논 문
58-6-11

풍력발전용 시뮬레이터 개발

Development of Simulator for Wind Power Generation

서 영 거* · 이 지 은* · 고 종 선†
(Young-Ger Seo · Ji-Eun Lee · Jong-Sun Ko)

Abstract - The main goal of this paper is to simulate a Doubly-Fed Induction Generator (DFIG), which is similar to a real system. Wind velocity data is applied to a 2D Lookup table as a speed reference for a turbine model. A real electric machine's parameters are put in the simulator to get some results of the real system. The Matlab have been generally used to simulate DFIG, but it has some differences from the real system and is difficult to implement. A Simplorer simulator, however, simplifies DFIG simulation. The turbine is directly connected with the DFIG to be close to the real system. The machine's rotor is excited and controlled by the discrete carrier modulated matrix converter. It is possible to retrieve important information, like a generated power and wind quality etc., from the simulator without a huge wind turbine.

Key Words : Wind power, DFIG, matrix converter, Simplorer simulator, Turbine model.

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 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 제어기를 갖춘 Simplorer 시뮬레이터를 이용하여 가장 현실성 있는 모의실험을 수행하고 실험결과와의 비교 검증하는 것에 목적이 있다.

2. 본 론

2.1 DFIG의 구조와 원리

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 그림 1에 보이는 바와 같이 최대 출력점 추적(MPPT - Maximum Power Point Tracking)을 통해서 고정속 발전기에 비해 20% 높은 출력을 발생한다.[7]

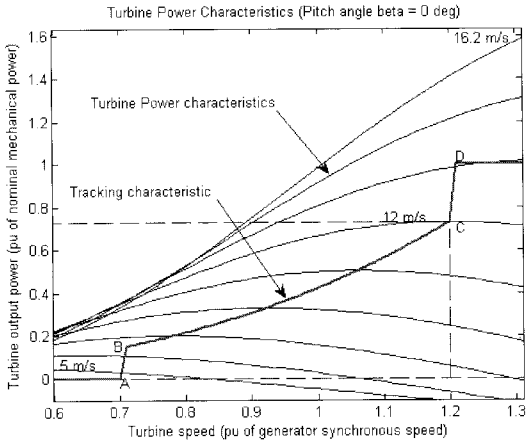


그림 1 터빈 전력 특성과 추적 특성
Fig. 1 Turbine power characteristics and tracking characteristic

그림 2는 이중여자 유도발전기의 구조를 나타내고 있다. 이러한 구조에서 컨버터에 의해서 제어되는 이중여자 유도형 풍력발전 시스템의 유효전력이 그림 3과 같다. 블레이드는 항상 발전기의 공극에 에너지를 공급하고 고정자는 공극 에너지를 전기적 에너지로 변환하여 계통에 공급한다. 회전자의 유효전력은 회전속도에 따라서 다르다.

† 교신저자, 정회원 : 단국대 공과대학 전기공학과 교수
E-mail : jsko@dku.edu
* 준 회 원 : 단국대 공과대학 전기공학과 석사과정
접수일자 : 2008년 10월 30일
최종완료 : 2009년 4월 28일

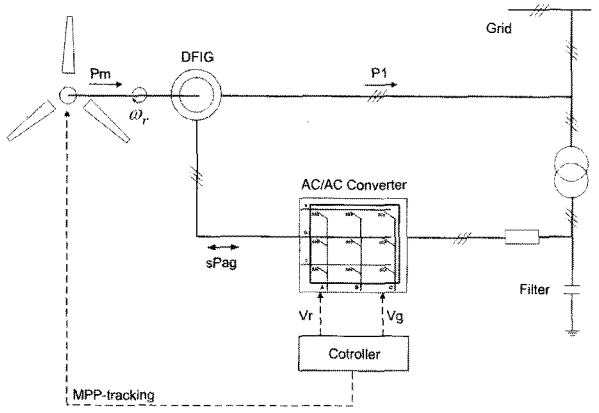
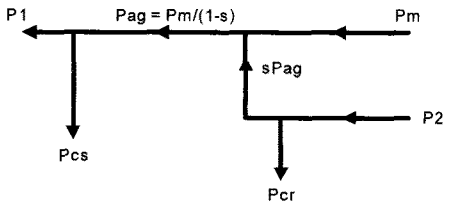
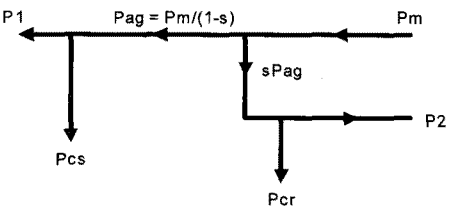


그림 2 이중여자 유도발전기의 구조
Fig. 2 Configuration of a DFIG wind power generator

그림 3(a)에서 발전기의 슬립이 0보다 큰 경우, 즉 회전속도가 동기속도보다 느릴 때 유효전력의 흐름을 보여주고 있다. 회전자측 컨버터는 회전자를 통해서 공극에 에너지를 공급하여 고정자 유효전력은 블레이드의 기계적 출력과 회전자 유효전력을 더한 값이 된다. 회전자측 컨버터에서 공급하는 유효전력의 크기는 발전기 슬립과 고정자 유효전력에 비례한다. 그림 3(b)에서 발전기의 슬립이 0보다 작은 경우, 즉 회전속도가 동기속도보다 빠른 경우를 보여주고 있다. 이 경우에는 블레이드는 공극에 에너지를 공급하고 고정자와 회전자에서 유효전력을 추출한다. 회전자 유효전력의 크기는 슬립과 고정자 유효전력에 비례한다. 여기서 P1은 고정자 유효전력, P2은 회전자 유효전력, Pm은 블레이드의 기계적 출력, Pag는 고정자측에 전달되는 공극전력, sPag는 슬립전력, Pcs는 고정자 동손, Pcr은 회전자 동손을 각각 나타낸다.



(a) Subsynchronous operation



(b) Supersynchronous operation

그림 3 DFIG의 전력 흐름
Fig. 3 Power flow of a DFIG

동기속도 이하일 때는 기계적인 에너지와 회전자로 유입되는 에너지가 모두 고정자로 흐르고, 동기속도 이상일 때는 충분한 기계적 에너지 때문에 고정자와 회전자에서 모두 에너지를 얻을 수 있다. 그림 4에서 보이는 바와 같이 동기속도 0을 기준으로 하여 동기속도 이상일 때와 동기속도 이하일 때 모두 공급되는 에너지인 P1이 일정하게 유지된다.

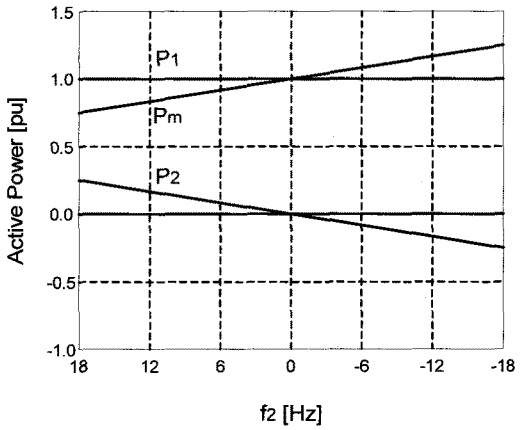


그림 4 이상적인 DFIG의 전력 특성
Fig. 4 Power characteristics of ideal DFIG

이러한 양방향 전력 조류 때문에 매트릭스 컨버터를 선정한 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 제어기가 필요하다.[3],[4] 이러한 조건들을 부합하는데 매트릭스 컨버터가 전혀 부족함이 없다.

2.2 매트릭스 컨버터

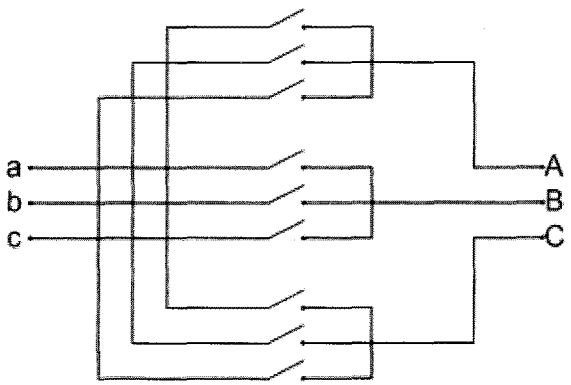


그림 5 매트릭스 컨버터의 구조
Fig. 5 Construction of Matrix Converter

전류의 역률개선을 통해 향상된 전력계통품질과 고효율, 저소음 등의 수많은 이점을 가진 매트릭스 컨버터는 직류링크회로가 없어서 상용 3상 AC 전원으로부터 직류 변환 없이 가변전압, 가변주파수의 교류 출력을 얻는 회로 방식이다. 그림 5는 3상 매트릭스 컨버터의 기본구성과 개념을 나

타낸 것이다. 매트릭스 컨버터에서 각 상의 출력은 세 개의 입력중 하나에 연결되어야 하므로, 출력과 입력을 상호 연결하는 스위치로 양방향 스위치를 사용해야한다.

매트릭스 컨버터는 부하전류에 대해서 독자적인 환류경로가 존재하지 않고 출력측은 직류링크회로 없이 입력측과 직접 연결되어 있어 신뢰성 있는 스위치 전류(轉流)를 구현하기 위해서는 기존 전력변환시스템에 비해 복잡한 제어기법이 요구되고 클램프회로나 스너버회로와 같은 보호회로가 반드시 필요하다.

3상 매트릭스 컨버터에서 전류(轉流)에 대해 기본적으로 고려해야 할 두가지중 첫째는 한 개의 그룹에서 두 개 이상의 양방향 스위치를 동시에 턴온 시키지 말 것, 둘째는 한 개의 그룹에서 동시에 세 개의 양방향스위치를 턴오프하지 말 것이다. 이는 매트릭스 컨버터에 사용되는 양방향 스위치가 이상적인 소자가 아니기 때문이다.

매트릭스 컨버터의 입력 전원은 3개의 선간 전압으로 구성되어 있다. 이 3개의 전압 중 가장 큰 하나를 이용하여, 매트릭스 컨버터의 입력으로 사용할 경우, 스위칭 주기 안에서 3상 중 2개의 상만이 이용되고, 나머지 하나의 상은 전류가 흐르지 않게 되어 입력 전류에 왜곡이 생기게 된다.

따라서 3개의 선간 전압 중 크기가 큰 2개의 선간 전압을 스위칭 주기 안에서 사용한다. 그러면 스위칭 주기 안에서 3개의 상을 전부 이용하게 되어, 3개의 상에 모두 전류가 흐르게 된다.

매트릭스 컨버터의 출력 전압 합성을 수행하는데 있어서, 옵셋 전압을 이용한 전압 변조 방법[9]을 적용한다. 즉, 자유도인 옵셋 전압을 이용하여, 상 전압 지령에 옵셋 전압을 더하여, 폴 전압 지령을 만드는 과정을 매트릭스 컨버터에 적용하여 출력 전압을 합성한다. 이 때, 각각의 변수는 다음과 같이 표기한다.

- E_A, E_B, E_C:입력 상전압
  $MAX = \max(E_A, E_B, E_C)$
  $MID = \mathrm{mid}(E_A, E_B, E_C)$
  $MIN = \min(E_A, E_B, E_C)$
- V_{as}, V_{bs}, V_{cs} : 출력 상전압 지령
  $\max = \max(V_{as}, V_{bs}, V_{cs})$
  $\min = \min(V_{as}, V_{bs}, V_{cs})$
- V_{sn1} : T_1 기간의 옵셋 전압
  V_{sn2} : T_2 기간의 옵셋 전압
- $V_{an1} = V_{as} + V_{sn1}$: T_1 기간의 a상 폴전압 지령
  $V_{an2} = V_{as} + V_{sn2}$: T_2 기간의 a상 폴전압 지령
  $V_{bn1} = V_{bs} + V_{bn1}$: T_1 기간의 b상 폴전압 지령
  $V_{bn2} = V_{bs} + V_{bn2}$: T_2 기간의 b상 폴전압 지령
  $V_{cn1} = V_{cs} + V_{cn1}$: T_1 기간의 c상 폴전압 지령
  $V_{cn2} = V_{cs} + V_{cn2}$: T_2 기간의 c상 폴전압 지령

스위칭 주기를 T_1, T_2로 나누어, T_1 기간에는 직류 링크 전압으로 입력 선간 전압이 가장 큰 MAX와 MIN사이의 전압을 사용하고, T_2 기간에는 전압 이용률을 높이기 위해서 그 다음으로 입력 선간 전압이 큰 것을 이용한다. 즉, 경우에 따라서, MAX와 MID 사이의 전압, 또는 MID와 MIN 사이의 전압 중 그 크기가 큰 전압을 이용하는데 그림 6은 입력 선간 전압을 MAX와 MID 사이의 전압이 MID와 MIN 사이의 전압보다 큰 경우를 나타내고 있다.

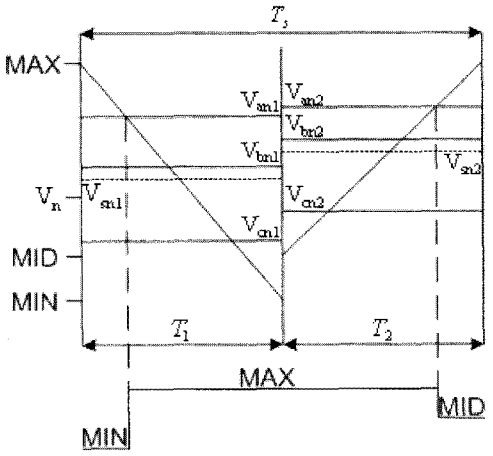


그림 6 매트릭스 컨버터의 전압변조
Fig. 6 Voltage Modulation of Matrix Converter

폴 전압 지령을 만들기 위한 옵셋 전압(V_{sn})은 "옵셋 전압을 이용한 전압 변조 방법"에서 만든 것과 동일한 방식으로 만들 수 있다. 전압원 컨버터에서 옵셋 전압(V_{sn})은 폴 전압 지령들을 직류 링크 전압의 한 가운데 두어서 유효 벡터를 스위칭 주기의 한 가운데에 위치시키고 영 벡터는 스위칭 주기의 양 끝에 같은 시간 동안을 배치시키도록 설정된다. 이와 같은 방식으로 T_1 구간과 T_2 구간에서 유효 벡터와 영 벡터(zero vector)가 배치되도록 옵셋 전압을 구할 수 있다. T_1 구간에서의 옵셋 전압은 식 (1)과 같다.

$$V_{sn1} = \frac{(MAX + MIN) - (\max + \min)}{2} \tag{1}$$

T_2 구간의 옵셋 전압은 다음과 같이 구할 수 있다. T_2 구간에 MAX와 MID 사이의 전압을 이용할 경우, 식 (2)를 이용한다. T_2 구간에 MID와 MIN 사이의 전압을 이용할 경우, 식 (3)을 이용한다.

$$V_{sn2} = \frac{(MAX + MID) - (\max + \min)}{2} \tag{2}$$

$$V_{sn2} = \frac{(MID + MIN) - (\max + \min)}{2} \tag{3}$$

이러한 옵셋 전압(V_{sn1}, V_{sn2})을 이용하여 연산한 폴 전압지령(V_{an1}, V_{an2})을 캐리어와 비교하여, a상의 스위칭 상태를 표현하면, 그림 6의 아래 부분과 같이 나타낼 수

있다. b상, c상에 대해서도 같은 방식으로 스위칭 상태를 나타낼 수 있다.

스위칭 시간인 T_1 기간과 T_2 구간은 입력 전압의 위상각(β_i)에 따라서 결정된다. 단, T_1 구간과 T_2 구간의 합은 항상 스위칭 주기 T_s가 된다. T_1과 T_2는 식 (4), (5)와 같다.

$$T_1 = \frac{2}{\sqrt{3}} sin(\beta_i^{'} + \frac{2\pi}{3}) cos(\beta_i^{'}) T_s \quad (4)$$

$$T_2 = \frac{2}{\sqrt{3}} sin(\beta_i^{'}) cos(\beta_i^{'} + \frac{2\pi}{3}) T_s \quad (5)$$

β_i와 $\beta_i^{'}$의 관계는 식 (6)으로 표시되며 그림 7과 같다.

$$\beta_i^{'} = \frac{1}{6} cos^{-1}(cos(6\beta_i)) \quad (6)$$

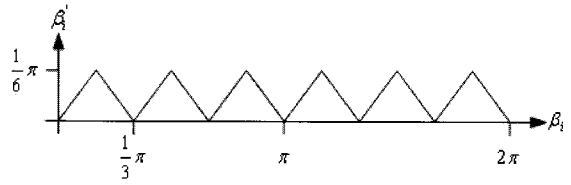


그림 7 β_i와 $\beta_i^{'}$의 관계

Fig. 7 Relationship between β_i and $\beta_i^{'}$

2.3 Simplorer를 이용한 시뮬레이터 구현

다음 표 1은 시뮬레이션과 실험에 사용된 파라메타를 나타낸다.

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^2

그림 8은 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.

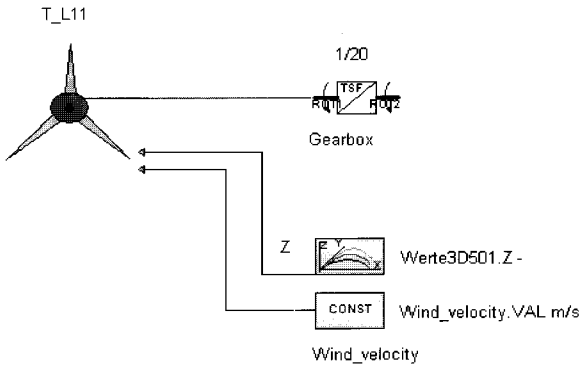


그림 8 심플로러 시뮬레이터의 터빈 모델

Fig. 8 Turbine model of the Simplorer simulator

그림 9는 블레이드의 회전속도를 발전기의 회전속도로 증폭시켜주는 증속기 역할을 하는 기어박스를 나타내고 있다. 이 기어박스는 터빈의 기계적 회전속도가 발전기의 전기적 회전속도보다 매우 느리기 때문에 필요한 것이다.

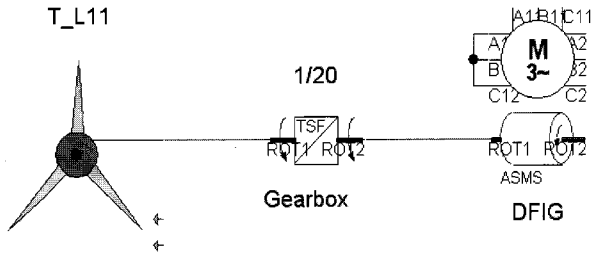


그림 9 증속기 역할을 하는 기어박스

Fig. 9 Gearbox for a speed amplifier

그림 10은 제어기의 블록선도를 나타내고 있다. 회전하고 있는 회전자의 자속각은 간접 벡터 제어(indirect vector control)로써 얻는다. 이 제어기는 q상과 d상으로 독립 제어하여 회전자에 가변 전압을 제공함으로 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 11은 터빈과 DFIG로 동작하는 슬립링 유도발전기를 나타내고 있다. 3상 전압원이 계통을 대신하고 있으며 그 전압원이 고정자를 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 크기로 설계할 수 있다. 회전자 전압과 계통 전압의 크기 스케일을 맞추기 위해 3상 변압기가 필요하다.

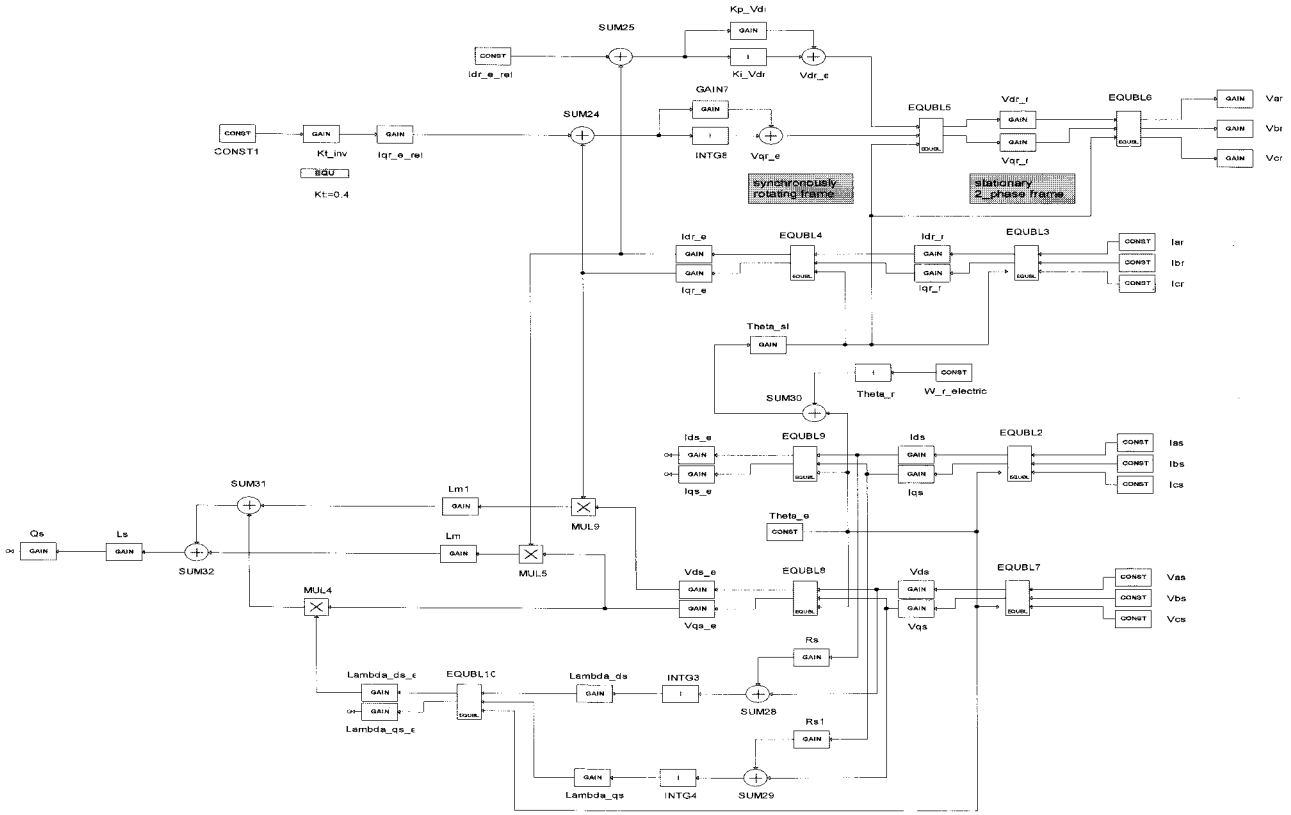


그림 10 제어기의 블록선도

Fig. 10 Block diagram of the controller

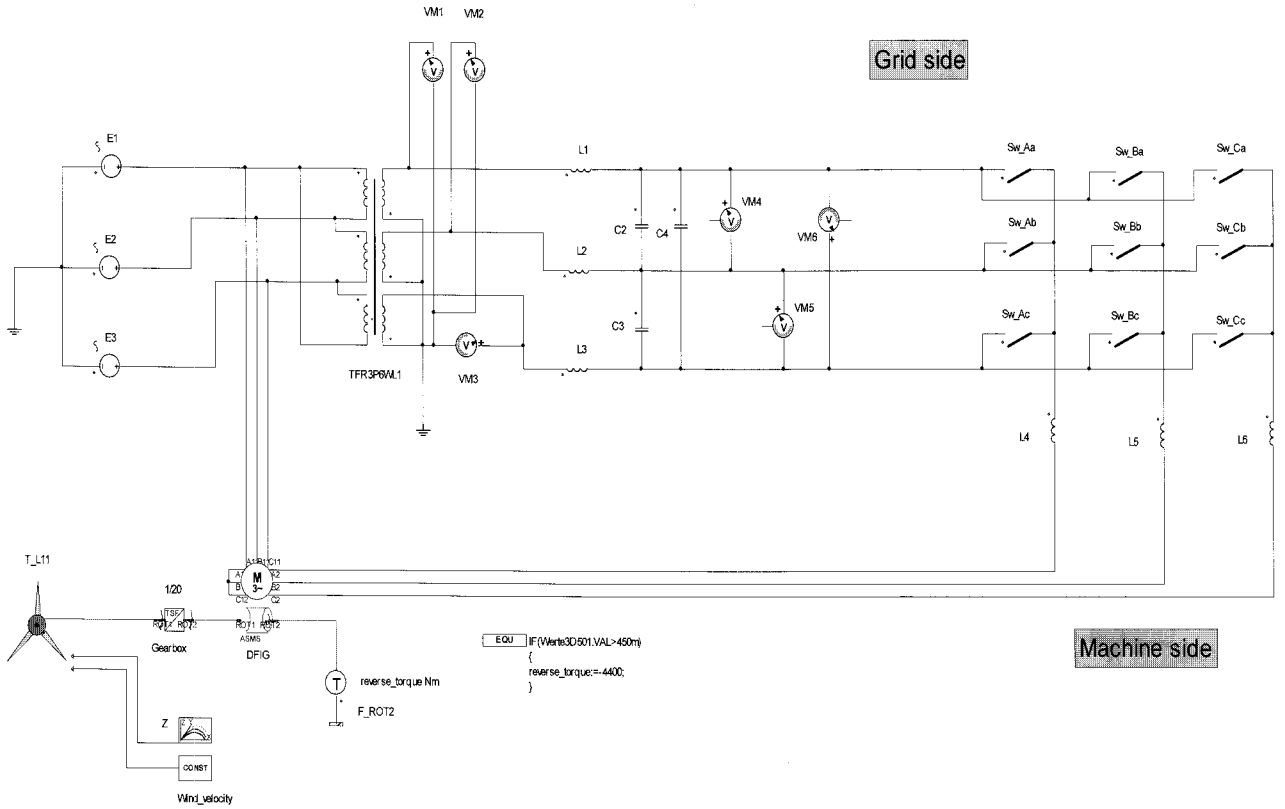


그림 11 DFIG 시뮬레이터의 구조

Fig. 11 Configuration of a DIFG simulator

그림 12는 이중여자 유도발전기의 실험을 위한 하드웨어를 구성한 것으로 왼쪽에는 전동기와 발전기 세트이고 오른쪽에는 매트릭스 컨버터를 포함하고 있는 DFIG 제어기이다.

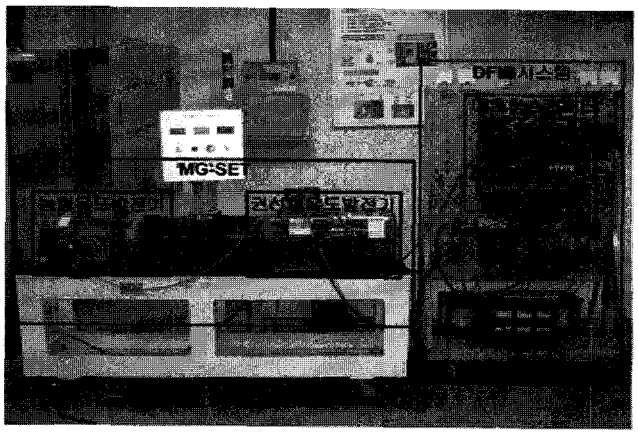


그림 12 DFIG의 하드웨어 실험 세트
Fig. 12 Experimental hardware set of DFIG

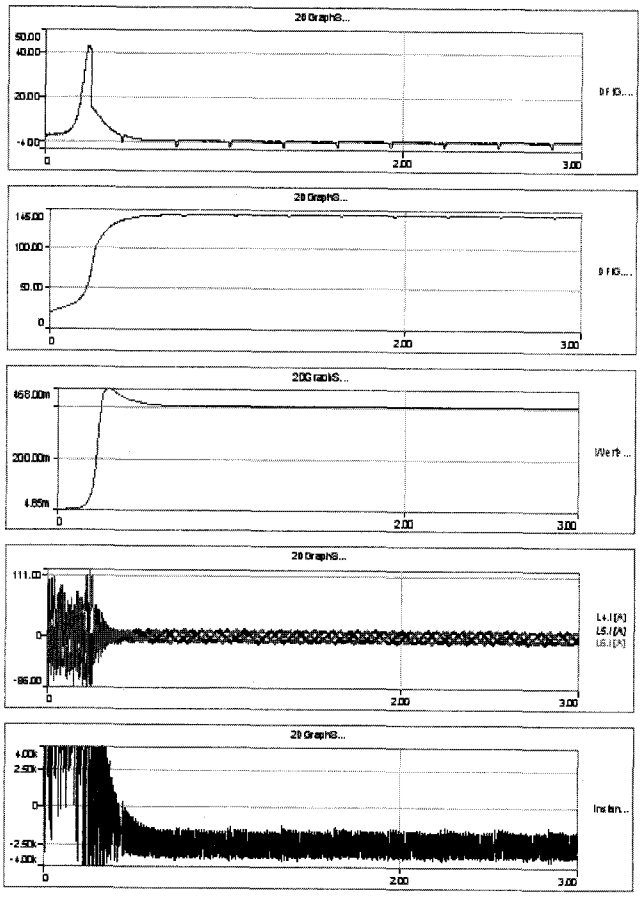


그림 13 시뮬레이션의 결과파형($T, \omega, C_{p-opt}, i_r, P_{ins}$)
Fig. 13 Results of the simulation($T, \omega, C_{p-opt}, i_r, P_{ins}$)

그림 13과 14은 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 회전자 전력이 음수로 바뀐다는 것이다. 따라서 그림 13의 마지막 파형에서 확인할 수 있듯이 발전중이며 그림 14의 두 번째 파형을 통해 알 수 있듯이 계통으로 전력을 공급하고 있다. 그림 13의 세 번째 파형은 주속비에 대한 함수인 출력계수의 값으로 최대값을 검출한 후 최대 출력점 추적을 통하여 최적의 값으로 유지시킨다. 마지막으로 그림 13의 네 번째 파형과 그림 14의 세 번째 파형이 매트릭스 컨버터의 출력 전류를 측정한 것으로 정상상태에서 원하는 3상 대칭 전류를 확인할 수 있었다.

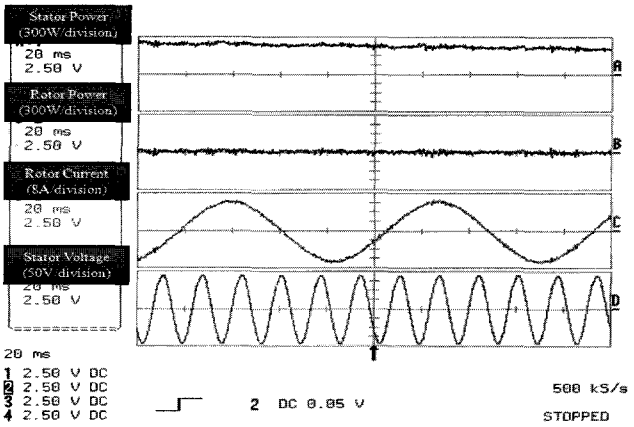


그림 14 실험 결과파형
Fig. 14 Results of the experiment

4. 결 론

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 이로써 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.

감사의 글

이 연구는 2008학년도 단국대학교 대학연구비의 지원으로 연구되었음.

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, "회전자측 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 절환을 고려한 이중여자 유도형 풍력발전기의 시뮬레이터", 전력전자학회 논문지, Vol. 11, No. 4, pp.349~360, 2006, October

[5] 정병창, 정세종, 송승호, "가변관성 모의 기능을 가진 풍력 터빈 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"

[9] Dae-Woong Chung, Joohn-Sheok Kim, Seung-Ki Sul, "Unified voltage modulation technique for real-time three-phase power conversion", IEEE Trans. Industry Applications, Vol. 34, pp. 374 - 380, March-April 1998.

저 자 소 개

서 영 거 (徐 永 巨)

1982년 6월 20일생. 2007년 단국대학교 전기전자컴퓨터공학부 졸업. 2009년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사).

이 지 은 (李 智 恩)

1982년 4월 8일생. 2008년 단국대학교 전기전자컴퓨터공학부 졸업. 2008년~현재 동 대학원 전자전기공학과 석사과정.

고 종 선 (高 宗 宣)

1960년 3월 20일생. 1984년 서울대 전기공학과 졸업. 1989년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(석사). 1994년 동 대학원 전기 및 전자공학과 졸업(공박). 1983년~1995년 삼성전자 생산기술센터 선임연구원. 1995년~1996년 삼성그룹 삼성경영기술대 사내교수(부장). 1999년 2월~2000년 1월 미국 Tennessee 주립대(UT) Post-Doc. 1996년~2003년 7월 원광대 전기전자 및 정보공학부 조교수. 2003년 8월~현재 단국대 전자전기공학과 교수. 당 학회 편집위원. 전자 공학회 전력전자 연구위원장. 전력전자학회 편집이사.