

풍력발전을 위한 DFIG의 Simplorer 시뮬레이터 연구

서영거, 고종선
 단국대학교 전기전자컴퓨터공학부

A Study on a Simplorer Simulator of DFIG for Wind Power Generation

Young-Ger Seo, Jong-Sun Ko
 Dankook University

ABSTRACT

본 논문에서는 심플로러를 이용하여 실제와 가장 유사한 DFIG (Doubly-Fed Induction Generator)를 모사하였다. 이를 위해서 실제 바람과 유사한 속도 명령을 함수로 만들어 대체하였고 실제 전기기기의 파라미터 값을 입력하였다. 그동안 풍력 발전에 있어서 발전기는 주로 Matlab 등을 이용해서 DFIG를 구현하였기에 실제와 다소 다르고 모의실험으로 대체하기 매우 어려웠지만 Simplorer를 이용하여 실제로 발전기를 설치하지 않고 풍력 데이터로부터 풍력발전의 전반적인 경제성을 파악할 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]

풍력발전은 바람의 조건에 따라 효율적인 운전을 위해 발전기의 선정이 중요하기 때문에 넓은 풍속 범위에서 발전이 가능한 가변속 발전기의 하나인 권선형 유도발전기를 사용한 DFIG (Doubly-Fed Induction Generator) 시스템의 연구가 활발하다.

풍력발전기를 설치하기 위해서 바람의 품질을 검증받아야 하고 이를 위해서 현재까지는 시뮬레이션보다는 원하는 곳에 하나의 발전기를 설치하고 그 결과로 풍력발전의 경제성을 파악할 수 있었다. 이보다 시뮬레이션에 가깝게 접근한 것은 Matlab을 이용한 것인데 이는 실제와 근사한 실험을 할 수 없다는 것이 현실이었다. 그래서 실제와 가장 근사한 모의실험과 이를 통한 최적의 경제성 파악에 주 관심을 둔 것이다.

본 논문은 실제 바람의 데이터를 이용하여 신속, 정확한 결과를 얻어 Simplorer Simulator를 통하여 가장 현실성 있는 모의실험을 수행하고 이를 바탕으로 전반적인 경제성을 파악하는데 목적이 있다.

2. 이중여자 유도발전기

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, 첫 번째는 동기속도 이하 영역에서의 발전이고 두 번째는 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 공극전력 P_{ag} 가 더 커서 일반 유도발전기는 동기속도 이하에서 발전기로 동작할 수 없으나 DFIG는 회전자를 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

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

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 공극전력 P_{ag} 보다 더 커서 고정자측 발전전력 P_1 에 정격 전력을 초과 할 수 있으나 DFIG의 회전자를 역상제어를 함으로써

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

일정한 전력을 얻을 수 있다.

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

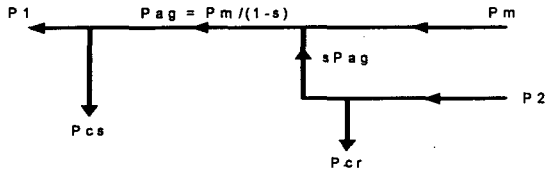
$$P_{ag} = P_m + sP_{ag} \quad (3)$$

가 됨을 알 수 있고 이 때 슬립전력 sP_{ag} 는

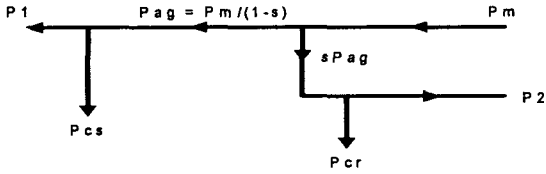
$$sP_{ag} = P_2 \pm P_\sigma \quad (4)$$

가 되어서 동기속도 이하, 이상 영역 모두에서 일정한 전력 P_1

을 얻을 수 있도록 한다.



(a) 동기속도 이하



(b) 동기속도 이상

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

2.2 풍력발전기의 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.

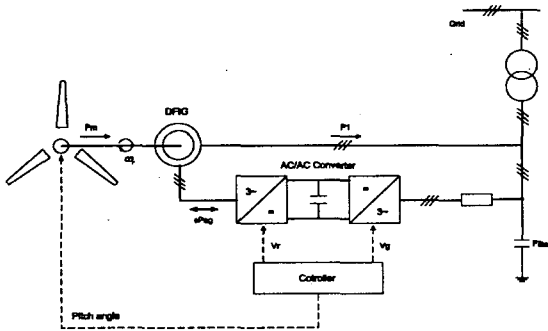


그림 2 DFIG 풍력발전기의 구조
Fig. 2 Configuration of a DFIG wind power generator

그림 2는 DFIG 풍력발전기의 구조를 나타내고 있다. 풍력에너지가 풍력발전기의 날개로 전달되어 기계에너지로 변환되고 DFIG의 회전자를 회전시킨다. 이 때 회전자를 여자시킴에 있어서 출력을 회전자 쪽으로 보내는 경우와 회전자에서 받아내는 두 가지 경우가 있다. 이는 앞 절에서 다룬 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 전류조류가 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.

3. Simplorer를 이용한 DFIG 모의실험

그림 3은 실제의 풍력 터빈 블레이드의 역할을 하는 터빈 시뮬레이터를 농형 유도전동기의 직접토크제어방식(DTC)을 이용하여 구현하였다. 실제 풍속의 역할을 하는 속도 명령을 함수로 대신하고 PI 제어를 통하여 농형 유도 전동기의 회전자 회전 속도를 제어하였다.

그림 4는 DFIG를 구현한 것인데 계통을 대신하여 삼상 전원을 고정자 측에 인가하여 여자시켰고 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.

블레이드 측 농형 유도전동기와 발전기 측 권선형 유도전동기의 기계적 연결을 대신하여 수학적 연결이 필요한데 그림 4의 W1이 그 수학적 연결을 가능하게 한다. W1은 농형 유도전동기의 각속도를 입력으로 하여 DFIG의 회전자의 각속도를 출력으로 하는 Angular Velocity Source이다.

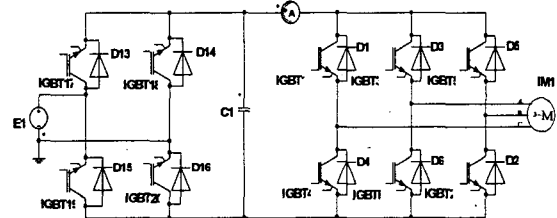


그림 3 터빈 시뮬레이터 구성도
Fig. 3 Configuration of a turbine simulator

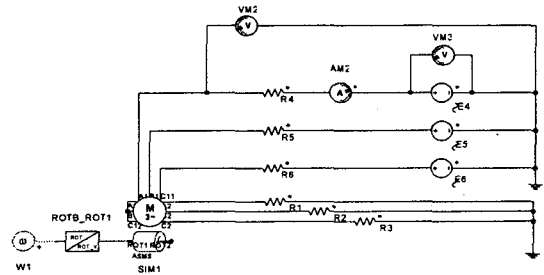


그림 4 DFIG 풍력발전기의 구성도
Fig. 4 Configuration of a DFIG wind power generator

그림 5는 함수로 구현한 속도 명령과 그 명령을 따른 농형 유도전동기의 각속도, DFIG의 각속도를 나타내는 결과이다. 최초 1207.986 [rpm]의 명령 값은 126.5 [rad/s]인데 DFIG의 동작

점(operating point)을 확인하여 정해진 값이다. 표 1은 DFIG의 파라미터 값인데 L_s , L_r 과 상호 인덕턴스 L_m 이 발전기의 출력에 가장 큰 영향을 미친다. 앞의 2.2절에서 다른 바와 같이 풍력발전기는 각 풍속마다 출력이 최대가 되는 지점이 있는데 발전기의 파라미터 값을 만족하면서 동시에 최대 출력이 나오는 지점이 바로 126.5 [rad/s]이다. 이는 표 2에서 확인 할 수 있듯이 같은 조건에서 최대 출력을 얻을 수 있는 속도를 찾기 위해서 각속도를 0.5 [rad/s] 단위로 변화시키면서 확인한 결과이다.

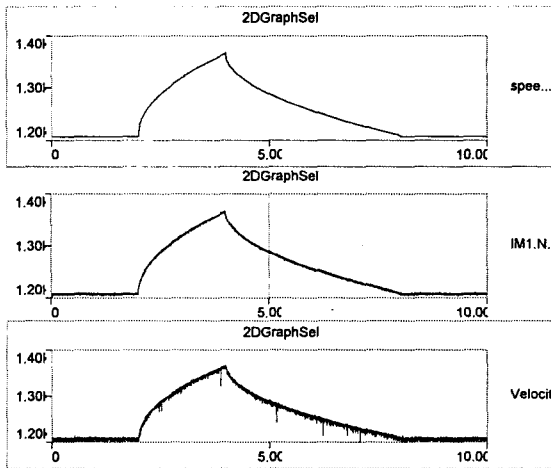


그림 5 속도 명령과 결과
Fig. 5 Speed reference and the results

표 1 DFIG 파라미터
Table 1 DFIG parameters

정격출력	3.7 kW
정격속도(Rated speed)	1127 rpm
극수(P)	6 극
고정자 저항(R_s)	4.47 Ω
회전자 저항(R_r)	1.6 Ω
고정자 인덕턴스(L_s)	0.762 H
회전자 인덕턴스(L_r)	0.8 H
상호 인덕턴스(L_m)	0.8 H
관성(Inertia)	0.038 kgm ²

표 2 파라미터 값의 변화에 따른 발전전압
Table 2 Generating voltage refer to the parameters

L_s / L_r [H]	$R_{4,5,6}$ [ohm]	각속도 [rad/s]	발전전압 [Vrms]
0.06	50	150	310
0.07 ~ 0.29	50	130	239
0.3 ~ 0.7	50	127	224
0.762 / 0.8	75	126.5	222

그림 6은 DFIG의 발전 상태를 나타내고 있다. 발전전압(VM2)이 전원전압(VM3)보다 크고 고정자 전류와 회전자 전류 또한 흐르고 있기 때문에 발전 증임을 확인 할 수 있다. 회전자 전류는 제어되지 않은 상태에서 직결하였으나 회전자에서 전력이 공급됨을 알 수 있다.

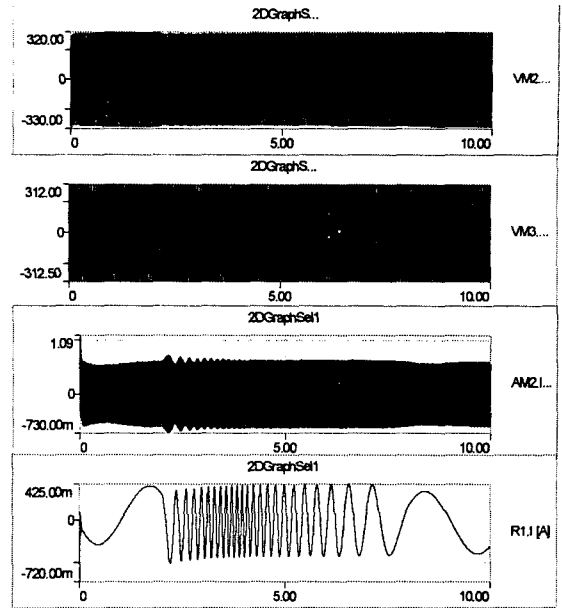


그림 6 발전전압, 전원전압, 고정자 전류와 회전자 전류
Fig. 6 Generated voltage, supply voltage, stator current and rotor current

4. 결론

본 논문에서는 DFIG를 모터의 시뮬레이션 프로그램 중 정교한 Simplorer Simulator를 이용하여 구현하였다. 현재 단계에서는 풍속을 함수로 대신하여 모사되었고 발전전압(VM2)과 전원전압(VM3)을 비교함으로써 DFIG의 발전 가능성을 확인하였다. 그리고 회전자 쪽 외부저항 R1에 흐르는 전류(R1.I)를 확인함으로써 DFIG로서 회전자의 여자전압과 여자주파수를 조절할 수 있음을 확인하였다. 다음 단계로는 실제바람을 풍속계로 데이터화 하여 터빈 쪽 속도 명령으로 인가하는 것이다. 풍력발전기를 실제로 설치하지 않고 바람의 데이터만 가지고 충분히 바람의 품질을 확인하고 풍력발전기의 설치 여부까지도 판단할 수 있어 매우 경제적이라 할 수 있다.

감사의 글

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

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 풍력 발전기의 계통 투입 알고리즘", 대한전기학회 논문지, Vol. 52B, No. 10, pp.528~534, 2003, October
- [4] Documentation of SimPowerSystems, "Wind Turbine Doubly-Fed Induction Generator(Phasor Type)"