



건물용 에너지저장장치(ESS)의 전력변환시스템(PCS) 기술

최중묵<건국대학교 전기공학과 박사과정> · 한석우<국제대학교 전기과 교수> ·
송용희<삼성SDI 책임연구원> · 최규하<건국대학교 전기공학과 교수>

1 개 요

현대 산업사회에서 에너지는 전력산업과 매우 밀접한 관계를 갖고 있으며 이러한 전력산업은 중앙집중형(Central Station) 방식의 대규모 전원 개발을 중심으로 수요에 대응해 왔다. 그러나 고도의 경제성장과 소득증대 및 생활수준 향상으로 인한 전력 사용량 급증으로 에너지 자원 한계, 환경 제약 등의 문제점에 직면해 있다. 이러한 에너지를 둘러싼 산업전체와 국민경제의 심각한 상황 인식하에서 지속적인 전력 수급의 안정성 확보 및 전력 에너지의 효율적 이용을 위한 전력시스템 개발, 더 나아가 에너지 수입량 저감을 위하여 전력 수급 양면에 걸친 대책의 마련이 절실히 요구되고 있다. 그 중 하나의 대책으로 신재생에너지 분산형 전원(Distributed Resource, DR)과 에너지 저장장치(Energy Storage System, ESS)의 개발과 도입이 활발히 이루어지고 있다. 최근 유럽에서는 전체 발전원 중 신재생 에너지 비중을 2020년까지 20% 2050년까지 50%로 늘려가겠다는 계획을 확정했다. 우리나라와 미국 역시 신재생에너지 의무할당제(Renewable Portfolio Standards, RPS)를 통해 확대해 나가고 있다[1-2]. 신재생에너지에

의한 발전량은 수요자 중심이 아닌 태양광과 풍력 등의 영향을 받게 된다. 이 경우 발전량이 급격하게 감소하거나 정지하게 되면, 전력시스템 전체의 안정성에 영향을 미치게 된다. 이를 해결할 수 있는 대안은 에너지를 저장해 두었다가 수요자가 필요한 시점에만 공급하는 장치로 계통의 신뢰성을 높일 수 있다. 본 원고를 통해 에너지 저장장치(ESS)의 전력변환장치인 PCS의 구성방식에 대한 설명과 이를 구성하기 위한 필요기술에 대하여 알아본다. 또한 국내에 적용된 사례를 소개하고자 한다.

2. 구성방식에 따른 PCS 분류

신재생에너지에서 발전되는 에너지를 사용하기 위해서는 사용자에게 맞는 전력으로 변환하여 공급해야 한다. 이때 전압의 크기 변환과 더불어 직류를 교류로 변환할 수 있어야 한다. 이를 전력변환장치(Power Conditioning System, PCS)라고 부른다. 이 시스템은 크게 독립형과 계통연계형으로 나누어진다. 그림 1은 독립형 PCS의 구성을 나타낸다.

독립형 PCS는 전기공급이 어려운 벽지, 낙도 가정의 전원으로 사용되는 경우, 그리고 가로등 및 통신시

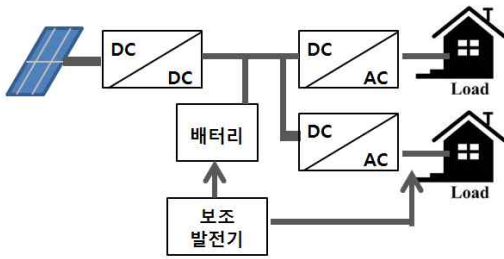
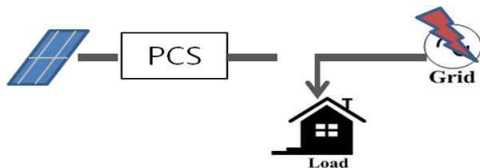
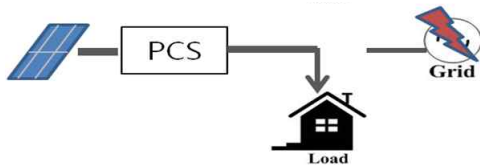


그림 1. 독립형 PCS 구성



(a) 계통연계 단독운전 방지형



(b) 계통연계 독립 운전형

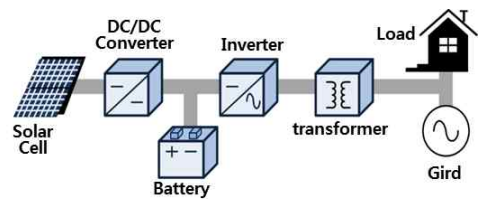
그림 2. 계통사고 시 동작 방식에 따른 분류

스택의 전원 공급용으로 사용하기도 한다. 최근 늘어나고 있는 캠핑용 태양광 전원 역시 이러한 형태이다. 계통연계형 PCS는 상용 전력계통과 연계운전하며 ESS를 통해 침투 부하전력을 억제하고 잉여전력을 계통으로 반환한다. 신재생에너지 발전 설비들이 여기에 해당된다. 발전전력을 최적화 하기 위해 태양광 최대전력점추종(Maximum Power Point Tracking, MPPT) 기술이 사용되고 고조파제거, 고효율 제어, 단독운전 방지 그리고 단락사고 감시 기술 등이 필요하다. 계통연계형의 경우 계통사고 시 기존에는 그림 2 (a) 같이 PCS를 절체 시켰다. 이와 다르게 최근에는 계통연계 ESS로 사용하다 정전시 계통을 분리하고 ESS를 이용해 독립운전을 하는 계

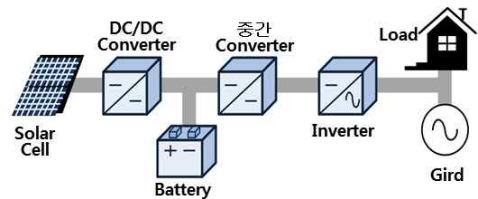
통연계 독립운전형으로 개발 되었으며 그림 2 (b)와 같다.

그림 3은 계통연계형 PCS의 구조를 나타낸다. 그림 3 (a)는 인버터 출력전압을 후단의 변압기를 이용하여 승압하는 방식이며 저주파 절연형 이라고 한다. 이러한 방식의 장점은 구조가 단순하다는 점 그리고 전기적 절연이 변압기를 통해 이루어 진다는 점이 있다. 하지만 전류가 높아 전선류 및 버스바(bus bar)가 굵어지며 ESS 구성시 DC 링크에 배터리를 병렬 연결하여 저주파 리플전류가 주입되어 배터리 수명에 나쁜 영향을 미치게 된다.

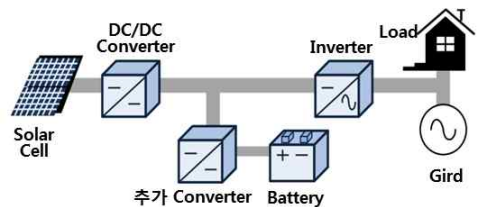
그림 3 (b)는 DC 링크에 전압을 승압하여 인버터에 공급하는 중간 컨버터 추가 무변압기형이다. 이 방식은 DC링크에 배터리를 직접 연결하는 방식에 비하



(a) 저주파 절연형 PCS



(b) 중간 컨버터 추가 무변압기형 PCS



(c) 충전전기 추가 무변압기형 PCS

그림 3. 계통연계 PCS의 구성방식에 따른 분류

여 제어가 용이하지만 태양광 출력의 변환 경로가 3 단계로 이루어져 전력손실이 커진다.

그림 3 (c)는 충방전기 추가 무변압기형이다. 배터리를 선택적으로 사용이 가능하며 문제가 생겼을 경우 태양광 발전만 동작하는 운전이 즉시 가능하다. 하지만 추가 컨버터의 제어구현이 필요하다.

이러한 PCS를 개발하기 위해서 필요한 Hardware와 Software의 기술을 각각 표 1, 표 2에 나타내었다.

표 1. Hardware 설계 기술

Hardware 설계기술	내용
저주파 절연형 PCS 설계 기술	사고시 시스템 보호를 위해서 입력력을 절연하는 PCS 설계
무변압기형 PCS설계 기술	PCS의 효율을 높이고 사이즈를 줄이기 위해 변압기 없이 출력 전압을 확보하는 기술
급속 충방전기 설계 기술	양방향 DC출력 하기 위한 컨버터를 설계하는 기술
출력 필터 설계 기술	제어 대역폭을 보장하면서 높은 품질의 전류를 출력하기 위해 자기회로를 설계하는 기술
DC Link 설계기술	상호 에너지 전달을 원활히 하고 스위칭 리플을 감소시키기 위해 충전회로를 설계하는 기술
스위칭 드라이버 설계 기술	MOSFET 또는 IGBT를 사용하기 위해 제어회로로부터 절연된 전원으로 신호를 만드는 보드를 설계하는 기술

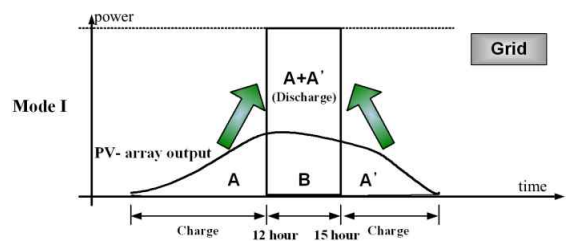
표 2. Software 설계 기술

Software 설계기술	내용
가상 이상 PLL 제어기술	단상 계통과 연계하기 위해 가상의 상을 만들어 위상을 제어하는 기술
양방향 인버터 제어기술	높은 전력품질을 유지하면서 DC를 AC로 만들고 AC를 DC로 만들기 위한 인버터 제어 기술
MPPT 제어기술	PV 발전을 최대로 사용하기 위하여 입력 전압 전류를 DC-DC 컨버터로 제어하는 기술
계통연계 단독운전 방지 제어기술	인명사고 방지를 위해 계통사고를 감지하고 동작을 정지하는 기술
계통연계 독립운전 제어기술	정전시 전기 공급을 위해 계통사고를 감지하고 계통을 차단하는 기술
급속 충방전 제어기술	컨버터가 정전류 또는 정전압 출력하기 위해 컨버터 제어를 이중루프로 구현하는 기술

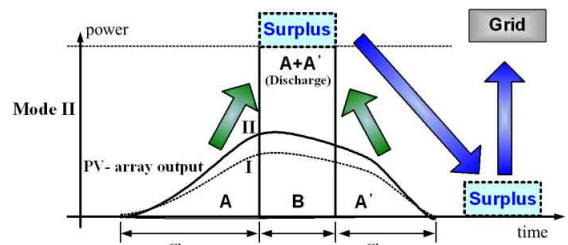
3. PCS를 이용한 ESS 운전

3.1 피크컷 세이브 시스템 (peak cut save system)

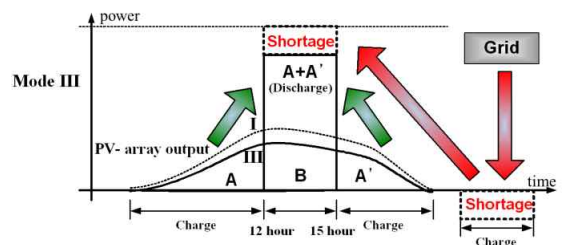
피크컷 시스템은 일반 태양광 발전 시스템과 달리 출력전력이 즉시 계통으로 전달되지 않고 피크 수요 시간 이외에는 배터리를 충전하는데 사용된다[3]. 이때 배터리가 완충전 되면 잉여전력을 계통으로 발전한다. 피크시간 내에서는 배터리의 일정 전력을 계통으로 주입한다.



(a) PV 출력 = 연평균 출력 모드



(b) PV 출력 > 연평균 출력 모드



(c) PV 출력 < 연평균 출력 모드

그림 4. 피크컷 세이브 시스템 운전 모드

그림 4 (a)는 이상적인 모드로서 발생하기 힘든 모드로 볼 수 있으나 시스템 운전 방법을 설명하기 위한 핵심 개념이다. 이 모드에서는 1일 시스템 발전량은 기준치와 동일하므로 PCS는 외부에 의해 설정된 운전시간 대에서만 운전한다.

그림 4 (b) 1일 PV-array의 발전량이 기준치를 초과한 경우이다. 이 모드가 반복되면 배터리와 같은 전력저장장치의 이용시 배터리가 과충전이 될 수 있어 1일 PV-array로부터 발전된 전력을 충전시킬 수 없는 경우가 발생할 수 있으므로 야간에 충전된 양을 방전한다.

그림 4 (c)의 경우는 일기가 좋지 않을 경우 발생할 수 있는 모드로서 이 모드가 반복되면 침두부하 발생 시간대에 발전해야 할 전력량을 확보할 수 없는 경우가 발생한다. 그러므로 이런 경우에는 DC-AC 컨버터의 양방향 전력제어특성을 이용하여 침두부하 시간대외의 시간인 발전 설비의 이용률이 낮은 심야 시

간대를 이용해서 배터리를 충전한다.

3.2 BMS, EMS, AMR과 연계운전

ESS는 단일기기로 구성할 수 없고 그림 5와 같은 여러 가지 기기로 이루어져 있다. 그리고 여기에서 사용되는 용어를 표 3에 정리하였다.

PCS는 앞서 보았듯이 신재생 에너지의 전력을 변환하는 전력변환 장치이다. BMS는 배터리의 셀 밸런싱과 충전량을 관리하는 시스템이다. 리튬폴리머 배터리의 BMS는 단위 셀마다 셀 밸런싱을 제어하고 충전량을 연산하며 또한 수명까지 나타낸다. 최근에는 충전량 연산을 위해 전류적산 방법과 외부 온도 등의 환경변수가 적용된 테이블을 이용하는 조합된 알고리즘을 사용한다. EMS는 다수의 BMS와 PCS의 정보를 저장하여 사용자에게 보여주는 장치이다. 최근에는 누적된 데이터를 이용하여 운전명령을 내리는 시스템도 보급되고 있다. AMR은 사용자의 전기 사

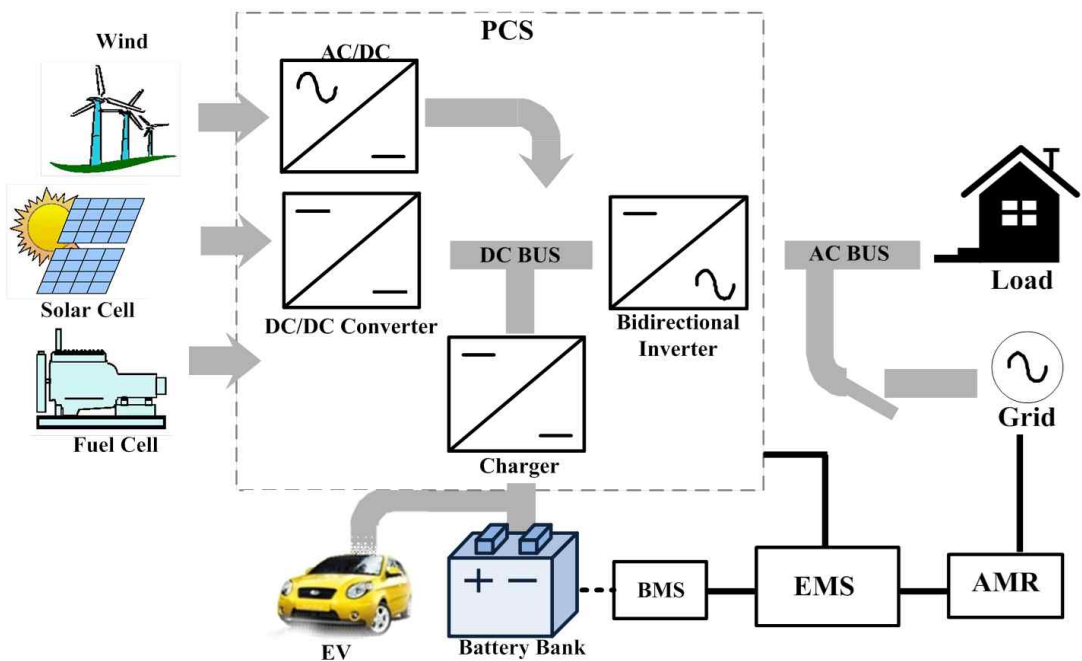


그림 5. 스마트그리드(smart grid) 내에서 ESS의구성

용량을 실시간으로 측정한다. 실시간 사용량을 이용하면 ESS가 에너지를 보다 효율적으로 처리 할 수 있게 된다.

표 3. ESS 관련 용어 정리

용어	의미
PCS	Power Conditioning System
BMS	Battery Management System
EMS	Energy Management System
AMR	Automatic Meter Reading

3.3 Active load leveling

스마트그리드(smart grid) 내에서 ESS를 운영하기 위해서는 그림 5와 같이 각종 기기들의 네트워크가 중요하다. 그림 6은 건국대학교에서 1년간 실증시험한 ESS의 운전결과 중 하나이다. 시스템은 BMS, EMS, PCS, AMR로 구성되어 있다. 붉은색은 AMR로 측정된 부하 전력을 보여주며 보라색은 배터리의 충방전 전력이다. 우선적으로 부하는 태양광 전력을 사용하고 잉여전력은 배터리에 충전하고 부족 시 방전하는 경향을 그림 6을 통하여 알 수 있다.

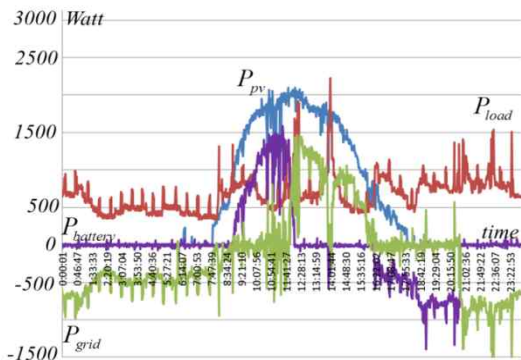


그림 6. ESS의 실증시험 결과
(건국대 전력전자연구실용 3kW급 ESS)

4. ESS용 PCS 실증사례

ESS는 최근 국내외에서 많은 실증 사례가 발표되고 있고, 상업적으로 설치 구동되고 있다는 기사도 많이 볼 수 있다. 특히 일본과 미국의 경우 한가지 배터리에 치중되지 않고 Sodium Sulphur Battery (NAS), Redox Flow Battery(RFB) 등의 다양한 실증 사례를 발표 하고 있다. 국내에서도 제주도 실증단지와 대전지역 보급사업 등 많은 사례들이 발표되고 있다. 그 중에서 필자들이 개발한 ESS용 PCS를 아래에 소개 한다.

4.1 강릉 녹색도시 ESS 실증시험

강원도 강릉시가 녹색 시범도시로 선정되면서 사업 중 하나로 강릉 녹색시범도시 체험센터를 최근에 준공하였다. 센터 외부에는 태양광 모듈이 설치되어 있고 내부에는 ESS가 설치되어 있다. 그림 7은 설치 당시 사진이다. 5kW급 ESS 내부에는 EMS통신 장비, BMS, 리튬폴리머 배터리 그리고 필자들이 개발한 5kW급 PCS가 설치되어 있다. 전기적 사양은 표 4와 같다.



그림 7. 강릉 녹색 단지 내 5kW급 ESS(좌측 외부 태양광 모듈과 필자, 우측 ESS 캐비닛)

표 4. 5kW급 PCS 전기적 사양

항목	내용
운전방식	계통연계 독립 운전형
정격 출력	5 kW
출력주파수	60Hz
출력전류 THD	5% 이내
PV 운전전압	200~400V
PV 정격 출력	5kW
배터리 전류 리플율	7.5% 이내
배터리 전압 범위	120~166V
BMS 통신	CAN 2.0
Gateway 통신	RS 485
EMS 통신	TCP/IP
RTC 통신	I2C
터치패널 통신	RS 232

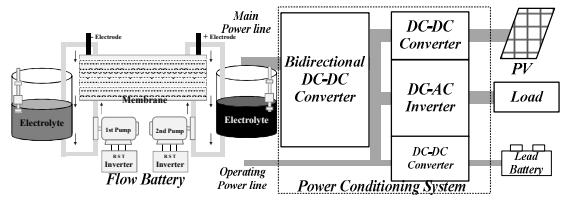


그림 8. RFB를 적용한 PCS 블록선도

그림 9는 개발된 10kW급 PCS의 외형이며 표 5는 PCS의 전기적 사양이다. 위의 PCS는 독립운전 시스템이므로 초기 구동을 위한 전원으로 연축전지를 사용했다. 지금보다도 출력 전류 사양이 높고 내부 직렬 저항이 낮은 울트라커패시터(Ultracapacitor)로 교체하는 연구도 현재 진행 중에 있다.

표 5. RFB용 10kW급 PCS 전기적 사양

항목	내용
운전방식	독립운전
정격 출력	10kW
출력주파수	50Hz 또는 60Hz
출력전압 THD	5% 이내
PV 운전전압	200~400V
PV 정격 출력	6kW
배터리 전압범위	0~120V

4.2 Redox Flow Battery를 적용한 PCS 실증시험

Redox Flow Battery(RFB)는 두 가지 전해액의 산화 환원 반응에 의하여 충방전한다.

멤브레인은 타 전지와 다르게 용기 내에 있지 않고, 반응을 위해 전해액이 멤브레인으로 공급된다.

RFB용 PCS의 구성은 그림 8과 같다. 그림에서 펌프와 모터드라이브는 외부탱크에 보관된 전해액을 순환시키는 역할을 한다. RFB는 탱크와 독립적으로 구성이 가능하므로 대용량화에 적합하며, 전해질은 리튬배터리보다 구하기가 쉽고 경제적이다.

셀당 배터리 전압이 리튬이온배터리 셀과 비교하여 낮기 때문에 직렬수가 더 많아져도 전압이 낮다. 그러므로 배터리 충방전기는 승압시 손실을 줄이는 알고리즘으로 설계되어야 하며 내부저항에 대한 동특성 역시 고려해야 한다[4].



그림 9. RFB를 적용한 10kW급 PCS

5. 결 론

PCS는 ESS의 목적에 알맞게 다양한 형태로 구성되고 또한 제어 알고리즘도 계속 발전되고 있다. ESS는 이러한 PCS 발전으로 인해 다양한 환경에서 유연하게 전력을 공급할 수 있게 해준다. 이러한 ESS의 보급에 따라 기대되는 효과는 다음과 같다.

- 신재생에너지의 효율적인 활용과 안정화 기여
 - 전력 부하 조정에 의한 전력 배전량 감소 효과
 - 부하 침투치 감소에 의한 예비 전력량 감소 효과
 - 계통의 신뢰도 향상으로 인한 효율적인 운영 가능(주파수조정, 피크감소, 신재생에너지 출력 안정화)
 - 전력설비의 증설 투자비 및 운전비 절감
- 위와 같이 ESS는 직접적으로 전기절약 뿐만 아니라 사회 간접자본의 사용량을 줄이고 설비를 절약하는 효과를 거둘 수 있다.

더불어 계통연계로 전력예비율 부족으로 인한 순환정전 예방, 전력품질 향상 및 저 탄소 그린에너지 구현으로 차세대 전력사업의 핵심장치로 발전이 기대된다. 그리고 단위 kW당 에너지저장 비용 절감 및 ESS 보급사업 관련 정부의 제도개선 노력이 요구된다.

참고문헌

- (1) “신·재생에너지 기술개발 및 보급사업 추진 방안”, 산업자원부, 2006.
- (2) 홍일선 “신재생에너지 확대의 관건, 전력저장장치” LG Business Insight, 2010.7.
- (3) 임종용 외 5명 “피크컷 알고리즘을 적용한 에너지 저장장치를 갖는 태양광 시스템” 전력전자학회 추계학술대회 논문집, 2012.11, pp135-136.
- (4) 최중묵 외 4명 “Zinc-Bromine 레독스 플로우 배터리를 이용한 독립형 마이크로그리드 ESS DC-DC 컨버터 설계 및 실증” 전력전자학회논문지 vol 19. No 2. 2014. 04, pp106-115.

◇ 저 자 소 개 ◇



최중묵(崔重默)

1983년 1월 1일생. 2008년 건국대 전기공학과 졸업. 2010년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2010~2011년 LS산전 중앙연구소. 2011년~현재 동 대학원 박사과정.



한석우(韓錫愚)

1964년 3월 1일생. 1989년 호서대 전기공학과 졸업. 1991년 건국대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1992~1998년 한국전력공사. 1998년~현재 국제대학교 전기과 교수. 건축전기설비기술사. 전기응용 기술사.



송용희(宋龍熙)

1976년 10월 22일생. 2000년 충북대 전기전자공학부 졸업. 2002년 동 대학원 제어계측공학과 졸업(석사). 2011년 동 대학원 제어계측공학과 졸업(박사). 현재 삼성SDI책임연구원.



최규하(崔圭夏)

1955년 7월 24일생. 1978년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1980년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1986년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1987~1988년 미국 오레곤주립대 전기공학과 Post-Doc. 1998~1999년 버지니아주립대 교환 방문교수. 1996년~현재 건국대 산업기술연구원 인버터 제어기술연구센터 소장. 1999년~현재 건국대 부설전력 전자기술연구센터 소장. 2012~2013년 건국대 부총장. 현재 건국대 전기공학과 교수.