

다양한 환경조건에서 태양전지모듈의 PID회복특성

PID Recovery Characteristics of Photovoltaic Modules in Various Environmental Conditions

이은석* · 정태희** · 고석환** · 주영철** · 장효식*† · 강기환**†

Lee Eun-Suk*, Jung Tea-Hee**, Go Seok-Hwan**, Ju Young-Chul**
Chang Hyo Sik*† and Kang Gi-Hwan**†

(Received 07 October 2015; accepted 28 October 2015)

Abstract : The Potential Induced Degradation(PID) in PV module mainly affected by various performance conditions such as a potential difference between solar cell and frame, ambient temperature and relative humidity. The positive charges as sodium ions in front glass reach solar cell in module by a potential difference and are accumulated in the solar cell. The ions accelerate the recombination of generation electrons within solar cell under illumination, which reduces the entire output of module. Recently, it was generally known that PID generation is suppressed by controlling the thickness of SiNx AR coating layer on solar cell or using Sodium-free glass and high resistivity encapsulant. However, recovery effects for module with PID are required, because those methods permanently prevent generating PID of module. PID recovery method that voltage reversely applies between solar cell and frame contract to PID generation begins to receive attention. In this paper, PID recovery tests by using voltage under various outdoor conditions as humidity, temperature, voltage are conducted to effectively mitigate PID in module. We confirm that this recovery method perfectly eliminates PID of solar cell according to repetitive PID generation and recovery as well as the applied voltage of three factors mainly affect PID recovery.

Key Words : PID(Potential Induced Degradation), PID Recovery, Encapsulation Materials, Potential Difference

-
- **† 강기환(교신저자): 한국에너지기술연구원 태양광연구실 **† Kang Gi-Hwan(corresponding author) : Photovoltaic Laboratory, Korea Institute of Energy Research.
E-mail : ghkang@kier.re.kr, Tel : 042-680-3418
*† 장효식(교신저자): 충남대학교 에너지과학기술대학원 E-mail : ghkang@kier.re.kr, Tel : 042-860-3418
E-mail : hschang@cnu.ac.kr, Tel : 042-821-8607 **† Chang Hyo Sik(corresponding author) : Graduate School of Energy Science and Technology, Chungnam National University
E-mail : hschang@cnu.ac.kr, Tel : 042-821-8607
*이은석 : 한국에너지기술연구원 태양광연구실 *Lee Eun-Suk : Photovoltaic Laboratory, Korea Institute of Energy Research. / Graduate School of Energy Science and Technology, Chungnam National University
E-mail : hschang@cnu.ac.kr, Tel : 042-821-8607
**정태희 : 한국에너지기술연구원 태양광연구실 **Jung Tae-Hee : Photovoltaic Laboratory, Korea Institute of Energy Research.
**Go Seok-Hwan : Photovoltaic Laboratory, Korea Institute of Energy Research.
**Ju Young-Chul : Photovoltaic Laboratory, Korea Institute of Energy Research.

1. 서 론

태양전지모듈은 장기간 외부환경에서 태양 전지를 보호하기 위하여 일반적으로 모듈의 전면부에는 유리(Glass), 후면부에는 백시트(Back sheet)를 구조로 제작되어진다. 하지만 이렇게 만들어진 모듈도 백화현상, 황변현상, 전극부식, 박리, 태양전지파손, 유리파손, PID 현상과 같이 장/단기적으로 여러 가지 원인에 의해 모듈이 열화(Degradation)되어 모듈의 출력뿐만 아니라 신뢰성에 영향을 미치게 된다.^{1) 2)} 특히 PID(Potential Induced Degradation) 현상은 태양광 시스템 출력전압이 높아짐으로써 정상적인 모듈에서도 나타나지만 다른 모듈 열화와 달리 육안으로 쉽게 구별되지 않아 간과하기 쉬운 열화 현상이다.³⁾ 따라서 가장 일반적으로 많이 사용되는 결정질 실리콘 타입의 모듈에서 PID문제는 최근 더욱 부각되고 있다.⁴⁾ 모듈에서 PID현상은 전면 재료로 사용되는 저 철분 강화 유리에 포함되어 있는 Na⁺과 같은 양이온이 프레임과 태양전지 사이의 전위차에 의해 태양전지 표면으로 이동하여 축적됨으로써 태양전지 내부에서 생성된 전자가 전극으로 수집되는 것을 방해하게 되어 태양전지 전체 출력을 감소시킨다고 알려져 있다.⁵⁾ 최근에는 다양한 환경에 설치된 모듈의 PID에 의한 모듈의 출력 변화를 예측하기 위하여 전면유리 및 봉지재(Encapsulation material)의 절연 평가를 통한 PID 발생연구가 활발하게 진행되고 있다.⁶⁾

PID현상 발표 이후, 수많은 태양전지 및 모듈 제조사, 모듈 원부자재 제작업체등 PID발생을 최소화시키기 위한 다양한 연구가 활발히 진행되고 있다. 태양전지 제작과정에서는 반사방지막인 SiNx의 두께 및 굴절률을 적절하게 조절하여 SiNx층의 표면에 Na⁺이온이 축적되어 발생하는 에미터(emitter)의 역전 현상 혹은 웨이퍼 내부로의 이동을 억제함으로써

써 PID를 완화할 수 있다고 알려져 있다.⁷⁾ 모듈 차원에서는 수분침투를 최소화 하는 것으로 적절한 가교율을 갖기 위해서 라미네이션(Lamination)시 최적화된 온도, 시간을 설정하여 모듈을 제조하거나, 구성소재중 봉지재로 널리 사용되는 EVA(Ethylene Vinyl Acetate) 대신 체적저항이 높은 POE(Polyolefin elastomer)나 Ionomer를 적용함으로써 PID현상을 완화시킬 수 있는 다양한 연구들이 진행되고 있다.^{8) 9)} 시스템에서는 PCS구성요소를 변경하거나 컨트롤 알고리즘을 변경하는 방법이 있다.¹⁰⁾ 하지만 이와 같이 모듈에서 PID현상을 억제하기 위한 다양한 기술은 단지 PID 발생 시기를 늦출 수는 있지만 모듈에서 PID발생을 근본적으로 없앨 수는 없다.¹¹⁾ 일부 연구에서는 상온에서 장기간 보관을 할 경우에도 자연적으로 PID회복(PID Recovery)이 가능하다는 연구결과가 발표되었지만 실제 적용의 한계를 가지고 있다.¹²⁾ 한편 모듈이 동작하지 않는 야간에 모듈 프레임과 태양전지에 전압을 인가하여 모듈에서 PID를 회복시킬 수 있음을 알려져 있다.^{13) 14)} 심지어 이 기술을 적용하여 PID회복장치가 개발되었지만 다양한 모듈 설치환경을 고려하지 않아 합리적인 회복 조건을 적용하지 못하고 있는 실정이다. 따라서 전압을 이용한 PID회복 방법에서 온도, 습도, 전압과 같이 모듈의 발전 조건이 회복에 미치는 영향을 확인할 필요가 있다.

따라서 본 논문에서는 온도, 습도, 전압과 같이 외부 환경요소가 회복에 어떤 영향을 미치는지를 분석하기 위해서 다양한 실험을 진행하였다. 우선 PID발생에 가장 가혹한 조건인 85℃, 85%, 1000V의 실험환경에서 기본적인 PID회복특성을 파악하였다. 이를 기초로 각각의 환경요소가 PID회복에 어떤 영향을 미치는지 확인하기 위하여 온도(0~85℃), 습도(0~85%), 전압(250~2000V)범위에서 실험을 진행하였다.

2. 실험방법

2.1 시료제작

실험에 사용된 모듈은 일반적으로 많이 사용되는 구조인 G-to-B(Glass to Backsheet) 타입의 모듈로 제작하였다. 모듈 제작에는 G社에서 P 타입의 웨이퍼로 제작된 약15%의 효율을 갖는 6인치의 다결정 실리콘 태양전지를 사용하였다. 리본(Ribbon)의 경우 0.15mm*2.0mm 구리선에 62Sn36Pb2Ag의 솔더로 코팅된 리본을 이용하였다. 리본의 납땜은 S社의 Current Welding방식의 테빙(Tabbing) 장치를 이용하여 리본을 태양전지와 전기적으로 연결하였다. 봉지재는 쉽게 PID를 발생시키기 위하여 약 0.45 μ m 두께를 갖는 J社의 EVA를 사용하여 Fast Cure Type의 라미네이터 장비를 이용하여 라미네이션 하였다. 또한 모듈 제작에 사용된 백시트는 Tedlar / Polyester / Tedlar 구조이며, 사용된 유리는 철분 함유량이 0.03% 이하인 태양광모듈용 저 철분 강화유리이다. 정션박스(Junction box) 및 알루미늄 프레임 대신 모듈의 전면에는 Fig. 1과 같이 두께 1.5t의 구리판을 부착하여 표면전도성을 높여줌과 동시에 전압을 인가할 수 있게 전극으로 사용하였다.

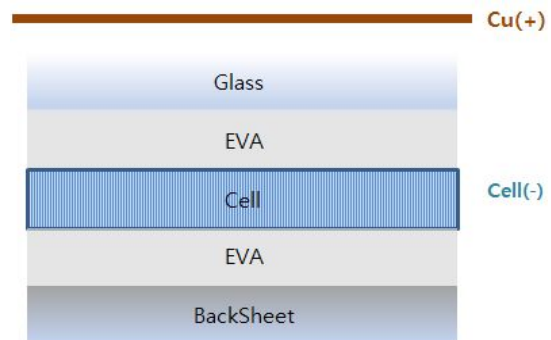


Fig. 1 Fabricated module and copper electrode

2.2 PID회복 실험

제작된 모듈은 태양전지 시뮬레이터(Solar

Cell Simulator)를 이용하여 실험 전·후의 출력 값을 측정하여 회복되는 비율을 확인하였다. 또한 모든 모듈은 PID에 의해 출력변화된 것을 확인하기 위하여 각 실험 전·후 모듈의 EL(Electro-Luminescence)이미지를 비교하였다. 모듈에 인위적으로 PID를 발생시키기 위해 구리판에는 Fig. 2와같이 DC Power Supply의 (+)전압을 인가하고, 모듈은 양 전극을 단락(Short)시킨 상태로 (-)전압을 인가하여 실제 PID발생 환경과 유사한 조건을 만들었다. 반면 PID 회복은 구리판에는 (-)전압, 모듈에는 (+)전압을 각각 인가하였다. 각 실험은 외부환경에 의한 영향을 최소화시키기 위하여 Fig. 3에서 보이는 항온·항습 챔버(Chamber) 내에서 모든 실험이 진행되었다. 모듈의 PID 발생은 항상 온도 85 $^{\circ}$ C, 상대습도 85%, 1000V의 전압의 동일 한 조건에서 6시간 진행하였으며,



[유리/EVA(185×185mm),구리전극 (156×156mm)]

Fig. 2 Cross section structure of module with copper electrode

이에 반하여 온도, 습도, 전압이 다른 다양한 환경조건에서 6시간 동안 PID회복을 시켜 출력을 측정하였다. 이와 같은 PID발생과 회복을 반복함으로써 각 조건에서 PID 발생 이전 초기 출력 대비 회복이후의 출력 비를 구하여

회복률 변화를 계산하여 비교하였다.



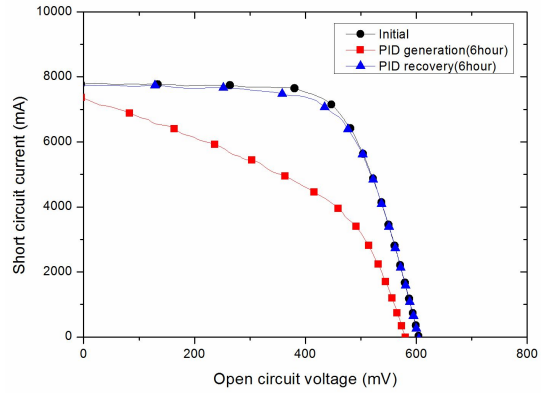
Fig. 3 DC Power Supply and Temperature&Humidity Chamber

3. 실험결과

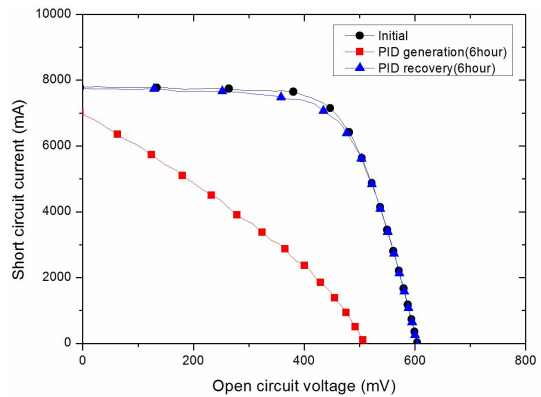
3.1 85°C, 85%, 1000V 조건에서 PID발생 및 PID회복

본 실험은 PID발생과 회복을 반복적으로 진행하였을 때 회복률 변화를 확인하기 위해 실험을 진행하였다. 이를 위해 두 개의 모듈을 이용하여 PID발생시킬 수 있는 환경 즉 온도 85°C, 습도 85%, 전압 1000V에서 PID발생과 회복을 반복적으로 진행하면서 회복 시 모듈의 출력 변화특성을 확인하였다. 회복률은 PID 발생 이전과 회복 이후의 모듈 출력비로 계산하였으며, 발생과 회복을 총 7회 반복하면서 회복률 변화를 확인하였다. Fig. 4는 처음 PID 발생과 회복을 진행하면서 두 모듈의 I-V Curve를 보여주고 있다. 그림에서 보다시퍼 모듈에 PID발생 이후 낮은 병렬 저항(Shunt resistance) 특성을 갖으면서 출력이 줄어드는 것을 볼 수 있다. 이는 기존에 알려진 것과 같이 전위차에 의해 전면 유리에 있는 양이온이 태양전지 표면 및 내부로 이동하여 전자의 재결합을 촉진하여 누설전류가 증가하게 되는

것으로 추정할 수 있다.



(a)



(b)

Fig. 4 (a) I-V Curves of No.1 module during first PID generation and recovery (b) I-V Curves of No.2 module during first PID generation and recovery

반면 다시 모듈이 회복 되더라도 병렬저항은 완벽하게 회복되지 않기 때문에 출력은 초기 값보다 감소하는 것을 알 수 있다. 결국 회복이 반복될수록 모듈의 병렬저항은 더욱 감소하기 때문에 모듈의 출력은 점차 저하된다. Fig. 5는 PID발생과 회복을 1회 진행하는 동안 각각의 모듈 EL 이미지 변화를 비교한 결과를 보여주고 있다. (a),(b)모듈 모두 PID발생 이후 전체적인 색이 더욱 어두워지는 것을

볼 수 있다. 이는 모듈들이 발전능력이 현저하게 저하되는 것으로서 Fig. 4의 I-V Curve에서와 같이 모듈의 출력특성이 감소하게 된다. 특히 (b)모듈의 경우 PID발생 이후 (a)모듈보다 짙은 색으로 변화됨으로써 출력이 더욱 감소하게 되는 것을 확인할 수 있다. 회복 이후 모듈은 실험 전과 색의 변화가 거의 없으므로 보아 모듈의 발전능력의 차는 크지 않으며, 이는 Fig. 4의 결과와 유사한 것을 볼 수 있다.

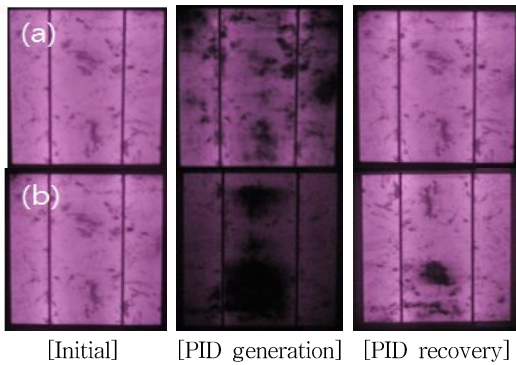


Fig. 5 Electro Luminescence images of two modules during first PID Generation and recovery test

Fig. 6은 PID발생과 회복을 총7회 반복 했을 때 모듈의 출력변화를 나타내고 있다. 첫 번째 모듈의 1회 실험 후 회복되는 출력이 초기대비 5.25%감소한 94.75%의 출력을 나타냈다. 2회에서는 92.68%, 3회에서는 92.77%, 4회에서는 85.58%, 5회에서는 85.02%의 회복률을 보였다. 두 번째 시료에서도 마찬가지로 매우 유사한 경향을 나타냈다. 또한 PID발생과 회복을 반복적으로 진행하게 되면 저하율은 다소 불규칙적인 특성을 나타냈으며, 회복률은 일정하게 감소하는 경향을 보였다. 결국 PID발생과 회복이 반복될수록 회복되는 출력은 점차 선형적으로 감소하게 됨을 알 수 있으며, 4회 이후부터는 약 85%대의 일정한 회

복률을 가지는 것을 볼 수 있다. 이는 회복이 반복될수록 태양전지의 표면에 양이온의 잔류량이 점차 증가하면서 회복되는 비율이 줄어드는 것으로 판단할 수 있다.

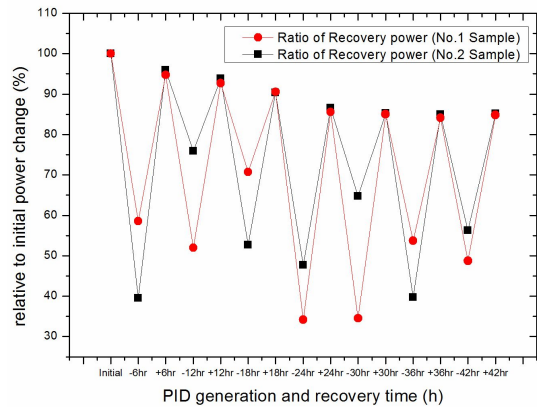


Fig. 6 Ratio of power change of module according to some PID generation and recovery tests

3.2 온도에 의한 PID회복특성 변화

일반적으로 모듈은 고온/다습한 환경에 프레임과 셀과의 전위차가 커질 수로 더욱 쉽게 PID가 발생하지만 회복과의 상관관계를 확인하기 위하여 몇 가지 연구를 진행하였다. 본 실험에서는 단지 외기온도가 PID 회복에 미치는 영향을 확인하기 위하여 실험을 진행하였다. 이를 위하여 온도 85℃, 습도 85%에서 1000V 전압으로 6시간 일정한 조건하에서 PID를 발생시켰다. 반면 85% 습도와 1000V 전압을 일정하게 유지하면서 단지 외부 온도만 0~ 85℃까지 25℃씩 온도를 증가시키면서 PID회복률 변화를 확인하였다. 실험결과의 재현성을 확보하기 위하여 본 실험은 두 번 진행함으로써 총 10개의 모듈을 이용하였다. 또한 Fig.6의 결과를 통하여 회복률의 변화가 일정한 6시간씩 5회 반복한 이후 회복된 이후 모듈의 출력을 측정하여 회복률을 계산하였

다. Table 1은 PID 발생 이전의 출력과 각 온도에서 회복된 이후의 모듈의 출력을 나타내고 있다. 이 결과를 바탕으로 각 실험에서의 회복률은 Fig. 7에서와 같이 각각 84.22~85.36%, 84.08~85.30%로써 약1%내외로 균일한 출력 변화가 있는 것을 알 수 있다. 이를 통해 모듈의 PID회복은 외부온도에 의한 영향은 크지 않다는 것으로 확인할 수 있다.

Table 1 Power of modules by generation and recovery PID under various temperatures

Temp	Test	Module number [ea]	Initial power [W]	Recovery Power [W]
0℃	first	1	3.198	2.719
	second	2	3.195	2.710
25℃	first	3	3.201	2.717
	second	4	3.210	2.699
45℃	first	5	3.189	2.715
	second	6	3.210	2.738
65℃	first	7	3.211	2.741
	second	8	3.197	2.719
85℃	first	9	3.182	2.680
	second	10	3.199	2.708

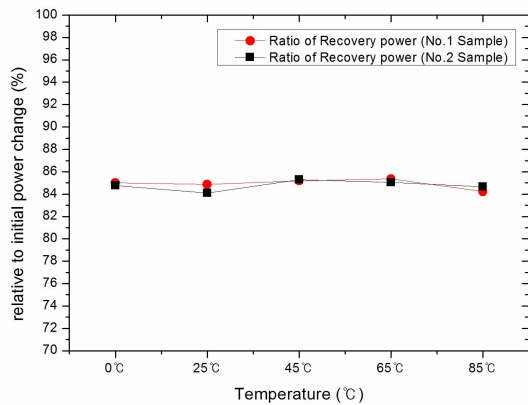


Fig. 7 Ratio of PID recovery power to initial power of modules by Temperature change

3.3 습도에 의한 PID회복특성 변화

본 연구는 습도가 PID회복에 어떤 영향을

미치는지 확인하기 위해서 실험을 진행하였다. PID 발생은 온도 85℃, 습도 85%, 전압 1000V하에서 이루어졌으며, 반면 PID 회복은 85℃ 온도와 1000V 전압은 고정한 뒤 습도 0~85%까지 변화시켜 가면서 수행 하였다. 두 번의 실험을 반복하여 모듈자체의 특성 차이로 인해 발생하는 회복률 차를 확인하였다. Table 2는 PID발생 이전 모듈의 초기 출력과 회복되었을 때의 출력변화를 나타내고 있다.

Table 2 Power of modules by generation and recovery PID under various humidities

Humid	Test	Module number [ea]	Initial power [W]	Recovery Power [W]
0%	first	1	3.208	2.720
	second	2	3.212	2.731
25%	first	3	3.195	2.728
	second	4	3.219	2.747
45%	first	5	3.211	2.719
	second	6	3.192	2.699
65%	first	7	3.204	2.732
	second	8	3.211	2.721
85%	first	9	3.189	2.716
	second	10	3.212	2.725

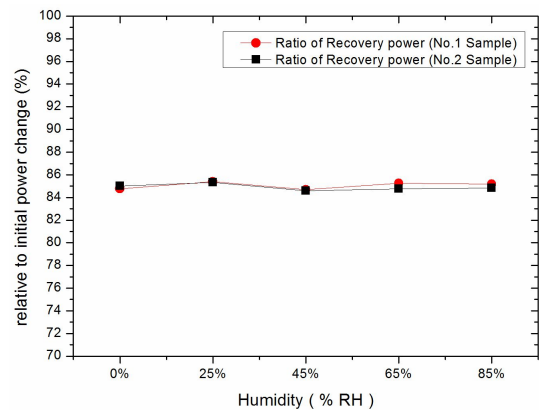


Fig. 8 Ratio of PID recovery power to initial power of modules by Humidity change

이를 기초로 초기 출력 대비 회복되었을 때

의 출력 비를 Fig.8에서 볼 수 있다. 이 결과를 통하여 습도 0~85%까지의 회복률은 각각 84.68~85.27%, 84.56~85.34%이며, 평균 회복률은 0.6%내외로 습도에 의한 영향성 또한 크지 않은 것을 확인 할 수 있다. 이는 결국 실제 PID가 발생한 모듈을 회복시킬 때 온도와 습도는 미미하게 영향을 줄 것으로 판단된다.

3.4 전압에 의한 PID회복특성 변화

마지막으로 전압에 의한 PID회복특성을 변화를 확인하기 위해 실험을 진행하였다. PID 발생 조건은 이전의 실험과 동일하게 온도 85°C, 습도 85%, 전압 1000V하에서 6시간동안 진행하였다. 반면 PID 회복은 온도 85°C, 습도 85%는 일정한 상태에서 인가 전압만 250V~2000V까지 상승시켜가며 출력을 측정 비교하였다. 또한 각 실험은 두 번 반복적으로 진행하여 각각의 회복전압에서의 출력 변화를 관찰하였다. Table 3은 PID 발생이전의 초기 출력과 회복 이후의 출력 변화를 나타내고 있다.

Table 3 Power of modules by generation and recovery PID under various voltages

Volt	Test	Module number [ea]	Initial power [W]	Recovery Power [W]
250V	first	1	3.229	1.810
	second	2	3.188	1.843
500V	first	3	3.215	2.232
	second	4	3.202	2.146
1000V	first	5	3.219	2.71
	second	6	3.195	2.699
1500V	first	7	3.205	2.725
	second	8	3.192	2.711
2000V	first	9	3.198	2.742
	second	10	3.191	2.729

또한 이를 바탕으로 Fig. 9는 각 전압에서의 회복율을 계산하여 나타내고 있다. 그림에서

와 같이 250V에서 회복률은 56.05~57.81%이며, 500V에서는 67.02~69.42%, 1000V에서는 84.19~85.10%로 전압이 증가할수록 회복률은 선형적으로 증가하는 추세를 나타내는 것을 알 수 있다. 2000V에서는 85.15~85.74%의 회복률을 보였으며, 반면, 1000V이상의 전압부터는 회복률이 85.15~85.74% 이내로 일정한 경향을 나타내는 것을 확인할 수 있다. 이 결과를 통해 일정 전압 이하에서 PID회복 정도는 차이가 나지만 임의의 전압 이상에서는 인가되는 전압이 회복률 변화에 영향이 없는 것을 알 수 있다. 따라서 회복률을 극대화시키기 위해서는 저전압 보다는 고전압에서 유리하며, 이때 최소한의 전압은 각각의 모듈 제작 조건에 따라 달라질 것으로 판단된다.

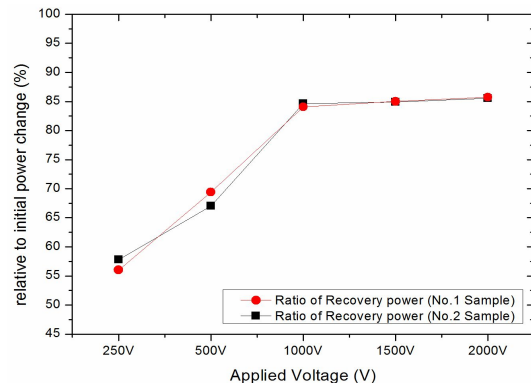


Fig. 9 Ratio of PID recovery power to initial power of modules by Voltage change

4. 결 론

본 논문은 결정질 실리콘 태양전지모듈의 열화현상 중 PID현상에 의해 열화 된 모듈의 회복조건에 관한 연구를 진행하였다. 일반적으로 알려진 역전압 인가 방식의 PID회복방법에서 PID 발생과 회복이 반복적으로 진행될 때 나타나는 회복률 변화뿐만 아니라 외기

온도, 습도, 전압에 의한 회복 특성을 실험적으로 확인하였다. 그 결과 다음과 같이 몇 가지 의미 있는 결과를 얻을 수 있었다.

- (1) PID가 발생한 모듈에 역전압을 이용하여 회복시킬지라도 완벽한 회복이 불가능하다는 것을 알 수 있었다. 또한 PID 발생과 회복이 반복될수록 회복률은 점차 감소하게 되며, 4회 반복 이 후 회복률은 약 85%로 일정하게 저하되는 것을 알 수 있었다.
- (2) 온도와 습도는 회복률에 대한 영향이 적었지만, 전압은 저전압에서 고전압으로 갈수록 회복률이 점차 증가함을 보였고, 1000V 이상에서는 회복률이 더 이상 증가하지 않고 포화되는 것을 알 수 있었다. 즉 인가되는 전압이 PID회복에 있어서 중요한 요소임을 본 연구결과를 통해 예상할 수 있다.

본 논문의 결과는 보다 합리적인 회복조건을 구현할 수 있는 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다. 또한 추후 Glass to Glass 타입 과 같이 보다 다양한 모듈 제작조건 및 환경조건에 관한 PID회복기술과 회복에 중요한 요소인 전압과 회복시간의 상관관계에 대한 연구를 통해 보다 더 효과적인 PID회복조건을 구현할 수 있을 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 한국에너지기술연구원의 주요 사업 (B5-2420)과 2015년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행한 결과입니다(No.20143010011820)

Reference

1. C. G. Lee, K. S. Kim, G. H. Kang, Analysis with Aging Case of Field Exposed PV modules,

- Journal of the Korean Solar Energy Society, Vol.30, pp.411-413, 2010. 11
2. S. Pingel, O. Frank, M. Winkler, S Oaryan, T. Geipel, H. Hoehne and J. Berghold, in Proceedings of the 35th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (Honolulu, HI, June2010) p. 2817.
3. J. Berghold, O. Frank, H. Hoehne, S. Pingel, B. Richardson and M. Winkler, in Proceedings of the 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference(Valencia, Spain, September 2010) p.3753.
4. P. Hacke, M. Kempe, K. Terwilliger, S. Glick, N. Call, S. Johnston, S. Kurtz, I. Bennett and M. Kloos, in Proceedings of the 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference (Valencia, Spain, September 2010) p.37604
5. K. Mishina, A. Ogishi, K. Ueno, D. Imai, T. Saruwatari, T. Yamazaki, T. Doi, K. Hara, N. Ikeno, A. Ogura, A. Masuda, in Proceedings of the 28th European Photovoltaic Solar Energy Conference (Paris, France, October 2013) p.1139
6. G. H. Kang, H. B. Kim, T. H. Jung, Y. C. Ju, S. H. Ko, H. E. Song, Prediction of the Potential Induced Degradation of Photovoltaic Modules Based on the Leakage Current Flowing Through Glass Laminated with Ethylene Vinyl Acetate, Journal of Solar Energy Engineering, Vol.137, 2015
7. Q-Cells Se., Solar cell, solar cell manufacturing method and testing method, US patent No. US20110308602 A1, 2011.
8. K. Mishina, A. Ogishi, K. Ueno, D. Imai, T. Saruwatari, T. Yamazaki, T. Doi, K. Hara, N. Ikeno, A. Ogura, A. Masuda, in Proceedings of the 28th European Photovoltaic Solar Energy Conference (Paris, France, October 2013) p.1139.
9. H. Mehlich, D. Decker, U. Scheit, M. Uhlig, S. Frigge, M. Runge, B. Heinze, H.-P. Sperrlich, J. Mai, H. Schlemm, E. Vetter, J. Höhne, S.

- Reichel and W. Stein, in Proceedings of the 27th European Photovoltaic Solar Energy Conference (Frankfurt, Germany, September 2012) p. 3411.
10. H. Nagel, A. Metz, K. Wangemann, in Proceedings of the 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference (Hamburg, Germany, September 2011) p. 3107.
 11. H. Mehlich, D. Decker, U. Scheit, M. Uhlig, S. Frigge, M. Runge, B. Heinze, H.-P. Sperrlich, J. Mai, H. Schlemm, E. Vetter, J. Höhne, S. Reichel and W. Stein, in Proceedings of the 27th European Photovoltaic Solar Energy Conference (Frankfurt, Germany, September 2012) p. 3411.
 12. S. Pingel, S. Janke, O. Frank, in Proceedings of the 27th European Photovoltaic Solar Energy Conference (Frankfurt, Germany, September 2012) p. 3379.
 13. K. Mishina, A. Ogishi, K. Ueno, D. Imai, T. Saruwatari, T. Yamazaki, T. Doi, K. Hara, N. Ikeno, A. Ogura, A. Masuda, in Proceedings of the 28th European Photovoltaic Solar Energy Conference (Paris, France, October 2013) p.1139.
 14. D. Lausch, V. Naumann, A. Graff, A. Hähnel, S. Hübner, O. Breitenstein, C. Hagendorf, and J. Bagdahn, 4th International Conference on Crystalline Silicon Photovoltaics (Hertogenbosch, Netherland, March 2014)

