

태양광발전시스템의 설치 현장 출력 측정 방법



글_ 김응상
한국전기연구원 신재생에너지시스템
연구센터 팀장/책임연구원

1. 필요성 및 배경

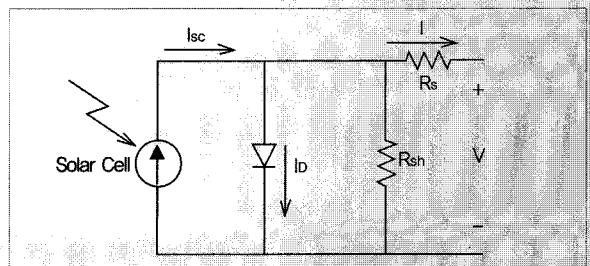
화력발전 원자력발전 등 기존의 발전시스템은 입력인 연료의 공급에 따라서 출력이 변동하나 태양광발전시스템은 햇빛이라는 자연조건에 따라서 출력이 수시로 변동하기 때문에 태양전지 제조사가 제시하는 규격은 표준 시험조건(즉, STC, Air Mass 1.5, 일사량 1000[W/m²], 온도 25°C기준)에서 시험한 성능 규격을 제시하고 있다. 그러나 적용현장에 설치된 태양전지는 인위적으로 표준 시험조건을 만들어 줄 수 없기 때문에 제조사가 제시한 성능 규격이 제대로 나오는 지 여부를 정확하게 확인이 불가능하다. 따라서 설치현장에서 자연조건에서 측정된 출력에 다 태양전지 제작사에서 제시한 온도 및 일사량 특성곡선에서 추출된 보정계수를 적용하여 보정 출력을 산정해서 보정 출력이 제조사에서 제시한 규격에 부합하는 지 여부를 판단하기 위해 설치 현장에서의 정확한 출력 측정 방법을 검토하고자 한다.

2. 태양광 현장 출력 측정 방법

2.1 태양전지 등가회로

태양전지는 태양광발전 시스템의 발전원으로써 발전시스템의 용량을 결정하는 중요한 요소로 태양전지의 물리적인 구조와

태양전지 모델링을 위한 등가회로와 수학적인 모델에 대하여 설명하면 다음과 같다.



[그림 1] 태양전지 등가회로

태양전지 등가회로는 그림 1과 같으며, 태양전지 수리모형은 이 등가회로를 바탕으로 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$I = I_{sc} - I_D - I_{SH} = I_{sc} - (\exp[\frac{V + IR_s}{nV_T}] - 1) - \frac{V + IR_s}{R_{SH}} \quad (1)$$

여기서, I_{sc} = 태양전지 단락전류 [A]

I_D = 다이오우드 전류 [A]

I_{SH} = 병렬저항 전류 [A]

I_o = 다이오우드 포화전류 [A]

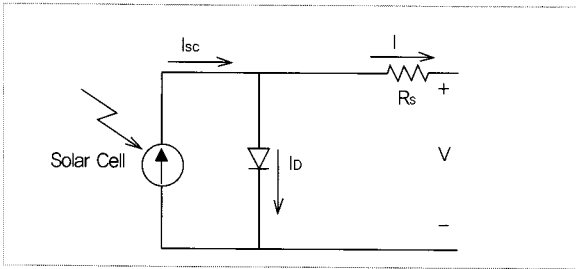
V = 부하전압 [V]

R_s = 직렬저항 [Ω]

R_{SH} = 병렬저항 [Ω]

- n = 다이오우드 이상 정수 (1~2)
- V_T = 열 전위차 [V]. 단, $V_T = (kT/q)m$
- κ = 볼츠만 상수 ($1.38e-23$ [J/K])
- T = 절대온도 [K]
- q = 쿨롱 상수 ($1.6e-19$ [C])

병렬저항 R_{sh} 는 수백 Ω 에서 수k Ω 이상의 상대적으로 아주 큰 값을 가지므로, 병렬저항을 무시하여 해당 선로를 개방상태로 간주 할 수 있다. 본 논문에서는 그림 2와 같이 병렬 저항을 무시하여 등가회로를 좀 더 간략하게 구성한 등가회로 모델을 이용하였다.



【그림 2】 간략화된 태양전지 등가회로

그림 2의 등가회로에서 다음과 같은 수리 관계식들을 얻을 수 있다.

$$I = I_{sc} - I_0 \left(\exp\left[\frac{V + IR_s}{nV_T}\right] - 1 \right) \quad \text{----- (2)}$$

$$V = nV_T \ln\left(\frac{I_{sc} - I}{I_0} + 1\right) - I \cdot R_s \quad \text{----- (3)}$$

$$I_{sc} = I_{sc0} \left(\frac{S}{1000}\right) + J(T - T_{ref}) \quad \text{----- (4)}$$

여기서, T_{ref} = 기준온도 (=298 [K])

I_{sc0} = 기준온도에서의 단락전류 [A]

S = 일사량 [W/m²]

J = 단락전류 온도계수 [A/K]

$$I_0 = I_{sc} \frac{1}{\exp\left[\frac{V_{oc}}{nV_T}\right] - 1} \approx I_{sc} \cdot \exp\left[-\frac{V_{oc}}{nV_T}\right] \quad \text{--- (5)}$$

$$I_0 = A T^r e^{\left(-\frac{E_g}{nKT}\right)} \quad \text{----- (6)}$$

여기서, V_{oc} = 태양전지 개방전압 [V]

A = 포화전류 온도계수 [A/K]

r = 온도의존 인자 (일반적으로 3)

E_g = band 에너지 갭 [eV], 1 eV = $1.6e-19$ Joul

$$E_g = 1.16 - 7.02 \times 10^{-4} \frac{T^2}{T - 1108} \text{ [eV]} \quad \text{--- (7)}$$

식2-7은 각각 태양전지에서의 출력전류, 출력전압, 일사량과 온도에 대한 태양전지 단락전류, 다이오우드 포화전류, 포화전류의 온도에 대한 관계식 및 에너지 갭의 온도에 대한 관계식이다. 일반적으로, 제조업체에서 제공하는 태양전지 모듈 사양서 에서 제시된 규격에서 얻을 수 있는 기본 데이터는 표 1에서와 같이 한정되어 있으며, 이 규격의 정보로부터 적절한 태양전지 모델에 필요한 모든 파라미터 들을 직접 얻을 수 없다. 따라서 구할 수 없는 파라미터의 경우 기본 데이터를 바탕으로 유추하여야 한다.

【표 1】 A사에서 제공하는 태양전지 모듈

	SM-75	SM-80
Maximum Power(Pmax)	75Wp	80Wp
Voltage at Pmax(Vmp)	17.3V	17.6V
Current at Pmax(Imp)	4.35A	4.55A
Warrented minimum Pmax	70W	75W
Short-circuit current(Isc)	4.75A	4.8A
Open-circuit voltage(Voc)	21.8V	22.1V
Temperature coefficient of Isc	(0.065±0.015)%/°C	
Temperature coefficient of Voc	-(80±10)mV/°C	
Temperature coefficient of Power	-(0.5±0.05)%/°C	
NOCT	47±2°C	
Maximum system voltage	600V	

식 2에서 7까지는 태양전지 모듈을 바탕으로 전지 모듈의 관계식이며, 태양전지 array에서의 특성을 구현하기 위해서는 모듈의 직병렬 연결 구조에 맞추어 모듈의 직렬 연결 수 N_s 와 병렬 연결 수 N_p 를 포함하여 재구성한다.

태양전지 어레이 변수 및 데이터를 다음과 같이 구할 수 있다.

• 어레이 출력전류 : $I_{AF} = N_p I$ ----- (8)

• 어레이 단락전류 : $I_{SCA} = N_p I_{sc}$ ----- (9)

• 어레이 단자전압 : $V_A = N_s V$ ----- (10)

• 어레이 개방전압 : $V_{OCA} = N_s V_{oc}$ ----- (11)

• 어레이 직렬저항 : $R_{SA} = (N_s/N_p) R$ ----- (12)

식8에서부터 식 12까지를 식 2에 대입하면 식 13과 같고 이를 정리하면 식 14와 같은 태양전지 어레이의 특성 식을 얻을 수 있다. 또한, V_A 에 대하여 정리하면 식 15와 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{I_A}{N_P} = \frac{I_{SCA}}{N_P} - I_0 \left(e^{\frac{V_A + I_A \cdot N_P \cdot R_{SA}}{n N_S V_T}} - 1 \right) \quad \text{---(13)}$$

$$I_A = I_{SCA} - N_P I_0 \left(e^{\frac{V_A + I_A R_{SA}}{n N_S V_T}} - 1 \right) \quad \text{-----(14)}$$

$$\therefore V_A = n N_S V_T \ln \left(\frac{I_{SCA} - I_A}{N_P I_0} + 1 \right) - I_A R_{SA} \quad \text{---(15)}$$

2.2 온도 및 일사량 측정 방법

태양광발전시스템은 출력이 태양빛과 온도에 많은 영향을 받기 때문에 일사량과 온도 측정이 대단히 중요하다. 일사량 데이터는 일사량을 매 10초마다 샘플링하여 누적하고, 매 1분마다 1분전 누적 값과 차를 구해 1분간 전천 일사량 값으로 한다. 1분간 전천일사량에서 매 10분간 전천일사량과 매 시간 전천 일사량을 구하는 방법을 사용한다.

2.3 출력 측정 및 성능 보정 방법

본 논문에서의 출력 측정과 성능 보정 방법을 설명하고자 다음 규격으로 태양광발전시스템이 설치되어 운전되고 있다고 가정한다.

가. 가정

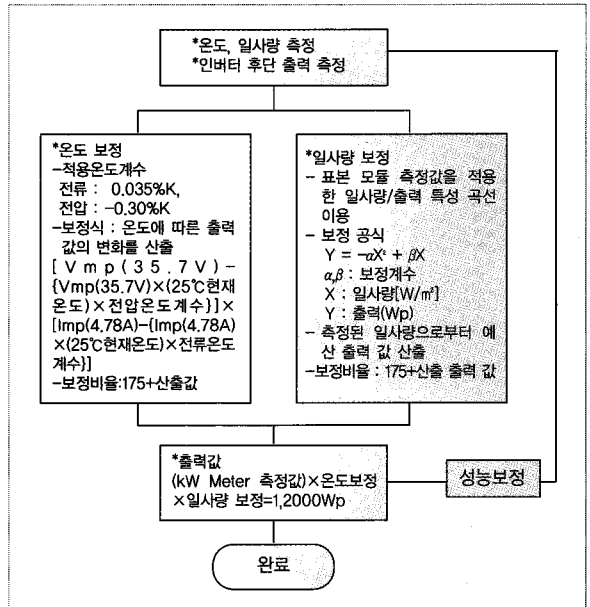
1) 중대용량 1200kW급 태양광발전시스템을 설치한다.

2) 시스템 규격

- 태양전지 175W(6880장, 16직렬, 430병렬, 개방전압 $V_{mp}=35.7V$, 단락전류 $I_{mp}=4.78A$)
- 정확한 총 용량은 1,204kWp
- 인버터 200kVA 6대(효율 95%이상)
- 수변전 설비 효율 97%이상(승압변압기, 차단기, 배전반 등 주변설비 종합)
- 배선효율 92% 이상
- 시스템 종합효율 84.7%이상(인버터, 수변전, 배선 종합 효율)

나. 보정계수 결정

출력 보정 및 성능을 검증하고자 직류를 발생시키는 태양전지의 단락전류 ISC는 모듈에 입사하는 일사량과 온도상승에 비례하여 증가하며, 대개 그 비율은 $0.1\%/^{\circ}C$ 정도이다. 개방전압 VOC는 일사량에 지수 함수적으로 비례하며, 반면에 온도상승에 따라 ISC에 비해 급속하게 감소하는 경향을 보인다. ($-2.3mV/^{\circ}C$ 정도) 따라서 모듈의 최대 전력 값은 온도상승에 따라서 통상 $0.4\%/^{\circ}C$ 의 비율로 감소하게 된다. 이러한 단락전류와 개방전압의 온도와 일사량에 대한 관계로부터 어느 순간 일정 환경 조건에서의 전압, 전류, 전력 등 모듈 정수 값을 추정하는 것이 가능하다.



[그림 3] 온도 및 일사량 보정 흐름도

따라서 설치된 태양광 어레이의 출력 성능을 평가하기 위해 일사량이 가장 표준 시험조건(STC)에 가깝다고 생각되는 정오에서 오후 2시 사이의 시간을 택하여 다음과 같은 방법으로 태양광 어레이의 실제 성능을 표준 시험조건 기준으로 보정하여 검증한다.

1) 시험기 설치

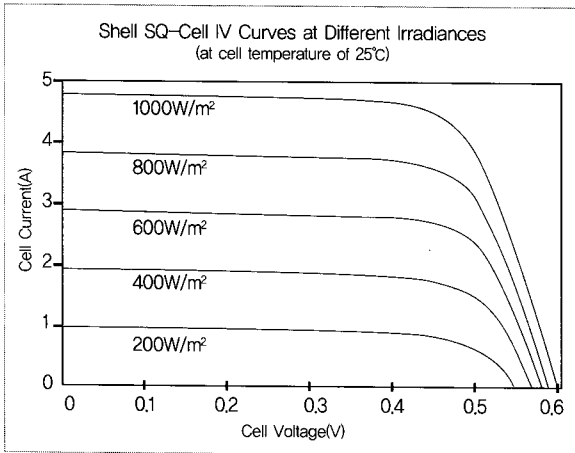
- 온도센서 설치 : 태양전지의 온도를 측정하기 위해서 모듈 후면부에 온도센서를 부착하고 테이프 등을 이용하여 고정시킨다.
- 일사량 센서 설치 : 모듈 면에 수직으로 입사하는 일사량

을 측정해야 하므로 일사량 센서를 모듈 경사면과 같은 각도로 부착하여 고정시킨다.

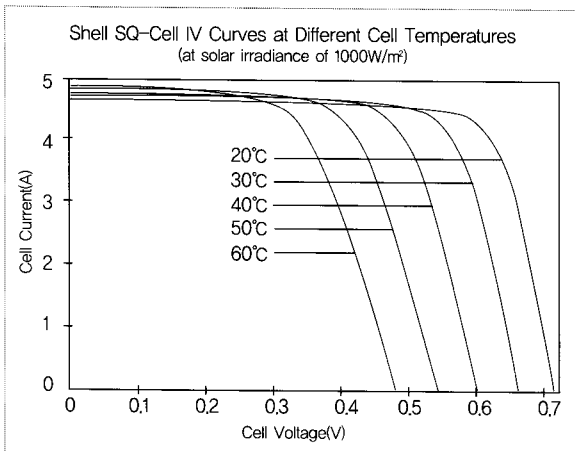
2) 태양광 어레이 설치 현장에서 어레이 테스터를 이용하여 일사량 및 온도를 측정하고 같은 시점에서 인버터 후단의 출력 값을 파워미터로 측정한다.

3) 일사량 보정

- 표본 모듈 측정값을 적용한 일사량/출력 특성 곡선 이용
 - 보정 공식
- $$Y = -\alpha X^2 + \beta X$$
- X : 일사량[W/m²] Y : 출력(Wp) α,β : 보정계수
- 측정된 일사량으로부터 예산 출력 값 산출
 - 보정비율 : 175+산출 출력 값



【그림 4】 일사량 변화에 대한 I-V 특성



【그림 5】 온도변화에 대한 I-V 특성

4) 온도 보정

- 적용온도계수 전류 : 0.035%/K, 전압 : -0.30%/K
 - 보정식 : 온도에 따른 출력 값의 변화를 산출
- $$[V_{mp}(35.7V) - (V_{mp}(35.7V) \times (25^\circ C - \text{현재온도}) \times \text{전압 온도계수})] \times [I_{mp}(4.78A) - (I_{mp}(4.78A) \times (25^\circ C - \text{현재온도}) \times \text{전류 온도계수})]$$
- 보정비율 : 175 + 산출 출력값

5) 태양광 어레이 출력 값 판정

표준 시험조건 환산 태양전지 출력 값 =(인버터 후단 출력 값 × 일사량 보정율 × 온도 보정율)/인버터 효율+DC측 전력손실분 ≥ 1200kWp(정격출력)

다. 시스템 파라메타 결정

1) 승압변압기 용량 계산

발전 전원의 최대 발전 전력에 태양전지 설비용량 표 3를 상회하는 정격의 변압기를 선정함.

【표 2】 태양전지의 설비 용량

구분	공종명	부하명	설비용량 (kVA)	수용율(%)	최대수용전력 (kVA)
송전용	승압용 변압기	태양광 발전 (175W*6,880EA)	1,204	98(효율)	1,180

∴ 신설 변압기는 3ø 1,250[kVA] 380V/22.9kV를 선정함

2) 차단기(VCB) 차단 용량 계산서

가) 고려 사항

차단기 선정에는 정격전압, 정격전류 및 정격 차단전류를 고려해야 하며, 각 차단기 제작사에서 제시한 자료를 참조한다.

나) 차단기 정격전압 선정

$$\text{정격전압[kV]} = \text{공칭전압} \times 1.2 \div 1.1$$

각 공칭전압은 22.9kV 차단기 정격전압은 25.8kV 가 된다.

다) 차단기 정격전류 계산

계산된 발전기 정격전류 값에 과부하 내량을 고려하여 선정한다.

$$\text{정격전류[A]} = \text{발전기 정격전류} \times 1.25$$

발전기 정격전류 계산식 ;

$$I_n[A] = P \div (\sqrt{3} \times V \times PF)$$

I_n : 발전기 정격전류

V : 정격전압

P : 발전기 용량(kW)

PF : 발전기 역률(0.8)

$$\begin{aligned} \text{※ 차단기 정격전류} &= (1200\text{kW} \div (\sqrt{3} \times 22.9\text{kV} \times 0.8)) \times 1.25 \\ &= 47.3[\text{A}] \end{aligned}$$

∴ 차단기 제작사 생산품중 정격전류가 630[A]인 제품을 선정한다.

라) 차단기 차단전류 계산

차단기의 차단전류를 선정 시, 단락전류를 계산하여 단락 전류를 차단할 수 있는 용량의 차단기를 선정한다.

단락전류 계산식 ; $I_s[A] = 100 \div \%Z \times I_n$

$\%Z$: 계통의 합성 임피던스

I_s : 단락전류

I_n : 발전기 정격전류

3) 태양광발전시스템 차단전류 계산

가) 내연 발전소 조건

a) 발전 용량 : 1200 kW(1.2MVA) * 1SET = 1.2MW

b) 전압 : 22,900 V

c) 발전기 정격전류 : 47.2 A

d) 주 변압기 : 1250 kVA, 0.380/ 22.9kV

e) % 임피던스: 발전기(10%), 주 변압기(6.0%), 선로 임피던스는 무시

나) % 임피던스 계산

a) 기준용량을 발전 용량인 1.2MVA로 정하고 발전기 및 변압기의 임피던스를 기준 용량에 대비하여 환산한다.

$$\%XG1(\text{Gen.}) = 1.2 / 1.25 \times 10 = 9.6$$

$$\%XT(\text{주 변압기}) = 1.250 / 1.250 \times 6 = 6.0$$

b) 위에서 구한 주요 기기에 대한 %임피던스를 기준으로 합성임 피던스를 구하면 $\%Z = 9.6 + 6.0 = 15.6$

다) 단락전류 계산

위에서 구한 %Z를 기준으로 단락전류를 계산한다.

$$\text{※ 단락전류} = 100 \div 15.6 \times 47.3 = 0.303[\text{kA}]$$

∴ 차단기 제작사 생산품 중 정격 차단 전류가 12.5[kA]인 제품을 선정한다.

4) 차단기 차단용량 계산

계산된 차단용량 이상의 차단기를 선정한다.

$$\text{단락용량 계산식 : } P_s = \sqrt{3} \times V \times I_s$$

P_s : 차단용량

V : 정격전압

I_s : 차단전류

$$\text{※ 차단기 차단 용량} = \sqrt{3} \times 25.8\text{kV} \times 303\text{A} = 13.539[\text{MVA}]$$

∴ 차단기 제작사 생산품 중 정격 차단 용량이 520[MVA]인 제품을 선정한다.

5) 차단기 선정

제시한 차단기 선정 기준을 근거로 하여 선정된 차단기의 사양은 다음과 같다.

가) 정격전압 : 22,900 [V]

나) 정격전류 : 630 [A]

다) 차단전류 : 12.5 [kA]

라) 차단용량 : 520 [MVA]

2.4 출력보정 및 출력성능 검증

가. 시스템 규격 충분조건

1) 태양전지 출력보정 조건

현장 시험조건(실제 측정 일사량, 어레이 표면온도)하에서 출력된 값을 표준 시험조건 (STC 일사량 1000[W/m²], 대기질량정수 AM 1.5, 어레이표면온도 25℃) 으로 보정하여 인버터 주변압기 및 배선 효율을 고려하여 산출하는 것을 원칙으로 한다.

2) 시스템 성능 보증 조건

본 논문에서 가정한 시스템의 경우 태양광발전시스템의 성능 보증은 다음 표 4와 같이 시스템 종합 효율은 84.7% 이상이 되어야 한다.

나. 출력 보정 방법

【표 3】 태양광발전 시스템의 성능 보증 조건

보증 항목	시험 조건	보증 치
태양광 어레이 최대출력 보증	최대 출력 (100%)	1,200kWp이상
시스템 효율 보정	발전 모드 인버터 효율	95% 이상
	수변전 설비 효율	97% 이상
	배선 효율	92% 이상
	시스템 종합 효율	84.7% 이상

1) 기준 조건 : 표준 시험조건

- 보정 일사량 : 기준 $1,000[W/m^2]$ 에서의 출력량 대비 시험시 일사량에 의한 출력량 대비하여 보정한다.
- 보정 온도 : 태양전지 모듈의 출력은 모듈 표면온도 $1^\circ C$ 변화에 따라 출력량 대비하여 보정한다.

2) 일사량 및 온도에 의한 태양전지 모듈 출력 특성

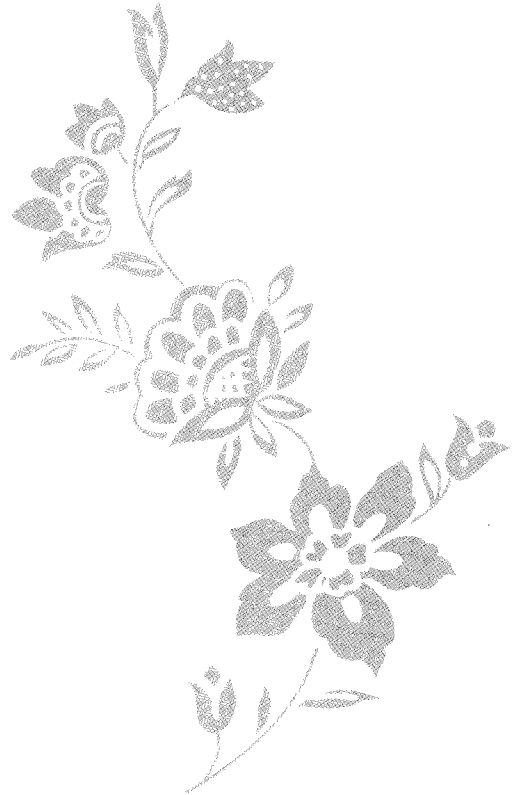
태양전지 출력특성은 온도와 일사량에 따라서 전압과 전류가 변하기 때문에 표준 시험조건에 대해서 위에 제시한 보정 계수 결정 방법에 따라서 온도 및 일사량에 대한 보정계수를 결정하고 실제 측정시에는 일조건이 좋고 표준 시험조건에 가장 근접한 정오부터 오후 2시 사이에 온도, 일사량 및 출력을 측정한 후 온도 및 일사량 보정계수를 적용하여 보정 출력을 계산하도록 한다.

다. 측정 출력 판정

현장에서 측정된 태양광발전 출력에 온도 및 일사량에 대한 보정계수를 적용한 성능보증 출력(p)이 태양광발전시스템의 계통연계점 정격출력인 1200kWp의 인버터, 변압기 및 배선 등의 전체 손실을 제외한 종합출력 84.7%이상이 되면 합격한 것으로 판정한다.

3. 요약

본 고에서는 현장에 설치된 태양광발전시스템의 출력 측정 방법을 제시 하였다. 태양광발전시스템은 햇빛이라는 자연조건에 따라서 출력이 수시로 변동하기 때문에 태양전지 제조사가 제시하는 규격은 제작시에 태양전지를 표준 시험조건(즉, STC, Air Mass 1.5, 일사량 $1000[W/m^2]$, 온도 $25^\circ C$ 기준)에서 시험한 성능 규격을 제시하고 있다. 그러나 적용현장에 설치된 태양전지는 인위적으로 표준 시험조건을 만들어 줄 수 없기 때문에 출력을 측정하면 제조사가 제시한 성능 규격이 제대로 나오는지 여부가 관심사다. 그렇기 때문에 설치현장에서 자연 조건에서 측정된 출력에다 태양전지 제작사에서 제시한 온도 및 일사량 특성곡선에서 추출된 보정계수를 적용하여 보정 출력을 산정해서 보정 출력을 토대로 제조사에서 제시한 규격에 부합하는 지 여부를 판단할 수 있는 방법을 제안하였다. ❖



참고문헌

- [1] L Zhang, A Al-Amoudi, Yunfei Bai, "Real-time Maximum Power Point Tracking for Grid-Connected Photovoltaic Systems", Power Electronics and Variable Speed Drives, 18-19 September 2000, Conference Publication No. 475.
- [2] Minwon Park and In-Keun Yu, "A Novel Real-Time Simulation Technique of Photovoltaic Generation Systems Using RTDS", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 19, No. 1, March 2004.