한국신·재생에너지학회 2007년도 춘계학술대회논문집 pp.374~377

풍력 시스템 하중 절감을 위한 피치 제어에 관한 연구

김 성호[1], 윤 용하[2], 이 현주[3], 최 원호[4], 이 승구[5]

A Study on Pitch Control for Load - Reducing of Wind Turbine

Sungho Kim, Yongha Yoon, Hyunjoo Lee, Wonho Choi, Seungkuh Lee

Key words : pitch control(피치 제어), wind turbine(풍력 터빈), blade model(블레이드 모델), blade element momentum theory(블레이드 요소 운동량 이론), load - reducing (하중 절감), aerodynamics(공기 역학)

Abstract : This paper deals with a pitch control for reducing load of the wind turbine system. To make a model of the wind turbine system, the Momentum Theory and Blade Element Theory are used. Considering wind shear, wind model was also built. Due to a difference of the wind speed between upper parts and lower parts of the sweep area, overturning moment of the wind turbine is generated. So, in this paper through analyzing of the system model of the wind turbine, a control algorithm which was able to achieve both maintaining power and reducing overturning moment was proposed. Using matlab simulink, controller performance was verified.

Nomenclature

V : wind speed, m/s
R : rotor radius, m
a : axis induction factor
a' : angular induction factor
c : aerofoil chord length, m
C_L : lift coefficient
C_D : drag coefficient
Ω : blade rotational speed, rad/s
λ : tip speed ratio
α : angle of attack
β : pitch angle
θ : twist angle
σ : local solidity
r : blade element radius, m
P : power, W
T : thrust force, N

subscript

NWP : Normal wind profile

1. 서 론

현재 대부분의 풍력 발전 시스템은 출력 제어를 위하여 피치 제어 방식을 사용하고 있다. 이 피치 제어는 정격풍속 이상, 종단풍속 이하의 영역에서 블레이드의 피치각을 제어함으로써, 출력을 정격으로 유지하여, 출력의 효율성과 발전기의 안정성을 동시에 향상시키는 방식이다.

풍속은 일반적으로 높이에 따라 증가하는 경향을 보인다. 이로 인하여 로터 블레이드(rotor blade) 상단과 하단 사이에 가해지는 하중의 불균형이 발생한다. 불균형한 하중으로 타워를 전복시키려는 모멘트 하중이 발생하게 되는데, 이때 발생하는 최대 모멘트 하중을 감소시킨다면

1) 효성 중공업연구소
E-mail : nomar05@hyosung.com
Tel : (02)707-4303 Fax : (02)707-4398
2) 효성 중공업연구소
E-mail : yongha@hyosung.com
Tel : (02)707-4302 Fax : (02)707-4398
3) 효성 중공업연구소
E-mail : brocken@hyosung.com
Tel : (02)707-4364 Fax : (02)707-4398
4) 효성 중공업연구소
E-mail : choiwh@hyosung.com
Tel : (02)707-4370 Fax : (02)707-4398
5) 효성 중공업연구소
E-mail : sklee1@hyosung.com
Tel : (02)707-4301 Fax : (02)707-4398

풍력 터빈의 설계, 제작 시 소요되는 비용을 절감할 수 있다.

본 연구에서는 풍력 시스템의 출력량의 크기를 크게 변화시키지 않는 범위 내에서 모멘트 하중의 절감을 위한 피치각 제어 알고리즘을 제안하고, 이를 시뮬레이션으로 검증한다.

2. 풍력 시스템 모델링

본 연구에서는 풍력 터빈의 블레이드와 허브(hub)만을 고려하여 풍속과 블레이드의 피치각을 입력하였을 때, 로터의 출력과 허브에서의 모멘트의 크기를 출력하는 시스템을 모델링하였다.

2.1 블레이드 모델

블레이드 요소 운동량 이론(Blade element momentum theory)에 의하여 축방향 유도 계수 a와 접선방향 유도계수 a'를 식 (1)과 식(2)의 반복 계산을 통하여 얻을 수 있다.

$$\frac{4a}{1-a} = \sigma\, C_L \frac{cos\phi}{sin^2\phi}\left(1+\frac{C_D}{C_L}tan\phi\right) \qquad (1)$$

$$\frac{4a'}{1-a'} = \frac{\sigma\, C_L}{cos\phi}\left(1-\frac{C_D}{C_L}\frac{1}{tan\phi}\right) \qquad (2)$$

로터가 회전하면서 발생하는 상대속도와 로터 회전면 사이의 각을 아래의 식(3)과 같이 표현할 수 있고, 이 각에서 피치각과 블레이드 형상에 따라 나타나는 트위스트 각의 합을 빼면 영각이 된다.

$$\phi = tan^{-1}\left(\frac{1-a}{1+a'}\frac{1}{\lambda_r}\right) \qquad (3)$$

$$\alpha = \phi - (\beta+\theta) \qquad (4)$$

이 때의 양력계수와 항력계수는 식(5)와 같이 영각의 함수로 나타낼 수 있다.

$$C_L = f(\alpha)\ ,\ C_D = f(\alpha) \qquad (5)$$

블레이드 모델에 의하여 출력되는 저속 축에서의 출력값은 식(6)과 같다.

$$P = \frac{\rho A V^3}{2}\int_0^{\lambda} a'(1-a)\lambda_r^3 d\lambda_r$$

$$= \frac{\rho A V^3}{2}\sum_{n=1}^{25} a'(1-a)\frac{2\Omega^2(r_n^4 - r_{n-1}^4)}{V^2R^2} \qquad (6)$$

같은 동심원 상의 지점이라도 풍속이 높이에 따라 다르므로, 발생하는 추력의 크기 또한 달라진다. 이를 위하여 블레이드를 길이방향으로 25개, 동심원 상에서 4개, 총 100개의 요소로 나누었고, 각 파트에 대한 추력을 구하였다.

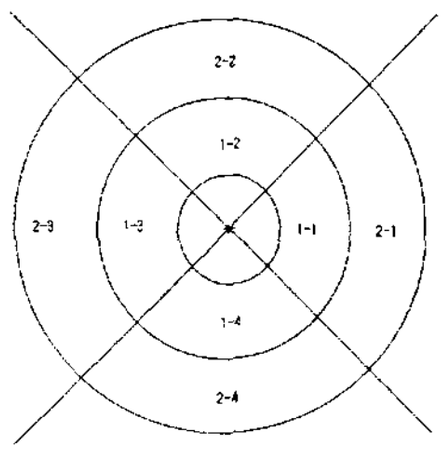


Fig. 1 Blade element

위의 블레이드 모델의 한 요소에 작용하는 풍속은 동심원 전체에 발생되는 추력을 구한 뒤, 파트 수로 나누어 각 파트에서의 추력을 구하고, 4번의 반복 작업으로 하나의 동심원에 작용하는 추력 개별적으로 계산할 수 있다.

블레이드를 미세하게 나누었을 때 발생하는 미소추력 dT와 이를 적분하여 구한 n번째 동심원에서 발생하는 추력의 크기는 아래와 같다.

$$dT = \frac{(1-a^2)}{4}\frac{\sigma\, C_L cos\phi}{sin^2\phi}\left(1+\frac{C_D}{C_L}tan\phi\right)\rho V^2\pi r dr$$

$$T_n = \frac{(1-a^2)}{4}\frac{\sigma\, C_L cos\phi}{sin^2\phi}\left(1+\frac{C_D}{C_L}tan\phi\right)\rho V^2\pi\frac{r_n^2 - r_{n-1}^2}{2} \qquad (7)$$

허브를 중심으로 요소의 무게중심에서 발생하는 모멘트 하중을 구하고, 이를 통해 얻어진 요소들의 총합이 허브에 발생하는 모멘트 My가 된다.

2.2 풍속 모델

풍속 모델은 정상 윈드 프로필 모델(NWP)을 사용하였다. 이는 터빈에 작용하는 각 높이에서의 풍속을 높이 z의 함수로 나타낸 것으로 식(8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$V(z) = V_{hub}\,(z/z_{hub})^a \quad where \quad a = 0.2 \qquad (8)$$

3. 시스템 제어

앞 장에서의 과정을 통하여 도출한 모델링을 기반으로 피치 제어기 설계를 수행하였다.

3.1 피치 제어의 목적

이 장을 통하여 설계할 피치 제어기의 목적은 아래와 같다.

① 공력학 모델의 출력이 발전기에서의 허용 범위(2.1±0.21MW)내에서 수렴한다.
② 공력으로부터 시스템에 발생하는 최대 모멘트 하중부하를 최소화한다.

3.2 피치 제어 알고리즘

앞의 과정을 통하여 설계된 시스템 모델은 비선형적인 특성을 가지고 있다. 따라서 속도에 따라 블레이드의 피치각도가 변화할 때, 시스템 모델에 의하여 나타나는 출력과 하중 부하를 바탕으로 시스템의 제어 알고리즘을 설계하였다. 풍속 증가 시와 감소 시에 풍속에 대한 하중 특성이 다르게 나타나기 때문에, 이를 고려하여 두 경우의 제어를 개별적으로 수행하였다.

3.2.1 풍속 증가 시 제어 알고리즘

풍속이 증가하는 경우 발생하는 하중과 파워를 Fig.2의 실선으로 나타내었다. 풍속이 14~17m/s 근처에서 최대하중이 발생함을 알 수 있는데, 이 때 출력 한계를 유지함과 동시에 발생하는 최대 하중의 크기를 최소화 시키도록 제어하였고, 11m/s 근처에서 하중의 크기가 떨어지는 현상으로 인하여 시스템이 받는 피로 하중을 절감하기 위해 하중이 완만하게 증가되도록 피치 제어기를 설계하였다. 이를 위하여 선정된 제어 명령은 Fig.2 의 점선으로 나타내었다.

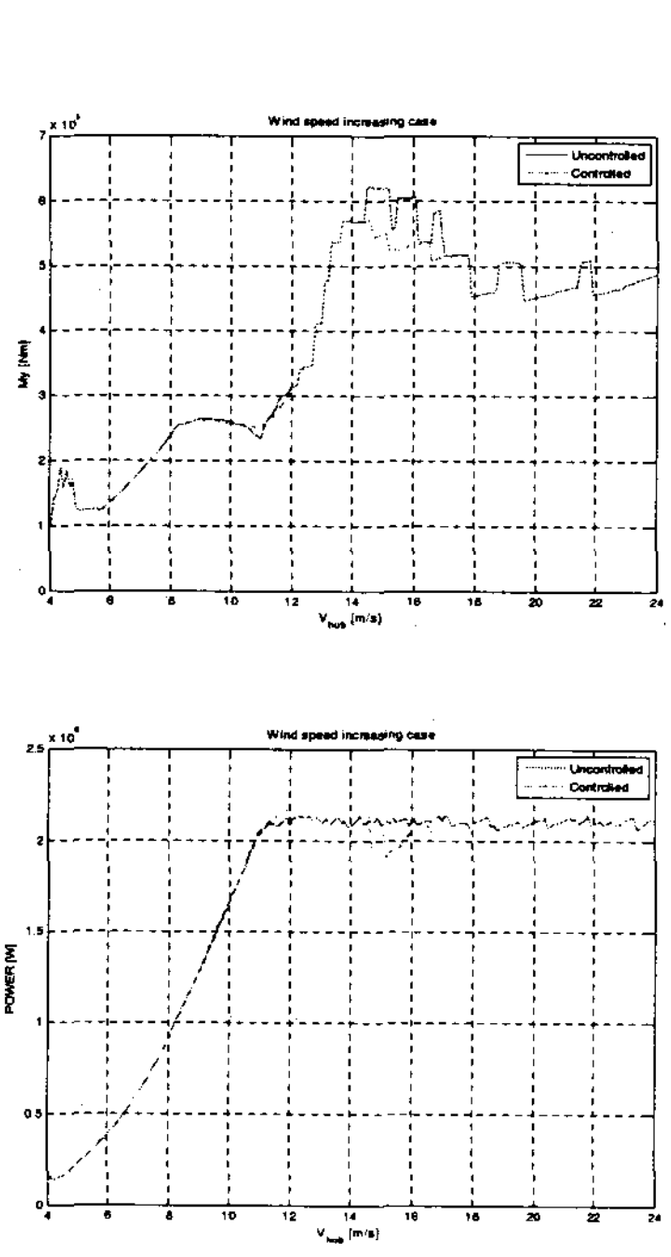


Fig. 2 Load and Power of wind turbine at increasing wind speed

3.2.2 풍속 감소 시 제어 알고리즘

풍속이 감소하는 경우 발생하는 하중과 출력을 Fig.3 의 실선으로 나타내었다. 풍속감소 시 제어 방법은 풍속이 증가 시 제어 방법과 동일한 방법으로 수행하였다. 이에 의하여 선정된 제어 명령을 아래의 Fig.3의 점선으로 표시하였다.

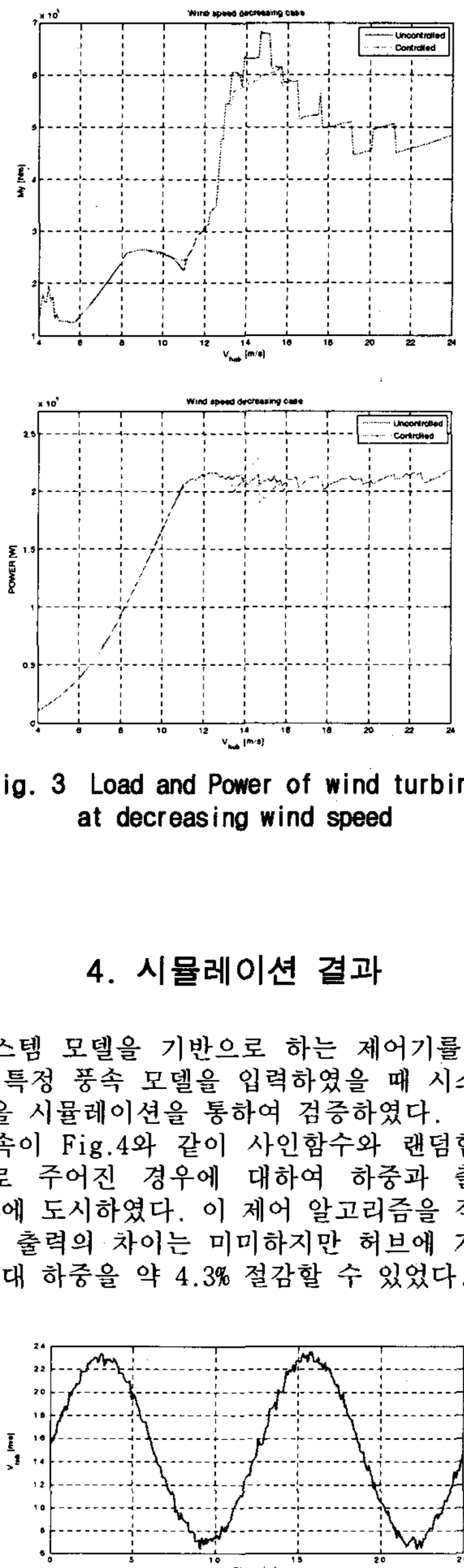


Fig. 3 Load and Power of wind turbine at decreasing wind speed

4. 시뮬레이션 결과

시스템 모델을 기반으로 하는 제어기를 이용하여 특정 풍속 모델을 입력하였을 때 시스템의 응답을 시뮬레이션을 통하여 검증하였다.

풍속이 Fig.4와 같이 사인함수와 랜덤함수의 합으로 주어진 경우에 대하여 하중과 출력을 Fig.5에 도시하였다. 이 제어 알고리즘을 적용한 결과, 출력의 차이는 미미하지만 허브에 가해지는 최대 하중을 약 4.3% 절감할 수 있었다.

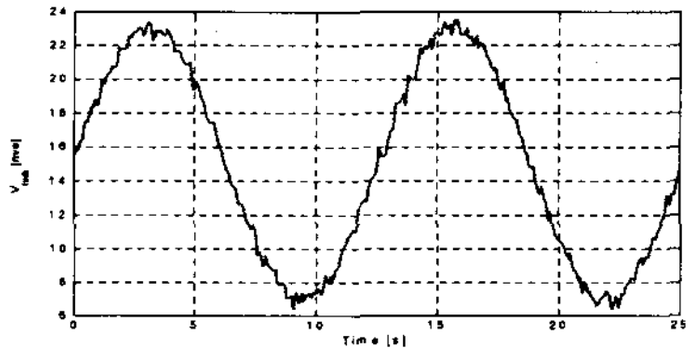


Fig. 4 sinusoidal wind model

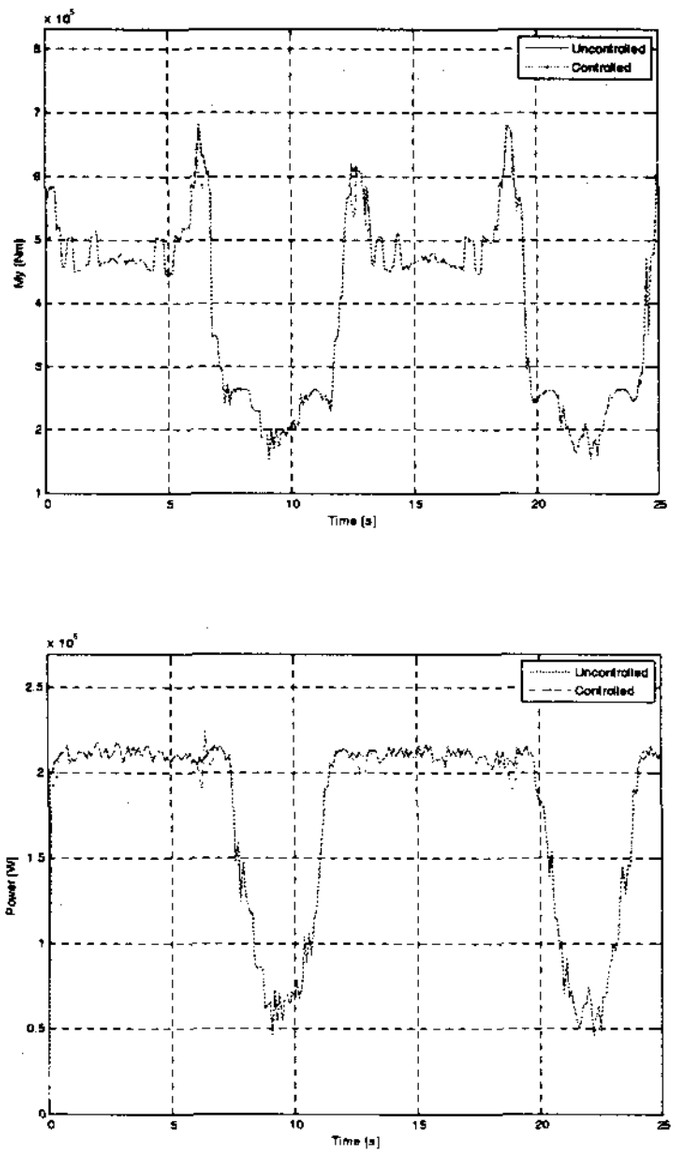


Fig. 5 Load and Power of wind turbine

다음은 일정 풍속을 유지하다가 짧은 시간동안 강한 돌풍이 부는 경우에 대하여 시뮬레이션을 수행하였다. Fig.5는 이 상황에 대한 풍속의 변화를 나타내고, 이 때 발생하는 하중과 출력을 Fig.6에 나타내었다. 이 제어를 통해 최대하중의 크기가 약 4.8%가량 감소하였고, 11m/s 근처에서 피로하중의 크기가 감소하였음을 확인하였다.

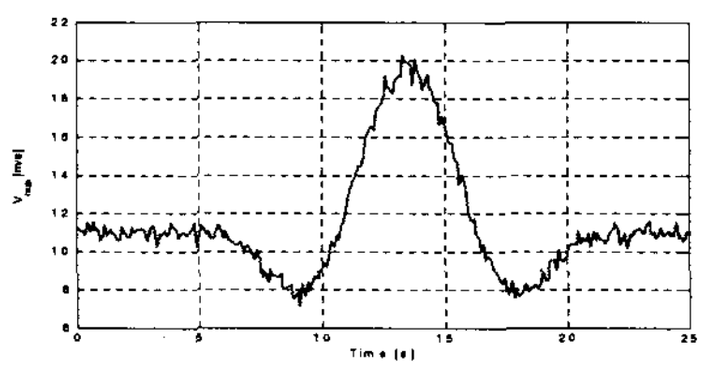
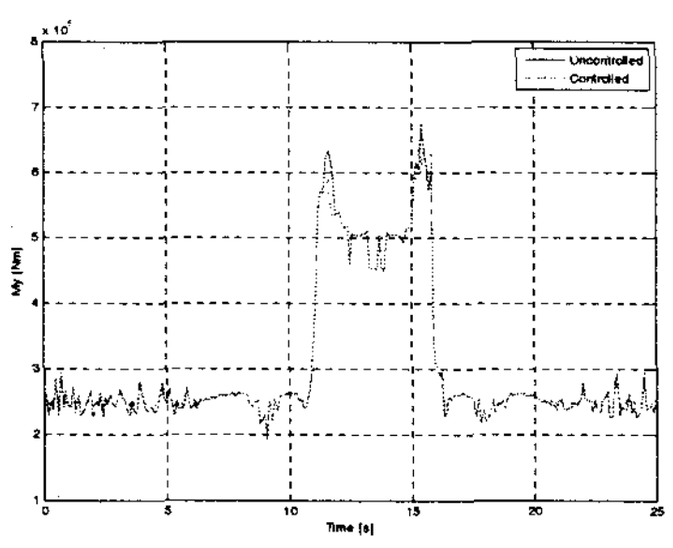


Fig. 6 gust model



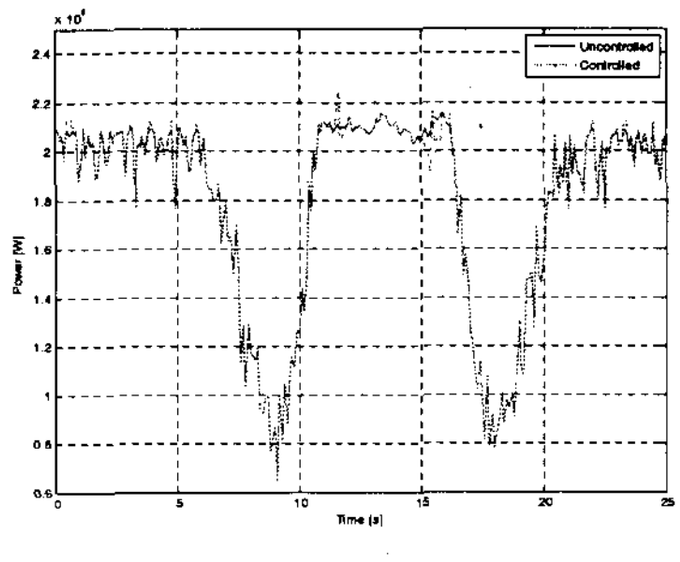


Fig. 7 Load and Power of wind turbine

5. 결 론

본 논문에서는 풍력 발전 시스템의 출력을 제어하는 기존 목적과 더불어 시스템에 가해지는 하중을 절감시킬 수 있도록 하는 피치 제어에 대하여 연구하였다.

모멘텀 이론과 블레이드 요소 이론, 그리고 이를 응용한 식을 이용하여 풍속이 발생할 때 출력과 하중의 크기를 계산하는 풍력 시스템을 모델링 하였다. 그리고 시스템 모델이 가지는 특성에 따라 풍속이 증가할 경우와 감소할 경우에 대하여 출력은 유지함과 동시에 시스템에 가해지는 최대 하중 절감을 목적으로 하는 피치 제어기를 설계하였다. 이 때 풍속 모델은 윈드 쉬어를 고려한 정상 윈드 프로필 모델(NWP)로 하여 시뮬레이션을 수행하였고, 이를 통하여 하중 절감 효과를 확인할 수 있었다.

후 기

본 연구는 산업자원부의 지원으로 수행중인 "국제기술제휴 및 협력에 의한 2MW급 풍력발전시스템 상용화 개발" 과제의 일환으로 수행된 연구결과이다.

References

[1] 김성주. 출력성능 향상을 위한 풍력발전기 피치제어 알고리즘에 관한 연구. 전력전자학술대회 논문집 1993;973-976

[2] Hongwei Liu, Yonggang Lin, Wei Li. Study on control Strategy of Individual Blade Pitch-Controlled Wind Turbine. Proceeding of the 6th world congress on intelligent control and automation. 2006; 6489-6492

[3] 송승호, 정병창. 피치각을 고려한 풍력발전기 출력특성 시뮬레이션 모델의 응용. 전력전자학술대회 논문집. 2006;260-262

[4] 산업자원부. 1MW급 Dual-rotor 풍력발전 시스템 개발 보고서 2006

[5] 우시야마 이주미. 운문당. 풍력공학입문. 2006