특집 : 신재생에너지

태양광 발전 계통 연계형 PCS의 기술과 시험

김 영 록
(헥스파워시스템(주) 연구소장)

1. 서 론

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.

태양에너지는 태고로부터 현재까지 인류가 살고 있는 지구에 적당한 에너지를 끊임없이 공급하고 있다. 태양전지는 빛을 전기에너지로 변환하는 소자인 반도체를 사용하고 일찍부터 인공위성이나 등대 등의 전원으로 사용되었으며, 최근 고유가에 의해서, 더욱 더 주목받고 있는 태양광 발전은 신재생에너지 기술 중에서 가장 실용화에 근접하여 있고 운전이 쉬우며, 유지 및 보수가 간단하고 발전규모 선택이 자유롭다는 여러 가지 장점을 가지고 있어 미래의 자원고갈에 대처할 수 있는 유력한 대체에너지원으로 각광을 받고 있을 뿐 아니라 최근 문제되고 있는 환경문제 해결에도 부합할 수 있는 특징을 갖고 있다.

특히 계통에 연계되는 발전 시스템의 형태로서 최대전력을 발전하는 시간대가 하절기 피크 전력 소비시간대와 비슷하여 주택 및 건물의 지붕이나 옥상, 벽면 등에 설치함으로써 전력수급 불균형 해소에 기여할 수 있고 국토의 효율적 사용이 가능한 전력공급원으로 그 활용이 가능하다.

태양전지를 전원으로 하는 직 · 교류 전력변환시스템은 상용 전력계통과 병렬 접속하기 때문에 배전선의 상태 변화에 대한 추종성이 양호함과 동시에 계통의 주파수나 전압 변화에 대한 운용 능력, 계통 사고시에 적절히 대응하는 기능 및 자체 발생 고조파로 인한 통신유도 장애가 발생하지 않도록 하는 능력을 보유하여야 한다. 태양광발전 계통연계형 PCS의 성능 비교시에 기준이 되는 3가지 주요 기능과 시험 방법에 대하여 소개하기로 한다.

2. 태양광 발전의 개요

2.1 태양전지의 원리와 종류

태양전지는 그림 1과 같은 원리로 전기를 발생시키는 반도체 소자로서, 전기 전도를 지배하는 다수캐리어가 전자인 n형 반도체와 다수 캐리어가 양공(陽孔)인 p형 반도체를 접합(P-N접합)하여 만들어진다.

이 P-N 접합부에는 전계(電界)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 향

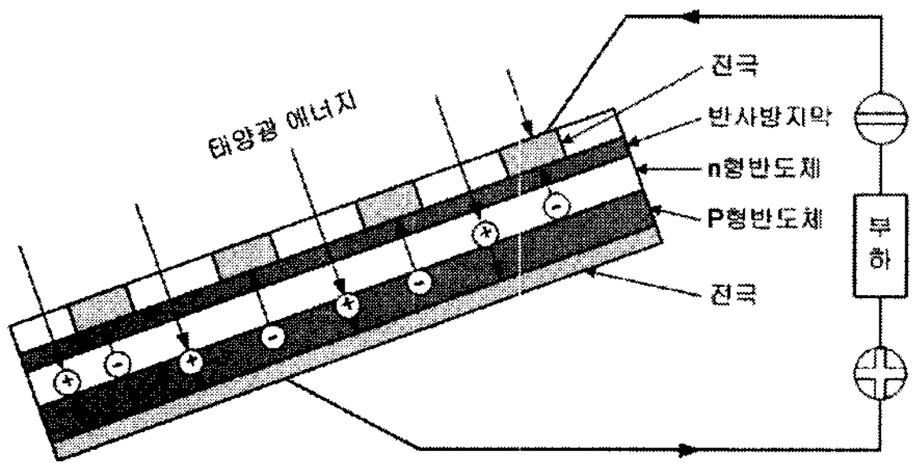


그림 1 태양전지의 원리

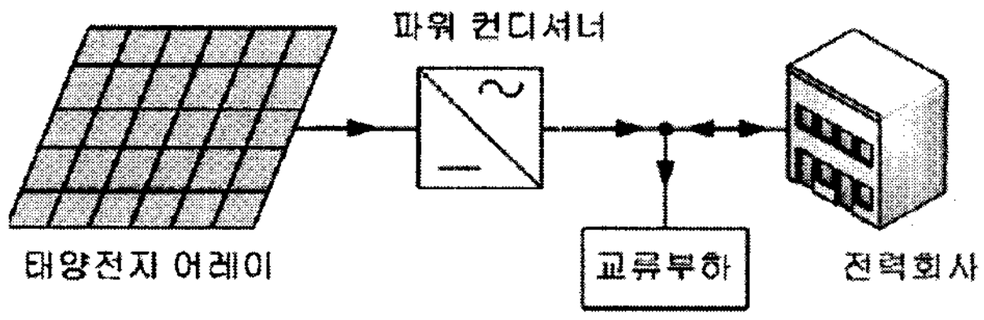


그림 2 계통 연계형 시스템

하여 흐르는 전류를 얻을 수 있다.

태양전지는 실리콘 반도체와 화합물 반도체로 크게 나누어진다. 실리콘 반도체는 다시 결정질 반도체와 비정질(非晶質: amorphous) 반도체로 나누어진다. 그리고 결정질 반도체는 단(單)결정 반도체와 다(多)결정 반도체로 구분된다. 실리콘 반도체는 결정체나 잉곳에서 태양전지용의 두께 수백 미크론의 박편(薄片)을 잘라 내기 때문에 실리콘 소비량이 많아진다. 그래서 두께 수 미크론 정도의 비정질, 또는 박막 다결정 태양전지 등 박막 태양전지가 연구개발 되고 있다. 실리콘 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.

2.2 계통 연계형 PCS

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.

계통연계형 태양광 발전 시스템은 태양전지를 전원으로 직류전력을 발전하여 직 · 교류 전력변환장치를 이용하여 상용전력계통과 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 태양광발전시스템이 배전선과의 연계운전 시에 계통의 정전 또는 사고 발생시 태양광시스템의 발전출력의 역충전에 의하여 일부 계통에 부분적인 단독운전을 방지할 수 있는 보호검출 회로가 필요하다.

태양광발전 계통연계형 인버터의 종류는 변압기와 회로구성에 따라 다음의 세 가지로 구분된다.

① 저주파 절연 변압기 내장형
② 무변압기(Transformerless)형
③ 고주파 링크형

3. PCS에 요구 되는 성능과 기능

3.1 최대출력추종 제어기술

태양전지의 출력은 일사량, 표면온도 등의 환경에 따라 동작전압과 전류의 상태를 나타내는 I-V특성이 비선형적으로 변화하는 비선형특성을 가지며, 특성곡선상의 전압-전류의 동작점이 결정되면 이에 따라 출력량이 결정된다. 계통연계형 전력제어기는 태양전지에서 발전된 전력을 최대로 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(Fuzy)제어, 적응(Adaptive) 제어등의 비선형제어기법들의 적용이 시도되고 있다.

3.1.1 최대 출력점 추종 제어 성능 시험

최대 출력점 추종의 성능 평가는 먼저 태양 전지 모듈의 종

표 1 정상 상태 MPPT시험 조건

Test	Vdc	F.F	PCS입력 전력				
A	105%Vmin	0.55	10%	25%	50%	75%	100%
B	Vnom	0.55					
C	95%Vmax	0.55					
D	105%Vmin	0.68					
E	Vnom	0.68					
F	95%Vmax	0.68					
G	105%Vmin	0.8					
H	Vnom	0.8					
I	95%Vmax	0.8					

(1000W/m2, 25℃, STC)
단) 박막형 태양전지의 F.F = 0.55 단결정 혹은 다결정 태양전지 F.F = 0.68
고효율 결정질 태양 전지의 F.F = 0.8

표 2 일사량 패턴

Pattern	GL[W/m²]	GL[W/m²]	Tr[S]	Tf[S]
1	200	800	5	5
2	200	800	3	3
3	200	800	2	2
4	200	800	1	1
5	200	800	0.5	0.5

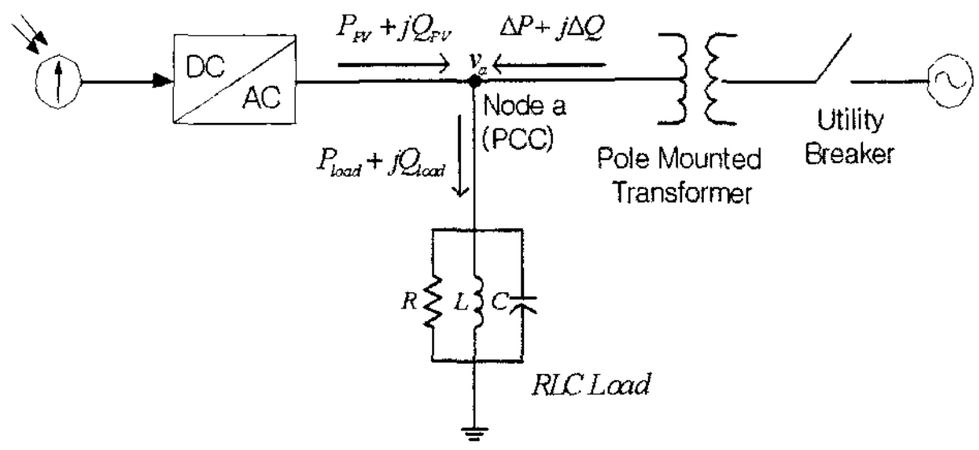


그림 3 태양광발전 시스템과 계통의 전력흐름

류 즉 F.F(Fill Factor,개방전압과 단락전류의 곱에 대한 최대 출력 전압과 전류에 대한 비율)에 의한 3가지 종류의 I-V 특성 곡선을 시험하고 일사량이 일정한 경우와 변동에 하는 경우를 측정한다.

3.1.1.1 정상 상태 추종시험

일사량이 일정한 경우, 각 종류의 태양 전지를 모듈에서 일사량에 의한 PCS의 최대점 최대점 추정 능력을 표 1과 같이 구분하여 측정한다.

현재의 대부분의 인버터들은 95%이상의 추종능력을 보여주고 있다.

3.1.1.2 과도 상태 추종 시험

우천시 혹은 구름의 이동에 따라서 일사량은 변동이 된다. 일사량의 변동시에도 PCS는 가능한 전력의 손실 없이 발전해야만 한다. 그러므로 일사량이 변동시의 최대 출력점 추종 능력이 발전량을 좌우한다고 할 수있다. 표 2와 같이 일사량이 주어진 시간에 상승시 혹은 하강시에 정지하는 등의 이상동작없이 정지하여야 한다.

3.2 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 지나는 사람들이 계통의 전원이 차단된 것으로 인식하고 접근할 경우 이들의 안전에 위험을 초래한다.

그림 3은 태양광발전 시스템과 계통간의 전력의 흐름을 나타내는데, 태양광발전 시스템, 수용가 그리고 스위치(퓨즈, 재폐로 차단기 등)로 구성되어 있다. 여기서 태양광발전 시스템, 계통 그리고 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_a라고 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 ΔP, 무효전력 ΔQ는 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 $\Delta Q=Q_{PV}$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 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, 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.

3.2.1 단독운전 검출 방법

단독운전 현상이 일어났을 때 태양광발전 시스템을 차단하는 단독운전방지기능 검출기법으로서는 수동적 방식과 능동적 방식으로 크게 분류할 수가 있으며, 수동검출법은 단독운전 시 전압, 주파수를 검출하여 허용범위를 벗어나면 단독운전으로 판단하는 검출방법으로서, 단순히 계통의 변화를 이용하여 단독운전 여부를 판단하는 방법이다.

수동검출법에는

㉮ 전압위상 도약검출 방식
㉯ 3차 고조파 전압왜율 급증 검출방식
㉰ 전압/주파수변화율 검출방식

능동검출법은 태양광발전 시스템의 인버터 출력에 변동을 주어 단독운전시 능동적으로 대처하여 단독운전 여부를 판단하는 방법으로

㉮ 주파수 Shift방식
㉯ 무효전력 변환방식
㉰ 유효전력 변동방식
㉱ 부하 변동방식 등이 있다.

국내외의 PCS업체는 수동적 방식과 능동적 방식의 각각 하나의 방식 이상을 조합하여 검출기법으로 사용하는 경우가 많다.

3.2.2 단독운전 검출 성능 시험

최근 IEC의 TC82에서는 단독운전 검출 시험에 대한 표준을 준비하여 있고 제정될 예정이다. 단독운전 검출 시험 방법인 IEC62116의 시험 방법을 소개하기로 한다.

먼저, 시험 조건을 PCS의 입력 전압 조건에 따라서 표3과 같이 3가지로 분류하고, 각 입력 전압의 조건따른 출력시, 부하의 조건을 달리하여 전압과 주파수의 설정 범위를 벗어나서 정지하는 단독운전 검출 시간을 측정한다. 전압의 주파수 설정 범위는 PCS 제조사의 설정값 혹은 각 나라의 기준에 따라서 설정되고 부하의 공진 조건은 Qf = 1.0 ± 0.05이다.

$$Q_f = R\sqrt{\frac{C}{L}}$$

단, 입력 전압은 PCS의 동작 범위가 최소 X전압과 최대 Y전압 사이인 경우, 90% = X + 0.9*(Y-X) 이다.

시험 조건 A의 경우 표와 같이 유,무효 전력에 대한 편차율을 조정하여 각각의 상태에서 검출 시간을 측정하고 시험 조건 B와 C는 표에서 무효 전력의 편차율만을 조정하여 검출 시간을 측정한다.

3.3 변환 효율 측정

표 3 단독운전 검출 시험 조건

조건	출력 전력	입력 전압
A	최대(100%)	〉90%
B	50~60%	50%
C	25~33%	〈10%

표 4 한국의 전압과 주파수 설정치와 검출 시간

	설정치	검출시간
과전압	기준전압의 110%	0.5 s
부족전압	기준 전압의 88%	0.5 s
과주파수	59.3Hz	0.5 s
부족주파수	60.5Hz	0.5 s

표 5 시험 조건 A(출력 100%)에서 부하 편차율

부하 편차율(유효,무효부하)				
-10, +10	-5, +10	0, +10	+5, +10	+10, +10
-10, +5	-5, +5	0, +5	+5, +5	+10, +5
-10, 0	-5, 0		+5, 0	+10, 0
-10, -5	-5, -5	0, -5	+5, -5	+10, -5
-10, -10	-5, -10	0, -10	+5, -10	+10, -10

표 6 시험 조건 B & C에서 부하 편차율

부하편차율(유효,무효부하)
0,-5
0,-4
0,-3
0,-2
0,-1
0, 1
0, 2
0, 3
0, 4
0, 5

태양광 발전 PCS의 중요한 선택 기준 중의 하나는 바로 효율이라고 생각할 수 있으며 최대의 효율의 바로 기술력의 상징이 될 수 있다. 전력 변환 장치에서의 소비 전력을 최소화

표 7 입력 전력, 전압, 계통 전압에 따른 측정 조건

Test	V_{dc}	V_{ac}	PCS입력 전력 레벨[%]						
			100	75	50	30	20	10	5
A	V_{nom}	V_{nom}							
B	V_{max}	V_{nom}							
C	V_{min}	V_{nom}							
D	V_{min}	102% V_{nom}							
E	V_{max}	98% V_{nom}							

표 8 효율 계산을 위한 가중치

Factor	Power Level	가중치	
		고일사량	저일사량
F_1	5%	0.00	0.03
F_2	10%	0.04	0.06
F_3	20%	0.05	0.13
F_4	30%	0.12	0.10
F_5	50%	0.21	0.48
F_6	75%	0.53	0.00
F_7	100%	0.05	0.20

하기 위해서 소프트 스위칭 방식의 도입과 인덕터와 변압기의 소재개발이 필요하다고 할 수 있다. 태양광 발전용 PCS는 기타의 전력 변환 장치와 달리 일사량의 변동 측 입력 전력의 변동, 계통 전압의 변동, 입력 전압의 변동에 따라서 효율이 변동하게 된다. 따라서 각각의 상태에 따라서 효율을 측정하여 가중치에 따라서 효율을 표시하는 방법이 필요하다.

일출에서 일몰까지의 일사량을 분석하면 아래와 같이 가중치를 도입한 효율을 도입할 수 있다.

$\eta Wtd = F1\eta 5 + F2\eta 10 + F3\eta 20 + F4\eta 30 + F5\eta 50 + F6\eta 75 + F7\eta 100$

F1,F2,F3, ... - 각 출력에서의 가중치,

$\eta 5, \eta 10, \eta 20, \eta 30, \eta 50$ ... - 각 출력에서의 효율,

표 8에서 저일사량 가중치는 현재 유럽에서 사용하고 있는 유로 효율에 해당한다. 미국의 남부 지역은 고일사량의 가중치를 이용하여 효율을 표시한다.

가중치 효율을 이용하면 태양광 발전 시스템의 설계자와 소비자가 태양광 어레이의 설치용량과 설치 장소의 일사량을 이용하여 시스템의 발전량을 쉽게 산출 할 수 있는 이점이 있다.

4. 결 론

지금까지 태양광발전 시스템의 기술적인 측면에서의 태양광발전과 최대출력추종제어의 개념과 성능 평가 방법과 계통에 태양광발전 시스템을 연계시 시스템 보호를 위한 단독운전 검출 방법과 시험 방법, 그리고 전력 변환 장치의 효율을 대하여 설명하였다.

현재까지의 태양광 발전용 계통연계형 인버터의 국내기술 현황은 기본적인 기술은 확립되어 있으나 신뢰성, 효율, 저가화, 등은 외국과 기술격차가 존재한다. 따라서 태양광 PCS기술의 향상을 위해서는 정확한 시험 방법을 통한 기술개발이 필요하다고 할 수 있다.

참 고 문 헌

[1] "태양광 PCS 기술 세미나", 신재생에너지센터, 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.

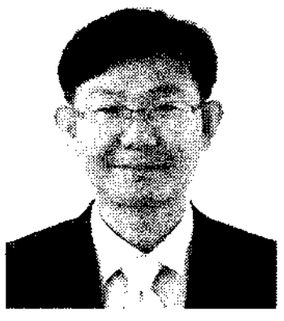
[5] New Energy and Industrial Technology Development Organization, Homepage, http://www.nedo.go.jp

[6] "주택보급형 태양전지 양산기술 및 계통연계 3kW 태양광시스템 상용화기술개발(최종보고서)" 산업자원부, 2005

[7] IEC 62116(FDIS) Test Procedure of Islanding Prevention Measures for Utility-Interconnected Photovoltaic Inverters

[8] Sandia Inverter Performance Test Procedures

〈 필 자 소 개 〉



김영록

1969년 4월 29일생. 1991년 충남대 전기공학과 졸업. 1992년 12월~1998년 6월 LG산전 연구소. 1998년 9월~2001년 7월 지오닉스. 2001년 10월~현재 헥스파워시스템 연구소장 .