

해상 매립 지역 산업 플랜트 건설 시 감전 재해 예방을 위한 안전 접지에 관한 연구

A Study on the Safety Grounding for Prevention of Electric Shock Hazard in Construction of Industrial Plant in Maritime Landfill Area

Hong-Yong Kim^{a*}, Ung-Burm Jang^b

^a University of Hansei, 30 Hansei ro, Gunpo city, Gyeonggi do, 435-742 Republic of Korea

^b Professor, Dept. of Industrial Management Engineering, University of Sunmoon, 70, Sunmoon-ro 221 beon-gil, Tangjeong-myeon, Asan-si, Chungcheongnam-do 314-60 Republic of Korea

ABSTRACT

In our society, the advanced, advanced, and information industries have continued to grow and now live in the era of the fourth industrial revolution. As the industry develops, the load of the users has also increased so much that it is deepened by the energy shortage phenomenon and the construction of additional energy facilities is required. Therefore, energy plant construction work is being actively carried out in the coastal area. In particular, it is common to build a plant in the ground by filling the coast with soil in other regions, reflecting the fact that Korea is lacking in the country when constructing power plants, gas and petrochemical plants. Current domestic grounding designs are designed or constructed to suit only the use of grounding resistors based on the electrical equipment design technical standards. However, in the case of a plant facility constructed in the untested buried soil, when the lightning current and the abnormal current are inputted, the facility operator or the user due to the elevation of the ground potential is seriously exposed to the risk of electric shock disaster. In this paper, we analyze the ground resistivity of the landfilled soil and use a computer program (CDEGS) based on KS C IEC 61936-1, We analyze the contact voltage and stratification voltage and propose a grounding design optimized for plant installation.

KEYWORDS

Safety ground
Industrial plant
Marine landfill
1,000V or more

우리사회는 고도화, 첨단화, 정보화 산업들이 지속적으로 성장을 거듭하여 현재는 4차 산업 혁명의 시대에 살고 있다. 산업이 발달함에 따라 사용자의 부하도 다양하게 급증하였고 이는 에너지 부족 현상으로 심화되어 추가적인 에너지 시설의 건설이 요구되고 있는 실정이다. 이에 해안 지역을 중심으로 에너지 플랜트 건설공사가 활발히 진행되고 있다. 특히, 발전소·가스·석유화학 플랜트 등의 건설 시 국토가 부족한 우리나라의 실정을 고려하여 타 지역의 토양으로 해안을 매립하고 그 지반에 플랜트 시설을 건축하는 방식으로 시행되고 있다. 현재의 국내 접지 설계는 전기설비설계기술기준에 근거한 접지저항만을 용도에 맞게 결정하는 설계와 시공이 이루어지고 있다. 하지만 이렇게 검증되지 않은 매립된 토양에 건립한 플랜트 시설에 뇌격전류 및 이상전류 유입 시 대지 전위상승으로 인한 설비 운용자나 사용자가 감전재해 위험에 심각하게 노출 되게 된다. 따라서 플랜트 시설의 부하 특성에

안전 접지
산업 플랜트
해상 매립지
1,000V 이상

최적화된 접지시스템이 요구되고 있어, 본 논문에서는 매립된 토양의 대지고유저항을 분석하고 KS C IEC 61936-1 규격을 적용한 컴퓨터 프로그램(CDEGS)을 활용하여 감전재해를 일으키는 접촉전압과 보폭전압을 해석하여 플랜트 설비에 최적화된 접지설계를 제안하고자 한다.

© 2017 Society of Disaster Information All rights reserved

* Corresponding author. Tel. 82-01-5494-6150. Email. hy_kim76@hanmail.net
1 Tel. 82-01-5277-4320. Email. jang0516@korea.com

ARTICLE HISTORY

Received Mar. 31, 2017
Revised Apr. 25, 2017
Accepted Sep. 17, 2017

1. 서론

최근 동해안 해상지역에 간척사업을 통한 발전분야, 가스분야, 산업분야 플랜트 산업단지가 개발·형성되고 있다. 주로 외부에서 토사가 유입되어 바다를 매립하는 형식으로 지반을 마련하고 그 위에 플랜트 산업단지가 건설된다. 본 논문에서는 신규로 건설되는 산업플랜트 시설에 안전이 확보된 접지환경을 조성하여 사람의 감전재해와 고가의 운용 설비를 보호할 수 있는 최적화된 접지시스템을 설계한다. 결국 최적화된 접지시스템이란 운용 설비에 대지 표면의 전위 상승을 억제하고 전위 경도를 작게하는 것을 말한다. 동일한 위치에 대지 전류가 흐를 경우 접지 저항이 낮은 분포의 대지 표면 전위상승이 작게 나타나고 안전성도 확보 될 수 있다. 하지만 접지 저항의 수치만으로 감전 예방을 목적으로 하는 접지 시스템을 설계하는 것은 매우 비효율적 일 수도 있다. 이는 낙뢰로 인한 이상 전류 유입이나 대용량의 전력 시스템의 고장 시 대지로 흐르는 전류가 매우 크고 위험하기 때문에 운용자나 사용자가 감전 재해에 직접적으로 노출 된다는 것이다. 즉, 실제로 사람이 감전될 경우 충전부에 접촉된 부분과 인체 전위간의 차이(전위경도)가 발생하게 된다. 이에 인체에 안전한 범위(인체 안전 한계)의 전류를 고려하여 최대예상전압, 접촉전압, 보폭전압을 경감시켜 안전한 접지 설계를 제안하고자 한다.

2. 본론

2.1 해상 매립지의 토양 분석

(1) 대지고유저항률 토양 분석시스템 선정 방안

대지고유저항률의 분석과 접지 저항값의 계산에 대한 분석은 기술자의 개인 능력과 경험 등에 따라 매우 다른 결과가 나타날 수 있다. 심지어 동일한 기술자가 똑같은 데이터를 분석하여도 상당한 차이가 나타날 수도 있다. 본 논문은 웨너 4 전극법에 의해 측정된 토양의 저항 데이터를 분석하고 캐나다 SES社에 접지 시스템 전용 분석 프로그램(CDEGS)의 모듈을 활용하여 KS C IEC 61936-1 1kV를 초과하는 전력 설비 접지 모델을 선정하여 설계 한다

(2) 대지고유저항률 이론과 측정 방법

토양 계층은 매우 다양한 구조로 되어있으며 측정하는 현장에 저항률 수치는 접지 시스템을 선정하는데 매우 중요한 요소이다. 대지저항 R과 대지저항률 ρ는

$$R = \frac{\rho l}{2\pi a^2} \quad (1)$$

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

(1)과 (2)를 이용해서 l, ρ를 구할 수 있다. 이때, (1)과 (2)로 부터 l을 구하면

$$l = \left(a + \frac{2a^2}{\sqrt{a^2 + 4d^2}} - \frac{a^2}{\sqrt{a^2 + d^2}} \right) \div 2 \quad (3)$$

대지저항률 ρ는 다음과 같다.

$$\rho = \frac{4\pi a R}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4d^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + d^2}}} \quad (4)$$

(단, R은 측정 장비로 읽은 저항 값, d는 지중 금속제 탐침의 길이)

만일, $a \gg d$ 라면, 대지 저항률은

$$\rho = 2\pi aR \tag{5}$$

$$\rho = 6.28aR \tag{6}$$

으로 나타낼 수 있다.

수식을 기반한 웨너 4 전극법(4-point Wenner Method)의 측정 방법은 4개의 동일한 크기를 갖는 금속재 탐침(Test Probe)을 정해진 간격으로 대지에 설치하고 회로를 구성한다. 계측 장비와 탐침간 회로구성은 Fig. 1.에 나타내었다. 계측장비에서 미세 전류를 대지로 흘려 구성된 회로를 통해 탐침으로 돌아오는 전류값을 분석하고 대지 저항률을 측정하게 된다. 즉, C1과 C2 사이에 전원을 공급하여 대지에 전류를 흘리고 이때 안쪽의 두 탐침봉 P1과 P2 사이에 생기는 전위차를 측정하여 옴의 법칙에 따라 접지 저항을 구할 수 있다. 측정 원리와 전계도는 Fig. 2와 같다.

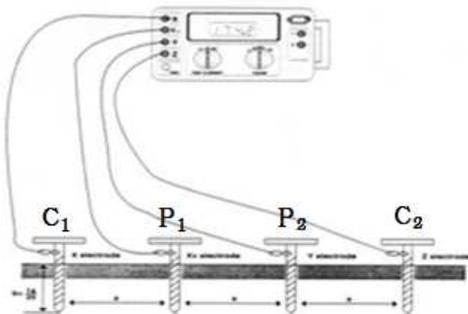


Fig. 1. Measurement probe structure

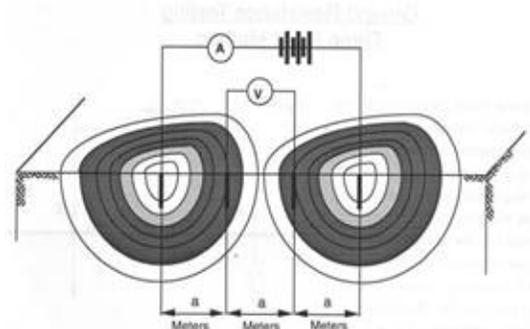


Fig. 2 Earth-to-probe current field diagram

(3) 대지고유저항률 분석

대지고유저항 측정은 전력설비가 설치되는 지역 반경 200m 범위의 2개 Group에서 4Point를 측정하였다. 대지고유저항 측정 분석 결과는 Table 1와 같이 나타났다. 측정된 데이터를 MATLAB 프로그램에 수식 (5),(6)을 적용하여 매립된 토양의 분포를 결과값으로 나타내었다.

Table 1. MATLAB Simulation Model for Earth Resistivity Measurement

Division	Group A		Group B	
	Measuring [Ω]	Eigenvalue [Ωm]	Measuring [Ω]	Eigenvalue [Ωm]
2	6.88	86.41	33	414.48
4	4.46	112.04 ↑	18	452.16 ↑
8	1.57	78.88	6.54	328.57
12	0.66	66.32 ↓	0.61	61.29 ↓

토양의 대지고유저항 Group A, B 측정값의 분포 편차가 매우 크게 나타났다. Group A의 최대값은 약 112[Ωm], 최저값은 약 66[Ωm]가 나타났고, Group B는 최대값 약 452[Ωm], 최저값 61[Ωm]가 나타나 표준토양 분류에서 해안 모래와 적토층(50~500[Ωm])에 해당하는 매립토가 관측되었다. 다만, Group A, B 모두 16[m]에서 최저값이 나타난 것으로 보아 16[m]이하에서는 화성암이 아닌 흙습이 수월한 토양으로 저항율이 비교적 낮은 수치가 나타날 거라 예상 된다. 또한, 대지 고유 저항이 계절적으로 매우 낮은 시기에 측정된 결과로 보여지며 갈수기가 지난 후에는 더욱 높은 접지값이 나타날 것으로 예측 된다. 전력 계통 설비의 절연보호와 안정적인 운용을 위한 관리자의 인체 감전보호에 주안점을 두고 대지표면의 전위상승, 접촉전압, 보폭전압 등을 고려하여 접지시스템을 선정하여야 할 것이다. 일반적으로 대지 표면의 전위상승으로 인한 상용주파 고장 전류, 접지저항 수치, 매설 접지망의 면적으로 결정되며, 접지의 안정도와 안전 측면에서 대지표면 전위상승의 분포는 접지저항 수치와 매설 접지망의 면적으로 결정하는 것은 매우 중요함을 알 수 있다.

2.2 CDEGS 접지 설계 시뮬레이션

(1) 접지 설계 흐름도

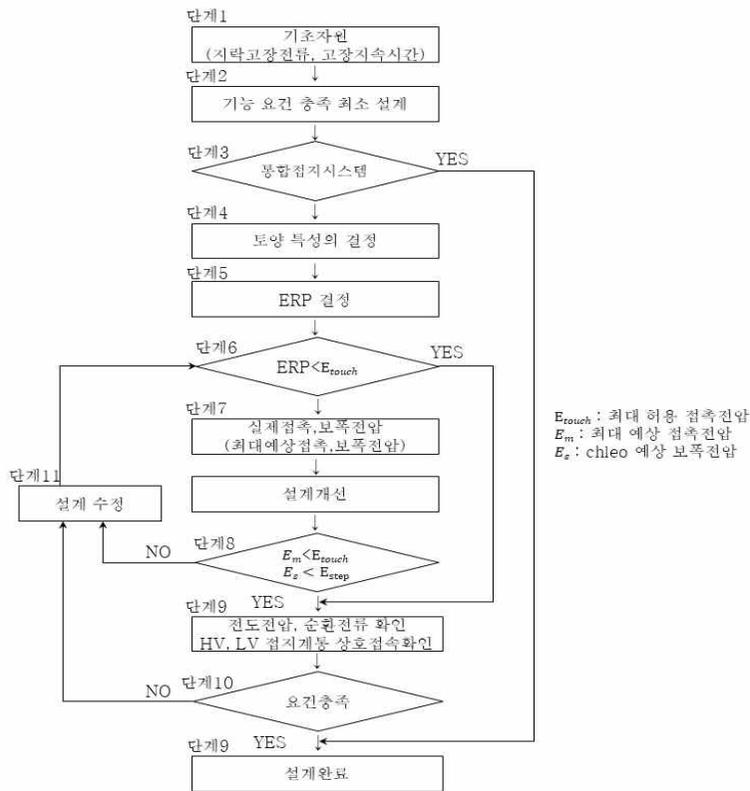


Fig. 3 Grounding design flow chart of KS C IEC 61936-1 model

1kV를 초과하는 전력설비의 접지 설계 KS C IEC 61936-1의 모델을 활용하여 CDEGS 프로그램으로 시뮬레이션 하였으며 그 결과는 아래 Table 2, Table 3와 같이 대지저항률의 토층별 분석과 IEEE std 80의 안전전압 기준값으로 상용전력설비의 통합 접지 방식의 계통에 1,000A를 인가하여 전위상승과 안전전압(접촉전압, 보폭전압)을 분석하였다. KS C IEC 61936-1의 모델의 접지 설계 흐름도를 Fig. 3에 나타내었다.

(2) CDEGS 시뮬레이션 결과

Table 2. Earth resistivity simulation model

Land layer	Strata analysis Earth resistivity		
	Division	Earth resistivity($\Omega \cdot m$)	Thickness(m)
2 layer	Upper layer	102.0 ↓	1.2
	Ground floor	112.0 ↑	∞

여기서, CDEGS 프로그램을 활용한 토양층의 분석결과를 Table 3.에 나타내었다. 토양층은 공기층을 제외한 2지층으로 분석되었고 대지저항률은 Table 2과 같이 상지층이 하지층보다 조금 낮은 102 [Ωm]로 측정되었다. 토양층의 깊이는 1.2[m]로 분석되어 해당 범위에 접지극을 설계 · 시공하는 것이 안전성을 더욱 확보한 환경으로 판단된다.

Table 3. Potential rise and safety voltage simulation model

Division	Contents		Remarks
Standard Code	KS C IEC 61936-1		IEEE std. 80
Surface of the earth	매립 적토층		
Input current	1,000A		
Classification rate(β)	1.0		
Cut-off time	0.5sec		Relay operation time
Safety voltage standard(주1)	Touch voltage	Step voltage	anatomy 50kg Allowable voltage 50V Body resistance 1000 Ω
	353.3 V	781.0 V	
Designed safety voltage	876.839 V	305.556 V	
Potential rise	1991.7 V		

(주1) 안전전압 기준값 IEEE std. 80 기준임.

여기서 CDEGS 시뮬레이션 접지설계 결과를 Table 3.에 나타내었으며, 결과에 따른 접촉전압과 보폭전압의 세부 분석 그래프는 Fig. 4와 Fig. 5와 같다. 접지 시스템에 1,000A를 가상으로 흘렸을 때 대지 전위상승 전압은 1991.7V로 나타났으며, IEEE std 80에 근거한 안전표준 보폭전압이 약 781V 기준에 약 305V로 기준값에 절반도 안되는 값이 관측되었고, 접촉전압은 약 353V 기준에 876V가 관측되어 기준값의 2배 이상의 값을 나타낸다. 하지만 접촉전압의 최대값이 접지시스템에 간섭이 되지 않는 외각 지역에 분포하는 것을 Fig. 4를 통해 확인할 수 있다. 접지시스템 주변의 평균값은 30%에 해당하는 약 263V가 되는 것을 알 수 있다. 따라서 접촉전압의 안전기준값의 범위에 포함되는 접지설계임을 판단 할 수 있다.

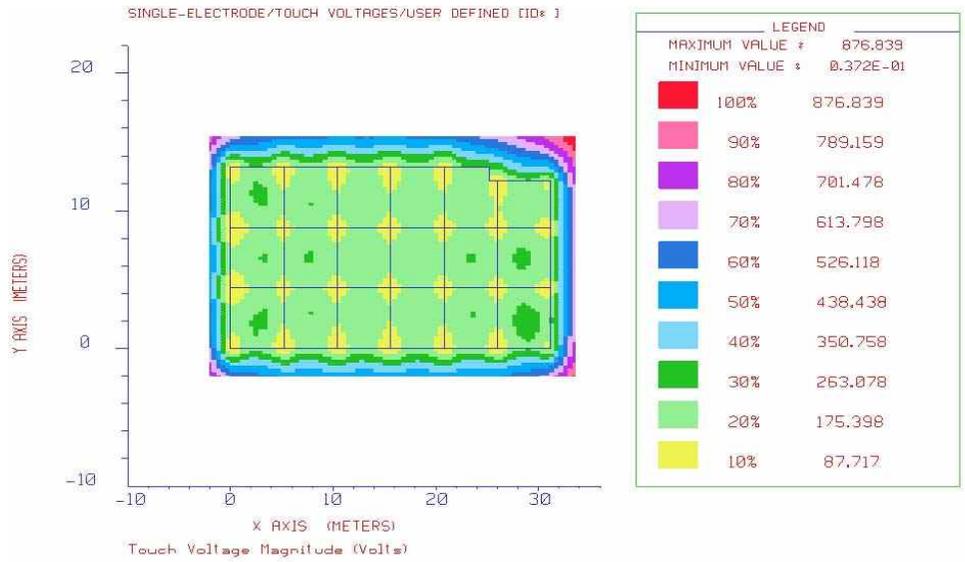


Fig. 4. Touch voltage

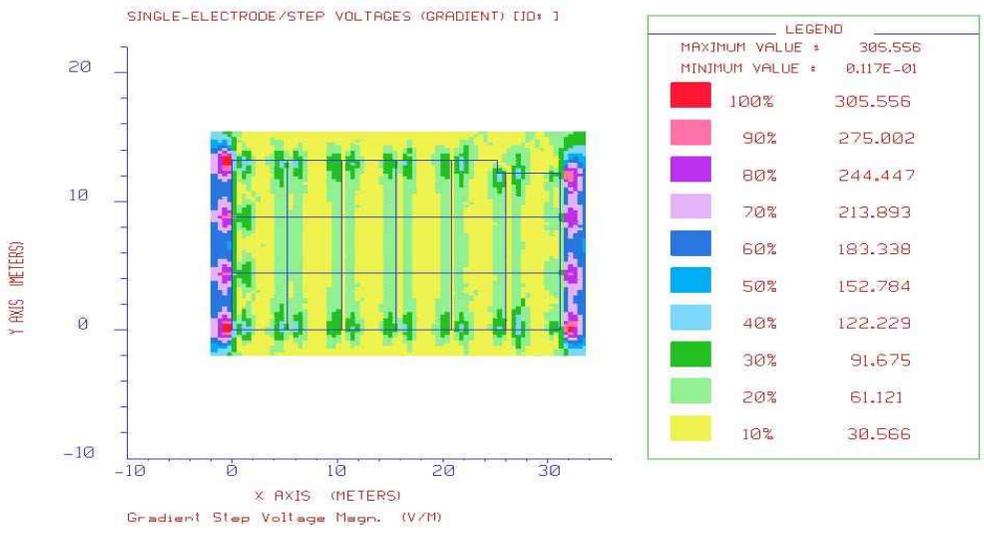


Fig. 5. Step voltage

3. 결론

본 논문에서는 동해안 해상지역을 매립한 토양의 지반에 신규 건설되는 산업플랜트의 부하설비 측면에서 최적화할 수 있는 접지시스템을 설계 제안하였다. 접지 설계를 위한 토양의 분포를 분석하는 기법으로 Wenner 4전극법을 활용한 2개 Group의 대지고유저항값을 측정하였고, 측정된 데이터를 기본 수식을 기반으로한 MATLAB 컴퓨터 프로그램에 적용하여 일정한 깊이와 간격의 토양의 분포를 1차 분석하였다. 그리고 SES社의 CDEGS 모듈을 이용하여 2차 토양층을 분석한 자료를 기반으로 1kV를 초과하는 전력 설비의 접지 설계를 선정하여 대지표면 전위상승 분포와 접지값, 접지시스템의 한계, 매설 접지망, 매설 포설 면적 등 해상 매립 토양의 접지시스템 설계를 제안하였다.

(1) 매립지 토양분석

토양은 전반적인 혼합토 상태에서 토양 층간 고유저항률의 편차가 매우 크게 나타나 해안모래, 매립 적토층에 해당하는 토양으로 판단되며, 깊이 16[m] 부근에서 흡습이 원활한 토양층으로 형성된 것으로 추정 된다. 대지고유저항의 측정값은 계절에 따라 차이가 있고 측정한 시점이 초여름(6월)으로 갈수기가 지난 후에는 접지저항 데이터 수치가 현재보다 상승 될 것으로 판단 된다.(일반적으로 늦 겨울에서 초봄(1~4월)이 가장 높은 접지저항 데이터 수치가 분포 됨.) 따라서 가장 높게 형성되는 시기의 토양의 접지저항 데이터를 분석하여 추가적인 접지시스템을 보완하는 것이 바람직 할 것이다.

(2) CDEGS 모듈을 이용한 안전 접지 설계

대지고유저항 측정 데이터를 기초 자료로 접지전극을 형성하고 요구 접지저항값(1.99[Ω])을 얻을 수 있었다. 주요 전력 설비의 절연보호 측면의 등전위 분당과 구조체 접속을 통한 통합접지방식(Main Mash + 접지동봉)을 설계 하였으며, 통합 접지시스템 계통에 사고가 발생 할 경우 접촉전압, 보폭전압이 허용기준을 만족하는 값을 얻을 수 있었다.

본 연구를 통해 매립된 해상지역의 토양분석과 산업플랜트 시설에 대지표면 전위상승을 해소할 수 있는 접지시스템 설계를 제안하였다. 향후 건설되는 산업플랜트 설비의 대지고유저항과 접지시스템의 경련변화를 실시간으로 모니터링하고 데이터를 축적할 수 있는 시스템의 개발은 남겨진 과제일 것이다. 또한, 해당 지역의 토양 변화 추이를 시계열 분석기법을 적용한 보다 정밀하고 감전재해로부터 안전한 접지설비 구조와 내구성이 강하고 환경에 무해한 접지전극의 재료를 개발하는 연구가 진행되어야 할 것으로 판단된다.

References

Journal of The Society of Disaster Information 2017.

jeong-seol Lee, A Study on the Corrosion Grounding According to Soil Contamination, Hoseo of University Asan Korea 2013.

ju-cheol Lee, Safety Safety standards for grounding systems IEC 61936-1, Proceedings of the Korean institute of illuminating and electrical installation engineers 2015.

In-hyuk Jung, A study on the Characteristics of Grid and Diagonal Spaced Mesh Grounding Depending on the Burial Depth, Hongik University Sejong Korea 2012.

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

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

ANSI/IEEE Std. 142-1991, "IEEE Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power System", Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., New York, 1991.

hong-kyu Choi, Design of modern grounding equipments 2012.