

PV 모듈 내 바이패스 다이오드 손상에 의한 열적 전기적 특성 변화 분석

Analysis on thermal & electrical characteristics variation of PV module with damaged bypass diodes

신우균* · 정태희** · 고석환** · 주영철** · 장효식*† · 강기환**†
Shin Woo-Gyun* · Jung Tae-Hee** · Go Seok-Hwan** · Ju Young-Chul**
Chang Hyo-Sik*† · Kang Gi-Hwan**†

(Received 04 June 2015; Accepted 29 August 2015)

Abstract : PV module is conventionally connected in series with some solar cell to adjust the output of module. Some bypass diodes in module are installed to prevent module from hot spot and mismatch power loss. However, bypass diode in module exposed outdoor is easily damaged by surge voltage. In this paper, we study the thermal and electrical characteristics change of module with damaged bypass diode to easily find module with damaged bypass diode in photovoltaic system consisting of many modules. Firstly, the temperature change of bypass diode is measured according to forward and reverse bias current flowing through bypass diode. The maximum surface temperature of damaged bypass diode applied reverse bias is higher than that of normal bypass diode despite flowing equal current. Also, the output change of module with and without damaged bypass diode is observed. The output of module with damaged bypass diode is proportionally reduced by the total number of connected solar cells per one bypass diode. Lastly, the distribution temperature of module with damaged bypass diode is confirmed by IR camera. Temperature of all solar cells connected with damaged bypass diode rises and even hot spot of some solar cells is observed. We confirm that damaged bypass diodes in module lead to power drop of module, temperature rise of module and temperature rise of bypass diode. Those results are used to find module with a damaged bypass diode in system.

Key Words : PV module, Damaged bypass diode, Heating, Power loss

- | | |
|--|--|
| <p>*† 장효식(교신저자) : 충남대학교 에너지과학기술대학원 교수
E-mail : hschang@cnu.ac.kr, Tel : 042-821-8607</p> <p>**† 강기환(교신저자) : 한국에너지기술연구원 태양광연구실 책임연구원
E-mail : ghkang@kier.re.kr, Tel : 042-860-3418</p> <p>* 신우균 : 한국에너지기술연구원 태양광연구실, 충남대학교 에너지과학기술대학원 학연석사과정</p> <p>** 정태희 : 한국에너지기술연구원 태양광연구실</p> <p>** 고석환 : 한국에너지기술연구원 태양광연구실</p> <p>** 주영철 : 한국에너지기술연구원 태양광연구실</p> | <p>*† Chang Hyo-Sik(corresponding author) : Graduate School of Energy Science & Technology Chungnam National University
E-mail : hschang@cnu.ac.kr, Tel : 042-821-8607</p> <p>**† Kang Gi-Hwan(corresponding author) : Korea Institute of Energy Research Solar Energy Department
E-mail : ghkang@kier.re.kr, Tel : 042-860-3418</p> <p>* Shin Woo-Gyun : Korea Institute of Energy Research Solar Energy Department, Graduate School of Energy Science & Technology Chungnam National University</p> <p>** Jung Tae-Hee : Korea Institute of Energy Research Solar Energy Department</p> <p>** Go Seok-Hwan : Korea Institute of Energy Research Solar Energy Department</p> <p>** Ju Young-Chul : Korea Institute of Energy Research Solar Energy Department</p> |
|--|--|

1. 서 론

일반적으로 출력전압이 낮은 태양전지는 다수의 태양전지를 직렬로 연결하여 출력 전압을 높이고, 장기간 옥외 노출되었을 때 태양전지를 보호하기 위하여 모듈의 형태로 제작되어 진다. 또한 모듈 내 각각의 태양전지의 출력 불균일(Mismatching)하에서 모듈의 온도 상승을 억제하고 출력 손실을 줄이기 위하여 바이패스 다이오드(Bypass diode)를 설치하게 된다. 만일 모듈에 바이패스 다이오드가 설치되지 않을 경우 음영에 의해 태양전지에 출력이 줄면서 그 태양전지는 급격하게 온도가 상승하게 되고 심할 경우 hot spot이 발생하게 된다. 결국 그 태양전지는 열화(Degradation)됨으로써 모듈 전체의 출력이 감소하게 된다.^{1) 2) 3)}

일반적으로 바이패스 다이오드는 대부분 쇼트키 다이오드(Schottky diode)를 사용함으로써 동작전압은 0.2~0.3V로 낮아 모듈 내 미세한 출력 불균일 상태에서도 모듈을 보호할 수 있을 뿐만 아니라 항복전압이 60~100V로 높아 출력전압이 높은 모듈에서 안정적으로 동작할 수 있다.

현재까지 모듈 내 바이패스 다이오드의 동작에 관한 연구는 가장 다양하게 진행되었다. 우선 태양전지의 역전압 특성을 바탕으로 바이패스 다이오드가 동작한 모듈에 출력 변화를 예측한 다양한 연구결과가 발표되었다.^{4) 5) 6)} 이때 태양전지 이론을 모듈에 그대로 적용함으로써 반복적이고 복잡한 계산방법이 요구되며, 이를 쉽게 해결하기 위하여 Matlab-Simulink, PSPICE, PSIM과 같은 다양한 시뮬레이션 프로그램을 이용해 계산한 결과를 볼 수 있었다.^{7) 8) 9)} 또한 이와 같은 계산방법을 이용하여 부분적인 출력 불균일 상태에서 모듈의 전체 출력감소를 줄이기 위한 바이패스 다이오드와 태양전지의 전기적 연결 방법에 관한 연구도

진행되었다.^{10) 11) 12)}

일반적으로 바이패스 다이오드의 손상은 대부분 전압 및 전류에 의해 단락(Short)되는 경우가 주를 이루며, 정상적인 바이패스 다이오드도 항복 전압 이상의 서지(Surge) 전압에 취약하기 때문에 기존의 대부분 연구도 서지 전압에 의한 바이패스 다이오드 파괴에 대한 연구가 진행되었다.^{13) 14)} 옥외 설치된 모듈이 다이오드 불량이나 손상에 의한 모듈 출력 저하 및 신뢰성 문제를 야기한 사례가 종종 보고되고 있다.¹⁵⁾ 그러나 다수의 모듈로 구성된 태양광 시스템에서 바이패스 다이오드가 손상된 모듈을 찾는 것은 어려운 문제이다.

따라서, 본 논문에서는 모듈 내 바이패스 다이오드가 손상되었을 때 열·전기적 특성 변화를 비교함으로써 옥외 설치된 모듈 내 바이패스 다이오드 손상 유무를 쉽고 정확하게 확인할 수 있는 방법을 강구하였다. 이를 위하여 우선 전류상승에 따른 바이패스 다이오드의 표면 열 발생 정도를 분석하였다. 또한 손상된 바이패스 다이오드가 설치된 모듈과 정상적으로 바이패스 다이오드가 동작하는 모듈의 I-V커브를 비교함으로써 다이오드 손상 유무에 따른 전기적인 출력 차이를 확인하였다. 마지막으로 실제 설치된 모듈에서 손상된 바이패스 다이오드가 설치될 경우 모듈에서 표면의 온도변화를 확인함으로써 다수의 모듈로 구성된 시스템에서 바이패스 다이오드가 손상된 모듈을 구별하는 방법을 찾을 수 있었다.

2. 본 론

2.1 다이오드 손상에 의한 열 발생 분석

본 실험은 모듈 내 다이오드 자체의 열 발생으로 손상된 바이패스 다이오드를 구별할 수 있는지를 확인하기 위해 진행하였다. 바이

패스 다이오드는 태양전지의 극성과 반대로 연결되므로 정상적인 경우에는 전류가 흐르지 않는다. 하지만 surge와 같은 원인에 의해 바이패스 다이오드가 손상되면 역방향 전류가 흐르게 된다. 따라서 바이패스 다이오드가 순·역방향일 때 전류를 흘려주어 다이오드 자체의 온도변화를 확인하였다. 이를 위해 우선 정상적인 바이패스 다이오드에 DC power supply를 이용해 역전압을 인가하여 인위적으로 손상시켰으며, 이를 정상적인 다이오드와 I-V 커브를 측정하여 손상 유무를 확인하였다. 또한 정상적인 바이패스 다이오드와 손상된 바이패스 다이오드에 최대 단락전류(8A)까지 전류를 증가시키며 표면온도를 비교함으로써 모듈 내 정상적으로 동작하는 다이오드와 구별 가능성을 평가하였다. Fig. 1과 같이 DC power supply, Source-Meter(Keithley2430), Data logger(GRAPHTEC GL7000)로 구성된 장비를 이용하여 실험하였다.



Fig. 1 Experiment equipment

Fig. 2에 다이오드는 Table. 1에서와 같이 정격전류가 각각 12A, 20A, 25A인 바이패스 다이오드를 선정하였고, 다이오드 자체의 특성차를 고려하여 동일한 다이오드에 세 개씩 반복적으로 실험을 진행하였다. 정상적으로 동작하는 바이패스 다이오드와 항복전압(62V) 이상에서 단락전류를 5초정도 흘려 인위적으로 손상된 바이패스 다이오드를 각각 3개씩 실험하였다.

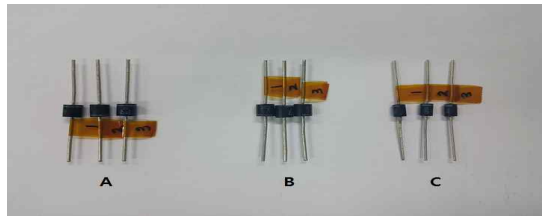
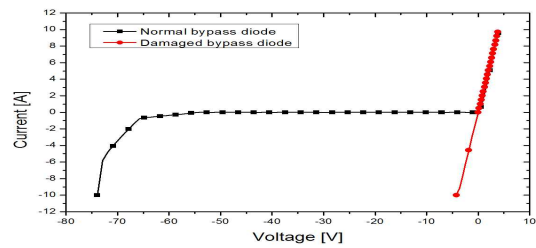


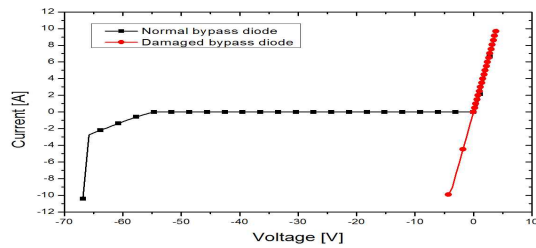
Fig. 2 Three types of diodes used to experiment

Table 1 Bypass diode data sheet

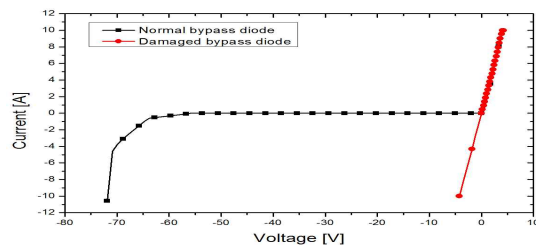
	A type	B type	C type
Norminal Current	20A	25A	12A
Forward Voltage (Norminal Current)	0.59V	0.55V	0.68V
Junction Temperatne	≤200℃	≤200℃	≤200℃
Peak Forward Surge Current(50/60Hz sine-wave)	20/30A	20/30A	20/30A



(a) A-type



(b) B-type



(c) C-type

Fig. 3 I-V curves of normal and damaged bypass diode

Fig. 3은 정상적인 바이패스 다이오드와 손상된 다이오드의 I-V 커브를 보여주고 있다. 그림에서 보듯이 정상적인 다이오드의 항복 전압은 60V이상인 것을 확인할 수 있다. 인위적으로 손상된 다이오드는 공핍층(Depletion layer)이 파괴됨으로써 저항이 약 0.5Ω이하의 단락상태로 된 것으로 볼 수 있다.

Fig. 4에서 보듯이 모듈 내 태양전지 출력 불균일이 존재하지 않는 경우 바이패스 다이오드는 항상 역전압이 인가됨으로써 바이패스 다이오드는 역전류가 흐르게 된다. 반면 모듈에서 태양전지가 출력 불균일 상태가 되면 해당되는 바이패스 다이오드는 순방향의 전류가 흐르게 된다. 본 실험에서는 바이패스 다이오드의 열 발생으로써 바이패스 다이오드의 고장유무를 판단하기 위해 실험을 진행하였다. 손상되지 않는 바이패스 다이오드에는 역전압 전류가 거의 흐르지 않는다고 가정하였고, 모듈의 정상 및 불균일 동작을 모두 고려하여 손상된 바이패스 다이오드에는 순·역방향 전류를 흘려주면서 다이오드의 온도 변화를 측정하였다.

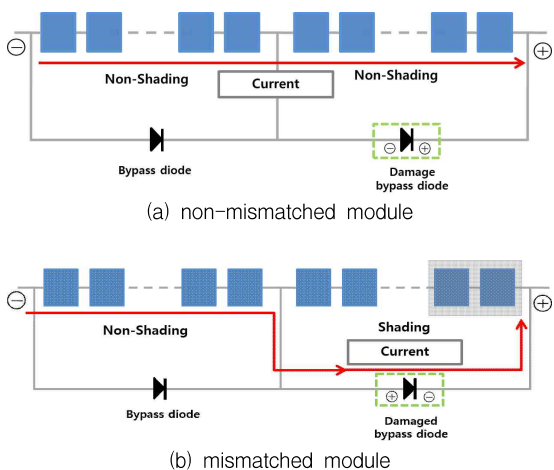


Fig.4 The output current of module by bypass diode conduction

바이패스 다이오드의 단락전류 값에 따른 다이오드 자체의 온도를 측정하기 위해 정상적인 다이오드와 손상된 다이오드에 DC power supply를 이용하여 2A, 4A, 6A, 8A의 전류를 각각 흘렸으며, 온도는 TC sensor와 Data logger를 통해 측정하였다. 사용된 TC sensor는 T-type으로 Data logger를 이용하여 측정할 경우 측정 온도의 정확도는 $\pm 0.1\% + 0.5^{\circ}\text{C}$ 이다. Fig. 4를 보게 되면 정상적인 바이패스 다이오드는 전류 값이 2A씩 증가함에 따라 A type은 약 14°C , B type은 약 18°C , C type은 약 23°C 정도씩 증가함을 보인다. 이는 손상된 바이패스 다이오드가 역방향일 경우와 비교하면 일정한 증가폭임을 알 수 있다.

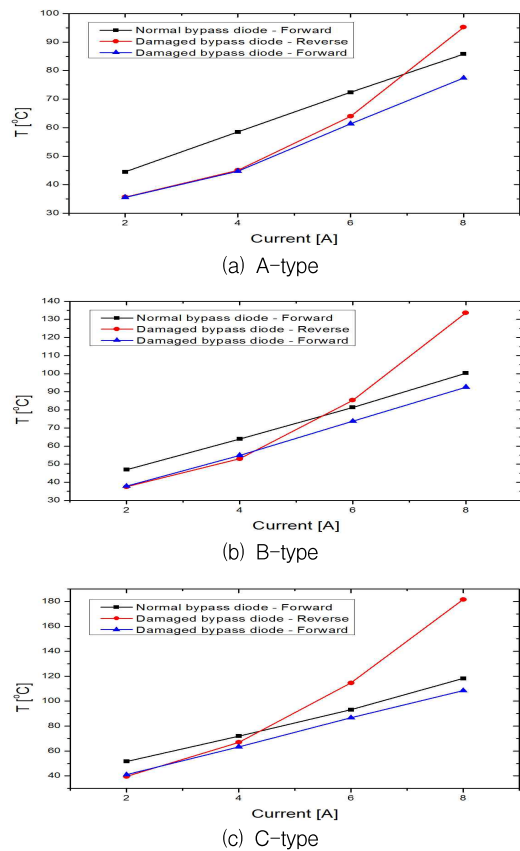


Fig. 5 Surface temperature of normal and damaged bypass diode

손상된 바이패스 다이오드가 역방향 상태일 경우 6A미만의 전류에서는 정상적인 바이패스 다이오드 자체의 온도보다 낮은 경향을 보인다. 하지만, 6A이상의 전류부터 손상된 바이패스 다이오드 자체의 온도가 급격히 상승하게 되고, 8A가 되면 정상적인 바이패스 다이오드 보다 최대 약 63°C 높은 181.6°C 까지 온도가 상승하게 된다.

본 실험 결과를 통하여 모듈 내 발전 불균일 상태에서는 모든 다이오드에 순방향 전류가 흐르게 됨으로써 정상적인 다이오드와 손상된 다이오드의 온도차는 상대적으로 적어 다이오드 손상유무를 판단하기 힘들 것으로 사료된다. 그러나 출력 불균일이 없는 정상적으로 발전하는 모듈에 일사량이 높아 발전전류가 많고, 부하가 커 다이오드에 역전압이 크게 인가되는 상황에서는 바이패스 다이오드의 열 발생 정도로써 쉽게 고장유무를 판단할 수 있을 것으로 생각된다.

2.2 손상된 바이패스 다이오드가 설치된 PV 모듈의 전기적 특성

다음은 모듈 내 손상된 바이패스 다이오드가 연결될 경우 모듈의 출력 변화를 확인하기 위해 실험을 진행하였다. 실험에 사용된 모듈은 60개의 다결정 태양전지와 바이패스 다이오드가 3개 설치된 출력이 약 255W인 모듈 2장을 이용하였다. 이때 바이패스 다이오드는 역전류에 온도 상승 정도가 중간 정도인 B-type 다이오드를 적용하였다. 모든 측정은 STC(Standard Test Condition)조건에서 모듈 시뮬레이터(Simulator)를 이용하여 I-V 커브를 측정 비교하였다. 우선 모두 정상적인 다이오드를 설치하여 모듈 출력을 측정하고 손상된 바이패스 다이오드를 하나씩 증가시키면서 출력 변화를 비교하였다.

Fig. 6은 두 모듈의 손상된 바이패스 다이오

드가 증가함에 따른 I-V 커브 변화를 보여주고 있다. Fig. 6에서 보듯이 손상된 바이패스 다이오드가 증가할수록 그 다이오드가 연결된 태양전지 스트링(String) 만큼 출력 전압이 낮아지는 것을 확인할 수 있다. 이와 같은 현상은 Fig. 7에서 같이 손상된 다이오드는 단락상태가 됨으로써 그 다이오드에 연결된 태양전지만큼의 출력 전압이 줄어들게 되는 것으로 추정할 수 있다. 전류의 경우 정상적인 스트링에서의 발전 전류가 손상된 다이오드가 연결된 태양전지만큼 아니라 손상된 다이오드를 통해서도 흐르게 됨으로써 전류의 변화는 거의 없는 것을 확인할 수 있다.

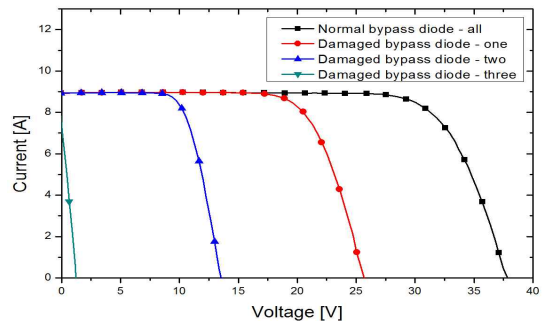


Fig. 6 I-V curves of PV module according to increase in the number of B-type damaged bypass diode

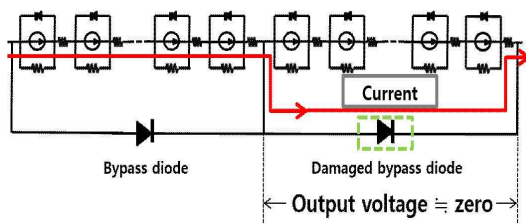


Fig. 7 Current flow in PV module with damaged bypass diode

따라서 Table. 2에서와 같이 모듈 정상적인 바이패스 다이오드가 연결된 모듈의 출력은 약 255W이지만 한 개의 손상된 다이오드가

연결되면 모듈의 출력은 약 88W 감소한 약 167W가 되며, 두 개의 다이오드가 손상될 경우 약 83W로 줄어들고, 모듈 내 바이패스 다이오드가 모두 손상될 경우 출력은 약 2W가 된다. 이는 약 33%의 비율로 감소하는 것을 확인할 수 있다.

Table 2 Output change of PV module according to increase in the number of B-type damaged bypass diode

다이오드 개수	출력(W)	출력 감소율(%)
0	254.88	0
1	166.5	34.68
2	83.97	67.06
3	2.29	99.10

이 결과를 통하여 바이패스 다이오드가 손상된 모듈은 출력 불균일에 의한 다이오드가 동작하는 모듈과 다르게 항상 출력 전압이 낮은 것을 확인할 수 있다. 결국 모듈 내 바이패스 다이오드 불량률 평가를 평가하는 하나의 기준으로 활용될 수 있음을 알 수 있다.

2.3 손상된 바이패스 다이오드가 설치된 PV 모듈의 열적 특성

마지막으로 실제 동작하는 모듈에서 한 스트링의 바이패스 다이오드가 손상되었을 때 모듈의 표면 온도 변화를 관찰하였다. 이를 위하여 우선 모든 바이패스 다이오드가 정상적으로 작동하는 모듈을 옥외 노출시키면서 전체적인 온도 분포를 확인하였다. 또한 인위적으로 손상시킨 바이패스 다이오드를 한 스트링에 설치하여 모듈의 표면 온도 변화를 비교하였다.



Fig. 8 PV module installed in outdoor

본 실험에서는 이전 실험과 동일하게 출력이 255W급으로써 60개의 다결정 태양전지로 구성되어진 모듈을 사용하였으며, 다결정 태양전지의 불균일한 역전압 특성을 고려하여 동일한 두 개의 모듈을 이용하여 비교하였다. 또한 이전 실험과 같이 바이패스 다이오드는 B-type의 바이패스 다이오드를 이용하였다. 손상된 바이패스 다이오드는 Fig. 8에서와 같이 오른쪽에 삽입되었으며 손상된 바이패스 다이오드는 20개의 태양전지와 연결되었다. 모듈 내 표면 온도 변화는 모두 열화상 카메라(Fluke Ti27)를 이용하여 관찰하였으며, 본 실험은 대기온도가 28℃이고 일사량이 약 750W/m² 일 때 진행하였다.

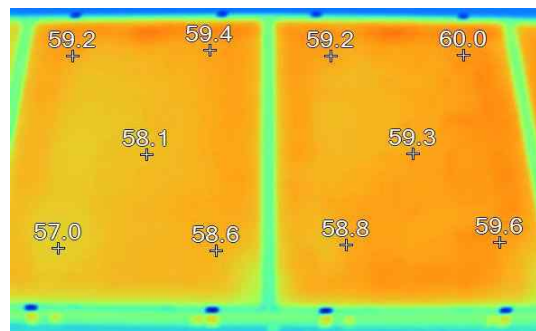


Fig. 9 Surface temperature of PV module with all normal bypass diodes

Fig. 9는 모듈 내 모든 바이패스 다이오드가

모두 정상인 경우 모듈 표면 온도를 관찰한 것으로 평균 약 59°C 정도이고, 그 오차는 $\pm 1^\circ\text{C}$ 이내로 균일한 것을 볼 수 있다. 반면, 동일한 모듈에서 인위적으로 손상시킨 바이패스 다이오드 1개를 모듈 내 삽입했을 경우 나타나는 표면 온도 변화는 Fig. 11과 같다. 정상적인 바이패스 다이오드가 연결된 스트링에 비해 손상된 바이패스 다이오드가 연결된 스트링의 표면 온도는 상승할 뿐만 아니라 일부분의 태양전지에서는 hot spot도 나타나는 것을 볼 수 있다. 이와 같은 현상은 Fig. 10에서와 같이 손상된 바이패스 다이오드가 연결된 스트링에서 생성된 대부분의 전류는 외부로 흐르기 보다는 전기적으로 단락된 바이패스 다이오드를 통해 흐르게 됨으로써 단락전류 정도의 큰 순환전류(I_c)가 흐르게 되는 것으로 사료된다. 이는 약간의 발전 불균일에 의해 출력이 낮은 일부분의 태양전지는 온도가 증가하게 되고 몇몇 태양전지는 hot spot도 발생하는 것으로 생각 할 수 있다. hot spot이 발생한 태양전지 온도와 정상적인 바이패스 다이오드가 연결된 태양전지는 최대 약 16.5°C 정도 온도차가 발생함을 Fig. 11을 통해 알 수 있다. 이 결과를 바탕으로 옥외 설치된 모듈의 스트링 내 일부 태양전지의 온도가 상승한다면 이는 바이패스 다이오드 손상에 의해 나타날 수 있는 현상임을 본 실험을 통하여 알 수 있다.

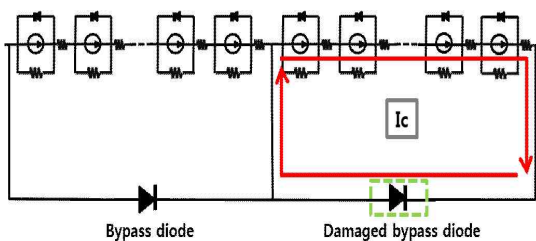


Fig. 10 Surface temperature of PV module with one damaged bypass diode

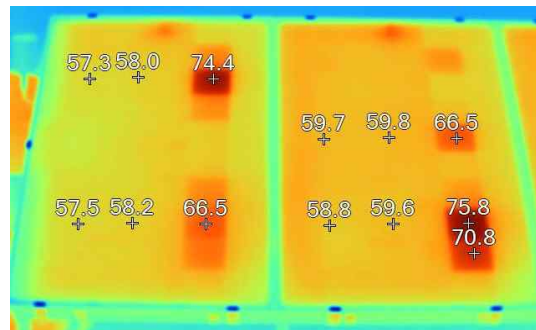


Fig. 11 Output current flow of solar cells connected damaged bypass diode

3. 결 론

본 논문은 다수의 모듈이 설치된 태양광 시스템에서 바이패스 다이오드가 손상된 모듈을 쉽게 구별하기 위하여 정상적인 모듈 대비 바이패스 다이오드가 손상된 모듈의 열·전기적 특성변화를 비교 분석하였다. 이를 위하여 바이패스 다이오드가 손상된 경우 다이오드 자체 열 발생, 모듈 출력 및 표면온도 변화를 확인하였다.

- (1) 정상적인 바이패스 다이오드 순방향 전류와 손상된 바이패스 다이오드 역방향 전류를 비교하였을 때 저전류에서는 온도차가 별로 존재하지 않지만, 단락전류에 부근에서는 손상된 바이패스 다이오드는 급격하게 표면 온도가 상승하는 것을 볼 수 있었다. 이는 단락전류만큼 큰 불균일 상태에서 다이오드 표면 온도를 측정하면 바이패스 다이오드 손상 유무를 쉽게 구별할 수 있을 것으로 판단된다.
- (2) 손상된 바이패스 다이오드가 있는 모듈의 경우 손상된 다이오드 개수에 비례하여 모듈 출력이 감소하는 것을 확인하였다. 이는 부분적으로 불균일에 의해 다이오드가 동작하는 경우와 다르게 태양광 시스

템에서는 일사량 변화와 상관없이 출력 전압이 줄어들 것으로 판단된다. 만일 이 모듈을 모듈 시뮬레이터로 I-V 커브를 측정한다면 스트링 개수만큼 출력이 나타나지 않을 것을 볼 수 있다.

- (3) 모듈 내 일부분의 바이패스 다이오드가 손상될 경우 해당되는 스트링의 표면온도가 급격하게 상승하게 되며 일부분의 태양전지는 hot spot이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 이와 같은 현상을 열화상 카메라로써 쉽게 구별할 수 있다. 이와 같은 측정방법은 비전문 시스템 관리자들이 활용할 수 있는 현실적인 수단이다.

모듈 내 바이패스 다이오드가 손상될 경우 확인할 수 있는 방법에 관한 연구를 진행하였다. 본 논문의 결과는 다수의 모듈이 설치된 시스템을 유지 및 관리하는데 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 한국에너지기술연구원의 주요 사업(B5-2489)과 2015년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행한 결과입니다.(No.20143010011820)

Reference

1. Jung. T. H, Kang. K. H, Ahn. H. K, Optimal Design of PV module with Bypass Diode to Reduce Degradation due to Reverse Excess Current, Transactions on Electrical and Electronic Materials, Vol. 15, No.5, pp. 279-283, October 25, 2014
2. Kim. S. T, Kang. G. H, Park. J. H, Ahn. H. K, YU. G. J, Han. D. Y., The electrical characteristics of Shading Effect in Photovoltaic Module, Journal of the Korean Solar Energy Society, pp.257-262, 2008.4
3. M.C.Alonso-Garica, J.M. Ruiz and F.Chenlo, Experimental study of mismatch and shading effects in the I-V characteristic of a photovoltaic module, Solar Energy Material and Solar Cells, Volume 90, Issue 3, pp.329-340, 2006. 2
4. Jung. T. H, Go. J. W, Kang. K. H, Ahn. H. K, The Output Characteristics of PV module Considering Partially Reverse Biased Conditions, Solar Energy, Vol 92, pp.214-220, June 2013
5. W. Herrmann, M. Adrian, W. Wiesner, Operational behaviour of commercial solar cells under reverse biasde conditions, Proceedings of the 2nd World Conference on PVSEC, pp.2357-2359, Vienna(1988)
6. A. Abete, E. Barbisio, F. Cane, P. Demartini, Analysis of photovoltaic modules with protection diodes in presence of mismatching, 21st IEEE PV Specialists Conference, Kissimimee, pp.1005-1010 U.S.A.(1990)
7. Kashif Ishaque, Zainal Salam, Syafaruddin, A comperehensive MATLAB Simulink PV system simulator with partial shading capability based on two-diode model, Solar Energy, Vol 85, Issue 9, pp.2217-2227, September 2011
8. R Ramaprabha, M. Mathur and L. Badrilal, Modelling and simulation of solar PV array under partial shaded conditions, International Conference on Sustainable Energy Technologies, ICSET 2008, pp.7-11, 24 November 2008
9. H. Ziar, S. Mansourpour, E. Afjey, M. Kazemi, Bypass diode Characteristic effect on the behavior of solar PV array shadow condition, in: Proceedings of the Power Electronics and Drive System Technology (PEDSTC), pp.229-233, 2012
10. W. Herrmann, W. Wiesner, W. Vaanen, Hot Spot Investigations on PV Modules - New Concepts for a Test Standard and Consequences

- for Module Design with Respect to Bypass Diodes, Proceedings of the 26th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Anaheim, pp.1129 - 1132, CA (1997)
11. S. Silvestre, A. Boronat, A. Chouder, Study of bypass diodes configuration on PV modules, Volume 86, Issue 9, pp.1632-1640, September 2009
 12. Yaw-Juen Wang, Po-Chun Hsu, An investigation on partial shading on PV modules with different connection configurations of PV cells, Energy, Vol 36, Issue 5, pp.3069-3078, May 2011
 13. H. Haeberlin, Damages at Bypass Diodes by Induced Voltages and Currents in PV Modules Caused by Nearby Lightning Currents, 22nd European Photovoltaic Solar Energy Conference, Milano, Italy, Sept, 2007
 14. H. Haeberlin, Interference Voltages Induced by Magnetic Fields of Simulated Lightning Currents in Photovoltaic Modules and Arrays, 17th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Munich, Germany, Oct 22-26, 2001
 15. Ewan D. Dunlop, David Halton, The Performance of Crystalline Silicon Photovoltaic Solar Modules after 22 Years of Continuous Outdoor Exposure, Progress in Photovoltaics: Research and applications, 14(2005), pp.53-64