Journal of the Society of Disaster Information Vol.14 No.2 ▌pp. 130 - 140

Available online at www.sodi.or.kr

태양광 발전단지 내부 그리드의 안전 특성화 접지 설계에 관한 연구

A Study on the Safety Characterization Grounding Design of the Inner Photovoltaic System

김홍용[a,*], 윤석호[b,1]

Hong-Yong Kim[a,*], Suk-Ho Yoon[b,1]

[a] *Department of IT Convergence, University of Hansei, 30 Hansei ro, Gunpo city, Gyeonggi do, 435-742 Republic of Korea*

[b] *Professor, Dept. of Fire Protection Engineering, University of Gimcheon, 214, Daehak-ro, Gimcheon-si, Gyeongsangbuk-do, Korea*

A B S T R A C T

Purpose: In this paper, we propose a design technique for the safety characterization grounding in the construction of the photovoltaic power generation complex which can be useful and useful as an alternative power energy source in our society. In other words, we will introduce the application of safety grounding for each application, which can improve and optimize the reliability of the internal grid from the cell module to the electric room in the photovoltaic power generation complex.

Method: We analyze the earth resistivity of the soil in the solar power plant and use the computer program (CDEGS) to analyze the contact voltage and stratospheric voltage causing the electric shock, and propose the calculation and calculation method of the safety ground. In addition, we will discuss the importance of semi-permanent ground electrode selection in consideration of soil environment.

Results: We could obtain the maximum and minimum value of ground resistivity for each of the three areas of the data measured by the Wenner 4 - electrode method. The measured data was substituted into the basic equation and calculated with a MATLAB computer program. That is, it can be determined that the thickness of the minimum resistance value is the most favorable soil environment for installing the ground electrode.

Conclusion: Through this study, we propose a grounding system design method that can suppress the potential rise on the ground surface in the inner grid of solar power plant according to each case. However, the development of smart devices capable of accumulating big data and a monitoring system capable of real-time monitoring of seismic changes in earth resistances and grounding systems should be further studied.

KEYWORDS

Safety ground,
Solar power generation,
Characterization ground electrode

연구목적: 본 논문에서는 우리사회의 대체 전력 에너지원으로 적합하고 유용하게 활용 할 수 있는 태양광 발전 단지 건설 시 안전 특성화 접지에 관한 설계 기법을 제안하고자 한다. 즉, 태양광 발전 단지 내의 셀 모듈부터 전기실까지 내부 그리드의 신뢰성을 향상하고 최적화 할 수 있는 용도별 안전 접지를 적용한 사례들을 소개하고자 한다.

연구방법: 태양광 발전 단지 내 토양의 대지 고유저항을 분석하고 컴퓨터 프로그램(CDEGS)을 활용해 전격을 일으키는 접촉전압과 보폭전압을 해석하여 안전접지에 관한 계산과 산출방법에 대해 제안한다. 또한, 토양 환경을 고려한 반영구적인 접지전극의 재료 선정에 관한 연구에 중요성을 논하고자 한다.

연구결과: Wenner 4 전극법으로 측정한 데이터 중 3개 지역의 CASE별 대지 고유저항 최대값과 최소값을 얻을 수 있었고 이 두 값으로 토양의 두께를 알 수 있다. 측정된 데이터를 기본 수식 $\rho = 6.28aR$에 대입하여 MATLAB 컴퓨터 프로그램으로 계산하였다. 즉, 최소 저항값의 두께는 접지전극을 설치하기에 가장 유리한 토양 환경임을 판단 할 수 있다.

결론: 본 연구를 통해 지역의 CASE별 태양광 발전소 내부 그리드에 대지 표면에 전위상승을 억제 할 수 있는 접지시스템 설계기법을 제안하였다. 하지만 대지의 고유저항과 접지시스템에 경련변화를 실시간으로 확인 할 수 있는 모니터링 시스템과 빅 데이터를 축적 할 수 있는 스마트 디바이스의 개발이 추가적으로 연구되어야 할 것이다.

안전접지,
태양광발전,
특성화 접지전극

ⓒ 2018 Society of Disaster Information All rights reserved

* Corresponding author. Tel. 82-10-5494-6150. Email. hy_kim76@uohs.ac.kr

1 Tel. 82-10-3518-5396. Email. capa2020@naver.com

ARTICLE HISTORY

Received Apr. 06, 2018

Revised Apr. 09, 2018

Accepted Jun. 18, 2018

1976-2208 ⓒ 2018 Society of Disaster Information All rights reserved.

http://dx.doi.org/10.15683/kosdi.2018.06.30.130

1. 서 론

최근 우리사회의 지역 곳곳에 농토(인삼밭, 논 등), 나대지, 자투리 토지 등을 활용한 소규모의 개인사업자가 태양광 발전소를 건설하거나, 국가 단위 또는 지방자치단체에서 발주하는 대단지 프로젝트가 전국적으로 활발히 건설되고 있다. 태양광 발전소 건립사업은 많은 초기 비용이 투자되고 건설 후 O&M 부분도 체계적으로 적립되지 않은 사각지대에서 발생되는 손실 비용을 감수하여야 하는 것이 현실이다.

본 논문에서는 태양광 발전 단지의 고가 설비들을 직격뇌와 외부에서 유입되는 이상전압이나 서지로부터 보호 할 수 있는 안전접지 설계 기법을 소개하고자 한다. 모두 3개 지역에서 각각의 용도에 적합하다고 판단되어지는 접지공법을 적용하였으며, 적용기준은 IEEE Std. 80-2000, KS C IEC 62305, KS C IEC 61936-1를 기반하여 대지 표면에 전위 상승을 억제 할 수 있고 전위 경도를 작게 할 수 있는 방법을 선정하였다. 실제로 사람이 충전부에 접촉하게 되면 인체의 전위차(전위경도)가 발생하여 전격이 일어난다. 따라서 인체 안전 한계(안전한 범위) 전류를 고려하여 접촉· 보폭전압과 최대예상전압을 경감 할 수 있는 메시 접지시스템(접지전극)을 이용한 절연협조와 등전위화된 안전 접지 설계가 요구된다.

2. 사례별 토양 분석

2.1 테스트 베드(Test Bad) 선정

우리나라의 지역적 특성과 산업 생태계에 매우 긍정적인 평가를 받고 있는 대체에너지로 태양광 발전소를 들 수 있다. 이러한 태양광 발전소를 구성하는 전력 그리드를 더욱 효율적이고 안전하게 특성화 할 수 있는 접지 설계 기법이 요구되고 이다. 본 논문에서는 신규로 건설하는 태양광 발전단지 중 3개 지역을 테스트 베드로 임의로 선정하여 각 현장의 대지 고유저항을 측정하고 토양을 분석한 후 각 설비 부하특성에 최적화 할 수 있도록 안전 접지 설계 기법을 연구 하고자 한다.

☞ Case1. 경기도 용인시 태양광 발전 단지 내 전기실
☞ Case2. 충남 공주시 태양광 발전 단지 내 전기실
☞ Case3. 경북 안동시 태양광 셀 주변 및 주요 설비

2.2 대지 고유저항 측정 방법 선정

대지 고유저항 측정은 일반적으로 많이 활용하는 WENER 4 전극법으로 선정 하였다. 4개의 같은 크기를 갖는 Test Probe를 Table 1.의 간격으로 대지에 박아서 설치하며, 연결된 회로에 따라 바깥쪽 Probe(C1,C2)는 전류회로, 내부 쪽 탐침(P1,P2)은 전원회로가 된다.

Table 1. Ground Resistivity Measurement Depth

Probe Spacing(m)	Measured Soil Depth(m)
1	1
2	2
4	4
8	8
16	16

WENER 4 전극법 측정에 필요한 회로 구성은 Fig. 1.에 나타내었다.

① 외부 2개의 Test Probe에 직류전원과 전류계를 연결한다.

② 내부 2개의 Test Probe에는 전위차 측정을 위해 전압계를 함께 연결한다.

이렇게 2개의 전압계 및 전류계로 얻어진 측정값은

옴의법칙 식 $R = E/I$ (1)로 부터 계산된 대지저항(R)을 얻게 된다.

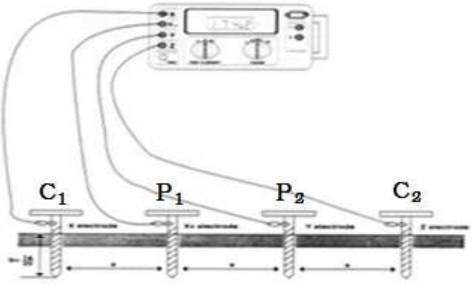


Fig. 1. Earth Resistance connection diagram

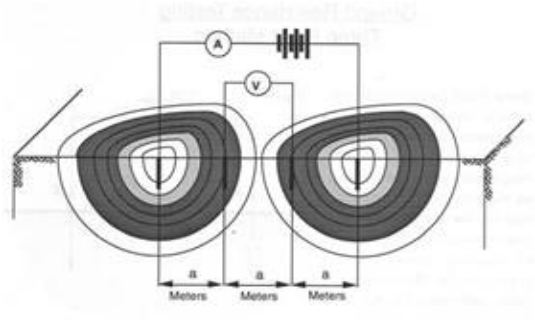


Fig. 2 Earth Resistance Measurement Principles

이때 전류는 Fig. 2에 나타난 바와 같이 Test Probe로 부터 등심원을 그리며 토양을 통하여 흐르게 되며 각각 토양의 영향범위(Shell)에서 Test Probe 간의 거리 “a” 를 조절함으로써 효율적인 측정값을 얻을 수 있다. 토양의 계층은 매우 다양한 형태의 구조로 되어있으며, 현장에서 측정한 저항 수치는 접지 시스템 선정에 매우 핵심적인 요소이다.

이때, 대지저항 R과 고유저항 ρ를 구하면,

$$R = \frac{\rho l}{2\pi a^2} \quad (2)$$

$$\rho = \frac{2\pi a^2 R}{l} \quad (3)$$

으로 나타낼 수 있으며, 고유저항ρ는

$$\rho = 2\pi a R = 6.28 a R \quad (4)$$

로 나타낼 수 있다.

2.3 대지 고유저항 현장측정

Fig. 3. Ground Resistance Measuring Equipment

Case1. 경기도 용인시 태양광 발전 단지 내 전기실 (측정일자 : 2017.10.26.)

1m Measured Value (167Ω↑)

2m Measured Value (62.1Ω)

4m Measured Value (10.6Ω)

8m Measured Value (3.74Ω)

16m Measured Value (3.25Ω↓)

Fig. 4. Ground Resistance Measuring Value of CASE1

Case2. 충남 공주시 태양광 발전 단지 내 전기실 (측정일자 : 2017.10.31.)

1m Measured Value (47.2Ω↑)

2m Measured Value (29.4Ω)

4m Measured Value (24.0Ω)

8m Measured Value (10.8Ω)

16m Measured Value (8.7Ω↓)

Fig. 5. Ground Resistance Measuring Value of CASE2

Case3. 경북 안동시 태양광 셀 주변 및 주요 설비 (측정일자 : 2017.11.06.)

1m Measured Value (22.1Ω↑)

2m Measured Value (15.6Ω)

4m Measured Value (10.5Ω)

8m Measured Value (4.66Ω)

16m Measured Value (1.98Ω↓)

Fig. 6. Ground Resistance Measuring Value of CASE3

2.4 대지 고유저항 분석

대지 고유저항 측정은 태양광 발전설비가 설치되는 지역 반경 200m 범위에서 측정하였다. Case별 대지 고유저항 측정 분석 결과는 Table 2와 같다. 대지 고유저항 측정값은 MATLAB 프로그램에 수식 $\rho = 6.28aR$ (5)를 적용하여 지질 분포에 결과 값을 산출하였다.

Table 2. MATLAB Simulation Model for Earth Resistivity Measurement

Probe Spacing (m)	Case1		Case2		Case3	
	Measured Value (Ω)	Resistivity Factor (Ω·m)	Measured Value (Ω)	Resistivity Factor (Ω·m)	Measured Value (Ω)	Resistivity Factor (Ω·m)
1	167↑	1048.7↑	47.2↑	297↓	22.1↑	138.8↓
2	62.1	779.9	29.4	370	15.6	195.9
4	10.6	266.2	24.0	604	10.5	263.7↑
8	3.74	187.8↓	10.8	542	4.66	234.1
16	3.25↓	326.5	8.70↓	653↑	1.98↓	198.9

3. CDEGS 접지 설계 시뮬레이션

3.1 접지 설계 흐름도

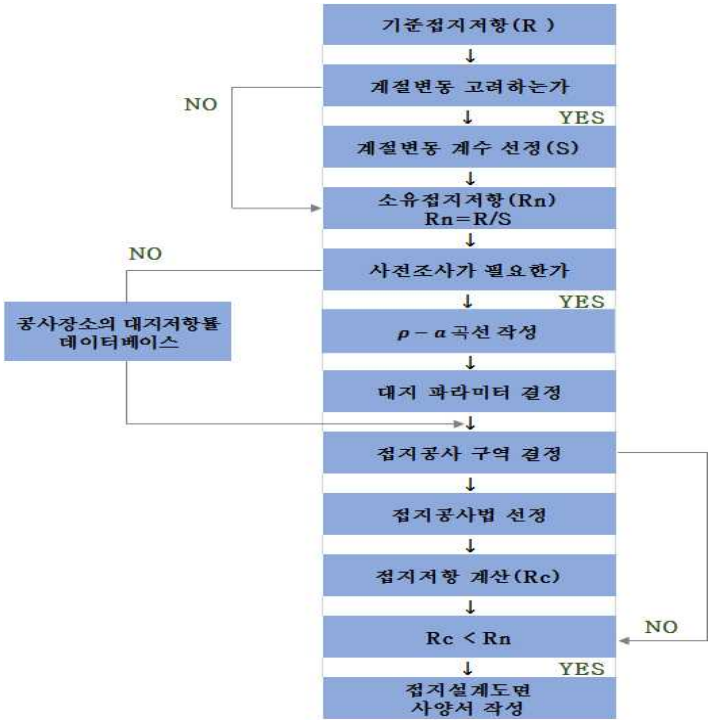


Fig. 7. Grounding design flow chart

3.2 CDEGS 시뮬레이션 결과

대지 고유저항의 측정으로 얻어진 Table 2.의 측정값으로 Fig7.의 접지설계 절차(Grounding design flow chart)에 따라 CDEGS 모듈을 활용하여 토양의 지층을 2개층(상지층, 하지층)으로 분석하였다. 2개층의 분석값으로 각 층간 두께를 산출하면 Table 3.과 같이 상지층이 최소값Upper layer) 하지층이 최대값(Ground floor)으로 나타난다.

Table 3. Earth resistivity simulation model

Division	Strata analysis Earth resistivity		
	Layer	Earth resistivity(Ω·m)	Thickness(m)
CASE1	Upper layer	1,231.2 ↓	0.94
	Ground floor	2,000.1 ↑	∞
CASE2	Upper layer	244.8 ↓	0.97
	Ground floor	667.6 ↑	∞
CASE3	Upper layer	110.2 ↓	0.57
	Ground floor	230.2 ↑	∞

결국 최소 저항값(Upper layer)의 두께는 접지전극을 설치하기에 가장 유리한 토양 환경임을 알 수 있다. Table 4는 Table 2 중 CASE 2.에 데이터를 CDEGS 프로그램으로 안전 접지 설계한 원문 상세 결과서이다.

Table 4. CASE2 CDEGS GROUND DESIGN SPECIFICATION

DATE OF RUN (Start)= DAY 03 / Month 11 / Year 2017			☞ 설계 일 월 년
STARTING TIME= 13:49:39:36			☞ 설계 시간
==========< G R O U N D I N G (SYSTEM INFORMATION SUMMARY) >==========			
Run ID	:	통합접지	☞ 설계 I.D
System of Units: Metric	:	Metric	☞ 시스템의 단위
Earth Potential Calculations	:	None	☞ 전체접지시스템의 대지전위 계산
Mutual Resistance Calculations	:	NO	☞ 타 접지간의 상호저항의 계산은 안함
Type of Electrodes Considered	:	Main Electrode ONLY	☞ 주 접지전극(하나의 접지 시스템)
Soil Type Selected: Multi-Layer Horizontal	:	Multi-Layer Horizontal	☞ 지질구조는 수평2지층으로 설계반영
SPLITS/FCDIST Scaling Factor	:	1.0000	☞ 시스템의 기준 계수
MULTI-LAYER EARTH CHARACTERISTICS USED BY PROGRAM			☞ 대지 저항률의 다 지층분석

LAYER No.	TYPE	REFLECTION COEFFICIENT	RESISTIVITY (ohm-meter)	THICKNESS (METERS)	
1	Air	0.00000	0.100000E+11	Infinite	☞ 대기층 저항률
2	Soil	-1.00000	**244.772**	**0.975986**	☞ 상지층 저항률
3	Soil	0.463436	**667.597**	**Infinite**	☞ 하지층 저항률

CONFIGURATION OF MAIN ELECTRODE
==========

Original Electrical Current Flowing In Electrode.....: 1000.0 amperes	☞ 접지전극에 1000A전류를 흘림
Current Scaling Factor (SPLITS/FCDIST/specified).: 1.0000	☞ 전류의 기준 계수
Adjusted Electrical Current Flowing In Electrode... : 1000.0 amperes	☞ 전극에 유입되는 전류
Number of Conductors in Electrode.....: 10	☞ 전극 도체의 수
Resistance of Electrode System.....: **4.8057 ohms**	☞ 계산된 접지저항

SUBDIVISION
==========

Grand Total of Conductors After Subdivision.....: 28	☞ 총 도체를 28등분으로 세분화해서 각각의 값(저항)들을 계산해서 합한값이 접지시스템의 접지저항이다.
Total Current Flowing In Main Electrode.....: 1000.0 amperes	☞ 주접지전극에 유입된 전류의 총량
Total Buried Length of Main Electrode.....: 240.00 meters	☞ 주접지전극의 총 길이

EARTH POTENTIAL COMPUTATIONS
==========

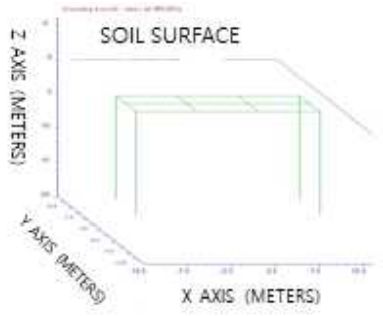
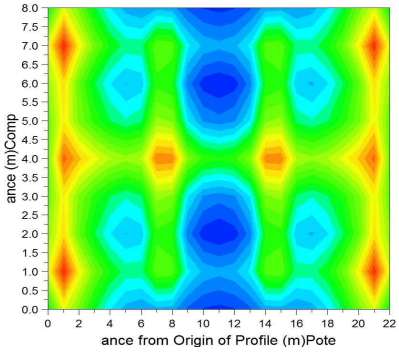
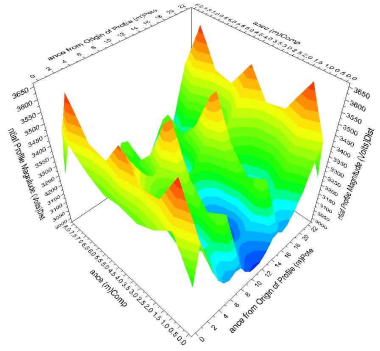
Main Electrode Potential Rise (GPR).....: 4926.5 volts	☞ 전극시스템에 1,000 amperes가 유입되면 접지(based on two representative points) 시스템의 전압이 대지 전위인 "0" 전위에서 4926.5 volts 상승됨을 말함.

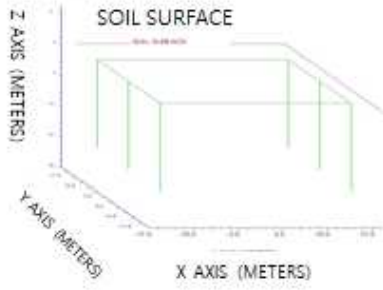
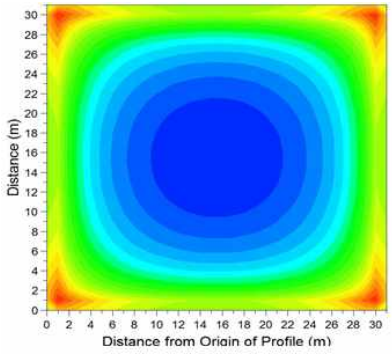
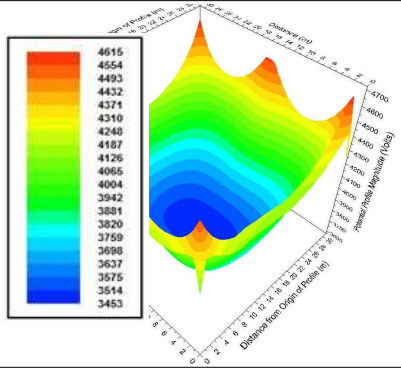
CASE1과 CASE2는 태양광 발전소내 전기실 내부 그리드에 대한 안전접지 설계이다. 두 지역의 전기실 안전 접지 설계를 차별화하기 위해 CASE1 사례는 IEEE Std 80-2000 / KS C IEC 62305 기준으로 설계하고 CASE2 사례는 IEEE Std 80-2000 / KS C IEC 61936-1기준으로 1kV를 초과하는 전력설비 그리드 안전 접지 설계를 시행하였다. CASE2 사례의 설계 기법은 전격 시 접촉전압과 보폭전압의 값을 Table 5.와 같이 얻을 수 있다. 이처럼 어떠한 기준으로 설계 하는지에 따라 결과는 많은 차이가 나타나는지 두 사례의 비교를 통해 알 수 있었다.

Table 5.는 CASE별 설계 기준을 차별화하여 요구 접지저항 5[Ω]을 기준으로 설계 제안하였다. 1,000[A]의 이상 전류를 접지전극에 흘리면 각 사례별 접지구조에 따라 대지표면에 전압이 상승하게 된다. 이 때 각 CASE별 대지표면에 상승하는 전압(Potential rise) 즉, 이상전압에 잘 견디고 토양의 환경에 경련변화가 없는 접지전극의 재료 선정이 접지시스템(접지전극)에 중요한 요소임을 알 수 있다.

Table 5. Potential rise and safety voltage simulation model 1

Division	CASE1	CASE2	CASE3
Standard Code	IEEE Std. 80-2000 / KS C IEC 62305	IEEE Std 80-2000 / KS C IEC 61936-1	IEEE Std. 80-2000 / KS C IEC 62305
Surface	Electric Room	Electric Room	Yard
Ground TYPE	Radial electrolyte Ground Rod Φ54*6000mm	Radial electrolyte Ground Rod Φ54*6000mm	Ground Rod Φ16*1800mm
	Boring 15m x 4 sets	Boring 30m x 4 sets	4 sets
Ground Design	Ground Rod + Bear coper(70sq) + Bonding	Ground Rod + Bear coper(70sq)	Ground Rod + Bear coper(70sq)
Location	Under Building		
Input current	1,000 [A]		
Classification rate(β)	1.0		
Rn	5 [Ω] ↓		
Rc	4.4914 [Ω]	4.8057 [Ω]	4.6094 [Ω]
Potential rise	4491.4 [V]	4926.5 [V]	4609.4 [V]

Case1. 경기도 용인시 태양광 발전 단지 내 전기실		
설계구조(3D)	전위경도(SPOT)	전위분포(3D)
		

Case2. 충남 공주시 태양광 발전 단지 내 전기실		
설계구조(3D)	전위경도(SPOT)	전위분포(3D)
		

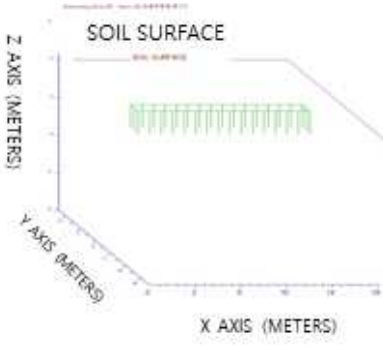
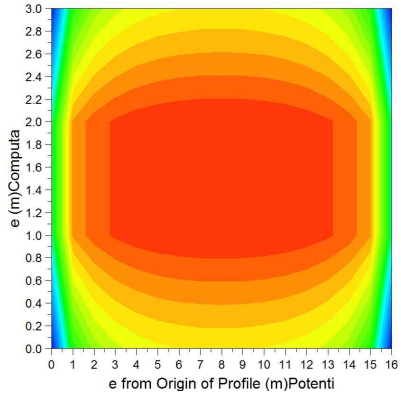
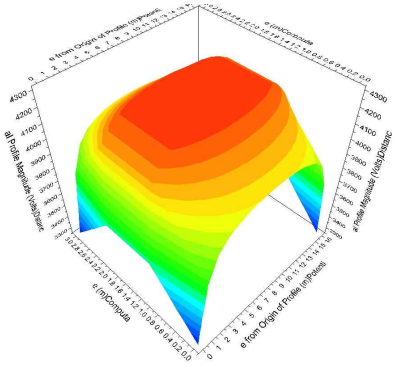
Case3. 경북 안동시 태양광 셀 주변 및 주요 설비		
설계구조(3D)	전위경도(SPOT)	전위분포(3D)
		

Fig. 8. Feature Graphs for the Case-specific Ground Design

Table 6. Potential rise and safety voltage simulation model 2

CASE2. 충남 공주시 태양광 발전 단지 내 전기실		
Cut-off time	0.5sec	
Safety voltage standard(주1)	Touch Voltage	Step Voltage
	2,779.3[V]	811.8[V]
Designed safety voltage	666.7[V]	129.2[V]

(주1) IEEE std. 80 안전전압 기준값 임.

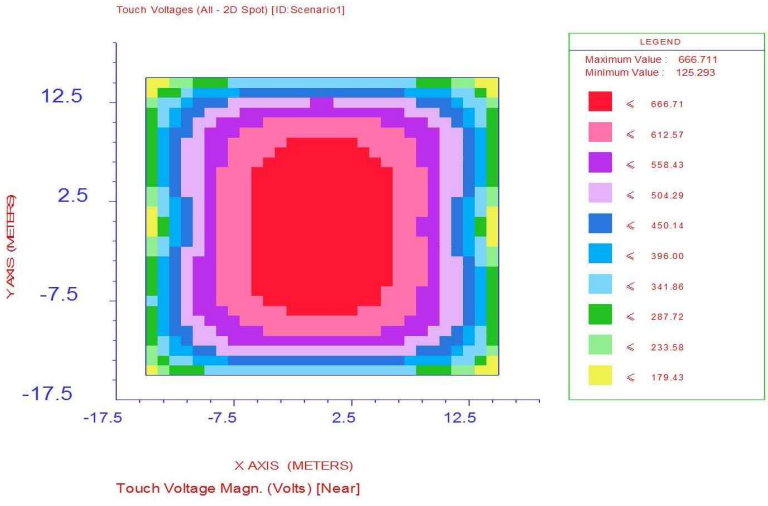


Fig. 9. Touch voltage

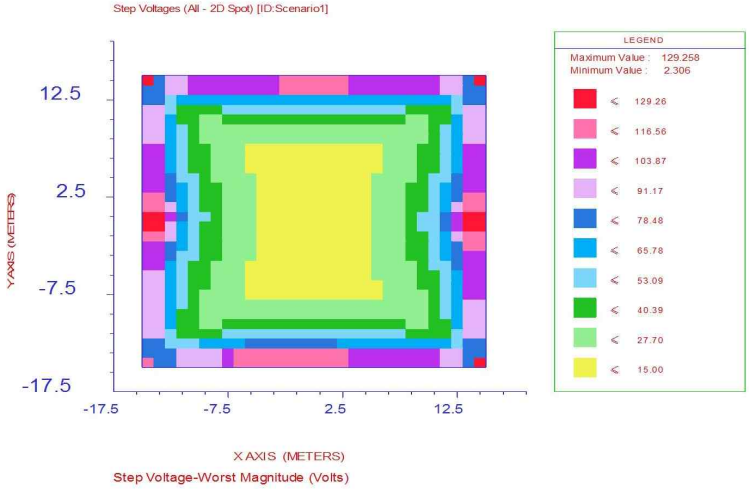


Fig. 10. Step voltage

4. 결 론

본 논문은 화석연료의 고갈과 미세먼지 등 환경오염과 같은 인간중심 사회에 삶의 질을 저하하고 생명과 안전에 위협이 되는 근본적 문제를 해결하기 위한 주제에서 출발한다. 세계는 화석연료를 대체가능한 새로운 에너지의 발굴과 환경오염 문제를 해결하기 위한 노력을 기울여 왔으며 지금도 수많은 연구가 진행되고 있다.

4.1 대지 고유저항 측정과 분석

Wenner 4 전극법으로 측정한 데이터 중 Table 3.에서 3개 지역의 CASE별 대지 고유저항 최대값과 최소값을 얻을 수 있었고 이 두 값으로 토양의 두께를 알 수 있다. 측정된 데이터를 기본 수식 $\rho = 6.28aR$ (4)에 대입하여 MATLAB 컴퓨터 프로그램으로 계산하였다. 즉, 최소 저항값의 두께는 접지전극을 설치하기에 가장 유리한 토양 환경임을 판단 할 수 있다.

4.2 CDEGS 모듈을 이용한 태양광 발전소 내부 그리드 안전 접지 설계

분석된 자료를 기반으로 발전소 내부 그리드의 안전 접지 설계 기준을 선정하고 대지표면에 전위의 상승 수치, 토양의 접지 분포와 접지값, 접지 시스템의 한계, 매설되는 접지망, 매설 면적 등 각 지역 CASE별 접지시스템(접지전극) 설계를 제안하였다. 각 CASE 지역별 토양의 환경이 다양하므로 상황에 적합한 접지설계 규격을 적용하였으며, 대지 고유저항 측정 데이터를 기초 자료로 접지전극이 설치되는 높이와 길이를 결정하고 Ground Rod와 Bear coper 등을 설계하였다.

이렇게 형성된 접지전극의 접지 저항값은 요구하는 수치보다 안정적인 값을 얻을 수 있었다. 주요한 고가의 전력 설비들을 절연보호하는 측면에서 구조체 접속과 등전위 본딩을 통한 통합접지방식(Ground Rod + Main Mash)을 채용하였다. 또한, CASE2의 경우와 같이 통합 접지시스템의 계통에 사고가 발생하게 될 경우 접촉전압(666.7[V]), 보폭전압(129.2[V])이 허용기준의 값을 만족하는 결과를 얻을 수 있었다.

본 연구를 통해 지역의 CASE별 태양광 발전소 내부 그리드에 대지 표면에 전위상승을 억제 할 수 있는 접지시스템 설계 기법을 제안하였다. 하지만 대지의 고유저항과 접지시스템에 경련변화를 실시간으로 확인 할 수 있는 모니터링 시스템과 빅 데이터를 축적 할 수 있는 스마트 디바이스의 개발이 추가적으로 연구되어야 할 것이다. 계절적인 토양 환경 변화의 비례 추이를 시계열 분석기법을 활용하여 보다 정밀하고 감전재해로 부터 안전한 접지시스템과 토양의 특성에 환경 친화적인 접지전극의 재료에 대한 연구도 추가적으로 진행되어야 할 것으로 판단된다.

References

[1] Hong-Yong Kim. (2017)"A Study on the Safety Grounding for Prevention of Electric Shock Hazard in Construction of Industrial Plant in Maritime Landfill Area"Journal of the Society of Disaster Information Vol.13 No.3 pp. 305 - 312

[2] Hong-Yong Kim, Ung-Burm Jang. (2017) PV system and safety grounding engineering. Deaja,

[3] ju-cheol Lee. (2015) Safety Safety standards for grounding systems IEC 61936-1, Proceedings of the Korean institute of illuminating and electrical installation engieers.

[4] IEEE Std. 80-1986. (1986) "IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding", Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., New York,

[5] IEEE Std. 80-2000. (2000) "IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding", Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., New York.