

태양광발전 계통연계 기술

안 교 상*, 황 정 희*, 임 희 천*, 김 신 섭**

(*한국전력공사 전력연구원, **헥스파워시스템(주))

1. 서론

지구환경문제와 미래에너지원의 안정적 확보를 위한 무한의 청정에너지원인 태양광 발전기술 개발 및 보급이 국내외에서 활발히 진행되고 있다. 국내의 경우 산업 인프라는 태양광 발전사업을 육성하기에 양호한 조건을 보유하고 있음에도 불구하고 관련 산업의 기술을 적절하게 시스템화하지 못하면서 선진국은 물론이고 최근에는 후발 개발도상국에까지도 도전을 받고 있는 실정이다.

이에 따라, 정부는 태양광발전 보급 활성화 전략으로 “solar land 2010 program”의 발표를 계기로, 신·재생에너지 발전 전력에 대한 기준 가격제도 도입, 에너지사업자와의 자발적 협약(Renewable energy Portfolio Agreement; RPA) 체결은 국내 발전사업자의 지원 정책을 강화하게 되었으며, 전력 계통의 운영 주체로서 한전에서 배전설비 이용 규정 정비 및 분산형전원의 배전계통 연계 기술 기준의 제정등 보급 활성화 사업에 적극적으로 지원하고 있다.

본 고에서는 실용화에 가장 근접하여 있는 태양광 발전시스템의 계통연계 운전특성에 대하여 논하고자 한다.

2. 태양광발전 계통연계 기술기준

전력계통에 있어서 태양광발전의 도입은 운영 및 보호협조 체계를 변화시킬 수 있는 새로운 요소로 부각되고 있다. 지난 수년 동안 태양광발전 관련 운전경험은 아주 높은 수준에 이르렀고 오늘날 설치된 태양광발전은 우수한 특성을 갖으며 연계운전에 있어 잘 운전되고 있다. 태양전지 모듈 및 주변장

치(Balance Of System; BOS)의 가격도 상당히 감소함에 따라 전력계통과 병렬 연계된 태양광발전은 매력적인 수단이 되고 있다. 그러나 불특정 다수의 태양광 발전시스템을 계통 연계하는 것은 배전선의 전력품질, 안전성, 안정성에 영향을 줄 가능성이 있기 때문에 이들 발전 전원의 본격적인 보급에 앞서서 미리 계통연계운전에 의해 발생할 기술적인 대책을 확립할 필요가 있다.

태양광발전의 배전선로 연계는 기존의 전력계통 개념에서는 새로운 변화를 의미한다. 예를 들면 태양광발전은 계통에 연계되기 전에 태양전지 모듈의 직류전력이 교류전원으로 변환되는데 태양광발전과 전력계통 사이에는 상호간에 피해를 주지 않도록 보호협조 체계 구축이 필요하다. 태양광발전의 계통연계기술을 확립하기 위해서는 시스템 자체성능 확인 이외에 그 연계할 지점, 즉 배전선계통으로의 영향, 또는 그 주변부문에 존재하는 전기제품을 중심으로 한 부하 측으로 영향 확인도 필요하다.

향후 신·재생에너지 보급이 일반화 되어 다수의 분산형 태양광발전이 계통에 도입될 경우 전압변동, 고조파, 단독운전, 도입용량, 도입지점 등 보호협조 문제가 이러한 관점에서 주로 고려되어 할 것으로 보인다.

국내의 연계형 태양광 발전시스템 기술개발 및 보급 동향을 살펴보면 태양광 발전시스템의 계통연계 전력변환 제어기술 개발, 성능평가, 실증시험을 통한 계통연계 보호협조 및 운영 기술을 확립, 분산형 전원으로서는 태양광 발전시스템의 계통 도입에 대비한 제반 기술 개발에 주력하고 있으며, 향후 분산형 전원으로서는 다수의 태양광 발전시스템이 계통도입에 따른 현황 분석과 운영기법 확립 및 전력변환 효율 향상 등에 대한

표 1 태양광발전 주요 보급계획

분야	사업명	비고
태양광 발전	· 2012년까지 총 1,300 MW 보급 - 주택용 : 300 MW(10만 가구) - 공공 및 상업용 : 400 MW(4만 개소) - 산업용 : 600 MW(3만 개소)	분산형 전원 중심

기술개발을 추진하고 있다.

현재 태양광발전은 정부의 태양광발전 보급 활성화를 위한 신 재생에너지 시범 및 보급보조사업 등에 힘입어 중·소규모의 계통연계형 상용화 시스템의 활성화를 앞당기고 있다. 보급 계획을 보면 2012년까지 3 kWp급 주택용 태양광 발전 시스템을 300 MWp(10만 가구), 공공 및 상업용 시스템 400 MWp(4만 개소), 그리고 산업용 600 MWp(3만 개소)로 총 1,300 MWp 보급 계획을 추진하고 있다. 최근에는 신·재생에너지전원에 의해 발전된 전력을 일반 전기사업자가 기준가격을 적용하여 구매하는 차액보전제도의 도입으로 중·대형급 태양광발전을 비롯한 전력사업용 분산형 전원의 보급이 활발히 추진되고 있다.

2.1 국외 기술기준

태양광발전 분야의 지속적인 보급 촉진을 위한 기술기준 및 지침의 중요성은 오랫동안 인식되어왔다. 1981년에 IEC는 태양광 발전시스템에 대한 국제적인 기준을 준비하기 위해 기술 분과 위원회(TC82)를 조직하였다. 2005년 현재 23개의 국가가 TC82에 참여하고 있을 뿐 아니라 12개 국가가 옵서버 자격으로 참여하고 있다.

전 세계적인 추세가 비록 연계형 시스템으로 현재 전체 설치용량의 80% 이상을 차지하고 있고 많은 관련 기관이 기술요건에 관하여 참여하고 있음에도 불구하고 연계형 시스템은 아직까지 여러 가지 기술적인 이슈가 남아 있다. 그동안 태양 전지 모듈에 관심을 가져온 반면에 BOS와 시스템에는 적절한 국제적인 공통기준이 부족해서 제조업자, 공급자, 설치자 등은 어려움을 갖고 있다. 몇몇 국가는 분산전원의 계통연계 지침을 제정해서 사용하고 있는 그 대표적인 예가 IEEE 1547 "Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems"이다.

이 기준은 전력회사, 산업계, 미국 국립연구기관 등에 폭 넓게 인정되고 있다. 최근 유럽에서는 유럽연합(EC)이 계통연계를 위한 공통의 법규와 조화된 기술요건의 필요성을 인식하고 전력계통에서 신·재생에너지원 및 분산전원을 다루는 RTD 프로젝트를 지원하고 있다.

이처럼 태양광, 풍력, 소수력 등 신·재생에너지설비의 보급이 활성화되고 역사가 오래된 미국, 일본, 유럽 등의 선진

표 2 IEEE 929-2000과 IEEE P1547의 연계기술 기준 비교분석

Specifications	IEEE 929-2000	IEEE P1547
Voltage	0.88 - 1.10 pu	0.88 - 1.10 pu
Frequency	59.3 - 60.5 Hz	59.3 - 60.5 Hz
DC-injection	< 0.5%	< 0.5%
Power factor	> 0.85	
Islanding time	10 cycles (up to 2 sec)	2 sec.
Harmonics	Based on IEEE 519	Based on IEEE 519
Utility-interface disconnect switch	Optional	Required when DGs are operating without utility
Re-synchronization	Up to 5 min	Up to 5 min

국에서는 분산형 전원의 계통연계를 위한 계통연계 관련 기술지침 및 기준, 규정, 인허가 절차 등이 제도화 되어 있기는 하지만 연계기술조건의 제정 및 적용방법은 국가별로 차이가 있다.

2.2 국내 계통연계 기술기준

국내의 태양광 발전설비 계통연계 신청절차는 한국전력공사의 "배전용 전기설비 이용규정(2005. 1. 1 시행)"에 따른다. 이 규정은 배전사업자인 한전의 배전용 전기설비 이용요금 및 기타 이용조건을 정하는 것으로 전기사업법 제 31조 [전력거래]의 규정에 따라 전력시장에서 전력을 거래하기 위하여 한전의 배전용 전기설비를 이용하는 경우 적용하게 된다.

배전용 전기설비 이용규정에는 배전용 전기설비의 이용절차 및 조건, 배전 이용요금의 계산 및 납부, 접속공사비의 계산 및 납부 등이 자세히 명시되어 있다.

주요내용을 살펴보면 이용을 원하는 고객은 기본계획 자료를 포함한 이용신청서 서식에 의하여 신청하도록 되어 있고 한전은 이용신청 후 5개월 이내에 이를 처리하도록 되어 있다. 또한 연계시 적용되는 기술기준은 현재 한전이 송·배전계통에 적용하고 있는 "발전기 병렬운전 연계선로 보호업무 기준서" 및 "분산형 전원 저압계통 연계기준"에 따르도록 되어 있고 설비 연계에 따른 접속공사비는 고객이 부담하도록 되어 있다.

태양광발전을 비롯한 분산전원의 계통연계와 관련된 기술 기준으로는 최근에 발표된 한국전력공사의 "분산형전원 배전계통 연계 기술기준(2005.5)"를 준용하고 특고압연계의 경우 보호계전기 설치에 관한 사항은 "타사발전기 병렬운전 연계선로 보호업무 지침(1996)"에 따른다. 타사발전기 병렬운전 연계선로 보호업무 지침은 22.9kV 및 154kV의 특별고압선에 연계하는 경우에 대한 전력회사의 보호협조 관련 업무가 주 내용으로 되어 있다.

표 3 한전의 계통연계 관련 절차 및 기준

전압별	연계 업무처리 절차	연계기술기준
저압	배전용 전기설비 이용규정 (2005.1.1.)	분산형전원 배전계통 연계 기술기준(2005.5)
특고압	상동	분산형전원 배전계통 연계 기술기준(2005.5) (보호계전기 설치는 “발전기 병렬운전 연계선로 보호업무 기준서” 준용)

표 4 연계구분(분산형 전원 배전계통 연계 기술기준)

연계구분	적용발전설비	연계설비용량
저압 배전선	분산형 전원 발전설비	20kW이하: 일반 배전선 20-100kW: 전용선로
특별고압 배전선	분산형 전원 발전설비	3,000kW 이하: 일반 배전선 3,000-10,000kW: 전용선로

표 5 연계항목별 기준치(분산형전원 배전계통 연계 기술기준)

항목	동기화	직류전류 유입	역율	고조파 전류	단독운전 방지
연계 기준	전압변동 ±4%	0.5% 이내	90% 이상	TDD 5%이내	0.5초 이내

분산전원의 계통연계와 관련된 기술기준인 “분산형전원 배전계통 연계기술기준(2005.5)”를 비롯한 주요내용을 요약하면 다음과 같다.

3. 120kW 태양광발전 연계운전 분석평가

실증 운전은 설계 제작된 단일용량 120 kW급 전력변환장치(Power Conditioning System; PCS), 특고압 연계용 150kVA 송수전 변전설비 및 122.4kWp급 태양전지 모듈로 구성되어 있으며 PCS 설계 및 제작 규격은 표 6과 같다. 본 120kW급 태양광 발전설비는 80Wp 태양전지 모듈 1,530매를 34직렬 45병렬 결선하였으며, 120kVA PCS, 150kVA 송수전 변전설비 및 모니터링 시스템 등으로 구성 되어 있다.

태양광발전용 직·교류 전력변환기술은 태양전지로부터 나오는 직류전력을 교류전력으로 변환시키기 위한 PCS 기술을 의미하며, 태양광발전용 PCS는 일반 전기기기 사용을 위한 태양전지의 직류출력을 상용주파수의 교류로 변환하는 것을 목적으로 개발되고 있다. 이를 위해 파형왜곡이 작은 정현파를 안정적으로 출력할 필요가 있는데 고속 스위칭이 가능한

표 6 PCS 설계 및 제작 규격

구분	항 목	내 용	비 고
입 력	정격전압	595 Vdc	
	전압변동범위	476~741 Vdc	
출 력 규 격	정격 출력용량	120 kVA	
	정격 출력전압	380 Vac	
	계통 전압변동율	±10%	
	정격출력 주파수	60 Hz	±2 Hz
	주파수 변동	계통선 주파수와 동기	
	전류 총왜율 (THD)	총합 왜율 5%이하 각차 왜율 3%이하	정격부하시
시 스 템 규 격	효율	90% 이상	정격부하시
	역률	98.8% 이상	
	과부하량	110%/10분	
	냉각방식	강제 공냉식	
보 호 기 능	소음	60 dB 이하	전방 1 m
	입력 저전압	460 V	
	입력 과전압	765 V	
	계통 저전압	342 V	정격 -10%
	계통 과전압	418 V	정격 +10%
	주파수 이상	동작 정지	± 3Hz
	주파수 동기 이상	동작 정지	2.86도 이하
Islanding 보호	380 ms	500 ms 이내	

MOSFET나 IGBT 등의 자기소호소자의 대용량화와 제어기술의 발전에 의해 쉽게 가능하게 되었다.

한편 태양광 발전시스템의 가격 중 PCS가 점유하는 비율은 10~20%정도 되며 시스템 전체의 가격저감을 위해서도 전력변환 효율향상은 중요한 요소이며, 자연의 기상조건을 고려할 때 정격 출력 효율보다는 80~50% 정도의 발전출력시의 변환 효율이 중요하다.

또한, 태양광 발전의 배전선로 도입과 병렬운전을 위하여 다음과 같은 성능을 충족하여야 할 것이다.

- 1) 계통 전력품질의 유지를 위한 낮은 왜율(THD)과 전압 안정화,
- 2) 계통과 태양광 전력변환 시스템의 보호협조 체계 구축,
- 3) 태양광 전력변환장치의 저가화,
- 4) 효율향상과 소형 경량화 등을 들 수 있다.

3.1 배전선로 보호 협조

분산형 전원으로서 태양광 발전시스템이 배전선로에 도입 시 발전설비의 고장 또는 전력계통의 고장시 신속하게 고장을 제거하고 고장 범위를 국한시켜 발전설비와 계통을 보호하기 위한 보호 협조를 위하여 태양광 발전설비의 이상 및 고

여 발전출력별로 기동·정지에 따른 전압파형을 분석하였다. 실험 파형으로부터 발전시스템의 갑작스런 기동·정지에도 계통 전압에는 별다른 영향이 없음을 보여 준다.

3.2.2 고조파 분석

분산형 전원 계통연계 기술기준에 따라 태양광발전설비로

표 7 실계통 연계운전시 출력전류의 고조파 측정결과

태양광출력	17kW	42kW	75kW	92kW
출력전류				
THD(%)	5.42	2.67	1.48	1.3

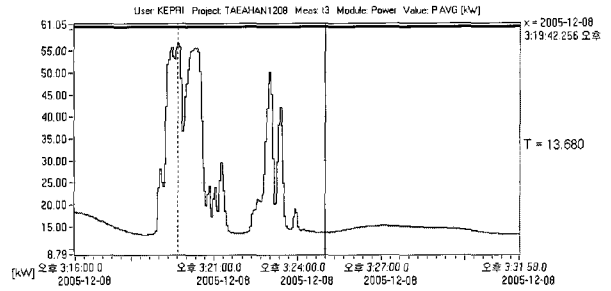


그림 8 출력변동 특성

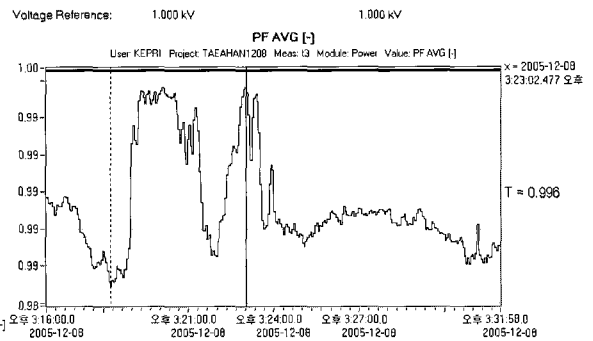


그림 9 출력변동 역률 특성

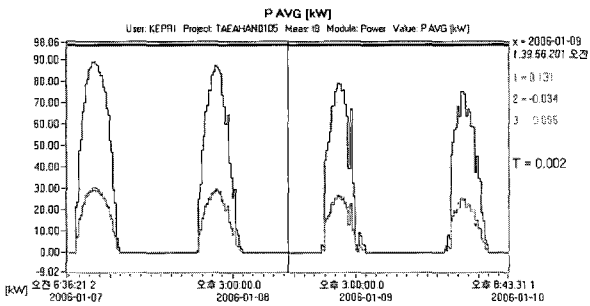


그림 5 출력 특성

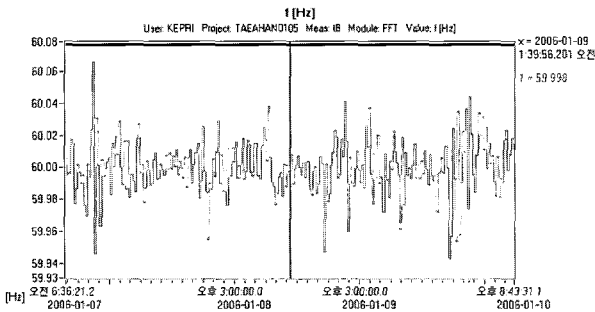


그림 6 주파수 특성

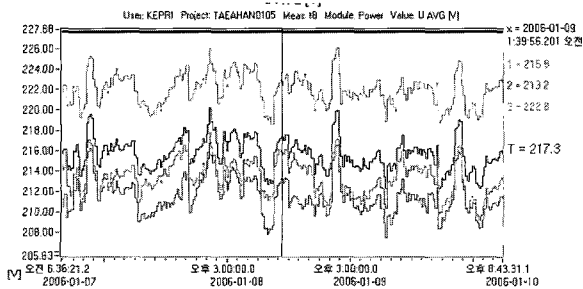


그림 7 전압특성

부터 계통에 유입되는 고조파 전류는 10분 평균한 40차까지의 종합 전류 왜형률이 5%를 초과하지 않도록 각 차수별로 제어하여야 한다.

태양광발전 출력 변화에 따른 실 계통 연계 운전시의 고조파 발생량을 PZ 4000 Power Analyzer 로 측정하였다. 표 7 은 태양광발전 출력별 측정 결과를 보여 주고 있다. 기준에 제시되는 TDD 5%는 발전설비를 제외한 국부 연계계통의 1년 중 15분 최대 부하전류, 또는 (발전설비와 계통연계점 사이에 변압기가 있을 경우 이 변압기를 통과하는)발전설비 정격 전류용량 중 큰 값에 대한 고조파 전류의 비율을 의미하므로 측정결과가 기준을 만족함을 알 수 있다.

3.2.3 연계 운전 파형 분석

(그림 5~그림 9 참조)

4. 결론

태양광발전의 계통연계 도입기준에 대한 국내외 현황을 분석하였으며, 이를 적용한 태양광 발전의 배전선로에 연계 적용시 운전특성을 측정 분석 하였다. 연속운전 특성, 기동·정지 특성, 부하변동에 따른 측정파형에서 보듯이 태양광 발전은 계통에 영향 없이 안정적으로 운전되고 있음을 보여 주고 있다.

전압변동, 주파수 변동 및 고조파 왜율 분석에서 보여 주듯이 태양광 발전은 배전선로의 전력품질에 영향 없이 신뢰성 있는 운전을 지속함으로써 특 고압 실 계통 연계형 태양광발전의 안정성 및 신뢰성을 확인할 수 있었다.

향후, 특고압 연계형 태양광 발전시스템에 의한 배전선로의 전력품질, 배전선로 보호시스템과의 보호협조 문제, 발전시스템에 대한 계통 연계조건의 타당성, 기타 설비보호, 운영관리방식 등에 대하여 종합적인 실증검토를 장기적으로 진행할 예정이다. □

참고 문헌

- [1] 배전용전기설비 이용 규정, 한국전전공사, 2005.
- [2] 전기사업법 시행규칙, 산업자원부, 2005.
- [3] IEEE, Standard 929-2000, IEEE Recommended Practice for Utility Interface of Photovoltaic (PV) Systems.
- [4] IEEE P1547, Draft Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems.
- [5] IEEE Standards 519-1992, IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems.
- [6] 분산형전원 배전계통 연계 기술기준, 한국전력공사, 2005년 5월.
- [7] 120 kW급 태양광발전시스템의 실계통 연계운전 적용 및 평가 최종보고서, 산업자원부, 2006년 3월.
- [8] 김신섭 외, "단일용량 120 kW급 태양광발전용 PCS 개발", 전력전자 하계학술대회, 2005.

〈 저 자 소 개 〉



안교상(安敎相)

1964년 3월 20일생. 1990년 단국대 전자공학과 졸업. 1994년 동 대학원 전자공학과 졸업(석사). 현재 전력연구원 신재생에너지그룹 선임연구원.



황정희(黃正熙)

1977년 10월 30일생. 2003년 고려대 물리학과 졸업. 2005년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 전력연구원 신재생에너지그룹 위촉연구원.



임희천(林希天)

1956년 5월 15일생. 1982년 성균관대 기계공학과 졸업. 1994년 충남대학교 대학원 기계공학과 졸업(석사). 1999년 충남대학교 대학원 기계공학과 졸업(박사). 현재 전력연구원 신재생에너지그룹 수석연구원(을).



김신섭(金信燮)

1962년 9월 6일생. 1988년 한양대 전기공학과 졸업. 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 헥스파워시스템(주) 대표이사. 당 학회 조사이사.