

풍력발전시스템에서의 LQG 제어에 관한 연구

김호찬
 제주대학교 전기공학과, 산업기술연구소

A study on the LQG control in wind power systems

Ho-Chan Kim
 Dept. of Electrical Eng., Cheju National University, RIIT

Abstract - In this paper, the aspects on modeling and control of an existing wind turbine are discussed. When designing control for variable-speed wind turbine, one deals with highly resonant, nonlinear dynamic systems subject to random excitation, i.e. wind turbulence. This requires good knowledge of the dynamics to be controlled. This paper describes an mathematical modeling of wind turbines with emphasis on control design for an existing wind turbine.

1. 서론

자원의 고갈과 환경문제가 대두됨에 따라 우리나라에서도 풍력, 태양광 발전등과 같은 신재생에너지에 관심이 점차 늘어나고 있다. 풍력에너지의 이용선진국인 미국 유럽국가들의 메가와트급 시스템 개발 및 중국, 인도 등 후발국가에서의 풍력단지 건설은 풍력에너지가 대체 에너지원의 하나로 각광을 받고 있음을 입증한다. 그러나, 국내의 풍력에너지 이용기술은 아직 기초적 단계에 머물고 있으며 기 개발된 외국기종의 도입을 통한 풍력발전시스템의 운용성 연구에 주력하고 있는 실정이다. 제주도인 경우 풍력발전기가 월령신재생에너지 연구센터에 4기와 중문관광단지에서 1기가 설치 운용되고 있고 [1], 1998년 3월 구좌읍 행원리에 Vestas V42-600KW급 풍력발전기 2기가 설치되어 한국전력 라인에 직접적으로 연결되어 전력을 공급하고 있다. 본 연구는 실제 현장에서 동작하는 V42-600KW 풍력발전 시스템을 실질적으로 모델링하고 LQG 제어 알고리즘을 적용하여 성능을 비교 평가하는데 목적을 두고 있다.

2. 풍력발전시스템 모델링

풍력시스템의 구조상 분류로는 수평축 풍력시스템(HWAT)과 수직축 풍력시스템(VAWT)으로 구분할 수 있다 [2]. 풍력발전시스템의 주요 구성은 바람의 에너지를 기계적인 에너지로 변환하여 발전기로 전달하여 주는 회전자(rotor)와 동력전달장치로 구성된 풍차부분과 기계적인 에너지를 전기적인 에너지로 변환하여 주는 발전기(generator) 부분으로 구성되며 이것들을 지지하여 주는 철탑과 전압, 주파수, 풍향추적과 계통선과의 연계 등을 위한 제어시스템으로 구성된다 [2]. 주위 조건에 변화에 따른 풍력발전기의 각 구성요소에 대한 운전상태 변화를 얻기 위해서는 풍력시스템을 구성하고 있는 구성요소에 대한 동적 해석이 필수적이라 할 수 있다.

2.1 풍속 모델링

풍력발전시스템의 동적 성능을 확인하기 위해서는 바람의 특성을 분석하는 것이 필요한데 바람은 풍속과 풍향으로 나누어 생각할 수 있다. 풍속을 성분별로 나누면 시간에 따라 천천히 변하는 평균풍속(average speed) 부분(v_m)과 아주 급히 변하는 난류풍속(turbulence speed) 부분(Δv)으로 나눌

수 있는데, 풍속 모델링한 선형 모델은 다음과 같이 나타낼 수 있다 [3].

$$v = v_m + \Delta v \tag{2.1}$$

$$\dot{\Delta v} = -\frac{b_1 + b_2}{b_1 b_2} \Delta v - \frac{1}{b_1 b_2} \Delta v + \frac{k}{b_1 b_2} e$$

여기서 평균풍속 v_m 은 기온과 지리적 환경에 영향을 받는데 특정지형의 풍속을 분석하는데 사용되는 10분 평균풍속이 이에 해당되고 난류풍속 Δv 는 백색잡음(white noise) e 를 통해 표현되는 유색잡음(colored noise)으로 표현된다.

2.2 풍력발전시스템의 구성

회전자에서 바람으로부터 얻을 수 있는 공기역학적인 파워와 토오크는 다음과 같이 표현될 수 있다 [2].

$$P_r = \frac{1}{2} \rho A v^3 c_p(\lambda, \beta) \tag{2.2}$$

$$T_r = \frac{1}{2\omega_r} \rho A v^3 c_p(\lambda, \beta)$$

여기서 v 는 측정된 순간풍속, ρ 는 공기밀도, A 는 회전자 단면적, 그리고 $c_p(\lambda, \beta)$ 는 출력계수(power coefficient)를 나타낸다. 출력계수 $c_p(\lambda, \beta)$ 는 풍력발전기가 바람의 운동에너지를 기계적인 에너지로 변환시켜주는 능력을 나타내는 중요한 비선형 함수로써 피치각(pitch angle) β 와 터빈발단의 주속비(tip speed ratio) λ 에 의해 결정된다 [4].

$$\lambda = \frac{\omega_r R}{v} \tag{2.3}$$

여기서 ω_r 와 R 은 회전자의 각속도(angular velocity)와 회전자반경이다.

그림 2.1과 같이 나타나는 동력전달장치는 회전자로부터의 에너지를 발전기로 전달해주며, 발전기가 필요로 하는 회전속도로 증속하기 위해 기어로 구성되어 있다.

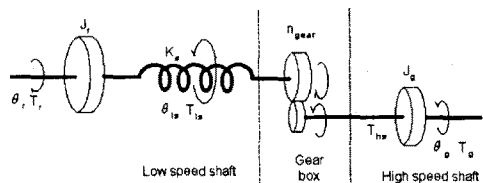


그림 2.1 동력전달장치 구성도

그림에서 J_r 는 회전자, 저속샤프트(low speed shaft), 그리고 기어박스의 관성(inertia)의 총합을 나타내고 J_g 는 고속샤프트(high speed shaft)와 발전기의 관성을 나타낸다. K_r 는 저속샤프트에 영향을 미치는 경도(stiffness)를 나타낸다. 회전자, 동력전달장치 및 발전기사이의 관계식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} J_r \dot{\omega}_r &= T_r - T_k \\ J_g \dot{\omega}_g &= \eta_{gear} \frac{T_k}{n_{gear}} - T_g \\ T_k &= K_s \theta_\epsilon, \quad \dot{\theta}_\epsilon = \omega_r - \frac{\omega_g}{n_{gear}} \end{aligned} \quad (2.4)$$

이다. 여기서 n_{gear} 과 η_{gear} 는 기어박스의 증속비와 효율 (efficiency)를 나타내고 ω_g 는 발전기의 각속도이다.

풍력발전기의 운전방법에는 기존 전력계통과 직접적으로 연계된 경우에는 사용되는 정속도(fixed speed) 운전과 전력변환장치를 통하여 전력계통과 연결할 경우에 사용되는 가변속도(variable speed) 운전으로 나눌 수 있다. 이때 발전기의 효율 η 을 고려하면 풍력발전으로 인해 발전기에서 발생하는 전기적인 파손

$$P_e = \eta T_g \omega_g \quad (2.5)$$

이다. 발전기가 정속도운전을 할때 발전기 토오크는 다음과 같이 나타낼 수 있다 [3].

$$T_g \approx D_g (\omega_g - \frac{\omega_0}{n_p}), \quad D_g = \frac{P_{e,0}}{\eta \omega_{g,0} (\omega_{g,0} - \frac{\omega_0}{n_p})} \quad (2.6)$$

여기서 $P_{e,0}$ 는 정격출력을 나타내고 $\omega_{g,0}$ 는 미리 정해진 정속도이다. 가변속도운전 발전기는 전력변환장치로서 정류기, DC링크, 인버터를 포함하므로 발전기가 전력계통과 무관하게 동작할 수 있으므로 $D_g = 0$ 이 되고 동력전달계통보다 굉장히 빠른 응답특성을 갖고있으므로 모델링에서는 무시해도 거의 영향을 미치지 않는다. 따라서 발전기 토오크는 기준입력으로 주는 값과 정확히 일치하게 된다.

$$T_g = T_{g,ref} \quad (2.7)$$

발전기에서 속도를 조절하는 것은 풍차날개의 피치각을 제어하는 것으로 가능한데, 빠르고 정확한 피치제어를 위해 유압 제어방식을 사용한다. 피치각은 제어장치에 의해 정해진 범위 내에서만 움직일 수 있는데, 피치각과 변화속도가 포화경계치 내에 존재하면 피치제어 모델은 다음과 같이 선형으로 나타난다.

$$\dot{\beta} = -\frac{1}{\tau_\beta} \beta + \frac{k_\beta}{\tau_\beta} \beta_{ref} \quad (2.8)$$

2.3 풍력발전시스템의 수학적 모델링

위에서 살펴본 4가지 구성요소들을 수학적으로 모델링하기 위해, 비선형 함수인 회전자 토오크 $T_r = f(v, \beta, \omega_r)$ 를 동작점 (operating point)을 중심으로 다음과 같이 선형화시키자.

$$\begin{aligned} T_r &= T_{\omega_r,0} + \Delta T_{\omega_r} \\ \Delta T_{\omega_r} &= \left. \frac{\partial T_{\omega_r}}{\partial v} \right|_{op} \Delta v + \left. \frac{\partial T_{\omega_r}}{\partial \beta} \right|_{op} \Delta \beta + \left. \frac{\partial T_{\omega_r}}{\partial \omega_r} \right|_{op} \Delta \omega_r \end{aligned} \quad (2.9)$$

여기서 $\Delta v = v - v_m$, $\Delta \beta = \beta - \beta_0$, $\Delta \omega_r = \omega_r - \omega_{r,0}$ 인데 w_m , β_0 , $\omega_{r,0}$ 와 $T_{\omega_r,0}$ 는 각각 동작점에서의 평균풍속, 피치각, 회전자 각속도 및 회전자 토오크를 나타낸다. 동력전달장치의 모델링은 (2.4)와 (2.9)를 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \Delta \dot{\theta}_\epsilon &= \Delta \omega_r - \frac{1}{n_{gear}} \Delta \omega_g \\ \Delta \dot{\omega}_r &= -\frac{K_s}{J_r} \Delta \theta_\epsilon + \frac{1}{J_r} \Delta T_r \\ \Delta \dot{\omega}_g &= \frac{\eta_{gear} K_s}{n_{gear} J_g} \Delta \theta_\epsilon - \frac{1}{J_g} \Delta T_g \end{aligned} \quad (2.10)$$

이때 발전기는 정속도운전에서는 $\Delta T_g = D_g \Delta \omega_g$ 이고 가변속도운전에서는 $\Delta T_g = \Delta T_{g,ref}$ 이다.

발전기가 가변속도로 운전할 경우에는 입력이 피치각 기준입력과 발전기 토오크 기준입력이 되고 출력은 발전기 각속도와 발전기 토오크이므로 다중입출력 (multi input multi output, MIMO)인 상태방정식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \Delta \dot{\theta}_\epsilon \\ \Delta \dot{\omega}_r \\ \Delta \dot{\omega}_g \\ \Delta \dot{\beta} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & -\frac{1}{n_{gear}} & 0 \\ -\frac{K_s}{J_r} & \frac{1}{J_r} \frac{\partial T_{\omega_r}}{\partial \omega_r} & 0 & \frac{1}{J_r} \frac{\partial T_{\omega_r}}{\partial \beta} \\ \frac{\eta_{gear} K_s}{n_{gear} J_g} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{\tau_\beta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_\epsilon \\ \Delta \omega_r \\ \Delta \omega_g \\ \Delta \beta \end{bmatrix} \\ &+ \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{J_g} \\ k_\beta & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \beta_{ref} \\ \Delta T_{g,ref} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{J_r} \frac{\partial T_{\omega_r}}{\partial v} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \Delta v_{wind} \end{aligned} \quad (2.11)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta \omega_g \\ \Delta T_g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_\epsilon \\ \Delta \omega_r \\ \Delta \omega_g \\ \Delta \beta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \beta_{ref} \\ \Delta T_{g,ref} \end{bmatrix}$$

이때 시스템의 입출력은 정속도운전에서 $u = \Delta \beta_{ref}$, $y = \Delta P_e$ 이고 $D_p = 0$ 이며 가변속도운전에서는 $u = [\Delta \beta_{ref} \quad \Delta T_{g,ref}]$, $y = [\Delta \omega_g \quad \Delta T_g]$ 이 된다.

풍력발전시스템에서 난류풍속은 잡음으로 간주되는데, (2.1)을 (2.11)에 적용시키면 풍속을 포함한 풍력발전기 전체의 통합 상태방정식이 얻어진다.

3. 제어시스템 설계

풍력발전시스템을 좀 더 효율적으로 운용하기 위해서 요즘도 여러 면에서 연구가 되고 있는데, 여전히 많은 개선이 필요한 부분이 제어시스템 구성이다. 제어관점에서 볼 때 풍력발전은 외란입력, 풍속, 측정잡음에 의해 구동되는 동적시스템이다. 풍력발전시스템은 시동풍속(cut-in speed)에서 출력이 발생되기 시작하고 풍속이 더욱 증가하면 시스템 출력이 정격출력(rated power)까지 올라가는데 이 경우를 정격풍속(cut speed)이라 한다. 정격풍속 이상에서는 시스템 출력이 일정하게 유지되다가 안전을 고려하여 중단풍속(cut-out speed)에서 운전을 중단하게 된다. 일반적인 풍력발전시스템에서 정격속도를 기준으로한 제어기설계 목적은 다음과 같다.

- 정격풍속이하에서는 바람에 의해 생성되는 에너지를 최대한으로 전기적 에너지로 변환시킴
- 정격풍속이상에서는 일정한 정격출력을 유지시킴
- 풍력발전기의 순간적인 부하를 줄임으로써 정격풍속이하와 이상에서 풍력발전기 수명을 늘림

따라서 풍력발전에서 제어방법은 저정격운전(below rated operation)과 고정격운전(above rated operation)에 따라 달라져야하는데 [5], 본 논문에서는 고정격운전에서 제어기 설계만을 다룬다.

정격풍속이상에서 다양한 풍속에 대하여 일정한 토오크를 얻기 위하여는 날개의 피치각을 변화시켜야 하므로 보통 피치제어라고 부른다. 피치제어 방법으로 여러 가지가 있으나 PI 피치제어, 적분기가 들어간 LQG 피치제어, 가변속 LQG 피치제어 방법 등에 대해 살펴본다.

① PI 피치제어기 : 현재 풍력발전에서 가장 많이 사용하는 방법으로 피치각은 정격출력과 실제출력간의 오차를 PI 피치제어기를 통해 정해지는 제일 간단한 방법이다.

② LQG 피치제어기[5] : 백색잡음이 영향을 받는 불완전한 측정하에서 2차의 목적함수에 대한 선형시스템의 최적제어는 LQG이다. LQG 제어방법을 정속도운전 풍력발전시스템에서 적용하면 다음과 같다. 정속도운전에서 입출력은 $u = \Delta \beta_{ref}$, $y = \Delta P_e$ 이고 $D_d = 0$ 이므로, $Q = C_d^T C_d$ 와 $R = \rho I$ (여기서 $\rho > 0$)라고 두면 목적함수는

$$J = E \left\{ \sum_{k=0}^{\infty} ((\Delta P_e(k))^2 + \rho (\Delta \beta_{ref}(k))^2) \right\} \quad (3.1)$$

이 되는데, 시스템의 출력과 제어 에너지를 최소화하게 된다. 이때 제어가중치 ρ 의 크기를 달리하면 페루프 시스템의 극점들이 달라진다. 일반적으로 LQG는 일정한 기준입력이나 출력측으로 반영된 외란에 대하여 정상상태오차를 발생하므로 제어루프안에 적분기를 추가시켜야 한다. 이를 상태방정식으로 나타낼 경우 시스템의 상태가 하나 늘어나게 된다. 적분기를 포함한 전체 풍력발전시스템의 상태방정식은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} x(k+1) \\ x_i(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_d & 0 \\ -C_d & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(k) \\ x_i(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_d \\ 0 \end{bmatrix} u(k) + w(k)$$

$$y(k) = [C_d \ 0] \begin{bmatrix} x(k) \\ x_i(k) \end{bmatrix} + e(k)$$

$$x_i(k+1) = [0 \ 1] \begin{bmatrix} x(k) \\ x_i(k) \end{bmatrix}$$
(3.2)

여기서 (A_d, B_d, C_d) , $x(k)$ 는 (2.11)을 이산화시킨 시스템과 상태를 나타내고 $e(k)$, $w(k)$ 는 외란을 나타낸다. (3.2)에서 외란이 존재하므로 상태 $x(k)$ 는 출력값으로부터 Kalman 필터등을 사용하여 추정하여야 한다. 전체적인 LQG 피치제어기의 구조는 다음 그림과 같다.

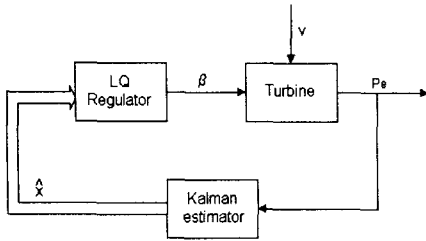


그림 3.1 LQG 피치제어기 구조

③ 가변속 LQG(VLQG) 피치제어기 : 가변속 피치제어기는 Vestas V42-600KW가 채택하는 구조로서, 정격풍속이상에서 갑자기 풍속이 높아지면 제어기는 발전기의 속도가 약간 증가하는 것을 허용함과 동시에 피치제어 시스템은 풍차날개(blade)의 피치각도를 조절하여 바람의 저항을 증가시켜 회전자의 분당회전속도를 감소시키게 된다.

4. 시뮬레이션 성능평가

3장에서 여러 가지 제어시스템을 설계하였는데, 여기서는 실제로 운용중인 풍력발전기를 대상으로 얻은 데이터를 사용하여 제어알고리즘의 성능을 비교하고자 한다. 본 논문에서는 수치적인 결과만 표로 나타내고 각 제어방법의 출력파형은 생략하였다. 시뮬레이션은 정속도운전 풍력발전시스템을 대상으로 PI 피치제어, 적분기가 들어간 LQG 피치제어 방법을 살펴보고, 가변속도운전 풍력발전시스템을 대상으로 가변속 LQG 피치제어 방법 등에 대해 살펴본다. 가변속도운전 풍력발전기 모델은 V42-600KW를 그대로 사용하고, 정속도운전 풍력발전기 모델의 출력은 컴퓨터에서 구하였다. 수치적으로 비교하기 위해 피치제어를 수행하지 않았을 경우와 각 제어알고리즘에 따른 발전기의 파워, 토오크 및 각속도의 특성을 표 4.1에 나타냈다.

표 4.1에서 피치제어를 수행하는 경우의 출력이 정격 출력 600KW에 가깝게 나타남을 알 수 있는데, PI 방법보다는 LQG나 가변속 LQG 방법이 더 우수한 성능을 나타냄을 알 수 있다. 발전기의 각속도는 PI나 LQG 방법은 거의 일정하나 가변속 LQG 방법은 많이 변화함을 알 수 있고 피치각의 변동은 가변속 LQG 방법이 LQG 방법보다 작게 변하는데, 이유는 가변속 LQG 방법은 피치각과 병행하여 각속도도 변화시키기 때문이다.

표 4.1 피치제어 방법에 따른 발전기 출력 특성

	mean(P_p)(KW)	mean(T_p)(Nm)	mean(w_p)(rad/s)
NO	640.85	3041.08	188.38
PI	602.69	3287.21	188.50
LQG	601.79	3287.4	188.50
VLQG	602.54	3299.2	188.50
	STD(P_p)(KW)	STD(T_p)(Nm)	STD(w_p)(rad/s)
NO	99.14	146.86	0.07
PI	54.86	201.98	0.09
LQG	21.61	79.26	0.04
VLQG	34.02	125.27	0.587
	max(β) (deg)	min(β) (deg)	STD(β) (deg)
NO			
PI	14.98	9.69	1.44
LQG	15.41	6.52	1.53
VLQG	15.25	7.55	1.5163

3. 결 론

본 논문에서는 풍력발전시스템에서 활용할 수 있는 LQG 제어 알고리즘을 살펴보았다. 현재 국내에서 제작하고 운용중인 소수의 풍력발전시스템의 제어방식은 거의 전부가 가장 간단한 PI 제어기이다. 따라서 본 연구의 알고리즘을 실제로 적용하는 방법을 연구하면 성능개선에 도움이 되리라 기대된다.

본 연구는 기초전력공학연구소의 지원(과제관리번호: 97-072)에 의하여 수행되었음.

(참 고 문 헌)

- [1] 전력연구원 보고서 "중형급 풍력발전시스템 운영기술 개발" 1996. 6
- [2] L. L. Freris, *Wind Energy Conversion Systems*, Prentice Hall International (UK) Ltd., 1990
- [3] X. Ma, "Adaptive extremum control and wind turbine control," Ph. D. thesis, IMM, Technical University of Denmark, Denmark, 1997.
- [4] P. Novak, T. Ekelund, I. Jovik, and B. Schmidtbauer, "Modelling and control of variable-speed wind turbine drivesystem dynamics," *IEEE Control Systems*, vol. 15, no. 4, pp. 28-38, 1995.
- [5] T. Ekelund, "Modeling and Linear Quadratic Optimal Control of Wind Turbines," Ph. D. thesis, Control Engineering Laboratory, Chalmers University of Technology, Goteborg, Sweden, 1997.
- [6] W.H. Press, S.A. Teukolsky, W.T. Vetterling, B.P. Flannery, *Numerical Recipes in C : The art of scientific computing*, Cambridge University Press, 1992.
- [7] A. Gelb, *Applied Optimal Estimation*, MIT Press, 1974.