

가변속도-가변피치 풍력터빈의 공기역학적 토크의 비선형 특성에 관한 고찰

임채욱*

An Investigation on Nonlinear Characteristics of Aerodynamic Torque for Variable-Speed Variable-Pitch Wind Turbine

Chae-Wook Lim*

Key Words : Wind turbine(풍력터빈), Aerodynamic torque(공기역학적 토크), Linearization(선형화), Nonlinear parameter(비선형 파라미터), Steady-State Value(정상상태 값)

ABSTRACT

Aerodynamic torque of wind turbine is highly nonlinear due to the nonlinear interactions between wind and blade. The aerodynamic nonlinearity is represented by nonlinear power and torque coefficients which are functions of wind speed, rotational speed of rotor, and pitch angle of blade. It is essential from the viewpoint of understanding and analysis of dynamic characteristics for wind turbine to linearize the aerodynamic torque and define aerodynamic nonlinear parameters as derivatives of aerodynamic torque with respect to the three parameters. In this paper, a linearization method of the aerodynamic torque from power coefficient is presented through differentiating it by the three parameters. And steady-state values of three aerodynamic nonlinear parameters according to wind speed are obtained and their nonlinear characteristics are investigated.

1. 서론

풍력터빈은 로터(블레이드와 허브), 기어박스, 회전축(고속 및 저속 회전축), 타워, 발전기, 피치시스템, 요시스템 등으로 구성되어 있다. 바람이 불 때 풍력터빈에서 원하는 출력을 생산하기 위해서는 제어를 항상 수행해야 하는데, 이를 위하여 풍력터빈의 제어기는 토크 제어기와 피치 제어기로 구성되어 있다^(1,2). 최근 시장의 주류를 형성하는 풍력터빈은 출력용량 면에서는 수 MW급으로 대형화되는 추세이며, 동작모드 면에서는 발전기의 회전속도와 블레이드의 피치각 모두가 변화하는 가변속도-가변피치 방식이 채택되고 있다⁽¹⁻⁴⁾.

풍력터빈을 구성하는 각 구성요소들의 하중 설계를 위해서 뿐만 아니라, 가동 풍속 범위 내의 풍력터빈의 동특성 파악과 제어기의 정밀한 설계를 위해서는 바람과 블레이드의 상호작용에 따른 특성을 파악하는 것이 반드시 필요하며 매우 중요하다. 가변속도-가변피치 풍력터빈의 경우 바람과

블레이드의 상호작용에 따른 공기역학적 토크는 풍속, 로터 속도, 블레이드 피치각에 따라 매우 비선형적인 특성을 보인다⁽⁵⁻⁸⁾. 그러므로 풍력터빈의 각 요소시스템을 선형모델로 가정하더라도, 공기역학적 토크의 비선형성으로 인해 풍력터빈의 전체 거동은 비선형 모델로 표현된다. 특히, 풍력터빈의 동특성을 파악하고 해석하기 위해서는 비선형적인 공기역학적 토크의 선형화가 반드시 필요하다. 비선형적 동특성을 선형화하기 위해서는 동작 풍속에 따른 로터속도와 피치각의 동작점 선정이 우선 필요하고, 다음으로 선정된 동작점에서의 토크 값과 동작점 근처에서의 공기역학적 토크의 변화 값을 정확하게 계산하는 것이 필요하다.

저자의 이전 연구에서는 가변속도-가변피치 풍력터빈의 제어전략을 바탕으로 출력, 로터속도, 피치각의 제한조건 정보들을 고려하여 동작 풍속에 따른 로터속도, 피치각 등의 동작점들을 구하는 방법이 제시되었다⁽⁹⁾. 본 논문에서는 가변속도-가변피치 풍력터빈을 대상으로 선정된 동작점에서 비선형적인 공기역학적 토크를 선형화하여 공기역학적 토크 변화의 특성을 살펴보고자 한다. 이를 위하여 풍속, 로터속

* 한밭대학교 기계공학과

E-mail : cwlim@hanbat.ac.kr

도, 피치각에 따른 비선형적인 특성을 보이는 출력계수의 정보를 이용하여 비선형적인 공기역학적 토크를 선형화하여 비선형적인 공기역학적 토크의 풍속, 로터속도, 피치각에 대한 편미분치인 세 개의 비선형 파라미터들을 구하는 식을 구하고, 동작 풍속에 따른 세 개의 비선형 파라미터들의 정상 상태 값들을 구하여 이들의 풍속에 따른 비선형적인 변화 특성을 살펴본다.

2. 공기역학적 토크의 비선형성과 선형화

2.1. 공기역학적 토크의 비선형성

가변속도-가변피치 풍력터빈은 토크 제어기와 피치 제어기에 의해 로터속도와 블레이드의 피치각 모두가 변화하는 시스템이므로, 로터 블레이드와 바람과의 상호작용에 의해 발생하는 공기역학적 토크는 무차원 계수들인 출력계수(C_p)와 주속비(λ), 그리고 풍속(V)을 사용하여 식 (1)과 같이 표현된다^(6,6). 공기역학적 토크는 풍속에 대해서는 풍속의 제곱에 비례하는 비선형적 특성을 보인다.

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

여기서 ρ 는 공기밀도, R 은 블레이드 길이, β 는 블레이드 피치각이다.

주속비(TSR; tip speed ratio) λ 는 풍속과 블레이드 끝단속도의 비로 식 (2)와 같이 정의되며 로터속도 Ω_r 과 풍속 V 의 함수이다.

$$\lambda = \frac{\Omega_r R}{V} \quad (2)$$

출력계수 $C_p(\lambda, \beta)$ 는 Fig. 1에서 보이는 바와 같이 주속비와

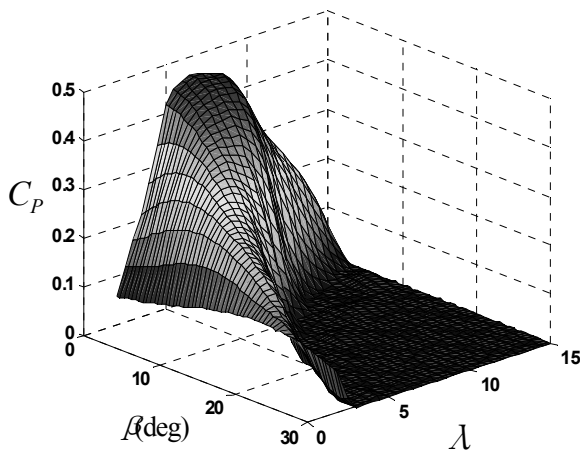


Fig. 1 Nonlinear properties of power coefficient

피치각에 대하여 매우 비선형적으로 변화하는 특성을 보인다. 그러므로 바람과 블레이드의 상호작용에 의한 공기역학적 토크는 풍속(V), 로터속도(Ω_r), 피치각(β)에 대하여 매우 비선형적인 특성을 보임을 알 수 있다.

2.2. 풍력터빈의 동작점

풍력터빈의 동특성을 파악하고 해석하기 위해서는 공기역학적 비선형성을 선형화할 필요가 있다. 비선형적인 동특성을 선형화하기 위해서는 동작점이 먼저 선정되어야 하는데, 가변속도-가변피치 풍력터빈의 경우 비선형적인 공기역학적 토크의 선형화를 위해서는 동작 풍속(V_o)에 따른 로터속도와 피치각 모두에 대한 동작점(Ω_{ro}, β_o) 선정이 필요하다. 이들 동작점들은 수립되는 제어전략을 바탕으로 풍력터빈의 출력, 로터속도, 피치각의 제한조건 정보들을 고려하여 구하게 된다⁽⁹⁾.

2.3. 공기역학적 토크의 선형화

로터속도, 피치각, 풍속에 대한 동작점들을 식 (3)과 같이 두고, 이들 동작점들(O_p) 근처에서의 로터속도, 피치각, 풍속의 변화를 각각 $\delta\Omega_r$, $\delta\beta$, δV 로 두면, 식 (1)의 비선형적인 공기역학적 토크는 식 (4)와 같이 선형화가 가능하다.

$$O_p = \{\Omega_{ro}, \beta_o, V_o\} \quad (3)$$

$$T_r = T_{ro} + \delta T_r \quad (4)$$

여기서 $T_{ro} = T_r|_{O_p}$ 로 동작점들에서의 공기역학적 토크이고, δT_r 은 동작점들 근처에서의 공기역학적 토크의 변화로 식 (5)와 같다.

$$\delta T_r = \left. \frac{\partial T_r}{\partial \Omega_r} \right|_{O_p} \cdot \delta \Omega_r + \left. \frac{\partial T_r}{\partial \beta} \right|_{O_p} \cdot \delta \beta + \left. \frac{\partial T_r}{\partial V} \right|_{O_p} \cdot \delta V \quad (5)$$

3. 공기역학적 토크의 비선형 파라미터들

3.1. 세 개의 비선형 파라미터들

공기역학적 토크의 비선형성이 풍력터빈의 전체 동적거동과 동적특성에 미치는 영향을 고찰하기 위해서는 토크계수보다는 출력계수와 주속비의 정보들을 이용하는 것이 편리하다. 왜냐하면 풍력터빈의 동적거동 특성은 공기역학적 토크의 비선형성 외에도 토크 제어기와 피치 제어기의 전략과 방법에도 영향을 받기 때문이다. 풍력터빈의 제어 방법은 출력계수와 주속비를 이용하여 파악하고 이해하는 것이 편리하므로^(1,2,7,8), 여기에서는 출력계수 정보를 이용한다.

가변속도-가변피치 풍력터빈의 경우 비선형적인 공기역

학적 토크의 선형화는 동작점들(O_p)에서 공기역학적 토크를 로터속도, 피치각, 풍속에 대하여 각각 편미분함으로써 가능하다. 이들 편미분치는 동작 풍속에 따라 매우 비선형적인 특성을 보이므로, 가변속도-가변피치 풍력터빈의 공기역학적 토크의 변화를 나타내는 세 개의 비선형 파라미터들(N_{Ω_r} , N_{β} , N_V)이 존재함을 알 수 있다. 세 개의 비선형 파라미터들을 식 (6)과 같이 정의하면 식 (5)는 식 (7)과 같이 표현된다.

$$N_{\Omega_r} = - \left. \frac{\partial T_r}{\partial \Omega_r} \right|_{O_p}, \quad N_{\beta} = \left. \frac{\partial T_r}{\partial \beta} \right|_{O_p}, \quad N_V = \left. \frac{\partial T_r}{\partial V} \right|_{O_p} \quad (6)$$

$$\delta T_r = -N_{\Omega_r} \cdot \delta \Omega_r + N_{\beta} \cdot \delta \beta + N_V \cdot \delta V \quad (7)$$

식 (6)에서 N_{Ω_r} 의 정의에서 (-) 부호를 사용한 이유는 N_{Ω_r} 은 공기역학적 토크를 로터속도에 대하여 편미분한 값이므로 풍력터빈 시스템에 감쇠 역할을 하는 물리적인 의미를 부여하기 위해서이다.

3.2. 비선형 파라미터들의 계산식 유도

출력계수(C_P)를 이용하여 공기역학적 토크의 변화를 표현하는 비선형 파라미터들을 구하는 식을 유도하면 다음과 같다.

식 (2)의 주속비를 로터속도와 풍속에 대하여 각각 편미분하면 식 (8), (9)와 같다.

$$\frac{\partial \lambda}{\partial \Omega_r} = \frac{R}{V} \quad (8)$$

$$\frac{\partial \lambda}{\partial V} = - \frac{\Omega_r R}{V^2} \quad (9)$$

출력계수를 로터속도와 풍속에 대하여 각각 편미분한 후 식 (8), (9)를 이용하면 식 (10), (11)과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial C_P}{\partial \Omega_r} = \frac{\partial C_P}{\partial \lambda} \frac{\partial \lambda}{\partial \Omega_r} = \frac{R}{V} \frac{\partial C_P}{\partial \lambda} \quad (10)$$

$$\frac{\partial C_P}{\partial V} = \frac{\partial C_P}{\partial \lambda} \frac{\partial \lambda}{\partial V} = - \frac{\Omega_r R}{V^2} \frac{\partial C_P}{\partial \lambda} \quad (11)$$

식 (1)의 공기역학적 토크를 로터속도, 피치각, 풍속에 대하여 각각 편미분한 후 식 (10), (11)을 이용하면 식 (12)~(14)와 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial T_r}{\partial \Omega_r} &= \frac{\pi \rho R^2}{2} \left[- \frac{V^3}{\Omega_r^2} C_P + \frac{V^3}{\Omega_r} \frac{\partial C_P}{\partial \Omega_r} \right] \\ &= \frac{\pi \rho R^2}{2} \left[- \frac{V^3}{\Omega_r^2} C_P + \frac{RV^2}{\Omega_r} \frac{\partial C_P}{\partial \lambda} \right] \end{aligned} \quad (12)$$

$$\frac{\partial T_r}{\partial \beta} = \frac{\pi \rho R^2}{2} \left[\frac{V^3}{\Omega_r} \frac{\partial C_P}{\partial \beta} \right] \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial T_r}{\partial V} &= \frac{\pi \rho R^2}{2} \left[\frac{3V^2}{\Omega_r} C_P + \frac{V^3}{\Omega_r} \frac{\partial C_P}{\partial V} \right] \\ &= \frac{\pi \rho R^2}{2} \left[\frac{3V^2}{\Omega_r} C_P - RV^2 \frac{\partial C_P}{\partial \lambda} \right] \end{aligned} \quad (14)$$

식 (12)와 (14)를 식 (2)의 주속비를 이용하여 간단히 한 후 정리하면, 식 (6)의 세 개의 비선형 파라미터들의 동작점들에서의 값은 식 (15)~(17)과 같이 표현된다.

$$N_{\Omega_r} = \frac{\pi \rho R^2}{2} \frac{V_o^3}{\Omega_{ro}^2} [C_P(\lambda_o, \beta_o) - \lambda_o C_{P,d\lambda}] \quad (15)$$

$$N_{\beta} = \frac{\pi \rho R^2}{2} \frac{V_o^3}{\Omega_{ro}} [C_{P,d\beta}] \quad (16)$$

$$N_V = \frac{\pi \rho R^2}{2} \frac{V_o^2}{\Omega_{ro}} [3C_P(\lambda_o, \beta_o) - \lambda_o C_{P,d\lambda}] \quad (17)$$

여기서 λ_o 는 주속비의 동작점으로 로터속도와 풍속의 동작점들을 알면 식 (18)과 같이 구할 수 있으며, $C_{P,d\lambda}$ 와 $C_{P,d\beta}$ 는 각각 주속비의 동작점(λ_o)과 피치각의 동작점(β_o)에서의 출력계수의 주속비와 피치각에 대한 편미분치로 식 (19), (20)과 같다.

$$\lambda_o = \frac{\Omega_{ro} R}{V_o} \quad (18)$$

$$C_{P,d\lambda} = \left. \frac{\partial C_P(\lambda, \beta_o)}{\partial \lambda} \right|_{\lambda_o} \quad (19)$$

$$C_{P,d\beta} = \left. \frac{\partial C_P(\lambda_o, \beta)}{\partial \beta} \right|_{\beta_o} \quad (20)$$

3.3. 비선형 파라미터들의 정상상태 값 계산

풍력터빈의 동특성 파악과 운용을 위해서는 풍속에 따른 정상상태 값을 미리 알아야 한다. 풍력터빈의 정상상태 값은 동작 풍속에서의 로터속도, 피치각, 출력 등의 동작점들을

구함으로서 얻을 수 있다. 가변속도-가변피치 풍력터빈에서 공기역학적 토크의 변화를 나타내는 세 개의 비선형 파라미터들의 풍속에 따른 정상상태 값은 동작풍속(V_o)에서 구해진 로터속도의 동작점(Ω_{ro}) 또는 주속비의 동작점(λ_o)을 이용하면 식 (15)~(17)로부터 구할 수 있다. 식 (15)~(17)을 이용하여 공기역학적 토크의 세 개의 비선형 파라미터들을 구하기 위해서는 주속비와 피치각에 대한 출력계수 값과 출력계수의 주속비와 피치각에 대한 편미분치를 알아야 한다. 여기에서는 Fig. 1과 같은 비선형 특성을 갖는 출력계수 값을 이용하였다. 출력계수의 최대값($C_{P,max}$)이 되는 λ 와 β 의 값을 각각 λ_{opt} 와 β_{opt} 로 두면, Fig. 1의 경우 $\lambda_{opt}=6.6$, $\beta_{opt}=0.4^\circ$ 이고 이에 대한 $C_{P,max}=0.4635$ 이다.

블레이드 길이는 33.25m, 로터 정격속도는 20rpm, 정격 출력은 1.5MW인 가변속도-가변피치 형태의 풍력터빈에 대하여 선형화를 통하여 공기역학적 토크의 변화를 나타내는 세 개의 비선형 파라미터들을 구해 보면 다음과 같다. 풍력터빈이 작동하는 풍속범위는 시동풍속(cut-in wind speed)이 3m/s이고 정지풍속(cut-out wind speed)이 24m/s인 경우를 고려하였다.

Fig. 2는 동작 풍속에 대하여 로터속도, 피치각, 주속비에 대한 동작점들을 구한 결과를 보여주고 있다(구하는 방법은 참고문헌 (9)를 참조). 로터속도의 동작점은 정격로터속도 풍속인 10.6m/s에 이르기까지 풍속이 커짐에 따라 풍속에 비례하여 선형적으로 증가한다. 주속비의 동작점은 정격로

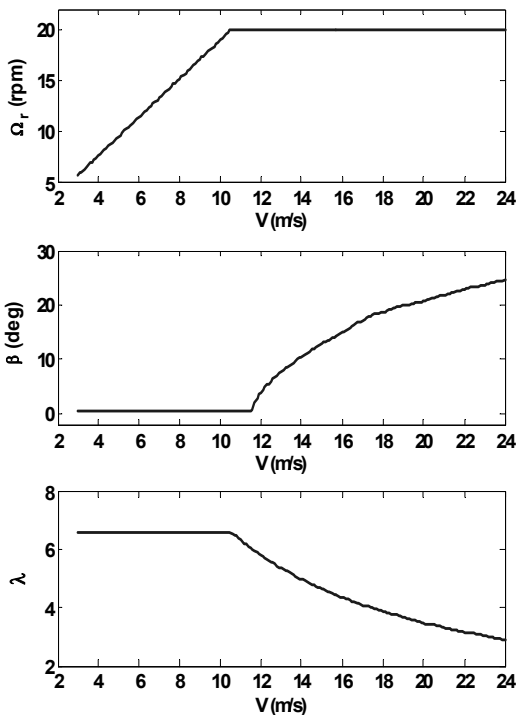


Fig. 2 Operating points of rotor speed, pitch angle, and TSR for an 1.5MW wind turbine

터속도 풍속 이하에서는 일정한 값(λ_{opt})을 유지하다가 정격로터속도 풍속 이상에서는 감소함을 확인할 수 있다. 피치각의 동작점은 정격출력 풍속인 11.6m/s 이상에서는 로터속도와 출력을 줄이기 위하여 풍속이 커짐에 따라 증가함을 확인할 수 있다.

Fig. 3은 주속비의 동작점과 피치각의 동작점에서의 출력계수의 주속비와 피치각에 대한 편미분치들($C_{P,d\lambda}$ 와 $C_{P,d\beta}$)을 계산한 결과를 보여주고 있다. $C_{P,d\lambda}$ 와 $C_{P,d\beta}$ 는 정격로터속도 풍속인 10.6m/s 이하에서는 0인데, 이는 Fig. 2에서 보이는 바와 같이 주속비와 피치각의 동작점들은 출력계수가 최대($C_{P,max}$)가 되게 하는 값(λ_{opt} , β_{opt})이 되기 때문이다. 정격로터속도 풍속 이상에서는 주속비와 피치각의 동작점들은 Fig. 2에서 보이는 바와 같이 비선형적으로 바뀌기 때문에 $C_{P,d\lambda}$ 와 $C_{P,d\beta}$ 또한 이에 따라 비선형적으로 변함을 확인할 수 있다. 정격출력 풍속 이상에서 $C_{P,d\lambda}$ 와 $C_{P,d\beta}$ 의 값이 0보다 작은 이유는 풍속이 커짐에 따라 피치각을 크게 하여 로터속도와 출력을 정격으로 제한하기 때문이다.

다음으로 로터속도, 피치각, 주속비의 동작점에서 공기역학적 토크의 변화를 나타내는 세 개의 비선형 파라미터들(N_Ω , N_β , N_V)의 값을 구하였다. Fig. 4에서는 이들 세 개의 비선형 파라미터들의 동작풍속에 따른 정상상태 값을 보여주고 있다. 정격로터속도 풍속인 10.6m/s 이하에서는 $C_{P,d\lambda}$ 와 $C_{P,d\beta}$ 는 0이고 주속비의 동작점과 피치각의 동작점은 일정한 값(λ_{opt} , β_{opt})을 가진다. 그러므로 이 경우 N_β 는 0이고, N_Ω 과 N_V 는 풍속에 비례하여 선형적으로 증가한다. 정격출력 풍속인 11.6m/s 이상에서는 $C_{P,d\lambda}$ 와 $C_{P,d\beta}$ 는 음수이므로, N_β 는 음수가 되고 N_Ω 과 N_V 는 양수의 값을 가지게 된다. 그리고 Fig. 4는 풍력터빈의 비선형적인 특성은 피치각의 변화가 생기는 정격출력 풍속 이상에서 매우 커짐을 보

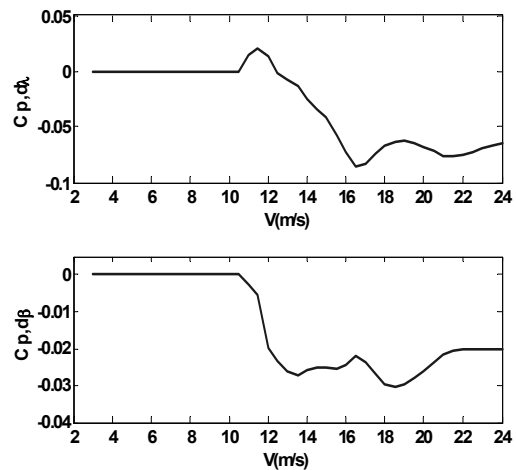


Fig. 3 Partial derivatives of power coefficient at operating points for an 1.5MW wind turbine

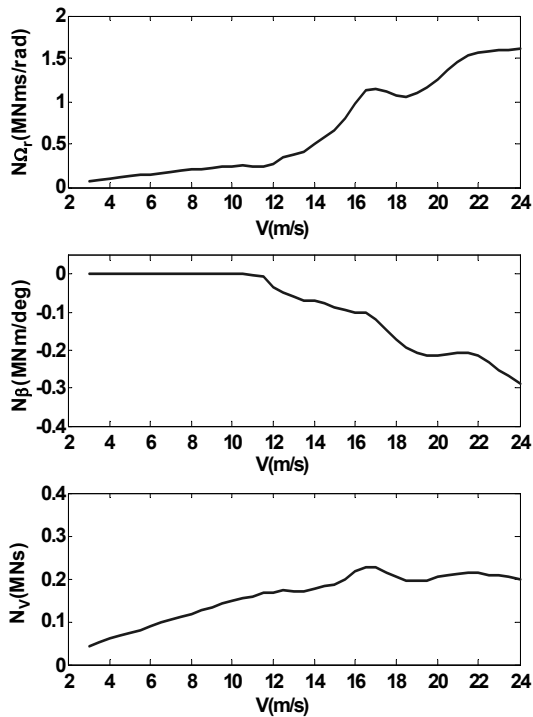


Fig. 4 Steady-state values of aerodynamic nonlinear parameters for an 1.5MW wind turbine

여주고 있다. 정격출력 풍속에서의 N_{Ω} , N_{β} , N_V 의 값과 정지풍속(24m/s)에서의 이들 값을 비교해 보면, N_V 의 변화는 N_{Ω} 과 N_{β} 의 변화에 비해 상대적으로 작음을 알 수 있다.

풍력터빈에서 원하는 출력을 생산하기 위해서는 제어를 항상 수행해야 하므로, 풍력터빈의 동적특성은 제어기와와의 연관성이 매우 높다. 그러므로 동작풍속에 따른 공기역학적 토크의 비선형 파라미터들(N_{Ω} , N_{β} , N_V)이 제어를 통한 폐루프계에 미치는 영향에 대한 연구가 필요할 것이다. 풍력터빈에 대한 물리적인 개념에 근거하여 이에 대하여 간단하게 살펴보면 다음과 같이 말할 수 있을 것이다. 풍력터빈의 제어기는 크게 토크 제어기와 피치 제어기로 구성된다. 토크 제어기는 피치각을 β_{opt} 로 고정된 가운데 로터속도를 제어하며, 피치 제어기는 로터속도를 정격으로 유지하기 위하여 피치각을 제어한다. 그러므로 N_{Ω} 은 토크 제어기와 피치 제어기의 특성 모두에 영향을 미치며, N_{β} 는 피치 제어기의 특성에만 영향을 미치는 비선형 파라미터들이 될 것이다. 이와 같이 N_{Ω} 과 N_{β} 의 변화는 풍력터빈의 동특성과 토크 제어기 및 피치 제어기의 특성에 비선형적인 요소로 매우 큰 영향을 미칠 수 있음을 확인할 수 있는데, 이에 대한 구체적인 연구가 향후 필요할 것으로 보인다.

4. 결 론

본 논문에서는 가변속도-가변피치 풍력터빈의 바람과 블레이드의 상호작용에 따른 비선형적인 공기역학적 토크가 풍력터빈의 전체 거동에 미치는 영향을 확인하기 위하여 공기역학적 토크의 선형화를 통하여 공기역학적 토크의 변화를 나타내는 세 개의 비선형 파라미터들에 대한 특성을 살펴 보았다. 비선형적인 공기역학적 토크를 로터속도, 피치각, 풍속에 대하여 각각 편미분하여 풍력터빈의 동작점들에서 공기역학적 토크의 변화를 표현하는 세 개의 비선형 파라미터들을 계산하는 방법이 제시되었다. 이를 위하여 출력계수의 정보와 주속비를 이용하여 공기역학적 토크의 세 개의 비선형 파라미터들을 계산하는 식이 유도되었다. 그리고 유도된 계산식을 바탕으로 1.5MW급 풍력터빈을 대상으로 로터속도, 피치각, 주속비에 대한 동작점들을 선정한 후, 선정된 동작점들에서 공기역학적 토크의 변화를 나타내는 세 개의 비선형 파라미터들을 구하여 동작 풍속에 따른 이들의 정상 상태 값들을 살펴봄으로서 비선형적인 특성을 살펴보았다.

후 기

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임 (No. 2010-0007063)

참고문헌

- (1) Burton, T., Sharpe, D., Jenkins, N. and Bossanyi, E., 2001, Wind Energy Handbook, John Wiley & Sons, Ltd.
- (2) Bianchi, F. D., Battista, H. D. and Mantz, R. J., 2007, Wind Turbine Control Systems: Principles, Modelling and Gain Scheduling Design, Springer-Verlag.
- (3) 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.
- (4) Ackermann, T. and Söder, L., 2000, "Wind Energy Technology and Current Status: A Review," Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 4, pp. 315~374.
- (5) 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.
- (6) Leithead, W. E. and Connor, B. 2000, "Control of Variable Speed Wind Turbines: Design Task," International Journal of Control, Vol. 73, No. 13, pp. 1189-1212.

임채욱

- (7) 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.
- (8) 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.
- (9) 임채욱, 2009, “가변속도-가변피치 풍력터빈의 정상상태 곡선 결정 방법,” 대한기계학회논문집 B권, 제33권, 제11호, pp. 894~899.