

# DFIG 풍력 발전 시뮬레이터 개발

이용재, 박병우, 김춘성, 이화춘, 박성준  
전남대학교

## Development of Simulator for DFIG Wind Power Generation

Yong-Jae Lee, Byoung-Woo Park, Chun-Sung Kim, Hwa-Chun Lee, Sung-Jun Park  
Chonnam University

### ABSTRACT

본 논문에서는 2.2kW급 이중여자유도발전기(DFIG)를 이용하여 계통에 발전전력을 연계하는 풍력 발전 시뮬레이터를 제작하고 무효전력 출력성능을 실증한다. DFIG는 회전자 정격이 고정자에 비해 20~40% 수준으로 회전자 여자 및 계통 연계를 위해 사용되는 전력용 소자의 정격이 낮아지는 장점이 있다. 가상의 계통연계기준을 설정하고 풍속에 따라 결정된 최대 유효출력을 고려하여 무효전력을 생산함으로써 진상/지상 역률 제어를 전 운전영역에서 실시할 수 있도록 하였다.

### 1. 서론

신재생에너지 중 풍력발전의 효율성과 경제성이 대두되면서 대규모 풍력 단지가 증가하였고 이로 인해 유럽 일부 국가를 중심으로 새로운 계통연계기준이 마련되고 있는 실정이다. 이에 따라 계통 안정성을 위해 풍력발전 단지에 대한 무효전력 요구량이 규정되고 있으며, 효율적인 무효전력 출력제어가 필요하게 되었다. DFIG는 회전자 정격이 고정자에 비해 20~40% 수준으로 회전자 여자 및 계통 연계를 위해 사용되는 전력용 소자의 정격이 낮아지는 장점이 있다. 본 논문에서는 DFIG 풍력발전 시뮬레이터를 이용하여 현실성 있는 모의실험을 수행하고자 한다.

### 2. 본론

#### 2.1 이중여자 유도발전기의 구조와 원리

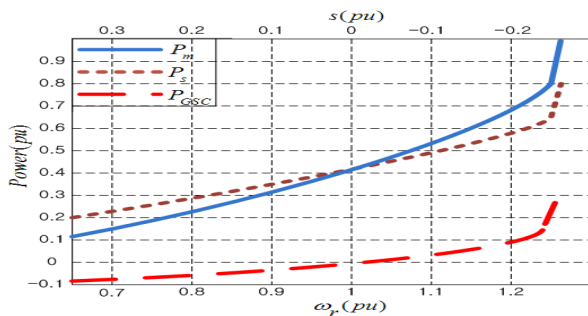


그림 1 회전자 속도 및 슬립에 대한 고정자와 GSC, 전체 출력  
Fig. 1 Total generated, stator and GSC power vs. rotor speed and slip

일정속도 풍력발전기의 경우 일정한 출력을 얻기 위해서 적정 운전 속도 이외의 속도는 모두 슬립으로 수용한다. 하지만 가변속도 풍력발전기인 DFIG는 각 풍속의 출력속도를 따라가며 발전을 하기 때문에 일정속 풍력발전기에 비해 평균 20% 높은 출력 이득을 보인다. 풍력발전으로 인해 바람의 운동에너지는 블레이드에 의해 기계에너지로 변환되고 DFIG의 회전자를 회전시킨다. 발전기의 기계적인 출력은 풍속의 세제곱에 비례하고, 전형적인 속도범위에 대한 고정자와 GSC 출력 및 전체 출력을 그림 1에 나타되었다. 부속동기 일때(positive slip), 계통으로부터 GSC를 통해 전력을 공급하고 MSC로부터 회전자 여자전원을 공급한다. 반대로 회전자 속도가 초동기(negative slip)일 때 발전전력은 MSC 회전자 회로를 거쳐 GSC를 통해 계통에 공급 된다. 저주파수의 회전자 전류에 포함된 고조파 성분이 고정자 전류에 영향을 주기 때문에 동기속도 부근에서 인버터는 정현파에 가까운 저주파수의 회전자 전류를 공급해야 한다.

#### 2.2 DFIG 시뮬레이터 구성

그림 2에 나타낸 DFIG 시뮬레이터는 크게 풍속과 블레이드 출력을 결정하는 PC기반 상위 제어기와 블레이드와 발전기를 모의하는 M-G set, MSC, GSC, 계통연계용 변압기, 컨버터 제어기로 구성된다. 컨버터 제어기에 사용된 DSP는 150 Mhz의 높은 연산 속도를 가지며 32bit 부동 소수점 연산, 두 개의 EVM Module과 16채널의 12bit ADC 그리고 QEP Module이 자체적으로 내장되어 있으므로 전체 제어회로의 크기를 축소할 수 있는 장점이 있다.

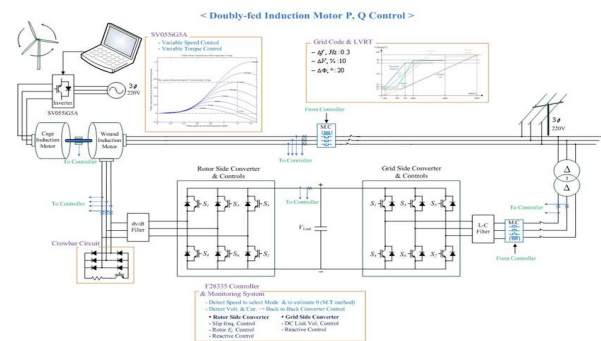


그림 2 DFIG 시뮬레이터 블럭도  
Fig. 2 Block diagram of DFIG simulator

### 2.3 무효전력 연계성능

일부 유럽 국가들에서는 계통에서 무효전력이 요구될 때 대용량 풍력발전기가 진상 역률제어 또는 지상 역률제어가 가능하고 정상시에는 단위 역률제어가 가능하도록 규정을 제시하고 있다. 이러한 기능을 수행하기 위해서는 풍력발전기 무효전력 용량을 규정할 필요가 있고 정상상태에서 DFIG의 용량한계는 고정자와 회전자 최대 허용전류를 산정함으로써 계산될 수 있으며 또 다른 용량한계는 발전기의 정상상태 안정도의 관점에서 나타낼 수 있다.

고정자 전류 한계는 고정자 권선의 열손실로 인한 고정자 온도 상승을 고려한다. 식 (1.1)를 적용하여, PQ평면의 고정자 최대 전류의 궤적을 나타내면, 그림 3과 같다. 이것은 원점을 기준으로 하며, 반경은 고정자 정격의 피상전력과 같으며, 이것은 동기발전기의 용량한계와 유사하다.

$$P_s^2 + Q_s^2 = (3U_s I_s)^2 \quad (1.1)$$

회전자 전류 한계는 회전자 권선의 열손실로 인한 회전자 온도 상승을 고려한다. 식 (1.2)과 같이 유도할 수 있으며 궤적은 그림 3에 나타나 있다. 원점은  $[-3U_s^2/X_s, 0]$ 이며, 반경은  $3X_M U_s I_R / X_s$  이 된다.

$$P_r^2 + \left( Q_r + 3 \frac{U_s^2}{X_s} \right)^2 = \left( 3 \frac{X_M}{X_s} U_s I_s \right)^2 \quad (1.2)$$

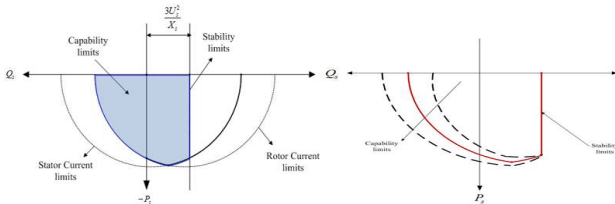


그림 3 DFIG 한계용량 곡선  
Fig. 3 Capability curve of DFIG

그림 3의 PQ 평면에서  $[-3U_s^2/X_s, 0]$ 의 수직선은 정상상태 안정도 한계를 의미하며,  $3U_s^2/X_s$ 은 무부하 무효전력량을 나타낸다. 무효전력 흡수량이 무부하 무효전력량 보다 높을 경우 발전기가 불안정 영역으로 위치함을 의미한다. 그림 3의 간략화된 한계곡선에서 실선은 고정자 및 회전자 한계로 인해 정해진 무효전력 특성을 나타내며 점선은 GSC 출력성능을 조절함으로써 취할 수 있는 전체 시스템 무효전력 용량 한계를 나타낸다. 고정자와 GSC가 갖는 무효전력 출력 계수를 설정하고 이를 변화시켜 무효전력 운전성능을 실증하였다.

### 2.4 실험 결과

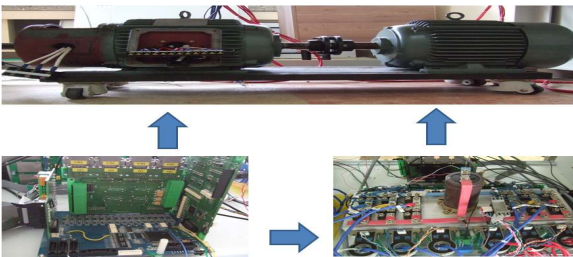


그림 4 DFIG 시뮬레이터  
Fig. 4 DFIG simulator

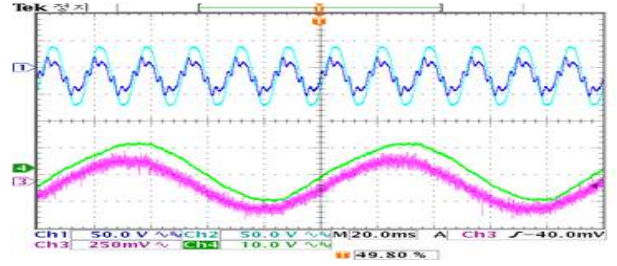
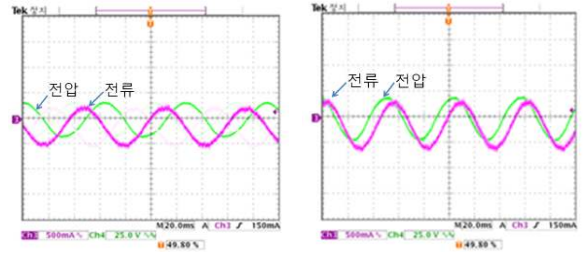


그림 5 실험 파형  
fig. 5 experiment waveform



a. 진상역률 제어                      b. 지상역률 제어  
그림 6 무효전력 연계성능 파형  
fig. 6 reactive power connection capacity waveform

그림 4는 시뮬레이터를 이루는 구성도 사진으로 M-G set과 제어보드(DSP), MSC, GSC로 구성된다. 그림 5는 계통 및 회전자 PLL파형으로 계통전압과 회전자 전압을 잘 추종하고 있음을 알 수 있다. 그림 6은 무효전력 출력계수를 변화시켜 진상/지상역률로 제어할 때의 전압/전류 파형이다..

## 3. 결론

본 논문에서는 2.2kW급 이중여자유도발전기(DFIG)를 이용하여 계통에 발전전력을 연계하는 풍력 발전 시뮬레이터를 제작하고 무효전력 출력성능을 실증하였다. 풍속과 블레이드 출력을 결정하는 PC기반 상위 제어기와 블레이드와 발전기를 모의하는 M-G set, MSC, GSC, 계통연계용 변압기, 컨버터 제어기로 구성된 시뮬레이터는 고정자와 GSC가 갖는 무효전력 출력 계수를 설정하고 이를 변화시켜 무효전력 운전성능을 실증하였다.

## 참고 문헌

- [1] 박정우, "풍력발전 계통연계 기술", 전력전자학회지, 제12권, 제1호, 2007, pp. 27-31
- [2] Jamal A. Baroudi, Venkata Dinavahi, Andrew M. Knight, "A review of power converter topologies for wind generators", Renewable Energy, vol. 32, 2007, pp. 2369-385
- [3] Chen Z, Spooner E, "Current source thyristor inverter and its active compensation system", Proceedings of IEE generation, transmission and distribution, vol. 150, 2003, pp. 447-454
- [4] Tan K, Islam S, "Optimum control strategies in energy conversion of PMSG wind turbine system without mechanical sensors", IEEE Trans Energy Convers, 2004, pp. 392-399