

풍력발전시스템의 적응백스테핑 위치제어기 설계

현근호
신성대학 디지털전기계열

Design of an Adaptive Backstepping Position Controller for the Wind Power Generation System

Keun-Ho Hyun
Department of Digital Electrical Engineering

Abstract - In this paper a robust controller using adaptive backstepping technique is proposed to control the position of wind power generation 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 speed tracking, as justified by analysis and computer simulation.

1. 서론

화석연료의 대량 소모 및 이에 따른 환경문제와 원자력발전의 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 기상조건과 교류시스템 부하의 계속적인 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.

한편, 지난 몇년간 적응백스테핑 기법(adaptive backstepping method)에 관한 연구가 활발히 지속되어 왔으며 이것은 비선형 피드백 제어를 체계적이고 순차적으로 설계하는 방식이다. 대부분의 경우에 있어서 피드백선형화기법(feedback linearization method)은 한정된 작동 영역 내에서 외란이 없는 상태에서만 유용하지만 적응백스테핑 기법에 의한 설계는 이러한 제약을 완화시켜 줄 수 있다.

본 논문에서는 적응백스테핑 기법을 활용한 풍력발전시스템의 위치제어 방법을 제시하고자 하며 비선형적인 풍력발전기의 위치제어를 발전기 계자권선 전압으로 조정하고자 기계, 전기적인 동특성과 비선형 적응백스테핑 제어알고리즘을 유도할 예정이다. 또한, strict-feedback 형태의 제어대상에 적용 가능한 적응백스테핑 제어기의 구조를 제시하고, 컴퓨터 모의실험을 수행하여 타당성을 입증하였다.

2. 본론

2.1 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. 이제 다음과 같은 strict-feedback 형태의 비선형시스템을 고려하자.

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

여기서, $\bar{x}_i = [x_1, x_2, \dots, x_i]^T \in R^i$, $u, y \in R^1$ 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 비선형 함수, $g_n(\cdot) \neq 0$, $F_n(\cdot)$, $f_n(\cdot)$ 는 기지의 continuous 비선형 함수이다. 이제 다음과 같은 기지, 유계(bounded)의 smooth 기준모

델을 고려하자.

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

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

백스테핑 설계절차는 n 단계로 구성되며, i 단계에서 적절한 Lyapunov함수 V_i 를 활용하여 가상 제어입력 α_i (또는 안정화함수)가 설정된다. 각 단계에서 오차변수 z_i 와 안정화함수는 다음과 같이 설정한다.

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

$$\alpha_1 = \frac{1}{g_1}(-c_1 z_1 - \theta^T F_{1\theta} - f_{1s}) \quad (4)$$

$$\alpha_i = \frac{1}{g_i}(-c_i z_i - g_{i-1} z_{i-1} - \theta^T F_{i\theta} - f_{is} + \sum_{k=1}^{i-2} z_{k+1} \frac{\partial \alpha_k}{\partial \theta} \Gamma F_{i\theta})$$

여기서, 각 축차(regressor)함수들은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} F_{1s} &= F_1, \quad F_{is} = F_i - \sum_{k=1}^{i-1} \frac{\partial \alpha_{k-1}}{\partial x_k} F_k, \quad f_{1s} = f_1 - f_{r1} + g_1 x_{r2} \\ f_{is} &= f_i - f_{ri} + g_i x_{r(i+1)} - \sum_{k=1}^{i-1} \frac{\partial \alpha_{k-1}}{\partial x_k} (g_k x_{k+1} + f_k) \\ &\quad - \frac{\partial \alpha_{i-1}}{\partial \theta} \Gamma_i - \sum_{k=1}^m \frac{\partial \alpha_{i-1}}{\partial x_k} f_{rk} - \frac{\partial \alpha_{i-1}}{\partial t} \end{aligned} \quad (5)$$

미지파라미터를 추정하는 적응칙(adaptation law)은 다음과 같다.

$$\dot{\hat{\theta}} = \sum_{k=1}^n \Gamma F_{is} z_i \quad (\Gamma = \text{diag}[\gamma_1 \quad \gamma_2 \quad \dots \quad \gamma_n] = \Gamma^T > 0) \quad (6)$$

n 단계에서의 안정화함수 α_n 은 다음과 같은 제어입력이 된다.

$$u = \frac{1}{g_n}(-c_n z_n - g_{n-1} z_{n-1} - \theta^T F_{ns} - f_{ns} + \sum_{k=1}^{n-2} z_{k+1} \frac{\partial \alpha_k}{\partial \theta} \Gamma F_{ns}) \quad (7)$$

각 단계별 Lyapunov함수와 도함수는 다음과 같다.

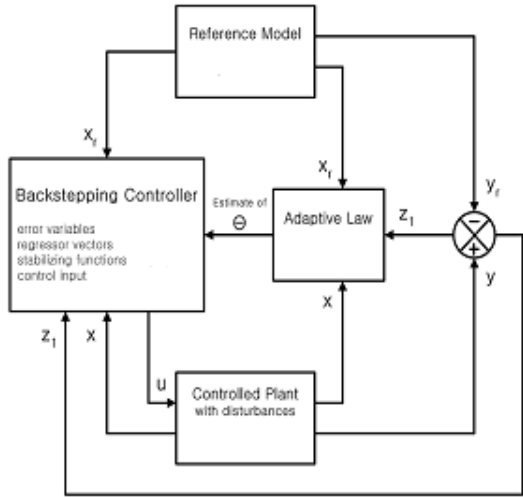
$$V_1 = \frac{1}{2} z_1^2 + \frac{1}{2} (\hat{\theta} - \theta) \Gamma^{-1} (\hat{\theta} - \theta), \quad V_n = V_{n-1} + \frac{1}{2} z_n^2 \quad (8)$$

$$\dot{V}_n = - \sum_{k=1}^n c_k z_k^2 \leq 0 \quad (9)$$

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

$$\begin{aligned} \dot{z}_1 &= -c_1 z_1 + g_1 z_2 + (\theta - \hat{\theta})^T F_1 \\ \dot{z}_i &= -g_{i-1} z_{i-1} - c_i z_i + g_i z_{i+1} + (\theta - \hat{\theta})^T F_{i,s} \\ \dot{z}_n &= -g_{n-1} z_{n-1} - c_n z_n + (\theta - \hat{\theta})^T F_{n,s} \end{aligned} \quad (10)$$

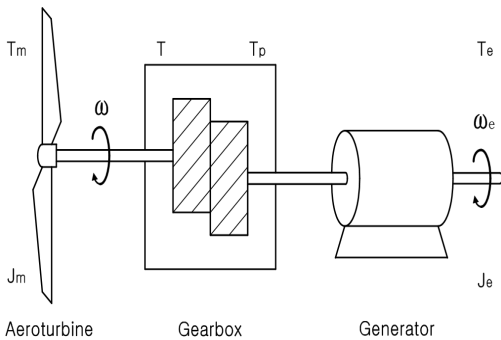
식(1)의 제어대상 시스템과 식(2)의 기준모델 시스템에 대하여 식(6)의 적응칙과 식(7)의 제어입력을 적용하면 LaSalle정리에 의하여 제어대상 시스템의 상태 $x = [x_1, x_2, \dots, x_n]$ 와 파라미터 추정값 $\hat{\theta}$, 제어입력 u 를 비롯한 전체 시스템의 모든 신호가 유계이고, 오차변수는 모두 점근적으로 0으로 수렴($\lim_{t \rightarrow \infty} z(t) = 0$) 하게 되며, $z_1 = x_1 - x_{r1} = y - y_r = 0$ 이 되어 제어 목적을 달성할 수 있으며 전체 페루프 제어시스템의 구성은 그림 1과 같다.



<그림 1> 전체 페루프 제어시스템 구성

2.2 풍력발전과 계자제어시스템

풍력발전시스템은 날개의 회전축의 방향에 따라 회전축이 지면에 대해 수직으로 설치되어 있는 수직축 풍차와 회전축이 지면에 대해 수평으로 설치되어 있는 수평축 풍차로 구분된다. 수직축 풍차는 바람의 방향에 관계가 없어 사막이나 평원에 많이 설치하여 이용할 수 있지만 소재가 비싸고 수평축 풍차에 비해 효율이 떨어지는 단점이 있다. 수평축 풍차는 간단한 구조로 이루어져 있어 설치하기 편리하나 바람의 방향에 영향을 많이 받는다. 본 논문에서는 일반적으로 많이 사용되는 수평축 풍차를 다룰 예정이며 그 전형적인 구조는 그림 2와 같이 크게 터빈날개, 기어박스 및 발전기의 세 부분으로 구성된다.



<그림 2> 풍력발전시스템의 일반적인 구조

그림 2에서 입력되는 바람의 토크 T_m 에 의하여 풍력터빈의 회전날개가 각속도 ω 로 회전된다. 기어박스의 변속기 출력 토크 T_p 는 발전기로 유입되어 발전기 각속도 ω_e 에서 축(shaft) 토크 T_e 를 발생시킨다. 기어박스의 사용에 따라 회전날개와 발전기의 각속도는 일반적으로 상이하다. 풍력발전시스템으로부터 발생하는 전력은 가용 풍력, 기계의 전력곡선 및 바람방향의 변화에 대한 기계의 대응 능력 등 세 가지 주요 요소의 함수이며 이론적

으로 풍력발전시스템에서 발생하는 전력은 다음과 같다.

$$P_m(\omega) = k_w \omega^3 \quad \text{with } k_w = \frac{1}{2} C_p \rho \pi \frac{R^5}{\lambda^3} \quad (11)$$

여기서, k_w 는 발전계수, C_p 는 풍력터빈의 전력계수, ρ 는 공기밀도, R 은 회전날개의 반지름, λ 는 틱속도비이다. 풍력발전시스템의 동특성(dynamics)은 다음과 같은 수식으로 표현된다.

$$\begin{aligned} T_m - T &= J_m \dot{\omega} + B_m \omega + K_m \int_0^{\tau} \omega d\tau \\ T_p - T_e &= J_e \dot{\omega}_e + B_e \omega_e + K_e \int_0^{\tau} \omega_e d\tau, \quad T_p \omega_e = T\omega \end{aligned} \quad (12)$$

여기서, B_m, K_m, B_e, K_e 는 마찰, 비틀림 상수이고 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(11) 및 식(12)를 다음과 같이 결합하여 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{\phi} &= \omega \\ J\dot{\omega} + B\omega + K \int_0^{\tau} \omega d\tau &= T_m - GT_e \end{aligned} \quad (13)$$

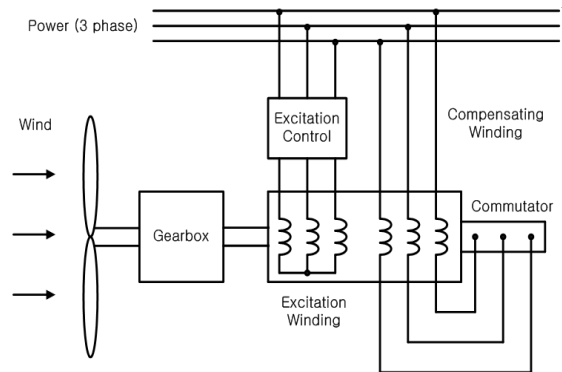
여기서, ϕ 는 회전날개의 회전각을 나타내며 $J = J_m + G^2 J_e, B = B_m + G^2 B_e, K = K_m + G^2 K_e$ 이고 T_e 는 발전기에서 발생하는 토크로써 다음과 같이 발전기의 계자전류 I_f 에 비례한다.

$$T_e = K_e I_f \quad (14)$$

여기서, K_e 는 기계상수이다. 본 논문에서 다루는 풍력발전시스템의 계자시스템은 그림 3과 같이 표현되며 동특성은 다음과 같다.

$$L\dot{I}_f + RI_f = u_f \quad (15)$$

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



<그림 3> 계자제어시스템의 구조

2.3 적응백스테핑 위치제어기 설계

풍력터빈의 회전각 ϕ 는 그림 3에서와 같이 계자권선전압을 조정함으로써 제어된다. 본 논문에서는 식(15)의 여자전압 u_f 를 통하여 식(14)의 발전 토크 T_e 를 제어함으로써 회전각 ϕ 을 적절하게 조절할 수 있는 제어기를 설계하고자 한다. 제어 문제로서 다시 기술한다면 풍력터빈의 회전각(ϕ)이 원하는 기준각(ϕ_r)을 점근적으로 추종할 수 있도록 즉, $\lim_{t \rightarrow \infty} |\phi - \phi_r| = 0$ 이 되도록 제어 입력(계자전압 u_f)을 설계하는 것이다. 단, 기준각 및 그 미분값들($\phi_r, \dot{\phi}_r, \ddot{\phi}_r$)은 유계(bounded)이다. 제어기 설계를 위하여 식(14) 및 식(16)을 재정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}\dot{\phi} &= \omega & (16) \\ \dot{\omega} &= a_1 \omega^2 + a_2 \omega + a_3 \phi + b_1 I_f \\ \dot{I}_f &= b_2 I_f + b_3 u_f\end{aligned}$$

여기서, $a_1 = \frac{k_w}{J}$, $a_2 = -\frac{B}{J}$, $a_3 = -\frac{K}{J}$ 는 미지(未知) 파라미터이고, $b_1 = -\frac{GK_e}{J}$, $b_2 = -\frac{R}{L}$, $b_3 = \frac{1}{L}$ 은 기지(既知) 파라미터이다. 이제 식(1)과 같은 strict-feedback 형태로 식(16)을 고려하여 $x_1 = \phi$, $x_2 = \omega$, $x_3 = I_f$, $u = u_f$ 로 설정하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= g_1(x_1, t)x_2 & (17) \\ \dot{x}_2 &= g_2(x_1, x_2, t)x_3 + \theta^T F_2(x_1, x_2, t) \\ \dot{x}_3 &= g_3(x_1, x_2, x_3, t)u + f_3(x_1, x_2, x_3, t) \\ y &= x_1\end{aligned}$$

식(1)의 비선형시스템 구조에서 축차함수 $F_1 = F_3 = f_1 = f_2 = 0$ 이며 식(17)의 함수와 파라미터는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}g_1(x_1, t) &= 1, & g_2(x_1, x_2, t) &= b_1, & g_3(x_1, x_2, x_3, t) &= b_3 & (18) \\ F_2(x_1, x_2, t) &= [x_2^2 \ x_2 \ x_1]^T, & f_3(x_1, x_2, x_3, t) &= b_2 x_3, & \theta &= [a_1 \ a_2 \ a_3]^T\end{aligned}$$

또한, 오차변수, 안정화함수 및 회귀함수는 각각 다음과 같다.

$$\begin{aligned}z_1 &= x_1 - x_{r1}, & z_2 &= x_2 - x_{r2} - \alpha_1, & z_3 &= x_3 - x_{r3} - \alpha_2 & (19) \\ \alpha_1 &= \frac{1}{g_1}(-c_1 z_1 - f_{1s}),\end{aligned}$$

$$\alpha_2 = \frac{1}{g_2}(-c_2 z_2 - g_1 z_1 - \hat{\theta}^T F_{2s} - f_{2s} + z_2 \frac{\partial \alpha_1}{\partial \theta} \Gamma F_{2s})$$

$$F_{1s} = 0, \quad F_{2s} = F_2, \quad F_{3s} = -\frac{\partial \alpha_2}{\partial x_2} F_2, \quad f_{1s} = -f_{r1} + g_1 x_{r2}$$

$$f_{2s} = -f_{r2} + g_1 x_{r2} - \frac{\partial \alpha_1}{\partial x_1} g_1 x_2 - \frac{\partial \alpha_1}{\partial \theta} \Gamma F_{2s} z_2 - \frac{\partial \alpha_1}{\partial x_{r1}} f_{r1} - \frac{\partial \alpha_1}{\partial x_{r2}} f_{r2} - \dot{\alpha}_1$$

$$\begin{aligned}f_{3s} &= f_3 - f_{r3} + g_2 x_{r3} - \frac{\partial \alpha_2}{\partial x_2} g_2 x_3 \\ &\quad - \frac{\partial \alpha_2}{\partial \theta} \Gamma (F_{2s} z_2 + F_{3s} z_3) - \frac{\partial \alpha_2}{\partial x_{r2}} f_{r2} - \frac{\partial \alpha_2}{\partial x_{r3}} f_{r3} - \dot{\alpha}_2\end{aligned}$$

이제, 적응백스테핑 제어기를 식(6) 및 식(7)과 같이 적용하면 다음과 같다.

$$\dot{\hat{\theta}} = \Gamma (F_{2s} z_2 + F_{3s} z_3) \quad (20)$$

$$u = \alpha_3 = \frac{1}{g_3}(-c_3 z_3 - g_2 z_2 - \hat{\theta}^T F_{3s} - f_{3s} + z_3 \frac{\partial \alpha_2}{\partial \theta} \Gamma F_{3s}) \quad (21)$$

따라서, 적응백스테핑 제어기를 식(6) 및 식(8)과 같이 적용하면 회전각(ϕ)이 기준각(ϕ_r)을 추종하고 제어기를 포함한 시스템 전체의 안정성이 보장된다.

2.4 컴퓨터 모의실험 및 결과 고찰

본 논문에서 제시된 적응백스테핑 위치제어기의 타당성을 입증하기 위하여 컴퓨터 모의실험을 수행하였다.

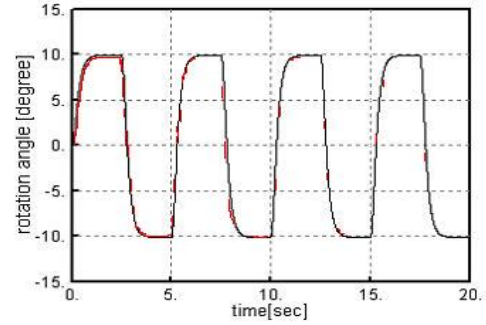
<표 1> 모의실험에서 설정한 시스템파라미터

파라미터명(기호)	값[단위]
발전계수(k_w)	0.0044
마찰상수(B)	0.006[Nm/rpm]
비틀림상수(K)	0.002[Nm/rad]
관성모멘트(J)	0.5[kg · m ²]
기어비(G)	5
기계상수(K_e)	0.3[Nm/A ²]
계자저항(R)	1.6[Ω]
계자인덕턴스(L)	0.01[H]

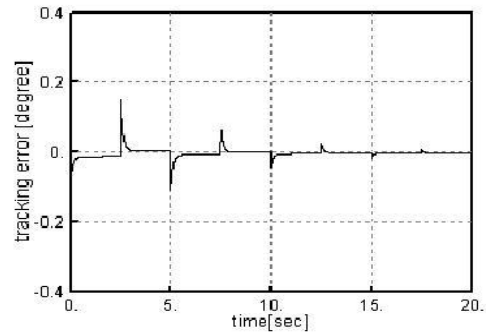
풍력발전시스템은 발전용량 1.2[kW], 정격 회전속도 200[rpm] 및 회전자 직경 1[m]인 시스템(Delft T-40/500)을 대상으로 하였으며 이에 따른 시스템파라미터는 제작사에서 제시한대로 표 1과 같이 설정하였다. 또한, 기준모델 입력의 경우 식(2)의 조건을 만족시킬 수 있도록 3차의 기준모델(θ_r)은 $\pm 10[^\circ]$ 의 구형파가 전

달함수 $\frac{1000}{s^3 + 35s^2 + 350s + 1000}$ 을 통과한 신호로 설정하였다.

제어기의 설계파라미터 즉, 적응 및 제어이득은 각각 $c_1 = c_2 = c_3 = 1$, $\gamma_1 = 0.1$, $\gamma_2 = 0.01$, $\gamma_3 = 0.001$ 로 설정하였다. 그림 4는 모의실험 결과로써 그림 4(a)는 기준각(ϕ_r)과 회전각(ϕ)를, 그림 4(b)는 추종오차를 나타내며 회전각이 기준각을 5[sec] 정도 후 $\pm 0.1[^\circ]$ 오차범위 이하로 추종하고 있다.



(a) 기준각($\phi_r \rightarrow$ 흑색)과 회전각($\phi \rightarrow$ 적색)



(b) 위치추종오차($z_1 = \phi - \phi_r$)

<그림 4> 컴퓨터 모의실험 결과

3. 결 론

본 논문에서는 적응백스테핑 기법을 활용한 풍력발전시스템의 위치제어 방법을 제시하였으며 비선형적인 풍력발전시스템의 회전각 제어를 발전기 계자권선 전압으로 조정하였다. 이를 위하여 strict-feedback 형태의 제어대상에 적용 가능한 적응백스테핑 제어기의 구조를 제시하였고, 풍력발전시스템의 기계, 전기적인 동특성을 활용하여 비선형 적응백스테핑 제어알고리즘을 유도하였다. 또한, 본 논문에서 제시된 알고리즘의 타당성을 확인하기 위하여 컴퓨터 모의실험을 수행하였으며 차후 모형시스템 혹은 실제시스템을 대상으로 실험을 수행할 예정이다.

[참 고 문 헌]

- [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] K.H.Hyun and I.H.Son, "Design of an Adaptive H ∞ Controller for Linear Induction Motor", International Conference on Control, Automation and Systems) Proceeding, pp. 598~603, KINTEX, Korea, 2005