

## 파력발전용 30kW 계통연계형 PCS 제어

김완석, 김재혁\*  
원광대학교 전기공학과

### Control of 30kW Grid-Connected PCS for Wave Power Generation

Wan-Seok Kim, Jae-Hyuck Kim\*

Department of Electrical Engineering, Wonkwang University

**요약** 본 논문에서는 진동수주형(OWC: Oscillating Water Column) 파력발전시스템을 위한 30kW 급 계통연계형 PCS(Power Conversion System)을 다룬다. 해양에너지 중 파력 발전은 삼면이 바다인 반도의 특성을 지닌 한국에 적용하기 적합하고 연안 재해 시 파력 발전기가 방파제 역할을 하여 피해를 감소시킬 수 있고, 다른 해상 발전과 개발 대상 적지가 일치하므로 통합하여 효율을 증대시킬 수 있다. 파력발전 방식은 작동 원리에 따라 가동 물체형과 진동수주형, 월파형 등 여러 형태로 구분하며, 설치 형태에 따라 고정식과 부유식으로 구분된다. 본 논문에서는 구조적으로 안정되고 터빈과 발전기의 유지 보수가 비교적 쉬운 진동수주형을 채택하여, 파력발전용 30kW 계통연계형 PCS 토폴로지 및 모델을 제안하고 계통에 안정적으로 전압을 공급할 수 있는 DC link 전압 제어 등 계통연계 시 필요한 제어방법에 대해 설명하였다. 또한 이를 검증하기 위해 시뮬레이션을 수행하였다.

**Abstract** This paper deals with a 30kW grid-connected PCS (Power Conversion System) for an Oscillating Water Column (OWC) wave-power generation system. Wave power generation in marine energy is suitable for Korea with the characteristics of a peninsula with three sides facing the sea. In the case of coastal disasters, wave generators can act as a breakwater to reduce damage, and can be integrated with other marine power generation systems to increase efficiency. Wave power generation systems are classified into various types, such as oscillating bodies, OWC, and overtopping according to the operation principle, and they can also be classified into two types according to the installation method: a fixed structure and floating structure. This paper proposes a 30kW grid-connected PCS topology and model for OWC wave power generation that is structurally stable with a turbine and generator that are relatively easy to maintain, and then provide a control method required for grid connection, including DC link voltage control. Simulation verification was performed to verify the proposed PCS.

**Keywords :** Wave Power Generation, OWC, Grid-Connected, Back-To-Back Converter, Inverter

### 1. 서론

화석연료의 유한성과 이산화탄소 배출에 따른 심각한 환경 문제로 인해 신재생에너지의 관심이 높아지고 있다. 신재생에너지의 한 부문인 해양에너지, 그 중에서도 파력발전은 우리나라 지형 특성상 3면이 바다이므로 쉽

게 파랑 에너지를 얻을 수 있고, 도서지역에 설치 시 독립적인 발전이 가능하므로 효율을 증대시킬 수 있어 세계 여러 나라에서 연구가 활발히 진행되고 있다[1].

파력발전 방식은 작동 원리에 따라 가동 물체형, 진동수주형, 월파형으로 구분한다. 그 중 진동수주형 파력발전은 파랑에너지를 공기의 흐름으로 변환하고, 발생된

본 연구는 2019학년도 원광대학교의 교비지원에 의해 수행됨.

\*Corresponding Author : Jae-Hyuck Kim(Wonkwang Univ.)

Tel: +82-63-850-6733 email: jaehkim@wku.ac.kr

Received December 26, 2018

Revised February 7, 2019

Accepted March 8, 2019

Published March 31, 2019

공기의 흐름 중에 터빈을 위치시켜 전기를 얻는 파력발전 방식이다[2][3].

본 논문에서는 장치 자체의 신뢰도가 매우 우수하고, 안전성 및 유지보수 편이성 면에서도 탁월한 진동수주형으로 채택하여 30kW급 3상 진동수주형 파력 발전 시스템 모델을 제안하고 제안된 모델을 기반으로 통합 시뮬레이션을 진행하여 발전기 측과 계통 측의 출력의 변화에 대하여 설명하고자 한다.

## 2. 본론

### 2.1 계통연계형 파력발전 시스템

파랑의 에너지는 순시 적으로 변동되므로 분산전원 시스템과 계통과의 연계필요성이 증대된다. 진동수주형 파력발전 시스템의 시뮬레이션을 위한 모델은 개발 중인 3상 계통연계형 파력발전용 인버터의 시스템을 고려한 제어회로로 시뮬레이션 모델링하여 시뮬레이션을 수행하였다. Fig. 1은 파랑에너지가 수직운동을 하여 터빈을 회전시키는 모형을 나타내었고, Fig. 2는 계통연계 파력 시스템을 보여준다.

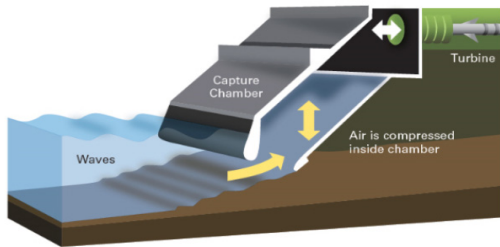


Fig. 1. Oscillating water column model

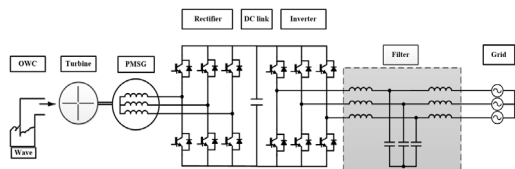


Fig. 2. Diagram of grid-connected wave power generation system

### 2.2 발전기 측 제어

발전기 측 MSC(Machine Side Converter)제어의 목적은 부스트 컨버터를 사용하여 DC Link 커패시터에

계통의 최대 선간전압 이상을 충전하여 계통에 안정적인 전압과 전류를 보내는 것을 목적으로 한다. 발전기 측 제어방식은 최적 출력을 내는 발전기 속도지령과 발전기의 실제 속도의 오차를 PI제어기를 거쳐 발전기 측 컨버터의 d축 전류 지령을 만든다. 발전기 전류의 d축 전류는 자속 측에 맞춰져 있으므로 q축 전류를 0으로, d축 전류를 지령치에 맞도록 제어하여 발전기가 최대 토크를 내도록 제어하게 된다. d-q축 좌표변환(d-q reference frame)에 의해 유효전력 및 무효전력 출력을 정의할 수 있으며, 발전기 측 전압방정식은 다음과 같이 정의된다.

$$v_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\Psi_{ds}}{dt} - \omega_m \Psi_{qs} \quad (1.1)$$

$$v_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\Psi_{qs}}{dt} + \omega_m \Psi_{ds} \quad (1.2)$$

시뮬레이션을 동작하기 위한 영구자석 발전기의 입력 토크 수식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_e = \frac{3}{2} P [\phi_f i_{qs}^e + (L_{ds} - L_{qs}) i_{qs}^e i_{ds}^e] \quad (1.3)$$

Fig. 3은 발전기와 컨버터 제어 모델을 나타내었다.

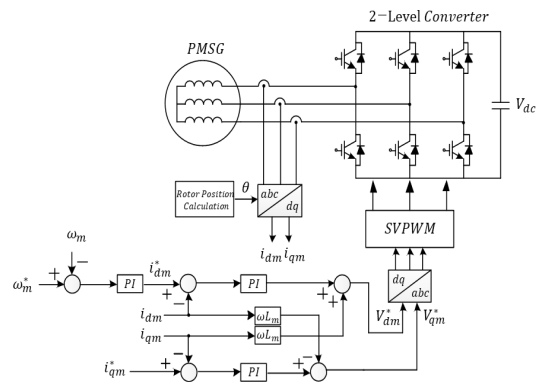


Fig. 3. 3-phase generator and rectifier control model

### 2.3 계통 측 제어

계통 측 GSC(Grid Side Converter)제어는 back-to-back 컨버터의 DC link 전압을 제어하고 계통으로의 무효전력 제어하는 것을 목적으로 한다.

계통 측의 인버터 제어방법은 q축 루프는 무효전력

주입을 제어하는데 사용되며 d축 루프는 DC Link 전압을 제어함으로써 DC Link 전압을 안정적으로 유지시킬 수 있다[4]. 인버터의 출력 상 전압은 계통전압과 동일한 220V로 출력과 동시에 위상을 계통전압과 동기화 시켜 역률을 1에 가깝게 만들어야 한다. 따라서 위상을 추종하기 위해서 동기 위상각 계산(Phase Locked Loop)하여 역률을 개선시킨다. PLL은 위상을 자동으로 조정하는 피드백 제어 시스템으로 계통의 3상 전압정보를 받아 d-q 변환한 뒤 PI제어기를 사용하여 위상각을 보정한다. Fig. 4는 3상 PLL의 구조를 나타내었다[5][6].

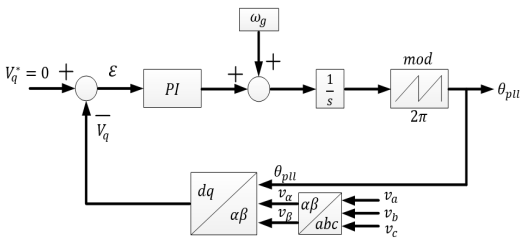


Fig. 4. Three phase PLL structure

계통의 각 상의 출력 전압을 d-q 고정좌표계로 변환하면 다음과 같다.

$$V_d^s = \frac{2V_a - V_b - V_c}{3} \quad (2.1)$$

$$V_q^s = \frac{V_b - V_c}{\sqrt{3}} \quad (2.2)$$

고정좌표계를 회전 좌표계로 변환하면 다음과 같다.

$$V_d^e = V_d^s \cos \theta + V_q^s \sin \theta \quad (2.3)$$

$$V_q^e = -V_d^s \sin \theta + V_q^s \cos \theta \quad (2.4)$$

여기서 위상각( $\theta$ )은 변환된 회전좌표계 q축 전압을 0으로 제어하기 위해 PI제어기의 출력을 계통의 각속도를 더해 적분하면 다음과 같이 위상각( $\theta_{pll}$ )을 얻는다. 따라서 P제어기의 정상상태를 보면 위상의 오차가 없음을 확인할 수 있다[7].

$$\Delta \omega = \left( K_p + \frac{K_i}{s} \right) \Delta V_{err} \quad (2.5)$$

$$\theta_{pll} = \frac{\Delta \omega + \omega_g}{s} \quad (2.6)$$

계통 축의 인버터 출력 상 전압방정식은 다음과 같이

나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = R_f \begin{bmatrix} i_{ag} \\ i_{bg} \\ i_{cg} \end{bmatrix} + L_f \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{ag} \\ i_{bg} \\ i_{cg} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{ag} \\ v_{bg} \\ v_{cg} \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

여기서  $R_f, L_f$ 는 계통라인의 저항 및 인덕턴스를 나타내고 계통전압에 대해 d-q 변환하여 PWM 제어에 입력되는 전압 지령치는 다음과 같다.

$$v_{dg} = R_f i_{dg} + L_f \frac{di_{dg}}{dt} + \omega_e L_f i_{qg} \quad (2.8)$$

$$v_{qg} = R_f i_{qg} + L_f \frac{di_{qg}}{dt} - \omega_e L_f i_{dg} \quad (2.9)$$

인버터에 인가되는 PWM은 공간벡터전압변조(SVPWM)방식을 사용하였다.

SVPWM의 장점으로서는 dq 변환을 사용하여 계통 연계 시 제어 알고리즘이 간단해지고, 출력 가능한 상 전압의 최대값이  $V_{dc}/\sqrt{3}$ 이므로 SPWM보다 15.5%가 크다. SVPWM의 단점으로 전압 벡터의 위치와 삼각 함수 계산 등 연산시간이 오래 걸린다는 단점이 있지만 본 논문에서는 오프셋(offset) 전압을 이용한 변조 기법을 사용하여 연산과정을 단순히 하였다. 오프셋 전압을 다음 식과 같이 극전압 지령을 생성하여 삼각파 비교 PWM 기법으로 간단히 구현 할 수 있다.

$$\begin{aligned} v_{an}^* &= v_{as}^* + v_{sn} \\ &= v_{as}^* - \frac{v_{max} + v_{min}}{2} \end{aligned} \quad (2.10)$$

인버터의 8개 출력 전압 벡터를 복소수 공간상에서 표현하면 Fig. 5와 같다.

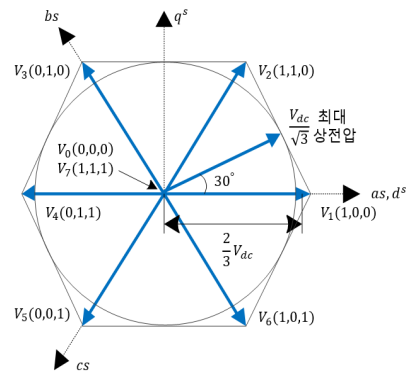


Fig. 5. Inverter output voltage expressed as a space vector

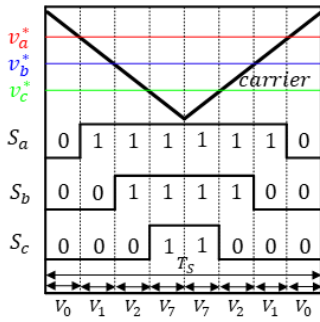


Fig. 6. The effective time of each phase pole voltage

Fig. 6은 각 상 극전압의 유효 인가 시간을 나타낸 그림으로 지령전압과 삼각파 비교하여 스위칭 시간을 결정하게 된다. 스위칭 소자의 게이팅 인가시간은 다음과 같다[8][9].

$$T_{on} = \frac{T_s}{2} - \frac{v_{an}^*}{V_{dc}} T_s \quad (2.11)$$

$$T_{off} = \frac{T_s}{2} + \frac{v_{an}^*}{V_{dc}} T_s \quad (2.12)$$

d-q축 좌표변환(d-q reference frame)에 의해 유효 전력 및 무효전력 출력은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$P_g = \frac{3}{2} (v_{dg} i_{dg} + v_{qg} i_{qg}) \quad (2.13)$$

$$Q_g = \frac{3}{2} (-v_{dg} i_{dq} + v_{qg} i_{qg}) \quad (2.14)$$

Fig. 7는 DC link, 2-Level Inverter, LCL Filter, Grid 로 이루어진 파력발전용 전력변환 시스템의 계통 측 제어 모델이다.

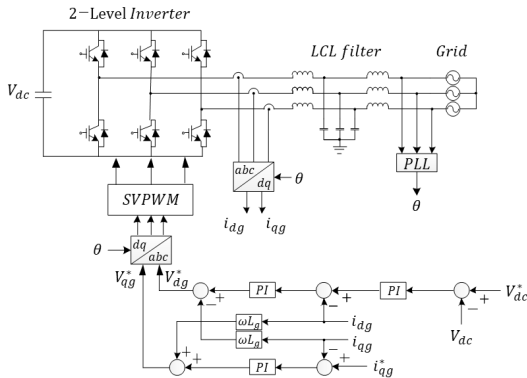


Fig. 7. Grid-connected inverter control model

## 2.4 시뮬레이션 결과

계통연계형 파력발전 시스템의 모델링을 검증하기 위해 PSIM 시뮬레이션을 이용하여 수행 하였으며 Table 1 은 시뮬레이션에 사용된 시스템 파라미터를 표기하였다.

Table 1. System parameter

Parameter	Value	Unit
DC link capacitor	5500	uF
PWM switching frequency	5	kHz
Grid voltage	220	V
Grid frequency	60	Hz
inverter side inductance( $L_i$ )	83	uH
Grid side capacitor( $C_f$ )	13	uF
Grid side inductance( $L_g$ )	42	uH
Damping resistance( $R_d$ )	0.21	$\Omega$

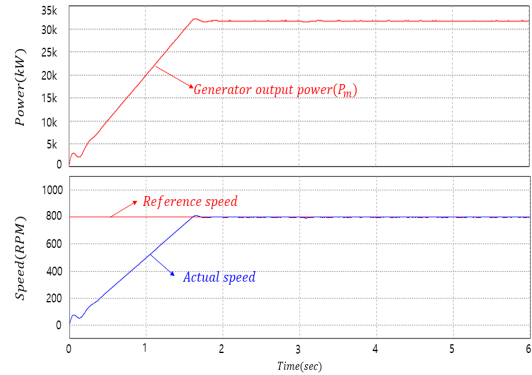


Fig. 8. Generator output power(Top), Generator speed control(Bottom)

Fig. 8은 발전기의 출력과 발전기가 속도제어에 의해 속도가 지령치에 수렴하는 것을 확인할 수 있다.

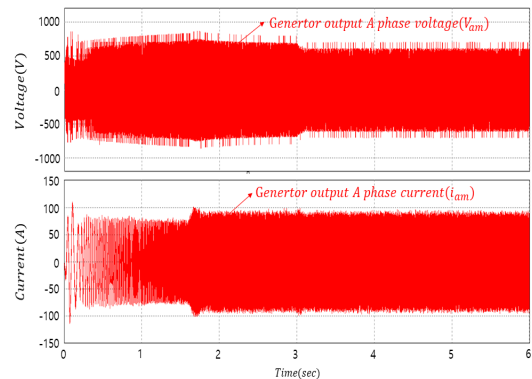


Fig. 9. Generator output voltage(Top), Generator output current(Bottom)

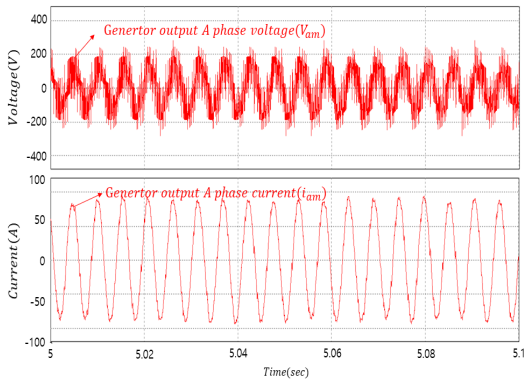


Fig. 10. Generator output voltage zoom in(Top), Generator output current zoom in(Bottom)

Fig. 9는 발전기의 출력 a상 전압과 전류를 나타내었고, Fig. 10는 정상상태 구간을 확대하여 나타내었다.

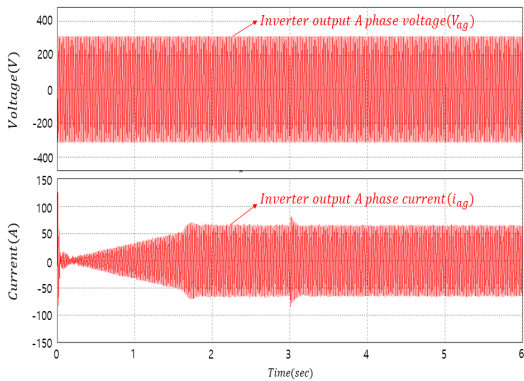


Fig. 11. Inverter output voltage(Top), Inverter output current(Bottom)

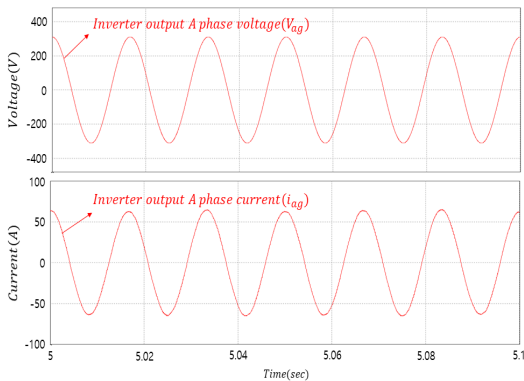


Fig. 12. Inverter output voltage zoom in(Top), Inverter output current zoom in(Bottom)

Fig. 11는 계통 측 인버터의 출력 a상 전압과 전류를 나타내었고, Fig. 12는 정상상태 구간을 확대하여 나타내었다.

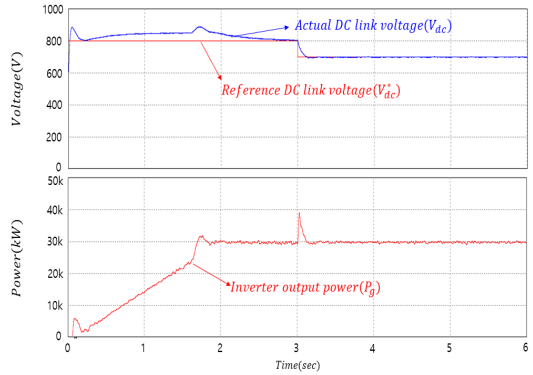


Fig. 13. Grid side DC link voltage control(Top), Inverter output power(Bottom)

### 3. 결론

본 논문은 계통연계 운전을 위한 3상 계통연계형 인버터의 제어 방법을 설명하였다. Psim을 이용하여 30kW back-to-back 계통연계시스템 시뮬레이션을 수행하였다.

Fig. 11, 13을 보면 계통 측 인버터에서 DC link 전압 지령에 스텝 변화를 주어 변동해도 계통 전압이 흔들리지 않는 것을 확인 할 수 있었다. 따라서, DC link의 크기를 변화시켜 피상전력의 조절이 가능하다. 제안된 과력발전용 계통연계형 PCS의 효율은 발전기의 출력이 31.8kW 일 때, 계통 측 전력은 30kW로 손실전력은 약 1.8kW이다. 입력대비 출력 효율은 94.34%가 나온 것을 확인 할 수 있었다.

추후에는 정격 용량과 같은 실험을 통해 제안된 모델링 검증과 인버터 품질의 효율, 전류 THD 등 성능 측정이 추가적으로 수행 할 필요가 있다고 생각 된다.

### References

[1] R. Sabzehgar, "A Review of Ocean Wave Energy Conversion Systems", IEEE Electrical Power & Energy Conference, Oct. 2009.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/EPEC.2009.5420927>

[2] Dionisio Ramirez, "Emulation of an OWC Ocean Energy Plant With PMSG and Irregular Wave Model", IEEE TRANSACTIONS ON SUSTAINABLE ENERGY, pp1515-1523, Oct. 2015.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TSST.2015.2455333>

[3] Nicola Delmonte, "Review of Oscillating Water Column Converters", IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, pp1698-1710, Mar. 2016.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TIA.2015.2490629>

[4] Fattah Hassanzadeh, "Back-to-back Converter Control of Grid-connected Wind Turbine to Mitigate Voltage Drop Caused by Faults" IEEE Conferences, pp1-6, Nov. 2017.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/NAPS.2017.8107205>

[5] Vikram Kaura "Operation of a Phase Locked Loop System Under Distorted Utility Conditions", IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, Jan. 1997.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/28.567077>

[6] F. A. Ramirez, "Development of a Grid-Connected Wind Generation System With a Modified PLL Structure", IEEE TRANSACTIONS ON SUSTAINABLE ENERGY, pp474-481, Jul. 2012.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TSST.2012.2190770>

[7] Tae-Won Chun, "Synchronization Techniques for Single-Phase and Three-Phase Grid Connected Inverters using PLL Algorithm", THE TRANSACTIONS OF KOREAN INSTITUTE OF POWER ELECTRONICS, pp309-316, Aug. 2011.

[8] Zitao Wang, "A DC Voltage Monitoring and Control Method for Three-Phase Grid-Connected Wind Turbine Inverters", IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, pp1118-1125, May. 2008.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TPEL.2008.921174>

[9] Qingrong Zeng, "Improved Current Controller Based on SVPWM for Three-phase Grid-connected Voltage Source Inverters", IEEE 36th Power Electronics Specialists Conference , pp2912-2917, 2005.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/PESC.2005.1582047>

김 재 혁(Jae-Hyuck Kim)

[정회원]



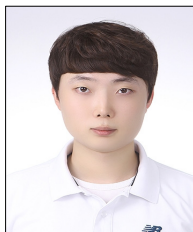
- 1998년 11월 ~ 2000년 6월 : UL Korea, Engineer
- 2004년 8월 : Univ. of Wisconsin at Madison (공학석사)
- 2010년 5월 : Virginia Tech(공학 박사)
- 2010년 1월 ~ 2010년 6월 : Ramu Inc. Senior Engineer
- 2010년 9월 ~ 현재 : 원광대학교 전기공학과 부교수

<관심분야>

전력전자, 전동기 설계 및 제어, 에너지변환

김 완 석(Wan-Seok Kim)

[정회원]



- 2017년 2월 : 원광대학교 전기공학과 졸업
- 2017년 3월 ~ 현재 : 원광대학교 대학원 전기공학과 석사과정
- 2019년 1월 ~ 현재 : (주)현기술 연구원

<관심분야>

전력전자, 전동기 제어