



# 태양광 발전 기술현황 및 계통연계 기술

김신섭 | 핵스파워시스템(주) 대표이사



## 1. 서론

우리의 일상생활은 에너지를 사용하는 일부터 시작하여, 모든 것에 에너지 없이는 생존이 어려울 정도로 에너지에 의존해야만 하는 생활이 되었다. 그러나 에너지의 주된 공급원은 이 지구상에서 유한한 석탄이나 석유 등의 화석연료로 되어 있다. 한편, 이 에너지 사용의 부산물로 발생하는 과대한 CO2의 배출과 기타의 폐기물은 현재의 인류뿐만 아니라, 지구와 그 미래에 대한 유해로운 산물이 되고 있다.

장기적으로 화석에너지의 고갈과 에너지 자원의 무기화가 예견되는 상황에서 에너지 자원이 전무한 우리나라는 태양광 발전을 비롯한 신재생에너지의 보급이 추진되고 있다. 태양광 발전을 비롯한 신재생에너지 발전시스템도 수입에 의존하지 않기 위하여 국산화 개발이 절실히 요구되며 보급이 추진되는 시점에서는 막대한 수입대체 효과가 발생하게 될 것이며 나아가 수출을 통해 에너지 선진국으로 도약할 수 있을 것이다.

태양에너지는 태고로부터 현재까지 인류가 살고 있는 지구에 적당한 에너지를 끊임없이 공급하고 있

다. 태양에너지를 극히 사용하기 쉬운 전기에너지로 직접 변환해주는 태양광발전은 20세기의 경제 중심 사회로부터 21세기에는 환경중심 사회로 변혁을 가능케 해 주는 중요한 아이템의 하나가 되고 있다.

태양광 발전은 햇빛을 받으면 직류전력을 발생하는 태양전지를 이용하는 새로운 발전방식이다. 태양전지는 빛을 전기에너지로 변환하는 소자인 반도체를 사용하고 일찍부터 인공위성이나 등대 등의 전원으로 사용되었으며, 그 편리함과 가격인하로 현재는 탁상계산기, 손목시계 등 민생용품으로부터 주택용 및 공공건물용에 이르러 발전 사업용으로도 이용할 수 있게 되었다.

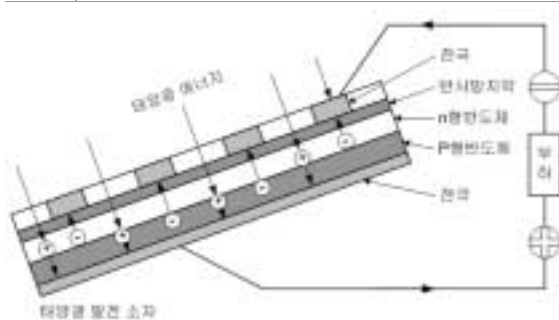
## 2. 본론

### 가. 태양광 발전의 개요

#### 1) 태양전지의 원리 종류

태양전지는 그림 1과 같은 원리로 전기를 발생시키는 반도체 소자로서, 전기 전도를 지배하는 다수 캐리어가 전자인 n형 반도체와 다수 캐리어가 양공

그림 1 태양전지의 원리



(鹵鹵)인 p형 반도체를 접합(P-N접합)하여 만들어진다.

대표적인 결정질 실리콘 태양전지는 실리콘에 붕소를 첨가한 p형 실리콘 반도체를 기판으로, 그 표면에 인(堯)을 확산시켜 n형 실리콘 반도체의 층(n층)을 만든다. 이 P-N 접합부에는 전계(電浬)가 형성되어, 태양광을 비추면 광양자가 원자에 충돌하여 전자와 양공의 쌍이 발생한다. 이 전자와 양공이 내부 전계 및 확산에 의해 서로 역방향으로 흘러 전류가 발생한다. 이때 반도체 내에 만들어지는 p영역과 n영역을 연결하여 외부회로를 만들면 p영역에서 n영역을 향하여 흐르는 전류를 얻을 수 있다.

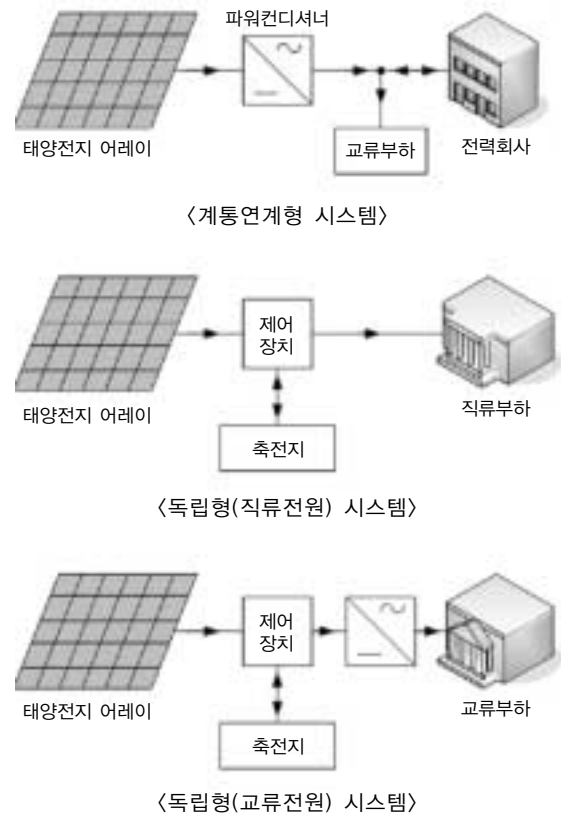
태양전지는 실리콘 반도체와 화합물 반도체로 크게 나누어진다. 실리콘 반도체는 다시 결정질 반도체와 비정질(誦晶質: amorphous) 반도체로 나누어진다. 그리고 결정질 반도체는 단(鹵)결정 반도체와 다(鹵)결정 반도체로 구분된다. 단결정 실리콘 반도체는 처음에 인공위성용으로 사용되었는데, 그 후 대량생산이 가능한 값 싼 다결정 태양전지가 개발되었다. 실리콘 반도체는 결정체나 잉곳(Ingot)에서 태양전지용의 두께 수백 마이크로미터의 박편(捰片)을 잘라 내기 때문에 실리콘 소비량이 많아진다. 그래서 두께 수 마이크로미터 정도의 비정질, 또는 박막 다결정 태양전지 등 박막 태양전지가 연구개발 되고 있다. 실

리콘 반도체의 변환효율은 20% 정도가 한계이기 때문에 더욱 높은 변환효율을 얻기 위해 화합물 반도체가 개발 되고 있다. 화합물 반도체로서는 II-VI족(CIS, CdTe), III-V족(GaAs, InP) 등이 있다.

## 2) 태양광발전 시스템

태양광발전 시스템은 태양전지 위주로 발전하는 전원 시스템이다. 태양광발전은 태양전지 어레이(array)에서 발생하는 전력이 파워컨디셔너(power conditioner 혹은 PCS)를 거쳐 전력부하에 공급된다. 파워컨디셔너는 태양전지의 출력을 제어하여 부하에 적합한 품질로 변환하는 기능을 가진다. 시스템은 구성에 따라 그림 2와 같이 계통연계형 시스템

그림 2 태양광발전 시스템의 종류





과 독립형 시스템으로 분류된다.

독립형 태양광발전 시스템은 축전지에 전력을 저장하였다가 계통전원과 독립된 부하에 전력을 공급하고, 계통연계형 태양광발전 시스템은 상용전원계통에 연계하여 부하에 전력을 공급하고 잉여 전력을 계통에 공급한다. 독립형 태양광발전시스템은 축전지의 가격 부담 등으로 인하여 도서나 벽지에서 주로 사용되고 있으며, 태양전지에서 발생한 전력을 부하 혹은 계통에 전량을 공급할 수 있고, 하절기의 피크부하 분담을 분산전원의 형태로 계통연계형이 활발히 보급되고 있다.

계통연계형 태양광 발전 시스템은 태양전지를 전원으로 직류전력을 발전하여 직·교류 전력변환장치를 이용하여 상용 전력계통과 병렬 접속하기 때문에 배전선의 상태변화에 대한 추종성이 양호함과 동시에 계통의 주파수나 전압변화에 대한 운용능력, 계통사고 시에 적절히 대응하는 기능 및 자체적으로 발생하는 고조파로 인한 통신유도 장애가 발생하지 않도록 하는 능력을 보유하여야 한다. 또한, 계통연계형 태양광 발전시스템이 배전선과의 연계운전 시에 계통의 정전 또는 사고 발생시 태양광시스템의 발전출력의 역충전에 의하여 일부 계통에 부분적인 단독운전을 방지할 수 있는 보호검출 회로가 필요하다.

## 나. 국내·외 태양광발전 동향

### 1) 외국의 태양광발전 동향

미국, 일본, 유럽 등 주요 선진국의 태양광발전 기술개발도 국내의 경우와 마찬가지로 범국가적으로 정부 주도로 이루어지고 있다.

미국은 1972년부터 지상용 태양광 발전시스템의 실용화를 위하여 5년 주기로 National Photovoltaic Program을 수립하고, 매년 기술개발

목표와 가격목표를 설정하여 추진하고 있다. 이러한 계획들 중에는 미국 에너지성(Department of Energy: DOE)의 주도하에 진행되고 있는 National Renewable Energy Laboratory: NREL 계획은 전 태양 에너지연구소인 SERI 와 Sandia National Laboratory:SNL이 중추적 역할을 담당하고 있다. 미국의 에너지성(Department of Energy)과 전력연구소(EPRI) 및 전력회사들의 협력 하에 태양광발전의 상업화에 필요한 실증시험과 주변장치의 가격절감을 위한 시스템 기술개발 연구로는 Photovoltaic for Utility-Scale Applications : PVUSA program이 있고 이러한 PVUSA program에 의해 개발된 제조기술을 상업화하기 위하여 관련 업체들로 구성된 Photovoltaic Utility Group : UPVG 가 주관하는 Technology Experience to Accelerate Markets in Utility Photovoltaics TEAM-UP program 그리고 대학과 태양광 발전 제조업체, 주정부 에너지관리공단 및 전력회사들이 참여하는 PV4U (Photovoltaics for Utility) program 등이 추진되고 있다. 현재 미국 전역의 12개 전력회사들이 태양광 발전시스템을 설치하여 운영 중에 있으며, 시범사업으로 대규모 변전소의 전원지원과 주거용 및 산업용으로 건물에 설치하여 전력품질 시험 등을 실시하고 있다.

일본은 1974년 국가주도의 태양광발전기술을 개발하기 위한 Sunshine Project를 만들어 진행하였으며, 1980년에는 신에너지 산업기술 종합개발기구(New Energy and Industrial Technology Development Organization : NEDO)를 설립하고 아울러 대체에너지 개발촉진법을 제정하여, 전기요금에 전원개발 촉진세를 부가할 수 있는 특별회계법을 시행함에 따라 본격적인 태양광발전에 대한 기술개발과 지속적인 지원 재정지원 정책이 가능하게 되

었다. 이러한 정부주도형의 추진체계에 의해 결과적으로 가장 효율적인 목표달성을 이룩할 수가 있었으며, 특히 첨단 반도체 기술을 기반으로 하여 정부의 민간업체에 대한 강력한 상품화정책 유도는 결정질 실리콘과 비정질 실리콘 태양전지의 기술수준을 세계에서 가장 앞서나가게 하였다. 이와 함께 1987년 관련기업과 연구기관 등으로 태양광발전 협의회(Japan Photovoltaic Energy Association)를 구성하여 기술과 시장정보를 상호 교환할 수 있는 협력체계를 구축하였으며, 1990년에는 24개 회사와 2개 단체를 구성원으로 하는 태양광 발전기술 연구조합(Photovoltaic Power Generation Technology Research Association :PVTEC)이 결성됨으로써 정부기관과 기술개발에 참여하는 기업과 연구소의 상호 협력뿐만 아니라, 대민 홍보와 연구개발의 중심기관으로서의 기능을 수행하고 있다. 특히 1993년에는 경제성장, 에너지, 환경보전에 대한 균형 있는 대책과 종합적인 기술개발을 위하여 Sunshine Project를 Moonlight Project와 지구환경 기술개발 프로그램을 하나로 뭉쳐 일체화한 New Sunshine Program(에너지 환경영역 종합기술개발 추진계획)을 수립하여 이에 대한 연구를 적극적으로 수행하고 있다.

한편, 계통연계 태양광 발전시스템의 보급 동향을 살펴보면 정부주도로 활발한 보급정책을 추진하고 있는 일본의 경우 다수의 상용 계통연계 실적이 있으며, 1994년 3월 역 조류 있는 경우의 저압배전선 계통연계를 포함한 분산형 전원 계통연계 가이드라인 수립을 완료하였다. 또한 최근의 신 에너지발전 필드 테스트사업은 태양광발전, 연료전지발전 및 풍력발전을 시험적으로 설치하여 장기운전을 통하여 각종 데이터를 수집·분석하는 것으로, 국가에서 보조(태양광의 경우 설치비의 1/2보조, 대상은 학교 및

공공건물)를 하며 NEDO와 설치자가 공동연구로 진행하고 있다.

유럽공동체(EC)의 태양광발전 기술개발은 비록 소규모이지만 1975년 이후 꾸준히 계속되고 있다. 1989년부터 시작한 Non-Nuclear Energy Program인 Joint Opportunities for Unconventional or Long-term Energy Supply : JOULE 계획을 수립하여 태양광 발전기술의 연구개발을 추진하였다. 이 계획은 3년간으로 이 계획의 2000년까지의 모듈 가격 목표는 1유로/Wp이며, 이러한 목표달성을 위하여 1994년까지의 JOULE II 계획은 상업화를 목적으로 다결정 실리콘 태양전지 제조기술 개선과 태양광 발전시스템에 대한 연구에 중점을 두고 있었다. 또한 저가의 박막 태양전지를 개발하기 위한 EUROCIS 컨소시엄을 형성하여 독일을 중심으로 CuInSe<sub>2</sub> 태양전지를 집중 연구함으로써 괄목할만한 연구 성과를 얻고 있다. 이와는 별도로 유럽 각국에서는 자체적인 장기 개발계획에 의해 태양광발전 기술개발을 추진하고 있다. 독일의 경우 소규모 태양광발전 시스템의 실증 및 개인주택용으로 실용화 및 보급을 위한 20,000 Roofs Project가 추진되고 있고, 이탈리아의 경우 100kW급 태양광 발전시스템의 표준화 및 보급을 위한 PLUG Project, 스위스 및 프랑스에서는 MW House Project와 PV 20 Project가 수행되고 있다. 독일의 경우 주택용 계통연계형 시스템 설치 시 초기 설치비의 70%까지 보조하여 주며, 이태리의 경우는 30~80%까지 시스템 설치비용을 보조하고 있다.

## 2) 국내의 태양광발전 동향

국내 태양광 발전기술은 1970년대 초부터 대학과 연구소를 중심으로 연구되어 왔으나 두 차례의 석유파동을 거치면서 신·재생에너지에 대한 인식이 고



표 1 | 외국의 태양광발전 보급 확대 프로그램

	미 국	일 본	독 일	이탈리아
사 업 명	Million Solar Roofs Program	주택용태양광 발전 도입기반 정비사업	100,000 Roofs Program	10,000Roof-Top PV Program
기 간	1999~2010	1994~2010	2000~2004(5년)	1999~2003(5년)
보급목표	3,025MW(100만호)	5,000MW	300MW	(10만호)50MW

표 2 | 국내 태양광발전의 개발 목표

목표항목	목표연도		
	2004	2006(1만호)	2012(10만호)
• 결정질 실리콘 및 박막형 태양전지 제조			
- PV모듈(\$/Wp)	5.4	3.3	1.9
- PV셀(\$/Wp)	3.0	2.0	1.7
• 인버터, 계통연계보호장치			
- 인버터(\$/W)	1.3	0.8	0.6
• 시스템 최적설계			
- 시스템단가(백만원/kW)	8	6	5
- 3kW급단가(백만원/3kW)	24	18	15
• 발전단가(원/kWh)	410	310	270

조됨에 따라서 정부차원의 기술개발 계획이 가시화 되기 시작하였다. 1987년 12월 대체에너지개발 촉진법이 제정되고 이에 따라 1988년 6월 동력자원부(현 산업자원부) 주관 하에 대체에너지기술개발 기본계획이 수립되었으며, 개발의 필요성과 중요성을 감안하여 1989년 7월 태양광발전 범국가적 연구사업 세부 추진계획과 장기 개발계획이 수립되었다. 또한 1993년부터 과학기술의 선진화를 위한 『G7 프로젝트』의 신에너지 분야에 태양광 발전기술이 포함됨으로써 기술개발과 보급촉진을 보다 강화할 수 있는 기틀이 마련되었다.

그러나, 태양광 발전기술의 최종목표는 상용전원

과 경쟁이 가능한 발전단가 수준의 제품을 개발하고, 동시에 신뢰성이 높고 효율적인 이용기술을 개발하여 태양광 발전기술을 실용화하는 것으로, 기술 수준과 예산 및 연구인력 등의 개발여건을 고려한 단계적 추진방법을 취하고 있다. 정부는 2002년 태양광 발전 보급·활성화 전략으로 “Solar Land 2010 Program”을 발표하였으며, 표 3은 태양광 발전의 보급 활성화를 위한 태양전지 및 BOS의 개발 목표를 향한 기술 개발 계획을 보여 주고 있다.

(1) 소재분야

소재분야에 있어 태양광 발전시장은 최근에 독일

지역의 시장이 급속하게 성장함으로 인해 원자재인 Poly Silicon의 수급불균형이 발생하여 가격이 상당히 상승한 상태이다. 이러한 현상은 2010년까지 지속적으로 공급부족상태가 유지될 것이고, 특히 2007년까지는 심각한 상태일 것으로 전망된다. 한편, 국내에서는 Poly Silicon 생산이 전무하여 전량 수입에 의존하고 있고, 해외의 대규모 업체가 물량을 선점하여 국내 수급에 막대한 차질이 발생하고 있다.

한국화학연구원에서 1990년대에 요소기술을 연구한 경험이 있기도 하지만, 현재에는 연구개발부에 있어서는 상당히 미흡하며, 대규모의 연구개발 및 생산설비투자가 필요한 분야이다. 향후, 잉곳 및 웨이퍼 생산업체와 태양전지 제조업체가 증가 할 경우, 국내의 생산 및 원자재 가격상승에 인한 하류분야의 생산원가 경쟁력에 문제가 발생할 것으로 예상된다.

## (2) 잉곳 및 웨이퍼 분야

잉곳(Ingot) 및 웨이퍼(wafer) 분야에 있어 국내에서는 (주)렉사에서 단결정 잉곳을 소규모 생산중이나 대부분을 수입에 의존하고 있으며 해외의 선도 태양전지 업체들이 경쟁적으로 3~4년 정도의 장기 선매수를 통하여 물량을 확보해 가고 있는 상황으로 국내 중소규모 업체의 원자재난이 시급한 문제로 대두되고 있다. 독일 및 일본의 잉곳 생산업체를 중심으로 국제적 수급 문제점을 해결하기 위해 생산라인 증설계획 중에 있으나 실리콘 원자재 난으로 인한 단가가 상승 중에 있다. 즉, 잉곳 웨이퍼 분야 산업은 최근 원소재인 Poly Silicon의 부족이 생산능력 증대와 신규투자에 장애요인이 되고 있다. 한편 국내에서는 태양전지용 Ingot 성장 양산기술 개발 및 폐 실리콘원료 재활용 기술개발을 통한 원료의 30%

를 재활용하여 제조원가를 낮추는 기술개발과 기판 크기 150×150mm 기준으로 두께 220 $\mu$  m이하를 목표로 하는 과제를 LG실트론(주)에서 수행 중에 있으며, 다결정 잉곳 양산기술 개발은 2005년도 하반기과제로 추진 중이다. 그리고, 기판의 크기를 대형화하며 두께를 얇게 하여 효율을 극대화 하는 기술을 중점적으로 연구 중에 있으며, 잉곳생성의 속도를 빠르게 하는 등 제조기술과 기판제조 시에 발생하는 원재료의 Loss를 최소화 하는 기술 등이 개발 중에 있다.

## (3) 태양전지 분야

태양전지는 2004년말 세계 시장은 1,250MW를 생산하였으며, 시장규모의 확대로 업체마다 증설계획을 발표하고 있다. 향후 지속적으로 25%이상의 시장 확대가 예측되며, 국내에서도 업체별 생산량 증설 및 신규투자에 대한 관심이 확대되고 있다.

현재 선진국의 수준은 후면전극형 단결정 Si 태양전지의 경우 변환효율 20%이며, 다결정 Si 태양전지의 경우 18.3% (12.5×12.5cm<sup>2</sup>)에 이르고 있다. 한편 국내에서는 변환효율이 17% (12.5×12.5cm<sup>2</sup>)의 후면전극형 다결정 Si 태양전지 개발과 변환효율이 18% (15×15cm<sup>2</sup>) 단결정 Si 태양전지 개발의 기술개발 과제를 삼성SDI가 수행 중에 있으며 결정질 Si 태양전지 저가격화를 위해 \$1/Wp의 제조단가를 목표로 기술개발 중이다.

국내 보급현황으로는 (주)포톤반도체에너지에서 연간 5MW 생산 중이며 2005년 말까지 40MW로 양산 준비 중에 있으며, 국내 신규업체의 투자와 기존업체의 증설을 통해 2008년까지는 연간 100MW 규모 이상의 생산능력을 보유할 것으로 보여 국내 내수 공급능력은 충분할 것으로 보인다. 그러나, 태양전지는 사업화에 있어서 대규모의 설비투자가 필



요하며 최종 양산까지 약 2년의 소요시간이 필요하고, 가격이 금리의 변화에 따른 변동하며, 국가의 정책에 따라 시장이 조정되는 문제점을 안고 있어으며 장기적으로 잉곳 및 웨이퍼 소재의 확보가 필요조건이 되고 있다.

#### (4) 모듈 분야

모듈분야는 전세계적으로 태양전지의 가격상승과 공급부족으로 인해 안정적 생산에 어려움이 있는 상태이다. 현대중공업(주), (주)경동솔라, 심포니에너지(주), 유니슨(주) 등의 신규 투자업체 및 (주)에스에너지, LS산전(주) 등의 기존업체에서 설비의 증설이 활발하게 이루어 지고 있다. 그리고, 건물일체형 BIPV 모듈 개발 및 건물적용에 표준화 및 설계기준 설정이 시장 확대에 주요 Issue가 되고 있으며, 생산 설비에 증설에 따른 생산 전문인력의 부족현상이 심화되고 있는 실정이다.

(주)경동솔라, 심포니에너지(주), 쉐라테크(주), (주)에스에너지, LS산전(주), 현대중공업(주)등 6개의 모듈제조업체를 중심으로 약 90MW의 연간 생산 능력을 보유하고 있으므로 국내 공급기반은 충분하게 이루어져 있으나, 협소하고 부정기적인 국내시장으로 인하여 안정적인 고객확보 차원에서 수출시장 확보를 통한 수익창출에 중점을 두어야 하는 실정이며, 외국 선진기업과 같이 일괄생산 체제가 갖추어져 있지 않아서 가격경쟁력 약하다. 즉, 잉곳, 셀 및 모듈 전체를 생산할 수 있는 태양광 전문업체 필요한 실정이다.

#### (5) PCS 분야

국내에서는 최근, 헥스파워시스템(주)에서 3kW급 무변압기형 계통연계 PCS를 개발, 양산화하여 주택용 태양광사업에 공급중에 있으며, 제품 품질

향상을 위해 단독운전 검출기법, 직류유입방지기술 등 고급제어 기술의 실현하고 DSP 기반 제어기 개발이 활발하게 진행중에 있다. 그리고, 120kW급 대형급 단일용량 PCS 개발하고, 고압계통연계 기술 확보하여 시스템에 적용하여 상용발전에 적용하고 있다. 해외에서는 200kW급 이상의 대형급 단일용량 PCS 상품화하여 MW급 태양광발전소에 적용중에 있다.

현재 10kW의 무변압기형 개통연계 PCS의 상용화 제품개발을 위한 기술개발 사업을 현대중공업(주)에서 수행 중에 있다. 현재 PCS 분야의 기술 수준은 선진국 대비 95%이상으로 국내시장에서 선진국 제품과의 경쟁력을 확보하고 있으나, 국내시장이 협소하여 대부분 저용량 PCS에 중점을 두고 생산을 하고 있는 실정이다.

#### (6) 시스템 분야

태양광 발전 시스템 분야는 독일, 일본을 중심으로 태양광발전시스템의 보급이 활성화되어 2004년에 전 세계 1100MW의 신규 설비가 설치되었다. 국내에서는 2004년부터 주택보급사업이 본격적으로 추진되고 있다. 현재 서울마린에서 MW급 발전시스템을 실증 Site를 구축하여 계통연계기준 및 발전사업 모델을 제시하기 위하여 연구과제를 수행 중에 있다. 그리고, 주택용 시장을 중심으로 연간 3MW 이내의 국내 시장이 형성되어 있으며, 국내 기업 주도로 시스템 설계 및 설치가 수행되고 있다.

한편, 공공건물 의무화 제도 등의 건물 적용을 확대하기위하여 건축외형과 어울리는 설계문제가 보급 확대에 주요 사항되고 있으며, 설치 Site의 모니터링 기술의 개발과 건축적용 설계기술의 개발을 병행하여 일정규모(연간 50MW이상)의 안정적 보급시장 확보하여야 한다.

## 나. 태양광발전 시스템 계통연계 기술

### (1) 최대출력추종 제어기술

태양전지의 출력은 일사량, 표면온도 등의 환경에 따라 동작전압과 전류의 상태를 나타내는 I-V특성이 비선형적으로 변화하는 비선형특성을 가지며, 특성 곡선상의 전압-전류의 동작점이 결정되면 이에 따라 출력량이 결정된다. 계통연계형 전력제어기는 태양 전지에서 발전된 전력을 최대한으로 이용할 수 있도록 하는 최대출력점 추종제어(MPPT)를 수행하여야 한다. 최대출력점 추종제어(MPPT)의 방법으로는 전력비교법(Perturb and Observe Method; P&O Method)과 도체증분법(Incremental Conductance Method; IncCond Method)이 주로 사용되며 현재, 학문적으로 퍼지(Fuzzy)제어, 적응(Adaptive) 제어 등의 비선형제어기법들의 적용이 시도되고 있다.

P&O 기법은 알고리즘이 간단하여 디지털 방식으

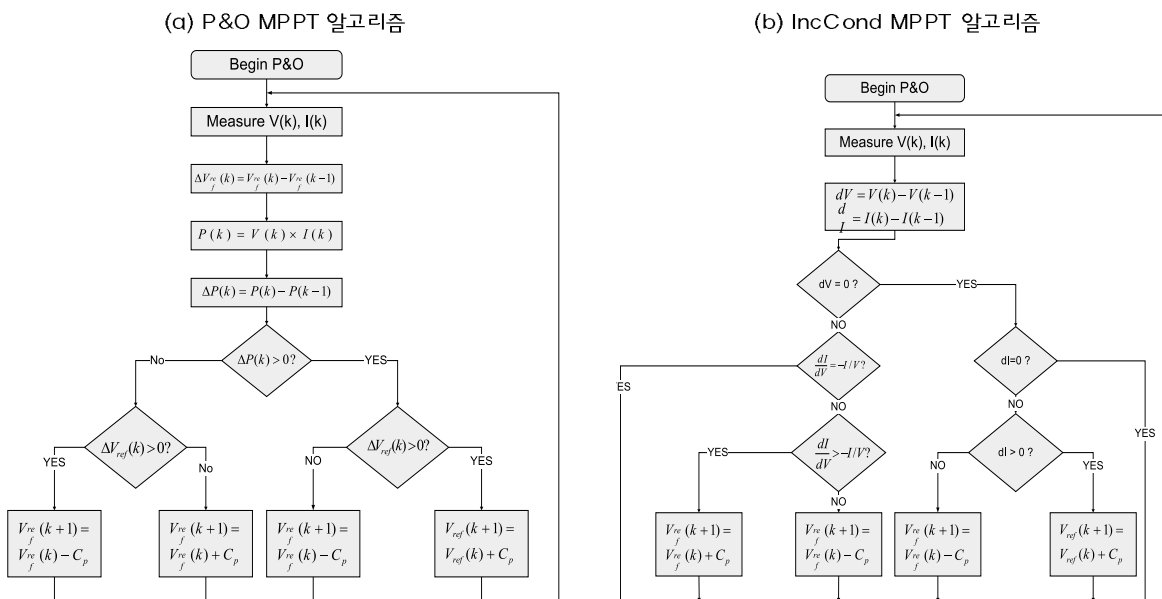
로 구현하기가 용이하며 태양전지의 파라미터에 영향을 받지 않으므로 태양전지의 노후로 인한 특성변화에 무관하게 동작하는 장점이 있다. 하지만, 수렴 속도가 느리므로 급격한 일사량의 변화에 대한 추종 능력이 떨어지며 최대출력점 부근에서 미소 진동하므로 효율이 저하되는 단점이 있다.

IncCond 기법은 태양전지 컨덕턴스 및 컨덕턴스의 변화율(미분)을 이용하는 방식으로 P&O 기법에 비해 추종능력을 개선하는 장점이 있으나 디지털방식으로 구성하는 경우 샘플링 구간의 문제, A/D 변환 오차, 노이즈에 의한 측정오차 등으로 인하여 급격한 일사량의 변화에 대하여 최대출력점 추종에 실패할 수도 있는 단점이 있다.

### (2) 계통연계 보호기술

태양광발전설비는 기존의 전력계통에 연계되어 운전될 경우, 원만하고 효율적인 계통연계실현을 목

그림 3 최대출력추종 (MPPT) 제어 알고리즘







표로 하고 있다.

- 기존의 전력품질(전압, 주파수, 고조파, 역률 등)과 공급신뢰도(정전시간 및 정전횟수)의 유지 및 향상
- 공중 및 작업자의 안전 확보와 전력공급설비 또는 타전기수용가의 설비보전
- 불필요한 기동정지를 하지 않고 전력계통과 협조 운전할 수 있는 안정성확보

를 달성할 필요가 있고, 또한 자원의 효율적 이용, 수용가의 공급의 안정성확보면 등에서 유리한 태양광발전설비의 계통연계시의 기술적인 문제는 다음과 같다.

- 전력품질(전압변동, 주파수, 고조파, 상불평형, 역률)
- 보호협조(계통측 및 시스템의 설비보호)
- 안전성(작업원 및 운전원의 인사사고)
- 보안(연락체제)
- 안정성(고품질/고신뢰의 운전안정성, 운전제어, 협조제어, 유/무효전력 제어)
- 계통운용관리(협조운전, 도입용량관리)

### ① 전압 운전 범위

계통연계형 태양광 발전시스템에서 인버터는 전압을 제어하지 않고 계통 및 부하로 전류를 주입한

다. 따라서 계통연계형 태양광 발전시스템의 전압 운전범위는 계통의 배전시스템이 허용범위 내에서 운전되어야 한다.

여기서 주의하여야 할 점은 전압의 측정지점인데 이는 PCC(Point of Common Coupling)전압으로 설정한다. PCC전압은 계통과 태양광발전 시스템의 연결지점을 의미한다. 인버터 시스템은 PCC에서의 RMS 값을 항상 감시하고 있어야 하며, 이상전압이 검출될 경우 'Maximum trip times'내에 응답이 이루어져야 한다. 여기서 'Maximum trip times'는 계통에 이상상황이 발생하고 나서 인버터가 계통으로의 전력유입을 차단하는 때까지의 시간을 의미한다.

표 3에서 적정한 응답지연 시간을 도입한 이유는 계측오류나 잠음 등에 의한 빈번한 시스템 트립 현상을 피하기 위해서이다. 따라서 인버터 시스템이 계통과 연결되는 지점과 가까이 설치되어 인버터 출력단과 계통연결지점(PCC)과의 전압강하가 충분히 작다면 인버터 출력단 전압을 제어에 이용할 수 있다. 전압 흔들림에 대한 규제는 기존의 전력설비의 고조파를 규제하는 규격들에서 찾아볼 수 있다. 대표적인 규격으로는 IEEE519 등이 있다.

### ② 주파수

계통연계형 태양광 발전시스템에서 주파수는 계

표 3 | 전압 운전범위 (IEEE 929-2000 참조)

전압(PCC)	백분율(%)	최대 차단시간(Max Trip times)
$V < 110.0$	$V < 50\%$	6cycles
$110.0 \leq V < 193.6$	$50\% \leq V < 88\%$	120cycles
$193.6 \leq V \leq 242.0$	$88\% \leq V \leq 110\%$	정상운전
$242.0 < V < 301.4$	$132\% < V < 137\%$	120cycles
$301.4 \leq V$	$137\% \leq V$	2cycles

통이 제어하고 있으며 인버터는 계통의 전압에 동기하여 동작하도록 설계하여야 한다. 따라서 인버터는 독립적으로 주파수를 발생시켜 공급하지 않으므로 주파수 이상에 대한 보호규격으로 사용된다. 계통에 대한 주파수 운전범위는 IEEE929의 경우 59.3~60.5Hz로 제한하고 있다. 일반적으로 주파수는 독립운전 검출 요소로 사용되므로 항상 감시하여 제어에 이용되고, 제시된 계통의 주파수 운전범위를 벗어나는 경우 IEEE 929는 6사이클 이내에 계통으로의 전력유입을 차단하도록 규제하고 있다.

### ③ 고조파

고조파에 대한 규제범위는 부하 혹은 전원에서 받아들일 수 있는 정도로 정해진다. 전압 혹은 전류고조파는 전동기나 발전기에는 고조파의 주파수의 철손과 동손을 회전기계에 유발하며 출력토크에 맥동을 초래한다.

변압기에 고조파가 인가될 경우 가청 노이즈가 증가하게 되며 전류고조파는 동손을 유발하며 전압고조파는 철손을 유발한다. 따라서 전체적으로 변압기에 인가된 고조파는 발열현상을 나타나게 하며 이러한 고조파는 정격의 5%로 제한한다. 또한 전력케이블에 고조파가 인가될 경우 표피효과를 발생시킨다. 그 외에도 전력측정부분이나 전회선 잡음 및 콘덴서 및 전자 장비들에 악영향을 미치게 된다. 일반적으로 전력시스템에서 고조파에 대한 규격을 IEEE519

표 4 | IEEE Std 519-1992의 각 고조파 제한범위

3rd 9th	< 4.0 %
11th 15th	< 2.0 %
17th 21st	< 1.5 %
23rd 33rd	< 0.6 %
Above the 33rd	< 0.3 %

의 규격을 따르는데 주택용 3kW급의 태양광 발전시스템의 고조파에 대한 제한 규격은 표 4와 같다

### ④ 역률

고조파와 마찬가지로 과거의 Line-Commutated 방식의 인버터에서는 역률이 문제가 될 수 있었으나 근래의 PWM 방식의 인버터에서는 역률을 거의 1에 가까운 단위역률로 제어할 수 있으므로 주요한 논의의 대상은 아니다.

계통연계형 태양광 발전시스템에서 전압은 계통 전압에 동기해서 발전하므로 부하의 전압에 위상을 맞추어 전류를 공급하게 되면 거의 단위역률에 가깝게 제어할 수 있다. 일반적으로 전력 공급 장치로서 역률은 0.85(진상 혹은 지상)이상으로 제어하도록 국제규정에서 제한하고 있다. 특수한 경우에 원하는 역률제어가 필요한 경우에는 전류의 위상을 조절하여 원하는 역률로 시스템을 제어할 수 있다.

### ⑤ 직류 성분

무변압기형 PCS의 경우에 있어, 계통으로 직류전류가 유입될 경우 계통 및 계통과 연결되어 부하설비에 손실을 초래하므로 반드시 제한되어야 한다. 일반적으로 국제규격에서는 정격의 0.5%이하로 규제하고 있다.

직류전압이 AC부하나 변압기 등에 인가될 경우 2차측은 DC성분에 대해 거의 단락상태에 이르게 되므로 이러한 직류전압성분이 발생할 경우에는 반드시 태양광 발전시스템의 동작을 차단시켜야만 한다. 직류전류가 계통으로 유입될 경우 계통의 배전용 변압기나 계통에 연결된 다른 부하의 변압기 시스템에 포화현상을 초래하게 된다. 소량의 직류전류는 변압기 등에 직류전류성분에 비례하는 양만큼 자속의 오프셋을 발생시키므로 변압기 등이 정격으로 동작할



경우 포화의 가능성을 증대시킨다.

일반적으로 10%정도의 직류전류가 발생하게 되면 많은 AC장비 및 변압기 시스템에 치명적인 문제를 야기할 수 있다. 대부분의 전력회사에서는 계통과 계통에 연결된 타부하의 안전을 위하여 가장 안전한 저주파 변압기 방법을 요구한다.

#### ⑥ 계통차단 및 재연결

상기의 계통의 이상현상이 발생하여 계통으로의 전력유입이 차단된 후 최소한 5분 이상 시간이 경과한 뒤 계통 전압 및 주파수 등의 상태를 관찰한 후 정상범위 이내에서 다시 연결할 수 있도록 IEEE 929는 제시하고 있다.

태양광 발전시스템의 발전이 중지되거나 계통으로의 전력유입이 차단된 경우에도 계통의 전압 및 전류 등의 상태를 관찰하여 재연결 및 시스템 재가동을 준비할 수 있다. 전력 케이블의 연결은 차단하더라도 전압 및 전류의 검출을 위한 검출부의 연결은 유지하여 제어시스템을 가동시키는 것이 시스템 운전효율을 높일 수 있다.

#### ⑦ 접지

미국의 경우 NEC 690-41에서 태양광 발전시스템의 태양광 전원시스템은 반드시 전기적으로 물리적인 접지를 설치하거나 이에 준하는 접지안전규격을 따르도록 규제하고 있다. 하지만 유럽에서는 태양광시스템은 접지시설을 일반적으로 규제하거나 설치하지 않는다. 접지에 관한 규격은 국제적으로 다소 다르게 나타난다. 접지를 할 경우에는 낙뢰와 같은 전기적 충격에 시스템 및 계통을 보호할 수 있다.

#### ⑧ 과도현상 보호

낙뢰와 같은 외부적인 요소나 개폐스위치의 온/오프

프 등에 의한 직류성분의 계통유입 등의 과도현상에 대한 보호조치가 인버터 시스템에 포함되어야 한다. 낙뢰와 같은 자연현상은 접지공사 등을 이용하여 보호할 수 있으며 온/오프의 과도현상은 소프트 스타팅(Soft Starting)기법을 이용하여 보호할 수 있다.

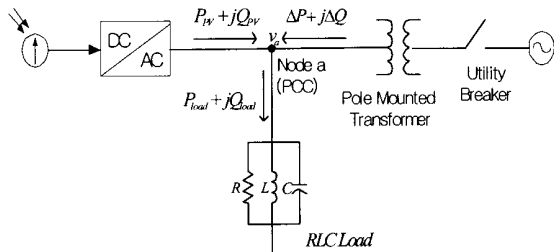
#### (3) 단독운전 방지기술

태양광발전 시스템의 단독운전(Islanding)은 안전과 시스템 보호의 차원에서 계통측과 시스템 양쪽 모두 중요한 문제이다. 단독운전은 계통의 일부가 계통의 전원으로부터 전력을 공급받지 못한 채 자체 발전시스템에서만 전력을 공급하고 있는 현상을 말한다. 이러한 단독운전의 문제점은 계통의 공사인부 혹은 사고지점 주위를 지나가는 사람들이 계통의 전원이 차단된 것으로 인식하고 접근할 경우 이들의 안전에 위협을 초래한다.

배전 계통측의 전원이 상실된 경우 태양광전원은 부하에 전력을 공급하는 단독운전(Islanding) 상태가 계속된다. 단독운전 상태가 지속되는 가운데 배전계통 측의 전원이 회복될 경우는 단락 및 탈조 등의 사고가 일어날 가능성이 있을 뿐만 아니라, 선로 작업을 위해 선로를 차단한 상태에서 작업원의 선로 작업시 전선접촉으로 감전사할 위험도 높다. 따라서 태양광전원 측에서 계통의 전원상실을 검출하여 자동적으로 계통으로부터 분리하는 방법 등의 새로운 보안확보방안이 검토되어야 한다.

계통연계형 태양광발전 시스템은 태양광발전 전력을 부하에 공급할 때, 부족전력은 상용 전력계통으로부터 공급받고, 잉여전력은 상용전력 계통에 공급하는 시스템이다. 그림 4는 태양광발전 시스템과 계통간의 전력의 흐름을 나타내는데, 태양광발전 시스템, 수용가 그리고 스위치(퓨즈, 재폐로 차단기 등)로 구성되어 있다. 여기서 태양광발전 시스템, 계통 그리

그림 4 태양광발전 시스템과 계통의 전력 흐름



고 수용가가 공통으로 연결된 마디 a를 PCC (point of common coupling : 공통연결점)라고 한다.

수용가를 RLC병렬로 나타내었는데, 그 이유는 일반적인 부하인 경우에는 단독운전이 발생되면 PCC의 전압이나 주파수가 변하기 때문에 수동 검출법으로 단독운전을 쉽게 검출할 수 있는 반면에, RLC병렬부하인 경우에는 계통이 분리되더라도 LC공진에 의해서 PCC의 전압이나 주파수가 유지될 수도 있어 검출이 어렵기 때문에 이러한 조건을 가정하였다.

PCC의 전압을  $V_a$ 라고 하면 부하측 유효전력  $P_{load}$ 와 무효전력  $Q_{load}$ 는 각각 다음의 식과 같다.

$$P_{load} = \frac{V_a^2}{R}, \quad Q_{load} = V_a^2 \left[ \frac{1}{\omega L} - \omega C \right]$$

또한, 계통측에서 유입되는 유효전력  $\Delta P$ , 무효전력  $\Delta Q$ 는 각각 다음의 식과 같다.

$$\Delta P = P_{load} - P_{PV}, \quad \Delta Q = Q_{load} - Q_{PV}$$

태양광발전 시스템의 출력전류는 PCC전압과 동상이 되도록 제어되기 때문에  $Q_{PV}$ 는 영이 되므로  $\Delta Q = Q_{load}$ 가 된다. 따라서  $\Delta Q = 0$ 이 될 조건은  $\omega_a = 1/\sqrt{LC} = \omega_o$  이다. 이 경우에는 계통이 분리되더라도 LC공진에 의해서 PCC에서의 주파수가 그대로 유지된다.

반면에  $\Delta Q > 0$ 이면  $\omega_a < \omega_o$  이므로 주파수가 증가한다. 한편  $\Delta P = 0$ 인 경우에는 계통이 분리되더라도 태양광발전 시스템이 부하에서 요구되는 유효전력을 공급하기 때문에 PCC의 전압 변동이 없는데  $\Delta P > 0$ 이면 태양광발전 시스템 공급전력이 부족하여 전압이 감소하고  $\Delta P < 0$ 이면 태양광발전 시스템 공급전력이 부하 전력보다 크기 때문에 PCC 전압이 증가한다. 따라서 PCC에서의 전압과 주파수를 검출하여 단독운전 상태를 판단할 수 있다.

전압이나 주파수가 특정 범위를 벗어나면 인버터의 보호기능에 의해 태양광발전 시스템의 전력 공급을 차단하게 되는데, 계통전압의 허용범위는 정격실효치의 88%~110% (193.6~242.0[V]), 계통주파수의 허용범위는 59.3~60.5[Hz]로 IEEE 규격 929-2000에서 규정하고 있다. 따라서 단독운전 상태가 발생되더라도 검출할 수 없는 범위 즉, 검출불가영역(NDZ, Non Detection Zone)가 존재하게 되는데, 이 영역에서도 단독운전 상태를 검출할 수 있는 다양한 방법들이 연구되고 있다.

단독운전 현상이 일어났을 때 태양광발전 시스템을 차단하는 방법에는 크게 두 가지로 나눌 수 있는데, 수동검출법과 능동검출법이 있다. 수동검출법은 단독운전 시 전압, 주파수를 검출하여 허용범위를 벗어나면 단독운전으로 판단하는 검출방법으로서, 단순히 계통의 변화를 이용하여 단독운전 여부를 판단하는 방법이다. 수동검출법에는 전압/주파수 검출법, 위상점프 검출법, 고조파 검출법등이 있다. 능동검출법은 태양광발전 시스템의 인버터 출력전류에 변동을 주어 단독운전시 능동적으로 대처하여 단독운전 여부를 판단하는 방법으로 주파수 바이어스 방법, 샌디아 주파수 변동 방법, 주파수 점프 방법, 샌디아 전압 변동 방법 등이 있다.



### 3. 결론

오늘날 환경문제가 중요하게 대두되면서 화석연료 대체를 위해서 청결한 에너지이면서 풍부한 자원을 가진 태양광 이용을 위해서 모든 주요 국가들이 연구, 기술개발 지원 및 법규제정 등에 많은 노력을 하고 있다. 지난 수년 간 태양광발전 공급량은 빠르게 성장해 왔으며 연평균 성장률도 30%를 상회하고 이에 따라 태양광 산업 시장규모도 크게 증가하고 있다. 이러한 추세로 볼 때 지금은 태양광 실증 연구 단계에서 태양광 이용사회로 변환하는 과정이 시작되었다. 현재 아직은 고가이지만 적극적인 기술개발과 보급 확대 정책을 통해 2010년경에는 세계시장이 크게 형성 될 것이고 21세기 주요한 산업으로 발전하게 될 것이다.

획기적인 태양광 이용시스템의 보급확대를 위해 정부는 지속적으로 연구 및 기술개발을 지원하고 태양광 이용이 에너지 자립과 청정에너지 사회로 가는 길이라는 정책을 세우고 지속적으로 견지해야 한다. 또한 민·관이 협동하여 태양광 에너지 기술개발과

태양광 에너지 사용에 동참해야 하며, 정부가 새로운 태양광 에너지 제품사용의 중요한 소비자가 먼저 되어야 한다.

국내에서 국산화된 단결정 실리콘 태양전지를 위주로 주택용과 공공건물용 및 산업용으로 활용하면서 계통연계 기술, 대량 보급 기반기술을 위한 토대를 마련함과 동시에 앞으로 실용화가 예상되는 박막 태양전지 및 미래 형태의 태양전지의 원천기술 확보를 위해 기술개발에 노력을 경주해야 한다. 또한 태양광 시스템 구성에 필요한 기술이나 태양광 보급 확대를 위한 인프라 구축을 위해서 계속적으로 외국의 기술정책 및 기술동향을 체계적으로 추적해야 할 필요도 있을 것이다.

본 고에서는 최근의 외국의 태양광발전 시장과 국가정책을 위주로 설명하고, 국내 태양광발전 시장 및 국가정책을 분야별로 세분화하여 설명하였다. 또한, 태양광발전 시스템의 기술적인 측면에서의 태양광발전과 최대출력추종제어의 개념을 설명하고 계통에 태양광발전 시스템을 연계할 때 고려해야 할 여러 가지 기술적인 사항들에 대하여 설명하였다.

#### [참고문헌]

- [1] "태양광 PCS 기술 세미나", 신재생에너지지센터, 2005.9.13
- [2] "태양광산업 활성화를 위한 Workshop", 태양광사업단, 2005.9.28
- [3] "분산형 전원 배전계통 연계 기술기준", 한국전력공사 배전처, 2005
- [4] 김지동, "태양광기술정책", 한국과학기술정보연구원 기술동향분석보고서, 2003.8
- [5] IEA/OECD, Trends in Photovoltaic Applications, 2000
- [6] New Energy and Industrial Technology Development Organization, Homepage, <http://www.nedo.go.jp>
- [7] 太陽光発電協會 홈페이지, <http://www.jpea.gr.jp>
- [8] 에너지관리공단 홈페이지, <http://www.kemco.or.kr>
- [9] "주택보급형 태양전지 양산기술 및 계통연계 3kW 태양광시스템 상용화기술개발 (최종보고서)" 산업자원부, 2005