

## 작동 조건 변화에 따른 풍력발전 시스템의 동적 특성 해석

남윤수<sup>†</sup> · 윤태준\* · 유능수\*\*

(2008년 6월 18일 접수, 2008년 12월 15일 수정, 2008년 12월 15일 심사완료)

### Dynamic Characteristic Analysis of a Wind Turbine Depending on Varying Operational Conditions

Yoonsu Nam, Tai Jun Yoon and Neung Soo Yoo

**Key Words :** Variable Speed Pitch Regulated Control(가변속 피치제어), Wind Turbine(풍력발전 시스템), Dynamic Modeling(동적 모델링), Generator Torque Setting(발전기 토크 설정)

#### Abstract

A design methodology for control strategy and control structure gives a direct impact on wind turbine's performance and life cycle. A baseline control law which is a variable rotor speed and variable pitch control strategy is introduced, and a mathematic performance model of a wind turbine dynamics is derived. By using a numeric optimization algorithm, the steady state operating conditions of wind turbines are identified. Because aerodynamic interaction of winds with rotor blades is basically nonlinear, a linearization procedure is applied to analyze wind turbine dynamic variations for whole operating conditions. It turns out the wind turbine dynamics vary much depending on its operating condition.

#### 1. 서 론

풍력발전 시스템(WT, wind turbine)의 제어 전략(strategy)과 이를 구현하는 제어 시스템 구조(structure)의 선정은 풍력 발전 시스템의 효율과 생산 전력의 품질, 그리고 운전 수명을 결정하는 중요한 요소이다. 1950년대 후반부터 사용된 농형 유도발전기(squirrel cage induction generator)는 간편하면서 잔 고장 없이 바람에너지를 회수할 수는 있었지만,<sup>(1)</sup> 로터 회전 속도 범위가 극히 제한된 정속(fixed speed) 발전기이기 때문에 바람에너지 회수 효율을 최적으로 유지할 수가 없었다. 이러

한 단점을 해결하기 위하여, 풍속에 비례하여 로터의 회전 속도를 증가시키는 가변속(variable speed) 제어 방식이 개발되었다.<sup>(2)</sup> 한편, 정격 풍속(rated wind speed) 이상의 바람에 대하여, WT 구조물의 안전성을 고려하여, 발전기의 출력을 일정한 값, 즉 정격 출력(rated power)으로 제한시킨다.

일반적으로 풍속이 증가되면, 회전날개 단면에서의 받음각(angle of attack)도 증가 되어 날개의 양력(lift)을 증가시킨다. 그러나, 받음각이 어느 한도 이상으로 커지면 실속(stall) 현상이 발생하여 오히려 양력이 작아지게 된다. 이에 따라 날개를 회전시키는 회전 토크도 작아지게 되는 데, 이러한 현상을 이용하여 발전기의 출력을 정격 이하로 제한하는 기법이 실속을 이용한 출력 제어 방식이다.<sup>(3)</sup> 그러나, 받음각이 커지게 되면, 날개 단면에 작용하는 항력(drag)도 계속 증가하게 되는데, 이것은 풍력발전 시스템의 기계적 하중을 크게 하여, 날개, 기어 트레인(gear train), 그리고 타워의 수명 단축을 촉진할 뿐 아니라 생산되는 전력의 품질도

<sup>†</sup> 책임저자, 회원, 강원대학교 기계·메카트로닉스 공학부

E-mail : nys@kangwon.ac.kr

TEL : (033)250-6376 FAX : (033)257-4190

\* 교신저자, 강원대학교 대학원 메카트로닉스공학과

\*\* 강원대학교 기계·메카트로닉스공학부

저하시킨다. 따라서, 정격 풍속이상의 바람조건에서는 회전 날개의 피치각을 조절하여 날개 단면의 받음각을 감소시켜, 발전기 출력을 풍속에 무관한 일정한 값으로 유지시키는 운전 방식이 사용되며, 이러한 운전방식을 가변 피치(variable pitch) 제어라 한다. 에너지 회수 효율은 최대화하면서, 동시에 기계적 하중은 최소화시킬 수 있는 가변속 피치제어(variable speed and pitch regulated control) 방식은 점차로 대형화하는 풍력발전 시스템에 대한 일반적인 제어 구조이다.<sup>(3,4)</sup> 즉, 정격 풍속 이하의 바람에서는 풍속 변화에 대하여 날개의 회전속도를 최적인 상태로 가변(variable speed)시키고, 정격 풍속 이상에서는 회전 날개의 피치 각을 조절(pitch regulated)하여 발전기 출력을 유지하는 운전 방식이다. 이 방식은 실속 방식보다 받음각이 훨씬 작은 영역에서 운전되므로, 항력에 의한 풍력발전 시스템의 기계적 하중은 실속방식에 비하여 훨씬 작게 된다.

본 논문은 가변속 피치제어 방식을 적용하는 수 MW 풍력 발전 시스템에 대한 제어 전략을 소개하고,<sup>(2)</sup> 그 동적 특성에 대한 해석 결과를 정리한다. 즉, 풍력발전 시스템의 일반적인 제어 구조를 살펴보고, 제어기 설계를 위한 풍력 발전 시스템의 동적 모델을 유도한다. 여기서, 제시된 운동 모델은 풍력 발전 시스템의 성능 해석에만 적합한 모델이며, 풍력발전 시스템의 구조적 변형은 고려되지 않았다. 한편, 회전 날개의 공기역학 특성 그리고 유도 발전기의 발전 특성은 매우 비선형이고, 풍력 발전 시스템의 운전 조건은 이 비선형 영역 내에서 광범위하게 변화한다. 제어기 설계에 앞서, 풍력 발전 시스템의 전체 운전 범위에 대하여 풍력 발전기의 동적 특성이 어떻게 변화되는지를 파악하는 것은 효율적인 제어기 설계에 매우 중요한 단계이다. 본 논문에서는 풍력 발전 시스템의 동적 모델과 2.75MW 발전기 공력 특성에 기초하여, 풍력 발전기의 전체 운전 영역을 정의하고, 이 영역 내에서 풍력 발전기의 동적 특성이 어떻게 변화되는 지 논의한다.

## 2. 풍력발전 시스템의 동적 모델

이 절에서는 풍력발전 시스템의 성능 특성해석에 적합한 동적 모델을 유도한다.<sup>(5)</sup> 따라서, 회전 날개의 공탄성 모델이나 타워의 구조 모델 등은 고려되지 않는다. Fig. 1은 풍력발전 시스템의 회전 날개에서 발전기까지의 구조를 간략화시켜 표현한 것이다. 여기서,  $J_r$ 은 3개 회전 날개,

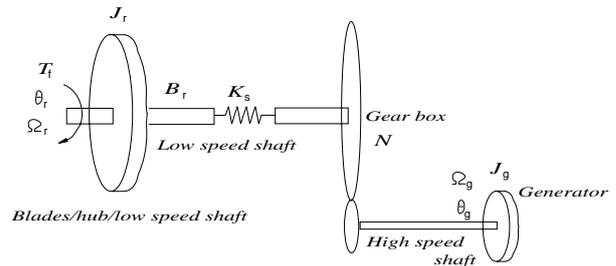


Fig. 1 Dynamic performance model of a wind turbine

허브, 그리고 저속 회전축(low speed shaft)의 효과를 모두 고려한 관성질량이고,  $J_g$ 는 발전기 회전 축의 관성질량을 나타낸다. 3개 회전 날개에 의한 공기 역학적 결과로 저속 회전축에는 다음 식과 같이 주어지는 공력 토크(aerodynamic torque)가 발생된다.

$$T_f = \frac{1}{2} \rho \pi R^3 \frac{C_p(\lambda, \beta)}{\lambda} v^2 \quad (1)$$

여기서,  $\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$ , 공기 밀도

$R$  = 회전날개 반경

$\lambda = \Omega R / v$ , 선단속도비(tip speed ratio)

$\Omega$  = 날개 회전속도

$v$  = 풍속

$C_p$  = 출력 계수(power coefficient)

$\beta$  = 날개의 피치각

Fig. 1의 각 관성질량에 대한 운동 방정식은 아래와 같이 된다.

$$J_r \frac{d\Omega_r}{dt} = T_f - k_s \left( \theta_r - \frac{1}{N} \theta_g \right) - B_r \Omega_r \quad (2)$$

$$J_g \frac{d\Omega_g}{dt} = \frac{k_s}{N} \left( \theta_r - \frac{1}{N} \theta_g \right) - B_g \Omega_g - T_e$$

여기서,  $k_s$  = 저속 회전축의 비틀림 계수

$N$  = 증속기의 증속비

$B_r, B_g$  = 저속, 발전기 회전축 댐핑계수

Fig. 2는 본 논문에 다루는 풍력발전 시스템의 출력 계수,  $C_p$ 를 선단속도와 피치각의 함수로 그린 것이다. 한편, Fig. 3은 피치각이  $0^\circ$ 인 조건에서 식 (1)로 주어지는 공력 토크를 풍속의 함수로 다시 그린 것이다. 즉, 맨 아래 곡선부터 2, 4, 6, 8, 10, 12, 그리고 14m/s의 풍속에 대한 공력 토크를 그린 것이다. 여기서, 점선은 발전기의 정격 출력인 2.75MW를 표시하며, 점과 함께 표시된 실선은 출력파워 계수,  $C_p$ 가 최대가 되는

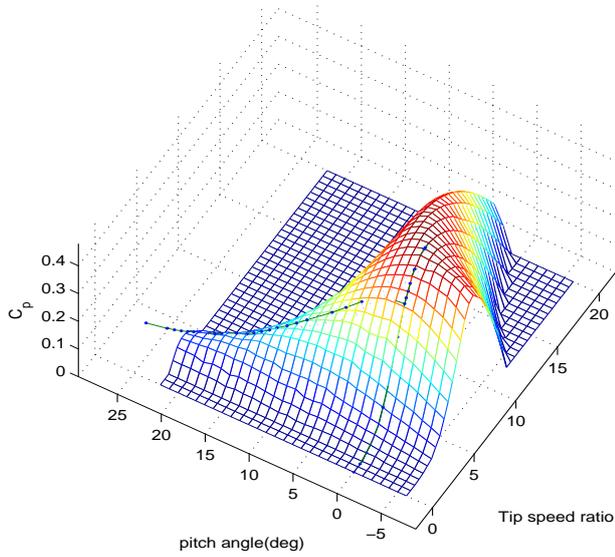


Fig. 2 Power coefficient of 2.75MW wind turbine

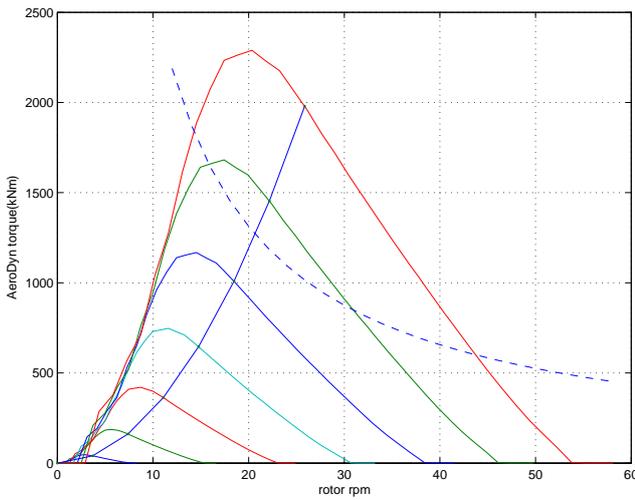


Fig. 3 Aerodynamic torque and rotor speed with varying wind speeds

조건을 나타낸다. 식 (1)과 Fig. 2로부터 저속 회전축에 걸리는 공력 토크는 비선형 관계식임을 알 수 있다. 따라서, 선형 해석 및 선형 제어기 설계를 위하여, 이 식을 다음과 같이 선형화할 필요가 있다.

$$\Delta T_f \approx \left( \frac{\partial T_f}{\partial \Omega_r} \right)_0 (\Omega_r - \Omega_{r0}) + \left( \frac{\partial T_f}{\partial v} \right)_0 (v - v_0) + \left( \frac{\partial T_f}{\partial \beta} \right)_0 (\beta - \beta_0) \quad (3)$$

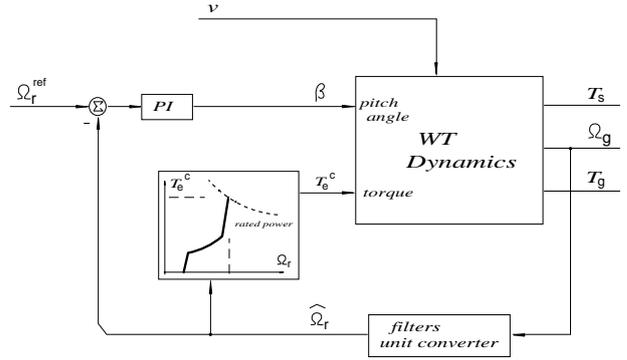


Fig. 4 Control law structure of a wind turbine

위 식에서  $\left( \frac{\partial T_f}{\partial v} \right)_0$ 의 값은 식 (2)의  $B_r$ 과 같은 물리적 의미를 갖는데, 이 값은 풍력 발전 시스템의 작동점이 변하면 함께 변한다. 특히, 이 값이  $B_r$ 보다 큰 양수의 값을 갖게 되는 운전조건에서는, 소위 “음의 댐핑(negative damping)” 조건이 되어 식 (2)로 표현되는 풍력 발전 시스템의 운동 방정식이 불안정해지게 된다.

### 3. 풍력발전 시스템의 동적 특성 해석

#### 3.1 풍력발전 시스템의 제어구조와 전략

풍력 발전 시스템의 일반적인 제어 구조가 Fig. 4에 도시되어 있다.<sup>(2)</sup> 크게 발전기 토크 제어 루프와 피치 각도 제어 루프로 구성된다. 그림 하단부의 토크 제어 루프는 정격 풍속 이하의 운전 조건에서 활용된다. 즉, 피치 각도는 일정한 값, 보통 0°로 유지시킨 상태에서, 발전기의 토크는 발전기(또는 회전 날개) 회전속도의 함수로 Fig. 4와 같이 미리 프로그램된 값을 추종하도록 제어된다. 한편, 풍속이 정격 풍속보다 크게 되면, 회전 날개의 속도는 일정한 정격 속도를 유지되도록 피치 루프가 작동한다. 이와 함께, 정격 파워 출력 생산을 위하여, 발전기 토크 목표치 설정 값( $T_e^c$ )도 정격 토크 값으로 일정하게 유지시키도록 제어된다. 풍력발전 시스템의 제어 전략을 요약하면, 정격 풍속을 기준으로 아래와 같이 간략하게 다시 정리할 수 있다.

- 정격 풍속 이하의 바람 조건: 피치각 고정, 가변속 날개 회전에 의한 발전기 토크 제어

- 정격 풍속 이상의 바람 조건: 날개 회전 속도 고정, 피치 제어에 의한 피치각 가변

3.2 작동점 변화에 따른 풍력발전 시스템의 동적 특성 해석

이제 위 절에서 제시된 제어 전략을 추종하기 위하여, 풍력발전 시스템은 어떤 운전 조건으로 운영되어야 하는가에 대하여 논의한다. 일정한 속도의 바람이 지속적으로 불어 온다면, 풍력발전 시스템의 모든 운전상태는 정상상태가 된다. 즉, 특정 풍속에 대하여 저속 회전속이나 발전기 회전속 모두 일정한 속도로 회전하게 된다. 풍속이 일정하면, 식 (2)는 아래와 같이 변화된다.

$$\frac{1}{2} \rho \pi R^3 \frac{C_p}{\lambda} v^2 - B_r \Omega_r - N B_g \Omega_g - N T_e = 0 \quad (5)$$

여기서,  $T_e$  는 발전기 토크로서, 정상상태에서는 Fig. 4 에서 정의된 발전기 토크 설정 값과 동일하며, 회전 날개 속도,  $\Omega_r$  의 함수가 된다. 또한,  $C_p$  는 Fig. 2 처럼 선단 속도비와 피치각에 관한 비선형 함수이다. 식 (5)에 대한 MATLAB/SIMULINK 모델이 Fig. 5 에 그려져 있다. 풍속이 일정한 값으로 주어질 때, 식 (5)를 만족하는 회전날개의 정상상태 회전속도, 그리고 날개의 피치각을 찾아야 한다. 이 문제는 MATLAB/SIMULINK 를 이용한 수학적 최적화

문제로 변환해서 풀 수 있다. 즉, 주어진 풍속에 대하여, Fig. 5 의 SIMULINK 모델 출력 1 의 크기, 다시 말하면 식 (5)의 좌변의 크기를 최소화하는 날개 회전속도 또는 피치각을 구하는 문제이다. MATLAB 의 최적화 툴박스(optimization toolbox)를 이용하여 이 문제를 해결할 수 있다.

MATLAB 을 이용한 최적화 해석 결과가 Fig. 6 와 7 에 도시되었다. Fig. 6 는 전체 풍속 범위에 대하여, 식 (5)를 만족하는 풍속, 날개의 회전속도, 그리고 날개의 피치각 사이의 관계를 3 차원 그래프로 나타낸 것이다. 정격 풍속(=12.3 m/s) 이하의 바람 조건에서 0°의 피치 각도를 유지하는 반면, 날개의 회전 속도는 풍속에 따라 변하고 있음을 볼 수 있다. 또한, 정격 풍속 이상의 바람 조건에서는 날개 회전속도가 정격 회전 속도, 15.54 rpm 으로 고정되어 있지만, 피치각은 풍속에 따라 계속 증가하고 있다. Fig. 7 은 풍속 변화에 따른 파워 계수,  $C_p$  의 변화를 나타내는데, 풍속이 대략 5.6m/s - 7.8m/s 사이에서 최대 파워 계수, 0.48 의 값을 갖게 된다. 이후의 풍속에서는 그 값이 계속 감소하여, 정격풍속 이상에서는 피치각 변화로 재빠르게 0 으로 근접한다. Fig. 2 에 그려진 점들은 주어진 풍속에 대하여 식 (5)을 만족하는 풍력발전 시스템의 정상상태 운전 조건을 의미하는데, 이 것은 Fig. 7 의  $C_p$  값을 피치각과 선단 속도비의 함수로 3 차원 메쉬 위에 다시 그린 것이다.

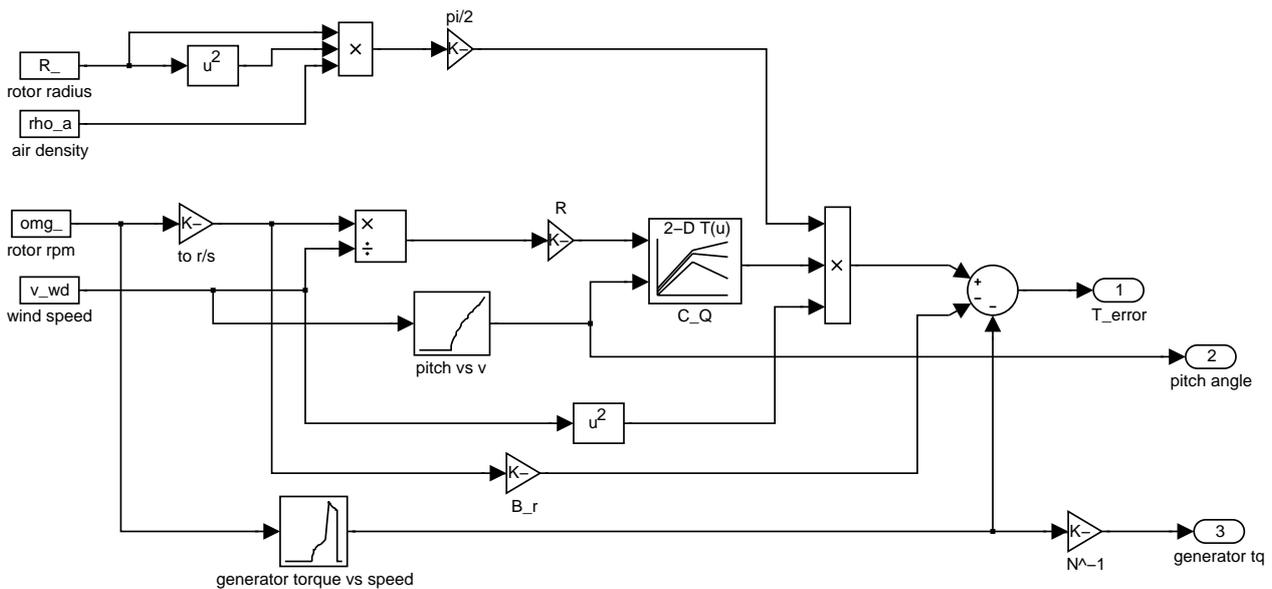
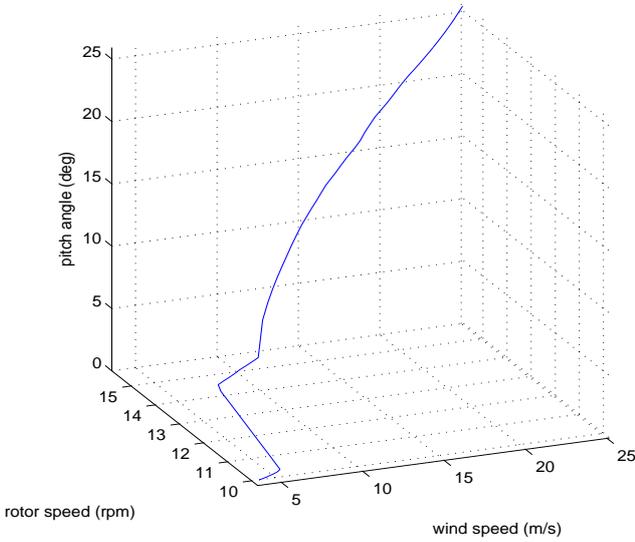
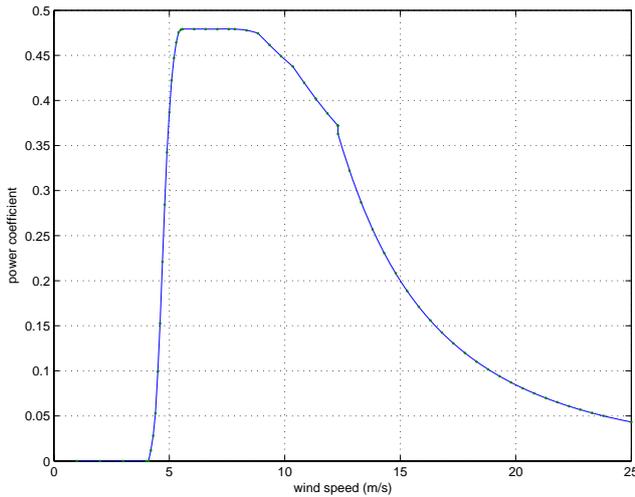


Fig. 5 SIMULINK model of Eq. (5)

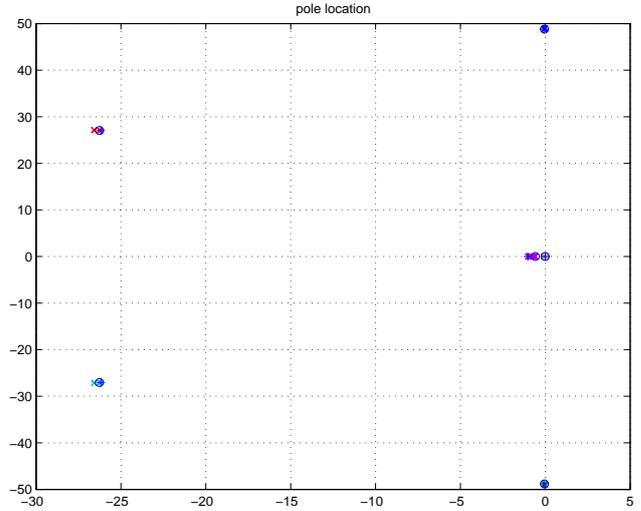


**Fig. 6** Steady state operational conditions of a wind turbine

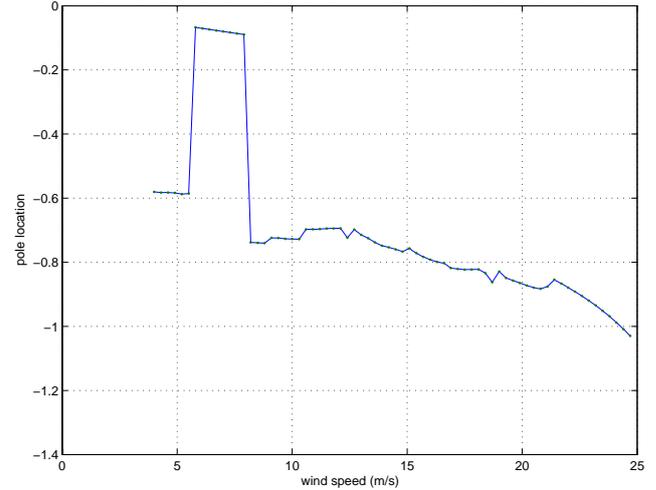


**Fig. 7** Power coefficient variation with wind speeds

지금까지 Fig. 4 의 발전기 제어 전략을 수행하기 위하여, 풍력 발전 시스템의 운전 조건이 어떻게 변화해야 하는 가를 살펴보았다. 풍력발전 시스템의 피치 제어기 설계에 앞서서, 시스템 작동 조건 변화에 따라 풍력 발전 시스템의 동적 특성이 얼마나 변화되는 지를 파악하는 것은 매우 중요하다. 앞서도 언급되었지만, 식 (1)로 표현되는 저속 회전축에 작용하는 공력 토크는 비선형이다. 따라서, 식 (3)과 같은 선형화 해석이 필요하다. 각각의 작동 점에 대하여 식 (3)의 선형화 계수를 계산하고, 그 결과를 식 (2)의 동적 모델, 그리고 Fig. 4 의 발전기 제어전략과 결합하면 풍력발전 시스템의 동적 특성을 파악할 수 있다. 이 해석의 결과가 Fig. 8



**Fig. 8** Open loop pole variation of a pitch control loop with changing operating conditions



**Fig. 9** Dominant open loop pole variation with wind speed

에서 Fig. 10 까지 도시되어 있다. 즉, 이 결과는 Fig. 4 의 제어 구조에서 토크 제어루프는 포함하고, 피치 제어루프는 개방시킨 조건에서 얻은 데이터 들이다. Fig. 8 은 Fig. 6 으로 주어지는 풍력발전 시스템의 운전 조건 변화에 대하여 개루프 피치 루프의 극점들이 어떻게 변화하는 가를 보여주고 있다. 전체 풍속 영역에 대하여 개루프 피치 제어 시스템의 극점들은 크게 변하지 않음을 알 수 있다. 이 그림에서 'o'로 표시된 극점은 최저 풍속(4 m/s)에 대한 극점, 그리고 '+'로 표시된 극점은 최대 풍속(24.7 m/s)에서의 극점을 각각 표시한다.

-27 ± j27 근처에 존재하는 극점은 발전기 토크 제어 서브 시스템의 특성을 표시하는데, 풍력발전 시스템의 운전조건이 변화해도 그 특성은 거의 변화되지 않고 있음을 볼 수 있다. ±j50 근처에 존재하는 낮은 댐핑을 갖는 극점들은 저속 회전축에 대한 토션 방향 1 차 진동 모드를 나타낸다. 역시, 운전 조건 변화에 영향을 받지 않는다. s-평면에서 원점 근처를 확대해 보면, 원점에 있는 고정 극점, 그리고 매우 낮은 주파수의 가변 극점이 하나씩 존재하는 것을 알 수 있다. Fig. 9 에 풍속 변화에 따른 이 가변 극점의 변화를 도시하였다. 풍속이 증가되면, 이 극점은 원점에서 멀어진다. 이 극점은 개루프 피치 제어 응답특성을 결정하는데, 풍속이 커질수록 피치각 변화에 따른 풍력발전 시스템의 응답 속도가 빠르게 됨을 의미한다. 이 그림에서 특별한 점은 풍속이 (5.8 - 8.2) m/s 의 영역에서, 즉 풍력발전 시스템이 최대  $C_p$ 로 작동되는 조건에서 극점이 다시 원점에 가까워 진다는 것이다.

이제 풍속 변화에 대하여 개루프 피치 제어 시스템의 주파수 응답이 어떻게 변하는 지 살펴 보자. Fig. 4 에서 토크 루프가 닫힌 상태에서 개루프 피치제어 루프 전달함수는 아래의 식으로 표현된다.

$$\begin{Bmatrix} T_s(s) \\ \Omega_r(s) \\ \Omega_g(s) \\ T_e(s) \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11}(s) & G_{12}(s) \\ G_{21}(s) & G_{22}(s) \\ G_{31}(s) & G_{32}(s) \\ G_{41}(s) & G_{42}(s) \end{bmatrix} \begin{pmatrix} v(s) \\ \beta(s) \end{pmatrix} \quad (6)$$

피치 루프 설계에 중요한 역할을 하는  $G_{22}(s) = \Omega_r(s) / \beta(s)$  의 주파수 응답은 아래의 Fig. 10 과 같다. 시동 풍속(cut-in wind speed)에서 정지 풍속(cut-out wind speed)까지의 총 70 개 풍속 조건 각각에 대한 주파수 응답을 겹쳐서 그린 것이다. 풍속 변화에 대한 주파수 응답의 변화 정도가 매우 큼을 볼 수 있으며, 세부적으로 분석하면 다음의 특성을 이끌어 낼 수 있다.

- 1) 70 개 작동점들은 다음과 같이 두 가지로 분류할 수 있다. 0.1 r/s 근처의 느린 극점을 갖는 그룹과 0.7 - 0.9 r/s 근처의 극점을 갖는 그룹으로 분류된다. Fig. 9 을 참조하면, 느린 극점을 갖는 그룹은 풍속이 5.8 - 8.2 m/s 인 영역으로 풍력발전 시스템이 최대  $C_p$  조건으로 작동하는 풍속영역에 해당한다.
- 2) Fig. 10 에서 DC 게인이 -40dB 이하인 작동 조건은 정격 풍속(12.3 m/s) 이하의 바람 조건에

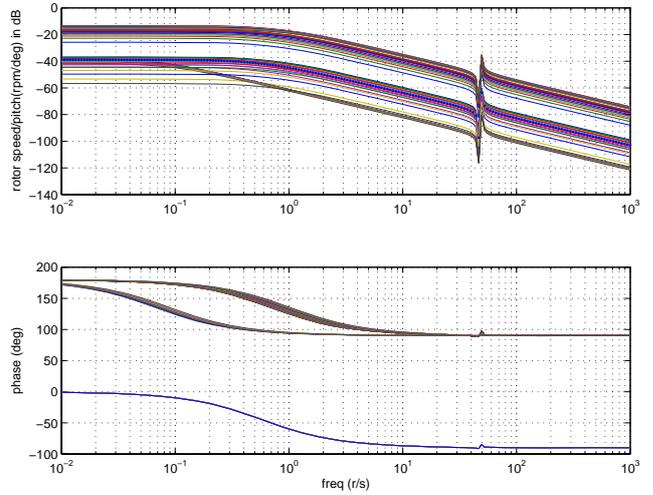


Fig. 10 Frequency response plot of  $G_{22}(s)$  for varying operating conditions

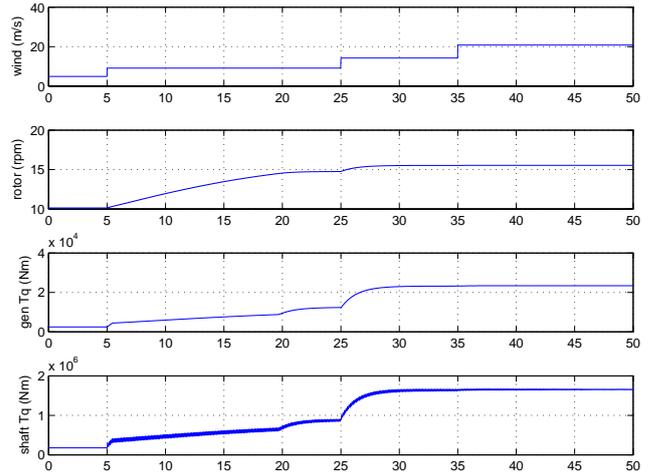


Fig. 11 Time simulation results

해당한다. 여기서, 5.8 - 8.2 m/s 의 풍속 영역은 제외된다.

3) 위상 선도가  $0^\circ$  에서 시작하는 운전 조건은 풍력발전 시스템이 시동풍속(4 m/s) 근처에서 작동할 때에 대응한다.

다음으로 계단(step)형 풍속 변화에 대한 개루프 비선형 시뮬레이션 결과를 살펴 보자. Fig. 11 에 이에 대한 결과가 도시되어 있다. Fig. 11 의 첫 번째 그림은 풍속의 변화를 나타낸다. 즉, 처음 5 초간은 4.9 m/s, 5 초에서 25 초 구간은 9.1 m/s, 25 초에서 35 초까지는 14.2 m/s, 그리고 마지막 50 초까지는 20.8 m/s 의 풍속 변화를 가정하였다. 이 때, 피치 각은 Fig. 6 의 정상상태 작동 조건의 값들이 입력되었다. Fig. 11 의 두 번째 그림은 로터의 회전 속도를 나타낸다. 각 풍속에

대응하는 날개의 정상상태 회전 속도는 10.132, 14.755, 15.523, 그리고 15.538 rpm 에 해당한다. 풍속이 4.9 m/s 에서 9.1 m/s 으로 바뀌었을 때, 로터 회전 속도, 발전기 토크, 주축 비틀림 모멘트의 응답은 타 응답 조건에 비하여 매우 느리다. 풍속 변화 후, 거의 17 초가 지난 후, 정상상태에 도달 함을 볼 수 있다. 이 것은, 앞서 논의되었던 (5.8 - 8.2) m/s 의 풍속 영역에서 풍력발전 시스템 특성이 매우 느리기 때문에 발생된 현상이다(Fig. 9 참조). Fig. 11 의 세 번째 및 네 번째 그림은 발전기 토크와 주축의 비틀림 모멘트를 나타낸다. 앞서 유도된 식 (2)에서 비틀림 모드의 댐핑 값을 0 으로 가정하였기 때문에, 비틀림 모멘트 응답에서 진동이 계속되고 있음을 볼 수 있다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 가변속 피치제어 풍력 발전 시스템의 제어 전략과 제어 구조가 논의 되었다. 또한, 풍력 발전 시스템의 성능해석에 적합한 수학적 모델이 유도되었다. 제어 전략, 제어 구조, 그리고 수학적 모델링을 결합하여, 풍속 변화에 따라서 풍력 발전 시스템의 운전 조건이 어떻게 변화되는 지 분석하였다. 또한, 비선형 공기역학 특성을 선형화시켜, 풍력발전 시스템 운전조건 변화에 따른 개루프 시스템의 동적 특성이 어떤 변화를 하게 되는 지 해석적으로 분석하였다. 본

논문에서 다룬 2.75MW 풍력발전 시스템의 경우, 최대  $C_p$  조건으로 작동되는 풍속 영역에서 그 응답 특성이 가장 느린 것을 알 수 있었으며, 풍속 변화에 따라서 풍력발전 시스템의 동적 특성은 매우 많이 변화하는 것을 확인하였다.

#### 후 기

본 결과물은 지식경제부의 출연금으로 수행한 에너지자원인력양성(학술진흥) 사업의 연구결과입니다.

#### 참고문헌

- (1) Stiesdal, H., 1999, "The Wind Turbine Components and Operation," Bonus Energy A/S, pp. 1~24.
- (2) Van der Hooft, E.L., Schaak, P. and van Engelen, T. G., 2003, "Wind Turbine Control Algorithm," ECN-C-03-111.
- (3) Bianchi, F. D. and Battista, H. D., 2007, "Wind Turbine Control Systems Principles, Modeling and Gain Scheduling," Springer.
- (4) Boukhezzar, B., Lupu, L., Siguerdidjane, H., Hand, M., 2007, "Multivariable Control Strategy for Variable Speed, Variable Pitch Wind Turbines," *Renewable Energy*, Vol. 32, pp. 1273~1287.
- (5) Leithead, W. E., and Connor, B., "Control of Variable Speed Wind Turbines: Dynamic Models," 2000, *Int. Journal of Control*, Vol. 72, No. 13, pp. 1173~1188.