

이중고정자 발전기를 이용한 전력변환시스템 최적화

Optimization of Power Conversion System Using Dual Stator RFPM Generator

김규헌^{1*}, 정태욱²

Gyu-Heon Kim^{1*}, Tae-Uk Jung²

〈Abstract〉

Dual stator generator has excellent cogging torque characteristics and can generate a high voltage, thus minimizing the loss that occurs when boosting. Moreover, It has a high output ratio to the same volume because the voltage is generated from the inner and outer generator. Dual stator permanent magnet generator is operated in a single phase by connecting the inner and outer generators in series in order to secure high voltage, so it must be controlled in a different way from conventional three phase power conversion system. In this paper, we proposed a method of design and controlling a grid-connected power conversion system using a dual stator generator. The proposed method was verified through simulation.

Keywords : Power conversion system, Single-phase, Dual stator radial flux Permanent magnet generator

1* 주저자, 경남대학교 전기공학과, 석사과정
E-mail: rbgjs8279@naver.com

2 교신저자, 경남대학교 전기공학과, 교수
E-mail: tujung@kyungnam.ac.kr

1* Dept. of Electrical Engineering of Kyungnam University

2 Dept. of Electrical Engineering of Kyungnam University

1. 서론

풍력발전기의 코깅토크는 소음 및 진동에 큰 영향을 미치는 요소이다. 도심에 설치하기 위해서는 소음 및 진동문제가 크게 작용하기 때문에 소형 풍력발전기의 코깅토크 저감은 필수적인 요소이다. 본 논문에서 제안하는 풍력발전시스템에서 사용되는 풍력 발전기인 이중고정자 발전기는 특성상 코깅토크 저감 설계에 유리하며, 높은 발전 전압으로 인해 전력변환기의 효율 확보에도 유리하다[1].

본 논문에서는 이중고정자 발전기를 통해 발전된 전력을 실제 계통과 연계하여 전력의 품질을 관리하며 시스템의 안정성 및 전력을 제어하는 이중고정자 발전기를 이용한 풍력발전시스템의 설계 방법을 제안한다.

2. 이중고정자 발전기용 풍력발전시스템

기존의 소형 풍력발전 시스템은 일반적으로 방사자속형 영구자석 발전기, 축자속형 영구자석 발전기를 이용하였다. 이중고정자 발전기(Dual Stator Radial Flux Permanent Magnet Generator : DSRFPMG)는 그림 1과 같이 내측 고정자와 외측 고정자가 하나의 회전자를 공유하는 구조이다.

내측 고정자와 외측 고정자에서 각각 전력을 생산하기 때문에 외륜형 발전기와 내륜형 발전기를 포함한 다른 발전기보다 동일 체적대비 높은 출력 비를 갖고 있다. 소음 및 진동의 원인이며, 풍력발전기의 초기 풍속에 큰 영향을 미치는 요소인 코깅토크를 다양한 기법을 통하여 저감이 가능하다. 내·외측에서 발생하는 코깅토크의 주파수에 맞춰서 영구자석 또는 고정자의 위치를 이동시

켜 저감하거나, 다른 발전기에도 이용되는 코깅토크 저감 기법을 적용하여 코깅토크를 저감할 수 있기 때문에 기존에 풍력발전기로 이용되는 발전기보다 코깅토크 특성이 우수하다[2-3].

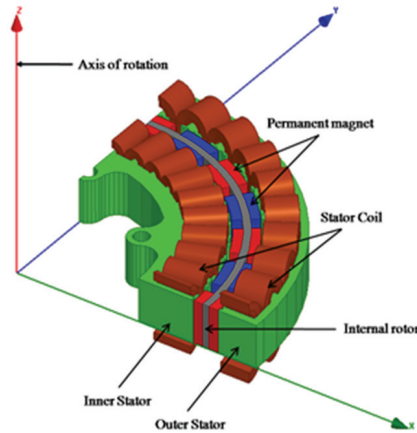


Fig. 1 이중고정자 발전기 개념도

이중고정자 발전기는 그림 2와 같이 2개의 정류기를 내·외측 발전기에 각각 연결하여 1개의 출력을 제어할 수 있으며, 그림 3과 같이 2개의 출력을 각각 제어할 수 있다. 본 논문에서는 입력 부에서 높은 전압을 확보할 수 있어 계통에 연계하여 전압을 형성할 때의 승압 시에 발생하는 손실을 줄일 수 있으며, 소형·경량화가 가능하며 제어가 용이한 1개의 출력을 제어하는 시스템을 채택하였다.

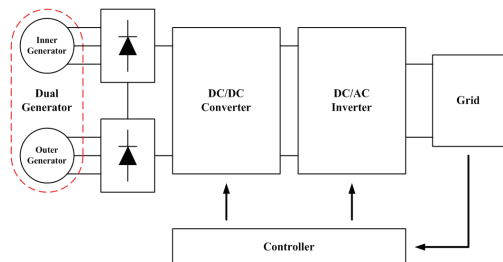


Fig. 2 직렬 시스템 개념도

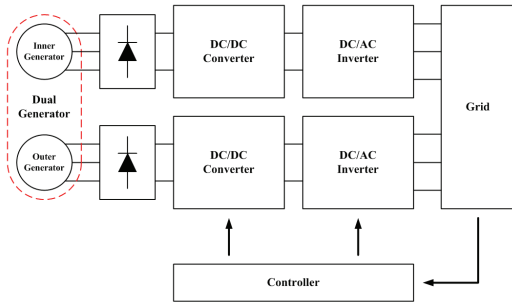


Fig. 3 병렬 시스템 개념도

3. 시스템 모델링

이중고정자용 전력변환기의 토폴로지에 대해 트랜스리스 방식, 고주파 링크 방식, 저주파 변압기 방식의 총 3개의 토폴로지에 대한 장·단점을 분석하였으며, 그 결과는 표 1과 같다. 저주파 변압기 방식은 주 회로와 제어부를 간단하게 구성할 수 있으나, 저주파 변압기에서의 손실로 효율이 감소하며 변압기의 사용으로 크기와 무게가 증가한다.

Table 1. 단상유도전동기의 설계 사양

	트랜스리스	고주파 링크	저주파 변압기
무게 & 크기	○	△	△
비용	○	X	△
효율	○	○	△
안정성	△	○	○
회로구성	○	X	○

○ : 양호, △ : 보통, X : 미흡

고주파 링크 방식은 저주파 변압기 방식에 비해 고효율 설계가 가능하지만, 회로 구성이 복잡해지고 제어회로가 복잡해지는 단점이 있다.

트랜스리스 방식은 변압기를 별도로 사용하지

않기 때문에 고효율 및 소형·경량화가 가능하지만 변압기를 별도로 사용하지 않기 때문에 계통에 직류성분의 전류가 유입되지 않도록 하기 위하여 정밀한 제어가 요구되는 단점이 있다. 본 논문에서는 DSP를 프로세서로 사용하므로 빠른 속응적인 제어가 가능하므로 낮은 가격으로 고효율화가 가능한 트랜스리스 방식을 토폴로지로 채택하였다.

그림 4는 트랜스리스방식의 회로 구조를 보여준다. 전체 회로시스템은 풍력발전기, 승압·강압형 컨버터, 2개의 단상 하프 브리지 인버터, 2개의 리액터와 2개의 커패시터, 브레이커, 계통전원으로 구성된다. 풍력발전기의 출력특성은 풍속에 따라 최대 출력 전압이 바뀌므로 스위칭을 통해 DC-DC 컨버터의 전압을 연속적으로 제어해야한다. 이중고정자 발전기는 내측과 외측에서 각각 전압을 발전하기 때문에 기존의 풍력발전기 대비 기본적으로 2개의 높은 직류 전압을 확보할 수 있기 때문에 승압·강압이 모두 가능한 벡-부스트 방식의 DC-DC컨버터 회로구조로 설계해야한다. 또한, 기존에 사용되는 발전기 대비 높은 전압을 발전하기 때문에 DC-DC 컨버터의 승압비를 최소화 할 수 있어 전력변환기의 효율을 향상시킬 수 있다.

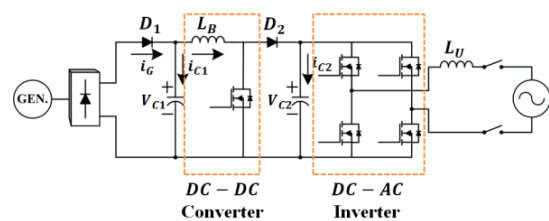


Fig. 4 트랜스리스방식 회로 구조

3상 시스템의 경우, 3상 전압을 정지좌표계로 변환한 후, 전압의 벡터각으로 부터 위상각을 쉽게 검출할 수 있다. 그러나 단상의 경우에는 이러한 방법이 적용되지 않으므로 단상 시스템의 위상

및 주파수 검출이 일반적으로 어렵다. 따라서 그림5와 같이 정지좌표계 d·q축 전압을 생성하기 위하여 가상 전압 발생기가 필요하다[4-5].

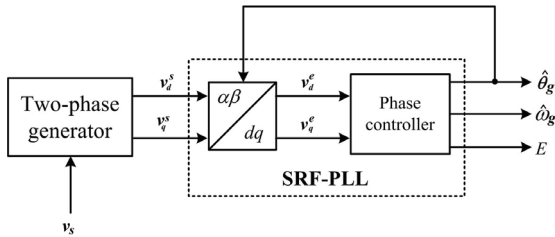


Fig. 5 2상 전압 발생기를 포함한 단상 시스템의 PLL 블록도

그림 5에서 알 수 있듯이 계통 측 전압과 90°의 위상차를 가지는 가상 전압을 발생시키기 위해 전역통과 필터를 사용하였다. 그림 6은 전역통과 필터의 보드선도를 보여준다.

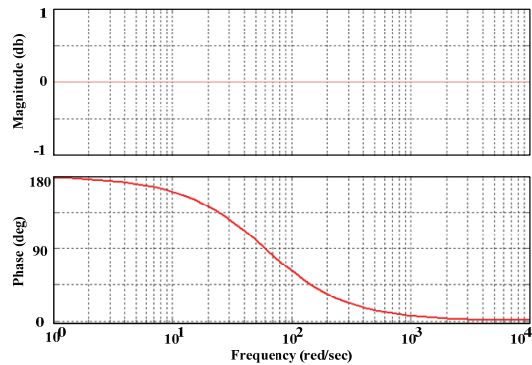


Fig. 6 전역통과필터의 보드선도

전역통과필터를 사용하는 경우, 그림 6의 보드선도에서 볼 수 있듯이 계통측 주파수의 변동이 발생하여도 크기 여유는 일정하고 위상여유만 변동하게 된다.

그림 7은 SRF-PLL(Synchronous Reference Frame PLL)의 블록도를 보여준다. 동기 좌표계 d축 전압을 PI제어기의 기준신호로 사용하며, 이는

동기 좌표계 d축 전압 지령이 '0'으로 제어되므로 직류값이 포함된 동기 좌표계 q축 전압과 비교하여 제어가 용이하다. 정지 좌표계 d·q축 전압은 좌표변환식을 이용하여 동기 좌표계 d·q축 전압으로 변환된다.

추정된 위상각이 이상적인 경우, 식 (1)과 같이 동기 좌표계 d축 전압은 '0'의 값을 가지며 동기 좌표계 q축 전압은 전압의 최대값 E를 가진다.

$$\begin{bmatrix} v_{ds}^e \\ v_{qs}^e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E(-\sin\theta_g \cos\hat{\theta}_g + \cos\theta_g \sin\hat{\theta}_g) \\ E(\sin\theta_g \sin\hat{\theta}_g + \cos\theta_g \cos\hat{\theta}_g) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E\sin(\hat{\theta}_g - \theta_g) \\ E\cos(\theta_g - \hat{\theta}_g) \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\approx \begin{bmatrix} E(\hat{\theta}_g - \theta_g) \\ E \end{bmatrix}$$

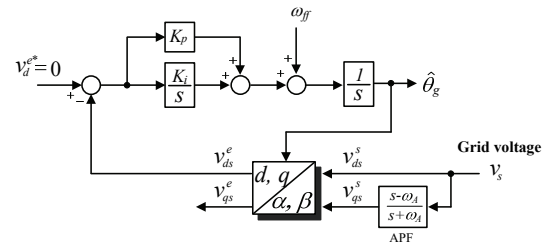


Fig. 7 SRF-PLL 제어 블록도

단상 계통연계형 인버터에서 발전기로부터의 입력전력과 출력전력의 균형을 맞추고 계통측 상전류를 제어하기 위하여 직류단 전압을 일정하게 유지시켜야 한다. DC-DC컨버터측에서 공급되는 입력전력이 계통측에 공급하는 출력전력보다 큰 경우에는 직류단 전압이 증가하고, 반대의 경우에는 직류단의 전압이 감소한다. 또한 입력전력이 출력전력과 같은 경우, 직류단 전압은 일정하게 유지된다. 따라서 계통측에 공급하는 출력전력을 제어함으로써 직류단 전압을 일정하게 제어할 수 있다. 그림 8은 PI제어기를 이용한 직류단 전압 제어 블록도를 보여준다. 직류단 전압 제어기는 직류단 커패시터의 전압과 전압 지령을 입력으로 받고 전류 지령의 최대값을 제어기 출력값으로 보낸다.

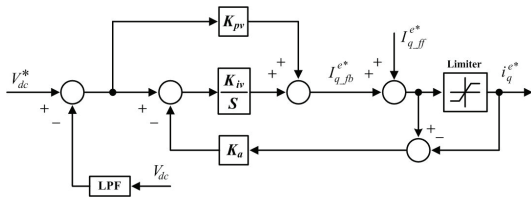


Fig. 8 PI제어기 기반 직류단 전압 제어 블록도

그림 9는 PI제어기를 이용한 전류 제어기의 블록도를 보여준다. 동기 좌표계 d·q축 전류 사이에는 상호 간섭(Cross-Coupling)성분이 존재하며, 이로 인해 동기좌표계 d·q축 전류의 변동이 상호간의 전류를 제어함에 있어 영향을 주게 된다. 따라서 전류제어기이 성능 향상을 위해서는 계통측 인덕턴스 성분에 의한 강하분과 함께 d·q축 전류에 의한 상호 간섭 성분에 대한 보상이 이루어져야한다. 식 (2)와 식 (3)은 계통측 인덕턴스 성분 및 상호 간섭 성분을 보상해 주기 위해 전류 제어기에 넣어 준 전향 보상 값을 나타낸다. 동기 좌표계 PI 전류 제어기의 비례이득과 적분이득은 각각 식 (4)와 같이 구할 수 있다.

$$V_{d_ff} = -w_g L i_q^c + v_{ds}^c \tag{2}$$

$$V_{q_ff} = w_g L i_d^c + v_{qs}^c \tag{3}$$

$$K_p = L w_{cc}, K_i = \frac{R}{L} K_p = R w_{cc} \tag{4}$$

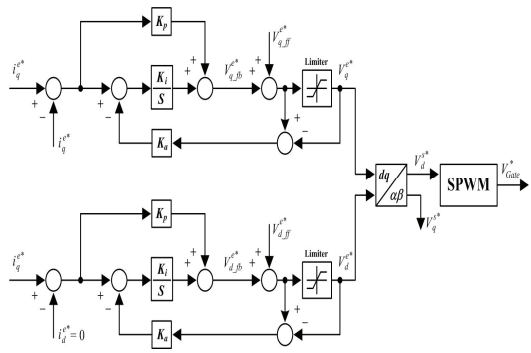


Fig. 9 동기 좌표계 PI 전류 제어 블록도

4. 계통연계 운전 제어 시뮬레이션

제안하는 제어 방식의 타당성을 검증하기 위하여 PSIM 시뮬레이션을 사용하였다. 그림 10은 계통연계형 전력변환기 시뮬레이션 및 제어 회로도를 보여주며, C-block을 이용하여 제어 회로를 구성하였다.

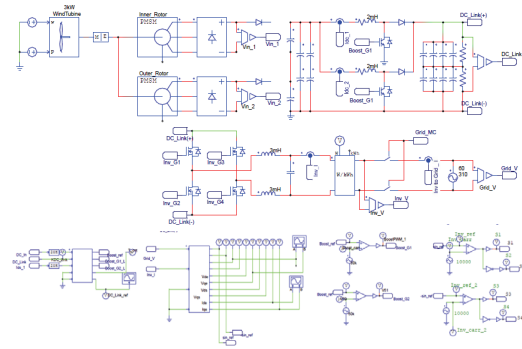


Fig. 10 계통연계형 전력변환기 시뮬레이션 회로도

파워회로는 이중고정자 발전기의 Inner 출력전압과 Outer 출력 전압을 각각 정류하는 다이오드 정류회로, 정류된 DC 전압을 승압 및 강압하는 Buck-Boost 회로, DC 전압을 계통과 연계하기 위해 위상이 일치된 동상전압으로 변환하는 DC-AC 인버터로 구성하였다.

제어 시스템의 구성은 전압 가상 2상 검출기와 SRF-PLL 제어기, 입력 전류제어기, DC 링크 전압 제어기, 인버터 전류제어기를 이용하였으며, 필터는 디지털 전역통과 필터와 디지털 저역 통과 필터로 구성하였다.

그림 11은 계통 위상각 검출 제어기법 블록도를 보여준다. 계통 전압을 ADC를 통해서 감지하여 디지털 APF를 통과하여 V_{ds} , V_{qs} 를 생성한다.

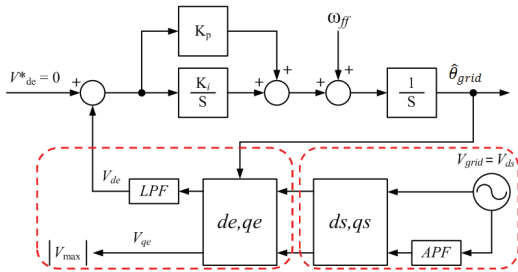


Fig. 11 계통 위상각 검출 제어기법 블록도

그림 12는 디지털 APF를 거친 계통전압을 보여준다. 계통전압(Original)을 V_{ds} 로, APF를 거친 Shift값을 V_{qs} 로 설정한다.

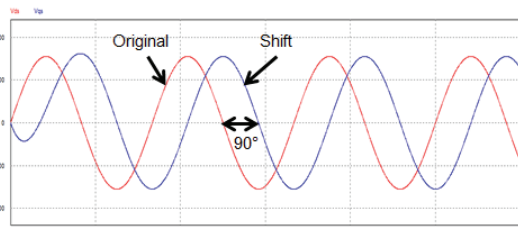


Fig. 12 디지털 APF를 거친 계통전압

그림 13은 TINA 시뮬레이션을 통해 디지털 APF의 주파수 응답 특성을 보여준다. Gain값은 0[dB]이며, 주파수 Gain은 90[deg]이다.

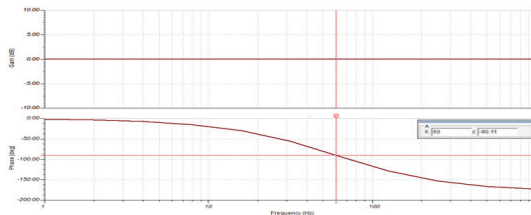


Fig. 13 디지털 APF 주파수 응답 특성

2상 가상전압 V_{ds} , V_{qs} 를 위상 추종각을 이용하여 V_{de} , V_{qe} 를 생성한다. 그림 14는 디지털 위상 동기화 기법을 이용하여 생성된 V_{de} , V_{qe} 를 보여준다.

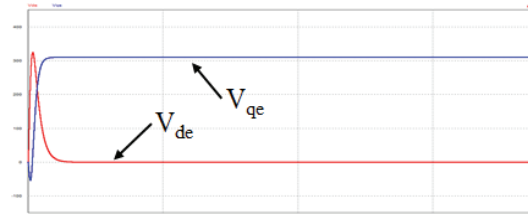


Fig. 14 생성된 V_{de} , V_{qe}

생성된 V_{de} , V_{qe} 를 이용하여 PI제어기를 거친 후 그 값을 $+2\pi$, 0으로 정적분을 실시한다. 그림 15는 계통과 연계된 가상의 모의실험을 통한 추종된 위상각의 결과 파형을 보여주고 있으며, 출력 전류 지령치에 따라 계통과 전력분담을 하는 것을 보여준다.

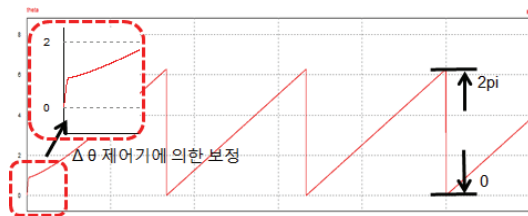


Fig. 15 추종된 위상각

그림 16은 DC링크 출력 전압을 보여주고 있으며, 지령치에 따라 초기 값에서 승압하여 420[V]로 고정 제어 되고 있는 것을 확인할 수 있다.

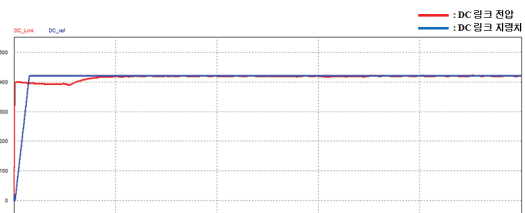


Fig. 16 DC링크 출력 전압

그림 17은 계통 전압과 인버터 출력 전류를 보여준다. 추종된 위상각을 기반으로 계통 전압과

인버터 출력 전류가 동상으로 제어되고 있음을 확인할 수 있다.

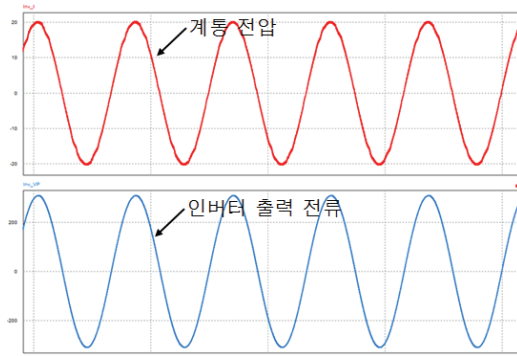


Fig. 17 계통 전압과 인버터 출력 전류

그림 18은 전류 지령치에 따른 출력 전류를 보여주며, 그림 19는 전류 지령치에 따른 출력 전력을 보여준다. 전류 지령치에 따라 출력 전류가 제어되는 것을 확인할 수 있으며, 전류 지령치에 따라서 전력이 제어됨을 확인할 수 있다.

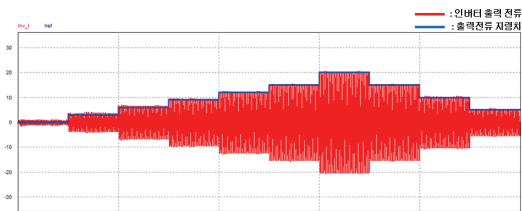


Fig. 18 전류 지령치에 따른 출력 전류

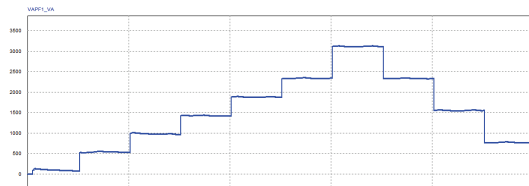


Fig. 19 전류 지령치에 따른 출력 출력 전력

5. 결론

본 논문에서는 이중고정자 발전기를 이용한 풍력발전시스템의 제어 방법을 제안하였다. 기존에 풍력발전시스템에 사용되어 온 방법은 3상 시스템을 사용하였다. 본 논문에서 제안하는 시스템은 내측과 외측 발전기에서 각각 발전되는 전압을 직렬로 연결하여 단상 시스템을 사용한다. 3상 시스템의 경우, 3상 전압을 정지좌표계로 변환한 후, 전압의 벡터각으로 부터 위상각을 쉽게 검출할 수 있다. 단상의 경우에는 이러한 방법이 적용되지 않으므로 SRF-PLL방법을 적용하여 제어 시스템을 모델링 하였다. 제안하는 제어 방법은 PSIM 시뮬레이션을 이용하여 검증하였다.

사 사

본 연구는 한국전력공사의 2018년 착수 기초연구개발과제 연구비에 의해 지원되었음 (과제번호 : R18XA06-50)

참고문헌

- [1] G. C. Lee, T. U. Jung, "A study on Cogging Torque Reduction of Dual Stator Radial Flux Permanent Magnet Generator Using Permanent Magnet Displacement Design of Rotor." Journal of IEEE, vol. 28, no. 4, pp. 49-55, (2014).
- [2] Z. Q. Zhu, D. Howe, "Influence of design parameters on cogging torque in permanent magnet machines," IEEE Trans. Energy Convers, vol. 15, no. 4, pp. 407-412, (2000).
- [3] J. J. H. Paulides, L. Encica, J. W. Jansen, E.A. Lomonova and D. van Wijk, "Small-Scale

- Urban Venturi Wind Turbine: Direct-Drive Generator,” in IEEE International Electric Machines and Drives Conference, pp1368-1373, (2009).
- [4] A. Cataliotti, V. Cosentino, S. Nuccio, “A phase-locked loop for the synchronization of power quality instruments in the presence of stationary and transient disturbances,” IEEE Trans. Instrum. Meas, vol. 56, No. 6, pp. 2232-2239, (2007).
- [5] S. B. Lee, K. B. Lee, D. C. Lee, J. M. Kim, “An Improved Control Method for a DFIG in a Wind Turbine under an Unbalanced Grid Voltage Condition,” Journal of Electrical Engineering & Technology, vol. 5, no. 4, pp. 614-622, (2011).
-
- (접수: 2021.03.18. 수정: 2021.04.07. 게재확정: 2021.04.09.)