

태양광 발전설비의 침수 시 설비영향 및 전기적 안전성 평가

(An Assessment on Effect of Facility and Electrical Safety During the Flooding of the Photovoltaic Power System)

박찬엄* · 정진수 · 한운기 · 임현성 · 송영상

(Chan-Eom Park · Jin-Soo Jung · Un-Ki Han · Hyun-Sung Lim · Young-Sang Song)

Abstract

The photovoltaic power system is performing power generation by being installed in outdoors. Therefore it has the characteristics affected by environmental factors. In particular, if the solar power generation facility connected to the grid, the power can be generated continuously in a state of being secured operating voltage of the inverter and solar irradiation. In that case, if an abnormal situation such as flooding or heavy rains has occur, the possibility of electric shock or damage of facilities due to current leakage or a floating matters is present. In this paper, we performed electrical safety assessment about the connection part, junction box and cable of the solar module when the solar power system was flooded. we also assessed whether or not the leakage current is occurred in case of the cable was damaged. As a result, in case of the leakage current is large, we can be known that it is the risk of electric shock as well as cause of inverter damage.

Key Words : Photovoltaic Power System, Leakage Current, Electric Shock, Electrical Safety, Flooding

1. 서 론

최근 들어 화석연료 사용의 증가로 인한 과도한 탄소 배출량의 증대에 따라, 지구온난화 및 탄소 배출량 저감을 위한 태양광, 연료전지 등의 에너지원에 대한 연구가 활발히 진행 중이다. 또한 온실가스 배출을 최소화하기 위한 방안의 마련을 위하여, 신·재생에

너지에 대한 연구와 보급이 확산되고 있다[1].

신·재생에너지 보급과 관련하여 이전 정부의 그린 홈 100만호 프로젝트와 연계한 사업을 지속적으로 수행하고 있다[2]. 태양광 발전 설비는 신·재생에너지원 중의 하나로 지구온난화 및 기후변화에 따라 그 필요성 및 중요성이 확대되고 있어 최근 수상 태양광[3-5], BIPV(Building Integrated Photovoltaic) 시스템 등에 대한 연구도 활발히 이루어지고 있는 실정이다[6-7]. 그러나 태양광 발전설비는 옥외에 노출된 형태로 설치되어 발전을 하기 때문에 환경적 요인에 의한 영향을 많이 받는 특징을 가지고 있다.

특히 계통에 연계되어 있는 태양광 발전설비는 일사량

* 주저자 : 한국전기안전공사 전기안전연구원
* Main author : KESCO ESRI
Tel : 063-716-2883, Fax : 063-716-9664
E-mail : cepark@kesco.or.kr
접수일자 : 2014년 8월 7일
1차심사 : 2014년 8월 13일
심사완료 : 2014년 9월 30일

및 인버터 동작 전압이 확보된 상황에서 지속적으로 발전을 할 수 있다는 점에서 발생가능성은 다소 크지 않으나, 하천부지나 지대가 낮은 장소에 구축되어 있는 태양광 발전설비의 경우, 폭우 또는 침수와 같은 이상상황이 발생하였을 시, 누설전류로 인한 감전사고 및 설비 소손 가능성이 존재한다.

특히 최근 기상이변으로 인한 국지성 호우의 발생 빈도가 높아지고 있고, 태풍이나 장마철 호우는 상기와 같은 상황이 발생할 가능성을 높일 수 있는 요인으로 대두된다고 할 수 있다.

그러나 상기 언급한 바와 같이 하천부지나 지대가 낮은 위치에 구축하는 태양광 발전설비의 경우, 수상 태양광과는 환경적 차이로 인하여, 설치 방법이나 자재가 상이하고 일반적인 형태로 시공하는 경우가 대부분이며, 태양광 설비의 침수 시 영향에 대한 고려는 다소 미흡하다고 할 수 있다.

또한 국제규격인 IEC 61215(결정계 실리콘 지상용 태양전지 모듈-설계인증 및 형식승인)[8], IEC 61730(태양광 발전 모듈 안전 조건)[9] 및 62257-7-1(지역 전력 공급용 소규모 신재생 복합전력 시스템의 권장 사항)[10] 등에서도 설비 침수를 고려한 부분은 존재하고 있지 않아 이에 대한 평가를 할 필요성이 있다.

따라서 본 연구에서는 태양광 발전설비의 침수 시 설비영향 및 전기적 안전성 평가를 위하여, 현재 태양광 발전설비 구성에 사용되는 실제 모듈 및 접속부위를 대상으로 실험환경을 구축하고 침수 시 방수 등급에 따른 방수 수준과 누설 전류, 부유물에 의한 케이블 및 모듈소손 시 설비 및 전기적 안전성에 대한 영향을 평가하고 그 결과를 제시하였다.

2. 태양광 발전설비 침수 시 평가 시스템 구성 및 환경구축

태양광 발전설비의 침수 시 발생할 수 있는 문제들에 대하여 고려하여야 할 요소들은 해당 설비의 영향 및 전기적 안전성 요소들로써, 상세 내용은 아래와 같다.

- 1) 침수 시 방수 부재로 인한 모듈 및 어레이 접속부위 (모듈 단자, 다이오드)에서의 누전 발생 가능성

여부

- 2) 누전 발생 시 인버터 및 계통에 미치는 영향
- 3) 정상상태와 침수 시의 발전량 차이
- 4) 부유물에 의한 모듈 및 어레이, 케이블 파손 시 성능 및 안전성 여부

상기 요소들에 대한 평가를 위한 침수 시 영향 평가 시스템은 그림 1에서와 같이 245W의 발전용량을 가진 모듈을 6 직렬, 2 병렬 형태로 하여 구성하였고, 각 어레이 별로 IP 65 및 IP 67 등급의 접속부위 결선 단자와 계통연계형 인버터를 설치하여, 실제 구축 운영되는 태양광 발전설비와 유사하도록 구성하였다.

태양광 발전설비의 침수 시 영향 평가를 위한 총 시험시간은 오후 12시부터 17시까지 진행하였다.

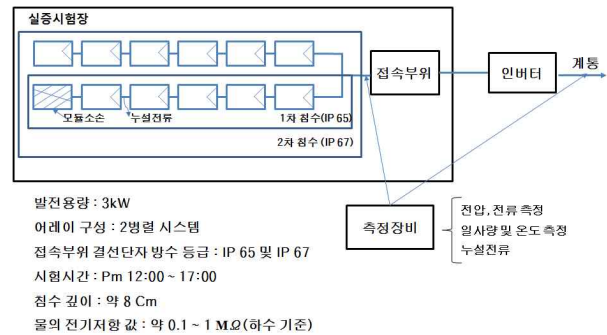


그림 1. 태양광 발전설비 침수 시 영향 평가 시스템
 Fig. 1. An Effect Evaluation system of during the flooding of the photovoltaic power system

3. 침수 시 영향 평가 항목 및 시험 절차

침수 시 영향 평가는 태양광 발전설비에 적용되는 모듈 및 접속부위(모듈 간 커넥터, 정선박스)에 대한 방수 성능과 발전성능 평가, 전류의 누설여부 및 누설 정도에 따른 감전 위험성 평가로 나누어 볼 수 있다.

방수성능은 어레이 별로 적용한 IP 65 및 IP 67 등급의 각 커넥터, 정선박스의 침수 상태에서 방수성능 저하를 인한 누전여부를 통한 방수성능 확인이며, 발전성능 평가는 태양광 모듈이 정상상태와 침수상태 일 경우, 거의 유사한 일사량 조건 하에서의 발전성능을 확인한다.

태양광 발전설비의 침수 시 설비영향 및 전기적 안전성 평가

그리고 감전 위험성 평가는 태양광 모듈이 침수된 상태에서 이벤트(케이블 및 모듈 소손)가 발생하였을 경우, 이전 상황대비 누설전류 증가여부 및 계통에의 영향, 그리고 이로 인한 감전 발생여부를 확인한다. 상기 기술한 내용을 표 1에 나타내었다.

표 1. 침수 시 영향 평가 구분에 따른 항목 및 내용
Table 1. Contents due to flooding effect evaluation

평가 구분	항목	내용
방수 성능	IP 65 및 IP 67 등급 접속부위 결선단자	각 등급의 제품 침수 시 영향 평가
누전 발생 시 영향	인버터 1차 및 2차 측 누설전류	인버터 및 계통에 미치는 영향 평가
발전 성능	일사량, 온도, 발전량	정상상태 및 침수 시 발전량 비교
감전 위험성	인버터 1차 및 2차 측 누설전류	침수 중 이벤트 발생(케이블 및 모듈 소손) 후 전기적 위험성 영향 평가

3.1 침수 시 영향 평가

3.1.1 방수 성능 평가

방수 성능 시험은 실제 사용되고 있는 모듈 및 접속 부속품에 대하여 진행하며, 본 시험에서는 국제 방수 등급 규격인 IP 65 및 IP 67에 해당하는 제품을 사용하였다. 여기서 IP 등급이란 IEC 60529 규정[11]에 의한 분진과 수분의 침투에 대한 산업 표준으로 상세 내용은 표 2에 각 IP 등급의 내용을 표기하였다.

표 2. IP 65 및 IP 67 등급의 내용
Table 2. Contents of IP Code(IP 65 and 67)

구분	내용
IP 65	6 : 인체 및 움직이는 부품에 의한 침투에 대한 완벽한 방지. 유해분진 침투 일체 차단
	5 : 모든 방향에서 분사되는 물방울 차단
IP 67	6 : 인체 및 움직이는 부품에 의한 침투에 대한 완벽한 방지. 유해분진 침투 일체 차단
	7 : 물에 넣었을 경우에 정해진 압력 하에서 일정기간 수분침투방지

3.1.2 누전 발생 시 인버터 및 계통영향 평가
IP 65 및 IP 67 등급의 접속부위 결선단자를 사용한 모듈에 대하여 침수 중 누전이 발생할 경우, 이로 인하여 인버터 1차 및 2차 측에서의 누설전류와 전류과형 분석을 통하여 인버터 및 계통에 미치는 영향을 평가한다.

3.1.3 발전 성능 평가

발전 성능은 일사량 및 온도가 유사한 조건에서의 정상상태, 즉 침수가 되지 않은 일반적인 상태에서의 발전량과 침수 시 발전량을 비교하여 침수에 의한 발전성능을 평가한다.

3.1.4 감전 위험성 평가

부유물에 의한 케이블 및 모듈 소손 시 영향을 평가하기 위하여, 태양광 모듈의 전원선 및 모듈을 소손 시킨 상태에서 침수하였을 때 누설전류 변화 상태를 측정 분석한다.

3.2 실험절차

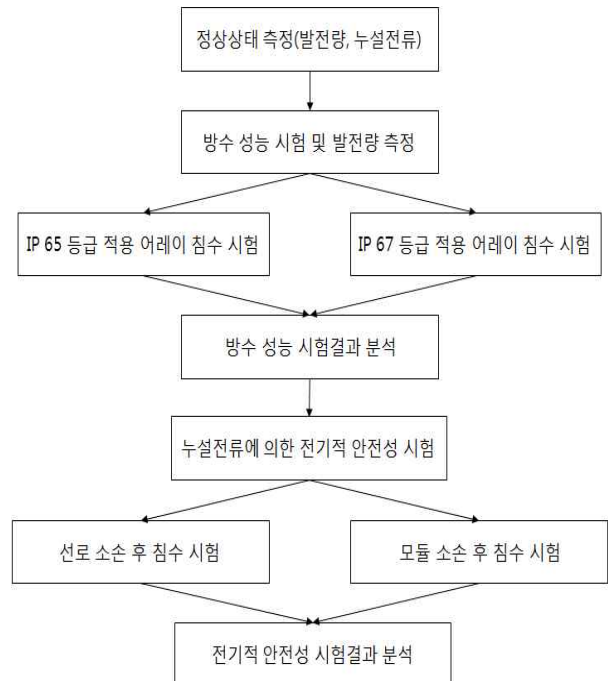


그림 2. 침수 시 영향 평가 시험 절차도
Fig. 2. Flow chart of flooding effect evaluation

실험절차는 그림 2에 나타낸 바와 같이 정상상태, 방수 성능시험 및 발전량 측정, 누설전류에 의한 전기적 안전성 시험으로 진행하며, 상세 내용은 다음과 같다.

1) 정상상태 측정

정상상태에서의 태양광 발전설비 발전량 및 인버터 1차 및 2차 측에서의 누설전류를 측정하여 기록한다.

2) 방수 성능시험 및 발전량 측정

- IP 65 등급으로 구성된 태양광 어레이를 침수한 후 누설전류를 측정하여 방수 성능 및 감전 위험성을 평가한다.
- IP 67 등급으로 구성된 태양광 어레이를 침수한 후 누설전류를 측정하여 방수 성능 및 감전 위험성을 평가한다.

3) 누설전류에 의한 전기적 안전성 시험

- 모듈의 정극성 또는 부극성 케이블을 소손 시킨 후 침수하여 누설전류를 측정하고 감전 위험성을 평가한다.
- 모듈의 양쪽 단자 케이블 모두를 소손 시킨 후 침수하여 누설전류를 측정하고 감전 위험성을 평가한다.
- 모듈의 외부를 소손 시킨 후 침수하여 누설전류를 측정하고 감전 위험성을 평가한다.

그림 3은 침수 시 영향 평가를 위한 환경 구축 현장을 나타낸 것으로서 그림에서 보는 바와 같이 모듈의 소손 전 침수상태 및 소손 후 침수 상태로 하여 진행하였다.

그림 3 (a)는 IP 65 및 67 등급의 케이블 및 정선박스를 적용한 태양광 모듈을 각 어레이로 구성하여 침수한 것으로서 모두 동일 한 조건을 적용하였다.

그림 3 (b)는 태양광 모듈의 케이블 및 정선박스를 침수한 것으로 상기와 마찬가지로 동일한 조건을 적용하였다.

그림 3 (c)와 3 (d)는 모듈 외부를 소손, 즉 케이블 및 모듈표면이 소손된 경우를 가정하여 임의로 외부 충격을 통한 소손 상태를 나타낸 것이다.



(a) 태양광 모듈 침수 상태



(b) 태양광 모듈 침수 상태(접속부위)



(c) 태양광 모듈 케이블 소손



(d) 태양광 모듈 소손

그림 3. 침수 시 영향 평가시스템 현장 사진
Fig. 3. Pictures of flooding effect evaluation system

4. 침수 시 영향 평가 결과

태양광 발전설비의 침수 시 영향 평가를 상기 그림 2의 절차에 따라 수행하였으며, 각 부분 별 결과는 다음과 같다.

4.1 정상상태 및 침수 시 발전량 비교

태양광 일사량 및 대기온도가 거의 유사한 환경에서 정상상태와 침수상태에서의 전압 및 전류, 발전량을 비교한 결과는 표 3과 같다.

표 3에서 보는 바와 같이 침수 시에는 셀 표면과

뒷면 온도가 물의 영향으로 인해 비교적 낮게 측정된 것을 알 수 있으며, 표면 온도의 영향으로 인해 전압은 상승한 형태를 나타내었고, 발전량 또한 일사량 대비 큰 차이를 나타내지 않는 결과를 보였다.

따라서 침수 시에도 태양광 발전설비는 정상상태와 유사하게 발전을 지속하는 것을 알 수 있다.

표 3. 정상상태 및 침수상태 시 발전량
Table 3. Generated power during steady state and flooded conditions

구분	일사 강도 (W/m ²)	대기 온도 (°C)	표면 온도 (°C)	뒷면 온도 (°C)	전압 (V)	전류 (A)	발전량 (W)
정상 상태	833.9	34.4	56.2	53.8	144.8	15.7	2,129
침수 상태	823.7	34.1	34.2	34.2	167.8	12.7	1,955

4.2 침수 시 방수 성능 시험 결과

방수 성능 시험은 IP 65 등급의 접속부위 결선단자를 사용한 어레이를 침수 후 DC 및 AC 누설전류를 측정하고, IP 65 등급적용 어레이를 제외한 후 추가로 IP 67 등급이 적용된 어레이를 침수한 상태에서 측정된 데이터를 기반으로 하였다.

표 4에서와 같이 시험결과 두 등급 모두 소량의 누설전류가 발생하는 것을 확인할 수 있었으며, IP 67 등급이 IP 65 등급보다 방수 성능이 우수한 것을 알 수 있다.

표 4. IP 등급 별 방수 성능 시험 결과
Table 4. Test result of waterproof performance

구분	DC누설전류 (mA)	AC누설전류 (mA)
IP 65 등급	130~150	10~12
IP 67 등급	20~30	3~5

4.3 침수 중 모듈 및 케이블 소손 시 누설 전류 영향 평가 결과

침수 중 모듈 및 케이블 소손 시 누설전류 영향 평가는 부유물 또는 외부 충격에 의하여 침수되어 있는 모듈이나 케이블이 소손되었을 시 누설되는 전류를 측정하여 그 정도를 확인하였다.

표 5에서와 같이 소손의 구분은 정극성 또는 부극성 케이블 하나에서의 소손, 두 개의 케이블 모두 소손, 그리고 모듈의 파손으로 나누어 시험하였으며, 결과는 소손 정도가 심해질수록 누설전류의 크기가 증가하는 것을 알 수 있다.

결과적으로 2선 케이블소손 및 모듈파손의 경우에서 AC 누설전류의 경우, 누전차단기 허용용량인 30mA를 크게 초과하였으며, DC의 경우에도 인체에 감전 영향을 줄 수 있는 전류가 측정된 것을 알 수 있다.

표 5. 침수되어 있는 모듈이나 케이블 소손 시 누설전류

Table 5. The test result of waterproof performance

구분	DC 누설전류(mA)	AC 누설전류(mA)
케이블 소손 (1선)	180~230	27~28
케이블 소손 (2선)	300~350	98~100
모듈 소손(크랙)	360~410	101~105

4.4 누전 발생 시 인버터 및 계통영향 평가 결과

누전이 발생할 시 인버터 및 계통영향은 아래 그림 4 및 5와 같다. 침수 시 누전이 발생한 케이스는 접속부위가 침수 되었을 때와 모듈 및 케이블이 소손된 경우로 나타낼 수 있으며, 전자의 경우 IP 등급에 따른 방수 성능 차이에 의한 누전을 확인한 경우로써, 누전이 발생하였으나 그 크기가 미약하여 인버터에 큰 영향을 주지 않은 것을 알 수 있다.

반면 후자의 경우에는 전자의 실험 후 조건에서 추가적으로 모듈표면 및 케이블을 소손시켰을 때 인버터 및 계통으로의 누전 영향 확대여부를 확인한

것으로써, 누설전류의 크기가 크고 계통 및 인버터 접지를 통해 누설전류가 유입되어, 인버터의 스위칭 동작에 영향을 주게 되고 그로 인해 AC 전압 및 전류는 큰 영향을 받지 않으나 DC 입력 전류에 왜란으로 작용한 것을 알 수 있다.

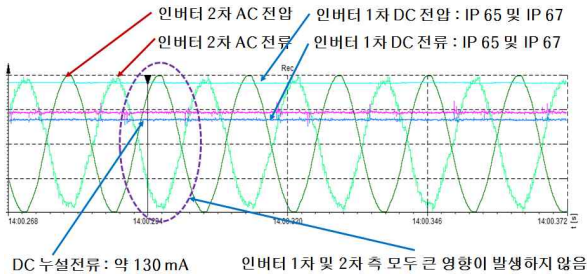


그림 4. 접속부위의 침수상태 시 전압, 전류 파형
Fig. 4. Waveforms during flooded conditions of junction part

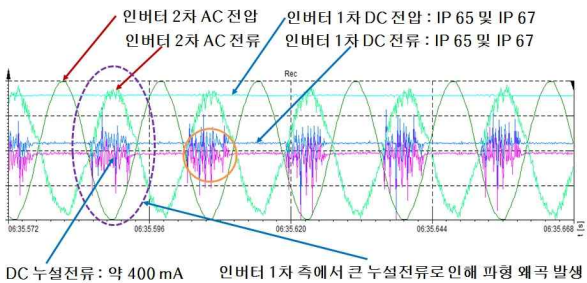


그림 5. 접속부위가 소손되어 침수 시 전압, 전류 파형
Fig. 5. Waveforms during flooded conditions of broken junction part

5. 결 론

본 실험에서는 상기와 같은 절차를 통하여 정상상태 및 태양광 발전설비의 침수 시 발전 성능과 설비 구성 부속품의 방수 등급에 따른 방수 성능, 그리고 모듈 및 케이블 소손 시 발생할 수 있는 전기적 안전성에 대한 결과를 확인하였다.

방수 성능 시험에서는 IP 65 등급보다 높은 IP 67 등급에서 성능이 더 우수한 것을 알 수 있었으며, 침수 가능성이 있는 지역에 설치되는 태양광 설비의 경우 IP 67 등급의 접속부위 결선단자로 시스템을 구축할 필요성이 있다고 할 수 있다.

누전 발생 시 인버터 및 계통 영향 평가에서는 접속 부위가 단순히 침수된 상황에서는 크기가 작은 누설 전류가 발생하여 큰 영향을 주지는 않았으나, 접속부위의 소손에 의해 절연이 파괴되어 누설전류의 크기가 커질 경우, 접지를 통하여 인버터로 유입되고, 입력 전류의 파형의 왜곡되는 결과를 나타내었으며, 이와 같은 상태가 지속될 시 인버터 내부에서의 소손이 발생할 가능성이 존재하는 것으로 나타났다.

케이블 및 모듈 소손에 따른 전기적 안전성 시험에서는 케이블이나 모듈의 소손 정도가 심각함에 따라 수증으로의 누설전류가 많이 발생할 수 있는 것을 알 수 있었다. 따라서 외부 충격에 의해 케이블이 소손되는 것을 최소화할 수 있는 방안이 필요하다고 할 수 있다.

결과적으로 서론에서도 언급 하였듯이 침수 가능성이 있는 지역에 설치되는 태양광 발전설비의 경우, 국내는 물론 국외에서도 본 연구결과와 같은 조건에서의 적정한 기준 및 설치방법이 구체적으로 정의되어 있지 않으므로 접속부위 및 결선단자는 방수등급이 더 높은 것을 적용할 필요성이 있으며, 누설전류 발생 시 인버터 및 계통에 좋지 않은 영향을 줄 가능성이 높고 인체 감전의 위험성 또한 존재한다는 것을 알 수 있다.

따라서 설비 보호 및 계통으로의 영향 과급 방지, 그리고 누전에 의한 감전 위험성을 인지할 수 있도록 그 방안은 마련하여야 할 것이다.

향후 장시간 침수 시 방수 성능시험, 접속함의 침수, 다수의 케이블 및 모듈 소손 그리고 침수 시 물의 오염도 증가 등과 같은 다양한 상황에서의 침수 시 발생 가능한 전기적 위험성에 대한 평가와 이에 대한 대처 방안이 강구되어야 할 것으로 생각된다.

감사의 글

본 연구는 2013년도 에너지관리공단 신재생에너지센터의 지원을 받아 수행한 연구로써, 관계부처에 감사드립니다.

References

[1] C.E. Park, W.K. Han, J.S. Jung, "An Assessment on Harmonics Effect in Customer and the Distributed Power

System during Grid Connection of Residential Fuel Cell System” KIEE Trans. Vol. 60, No. 6, Jun, 2011.

[2] C.E. Park, W.K. Han J.S. Jung, H.S. Lim, Y.s. Song, C.S. Kim, D.G. Lim, “An Assessment on Voltage and Power Quality in Load Facility during the Islanding of Residential Fuel Cell System. KIEE Trans. Vol. 62, No. 12, Dec, 2013.

[3] Y.K. Choi, J.S. Lee, “The Technique of Installing Floating Photovoltaic Systems”, Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society, Vol. 14, No. 9, 2013.

[4] Y.K. Choi, “An Experimental Study on Ground Resistivity and Grounding Resistance of Water Environment”, Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society, Vol. 15, No. 4, 2014.

[5] S.H. Kim, T.G. Lee, H.J. Joo, S.J. Yoon, “Structural Design and Installation of Tracking-type Floating PV Generation System”, Composites Research, Vol. 27, No. 2, 2014.

[6] G.J. Kim, S.J. Lee, H.B. Kang, J.H. Song, “An Evaluation Technique of Building Integrated Photovoltaic System Performance Test”, The Proceedings of the KIEE(World of Electricity), Vol 63, No. 3, 2014.

[7] J.H. Yoon, “The State of the Art in BIPV Technology” J. KIEEME, Vol. 27, No. 1, Jan 2014.

[8] KS C IEC 61215 Crystalline silicon terrestrial photovoltaic modules - Design qualification and type approval, 2011.11.09, Korean Industrial Standards.

[9] KS C IEC 61730 Photovoltaic Module Safety Qualification, 2013.11.12, Korean Industrial Standards.

[10] KS C IEC 62257-7-1 Recommendations for small renewable energy and hybrid systems for rural electrification - Part 7-1: Generator - Photovoltaic arrays, 2012.12, Korean Industrial Standards.

[11] KS C IEC 60529 Degrees of Protection Provided by Enclosures(IP Code), 2011.11, Korean Industrial Standards.

◇ 저자소개 ◇



박찬엄(朴燦嚴)

1977년 5월 8일생. 2001년 2월 강원대학교 삼척캠퍼스 제어계측공학과 졸업. 2003년 2월 중앙대학교 일반대학원 전자전기공학부 졸업(석사). 2007년 2월 동대학원 전자전기공학부 졸업(박사). 2007년 3월 ~2009년 2월 중앙대학교 정보통신연구원 연구교수. 2009년 3월~현재 한국전기안전공사 전기안전연구원 미래기술연구팀 주임연구원.



정진수(鄭鎭洙)

1976년 9월 12일생. 2003년 명지대학교 전기공학과 졸업. 2005년 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 2011년 동대학원 전기공학과 졸업(박사). 2004년~현재 한국전기안전공사 전기안전연구원 미래기술연구팀 선임연구원.



한운기(韓雲基)

1973년 6월 20일생. 1997년 목포대학교 전기공학과 졸업. 2001년 성균관대학교 전기공학과 졸업(석사). 2010년 숭실대학교 전기공학과 졸업(박사). 1998년~현재 한국전기안전공사 전기안전연구원 미래기술연구팀 책임연구원.



임현성(林炫成)

1981년 2월 18일생. 2006년 인천대학교 전기공학과 졸업. 2008년 인천대학교 전기공학과 졸업(석사). 2009년 3월~현재 한국전기안전공사 전기안전연구원 미래기술연구팀 주임연구원.



송영상(宋英上)

1981년 4월 27일생. 2006년 전남대학교 전기공학과 졸업. 2012년~현재 서울과학기술대학교 전기공학과 재학 중. 2006년 5월~현재 한국전기안전공사 전기안전연구원 미래기술연구팀 주임연구원.