

MW급 직접구동형 풍력터빈시스템을 위한 영구자석 동기발전기의 게인 스케줄링 속도제어기에 대한 연구

(A Study on the Gain Scheduling Speed Controller of Permanent Magnet Synchronous Generators for MW-Class Direct-Driven Wind Turbine Systems)

최영식* · 유동녕 · 최한호 · 정진우**

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

Abstract

This paper presents a new gain scheduling speed controller of permanent magnet synchronous generators(PMSG) for MW-class direct-driven wind turbine systems. The proposed gain scheduling speed controller performs the speed tracking at more than one operating point, and the first-order torque observer estimates the turbine torque which is needed to precisely control the speed of PMSG. The proposed speed controller verifies that the PMSG can successfully follow the reference speed which is determined via the maximum power point tracking(MPPT) control and pitch control under turbulent wind conditions. The proposed speed control algorithm is simulated using Simulink and its performance is confirmed through comparison with the results by PI control method.

Key Words : Direct-Driven Wind Turbine, Gain Scheduling Method, PMSG, Speed Control

1. 서 론

세계적으로 주목받고 있는 친환경적 재생에너지인 풍력발전은 1970년대부터 본격적인 연구가 진행되어 왔으며, 지속적인 기술 발전을 통해 현재에 이르러 수 MW급 풍력시스템을 상용화하는 단계에 이르렀다.

초기의 풍력발전시스템은 농형유도발전기를 이

용한 정속형을 사용하였으나, 풍속의 변화에 의하여 크게 변동하는 발전 전력에 의해서 낮은 효율성과 기계적 스트레스를 유발하였다. 현재는 양방향(Back-to-Back) 전력변환장치를 이용한 가변속 방식의 풍력발전시스템이 효율성 및 안전성 등을 이유로 널리 사용되고 있다[1].

가변속 풍력터빈의 운전은 정격전력의 발전이 가능한 지점을 기준으로 두 가지 구간으로 구분된다. 즉 정격풍속 이하의 영역에서 항상 최대전력을 발생시키도록 하는 최대전력점 추종구간이 있으며, 정격풍속 이상에서 피치각의 조절을 통하여 정격전력 이상의 발생전력을 제한함으로써 기계적인 파손과 전기적인 과부하를 방지하는 피치각 제어구간이 존재한다[2].

* 주저자 : 동국대(서울) 전자전기공학부 석박사과정

** 교신저자 : 동국대(서울) 전자전기공학부 조교수

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

E-mail : jinwjung@dongguk.edu

접수일자 : 2011년 6월 3일

1차심사 : 2011년 6월 8일, 2차심사 : 2011년 7월 21일

심사완료 : 2011년 8월 2일

가변속 풍력발전시스템용 영구자석 동기발전기의 속도제어를 위하여 PI 제어기가 널리 사용되고 있다. 그러나 PI 제어기는 선형 제어방식이므로 비선형적인 특성을 갖는 영구자석 동기발전기의 제어에 만족스러운 성능을 보장하기가 힘들다. 특히 기존의 PI 제어는 발전기 파라미터의 변동이나 풍속의 변화가 빠른 랜덤 풍속 조건 하에서 동기발전기의 안정도뿐만 아니라 강인한 제어 성능을 보장할 수 없다. 따라서 영구자석 동기발전기의 비선형을 고려한 속도제어기를 설계하기 위하여 다양한 진보된 제어이론이 제시되고 있다[3]. 최근에는 퍼지 이론을 기반으로 한 비선형 제어기법을 적용한 퍼지 속도제어기가 제안되었고, 이를 통하여 기존의 제어기법에서 해결하기 힘든 비선형적인 가변속 풍력터빈시스템을 성공적으로 제어할 수 있었다[4]. 그러나 속도제어기가 터빈 토크의 정보를 고려하지 않았으므로 부하 토크의 급격한 변동에 따른 강인성이 다소 부족하였다. 또한 게인 스케줄링 제어는 적응제어 이론을 기반으로 한 기법으로 비선형 시스템을 사용하는 많은 산업에서 큰 관심을 보이고 있으며, 불확실한 환경에서 동작하는 제어시스템의 강인함을 향상시키는 이점이 있다.

본 논문에서는 LMI(Linear Matrix Inequality) 조건을 기반으로 한 비선형 제어기에 게인 스케줄링 기법을 적용하여 MW급 영구자석 동기발전기를 이용한 직접구동형 가변속 풍력발전시스템의 최적전력 제어기법을 제안한다. 풍력터빈시스템의 특성을 고려하여 풍속, 풍력 터빈, 풍력 발전기를 모델링하고, MPPT 제어기와 피치각제어기를 설계한다. 제안된 게인 스케줄링 속도제어기는 각 구동점에서의 국부적인 선형 서브시스템(Local Linear Subsystem)을 모델링하고, LMI 조건을 이용하여 각 서브시스템들의 제어기 이득을 계산한다. 즉 국부적인 선형 속도제어기(Local Linear Speed Controller)를 설계한 후, 게인 스케줄링 방식을 이용하여 전역적인 비선형제어기(Global Nonlinear Controller)로 구현된다. 또한 제안된 게인 스케줄링 속도제어기는 터빈 토크의 정보가 필요하므로, 1차 토크관측기를 설계하여 터빈 토크를 추정함으로써 시스템의 신뢰성과 강인성을 향상한다. 마지막으로 제안된 속도제어기의 성능을 검증하기 위하여

난류성 풍속모델에서의 시뮬레이션 결과가 주어지며, 성능 비교를 위하여 PI 제어방식의 결과도 보여준다.

2. 풍력발전시스템의 구성

그림 1에서 보는 바와 같이, PMSG를 이용한 직접구동형 풍력발전시스템은 풍력터빈, 풍력발전기, 양방향(Back-to-Back)컨버터와 제어부로 구성된다. 풍속으로 인하여 회전되는 터빈의 블레이드(Blade)는 기계적인 에너지를 발생시키고, 터빈 토크의 형태로 풍력 터빈에서 PMSG로 공급된다. 이는 다시 발전기측 컨버터에 의해서 직류의 전기에너지로 변환된 후, 계통연계 인버터를 통하여 교류로 변환되어 계통에 공급된다. 본 논문은 최적의 출력제어를 위한 발전기측 컨버터까지의 제어시스템에 대하여 논의한다.

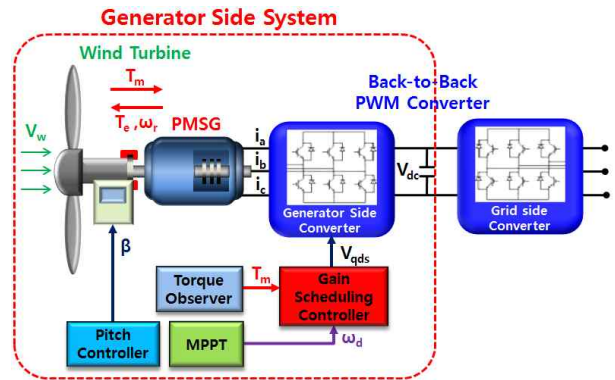


그림 1. 영구자석 동기발전기를 이용한 MW급 직접구동형 풍력발전시스템의 구성도

Fig. 1. Configuration of a MW-class direct-driven wind generation system using PMSG

2.1 풍속의 동적 모델링

본 논문에서 사용된 풍속 모델은 천천히 변화하는 계절적 성분과 급격하게 변화하는 돌풍성 성분을 이용한 확률과정에 의해 결정된다[5].

$$V_w = V_m + V_t \tag{1}$$

여기서 V_w 는 풍속(m/s), V_m 은 연간 평균풍속(m/s)이고, V_t 는 풍속의 난류성 성분(m/s)이다.

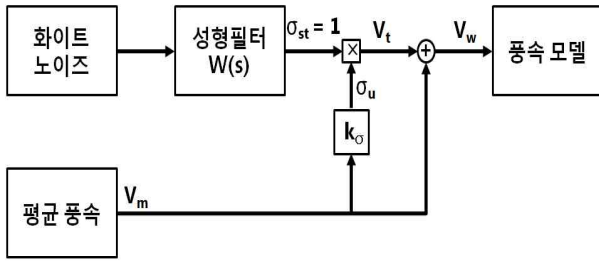


그림 2. 풍속 모델
Fig. 2. Wind speed model

풍속 모델의 도식적인 표현은 그림 2와 같다. 풍속의 추진력은 일반적으로 분포된 화이트 노이즈를 기저로 하여 표현된다. 그러나 화이트 노이즈와 같은 순시적인 풍속 변동은 물리적으로 불가능하므로, 제공되는 노이즈를 실제 풍속의 형태로 평활화하기 위한 성형 필터가 필요하다. 풍력터빈의 최소 설계 요구조건을 다루는 국제 기준인 IEC 61400-1에서는 난류성 풍속을 위한 성형 필터의 스펙트럼은 Von Karman 모델을 권장하고 있으나, 시뮬링크를 이용한 구현에 어려움이 있다. 따라서 본 연구에서는 Von Karman 모델과 유사하지만 시뮬링크로 구현이 용이한 Nichita 모델을 사용한다[6].

$$W(s) = K_F \frac{(m_1 T_F s + 1)}{(T_F s + 1)(m_2 T_F s + 1)} \quad (2)$$

여기서 $m_1 = 0.4, m_2 = 0.25$ 인 상수이며, T_F 는 모델의 시정수(s)로 다음과 같이 표현된다.

$$T_F = \frac{L}{V_m} \quad (3)$$

여기서 L 은 난류 길이의 척도(m)이며, 통상적으로 자유 기류에서의 와류의 길이를 의미한다. 이는 다음과 같이 풍력 터빈의 높이 h 에 비례하는 형태로 표현 가능하다.

$$L = 6.5h \quad (4)$$

그리고 K_F 는 필터의 이득으로 정의되며, 다음과 같이 근사화할 수 있다[7].

$$K_F \approx \sqrt{\frac{2\pi}{B(x,y)} \frac{T_F}{T_s}} \quad (5)$$

단 T_s 는 풍속 모델의 샘플링 주기(s)를 의미하며, $B(x,y)$ 는 일반적인 베타 함수이다.

$$B(x,y) = \int_0^1 t^{x-1} (1-t)^{y-1} dt \quad (6)$$

베타 함수의 값은 필터의 출력 노이즈의 표준 편차가 1이 되도록 선택되어야 하며, (x,y) 는 샘플링 주기에 따라서 변화한다. 필터를 통과하는 출력은 올바른 난류성 풍속의 표준편차 σ_u 에 의해서 조정된다.

$$\sigma_u = k_\sigma V_m \quad (7)$$

여기서 k_σ 는 지형 상태에 따른 비례상수이며, 조정된 출력은 풍속의 난류성 성분 V_t 이 된다. 이러한 난류성 성분과 연간 평균풍속 V_m 과의 합성을 거쳐서 실제 풍속과 유사한 형태의 풍속 모델 V_w 을 얻을 수 있다.

2.2 풍력터빈 모델링

일반적으로 바람에 의하여 풍력터빈에서 발생하는 기계적인 에너지는 식 (8)과 같이 표현된다[8].

$$P_m = 0.5 \rho \pi R_d^2 V_w^3 C_p(\lambda, \beta) \quad (8)$$

여기서 ρ 는 공기밀도(kg/m³), R_d 는 블레이드의 반지름(m), C_p 는 전력계수이고, β 는 피치각(°)이며, λ 는 주속비(Tip speed ratio)로 블레이드의 첨단에서의 풍속과 터빈의 회전속도의 비율을 의미하며, 식 (9)와 같이 표현된다[9].

$$\lambda = \frac{\omega_m R_d}{V_w} \quad (9)$$

여기서 ω_m 은 풍력터빈의 회전속도(rad/s)를 의미한다. 전력계수는 바람이 가진 최대에너지에 대한 터빈이 이용할 수 있는 에너지의 비율을 의미하며, 이는 식

(10)에서 보는 바와 같이 주속비와 블레이드의 피치각에 의해서 결정된다. 전력계수와 주속비, 피치각의 관계식은 블레이드의 설계에 따라 다르며, 본 논문에서는 다음과 같은 전력계수의 방정식을 이용하여 모델링하였다[10].

$$C_p = 0.73 \left(\frac{151}{\lambda_i} - 0.58\beta - 0.002\beta^{2.14} - 13.2 \right) e^{-\frac{18.4}{\lambda_i}} \quad (10)$$

여기서 λ_i 는 다음과 같다.

$$\lambda_i = \frac{1}{\frac{1}{\lambda - 0.02\beta} - \frac{0.003}{\beta^3 + 1}} \quad (11)$$

식 (10)에서의 전력계수와 주속비, 피치각의 관계는 그림 3과 같으며 최대전력 계수는 0.4409이다.

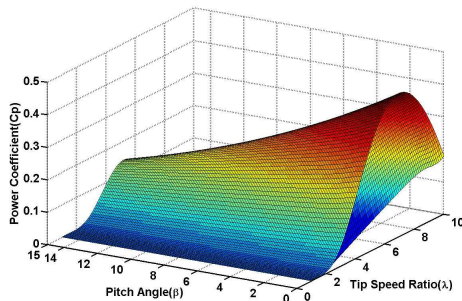


그림 3. 전력계수와 주속비, 피치각과의 관계
Fig. 3. Relationship between power coefficient, tip speed ratio, and pitch angle

풍력터빈에 의해서 발생된 기계적 에너지는 토크의 형태로 풍력발전기에 제공되며, 기계적인 에너지와 토크의 관계는 식 (12)와 같다.

$$T_m = \frac{P_m}{\omega_m} \quad (12)$$

2.3 영구자석 동기발전기 모델링

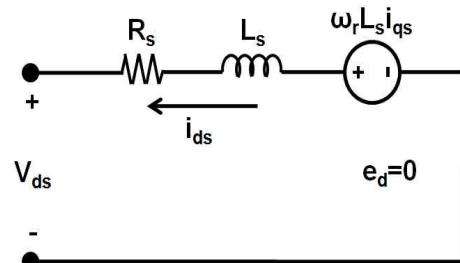
본 논문에서 사용된 발전기는 표면 부착형 영구자석 동기발전기이며, 토크방정식 및 전압방정식을 이용한

풍력발전기의 동적 모델은 아래 식 (13)으로 표현된다 [11]. 그림 4는 PMSG dq 모델에서의 등가회로를 보여 준다.

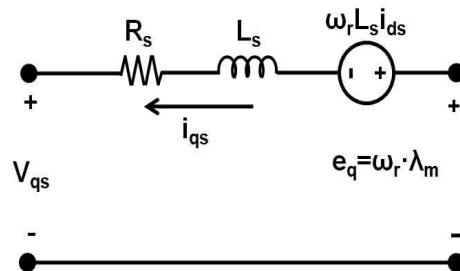
$$\begin{aligned} \dot{\theta} &= \omega_r, \\ \dot{\omega}_r &= -k_1 i_{qs} - k_2 \omega_r + k_3 T_m \\ \dot{i}_{qs} &= -k_4 i_{qs} + k_5 \omega_r - k_6 V_{qs} - \omega_r i_{ds} \\ \dot{i}_{ds} &= -k_4 i_{ds} - k_6 V_{ds} + \omega_r i_{qs} \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \text{여기서 } k_1 &= \frac{3}{2} \frac{1}{J} \frac{p^2}{4} \lambda_m, k_2 = \frac{B}{J}, k_3 = \frac{p}{2J}, \\ k_4 &= \frac{R_s}{L_s}, k_5 = \frac{\lambda_m}{L_s}, k_6 = \frac{1}{L_s} \end{aligned}$$

그리고 θ : 전기적인 위상각(rad), ω_r : 회전자의 전기적인 회전속도(rad/s), i_{qs} : q축 전류(A), i_{ds} : d축 전류(A), V_{qs} : q축 입력전압(V), V_{ds} : d축 입력전압(V), p : 극수, R_s : 고정자 상 저항(Ω), L_s : 고정자 상 인덕턴스(H), J : 회전 관성($\text{kg}\cdot\text{m}^2$), B : 마찰 계수($\text{N}\cdot\text{m}/(\text{rad}/\text{s})$), λ_m : 영구자석 자속(Wb).



(a) d축 등가회로



(b) q축 등가회로

그림 4. PMSG의 dq 모델에서의 등가회로
Fig. 4. Equivalent circuit of PMSG in the dq model

또한 동기발전기에서 발생하는 전자기적 토크 T_e 는 식 (14)와 같이 표현되며, 발전기 출력전력 P_g 은 마찰손실을 무시하면 식 (15)와 같이 전자기적 토크 T_e 와 풍력터빈의 회전속도 ω_m 의 곱으로 표현됨을 알 수 있다.

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{p}{2} \lambda_m i_{qs} \quad (14)$$

$$P_g = T_e \omega_m \quad (15)$$

3. 풍력터빈의 제어시스템 설계

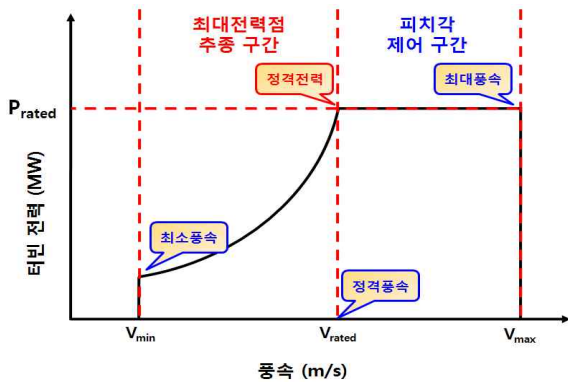


그림 5. 풍속에 따른 발생전력 및 운전영역
Fig. 5. Generated power and operating regions according to wind speed

가변속 풍력발전시스템은 그림 5에서 보는 바와 같이 풍속의 세기에 따라서 2 가지 영역에서 동작한다. 즉 하나는 최소풍속 V_{min} 에서부터 정격전력 P_{rated} 을 발생시키는 정격풍속 V_{rated} 까지의 영역으로 각 풍속에서의 최대전력을 얻기 위한 최대전력점 추종 제어 (MPPT)를 수행하는 가변속 제어구간이며, 다른 영역은 정격풍속부터 최대풍속 V_{max} 까지의 영역에서 피치각의 제어를 통하여 정격전력을 유지하는 피치각 제어구간이다. 이러한 영역 분할을 통하여 정격전력 보다 낮은 전력발전 영역에서는 최대전력점 추종에 의하여 가능한 최대의 전력을 얻도록 하여 효율성을 높이고, 정격전력 보다 높은 전력발생 상황에서는 발생하는 전력을 정격전력으로 강제하여 풍력발전시스템

의 스트레스를 최소화하여 시스템의 고장 및 파손을 방지하도록 설계하였다.

그림 6은 직접구동형 풍력터빈의 전반적인 제어시스템을 보여주고 있으며, 그림에서 보는 바와 같이 제어부는 크게 3 가지로 구성되어 있다. 즉 최대전력점 추종제어기, 피치각제어기, 그리고 제한된 계인 스케줄링 속도제어기로 구성되며, 특히 이득 조정 속도제어기는 터빈 토크의 정보를 필요로 하므로 1차 토크관측기를 이용하여 터빈 토크를 추정한다.

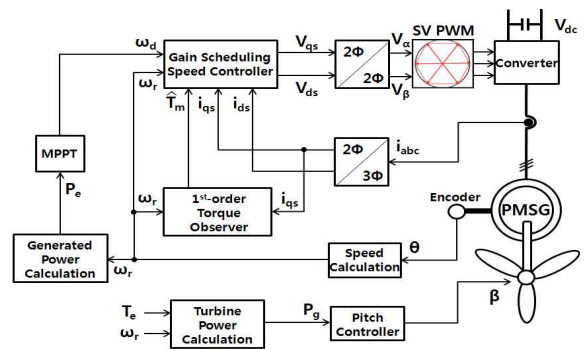


그림 6. 직접구동형 풍력터빈의 전반적인 제어시스템
Fig. 6. Overall control system of a direct-driven wind turbine

3.1 최대전력점 추종(MPPT) 제어

가변속 제어구간에서는 풍력발전기로부터 최대의 전력을 얻기 위해서 전력계수 C_p 가 최대가 되도록 제어하여야 하며, 그림 7은 일반적인 가변속 제어구간의 최적전력 곡선을 보여준다.

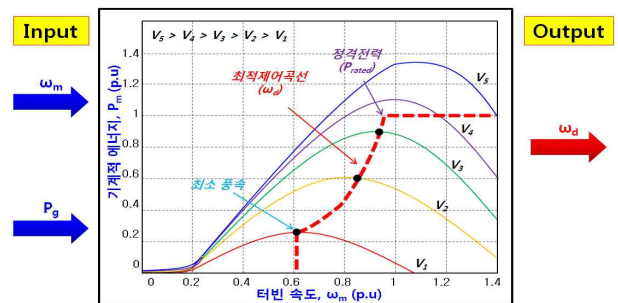


그림 7. 풍속과 발전기의 회전속도에 따른 최적 발생전력
Fig. 7. Optimum generated power as a function of wind speed and generator speed

그림에서 보는 바와 같이 풍력터빈의 회전속도와 풍속에 따라서 최대의 전력을 발생시키는 최적의 주속비 λ_{Max} 가 존재하며 이에 따른 최대의 전력계수 C_{pMax} 가 존재한다. 최대의 전력을 발생시키기 위한 기계적인 에너지 P_m 는 식 (16)과 같이 풍력터빈의 회전속도 ω_m 와 전력상수 K_{pMax} 의 곱으로 표현된다[12]. 그리고 식 (17)에서 보는 바와 같이 전력상수 K_{pMax} 는 최적의 주속비 λ_{Max} 와 최대의 전력계수 C_{pMax} 를 이용하여 계산된다.

$$P_m = \frac{1}{2} \rho \pi R_d^2 C_{pMax} \left(\frac{\omega_m R_d}{\lambda_{Max}} \right)^3 = K_{pMax} \omega_m^3 \quad (16)$$

$$\text{여기서 } K_{pMax} = \frac{\rho \pi R_d^5 C_{pMax}}{2 \lambda_{Max}^3} \quad (17)$$

따라서 식 (16)으로부터 최대의 전력을 추출하는 발전기 회전자 속도의 기준값은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\omega_d = \frac{p}{2} \sqrt[3]{\frac{P_g}{K_{pMax}}} \quad (18)$$

여기서 ω_d 는 풍력발전기의 전기적인 회전속도의 지령값이고, P_g 는 측정된 발전기 출력전력이다[13].

3.2 피치제어기(Pitch Controller)

정격풍속에서 최대풍속까지의 구간에서는 풍속이 증가함에 따라 발전기 출력전력 P_g 이 증가하여 기계적인 소손이나 전기적인 과부하 상태가 될 수 있기 때문에 발전기 출력전력을 정격전력으로 제한하는 제어가 필요하다. 그림 3에서 보는 바와 같이 피치각의 증감에 의하여 전력계수를 조절할 수 있으므로 블레이드의 피치각을 제어하면 발전기 출력전력을 제어할 수 있다. 즉 정격풍속 이하의 구간에서는 스위칭을 통하여 피치각의 최소값인 0[°]로 고정하여 최대전력을 생산하고, 정격풍속 이상의 구간에서는 피치각의 제어를 통하여 발전기 출력전력을 정격전력으로 유지한다.

본 논문에서는 그림 8과 같이 일반적으로 많이 사용되는 PI 피치각제어기를 사용한다[14].

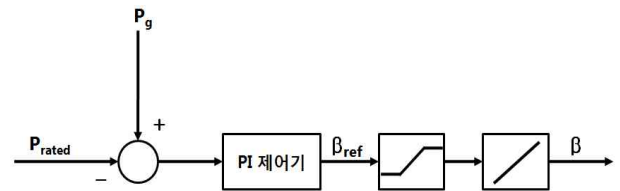


그림 8. 피치각제어기
Fig. 8. Pitch angle controller

그림 8의 피치제어기에서 P_g 와 P_{rated} 는 발전기의 출력전력과 발전기 정격전력이며, 이들 값의 오차는 PI 제어기를 통해 피치각으로 출력되며 이 값은 유압서보시스템에 전달된다.

3.3 제안된 게인 스케줄링 속도제어기

본 논문에서는 게인 스케줄링 속도제어기와 토크판측기를 설계하기 위하여 다음의 가정을 사용한다.

- A1 : ω_r, i_{ds}, i_{qs} 는 측정 가능하다.
- A2 : T_m 의 정확한 값을 알 수는 없으나, \dot{T}_m 은 무시할 수 있다. 즉 $\dot{T}_m = 0$ 으로 정할 수 있다.
- A3 : 속도 지령치(ω_d)는 일정하며, $\dot{\omega}_d = \ddot{\omega}_d = 0$ 이다.

제안된 게인 스케줄링 속도제어기의 설계를 위하여 식 (13)의 상태변수와 각 변수들의 추종치의 오차를 가정하자. 즉 회전자의 실제 위상각과 위상각의 추종치의 차이를 $e_1 = \theta - \theta_d$, 실제 속도와 회전자의 속도 지령치의 차이를 $e_2 = \omega_r - \omega_d$, q축 전류와 전류 기준값의 차이를 $e_3 = i_{qs} - i_{qs_d}$, d축 전류와 전류 기준값 $i_{ds_d} = 0$ 과의 차이를 $e_4 = i_{ds} - i_{ds_d} = i_{ds}$ 으로 정의하면, 식 (13)은 다음의 오차방정식으로 변환될 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{e}_1 &= e_2 \\ \dot{e}_2 &= -k_2 e_1 - k_1 e_2 \\ \dot{e}_3 &= -\omega_r e_4 - k_4 i_{qs} + k_5 \omega_r - k_6 V_{qs} - \dot{i}_{qs_d} \\ \dot{e}_4 &= -k_4 e_4 - k_6 V_{ds} + i_{qs} \omega_r \end{aligned} \quad (19)$$

여기서 회전자의 속도 지령치 ω_d 는 식 (18)로부터 얻을 수 있고, A2와 A3에 의해서 q축 전류의 지령치 i_{qsd} 와 도함수 \dot{i}_{qsd} 는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$i_{qsd} = \frac{1}{k_1}(-k_2\omega_d - \dot{\omega}_d + k_3T_m) = \frac{1}{k_1}(-k_2\omega_d + k_3T_m) \quad (20)$$

$$\dot{i}_{qsd} = \frac{1}{k_1}(-k_2\dot{\omega}_d - \ddot{\omega}_d + k_3\dot{T}_m) = 0$$

그리고 동기발전기의 제어입력 전압 V_{qs} 와 V_{ds} 는 아래와 같이 각각 정의된다.

$$V_{qs} = \frac{1}{k_6}(u_q + u_{qf}), V_{ds} = \frac{1}{k_6}(u_d + u_{df}) \quad (21)$$

여기서 u_q 와 u_d : 동기발전기의 비선형성을 보상하기 위한 제어 입력이며, u_{qf} 와 u_{df} : 오차 동역학을 안정화하기 위한 제어입력을 의미한다. 또한 비선형 보상입력 u_q 와 u_d 는 다음과 같이 정의하자.

$$u_q = k_5\omega_r - k_4i_{qs} \quad (22)$$

$$u_d = i_{qs}\omega_r$$

그러므로 식 (19)의 오차방정식은 다음과 같이 단순화 될 수 있다.

$$\dot{x} = A(\omega_r)x + Bu_{qdf} \quad (23)$$

$$\text{여기서 } A(\omega_r) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -k_2 & -k_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\omega_r \\ 0 & 0 & 0 & -k_4 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$x = [e_1, e_2, e_3, e_4]^T$, $u_{qdf} = [u_{qf}, u_{df}]^T$ 이다.

게인 스케줄링 속도제어기의 설계는 다수의 동작점에서 비선형 시스템의 국부적 모델(Local Model)을 얻음으로써 시작된다. PMSG의 동적 모델 특성에 있어 가장 큰 영향을 미치는 계획변수(Scheduling Variable)는 회전자의 회전속도 ω_r 이므로 n 개의 동작점에서의 회전속도 $W_i \in [W_1, W_2, \dots, W_{n-1}, W_n]$ 라 가정하면 i 번째 동작점에서의 $A(W_i)$ 는 식 (24)와 같이 표

현될 수 있다[15].

$$A(W_i) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -k_2 & -k_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -W_i \\ 0 & 0 & 0 & -k_4 \end{bmatrix} \quad (24)$$

또한 PMSG의 동작점에 따라서 구분된 A_i 를 이용하면 다음과 같은 국부적인 오차방정식으로 표현할 수 있다.

$$\dot{x} = (A_i + BK_i)x \quad (25)$$

주 1 : 쌍 (A_i, B) 는 W_i 의 값에 상관없이 안정가능하다. 그러므로 $(A_i + BK_i)$ 를 안정하게 할 이득행렬 K_i 가 항상 존재한다[16]. 그러므로 적절한 $\alpha > 0$ 에 대하여 다음 LMI 조건을 만족시키는 해 (X_i, Y_i) 가 항상 존재한다.

$$X_i > 0, (A_i + \alpha I)X_i + X_i(A_i + \alpha I)^T + BY_i + Y_i^T B^T < 0 \quad (26)$$

여기서 $X_i \in R^{4 \times 4}$, $Y_i \in R^{4 \times 1}$ 인 결정 변수들이다. 속도제어기 이득 K_i 는 해 (X_i, Y_i) 을 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$K_i = Y_i X_i^{-1} \quad (27)$$

그러므로 $(A_i + BK_i)$ 는 안정하며 식 (25)에 주어진 오차 x 는 최소 감쇠율 α 에 의해서 지수적으로 0에 수렴하므로 제어기는 안정함을 알 수 있다. 위의 식 (26)은 Matlab의 LMI Toolbox를 이용하여 풀고 이득행렬 K_i 를 (27)의 공식을 이용하여 구할 수도 있지만, 극배치 기법, $LQ, H_2/H_\infty$ 최적화 알고리즘 등을 이용하여 구할 수도 있다. 예를 들어 매틀랩의 극배치 설계 명령어 `place`를 이용하여 다음처럼 이득행렬 K_i 를 구할 수도 있다.

$$K_i = \text{-place}(A_i, B, \text{polei});$$

여기서 K_i, A_i, B 는 행렬 K_i, A_i, B 를 의미하고 `polei`는

폐회로 행렬 $A_i + BK_i$ 의 고유값들의 위치를 지정하는 4×1 벡터이다.

결국 주1에 의해서 계산된 제어기 이득 K_1, K_2 을 이용하여 각 동작점에서 국부적으로 안정함을 보장받는 국부 제어기(Local Controller)를 설계할 수 있고, 제어기 이득의 스케줄링을 통하여 PMSG의 모든 동작범위에 있어 적용 가능한 전체 제어기(Overall Controller)를 얻을 수 있다. 이때 스케줄링을 적용한 제어입력은 계획변수(Scheduling Variable)인 회전자의 회전속도 ω_r 에 따라 다음과 같이 이행된다.

$$u_{qdf} = \left[\left(1 - \frac{\omega_r}{W_i - W_{i-1}}\right) K_{i-1} x + \frac{\omega_r}{W_i - W_{i-1}} K_i x \right] \quad (28)$$

$$= \left[K_{i-1} + \frac{\omega_r}{W_i - W_{i-1}} (K_i - K_{i-1}) \right] x$$

여기서 $W_{i-1} < \omega_r \leq W_i$, $u_{qdf} = [u_{qf}, u_{df}]^T$ 이다. 그림 9는 제안된 게인 스케줄링 속도제어기의 블록 다이어그램을 보여주고 있다.

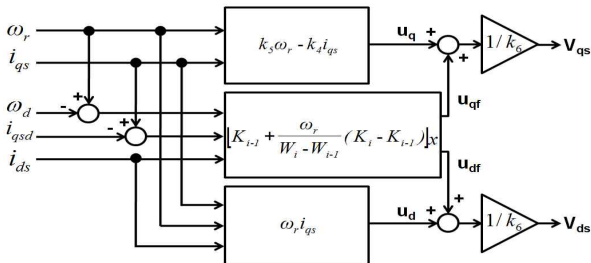


그림 9. 제안된 게인 스케줄링 속도제어기의 블록 다이어그램

Fig. 9. Block diagram of the proposed gain scheduling speed controller

3.4 토크관측기 설계

제안된 게인 스케줄링 속도제어기는 터빈 토크의 정보를 필요로 한다. 부하 토크 정보의 측정을 위하여 토크 센서를 사용하는 경우도 있으나, 비싼 가격과 더불어 고장 및 오작동의 가능성이 있어 만족스러운 신뢰성을 보장하기 힘들다. 따라서 본 논문에서는 1차 토크관측기를 설계하여 터빈 토크를 정확히 추정함으로써 속도제어기의 성능을 높이고자 한다.

토크관측기를 설계하기 위하여 다음과 같이 정의한다.

$$z = T_m + \gamma \omega_r \quad (29)$$

여기서 γ 는 관측기 이득이며, $\gamma > 0$ 이다.

그러면 위의 식 (29)는 식 (13)에 의해서 다음의 동적인 방정식으로 표현된다.

$$\begin{aligned} \dot{z} &= \dot{T}_m + \gamma \dot{\omega}_r = -\gamma k_1 i_{qs} - \gamma k_2 \omega_r + \gamma k_3 T_m \\ &= -\gamma k_1 i_{qs} - \gamma k_2 \omega_r + \gamma k_3 (z - \gamma \omega_r) \\ &= \gamma k_3 z - \gamma k_1 i_{qs} - (\gamma^2 k_3 + \gamma k_2) \omega_r \end{aligned} \quad (30)$$

따라서 식 (29)와 (30)으로부터 토크관측기는 다음의 방정식으로 나타낼 수 있다.

$$\hat{T}_m = \hat{z} - \gamma \omega_r \quad (31)$$

$$\dot{\hat{z}} = \gamma k_3 \hat{z} - \gamma k_1 i_{qs} - (\gamma^2 k_3 + \gamma k_2) \omega_r$$

위의 식 (31)은 아래와 같이 관측기 오차방정식으로 단순화 될 수 있으며, 그림 10은 1차 토크관측기의 블록 다이어그램을 보여준다.

$$\dot{\bar{z}} = \gamma k_3 \bar{z} \quad (32)$$

$$\text{여기서 } \bar{z} = z - \hat{z} = T_m - \hat{T}_m.$$

위의 식 (32)는 만약에 $\gamma > 0$ 이면 토크 관측기는 안정함을 의미하며, 추정 토크 \hat{T}_m 의 감쇠율은 γk_3 에 의해서 결정됨을 알 수 있다.

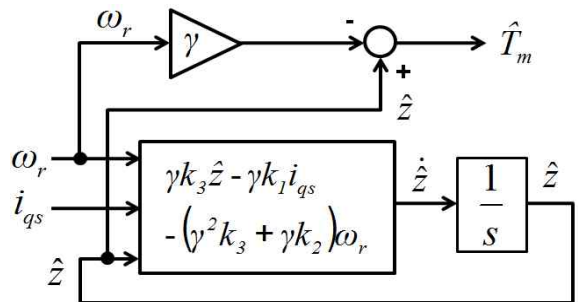


그림 10. 1차 토크관측기의 블록 다이어그램

Fig. 10. Block diagram of first-order torque observer

그림 11은 제안된 게인 스케줄링 속도제어기의 성능을 검증하기 위해 Matlab/Simulink로 구현한 직접구동형 가변속 풍력발전시스템의 시뮬레이션 모델을 보여준다. 스위칭 주파수는 스위칭 손실과 전류 리플을 고려하여 500[Hz]로 선정하였으며, 또한 공간전압벡터(Space Vector) PWM 방식이 사용되었다.

본 논문에서는 난류성 성분을 포함한 풍속 모델 하에서 제안된 게인 스케줄링 속도제어기와 기존의 PI 제어기에 대한 시뮬레이션 결과를 보여준다. 그리고 본 논문의 시뮬레이션 결과는 제안된 속도제어기의 강인성을 검증하기 위하여 동기발전기의 일부 파라미터 R_s, L_s, J 가 온도과 측정 오차 등에 의해서 200[%] 변동을 가정한 상태에서의 응답 특성을 보여준다.

그림 12와 13은 동일한 풍속 모델상황 하에서 제안된 게인 스케줄링 제어방식과 기존의 PI 제어방식의 성능을 비교하기 위한 시뮬레이션 결과이다. 본 논문에서 PI 제어기의 이득은 다음과 같이 선정되었다. 즉 전류제어기 이득의 주파수 대역폭은 157.1[rad/s]으로 설정되었으며, 속도제어기 주파수 대역폭은 15.7[rad/s]으로 설정되었다[17]. 그림 12는 풍속, 피치각, 터빈토크, 그리고 발전기 출력전력에 대한 결과를 보여준다. 그림에서 보는 바와 같이 피치각의 변동에 의해 MPPT 영역과 피치각제어 영역의 전환이 상황에 따라 신속하게 작동하여 있는 것을 확인할 수 있으며, 토크관측기는 터빈 토크의 값을 정확하게 추정하고 있음을 알 수 있다. 또한 발생전력 측면에서는 풍속에 따라서 최적의 전력을 발생함으로써 전반적으로 난류성 풍속 하에서 가변속 풍력발전시스템이 안정적이며 효율적으로 작동되는 것을 알 수 있다. 즉 정격전력인 2[MW]이하의 풍속영역에서는 최대의 전력을 생산하고, 정격전력 이상의 풍속영역에서는 정격전력인 2[MW]를 유지함으로써 가변속 풍력발전시스템의 전기적, 기계적 파손을 방지하고 안정적인 동작을 보장한다. 그러나 그림 12의 결과만으로는 제안된 게인 스케줄링 방식과 기존의 PI 제어방식의 성능 비교에 어려움이 있다.

따라서 그림 13에서는 보다 명확한 성능 비교를 위하여 제안된 게인 스케줄링 방식과 기존의 PI 제어방식의 속도 및 전류응답 특성에 대한 결과를 제시한다.

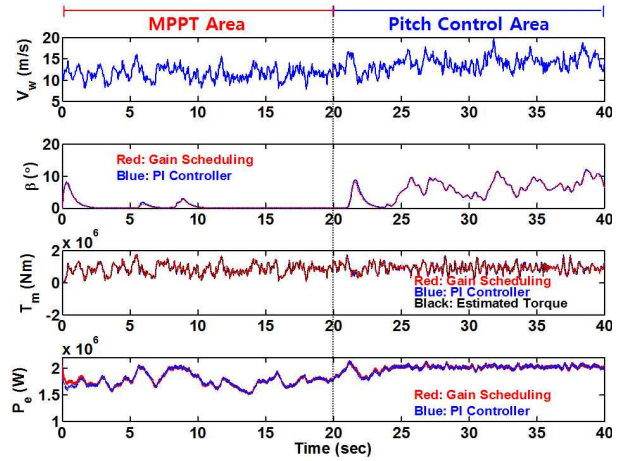


그림 12. 제안된 게인 스케줄링 제어방식과 기존 PI 제어방식의 시뮬레이션 결과 비교(풍속, 피치각, 터빈토크, 발전기 출력전력)

Fig. 12. Comparison of simulation results between the proposed gain scheduling control method and the conventional PI control method(Wind speed, pitch angle, turbine torque, generated power)

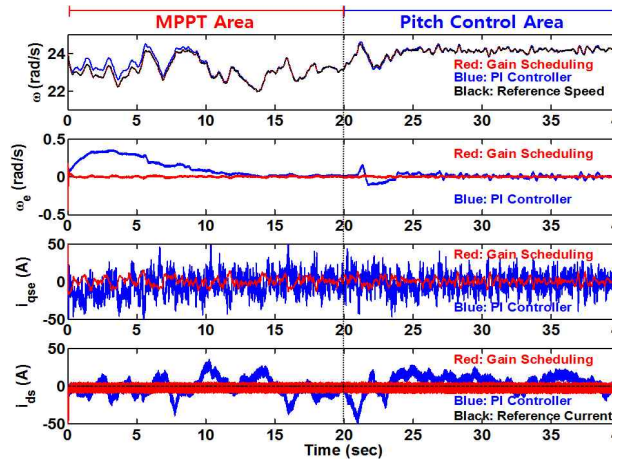


그림 13. 제안된 게인 스케줄링 제어방식과 기존 PI 제어방식의 시뮬레이션 결과 비교(회전자 속도, 회전자 속도오차, q축 전류오차, d축 전류)

Fig. 13. Comparison of simulation results between the proposed gain scheduling control method and the conventional PI control method(Rotor speed, rotor speed error, q-axis current error, d-axis current)

즉 그림 13은 회전자 속도, 회전자 속도오차, q축 전류 오차와 d축 전류에 대한 시뮬레이션 결과이며 제안된

계인 스케줄링 속도제어기와 기존의 PI 제어방식의 속도 및 전류 응답 특성을 보여준다. 그림에서 보는 바와 같이 PI 제어방식의 응답성은 제안된 계인 스케줄링 방식의 응답보다 느리며, 속도 및 전류의 오차 또한 훨씬 큼을 알 수 있다. 이는 제어기의 설계 시에 파라미터의 부정확한 측정으로 인한 오차와 풍력발전기의 작동 중 발생하는 온도 변화 및 예측 불가능한 외란에 의하여 발생하는 파라미터의 변동을 선형 제어 방식인 PI 제어기가 효율적으로 대응하지 못함을 보여주고 있다.

위의 시뮬레이션 결과비교로부터 본 논문에서 제안한 계인 스케줄링 속도제어기는 난류성 풍속모델 하에서 회전자 속도의 기준값이 변동하더라도 신속하고 안정적으로 대응하여 각 상황에서 최적의 전력을 생산할 수 있도록 제어함을 확인할 수 있다. 또한 제안된 계인 스케줄링 속도제어기는 기존의 PI 제어기에 비해 발전기 회전자의 속도와 전류에 빠른 과도응답 특성을 가지며, 정상상태에서는 회전자 속도의 오차와 dq축 전류의 오차가 더 적음을 알 수 있다. 모델링 오차나 온도변화 등으로 인해 발생할 수 있는 파라미터 변동에 대하여 PI 제어기는 효율적으로 대처하지 못하는 반면에, 제안된 계인 스케줄링 제어기는 강인성을 보이고 있어 우수성을 증명하고 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 직접 구동방식의 가변속 풍력발전시스템을 위한 영구자석 동기발전기의 계인 스케줄링 속도제어기를 제안하였고, 그 성능을 검증하기 위하여 풍력터빈시스템을 시뮬링크로 구현하였다. 제안된 속도제어기의 성능을 검증하기 위하여 실제에 가까운 난류성 풍속모델을 적용하여 풍력발전시스템을 시뮬레이션을 하였고, 기존에 사용되어온 PI 제어기와의 속도와 전류의 응답성 및 정상상태 오차의 비교를 통하여 제안된 속도제어기의 우수성을 검증하였다.

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (2011-0004936).

References

- [1] M. Chinchilla, S. Arnaltes, and J. C. Burgos, "A novel control strategy for a variable-speed wind turbine with a permanent-magnet synchronous generator", *IEEE Trans. on Ind. Applications*, Vol. 46, no. 1, pp. 331-339, Jan/Feb. 2010.
- [2] E. Muljadi and C. P. Butterfield, "Pitch-controlled variable-speed wind turbine generation", *IEEE Trans. Ind. Applications*, Vol. 37, no. 1, pp. 240-246, Jan/Feb. 2001.
- [3] 김흥우, 안해준, 장길수, 김성수, "영구자석 동기형 풍력발전시스템 모델링 및 전압변동 시뮬레이션", *조명·전기설비학회논문지*, 제23권, 제8호, pp. 116-123, 2009. 8.
- [4] 유동녕, 최영식, 최한호, 정진우, "가변속 풍력발전용 영구자석형 동기발전기의 피지 속도제어기 설계", *조명·전기설비학회논문지*, 제25권, 제2호, pp. 69-79, 2011. 2.
- [5] N. Stannard and J. R. Bumby, "Performance aspects of mains connected small-scale wind turbines", *IET Gener. Transm. Distrib.*, Vol. 1, no. 2, pp. 348-356, Mar. 2007.
- [6] C. Nichita, D. Luca, B. Dakyo, and E. Ceanga, "Large band simulation of the wind speed for real time wind turbine simulators", *IEEE Trans. on Energy Conversion*, Vol. 17, no. 4, pp. 523-529, Dec. 2002.
- [7] E. B. Muhando, S. Tomonobu, U. Naomitsu, Y. Atsushi, K. Hiroshi, and F. Toshihisa, "Gain scheduling control of variable speed WTG under widely varying turbulence loading", *Renewable Energy*, Vol. 32, no. 14, pp. 2407-2423, Nov. 2007.
- [8] W. Qiao, L. Qu, and R. G. Harley, "Control of IPM synchronous generator for maximum wind power generation considering magnetic saturation", *IEEE Trans. on Ind. Applications*, Vol. 45, no. 3, pp. 1095-1105, May/Jun. 2009.
- [9] E. Koutroulis, K. Kalaitzakis, "Design of a maximum power tracking system for wind-energy-conversion applications", *IET Renewable Power Generation*, Vol. 53, no. 2, pp. 486-494, Apr. 2006.
- [10] J. G. Slootweg, S. W. H. De Haan, H. Polinder, and W. L. Kling, "General Model for Representing Variable Speed Wind Turbines in Power System Dynamics Simulations", *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 18, no. 1, pp. 144-151, Feb. 2003.
- [11] L. Wang and G. Z. Zheng, "Analysis of a Microturbine Generator System Connected to a Distribution System Through Power-Electronics Converters", *IEEE Trans. on Sustainable Energy*, Vol. 2, no. 2, pp. 159-166, Apr. 2011.
- [12] S. Morimoto, H. Nakayama, M. Sanada, and Y. Takeda, "Sensorless output maximization control for variable-speed wind generation system using IPMSG", *IEEE Trans. on Ind. Applications*, Vol. 2, no. 2, pp. 159-166, Apr. 2011.
- [13] N. P. W. Strachan, D. Jovic, "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.

- [14] E. B. Muhando, T. Senjyu, K. Uchida, H. Kinjo, T. Funabashi, "Stochastic inequality constrained closed-loop model-based predictive control of MW-class wind generating system in the electric power supply", IET Renew. Power Gener., Vol. 4, no. 1, pp. 23-35, 2010.
- [15] P. Apkarian and R. J. Adams, "Advanced gain-scheduling techniques for uncertain systems", IEEE Trans. on Control Systems Technology, Vol. 6, no. 1, pp. 21-32, Jan. 1998.
- [16] 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, Oct. 2007.
- [17] P. Kshirsagar, R. P. Burgos, A. Lidozzi, J. Jang, F. Wang, D. Boroyevich, and S. K. Sul, "Implementation and sensorless vector-control design and tuning strategy for SMPM machines in fan-type application", IEEE Ind. Applicat. Conf. IAS Annu. Meeting, Vol. 4, pp. 2062-2069, 2006.

◇ 저자소개 ◇



최영식(崔永植)
1982년 3월 3일생. 2009년 8월 동국대 전기공학과 졸업. 2009년~현재 동 대학원 전자전기공학부 석·박사통합과정.



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.



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 DA연구소 연구원. 2005~2008년 삼성SDI 중앙연구소 책임연구원. 2008년~현재 동국대(서울캠퍼스) 전자전기공학부 조교수.