

특집 : 대체에너지산업에서의 전력전자기술

풍력발전시스템에서의 전력전자기술 및 전력품질 평가

김일환*, 송승호**

(*제주대 교수, **전북대 교수)

1. 서 론

풍력기술은 바람이 가진 운동에너지로부터 전기적 또는 기계적 에너지로 변환시키는 것으로 풍력 발전시스템을 구성하는 회전자, 동력전달장치, 발전기를 포함하는 전기시스템, 요잉 시스템, 출력제어 시스템, 안전장치, 타워 등 철 구조물 및 이들 기기의 조합인 풍력발전 시스템(Onshore 및 Offshore)의 설계, 제작, 해석, 진단 및 평가·운용에 관한 총괄적 기술이다.

풍력기술의 일반적 특성으로는 우선 지속개발 가능한 무공해 천연 에너지를 개발하는 산업으로써 산업의 결과물이 환경에 미치는 영향이 거의 없고 국토가 비좁은 우리의 현실에서 제방이나 산간오지 등을 개발 할 수 있다는 점과 국토이용 효율을 높일 수 있다는 장점을 지니고 있다. 또한 그 실용성에서도 매우 뛰어나, 대단위 규모로 운전하고 있는 미국의 경우에는 발전단가 면에서도 기존 에너지원인 원자력 및 화력 등에 대등한 상태로까지 발전된 상태이다.

전력전자 공학의 풍력발전 시스템 응용은 두 가지 측면에서 검토되어야 할 것이다. 첫 번째는 얼마나 큰 용량까지 전력 변환이 가능한가하는 것이고 두 번째는 단위 용량 당 가격(price/kW)이 얼마나 되는가의 관점이다. 본 글에서는 전기 에너지 변환측면에서 최신 풍력발전 시스템의 기술 동향을 비교 분석하고 특히 전력계통시스템과의 연계 측면에서 검토되어야 할 전력품질 이슈에 관해 IEC61400-21 국제 규정을 중심으로 소개하고자 한다.

2. 국내외 풍력 발전 보급현황

2001년 현재 세계적으로 24,900[MW] 풍력설비의 보급과

연간 54.5[TWh/년] 이상의 전력을 생산하는 청정에너지 산업으로써 세계적으로도 가장 빠르게 성장하고 있는 발전 사업으로써 최근 5년간의 연 평균 산업규모 성장률이 39.5(%)에 이르는 고도성장 기술이라 할 수 있다.

표 1. 최근 5년간 풍력기술의 성장규모 추이

Year	Installed MW	Increase %	Comulative MW	Increase %
1996	1.292		6.070	
1997	1.568	21	7.636	26
1998	2.597	66	10.153	33
1999	3.922	51	13.932	37
2000	4.495	15	18.449	32
2001	6.824	52	24.927	35
Average growth - 5 years		39.5		32.6

Source : BTM Consult ApS - March 2002

우리나라의 경우 2002년 11월까지 현재 제주지역 등 총 70기 16,514.4(kW)의 풍력발전 설비가 설치되어 2001년도 현재 6,567(kW)가 정상 가동되고 있고, 한 해 동안 12,591.8(MWh)의 전력을 생산하였다.

우리나라에서도 풍력산업을 포함한 국내 대체에너지산업 및 대체에너지원의 개발을 위해 꾸준한 기술개발과 보급 확대를 꾀하고 있다. 2003년까지 대체에너지 공급목표인 2.0(%)를 달성하기 위해서 풍력발전설비에 의한 전력생산에 대해 발전전력 가격보전제도 도입(풍력발전 전력기준 가격 : 107.66원/kWh) 등 적극적인 보급 지원정책을 추진하게 된 것이다. 이에 따라 에너지관리공단 지원으로 750(kW)급 중형 풍력발전 시스템 개발사업이 2002년부터 2004년까지 진행 중이다.

표 2. 국내 풍력 발전기 운영 현황

설치 장소	용량(kW)	대수	설치년도	주관기관	제조사	비고
제주 행원	225	1	1999. 3	제주도청	VESTAS	정상운전
	600	2	1998. 2		VESTAS	
	660	4	1999. 3~		VESTAS	
	750	5	2000. 3~		NEG MICON	
전남 무안	750	1	1999. 4	한국화이바	Lagerway	시운전중
경북 울릉도	600	1	1999.11	경북도청	VESTAS	시운전중
경북 포항	660	1	2001. 3	경북도청	VESTAS	정상운전
전북 새만금	30	1	2001. 3	(주)코윈텍	(주)코윈텍	정상운전
전북 새만금	750	2	2002.11	전북도청	NEG-MICON	정상운전
강원 대관령	750	1	2002.11	(주)유니슨	JOUMONT	시운전중

3. 풍력발전기 및 계통 연계 방식의 다양성

현대적인 3날개, 수평축, 계통연계형 풍차의 설계 개념이 처음 발표된 것은 1957년 Gedser의 설계로 1972년 Riisager가 22[kW] 풍차 실용화에 성공하면서 덴마크는 풍력발전산업의 선두적 역할을 해왔다. 지난 20여년동안 풍차의 단위 용량은 20[kW]에서 2[MW]로 증가했으며 기술사양면에서도 많은 발전을 이루었다. 그 중 가장 큰 변화는 회전날개(블레이드)의 바람받음각(Angle of Attack)을 임으로 조절하는 가변 피치(Variable pitch)방식의 도입이다. 일정 속도 이상의 바람조건에서는 실속을 일으켜 파워를 조절하는 기존의 stall 방식이나 최근에 적용되고 있는 Active stall 방식이 있으나 기술의 발전추세는 자유자재로 pitch 각을 조절하는 가변 피치방식의 풍차라고 할 수 있다.

풍력 발전 시스템의 개발 방향은 크게 대형화와 가변속화로 볼 수 있다. 최근에는 풍력기술에 의한 단위 풍력기기의 평균 용량도 대형화를 거듭하고 있는 상황이다. 단위 풍력발전 설비의 용량이 1980년대 초 25[kW]에 비하여 현재는 750~1,300[kW/대](세계 평균 : 915kW/대)로 커졌고 최근에는 2,500[kW]급 풍력발전기가 상용화되기에 이르렀다. 2,500[kW]급의 단일 풍력발전 기기는 날개의 직경이 80(m), 타워의 높이 70~80(m) 정도에 이르는 거대 구조물의 규모를 가지고 있다.

일반적으로 풍력발전기 시스템에 사용되는 발전기 - 전력 변환기 조합의 구성을 발전기 종류와 여자 방식에 따라 구분해 보면 다음 그림 1과 같다. 현재 가장 널리 사용되고 있는 풍차용 발전기는 크게 유도기와 동기기로 구분할 수 있으며 어느 발전기를 사용하건간에 발전시스템의 효율을 높이고 안전성을 향상시킬 수 있는 가변속 운전방식으로 바뀌고 있다. 유도기를 사용한 풍력발전기 계통연계방식을 그림 1 상단에 동기기 방식을 그림 1 하단에 나타내었으며 농형유도기를 사

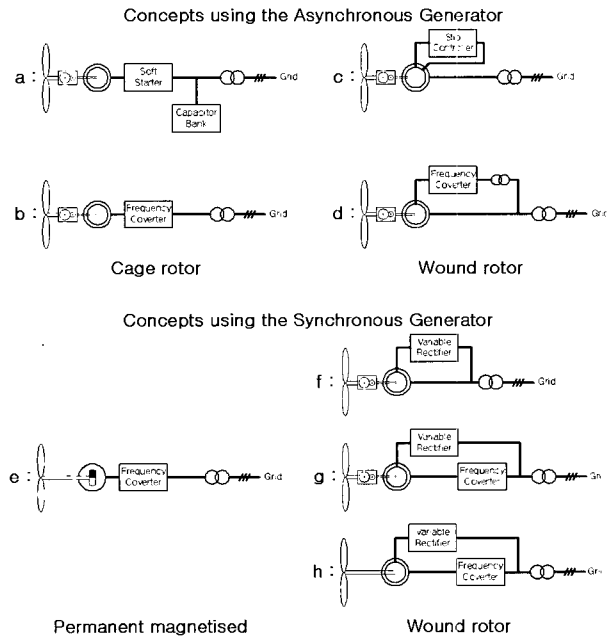


그림 1. 풍력 발전 시스템의 발전기-계통연계 구성도

용한 방식(구성 a, b)과 권선형 유도기를 사용한 방식(구성 c,d)로 나눌 수 있다.

a 방식: 농형유도기를 사용하며 Upwind 방식(타워를 기준으로 날개가 바람이 불어오는 쪽에 위치함), stall 방식, 3날개 구조의 시스템으로서 1980년대부터 90년대 중반까지 많은 덴마크식 터빈에 적용된 방식이다. 80년대 중반부터 역률 보상용 커패시터 뱅크와 보다 부드러운 계통투입을 위하여 소프트 스타터를 사용하기 시작 하였다.

b 방식: 이러한 구성에서는 커패시터 뱅크와 소프트 스타터를 full-size 전력변환 장치로 대체한 것으로서 농형유도기를 사용하면서 전 범위의 풍속에 대하여 발전이 가능한 특징이

있다.

c 방식: 이러한 구성은 1990년대 중반부터 Vestas가 사용한 OptiSlip 방식이다. 회전자 권선 외부에 추가로 연결된 저항 값을 스위치 PWM 조작에 의해 가변하게 되고 따라서 회전자 슬립이 10[%]정도 범위 내에서 변동 가능한 발전 방식이다. 이러한 방식을 회전자 내부에 장치하여 회전시키게 되면 외부 결선이 간단해지고 회전속도는 10[%] 범위 내에서 가변 가능한 유도 발전시스템이 구성될 수 있다. 국내에 도입되어 운전중인 Vestas 사의 풍력발전기들이 이와 같은 방식으로 구성되어 있다.

d 방식: 또 다른 권선형 유도발전시스템으로서 Doubly Fed Induction Generator(DFIG)를 사용하면서 회전자측에 주파수변환기(컨버터+인버터)를 이용하여 슬립에너지를 조절하는 방식이다. 이러한 방식을 사용하면 정격 출력의 20-30[%]정도의 주파수 변환기를 사용하여 전 범위 가변속 방식 (b)보다는 인버터 가격 면에서 저렴하고 운전가능한 회전 속도도 OptiSlip 방식 (c)보다 넓은 특징을 가지고 있다. 따라서 1[MW] 이상급 대용량 풍력발전기 기종의 약 60%가량이 이와 같은 방식을 채택하고 있는 실정이다.

e 방식: 본 방식은 기어박스를 사용하지 않고 다극형 영구 자석형 동기발전기를 사용하여 전체용량의 전력변환 장치를 통해 출력을 전달하는 방식이다. 이러한 방식은 가정용 또는 하이브리드형 소형 풍력발전시스템(1kW~20kW내외)에도 널리 채택되고 있으며 ABB사에서는 3.5[MW] 급 다극형 영구자석 발전기 시스템을 HVDC 기반 계통연계와 더불어 미래형 풍력발전시스템의 모델로서 제시한 바 있다.

f 방식: 권선형 동기발전기의 여자조절에 의해 고정자 측에 완벽한 동기 전압·주파수를 유지하는 것은 매우 힘든 일로서 이와 같은 구성방식은 별로 채택되고 있지 않다.

g 방식: 이러한 구성방식은 기어박스를 사용하여 정격용량의 전력변환기를 필요로 하는 동기식 발전시스템이다.

h 방식: 이 방식에서는 다극 권선형 동기 발전기를 사용하여 기어박스를 없애고 정격용량의 전력변환기를 사용하는 방식이다. 이와 같은 방식은 Enercon 과 Lagerwey사에서 제품화 되어 널리 적용되고 있으며 특히 낮은 시동풍속과 넓은 가변 속도 운전범위를 가질 수 있으므로 풍황조건이 낮은 지역에 유리할 수 있다.

이제까지 소개된 발전기와 전력변환기의 다양한 구성에서 컨버터와 인버터를 어떻게 구성할 것인지 즉, 어느 소자(다이오드, IGBT, GTO 등), 어느 토폴로지(Diode Rectifier, DC-DC, Boost-up Chopper, Chopper Switch for Variable Resistance, PWM inverter), 2 level or multi-level, 3 phase or 6 phase 등은 고정되어있지 않고 시스템 용량과 출력 특성 사양에 맞게 다양한 시도가 이루어지고 있으며 저가격, 고 신뢰성이 특히 중요한 조건으로 검토되어야 한다.

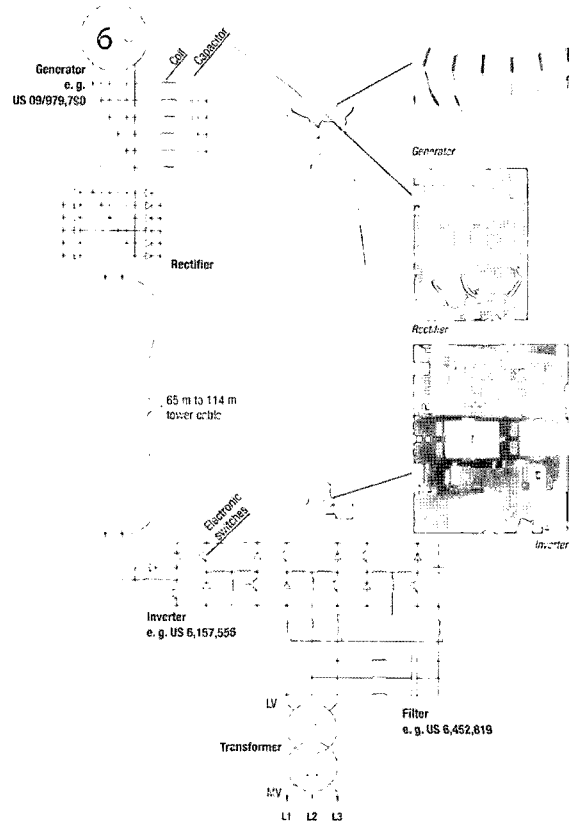


그림 2. 풍력발전에서 전력전자 기술의 사용 예 (Enercon E40 모델)

그림 2는 전가속형 기어리스 풍력발전기(600kW급, Enercon E40모델)에 사용된 권선형 동기 발전기와 AC-DC-AC 전력변환 주 회로 및 필터, 변압기 등의 회로 구성을 보여준다. 다양한 형태의 전력변환기술이 적용되고 있으며 시스템 최적화를 위한 연구개발 노력이 진행 중이고 기술 보호를 위한 특허 논쟁도 치열한 상황이다.

2001년 세계 풍력터빈 설치용량 상위 10개 회사의 대표 모델(최대 용량급)을 대상으로 발전기 종류와 전력변환 방식을 조사하여 그 결과를 표 3에 정리하였다.

4. 전력품질의 특성 측정과 평가

오늘날 풍력발전의 추세는 점점 대형화되고 상업 운전되고 있는 것이다. 풍력발전 시스템이 대형화되면서 부각되는 이슈가 발전 출력에 대한 전력품질과 계통에 대한 영향이다. 즉 용량이 큰 풍력발전은 하나의 분산형 전원으로서 동작되기 때문에 이에 대한 연구와 대비가 반드시 필요하다. 여태까지 우리나라에서의 풍력발전 사업은 주로 연구개발과 대국민 홍보를 위한 시범사업 수준 정도였다. 그러나 10 [MW] 용량의

표 3. 2001년 풍력발전 시스템 제작 상위 10개 업체 대표 모델의 특성

Manufacture	Wind Turbine	Conf. of Fig. 2	Power Control	Comments
NEG Micon	NM 2000/72	a	Active stall	Two Speed
	NM 1500C/64	a	Stall	Two Speed
Vestas	V80 - 2MW	d	Pitch and variable speed	Range : 905~1915 rpm
	V66 - 1.65MW	c	Pitch and OptiSlip	Range : 1500~1650 rpm
Gamesa	G52 - 850kW	d	Pitch and variable speed	Range : 900~1650 rpm
	G47 - 660kW	d	Pitch and variable speed	Range : 1200~1626 rpm
Enercon	E-66 - 1.8kW	h	Pitch and variable speed	Gearless. Range : 10~22 rpm
	E-58 - 1MW	h	Pitch and variable speed	Gearless. Range : 10~24 rpm
Enron Wind	1.5s - 1.5MW	d	Pitch and variable speed	Range : 989~1798 rpm
	900s - 900kW	d	Pitch and variable speed	Range : 1000~2000 rpm
Bonus	2MW	a	Active stall	Two Speed
	1.3MW	a	Active stall	Two Speed
Nordex	N80/2500kW	d	Pitch and variable speed	Range : 700~1303 rpm
	N60/1300kW	a	Stall	Two Speed
Mitsubishi	MWT-2000	-	Pitch and variable speed	공개되어 있지 않음
Repower	MD77 - 1500kW	d	Pitch and variable speed	Range : 1000~1800 rpm
Dewind	D4 - 600kW	d	Pitch and variable speed	Range : 680~1327 rpm
	D6 - 1.25MW	d	Pitch and variable speed	Range : 700~1350 rpm

제주도 행원 풍력발전단지의 성공적인 상업운전은 이러한 이슈에 대한 좋은 연구대상이 되고 있다. 더구나 2002년도에 제정된 대체에너지 전기사업법은 대체 에너지에서 발생된 전기는 정부에서 의무적으로 구매해야 한다는 사항 때문에 민간업자에 의한 대체에너지 발전사업이 크게 늘 것으로 예상되고 있다. 이중에서도 풍력은 일정기준 설치비에 비해서 출력용량을 가장 크게 할 수가 있다는 장점을 가지고 있기 때문에 더욱 큰 관심을 끌고 있으며 행원단지의 성공사례는 이에 대한 표준 모델이 되고 있는 실정이다. 더구나 제주도, 대관령, 전북 새만금 등에 대규모의 풍력발전단지가 조성될 예정이다. 이것은 계통상에서 하나의 분산형 전원으로 볼 수가 있다. 그러나 풍력발전은 바람의 에너지를 전기에너지로 변환시키는 시스템이기 때문에 바람의 세기에 따라 발전 및 정지가 반복되어 어느 분산형 전원보다 불안정한 출력을 발생시키는 발전설비이다. 이러한 이유 때문에 출력 용량이 큰 풍력발전단지의 운전시 주변 전력계통이 미치는 영향은 무시할 수 없을 정도로 크다. 뿐만 아니라 풍력발전 시스템이 설치되는 장소는 대부분 지리적 여건상 바람의 에너지를 얻기가 용이한 산간 고지대나 해안가 등에 위치하고 있어 계통연계시 전기품질의 관리나 계통안정도 등 계통운영상의 여러 가지 문제점을 야기할 수가 있다. 바람의 크기에 따라 출력이 변하

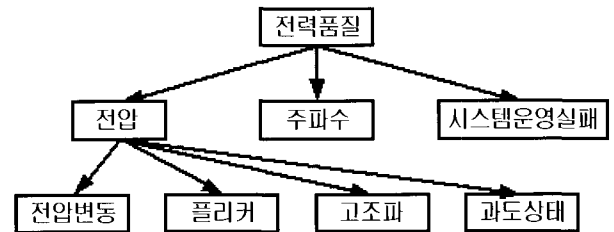


그림 3. 풍력발전의 전력품질 요소들

기 때문에 발전 출력에 대한 전력 품질은 그림 3과 같이 전압, 주파수, 시스템 운영 실패등에 의해 좌우될 수가 있다.

또한 정상 운전시는 정상상태 전압변동, 동적 전압변동, 전력전자 장비에 의한 고조파 왜곡 등에 의해 그리고 스위칭 운전시는 발전기의 계통연계시 전압강하와 플리커 문제, 진상용 콘덴서 연결시 전압과도 현상 등이 전력품질에 영향을 줄 수가 있는 요소들이다. 이러한 요소들은 계통연계시 계통에 악영향을 줄 수 있기 때문에 출력을 일정 기준 이상으로 하여 계통에 미치는 영향을 최소화하도록 하는 규정이 필요하다. 이러한 목적에 부합되는 규정이 아직 우리나라에는 없지만 국제적으로 널리 통용되는 것이 국제 전기기술위원회(IEC : International Electrotechnical Commission)에서 제정한

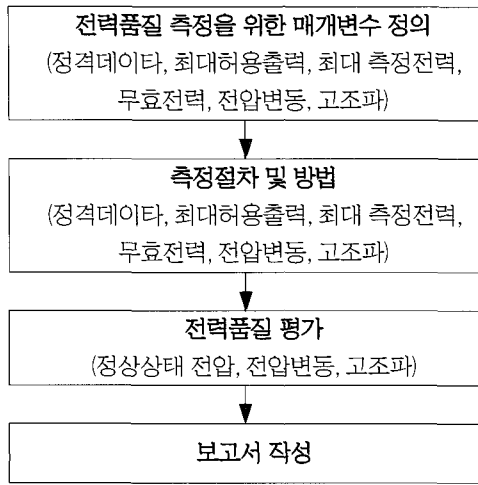


그림 4. IEC 61400-21의 기본 개념도

IEC 61400-21 이다. 이 규정의 목적은 풍력터빈의 전력 품질을 측정하고 평가하는데 일관성과 정확성을 보증할 수 있는 동일 표준의 방법론을 제시하는 것이다. IEC 61400-21의 내용은 크게 그림 4와 같이 구성되어 있다.

이를 근거로 하여 각 나라에서는 그 나라 실정에 맞게 규정을 제정하여 운용하고 있다. 특히 독일과 덴마크는 이미 제정되어 운용되고 있으며 일본도 조만간에 제정하여 운용하려고 하고 있다. 아직 우리나라에서는 이에 관련된 어떤 규정도 없지만 정부의 관련부서에서는 이에 관련된 국내 전문가 그룹을 구성하여 우리나라에 맞는 규정을 제정하려고 계획하고 있다.

5. 결 론

대체 에너지에 대한 전 세계 각국의 관심과 더불어 풍력발전 관련 기술의 발전은 풍력발전단가를 현저히 낮춰 풍력발전의 보급을 획기적으로 증대시켰다. 물론 우리나라에서도 제주도 행원단지의 성공적인 상업발전은 국내에서 풍력발전에 대한 이미지를 크게 바꿔 놓았다. 그러나 아직도 우리나라는 풍력발전에 대한 기술은 후진국이다. 지금부터 우리나라 실정에 가장 알맞은 풍력발전기를 선정하여 이에 관련된 제반 기술을 개발하고 보급하여 에너지자원 빈국인 우리나라의 전기 에너지 생산에 일조하고 또한 세계적으로 규제하려고 하는 나라별 이산화탄소 총 발생량 규제에 대해 능동적으로 대처할 수 있도록 해야 한다.

그리고 대체에너지 전기사업법 제정으로 인한 민간 발전이 크게 늘어날 것으로 예상되고 있다. 만약 이에 대한 법적 제반 규정이 없으므로 인하여 민간이 발전한 전력이 계통에 악 영향을 준다면 지금까지 노력해온 대체 에너지에 대한 기술개발과 보급이 큰 시련을 맞을 수도 있을 것이다. 따라서 이에 관

련된 법적 규정을 조속히 제정하여 민간에 의해서 발전된 출력에 의해서 발생될 수 있는 여러 가지의 문제점을 사전에 방지할 수 있도록 하는 것이 시급하며 이에 관련된 정부와 학계 그리고 산업계의 유기적인 협력도 절대적으로 필요하다.

참 고 문 헌

- [1] 정병창, 임종연, 송승호, 김영민, 노도환, 김동용, “중·대형급 풍력발전 시스템용 에너지 변환 방식에 대한연구”, 대한전기학회 전기기기 및 에너지변환시스템학회 춘계학술대회, pp. 459~462, 2001.
- [2] 송승호, “풍력발전 시스템의 현황 및 전력변환 기술동향”, 전력전자학회 전동력응용연구회/전력변환연구회 합동춘계 학술발표회, pp. 63~81, 2003.
- [3] L.H. Hansen 외 7인, “Conceptual survey of Generators and Power Electronics for wind Turbines”, RISO Technical Report, 2001.
- [4] 과학기술부, 풍력에너지기술, 국가기술지도 비전3, 2002.
- [5] Enercon, WIND BLATT, The enercon magazine, Issue 02/2003.
- [6] IEC 61400-21 Measurement and assessment of power quality characteristics of grid connected wind turbines.

《 저 자 소 개 》



김일환(金一煥)

1962년 3월 29일생. 1985년 중앙대 전기공학과 졸업. 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1991년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1995년~1996년 오하이오 주립대 Post-Doc. 1991년~현재 제주대학교 전기전자공학부 교수.

당 학회 국제이사.



송승호(宋丞鎬)

1968년 8월 27일생. 1991년 서울대 전기공학과 졸업. 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1999년 동 대학원 전기공학부 졸업(박사). 1992년~1995년 포스콘 기술연구소 연구원. 2000년~현재 전북대학교 전자정보공학부 조교수. 당 학회 학술위원.

당 학회 학술위원.