옥외 태양광 발전 시스템의 Potential Induced Degradation 진단 및 야간 역전압 회복 연구

최훈주
(주)신성이엔지
솔라사업부문
기술지원팀

김광현
(주)신성이엔지
솔라사업부문
기술지원팀

장동식
(주)신성이엔지
솔라사업부문
기술지원팀

배수현
고려대학교
신소재공학과

박노창*
전자부품연구원
융복합전자소재
연구센터

오원욱*
전자부품연구원
융복합전자소재
연구센터

요 약

The potential induced degradation (PID) phenomenon shows severe power loss within several years from the initial installation of solar power system. The accumulated power loss by PID is inevitable because the PID is suspected only if the power loss exceeds several percent. In this paper, we analyzed the cases of PID diagnosis and recovery by visiting the suspected PID site about 17 months after the installation of the 100kW PV system. The power difference of the two 50kW inverters was more than 20kWh, and the PR difference was more than 8%. From the beginning of the installation, the difference in power gradually increased. The recovery was observed for about 7 months by applying 1000V in the reverse bias at night. As a result, the

power difference of the two inverters was recovered to within 2kWh. In the case of a power station suffering from PID in the field, it will be helpful for stable development operation by quick diagnosis and problem solving.

서 론

태양광 모듈의 PID 현상은 2010년 Solon사에서 최초로 발표 한 이후로 최근까지 활발히 연구가 진행되어 왔다.[1,2] PID는 접지된 태양광 모듈의 프레임과 태양전지 사이의 전압 차이로 인해 유리에 포함된 Na 이온이 유리에서 태양전지로 이동하면서 발생된다. 태양전지로 이동한 Na 이온은 태양전지의 stacking fault를 따라 PN 접합으로 이동하여 심각한 출력 손실이 발생한다.[3] PID는 태양전지 반사방지막의 굴절률과 두께, 태양 전지의 stacking fault, 봉지재의 부피 저항과 같은 다양한 변수에 의해 결정된다.[1–3]

옥외 태양광 발전 시스템에서 PID는 초기에 진단이 어렵다. 특히, 태양광 발전소에서 일사량을 모니터링하지 않는 경우, 기상환경의 변화에 따른 PID 출력 손실을 감지하기가 어렵다. 이로 인해, 출력 저하가 현저하게 진행되어야만 PID 발생을 의심하게 된다. 또한, 발전사업주, 태양전지 및 모듈 제조사, 설치업체 등 이해충돌에 의해 해결하는데 어려움을 겪게 된다. 최근 대다수의 태양전지와 모듈 제조사들은 PID free 태양전지 및 모듈을 개발하고 시판중이다. 그럼에도 불구하고, 기존 설치되었거나, 전문적인 점검이 필요한 발전소들의 사례들이 종종 존재한다.

PID 현상은 영구적인 출력 저하를 야기하는 것이 아니라 일정한 조건이 주어질 경우 다시 모듈의 출력이 회복되는 특성이 존재한다고 알려져 있다.[1,2] PID가 발생하는 상황과 반대의 전압이 인가될 경우, 즉 역전압이 모듈에 인가되거나,[4,5] 전압이 가해지지 않은 상태에서 열처리가 진행될 경우[6–8] 출력이 다시 회복되는 현상이 보고되었다. 접지 전위와 상대적으로 +1000V의 크기로 프레임과 태양전지 사이에 전위차가 발생하여 PID가 일어난 후, 전압의 방향을 반대로 하여 −1000V 전압을 외부에서 인가할 경우 모듈 출력이 다시 초기의 결과로 회복되는 결과를 통해 PID 현상은 가역 반응으로 해석되고 있다. 온도, 역전압에 의해 PID가 해소되는 연구 결과는 많이 보고되었고, 현재 회복이 가능하다고 인식되고 있지만 아직 그 원인에 대한 연구는 부족한 상황이다. 현재까지 보고된 PID 회복 원인으로는 stacking fault 내부로 침투한 Na 이온이 다시 역전압, 온도에 의해 실리콘 표면으로 빠져나가는 재확산 반응이 일어나기 때문으로 보고되었다.[7] PID 이후 열화된 영역이 온도 및 역전압이 인가될 경우 감소하고, Na 이온이 stacking fault 내부에서 사라지는 것이 확인되었다.[7] 옥외 설치된 모듈의 경우 PID가 발생되면 시스템 전체의 출력 감소를 야기할 수 있는 관계로 연구 결과를 바탕으로 모듈의 출력을 회복하려는 노력이 시도되고 있다. 회복을 하는 연구들이 진행되어 왔으나, 실제 옥외 발전 시스템의 사례 중심의 발표는 찾기 힘들다.

본 논문에서는 실제 옥외 태양광 발전소의 모니터링 데이터를 이용해서 PID 발생 유무를 판단하고, 진단 및 PID 회복을 위해 야간에 역전압 방식의 offset box 적용한 사례를 분석하였다.

실 험

경기도에 위치한 100kW급 태양광 발전 시스템은 2종의 250W급 p타입 다결정 실리콘 태양광 모듈이 2대의 50kW 동일한 모델의 인버터에 설치되어 있다. 스트링은 22개의 모듈이 직렬연결되어 있고, 9개의 스트링이 병렬로 구성되어 한 개의 인버터에 동작한다. 모듈은 2014년 7월1일부터 가동된 이후 약 17개월 후 2015년 11월 두 인버터간의 1일 출력의 차이가 20kW 이상, PR값의 차이는 8~10% 발생하여 현장 점검을 진행하였다. 현장 점검은 스트링의 전압, 전류, 출력을 비교하고, IR 및 야간에 스트링의 EL을 측정하였다. PID 현상이 발생한 스트링의 양끝단 모듈을

수거하여 표준 상태에서 I–V를 측정하였다. PID에 의한 출력 손실을 회복하기 위해서 2016년 1월 야간 역전압 방식으로 1000V를 적용하였다. 2016년 7월 31일까지 회복 현상을 관찰하였다.

결과 및 고찰

PID 진단

그림 1은 설치 초기 2014년 7월1일부터 2015년 12월 31일까지 정상 인버터와 PID 발생 의심 시스템의 PR 및 PR 차이를 보여준다. 동일한 50kW급 두 개의 시스템은 초기부터 차이가 나기 시작해서 약 17개월 동안 PID 발생 시스템은 약 10%정도 출력 손실이 발생하였다. 이러한 출력 손실이 발생하였지만, 모니터링 출력 데이터를 비교하기 전까지는 발전시스템의 문제점을 인식하기 어렵다.

정밀한 진단을 하기 위해서 인버터별 3개의 스트링의 전압, 전류, 출력을 측정한 결과는 표 1과 같다. 정상 인버터의 스트링 출력에 비하여, PID 발생 스트링 출력은 평균 15.7% 출력 손실이 발생하였다.

그림 2의 (–) 쪽 모듈의 IR 카메라 이미지를 보면 핫스팟에 의한 미스매치 현상을 확인할 수 있다. 그림 3의 (a)는 야간에 스트링 EL 이미지를 보면, (–) 지역의 모듈들은 발광하지 않고, (+) 지역의 모듈들은 정상으로 판별되었다.

표 2는 스트링의 (–) 지역 끝단 모듈 2개를 수거하여 I–V 측정한 결과이다. 각각 정상 모듈 대비 53%, 60%의 출력값을 보이고 있다. PID 스트링의 경우 스트링의 (–)

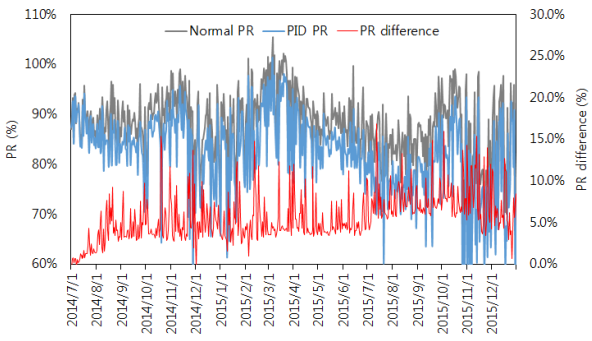

그림 1. PR and PR difference of normal and PID solar power system

표 1. String voltage, current and power of normal and PID inverter

	Normal inverter			PID inverter		
String No.	Voltage (V)	Current (A)	Power (kW)	Voltage (V)	Current (A)	Power (kW)
1	601.4	14.23	8.56	563.7	13.15	7.41
2	603.8	14.69	8.87	533.2	13.76	7.34
3	606.4	14.14	8.57	537.5	13.33	7.17
average	603.9	14.35	8.67	544.80	13.41	7.31

그림 2. IR image of PID module

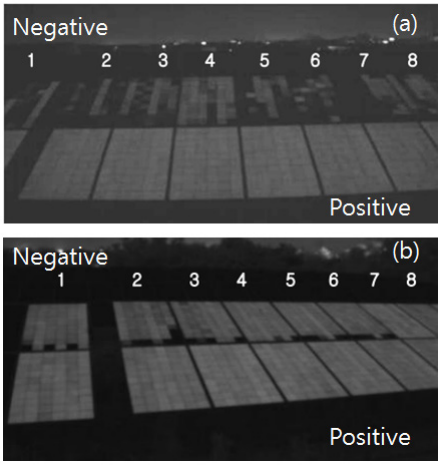

그림 3. EL images before/after PID recovery

표 2. PV moduels light I–V parameters

items	Pmax	Voc	Isc	FF	Rs	Rsh
Reference	250.3	37.7	8.76	0.76	0.49	151.4
PID PV module #1	132.3	35.0	8.44	0.45	1.00	13.5
PID PV module #2	150.4	34.9	8.61	0.50	0.83	25.4

끝단으로 갈수록 그 열화의 정도가 심해지고, 스트링의 출력 손실은 약 (-) 끝단 모듈의 1/4 수준을 보인다. PID에 의한 출력 손실은 초기에 Rsh의 감소가 진행되고, 점진적으로 Voc 손실과 FF 손실을 동반하게 된다.

PID 회복

PID가 발생하였을 때 PID-free 모듈을 교체하는 것이 최고의 방법이지만, 모든 모듈을 교체하지 않기 때문에 미스매치가 발생할 수 있다. 이로 인하여 일반적으로 PID offset box를 이용해서 야간에 역전압을 인가하고, 출력을 회복시키게 된다. 그림 4는 PID offset box의 배선도이다. PID offset box의 접지와 모듈의 접지로 인하여 프레임과 태양전지에 역전압을 걸어주게 되는 원리이다.

그림 5는 설치 초기부터 2016년 1월 offset box 설치 이후 회복까지 2년 1개월 간의 누적 출력 차이와 일일 출력 차이 및 PR 차이를 보여주고 있다. 약 2년간 5723kWh 정도의 누적 출력 손실이 발생하였고, 회복 시작 이후 4개월이 지난시점의 1일 출력 차이는 2kWh 이내로 보인다. 그림 3의 (b)는 회복 후 EL 이미지로 (-) 지역 하단의 약간의 태양전지만 회복이 덜 된 것이 확인되었다. 문헌상에도, 100% 회복이 되지 않는 것으로 알려져있고, 그 이유는 아직 명쾌하게 밝혀지지 않고 있다.

그림 6은 설치 초기 2014년부터 2016년 까지 3개년 동안 7월의 PR을 비교한 결과이다. 초기 한달동안 약 1.1%의 PR 차이를 보였고, 1년 후 약 7.2%로 PID 발생 시스템의 PR이 감소되었다. 회복 후 약 6개월이 지난 2016년의 경우 두 개의 시스템의 PR은 0.1% 차이로 회복되었다. 2016년은 정상 시스템도 감소하였지만, 실제 옥외 환경과 바이패스 다이오드 및 케이블 등의 불량을 교체하면서 생긴 손실이 반영되었기 때문에, 본 논문에서는 두 시스템의 차이로만 판별하였다. 또한, 정확하게 회복된 수치를 정량화하지는 못하였다.

PID를 방지하는 가장 좋은 방법은 PID free 모듈을 사용하는 것이지만, 기 설치된 옥외 태양광 발전소의 모듈의 경우 이러한 특성을 알 수 없다. PID 취약성은 태양 전지의 특성이 가장 중요한 요소로 고려된다.[9] 그래서 모듈을

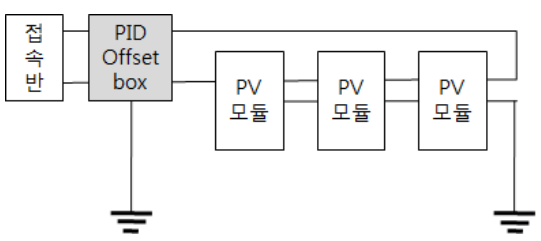

그림 4. Electrical schematic diagram

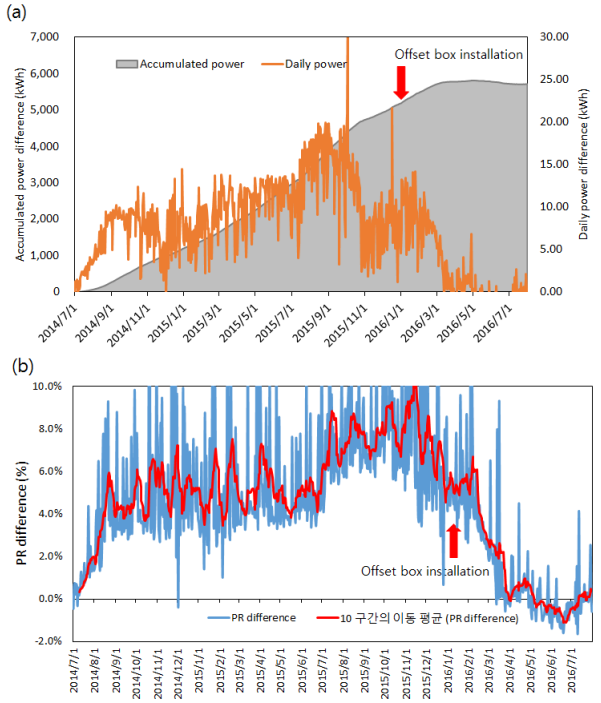

그림 5. The difference of accumulated power and daily power, PR difference

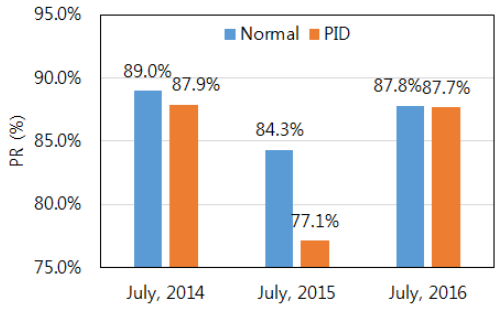

그림 6. PR trend of normal and PID system in July, from 2014 to 2016

만들기 전에 PID를 방지하기 위해 SiNx의 굴절률을 조정하여 ARC 층의 전도도를 높이거나 Si와 반사 방지 코팅층 사이에 SiO_2 층을 추가하는 방법이 있다.[10,11] 또한, 모듈 제조시 $10^{15}\Omega m$ 이상의 체적 저항의 EVA 또는 폴리올레핀과 같은 높은 체적저항의 봉지재를 사용하는 것도 효과적이다.[12] 심각한 열화가 이미 발생했을 때 PID free 모듈로 교체가 가능하나, 이해 관계자간에 복잡한 분쟁이 있고, 모든 모듈 교체가 아니기 때문에 출력의 미스매치 문제를 야기시킬 수 있다. 그러므로, 야간 동안 offset box를 이용하여 PID 모듈에 역전압을 적용하여 회복시키는 방법이 현실적이다.[13,14] Na 이온은 야간에 반대 방향으로 전압을 가함으로써 태양 전지의 PV 접합에서 유리로 이동하여 누설전류의 경로가 줄어들고, Rsh가 증가하게 된다. 본 시스템은 동일한 발전소에 2종의 동급의 태양광 모듈이 설치되어 모니터링 결과를 비교할 수 있었기 때문에 1년이 지난 시점에서 발견이 되었다. 실제 대다수의 발전소에서는 동일한 모듈의 출력 저하가 발생한 것을 관찰하기는 어려울 수 있기 때문에 모니터링과 주기적인 점검이 필수적이다.

결 론

본 논문에서는 옥외 태양광 발전시스템의 PID에 의한 출력 저하현상의 현장 진단과 야간 역전압 인가를 이용한 회복을 시행 후 출력의 추이를 분석하였다. 동일한 50kW급 인버터에서 모니터링 된 출력의 차이가 1년 동안에 약 7% 이상 차이를 보이고, 출력과 Voc, EL, 회수 후 I-V 측정 등을 시행한 결과 PID로 판별이 되었고, 약 4개월간 회복 후 두 시스템의 1일 발전량 차이는 2kWh 내로 개선되었다. 또한, 설치 이후 동일한 7월의 PR추이에서도 회복 후 두 시스템의 차이는 0.1%를 보인다. PID에 의한 심각한 출력 저하 현상은 실제 발전소에서 모니터링을 하고 있더라도 어느정도 출력이 저하된 이후에 점검을 통해 PID를 확인할 수 밖에 없는 실정이다. 이를 해결하기 위해 모니터링 데이터의 출력이 아닌 발전성능 추이를 먼저 살펴볼 필요가 있고, 주기적인 스트링과 인버터 점검을 통해서 사전에 검출할 수 있다. 또한, 야간 역전압을 이용한 PID offset box를 활용하여 약 4개월 정도의 기간동안 출력이 회복됨으로써 안정적인 발전 시스템의 운영에 도움이 될 것이다.

감사의 글

본 연구는 2017년 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(NO.20179210101140).

참고문헌

[1] Pingel, S., Frank, O., Winkler, M., Daryan, S., Geipel, T., Hoehne, H., & Berghold, J., 35th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, pp. 2817–2822, 2010.

[2] J. Berghold, O. Frank, H. Hoehne, S. Pingel, B. Richardson, M. Winkler, 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, pp. 3753–3759. 2010.

[3] V. Naumann, D. Lausch, A. H hnel, J. Bauer, O. Breitenstein, A. Graff, M. Werner, S. Swatek, S. Großer, J. Bagdahn, C. Hagendorf. Sol. Energy Mater. Sol. Cells, Vol. 120, pp. 383–389, 2014.

[4] J. Oh, S. Bowden and G. TamizhMani, IEEE Journal of Photovoltaics, Vol. 5, pp.1540–1548, 2015.

[5] B. Jaeckel, M. Cosic, J. Arp, Israel Journal of Chemistry, Vol. 55, pp. 1091, 2015.

[6] C. Taubitz, M. Sch tze and M. B. Koentopp, Proceedings of the 27th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, pp. 3172–3176, 2012.

[7] D. Lausch, V. Naumann, A. Graff, A. H hnel, O. Breitenstein, C. Hagendorf and J. Bagdahn, Energy Procedia, Vol. 55, pp. 486–493, 2014.

[8] C. Taubitz, M. Sch tze, M. Kr ber and M. B. Koentopp, Proceedings of the 28th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, pp. 3321–3323, 2013.
[9] W.Oh, J. Kim, B. Kang, S. Bae, K.D. Lee, H.–S. Lee, D. Kim, S.–I. Chan, Microelectron. Reliab. Vol. 64, pp. 646–649, 2016.
[10] V. Naumann, K. Ilse and C. Hagendorf, Proceedings of the 28th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, pp. 2994–2997, 2013.
[11] H. Nagel, P. Saint–Cast, M. Glatthaar and S. Glunz, Proceedings of the 29th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, pp. 2351–2355, 2014.
[12] J. Kapur, A. Bennett, J. Norwood, B. Hamzavytehrany and I. Kueppenbender, Proceedings of the 28th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, pp. 476–479, 2013.
[13] J. Oh, S. Bowden and G. Tamizhmani, Proceedings of the 40th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, pp. 925–929, 2014.
[14] B. Jaeckel, M. Cosic and J. Arp, Proceedings of the 29th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Amsterdam, the Netherlands, pp. 3350–3354, 2014.