

수상 태양광 발전설비 계통 연계 케이블 손상시 감전 위험에 관한 연구

(A Study on Risk of Electric Shock from Damaged Grid Connection Cable in
Floating Photovoltaic System)

송영상* · 전태현**

(Young-Sang Song · Taehyun Jeon)

Abstract

Recently, many renewable energy generating businesses are ongoing progress due to the introduction of the RPS(Renewable Portfolio Standards) as well as the needs of environmentally friendly energy resources. Researches on photovoltaic system are actively being processed since the photovoltaic system is relatively easy to install and becomes commercialized in many domestic application areas. Furthermore, the floating photovoltaic system is likely to be installed more actively since the conventional photovoltaic system requires relatively large areas of land. Also, the floating photovoltaic system is more efficient than photovoltaic system installed in land due to the operation in lower temperature. However, safety problems such as electric shock could arise since the cable should be installed in the water. In this paper, the leakage current and the voltage rising are measured and analyzed for the case when the cables are damaged connecting the floating photovoltaic system to the grid.

Key Words : Floating Photovoltaic System, Leakage Current, Voltage Rising

1. 서 론

2012년에 시행된 신재생 에너지 공급의무화제도(RPS : Renewable Portfolio Standards)는 국내발전사가 신재생에너지의 산업화를 위해서 발전량의 일정 비율을 신재생에너지로 공급하도록 의무화한 제도로써 설비규모 500MW 이상인 발전사업자는 2022년에는 총발전량의 10%를 신재생에너지로 공급해야 한다. 신재생에너지 발전원 중 태양광발전은 안정적으로 전

* 주저자 : 한국전기안전공사 전기안전연구원
주임연구원
** 교신저자 : 서울과학기술대학교 전기정보공학과 교수
* Main author : Korea Electrical Safety Corporation
Electrical Safety Research Institute
** Corresponding author : Seoul National University
of Science and Technology
Tel : 02-970-6409, Fax : 02-978-2754
E-mail : thjeon@seoultech.ac.kr
접수일자 : 2014년 4월 17일
1차심사 : 2014년 4월 19일
심사완료 : 2014년 7월 21일

력 생산이 가능하고 다른 신재생에너지 발전원에 비하여 설치가 간편하고 대중에게 널리 알려져 지속적인 발전 가능성이 있다. 또한 태양광 분야는 정부 주도로 제2반도체 산업으로 육성을 위한 기술로드맵 전략을 수립하여 추진하고 있으며 2016년까지 1,200MW 용량을 목표로 하고 있다[1]. 한 예로 최근 동서발전에서 1MW급 수상 태양광 발전소를 건설하는 등 수상 태양광에 관한 투자가 증가하고 있다. 또한 신안 앞바다에 수상 태양광 설치도 추진되고 있다. 태양광모듈은 셀의 온도가 1℃ 상승할 때 발전출력이 0.5% 이내로 감소하게 되는데 수상 태양광 발전은 육지에 비해 낮은 온도로 운영이 가능하기 때문에 효율성은 높일 수 있다는 장점을 가지고 있다[2]. 뿐만 아니라 육지의 경우 부지 확보가 어려운 점이 많기 때문에 수상 태양광 발전설비는 부지확보에 대해서도 유리한 장점이 있다.

현재 국내외 연구현황을 살펴보면 태양광 발전설비의 전기적 안전사항에 관하여 연구가 많이 진행되었다. 태양광 발전설비 전력 품질에 관한 사항 DC 접지 방법, 서지보호 방법 등 계통 연계 시 문제될 수 있는 사항과 설비보호, 감전보호에 대한 연구가 진행되었다. 그러나 최근 이슈화되고 있는 수상 태양광 발전설비 사고 발생 시 발생할 수 있는 위험성에 대한 검토가 부족하다.

수상태양광 발전설비의 경우 태풍과 같은 천재지변 또는 외부 사고에 의해 케이블 손상 등 절연 파괴 시 인체 감전 등의 재해가 일어날 가능성이 있다[3]. 따라서 본 논문에서는 수상 태양광 발전설비에서 계통으로 연계되는 케이블 손상 시 전위상승 및 누설전류 값을 측정하고 이를 통한 전기적 안전사항을 검토하였다.

2. 수상 태양광 발전설비의 구조

앞서 언급한 바와 같이 수상 태양광 발전은 부지와 효율 상의 장점이 있기 때문에 점차 확대될 것으로 전망된다. 수상태양광 발전시스템의 구조는 그림 1과 같다[1]. 수상 태양광 발전설비는 육상 태양광 발전설비와 다르게 수중에 뜰 수 있도록 부력체를 설치하고 앵커와 무게 추를 설치하여 충격을 완화시키고 태양광

발전설비를 고정한다[1]. 또한 수중 케이블을 통하여 계통과 연결시킨다. 수상태양광 발전설비는 수중 위에 설치되기 때문에 계류 기술이 무엇보다 중요하다. 아직까지 국내에서 계류 시설 이상으로 인한 사고는 발생하지 않았다. 그러나 계통과 연결하는 케이블은 항상 수중에 있기 때문에 위험성을 가지고 있다.

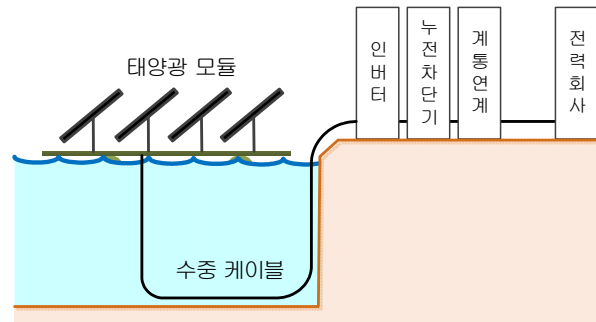


그림 1. 수상 태양광 발전시스템 구조
Fig. 1. Structure of floating photovoltaic system

3. 누설전류 및 전위상승 측정시스템 구축

측정시스템을 구축하기 위하여 그림 2와 같이 태양광 모듈을 6직렬로 연결하여 수조에 넣었으며 케이블을 인위적으로 손상시켰으며 손상된 케이블에 의한 전위상승과 누설전류를 측정하였다. 사용된 태양광 모듈은 정격용량 245W, 개방전압 37.1V, 단락전류 8.7A이며 케이블은 TFR-CV 4mm를 사용하였다. 측정 요소는 손상된 케이블과 거리에 따른 수중의 전위차, 손상된 케이블 간 누설전류, (+) 케이블과 모듈의 접지된 프레임 간 전위차이다.

침수된 태양광 모듈의 접속점 부분에서 전류 누설을 방지하기 위하여 방수등급 IP 67등급의 접속체를 사용하였다. IP 67등급은 인체 및 움직이는 부품에 의한 완벽한 방진이 가능하고 수중에 넣었을 때 일정한 압력 하에서 일정기간 수분침투를 방지할 수 있다.

측정 장비는 전력분석 장비인 DEWE-5000을 사용했다. 측정되는 전위차는 태양광 발전설비에서 일사량에 따라 전압이 변동될 수 있으므로 발전하는 전압을 160V로 환산하여 측정값을 비교, 분석하였다. 누설

전류는 태양광 모듈이 일사량과 온도에 따라 전력량이 변화하기 때문에 측정된 전력량 값을 600W으로 환산하여 측정값을 비교, 분석하였다. 또한, 실험 중 만약의 사고에 대비하여 인버터 후단에 누전차단기를 설치하였다.

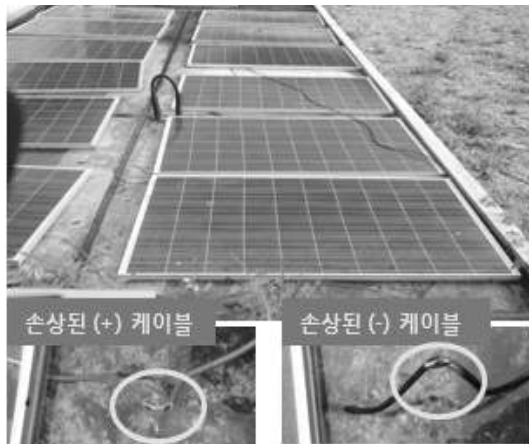


그림 2. 침수된 태양광 모듈 및 손상된 케이블
Fig. 2. Flooded photovoltaic module and damaged cable

첫번째 실험은 그림 3과 같이 모듈을 수중에 넣은 후 케이블을 인위적으로 손상시킨다. 손상시킨 케이블을 침수시킨 후 (-) 케이블과 수중의 거리를 조절하면서 (-) 케이블과 수중의 전위차를 측정했다. 거리는 30, 60, 100, 150cm로 조절하여 전위차를 측정했다.



그림 4. 침수된 태양광 모듈의 손상된 (+) 케이블과 (-) 케이블의 이격 거리에 따른 누설전류 측정
Fig. 4. Leakage current measurement according to the distance between damaged (+) cable and (-) cable of flooded photovoltaic module

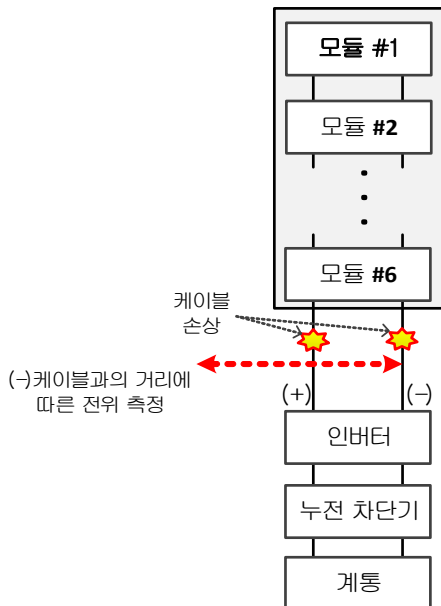


그림 3. 태양광 모듈의 손상된 (-)케이블과 수중 이격거리에 따른 전위차 측정
Fig. 3. Potential difference measurement between damaged (-) cable of photovoltaic module and point away from it in the water

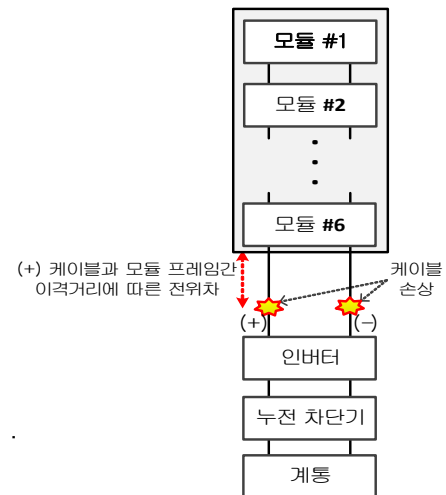


그림 5. 태양광 모듈의 손상된 (+) 케이블과 모듈 프레임과의 수중에서의 전위차 측정
Fig. 5. Potential difference measurement between damaged (+) cable and frame of module in the water

두 번째 실험은 그림 4와 같이 케이블을 손상시킨 후 (+) 케이블과 (-) 케이블의 이격 거리에 따른 누설 전류를 측정하는 실험이다. (+) 케이블과 (-) 케이블의 이격 거리를 30, 50, 70, 90cm로 조절하여 누설전류를 측정한다. 누설전류 측정은 인버터 전단에 직류용 클램프메타를 설치하여 케이블간 흐르는 전류 차이를 계산하여 측정했다.

세 번째 실험은 그림 5와 같이 손상된 (+) 케이블과 모듈 프레임의 접지된 부분과의 전위차를 측정한다. 손상된 (+) 케이블과 모듈 프레임의 이격 거리를 1, 30, 100cm로 조절하여 전위차를 측정하였다.

4. 실험결과 및 분석

첫 번째 실험을 진행한 결과 그림 6과 같이 (+)케이블과 이격 거리가 커질수록 전위차가 낮아지는 것을 알 수 있었다. 전위상승은 부유물과 물의 저항의 영향으로 미세한 전위차의 변동이 있었다. 그림 6의 데이터는 10초간 전위차를 나타내며 모듈에서 계통으로 공급되는 전압을 160V로 환산한 값이다. 시간에 따라 전위차의 변동은 있으나 10초간 평균데이터를 계산하면 손상된 케이블과 수중과의 간격이 커질수록 전위차가 감소함을 알 수 있다. 또한 케이블 간격에 따른 전위차를 평균값으로 계산하면 그림 7과 같이 나타나

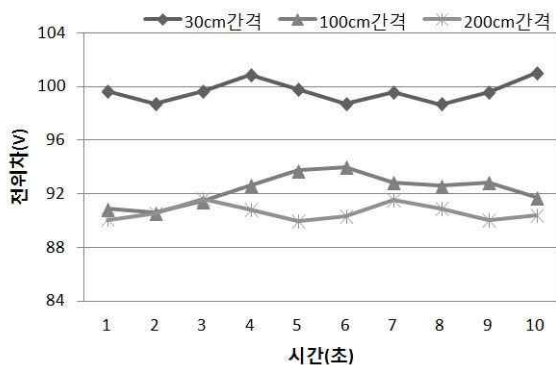


그림 6. 태양광 모듈의 손상된 (-)케이블과 수중 거리에 따른 전위차
Fig. 6. Potential difference between damaged (-) cable of photovoltaic module and point away from it in the water

며 30cm의 간격에서 약 100V의 전위차가 있으며 거리가 멀어질수록 전위차가 감소하였다.

두 번째 실험을 진행한 결과 그림 8과 같이 (+) 케이블과 (-) 케이블의 이격 거리가 작아질수록 누설전류가 증가하는 것을 볼 수 있었다. 그림 8의 데이터는 10초간 누설전류량의 평균값으로 전력량을 600W로 환산한 값이며 손상된 케이블 간 간격이 30cm일 때 누설전류가 약 22mA임을 알 수 있다.

세 번째 실험을 진행한 결과 (+)케이블과 (-)케이블의 전위차가 160V로 환산하였을 경우, 이격 거리가 거의 1cm일 경우 측정결과 그림 9와 같이 (+)케이블과

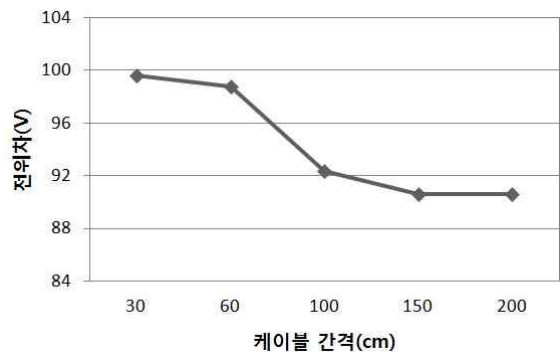


그림 7. 태양광 모듈의 손상된 (-)케이블과 수중 거리에 따른 전위차(평균값)
Fig. 7. Potential difference between damaged (-) cable of photovoltaic module and point away from it in the water(average value)

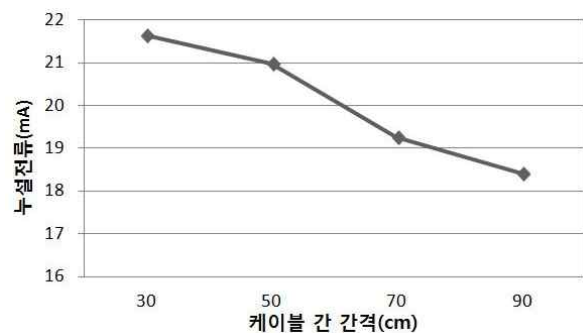


그림 8. 침수된 태양광 모듈의 손상된 (+)케이블과 (-)케이블의 이격거리에 따른 누설전류
Fig. 8. Leakage current according to the distance between damaged (+) cable and (-) cable of flooded photovoltaic module

모듈의 프레임간의 전위차는 약 48.2V 측정되었으며, 거리가 30cm인 경우에 약 2.7V가 측정되었다. 1m 이상 이격된 경우에는 측정된 전압은 약 0.5V으로 전위차가 거의 생기지 않았다. 여기서 모듈의 프레임은 접지되어 있기 때문에 접지선과 (+) 케이블과의 전위차와 동일하다.

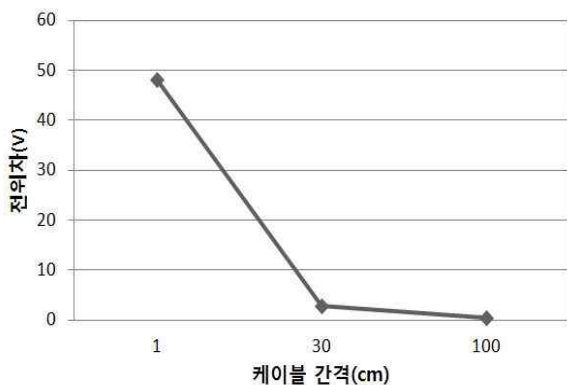


그림 9. 태양광 모듈의 손상된 (+) 케이블과 모듈 프레임과의 수중에서의 전위차
 Fig. 9. Potential difference between damaged (+) cable and frame of module in the water

첫 번째 실험의 (-) 케이블과의 거리에 따른 전위차를 보면 (-) 케이블과 거리가 멀어질수록 전위차가 낮아지는 것을 볼 수 있었다. (-) 케이블과의 1.5m 간격 내에서 90~100V의 전위차가 발생한다. 따라서 인체가 수중에서 손상된 (-) 케이블을 접촉하게 되면 전위차가 90~100V 사이가 가해지게 되고 수중에 있는 인체의 저항을 약 500Ω이라고 가정한다면 약 200mA의 전류가 흐르게 된다.

두 번째 실험은 (+)케이블과 (-)케이블의 거리에 따른 누설전류를 측정한 실험이다. 그림과 같이 거리가 가까워질수록 누설전류는 증가하는 것을 볼 수 있다. 또한 30~90cm의 거리에서 약 18~22mA의 누설전류가 발생하는 것을 알 수 있다. 태양광 발전설비에 정격감도 30mA 교류 누전차단기를 사용할 경우 일반적인 동작범위를 넘어선 34mA정도에 동작하며, 누설전류에 변화량이 없거나 기존에 누설전류가 많이 흐르고 있었을 경우에는 감도는 더 떨어진다[4]. 따라서 침수의 피해가 우려되는 육상에 설치된 태양광 발전설

비나 수중 태양광 발전설비의 경우 각 어레이 별로 직류용 누전차단기 사용을 함으로써 누전사고 발생 시 감전사고를 방지하여야 한다[5].

세 번째 실험에서는 (+)케이블과 모듈의 프레임이 거의 근접한 경우 전위차가 약 48.2V으로 측정되었고 이격 거리가 30cm 이상일 경우 전위차는 급격히 감소했다. 현재 산업안전보건법에서 안전전압으로 교류전압 30V로 규정하고 있으며 이를 직류전압으로 환산하면 42V이다. 또한 전기설비기술기준과 비교하면 수중에서 절연변압기 2차측에서 지락 보호장치를 설치하지 않아도 되는 안전전압은 30V 이하로 규정하고 있으며, IEC에서는 수중 전기설비의 경우 12V 이하로 규정하고 있다[6]. 따라서 48.2V의 전압이 인체에 직접적인 해를 가하지 않을 수 있으나, 전기재해의 경우 전격에 의해 발생하는 2차 재해가 있기 때문에 낮은 전압이라고 해서 안전하다고 단정할 수 없다.

5. 결 론

수중 태양광 발전설비의 계통 연계 케이블은 수중 환경에 있기 때문에 잠재적 위험성을 가지고 있다. 수중에 있는 케이블이 손상되었을 경우 손상된 케이블과 수중과의 간격이 30cm인 경우는 약 100V를 나타내었고 누설전류는 약 22mA가 측정되어 인체 저항에 따라 위험성이 있는 것으로 판단된다. 또한 케이블 손상 시 모듈 프레임과 가까운 거리에서는 수중 상태에서 위험전압이 가해질 수 있다. 따라서 수중 태양광 발전설비의 경우 기본적으로 각 어레이별로 직류용 퓨즈를 설치함을 물론 직류 누전차단기를 설치해야 한다. 또한 육상에 설치되더라도 침수될 위험성이 있는 태양광 발전설비나 수중 태양광 발전 설비는 점검 주기 단축 등 제도적 보완이 필요하다고 판단된다.

본 논문에서의 실험에 사용된 태양광 발전설비의 경우 6개의 모듈을 직렬로 연결하였고 빗물 환경 속에서 측정되었다. 측정값은 태양광 발전설비의 용량과 물의 저항 값에 따라 변동될 수 있으므로 이에 대한 추가적인 연구가 진행되어야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 산업기술혁신사업 에너지기술개발사업인 “무정전 자동 전환 절체를 위한 CTTS 국산화 기술 개발” 과제의 지원으로 수행되었습니다.(No. 201400078)

References

- [1] Young-geun Lee, Hyung-Joong Joo, Jeong-Hun Nam, and Soon-Jong Yoon, “Modified Design of Floating Type Photovoltaic Energy Generation System”, Journal of Korean society for Advanced Composite Structures, Vol.1, No.4, pp.18-27, 2010.12.
- [2] Sung-hun Lee, Nam-Hyung Lee, Hyeong-Cheol Choi, and Jin-O Kim, “Study on Analysis of Suitable Site for Development of Floating Photovoltaic System”, Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, Vol.26, No.7, pp.30-38, 2012.7.
- [3] Hyung-Ig Youn, Yeon-Hae Jung, and Hyung-Yong Jung, “A Safety Techniques of Photovoltaic Power Generating System”, Conference of KIEE, pp.308-309, 2008.9.
- [4] Hye-Jin Kim, Jongbok Baek, Gab-Su Seo, Kyusik Choi, Hyunsu Bae, and Bohyung Cho, “Research on Earth Leakage Circuit Breaker for DC-Based Green Home”, Conference of The Koeran Institute Of Power Electronics, pp.76-77, 2010.11.
- [5] Song-Yop Hahn, Hoo Sek Han, Jin Ho Han, Jong Min Oh, Hyung Guk Mun, and Yong Won Seo, “A Development of DC Leakage Current Breaker for Solar Power Generation System”, Conference of KIEE, pp.226-227, 2011.11.
- [6] Chong-Min Kim, Han-Sang Kim, Gi-Hyun Kim, and Geon-Ho Yi, “Improvement of Lighting Installation Technical Standard in Waterpark, Public Bath and Similar Places for the Prevention of Electric Shock”, Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, Vol.20, No.4, pp.78-85, 2006.5.

◆ 저자소개 ◆



송영상(宋英上)

1981년 4월 27일생. 2006년 전남대학교 전기공학과 졸업. 2012년~현재 서울과학기술대학교 산업대학원 전기공학과 석사과정. 2006년 5월~현재 한국전기안전공사 전기안전연구원 미래기술연구팀 주임 연구원.



전태현(田太賢)

1967년 1월 31일생. 1989년 연세대학교 전기공학과 졸업. 1993년 Minnesota 대학원 졸업(석사). 1997년 Minnesota 대학교 대학원 졸업(박사). 1997년 Motorola 연구원. 1998년 Texas Instruments 연구원. 2002년 한국전자통신연구원(ETRI) 선임 연구원. 2005년 3월~현재 서울과학기술대학교 전기정보 공학과 교수.