

풍력 발전용 DFIG를 위한 시뮬레이터 개발

서명거, 김영찬, 고종선, 최남섭\*, 한병문\*\*, 홍순찬  
 단국대학교, 전남대학교\*, 명지대학교\*\*

Development of Simulator for DFIG with Wind Turbine

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

**Abstract** - 본 논문에서는 심플로러를 이용하여 실제와 가장 유사한 DFIG (Doubly-Fed Induction Generator)를 모사하였다. 이를 위해서 실제 바람과 유사한 속도 명령을 록업 테이블로 만들어 대체하였고 실제 전기기기의 파라미터 값을 입력하였다. 그동안 풍력 발전에 있어서 발전기는 주로 매트랩 등을 이용해서 DFIG를 구현하였기에 실제와 다소 다르고 모의실험으로 대체하기 매우 어려웠지만 심플로러(Simplorer)를 이용하여 실제와 가장 유사한 모의실험 세트를 구현하였다. 우선 터빈의 역할을 담당하는 전동기는 SVM 벡터제어를 이용하여 속도제어를 실시하였고 발전기는 슬립링을 가지고 있는 권선형 유도전동기를 사용하여 DFIG의 구조를 갖추었다.

동작할 수 없으나 DFIG는 회전자로 동상여자 시킴으로써 발전기로 동작할 수 있다는 큰 장점이 있다. 고정자측 발전전력  $P_1$ 은 고정자와 회전자의 손실을 빼고 외부로부터 전달되는 전력  $P_m$ 과 회전자측 공급전력  $P_2$ 로부터 공급받으므로

$$P_1 = P_m + P_2 - P_{cr} - P_{cs} \quad (1)$$

일정한 전력을 얻을 수 있다.

그림 1. (b)는 회전자의 회전각속도가 계통주파수의 각속도보다 빠른 동기속도 이상 영역에서의 전력흐름을 나타내었다. 이 때 슬립은  $-1 < S < 0$  (super-synchronous speed) 이고 외부로부터 전달되는 전력  $P_m$ 이 고정자측에 전달되는 공급전력  $P_{ag}$ 보다 더 커서 고정자측 발전전력  $P_1$ 에 정격 전력을 초과할 수 있으나 DFIG의 회전자를 역상제어를 함으로써

$$P_1 = P_m - P_2 - P_{cr} - P_{cs} \quad (2)$$

일정한 전력을 얻을 수 있다.

회전자측에서 회전자손실을 제외한  $sP_{ag}$ 와 외부로부터 전달되는 전력  $P_m$ 이 공급되므로 공급전력  $P_{ag}$ 는

$$P_{ag} = P_m + sP_{ag} \quad (3)$$

가 됨을 알 수 있고 이 때 슬립전력  $sP_{ag}$ 는

$$sP_{ag} = P_2 \pm P_{cr} \quad (4)$$

가 되어서 동기속도 이하, 이상 영역 모두에서 일정한 전력  $P_1$ 을 얻을 수 있도록 한다.

1. 서 론

현대 산업사회의 급속한 발달로 인한 화석에너지의 고갈 문제와 각종 환경오염문제를 해결하기 위해서 20세기 중반 이후 대체에너지에 대한 관심이 몰리고 있고 그 결과로 우리나라에서도 풍력발전기에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. [1], [2]

DFIG를 통해 가변 속도제어를 하는 것이 오늘날의 가장 일반적인 형태이고 가변 속도 동작과 벡터전자 소자를 통한 계통과의 연결이 현대 풍력 발전의 주된 추세라고 평가되었다. [7]

현재 전력전자 소자들은 풍력 발전 시스템에 보다 폭 넓은 제어능력을 제공하였고 필수조건인 계통연계 또한 가능하게 하였다. 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]

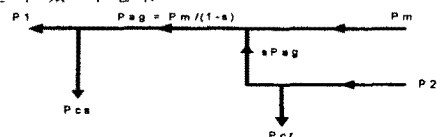
본 논문은 실제 바람의 데이터를 록업 테이블에 삽입하여 Simplorer Simulator의 입력으로 가능하게 하였고 이 시뮬레이터를 이용하여 가장 현실성 있는 모의실험을 수행하는 것에 목적이 있다.

2. 본 론

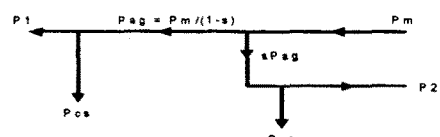
2.1 이중여자 유도발전기의 원리

이중여자 유도발전기는 이름처럼 회전자와 고정자에서 모두 여자 할 수 있으며 발전기의 회전속도에 따라 고정자뿐만 아니라 회전자에서도 출력을 얻을 수 있다. 이중여자 유도발전기는 두 가지 발전모드가 있는데, 동기속도 이하 영역에서의 발전과 동기속도 이상 영역에서의 발전이다.

그림 1. (a)는 회전자의 회전각속도가 계통주파수의 각속도보다 느린 동기속도 이하 영역에서의 전력흐름을 나타내었다. 이 때 슬립이  $0 < S < 1$  (sub-synchronous speed) 이고 외부로부터 전달되는 전력  $P_m$ 보다 고정자측에 전달되는 공급전력  $P_{ag}$ 가 더 커서 일반 유도발전기는 동기속도 이하에서 발전기로



(a) 동기속도 이하



(b) 동기속도 이상

그림 1. DFIG의 전력흐름도  
 Fig. 1. Power flow of a DFIG

## 2.2 이중여자 유도발전기의 구조

풍력에너지가 풍력발전기의 날개에 전달되는 기계적 출력은 선형적인 관계가 아니다. 각 풍속마다 그 출력이 최대가 되는 속도가 있다. 보통의 일정속 풍력발전기의 경우 일정한 출력을 얻기 위해서 적정 운전 속도 이외의 속도는 모두 슬립으로 수용한다. 하지만 가변속 풍력발전기인 DFIG는 각 풍속의 최대 출력 속도를 따라가며 발전을 하기 때문에 일정속 풍력발전기에 비해 평균 20% 높은 출력 이득을 보인다.

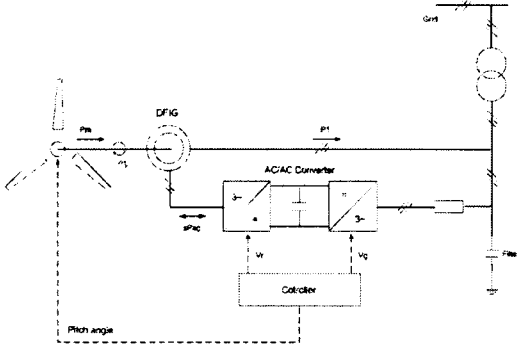


그림 2. DFIG 풍력발전기의 구조  
Fig. 2. Configuration of a DFIG wind power generator

그림 2는 DFIG 풍력발전기의 구조를 나타내고 있다. 풍력에너지가 풍력발전기의 날개에 전달되어 기계에너지로 변환되고 DFIG의 회전자를 회전시킨다. 이때 회전자를 여자시킴에 있어서 출력을 회전자 쪽으로 보내는 경우와 회전자에서 받아내는 두 가지 경우가 있다. 이는 앞 절에서 다른 슬립전력  $sP_{ag}$ 를 설명하는 것이다.

위 두 가지 경우 중 전자는 동기속도 이하 영역에서의 운전 상태로 회전자 측 출력은 인입방향으로 계통 측 컨버터는 정류기로, 회전자 측 컨버터는 인버터로 동작한다. 후자는 동기속도 이상 영역에서의 운전 상태로 회전자 측 출력은 인출방향으로 계통 측 컨버터는 인버터로, 회전자 측 컨버터는 정류기로 동작한다. 이상의 컨버터는 양방향 전류주류가 가능한 Power IGBT등이 사용될 수 있다. 저주파수의 회전자 전류에 포함된 고조파 성분이 고정자 전류에 영향을 주기 때문에 동기속도 부근에서 인버터는 정현파에 가까운 저주파수의 회전자 전류를 공급해야 한다. 최적의 고정자 역률을 얻기 위해서 제어기는 여자주파수를 제어하여 일정출력과 속도를 유지하며 여자전압을 제어하여 회전자 여자전류를 정격 값이 되도록 한다.

## 2.3 Simplorer를 이용한 모의실험

그림 3은 실제의 풍력 터빈 블레이드의 역할을 하는 터빈 시뮬레이터를 묘사한 것인데 농형 유도전동기의 공간 벡터 전압 변조 방식(SVM)을 이용하여 구현하였다. 속도 명령의 역할을 하는 풍속 데이터는 Lookup table을 이용하여 인가하였고 PI 제어기를 통하여 농형 유도 전동기의 회전자 회전 속도를 제어하였다.

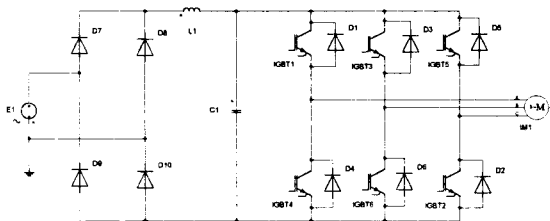


그림 3. 터빈 시뮬레이터의 구성도  
Fig. 3. Configuration of a turbine simulator

그림 4는 SVM 기법을 이용한 속도제어 블록도인데 간접벡터제어를 이용하여 고정자의 전류로부터 회전자의 자속 정보를 얻어내어 좌표변환에 중요한 역할을 하는 자속각  $\theta_e$ 를 계산하였다. 그리고 비간접 전류제어기를 사용하여 고정자의 q상 전류와 d상 전류의 간섭현상을 제거하였다. 실시간으로 회전자의 회전속도와 회전자의 자속을 피드백 받아서 그 오차를 PI 제어기로 제어하였고 SVM 알고리즘을 통해 스위칭 시간인  $T_0, T_1, T_2$ 가 결정된다.

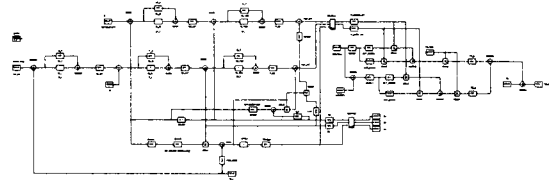


그림 4. SVM 기법을 이용한 속도제어 블록도  
Fig. 4. Block diagram of speed control using SVM

그림 5는 섹터 판별을 위한 State diagram을 나타낸 것이다. SVM 기법에 의해 정해진 전압 벡터가 인가되는 시간을 결정하기 위해서 섹터의 정보가 필요한데 이 섹터를 판별하기 위하여 State diagram을 이용하는 프로그램을 구현하였다. 스위칭 주기와 같은 주기로 새로운 섹터가 순차적으로 결정되고 그 섹터는 1~6 사이의 값으로 정해진다.

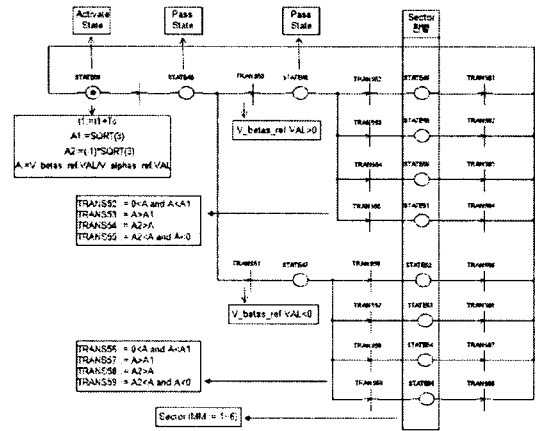


그림 5. State diagram을 이용한 섹터 판별  
Fig. 5. Sector selection using state diagram

그림 6은 State diagram을 이용한 스위칭 테이블로써 위에서 설명한 바와 같이 결정된 스위칭 시간  $T_0, T_1, T_2$ 만큼을 스위칭 주기마다 각 섹터별로 인버터의 게이트에 인가하는 프로그램이다.

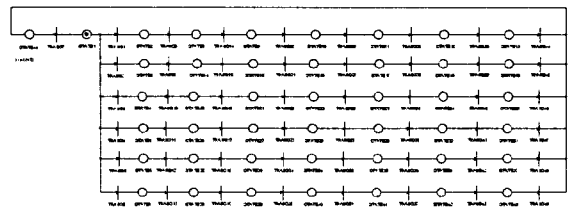


그림 6. State diagram을 이용한 스위칭 테이블  
Fig. 6. Switching table using state diagram

그림 7은 터빈의 회전속도를 발전기의 축에 전달할 때 그 속도를 증폭하기 위한 기어박스를 나타낸 것이다. 보통 풍속에 의한 기계적 회전속도는 발전기의 전기적 회전속도에 비해 현저하게 느리기 때문에 기어 비를 이용해서 증속한 뒤에 발전기의 축에 전달되도록 구현한 것이다. 기어박스는 시뮬레이터를 구성하기 위해서만 필요한 것이 아니라 실제 풍력 발전 시스템에서도 중요한 역할을 한다. [4], [7], [8]

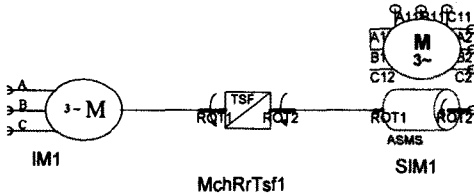


그림 7. 증속을 위한 기어박스  
Fig. 7. Gear box for speed amplifier

그림 8은 항 후 DFIG로 설계할 슬립링을 가지고 있는 권선형 유도전동기를 구현한 것인데 계통을 대신하여 삼상 전원을 고정자 축에 인가하여 여자시켰고 고정자 축 외부저항 R4에 의한 전압강하를 비교하여 발전전압(VM2)과 전원전압(VM3)을 측정하였다. 이 때 두 전위차에 의해 흐르는 전류(AM2)를 측정하여 전력조류의 방향과 가능성을 확인하였다. 회전자는 전류를 측정하기 위해서 저항을 연결하여 외부로 접지시켰다.

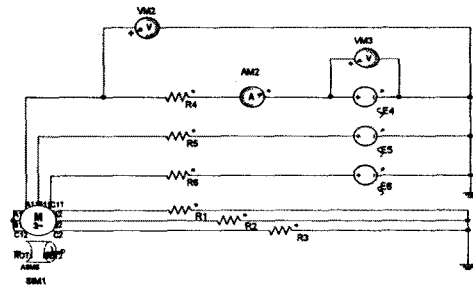


그림 8. 풍력 발전기의 구성도  
Fig. 8. Configuration of a DFIG wind power generator

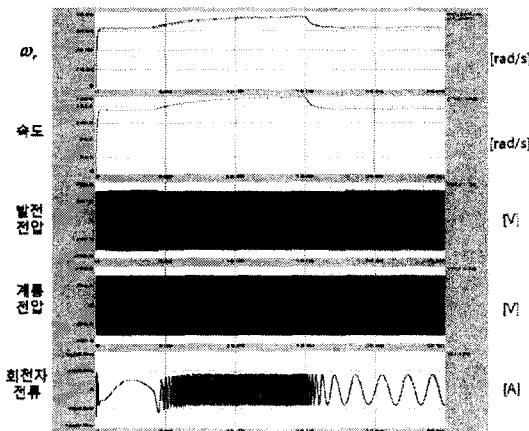


그림 9. 시뮬레이션 결과 파형  
Fig. 9. Results of simulation

그림 9의 첫 번째 그림은 터빈의 회전속도에 대한 지령 값과 실제 회전속도를 나타낸 것이고 두 번째 그림은 발전기의

회전속도를 나타낸 것인데 터빈의 회전속도와 발전기의 회전속도를 비교하면 서로의 크기가 다른 것을 알 수 있는데 이것은 기어박스를 이용하여 증속을 한 것이기 때문에 기어 비만큼 차이가 있다는 것을 다시 한 번 밝힌다. 세 번째와 네 번째 그림은 각각 발전전압(VM2)과 전원전압(VM3)을 나타낸 것인데 실효값으로 발전전압이 전원전압보다 큰 것을 확인하여 발전 중임을 알 수 있다. 마지막 그림은 회전자 축 외부저항 R1에 흐르는 전류를 나타낸 것인데 현재는 DFIG의 가장 큰 특징인 회전자를 여자시키는 것을 생각하여 DFIG로써 예상되는 현상은 만족하지 못하지만 회전자에 흐르는 전류를 제어하여 이중여자를 실현하기에 충분한 가능성을 확인하였다.

### 3. 결 론

본 논문에서는 모터의 시뮬레이션 프로그램 중 정교한 Simpler Simulator를 이용하여 DFIG를 구현하였다. 현재 단계에서는 풍속을 Lookup table로 모사하였고 그 풍속 데이터는 터빈을 모사한 전동기의 속도명령으로 인가되고 전동기는 SVM 벡터제어를 통하여 운전된다. 발전전압(VM2)과 전원전압(VM3)을 비교함으로써 DFIG의 발전 가능성을 확인하였고 회전자 축 외부저항 R1에 흐르는 전류(R1.I)를 확인함으로써 DFIG로써 회전자의 여자전압과 여자주파수를 조절할 수 있음을 확인하였다. 이로써 SVM으로 운전되는 터빈과 슬립링을 가지고 있는 권선형 유도전동기의 DFIG 모사를 완성하였다.

### 감사의 글

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)	1127 rpm
극수(P)	6 극
고정자 저항(Rs)	4.47 Ω
회전자 저항(Rr)	1.6 Ω
고정자 인덕턴스(Ls)	0.762 H
회전자 인덕턴스(Lr)	0.8 H
상호 인덕턴스(Lm)	0.8 H
관성(Inertia)	0.038 kgm <sup>2</sup>

### [참 고 문 헌]

- [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, "회전자축 PWM 인버터-컨버터를 사용한 이중여자 유도형 풍력 발전기의 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".