

가변속 동기형 풍력발전 시스템 모델링 및 운전제어에 대한 연구

허현* · 이재학**

A Study on the modeling and operation control of a variable speed synchronous wind power system

Hyun Huh* · Jaehak Lee**

요 약

본 논문에서는 가변속 풍력발전시스템의 동적 모델링과 운전제어 시뮬레이션을 수행하였다. 풍속모델, 풍력터빈과 PMSG 모델, MPPT 및 피치 운전제어 모델 등을 구현하였다. 그리고 상용화된 5MW급 풍력터빈 데이터들을 참고하여 실제적인 시스템과 유사한 출력계수 및 가상 운전 조건으로 시뮬레이션 하였다. 시뮬레이션 결과 정격속도 12[m/s]까지 최대출력계수를 유지하면서 최대전력추종을 확인하였다. 또한 12[m/s]이상의 고속 풍속에서는 동적으로 피치 각도를 제어하면서, 정격상태의 안정적인 출력을 유지하였다.

ABSTRACT

This study performs the dynamic modeling and the simulation of variable speed wind power system and implements the models of wind speed, wind turbine & PMSG, and MPPT & pitch control as well. The simulation of wind turbine was performed by using the power coefficient and other simulation parameters which were extracted with reference to the commercial 5MW class wind turbine data. As the result of this simulation, MPPT control is confirmed, maintaining the maximum power coefficient as far as the rated speed 12[m/s]. Over 12[m/s] wind speed, this wind power system makes it possible to keep the stable output by controlling the pitch angle.

키워드

Variable Speed Wind Power System, Multi-Level Modeling, PMSG, MPPT, Pitch Control
가변속 풍력 발전 시스템, 모델링, 영구 자석 동기 발전기, 최대 전력 추종, 피치 제어

1. 서 론

화석연료 중심의 에너지 소비 증가에 따른 온실가스 등의 지구 환경문제와 2011년 일본 후쿠시마 원전 사태이후 안전성 문제에 발목 잡힌 원자력발전의 자리를 메울 수 있는 가장 현실적인 대안으로 신재생에너지에 대한 관심이 증폭되어 왔다[10]. 그 중에서 이

미 화석연료와 가격경쟁이 가능한 풍력발전에 대한 관심이 증가함에 따라, 우리나라는 아직 선진국과 기술 격차가 여전히 큰 실정이지만 기술력 제고와 트랙 레코드 축적 등을 통해 지속적인 발전 여건을 위하여 다양한 연구가 진행되고 있다. 최근 풍력발전단지 개발 경향은 기존 육상 단지에서 발생하는 공간 및 인허가 문제 등의 해결책으로 고품질의 풍속자원을 대

* 청암대학교 신재생전기제어과 교수(huhuh@ca.ac.kr)

** 교신저자 (corresponding author) : 청암대학교 소방안전관리과 교수(pelectro@ca.ac.kr)

접수일자 : 2015. 06. 30

심사(수정)일자 : 2015. 08. 13

게재확정일자 : 2015. 08. 23

량으로 얻을 수 있는 해상풍력단지 개발 쪽으로 향하고 있다. 이러한 경향과 더불어 풍력터빈 기술의 발전 및 풍력발전 보급량의 증가로 대형풍력발전 플랜트와 기존 전력망과의 연결은 주요 이슈가 되고 있다 [11-12].

그러나 바람이 가진 간헐적이며 가변적인 에너지원의 특징과 풍력발전 시스템이 가진 신뢰성 문제는 전력시스템의 안전성에 부정적인 효과를 나타내고 있다. 즉, 바람의 풍향, 풍속 변화에 따른 발전전력의 변동이나, 기어박스 등 기계적 요소의 유지보수문제, 그리고 계통연계에 따라 발생하는 부하손실, 발전손실, 전송손실, 바람손실, 단락 등의 다양한 동적인 상황변화에 따른 풍력발전시스템에 미치는 영향을 고려한 풍력시스템의 특성을 예측하는 것은 매우 중요하다. 또한 고품질 유지와 효율적인 전력을 생산하며, 시스템의 동적인 부하변동에 대해서도 안정성 유지할 수 있는 풍력발전시스템을 운용하기 위해서 최대 전력추종(MPPT : Maximum Power Point Tracking) 및 피치제어와 같은 풍력발전시스템 제어가 필요하다.

따라서 본 논문에서는 비정상적인 계통상태에서도 유효 및 무효전력의 유연한 제어가 가능한 장점을 가지고 있는 가변속 영구자석 동기식 발전기(PMSG : Permanent Magnet Synchronous Generator)를 기반으로 하는 풍력발전시스템의 모델링과 제어에 대하여 연구하였다. 전력망과 계통연계를 고려한 가변속 동기형 풍력발전 시스템의 시뮬레이션 모델 개발을 통해 다양한 동적변화에 따른 영향 및 제어기술을 연구할 수 있는 기반으로 활용하고자 한다. 이를 위해 비선형적인 풍력발전 시스템의 모델링과 연속적인 고속 정밀 시뮬레이션을 위한 멀티레벨 모델링이 가능한 CASPOC을 활용하여 모델링과 시뮬레이션을 수행하였다[13].

II. 풍력발전 시스템 개요 및 운전모드

2.1 가변속 풍력발전 시스템

그림 1은 가변속 동기기형 풍력발전 시스템의 구성도를 나타내었으며, 기어박스가 없기 때문에 저속의 회전자 샤프트가 직접적으로 발전기에 연결된 구조로, 발전기 출력은 전력계통에 AC/DC/AC 전력변환 컨버

터를 통해 연결되어 있다. 그리고 최대전력추종을 위한 MPPT 동작과, 정격이상의 높은 풍속에서도 안정적인 출력제어를 위한 피치제어 동작의 개념도를 나타내었다.

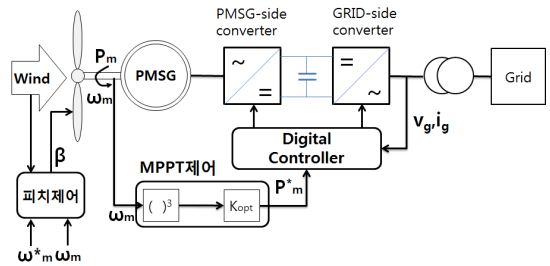


그림 1. PMSG 가변속 풍력발전 시스템 개념도
Fig. 1 Block diagram of variable speed wind power system with PMSG

2.2 풍력터빈 운전모드

풍속 v_w [m/s]인 바람에 의해 수풍면적(swept area) A [m^2]인 블레이드의 회전을 통해 변환되는 기계적 출력은 식 (1)과 같이 계산된다[1-2].

$$P_m = \frac{1}{2} \rho A v_w^3 C_p(\beta, \lambda) [W] \quad (1)$$

여기서 ρ [kg/m^3]는 공기밀도이고, C_p 는 터빈의 전력변환 계수, 그리고 λ 는 식 (2)와 같이 풍속에 대한 블레이드 팁 속도의 비로 주속비(tip speed ratio)라 한다.

$$\lambda = \frac{\omega_m R}{v_w} \quad (2)$$

최대 풍력 출력을 얻기 위해서 식 (1)로부터 전력 변환계수 C_p 가 최대값이 되어야 한다. 풍속의 변화에 관계없이 터빈이 항상 최적 주속비 λ_{opt} 점에서 동작한다면 전력변환계수가 최대값인 C_{Pmax} 가 되어 최대 전력이 발생된다. 따라서 최대 출력을 위한 블레이드 회전 각속도 목표 값은 식 (3)과 같이 구할 수 있다.

$$\omega_m^* = \frac{\lambda_{opt} v}{R} [rad/s] \quad (3)$$

그림 2는 cut-in 풍속에서 cut-out 풍속까지 풍력 발전기 운전을 위한 유효전력과 터빈 회전속도 관계를 나타내었다.

최대 출력을 얻기 위해서 cut-in 풍속에서부터 정격 풍속까지 최대 변환계수 C_{Pmax} 를 유지할 수 있도록 발전기의 회전속도를 제어한다. 그러나 정격풍속 이상에서는 블레이드의 피치각을 조절하여 cut-out 풍속까지 정격출력으로 제한한다.

따라서 풍력터빈 운전은 발전기 최소 속도 운전구간(A-B), 최대출력제어를 위한 가변속구간(B-C), 그리고 피치제어를 통한 발전기 정격속도 운전구간(C-D)으로 구분하여 제어되어야 한다.

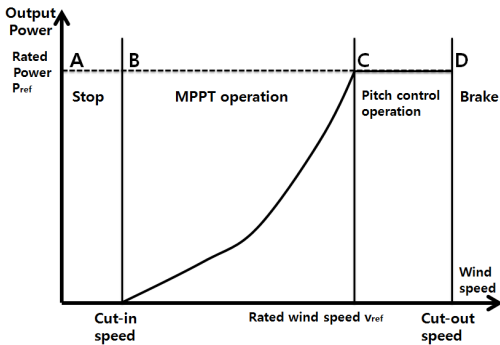


그림 2. 풍력터빈 운전모드
Fig. 2 Operation mode of wind turbine

III. 모델링

3.1 풍속 모델링

풍속 시뮬레이션은 풍력발전기의 성능뿐만 아니라, 에너지 출력 및 시스템 동적 특성을 해석하는데 매우 중요하다. 풍속은 계절풍, 내륙풍, 해상풍, 산곡풍 등 1년에서 하루, 1분, 1초에 이르기 까지 지속적으로 변화하고, 통계적인 특성을 가지고 있다. 이러한 풍속을 모델링하기 위해 그림 3과 같이 평균풍속과 난류성분으로 구성된 Van der Hoven 모델을 풍속 기본 모델로 고려하였다[3].

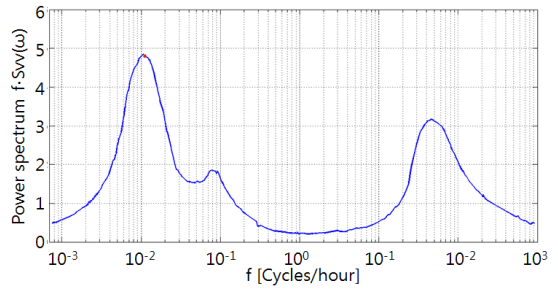


그림 3. Van der Hoven's 풍속 스펙트럼 모델
Fig. 3 Vander Hoven's spectrum model of Wind speed

수 시간 이상의 주기로 변하는 낮은 주파수의 풍속은 충분히 풍력터빈을 적용시킬 수 있지만, 높은 주파수, 특히 1분 주기로 매우 비번하게 변화하는 풍속에 대비하여 MPPT가 빠르게 수행되지 않으면 시스템은 항상 최대 전력 전달점에 동작할 수 없다.

그림 3의 풍속 파워 스펙트럼은 0.0007에서 900 cycle/hour범위에서 고조파 성분들의 분포를 나타내고 있다. 이 스펙트럼은 난류성분 뿐 만 아니라, 중장기적 풍속주기 변화성분이 포함되어 있다. 본 논문에서는 풍속의 수치적 모델링을 위해 Van der Hoven 스펙트럼을 샘플링 하였다. 이산적인 바람 발생 각 주파수 $w_i (i = 1, 2, \dots, N+1)$ 에 대응되는 파워 스펙트럼 밀도를 $S_{vv}(w_i)$ 와 각 주파수 w_i 에서 크기 A_i 는 식 (4)와 같이 주어진다[3].

$$A_i = \sqrt{\frac{1}{2} [S_{vv}(w_i) + S_{vv}(w_{i+1})] (w_{i+1} - w_i)} \quad (4)$$

이러한 조건에서 모델링되는 풍속 v_w 는 평균풍속 A_0 인 경우 시간에 대한 함수로 다음과 같이 정의된다.

$$v_w = A_0 + \sum_{i=1}^N A_i \cos(w_i t + \phi_i) \quad (5)$$

3.2 풍력터빈 모델링

Betz의 이론에 따르면 이상적인 풍력터빈에서 얻을 수 있는 최대 파워는 16/27(0.59) 비율 정도의 풍력에

너지를 얻을 수 있다. 그러나 공기 흐름의 비선형성과 블레이드의 형상 및 마찰, 피치각 β , 풍속 및 회전속도 등에 따라서 풍력터빈에서 얻을 수 있는 에너지는 C_P 로 알려진 출력계수의 비율로 감소된다. 따라서 식 1의 풍력터빈의 기계적 출력 P_m 을 블레이드 반지름이 R인 경우 다시 표현하면 식 (6)과 같다[4].

$$P_m = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 v_w^3 C_P(\lambda, \beta) \quad (6)$$

특히 블레이드의 형상은 공력설계 단계에서부터 결정되어 피치각 β 가 고정되었다고 가정하면, 식 2의 풍속과 블레이드 침두속도의 비인 주속비가 출력계수를 결정하는 주요 변수가 된다.

출력계수 C_P 값은 주속비 λ 와 블레이드 피치각 β 에 의해서 다음과 같이 표현된다[5].

$$C_P(\lambda, \beta) = c_1 \left(\frac{c_2}{\lambda_i} - c_3 \beta - c_4 \right) e^{-\frac{c_5}{\lambda_i}} + c_6 \lambda \quad (7)$$

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda - c_7 \beta} - \frac{c_8}{\beta^3 + 1} \quad (8)$$

계수 $c_1 \sim c_8$ 은 풍력터빈의 다양한 블레이드 형상 설계 값에 따라서 달라지는 특성 계수이다. 풍력터빈의 최대 출력을 얻기 위해서는 블레이드 피치각을 고정시킨 상태에서 최대 출력계수 C_{Pmax} 값을 갖는 특정 주속비 λ_{opt} 로 회전할 수 있도록 회전속도를 제어한다.

또한 블레이드의 공기역학적 회전력 T_m [Nm]은 발전기와 연결된 축을 통해 식 (9)와 같이 전달된다.

$$T_m = \frac{P_m}{\omega_m} = \frac{1}{2} \rho \pi R^3 v_w^2 C_P(\lambda, \beta) \quad (9)$$

3.3 PMSG 모델링

최근 대형 풍력발전기에서 폭넓게 도입되고 있는 가변속 PMSG는 기어박스과 브러시가 불필요하여 높은 구조적 신뢰성과 영구자석 회전자 사용에 따른 여자 전원공급이 불필요하며, 전력변환 컨버터의 사용으

로 분산 전력망의 유효 및 무효전력의 유연한 제어가 가능한 장점을 가지고 있다. 반면에 복잡한 시스템 구조와 전력변환제어 시스템의 요구로 최적의 디자인과 해석을 위한 지속적인 개선이 필요하다.

PMSG의 수학적인 동적모델은 d-q 회전형 동기좌표계로 표현할 수 있으며, 3상 PMSG의 등가해석 모델을 그림 4와 같이 표현 할 수 있다.

여기에서 V_{sd} , V_{sq} , I_{sd} , I_{sq} , R_s 는 각각 고정자의 전압, 전류 및 권선저항이며, ω_e 는 전기적 회전 각속도이다. 그리고 L_{sd} , L_{sq} 는 고정자 권선의 누설 인덕턴스이고, L_{md} , L_{mq} 는 상호 인덕턴스이다. 그리고 ψ_m 은 쇄교 자속이다.

등가해석 모델을 정리하면, 다음과 같이 PMSG의 전압에 대한 미분방정식이 얻어진다.[6]

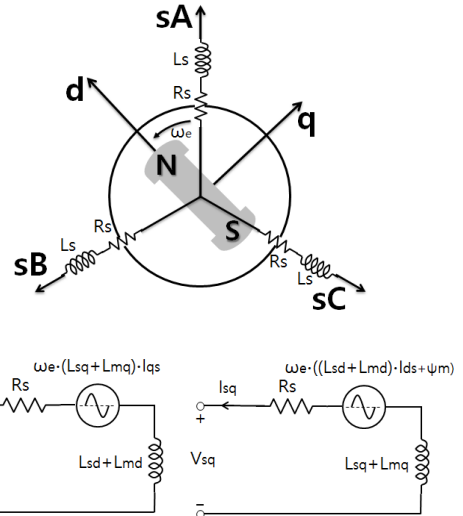


그림 4. PMSG 등가해석 모델
Fig. 4 PMSG equivalent circuit model

$$L_d \frac{dI_{sd}}{dt} = -V_{sd} - R_s I_{sd} - \omega_e L_q I_{sq} \quad (10)$$

$$L_q \frac{dI_{sq}}{dt} = -V_{sq} - R_s I_{sq} + \omega_e L_d I_{sd} + \omega_e \psi_m$$

여기에서 $L_d = L_{sd} + L_{md}$ 와 $L_q = L_{sq} + L_{mq}$ 이다. 또한 PMSG의 운전중 고정자 전류와 전기적 토크 사이의 선형적인 관계 특성을 가진 ZDC(Zero D-axis

Current) 제어를 위하여 $i_{sd}=0$ 인 상태에서 자극쌍 (pole pairs) p 인 발전기의 전기적 출력과 토크는 고정자 동손을 무시하고, 역률이 1인 경우를 고려할 경우 각각 다음과 같이 나타낼 수 있다[1], [6], [8].

$$P_e = \frac{3}{2} \omega_e \psi_m I_{sq} = T_e \omega_m = T_e \frac{1}{p} \omega_e \quad (11)$$

$$T_e = \frac{3}{2} p \psi_m I_{qs} = K_t I_{qs} \quad (12)$$

여기서 $K_t(1.5p\psi_m)$ 는 PMSG의 토크 상수로 고정자 q축 전류에 비례한다.

3.4 MPPT 제어 모델링

가변속 풍력터빈의 MPPT를 위해 최적의 회전자 각속도 ω_{mopt} 은 최대 출력값 P_{mppt} 를 통해서 다음 식과 같이 계산될 수 있다[1].

$$P_{mppt} = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 \left(\frac{\omega_{mopt} R}{\lambda_{opt}} \right)^3 C_{pmax} = K \omega_{mopt}^3 \quad (13)$$

$$\omega_{mopt} = \sqrt[3]{\frac{P_{mppt}}{K}} \quad (14)$$

즉, 풍력 터빈의 MPPT 곡선은 블레이드의 최적

회전 각속도 ω_{mopt} 의 3승에 비례함을 알 수 있다[7], [9]. 또한 발전기 축에 공급하는 토크는

$$T_m = K \omega_{mopt}^2 \quad (15)$$

와 같이 회전속도의 제곱에 비례함을 알 수 있다. 따라서 발전기의 마찰 손실을 무시할 경우 T_m 과 T_e 가 같게 되어, MPPT 제어를 위한 발전기 전류 기준 값은 식 (16)과 같이 설정 할 수 있다.

$$i_{qs}^e = \frac{1}{K_t} T_e \quad (16)$$

3.5 피치제어 모델링

피치제어는 정격 풍속보다 높은 풍속에서 풍력터빈의 출력을 일정하게 제어하기 위해 사용된다. 즉, 블레이드의 회전속도가 설정된 정격속도보다 증가할 경우 블레이드의 회전속도를 설정 범위 이내로 유지하기 위해 피치각을 연속적으로 제어한다. 또한 시스템 내부 고장이나 각종 응급 상황에서 피치각 제어를 통해 출력계수 C_p 를 감소시킴으로써 회전자의 고속 회전에 의한 기계적인 손상을 방지한다.

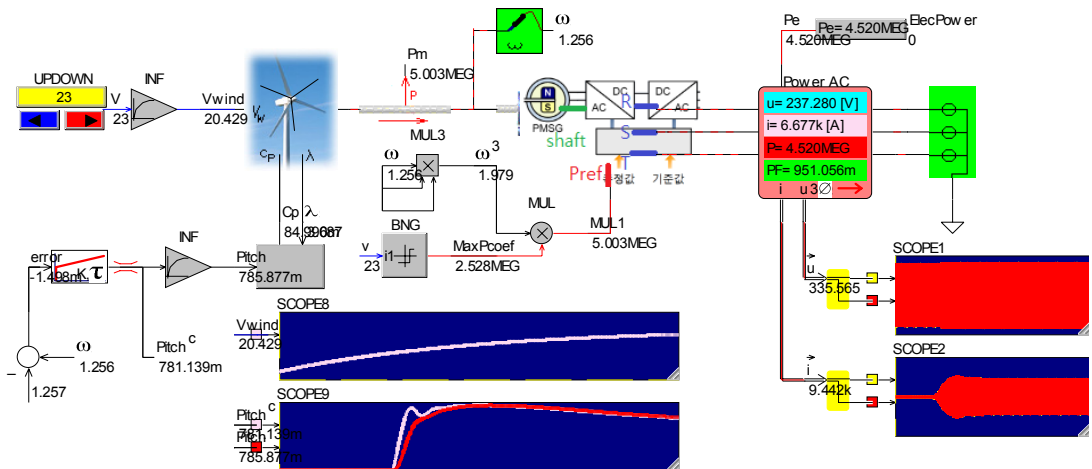


그림 5. CASPOC 풍력발전 시스템 시뮬레이션 모델
Fig. 5 Simulation model of wind power system using CASPOC

IV. 시뮬레이션

본 논문에서는 가변속 풍력발전 시스템의 시뮬레이션을 위해 표 1과 같은 기본 데이터를 가정하여 5MW 급 풍력터빈을 모델화 하였다. 표 1의 모델링 데이터는 상용화된 5MW급 풍력터빈 데이터들을 참고하여 블레이드 길이, 중량 및 정격속도 등을 선정하였고, 이를 바탕으로 출력계수 및 가상 운전 모드 조건을 계산하였다.

표1. 가상 풍력발전 시스템 모델링 데이터
Table 1. Modeling data of virtual wind power system

Rated power	5MW
Blade radius	60m(swept area = 11,309m ²)
Rated wind speed	12m/s
Blade weight	60ton(3-lobes)
Max. Power coef.	$C_{Pmax}=0.4946$
Optimal TSR	$\lambda_{opt}=7.854(@8m/s)$
Rated rotor speed	12rpm(1.257rad/s)
Blade inertia	36,000,000 kgm ²
C_p parameters	$c_1=0.730, c_2=103.8, c_3=0.4, c_4=5, c_5=21.95, c_6=0.0068, c_7=0.08, c_8=0.035$

최대 출력계수 C_{Pmax} 를 나타내는 풍속은 일반적으로 정격풍속의 $1/2 \sim 2/3$ 위치에서 나타난다. 따라서 본 논문에서는 정격풍속 12[m/s]의 5MW급 가상 블레이드에 대한 $2/3$ 위치인 8[m/s]에서 최대 출력점($C_{Pmax}=0.4946, \lambda_{opt}=7.854$)으로 가정하였다. 이러한 조건을 만족하는 출력계수 C_p 곡선을 수치적으로 근사화시킨 $c_1 \sim c_8$ 파라미터를 표 1과 같이 유도하였다.

이상과 같이 풍력발전기 가상 기본 데이터를 활용하여 그림 5와 같이 시뮬레이션 모델을 설계하였다. 전체적인 모델은 1차 적분기를 적용한 고정속 풍속모델, 출력계수를 포함한 풍력터빈 모델, MPPT모델, 그리고 피치제어 모델을 설계하였고, 발전기와 컨버터는 CASPOC 모델로 구성하여 시뮬레이션 하였다[9][14].

그림 6는 평균풍속 8[m/s]의 조건에서 Van der Hoven's 풍속 스펙트럼에 따라 5시간동안 계산된 풍속 모델링 결과로 본 논문에서는 풍속에 따른 난류성분 변화는 고려하지 않았다.

그림 7은 식 (7), (8)과 표 1에서 주어진 출력계수 파라미터를 적용하여 다양한 블레이드 피치각 β 에 대하여 주속비 λ 의 변화에 따른 C_p 값의 변화를 도식하였다.

모델링된 5MW 풍력터빈의 출력특성을 확인하기 위하여 풍속 및 터빈 회전속도에 따른 출력특성을 그림 8과 같이 구할 수 있었다. 또한 식 (13)에 표 1의 풍력터빈 데이터를 적용하여 MPPT 제어를 위한 계수 K 를 계산하였고, 이에 따른 최대 출력곡선을 같이 시뮬레이션 하였다. 이러한 풍력터빈의 최대출력추종 운전특성을 모의하기 위하여 발전기와 AC-AC 컨버터에 풍속변화에 따라 계산된 P_{mppt} 값을 전달하여, 최대 출력계수 C_{Pmax} 를 유지하면서 최대 전력을 추종하고 있음을 확인하였다.

또한 풍속 v_w 가 정격속도 12[m/s] 보다 크게 발생할 경우에는 피치각 β 를 증가시켜 출력을 일정하게 유지시키기 위한 피치제어 기능을 적용하였다. 본 논문에서는 정격 이상의 풍속에서 회전자 속도 ω 를 12rpm(1.257 rad/s)으로 일정하게 유지한 상태에서 풍속 v_w 이 증가함에 따라 주속비와 출력계수 C_p 가 동시에 감소하면서 풍력터빈 출력이 일정하게 유지됨을 확인하였다. 급격한 피치각변화에 따른 불안정한 출력특성을 개선하기 위하여 PI(비례적분) 제어기와 1차적분 필터를 적용하여 시뮬레이션 하였다.

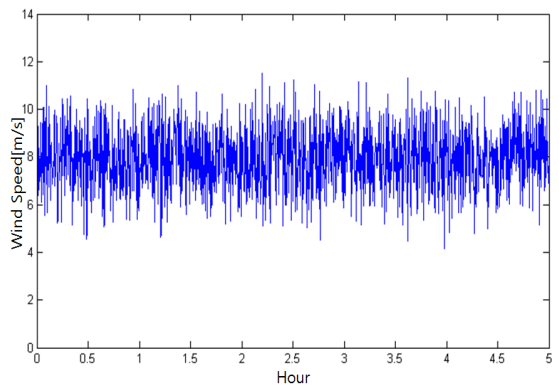


그림 6. 8[m/s] Van der Hoven's 풍속
Fig. 6 Van der Hoven's simulated wind at 8[m/s]

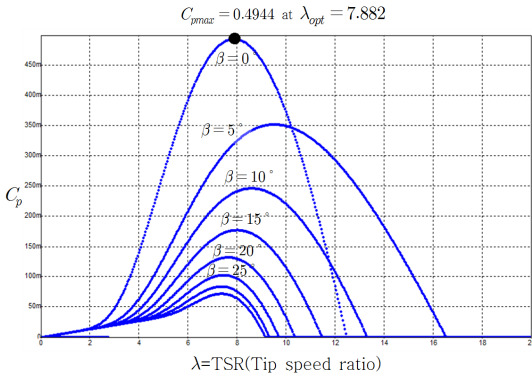


그림 7. 주속비 λ 변화에 따른 출력계수 C_p 특성
Fig. 7 Power coefficient characteristics vs. λ

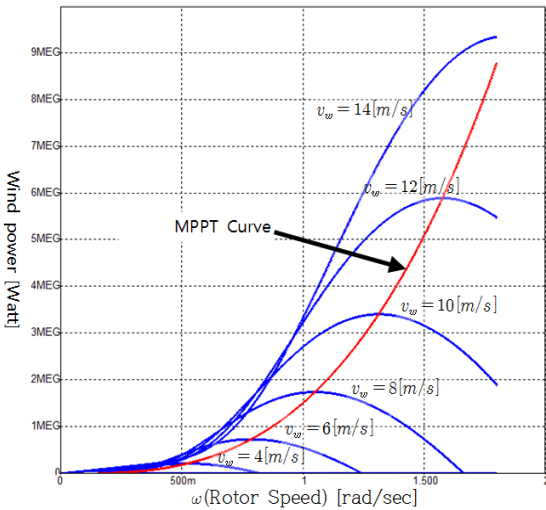


그림 8. 풍속 및 회전속도 변화에 따른 최대출력곡선
Fig. 8 Maximum power curve vs. wind and rotor speed

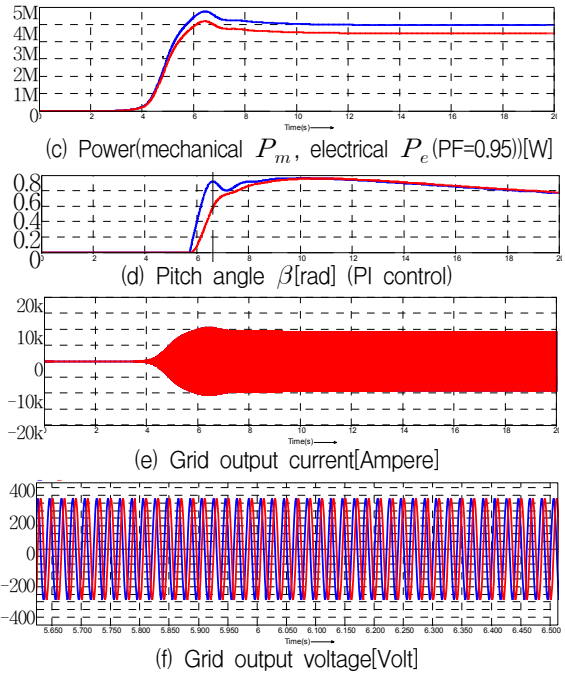
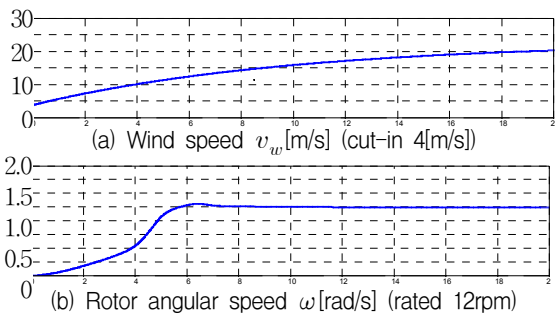


그림 9. 풍력발전 시스템 운전제어 및 출력
Fig. 9 Simulation results of wind power system

그림 9에 전체 시스템의 운전특성 시뮬레이션 결과를 나타내었다. 그림 9(a)의 풍속증가에 따라 그림 9(b)와 같이 정격이상의 풍속에서 회전자 각속도가 정격회전속도 12rpm으로 일정하게 유지됨을 확인하였고, 그림 9(c)와 같이 기계적 및 전기적 출력도 그림 9(d)의 피치제어에 의하여 정격 이상의 풍속에서 5MW 정격전력으로 안정적인 출력을 보임을 확인할 수 있다. 그림 9(e), (f)는 발전기와 컨버터를 통해 grid에 전달되는 출력 전류와 전압 파형을 나타내었다.

V. 결 론

본 논문에서는 기계적인 안정성과 신뢰성을 가지며, 다양한 동적변화에도 고품질 유지와 효율적인 전력생산이 가능하도록 가변속 풍력발전시스템 모델링과 운전제어 시뮬레이션을 수행하였다. 이를 위해 Van der Hoven's 풍속모델, 가변속 풍력터빈 모델, PMSG 제어모델, MPPT 및 피치제어 운전제어 모델

등을 구현하였고, 상용화된 5MW급 풍력터빈 데이터를 참고하여 실제적인 시스템과 유사하게 출력계수 및 가상 운전 조건으로 시뮬레이션 하였다.

모델링된 5MW급 가변속 풍력발전시스템의 시뮬레이션 결과 정격속도 12[m/s]까지 최대 출력계수를 유지하면서 최대 전력추종을 확인하였고, 12[m/s]이상의 고속 풍속에서는 능동적으로 피치 각도를 제어하여 안정적인 출력을 발생하고 있음을 확인하였다.

감사의 글

본 논문은 2015년도 청암대학교 학술연구비지원사업으로 수행되었습니다.

References

[1] B. Wu, Y. Lang, N. Zargari, and S. Kouro, *Power Conversion and Control of Wind Energy Systems*, New Jersey: Institute of Electrical and Electronics Engineers Press, 2011.

[2] M. Singh and S. Santoso, *Dynamic Models for Wind Turbines and Wind Power Plants*, Austin, Texas, National Renewable Energy Laboratory, 2011.

[3] C. Gavriluta, S. Spataru, and I. Mosincat, C. Citro, I. Candela, P. Rodriguez, "Complete methodology on generating realistic wind speed profiles based on measurements," *International Conference on Renewable Energy and Power Quality(ICREPQ)*, Santiago de Compostela, Spain, March, 2012.

[4] A. Betz, *Introduction to the Theory of Flow Machines*, Oxford: Pergamon Press, 1966.

[5] S. Heier, *Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems*, Chicester, U.K.: Wiley, 1998.

[6] S. Li, T. A. Haskew, and L. Xu, "Conventional and novel control design for direct driven PMSG wind turbines," *Electric Power Systems Research*, vol. 80, no. 3, 2010, pp. 328-338.

[7] H. Q. Minh, N. Frederic, E. Najib, and H. Abdelaziz, "Control of permanent magnet synchronous generator wind turbine for stand-alone system using fuzzy logic," *Atlantis press*, France, pp. 720-727, 2011.

[8] M. Hong, "Study of Maximum Power Point Tracking Controller for Wind Power System," Master's Thesis, *University of Ulsan*, 2010.

[9] A. Rolan, A. Luna, G. Vazquez, and D. Aguilar, "Modeling of a Variable Speed Wind Turbine with a Permanent Magnet Synchronous Generator", *International Symposium on Industrial Electronics 2009*, Seoul, Korea, July, 2009, pp. 734-739.

[10] S. K. Park, Y. Kim, K. Ban, and S. Song, "Cloud-based Intelligent Management System for Photovoltaic Power Plants," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 7, no. 3, 2012, pp. 591-596.

[11] S. Ku, K. Kim, J. Park, S. Hong, and K. Park, "Digital Asset Analysis Methodology against Cyber Threat to Instrumentation and Control System in Nuclear Power Plants," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 6, no. 6, 2011, pp. 839-847.

[12] Y. Yang, Y. Kim, J. Kwun, S. Ku, K. Kim, J. Park, S. Hong, and K. Park, "The Design of Operating System on Wind Power Plant," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 6, no. 1, 2011, pp. 135-141.

[13] P. Duijsen, P. Bauer, and F. Chen. "Modeling and simulation for wind energy." *Proceedings of the Taiwan power electronics conference & exhibition, 2006. Taiwan Power Electronic Association/IEEE Taipei*, Jan, 2006.

저자 소개



허현(Hyun Huh)

1992년 전북대학교 전기공학과 졸업 (공학사)

1994년 전북대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학석사)

1998년 전북대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학박사)

1999년~현재 청암대학교 신재생전기제어과 교수

1994.3~1995.12 전자부품기술연구원 Pre-Doc.

※ 관심분야 : 광통신시스템, 풍력, 태양광, 연료전지



이재학(JaeHak Lee)

1989년 중앙대학교 전기공학과 졸업
(공학사)

1991년 중앙대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학석사)

2005년 중앙대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학박사)

1999년~현재 청암대학교 소방안전관리과 교수

1990년~1996년 (주)이화전기공업 기술연구소

1996년 한국철도학회 학술이사

2007년 건축전기설비기술사

2010년 전기응용기술사

※ 관심분야 : 전력전자, 신재생에너지, 소방전기

