

# 매트릭스 컨버터를 이용한 풍력발전용 DFIG 시뮬레이터 검증

서영거, 고종선, 최남섭\*, 한병문\*\*, 홍순찬  
단국대학교, 전남대학교\*, 명지대학교\*\*

## Verification of DFIG Simulator for Wind Power Generation using Matrix Converter

Young-Ger Seo, Jong-Sun Ko, Nam-Sup Choi\*, Byung-Moon Han\*\*, Soon-Chan Hong  
Dankook Univ., Chonnam National Univ.\*, Myongji Univ.\*\*

### ABSTRACT

본 논문의 목표는 실제 시스템과 가장 유사한 이중여자 유도발전기(Doubly-Fed Induction Generator)의 시뮬레이터를 구현하고 실험을 통해서 그것을 검증하는 것이다. 바람의 속도를 2D 룩업 테이블을 이용하여 데이터화 한 후 터빈 모델의 입력으로 인가한다. 터빈 모델의 파라미터는 실험용 이중여자 유도발전기의 것과 동일하게 설정하여 실제 시스템과 유사하게 하였다. 지금까지는 이중여자 유도발전기를 모사하기 위하여 매트랩(Matlab) 등을 이용하였지만 실제와 다소 다르다는 문제와 구현하기 힘들다는 문제를 가지고 있었다. 하지만 본 논문에서는 심플로러(Simplorer)를 이용하여 쉽고 정확한 시뮬레이터를 구현하였다. 터빈과 이중여자 유도발전기는 기어를 이용하여 직결함으로써 실제 시스템과 매우 가깝게 모사하였으며 이중여자 유도발전기의 회전을 여자시키기 위해 이산 캐리어 변조 방법을 이용하여 매트릭스 컨버터를 구동하였다. 그리고 실험을 통해서 시뮬레이터의 결과와 실험 결과의 비교 및 검증을 한다. 궁극적으로 어떤 지역의 바람의 품질과 발전량 등 중요한 정보를 얻기 위해 실제 크기의 발전기를 설치하지 않고 본 논문에서 개발한 시뮬레이터를 이용하여 쉽게 그 정보들을 얻을 수 있다.

### 1. 서론

현대 산업사회의 급속한 발달로 인한 화석에너지의 고갈 문제와 각종 환경오염문제를 해결하기 위해서 20세기 중반 이후 대체에너지에 대한 관심이 몰리고 있고 그 결과로 우리나라에서도 풍력발전에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.[1],[2] DFIG를 통해 가변 속도제어를 하는 것이 오늘날의 가장 일반적인 형태이고 가변 속도 동작과 전력전자 소자를 통한 계통과의 연결이 현대 풍력 발전의 주된 추세라고 평가되었다.[7] DFIG의 컨셉은 회전자에 국부적인 주파수 대역의 컨버터를 사용하는 것인데 이 컨버터는 회전자의 전압을 제어하여 동기속도의 +/- 30%의 속도 범위에서 유효전력과 무효전력을 독립적으로 제어한다. 전체 생산 전력의 일부분만이 전력 소자를 통해 이동하기 때문에 일반 전 범위 전력 소자에 비해 비용과 손실을 줄일 수 있다.[7]

본 논문은 실제와 매우 유사한 터빈 모델, 매트릭스 컨버터, 독립 유/무효전력 제어를 갖춘 Simplorer 시뮬레이터를 이용하여 가장 현실성 있는 모의실험을 수행하고 실험 결과와의 비교 검증하는 것에 목적이 있다.

### 2. 본론

#### 2.1 DFIG의 구조

DFIG는 기본적으로 회전자의 슬립링에 가변 전압을 인가할 수 있는 전압형 컨버터 회로를 회전자 측에 포함하고 있는 권선형 유도발전기이다. 고정속 발전기의 경우에는 일정한 출력을 얻기 위하여 일정한 풍속만을 동작점으로 받을 수 있다. 하지만 가변속 발전기인 DFIG는 최대 출력점 추적(MPPT - Maximum Power Point Tracking)을 통해서 고정속 발전기에 비해 20% 높은 출력을 발생한다.[7]

그림 1은 이중여자 유도발전기의 구조를 나타내고 있다. 풍력 에너지는 터빈의 블레이드를 통과하고 그 때 DFIG의 회전을 회전하게 하는 기계적 에너지가 발생된다. 회전을 여자시키는 데에는 두 가지 경우가 있는데 첫 번째는 전력이 계통에서 회전자 쪽으로 흐르는 것이고 두 번째는 반대로 전력이 회전자에서 계통으로 흐르는 것이다.

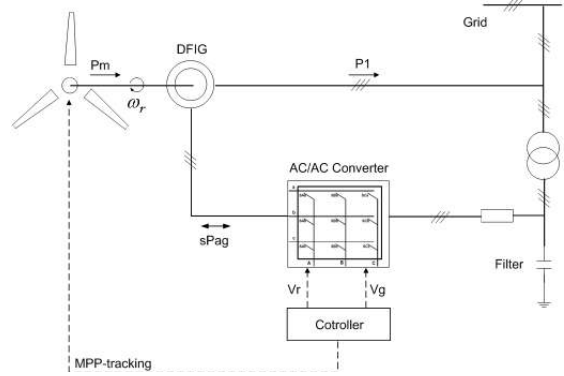


그림 1 이중여자 유도발전기의 구조  
Fig.1 Configuration of a DFIG wind power generator

이러한 양방향 전력 조류 때문에 매트릭스 컨버터를 선정하는 것이다. 고정자가 회전자 전류의 고조파 등에 영향을 받기 때문에 매트릭스 컨버터는 정현파에 가까운 회전자 전류를 발생시켜야 한다. 그리고 고정자의 최적 역률을 얻기 위하여 제어기는 회전자 여자 주파수를 제어해야 하고 일정한 속도와 일정한 출력을 유지해야 한다. 회전자의 정격 계자 전류를 만족시키기 위해서 여자 전압 또한 제어가 필요하다.[3],[4] 이러한 조건들을 부합하는데 매트릭스 컨버터가 전혀 부족함이 없다.

## 2.2 Simplorer를 이용한 시뮬레이터 구현

그림 2는 Simplorer 시뮬레이터의 터빈 모델을 나타내고 있다. 터빈의 파라미터는 실제 크기의 바람개비 반경, 관성 모멘트, 공기밀도 등으로 입력된다. 터빈 모델을 구동하기에는 현재의 풍속 데이터와 출력계수( $C_p$ )가 필요한데 이것은 Simplorer의 CONST 블록과 3D 룩업 테이블로 입력할 수 있다. [3],[4] 3D 룩업 테이블에는 출력계수의 변수인 주속비와 피치각을 미리 저장한다. 이로써 3D 룩업 테이블의 출력으로 출력계수를 얻을 수 있는 것이다.

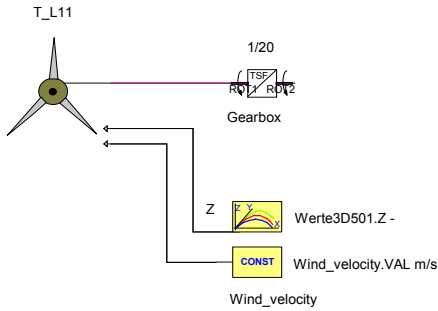


그림 2 심플러 시뮬레이터의 터빈 모델  
Fig.2 Turbine model of the Simplorer simulator

그림 3은 블레이드의 회전속도를 발전기의 회전속도로 증폭시켜주는 증속기 역할을 하는 기어박스를 나타내고 있다. 이 기어박스는 터빈의 기계적 회전속도가 발전기의 전기적 회전속도보다 매우 느리기 때문에 필요한 것이다.

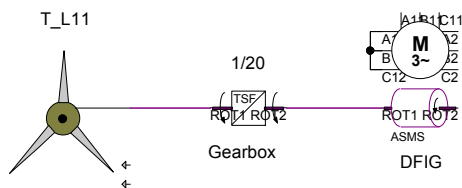


그림 3 증속기 역할을 하는 기어박스  
Fig.3 Gearbox for a speed amplifier

그림 4는 제어기의 블록선도를 나타내고 있다. 회전하고 있는 회전자와 자속각은 간접 벡터 제어(indirect vector control)로써 얻는다. 이 제어기는 q상과 d상으로 독립 제어하여 회전자에 가변 전압을 제공함으로써 유효전력과 무효전력을 독립적으로 제어하는 것이다. 각 제어 루프는 직렬 구조로 이루어져 있고 안쪽으로는 회전자 전류의 d, q상 전류 제어를 위한 빠른 전류 제어기가, 바깥쪽으로는 보다 느린 제어 루프가 있어서 각각 무효전력과 유효전력을 제어한다. 유효전력 제어에 대한 명령 신호는 터빈 블레이드 모델로부터 얻어지고, 무효전력 제어에 대한 명령 신호는 주로 0으로 정해진다. 최종으로 회전자 전압 제어를 위한 세 개의 제어 신호가 발생되어 매트릭스 컨버터 드라이버의 입력으로 전달된다.

그림 5는 터빈과 DFIG로 동작하는 슬립링 유도발전기를 나타내고 있다. 3상 전압원이 계통을 대신하고 있으며 그 전압원이 고장자를 여자시키고 동시에 양방향 전력 흐름이 가능한 매트릭스 컨버터를 통해 회전자를 여자시킨다. 매트릭스 컨버터는 3상 전원과 3상 부하를 직접적으로 연결하는 어레이 형태의 반도체 스위치인데, 양방향의 입출력을 정현파에 매우 가까운 파형으로 제어할 수 있고 입력 역률까지도 제어할 수 있다. 게다가, DC 링크 커패시터가 필요 없기 때문에 매우 작은 크기

로 설계할 수 있다. 회전자 전압과 계통 전압의 크기 스케일을 맞추기 위해 3상 변압기가 필요하다.

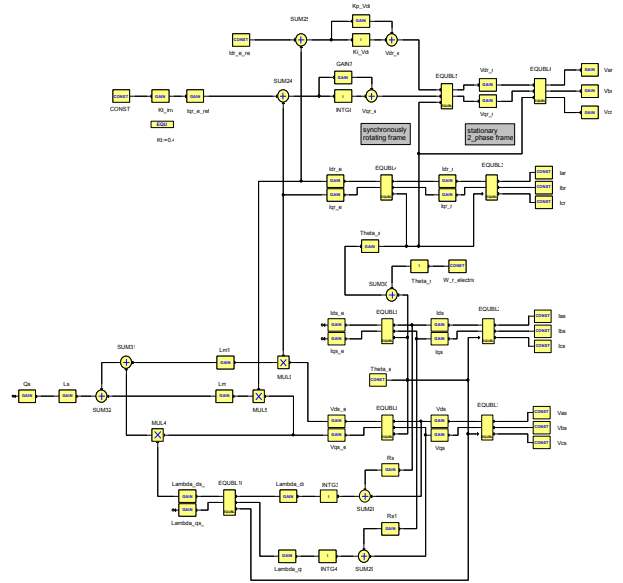


그림 4 제어기의 블록선도  
Fig.4 Block diagram of the controller

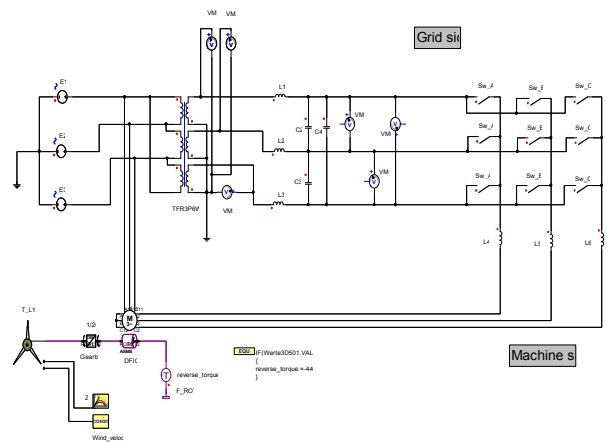


그림 5 DFIG 시뮬레이터의 구조  
Fig.5 Configuration of a DFIG simulator

그림 6은 이중여자 유도발전기의 실험을 위한 하드웨어를 구성한 것으로 왼쪽에는 전동기와 발전기 세트이고 오른쪽에는 매트릭스 컨버터를 포함하고 있는 DFIG 제어기이다.

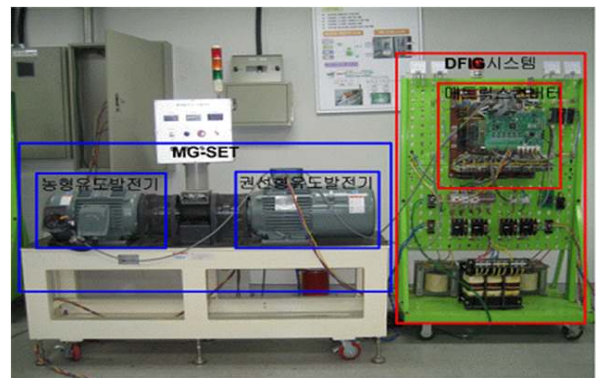


그림 6 DFIG의 하드웨어 실험 세트  
Fig.6 Experimental hardware set of DFIG

그림 7과 8은 각각 시뮬레이션 결과와 실험 결과파형을 보이고 있다. 가로축은 모두 시간이며 세로축은 각각 기재된 바와 같다. DFIG의 명령으로 인가되는 터빈의 회전자 발생 토크가 첫 번째 파형이다. 두 번째는 블레이드의 회전속도로써 풍속 데이터에 따라 자연스럽게 증가하는 것을 알 수 있고 그에 따라 DFIG의 회전속도 또한 동기속도까지 자연스럽게 증가하는 것을 알 수 있다. 주목할 것은 정상상태에서 발전기의 순시 전력이 음수로 바뀐다는 것이다. 따라서 그림 7의 마지막 파형에서 확인할 수 있듯이 발전중이며 그림 8의 첫 번째 파형을 통해 알 수 있듯이 계통으로 전력을 공급하고 있다. 그림 7의 세 번째 파형은 주속비에 대한 함수인 출력계수의 값으로 최대 값을 검출한 후 기계적인 제동을 통하여 최적의 값으로 유지시킨다. 그 기계적인 제동의 역할을 할 수 있도록 그림 5에서 볼 수 있듯이 터빈에 역방향의 토크 발생기를 설치하였다. 역토크의 값은 실험적 결과로 얻어졌다. 마지막으로 그림 7의 네 번째 파형과 그림 8의 세 번째 파형이 매트릭스 컨버터의 출력 전류를 측정한 것으로 정상상태에서 원하는 3상 대칭 전류를 확인할 수 있었다.

### 3. 결론

본 논문에서는 모터의 시뮬레이션 프로그램 중 정교한 Simplorer Simulator를 이용하여 DFIG를 구현하였다. Simplorer에서 제공하는 터빈 모델은 실제 시스템과 유사한 다양한 파라미터 값을 입력할 수 있어서 실제 시스템에 가까운 특징을 얻었다. DFIG에 전달되는 터빈의 회전자 발생 토크는 DFIG 시스템의 입력 역할을 하는 풍속 데이터가 터빈 모델을 거쳐 변환된 값이다. 이렇게 변환된 토크는 DFIG를 회전시켜 발전을 가능하게 한다. DFIG의 여자 전압과 회전자 주파수를 제어하기 위해서 매트릭스 컨버터를 삽입하고 계통과 연계하여 이로서 글자 그대로 이중여자를 실현하였다. 그리고 본 시뮬레이터의 결과와 실험의 결과를 바탕으로 발전 가능성을 검증하고 바람의 품질, 발전량 등의 중요한 정보를 얻을 수 있다. 궁극적으로는 이 시뮬레이터를 통해 실제의 거대한 발전기를 건설하지 않고도 쉽게 발전량을 확인하여 그 지역의 경제성을 파악할 수 있다.

본 연구는 산업자원부 지원에 의하여 기초전력공학공동연구소(과제관리번호 R-2005-B-136-01)주관으로 수행된 과제임

표 1 DFIG 파라미터  
Table 1 DFIG parameters

정격출력	3.7 kW
정격속도(Rated speed)	1200 rpm
극수(P)	6 극
고정자 저항(Rs)	0.3085 Ω
회전자 저항(Rr)	0.536 Ω
고정자 인덕턴스(Ls)	0.0022 H
회전자 인덕턴스(Lr)	0.0022 H
상호 인덕턴스(Lm)	0.0441 H
관성(Inertia)	0.038 kgm <sup>2</sup>

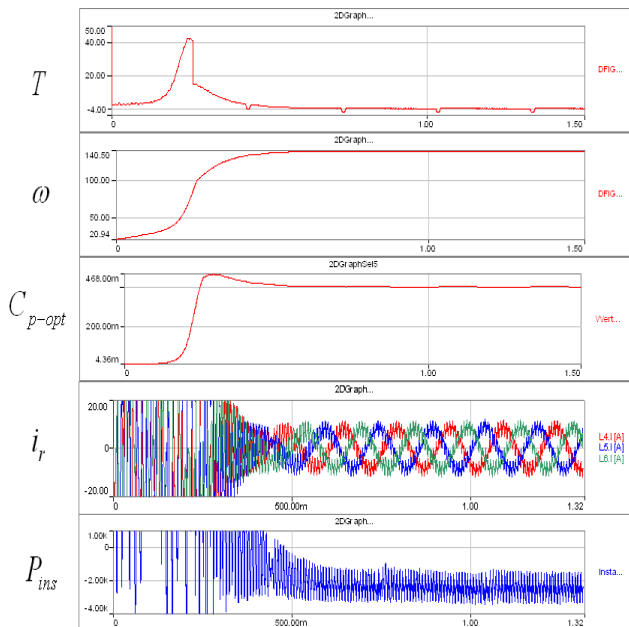


그림 7 시뮬레이션의 결과파형  
Fig.7 Results of the simulation

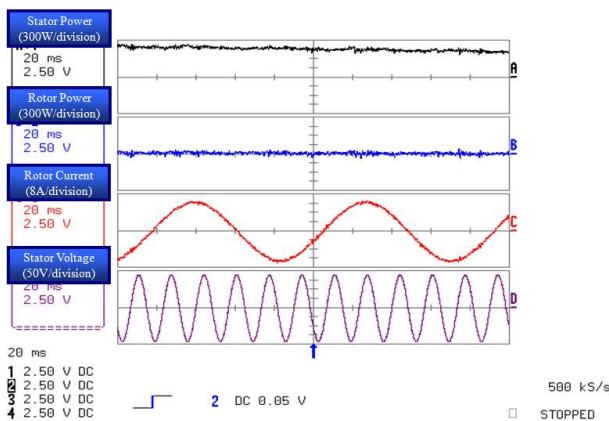


그림 8 실험 결과파형  
Fig.8 Results of the experiment

### 참고 문헌

- [1] 이우석, "이중여자 유도발전기의 정출력·최적역률 운전", 전력전자학회 논문지, Vol. 14, No. 4, pp.31~38, 2000, July.
- [2] 김철호, 서영택, 오철수, "이중여자 유도발전기의 회전자 여자에 따른 출력해석", 대한전기학회 논문지, Vol. 52B, No. 7, pp.299~306, 2003, July.
- [3] 정병창, 권태화, 송승호, 김일환, "회전자측 PWM 인버터-컨버터를 사용한 이중여자 유도형 풍력발전기의 계통 투입 알고리즘", 대한전기학회 논문지, Vol. 52B, No. 10, pp.528~534, 2003, October
- [4] 정병창, 송승호, 심동준, "가변 풍속시 운전모드 전환을 고려한 이중여자 유도형 풍력발전기의 시뮬레이터", 전력전자학회 논문지, Vol. 11, No. 4, pp.349~360, 2006, October
- [5] 정병창, 정세중, 송승호, "가변관성 모의 기능을 가진 풍력터빈 시뮬레이터의 제어 알고리즘", 전력전자학회 논문지, Vol. 8, No. 3, pp.266~273, 2003, June
- [6] Documentation of SimPowerSystems, "Wind Turbine Doubly-Fed Induction Generator(Phasor Type)"
- [7] Gabriele Gail, Anca D. Hansen, "Controller design and analysis of a variable speed wind turbine with doubly-fed induction generator"
- [8] S. Muller, M. Deicke, "Adjustable Speed Generator for Wind Turbines based on Doubly-fed Induction Machines and 4-Quadrant IGBT Converters Linked to the Rotor"