

# 가변속 풍력터빈의 통합제어기법에 관한 연구

## Pitch and Toque Control for Variable Wind Turbine System

김용수†·하철근\*

Kim Yong Su, Ha Cheolkeun

### 1. 서 론

본 논문에서는 일정 범위 내의 풍속변화에도 일정한 풍력터빈의 출력을 유지할 수 있는 시스템 설계를 목표로 터빈 모델을 선형화 하여 비례 적분 제어를 설계하고 최적 토크제어를 설계 하였으며 DFIG모델의 정상 상태를 가정하였다. 최종적으로 터빈 모델과 DFIG모델을 통합한 모델을 시뮬레이션 하여 풍력 터빈의 출력이 정격 출력을 유지하는지 고찰하였다.

### 2. 풍력터빈 모델

#### 2.1 공력 모델

공력 모델은 벤츠의 법칙에 준하여 정의되고  $C_p$ 는 다음의 식으로 표현된다.

$$C_p = \{151K - 0.58\beta - 0.002\beta^{2.14} - 13.2\}e^{-18.4K} \quad (1)$$

여기서  $K = \frac{1}{\lambda - 0.02\beta} + \frac{0.003}{\beta^3 + 1}$ ,  $\lambda$  : 주속비  $\left(\frac{w_r R}{V_w}\right)$ ,  $\beta$  : 블레이드 피치각 이다.

#### 2.2 터빈 모델

로터와 발전기축의 질량과 양쪽 회전축을 연결하는 기어를 가지는 풍력터빈의 수학적모델은 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$\begin{cases} J_r \dot{w}_r = T_a - D_r w_r - T_{ls} \\ J_g \dot{w}_g = T_{hs} - D_g w_g - T_{em} \\ T_{ls} = D_{ls}(w_r - w_{ls}) + K_{ls}(\theta_r - \theta_{ls}) \end{cases} \quad (2)$$

여기서  $J_r$  : 로터의 관성모멘트,  $J_g$  : 발전기의 관성모멘트,  $T_{ls}$  : 저속 샤프트 반토크,  $T_{hs}$  : 고속 샤프트 반토크,  $T_{em}$  : 발전기의 전기적 반토크,  $D_r$  : 로터 댐핑계수,  $D_g$  : 발전기 댐핑계수,  $K_{ls}$  : 로터 샤프트 스프링 계수,  $D_{ls}$  : 로터 샤프트

댐핑계수,  $\omega_r$  : 로터 각속도,  $\omega_g$  : 발전기 로터의 각속도,  $\theta_r$  : 로터 회전각,  $\theta_g$  : 발전기 로터의 회전각 이다. 블레이드의 서보는 1차 시간지연 모델로 표현하였다.

#### 2.3 DFIG 모델

가변속 풍력발전시스템 많이 사용되는 DFIG의 수학적 모델은 아래식과 같다.

$$\begin{cases} \dot{\Phi}_{ds} = \omega_s \Phi_{qs} - R_s i_{ds} + V_{ds} \\ \dot{\Phi}_{qs} = -\omega_s \Phi_{ds} - R_s i_{qs} + V_{qs} \\ \dot{\Phi}_{dr} = (\omega_s - \omega_e) \Phi_{qr} - R_r i_{dr} + V_{dr} \\ \dot{\Phi}_{qr} = -(\omega_s - \omega_e) \Phi_{dr} - R_r i_{qr} + V_{qr} \end{cases} \quad (3)$$

여기서  $\Phi$  : 자속,  $R$  : 저항,  $V$  : 전압,  $i$  : 전류, 첨자  $d, q, s, r$  는 각각 d축, q축, 고정자, 회전자를 뜻한다. 또한  $\omega_s$  : 그리드 축 동기 주파수,  $\omega_e$  : 발전기 축 주파수 이다. 그리고 발전기의 전기적 반토크  $T_{em}$ 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$T_{em} = \frac{3}{2} p (\Phi_{ds} i_{qs} - \Phi_{qs} i_{ds}) \quad (4)$$

### 3. 통합 제어

본 논문에서는 발전시스템 운용 영역 3에서 터빈 모델이 정격 출력을 유지할 수 있도록 하는 제어 시스템에 대해 논하고자 한다.

#### 3.1 토크 제어

터빈 모델의 정격출력 추적오차는  $\epsilon_p = P_{nom} - P$  이고, 미분방정식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\dot{\epsilon}_p + a_0 \epsilon_p = 0, \quad a_0 > 0 \quad (5)$$

정격 출력을  $P = \omega_t T_g$  이므로 미분방정식은  $-\dot{\omega}_r T_g - \omega_r \dot{T}_g + a_0 \epsilon_p = 0$  으로 쓸 수 있고 이 식을 다시 쓰면

$$\dot{T}_g = \frac{1}{\omega_r} \left( a_0 \epsilon_p - \frac{T_g}{J_t} (T_a - D_t \omega_t - T_g) \right) \quad (6)$$

식 (11)과 같은 제어출력을 얻을 수 있다.

#### 3.2 피치 제어

† 김용수; 울산대학교 항공우주공학과 대학원  
E-mail : ggomamulgogy@gmail.com  
Tel : (052) 259-1560

\* 울산대학교 항공우주공학과

터빈모델을 선형화하기 위해 간단히 표현하면 아래 식과 같다.

$$J_t \dot{\omega}_t = T_a - D_t \omega_t - T_g \quad (7)$$

여기서  $J_t = J_r + J_g N_g$  : 터빈축의 관성모멘트,  $D_t = D_r + D_g N_g$  : 터빈축의 댐핑계수,  $T_g = N_g T_{em}$  : 발전기 반토크 이다.

정상상태에서 터빈모델은  $0 = T_a^0 - K_t \omega_t^0 - T_g^0$  으로 표현되고 공력토크는 정상상태에서 다음과 같이 선형화 할 수 있다.

$$\begin{aligned} T_a &= T_a^0 + \Delta T_a \\ \Delta T_a &= \left( \frac{\partial T_a}{\partial \omega_t} \right)_0 \Delta \omega_t + \left( \frac{\partial T_a}{\partial \beta} \right)_0 \Delta \beta + \left( \frac{\partial T_a}{\partial V_w} \right)_0 \Delta V_w \end{aligned} \quad (8)$$

터빈 각속도와 반토크도 아래와 같이 선형화 할 수 있다.

$$\begin{aligned} \omega_t &= \omega_t^0 + \Delta \omega_t \\ T_g &= T_g^0 + \Delta T_g \end{aligned} \quad (9)$$

상태 방정식으로 표현하면 아래와 같다.

$$\begin{Bmatrix} \Delta \dot{\omega}_t \\ \Delta \dot{\beta} \end{Bmatrix} = A \begin{Bmatrix} \Delta \omega_t \\ \Delta \beta \end{Bmatrix} + B_1 + B_2 \begin{Bmatrix} \Delta V_w \\ \Delta T_g \end{Bmatrix} \quad (10)$$

여기서  $\Delta \omega_t, \Delta \beta$  : 상태변수,  $\Delta \beta_r$  : 입력이다.

Root-Locus를 이용하여 PI 제어기설계를 설계한다.

제어이득은 각각  $K_p = -251.86$ ,  $K_i = -25.7$  이다

### 3.3 DFIG 모델의 정상상태 가정

DFIG가 그리드에 정상상태로 연결 되어있다고 가정하여 정상상태 값들을 구한다. 위첨자  $^0$ 는 정상상태 값을 뜻한다.

$$\begin{cases} V_{ds} = V_{qs} = V_s^0 \\ Q_s = 0 \\ \dot{\Phi}_{ds} = \dot{\Phi}_{qs} = \dot{\Phi}_s = 0 \end{cases} \quad (11)$$

고정자 축의 전압과 무효전력, 인덕턴스를 위와 같이 가정하면 아래와 같이 정리 할 수 있다.

$$T_{em}^0 = \frac{3P}{2\omega_s} (-R_s i_{qs}^0 + V_{qs} i_{qs}^0 - R_s i_{ds}^0 + V_{qs} i_{ds}^0)$$

$$\Phi_{ds}^0 = \frac{1}{\omega_s} (-R_s i_{qs}^0 + V_s^0), \Phi_{qs}^0 = \frac{1}{\omega_s} (R_s i_{ds}^0 - V_s^0)$$

$$\Phi_{dr}^0 = L_{dr}^0 i_{dr}^0 + L_m i_{ds}^0, \Phi_{qr}^0 = L_{qr}^0 i_{qr}^0 + L_m i_{qs}^0$$

$$i_{ds}^0 - \frac{V_s^0}{R_s} i_{ds}^0 + T_{em}^0 \frac{\omega_s}{3P} = 0, i_{ds}^0 = i_{qs}^0$$

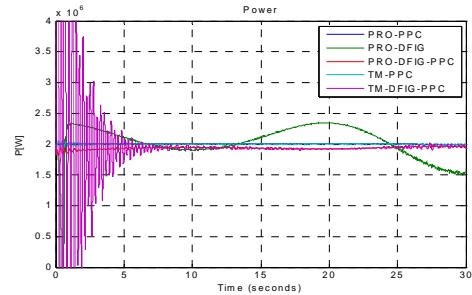
$$i_{dr}^0 = \frac{1}{L_m} (\Phi_{ds}^0 - L_{sm} i_{ds}^0), i_{qr}^0 = \frac{1}{L_m} (\Phi_{qs}^0 - L_{sm} i_{qs}^0)$$

$$V_{dr}^0 = R_r i_{dr}^0 - (\omega_s - \omega_c^0) \Phi_{qr}^0, V_{qr}^0 = R_r i_{qr}^0 - (\omega_s - \omega_c^0) \Phi_{dr}^0$$

## 4. 시뮬레이션 결과

다음 그림은 풍속을 최소 12m/s에서 최대 24m/s로 변화 시키면서 모델들을 시뮬레이션 결과이다. 그림 1에서 보인 시간반응 선도의 순서는 위에서부터 각각 단순화된 터빈모델을 통합제어한

결과(PRO\_PPC), 단순화된 터빈/DFIG 모델(PRO\_DFIG), 단순화된 터빈/DFIG 모델을 통합제어한 결과(PRO\_DFIG\_PPC), 기어비를 가진 터빈모델을 통합제어한 결과(TM\_PPC), 기어비를 가진 터빈/DFIG 모델을 통합제어한 결과(TM\_DFIG\_PPC)를 보인 것이다.



그림(1) 풍력터빈 출력 선도

위의 선도로부터 알 수 있듯이 터빈과 DFIG 통합모델 시뮬레이션 결과가 4%오차로 정격출력을 유지하는 것을 확인 할 수 있다.

## 4. 결 론

풍력발전 시스템을 모델링하고 정격출력을 유지하기위한 제어기를 설계하기위해 모델을 선형화하고 정상상태값을 구하여 피치제어와 토크제어 시스템을 설계하였다. 그리고 모델에 풍속 입력을 주어 시뮬레이션 한 결과 풍력발전 시스템의 출력이 정격출력에서 일정하게 유지됨을 확인할 수 있었다.

## 후 기

이 논문은 2009년 울산대학교 연구비에 의하여 연구되었으며 지원에 대해 감사드립니다.

## 참고문헌

- (1) L.Lupu, B.Boukhezzer, and H.Sisguerdidjane, "Pitch and Torque Control Strategy for Variable Speed Wind Turbines", in 2006 European Wind Energy Conference Proceedings, Athens, Greece 2006.
- (2) D.Aouzellang, K.Ghedamsi, E.M.Berkouk, "Power Control of a Variable Speed Wind Turbine Driving an DFIG", International Conference on Renewable Energies and Power Quality, 2006
- (3) VANEGAS F.A., ZAMACONA M., "Robust Control Solution of a wind turbine, A simulation Study", International Master's Thesis in Information Technologies, Halmstad University, February 2008.