법의 우수성을 증명하였다.

참고문헌

- [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] Z. Long and Q. ZhiPing, "Modeling and simulation of flywheel energy storage system with IPMSM for voltage sags in distributed power network," *Mechatronics and Automation, ICMA 2009*, vol. 9, pp. 5046-5051, 2009.
- [4] 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.
- [5] K. S. Ro and Y. S. Choo, "Neural network controller and a grid-connected wind energy conversion system for

maximum power extraction," *Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers (in Korean)*, vol. 18, no. 2, pp. 142-149, 2004.

- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.

성 화 창

2005년 연세대학교 전기전자공학과 졸업. 2007년 동 대학원 석사 졸업. 2012년 동 대학원 박사 졸업. 관심분야는 디지털 제어, 비선형 제어, 디지털 제어, 전력 계통 제어.

탁 명 한

2009년 군산대 전기전자제어과 졸업. 2009년 동 대학원 석사. 2011년~현재 군산대 제어로봇공학과 박사과정. 관심분야는 군집 로봇, 지능 제어, 영상 처리, 풍력 발전 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, 군산대학교 Post BK21 사업팀장, 제어로봇시스템학회 지능시스템연구회장, Int. Journal of Control, Automation, Systems (IJCAS) Editor. 대한전기학회 부회장, 대한전기학회 정보제어부문 회장. 관심분야는 지능형로봇, 인간-로봇 상호작용, 지능 제어, 로봇 비전, 지능형 감시 시스템, 풍력 발전 제어 등.