

가변속도-가변피치 풍력터빈의 정상상태 곡선 결정 방법

임 채 옥[†]

(2009년 6월 26일 접수, 2009년 10월 6일 수정, 2009년 10월 14일 심사완료)

A Method to Define Steady-State Curves for Variable-Speed Variable-Pitch Wind Turbine

Chae-Wook Lim

Key Words: Wind Turbine(풍력터빈), Variable-Speed Variable Pitch(가변속도-가변피치), Pitch-to-Feather(페더링 방향 피치), Operating Point(동작점), Steady-State Curve(정상상태 곡선), Aerodynamic Torque(공기역학적 토크), 선형화(Linearization)

Abstract

Aerodynamic power and torque of wind turbine are highly nonlinear and its operation mode depends on control strategies. Therefore, it is essential to define steady-state curves for the purpose of control and operation of wind turbine system. The steady-state curves of wind turbine can be defined by determining its operating points. In this paper, an algorithm to determine operating points of variable-speed variable-pitch wind turbine is presented on the basis of pitch-to-feather control strategy. And this algorithm is applied to obtain steady-state curves for an 1.5MW wind turbine.

1. 서 론

풍력터빈은 바람이 가진 에너지로 로터 블레이드를 회전시켜 기계적 에너지로 전환하여 발전기를 통하여 전기를 생산하는 기계이다. 최근 풍력터빈은 대형화되는 추세로 수 MW급이 시장의 주류를 형성하고 있고, 오늘날 대부분은 페더링 방향(pitch-to-feather)의 피치제어 방식의 가변속도-가변피치(variable-speed variable-pitch) 형태를 취하고 있다.^(1,2) 풍력터빈에서 요구되는 출력을 생산하기 위해서는 풍속의 변동에 따라 발전기의 토크 및 블레이드 피치각을 적절하게 제어해야

하며, 고신뢰성 및 안정성 확보를 위해서 작동 시작에서 정지 시까지 적절하게 제어 및 운용되어야 한다.⁽³⁾ 풍력터빈의 제어 및 운용을 위해서는 바람과 블레이드의 상호작용에 따른 비선형적 특성을 보이는 공기역학적 토크와 출력의 선형화 및 운용기준이 필요한데, 이를 위해서는 풍속에 대한 로터속도, 피치각, 주속비, 토크, 출력 등에 대한 정상상태 곡선들을 미리 알아야 한다.⁽⁴⁾ 정상상태 곡선들은 동작 풍속에 대하여 동작점들을 결정함으로써 구할 수 있다. 최근 가변속도-가변피치 풍력터빈의 제어에 관한 연구결과들이 보고되고 있지만,⁽⁵⁻⁸⁾ 정상상태 곡선들을 결정하는 방법에 관한 연구결과는 아직 제시되지 않았다.

그러므로 본 논문에서는 페더링 방향의 피치제어 방식의 가변속도-가변피치 풍력터빈의 정상상태 곡선들을 결정하는 방법을 구체적으로 보이고자한다. 이를 위하여 페더링 방향의 피치제어 방식의 제어전략을 살펴보고, 이 제어전략을 바탕으로 동작 풍속에 대하여 로터속도, 피치각, 주속

[이 논문은 대한기계학회 2009년도 충청지부 춘계학술대회(2009. 5. 15., 대전컨벤션센터) 발표논문임]

[†] 책임저자, 한밭대학교 기계공학과

E-mail : cwlim@hanbat.ac.kr

TEL : (042)821-1733 FAX : (042)821-1587

비, 토크, 출력의 동작점들을 결정하는 알고리즘을 제시한다. 그리고 정격출력이 1.5MW인 풍력터빈을 대상으로 제시된 알고리즘을 적용하여 정상상태 곡선들을 구하여 제시된 알고리즘의 타당성을 확인한다.

2. 풍력터빈 공기역학의 선형화

2.1 공기역학적 출력과 토크

바람이 가지고 있는 유용한 에너지는 로터 블레이드에 의해 풍력터빈의 로터 축에 작용하는 기계적 에너지로 변환된다. 풍속의 크기와 방향에 따라 블레이드에 발생하는 양력과 항력은 축력과 접선력으로 분해될 수 있다. 로터 축의 회전방향 성분인 축력은 로터, 타워 및 기초에 의해 지지되어야 하나, 접선력은 풍력터빈이 유용한 일을 생산하도록 회전 토크를 발생한다. 바람과 로터 블레이드의 상호작용에 의한 공기역학적 출력과 토크는 식 (1), (2)와 같이 각각 무차원 계수들(C_P , C_Q)을 사용하여 풍속의 함수로 표현된다.^(3,4)

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

$$T_r = \frac{1}{2} \pi \rho R^3 C_Q(\lambda, \beta) V^2 \quad (2)$$

여기서 ρ 는 공기밀도, R 은 블레이드 길이, β 는 블레이드 피치각, V 는 풍속, C_P 는 출력계수, C_Q 는 토크계수, λ 는 주속비(tip speed ratio)로 식 (3)과 같이 정의된다.

$$\lambda = \frac{\Omega_r R}{V} \quad (3)$$

여기서 Ω_r 은 로터속도이다.

출력계수 $C_P(\lambda, \beta)$ 의 값들은 풍력터빈의 동작점 결정과 풍력터빈의 제어 등의 목적을 위해 이용된다. 토크계수 $C_Q(\lambda, \beta)$ 의 값들도 풍력터빈의 공기역학적 토크의 동작점 결정에 이용될 수 있으나, $C_P(\lambda, \beta)$ 와 $C_Q(\lambda, \beta)$ 는 식 (4)와 같은 관계를 만족하므로 $C_P(\lambda, \beta)$ 의 값들만 알아도 된다.

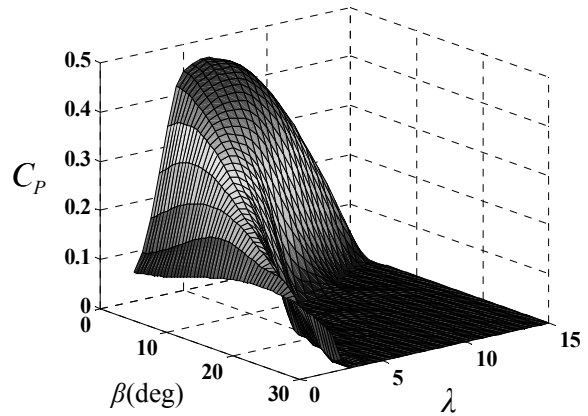


Fig. 1 Variations of C_P with λ and β

$$C_Q(\lambda, \beta) = \frac{C_P(\lambda, \beta)}{\lambda} \quad (4)$$

본 논문에서 사용된 $C_P(\lambda, \beta)$ 는 Fig. 1과 같은데, λ 와 β 의 함수이고 최대값($C_{P,max}$)을 가지는 한 점이 존재함을 알 수 있다. $C_{P,max}$ 가 되게 하는 최적의 λ 와 β 의 값을 각각 λ_{opt} 과 β_{opt} 로 두면, Fig. 1의 경우 $\beta_{opt} = 0^\circ$, $\lambda_{opt} = 6.25$ 이고 이에 대한 $C_{P,max} = 0.4625$ 이다. 가변속도-가변피치 풍력터빈의 경우 동작점을 계산함에 있어서 C_P 뿐만 아니라 λ 와 β 또한 매우 중요하다.

2.2 공기역학적 토크의 선형화

바람과 블레이드의 상호작용에 의한 공기역학적 토크는 식 (2)에서와 같이 풍속(V), 로터속도(Ω_r), 피치각(β)에 대하여 매우 비선형적인 특성을 보인다. 그러므로 로터 블레이드, 드라이브-트레인, 타워, 발전기, 피치시스템 등 풍력터빈의 각 요소시스템을 선형모델로 가정하더라도, 공기역학적 토크의 비선형성으로 인해 풍력터빈 전체 거동은 비선형 모델로 표현된다. 풍력터빈의 동특성을 확인하고 제어기 설계를 위해서는 공기역학적 비선형성을 선형화할 필요가 있다. 비선형적 동특성을 선형화하기 위해서는 동작점을 선정해야 하는데, 풍력터빈의 경우 공기역학적 토크의 선형화는 풍속에 따른 로터속도와 피치각의 동작점 선정을 필요로 한다.

풍속, 로터속도, 피치각의 동작점을 각각 V_o , Ω_{ro} , β_o 로 두고 동작점 근처에서의 풍속, 로터속도, 피치각의 변화를 각각 δV , $\delta \Omega_r$, $\delta \beta$ 로 두면, 식 (2)의 비선형적인 공기역학적 토크는 동작점에서 식 (5)와 같이 선형화가 가능하다.

$$T_r = T_{ro} + \delta T_r \quad (5)$$

여기서 $T_{ro} = T_o \big|_{(V_o, \Omega_{ro}, \beta_o)}$ 로 동작점에서의 공기역학적 토크이고, δT_r 은 동작점 근처에서의 공기역학적 토크의 변화로 식 (6)과 같다.

$$\delta T_r = \frac{\partial T_r}{\partial V} \bigg|_{(V_o, \Omega_{ro}, \beta_o)} \cdot \delta V + \frac{\partial T_r}{\partial \Omega_r} \bigg|_{(V_o, \Omega_{ro}, \beta_o)} \cdot \delta \Omega_r + \frac{\partial T_r}{\partial \beta} \bigg|_{(V_o, \Omega_{ro}, \beta_o)} \cdot \delta \beta \quad (6)$$

3. 풍력터빈 정상상태 곡선 구하기

3.1 가변속도-가변피치 풍력터빈의 제어전략

가변속도-가변피치 풍력터빈의 경우 풍속에 대한 출력, 토크, 로터속도, 피치각, 주속비 등에 대한 정상상태 값들은 미리 알고 있어야 제어로직 설계 및 운용이 가능하다. 이들 정상상태 값들은 제어전략에 의해서 결정되는데, 제어전략은 풍력터빈의 출력, 로터속도, 피치각에 대한 제한조건 정보들을 고려하여 수립된다.

풍력터빈은 발전기의 회전속도가 고정이나 가변이냐에 따라, 그리고 블레이드 피치각이 고정이나 가변이냐에 따라 동작모드가 구분(고정속도-고정피치, 고정속도-가변피치, 가변속도-고정피치, 가변속도-가변피치)되며 동작모드에 따라 제어전략들이 다르게 수립된다. 그리고 가변피치의 경우 피치각을 조절하는 방법은 스톨 방향(pitch-to-stall)과 페더링 방향(pitch-to-feather)의 두 가지 경우로 구분된다.

최근 현대 풍력터빈에서 주로 사용되는 동작모드는 페더링 방향의 피치제어 방식의 가변속도-가변피치이다. 이 경우 풍속에 따른 로터속도와 피치각의 변화는 Fig. 2의 $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D$ 경로를 따른다.^(3,4) 그러므로 풍속에 따른 풍력터빈의 동

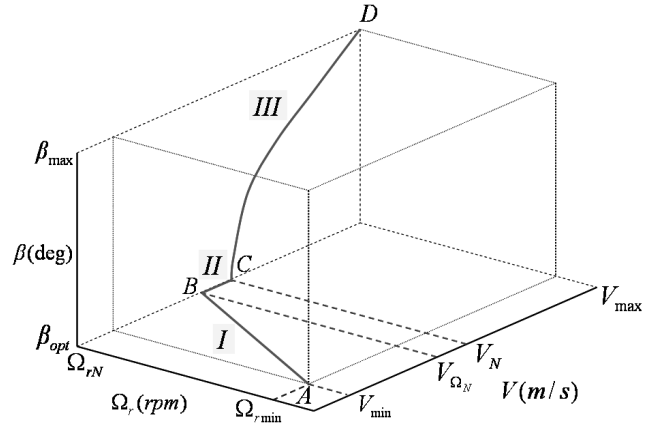


Fig. 2 Pitch-to-feather control strategy of variable-speed variable-pitch wind turbine

작영역은 세 경우로 구분될 수 있으며, 각 영역에서의 제어전략은 다음과 같다. I-영역($V_{min} \leq V \leq V_{N}$)은 저풍속 영역으로, 제어전략은 최대 출력을 생산하도록 하는 것이다. 최대 출력을 얻기 위해서는 주속비 $\lambda = \lambda_{opt}$ 를 항상 유지해야 한다. 풍속이 증가하여 V_{min} (가동 풍속) 이상이 되면 로터는 회전하게 되는데, 이 경우 로터속도는 풍속에 비례하여 증가하는 반면, 피치각은 $\beta = \beta_{opt}$ 를 유지하도록 고정한다. II-영역($V_{N} \leq V \leq V_{N}$)은 저풍속과 고풍속 사이의 천이영역으로, V_{N} (정격속도 풍속)과 V_{N} (정격출력 풍속) 사이의 풍속이다. 풍속이 V_{N} 으로 증가하면 로터속도는 풍속에 비례하여 더 이상 증가하지 않고 Ω_{rN} (로터 정격속도)로 제한한다. 그리고 풍속이 V_{N} 에 이르기 전에는 정격출력에 이르지 못하였으므로, 출력을 최대화하기 위하여 피치각은 여전히 $\beta = \beta_{opt}$ 를 유지하도록 고정한다. III-영역($V_{N} \leq V \leq V_{max}$)은 고풍속 영역으로, 제어전략은 정격출력을 유지하도록 하는 것이다. 풍속이 V_{N} 이상이 되면 로터속도는 계속 Ω_{rN} 으로 제한하고 피치각은 출력을 정격출력으로 제한하기 위하여 증가시킨다. 그리고 V_{max} (정지 풍속) 이상이 되면 과도한 하중을 방지하기 위하여 풍력터빈의 발전을 위한 제어동작을 멈추고, 피치각은 β_{opt} 방향이 아닌 페더링 방향(피치각 $\beta = 90^\circ$ 방향)으로 향하게 한다.

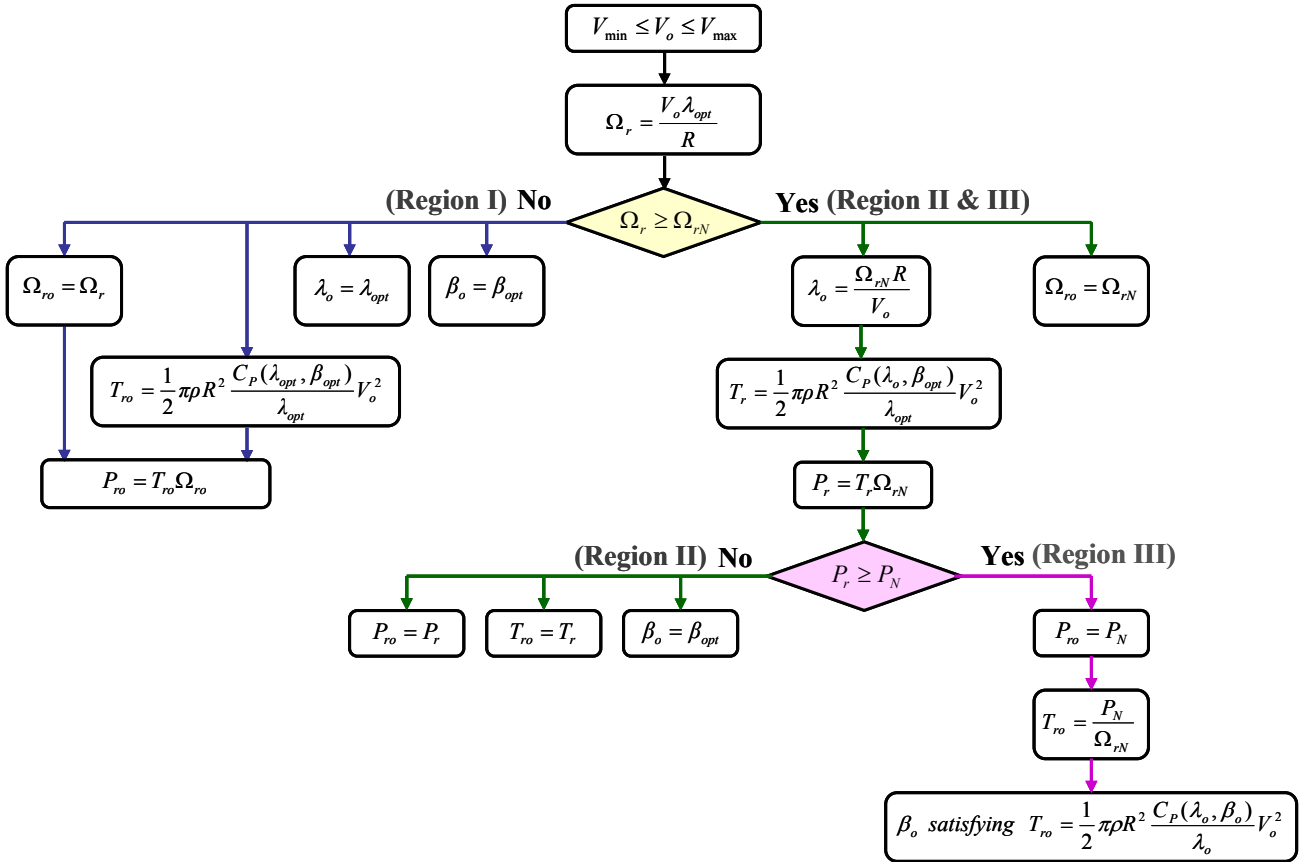


Fig. 3 Representation of an algorithm to define operating points

3.2 정상상태 곡선 결정 알고리즘

페더링 방향의 피치제어 방식의 가변속도-가변 피치 풍력터빈의 동작모드에 대한 제어전략을 바탕으로 정상상태 곡선을 구하고자 한다. 풍력터빈의 제어 및 운용을 위해서는 풍속에 대한 로터 속도, 피치각, 주속비, 토크, 출력 등에 대한 정상상태 곡선들이 반드시 필요하다. 정상상태 곡선들을 얻기 위해서는 동작풍속(V_o)에 대한 동작점들(Ω_{ro} , β_o , λ_o , T_{ro} , P_{ro})을 구하면 되는데, 본 논문에서는 이들 동작점들을 구하기 위한 알고리즘으로 Fig. 3을 제시한다. Fig. 3에서 제시된 알고리즘을 이용하여 동작점들을 구하기 위해서는 블레이드 길이(R), 출력계수($C_p(\lambda, \beta)$), 최적 주속비(λ_{opt})의 값이 주어져야 하고, 또한 로터 정격속도(Ω_{rN}), 정격출력(P_N), 최적 피치각(β_{opt}) 등에 대한 제한조건 정보들이 주어져야 한다. 제어전략에 따라 I-영역과 II, III-영역을 구분하는 기준은 로터속도인데, 이의 값이 정격속도보다 느리면 I-영역이다. II-영역과 III-영역을 구분하는 기

준은 출력인데, 이의 값이 정격출력 이상이면 III-영역이다.

Fig. 3의 제시된 알고리즘을 이용하여 페더링 방향의 피치제어 방식의 가변속도-가변피치 풍력터빈의 정상상태 곡선을 구해 보았다. 고려된 풍력터빈은 블레이드 길이 $R=30m$, 로터 정격속도 $\Omega_{rN}=20rpm$, 정격출력 $P_N=1.5MW$, 출력계수 $C_p(\lambda, \beta)$ 가 Fig. 1과 같이 주어진 경우를 고려하였다. $V_{min}=3m/s$ 와 $V_{max}=25m/s$ 사이의 풍속에 대하여 Fig. 3의 제시된 알고리즘을 적용하여 동작점들을 찾아 정상상태 곡선들을 구한 결과는 Fig. 4와 같다. 계산된 결과로부터 정격속도 풍속은 $V_{\Omega_N}=11.3m/s$ 이고 정격출력 풍속은 $V_N=11.6m/s$ 임을 확인할 수 있다. 로터속도는 정격속도 풍속 $11.3m/s$ 이하에서는 풍속에 비례하여 선형적으로 증가하다가 $11.3m/s$ 이상에서는 정격속도 $20rpm$ 을 유지함을 확인할 수 있다. 정격출력 풍속 $11.6m/s$ 에 이르기까지 주속비와 피치각은 각각 $\lambda_{opt} = 6.25$ 와 $\beta_{opt} = 0^\circ$ 의 고정된 값을 유지하다

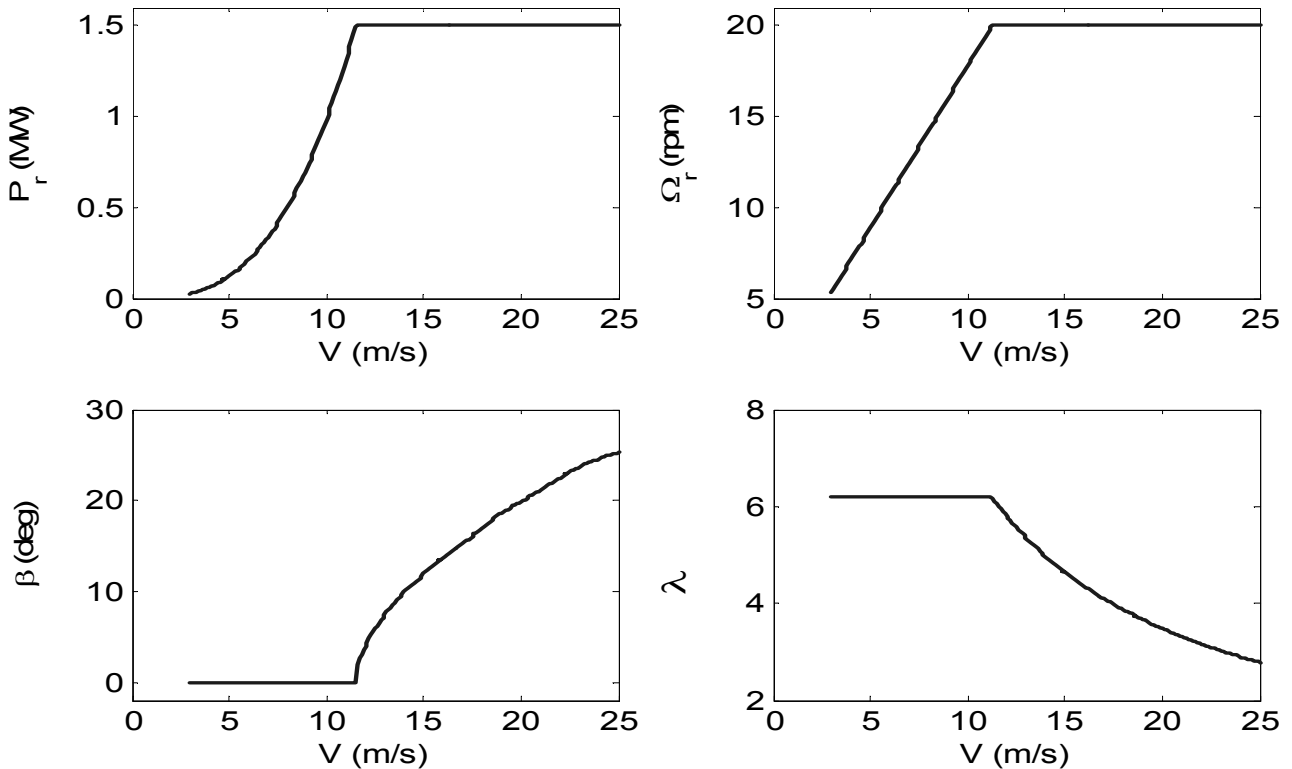


Fig. 4 Determined steady-state curves for an 1.5MW wind turbine

가, 11.6m/s 이상에서는 주속비는 줄어들고 피치각은 증가함을 확인할 수 있다. 이에 대한 결과로 출력의 경우 정격출력 풍속 11.6m/s에 이르기까지 출력계수는 $C_{P,max}$ 로 고정되어 풍속의 세제곱에 비례하여 증가하다가, 11.6m/s 이상에서는 1.5MW의 정격출력을 얻을 수 있음을 확인할 수 있다.

4. 결론

풍력터빈의 제어 및 운용을 위해서는 풍속에 대한 로터속도, 피치각, 주속비, 토크, 출력 등에 대한 정상상태 곡선들이 반드시 필요한데, 본 논문에서는 페더링 방향의 피치제어 방식의 가변속도-가변피치 풍력터빈의 정상상태 곡선들을 결정하는 방법에 대하여 살펴보았다. 풍력터빈에 대한 정상상태 곡선들은 동작풍속에 대한 동작점들을 구함으로 결정되는데, 제어전략을 바탕으로 출력, 로터속도, 피치각의 제한조건 정보들을 고려하여 동작점들을 구하는 알고리즘을 제시하였고, 이를 바탕으로 1.5MW급 풍력터빈에 대하여 정상상태 곡선들을 구한 결과를 살펴봄으로서 알

고리듬의 타당성을 확인하였다.

후기

본 논문은 지식경제부의 지원으로 수행한 연구결과입니다.

참고문헌

- (1) Joselin Herberta, G. M., Iniyamb, S., Sreevalsanc, E. and Rajapandian, S., 2007, "A Review of Wind Energy Technologies," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 11, pp. 1117~1145.
- (2) Ackermann, T. and Söder, L., 2000, "Wind Energy Technology and Current Status: A Review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 4, pp. 315~374.
- (3) Burton, T., Sharpe, D., Jenkins, N. and Bossanyi, E., 2001, *Wind energy Handbook*, John Wiley & Sons, Ltd.
- (4) Bianchi, F. D., Battista, H. D. and Mantz, R. J., 2007, *Wind Turbine Control Systems: Principles,*

Modelling and Gain Scheduling Design, Springer-Verlag.

- (5) Hansen, M., Hansen, A., Larsen, T., Øye, S., Sørensen, P. and Fuglsang, P., 2005, Control Design for a Pitch-Regulated, Variable Speed Wind Turbine, *Technical Report RISO-R-1500(EN)*, Risø National Laboratory, Roskilde, Denmark.
- (6) Van der Hooft, E.L., Schaak, P. and T.G. Van Engelen, T. G., 2003, Wind Turbine Control Algorithms, *Technical report ECN-C-03-111*, ECN Petten.
- (7) Bianchi, F. D., Mantz, R. J. and C.F. Christiansen, C. F. 2005, Gain Scheduling Control of Variable-Speed Wind Energy Conversion Systems Using Quasi-LPV Models, *Control Engineering Practice*, Vol. 13, pp. 247~255.
- (8) Munteanu, I., Cutululis, N.A., Bratcu, A. I. and Ceangă, E., 2005, Optimization of Variable Speed Wind Power Systems Based on a LQG Approach, *Control Engineering Practice*, Vol. 13, pp. 903~912.
- (9) Leithead, W. E. and Connor, B. 2000, Control of Variable Speed Wind Turbines: Dynamic Models, *International Journal of Control*, Vol. 73, No. 13, pp. 1173~1188.