

풍력 터빈 모의 실험을 위한 가변 토오크 입력형 전동기-발전기 제어 시스템 제작 및 실험

정병창*, 송승호*, 노도환*, 김동용*, 김영민**, 임종연***
 *전북대학교, **담양대학, ***호남산업

Variable Input Torque Motor-Generator Control System for Wind Turbine Emulation

Byoung-Chang Jeong*, Seung-Ho Song*, Do-Hwan Rho*, Dong-Yong Kim*, Yeong-Min Kim**, Jong-Yeon Lim***
 Chonbuk National Univ.*, Provincial College of Damyang**, Honam Industrial System Co.***

Abstract - In this paper, a wind power simulator is designed and implemented. This simulator realize the torque of wind blade by DC motor. And squirrel-cage induction machine is used as generator and controlled to achieve the maximum power point tracking(MPPT) algorithm.

1. 서 론

최근 화석에너지의 고갈에 대비한 환경 친화적 에너지 원으로 풍력 발전이 주목을 받고 있다. 풍력 발전 시스템은 크게 회전자-블레이드의 기계적인 부분과 발전기 등의 전기적인 부분으로 구분이 가능하고 많은 연구가 이뤄지고 있다.

발전 시스템은 전기적인 부분에서 발전기의 회전속도와 사용하는 발전기에 따라서 구분이 가능하다. 또, 운전 형태에 따라서 독립된 전원으로 운전하는 독립형과 계통의 송·배전망에 연결된 계통 연계형으로도 구분할 수 있다.[1]

그러나 풍력 발전 시스템의 전기적 부분에서 특성을 연구할 때 회전자 블레이드를 사용하여 토오크를 공급하는 것은 많은 제약이 따른다. 시스템의 용량이 증가할수록 회전자 블레이드의 길이가 길어지기 때문에 설치 공간적인 제약이 따른다. 또한 바람의 패턴과 용량을 발전 시스템에 맞게 원하는 형태로 제어하기 위해서는 별도의 풍동실험실 등을 갖춰야 하는 등의 경제적 제약도 있다. 이러한 제약 때문에 회전자 블레이드를 대신하여 토오크를 공급할 수 있는 시스템, 즉, 블레이드 시뮬레이터가 필요하다.

블레이드 시뮬레이터로는 직류 전동기를 사용하기로 한다. 직류 전동기의 회전 속도는 직류기에서 공급하는 토오크와 발전기에서 전기적 에너지로 변환하는 토오크의 차에 비례한다. 결국, 시뮬레이터에는 발전기와 발전기를 제어하기 위한 장치도 포함되어야 한다.

발전기로는 농형 유도 발전기를 사용하고, 발전기가 최대 출력점에서 동작하도록 제어를 설계하였다.

2. 발전기 시스템의 모델링 및 시뮬레이터

2.1 가변속 시스템

그림 1에 시뮬레이터로 구현하려는 가변속 풍력 발전 시스템의 개략도가 있다. 가변속 시스템은 크게 회전자-블레이드, 발전기, 컨버터, 계통연계형 인버터로 구성되어 있다. 회전자 블레이드는 앞에서 언급한 것과 같이 직류 전동기의 토오크를 제어하여 구현한다.

그림 2에서 시뮬레이터의 전체 구성을 보여주고 있다. 직류 전동기는 회전자 블레이드의 토오크를 구현하도록 제어하고, 유도 발전기는 MPPT 알고리즘에 의해서 속도를 제어하고 있다.

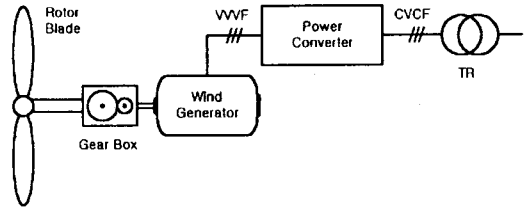


그림 1. 가변속 풍력 발전 시스템

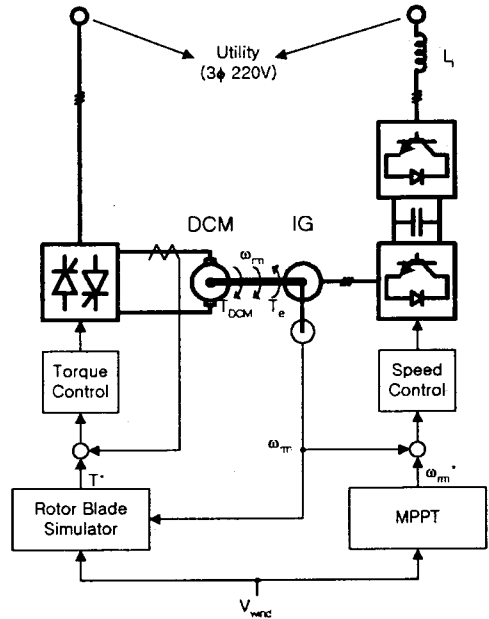


그림 2 시뮬레이터 구성도

2.2 회전자 블레이드의 모델링 및 구현

회전자 블레이드의 주속비(Tip Speed Ratio), λ는 풍속과 회전자 끝의 회전 속도의 비율로 다음과 같다.

$$\lambda = \frac{\text{날개끝의회전속도}}{\text{풍속}} = \frac{\omega_m \cdot R}{V} \quad (1)$$

ω_m 은 회전자의 회전 각속도[rad/sec], R 은 회전자의 반지름[m], V 는 풍속[m/sec]을 의미한다.

바람이 가지고 있는 전체 에너지 중에서 회전자가 입력받는 에너지의 비율을 출력계수(power coefficient), C_p 라고 하며 이론상 최대 값은 0.59로, 실제 가능한 최대 값은 이 값보다 작다. 그리고, 출력계수는 그림 3에

서 볼 수 있듯이 주속비에 대한 함수이다.

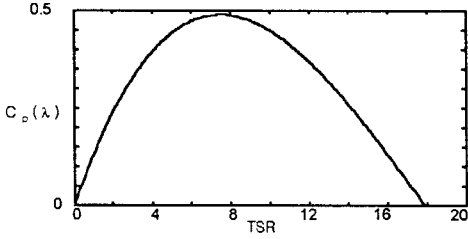


그림 3. 출력 계수와 주속비

회전자에서 변환된 에너지 P_{wind} 는 다음과 같다.

$$P_{wind} = \frac{1}{2} A \rho V^3 C_p(\lambda) \quad [\text{kW}] \quad (2)$$

A 는 회전자의 회전 단면적 $[\text{m}^2]$, ρ 는 공기의 질량으로 약 $1.25[\text{kg}/\text{m}^3]$ 이다. 이때 바람에 의해서 회전자에 입력되는 토오크는 다음과 같다.

$$T_{wind} = \frac{P_{wind}}{\omega} = \frac{1}{2} A \rho V^3 \frac{C_p(\lambda)}{\omega} \quad [\text{Nm}] \quad (3)$$

ω 는 회전자의 회전각속도 $[\text{rad}/\text{sec}]$ 이다.

회전자 블레이드의 토오크는 식(3)에서 볼 수 있듯이 풍속과 블레이드의 회전 속도에 의해서 결정된다. 직류 전동기를 사용해서 회전자 블레이드의 토오크를 구현하기 위해서는 풍속을 직류기의 제어기에 입력해야 한다. 직류 전동기에서 토오크는 식(4)와 같이 전기자 전류에 비례하므로 풍력에 의한 토오크는 전기자 전류를 제어하여 구현 할 수 있다.

$$T = K_T I_a \quad [\text{Nm}] \quad (4)$$

K_T 는 토오크 상수이다.

회전자-블레이드의 토오크 입력을 모의하기 위해서 먼저 블레이드의 사양을 결정해야 한다. 식(3)은 블레이드의 토오크를 간단한 형태로 정리한 식으로 블레이드의 길이와 출력계수의 특성이 주어져야 한다. 다음으로 블레이드의 사양이 주어지면 그림 3과 같은 과정을 통하여 직류기의 전류 기준값을 설정한다.

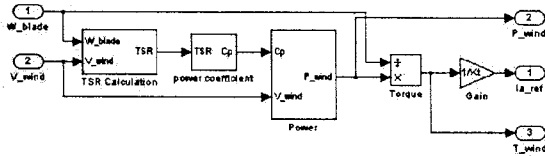


그림 4. 직류전동기 전류 기준값 설정

그림 3에서 볼 수 있듯이 직류 전동기의 전류 기준값을 결정하기 위해서는 풍속(V_{wind})과 현재 블레이드의 회전속도(W_{blade})를 입력받아야 한다. 입력된 값에서 TSR과 출력 계수 C_p 를 계산한다. 그리고, 계산된 출력 계수와 풍속을 사용하여 회전자 블레이드에 입력되는 파워와 토오크를 계산한다. 이때 그림 3에서 보여주는 시스템은 기어를 사용하지 않는 시스템을 모의할 때 전류 기준값을 결정하는 과정으로, 회전자 블레이드에 의한 입력 토오크와 직류 전동기에서 합성해야 할 토오크는 같다. 그러나 만일 기어를 사용하는 발전 시스템을 모의할 경우에는 직류기에서 발생시켜야 할 토오크와 전류 기준값은 다음과 같이 달라진다.

$$T_{DCM} = \frac{T_{wind}}{\text{gear ratio}} \quad [\text{Nm}] \quad (5)$$

$$I_a^* = \frac{T_{DCM}}{K_T} \quad [\text{A}] \quad (6)$$

직류 전동기의 회전속도는 직류 전동기에 의해서 공급되는 토오크와 유도 발전기에 의해서 변환되는 토오크의 차에 비례하여 변화하게 된다.

2.3 농형 유도 발전기 및 컨버터

유도 발전기 모델링에서 전류의 부호는 컨버터에서 발전기로 들어가는 방향을 양(+)으로 잡았다. 농형 유도기의 전압은 다음과 같다.

$$V_{ds}^e = \left\{ r_s + L_s \frac{d}{dt} \right\} i_{ds}^e - \omega_e L_m i_{qr}^e + L_m \frac{d}{dt} i_{dr}^e - \omega_e L_m i_{qr}^e \quad (7)$$

$$V_{qs}^e = \omega_e L_s i_{ds}^e + \left\{ r_s + L_s \frac{d}{dt} \right\} i_{qs}^e + \omega_e L_m i_{dr}^e + L_m \frac{d}{dt} i_{qr}^e \quad (8)$$

$$0 = L_m \frac{d}{dt} i_{ds}^e - (\omega_e - \omega_r) L_m i_{qs}^e + \left\{ r_r + L_r \frac{d}{dt} \right\} i_{dr}^e - (\omega_e - \omega_r) L_r i_{qr}^e \quad (9)$$

$$0 = (\omega_e - \omega_r) L_m i_{ds}^e + L_m \frac{d}{dt} i_{qs}^e + (\omega_e - \omega_r) L_r i_{dr}^e + \left\{ r_r + L_r \frac{d}{dt} \right\} i_{qr}^e \quad (10)$$

발전기에서 발전하는 유효 전력을 간단하게 표현하면 다음과 같다.

$$P = \frac{3}{2} \{ V_{ds}^e i_{ds}^e + V_{qs}^e i_{qs}^e \} \quad (11)$$

무효전력은 다음과 같다.

$$Q = \frac{3}{2} \{ V_{qs}^e i_{ds}^e - V_{ds}^e i_{qs}^e \} \quad (12)$$

발전기에 의해서 전력으로 변환되는 토오크는 다음과 같다.

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{p}{2} L_m (i_{dr}^e i_{qs}^e - i_{qr}^e i_{ds}^e) \quad (13)$$

또, 발전 시스템이 최대 전력을 발전하기 위해서는 회전자 블레이드의 회전속도를 최대 출력계수가 가능한 TSR이 되도록 제어해야 한다. 즉, 유도 발전기의 속도 제어 기준값은 다음과 같이 제어한다.

$$\omega_{m \text{ ref}} = \frac{\lambda_{opt} \cdot V}{R} \quad (14)$$

λ_{opt} 는 회전자 블레이드에서 최대 출력이 가능한 TSR로 주어진 출력 계수 곡선에서는 7.5정도 된다.

3. 시뮬레이터

그림 5에서 구성된 시뮬레이터를 보여주고 있다. 그리고 시뮬레이터 각 부분의 파라미터는 표 1에서 보여주고 있다.

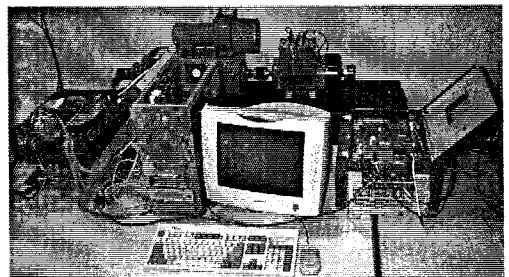


그림 5. 시뮬레이터

표 1. 시뮬레이터 파라미터

블레이드	직류 전동기	유도 발전기
R=1.6m Cpmax=0.4896 TSR opt=7.5	P=5500W V=220V Ia=32A $\omega_{rate}=1750\text{rpm}$	P=3000W V=220V I=14A p=4

그림 6은 발전기와 컨버터의 제어 블록을 보여주고 있다.

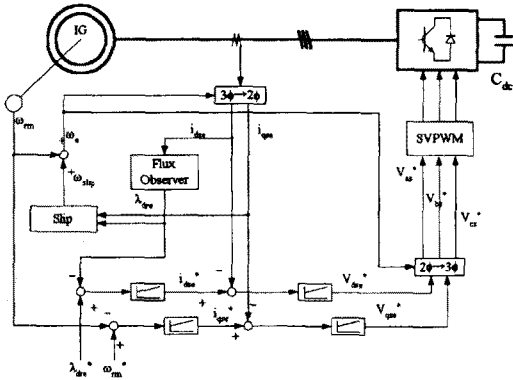


그림 6. 발전기 제어 블록도

그림 7에서 시뮬레이터의 직류 전동기와 유도 발전기의 동작을 보여주고 있다. 채널 1과 같이 풍속이 0→10→0m/sec로 가변할 때, 직류기의 전기자 전류는 회전자-블레이드의 토오르크를 구현하기 위하여 채널 2와 같이 풍속의 제곱에 비례하여 변하는 것을 볼 수 있다. 그리고 발전기의 회전속도는 최대 출력을 위하여 채널 3과 같이 제어된다.

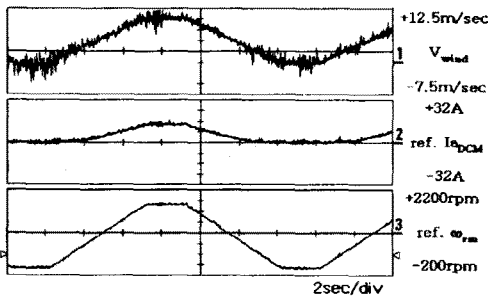


그림 7. 풍속과 토오르크, 회전속도 기준값

그림 8에서는 직류 전동기의 입력 전압과 전류, 유도 발전기의 q축 전압과 전류를 보여주고 있다.

그림 9는 유도 발전기의 회전 속도와 자속(λ_{dr}), 그리고 각각의 제어에 필요한 i_{ds}^* 와 i_{qs}^* 를 보여주고 있다.

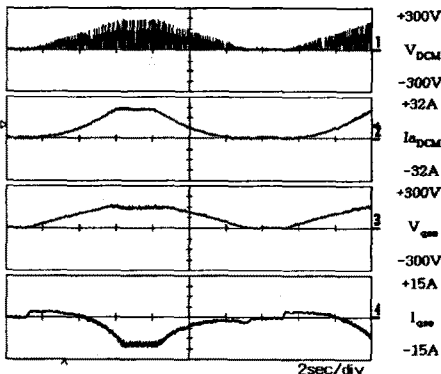


그림 8. 직류기와 유도기의 전압, 전류

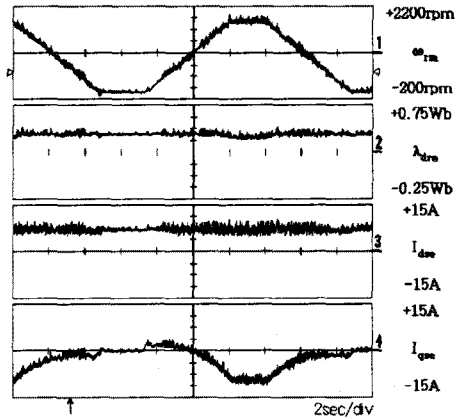


그림 9. 유도 발전기의 속도 및 자속 제어

5. 결론

본 연구에서는 풍력 발전 시뮬레이터를 설계 및 제작하였다. 발전 시스템의 각 부분은 다음과 같이 구성되어 각각의 기능을 수행한다.

실현 환경에서 구현이 어려운 회전자-블레이드는 직류 전동기로 대체하였다. 그리고 직류 전동기의 토오르크는 풍속과 회전속도에 따라서 달라지는 발전 시스템의 입력 토오르크를 구현하도록 설계, 제작되었다.

발전기는 유도발전기를 사용하였다. 그리고, 회전자 블레이드에서 최대의 에너지를 기계적 에너지로 변환할 수 있도록 유도 발전기의 속도를 제어하였다.

제작된 시뮬레이터는 앞으로 가변속 발전시스템의 출력 특성 시험에서 사용될 것이다. 또, 최대 전력 생산을 위한 새로운 발전기 제어 알고리즘의 개발을 위해서 사용될 것이다.

(참고 문헌)

- [1] Anders Grauers, "Efficiency of three wind energy generator systems", IEEE Trans. Energy Conversion, Vol. 11, No. 3, 1996, 650-657
- [2] 구성영, 이동춘, "풍력발전용 농형유도발전기의 최대출력 제어", 2001대한전기학회 춘계학술대회는논문지, 288-292
- [3] 김철호, 공정식, 오철수, "가변속과 일정속 풍력발전시스템의 출력제어", 한국에너지공학회지(2000), 제9권 제2호, 117-122
- [4] S. Müller, M. Deicke, Rik W. De Doncker, "Adjustable Speed Generators for Wind Turbines based on Doubly-fed Induction Machines and 4-Quadrant IGBT Converters Linked to the Rotor", IAS 2000. Conference Record, Vol. 4, 2000, 2249-2254
- [5] 김용현, 김일환, "풍력발전을 위한 이중역자 유도기의 센서리스 제어", 전력전자학회논문지, 2000, Vol. 5, No. 5, 451-458

본 연구는 (00-지역-03)한국전력공사지원에 의하여 기초전력공학공동연구소 주관으로 수행되었음.