

## 풍력터빈시스템의 적응백스테핑 속도제어기 설계

현근호, 손인환  
신성대학 디지털전기계열

### Design of an Adaptive Backstepping Speed Controller for Wind Turbine System

Keun-Ho Hyun, In-Hwan Son  
Department of Digital Electrical Engineering, Shinsung College

**Abstract** - In this paper a robust controller using adaptive backstepping technique is proposed to control the speed of a wind turbine system. To make wind power generation truly cost effective and reliable, advanced and robust control algorithms are derived to on-line adjust the excitation winding voltage of the generator based on both mechanical and electrical dynamics. This method is shown to be able to achieve smooth and asymptotic rotor position tracking, as justified by analysis.

#### 1. 서 론

화석연료의 대량 소모 및 이에 따른 환경문제와 원자력발전에 의한 위험요소의 증가 등으로 최근에는 태양열, 풍력, 조력 등 대체에너지에 관한 연구와 개발이 많은 관심을 받고 있다. 특히, 풍력발전시스템은 친환경적이면서도 경제적 경쟁력을 갖춘 전기 발생장치로써 각광받고 있다. 그러나, 풍력에너지변환시스템은 바람의 속도 및 방향 등 불분명한 기상 조건과 교류시스템 부하의 지속적인 변동 등으로 인하여 비선형적인 특성이 강하다. 속도의 가변, 풍력터빈의 피치 고정 등을 제어하는 문제는 매우 까다로우며 이것은 정격 풍속 내에서는 안정적이지만 정격 풍속 이상에서는 터빈의 실속(失速 : stall)으로 출력이 제한되어 제어가 불안정하게 되기 때문이다. 따라서, 제어시스템은 전체 작동영역에서의 안정화를 고려해야 하며 풍력으로 얻은 전력을 적절하게 조정(regulation)해야 하는 과제가 주어진다. 즉, 정격풍속 이하에서는 출력을 최대화하고 정격풍속 이상에서는 규격값을 유지시켜야 한다.

주어진 비선형시스템을 선형화하여 제어기를 설계하는 종래의 선형화 제어기법으로는 더 이상의 성능 개선 결과를 얻기 힘들다. 또한, 정격 풍속 이하의 영역에서는 최적의 제어기 설계가 가능하며 단일한 비례제어기만으로도 안정화될 수 있다. 주어진 비선

형시스템을 그대로 사용하여 적응제어이론을 적용한 경우도 있으며 기계, 전기적인 동역학을 기본으로 발전기의 여자권선전압을 온라인 조정하여 비선형 적응제어기를 유도하였다.[1][2] 이러한 제어기는 대부분 속도제어에 초점을 맞추고 있다. 지난 십수년간 적응백스테핑법(adaptive backstepping method)에 관한 연구가 활발히 지속되어 왔으며 비선형 피드백 제어를 체계적이고 순차적으로 설계하는 방식이다.[3][4] 대부분의 경우에 있어서 피드백선형화기법(feedback linearization method)은 한정된 작동 영역 내에서 외란이 없는 상태에서만 유용하지만 적응백스테핑기법에 의한 설계는 이러한 제약을 완화시켜 줄 수 있다. 또한, 피드백선형화기법은 제어대상의 정확한 모델링을 요구하며 필요한 경우 유용한 비선형 항목을 삭제해야 하는 반면 적응백스테핑기법은 불확실성 및 비선형성을 모두 고려할 수 있는 설계 방식을 제공하므로 불필요한 비선형 삭제과정이 필요 없다.

본 논문에서는 적응백스테핑기법을 활용한 풍력터빈의 속도제어 방법을 제시하고자 하며 비선형적인 풍력터빈의 속도제어를 발전기 여자권선 전압으로 조정하고자 기계, 전기적인 동특성과 비선형 적응백스테핑 제어알고리즘을 유도할 예정이다. 2장에서는 strict-feedback 형태의 제어대상에 적용 가능한 적응백스테핑 제어기의 구조를 제시하였고, 3장에서는 풍력터빈시스템에 대한 비선형 적응백스테핑 속도제어기를 설계하였다.

#### 2. 적응백스테핑 제어알고리즘

백스테핑 설계의 요점은 전체 시스템을 구성하는 각각의 부시스템(subsystem)에 대하여 상태변수로 이루어지는 적절한 함수를 가상 제어입력(pseudo-control inputs)으로써 반복적으로 선택하는데 있다. 각각의 백스테핑 단계에서 가상 제어입력이 설계되고 이것들은 앞 단계에서 정의된 가상 제어입력의 함수로 표현된다. 백스테핑 단계가 종료되면 본

래의 설계목적 달성을 위한 실제 제어입력이 최종적인 Lyapunov함수에 의하여 결정되며 이것은 각 설계단계에서 설정된 Lyapunov함수들을 모두 합한 형태이다. 이제 다음과 같은 strict-feedback 형태의 비선형시스템을 고려하자.

$$\begin{aligned} \dot{x}_i &= g_i(\bar{x}_i, t)x_{i+1} + \theta^T F_i(\bar{x}_i, t) + f_i(\bar{x}_i, t) \\ \dot{x}_n &= g_n(\bar{x}_n, t)u + \theta^T F_n(\bar{x}_n, t) + f_n(\bar{x}_n, t) \\ y &= x_1 \end{aligned} \quad (1)$$

여기서,  $\bar{x}_i = [x_1, x_2, \dots, x_i]^T \in R^i$ ,  $u, y \in R$ 은 각각 시스템의 상태변수와 입력, 출력이고  $\theta \in R^p$ 는 미지(未知)의 상수파라미터이며  $g_i(\cdot) \neq 0$ ,  $F_i(\cdot)$  및  $f_i(\cdot)$ 는 기지(既知)의 smooth 비선형함수,  $g_n(\cdot) \neq 0$ ,  $F_n(\cdot)$ ,  $f_n(\cdot)$ 는 기지의 continuous 비선형함수이다. 이제 다음과 같은 기지, 유계(bounded)의 smooth 기준모델을 고려하자.

$$\begin{aligned} \dot{x}_r &= f_r(x_r, t), \quad 1 \leq i \leq m, \quad n \leq m \\ y_r &= x_{r1} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서,  $x_r = [x_{r1}, x_{r2}, \dots, x_r]^T \in R^m$  과  $y_r \in R$ 은 각각 시스템의 상태변수와 출력이며  $f_r(\cdot)$ ,  $i=1, 2, \dots, m$ 은 기지의 smooth 비선형함수이다. 제어 목적은 제어대상 시스템인 식(2.10)의 출력  $y=x_1$ 가 기준모델 시스템인 식(2.11)의 출력  $y_r=x_{r1}$ 을 점근적(asymptotically)으로 추종(tracking)하고, 즉  $\lim_{t \rightarrow \infty} |y - y_r| = 0$  이고 전체 시스템의 안정성을 보장해주는 적응 상태피드백 제어를 설계하는 것이다.

백스테핑 설계절차는  $n$  단계로 구성된다.  $i$  단계에서 적절한 Lyapunov함수  $V_i$ 를 활용하여 가상 제어 입력  $\alpha_i$ (또는 안정화함수)가 설정된다. 각 단계에서 오차변수  $z_i$ 와 안정화함수는 다음과 같이 설정한다.

$$\begin{aligned} z_1 &= x_1 - x_{r1} \\ z_{i+1} &= x_{i+1} - x_{r(i+1)} - \alpha_i, \quad 1 \leq i \leq n-1 \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= \frac{1}{g_1}(-c_1 z_1 - \theta^T F_{1\theta} - f_{1s}) \\ \alpha_i &= \frac{1}{g_i}(-c_i z_i - g_{i-1} z_{i-1} - \theta^T F_{i\theta} - f_{is} \\ &\quad + \sum_{k=1}^{i-2} z_{k+1} \frac{\partial \alpha_k}{\partial \theta} IF_{i\theta}) \end{aligned} \quad (4)$$

여기서, 각 축차(regressor)함수들은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} F_{1\theta} &= F_1 \\ F_{i\theta} &= F_i - \sum_{k=1}^{i-1} \frac{\partial \alpha_{i-1}}{\partial x_k} F_k \\ f_{1s} &= f_1 - f_{r1} + g_{1r} x_{r2} \\ f_{is} &= f_i - f_{ri} + g_{ir} x_{r(i+1)} - \sum_{k=1}^{i-1} \frac{\partial \alpha_{i-1}}{\partial x_k} (g_k x_{k+1} + f_k) \\ &\quad - \frac{\partial \alpha_{i-1}}{\partial \theta} \tau_i - \sum_{k=1}^m \frac{\partial \alpha_{i-1}}{\partial x_{rk}} f_{rk} - \frac{\partial \alpha_{i-1}}{\partial t} \end{aligned} \quad (5)$$

미지파라미터를 추정하는 적응칙(adaptation law)은 다음과 같다.

$$\dot{\theta} = \tau_n = \tau_{n-1} + \Gamma F_{n\theta} z_n \quad (6)$$

여기서, 각 튜닝(tuning)함수들은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \tau_1 &= \Gamma F_{1\theta} z_1, \quad \tau_i = \tau_{i-1} + \Gamma F_{i\theta} z_i, \\ \Gamma &= \Gamma^T > 0 \end{aligned} \quad (7)$$

최종  $n$  단계에서의 안정화함수  $\alpha_n$ 은 다음과 같은 실제 제어입력이 된다.

$$\begin{aligned} \alpha_n = u &= \frac{1}{g_n}(-c_n z_n - g_{n-1} z_{n-1} - \theta^T F_{n\theta} \\ &\quad - f_{ns} + \sum_{k=1}^{n-2} z_{k+1} \frac{\partial \alpha_k}{\partial \theta} IF_{n\theta}) \end{aligned} \quad (8)$$

각 단계별 Lyapunov함수는 다음과 같이 설정한다.

$$\begin{aligned} V_1 &= \frac{1}{2} z_1^2 + \frac{1}{2} (\theta - \theta) \Gamma^{-1} (\theta - \theta) \\ V_n &= V_{n-1} + \frac{1}{2} z_n^2 \end{aligned} \quad (9)$$

이에 대한 도함수는 식(6)의 적응칙과 식(8)의 제어 입력을 적용할 경우 다음과 같다.

$$\dot{V}_n = - \sum_{k=1}^n c_k z_k^2 \leq 0 \quad (10)$$

또한, 각 단계별 오차변수는 다음과 같은 형태의 동특성 방정식을 갖는다.

$$\begin{aligned} \dot{z}_1 &= -c_1 z_1 + g_1 z_2 + (\theta - \theta)^T F_1 \\ \dot{z}_i &= -g_{i-1} z_{i-1} - c_i z_i + g_i z_{i+1} + (\theta - \theta)^T F_{is} \\ \dot{z}_n &= -g_{n-1} z_{n-1} - c_n z_n + (\theta - \theta)^T F_{ns} \end{aligned} \quad (11)$$

식(1)의 제어대상 시스템과 식(2)의 기준모델 시스템에 대하여 식(6)의 적응칙과 식(8)의 제어입력을 적용하면 LaSalle-Yoshizawa 정리[5][6]에 의하여 제어대상 시스템의 상태  $x=[x_1, x_2, \dots, x_n]$  와 파라미터 추정값  $\hat{\theta}$  제어입력  $u$ 를 비롯한 전체 시스템의 모든 신호가 유계이고 오차변수는 모두 점근적으로 0으로 수렴( $\lim_{t \rightarrow \infty} z(t)=0$ )하게 된다. 따라서,  $z_1 = x_1 - x_{r1} = y - y_r = 0$  이 됨으로 제어 목적을 달성할 수 있다.

### 3. 풍력터빈시스템의 속도제어

전형적인 풍력발전시스템을 그림 1과 같이 표현하였으며 크게 풍력터빈, 기어박스 및 발전기의 세 부분으로 구성된다.

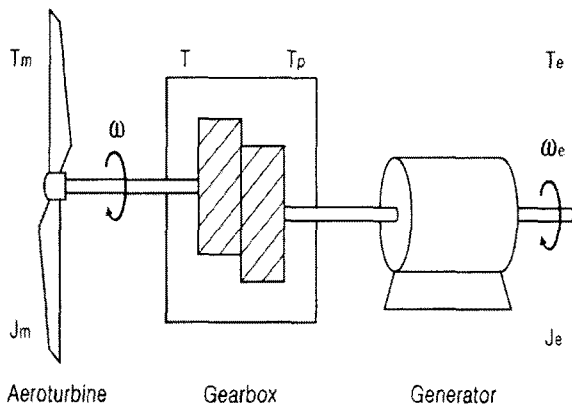


그림 1. 풍력발전시스템의 일반적인 구조

그림 1에서 입력되는 바람의 토크  $T_m$ 에 의하여 풍력터빈의 회전날개가 각속도  $\omega$ 로 회전된다. 기어박스의 변속기 출력 토크  $T_p$ 는 발전기로 유입되어 발전기 각속도  $\omega_e$ 에서 축(shaft) 토크  $T_e$ 를 발생시킨다. 기어박스의 사용에 따라 회전날개와 발전기의 각속도는 일반적으로 상이하다. 풍력터빈으로부터 발생하는 전력은 가용 풍력, 기계의 전력곡선 및 바람 방향의 변화에 대한 기계의 대응 능력 등 세 가지 주요 요소의 함수이며 이론적으로 풍력터빈에서 발생하는 전력은 다음과 같이 결정된다.

$$P_m(\omega) = k_w \omega^3 \quad \text{with} \quad k_w = \frac{1}{2} C_p \rho \pi \frac{R^6}{\lambda^3} \quad (12)$$

여기서,  $C_p$ 는 풍력터빈의 전력계수,  $\rho$ 는 공기밀도,  $R$ 은 회전날개의 반지름,  $\lambda$ 는 팁속도비이다. 풍력발전시스템의 동특성(dynamics)은 다음과 같은 수식으로 표현된다.

$$T_m - T = J_m \dot{\omega} + B_m \omega + K_m \int_0^t \omega dt \quad (13)$$

$$T_p - T_e = J_e \dot{\omega}_e + B_e \omega_e + K_e \int_0^t \omega_e dt$$

$$T_p \omega_e = T \omega$$

여기서,  $B_m, K_m, B_e, K_e$ 는 마찰 및 비틀림 관련 상수들이고  $T_m, T_e, T, T_p$ 는 각각 터빈끝, 발전기끝, 기어박스 전후 부분의 축 토크이며  $J_m, J_e$ 는 터빈과 발전기의 관성모멘트이다. 기어비  $G = \frac{\omega_e}{\omega}$ 의 정의에 따르면 식(12) 및 식(13)을 다음과 같이 결합하여 표현할 수 있다.

$$J \omega + B \omega + K \int_0^t \omega dt = T_m - G T_e \quad (14)$$

여기서,  $J = J_m + G^2 J_e$ ,  $B = B_m + G^2 B_e$  및  $K = K_m + G^2 K_e$ 이고  $T_e$ 는 발전기에서 발생하는 토크로써 다음과 같이 발전기의 계자전류  $I_f$ 에 비례한다.

$$T_e = K_e I_f \quad (15)$$

여기서,  $K_e$ 는 기계 관련 상수이다. 본 논문에서 다루는 풍력발전시스템의 여자시스템은 그림 2와 같이 표현되며 동특성은 다음과 같다.

$$L \dot{I}_f + R I_f = u_f \quad (16)$$

여기서,  $L$ 은 여자회로의 인덕턴스,  $R$ 은 회전자의 전기저항,  $u_f$ 는 계자전압을 나타낸다.

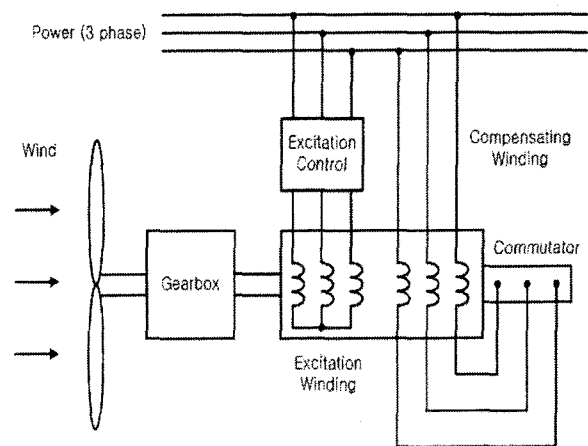


그림 2. 여자시스템의 구조

풍력터빈의 회전속도  $\omega$ 는 그림 2에서와 같이 여자

권선전압을 조정함으로써 제어된다. 본 논문에서는 식(16)의 여자전압  $u_f$ 를 통하여 식(14)의 발전 토크  $T_e$ 를 제어함으로써 회전속도를 적절하게 조정할 수 있는 제어기를 설계하고자 한다. 제어 문제로서 다시 기술한다면 풍력터빈의 회전속도( $\omega$ )가 원하는 기준속도( $\omega_r$ )를 점근적(asymptotically)으로 추종(tracking)할 수 있도록 즉,  $\lim_{t \rightarrow \infty} |\omega - \omega_r| = 0$  이 되도록 제어입력(계자전압  $u_f$ )을 설계하는 것이다. 단, 기준각 및 그 미분값들( $\omega_r, \dot{\omega}_r, \ddot{\omega}_r$ )은 유계(bounded)이다. 제어기 설계를 위하여 식(14) 및 식(16)을 재처리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{\omega} &= a_1 \omega^2 + a_2 \omega + a_3 \int_0^t \omega d\tau + b_1 I_f \\ I_f &= b_2 I_f + b_3 u_f \end{aligned} \quad (17)$$

여기서,  $a_1 = \frac{k_w}{J}$ ,  $a_2 = -\frac{B}{J}$ ,  $a_3 = -\frac{K}{J}$ 는 미지 파라미터이고,  $b_1 = -\frac{GK_e}{J}$ ,  $b_2 = -\frac{R}{L}$ ,  $b_3 = \frac{1}{L}$ 은 기지 파라미터이다. 이제 식(1)과 같은 strict-feedback 형태로 식(17)을 고려하여  $x_1 = \omega$ ,  $x_2 = I_f$ ,  $u = u_f$ 로 설정하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= g_1(x_1, t)x_2 + \theta^T F_1(x_1, t) \\ \dot{x}_2 &= g_2(x_1, x_2, t)u + f_2(x_1, x_2, t) \\ y &= x_1 \end{aligned} \quad (18)$$

식(1)의 strict-feedback 비선형시스템 구조에서  $F_2(x_1, x_2, t) = f_1(x_1, t) = 0$ 이며 식(18)의 함수 및 파라미터는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} g_1(x_1, t) &= b_1, \quad g_2(x_1, x_2, t) = b_3 \\ F_1(x_1, t) &= [x_1^2 \quad x_1 \int_0^t x_1 d\tau]^T \\ f_2(x_1, x_2, t) &= b_2 x_2, \quad \theta = [a_1 \quad a_2 \quad a_3]^T \end{aligned} \quad (19)$$

따라서, 적응백스테핑 제어기를 식(6) 및 식(8)과 같이 적용하면 회전속도가 기준속도를 추종하고 제어를 포함한 시스템 전체의 안정성이 보장된다. 기준속도에 대한 동특성방정식-식(2)-는 임의로 설정되 유계의 smooth신호가 되도록 하며 그림 3은 기준속도의 예를 보여준다.

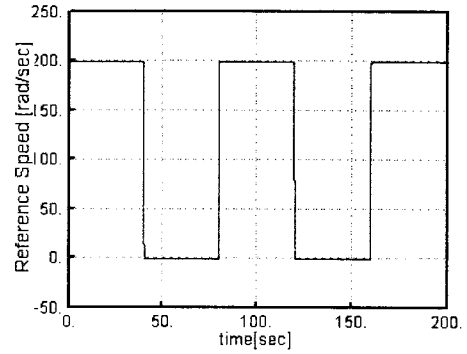


그림 3. 기준속도의 예

#### 4. 결 론

본 논문에서는 적응백스테핑기법을 활용한 풍력터빈의 속도제어 방법을 제시하였으며 비선형적인 풍력터빈의 속도제어를 발전기 여자권선 전압으로 조정하였다. 이를 위하여 strict-feedback 형태의 제어 대상에 적용 가능한 적응백스테핑 제어기의 구조를 제시하였고, 풍력터빈시스템의 기계, 전기적인 동특성을 활용하여 비선형 적응백스테핑 제어알고리즘을 유도하였다. 차후 본 논문에서 제시된 알고리즘의 타당성을 확인하기 위하여 컴퓨터 시뮬레이션 및 실험을 수행할 예정이다.

#### [ 참고 문헌 ]

- [1] X.F.Zhang, D.P.Xu and Y.B.Liu, "Adaptive Optimal Fuzzy Control for Variable Speed Fixed Pitch Wind Turbines", Proceedings of the 5th World Congress on Intelligent Control and Automation, June 15~19, 2004, Hangzhou, P.R.China
- [2] Y.D.Song, B.Dhinakaran and X.Bao, "Control of Wind Turbines using Nonlinear Adaptive Field Excitation Algorithms", Proceedings of the American Control Conference, June, 2000, Chicago, Illinois
- [3] M.Krstic, I.Kanellakopoulos and P.Kokotovic, "Nonlinear and Adaptive Control Design", John Wiley & Sons, 1995
- [4] R.Sepulchre, M.Jankovic and P.Kokotovic, "Constructive Nonlinear Control", Springer, 1997
- [5] J.P.LaSalle, "Stability Theory for Ordinary Differential Equations", Journal of Differential Equations, vol.4, pp.57~65, 1968
- [6] T.Yoshizawa, "Stability Theory by Lyapunov Second Method", The Mathematical Society of Japan, Tokyo, 1966