

농형유도발전기로 연계된 풍력발전시스템의 시뮬레이터 개발

이동근*, 이두영*, 한병문*, 고종선**, 최남섭***
 *명지대학교, **단국대학교, ***전남대학교

Simulator Development and Performance Analysis of Wind Power System Interconnected with Induction Generator

Dong-Geun Lee*, Doo-Young Lee*, Byung-Moon Han*, Jong-Sun Ko**, Nam-Sub Choi***
 *Myongji University, **Dankook University, ***Chonnam University

Abstract - 본 논문에서는 풍속이 가변하는 상황에서 풍력 발전 시스템의 동작을 모의 할 수 있는 풍력 터빈 시뮬레이터를 설계·구현하였다. 실제 풍속과 회전 속도를 실시간으로 입력 받으며, 토크 계산에 필요한 블레이드의 효율을 주속비에 관한 함수로 처리하여 사용함으로써 복잡한 조작 없이 가변 풍속조건에서 블레이드에 의한 토크입력을 모의할 수 있게 하였다.

또한 풍력터빈 시뮬레이터를 이용하여 농형 유도발전기식 풍력발전시스템을 구성하여 계통에 연계하였을 경우 발생하는 무효전력을 보상하기 위해 펄스 다중화 보조브리지회로를 이용한 새로운 구조의 36-펄스 전압원 컨버터방식의 실시간 무효전력보상기(STATCOM)를 적용하였다. 그리고 동작특성을 분석하고 제어시스템의 성능해석을 위하여 시뮬레이션 프로그램인 EMTDC/PSCAD를 이용한 시뮬레이션을 실시하였으며, 축소모형 하드웨어 실험을 통해 실험을 통한 분석을 실시하였다.

1. 서 론

에너지 자원이 빈약한 우리나라로서는 대체 에너지의 개발이 시급히 요구되고 있으며, 현재 연구 및 실용화 단계에 진입하고 있는 대체 에너지원으로는 풍력, 태양광, 연료전지 등을 들 수 있다. 그 중 풍력은 타 에너지원에 비해서 설치 후 유지비가 거의 필요 없다는 장점이 있어 독일, 네덜란드 덴마크를 중심으로 1970년대부터 풍력발전에 대한 많은 연구가 있어 왔고 그 결과 최근에는 수MW급 풍력발전 시스템을 상용화 하였다[1]-[3].

풍력발전시스템은 에너지 변환흐름에 따라 블레이드, 동력 전달부등의 기계부분과 발전기, 전력변환회로 등의 전기부분으로 구분이 가능하다. 이와 같이 풍력발전시스템의 발전기를 비롯한 전력변환시스템의 특성을 파악하고 고효율 시스템을 개발하기 위해서는 블레이드와 동력 전달부의 특성을 모의할 수 있는 모의 실험장치가 필수적이다. 블레이드의 효율 및 구조적 특성을 검토하기 위해서는 실제 블레이드, 기어, 발전기 등을 축소형 모델로 제작하여 풍동실험을 하는 것이 필요하지만 국내 풍동시설의 크기를 고려할 때 수백 W급 이상의 발전기는 시험이 어렵고 비용도 많이 소요된다. 이러한 제약 때문에 시스템의 연구 및 개발단계에서 실제 블레이드를 사용하여 전기적 시스템을 시험하는 것은 거의 불가능하고, 블레이드를 대신하여 발전기에 토크를 공급할 수 있는 시스템을 사용하는 방법이 요구된다.

본 논문은 풍속이 가변 하는 상황에서 풍력터빈시스템의 동작을 모의 할 수 있는 풍력터빈 시뮬레이터를 설계·구현하였다. 기존의 방법과는 달리 풍속과 회전속도를 실시간으로 입력받으며, 토크 계산에 필요한 블레이드의 효율을 주속비에 관한 함수로 처리하여 사용함으로써 복잡한 조작 없이 가변 풍속 조건에서 블레이드에 의

한 토크 입력을 모의 할 수 있게 하였다. 또한 위에서 개발한 풍력터빈 시뮬레이터를 농형 유도발전기에 연결하여 계통에 연계하였을 경우를 모의하였다. 농형 유도발전기는 계통에 직접 연결되어 있어 전압조정과 위상조절이 필요하지 않아 전기적 시스템이 비교적 간단하다. 그러나 낮은 역률을 보상하기 위한 무효전력보상기가 필요하다는 단점이 있다. 본 논문에서는 기존의 방법인 발전기 측에 전력용 커패시터와 스위치로 구성된 뱅크를 달아 무효전력을 보상하는 방법 대신 펄스 다중화 보조브리지회로를 이용한 36-펄스 전압원 컨버터 방식의 STATCOM을 선로에 병렬로 연결하여 사용함으로써 실시간으로 선로에 무효전류를 주입 또는 흡수하여 농형 유도발전기에서 필요로 하는 무효전력을 발생하고 모션 전압 안정도를 유지하는 역할을 할 수 있게 하였다.[4]

제안하는 풍력터빈 시뮬레이터와 STATCOM모델의 특성을 분석하고 제어시스템의 성능해석을 위하여 시뮬레이션 프로그램인 EMTDC/PSCAD와 Matlab을 이용하여 제안하는 시스템의 타당성을 검증하였고 그 결과를 토대로 축소모형 하드웨어 실험을 실시하였다.

2. 풍력터빈 시뮬레이터

2.1 블레이드 모델링

풍속 V_{wind} 의 바람이 불 때, 블레이드가 받아들이는 에너지는 출력계수(power coefficient) C_p 와 풍속의 3승에 비례한다. 이것은 일반적인 팬부하가 속도의 증가에 따라 속도의 제곱에 비례하는 토크 부하특성을 보이는 것과 마찬가지로이다. 바람이 가지고 있는 에너지는 다음과 같다.

$$P_{wind} = \frac{1}{2} A \rho V_{wind}^3 C_p \quad [W] \quad (1)$$

A는 회전자의 회전 단면적[m²], ρ 는 공기의 밀도로 약 1.25[kg/m³]이다. 따라서 매 순간마다 풍속의 변화에 따라 현재 회전 속도에서 블레이드가 입력할 수 있는 토크 T_{wind} 를 식 (2)와 같이 계산하였다.

$$T_{wind} = \frac{P_{wind}}{\omega_{blade}} = \frac{1}{2} A \rho V_{wind}^3 \frac{C_p}{\omega_{blade}} \quad [Nm] \quad (2)$$

이 때 출력계수의 계산에 주의하여야 한다. 출력계수란 풍속 V_{wind} 의 바람이 가지고 있는 전체 에너지 중에서 블레이드가 받아들이는 에너지의 비율을 의미하며, 풍속에 대한 블레이드의 회전속도의 비율인 주속비(TSR : Tip Speed Ratio) λ 에 따라 변한다. 본 논문에서 사용한 출력계수함수는 다음과 같다.

$$C_p(\lambda) = a_3\lambda^3 + a_2\lambda^2 + a_1\lambda + a_0 \quad (3)$$

$$\lambda = \frac{\omega_{blade} R_{blade}}{V_{wind}} \quad (4)$$

그림 1은 풍력터빈의 블록선도를 나타낸다.

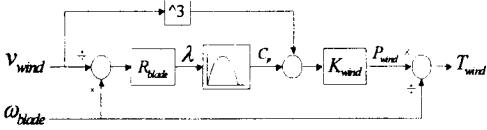


그림 1. 풍력터빈 블록선도

2.2 블레이드의 관성

식 (3)의 C_p 함수 계수는 25m의 반지름을 가지는 800kW급의 풍력발전 시스템의 블레이드를 모의한 것이다. 따라서 반지름이 25m인 블레이드의 중량을 알아야 관성을 모의할 수 있다. 세계 여러 풍력발전 시스템의 사양 중 가장 유사한 시스템인 Gamesa G52모델의 사양을 참조하였다. Gamesa G52모델은 850kW정격에 반지름 25.3m의 블레이드로 구성되어있다. 또한 3개의 블레이드 총중량은 10 ton이다.

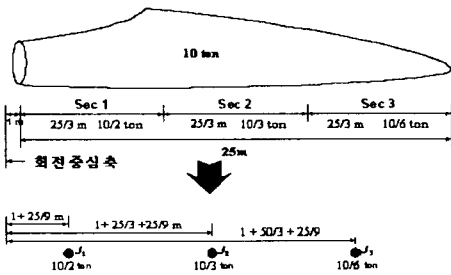


그림 2. 블레이드 관성계산을 위한 등가중량

고려하는 블레이드가 그림 2에 나타나있고 몇 가지 가정을 하였다. 첫째 블레이드는 3개로 구성되며 개당 3.3[ton], 전체 10[ton]이다. 둘째 블레이드를 3개의 구간으로 구분하였다. 셋째 각 구간의 무게 중심점은 회전중심축으로부터 1/3 지점에 위치한다.

$$J_1 = \frac{10}{2} \times 1000 \times \left(1 + \frac{25}{9}\right)^2 = 71358.02 \text{ [kg} \cdot \text{m}^2]$$

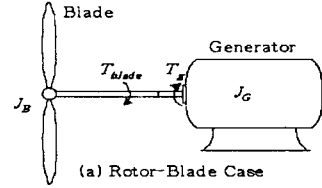
$$J_2 = \frac{10}{3} \times 1000 \times \left(1 + \frac{25}{3} + \frac{25}{9}\right)^2 = 488930.04 \text{ [kg} \cdot \text{m}^2]$$

$$J_3 = \frac{10}{6} \times 1000 \times \left(1 + \frac{50}{3} + \frac{25}{9}\right)^2 = 696625.51 \text{ [kg} \cdot \text{m}^2]$$

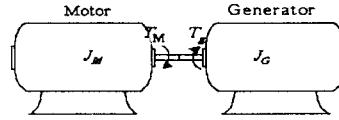
블레이드 전체 관성은

$$J_{blade} = J_1 + J_2 + J_3 = 1256913.58 \text{ [kg} \cdot \text{m}^2] \quad (5)$$

그림 3에 블레이드 동특성 구현을 위한 모델이 나타나 있다.



(a) Rotor-Blade Case



(b) Motor Case

그림 3. 블레이드 동특성 구현 모델

실제 블레이드를 사용한 경우와 블레이드를 전동기로 대체한 경우가 그림 3의 (a)와(b)에 나타나 있다. 그때의 블레이드의 토크 T_{blade} 와 T_{motor} 는 식 (6),(7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_{blade} = (J_B + J_G) \frac{d\omega_{blade}}{dt} + T_g \quad (6)$$

$$T_M = (J_M + J_G) \frac{d\omega}{dt} + T_g \quad (7)$$

만약 전동기와 블레이드의 동특성이 같다면 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\omega = \omega_{blade}$$

$$T_M = T_{blade} - (J_B - J_M) \frac{d\omega}{dt}$$

$$= T_{blade} - T_{comp} \quad (8)$$

2.3 시뮬레이션 모델

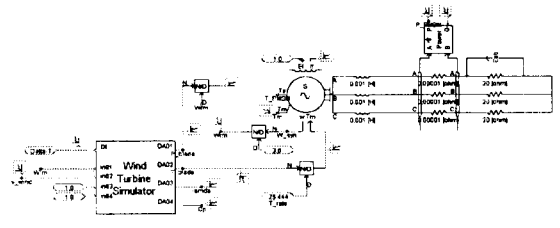


그림 4. EMTDC/PSCAD 풍력터빈 모델

풍력터빈특성을 구현하기 위해 EMTDC/PSCAD을 이용하여 시뮬레이션 하였다. 그 모델이 그림 4에 나타나 있고 시뮬레이션 회로정수는 표 1에 나타나 있다.

표 1. 시뮬레이션 회로정수

발전기 정격출력	3.7 [kW]
발전기 정격전압 (L-L)	220 [V]
발전기 정격전류	9.71 [A]
발전기 극수	6극
부하 (R)	2.4 [kVA]
블레이드 길이(Rblade)	25 [m]
최대 출력계수(Cpmax)	0.323
공기밀도(ρ)	1.225 [kg/m ³]

위에서 모의하는 Cp함수는 800kW급의 함수이므로 2kW급의 터빈을 모의하기 위해서 구매한 Tmotor를 400으로 나누어 2kW급의 풍력터빈토크를 계산하였다. 그림 5에 위의 모델의 시뮬레이션 파형이 나타나 있다.

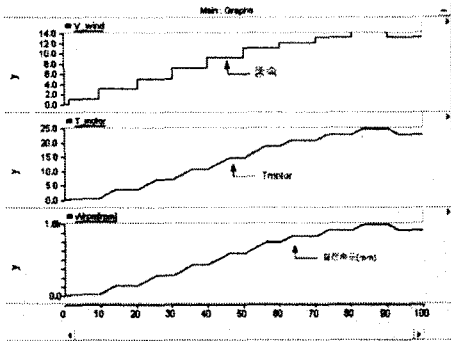


그림 5. EMTDC/PSCAD 시뮬레이션 파형

파형에 나타나는 것과 같이 풍속이 스텝으로 변하여도 풍동기 토크와 회전속도가 관성의 영향으로 서서히 증가하는 것을 알 수 있다.

2.4 시뮬레이션 모델

위에서 시뮬레이션한 조건에 의하여 실제 하드웨어에서도 같은 특성을 보이는지 확인하기 위하여 MG-set 실험을 실시하였다.

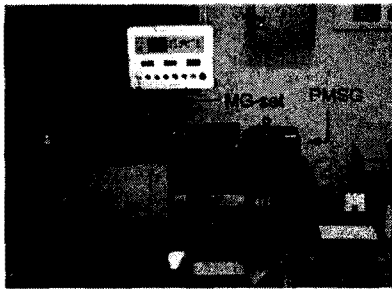


그림 6. MG-set 하드웨어 구성

그림 6에 나타나 있는 풍력시뮬레이터용 MG-set를 이용하여 풍력터빈 시뮬레이터를 구현시키기 위해서는 별도의 HMI 프로그램이 필요하다. 그림 7에는 C Builder를 이용하여 개발한 HMI 프로그램 화면과 파형이 나타나 있다. 실험파형도 시뮬레이션 특성과 동일함을 알 수 있다.

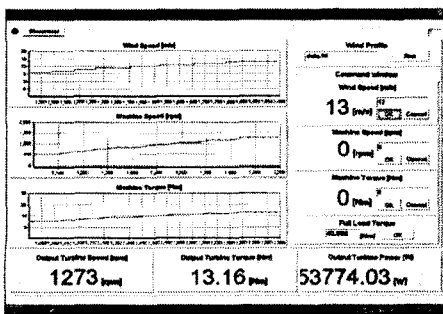


그림 7. MG-set 구동을 위한 HMI Program

3. STATCOM

3.1 시뮬레이션 모델

본 논문에서는 그림 8에 보인 것과 같이 직류 단에 보 통변압기와 3-레벨 반브리지로 구성된 보조회로를 갖는 새로운 구조의 36-펄스 컨버터를 제안한다. 그림 1의 Y로 연결된 컨버터와 Δ로 연결된 컨버터의 교류전압은 DC 커패시터의 전압 v_{dc} 와 보조브리지의 주입전압 v_{aux} 로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_Y = v_{dc} + v_{aux} \quad (9)$$

$$V_{\Delta} = v_{dc} - v_{aux} \quad (10)$$

이 관계식으로부터 각 컨버터의 출력 AC 전압은 주입전압 v_{aux} 에 의해서 동시에 조절 가능하다.

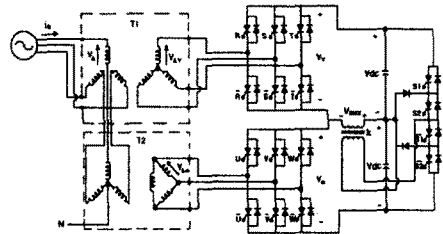


그림 8 새로운 보조회로를 이용한 36-펄스 컨버터

그림 8에서 개방_Y-Y와 Y-Δ 변압기로 연결된 두 대의 컨버터 시스템은 교류 측의 상전압을 30위상차를 갖도록 하여 12펄스를 발생하게 되며, 보조브리지회로는 30바다 동작하기 때문에 주입전압 v_{aux} 는 기본 주파수에 6배에 해당하는 펄스를 형성하게 된다. 그렇기 때문에 컨버터 시스템의 변압기 1차 측에 36펄스의 전압을 형성하게 된다.

3.2 STATCOM의 원리

인버터식 무효전력보상기인 STATCOM과 교류계통 사이에 교환되는 무효전력의 양은 인버터 출력전압의 크기에 따라 정해진다. 그림 9는 무효전력보상기가 교류계통에 연결된 것을 가상하여 보상기에서 들여다 본 테브난 단상동가회로를 나타낸 것이다. 인버터와 교류계통 사이의 유·무효전력 교환은 인버터출력전압, 교류단자전압, 양단의 위상각에 의해 제어 가능하다. 만일 인버터 출력전압 V_I 와 교류단자전압 V_T 가 동일한 위상각을 갖고 $V_I < V_T$ 이면, 교류계통은 보상기에 무효전력을 공급하고, $V_I > V_T$ 이면 교류계통은 보상기로부터 무효전력을 공급받는다. 그리고 $V_I = V_T$ 이면 무효전력의 출입은 0이 된다.

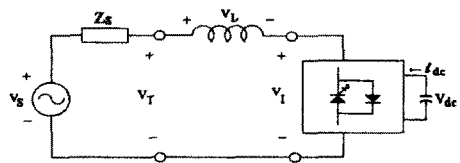


그림 9. STATCOM의 단상동가회로

4. 통합시스템 축소모형 실험

4.1 통합 시스템 축소모형 회로도

그림 10에 하드웨어 시스템 구성과 표 2에 시스템 회로정수가 나타나 있다.

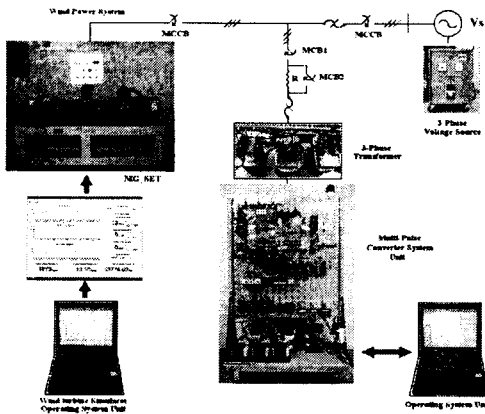


그림 10. 하드웨어 시스템 구성

표 2. 하드웨어 실험 회로정수

전원 전압	3 ϕ 220 V
주파수	60 Hz
DC 캐패시터	3300 μ F
Motor 정격용량	7.5 KW
Motor 정격 회전속도	1750 rpm
Generator 정격용량	3.7 KW
Generator 정격 회전속도	1130
위상변압기 용량	2 KVA
주입변압기 용량	2 KVA
변압기 누설 리액턴스	5 mH

4.2 실험결과

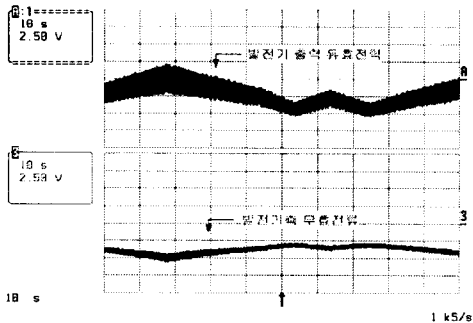


그림 11. 유도발전기 출력 유효전력과 무효전류

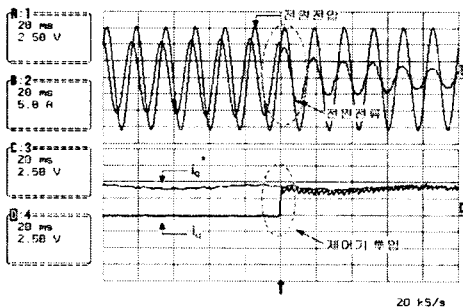


그림 12. 제어기 투입시 전원전압, 전원전류, 무효전류

그림 11, 12에는 본 논문에서 제안하는 풍력터빈 시뮬레이터를 구현한 유도발전기식 풍력발전시스템과 다중펄스 STATCOM을 연계하여 실험과형이 나타나 있다. 농형 유도발전기식 풍력발전시스템은 가변풍속을 모의할 수 있는 터빈 시뮬레이터를 통하여 발전되므로 실시간으로 출력하는 유효전력과 무효전력이 바뀌게 된다. 그림 11은 농형 유도발전기식 풍력발전시스템이 풍속이 변함에 따라 변하는 출력 유효전력과 그 때의 무효분 전류를 나타내고 있다. 유도발전기가 무효전력을 소모하고 있음을 알 수 있다. 그림 12는 풍력발전시스템이 동작하고 있을 때 STATCOM을 동작시킨 과정을 나타내고 있다. STATCOM제어기를 투입한 순간 i_q^* 기준값을 인버터 출력무효전류가 잘 추종하고 있음을 알 수 있고 그 순간의 전원전압과 전원전류가 동상이 됨을 확인할 수 있으며 STATCOM이 용량성으로 동작하여 역률보상이 이루어지는 것을 확인 할 수 있다.

5. 결 론

본 논문은 회전자 블레이드를 대신하여 가변 하는 풍속입력에 의해 풍력터빈시스템의 동작을 모의 할 수 있는 풍력터빈 시뮬레이터를 설계·구현하였다. 특히 실제 회전자 블레이드의 관성을 계산하여 이를 전동기를 이용하여 구현할 때의 보상 토크를 계산함으로써 회전자 블레이드의 동특성을 실제 상황에 가깝게 모의 할 수 있게 하였다.

한편 제안된 풍력터빈 시뮬레이터를 이용하여 농형 유도발전기식 풍력발전시스템을 구성하여 계통에 연계하였을 때 소모하는 무효전력을 보상하기 위해 펄스 다중화 보조회로를 이용한 36-펄스 전압원컨버터 STATCOM에 적용하였다.

제안된 풍력터빈 시뮬레이터와 다중펄스 STATCOM의 성능검증을 위하여 EMTDC/PSCAD 및 Matlab 컴퓨터 시뮬레이션을 사용하였고 실 시스템 적용을 위해서 하드웨어 축소모형을 제작하여 실험을 실시한 결과를 기술하였다.

본 논문에서 구현한 풍력터빈 시뮬레이터는 농형 유도발전기식 풍력발전시스템 뿐만 아니라 영구자석형 동기발전기, 권선형 유도발전기식 풍력발전시스템의 제어 알고리즘 개발, 성능시험 및 효율 측정 등의 다양한 분야에서 활용될 수 있을 것으로 보인다. 또한 펄스 다중화 보조회로를 이용한 36-펄스 STATCOM은 외형이 작고 비용이 낮아 대체에너지에서 생산된 전력을 공급하는 전원장치, 그리고 정보통신기기와 자동화기기의 가용신뢰도 향상에 이용되는 전력품질 보상장치에 적극 활용 가능할 것으로 보인다.

[참 고 문 헌]

- [1] R. Hoffmann, P. Mutschler, "The Influence of Control Strategies on the Energy Capture of Wind Turbines", 2000 IAS Conference Record, pp.886-893, 2000
- [2] Anders Grauers, "Efficiency of three wind energy generator systems", IEEE Trans. Energy Conversion, Vol. 11, No. 3, pp.650-657, 1996
- [3] Shibashis Bhowmik, Rene Spee, Johan H. R. Enslin, "Per formance Optimization for Doubly Fed Wind Power Generation Systems", IEEE Tr. Industry Application, Vol. 35, No. 4, pp.949-958, 1999.
- [4] 전영수, 백승택, 한병문, "펄스 다중화 보조회로를 이용한 새로운 구조의 36-펄스 전압원 컨버터" 대한전기학회 논문지, 54B권 5호, pp 237-244, 2005년 5월