풍력발전단지의 효율적 운영을 위한 퍼지로지식 기반 주파수 제어기 설계

A Design for a Fuzzy Logic based Frequency Controller for Efficient wind Farm Operation

김 세 윤, 김 성 호*
(Se Yoon Kim¹ and Sung Ho Kim^{2*})

¹School of Electronic and Information Engineering, Kunsan National University

²Department of Control and Robotics Engineering, Kunsan National University

Abstract: Recently wind energy penetration into power systems has increased. Wind power, as a renewable energy source, plays a different role in the power system compared to conventional power generation units. As long as only single and small wind power units are installed in the power system, wind power does not influence power system operation and can easily be integrated. However, when wind power penetration reaches a significantly high level and conventional power production units are substituted, the impact of wind power on the power system becomes noticeable and must be handled. The connection of large wind turbines and wind farms to the grid has a large impact on grid stability. The electrical power system becomes more vulnerable to and dependent on wind energy production, and therefore there is an increased concern about the large wind turbines impact on grid stability. In this work, a new type of fuzzy logic controller for the frequency control of wind farms is proposed and its performance is verified using SimWindFarm toolbox which was developed as part of the Aeolus FP7 project.

Keywords: wind power system, energy penetration, fuzzy logic controller, frequency control, simwindfarm toolbox

I. 서론

전 세계적으로 풍력 발전은 전력 생산을 위해 사용되는 신·재생 에너지원 중 가장 빨리 성장하고 있는 분야로 새로이 건설되는 풍력 발전 단지로부터 생산되는 전력은 전체 발전량에서 많은 부분을 차지하고 있는 실정이다.

유럽 각국 등의 풍력 발전 선진국들은 이미 오래 전부터 풍력발전을 계통에 연계하여 운영해온 경험과 많은 관련 연구를 바탕으로 계통 운영을 효율적으로, 그리고 안정적으로 수행하기 위하여 계통 연계 기준(Grid-code)을 정비해왔다. 하지만, 우리나라의 경우 한국전력공사의 “분산형 전원 배전계통 연계 기술 기준”이 있지만 이는 신재생에너지원 전체의 전원 접속에 관한 규정으로, 풍력 발전에 대한 계통 연계 기준이 별도로 마련되지 않았으며 대규모 풍력 발전이 도입될 경우 계통 운영 방안에 대한 검토도 부족한 실정이다[1,2].

풍력 발전은 기존의 화석연료를 이용한 발전과 매우 다른 특성을 갖는 변동성 전원으로 효율적인 계통 연계를 위한 철저한 대비가 필요로 된다. 우리나라는 아직 전체발전

량을 기준으로 풍력발전이 차지하는 비율이 미미하지만, 향후 대규모 해상 풍력발전 단지 조성 및 스마트 그리드 환경 변화에 따라 중·소규모의 풍력발전이 계통에 연계되면 계통 운영 및 계획에 있어 기존에 경험하지 못한 다양한 문제가 대두될 것으로 예상된다[3].

유럽의 경우 수력발전 등 풍부한 예비 발전력과 국가 간 계통 연계가 이루어져 풍력 발전 운용이 용이하지만, 국내 계통의 경우 이웃 국가와 전력 계통이 연결되지 않은 고립 계통이므로, 국내 계통의 특성을 고려한 풍력 발전 단지의 최적의 운영 방안 수립이 필요하다[4].

이에 본 논문에서는 유럽 연구 프로젝트의 일환인 Aeolus FP7 프로젝트 수행으로 개발된 Matlab/Simulink에서 활용 가능한 Simwindfarm toolbox를 이용하여 풍력 발전 단지와 바람장을 모델링하고, 이를 통해 풍력발전 단지를 안정적으로 운영하기 위해 수행되는 다양한 제어기법들을 고찰하고자 하며, Simwindfarm에서 제공하는 주파수제어에 대한 발전 특성을 분석하고, 퍼지제어기로 구성된 주파수 제어기를 설계한 후, 비교 분석하고자 한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II 장에서는 Simwindfarm toolbox에서 제공하는 기본 구성요소에 대해 설명하고, III 장에서는 풍력발전단지에서의 개별 풍력발전기의 특성 및 제어 방법, 풍력발전단지의 다양한 제어 기법에 대해 고찰하며, IV 장에서는 계통운영과 관련하여 주파수 제어기법에 대해 설명하고, 퍼지제어기로 구성된 제어기법에 대해 설명하며, V 장에서는 시뮬레이션을 통해 퍼지제어기로 구성된 주파수 제어기법의 유용성에 대해 확인하고자 한다.

* Corresponding Author

Manuscript received December 6, 2013 / revised December 31, 2013 / accepted January 11, 2014

김세윤: 군산대학교 전자정보공학부(ksydiary@kunsan.ac.kr)

김성호: 군산대학교 제어로봇공학과(shkim@kunsan.ac.kr)

※ 본 논문은 교육과학기술부와 한국연구재단의 지역혁신인력양성 사업으로 수행된 연구 결과임.

※ 본 논문은 2013년 ICROS 전북제주시부 학술대회에서 초안이 발표되었음.

II. WIND FARM MODEL STRUCTURE

계통 주파수의 효율적인 제어를 위한 퍼지 로직 기반의 제어기 설계를 위해 Aeolus FP7 프로젝트에서 제공하는 Matlab/Simulink 프로그램에서 활용 가능한 Simwindfarm toolbox를 사용하였으며, 제공하는 풍력발전단지의 전체 구성은 그림 1과 같으며, 풍력발전단지를 구성하는 요소들간의 입출력 관점에서 재구성하면 그림 2와 같은 블록도로 표현이 가능하다.

그림 2로부터 풍력발전단지는 바람장(wind field), 다수의 풍력 발전기(group of wind turbines), 풍력발전단지 제어기(wind farm controller) 및 네트워크 운영자(Network operator)로 구성된다. 바람장으로부터 다수의 풍력발전기의 출력인 V_{mean} 및 V_h 는 개별 풍력발전기에 대한 평균 풍속 및 허브 높이에서의 풍속을 의미하며, 다수의 풍력발전기로부터 바람장으로의 출력인 $stat$ 및 C_t 는 풍력발전기의 동작상태(0 또는 1로 풍력발전기의 동작유무)와 바람장에 영향을 줄 수 있는 개별 풍력발전기의 추력 계수를 의미한다. 또한 다수의 풍력발전기로부터 풍력발전단지 제어기로의 출력인 $Fatigue$, V_{meas} , P_a , β 및 w_g 는 개별 풍력발전기에서의 피로도, 측정된 풍속, 현재의 측정 풍속하에서 생산 가능한 전력, 피치각 및 발전기의 회전속도를 의미하며, 풍력발전

그림 1. Simwindfarm toolbox에서 제공하는 풍력발전단지 모델의 전체 구성도.

Fig. 1. Simwindfarm toolbox provides overall configuration of wind farm model.

그림 2. 풍력발전단지의 구성요소간의 신호 흐름도.

Fig. 2. Signal flow of wind farm components.

단지 제어기로부터 다수의 풍력발전기로의 출력인 P_{ref} 는 개별 풍력발전기가 생산해야할 기준 전력을 의미한다.

풍력발전단지 제어기로부터 네트워크 운영자로의 출력 P_{avail} 은 현재 풍속하에서 생산 가능한 전력을 의미하며, 네트워크 운영자로부터 풍력발전단지 제어기로의 출력 P_{dem} 은 네트워크 운영자의 다양한 운전 모드에 따라 풍력발전단지 전체가 생산해야 할 전력을 의미한다.

III. WIND TURBINE CONTROLLER AND FARM CONTROLLER

1. Wind turbine controller

Simwindfarm toolbox에서 제공하는 개별 풍력발전기의 내부 구성을 나타내면 그림 3과 같으며, 블레이드와 관련된 공기역학(Aerodynamic), 드라이브 트레인, 발전기, 타워, 피치 액추에이터 및 터빈 제어기로 구성된다.

풍력 발전기가 바람으로부터 흡수하는 에너지는 다음과 같은 비선형 함수에 의해 표현이 가능하다.

$$P_a = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 V_{wind}^3 C_p(\lambda, \beta) \quad [W] \quad (1)$$

여기서 R 은 회전자의 반경[m], ρ 는 공기의 밀도로 약 $1.25[Kg/m^3]$ 이다. 상기 식에서 전력계수 C_p 란 풍속 V_{wind} 의 바람이 갖고 있는 에너지 중에서 블레이드가 받아들이는 에너지의 비율을 의미하며 풍속에 3승에 비례한다. λ 는 풍속에 대한 블레이드 끝단의 회전 속도비인 주속비(TSR: Tip-Speed Ratio)로 다음과 같이 정의 된다.

$$\lambda = \frac{\omega_r R}{V_{wind}} \quad (2)$$

일반적으로 풍력 발전기의 제어는 크게 시동풍속에서 정격풍속 사이에서 바람 에너지로부터 최대의 전력을 인출하기 위한 토크제어와 정격풍속이상의 풍속에서 출력을 일정하게 유지하기 위한 피치제어로 구분되며, Simwindfarm에서 제공하는 터빈제어기에 대한 구성도를 나타내면 그림 4와 같다.

그림 4에서와 같이 개별 터빈 제어기는 풍력 발전 단지 제어기로부터 P_{ref} 와 현재 풍력발전기의 회전속도를 입력으로 받아들이며 다음과 같은 두 종류의 제어기를 선택적으로 사용하게 된다.

그림 3. 개별 풍력발전기의 내부 구성도.

Fig. 3. Internal configuration of individual wind turbines.

4) $f_d < f_g < f_c$ 경우,

$$P_{demand} = 0.5 \times (Set_{maxP} + Set_{minP}) - 0.5 \times (Set_{maxP} - Set_{minP}) \times \frac{f_g - f_b}{f_c - f_b} \quad (8)$$

5) $-f_c < f_g < -f_d$ 경우,

$$P_{demand} = 0.5 \times (Set_{maxP} + Set_{minP}) - 0.5 \times (Set_{maxP} - Set_{minP}) \times \frac{f_g + f_d}{f_c - f_d} \quad (9)$$

여기서 f_g 는 계통 주파수(f)에서 기준 주파수(60Hz)를 빼 값이며, Set_{maxP} 는 최대 출력값, Set_{minP} 는 최소 출력값을 의미한다.

2. 퍼지 제어기로 재구성된 주파수 제어기

상기의 Droop 제어 방식은 계통 운영자에 의해 미리 설정된 값으로 운영되기 때문에 풍력발전단지에 급격한 부하의 변동이 발생되었을 때 효과적인 주파수 제어가 어렵다는 문제점을 갖는다. 이에 본 연구에서는 그림 4의 Droop 제어기를 퍼지로지 기반의 주파수 제어기로 대체하고자 하며, 퍼지 제어 블록의 구성은 그림 7과 같다.

그림 5의 퍼지제어 블록은 식 (10), (11)과 같이 계통에서의 주파수와 기준 주파수(60Hz)간의 차이 및 이의 미분값을 입력으로 사용하며 주파수 제어를 위한 출력 베이스 및 퍼지 제어기 출력 등으로 구성된다.

$$e(t) = f_g(t) - f_{ref} \quad (10)$$

$$ce(t) = e(t) - e(t-1) \quad (11)$$

식 (10)의 $f_g(t)$ 는 t -step에서 측정된 계통 주파수이며, f_{ref} 는 60Hz인 계통의 설정 주파수이다. 식 (10)로 표현되는 $e(t)$ 와 이전 스텝에서의 주파수 오차 $e(t-1)$ 를 이용하여 오차의 변화율을 식 (11)과 같이 구한다.

그림 7. 주파수 제어를 위한 퍼지제어 블록.

Fig. 7. Fuzzy control block for frequency control.

그림 8. 주파수 오차에 대한 멤버십 함수.

Fig. 8. Membership function of $e(t)$.

그림 9. 오차 변화율에 대한 멤버십 함수.

Fig. 9. Membership function of $ce(t)$.

표 1. 주파수 제어를 위한 제어 규칙.

Table 1. Rule base for frequency control.

$e \backslash ce$	NB	NS	Z	PS	PB
NB	PM	PB	PB	PS	PS
NS	PS	PM	PM	Z	Z
Z	PS	PM	Z	NM	NS
PS	Z	Z	NM	NM	NS
PB	NS	NS	NB	NB	NM

오차 및 오차의 변화율과 관련된 퍼지 멤버십 함수의 형태를 나타내면 그림 8, 그림 9와 같으며, 주파수 제어를 위한 제어 규칙은 표 1과 같다.

표 1에서 횡렬은 주파수 오차 변화율을 나타내며, 종렬은 주파수 오차를 나타낸다. 상기의 규칙 베이스는 다음과 같은 경험칙에 의해 생성되었다.

1) e 가 P 의 경우

풍력발전단지에서 생산되는 전력량이 계통에서 요구하는 부하량보다 큰 경우로 계통의 주파수가 기준 주파수보다 높음으로 현재 발전되고 있는 전력량을 감소하도록 제어되어야 한다.

2) e 가 Z 의 경우

생산되는 전력량이 계통의 부하량과 일치하여 현재 주파수가 기준 주파수를 만족하는 경우로 현재 발전되는 전력량을 유지하도록 제어되어야 한다.

3) e 가 N 의 경우

생산되는 전력량이 계통의 부하량보다 부족한 경우로 계통의 주파수가 기준 주파수보다 낮으므로 현재 발전되고 있는 전력량을 증가하도록 제어되어야 한다.

상기와 같은 규칙베이스에서의 출력에 대한 멤버십 함수는 그림 10과 같다.

그림 10. 출력함수에 대한 멤버십 함수.

Fig. 10. Membership function of the output linguistic value.

V. SIMULATION

상기 설명들에 대한 특성 확인을 위해 Simwindfarm toolbox를 이용하여 5MW급 발전기 10기로 구성된 50MW급 풍력발전단지를 시뮬레이션에 사용하였다. 시뮬레이션 시간은 1,000초이며, 난류강도 10%의 정격풍속 12m/s의 바람장을 사용하였으며, 개별 풍력발전기의 허브높이에서의 풍속을 나타내면 그림 11과 같으며, 계통에서 요구되는 부하를 나타내면 그림 12와 같다.

1. Droop 제어로 구성된 주파수 응답 특성

Frequency 제어를 수행하기 위해 Dead band[Hz]를 0.01Hz, Control band[Hz]를 0.1Hz로 설정하였으며, (+) Control band 이상에서의 Max Power는 50MW, (-)Control band 이하에서의 Min Power는 10MW로 설정하였다. 다음 그림 13은 Droop 제어를 통한 풍력 발전 단지의 발전 특성을 나타낸다.

그림 13에서 보는 것과 같이 Droop 제어를 통해 생산된

그림 11. 시뮬레이션에 사용된 허브 높이에서의 풍속.

Fig. 11. Hub height wind speed used in simulation.

그림 12. 시뮬레이션에 사용된 계통의 부하.

Fig. 12. Grid load change used in simulation.

그림 13. Droop 제어를 통한 풍력 발전 단지 발전 특성.

Fig. 13. The Power tracking characteristic to load change of the conventional droop control.

그림 14. Droop 제어를 통한 계통 주파수 특성.

Fig. 14. Frequency regulation characteristics of conventional droop control.

전력이 계통의 요구량을 수렴함을 알 수 있다. 하지만 (a) 구간에서와 같이 주파수 에러 값(f_g)이 Dead band(± 0.01 Hz) 내에 존재하는 경우 식 (5)에 의해 정밀한 제어가 이루어지지 못해 주파수가 크게 변화함을 알 수 있으며, (b)구간에서는 풍속의 난류 성분 때문에 발전량이 일정치 못하며, (c) 구간에서와 같이 Control band의 설정치 이하의 동작에서는 수렴하지 못함을 확인할 수 있다. 이때의 계통 주파수 특성을 나타내면 그림 14와 같다.

Droop 제어를 통한 주파수 제어결과 Control band로 설정한 ± 0.1 Hz 내에서 제어가 수행되는 것을 확인할 수 있었으나, 설정치 이하의 동작에서 Droop 제어가 제대로 수행되지 못해 주파수가 크게 증가함을 알 수 있다.

2. Fuzzy 제어로 구성된 주파수 응답 특성

상기 설명의 Fuzzy 제어기의 제어 규칙으로 구성된 풍력 발전단지에서의 주파수 제어를 통한 발전 특성은 그림 15와 같다.

그림 13의 Droop 제어의 경우와 달리 Fuzzy 제어기는 풍력발전단지의 생산 가능한 전력량 내에서 계통의 요구량을 모두 수렴하는 것을 확인할 수 있었으며, Droop 제어와 달리 그림 13의 (c)구간에서도 계통의 요구량을 충족하며, 주파수 제어가 제대로 이루어짐을 알 수 있다. 이때의 주파수 특성을 나타내면 그림 16과 같다.

Fuzzy 제어를 통한 주파수 제어 결과, 일반적으로 계통 주파수의 ± 0.02 Hz내에서 제어가 수행되는 것을 확인할 수 있었으며, 바람의 난류특성으로 인해 발전량이 불규칙한 경우(그림 13(b)구간) 및 급격한 계통의 변화(그림 13(c)구간)

그림 15. Fuzzy 제어를 통한 계통 주파수 특성.

Fig. 15. The power tracking characteristic to load change of the proposed fuzzy logic controller.

그림 16. Fuzzy 제어를 통한 계통 주파수 특성.

Fig. 16. Frequency regulation characteristics of the proposed fuzzy logic controller.

그림 17. 두 제어기법의 계통 주파수 특성 비교.

Fig. 17. Comparing the frequency characteristics droop control and fuzzy logic control.

간)에서도 계통 주파수의 $\pm 0.05\text{Hz}$ 내에서 주파수 제어가 수행됨을 확인하였다. 위 그림 17은 두 제어 기법의 계통 주파수 특성을 비교한 그림이다.

그림 17에서 보는 것과 같이 계통의 부하가 일정하지 않고 변화하는 상태에서 Droop 제어는 식 (8) 또는 식 (9)에 의해 제어가 이루어지며, 일정한 전력을 출력하는 Dead band 내에서는 정밀하게 제어가 수행되지 않음을 확인할 수 있다. 이에 반해 Fuzzy 제어기의 경우 대부분의 주파수 제어가 Dead band 내에서 수행되어짐을 알 수 있으며, Droop 제어보다 약 2~5배 정도 정밀하게 주파수 제어가 수행됨을 확인할 수 있다.

VI. 결론

본 연구에서는 풍력발전단지에서 적용할 수 있는 퍼지 로직 기반의 계통 주파수 제어를 제안하였으며 제안한 제어 방식의 유용성을 확인하기 위해, Aeolus FP7 프로젝트에서 제공하는 Matlab/Simulink 환경의 Simwinfarm toolbox를 이용하여 5MW급 발전기 10기로 구성된 50MW급 풍력발전 단지와 정격 풍속 12m/s에서 10%의 난류성분을 갖는 바람장을 모델링 하였으며, 동일한 계통의 요구량에 대해 기존의 Droop 제어와 제안한 Fuzzy 제어를 통한 계통 주파수 특성을 비교하였다. 그 결과 Droop 제어의 경우 Control band로 설정한 $\pm 0.1\text{Hz}$ 내에서 제어가 수행되나 설정치를 벗어난 요구량에 대해선 제어가 제대로 수행되지 못함을 확인하였으며, Fuzzy 제어의 경우 풍력발전단지가 생산 가능한

전력량 내에서 계통의 요구량을 모두 수렴하고, $\pm 0.02\text{Hz}$ 내에서 제어가 수행됨을 확인하였다. 추후 연구를 통해 주파수 제어뿐만 아니라 네트워크 운영자가 수행하는 다양한 제어기법들을 통합한 제어시스템을 개발하고자 한다.

REFERENCES

- [1] S. I. Moon, "Reliability and grid operation problems of wind turbine system," *The proceedings of the Korean Institute of Electrical Engineering (in Korean)*, vol. 56, no. 4, pp. 30-34, Apr. 2007.
- [2] J. Hu, "Challenge and future for efficient grid-tied system operation," *The proceedings of the Korean Institute of Electrical Engineering (in Korean)*, vol. 60, no. 3, pp. 16-22, Mar. 2011.
- [3] Y. S. Jeon and Y. D. Choy, "A study on the optimal operation schemes for large-scale wind farm," *Journal of The Korean Institute of Power Electronics (in Korean)*, vol. 14, no. 5, pp. 365-371, Oct. 2009.
- [4] J. B. An, "Standardization and development of low voltage micro-grid operation devices," *SmatGrid Annual Report in 2011*, vol. 1, no. 2, pp. 591-614, 2009.
- [5] S. Y. Kim, S. H. Kim, "Design of fuzzy controller for frequency control of wind farm," *Proc. of 2013 ICROS Jeonbuk-jeju Regional Conference (in Korean)*, pp. 254-258, Dec. 2013.
- [6] D. S. Moon, S. K. Kim, and S. H. Kim, "A fault detection system for wind power generator based on intelligent clustering method," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 19, no. 1, pp. 27-33, Feb. 2013.
- [7] H. C. Sung, M. H. Tak, and Y. H. Joo, "Robust fuzzy controller for mitigating the fluctuation of wind power generator in wind farm," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 19, no. 1, pp. 34-39, Feb. 2013.
- [8] D. Jacob, M. Soltani, and T. Knudsen, "Aeolus toolbox for dynamic wind farm model, simulation and control," NREL report, 2010.
- [9] E. Cox, "Fuzzy fundamentals," *IEEE Spectrum*, vol. 29, no. 10, pp. 1-6, 2007.
- [10] <http://www.ict-aeolus.eu/SimWindFarm/index.htm>

김 세 윤

2008년 군산대학교 전자정보공학부 졸업. 2013년 동 대학원 석사. 2013년~현재 동 대학원 박사과정. 관심분야는 풍력발전, 인공지능경망, 자동제어, 고장 진단, 소프트웨어 설계 및 개발.

김 성 호

1984년 고려대학교 공과대학 학사졸업.
1986년 고려대학교 대학원 석사. 1991
년 고려대학교 대학원 박사. 1988
년~1990년 고려대 생산기술 연구소 연
구원. 1995년~1996년 Japan Hiroshima
University Post-Doc. 1991년 군산대학

교 제어계측공학과 교수. 관심분야는 풍력발전, 인공 신경
망, 퍼지, 센서 네트워크, 공장 자동화 및 오류 검출.