

# 50kW급 계통연계형 태양광 발전시스템

임희천, 안교상  
한국전력공사 전력연구원

## 1. 서론

오늘날 전 세계적으로 지구환경 변화에 대응하기 위하여 온실가스의 배출기준을 규제하는 국제협약이 발효되었으며, 선진국들로 구성된 경제협력개발기구 회원국은 배출량을 2000년까지 1990년 수준으로 유지하기로 합의하였다. 한국은 1996년 이 경제협력개발기구에 가입하였고, 이에 따라 정부도 이 협약의 규제를 준수할 것을 선언하였으며 이에 대한 대책 마련에 나서야 할 것으로 여겨진다.

현재 국내의 발전설비 용량은 4697만kW(1999년 12월 말 기준)이고, 장기 전원개발 계획에 의하면 2015년에는 7906만kW로 증가될 것으로 예상된다. 이러한 발전설비 용량 증가분은 대부분 화석연료를 사용하는 기력발전 설비로서, 2015년에 이들이 차지하는 비율은 60% 정도가 될 것으로 예측되고 있다. 이러한 전력수요의 증가는 화석연료 확보뿐만 아니라 날로 증가되고 있는 지구환경 오염이라는 문제를 초래한다. 특히 온실효과의 원인으로 지적되고 있는 CO<sub>2</sub> 배출량은 총량적인 규제의 대상이 되고 있어, 완전하지는 않지만 이에 대한 대책으로 대체에너지원의 개발이 주목받고 있다.

대체에너지 발전방식 중 태양광 발전은 가장 실용화에 가까운 발전방식으로 공해요인이 없고 운전 및 유지보수가 용이하며, 발전규모 선택이 자유롭다는 장점을 가지고 있다. 특히 계통연계형 태양광 발전시스템은 최대전력을 발전하는 시간대가 하절기 Peak 전력 소비 시간대와 비슷하여 대규모 집중형뿐만 아니라 주택과 건물의 지붕이나 옥상 혹은 벽면 등에 설치함으로써 전력수급 불균형 해소에도 기여할 수 있고 국토의 효율적 사용이 가능한 전력공급원으로 그 활용이 가능하다.

이러한 특성으로 선진 각국에서는 지속적으로 태양전지의 제조부터 활용까지 다양하게 기술을 개발하고 있다. 또한 태양광발전 기술은 기존 에너지원에 비하여 상대적으로 경제성이 떨어진다는 약점을 해결하기 위하여 실용화 기술개발에 많은 힘을 기울이고 있다. 따라서 미국, 일본, 유럽 등과 같은 선진국에서는 태양전지 가격 저감 기술과 함께 실용화시기를 앞당기기 위한 계통연계형 인버터 등의 주변기기 개발에도 많은 노력을 기울이고 있다. 국내에서도 전력사업용으로 유인도서 전화사업의 일환으로 마라도, 하와도 및 호도 등에 독립형 태양광 발전시스템이 보급되어 운전중에 있으며, 기타 등대, 통신용, 도로 등에 3.1MW 이상이 보급되어 활용되고 있는 상황

이다.

한전 전력연구원에서는 전력사업의 주체로서 분산전원 형태로 도입이 유력시되는 태양광 발전시스템의 3상 계통연계형 인버터의 전력변환 특성, 연계운전특성, 그리고 발전시스템의 설계와 운용능력의 향상, 발전시스템 제어와 보호기법 등을 검토하여 계통연계에 따른 문제점을 분석 보완함으로써 계통연계형 태양광 발전시스템의 실용화를 위한 기반기술을 확립하고자, 중규모 50kW급 계통선 연계형 태양광 발전시스템 개발에 착수하여, 설계용량 53Wp 태양전지판 960매를 직·병렬 구성하여 설계 최대 출력 50kW와 50kVA급 직·교류 변환장치(변환 효율 94% 이상) 등으로 구성하여 전력연구원 내의 동력실 계통선에 연결하여 운전특성을 실험중이다.

본고에서는 1999년 4월 8일 설치하여 실험운전을 시작한 50kW급 3상 계통연계형 태양광 발전시스템에 대하여 기술하고자 한다.

## 2. 국내외 태양광 발전기술 개발동향

### 가. 국내기술개발 동향

국내 태양광 발전기술은 1970년대 초부터 대학과 연구소를 중심으로 연구되어 오다가 두 차례의 석유파동을 거치는 동안 대체에너지에 대한 인식이 고조되면서 정부 차원의 기술개발 계획이 가시화되기 시작하였다. 1987년 12월 대체에너지개발촉진법이 제정되고 이에 따라 1988년 6월 동력자원부(현 산업자원부) 주관하에 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.

국내 태양광 이용분야는 원격지 소규모전원, 서비스용, 낙도 통신용 시스템의 경우에는 이미 경제성을 확보한 단계로서 본격적인 보급단계에 있으며, 특히 향로 표시등, 무인등대, 도로 지시등, 고속도로 비상등, 무인 유량 측정기, 유·무인 중계소, 도서지역 통신용 등 여러 가지 다양한 응용분야에 이용되고 있다. 국내 태양광 설치 용량은 총 3.1MWp 정도로서 도서용 독립전원으로 현재 원격지 유인등대 등에 디젤발전기를 대신하여 태양광 발전시스템이 6~8kW급 규모로 20여 곳에 설치 운용되고 있으며, 아울러 도서 전화사업을 목적으로 하화도(60kWp), 마라도(30kWp), 호도(90kWp), 와도(30kW)에 독립형 태양광발전소가 시범사업으로 건설되어 운영중에 있다. 특히 도서 전화사업의 경우 국가 농어촌 전화사업과 연계되어 50호 미만 유인도서 100여 개를 대상으로 태양광발전을 중심으로 한 디젤, 풍력 등 복합 발전시스템이 건설될 것으로 예상하고 있다(표 1 참조).

반면에 계통연계형의 경우에는 향후 보급 잠재력은 가장 크지만, 관련 법규 미비 및 기존 전력원과의 경제성에서 뒤떨어지기 때문에 아직은 정부의 시범보급 사업에 국한되고 있다. 그러나 전반적으로 신발전분야에 대한 인식이 새로워짐에 따라서 여름철 Peak 시간대의 전력공급을 위한 주택용 또는 솔라 에어컨 등의 계통연계형 시스템에 관한 기술연구가 활발히 진행되고 있으며, 이에 따라 중·대규모의 분산형 전원 형태의 계통연계형 발전시스템의 개발 및 보급이 가까운 시일 내에 이루어질 것으로 전망된다.

현재 국내의 경우 이 분야에서는 LG산전, 삼성전자,

〈표 1〉 태양광 이용시설 설치 현황

구분	~1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	계
태양광 (kW)	1,248	225	160	50	92	388	410	619	3,192

쌍용중공업 등 일부기업들만이 정부 대체에너지 기술개발 사업에 참여하고 있어 아직 실용화 또는 상품화 단계의 계통연계 시스템 개발에는 이르지 못하고 있는 실정이다.

#### 나. 국외 기술개발동향

미국, 일본, 유럽 등 주요 선진국의 태양광발전 기술개발도 국내의 경우와 마찬가지로 범국가적인 차원에서 정부 주도하에 이루어지고 있다.

미국은 1972년부터 지상용 태양광 발전시스템의 실용화를 위하여 5년 주기로 National Photovoltaic Program을 수립하고, 매년 기술개발 목표와 가격목표를 설정하여 추진하고 있다. 이러한 계획들 중 미국 에너지성(Department of Energy: DOE)의 주도하에 진행되고 있는 National Renewable Energy Laboratory(NREL) 계획은 전 태양 에너지연구소인 SERI와 Sandia National Laboratory(SNL)이 중추적 역할을 담당하고 있다. 미국의 에너지성(Department of Energy)과 전력연구소(EPRI) 및 전력회사들의 협력하에 태양광발전의 상업화에 필요한 실증시험과 주변장치의 가격절감을 위한 시스템 기술개발 연구로는 Photovoltaic for Utility-Scale Applications (PVUSA) Program이 있다.

현재 미국 전역에는 12개 전력회사들이 태양광 발전시스템을 설치하여 운영중에 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 촉진세

를 부가할 수 있는 특별회계법을 시행함에 따라 본격적인 태양광발전에 대한 기술개발과 지속적인 지원을 위한 재정지원 정책이 가능하게 되었다.

이와 함께 1987년 관련기업과 연구기관들이 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 중심기관으로의 기능을 수행하고 있다. 특히 1993년에는 경제성장, 에너지, 환경보전에 대한 균형 있는 대책과 종합적인 기술개발을 위하여 Sunshine Project를 Moonlight Project와 지구환경 기술 개발 프로그램을 하나로 묶어 일체화한 New Sunshine Program(에너지 환경영역 종합기술개발 추진계획)을 수립하여 이에 대한 연구를 적극적으로 수행하고 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 추진하고 있는데, 이 계획은 상업화를 목적으로 다결정 실리콘 태양전지 제조기술 개선과 태양광 발전시스템에 대한 연구에 중점을 두고 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 100,000 Roofs Project가 추진되고 있고, 이탈리아의 경우 100kW급 태양광 발전시스템의 표준화 및 보급을 위한 PLUG Project, 스위스와

프랑스에서는 MW House Project와 PV 20 Project가 수행되고 있다. 독일의 경우 주택용 계통연계형 시스템 설치시 초기 설치비의 70%까지 보조해 주며, 이탈리아의 경우는 30~80%까지 시스템 설치비용을 보조하고 있다. 표 2는 선진각국의 태양광 개발목표를 보여주고 있다.

한편, 계통연계 태양광 발전시스템의 보급 동향을 살펴 보면 정부 주도로 활발한 보급정책을 추진하고 있는 일본의 경우 다수의 상용 계통연계 실적이 있으며, 1994년 3월 역조류가 있는 경우의 저압배전선 계통연계를 포함한 분산형 전원 계통연계 가이드라인 수립을 완료하였다.

최근의 태양광 발전 산업동향은 전력회사의 투자가 활발하게 이루어지고 있는데 이는 전력회사들이 “에너지 공급회사”라는 단순한 개념을 탈피하여, 전력설비에 대한 투자의 다양화와 전원공급의 다변화를 위해 경제적인 신·재생 에너지 발전 시스템에 대한 관심이 증가하고 있기 때문이다. 예를 들면, 독일 전력회사들은 Siemens Solar Industries를, RWE 전력회사는 ASE를 그리고 미국의 Enron 전력회사는 Solarex, 이탈리아의 ENI 전력회사는 Eurosolar, 캐나다의 Ontario Hydro Technologies사는 최근에 TI의 Spheral Solar Cell 기

술을 사들였으며, Pacific Power 전력회사는 아예 Pacific Solar 등을 설립하여 태양광 발전사업에 투자를 하고 있다. 이들 전력회사들은 계통연계형 태양광 발전시스템의 설치가 증가함에 따라 태양광 발전시장의 증가가 예상되므로 태양광 발전시스템 제조업체에 투자하는 것은 가치가 있다고 판단하고 있으며, 이와 같은 전력회사의 태양광 발전에 대한 투자와 새로운 협력 투자회사들의 출현은 태양광발전 산업에 매우 유익하고, 태양광 발전 시장의 확대와 더불어 태양광발전 실용보급을 통한 국가 전원개발 정책에도 커다란 영향을 줄 것으로 예측된다.

### 3. 태양광 발전시스템 분석

#### 가. 개요

태양광 발전은 태양전지라는 반도체를 사용하여 태양의 빛에너지를 직접 전기에너지로 변환하는 발전 방식이다. 발전 출력은 직류 출력이므로 보통 인버터라고 부르는 직·교류 전력변환시스템을 사용하여 교류전력으로 변환한다. 즉, 태양광 발전은 그 발전의 기본 단위인 태양전지 이외에 직류를 교류로 변환하여 독립운전 또는 계통연계 운전을 위한 직·교류 전력변환시스템을 필요로 하는 발전기술이다.

태양전지는 가벼워 어디에나 설치 가능하고, 더구나 일사량은 별로 지역 차가 없기 때문에 규모의 크기 및 설치장소의 상이함에 따라 발전특성이 기본적으로 크게 변하지는 않고, 축전지 및 전력변환기 등 주변기기의 조합에 따라 여러 형태의 이용 시스템이 있을 수 있다.

초기에 널리 실용화되어 사용된 태양광 발전시스템은 대부분이 직류부하를 대상으로 한 소규모 용량의 것으로 시스템 구성은 태양전지와 축전지가 결합되어 있는 간단한 형태이지만, 본격적인 전력용으로서의 일반적인 시스템은 교류부하를 대상으로 한 것이 많고, 전력계통과의

〈표 2〉 국가별 태양광 관련 개발정책 및 목표

구 분	미 국	일 본	유 럽
개발정책	PVMat PVUSA, Solar 20,000	New Sunshine Program	JOULE I, II THERMIE
가격목표 -모듈가격 (\$/Wp) -발전단가 (¢/kWh)	(2010년 기준) 1 5-6	(2000년 기준) 1 7	(2000년 기준) 2 9
주관기관 -요소기술 -이용기술	NREL, SNL 전력회사	NEDO, PVTEC 전력회사, 제조업체	유럽연합 국가간 연계
중점분야 -태양전지 -이용기술	단결정/화합물 대규모 발전소	다결정/비정질 주택 용, 제품화	다결정/화합물 독립형, 건물용

연계까지 고려되고 있다.

태양광 발전시스템의 구성은 그 이용 형태에 따라 다르지만, 기본구성은 그림 1과 같다.

태양전지 어레이(Array)는 원하는 전압, 전류를 얻기 위하여 그에 맞도록 여러 개의 태양전지를 직·병렬로 접속한다. 직류부하만 있을 경우는 이것에 축전장치(일반적으로 축전지 사용)가 접속될 뿐이지만, 교류부하를 대상으로 한 경우는 반드시 직·교류 변환장치가 필요하다.

직·교류 변환장치는 인버터와 마찬가지로 태양전지에서 발생하는 직류 전력을 상용 60Hz의 교류 전력으로 변환하는 장치로, 부하측에서 필요로 하는 전압 및 주파수의 조정 등이 요구되고 있다.

태양광 발전시스템은 전력계통과의 연계 유무에 따라 크게 독립형 시스템과 계통연계 시스템으로 분류할 수 있고, 또한 전력계통과 연계할 경우에는 별도의 연계장치가 필요하게 된다.

연계장치는 태양광 발전시스템 또는 전력계통의 이상시에, 쌍방을 신속히 분리하는 보호 제어장치가 주가 되지만, 고조파 억제 필터 및 전력계통으로부터의 침입 Surge의 방지 그리고 전력 조류의 방향에 따라 별도로 계량할 수 있는 전력량계 등도 필요하다. 시스템 제어장치는 전체적으로 이상적인 운전이 가능하도록, 각 시스템 구성 기기를 감시, 제어하는 것이 있지만 규모에 따라 생

략되어 직·교류 전력변환시스템의 제어회로에 포함되고 있다.

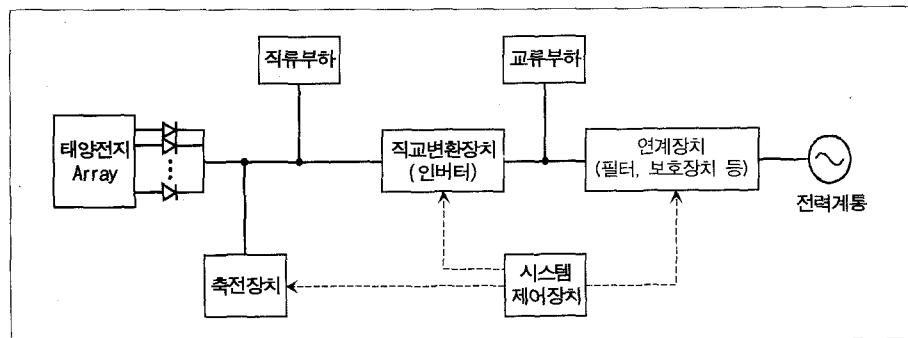
계통연계형 시스템을 그 시스템 이용형태에 따라 대별하면 주택, 빌딩 등의 옥상 등을 이용하여 설치되는 분산형 시스템과 대규모(수 MW급) 발전시스템인 집중형 시스템으로 분류할 수 있다.

이 50kW급 중규모 계통연계시스템은 빌딩의 옥상 등 유휴공간을 활용하는 분산형 시스템의 일종으로 고려될 수 있고 대규모 집중형 시스템의 기본기술을 개발한다는 측면에서 중요한 의미를 갖는다.

### 나. 직·교류 전력변환기술 개발동향

태양광 발전은 발전소자인 태양전지의 출력이 직류이기 때문에 상용 교류전원으로 사용하기 위해서는 직·교류 전력변환시스템이 필수적이다. 직·교류 전력변환기술은 전력용 반도체 소자를 사용하여 직류 전력을 원하는 교류전력으로 변환하는 장치로 전력손실을 수반하지 않는 변환이 이상적이다. 이 때문에 전력 손실이 없는 스위치를 사용하는 것이 최적이고, 사이리스터(Thyristor)를 사용했던 초기에는 전류회로(轉流回路)와 손실저감이 중요한 연구과제였지만 최근에는 고성능의 각종 전력용 반도체 소자가 개발되어 사용되고 있다.

전력변환의 기본기술은, ① 전력용 반도체 소자, ② 전



〈그림 1〉 태양광 발전시스템의 구성도

력변환·제어회로, ③ 제어회로 디바이스와 제어이론이고, 이러한 각 요소기술의 고도화는 상승적으로 장치의 소형·경량화, 고성능·고기능화, 저가격화 등의 요인이 되고 있다.

현재 개발되고 있는 전력용 반도체 소자를 살펴보면 특히 대용량에서는 GTO(Gate Turn Off Thyristor), 소·중용량에서는 IGBT(Insulated Gate Bipolar Transister)와 IPM(Intelligent Power Module)의 고성능화가 이루어지고 있다. GTO의 최대정격이 6kV, 6kA, IGBT 모듈은 1.2kV, 1kA, IPM은 1.2kV, 600A의 디바이스가 출현하고 있다.

IPM은 IGBT, 게이트 구동회로 및 과전류, 단락, 가열 등의 보호회로 등 주변회로가 1개의 패키지에 들어있는 것으로서, 인버터의 소형·경량화와 고성능화의 두 가지 목표에 크게 기여하고 있으며 제3세대 IGBT는 저포화 전압화, 고속화가 진행되어 범용 인버터에의 적용이 시도되고 있다.

전력변환시스템의 주회로 구성은 전력용 반도체 소자의 종류와 성능에 의해 좌우되지만, 신뢰성을 높이기 위한 회로에서는 부품 수가 적은 것이 바람직하다.

이상적인 전력변환시스템의 주회로는 전원(입력) 전류 파형을 역률 1의 정현파로, 출력전압·전류파형은 정현파, 전력변환 효율은 100%(전력손실이 0)일 뿐만 아니라, 전력흐름이 쌍방향(전력회생이 가능)인 회로이다. 이를 위해 최근에는 전기회로의 공진 현상을 이용한 영전압 스위칭, 또는 영 전류 스위칭에 의한 공진형 전력변환회로 및 입출력 고조파 전류를 억제하는 다중(Multi-level) 컨버터의 연구개발이 진행되고 있다.

제어회로 구성에 있어서도 주제어 회로의 입력 신호 처리, 연산, PWM 파형제어 등이 32bit의 DSP(Digital Signal Processor) 및 MPU(Microprocessor Unit)에 의해 최신 제어이론의 적용이 가능해짐으로써 전력변환시스템의 다기능화를 도모하고 있다.

전력변환시스템의 기본성능으로서는 앞에서 언급한 것처럼 일반적으로 태양광 발전에 의한 전력을 유효하게 안정적으로 교류전력으로 변환하기 위해 고효율 및 고신뢰성이 요구되며, 경제성 및 운전관리 면에서 소형, 저가격, 유지보수 용이 등의 특성을 갖추어야 한다.

#### 다. 태양광발전용 인버터의 기술요건

개인주택용을 비롯한 계통연계형 태양광발전시스템의 운용은 태양전지 출력을 최대한으로 활용하기 위하여 태양광 발전출력이 가정의 부하를 상회한 때에는 그 여분을 배전선에 보내는 역조류 운전을 하고, 우천, 야간 등 발전출력이 부족한 때에는 계통에서 공급받는 쌍방향 조류방식이 효과적이다.

그런데 이 방식은 향후 계통연계 태양광발전시스템이 실용화 보급되어 다수의 시스템이 계통과 연계할 경우 여러 가지 문제가 발생되는데, 그 중 대표적인 것을 들어보면 ① 계통전력 품질 열화의 문제, 즉 전압변동의 증대, 불필요한 고조파 전류의 유입 등에 의한 계통전력 품질의 열화, ② 계통보호, 안정성의 문제, 즉 배전선 보호 시스템에의 교란에 의한 공급 신뢰도의 저하, 태양광발전시스템으로부터의 역충전에 의한 선로작업시 안전성의 저하 등이다.

이 중 ①의 문제는, 일사량 변화에 따른 태양광발전 출력의 변동성분이 계통에 영향을 주고 또 태양광발전시스템이 직·교류 전력변환에 전력반도체 스위칭 소자를 사용하기 때문에 일어나는 것으로서 특히 고조파의 증가로 전력계통의 전압왜곡으로 인한 각종 장애가 발생하므로 가장 큰 문제가 되고 있다. 더욱이 개인주택용을 비롯한 계통연계형 태양광 발전시스템의 보급이 보편화될 경우 직·교류 변환장치 사용에 따른 고조파의 유입에 의해 계통의 전력품질이 더 악화될 우려가 있다.

따라서, 유럽, 미국 등 선진국에서는 이미 IEC, CIGRE, IEEE 등의 주도로 고조파 억제를 위한 규격

(IEC555, IEEE519)이 제정되어 세계각국에서 통용될 전망이다. 표 3에 IEC 및 IEEE의 고조파 규제 규격을 예시하였다.

〈표 3〉 IEEE 519 전압 왜형 규격

구 분	2.3~69kV	69~138kV	>138kV
각차 고조파 최대치	4.0	1.5	1.0
총합 고조파 왜율(THD)	7.0	2.5	1.5

\* 고조파 전압 제한치(Vh/Vf)임.

고조파 억제 방법 및 대책으로는 장치로부터 고조파를 발생시키지 않도록 장치의 용도에 따라 PWM 제어 방식을 채용하고, Active Filter를 부착하여 적극적으로 고조파를 제거하는 방법, 다상화 또는 Multi-level화하는 방법이 사용되고 있다.

한편 ②의 문제는 태양광 발전시스템을 갖는 수용가를 배전계통에 연결할 때 종래 볼 수 없었던 이질적인 부하(역조류 전원)가 되기 때문에 발생하는 것으로서 배전계통의 전력조류가 전원으로부터 부하로 흐르는 일방성의 형태가 아니라 전원과 부하가 혼재되어 있는 형태가 된다. 이에 따라 전력계통의 보호협조 및 인버터의 단독운전 가능성에 대한 검토가 필요하다.

이러한 계통연계형 태양광 발전시스템의 연계시 문제점에 대해 현재 상태에서 생각할 수 있는 대책으로서는 다음 방법이 제시되고 있다.

- ① 격심한 출력변동의 영향을 피하기 위하여 최저한도의 축전지(발전 능력의 30分~3日 정도의 저장능력) 또는 큰 용량의 커패시터를 설치하여 출력의 안정화 또는 수요 시간대로의 전력이동을 피한다.
- ② 계통전압의 변동과 고조파 전압의 증대를 억제하기 위하여 인버터에는 자려식을 채용하고, PWM화, 고주파 스위칭(Switching) 방식을 추진한다.
- ③ 계통 사고시에 있어서 배전선 보호 시스템과의 보호 협조 및 선로 작업시의 안정성을 확보하기 위하여

제어전원을 계통으로부터 취하는 자려식 인버터를 채용한다.

- ④ 계통 사고시의 이상상태 및 선로 작업으로 인한 계통전압의 상실을 정확히 검출하기 위하여 계통의 전압, 주파수를 검출하는 기능 이외에 단독운전(Islanding 현상)을 검출할 수 있는 수동적 또는 능동적 검출방법을 사용한다.

이상의 기본조건을 갖는데 필요한 개인주택용을 비롯한 계통연계형 태양광발전용 인버터의 필요기능은 아래와 같다.

- ㉠ 태양전지를 포함한 직류 측 회로의 보호
- ㉡ 일사량에 따른 태양전지 출력의 최대화
- ㉢ 일출·일몰시의 자동기동·정지
- ㉣ 고역률 제어(95% 이상)
- ㉤ 전력품질 유지(교류 출력, 파형 왜곡의 저감 등)
- ㉥ 교류 측 회로의 보호 협조, 역충전 방지 보호

이것들은 수동부하인 종래의 가전제품에는 없는 기능이고, 이같은 기능을 갖는 인버터를 구미에서는 PC(Power Conditioner) 또는 PCS(Power Conditioning System)라 부른다.

특히, 역조류 운전을 행하는 태양광 발전시스템은 하나의 발전소로 간주되고, 상기의 ㉢, ㉣은 계통으로의 영향, 보안에 관한 특성으로 신뢰성, 안전성 면에서 충분한 배려가 필요하다. 예를 들면, 배전선 측이 정전된 경우 가끔 태양광 발전시스템의 발전출력과 부하가 균형을 이루어도, 정전을 감지하여 태양광 인버터의 운전을 정지하여 배전선이 활선상태(역압 또는 역충전)가 되는 것을 방지하는 기능을 부가하여야 한다.

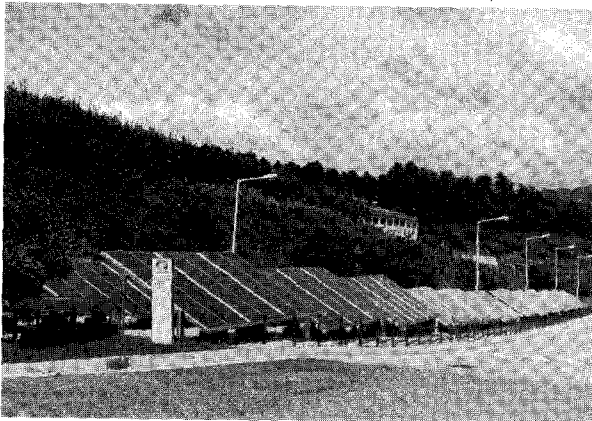
## 4. 50kW급 태양광 발전시스템 구성

### 가. 개요

분산형 전원으로서 가까운 시일 내에 확대보급 가능성

이 있는 것은 계통연계형 태양광 발전시스템이다.

중규모 50kW급 계통연계형 태양광 발전시스템은 태양광을 받아 직류전기를 발생시키는 53Wp 용량의 태양전지 총 960개의 모듈이 20매씩 3병렬을 1개 어레이 군으로 하여 모두 16개의 태양전지 어레이로 이루어져 있다. 독립된 16개의 어레이 군에는 각각의 출력단에 역전류 방지 다이오드, 차단 스위치 등으로 구성된 분전함인 설치되어 있고 이를 통하여 제어실내의 50kW 3상 인버터에 연결된다. 인버터를 통해 교류로 변환된 태양광발전시스템의 출력전력은 전력연구원내에 있는 수변전설비의 분전반에 연결되어 원내의 부하설비에 공급하도록 구성되어 있다(그림 2 참조).



〈그림 2〉 50kW급 태양광발전시스템 전경

## 나. 태양전지 규격 및 수량

### (1) 태양전지판 특성

이 시스템에 사용되는 태양전지는 국내에서 개발된 단결정 실리콘 Cell을 사용하였다. 태양전지판을 지지하는 태양전지판 프레임은 경량의 냉간 압연 강판 또는 경금속 특수 알루미늄 재질로써 밀봉 처리되어 습기 침투를 방지한 제품이며 태양전지판 내부에는 반드시 By-pass

다이오드가 부착되어 있다.

### (2) 태양전지 수량

50kW급 계통연계형 시스템에 사용될 태양전지 모듈의 규격 및 수량은 표 4와 같다. 또한, 태양전지 모듈 20개를 직렬로 연결한 서로 독립된 50개군의 각각의 출력단에 Blocking Diode, 차단 스위치, 전류 측정용 Shunt를 부착하여 고장에 대한 보수가 용이하게 구성되어 있다.

〈표 4〉 태양전지 규격 및 수량

품명	규격	수량	용량	비고
태양전지모듈	53Wp/ea	960	50kWp	-

### (3) 태양전지 전기적 특성(표 5 참조)

〈표 5〉 태양전지판 전기특성

구분	성능	비고
개방전압	21.7V	1kW/m <sup>2</sup> , 1.5AM, 25℃ 기준
단락전류	3.35A	
정격전압	17.4V	
정격전류	3.05A	
정격용량	53Wp±10%	
외형크기	1291×328.5×35mm	
중량	6.2kg	

## 다. 분전반

50kW급 계통연계형 태양광 발전시스템의 어레이 군은 총 16개로 이루어져 있다. 이 시스템은 상용화 설비 이전에 연구를 위한 설비이므로 시스템 분석과 각각의 부분에서 이상 발생시 태양전지 부분별 접근을 용이하게 하기 위하여 3개의 분전반을 설치하여, 부분별 태양전지 어레이의 상태 파악과 단위 요소별 분석을 할 수 있도록 하였다.



**라. 인버터 설계 규격**

50kW급 계통연계 태양광 발전시스템은 반도체소자, 퓨즈, 방열판, 필터용 리액터 및 커패시터 등으로 구성되어 있으며 태양전지로부터 직류 전원을 공급받아 교류전원으로 변환시켜 부하 또는 계통에 안정된 양질의 전원을 공급하며 유지보수가 용이해야 한다. 이 장치는 정격 부하 범위 내에서 부하에 전원을 연속으로 공급할 수 있어야 하며 출력전압의 변동없이 정격부하를 넘을 경우 110%의 과부하에서 10분간 견딜 수 있어야 하며 신뢰성을 높이고 조작성이 용이하도록 직류 과전압 및 저전압, 계통 과전압 및 저전압, 과부하, 과열, 정전 등 고장에 대한 경보기능과 차단기능이 있다(표 6 참조).

〈표 6〉 50kWp 태양광 발전시스템 설계 규격

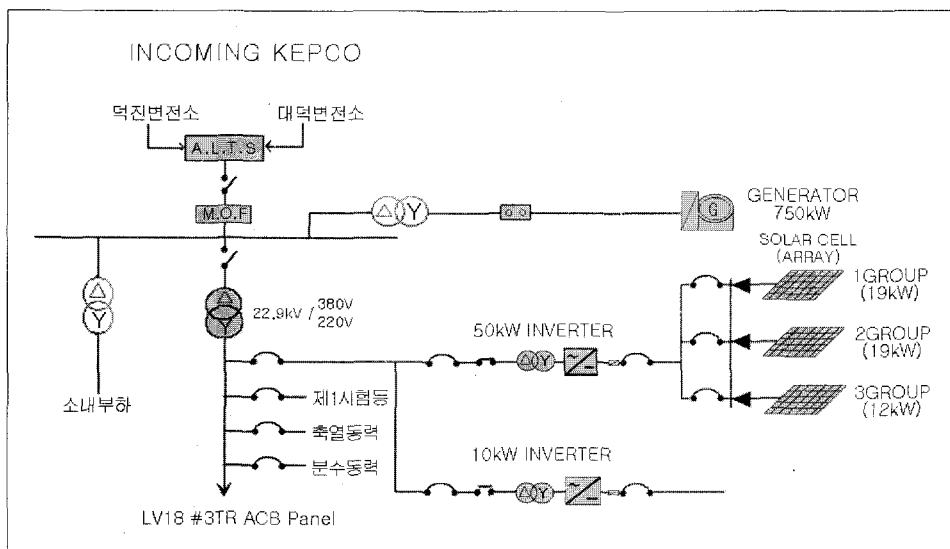
항 목	규 격	
태양전지 모듈	종 류	단결정 실리콘 태양전지
	용 량	53Wp
	효 율	14%
태양전지 어레이	결선방법	20직렬×3병렬×16개 어레이
	경 사 각	30° (정격전압 : 348V)
	용 량	약 50kVAp
인버터	연계운전방식	전압형 전류제어방식
	정격출력	50kWp
	직류입력전압	DC 220~430V
	전력제어방식	MPPT 제어
	정격출력	AC 3상 220/380V, 60Hz
	전력변환효율	94% 이상(정격 출력시)
	보호기능	과전압, 단락, 정전, 결상, 주파수

**마. 태양광 발전시스템 기본 구성도**

그림 3은 50kW급 계통연계형 태양광 발전시스템의 기본 구성도를 보여주고 있다.

그림에서와 같이 50kW급 태양광 발전시스템은 태양광을 받아 직류전류를 발생시키는 태양전지 모듈 960매가

20매씩 3병렬을 1군으로 하여 16군으로 이루어져 있으며, 여기서 발생된 직류전류를 교류전류로 변환시키는 IGBT를 사용한 50kVA급 PWM 방식의 인버터와 이를 배전선 계통에 연계시키는 계통보호시설 및 운전자료의 계측분석을 위한 MMI(Man Machine Interface)설비들로 구



〈그림 3〉 발전시스템 기본 구성도

성되어 있다.

**(1) 시스템 운전 및 감시 시스템 구축**

태양광 발전시스템의 운전자료는 산업자동화 소프트웨어인 FA50을 사용하여 태양광 발전시스템의 자료 수집 및 시스템 감시 제어에 맞게 구성하여 적용하였다.

주 화면에서 디지털 감시, BAR 그래프, 경보화면, 계통도, 보고서, 인버터 시간 변경, 시스템 구성 등 모든 기능을 수행하게 되어 있다.

**(2) 원격 감시 및 제어 시스템 구축**

태양광 발전시스템은 제어실에서 시스템의 모든 상황을 감시 및 제어할 수 있으며, 또한 밀집된 인근지역에서 다수의 계통연계형 태양광 발전시스템을 도입할 경우를 가정하여 시스템 운영의 효율적 방안 모색을 위한 원격 감시 및 제어 시스템을 연구원내의 LAN 망을 이용하여 연구동 태양광 실험실에 시스템을 구축하였다.

구축망은 Modem을 사용한 전화회선 혹은 LAN 망을 활용하는 것이 모두 가능하지만 전화회선의 한계성과 현재에 구축되고 있는 각종 전용 통신선의 보급 확대를 가정하여 LAN 망을 이용하는 것으로 선택하였다.

**(3) 50kW 태양광 발전시스템 일보 출력**

50kW급 계통연계형 태양광 발전시스템의 일일 발전 현황을 종합하여 다음날 9시에 출력되도록 하였다. 이때 태양전지 출력현황, 일사량, 온도, 인버터 현황, 발생전력 공급 현황 등이 시간대 별로 구분하여 출력되며 파일로 저장된다.

**바. 발전시스템 설치비 분포**

1998년 9월 24일 착공한 50kW급 계통연계형 태양광 발전시스템 설치공사는 1999년 4월 8일 모든 단위 설비를 설치 완료하고 시운전을 시작하였으며 7월 23일 10개

월에 걸친 공사를 완료하였다.

태양전지 어레이, 3상 50kW급 계통연계형 인버터, 전기배선, 철 구조물, 바닥 자갈 깔기, 조경을 위한 펜스 작업, 운전에 영향을 주는 도로 주변의 가로등 이설, 운전자료 수집 및 감시를 위한 제어실, 시제작된 3상 50kW급 계통연계형 인버터 등을 포함한 총 공사비 분포를 보면 표 7과 같다.

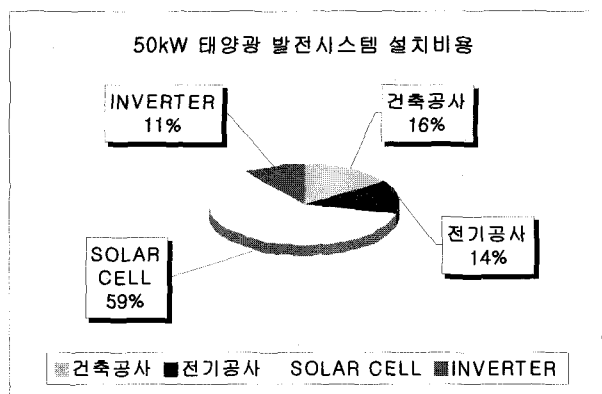
표 7에서 보면 계통연계형 태양광 발전시스템 설치의 60% 정도는 태양전지가 차지하고 있다. 현재 태양광 발전시스템의 발전원가 상승은 태양전지의 가격이 주도하고 있으며 선진국에서는 향후 2010년까지 현재의 절반 정도인 \$2/Wp를 목표로 개발중에 있다.

현재 14% 정도인 상용화된 태양전지 에너지 변환효율을 상승시키고 가격의 저감 상황에 따라 태양광 발전시스템도 더욱 경쟁력 있는 발전원이 될 수 있을 것으로 생각된다.

**5. 태양광 발전시스템 운전특성 분석**

50kW급 계통연계형 태양광 발전시스템은 1999년 4월 8일 기기의 점검 및 교정을 마친 후 시운전을 시작하여 10월까지 시스템의 출력특성이 분석되고 있다. 태양광

〈표 7〉 발전시스템 설치 비용분포



발전시스템의 운전자료를 수집하는 데는 산업자동화 소프트웨어인 FA50을 사용하였으며, 전류, 전압, 태양광 일사량, 온도 등을 자료화하여 태양광 발전특성에 미치는 영향 등을 분석하고 있다.

**가. 인버터의 입·출력 특성**

표 8은 전력변환장치인 인버터의 입·출력특성을 보여 주고 있으며, 교류전류 파형 왜율은 Power Scope를 사용하여 출력별로 측정하였다. 표8에서 보는 바와 같이 전류 파형의 왜율은 50% 부하 이상에서 2.5% 이하로 대단히 양호한 상태를 보여 주고 있으며, 인버터의 전력변환 효율도 1/2 부하 이상에서 92% 이상의 높은 변환 효율을 나타내고 있다.

〈표 8〉 인버터 입·출력 특성

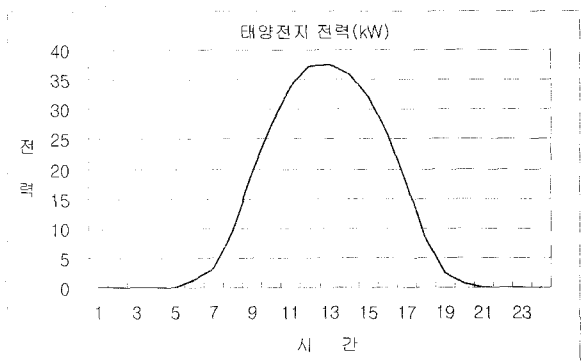
출력 (%)	인버터 입력 출력(kW)	인버터 출력 출력(kW)	효율 (%)	역률	교류전류 총합(%)
0	-	-	-	-	-
20	11	10	90.9	0.999	4.8
40	22	20	90.9	0.999	3.1
50	25	23	92.0	0.999	2.5
60	32	30	93.7	0.999	2.1
80	39	37	94.8	0.999	

표 8에서 보여주듯이 분산형 전원으로서 계통연계형 태양광 발전시스템의 전류 파형 왜율은 정상 출력에서는 배전계통으로 영향은 거의 없는 양질의 전력을 공급할 수 있으나, 우천 및 일기 불순 등 외기 환경의 변화 등으로 인한 저출력 운전시는 분전형 전원으로서의 전류 파형 왜율 제한치 5%에 근접한 수치를 보여 주고 있다. 이는 계통연계형 태양광 발전시스템의 한 단면을 보여주는 것으로서 자연 환경에 따른 발전출력을 예측하고 이에 대응한 전력품질 향상을 위해 저출력에서의 대책을 세워야 할 것이다.

**나. 50kW 계통연계형 태양광 시스템 발전특성**

50kW급 계통연계형 태양광 발전시스템은 지난 해 4월 8일 이후 207일 동안 총 34,589kWh를 발전하여 일 평균 약 167kWh/day를 발전하였다. 표 9는 일일 발전 출력 특성을 나타낸 것으로서 계통전력의 전력사용량은 태양광 발전량과 유사함을 보여 주고 있는데, 이는 태양광 발전시스템이 전력 Peak Cut 효과가 있음을 보여주는 것이며, 이러한 효과는 발전용량의 40%~50% 정도로 보고되고 있다.

〈표 9〉 일일 발전특성 곡선('99. 5. 29)



태양광 발전시스템 운전특성 분석을 위한 시스템 이용률 및 시스템 발전효율은 식 1과 2에 의하여 계산된다.

$$\text{시스템 이용률} = \frac{\text{시스템 발전전력량(kWh)}}{\text{시스템 정격출력} \times 24(\text{h}) \times \text{일수}} \times 100(\%)$$

..... (식 1)

$$\text{시스템발전효율} = \frac{\text{시스템 총발전량(kWh)}}{\text{경사면일사량} \times \text{어레이 면적(m}^2\text{)}} \times 100(\%)$$

..... (식 2)

표 10는 시험 운전기간 동안의 발전특성을 분석한 것으로 시스템 이용률은 평균 13.96%, 시스템 발전효율은 9.78%, 태양전지 어레이 효율은 10.46%로 중규모급 태양광 발전시스템에서 높은 수치를 나타내고 있다. 이는 효율이 높은 단결정 실리콘 태양전지를 사용하였고, 태양의 경

사면 일사량의 크기가 가장 크도록 태양전지 어레이가 적절한 위치와 각도로 설치되었기 때문으로 판단된다.

〈표 10〉 태양광 시스템 이용률

월 별	발전 전력량 (kWh)	시스템 이용률 (%)	계측일수
4	4,220	15.28	23
5	6,306	16.95	31
6	5,204	14.45	30
7	5,204	13.99	31
8	4,604	12.38	31
9	4,144	11.51	30
10	4,904	13.18	31
평균 (합계)	4,941 (34,589)	13.96 (-)	(207)

〈표 11〉 태양광 발전시스템 효율

월 별	경사면일사량 (kW/m <sup>2</sup> )	발전량 (kWh)	시스템 효율 (%)
1999년 4월	43.744	2,621	10.49
5월	80.820	4,531	9.82
6월	103.165	5,190	8.81
7월	102.004	5,196	8.92
8월	81.238	4,604	9.92
9월	75.178	4,144	9.65
10월	78.878	4,904	10.89
평균			9.78

〈표 12〉 태양전지 어레이 효율

월 별	경사면일사량 (W/m <sup>2</sup> )	PV 발전량 (kWh)	어레이 효율 (%)
1999년 4월	43.744	2,841	11.37
5월	80.820	4,977	10.78
6월	103.165	5,656	9.6
7월	102.004	5,713	9.81
8월	81.238	4,917	10.66
9월	75.178	4,947	10.55
평균			10.46

\*일사량계 미설치 및 프로그램 수정기간 제외

현재까지, 중규모 50kW급 계통연계형 태양광 발전시스템의 설계·제작·실증운전은 양호한 특성을 보여 주고 있으며, 향후 장기 실증운전을 통한 계절별 운전특성 및 기후 변화에 대한 특성 등을 보다 심도 있게 분석하고, 이에 대한 평가와 보완수립이 진행되어야 할 것이다.

## 6. 결 론

국내에서 제작된 태양전지 모듈 960매와 자체 설계한 3상 50kW급 계통연계형 인버터를 순수 국내 기술에 의해 제작하여 설치된 50kW급 계통연계형 태양광 발전시스템의 운전특성에 관하여 분석하였다. 50kW급 계통연계형 태양광 발전시스템에 대해 4월 8일부터 10월 31일까지 207일 동안의 운전특성을 분석하였으며, 주요 결과는 50% 부하 이상에서 인버터 전류 파형 왜율은 2.5% 이하로 대단히 양호하였으며, 전력변환장치인 인버터의 변환효율은 1/2 부하 이상에서 92% 이상의 좋은 변환 효율을 보여 주었다.

발전특성 분석으로 운전기간 동안에 34,589kWh로 일 평균 167kWh/day, 시스템 이용률 13.96%, 시스템 발전효율 9.78%, 태양전지 어레이 효율은 10.46%인 것으로 분석되었다.

태양광 발전시스템의 출력특성인 환경 변환에 대한 문제점 중에서 저출력으로 인한 고조파 발생 문제에 대하여는 심도있게 분석하여, 대책을 강구하여야 할 것이다. 정상 출력에서는 이상이 없지만 현 시스템에서는 정격의 20%에서 고조파 발생이 제한치 5%에 근접함을 볼 수 있었다.

향후 계통연계형 태양광 발전시스템의 장기운전을 통한 계절별 발전특성을 분석하고, 3상 계통연계형 인버터의 고조파 영향을 분석하여 대책 수립과 다수의 시스템의 도입시 영향 등을 분석하고 대책을 수립할 예정이다.