

노후 태양광모듈 스트링의 부정합 해소를 위한 전압보상기에 관한 연구

A Study On The Voltage transfer compensator for solving
mismatch of oldage PV module string

나정승^{1*}, 송광철²

Jeong-Seong Na, Gwang-Cheol Song

〈Abstract〉

In this paper, we propose the performance enhancement of solar individual string power generation system using booster power control for voltage compensation. The proposed control method determines the variable voltage for the compensator using direct power control (DPC) modeling applied to motion factor estimation. This method also maintains excellent dynamic response to the characteristics of direct power control (DPC) by calculating the mismatch ratio of the arrestered PV modules. The validity of the proposed algorithm is verified through simulation and experiments

Keywords : Oldage PV(PhotoVotanic)string, mismatch solution, Voltage compensator, DPC(Direct Power Control), lot Technology

1* 정회원, 교신저자, 호남대학교, 조교수
E-mail: naj@s@honam.ac.kr

2 정회원, 주저자, (주)엘탑 대표이사
E-mail: ltop9279@gmail.com

1* Dept. of Electrical Engineering, Honam University,
Professor.

2 CEO of LTOP Company Ltd.

1. 서론

태양광 발전소는 PV(PhotoVotanic)모듈을 직렬 연결한 스트링과 각 스트링을 병렬 연결하여 운전하고 있다. 외부환경(자외선, 고온, 고습, 일교차)에 영향을 받아 태양광 모듈의 열화(붕괴재변색, 백시트 박리, 리본와이어부식, 태양전지크랙)가 발생하고 이에 따라 개별 스트링의 전압, 전류 특성이 달라진다. 태양광 발전용 인버터는 각 스트링의 전압, 전류를 고려하여 최대전력추종 제어를 시행하여 최대전력을 생산한다. 그런데 열화된 모듈이 포함된 개별 스트링의 전압, 전류 특성이 저하되면 MPPT제어 시 전체 전력생산량이 급격히 감소한다. 따라서 IoT기반 센서를 이용하여 열화된 모듈이 포함된 스트링을 찾아 전압을 보상해주는 장치를 삽입하여 MPPT제어 시 전체 전력생산량이 항상 최대가 되도록 구현한다.

특히 PV모듈의 노후로 최대 전력점의 전압과 전류가 모듈간에 서로 다르면 이들이 직렬 연결된 스트링에서 전류는 동일하므로 모든 모듈이 최대 전력점에서 동작하는 것이 불가능하게 된다. 따라서 모듈에서의 부정합 손실, 즉 모듈 최대 전력과 실제 발생하는 전력의 차이가 발생하게 된다.[1]

결정계 태양전지의 경우 $R_s \approx 0\Omega$, $R_{sh} \approx \infty\Omega$ 이며 비 직선성의 특성은 다이오드가 지배적이다. PV모듈의 전기적인 대표적 특성값은 Pmax(최대 출력 전력[W]), Vpm(최대전력점 전압[V]), Ipm(최대전력점 전류[A]), Voc(개방전압[V]), Isc(단락전류[A])이다. AM(air mass)은 태양광이 지표면에 도달할 때까지 통과해 오는 공기층의 길이이며 적도 아래에서는 AM1.0이고 위도가 높아질수록 태양광은 대기층을 비스듬하게 통과하므로 공기층을 통과하는 거리가 길어진다. 또한 빛을 에너지의 강도로 환산한 일사강도의 단위는 $[kW/m^2]$ 이다. 일사강도 $1[kW/m^2]$ 일 때 태양전지의 성능결정요

소는 필팩터(FF: Fill Factor)로 정의된다.

$$FF = \frac{V_m \times I_m}{V_{oc} \times I_{sc}} [\%] \tag{1}$$

단, V_m : 최대전압, I_m : 최대전류
 V_{oc} : 개방전압, I_{sc} : 단락전류

Fig2 는 Voc와 Isc를 같게 한 상태에서 FF를 0.6~0.8까지 변화시킨 그림이다. I-V 곡선의 우측 상단을 보면 FF의 수치가 높을수록 곡선의 하단 면적이 커지며, Voc와 Isc의 값이 같은 태양전지라도 Pmax가 큰 태양전지 쪽이 곡선의 하단 면적이 크고 출력전력이 크다

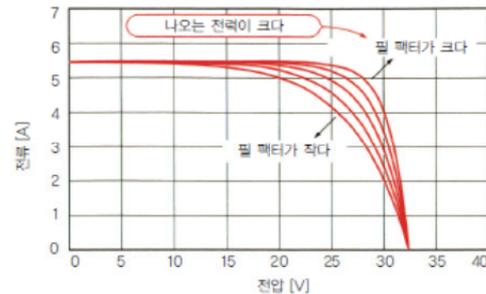


Fig. 1. If Voc and Isc are at the same state value and Pmax

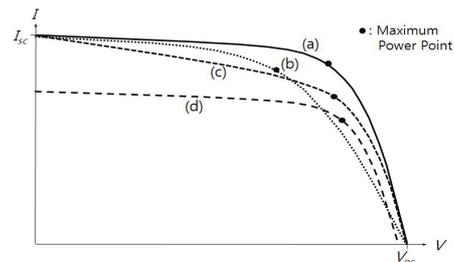


Fig. 2. Characteristics change of I-V curve due to performance degradation of PV module

Fig3은 노후 PV모듈 성능저하에 따른 I-V곡선의 특성변화를 나타낸다. (a)정상모듈 (b)직렬저항의 증가, (C) 병렬저항의 감소, (d)입사광의 감소를 의미하며 스트링의 회로모델을 통한 출력전류와의 관계는 다음식(2)와 같다.

$$I_{sc} = I_s \times N_p \left[\exp\left(\frac{qV_{oc}}{nkTN_s}\right) - 1 \right] \quad (2)$$

각각의 수치값은
 I_s : 등가역포화전류
 N_p : 태양전지의 병렬 연결된 수
 q : 크롬상수
 k : 볼츠만 상수
 T : 모듈온도
 N_s : 태양전지의 직렬 연결된 수

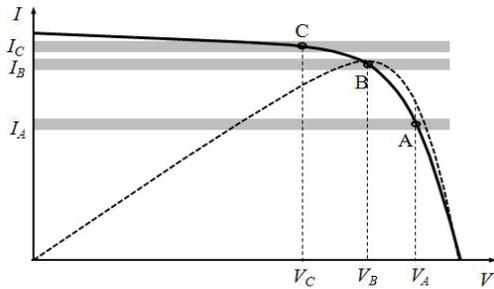


Fig. 3. The position of the operating point on the I-V curve

Fig4는 I-V곡선상의 동작점의 위치를 나타낸다. 동작점의 위치가 최대점의 좌측(C)이면 모듈의 전압의 변화폭이 크고, 우측(A)이면 변화폭이 작게 나타남을 알 수 있다. 따라서 모듈의 전류와 전압의 파형을 분석하면 최대전력점에서의 동작여부, 즉 부정합 발생여부를 판단할 수 있다. 결과적으로 스트링에 직렬 연결된 각 PV모듈의 I-V곡선이 모두 동일하면 각 모듈의 최대점에서 동작하고 전압파형의 변화폭이 같고 I-V곡선이 동일하지 않고 부정합이 있는 경우에는 전압파형의 변화폭이 서로 다르다. 결국, 어레이 전압 또는 전류를 조금씩 변화시켜 가면서 최대전력점을 찾아간다. 이

과정에 의하여 어레이 전압은 지속적으로 소폭의 변화를 반복하게 된다.[2]

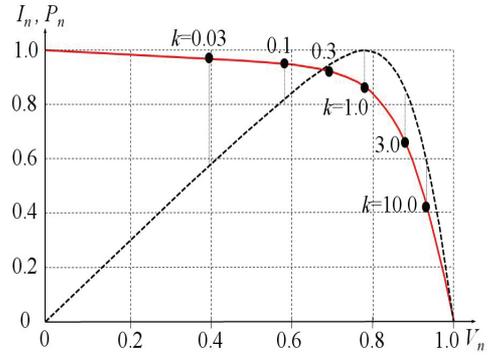


Fig. 4 Mismatch coefficient

2. 노후 태양광 모듈의 특성 분석

2.1 노후 PV모듈 특성 분석

태양광발전소의 출력과 PV모듈의 수명을 향상시키기 위해서는 PV들에서 발생하는 노후화 현상을 진단할 수 있어야 한다. 즉, 노후 PV모듈에서 측정된 데이터를 이용하여 전기적 특성(Fill Factor, 단락전류)을 분석하고, 환경인자(일사량, 온도, 습도 등)를 고려하여 PV모듈에서 진행되고 있는 노후화를 진단한다. PV모듈의 노후화 현상 분석결과 외부환경의 영향으로 노후화현상이 주로 발생하였다. 즉, 봉지재 변색은 태양광모듈이 장기간 자외선과 높은 온도에 노출될 경우, 과산화물의 광분해가 발생하여 태양광의 투과율이 감소하고 단락전류도 감소하게 된다. 또한, 리본와이어 부식은 모듈내부에 수분이 침투하여 부식현상이 발생하고, 이로 인해 모듈의 내부저항이 증가하게 된다. 한편, 모듈의 후면에 노출되어 있는 백시트

는 습기와 온도차로 인하여 박리 현상이 나타나며, 이로 인하여 단락전류가 감소하게 된다. 셀 접합부 균열은 온도차로 인하여 팽창과 수축이 반복되는 과정에서 발생되며, 이로 인하여 내부저항이 증가하게 된다. 상기의 환경인자에 따른 태양광모듈의 노후화현상을 분류하면 다음과 같다.[3]

Table 1. Characterization of old PV modules

노후화 요소	노후화 상태	전기적 특성
자외선, 고온	봉합재, 변색	Isc 감소, 효율저감
고온, 습도	로빈Wire 부식	Rs 증가, FF 감소
온도차, 습도	배면시트 층간박리	Isc 감소, 효율저감
온도차	셀의 갈라짐	Rs 증가, FF 감소

2.3 노후 PV모듈의 노화율

PV모듈의 초기출력(P_{inital})과 노후 PV모듈의 출력을 비교하여 일사량이 가장 좋은 시간에 PV모듈의 출력을 측정한다. 표준시험조건(STC, standard test condition)을 기준으로 온도(25°C), 일사량(1000W/m²)인 경우의 출력값을 온도 보정값을 계산한다.

$$\Delta G_{(N,t)} = G_{(N)}\lambda_{(N)}(25 - T_{(N,t)}) \quad (3)$$

단, $\Delta G_{(N,t)}$: 온도 보정치 [W]
 G_{init} : 모듈의 초기출력 [W]
 N : String내의 모듈번호
 t : 시간
 $\lambda_{(N)}$: N모듈의 온도계수 (%/°C)
 $T_{(N,t)}$: t시간의 N모듈의 온도 (°C)

대상모델의 출력을 STC으로 보정하기 위하여 일사량 보정계수 A, B, 오차 τ 를 이차방정식으로 만든다.

$$E_{(N,t)} = A_{(N)}F_{(t)}^2 + B_{(N)}F_{(t)} + \tau_{(N)} \quad (4)$$

단, $E_{(N,t)}$: 측정된 모듈이 출력[W]
 $F_{(t)}$: t시간의 일사량 [W/m²]
 $A_{(N)}, B_{(N)}$: N번 모듈의 일사량 보정계수
 $\tau_{(N)}$: 오차

STC(기준일사량 1000[W/m²])기준으로 보정된 PV모듈의 출력값과 노화율은 다음과 같다.

$$P_{amend[W]} = E_{(N,t)} + \Delta G_{(N,t)} \quad (5)$$

단, $P_{amend[W]}$: 보정된 태양광모듈의 출력

$$SR(\text{Senescence Rate}; \text{노화율}) \quad (6)$$

$$= \frac{G_{init} - P_{amend}}{G_{init}} [\%]$$

3. 부정합 손실에 따른 동작점 계수 산정

PV시스템의 기본구성요소는 PV모듈과 전력조절장치(PCU: Power Condition Unit)이다. PV모듈은 정격 전력이 크지 않으므로 대규모 발전을 위해서는 다수의 모듈이 직렬과 병렬 연결된 PV 어레이 구조를 형성하며, PCU에는 최대전력점추종(MPPT: Max Power Point Tracking) 기능이 필수적으로 구비되어 있어 어레이에서 최대 출력이 발생되도록 제어한다. PV모듈이 모두 동일한 특성을 갖고 있다는 전제하에 시스템을 설계하는 것이 일반적이나 노후화에 따른 모듈의 특성 차에 의해 시스템 전체의 출력전력이 모듈 각각의 최대 전력의 합보다 작아지게 되며, 그 차이를 부정합 손실(ML: Mismatch Loss)이라 한다.

모듈 부정합은 PV시스템의 발전효율을 악화시킬 뿐 아니라 이로 인한 모듈 온도 상승을 유발하여 장기적으로 수명을 단축시키는 요인으로 작용

하므로 부정합을 최소화 하는 연구가 진행되었는데, 분산형 인버터방식, PV 어레이의 직병렬 결선 방법 변경, 모듈내장형 DC/DC컨버터등이 있다. 그러나 기존 대안은 PV시스템이 초기 구축시 확정하는 대책이다. 본 논문에서는 PV시스템이 설치되어 운전 중일 때 발생하는 부정합 손실을 진단하고 개선하는 시스템을 제안한다. 스트링 내에서 PV모듈 부정합 손실이 발생하여도 최대전력점에서 발전이 가능하도록 부족한 PV모듈의 전압을 보상하는 전압보상기를 제안한다. 노후 PV스트링의 전압과 전류의 파형을 분석하여 부정합상태를 진단하고 전압보상시점과 보상전압의 크기를 결정하는 동작점 계수는 노후 PV모듈로 인해 부정합이 생기면 모듈의 동작점은 최대전력점에서 벗어나게 되는데 이것을 정량화하기 위하여 전압과 전류 파형을 이용하여 증분 컨덕턴스방법에서 이용되는 PV모듈의 최대전력조건은 다음과 같다.

$$\frac{dP}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} = 0 \quad (7)$$

$$\text{또는 } \frac{dI}{dV} = \frac{-I}{V}$$

위 식은 PV모듈의 순시치 컨덕턴스의 크기와 증분컨덕턴스의 크기가 같아질 때 최대전력이 발생함을 의미한다. 이 조건이 성립되지 않으면 부정합 손실이 발생되고 있음을 나타낸다. 이를 활용하여 다음과 같은 동작점 계수를 정의한다.

$$k = \left| \frac{dI/dV}{I/V} \right| \quad (8)$$

Fig5 에서 실제 모듈의 I-V곡선으로부터 동작점 계수를 산출하여 나타낸다. 전압, 전류, 전력은 각각 모듈의 개방전압(Voc), 단락전류(Isc), 최대전력(Pmax)을 기준으로 정규화 시킨 값을 사용하여 부정합계수의 특성을 살펴보면 다음과 같다.

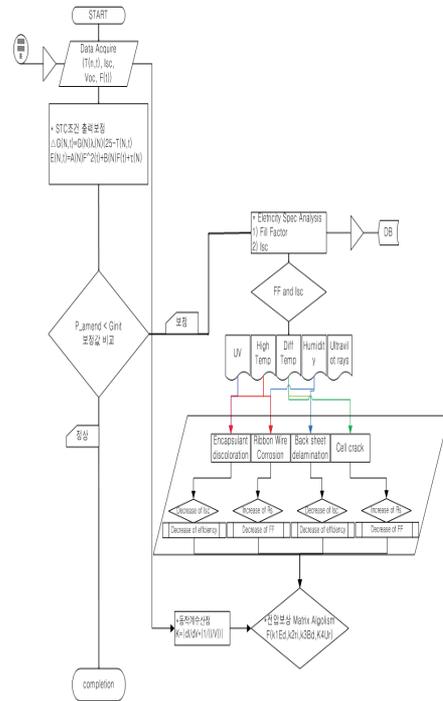


Fig. 5 PV string aging diagnosis and voltage compensation algorithm

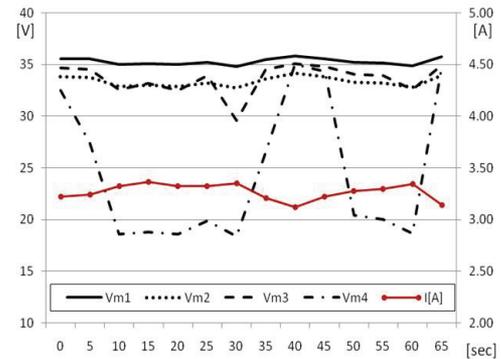


Fig. 6 Voltage / current waveform of the measured string

전압, 전류의 파형으로 동작점 계수를 산출하기 위해서는 전압과 전류의 측정이 동시에 이루어져야 하며, 측정된 데이터를 이용하여 다음과 같이 계산한다.

$$k = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n k_j \tag{9}$$

$$= \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \left| \frac{I_j - I_{j-1}}{V_j - V_{j-1}} \right| \frac{V_j}{I_j}$$

여기서 V_j 와 I_j 는 j 번째 샘플링의 전압과 전류측정치이며 n 은 샘플링 수이다. 새로운 측정데이터가 생길 때마다 동작점계수를 계산하고 이들의 평균치를 최종적으로 사용함으로써 측정잡음이나 매우 작은 전압변화에 의한 민감한 반응을 방지할 수 있다.

4. 동작점계수를 이용한 전압보상기

그림7은 PV스트링 노후와 진단 및 전압보상 알고리즘이다. 전압보상기를 7년이 경과한 태양광 발전소를 대상으로 설치하여 시험하였다. PV모듈은 150Wp 단결정 실리콘 태양전지 모듈로 스트링을 구성하며 한 개의 인버터에 연결되어 있다. 동일 어레이 내의 스트링들에 대하여 전압/전류 파형을 측정하고 동작점 계수를 산출하며, 이것과 어레이의 I-V곡선을 비교함으로써 동작점계수와 부정합 손실의 관계를 분석한다. 그림8은 스트링 전압과 전류의 파형 측정을 위하여 5초 마다 4개 소의 전류를 동시에 측정할 수 있는 모니터링 장치를 제작하여 측정하였다, 측정은 2018년 1월 29일 14시경의 쾌청한 날씨에 이루어졌고, 측정된 전압파형 중 특성의 차이가 확연한 것 4개를 선정하여 전류 파형과 함께 나타내었다

선정된 스트링의 I-V곡선을 함께 나타내고, 전류파형 측정치의 동작범위(ΔI)를 두었고 전압, 전류 파형의 데이터를 적용하여 산출한 동작점계수와 계산한 부정합 손실율을 찾아 확인한다. 동작점 계수와 부정합 손실율의 관계를 살펴 보

면 $k=0.93$ 인 S3은 손실율 0.6%이므로 MPP에서 동작하고 있음을 알 수 있고 이것은 S3의 동작점이 MPP에 매우 가깝다는 사실에서도 확인된다. 동작점 계수가 1보다 클수록(S1과 S2) 또는 작을수록 (S4) 부정합 손실이 나타나는 경향을 보인다.

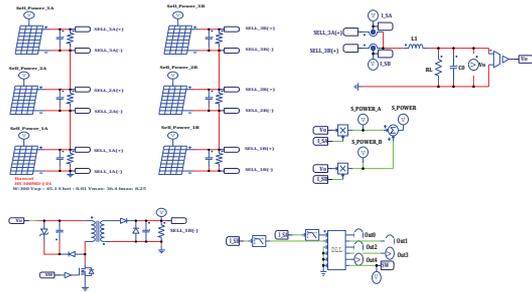


Fig. 7 String voltage compensator simulation circuit diagram



Fig. 8 String current when compensator not used

Table 2. Mismatch loss ratio

모듈 \ 항목	S1	S2	S3	S4
동작점 계수(k)	2.86	1.95	0.93	0.36
동작점 평균전압(V)	35.3	33.4	33.6	24.6
동작점 평균전류(A)	3.27	3.27	3.27	3.27
전력평균(W)	115.4	109.2	109.9	80.4
보정 최대전력(Wp)	134.1	119.1	110.6	102.7
부정합 손실율(%)	13.9	8.3	0.6	21.7

*선정된 모듈의 I-V곡선을 구하기 위하여 모듈을 표준시험조건 (STC:1000W/m², 25°C, 1.5AM)에서 측정을 실시

*파형 측정 시의 표면온도(45°C) 및 경사일사량(950W/m²) 보정

1) 부정합 손실율(%) = $\frac{\text{최대전력} - \text{평균전력}}{\text{최대전력}}$

4. 시뮬레이션

그림9는 전압보상기 시뮬레이션 회로도이다. PV 모듈은 300[W]급 HS300MD-J01 3개를 직렬로 연결하여 스트링을 구성하고 2병렬 스트링 구조로 하였다. 태양광 발전부하는 그림과 같이 저항부하에 두 스트링을 병렬로 연결하여 각 스트링 전류와 전력을 계측하였다. 전압보상기는 독립된 전원을 사용하지 않고 스트링 출력전압을 이용한 컨버터를 사용하여 보상전압을 발생하도록 하였다. 스트링 전류가 동일하도록 스트링 전압 보상을 위해 MCU를 통하여 제어하도록 하였다.

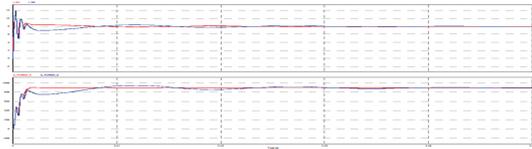


Fig. 9 String current when compensator is used

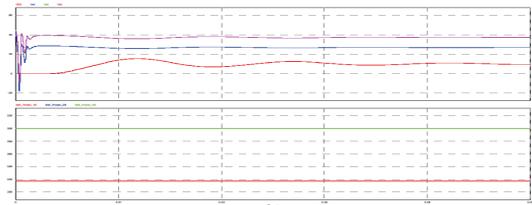


Fig. 10 Output voltage and generated power when compensator is used

시뮬레이션을 시행한 결과 보상기를 사용하지 않는 경우에는 스트링 전류는 8.36[A]와 7.0[A]이며 스트링 전력은 900[W], 753[W]로 현격한 차이를 보였으나 보상기를 사용한 경우 두 스트링 전류는 8.0[A]이며 각 스트링의 전력도 900[W]로 동일하였다. 이때 보상용 전압은 9.7[V]이며 정상 모듈과 노후 모듈전압은 37[V], 27[V]로 나타났다. 또한 정상 모듈과 노후화 모듈의 발생전력은

300[W], 218[W]로 나타났으며 보상기에서 공급하는 전력은 82[W]로 나타났다.

5. 실험

Fig12 은 제작한 전압 보상기 회로도이며 그림 14는 전압보상기 실물사진이다. A/D 컨버팅 회로는 8CH 12Bit 분해능을 갖는 A/D 컨버터 IC(MCP3208-B)를 사용하여 24CH A/D 컨버팅 가능하도록 설계하였으며 OP-AMP를 이용한 필터 회로(전압 플로어)를 통한 입력신호 노이즈 제거하고 필터회로 출력부분에 저항을 이용한 전압 분배로 A/D 컨버터 IC의 입력값 조정할 수 있도록 하였으며 전원부 회로는 변환 효율이 좋은 스위칭 타입 레귤레이터 IC를 사용하여 회로 구성하여 12V(OP-AMP, Gate 신호), 5V(주전원)의 두 타입 전압원 구성하였다.

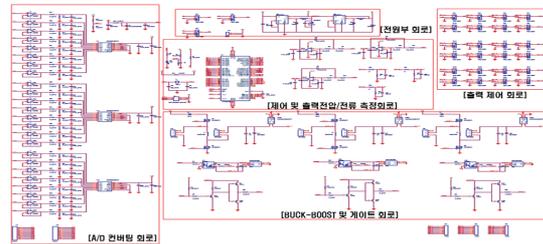


Fig. 11 Voltage compensator circuit diagram

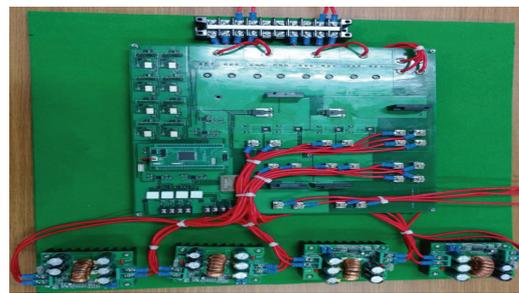


Fig. 12 Manufactured voltage compensator

제어 및 출력전압/전류 측정 회로는 출력부 전압/전류 측정을 위한 센서 및 측정회로 구성으로 센서 및 측정회로에서 측정된 데이터의 노이즈 제거를 위한 필터 회로 구성하였다. BUCK-BOOST 및 GATE 회로는 전압 보상을 위한 자유로운 출력 전압 제어를 위한 Buck-Boost 회로 구성과정에서 용량을 고려하여 Buck-Boost 1개 회로당 8개 태양광 스트링의 전압 보상을 담당하도록 하였으며 PWM 신호 전달 정확도 및 MOSFET 동작 신뢰성 향상을 위한 GATE 회로 구성하였다. 출력 제어 회로는 전압 보상이 필요한 태양광 스트링에 컨버터 전원을 연결하여 기준 전압 출력 24개의 릴레이로 구성되어 평소에는 태양광 스트링과 GND와 연결되었다가 기준 전압보다 낮은 전압출력 시 스트링과 컨버터를 연결, 컨버터의 GND와 기준 설비의 GND를 연결하였다. 제작한 전압보상기로 현장실증결과 시뮬레이션의 예측대로 PV모듈 부정합으로 인한 손실이 개선됨을 확인할 수 있었다.

6. 결론

본 논문에서는 동작점 계수를 산출하여 노후PV 모듈스트링의 부정합 상태를 진단하고 전압보상 기법을 제안하여 모의실험하고 실험하여 확인하였다. 이것을 실제 PV 시스템에 적용한 결과, 스트링의 동작점 계수가 대략 0.5와 1.5사이의 값이면 모듈의 최대 전력에 근접한 전력이 발생되며 1에서 멀어질수록 부정합 손실이 증가한다는 관계를 확인하였다. 개별 스트링에 대하여 전압과 전류의 파형을 측정하고 분석함으로써 전체 시스템의 부정합 상황을 판단할 수 있으므로, 제안된 기법은 운전 중인 PV 시스템의 발전 성능 진단과 모니터링 및 시스템 개선에 효과적으로 활용 될 수 있을 것으로 예상된다.

참고문헌

- [1] Lee, Soon Hyung, "Planning and Design of Solar System", 2008. [2] Ewha, "A Study on the Shading Effects of Solar Array and Arrangement of Backflow Prevention Diodes" 2008.
- [2] D.Picault, B. Raison, S. Bacha, J. de la Casa, J. Aguilera, "Forecasting Phovoltaic array Power Production subject to mismatch losses", Solar Energy 84 pp.1301-1309
- [3] Lee,K.etal., "Development of Deterioration Diagnosis Algorithm of Photovoltaic Module Considering Electrical Characteristics and Environmental Factors", The Korean Institute of Electrical Engineers 64 (10), pp.1411-1417

(접수: 2018.01.09. 수정: 2018.02.06. 게재확정: 2018.02.23.)