가변속 풍력발전용 영구자석형 동기발전기의 퍼지 속도제어기 설계

(Fuzzy Speed Controller Design of Permanent Magnet Synchronous Generators for Variable-Speed Wind Turbine Systems)

유동녕* · 최영식 · 최한호 · 정진우**

(Dong-Young Yu · Young-Sik Choi · Han Ho Choi · Jin-Woo Jung)

Abstract

This paper proposes a new fuzzy speed control method based on Takagi-Sugeno fuzzy method of permanent magnet synchronous generators(PMSG) for variable-speed wind turbine systems. The proposed fuzzy speed controller consists of the control terms that compensate for the nonlinearity of PMSG and the control terms that stabilize the error dynamics. The conditions are derived for the existence of the proposed speed controller, and the gain matrices of the controller are given. The proposed control method can guarantee that the PMSG can effectively track the speed reference which is calculated through the MPPT control and can reduce the fluctuations of the generated power under even fast random wind conditions. To verify the performance of the proposed fuzzy speed controller, the simulation results are demonstrated.

Key Words : Fuzzy Control, Matlab/Simulink, PMSG, Speed Control, Variable-Speed Wind Turbine

1. 서 론

1.1 연구의 배경

풍력발전은 다양한 신재생에너지원들 중에서 시장 경쟁력과 기술력이 확보되어 있고, 경제성이 화력발전에 근접해있는 기술로서, 최근에는 전 세계적으로 급성장을 보이고 있다. 과거에는 농형 유도발전기를 이

용한 정속 구동형 풍력터빈이 많이 사용되었지만, 근래에는 가변속 구동의 우수성이 입증되면서 발전기와 그리드 사이에 Back to Back PWM Converter를 두고 벡터제어 방식으로 구동되는 영구자석 동기발전기(PMSG, Permanent Magnet Synchronous Generator)을 이용한 가변속 풍력발전기가 고효율, 저유지 비용 및 넓은 운전범위 등의 여러 장점으로 인하여 활발히 연구되고 있다.

특히 PMSG 방식은 소음과 신뢰성을 저하시키는 주요인인 증속기(Gear Box)를 제거한 직접 구동(Direct-Driven)방식이 가능한 형태로서 최근에는 이에 대한 연구가 집중되고 있다[1]. 직접 구동방식의 PMSG를 이용하는 풍력발전시스템은 바람의 속도가

* 주저자 : 동국대(서울) 전자전기공학부 박사과정

** 교신저자 : 동국대(서울) 전자전기공학부 조교수

Tel : 02-2260-3348, Fax : 02-2275-0162

E-mail : jinwjung@dongguk.edu

접수일자 : 2010년 10월 13일

1차심사 : 2010년 10월 16일, 2차심사 : 2010년 12월 16일

심사완료 : 2010년 12월 27일

정격속도 이하일 때는 풍향이나 풍속이 수시로 변하는 환경에서 바람에너지를 최대한 이용하기 위한 최대전력점 추종(MPPT, Maximum Power Point Tracking)제어 기법들을 사용하고 있으며[2-4], 바람의 속도가 정격속도 이상일 때는 바람의 속도 변화에 따른 전력의 변동을 감소시키고 일정한 정격 출력을 유지할 수 있도록 다양한 피치각(Pitch Angle) 제어방식[5-6]이 사용되고 있다. 또한 속도제어의 경우에는 일반적으로 PID 제어가 널리 사용되고 있다[7-9].

1.2 연구의 목적 및 방법

기존의 PID 제어와 같은 선형 제어방식은 비선형인 영구자석 동기발전기 시스템의 제어에 만족스러운 성능을 보장할 수 없다. 그러므로 이러한 문제를 해결하기 위해 다양한 비선형 제어방식이 제안되었다. 그러나 대부분의 기존 방식은 선형화된 모델을 사용하였으므로 발전기 파라미터의 변동이나 풍속의 변화가 빠른 랜덤 풍속 조건 하에서 동기발전기의 안정도뿐만 아니라 강인한 제어 성능을 보장할 수 없다. 반면에 Takagi-Sugeno(T-S) 퍼지 모델은 기존의 제어기법에서는 해결하기 힘든 복잡한 비선형 또는 불확실한 시스템을 성공적으로 제어할 수 있었다[10-12].

본 논문에서는 T-S 퍼지 모델을 이용한 비선형 속도제어기를 제안한다. 각 국부 서브시스템을 위하여 국부적인 선형제어기(Local Linear Controller)가 설계되며, 이들은 표준 퍼지추론법(Standard Fuzzy Inference Method)을 사용함으로써 전역적인 비선형 제어기(Global Nonlinear Controller)로 구현 된다. 또한 제안된 비선형 퍼지 속도제어기의 해가 존재하기 위한 LMI(Linear Matrix Inequality)조건을 유도하며, 이로부터 제어기 이득을 계산한다. 마지막으로 풍속의 변화가 빠른 랜덤 풍속 조건하에서 시뮬레이션 결과가 주어진다.

2. 풍력발전시스템 모델링

PMSG를 사용한 직접 구동형 풍력발전시스템의 전

체 구성은 그림 1과 같다. 바람의 운동에너지는 블레이드(Blade)를 회전시킴으로서 기계적 토오크를 발생시키며 이는 PMSG와 발전기측 컨버터를 거쳐 직류의 전기에너지로 변환되고, 변환된 전기에너지는 계통연계 인버터를 통하여 교류로 변환된 후 계통으로 공급된다. 이때 발전기측 컨버터는 최적의 출력을 내기 위해 회전자속의 속도를 제어하고, 계통연계 인버터는 주파수 변환과 역률제어를 수행한다. 본 논문은 그림 1에서 보는바와 같이 발전기측 3상 컨버터의 속도제어 방식에 관한 것이다.

그림 1. PMSG를 사용한 직접 구동형 풍력터빈 구성도
Fig. 1. Configuration of a direct-driven wind turbine using PMSG

2.1 풍력터빈 모델링

풍력터빈은 바람으로부터 동력을 포획하여 기계적인 힘으로 변환시킨다. 바람의 속도와 연관된 기체역학(Aerodynamics)적인 토크는 식 (1)과 같다.

$$T_m = 0.5 \rho \pi R_t^3 V_w^2 C_p(\beta, \gamma) / \gamma \quad (1)$$

여기서, ρ 는 공기밀도, R_t 는 블레이드 반지름, V_w 은 풍속, C_p 는 전력계수이고, β 는 피치각, $\gamma = \frac{\omega_m}{V_w}$ 는 주속비(Tip speed ratio), ω_m 는 풍력터빈 회전자속의 기계적 회전속도이다.

풍력터빈의 전력계수 C_p 는 다음과 같다[9].

$$C_p = 0.73 \left(\frac{151}{\lambda_i} - 0.58\beta - 0.002\beta^{2.14} - 13.2 \right) e^{-\frac{18.4}{\lambda_i}} \quad (2)$$

여기서 λ_i 는 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$\lambda_i = \frac{1}{\frac{1}{\gamma - 0.02\beta} - \frac{0.003}{\beta^3 + 1}} \quad (3)$$

따라서 피치각 β 에 따른 C_p 와 γ 의 관계는 그림 2와 같다.

바람으로부터 풍력터빈이 포획하는 기계적인 전력은 다음과 같이 표현된다.

$$P_m = T_m \omega_m \quad (4)$$

또한 풍력터빈의 회전속도 ω_m 에 대한 동역학은 기계적 토크 T_m , 전자기적 토크 T_e , 점성 마찰계수 B_m , 풍력터빈과 발전기의 관성을 합친 등가관성 J_{eq} 에 의해 아래와 같이 모델링 된다.

$$\frac{d\omega_m}{dt} = (T_m - T_e - B_m \omega_m) / J_{eq} \quad (5)$$

그림 2. 전력계수와 주속비와의 관계
Fig. 2. Relationship between power coefficient and tip speed ratio

2.2 PMSG 모델링

PMSG의 동적모델은 2개의 동기 회전 기준축, 즉 d축과 회전방향을 기준으로 d축보다 90[°] 앞서는 q축

을 이용하여 표현될 수 있으며, PMSG의 전압방정식을 이용한 전기적 모델은 아래 식 (6)과 같다. 그림 3은 PMSG에 대한 dq 동기 회전 기준축에 따른 등가회로이다.

(a) d축 등가회로

(b) q축 등가회로

그림 3. PMSG의 dq 동기 회전 기준축에서의 등가회로
Fig. 3. Equivalent circuit of PMSG in the dq synchronous reference frame

$$\frac{di_d}{dt} = -\frac{R_a}{L_d} i_d + \omega_e \frac{L_q}{L_d} i_q - \frac{1}{L_d} V_d \quad (6)$$

$$\frac{di_q}{dt} = -\frac{R_a}{L_q} i_q - \omega_e \left(\frac{L_d}{L_q} i_d - \frac{1}{L_q} \lambda_0 \right) - \frac{1}{L_q} V_q$$

여기서, 첨자 ‘d’와 ‘q’는 dq 동기 회전 기준축으로 변환된 물리적인 양을 의미하고, R_a 는 고정자 저항, $\omega_e = n_p \omega_m$ 는 기계적인 회전자의 회전속도(ω_m)와 연관된 전기적 회전속도(ω_e)이며, n_p 는 자극 쌍의 수이고, λ_0 는 영구자석 자속이다. L_d 와 L_q 는 d축과 q축의 인덕턴스이고, 본 논문에서는 표면 부착형 PMSG가 사용되므로 $L_d = L_q = L_s$ 인 경우로 가정한다. 또한 q축의 유기기전력은 $e_q = \lambda_0 \omega_e$ 이고, d축의 유기기전력은 $e_d = 0$ 이며, V_d 와 V_q 는 PMSG의 제어 입력전압이다.

PMSG에서 발생하는 전자기적 토크는 아래 식 (7)과 같다.

$$T_e = 1.5 n_p i_q \lambda_0 \quad (7)$$

따라서 발전기 출력전력(P_g)은 마찰손실을 무시하면 아래와 같이 전기자기적 토크(T_e)와 기계적 회전속도(ω_m)의 곱으로 표현된다.

$$P_g = T_e \omega_m = 1.5 n_p i_q \lambda_0 \frac{\omega_e}{n_p} \quad (8)$$

3. 제어기 구조

가변속 풍력시스템은 바람의 속도에 따른 2 가지의 제어 목적을 가진다. 하나는 바람의 속도가 정격속도 이하일 경우로 최대 주속비를 유지하여 최대의 전력을 추출하는 것이고(MPPT, 최대전력점 추종제어), 다른 하나는 바람의 속도가 정격속도 이상일 경우에는 피치각을 증가시키고 전력계수를 감소시켜서 일정한 정격전력을 유지하게 하는 것이다(피치각제어). 바람의 속도와 발전기 출력전력 사이의 관계는 그림 4와 같이 표현될 수 있다.

그림 4. 풍속과 발생전력의 관계
Fig. 4. Relationship between wind speed and generated power

그림 5는 PMSG를 이용한 가변속 풍력터빈의 전반적인 제어시스템을 보여주고 있으며, 제어블록은 크게 3 가지로 구성되어 있다. 즉, 피치각 제어기, 최대 전력점 추종제어기, 그리고 퍼지 속도제어기로 구성된다.

그림 5. 가변속 풍력터빈의 전반적인 제어시스템
Fig. 5. Overall control system of a variable-speed wind turbine

3.1 피치각 제어기(Pitch Angle Controller)

식 (2)와 그림 2에서 보는 바와 같이 전력계수 C_p 는 피치각 β 의 함수임을 알 수 있으며, β 가 증가할수록 C_p 는 감소한다. 바람의 속도가 정격속도 이하인 경우 피치제어는 최소의 값(예, 0도)으로 고정되고, 바람의 속도가 정격속도 이상인 경우는 터빈의 설계 한계치에 도달하지 않게 조절하는 역할을 피치각 제어기를 통해서 수행하게 된다.

본 논문에서는 그림 6과 같이 일반적으로 많이 사용되는 PI 피치각 제어기를 사용한다.

그림 6. 피치각 제어기
Fig. 6. Pitch angle controller

그림 6의 피치 제어기에서 P_g 와 P_{gRated} 는 발전기의 출력전력과 발전기 정격 출력전력이며, 이들 값의 오차는 PI 제어기를 통해 피치각의 기준값으로 산출되고 유압서보시스템을 통해 풍력터빈에 전달된다.

3.2 최대전력점 추종(MPPT) 제어

식 (1)~(4)로부터 풍력터빈에 의해서 발생하는 전력은 바람의 속도와 발전기 회전자 속도에 따라서 그림 7과 같은 특성을 보인다.

그림 7. 바람의 속도와 발전기 속도에 따른 최적 발생 전력
Fig. 7. Optimum generated power as a function of wind speed and generator speed

그림 7에서 보는 바와 같이 발전기 회전자의 속도에 따라서 최대의 발생 전력에 해당하는 최적의 주속비 γ_{Opt} 이 존재하고 이에 따른 전력계수의 최대값 C_{pMax} 가 존재함을 알 수 있다. 따라서 발생전력(P_m)은 식 (9)와 같이 발전기 회전자의 속도와 K_{pOpt} 의 함수로 표현할 수 있으며, 개별 풍력터빈의 특성에서 K_{pOpt} 는 최적의 주속비 γ_{Opt} 와 전력계수의 최대값 C_{pMax} 를 이용하여 계산될 수 있다.

$$P_m = 0.5 \rho \pi R_t^2 C_{pMax} \left(\frac{\omega_m R_t}{\gamma_{Opt}} \right)^3 \quad (9)$$

$$= K_{pOpt} \omega_m^3$$

$$K_{pOpt} = \frac{0.5 \rho \pi R_t^5 C_{pMax}}{\gamma_{Opt}^3} \quad (10)$$

이러한 K_{pOpt} 를 활용하면 발생전력을 측정하여 최대의 전력을 추출하는 발전기 회전자 속도의 기준값을 식 (11)과 같이 계산해 낼 수 있다.

$$\omega_{eRef} = n_p \sqrt[3]{\frac{P_g}{K_{pOpt}}} \quad (11)$$

여기서, ω_{eRef} 은 발전기 회전자의 전기적인 속도 기준값이고, P_g 는 측정된 발전기 출력전력이다.

그러므로 발전기 회전자 속도가 기준값을 추종하기 위한 q축 전류 기준값(i_{qRef})은 식 (8)과 (11)을 이용하면 식 (12)와 같이 도출될 수 있다.

$$i_{qRef} = \frac{K_{pOpt} \omega_{eRef}^2}{1.5 \lambda_0 n_p^3} \quad (12)$$

3.3 제안된 퍼지 속도제어기

발전기 회전자의 속도 지령치와 실제 속도와의 차이를 $e_1 = \omega_e - \omega_{eRef}$, q축 전류값과 전류 기준값과의 차이를 $e_2 = i_q - i_{qRef}$, d축 전류값과 전류 기준값($i_{dRef} = 0$)과의 차이를 $e_3 = i_d - i_{dRef} = i_d$ 으로 정의하면, 식 (5)와 (6)은 다음의 오차방정식으로 변환된다.

$$\dot{e}_1 = -k_2 e_1 - k_1 e_2 \quad (13)$$

$$\dot{e}_2 = k_5 e_1 - k_4 e_2 - \omega_e e_3 - k_6 V_q - k_4 i_{qRef} + k_5 \omega_{eRef} - i_{qRef}$$

$$\dot{e}_3 = \omega_e e_2 - k_7 e_3 - k_8 V_d + \omega_e i_{qRef}$$

여기서, $k_1 = \frac{1.5 n_p^2 \lambda_0}{J_{eq}}$, $k_2 = \frac{B_m}{J_{eq}}$, $k_3 = \frac{n_p}{J_{eq}}$, $k_4 = k_7 = \frac{R_s}{L_s}$, $k_5 = \frac{\lambda_0}{L_s}$, $k_6 = k_8 = \frac{1}{L_s}$ 이다. 또한 발전기 회전자 속도의 기준값(ω_{eRef})과 q축 전류의 지령치(i_{qRef})는 식 (11)과 (12)에서 구할 수 있다.

T-S 퍼지 모델링 기법을 이용하면, 식 (13)의 오차방정식은 3차 r-rule 퍼지 모델로 근사화 할 수 있다. 따라서 T-S 퍼지 모델의 i 번째 플랜트 규칙은 다음과 같이 주어진다.

Plant Rule i : IF ω_e is F_i , THEN

$$\dot{e}_1 = -k_2 e_1 - k_1 e_2 \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \dot{e}_2 &= k_5 e_1 - k_4 e_2 - W_i e_3 - k_6 V_q \\ &\quad - k_4 i_{qRef} + k_5 \omega_{eRef} - \dot{i}_{qRef} \\ \dot{e}_3 &= W_i e_2 - k_7 e_3 - k_8 V_d + \omega_e i_{qRef} \end{aligned}$$

여기서, $F_i (i=1, \dots, r)$: 퍼지 집합(Fuzzy Set), r : 퍼지 규칙 수, W_i : i 번째 동작점. 각 퍼지 집합 F_i 는 i 번째 Plant Rule에 대한 소속 함수 $m_i(\omega_e)$ 에 의해서 특성화되며, i 번째 동작점에서 $\omega_e = W_i$ 이다. 그러므로 표준 퍼지 추론법을 사용하면 다음과 같은 전역적인 비선형 퍼지 모델을 얻을 수 있다.

$$\dot{e}_1 = -k_2 e_1 - k_1 e_2 \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \dot{e}_2 &= k_5 e_1 - k_4 e_2 - \sum_{i=1}^r h_i(\omega_e) W_i e_3 + k_6 V_q \\ &\quad - k_4 i_{qRef} + k_5 \omega_{eRef} - \dot{i}_{qRef} \\ \dot{e}_3 &= \sum_{i=1}^r h_i(\omega_e) W_i e_2 - k_7 e_3 - k_8 V_d + \omega_e i_{qRef} \end{aligned}$$

$$\text{여기서, } m_i: R \rightarrow [0, 1], h_i(\omega_e) = \frac{m_i(\omega_e)}{\sum_{j=1}^r m_j(\omega_e)}, h_i \text{는 각}$$

IF-THEN 규칙의 정규화 된 가중치를 의미하며, 항상 다음 조건 $\sum_{i=1}^r h_i(\omega_e) = 1, h_i(\omega_e) \geq 0$ 을 만족한다.

PMSG의 제어입력 전압 V_d 와 V_q 는 다음과 같이 구분하여 표현할 수 있다.

$$V_q = \frac{1}{k_6}(u_q - u_{qf}), V_d = \frac{1}{k_8}(u_d - u_{df}) \quad (16)$$

여기서, u_q 와 u_d : 동기발전기의 비선형성을 보상하기 위한 제어 입력, u_{qf} 와 u_{df} : 오차 동역학을 안정화하기 위한 제어입력이다.

제어입력을 아래와 같이 정의하자(그림 8 참조).

$$u_q = -k_4 i_{qRef} + k_5 \omega_{eRef} - \dot{i}_{qRef} \quad (17)$$

$$u_d = \omega_e i_{qRef}$$

$$u_{qdf} = \sum_{i=1}^r h_i(\omega_e) K_i x$$

여기서, $x = [e_1, e_2, e_3]^T$, $u_{qdf} = [u_{qf}, u_{df}]^T$, $K_i \in R^{2 \times 3}$ 이다.

그러면 식 (15)의 오차방정식은 식 (16)과 (17)을 적용하여 다음과 같이 단순화 될 수 있다.

$$\dot{x} = \sum_{i=1}^r h_i(\omega_e) (A_i + B K_i) x \quad (18)$$

$$\text{여기서, } A_i = \begin{bmatrix} -k_2 & -k_1 & 0 \\ k_5 & -k_4 & W_i \\ 0 & W_i & -k_7 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \text{이다.}$$

그림 8. 제안된 퍼지 속도제어기
Fig. 8. The proposed fuzzy speed controller

따라서 [9]를 이용하여 다음의 정리 1을 얻을 수 있다.

정리 1 : 다음의 LMI 조건을 만족시키는 해 (P, Y_{ci}) 가 존재한다고 가정하자.

$$P > 0, A_i P + P A_i^T + B Y_{ci} + Y_{ci}^T B^T < 0, \forall i \quad (19)$$

여기서 $P \in R^{3 \times 3}$, $Y_{ci} \in R^{3 \times 1}$ 인 결정 변수들이며, 제어기 이득 K_i 는 다음과 같이 주어진다고 가정하면,

$$K_i = Y_{ci} P^{-1} \quad (20)$$

오차 $x = [e_1, e_2, e_3]^T$ 는 0으로 수렴한다.

증명 : 식 (19)를 만족한다면, 다음을 만족하는 $Q > 0$ 인 행렬이 존재한다.

$$A_i P + P A_i^T + B Y_{ci} + Y_{ci}^T B^T \leq -Q < 0, \forall i \quad (21)$$

$V(x) = x^T P^{-1} x$ 을 Lyapunov 함수로 정의하면, 이것의 시간에 대한 도함수는 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} \dot{V} &= 2x^T \sum_{i=1}^r h_i(\omega_e) P^{-1} [A_i + B K_i] x \\ &= 2x^T \sum_{i=1}^r h_i(\omega_e) P^{-1} [A_i P + B Y_{ci}] P^{-1} x \\ &\leq -x^T Q x \end{aligned} \quad (22)$$

따라서 식 (18)에 주어진 오차 $x = [e_1, e_2, e_3]^T$ 는 지수적으로 0에 수렴함으로 식 (21)의 LMI 조건을 만족하는 속도제어기가 안정함을 알 수 있다.

주 1 : 정리 1은 제안된 제어기를 설계할 때 단순히 (19)의 LMI식을 풀어 (20)식에 따라 계산하면 된다는 것을 의미한다. [10]과 같은 이전 결과를 이용하면 본 논문에서 제안된 방법은 LMI에 기반 하므로 $LQ, H_2/H_\infty$, α -안정도, 극점 배치 등을 적용할 수 있다. 즉, 시간 및 주파수 영역의 성능지수를 제어기를 설계할 때 해당하는 LMI 형태의 구속조건을 포함함으로써 쉽게 보장할 수 있음을 의미한다. 예로 만약 다음의 식을 풀어서 제어기 이득 K_i 를 식 (20)식에 따라 결정한다면 최소 감쇠율($\alpha > 0$)을 보장하는 제어기를 설계할 수 있다.

$$(A_i + \alpha I)P + P(A_i + \alpha I)^T + B Y_{ci} + Y_{ci}^T B^T < 0$$

4. 시뮬레이션 검증

본 논문에서 제안된 영구자석 동기발전기를 위한 퍼

지 속도제어기의 성능을 검증하고자 직접 구동방식의 가변속 풍력발전시스템을 Matlab/Simulink를 이용하여 랜덤 풍속 조건하에서 시뮬레이션 하였다. 본 시뮬레이션에서 사용된 풍력터빈과 표면 부착형 PMSG의 파라미터는 각각 표 1, 2와 같다.

표 1. 풍력 터빈 파라미터
Table 1. Wind turbine parameters

블레이드 반지름	R_t	38[m]
공기 밀도	ρ	1.205[kg/m ³]
전력계수 최대값	C_{pMax}	0.4412
Cut-In 풍속	V_{wCutin}	4[m/sec]
정격 풍속	V_{wRated}	11.8[m/sec]
Cut-Off 풍속	$V_{wCutoff}$	20[m/sec]
전력상수 최대값	K_{pOpt}	0.191 [MW/(rad/sec) ³]

표 2. 영구자석 동기발전기 파라미터
Table 2. PMSG parameters

정격 전력	P_{Rated}	2[MW]
정격 속도	ω_{eRated}	23.98[rad/sec]
Pole Pairs	n_p	11
등가 관성	J_{eq}	2.5253×10 ⁶ [kg · m ²]
점성 마찰 계수	B_m	1.0×10 ⁻³ [N · m · sec/rad]
영구자석 자속	λ_0	136[Wb]
고정자 인덕턴스	L_s	0.2504[H]
고정자 저항	R_s	0.08[Ω]

본 논문에서 풍속 모델은 날씨와 지형 지물 등에 따라 실제 풍속이 가지는 돌풍, 주기적인 변화, 빠른 랜덤 노이즈 풍속 특성을 포함하도록 다음의 함수로 구성하였으며[6], 그림 9는 이러한 풍속 모델을 도식적으로 보여준다.

$$V_w = V_{base} + V_{ramp} + V_{noise} \quad (23)$$

여기서, V_{base} 는 돌풍을 포함하는 풍속의 기본 성분이며, V_{ramp} 는 풍속의 램프 성분, V_{noise} 는 풍속의 노이즈 성분이다. 풍속의 기본 성분 V_{base} 는 초기 풍속이

12[m/sec]이며 0.5초에서 10[m/sec]로, 3초에서 11[m/sec]로, 8초에서 13[m/sec]로 풍속의 변화를 가지고, 6초에서 0.5초 동안의 13[m/sec]의 돌풍을 가정한 다[9]. 또한 풍속의 램프 성분은 $V_{ramp} = A \sin(\frac{2\pi}{T_{rw}} t)$ 로 $A=1$, $T_{rw}=16$ 초로 가정하였고, V_{noise} 는 랜덤 노이즈 풍속으로 평균 0, 분산 1, 샘플링 주기는 0.1초를 가정한다.

그림 9. 풍속 모델
Fig. 9. Wind speed model

먼저 피치각 제어기의 경우, 그림 6과 같은 제어기 구조에서 유압서보시스템의 피치각 구동은 1차의 전달함수로 다음과 같이 모델링 된다.

$$\dot{\beta} = \frac{\beta_{Ref} - \beta}{\tau_{\beta}} \quad (24)$$

여기서, τ_β 는 유압서보시스템의 응답을 고려하여 2초로 가정하고, 피치각의 기준값(β_{Ref})은 정격전력이 하에서는 피치각을 0도로 설정하며, 정격전력 이상에서는 출력이 항상 일정한 정격전력을 발생하도록 PI 제어기를 통하여 피치각을 제어한다.

다음으로 MPPT 제어를 위하여, 식 (11)과 (12)에서 보여준 발전기 회전자 속도의 기준값(ω_{ref})과 q축 전류 기준값(i_{qref})은 다음과 같이 선정한다.

$$\omega_{eRef} = 0.191 \sqrt[3]{P_g}, \quad i_{qRef} = 0.0257 \sqrt[3]{P_g^2} \quad (25)$$

마지막으로 영구자석 동기발전기의 퍼지 속도제어를 설계하기 위하여 다음의 정규화 된 소속 함수를 사용한다.

$$h_1(\omega_c) = \frac{m_1(\omega_c)}{m_1(\omega_c) + m_2(\omega_c)} \quad (26)$$

$$h_2(\omega_e) = 1 - h_1(\omega_e)$$

여기서, $\mu=0.5$, $W_1=100$, $W_2=-100$ 로 설계되었으며, 식 (19)를 풀면 퍼지 속도제어기의 이득 K_i 는 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$K_1 = \begin{bmatrix} 95,555 & -471 & -1,915 \\ -873 & -96 & -9,992 \end{bmatrix} \quad (27)$$

$$K_2 = \begin{bmatrix} 95,555 & -471 & 1,915 \\ 873 & 96 & -9,992 \end{bmatrix}$$

그림 10. 가변속 풍력터빈시스템의 전반적인 블록 다이어그램

Fig. 10. Overall block diagram of a variable-speed wind turbine system

그림 10은 영구자석형 동기발전기를 위해 제안된 퍼지 속도제어기의 성능을 검증하기 위한 가변속 풍력 터빈시스템의 전반적인 블록 다이어그램을 보여준다.

본 논문에서는 스위칭 손실과 전류 리플을 고려하여 1[kHz]의 스위칭 주파수가 선정되었으며, 또한 공간 전압벡터(Space Vector) PWM 방식이 사용되었다.

본 논문에서는 제안된 퍼지제어기와 기존의 PI제어기에 대한 각각의 시뮬레이션 결과를 보여준다. 또한, 모든 시뮬레이션 결과는 제안한 속도제어기의 강인성을 검증하기 위하여 동기발전기의 일부 파라미터(R_s, L_s, J_{eq})가 모델링 오차와 온도 변화 등에 따라서 200[%] 변동시의 전력, 속도 및 전류 응답을 보여주고 있다.

그림 11. 제안된 퍼지 제어방식에 대한 시뮬레이션 결과(풍속, 피치각, 전력, 토크, 회전자 속도)
Fig. 11. Simulation results about the proposed fuzzy control method(Wind speed, pitch angle, power, torque, rotor speed)

그림 11과 12는 그림 9의 빠른 랜덤 풍속 조건하에서 식 (25)에 의해 산출된 발전기 회전자 속도의 기준값(ω_{eRef})과 식 (27)의 퍼지 속도제어기의 이득을 사용한 제안된 퍼지제어기의 시뮬레이션 결과를 보여준다. 그림 11은 풍속, 피치각, 전력, 토크, 그리고 회전자 속도에 대한 시뮬레이션 결과로서 발전기 출력 전력과

발생 토크는 풍속의 빠른 랜덤 변동 대비 안정적으로 정격 전력과 토크 값으로 유지됨을 알 수 있다. 또한 발전기 회전자 속도의 오차(ω_{eError})가 매우 작으므로 제안된 퍼지제어기의 속도응답 특성이 우수함을 보여준다. 그림 12는 똑같은 조건하에서 dq축 전류와 q축 전류 오차(i_{qError}), 그리고 a 상의 전압과 전류 등 제안된 퍼지제어기의 전류응답 특성을 보여주며, 그림에서 보는바와 같이 q축 전류의 오차도 매우 작음을 알 수 있다.

그림 12. 제안된 퍼지 제어방식에 대한 시뮬레이션 결과 (dq축 전류, q축 전류 오차, 상전압과 상전류)
Fig. 12. Simulation results about the proposed fuzzy control method(d-axis/q-axis currents, q-axis current error, phase a voltage, phase a current)

제안된 퍼지제어기의 성능을 비교하기 위하여 그림 13과 14는 기존의 PI 제어방식에 대한 시뮬레이션 결과를 보여주고 있으며, 본 논문에서 PI 제어기의 이득은 다음과 같이 선정하였다. 즉, 전류제어기 이득의 주파수 대역폭은 78.5[rad/sec]으로 설정하였으며, 속도제어기 주파수 대역폭은 15.7[rad/sec]으로 설정하였다. 그림 13은 풍속, 피치각, 전력, 토크, 그리고 회전자 속도에 대한 시뮬레이션 결과로서 발전기 회전자 속도의 응답도 느리며, 오차(ω_{eError}) 또한 제안된 퍼지제

그림 13. PI 제어방식에 대한 시뮬레이션 결과(풍속, 전력, 피치각, 토크, 회전자 속도)

Fig. 13. Simulation results about the PI control method(Wind speed, pitch angle, power, torque, rotor speed)

여기에 비해 훨씬 크다는 것을 알 수 있다. 그림 14는 dq축 전류, q축 전류의 오차, 그리고 상전압 및 상전류 등 기존의 PI제어기에 대한 전류응답 특성을 보여준다. 그림에서 보는바와 같이 dq축 전류의 과도 응답이 느리며 q축 전류의 오차도 제안된 퍼지제어기에 비해 훨씬 큼을 알 수 있다.

위의 시뮬레이션 결과로부터 본 논문에서 제안한 퍼지 속도제어기는 풍속의 빠른 랜덤 변동에도 불구하고 정격 전력과 토크 값을 안정적으로 유지함을 확인할 수 있다. 또한, 제안된 퍼지제어기는 기존의 PI제어기에 비해 발전기 회전자 속도와 dq축 전류가 빠른 응답 특성을 가지며, 정상상태에서는 회전자 속도의 오차와 dq축 전류의 오차가 현저히 적음을 알 수 있다. 따라서 제안된 퍼지제어기는 직접 구동방식의 가변속 풍력터빈용 영구자석형 동기발전기에서 퍼지제어기 및 MPPT 제어기와 함께 사용하여 발전기 회전자 속도와 출력 전류를 기존의 PI제어기에 비해 정확

그림 14. PI 제어방식에 대한 시뮬레이션 결과(dq축 전류, q축 전류 오차, 상전압과 상전류)

Fig. 14. Simulation results about the PI control method(d-axis/q-axis currents, q-axis current error, phase a voltage, phase a current)

하고 빠르게 제어할 수 있음을 확인하였다.

5. 결 론

본 논문에서는 직접 구동방식의 가변속 풍력터빈용 영구자석형 동기발전기를 위하여 T-S 퍼지 모델을 사용한 퍼지 속도제어기에 대해 연구하였다. 퍼지 속도제어기가 존재하기 위한 LMI 조건을 제시하였고, 퍼지제어기의 이득을 계산하였다. 또한, 빠른 랜덤 풍속 조건하에서 Matlab/Simulink를 활용한 시뮬레이션 결과는 제안된 퍼지 속도제어기가 발전기 회전자의 속도와 발전기 출력전력을 아주 효과적으로 제어함을 확인하였다.

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임. (2010-0009577)

References

- [1] M. Chinchilla, S. Arnaltes, and J. C. Burgos, "Control of permanent-magnet generators applied to variable-speed wind-energy systems connected to the grid", *IEEE Trans. Energy Conversion*, Vol. 21, no. 1, pp. 130-135, Mar. 2006.
- [2] S. Morimoto, H. Nakayama, M. Sanada, Y. Takeda, "Sensorless output maximization control for variable-speed wind generation system using IPMSG", *IEEE Trans. Ind. Applications*, Vol. 41, no. 1, pp. 60-67, Jan/Feb. 2005.
- [3] 강주성, 고강훈, 이현우, "풍력발전기용 최대전력점 추종 제어기에 관한 연구", *한국조명·전기설비학회 2006 추계학술대회 논문집*, pp. 345-349, 2006. 11.
- [4] 장석호, 박홍극, 이동춘, 김홍근, "소형 풍력발전용 영구 자석형 동기발전기의 센서리스 제어", *전력전자학회논문지 제14권 제1호*, pp.15-22, 2009. 2.
- [5] Feng Gao, Daping Xu, Yuegang Lv, "Pitch-control for large-scale wind turbines based on feed forward fuzzy-PI", *IEEE Proc. Intelligent Control and Automation*, Chongqing, China, pp. 2277-2282, 2008.
- [6] Lingfeng Xu, Xiyun Yang, Xinran Liu, Daping Xu, "Pitch Control of Variable Speed Wind Turbines Based on Adaptive Fuzzy Sliding Mode Controller", *IEEE Proc. Intelligent Control and Automation*, Chongqing, China, pp. 2970-2975, 2008.
- [7] Ming Yin, Gengyin Li, Ming Zhou, Chengyong Zhao, "Modelling of the wind turbine with permanent magnet synchronous generator for integration", *IEEE Proc. Power Engineering*, Tampa, Florida, pp. 1-6, 2007.
- [8] N. A. Orlando, M. Liserre, V. G. Monopoli, A. Dell'Aquila, "Speed Sensorless Control of a PMSG for Small Wind Turbine Systems", *IEEE Proc. Industrial Electronics*, Seoul, Korea, July 5-8, 2009.
- [9] N. P. W. Strachan, D. Jovicic, "Dynamic Modelling, Simulation and Analysis of an Offshore Variable-Speed Directly-Driven Permanent-Magnet Wind Energy Conversion and Storage System (WECSS)", *IEEE Proc. Aberdeen*, pp. 1-6, June 2007.
- [10] H. H. Choi, "LMI-based nonlinear fuzzy observer-controller design for uncertain MIMO non-linear systems", *IEEE Trans. Fuzzy Systems*, Vol. 15, no. 5, pp. 956-971, 2007.
- [11] T. Takagi, M. Sugeno, "Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control", *IEEE Trans. Syst., Man, Cybern.*, Vol. 15, no. 1, pp. 116-132, 1985.
- [12] T. A. Johansen, R. Shorten, R. Murray-Smith, "On the interpretation and identification of dynamic Takagi-Sugeno fuzzy models", *IEEE Trans. Fuzzy Systems*, Vol. 8, no. 2, pp. 297-313, 2000.

◆ 저자소개 ◆

유동녕(劉炯寧)

1969년 8월 18일생. 1991년 2월 한양대 전기공학과 졸업. 1993년 2월 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1993~2008년 삼성전기 전자부품개발팀 수석연구원. 2008~2010년 한국IBM Energy & Utility 부문 컨설턴트. 2009년~현재 동국대 대학원 전자전기공학부 박사과정.

최영식(崔永植)

1982년 3월 3일생. 2009년 8월 동국대 전기공학과 졸업. 2009년~현재 동 대학원 전자전기공학부 석·박사통합과정.

최한호(崔漢浩)

1966년 8월 25일생. 1988년 서울대 제어계측공학과 졸업. 1990년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(석사). 1994년 동 대학원 전기 및 전자공학과 졸업(박사). 2003년~현재 동국대(서울캠퍼스) 전자전기공학부 교수.

정진우(鄭鎭佑)

1969년 1월 11일생. 1991년 2월 한양대 전기공학과 졸업. 1997년 2월 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2005년 6월 The Ohio State Univ. 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1997~2000년 LG전자 DA 연구소 연구원. 2005~2008년 삼성SDI 중앙연구소 책임연구원. 2008년~현재 동국대(서울캠퍼스) 전자전기공학부 조교수.