



저작자표시 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.
- 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#) 

2014年 2月
博士學位論文

다층 대지구조 모델을 위한
변전소 그리드 접지전극 설계

朝鮮大學校 大學院

電氣工學科

文 銀 兒

2014年2月
博士學位論文
다층
대지구조
모델을
위한
변전소
그리드
접지전극
설계
文
銀
兒

다층 대지구조 모델을 위한
변전소 그리드 접지전극 설계

Grounding Grid Design of the Substation
for Multi-Layered Soil Models

2014年 2月 日

朝鮮大學校 大學院

電氣工學科

文 銀 兒

다층 대지구조 모델을 위한
변전소 그리드 접지전극 설계

指導教授 曹錦培

이 論文을 工學博士學位 申請論文으로 提出함.

2013年 10月

朝鮮大學校 大學院

電氣工學科

文 銀 兒

文銀兒의 博士學位 論文을 認准함

委員長 朝鮮大學校 教授 白 亨 來 印

委員 朝鮮大學校 教授 李 愚 宣 印

委員 朝鮮大學校 教授 崔 孝 祥 印

委員 弘益大學校 研究教授 沈 建 輔 印

委員 朝鮮大學校 教授 曹 錦 培 印

2013年 12月

朝鮮大學校 大學院

목 차

ABSTRACT

I. 서 론	1
II. 접지와 인체의 전기안전	5
A. 감전전류에 대한 안전한계	5
B. 접지와 인체의 위험전압	14
C. 감전전류와 안전전압	18
III. 접지 그리드 해석법	21
A. 유입전류 분포계산	21
B. 접지도체의 전류분포 계산	35
C. 지표면 전위분포 계산	40
D. IEEE Std. 80에 의한 변전소 접지시스템 설계	50
IV. 제안한 접지 그리드 해법	59
A. 유입전류 분포계산을 위한 제안해법	59
B. 접지도체의 전류분포 계산	64
C. 지표면 전위분포의 해석적 기법	65

D. 제안하는 접지시스템 설계	69
V. 시뮬레이션 결과 및 검토	71
A. 허용 안전전압의 계산	72
B. 유입전류 분포계산	79
C. 접지그리드 전극의 설계 및 해석	86
VI. 결론	98

참고문헌

LIST OF TABLES

Table 2.1 Body Current by Reaction	6
Table 2.2 Risk Degree of Current Path	7
Table 5.1 Lower-Layerd Earth Resistivity according to Soil Structure Model	73
Table 5.2 Fault Current of the Substation	79
Table 5.3 Data about the Substation	79
Table 5.4 Change of End-Substation Ground Resistance	82
Table 5.5 Change of Sample Substation Ground Resistance	83
Table 5.6 Change of Tower Ground Resistance	84
Table 5.7 Results of Design by IEEE Std-80	91
Table 5.8 Results of Design and Analysis for Grounding System	92

LIST OF FIGURES

Fig. 2.1 Threshold Current for Safety	8
Fig. 2.2 Fibrillating Current vs Body Weight	9
Fig. 2.3 Comparison of Current and Time	10
Fig. 2.4 Time/Current Zones of Effects on Persons	12
Fig. 2.5 Distribution of Surface Potential of Mesh Electrode	14
Fig. 2.6 Equivalent Circuit of Touch and Step Voltage	19
Fig. 3.1 Structure of Power System	23
Fig. 3.2 Equivalent Circuit of Transmission Line	27
Fig. 3.3 Equivalent Circuit for One-Side Elimination of T/L System.....	28
Fig. 3.4 Equivalent Circuit for Double-Side Elimination of T/L System.....	31
Fig. 3.5 Grounding Grid	36
Fig. 3.6 Point Electrode and Image in Soil	43
Fig. 3.7 Linear Electrode in Soil	45
Fig. 3.8 Arbitrarily Arrangement of Linear Conductor	48
Fig. 3.9 Derating Factor vs Thickness	53
Fig. 3.10 Flowchart of Ground Grid Design	58
Fig. 4.1 Geometrical Structure of a Tetrahedron	66
Fig. 4.2 Flowchart of Proposed Method	70
Fig. 5.1 2-Layered Soil Model	72
Fig. 5.2 Variation of Top-layer Soil Resistivity	72
Fig. 5.3 Allowable Safety Voltage by Surface Soil Depth	74
Fig. 5.4 Allowable Safety Voltage by Surface Soil Material	75
Fig. 5.5 Allowable Safety Voltage by Surface Soil Material	76

Fig. 5.6 Allowable Safety Voltage by Reflection Coefficient	76
Fig. 5.7 Allowable Step Voltage by Top-Layer Depth	77
Fig. 5.8 Allowable Touch Voltage by Top-Layer Depth	78
Fig. 5.9 Sample Power System	80
Fig. 5.10 T/L Tower	81
Fig. 5.11 Distribution Factor vs Terminal S/S Resistance	83
Fig. 5.12 Distribution Factor vs Target S/S Resistance	84
Fig. 5.13 Distribution Factor vs Tower Resistance	85
Fig. 5.14 Characteristics of Sample Electrode	86
Fig. 5.15 Arrangement of Sample Electrode	87
Fig. 5.16 Results of Potential Distribution	88
Fig. 5.17 Potential Distribution by Proposed Method	88
Fig. 5.18 Surface Potential Distribution of Grids System	89
Fig. 5.19 Touch Voltage Distribution of Grid System	89
Fig. 5.20 Step Voltage Distribution of Grid System	90
Fig. 5.21 Arrangement of Ground Grid	93
Fig. 5.22 Surface Potential Distribution of Model I	94
Fig. 5.23 Surface Potential Distribution of Model II	94
Fig. 5.24 Touch Voltage Distribution of Model I	95
Fig. 5.25 Touch Voltage Distribution of Model II	95
Fig. 5.26 Step Voltage Distribution of Model I	96
Fig. 5.27 Step Voltage Distribution of Model II	96

ABSTRACT

Grounding Grid Design of the Substation for Multi-Layered Soil Models

Eun-A Moon

Advisor : Prof. Geum-Bae Cho, Ph.D.

Department of Electrical Engineering

Graduate School of Chosun University

‘Electrical Grounding’ originally began as a safety measure used to help prevent people from accidentally coming in contact with electrical hazards. Grounding system refers to metallic wires of different geometrical structures, which are buried in the earth. This metallic wire is used for establishing and maintaining the potential of the earth, or approximately that potential, on the circuit or equipment connected to it.

The grounding resistance as well as step and touch voltages determine the performance and quality of grounding grids. The estimation of grounding resistance values and the step and the touch voltages are usually carried out by means of formulas and algorithms that take into account the mutual influence between the grid electrodes.

In the past time, grounding systems were designed to achieve ground resistance below a specified value. Current practice, however, dictates that such grounding

systems are designed to control step, touch and mesh voltages within and around the electrical equipment, and limit both the extent of dangerous zones and the magnitudes of transferred potentials to remote sites.

A safe grounding system has the following objectives :

- 1) Ensure such a degree of human safety that a person working or standing in the vicinity of grounded equipments is not exposed to the danger of a critical electric shock. The touch and step voltages produced in a fault condition have to be at safe values. A safe value is one that will not produce enough current within a body to cause ventricular fibrillation.
- 2) Provide means to carry and dissipate electric currents into earth under normal and fault conditions without exceeding any operating and equipment limits or adversely affecting continuity of service.
- 3) Provide grounding for lightning surges and the over-voltages occurring from the switching of substation equipment, which reduces damage to equipment and cable.
- 4) Provide a low resistance for the protective relays to see and clear ground faults, which improves protective equipment performance, particularly at minimum fault.

This paper describes significance of appropriate soil model to be considered while designing any grounding grid in order to take into account the variation in characteristics of soil. In the past, grounding systems were designed to apply the uniform soil model. But, usually soil models have two or more horizontally and/or vertically stratified layers of different resistivity, former being more common. While the most accurate design and analysis of the grounding system should certainly be based on the actual variations of soil resistivity present at the electrical equipment site, it will rarely be economically justifiable or technically

feasible to model all these variations. However, in most case, design and analysis of a ground electrode based on the equivalent two-layered soil model are sufficient for design and analysis of grounding system.

This paper will present the analytical methods that used for calculating the grounding resistance and earth surface potential distribution by finite element method(FEM) for grounding grids of electrical substations.

In this paper, proposed algorithm was the expressions of the grounding resistance and the potential at any point due to a point source in multi-layered soil models can be obtained by image technique or solution of Laplace's equations. Determination of potential from such expressions, therefore, forms significant part of computational effort in analysis and design of a grounding system in equivalent two-layer soil model.

The validation of methods was explained by comparing their results and the other results that formulated in IEEE guide for safety in AC substation grounding(ANSI/IEEE Std. 80-2000).

I. 서론

전기에너지를 사용하는 전력설비에서 고장이나 낙뢰현상은 필연적으로 일어나는 것이며, 특히 지락고장이 발생하면 고장전류가 접지전극을 통하여 대지로 흘러가게 되어 전기설비의 구내 및 주변에 전위차가 나타나게 되며 전기설비 구내 및 주변에 위치하는 인체의 안전이나 설비의 절연에 위협을 초래하게 된다. 더욱이 최근에 전력사용의 수요가 급속하게 성장함에 따라 전력설비도 증대되어 전력설비의 고장용량도 증가하고 있으므로 상대적으로 고장전류에 의한 대지전위의 상승이 커져서 인체의 안전이나 전기설비의 절연 등에 미치는 위험도 증대되고 있는 실정이다. 이러한 위험에 대비하기 위한 것이 전기설비의 접지시스템(Grounding System)인데, 접지시스템을 구축하는 목적은 전기설비 주변에 위치하는 인체와 동물의 감전사고 방지와 전력기기의 손상 등을 방지하기 위한 것으로서 기본적으로 대지표면의 전위상승을 억제하여야 하며 또한, 대지표면에 나타나는 전위경도를 작게 하여야만 효과적이다. 따라서 같은 크기의 고장전류가 흐른다고 한다면 접지전극의 접지저항의 크기가 작을 수록 대지표면의 전위상승도 작게 나타날 것이고, 대지표면의 전위경도도 작게 되어 인체와 동물의 안전은 물론 전력기기의 동작에 대한 안전성도 확보할 수 있게 된다. 그러나 대형 접지전극에서 접지저항의 크기 만에 의한 안전성을 평가하는 것에는 인체 및 동물에 대한 감전사고 방지의 목적을 위하여 효과적이지 못하다.

이러한 접지공사는 목적에 따라 공사의 방법이 다르며, 접지를 시공하는 대상 부지의 토양특성에 따라서 공사의 방법이 다를 수 있으므로 접지공사는 설계, 시공방법, 접지저항이나 위험전압의 특성 및 유지관리 등을 종합적으로 검토하고 계획하여야 합리적인 방안이 수립될 수 있다. 그러나 국내의 접지기술에 대한 수준은 아주 미약한 수준으로, 현재 대부분의 전기 설계용역을 하는 엔지니어링 회사에서는 접지설계를 위한 가장 기본적인 대지 저항률의 특성도 분석하지 않을 뿐만 아니라 접지 저항값의 계산을 하지 않고 설계도면에 접지공사의 종류만을 표시하고 있는 실정이다. 이러한 현상은 현장에서 공사를 시행할 때 많은 혼란과 시행착오를 일으키고 있으며, 경제적으

로도 많은 손실이 발생하고 있다. 이와 같은 현실에서 위험전압이나 GPR, EMI 및 EMC 등에 대하여 논의를 하는 것은 현실과 맞지 않는 상황이다. 또한, 접지에 관한 기준은 나라마다 약간의 차이는 있지만, 근본적으로는 인체에 대한 감전의 위험을 피하고, 기기 사이의 안정적인 동작을 목적으로 한다는 점에는 차이가 없다.

최근까지 우리나라의 경우에 전기설비 기술기준에서 접지공사의 종류에 따른 접지저항의 크기만을 기준으로 제시하고 있어서 접지시스템의 설계에서는 접지저항을 얻기 위한 접지설비의 설계에 주안점이 주어지고 있었다. 그러나 미국을 비롯한 기술 선진국에서는 고장전류가 접지전극에 흐르는 경우에 나타나는 대지표면 전위상승에 의한 보폭전압, 접촉전압, 대지 전위상승 및 이행전압 등의 위험전압 관점에서 대지표면의 전위경도를 경감시키기 위한 설계가 이루어지고 있다. 전기설비 주변에 위치하는 인체와 동물의 감전사고와 기기의 손상 등을 방지하기 위한 접지시스템의 설계는 대지표면 전위의 상승을 억제하여야 되며, 접지저항의 크기를 얻기 위한 설계에는 한계가 있다. 실제로는 접지저항의 크기가 아닌 사용 주파수에 따라 크기가 다른 주파수의 함수인 임피던스의 크기를 고려하여야 한다는 점이다. 또한, 기준 접지저항의 크기에 대한 근거도 확실하지 않고 모호한 것으로서, 접지설계의 최종목표를 접지저항의 크기로 정할 것이 아니라 접촉전압이나 보폭전압과 같은 위험전압, 대지 전위상승 등으로 정하여야 할 것이다. 최근에 개정된 전기설비 기술기준에서는 과거에 적용하던 접지저항의 크기에 의한 기준보다는 위험전압을 기준으로 규정을 정하고 있지만, 실제 현장에서 이러한 규정이 적용되기 위하여 많은 혼란이 가중되고 있는 것이 현실이다. 이와 같은 여러 가지의 설계조건을 만족시키기 위하여 접지설계의 기초단계에서부터 가장 경제적이고 신뢰성 있는 접지설계가 달성될 수 있는 기술의 개발과 보급이 필수적인 것이다.

또한, 대형 전기설비(변전소)에 대한 접지전극의 설계에서는 인체 및 동물 등의 감전방지를 주목적으로 하는 경우에 대지표면 전위분포 및 전위경도를 작게 하는 방법이 더욱더 효과적이다. 따라서 미국을 비롯한 기술 선진국에서는 변전소 그리드 접지전극의 설계를 위해서는 IEEE Std. 80을 적용하여 접지전극을 설계하고 있어서 접지전극의 안전성에 대하여 접지저항의 크기보다는 인체 및 동물의 안전한계를 고려한 접촉전압, 보폭전압 및 메쉬전압 등을 안전성 지표로 평가하고 있다.^{[1]~[5]}

특히 인체 및 동물 등에 대한 감전방지와 전력기기의 동작에 대한 안정성을 확보하

기 위한 접지전극의 설계 및 해석 등에서 중요한 역할을 하는 것은 접지전극이 매설되는 대지구조로서, 과거에는 접지전극의 설치를 위한 설계단계에서 적용하던 대지구조가 단일지층 구조의 등가 대지 저항률에 의하여 접지전극의 접지저항 크기와 위험전압 등을 평가하였으나, 실제의 대지구조는 다층구조로 구성되어 있으며 접지전극에 대한 정확한 평가를 위해서는 다층구조의 대지 저항률을 적용하여야 한다.^{[6][7]} 그러나 다층구조의 대지 저항률을 적용하는 접지전극의 평가, 특히 접지전극의 접지저항 크기의 평가는 매우 어려운 문제로서 현재까지 알려진 간단한 수식으로는 평가할 수 없는 문제이다.

전기설비의 접지시스템에서 고장전류에 의한 전위상승은 인체의 안전이나 설비의 안정적 운전에 영향을 미치는 매우 중요한 값이다.^{[8]~[18]} 따라서 변전소 등의 그리드 접지전극의 설계 및 해석을 위한 지표면 전위상승을 계산하는 과정은 필수적인 것이며, 이 과정에서 접지전극에 유입되는 고장전류의 크기, 접지그리드의 고장전류 분포 및 접지전극의 저항값도 중요한 요소이다.

이러한 중요한 요소인 접지전극에 유입되는 고장전류의 분류계수를 결정하기 위하여 송전계통에 대한 모델링을 통한 계산 알고리즘, 접지그리드의 고장전류 분포를 계산하기 위한 알고리즘, 접지그리드의 지표면 전위상승 값을 계산하는 문제에 대하여 일반적으로 대지 저항률, 특히 지층의 구조가 매우 중요한 변수임에도 불구하고 실제의 지층구조가 아닌 등가화된 단일 지층구조의 파라미터를 사용하고 있으며, 고장전류의 분류계수나 접지그리드의 고장전류 분포 등에 대한 계산이 정확하게 이루어지지 않고 있어서 접지의 그리드 설계 및 해석이 이루어지는 관계로 실제의 현상이 제대로 파악되지 않는 문제점이 있는 것이다.^{[19]~[29]}

다중의 송전계통망이 연결된 접지그리드의 설계를 위한 고장전류의 분류계산을 위한 알고리즘, 접지그리드의 고장전류 분포를 계산하기 위한 알고리즘 및 접지그리드의 전위상승 값을 계산하기 위한 알고리즘 등을 제안하였다.

제안된 알고리즘 등의 효용성을 검증하기 위하여 다층구조의 대지 저항률에서 대지 저항률의 변화와 표토층의 재료와 두께의 변화에 대한 허용 안전전압의 변화특성, 철탑 및 터미널 변전소의 접지저항 변화 등을 통한 다중의 송전계통망에 연결된 접지그리드의 유입 고장전류의 분류계수의 변화와 접지그리드의 고장전류 분포, 다층구조 대

지모델에서의 접지전극에 대한 전위해석을 통한 접지그리드 설계 및 해석에 대하여 사례를 연구하였다.

제안된 방법을 변전소 그리드 접지전극의 설계와 해석을 IEEE Std. 80에서 적용하는 단일지층 구조의 결과와 제안된 방법의 다층구조 모델에 대하여 적용한 결과를 비교하여 접지전극의 설계 및 해석을 위한 대지구조 모델은 다층구조 모델이 적용되어야 한다는 점을 확인하였으며, 철탑 및 터미널 변전소의 접지저항 변화 등을 통한 다중의 송전계통망에 연결된 변전소 접지그리드의 유입 고장전류의 분류계수의 변화와 접지그리드의 고장전류 분포의 계산도 필수적임을 확인하였다.

II. 접지와 인체의 전기안전

전기에너지를 사용하는 전기설비에서 감전사고는 주로 인체가 전기에너지에 직접 또는 간접적으로 접촉하여 발생되며, 감전사고의 형태는 크게 전격에 의한 감전, 절연과괴에 의한 아크감전, 전기에 의한 감전 및 낙뢰에 의한 감전 등으로 분류할 수 있다. 감전에 의한 재해는 대부분의 사람이 사망하거나 부상을 당하는 인명상해로서, 감전사고로 인한 사망률이 다른 사고에 의한 사망보다 더 높아지는 추세를 보이고 있어서 감전사고의 방지에 대해서 보다 더 근원적으로 학문적인 접근이 이루어져야 할 필요가 있다.

접지가 실시된 전기설비의 고장이나 절연열화 등에 의하여 발생하는 누전전류에 의한 전기설비 주변의 인체에 미치는 위험성 등을 파악하고 국제 기술기준 등에서 정의한 인체의 안전전압 한계 등에 대하여 정리하였다.

A. 감전전류에 대한 안전한계

감전전류가 인체에 미치는 영향에 대하여 전기사고를 조사 분석하거나 동물 실험을 통한 결과로부터 통전 경로가 손-몸통-다리로 되며, 통전 시간이 1[초]인 경우에 대한 인체의 생리적 반응에 따라 전류를 4가지의 등급으로 분류한다. 인체를 통과하는 전류의 크기가 약 25[mA]이하인 1등급에서는 인체가 전류를 감지하는 상태에서 자발적으로 이탈이 불가능하게 되는 상태로서 심장박동의 리듬과 신경계통에는 영향이 없다. 인체 통전전류가 25~80[mA]인 2등급에서는 인체가 견딜 수 있는 전류의 크기로서 혈압이 상승하거나 심장박동의 불규칙 혹은 회복이 가능한 심장정지의 상태가 되며, 사람에 따라서는 50[mA]에서 실신상태에 이르기도 한다. 등급 3은 통전전류의 크기가 80~3000[mA]으로서 실신이나 심실세동의 상태에 이르게 되며, 통전전류가 3000[mA] 이상인 등급 4에서는 혈압상승, 회복이 불가능한 심장정지 및 부정맥 폐기종이 발생하는 가장 위험한 상태이다. 각각의 전류범위에 대한 인체의 작용과 전류 값을 보인 것이 표 2.1이다.^{[30]~[33]}

Table 2.1 Body Current by Reaction

분류	생 리 작 용	전류의 크기[mA]
1등급	- 자발적으로 이탈이 불가능하게 된 상태 - 심장박동 리듬, 신경계통 영향 없음	약 25 이하
2등급	- 참을 수 있는 전류 - 혈압상승, 심장맥동 불규칙, 심장정지 - 50[mA]에서는 실신한다.	25~80
3등급	- 실신, 심실세동	80~3000
4등급	- 혈압상승, 회복불가성 심장정지, 부정맥 폐기종	약 3000 이상

1. 켈펜(Keoppen)에 의한 안전기준

독일의 켈펜은 인체에 통전전류가 흐르는 방향에 따라 두 가지로 분류하였다.

1.1 통전전류가 세로로 흐른 경우

① I: 0~25[mA]

- 1[mA]이하 : 거의 느끼지 못함
- 5[mA]이하 : 가벼운 경직 또는 마비 현상
- 15[mA]이하 : 이탈 가능한 경련현상
- 15[mA]이상 : 경련현상

② II: 25~80[mA]

- 혈압이 상승하고 심장의 불규칙적인 박동, 50[mA]이상에서는 실신

③ III: 80[mA]이상 3~8[A]이하

- 약 0.3초 이상에서 심실세동으로 인한 사망

④ IV: 3~8[A]이상

- 고전압 감전의 경우로 피부의 내·외부화상과 통전중 심장마비
- 화상 또는 탄화로 인한 사망

1.2 통전전류가 수평 또는 부분적으로 흐를 경우

인체에 심실세동의 한계를 넘는 전류가 흐르더라도 심장은 분로역할을 하게 되므로 전류가 흐르는 경로에 따라 인체에 미치는 위험도는 달라진다. 표 2.2는 통전 경로별 위험도를 나타낸 것으로 숫자가 클 수록 위험도가 높아지는 것을 의미한다.

쾌펜은 감전에 의한 인체의 생리학적 반응을 통전전류의 크기와 통전시간 등에 의하여 결정된다는 것을 확인하였다. 전류의 크기가 크면 짧은 시간에도 위험하고, 전류의 크기가 작으면 장시간 통전이 지속되어도 안전하다는 개념에 근거하여 감전전류의 안전한계를 식 (2.1)과 같이 전류의 크기와 통전시간의 곱이 일정한 값(50 [mA · s])을 갖도록 정식화하였다.

$$I \cdot t = 50 [mA \cdot s] \quad (2.1)$$

여기서, I : 인체 통전전류[mA]

t : 통전시간[s]

Table 2.2 Risk Degree of Current Path

통 전 경 로	위 험 도	비 고
왼손-가슴	1.5	가장 위험
오른손-가슴	1.3	
왼손-한발 또는 양발	1.0	기준 위험
양손-양발	1.0	기준 위험
오른손-한발 또는 양발	0.8	
왼손-등	0.7	
한손 또는 양손-앉은 자리	0.7	
왼손-오른손	0.4	
오른손-등	0.3	

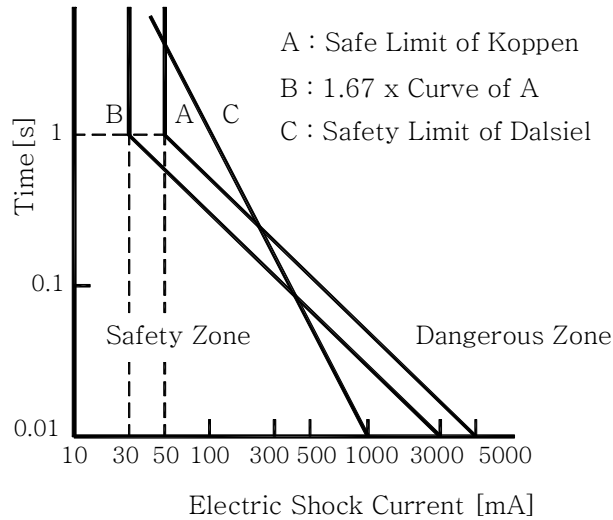


Fig. 2.1 Threshold Current for Safety

식 (2.1)을 그래프로 나타낸 것이 그림 2.1에서 A선이다. A선을 경계로 하여 오른쪽의 위가 위험한 범위이고, 왼쪽의 아래가 안전한 범위이다. A선에서는 인체 통과전류가 $50[\text{mA} \cdot \text{s}]$ 이하가 되면 안전한계 전류는 시간과 상관없는 상태가 된다. B선은 전류와 시간을 곱한 값이 $30[\text{mA} \cdot \text{s}]$ 인 경우로 A선에 대하여 안전을 1.67을 고려하여 작성된 것으로 유럽지역에서는 B선을 기초로 사용하고 있으며, C선은 달질(C. F. Dalziel)의 안전 한계선을 나타낸다.

2. 안전전류 기준

미국의 전기전자학회(IEEE)에서는 달질의 연구결과를 안전전류의 기준으로 하고 있는데, 감전사고의 위험도는 인체에 인가된 전력에 비례한다는 관점에서 여러 동물을 대상으로 실험한 자료로부터 인체의 감전전류 한계를 체중에 따라 다르게 적용하고 있다. 그림 2.2는 여러 동물에 대하여 수행한 심실세동전류와 체중의 관계를 나타낸 것이다.^[34]

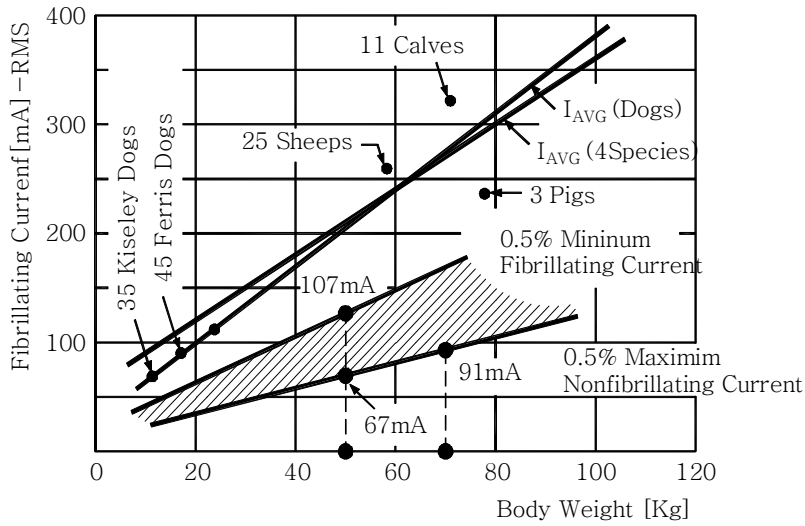


Fig. 2.2 Fibrillating Current vs Body Weight

여러 동물실험의 결과로부터 심실세동전류와 체중과의 함수관계를 가정하여 모든 사람들의 99.5[%]가 심실세동을 일으키지 않고 안전하게 견딜 수 있는 통전전류의 크기와 통전시간의 관계를 다음과 같이 정의하였다.

$$I_B = \frac{k}{\sqrt{t_s}} \quad (2.2)$$

여기서, I_B : 안전 통전전류[mA]

t_s : 통전시간[s]

$k = 0.116$ (체중 50[kg]인 경우)

$k = 0.157$ (체중 70[kg]인 경우)

3. 달질과 비겔마이어의 결과 비교

1980년도에 발표된 오스트리아 비겔마이어(Biegelmeir)의 연구결과는 그림 2.3은 달질과 비겔마이어의 연구 결과를 비교한 것으로 달질의 연구결과는 인체의 체중에 따라 심실세동전류와 통전시간의 관계가 통전시간의 범위에 상관없이 표시하였으나, 비겔마이어의 연구결과에 의하면 통전전류와 시간의 일정한 범위를 벗어나면 일정한 위험도를 가지는 것으로 표시되고 있다.^[35]

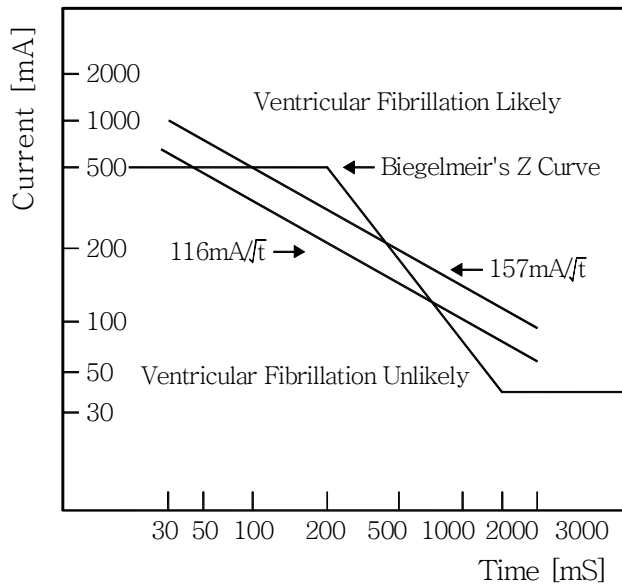


Fig. 2.3 Comparison of Current and Time

비겔마이어의 연구결과에 의하면 통전전류 500[mA], 통전시간 0.2초 이내에서는 일정한 위험도를 나타내며, 통전전류 50[mA], 통전시간 2.0초 이상에서도 일정한 위험정도를 나타낸다.^[36] 그 외의 구간에서는 통전전류의 크기와 통전시간의 관계가 비례하는 특성을 나타내고 있다. 달질의 기준식에서는 0.03~3.0초 사이의 범위로 제한이 되는데 비겔마이어의 연구결과에 의하면 심실세동이 심장의 박동주기와 관련이 커서 통전시간 0.06~0.3초 범위에서는 달질의 연구결과보다 위험성이 훨씬 더 작아진다는 점이다.

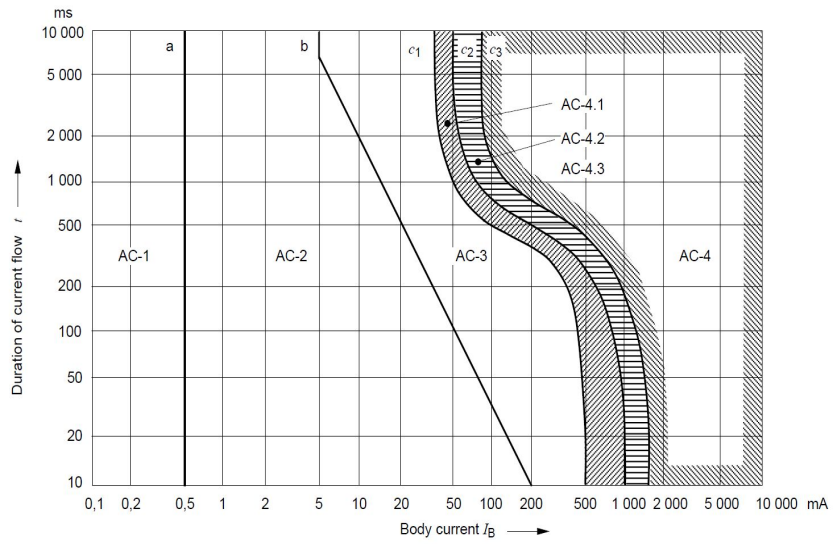
4. 국제기술기준에 의한 안전전류기준

보통 사람들의 감지전류는 통전전류가 0.5~12[mA]로서 전류가 흐른다는 느낌을 느낄 정도의 크기이며, 전류는 10~15[mA] 정도의 통전전류가 흘러서 근육이 수축되는 정도의 크기이다. 심실세동전류는 전류가 수십[mA] 정도로 흘러서 심근에 경련이 일어나고 혈액순환 기능이 지장을 받아서 사망에 이를 수 있는 전류로서, 심실세동전류의 한계는 전류의 크기에 통전시간을 곱하여 표시하며, 감전에 의한 인체의 영향을 적게 하기 위하여 인체에 흐르는 통전전류의 크기를 작게 하는 방법과 통전시간을 작게 하기 위하여 빠른 속도로 통전전류를 차단하는 방법을 고려할 수 있다.

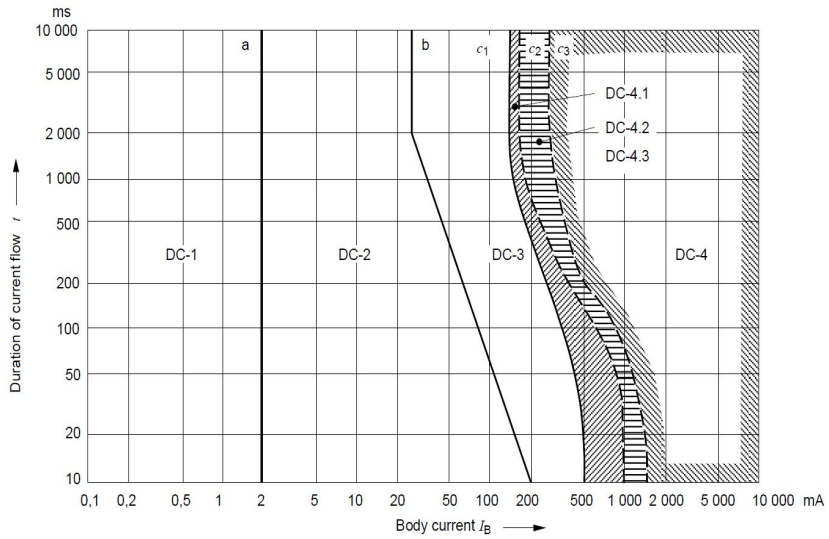
국제전기기술위원회(IEC, International Electrotechnical Commission)에서 감전전류의 안전한계에 대한 국제적인 기준은 IEC TC-64(국제전기기술위원회 건축전기설비 전문위원회)에서 심의한 결과, 전류가 인체에 미치는 영향에 대하여 그림 2.4와 같이 교류인 경우와 직류인 경우에 대한 안전한계 곡선을 감전보호 대책의 기초 자료로 Pub. 479(인체를 통과하는 전류의 영향)를 사용하고 있으며, 달질이나 쾌팬의 연구 결과를 적용하였으나, 최근에 오스트리아의 비겔마이어에 의한 연구결과를 반영한 새로운 기준이 제정되었다.^[37] 이 기준은 비겔마이어의 연구결과인 특정한 범위의 통전전류와 통전시간에서는 일정한 위험도를 나타낸다는 내용을 반영한 것으로서, 달질의 통전전류와 통전시간의 관계에 따른 위험도의 영역을 좀 더 세분화한 것이다.

그림 2.4에서 인체에 미치는 교류 및 직류전류의 영향에 대한 내용을 교류에 대하여 정리하면 다음과 같다.

- AC-1 (a 이하) : 일반적으로 영향이 없고 감지전류라 하며 0.5[mA]정도이다.
- AC-2 (a~b사이) : 일반적으로 인체 위험한 영향이 없고 이탈한계전류라 하며 10[mA] 정도이다.
- AC-3 (b~c사이) : 일반적으로 예상하지 못한 장애가 없고 2초 이상 흐르면 근육경련, 호흡곤란, 심장의 자극이 발생한다. 통전전류의 크기와 통전시간 경과에 따라 일시적인 심실세동이나 심실세동이 없는 심장박동정지 발생 가능성이 있다.
- AC-3 (c이상) : AC-3의 영향보다 심한 장애가 발생하고 통전전류의 크기와 시간의 경과에 따라 심장정지, 호흡정지 및 화상등의 인체 영향이 나타날 가능성이 높다.



(a) AC Case



(b) DC Case

Fig. 2.4 Time/Current Zones of Effects on Persons

- AC-4.1 (c1~c2이하) : 약 5[%]정도의 심실세동이 일어날 가능성이 있다.
- AC-4.2 (c2~c3이하) : 약 50[%]정도의 심실세동이 일어날 가능성이 있다.
- AC-4.3 (c3이상) : 50[%]정도의 심실세동이 일어날 가능성이 있다.

이어서 그림 2.4의 직류전류의 영향에 대한 내용을 정리하면 다음과 같다.

- DC-1 (a 이하) : 전류의 흐름, 차단 또는 갑작스런 전류 흐름의 방향을 바꿀 때 발생 가능하며 약간 따끔한 감각이 있다.
- DC-2 (a~b사이) : 전류의 인가, 차단 또는 갑작스런 전류 흐름의 방향을 바꿀 때 발생가능하며 비자의적인 근육수축이 일어날 수 있지만 전기 생리학적으로 해롭지 않다.
- DC-3 (b~c1사이) : 강한 비자의적인 근육의 반응이 있고 전류크기와 시간이 증가함에 따라 심장의 회복 가능한 기능장애 및 박동전도가 일어날 수 있다. 일반적으로 기관의 손상은 예측되지 않는다.
- DC-4.1 (c1~c2사이) : 약 5 %정도까지 심실세동의 가능성이 커진다.
- DC-4.2 (c2~c3사이) : 약 50 %정도까지 심실세동의 가능성이 커진다.
- DC-4.3 (c3이상) : 50 %를 초과하는 심실세동의 가능성이 커진다.

B. 접지와 인체의 위험전압

전기설비에 대한 접지의 목적은 전기설비의 고장에 의한 고장이나 낙뢰등에 의한 이상전류가 흐를 때 대지표면의 전위상승을 억제하여 인체에 대한 감전사고의 위험이나 전력기기의 손상을 방지하기 위한 것이다. 따라서 고장이나 낙뢰등에 의하여 접지도체를 통하여 이상전류가 흐를 때 대지표면의 전위를 낮게 하기 위해서는 기본적으로 접지 저항값이 작아야 한다. 접지를 시행하는 목적에 맞는 규정과 기준이 정해져야 하는데, 우리나라와 일본은 접지에 대한 규정과 기준이 설계의 여러 조건, 접지대상 대지의 크기, 대지의 전기적 성질 및 주변의 환경 등을 고려하지 않고 접지저항의 크기만으로 정해져 있으나 미국을 비롯한 선진 기술국에서는 접지전극에 의한 대지표면의 전위상승 값에 관련된 대지 전위상승, 보폭전압, 접촉전압 및 전이전압 등의 크기를 제한하고 있다.

일반적으로 접지봉이나 메시형태의 접지망을 대지에 매설하여 접지전극으로 사용한다. 이 접지전극에 흐르는 전류는 전력계통이나 전기기기의 고장에 의한 고장전류, 계통의 부하 불평형에 의한 불평형 전류, 누설전류 및 전력계통의 외부에서 발생하는 낙뢰와 같은 서지전류 등으로 구분되며, 접지전극을 통해서 대지에 흡수된다.

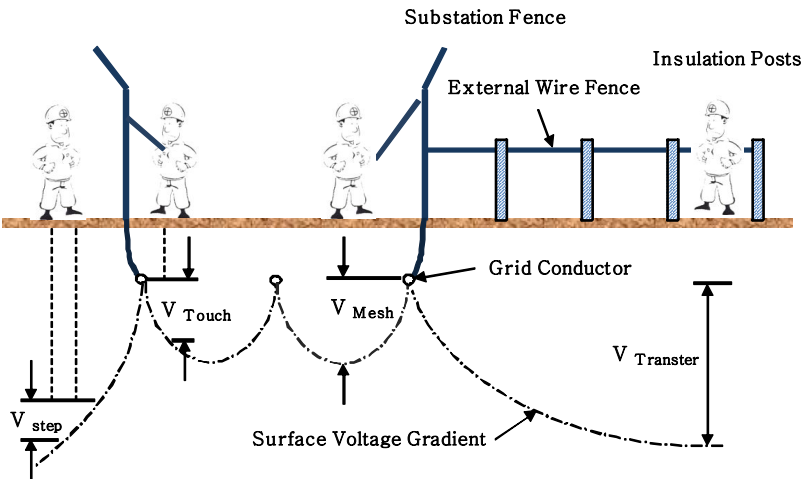


Fig. 2.5 Distribution of Surface Potential of Mesh Electrode

이상적인 경우는 이 전류가 접지전극으로 유입될 때, 접지전극과 대지사이에 전기적 저항이 없이 완벽하게 결합이 되거나, 또는 대지의 저항률이 매우 낮아서 전류의 흐름에 아무런 장애가 없이 대지에 흡수되는 것이다. 그러나 실제로 대지 저항률은 상당히 큰 값을 가지고 있으므로, 접지전극과 대지사이에 접촉저항이 존재하여 접지전극을 통해 대지로 흘러가는 전류는 방해받게 된다. 따라서 이러한 전류흐름의 방해에 의하여 전위가 상승하게 되며, 그 크기는 유입된 전류와 저항을 곱한 크기로 표현된다. 일반적으로 이 전위를 대지전위라고 정의하며, 접지전극의 표면에서 나타나는 최대의 대지전위를 대지 전위상승(Ground Potential Rise : GPR) 이라고 한다. 대지의 전기적 특성을 균질하다고 가정하면, 유입된 전류는 유입점을 중심으로 방사상 모양으로 퍼져나가는 형상을 상정할 수 있다. 따라서 유입점으로부터 멀어질 수록 전류분포가 작아져서 대지전위는 낮아지며, 충분히 멀리 떨어진 거리에서는 전위가 영이 되어 영 전위점이 된다.

그림 2.5는 메시형태의 접지전극에 전류가 유입된 경우에 나타나는 대지표면 전위의 분포를 보인 것이다.^[38]

1. 대지 전위상승(GPR)과 대지표면 전위 : E_{GPR} 와 E_p

접지저항이 R 인 접지전극의 대지 전위상승 E_{GPR} 는 식 (2.3)과 같이 표현된다.

$$E_{GPR} = R \cdot I_e \quad (2.3)$$

여기서, I_e 는 총 지락고장 전류 I_f 의 일부분이 접지전극을 거쳐 대지에 주입된 전류를 나타내며, 대지 전위상승 E_{GPR} 을 정확하게 계산하려면, 지락 고장전류 값에 대한 접지전극의 주입전류 I_e 와 R 사이의 관계를 먼저 결정하여야 한다. 일반적으로 이것은 쉬운 일이 아니므로 컴퓨터프로그램을 사용하는 것이 일반적이다.

또한, 접지전극이 설치된 전력설비의 내부나 그 경계부근 밖의 한 점 P에서의 대지표면 전위 E_p 은 접촉전압과 보폭전압을 결정하는 관점에서 매우 중요하다. 이러한 대

지표면 전위분포의 계산은 대지구조의 형태나 접지전극의 형태에 따라 매우 복잡하여 프로그램을 이용하여 계산하는 것이 일반적이지만, 이러한 계산 목적을 위하여 개발된 프로그램이 많지 않다.

2. 접촉전압 : E_t

전기설비의 접지전극에 고장전류가 유입되었을 때, 전기설비에는 최대전압인 대지전위상승(GPR)이 나타나며, 전기설비로부터 일정한 거리가 떨어진 점에 나타나는 대지표면 전위와의 차이, 즉 전기설비로부터 일정한 거리에 떨어져 서 있는 사람의 손이 전기설비와 접촉했을 때 접촉한 손과 발 사이에 나타나는 두 점 사이의 전위차를 접촉전압(touch voltage)이라고 정의한다. 다시 말하면 접촉전압은 대지 전위상승과 임의의 한 점에서의 대지표면 전위와의 차로 표시되며, 대지표면 전위 분포곡선의 경사가 급하면 급할 수록 접촉전압의 크기가 크게 나타나게 된다. 이러한 전위차가 인체에 영향을 미치므로 접지전극을 설계하는 과정에서 대지표면 전위 분포곡선의 경사가 적게 되도록 설계하여야 한다. 접촉전압 E_t 의 최대값은 식(2.4)와 같다.

$$E_t = E_{GPR} - E_p \quad (2.4)$$

3. 보폭전압 : E_s

접지전극 위에 사람이 두 발을 벌리고 서 있을 경우, 두 발이 접촉하고 있는 대지표면 전위 분포곡선에서 두 발 사이의 전위차가 보폭전압(step voltage)이라고 정의되며, 일반적으로 1[m] 거리사이의 대지 전위차를 나타낸다. 이 보폭전압도 대지표면 전위 분포곡선의 경사가 클 수록 크게 나타난다. 메시 접지전극인 경우, 메시의 외곽지역에서 큰 값을 나타내며, 접지봉과 같은 전극에서는 전극 부근에서 크게 나타나므로, 메시의 외곽에 접지도체를 집중적으로 분포하도록 설계하여야 한다. 보폭전압 E_s 의 최대값

은 식(2.5)와 같이 결정한다.

$$E_s = E_{p1} - E_{p2} \quad (2.5)$$

여기서, E_{p1} 과 E_{p2} 은 양쪽 발이 위치한 점에서의 대지표면 전위이다.

4. 메시전압 : E_m

메시 접지전극 위에 나타나는 최대의 접촉전압을 메시전압(mesh voltage)이라고 정의한다. 일반적으로 접지전극의 간격을 크게 하는 경우에 이 전압의 크기도 크게 나타난다.

C. 감전전류와 안전전압

1. 감전전류와 안전전류

전기적 충격인 감전에 의해서 죽음에 이르는 일반적인 메커니즘은 심실의 세동이 원인이라고 알려져 있다.

전류의 크기를 증가시켰을 때, 처음에 따끔거리는 느낌은 근육의 수축에 의한 것이다. 전류가 증가함에 따라 이러한 수축과 동반되는 열에 대한 감각은 증가하고, 결국 도체를 움켜잡는 힘을 완화시킬 수 없는 전류값까지 도달하게 된다. 인간이 견딜 수 있고, 도전된 도체를 쥐고 있다가 놓아줄 수 있는 정도의 최대전류를 ‘Let’s-go 전류’라고 한다. 인간이 접촉한 도체에 큰 전류가 흐를 때, 인체의 근육이 굳어지고 숨쉬기가 어렵게 되며, 무의식중에 심실의 세동이 연속적으로 일어난다. 이 상태보다 더 큰 전류는 피부에 치료할 수 없는 상처를 입힌다.

동물에 대한 실험에서 심실세동은 충격기간, 전원 주파수 및 신체 체중의 함수가 된다는 점이 나타났다. 실험의 통계적 자료로부터 주파수와 8.3[ms]~5[s]까지의 충격기간에 대하여 식 (2.6)과 같이 감전방정식을 얻을 수 있다.

$$i_{\max} = \frac{0.116}{\sqrt{t}} \text{ (rms amperes)} \quad (2.6)$$

여기서, i_{\max} : 체중 50 [kg]인 사람의 최대 0.5 [%]가 심실세동을 경험하는

최대 허용 전류

t : 전기적 충격 시간[초]

일반적으로, 지락고장은 10 주기 안에 제거되지만 보호계전 동작실패의 경우에 보조계전기의 작동은 긴 시간이 필요하게 된다. 대부분의 경우에 최대 제거시간은 0.5[s]로 가정한다. 결과적으로 치명적인 감전사고가 발생할 확률은 매우 낮다고 할 수 있다.

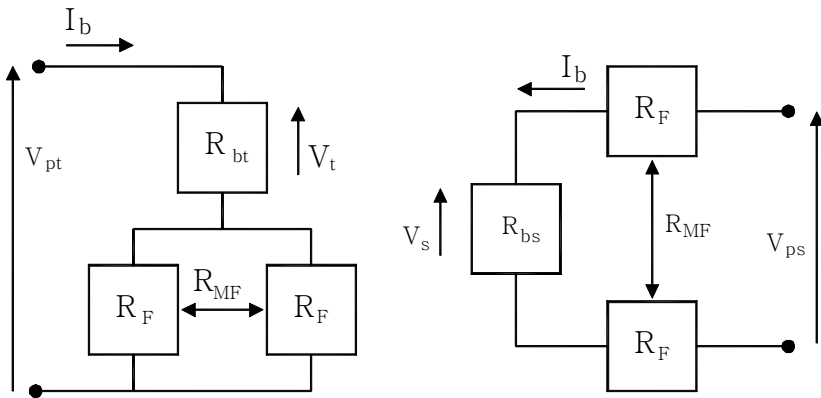
인체에 대하여 안전한 안전전류 i_b 는 식 (2.7)과 같다.

$$i_b \leq i_{\max} \quad (2.7)$$

2. 안전전압

그림 2.6은 접촉과 보폭전위에 의하여 인체에 흐르는 전류의 두 가지 경로를 보여준다. 첫 번째 경로는 배와 발을 포함하는 경로이고, 두 번째는 손, 가슴 및 발을 포함하는 경로이다. 이런 전류에 의한 충격전압이 접촉전압과 보폭전압이다.

일반적으로 접지시스템의 설계를 위한 인체의 저항은 1000~3000[Ω] 사이의 범위로서 보통 1000[Ω]의 저항값을 선택한다. 대지에 접촉되는 발은 대지 맨 위층 저항률의 [Ω-m]당 3.0[Ω]의 평균 대지저항을 가진다. 이 값에 의하여 다음의 안전 접촉전압과 보폭전압이 계산된다.



(a) Touch Voltage

(b) Step Voltage

Fig. 2.6 Equivalent Circuit of Touch and Step Voltage

지금, 손과 발 사이에 V_t [V]가 인가되고 발에는 V_s 가 적용된다고 가정하면 인체에 흐르는 전류는 식 (2.8)과 (2.9)로 정의된다.

$$i_{bt} = \frac{V_t}{1000 + 1.5\rho_s} \quad (\text{feet in parallel}) \quad (2.8)$$

$$i_{bs} = \frac{V_s}{1000 + 6\rho_s} \quad (\text{feet in series}) \quad (2.9)$$

여기서, ρ_s : 표면의 대지 저항률[Ω -m]이다.

i_{bt} : 접촉전압을 일으키는 전류

i_{bs} : 보폭전압을 일으키는 전류

접촉전압에 의한 전류 i_{bt} 와 보폭전압에 의한 전류 i_{bs} 가 i_{\max} 보다 작아야 하므로 식 (2.10)과 (2.11)의 관계식이 얻어진다.

$$V_t \leq \frac{116 + 0.174\rho_s}{\sqrt{t}} = E_t \quad [\text{V}] \quad (2.10)$$

$$V_s \leq \frac{116 + 0.696\rho_s}{\sqrt{t}} = E_s \quad [\text{V}] \quad (2.11)$$

여기서, E_t 와 E_s 는 각각 최대 접촉전압과 보폭전압을 나타낸다. 일반적으로, 전력설비의 접지설계에서 가장 만족시키기 어려운 위험전압은 접촉전압 E_t 이다.

Ⅲ. 접지 그리드 해석법

A. 유입전류 분포계산

1. 개 요

전력계통의 운전중에 고장은 불가피하게 일어나게 되어 있으며, 여러 가지 형태의 고장으로 부터 발생하는 고장전류가 각종의 전력계통 구성요소에 흐르게 된다. 이때, 각 구성요소에 흐르는 고장전류의 크기에 대한 분포가 어떠한가를 아는 것은 전력계통의 보호측면에서 중요한 정보로 이용된다. 이러한 고장전류 크기의 분포는 계통에 분산되어 있는 여러 계전기들의 전류 정정치를 설정하는 기준이 되고, 차단기의 정격 등을 결정할 수 있다. 이외의 중요한 적용대상은 접지시스템 설계분야로서 고장전류의 크기는 중요한 파라미터로 작용하게 되는데, 접지그리드를 통하여 대지로 흐르는 고장전류와 중성선(가공지선)으로 흐르는 전류, 접지된 철탑 등을 통해서 대지로 흐르는 전류의 크기와 분포를 정확하게 해석하므로써 최적의 접지시스템 설계, 인접회로에 대한 전자기 유도현상의 계산 및 보호계전기의 최적전류 정정치 결정등에 이용된다.

고장전류의 분포를 계산하기 위하여 기존의 많은 연구에서는 여러 가지의 기본적인 가정들을 사용하고 있어서 실제적인 현상들을 제대로 표현하지 못하였다.^{[39]~[49]} 특히 접지시스템을 설계하기 위한 접지그리드로 유입되는 고장전류의 분포를 계산하기 위한 가정은 다음과 같다.

- 고장전류의 크기는 대지저항율의 변화 등에 의한 접지임피던스의 변화에 영향을 받지 않는다.
- 두 개의 송전 철탑사이에 접지된 매설지선 임피던스와 송전철탑의 저항은 모두 일정하다.
- 고장이 발생한 지점을 중심으로 접지그리드를 가진 두 개의 말단 변전소가 송전선로로 연결되어 양쪽에 존재한다.
- 분포정수법이나 미분방정식을 이용해서 해를 구하기 위하여 무한길이의 선로나

많은 수의 경간으로 가정한다.

위의 가정들은 실제적인 현상을 근사화한 것이지 정확하게 표현한 것은 아니다. 일반적으로 변전소에는 몇 개의 인입 송전선로나 인출 송전선로가 설치되어 있다. 이러한 송전선로들은 때때로 10 [km]보다 짧으며 또한, 토양의 비균질성 때문에 송전 철탁의 탐각 저항은 각각의 철탁마다 일정하지 않다. 또한, 송전선로의 어떤 경간에서는 매설지선이 설치되는 경우도 있으며, 다른 경간에서는 접지가 충분하게 안될지도 모른다. 또한, 어떤 경우에는 변전소의 근처에만 알루미늄 지선을 설치하는 것이 경제적이고 장점을 갖게 될 지도 모른다. 이러한 것은 전극으로부터 접지전류의 전환에 의해서 발생하는 접지전극에서의 위험전위를 피하기 위해 필요한 것이다. 매설지선은 변전소의 접지전극으로부터 고장전류를 전환하는 데 매우 유용하다. 그러나 매설지선이나 가공지선에 흐르는 전류는 고장 발생점으로부터 약간의 거리에서 그 초기 고장전류의 몇 퍼센트로 약하게 되기 때문에 이런 지선을 전 송전선로에 설치하는 것은 불필요하고, 또한 비경제적이다. 이러한 결과로부터 다른 지역으로부터 공급되는 유도전압이나 전위상승을 더욱더 고려해야 한다. 또한, 알루미늄 지선이나 매설지선의 최적의 길이는 서로 다른 송전선로의 경간을 가정하여 결정해야만 한다. 이러한 경제적이고 최적인 전력계통 설계(지락고장 효과에 대하여)에 대한 모든 고려사항은 길거나 짧은 다중 송전선로를 모두 대상으로 하는 충분히 일반적이고 융통성이 있는 계산방법을 필요로 하는 것이다.

전력계통에서 정상적인 운전상태일 때에는 대지전류나 전자유도 등은 무시할 수 있을 정도로 평형상태를 유지한다. 또한, 계통은 대지와 분리되고, 대지구조나 성분과는 실질적으로 무관한 특성을 나타낸다. 이러한 현상은 계통에서 3상 평형고장이 발생하는 경우에도 마찬가지이다. 그러나 계통에서 1선 지락고장과 같은 불평형 고장이 발생하는 상황에서는 이러한 특성이 극적으로 변화된다. 따라서 접지계통에 유입되는 고장전류를 고찰하는 부분에서는 1선 지락고장에 대해서만 고려하여도 된다. 이러한 경우에 가공선로나 대지에서의 영상분 전류를 계산한다. 이 전류는 접지시스템에서 전위상승의 원인이 되고, 통신선로, 수도관로, 가스관로 및 전차선로 등과 같이 인접한 도체에 대한 유도전압의 원인이 되기도 한다.

1선 지락고장이 발생한 경우에 고장전류의 크기나 분포를 해석하기 위한 일반적인

해법으로는 미분방정식 해법, 유한길이 수정계수법, 일반적인 고장계산법, 단일측 소거법, 양측 소거법 등이 있다.

(1) 전력계통의 등가 모델

고장전류의 크기나 분포를 해석하기 위해서 먼저 전력계통의 등가모델을 정의하여야 한다. 일반적으로 전력계통에서는 말단 변전소를 변압기의 임피던스까지 포함하는 여러 개의 전압원으로 구성된 회로망으로 표현할 수 있다. 그림 3.1과 같은 전력계통에서 전압원은 실제의 발전기를 나타낼 수도 있고, 등가전원의 임피던스에 의해서 표현되는 전력계통의 일부를 나타낼 수도 있다. 등가전원의 임피던스는 그림처럼 변압기의 임피던스와 말단 변전소에 근접한 송전선로의 임피던스까지도 포함한다.

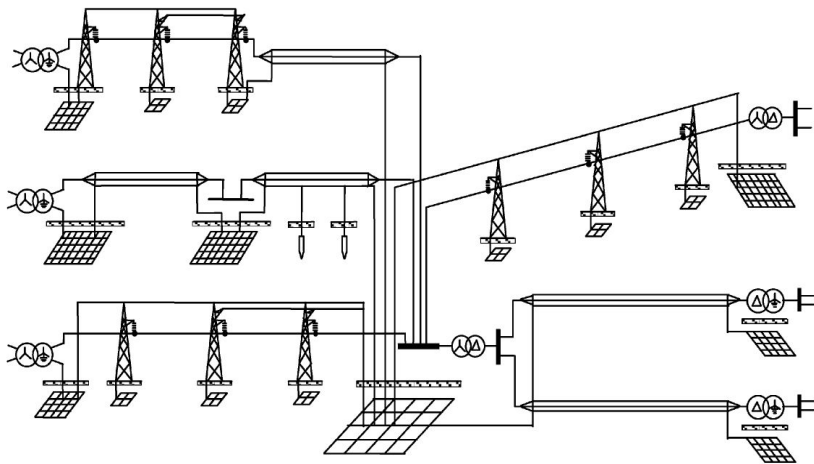


Fig. 3.1 Structure of Power System

송전선로는 각 터미널 변전소나 지락고장이 발생한 철탑에 연결되며, 고장지점에 도달되기 전에 각각의 송전선로는 중간 송전선로 혹은 배전 변전소와 연결되어 있다는 점을 주의해야 한다.

전력계통에서 지락고장이 발생한 경우에 고장전류의 크기와 여러 귀로에서 고장전류의 분포에 영향을 주는 요소로 다음과 같은 것을 고려할 수 있다.

- 발전원(Generating Source)와 변압기의 임피던스
- 상도체와 중성선 도체(지선, 매설지선 등)의 자기 및 상호임피던스
- 말단 변전소와 중간 변전소의 접지임피던스
- 송전탑의 탑각 임피던스, 고장점의 위치

(2) 임피던스의 결정

고장전류의 분포에 영향을 미치는 구성요소 중에서 각 변전소의 접지그리드 임피던스와 송전탑각 임피던스는 대지특성의 함수로 표현되는 저항만으로 나타나며, 이 대지특성은 시간적으로나 다른 요인에 대하여 변하는 특성을 갖는다. 이러한 임피던스는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Z = \Phi(s) + j\zeta(g) \quad (3.1)$$

여기서 s 는 토양 구조나 전극의 모양에 따라 나타내는 변수의 집합이고, g 는 접지도체의 배열에 따라 나타내는 변수의 집합이다. 여기에서 $\Phi(s)$ 를 상수 혹은 상층 대지 저항률에 선형적으로 변하는 것으로 설명된다. 다른 함수들은 저항값의 변화를 시뮬레이션하기 위해서 사용된다. 허수항 $\zeta(g)$ 는 기본적으로 기하학적 전극만의 함수이며, 상수로 가정한다. 여러가지 경우에서 $\zeta(g)$ 는 $\Phi(s)$ 에 비해서 무시될 수 있다. 그러나 규모가 큰 접지시스템이나 매설지선에서는 무시할 수 없다.

전력계통에서 고장이 발생하는 경우에 접지그리드로 유입되는 고장전류의 크기 및 분포를 해석하기 위해서는 먼저 각 임피던스를 결정해야 하며, 이때 대지를 2층 구조의 등가모델과 임의의 x 지점에서 대지 저항률을 ρ_1^x 와 ρ_2^x 라고 한다면 도체의 자기 임피던스와 상호 임피던스는 대지 저항률의 함수로 표현된다. 이러한 임피던스의 계산은 대지귀로 임피던스에 의한 카슨(Carson)방법이 있으나, 이 방법에 의한 임피던스는 단일층 대지 저항률만을 고려할 수 있어서 좀 더 일반적인 임피던스의 계산 방법들이 제안되어 있다.

일반적으로 i 노드와 j 노드 사이에서 중성선 도체의 자기 임피던스 Z_{ij} 와 중성선

도체와 상도체사이의 상호 임피던스 Z_{ij}^m 은 다음과 같이 표현된다.

$$Z_{ij} = \phi_{ij}(\rho_1^{ij}, \rho_2^{ij}) \quad (3.2)$$

$$Z_{ij}^m = \psi_{ij}(\rho_1^{ij}, \rho_2^{ij}) \quad (3.3)$$

노드 j 에서 접지저항은

$$R_j = \theta_j(\rho_1^j, \rho_2^j) \quad (3.4)$$

이고, 변전소 k에서의 접지저항은 다음과 같다.

$$R_k = \eta_k(\rho_1^k, \rho_2^k) \quad (3.5)$$

i-j 노드 사이의 자기임피던스 Z_{ij} 와 상호임피던스 Z_{ij}^m 을 카슨과 폴락체크(Pollaczek)의 공식을 이용하면 다음과 같이 다시 정리된다.

$$Z_{ij} = j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{2h_i}{r} + 2(\Delta R_{ij} + j\Delta X_{ij}) \quad (3.6)$$

$$Z_{ij}^m = j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_{ij}}{d_{ij}} + 2(\Delta R_{ij}^m + j\Delta X_{ij}^m) \quad (3.7)$$

여기서, ΔR_{ij} and ΔX_{ij} : 단위 길이당 자기 임피던스

ΔR_{ij}^m and ΔX_{ij}^m : 단위 길이당 상호 임피던스

h_i : 도체의 지표상 높이(케이블인 경우는 0)

D_{ij} : 도체와 영상도체 사이의 등가 선간거리

d_{ij} : 도체간의 등가 선간거리(케이블인 경우 $D_{ij} = d_{ij}$)

$$\frac{\mu_0}{2\pi} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{2\pi} = 2 \cdot 10^{-4} \text{ [H/km]}$$

또한, 가공지선과 고장상 도체사이의 상호 임피던스를 계산하기 위한 식은 다음과 같다.

$$Z_{pg} = j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \left[\frac{\sqrt{(h_p + h_g + 2D)^2 + h_{pg}^2}}{\sqrt{(h_p - h_g)^2 + h_{pg}^2}} \right] \quad (3.8)$$

여기서, $\omega = 2\pi f$

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$$

h_p : 상도체의 지표 높이

h_g : 가공지선의 지표 높이

h_{pg} : 상도체와 가공지선의 직선 거리

(3) 매설지선의 등가회로

가공지선과 함께 각 송전탑마다 매설지선을 설치하는 경우에 매설지선의 영향을 고려해야 하는데, 각 송전탑마다 매설지선을 설치하는 경우의 등가회로를 그림 3.2에 보였다. 따라서 송전탑의 접지 임피던스는 송전탑의 접지도체 임피던스뿐만 아니라 매설지선에 의한 자기임피던스와 상호임피던스까지도 고려해야 한다. 상도체와 중성선 도체의 자기 및 상호 임피던스도 대지특성에 의해서 영향을 받는다. 이러한 임피던스는 실제로 대지 저항률에 영향을 받는데, 이 영향이 매우 적기 때문에 접지 임피던스의 변화를 무시하여 상수로 가정한다.

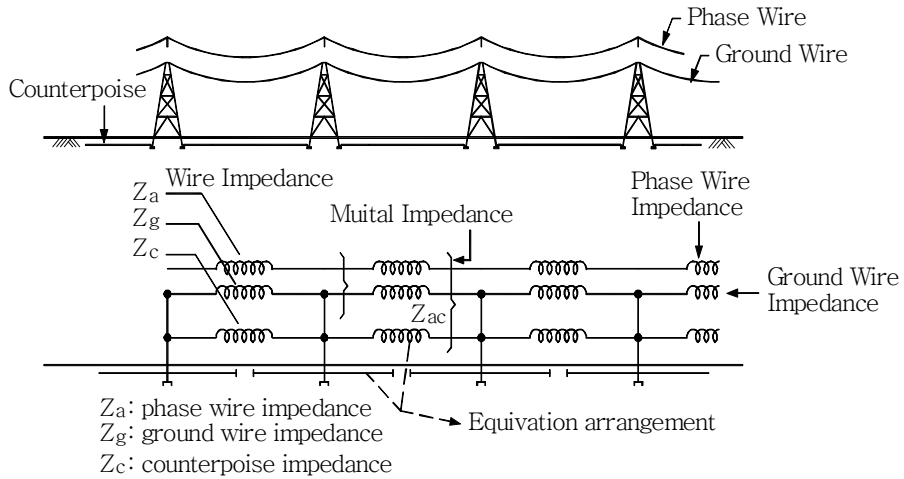


Fig. 3.2 Equivalent Circuit of Transmission Line

2. 일반적인 해석적 해법

일반적으로 전력계통에서 발생한 고장전류의 분포를 계산하기 위하여 사용되는 해석적인 방법은 직접법이다. 이러한 해법은 계산의 중간이나 최종결과에 대한 필연적인 반올림 오차(Round-Off Error)를 제외하면, 직접법에 의해 얻어진 해는 정확하고 수학적 연산의 확실한 수에 의해서 얻어진다. 그러나 일부의 직접법은 그들의 단순성에도 불구하고 컴퓨터를 이용한 연산과정에서 유효자리수의 처리에 의하여 몇몇의 중요한 숫자가 상실되기 때문에 컴퓨터의 응용에는 적합하지 않다. 다음에 표현하는 수학적 방법은 계산 알고리즘의 변화를 보여준다.

(1) 단일측 소거법(One-Sided Elimination Method)

전력계통에서 고장이 발생한 경우에 고장전류가 변전소의 접지계통으로 유입되는 고장전류의 분포를 구하기 위한 일반적인 해석적 해법들을 잘 이해하기 위해서는 먼저 간단한 문제에 대하여 이해를 하는 것이 중요하다. 여기서는 고장전류 분포계산의 여

러 가지의 해법들 중에서 단일측 소거법에 대하여 논하고자 한다.

고장전류의 분포를 해석하고자 하는 간단한 형태의 전력계통에 대한 등가회로를 그림 3.3에서 보였다. 말단 변전소 T에는 변전소 G에서 지락고장이 일어났을 때 전류 I_F 가 흐르며, 송전선로의 가공지선은 철탑에서 규칙적으로 접지되어 있다. 여기에서, i 번째 구간은 지선에 대한 자기 임피던스는 Z_{gi} , 지선과 상도체와의 상호 임피던스는 Z_{mi} , 상도체의 자기 임피던스는 Z_{ai} , i 번째 송전탑의 탐각저항은 R_i 로 나타낼 수 있다. 또한, 고장점에서 말단 변전소 T까지는 n 개의 구간으로 나누어져 있으며, 말단 변전소 T의 접지저항은 $R_T(=R_n)$ 으로, 고장점인 변전소 G의 접지저항은 $R_G(=R_0)$ 로 나타냈다.

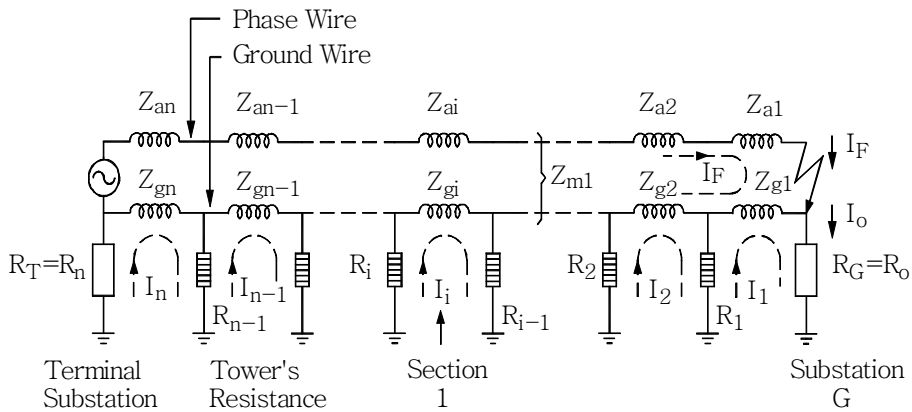


Fig. 3.3 Equivalent Circuit for One-Side Elimination of T/L System

이 방법은 기본적으로 키르히호프(kirchhoff)의 법칙에 기초를 두고 있다. 그림 3.3에서 각각의 송전탑 사이를 각각 하나의 폐회로로 가정하며, 상도체와 지선회로를 하나의 폐회로라고 가정하여 각각의 폐회로에 대한 전압방정식이 다음과 같이 유도된다.

$$\begin{aligned}
(0) \quad H_F I_F - \sum_{i=1}^n (S_i I_i) &= V \\
(1) \quad -S_1 I_F + T_1 I_1 - R_1 I_2 &= 0 \\
(2) \quad -S_2 I_F - R_1 I_1 + T_2 I_2 - R_2 I_3 &= 0 \\
\cdot & \\
(i) \quad -S_i I_F - R_{i-1} I_{i-1} + T_i I_i - R_i I_{i+1} &= 0 \\
\cdot & \\
(n-1) \quad -S_{n-1} I_F - R_{n-2} I_{n-2} + T_{n-1} I_{n-1} - R_{n-1} I_n &= 0 \\
(n) \quad -S_n I_F - R_{n-1} I_{n-1} + T_n I_n &= 0
\end{aligned} \tag{3.9}$$

여기에서 H_F , S_i 및 T_i 는 다음과 같이 정의된다.

$$H_F = \sum_{i=1}^n (Z_{ai} + Z_{gi} - 2Z_{mi}) \tag{3.10}$$

$$S_i = Z_{gi} - Z_{mi}$$

$$T_i = R_{i-1} + Z_{gi} + R_i$$

식 (3.9)의 형태는 총 고장 전류 I_F 에 의한 루프전류 $I_i (i = 2, 3, \dots, n)$ 와 변전소의 전극 전류 $I_0 (I_0 = I_1)$ 를 표현하는데 장점을 가지고 있으며, 이것은 루프(1)에 의해서 루프(2)의 방정식을 I_1 으로 표현하기 쉽다. 만일 이러한 과정이 (n-1) 루프방정식까지 계속된다면 다음과 같은 결과식을 얻는다.

$$I_i = C_i I_F + B_i I_{i-1}, \quad i = 2, \cdot \cdot \cdot, n-1 \tag{3.11}$$

$$C_i = -S_{i-1} / R_{i-1}$$

$$B_i = T_{i-1} / R_{i-1}$$

또한, 식 (3.11)은 변전소 전류 I_0 를 다음과 같이 표현하기에 편리하다.

$$I_0 = I_1 = \alpha_0 I_F + \gamma_0 I_1 = \alpha_1 I_F + \gamma_1 I_1 \quad (3.12)$$

여기서, $\alpha_0 = \alpha_1 = 0$

$$\gamma_0 = \gamma_1 = 1$$

일반적인 i 번째 루프방정식은

$$I_i = \alpha_i I_F + \gamma_i I_0 \quad (3.13)$$

여기서, $\alpha_i = B_i \alpha_{i-1} + C_i$

$$\gamma_i = B_i \gamma_{i-1}$$

이 되며, 이 식은 유도에 의해서 쉽게 증명될 수 있다. 만일 식 (3.13)에 주어진 I_i 의 값이 루프방정식 (0)와 (n)으로 각각 대치되면, 기본적인 변형한 후에 다음 식이 얻어진다.

$$H_F - \sum_{i=1}^n (s_i \alpha_i) I_F - \sum_{i=1}^n (s_i \gamma_i) I_0 = V \quad (3.14)$$

$$[R_n \alpha_{n+1} + R_{n-1} \alpha_n] I_F + [R_n \gamma_{n+1} + R_{n-1} \gamma_n] I_0 = 0$$

여기서, α_{n+1} 과 γ_{n-1} 은 식 (3.13)에 의해서 정의된다. 식 (3.14)의 해는 총 고장전류 I_F 와 변전소 전류 I_0 를 제공한다. 루프전류 I_i 는 (3.13)에 의해서 직접 구해진다. α_i 와 γ_i 는 변전소(i=1)에서 시작하여 계산된다. 또한, 터미널 (i=n)에서 시작하는 것도 가능하

다. 이러한 성질 때문에 이 알고리즘이 단일측 소거법(One-Sided Elimination Method)이라고 불리는 이유이다.

(2) 양측 소거법(Double-Sided Elimination Method)

단일측 소거법이 사용될 때 어떤 경우에 발생할 수 있는 반올림 오차는 기본적으로 다른 쪽의 값을 얻기 위해서 송전선로의 한 쪽에서의 데이터를 사용하는 계산 알고리즘의 결과이다. 반대로, 양측 소거법은 동시에 선로의 양 쪽에서 데이터를 사용한다.

그림 3.4의 송전계통 등가회로에서 루프전류의 배분의 법칙을 나타내는 식은 식 (3.16)에 의해서 주어진다. 말단 변전소 K의 선로 J와 관련이 있는 방정식이 나오는 점을 주목해야 한다. 또한 이 선로 n_{KJ} 에서 경간의 총 숫자는 n 으로 표현되었다.

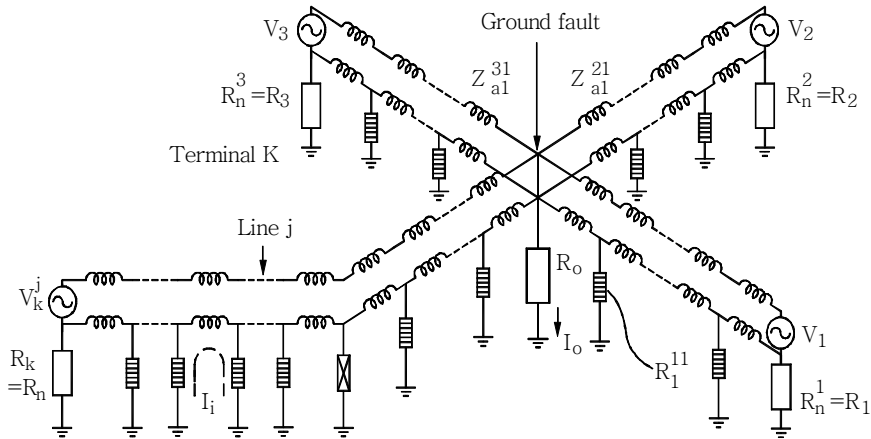


Fig. 3.4 Equivalent Circuit for Double-Side Elimination of T/L System

$$(0) \quad H_F^{KJ} I_F^{KJ} - \sum_{i=1}^n (S_i^{KJ} I_i^{KJ}) = V_K^J$$

다음과 같이 쓸 수 있다.

a) $i = 2, \dots, n-1$ 인 경우

$$I_i = \delta_i I_{i-1} + \gamma_i I_K + \alpha_i I_F \quad (3.20)$$

$$\begin{aligned} \text{여기서, } \delta_i &= A_i / (1 - B_i \delta_{i+1}) & (3.21) \\ \gamma_i &= B_i \gamma_{i+1} / (1 - B_i \delta_{i+1}) = \delta_i (R_i \gamma_{i+1} / R_{i-1}) \\ \alpha_i &= (C_i + B_i \alpha_{i+1}) / (1 - B_i \delta_{i+1}) = \delta_i (S_i R_{i-1} + R_i \alpha_{i+1} / R_{i-1}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \delta_{n+1} &= 0 & ; \delta_n &= A_n & (3.22) \\ \gamma_{n+1} &= 1 & ; \gamma_n &= B_n \\ \alpha_{n+1} &= 0 & ; \alpha_n &= C_n \end{aligned}$$

b) $i = 1, n$ 인 경우

$$I_i = \varepsilon_i I_{i+1} + \theta_i I_0 + \eta_i I_F \quad (3.23)$$

$$\begin{aligned} \text{여기서, } \varepsilon_i &= B_i / (1 - A_i \varepsilon_{i-1}) & (3.24) \\ \theta_i &= A_i \theta_{i-1} / (1 - A_i \varepsilon_{i-1}) = \varepsilon_i (R_{i-1} \theta_{i-1} / R_i) \\ \eta_i &= (C_i + A_i \eta_{i+1}) / (1 - A_i \varepsilon_{i-1}) = \varepsilon_i (S_i / R_i + R_{i-1} \eta_{i+1} / R_i) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_0 &= 0 & ; \varepsilon_1 &= B_1 & (3.25) \\ \theta_1 &= 1 & ; \theta_0 &= A_1 \\ \eta_0 &= 0 & ; \eta_1 &= C_1 \end{aligned}$$

만일 루프전류 I_{i+1} 과 I_{i-1} 를 제거하기 위해서 식 (3.20)과 (3.23)을 결합하면 다음의 방정식이 얻어진다.

$$I_i = U_i I_F + V_i I_K + W_i I_0, \quad i = 2, \dots, n-1 \quad (3.26)$$

$$I_i = u_i I_F + v_i I_K + w_i I_0, \quad i = 1, n \quad (3.27)$$

$$\begin{aligned} \text{여기서, } U_i &= (\alpha_i + \delta_i \eta_{i-1}) / (1 - \delta_i \varepsilon_{i-1}) \\ V_i &= \gamma_i / (1 - \delta_i \varepsilon_{i-1}) \\ W_i &= \delta_i \theta_{i-1} / (1 - \delta_i \varepsilon_{i-1}) \end{aligned} \quad (3.28)$$

$$\begin{aligned} u_i &= (\eta_i + \varepsilon_i \alpha_{i-1}) / (1 - \varepsilon_i \delta_{i+1}) \\ v_i &= \varepsilon_i \gamma_{i-1} / (1 - \varepsilon_i \delta_{i+1}) \\ w_i &= \theta_i / (1 - \varepsilon_i \delta_{i+1}) \end{aligned} \quad (3.29)$$

식 (3.26)과 (3.27)을 결합하면 다음 연립방정식 집합이 얻어진다.

$$[H_F - S_1 u_1 - \sum_{i=2}^n S_i U_i] I_F - [S_1 v_1 + \sum_{i=2}^n S_i V_i] I_K - [S_1 w_1 + \sum_{i=2}^n S_i w_i] I_0 = V_K^J$$

..... for $J = 1, \dots, M_K$ 와 $K = 1, \dots, P$

$$\sum_{m=1}^{M_K} (U_n I_F^{K_m}) + [\sum_{m=1}^{M_K} (V_n^{K_m})] I_K + [\sum_{m=1}^{M_K} W_n^{K_m}] I_0 = 0 \quad (3.30)$$

..... for $K = 1, \dots, P$

$$\sum_{K=1}^P [\sum_{m=1}^{M_K} (U_1^{K_m} I_F^{K_m})] + \sum_{K=1}^P [\sum_{m=1}^{M_K} (V_1^{K_m}) I_K] + \sum_{K=1}^P [\sum_{m=1}^{M_K} -1] I_0 = 0$$

B. 접지도체의 전류분포 계산

변전소의 접지문제를 다루는데 있어 접지그리드의 전류분포를 정확하게 구하는 것이 무엇보다 선행되어야 한다. 그러나 균질토양에 있는 직선 접지도체와 같은 간단한 문제를 취급하더라도 접지도체에 흐르는 전류분포를 구하려면 적절한 가정을 통한 적분 방정식의 해를 만족시켜야 한다.

접지그리드는 물론 실제 접지시스템에서 접하게 되는 접지그리드가 상호 연결된 복수개의 접지그리드에서 리턴전극에 의한 상호간의 근접효과 영향을 고려하는 등의 보다 복잡한 해석문제를 다룰 때 이에 적합한 최적 해석기법을 선정이 중요하게 된다.

접지그리드의 형상별로 고려해 보면, 등간격으로 배치된 도체군으로 구성된 접지그리드의 경우와 도체가 비대칭으로 구성된 보다 복잡한 형상의 접지그리드로 구분된다. 이에 대한 다른 연구결과에 의하면, 전자의 경우 주 그리드와 리턴전극의 중심에 대해 전류가 선형적으로 분포된다는 가정 하에 해석이 실제와 잘 부합되는 것이 증명되었다. 그러나 후자의 경우 접지그리드에서 전기적 중심점을 찾는 것이 어려울 뿐만 아니라 그리드 주변을 에워싼 토양에 중첩되는 도체에 대해서는 상기한 방법으로 해석하여 정확한 해를 구할 수 있는가에 대한 문제가 있다. 따라서 후자의 경우 전류의 분포가 비선형적이라는 가정이 전제되어야 한다.

1. 접지그리드

그림 3.5는 2층 구조의 대지에 매설되어 있는 도체 $j(j=1, \dots, n)$ 가 n 개로 구성된 접지그리드를 나타내고 있다. 도체 j 는 직선도체이고 길이는 접지그리드의 전체 길이에 비해 대단히 작다 ($l_j \ll L$). 각각의 도체 j 의 중심좌표 (x_j, y_j, z_j) 점에서 도체 i 에 의해 유도되는 전위를 V , 도체 i 의 선형 전류밀도를 i_i , 그리드로 주입되어 대지로 흐르는 전체 전류를 I 라 할 때, 전류밀도 분포계수 S_i 는 다음 식으로 표현된다.

$$S_i \frac{I}{L} = i_i \quad (3.31)$$

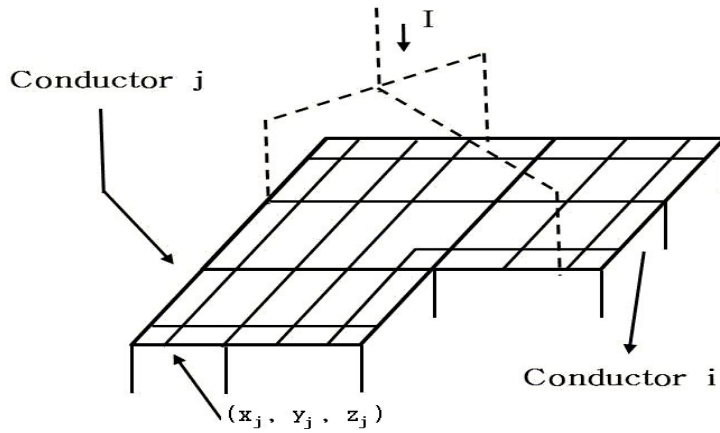


Fig. 3.5 Grounding Grid

2. 계산 해법

(1) 반복법 (Iterative Method)

식 (3.31)에서 전체 도체의 길이 L 과 그리드 유입전류 I 를 정리하면 다음과 같다.

$$l_1 + l_2 + \cdots + l_i + \cdots + l_n = L \quad (3.32)$$

$$i_1 l_1 + i_2 l_2 + \cdots + i_i l_i + \cdots + i_n l_n = I \quad (3.33)$$

이 식 (3.33)을 이용하여 식 (3.34)와 같이 유도할 수 있다.

$$S_1 l_1 + S_2 l_2 + \cdots + S_i l_i + \cdots + S_n l_n = L \quad (3.34)$$

접지그리드 전극의 전위 상승값을 V 라고 하면, j 번째 도체의 전위분포에 대한 관계식은 다음과 같이 정리할 수 있으며,

$$S_1 V_{1j} + S_2 V_{2j} + \dots + S_i V_{ij} + \dots + S_n V_{nj} = V \quad (3.35)$$

여기서, $j = 1, \dots, n$

식 (3.35)의 양변에 $l_j V_{ii}$ ($j = 1, \dots, n$)를 곱하면 다음 식이 유도된다.

$$l_1 S_1 \frac{V_{1i}}{V_{ii}} + l_2 S_2 \frac{V_{2i}}{V_{ii}} + \dots + l_i S_i + \dots + l_n S_n \frac{V_{ni}}{V_{ii}} = \frac{V l_i}{V_{ii}} \quad (3.36)$$

이들 항을 더하여 V 에 대하여 정리하면 다음과 같은 식이 성립된다.

$$V = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (l_i S_j V_{ji} / V_{ii}) / \sum_{i=1}^n (l_i / V_{ii}) \quad (3.37)$$

또한 S_1 에 대해 정리하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$S_k^{(h+1)} = S_k^{(h)} \frac{\sum_{i=1}^n (\sum_{j=1}^n (l_i / V_{ii}) (S_j^{(h)} V_{ji}))}{V_{kk} \sum_{i=1}^n (l_i / V_{ii})} - \frac{\sum_{i=1}^n (l_i / V_{ii}) (\sum_{j=1}^n (S_j^{(h)} / V_{jk}))}{V_{kk} \sum_{i=1}^n (l_i / V_{ii})} \quad (3.38)$$

여기서, h 는 반복회수이고, S_k 의 초기값은 식 (3.34)를 만족하여야 한다.

또한, 해를 구하는 수렴속도는 초기값에 따라 달라지므로 다음과 같은 물리적 법칙을 전제로 하여야 한다.

- 접지그리드의 외곽도체에 보다 전류밀도가 높다.
- 도체의 밀집도가 크면 주변 매질(토양)이 포화된다.

(2) 다단계법(The Multistep Method)

앞의 두 가지 해석법은 미지수의 수가 많다는 단점을 가지고 있다. 이러한 미지수들을 줄이기 위해 다음과 같은 점을 고려해야 한다.

접지그리드의 저항은 그리드의 전류분포와는 무관하며, 무한원점의 한 도체에서 유기되는 전위는 그 도체의 전류분포와 무관하다. 따라서 도체를 한꺼번에 n 개의 요소로 분할하지 않고, n 개의 단계로 나누어 각 단계마다 보다 작은 요소로 전극을 분할하는 방법을 고려할 수 있다. 예를 들면, 앞서의 방법에서 접지그리드를 다음의 두 단계로 나누어 각 단계마다 분할할 수 있다.

- 전위를 구하고자 하는 점에 가까운 도체 (점 l)
- 나머지 접지그리드 (r)

따라서, 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$S_1 l_1 + (L - l_1) S_{r_1} = L \quad (3.39)$$

여기서, l 은 도체의 중심이고, 전위는 좌표 (x_1, y_1, z_1) 에서 구하며, r_1 은 나머지 그리드 부분을 점 l 에 대해 분할한 것이다. 따라서 식 (3.35)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$S_1 V_{l1} + S_{r_1} V_{r1} = V = RI \quad (3.40)$$

과정을 각각의 다른 점 $i = 1, \dots, n$ 에 대해 반복하면

$$S_1 = \gamma_1 \left(\frac{\alpha_1 v + v_{l1} - \sum_{j=1}^n v_{j1}}{\gamma_1 v_{l1} - \sum_{j=1}^n v_{j1}} \right) \quad (3.41)$$

따라서 $R = 1$ 로 가정하고 식 (3.34)에 의해 S_i 를 조정 한 후 전류분포 계수 S_i 를 구할

수 있다.

$$\sum_{i=1}^n S_1 L_1 = L \quad (3.42)$$

식 (3.41)과 (3.34)로부터 접지그리드 저항 R 과 S_i 를 동시에 구하는 것이 가능하다. 식 (3.41)에서 S_i 을 식 (3.34)에 대입하면 다음 식을 얻을 수 있다.

$$R = \frac{1 - n + \sum_{i=1}^n \left(\beta_1 v_{i1} / (\gamma_1 v_{i1} - \sum_{j=1}^n v_{j1}) \right)}{I \sum_{i=1}^n \left(\alpha_1 / (\gamma_i v_{i1} - \sum_{j=1}^n v_{j1}) \right)} \quad (3.43)$$

$$S_1 = \gamma_1 \left(1 + \frac{\alpha_1 v - \beta_1 v_{i1}}{\gamma_1 v_{i1} - \sum_{j=1}^n v_{j1}} \right) \quad (3.44)$$

C. 지표면 전위분포 계산

접지그리드에 유입된 고장전류의 분포를 알고 있는 상태에서 변전소 접지시스템의 지표면 전위 분포는 인체의 안전이나 설비의 안정적 운전에 영향을 미치는 매우 중요한 값이다. 지표면 전위 분포의 결과에 따라 접촉전압, 보폭전압 및 메시전압 등을 계산하는 기초가 된다. 따라서 접지그리드의 설계 및 해석을 위한 전위상승을 계산하는 과정은 필수적인 것이며, 이 과정에서 접지전극의 저항값도 중요한 요소이다. 이러한 중요한 요소인 접지전극의 접지 저항값을 계산하는 문제에 대하여 일반적으로 대지 저항률, 특히 지층의 구조가 매우 중요한 변수임에도 불구하고 실제의 지층구조가 아닌 등가화된 단일 지층구조의 파라미터를 사용하여 접지전극 설계 및 해석이 이루어지는 관계로 실제의 현상이 제대로 파악되지 않는 문제점이 있는 것이다.

따라서 실제의 다층 구조의 대지구조 모델을 적용할 수 있고, 임의의 모양으로 구성되는 접지그리드에 대하여 유입된 고장전류에 의한 지표면 전위를 계산하기 위한 해석적 기법 접지전극에 유입된 고장전류에 의하여 임의의 점에서 전위를 계산할 수 있는 그린함수의 정리(Principle of Green's Function)을 이용하여 접지전극의 GPR과 대지표면의 전위분포를 계산하는 방법이다.

1. 그린함수의 원리

접지시스템의 특성을 해석하기 위한 기본적인 조건이 정태 전류장 이론(Theory of a Static Current Field)에 기초한다는 것으로서, 매설된 접지그리드에 전류 I 가 유입되면 무한거리의 한 점을 영전위의 기준점으로 지정한다는 것이다.

접지전극의 유입전류에 의한 임의의 한 점 P 에서의 전위는 그린함수의 원리에 의하여 다음과 같이 계산된다.

$$V_P = \iint_S G(P, Q) J(Q) dS \quad (3.45)$$

여기서, $J(Q)$: 접지도체의 표면 S 에서 Q 점의 유입 전류밀도

$G(P, Q)$: 접지도체에 대응되는 그린함수

접지그리드의 해석을 위하여 접지도체 표면의 한 점인 Q 점을 통하여 유입되는 단위 전류밀도에 의하여 임의의 한 점 P 에서의 전위가 표현된다. 따라서 접지도체를 통하여 대지로 흘러가는 전체의 누설전류는 모든 접지도체에 흐르는 전류 I 와 같으며 다음과 같이 정리된다.

$$I = \iint_S J(Q) dS \quad (3.46)$$

접지도체의 경계면에서 전위 강하를 무시한다면 경계조건은

$$V_r = C \quad (3.47)$$

이 된다. 여기서 C 는 상수이다.

식 (3.45)로부터 (3.47)이 그린함수의 원리를 이용한 접지도체의 전위분포를 계산하기 위한 기본 방정식이며, 이 방정식에 대한 일반적인 수치해석기법을 적용하기 위하여 접지도체를 n 개의 작은 도체로 분할하여 중첩의 원리를 적용하는 기법으로 임의의 한 점 P 에서의 전위를 계산한다.

접지도체의 전체길이를 L 이라고 하며 도체길이 L 에 흐르는 전체전류를 I 라고 한다면, 도체길이 L 의 j 번째 미소 전극도체 L_j , L_j 도체의 중심을 O_j , 미소 전극도체의 전류 I_j 가 되고,

$$L = \sum_{j=1}^n L_j \quad (3.48)$$

$$I = \sum_{j=1}^n I_j \quad (3.49)$$

와 같이 정리된다. 그러면 접지도체 L 에 흐르는 전류 I 에 의하여 임의의 한 점 P 에서의 전위는 중첩의 원리를 적용하여 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$V_P = \sum_{j=1}^n G(P, O_j) I_j \quad (3.50)$$

여기서, $G(P, O_j)$ 는 접지도체 L_j 중심점 O_j 의 단위 점전원에 의한 임의의 한 점 P 에서의 전위를 계산하는 그린함수이다. i 번째 미소전극의 임의의 한 점 P 에서 모든 미소 전극에 의한 그린함수 $G(i, j)$ 는 j 번째 미소전극에 단위 전류원이 인가되었을 때 i 번째 미소전극에 나타나는 전위를 나타낸다. $G(i, j)$ 는 R_{ij} 로 표현되는 상호 저항처럼 표현되며, $i = j$ 일 때는 R_{ij} 는 자기 저항을 표현되어, 임의의 한 점 P 에서의 전위는 다음과 같이 표현된다.

$$V_P = \sum_{j=1}^n R_{ij} I_j \quad (3.51)$$

2. 중첩의 원리에 의한 전위 해석

일반적으로 접지그리드는 점전극과 선형도체로 구성된 복합시스템으로 해석하여야 한다. 대지를 단일매질과 전위라고 한다면 모든 점에서의 전위를 계산하기 위하여 중첩의 원리를 적용하기에 적합한 문제이다. 대지 혹은 접지도체의 표면에서 모든 점에서의 전위는 미소 접지전극의 모든 부분에 의한 전위의 합으로 계산할 수 있다.

복합 접지도체는 매우 많은 개수의 선형 미소 도체로 나누어지며, P 점에서의 전위는 대지에서의 점전극에 의하여 계산할 수 있다.

$$V_P = \frac{I\rho}{4\pi} \left(\frac{1}{r} + \frac{1}{r'} \right) \quad (3.52)$$

여기서, r 은 점전극 A 와 P 점과의 거리이고, r' 은 P 점과 영상분과의 거리를 나타낸다. 그리고 전류 I 는 점전극 A 로부터 대지로 흐르는 전류이다.

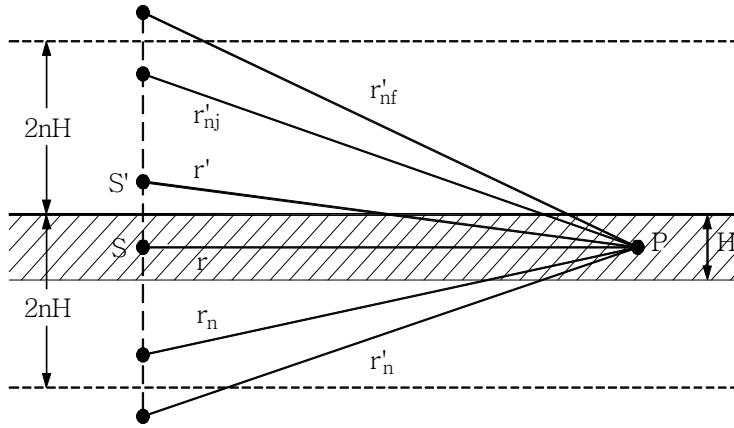


Fig. 3.6 Point Electrode and Image in Soil

다층 대지구조 모델에서 그림 3.6에 보인 바와 같이 영상법의 원리에 의하면 2층 대지구조에서 P 점에서의 전위는

$$V_P = \frac{I\rho_1}{4\pi} \left(\frac{1}{r} + \frac{1}{r'} \right) + \frac{I\rho_1}{4\pi} \sum_{n=1}^{\infty} K^n \left(\frac{1}{r_n} + \frac{1}{r'_n} + \frac{1}{r_{nj}} + \frac{1}{r'_{nj}} \right) \quad (3.53)$$

여기서, K 는 대지의 반사계수

$$K = \frac{(\rho_2 - \rho_1)}{(\rho_2 + \rho_1)} \quad (3.54)$$

ρ_1 : 상층의 대지 저항률[Ω -m]

ρ_2 : 하층의 대지 저항률[Ω -m]

2층 구조의 대지구조에서 점 전극 S 와 P 점이 상층에 있을 때의 전위는 다음과 같

이 표현된다.

$$\begin{aligned}
 V_P = & \frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2 + (h-z)^2}} + \frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2 + (h+z)^2}} \\
 & + \sum_{n=1}^{\infty} K^n \left[\frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2 + (2nH+h-z)^2}} + \frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2 + (2nH+h+z)^2}} \right. \\
 & \left. + \frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2 + (2nH-h-z)^2}} + \frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2 + (2nH-h+z)^2}} \right]
 \end{aligned}$$

여기서, H : 상층의 깊이

h : 점전극과 지표면과의 거리

2층 구조의 대지구조에서 점 전극 S 와 P 점이 하층에 있을 때의 전위는

$$V_P = \frac{\rho_2 I}{4\pi} (1-K) \sum_{n=0}^{\infty} K^n \left[\frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2 + (2nH+h+z)^2}} + \frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2 + (2nH+h-z)^2}} \right] \quad (3.55)$$

이고, 2층 구조의 대지구조에서 점 전극 S 는 상층에 P 점이 하층에 있을 때의 전위이다.

$$V_P = \frac{\rho_1 I}{4\pi} (1+K) \sum_{n=0}^{\infty} K^n \left[\frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2 + (2nH+h+z)^2}} + \frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2 + (2nH+h-z)^2}} \right] \quad (3.56)$$

그림 3.7과 같은 선형 도체가 (x_1, y_1, z_1) 와 (x_2, y_2, z_2) 의 좌표에 위치해 있을 때 임의의 한 점 P 는 (x_0, y_0, z_0) 에서의 전위는

$$V_P = \frac{\rho I}{4\pi L_s} \left[\int_0^{L_s} \frac{dr}{s} + \int_0^{L_s} \frac{dr}{s'} \right] \quad (3.57)$$

여기서, $s = \sqrt{r^2 + R_1^2 - 2rR_1\cos\theta}$

$$\cos\theta = \frac{R_1^2 + L_s^2 - R_2^2}{2L_sR_1}$$

$$R_1 = [(x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2 + (z_1 - z_0)^2]^{1/2}$$

$$R_2 = [(x_2 - x_0)^2 + (y_2 - y_0)^2 + (z_2 - z_0)^2]^{1/2}$$

$$R'_1 = [(x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2 + (z_1 + z_0)^2]^{1/2}$$

$$R'_2 = [(x_2 - x_0)^2 + (y_2 - y_0)^2 + (z_2 + z_0)^2]^{1/2}$$

이 되어, 다시 정리하면 다음과 같다.

$$V_P = \frac{\rho I}{4\pi L_s} \left[\ln\left(\frac{L_s - R_1\cos\theta + (R_1^2 + L_s^2 - 2L_sR_1\cos\theta)^{1/2}}{R_1(1 - \cos\theta)}\right) \right] \quad (3.58)$$

$$+ \ln\left(\frac{L_s - R'_1\cos\theta' + (R_1'^2 + L_s^2 - 2L_sR'_1\cos\theta')^{1/2}}{R'_1(1 - \cos\theta')}\right)]$$

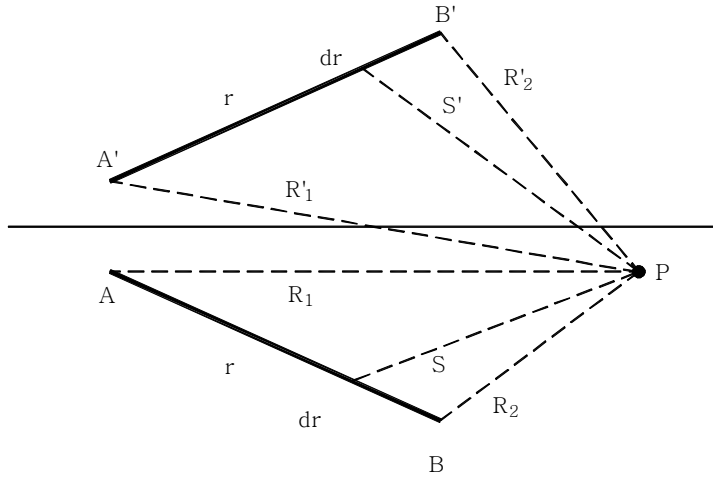


Fig. 3.7 Linear Electrode in Soil

3. 적분방법에 의한 전위해석

다층구조의 대지 상층부에 깊이 e 로 매설된 수평의 직선도체를 고려하면 이때 지표면의 한 점 $M(x_0, y_0, z_0)$ 에서의 전위를 구하기 위하여 먼저, 도체전극은 상호 연결된 직선도체로 구성되며, 각각의 직선도체는 균일한 전류밀도를 갖는다는 조건을 가정하면, 도체의 미소부분 du 에 의한 관측점 $M(u_0, v_0, w_0)$ 에서의 전위는 함수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$dV = \theta(w_0) + \theta(w_0 + 2z_s) \quad (3.59)$$

$$\begin{aligned} \text{여기서, } \theta(w_0) = & \frac{\rho_1 i du}{4\pi} \left[\frac{1}{\sqrt{(u-u_0)^2 + v_0^2 + w_0^2}} \right. \\ & + \sum_{n=1}^{\infty} k^n \left(\frac{1}{\sqrt{(u-u_0)^2 + v_0^2 + (2nh+w_0)^2}} \right. \\ & \left. \left. + \frac{1}{\sqrt{(u-u_0)^2 + v_0^2 + (2nh-w_0)^2}} \right) \right] \end{aligned} \quad (3.60)$$

전체적인 도체에 의한 M 점에서의 전체 전위는

$$V = \int_{u_s=0}^{u_p} \theta(w_0) du + \int_{u_s=0}^{u_p} \theta(w_0 + 2z_s) du \quad (3.61)$$

$$\begin{aligned} \text{여기서 } \int_0^{u_p} \theta(w_0) du = & \frac{\rho_1 i}{4\pi} \left[\text{Ln} \left(\frac{u_p - u_0 + \sqrt{(u_p - u_0)^2 + v_0^2 + w_0^2}}{-u_0 + \sqrt{u_0^2 + v_0^2 + w_0^2}} \right) \right. \\ & + \sum_{n=1}^{\infty} k^n \text{Ln} \left(\frac{(u_p - u_0) + \sqrt{(u_p - u_0)^2 + v_0^2 + (2nh + w_0)^2}}{-u_0 + \sqrt{u_0^2 + v_0^2 + (2nh + w_0)^2}} \right) \\ & \left. + \sum_{n=1}^{\infty} k^n \text{Ln} \left(\frac{(u_p - u_0) + \sqrt{(u_p - u_0)^2 + v_0^2 + (2nh - w_0)^2}}{-u_0 + \sqrt{u_0^2 + v_0^2 + (2nh - w_0)^2}} \right) \right] \end{aligned} \quad (3.62)$$

$\int_0^{u_p} \theta(w_0 + 2z_s)$ 는 식 (3.62)에서 w_0 대신에 $w_0 + 2z_s$ 을 대입함으로써 얻어질 수

있다. 따라서 V 는 다음과 같은 간단한 형태로 표현될 수 있다.

$$V = \frac{\rho_1 I}{4\pi L} \psi[u_p, u_0, v_0, w_0] + \psi[u_p, u_0, v_0, (w_0 + 2z_s)] \quad (3.63)$$

또한, 여기서 u_p, u_0, v_0, w_0 는 다음과 같이 xyz 좌표계로 변환할 수 있다.

$$\begin{aligned} u_p &= (x_p - x_s) \cos\alpha + (y_p - y_s) \sin\alpha \\ u_0 &= (x_0 - x_s) \cos\alpha + (y_0 - y_s) \sin\alpha \\ v_0 &= (y_0 - y_s) \cos\alpha - (x_0 - x_s) \sin\alpha \\ w_0 &= z_0 - z_s \end{aligned} \quad (3.64)$$

다층 대지구조의 상층부에 임의의 형태로 매설되어 있는 직선 도체를 그림 3.8에 나타냈다. 도체가 $u'v$ 평면에 위치하도록 uvw 좌표계를 설정하면 uvw 좌표계의 원점이 x_s, y_s, z_0 ($u'v$ 평면에서 측정점 M)이 된다.

점 $M(u_0, v_0, 0)$ 에서 도체로 인한 전위는 $0'u$ 축상의 점 $M'(u'_0, v'_0, 0)$ 에서의 수평 도체에 의한 전위와 같다. 따라서 새로운 등가 수평도체의 특성은 다음과 같으며,

$$\begin{aligned} u'_s &= v'_s = w'_s = 0 \\ v'_p &= w'_p = 0 \\ u'_p &= \sqrt{u_p^2 + (w_p - w_s)^2} \end{aligned} \quad (3.65)$$

그리고 새로운 측정점 M'의 좌표는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
u'_0 &= [u_p u_0 + w_s (w_s - w_p)] / u'_p & (3.66) \\
v'_0 &= [u_0^2 + v_0^2 + w_s^2 - u'^2_0]^{\frac{1}{2}} \\
w'_0 &= w_0 = 0
\end{aligned}$$

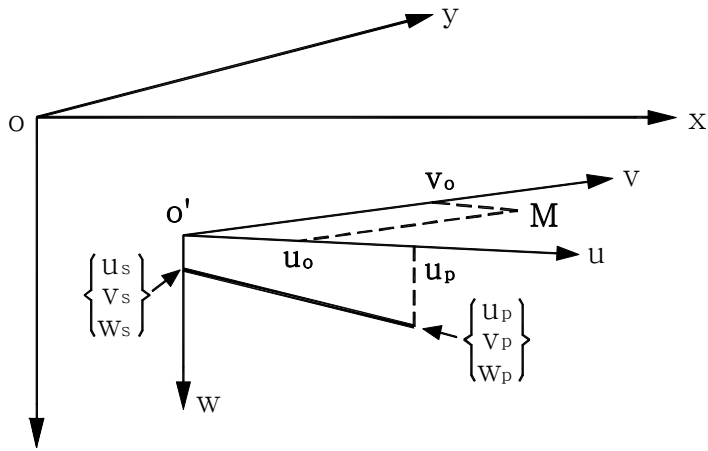


Fig. 3.8 Arbitrarily Arrangement of Linear Conductor

메시 접지전극과 같이 직선도체의 전극이 상호연결되어 임의의 형태로 문힌 전극에 대한 상층부 (x_0, y_0, z_0) 에서의 전위는 식(3.63)에서 계산한 것과 같이 각 직선도체에 의한 전위를 합한 것과 같다. 만일 각각의 직선도체가 j 로 표시된다면, 전체 전위는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$V = \frac{\rho_1 I}{4\pi L} \sum_{j=1}^m \{ \Psi_j [u_p, u_0, v_0, w_0] + \Psi_j [u_p, u_0, v_0, (w_0 + 2z_s)] \} \quad (3.67)$$

여기서, L : 매설된 도체의 전체 길이

m : 직선도체 수

따라서 메시 접지도체와 같이 상호 연결된 임의배치의 직선도체에 대한 전위계산을 위한 식은 다음 파라미터들의 함수로 표현된다.

$$V = f(\rho_1, k, I, L, x_s, y_s, z_s, x_p, y_p, z_p, x_0, y_0, z_0, \alpha) \quad (3.68)$$

전위를 구하는 식 (3.68)에 대하여 도체표면의 전위(GPR)를 구하여 인가된 전류로 나누면 접지도체의 접지저항을 구할 수 있으며, 지표면의 전위분포를 구하면 지표면에 서의 접촉전압과 보폭전압의 분포를 구할 수 있다.

D. IEEE Std. 80에 의한 변전소 접지시스템 설계

접지설계는 다음 두 가지 목적을 가지고 있다. 첫째는 각종 변전설비의 안전 운전조건을 초과하거나 전력공급을 중단하지 않고 정상 및 사고 상황에서의 전류를 대지에 안전하게 흘릴 수 있어야 하며, 둘째는 접지된 설비의 주위에 있는 사람이나 동물 등이 치명적인 전기적 충격을 받을 위험이 없어야 한다.

지락사고가 발생한 경우에 고장전류가 대지 속으로 흘러 들어가면 변전소의 구내 및 주변에 전위차가 발생하여 접지시스템 설계시 이에 대한 적절한 대책을 세우지 않으면 지락사고시 지표면에 발생하는 전위경도가 인체에 위험을 초래하게 된다. 특히, 접지한 철구, 기기의 외함 또는 지지물과 부근 대지위의 인체간에 위험한 전위차가 발생할 수 있다. 이와 같은 위험전위는 접지계의 구조, 접지지점의 토양의 성분 및 균질성, 지락 전류의 크기 및 지속시간, 인체의 전기적 특성 등 관계되는 요소가 많을 뿐 아니라 그 특성이 복잡하고 불확실하여 정확한 계산은 매우 어렵다.

그러나 얻은 자료에 따라서 각 요소를 검토함으로써 실용적으로 안전한 접지시스템 설계가 가능하다. 특히 낮은 접지 저항값만으로 인체의 안전이 보장되지 못한다는 것이며 접지된 시설물은 접촉하여도 안전하지 않다는 점이다.

IEEE Std. 80 기준에서는 접지의 기본설계, 인체안전 허용전류, 대지전류 계산, 접지도체의 굵기선정, 최대 허용 안전전압 계산, 위험전압의 계산, 접지저항의 계산, 최대 대지전위 상승전압 계산방법을 제시하고 접지설계 절차를 설명한다.

1. 개요

인체의 안전허용 보폭전압 및 접촉전압의 한계를 결정한 후는 다음의 순서로 접지시스템을 설계한다.

- (1) 토양의 특성조사
- (2) 최대 지락고장전류의 결정
- (3) 접지그리드의 예비설계

- (4) 접지그리드의 접지저항계산
- (5) 접지그리드의 최대전위상승계산
- (6) 접지그리드 주변의 보폭전압계산
- (7) 접지그리드내의 보폭전압 및 접촉전압계산
- (8) 전이전압과 특히 위험한 개소의 조사
- (9) (6), (7) 및 (8)항에 의한 예비설계의 수정
- (10) 접지그리드 건설
- (11) 완료 후의 접지그리드의 접지저항 측정과 가능하면 보폭전압 및 접촉전압측정
- (12) 실측값에 의한 (5), (6), (7) 및 (8)항의 재검토
- (13) (12)항의 검토 결과에 따라 필요하다면 접지그리드의 변경 및 추가

2. 접지설계의 순서

▶ 단계 1

변전소 기본배치도면에서 접지그리드 포설면적을 계산한다. 토양자료의 조사 및 분석을 통하여 얻은 결과로부터 등가 대지 저항률을 구한다.

▶ 단계 2

접지도체의 굵기는 IEEE Std. 80에서 제안하는 식 (3.69)에 의하여 계산한다. 1선 지락전류 I_F 는 장래의 계통확장과 도체전류 분류율(α)을 감안하여 접지도체가 견뎌야 할 최대값이며, 고장전류 지속시간 t_c 는 보호계전기의 후비보호를 포함하여 최대 고장 제거 시간을 반영한다. 고장전류 지속시간 t_c 는 1.0으로 한다.

$$A = I_F \cdot \sqrt{\frac{t_c \cdot \alpha_r \cdot \rho_r \cdot 10^4}{TCAP \cdot \ln \left[1 + \left(\frac{T_m - T_a}{K_0 + T_a} \right) \right]}} \quad [\text{mm}^2] \quad (3.69)$$

여기서, I_F : 최대지락전류 [A]

A : 도체의 단면적 [mm²]

T_m : 최대허용온도[°C]

Ta : 주위온도 [°C]

t_c : 고장전류지속시간 [°C]

α_r : 20°C에서의 저항온도계수

K_0 : 0°C에서의 저항온도계수

ρ_r : 20°C에서의 도체의 고유저항[μΩ · cm]

$TCAP$: 열용량계수 [J/cm³/°C]

▶ 단계 3

최대 허용 안전전압을 식 (3.74)와 (3.75)에 의하여 계산한다. 이 식에서 사용된 인체가 허용된 감전시간은 0.03~3초의 범위에서 인체안전 허용전류 계산한 결과로 고장 설비의 차단시간을 감안하여 감전시간 t_s 를 0.5~1.0초 범위내의 값으로 한다.

변전소에서 인체가 위치하는 지점의 넓은 면적을 자갈이나 아스팔트와 같이 저항률이 높은 재료를 0.08~0.15[m]의 층으로 덮는 경우에는 신발과 대지와와의 접촉저항이 증가한다. 따라서 접촉전압과 보폭전압의 등가회로에서 저항률이 높은 재료를 덮는 경우에 접촉전압과 보폭전압의 최대 허용전압 한계값은 식 (3.70)과 (3.71)로 표현된다.

$$E_{touch} = I_B(R_B + 1.5 C_s \rho) = (R_B + 1.5 C_s \rho) \frac{k_w}{\sqrt{t_s}} \quad (3.70)$$

$$E_{step} = I_B(R_B + 6.0 C_s \rho) = (R_B + 6.0 C_s \rho) \frac{k_w}{\sqrt{t_s}} \quad (3.71)$$

여기서, C_s : 표토 층 재료와 두께에 따른 감쇄계수

감쇄계수 C_s 는 표토층의 재료와 두께에 의하여 결정할 수 있으며, 지층의 대지저항률(ρ)과 표토층 재료의 저항률(ρ_s)와의 특성인 반사계수(K)에 따라서도 다른값을 나타낸다. 이러한 관계를 보인 것이 그림 3.9이며, 반사계수(K)는 식 (3.72)와 같다.

$$K = \frac{\rho - \rho_s}{\rho + \rho_s} \quad (3.72)$$

여기서, ρ_s : 대지표면(표토층)의 저항률[Ω -m]

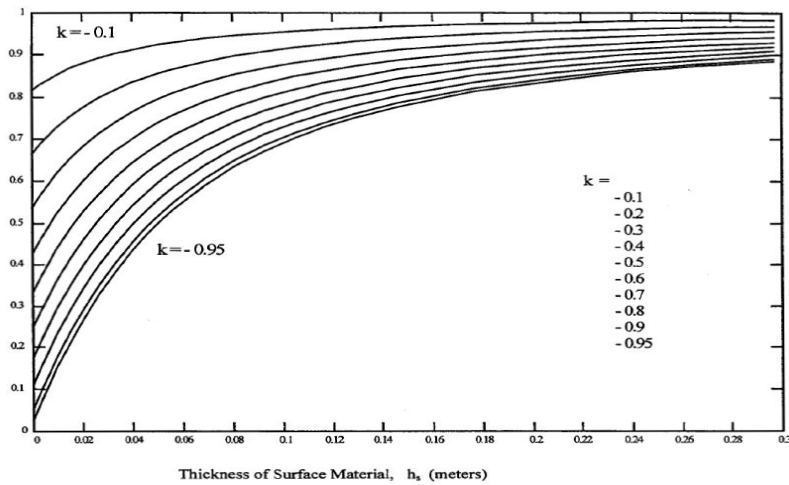


Fig. 3.9 Derating Factor vs Thickness

감쇄계수 C_s 를 식 (3.73)과 같이 해석식으로 구할 수 있다.

$$C_s = \frac{1}{0.96} \left\{ 1 - 0.106 \left(\frac{1 - \frac{\rho}{\rho_s}}{2h_s + 0.106} \right) \right\} \quad (3.73)$$

그러면 인체의 체중별로 최대 안전 허용전압은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{허용 보폭전압 : } E_{step} &= (1,000 + 6 \cdot C_s \cdot \rho_s) \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} (50[\text{Kg}]) & (3.74) \\ &= (1,000 + 6 \cdot C_s \cdot \rho_s) \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} 70[\text{Kg}] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{허용 접촉전압 : } E_{touch} &= (1,000 + 1.5 \cdot C_s \cdot \rho_s) \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} (50[\text{Kg}]) & (3.75) \\ &= (1,000 + 1.5 \cdot C_s \cdot \rho_s) \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} (70[\text{Kg}]) \end{aligned}$$

▶ 단계 4

예비설계에서는 접지그리드 매설깊이 h 를 결정하고, 접지그리드 간격 D 를 정하여 <단계 1>에서 구한 접지그리드 포설면적으로부터 접지그리드 1변 도체수 n 을 구하고, 접지시스템 도체의 총길이 L 를 구한다. 접지그리드 간격과 접지봉의 매설위치는 대지 전류 I_G 의 크기와 접지그리드의 포설될 면적을 감안하여 결정한다.

▶ 단계 5

접지저항을 식 (3.76)에 의하여 계산한다.

$$R_g = \rho \left[\frac{1}{L} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left(1 + \frac{1}{1 + h \sqrt{\frac{20}{A}}} \right) \right] \quad (3.76)$$

여기서, R_g : 변전소 접지저항 [Ω]

ρ : 대지 고유 저항률 [$\Omega \cdot \text{m}$]

A : 접지망 포설면적 [m^2]

L : 접지계 총 도체길이[m]

h : 접지망 매설깊이 [m]

▶ 단계 6

대지전류 I_G 를 계산한다. 접지시스템의 과다설계를 방지하기 위하여 지락전류가 접지그리드를 통하여 원격대지로 흘러 들어가 보폭전압, 접촉전압 및 접지 전위상승에 관계되는 전류분만을 설계에 반영한다. 그러나 최악의 고장위치와 조건, 비대칭분에 대한 교정, 장래의 확장을 고려하여야 한다.

▶ 단계 7

위험전압인 최대 보폭전압 및 접촉전압을 다음의 간이 해석방법에 의하여 계산한다. 지표면 전위분포를 계산할 수 있는 컴퓨터 프로그램이 있으면 활용한다.

1) 접지그리드의 최대 보폭전압

접지그리드의 보폭전압은 다음 식 (3.77)에 의하여 계산한다.

$$E_s = \frac{\rho \cdot I_g \cdot K_s \cdot K_i}{L_{step}} \quad [\text{V}] \quad (3.77)$$

보폭전압 산출을 위한 간격계수 K_s 의 값은 매설깊이에 따라 식 (3.78)에 의하여 결정한다.

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{D} (1 - 0.5^{n-2}) \right] \quad (3.78)$$

2) 접지그리드의 최대 접촉전압

접지그리드의 최대 접촉전압은 다음 식 (3.79)에 의하여 계산한다.

$$E_m = \frac{\rho \cdot I_g \cdot K_m \cdot K_i}{L_{mesh}} \quad [\text{V}] \quad (3.79)$$

여기서 L_c : 메시도체의 총 길이 [m]

L_r : 접지봉 총길이 [m]

$$L_{touch} = L_c + \left(1.55 + 1.22 \left(\frac{L_r}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} \right) \right) L_r$$

$$L_{step} = 0.75 \cdot L_c + 0.85 \cdot L_r$$

h : 접지그리드의 매설깊이 [m]

메시전압 산출을 위한 간격계수 K_m 은 식 (3.80)와 같이 계산한다.

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{D^2}{16hd} + \frac{(D+2h)^2}{8Dd} - \frac{h}{4d} \right) + \frac{K_{ii}}{K_h} \ln \frac{8}{\pi(2n-1)} \right] \quad (3.80)$$

여기서 h_0 : 1 [m] (접지그리드 기준 매설 깊이)

K_{ii} : 외곽 도체에 대한 내부도체의 보정계수

$K_{ii} = 1$ (접지망 외각 또는 전체에 접지봉을 타설한 경우)

$$K_{ii} = \frac{1}{(2n)^n} \quad (\text{상기 이외의 경우})$$

K_h : 매설 깊이에 따른 보정계수

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{h}{h_0}}$$

D : 그리드 간격 [m]

h : 매설깊이 [m]

n : 접지그리드 형상에 따라 계산되는 계수

d : 도체의 직경 [m]

▶ 단계 8

만약 최대예상 접촉전압이 최대 허용 접촉전압보다 낮으면 다음 단계로 넘어가고 그렇지 않으면 <단계 11>로 넘어가 예비설계를 수정한다.

▶ 단계 9

만약 접촉전압과 보폭전압이 최대 허용 위험전압보다 낮으면 기본적인 접지설계를 끝내고 그렇지 않으면 <단계 11>로 넘어가 예비설계를 수정한다.

▶ 단계 10

접촉전압과 보폭전압이 최대 허용 위험전압보다 높으면 접지그리드 간격 또는 매설깊이 등을 조정하고 접지봉의 개수를 증가시켜 접지시스템 도체의 총길이를 증가시키도록 예비설계를 수정한다. 만일 접지그리드와 접지봉을 증가시켜도 소요 접지저항을 얻을 수 없을 경우에는 접지그리드 포설면적을 증가 가능 여부, 별도의 접지보강 방법 사용, 자갈의 포설두께를 증가시키거나 절연성능이 좋은 재질로 변경하여 최대허용 안전전압을 증가시킬 수 있는지를 검토한다.

▶ 단계 11

접촉전압과 보폭전압 계산값이 요구치를 만족하면 상세설계에 들어간다. 접지할 기기의 근처에 접지도체가 설치되어 있지 않으면 접지도체를 추가로 설치하고, 가공지선, 피뢰기, 변압기 중성점 등의 하부에 접지봉을 추가로 타설하는 것을 검토한다.

접지설계가 제출되어 시공이 완료되면 접지저항을 실측하여 설계치와 크게 차이가 나면 그 원인을 분석하고 실측 저항치가 설계 저항치보다 높으면 접지설계를 보강하여 재 시공하여야 한다.

3. 접지설계의 순서도

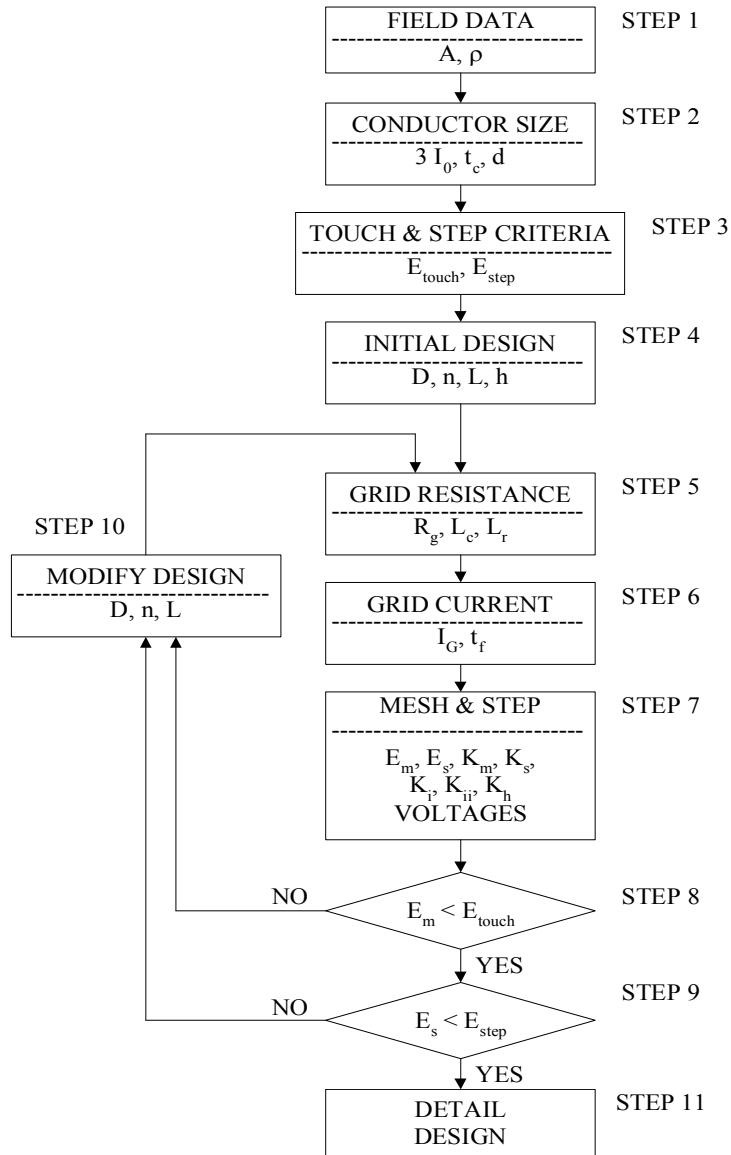


Fig. 3.10 Flowchart of Ground Grid Design

IV. 제안한 접지 그리드 해법

A. 유입전류 분포계산을 위한 제안해법

1. 단순 전력계통에 대한 모델

송전선로를 π -등가회로로 등가화하고, 이 회로에 대하여 기본적으로 키르히호프(Kirchhoff)의 법칙에 기초를 두고 정리할 수 있다. 그림 3.3의 등가회로에서 각각의 송전탑사이를 각각 하나의 폐회로 (i)로 가정하며, 상도체와 지선회로를 하나의 폐회로(0)라고 가정하여 각각의 폐회로에 대한 전압방정식이 다음과 같이 유도된다.

$$\begin{aligned}
 (\text{루프 } n) \quad & -(Z_{gn} - Z_{mn})I_F - R_{n-1}I_{n-1} + (R_{n-1} + Z_{gn} + R_n)I_n = 0 \\
 (\text{루프 } n-1) \quad & -(Z_{gn-1} - Z_{mn-1})I_F - R_{n-2}I_{n-2} + (R_{n-2} + Z_{gn-1} + R_{n-1})I_{n-1} - R_{n-1}I_n = 0 \\
 (\text{루프 } n-2) \quad & -(Z_{gn-2} - Z_{mn-2})I_F - R_{n-3}I_{n-3} + (R_{n-3} + Z_{gn-2} + R_{n-2})I_{n-2} - R_{n-2}I_{n-1} = 0 \\
 & \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \\
 (\text{루프 } 1) \quad & -(Z_{g1} - Z_{m1})I_F - R_0I_0 + (R_0 + Z_{g1} + R_1)I_1 - R_1I_2 = 0 \\
 & \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \\
 (\text{루프 } 0) \quad & \left(\sum_{i=1}^n Z_{ai}\right)I_F + \left(\sum_{i=1}^n Z_{gi}\right)I_F - 2\left(\sum_{i=1}^n Z_{mi}\right)I_F \\
 & - (Z_{g1} - Z_{m1})I_1 - (Z_{g2} - Z_{m2})I_2 - \dots - (Z_{gn} - Z_{mn})I_n = V
 \end{aligned}$$

앞의 식에서 G변전소의 그리드 전류 I_0 ($I_0 = I_1$)의 관계가 있으며, 각 루프의 전류 I_i ($i = 2, 3, \dots, n$)은 총 고장전류 I_F 와 그리드 전류 I_0 의 항으로 표시된다. 따라서 각각의 자기 임피던스 Z_{ai} , Z_{gi} , 상호 임피던스 Z_{mi} , 송전탑각 저항 R_i 및 변전소의 접지저항 Z_T 는 이미 알고 있는 값이고, 총 고장전류 I_F 도 알고 있는 값이다. 그러면, 각 폐회로의 전류가 미지수가 되므로 루프 방정식을 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
& -R_{n-1}I_{n-1} + (R_{n-1} + Z_{gn} + R_n)I_n = (Z_{gn} - Z_{mn})I_F \\
& -R_{n-2}I_{n-2} + (R_{n-2} + Z_{gn-1} + R_{n-1})I_{n-1} - R_{n-1}I_n = (Z_{gn-1} - Z_{mn-1})I_F \\
& -R_{n-3}I_{n-3} + (R_{n-3} + Z_{gn-2} + R_{n-2})I_{n-2} - R_{n-2}I_{n-1} = (Z_{gn-2} - Z_{mn-2})I_F \\
& \quad \dots \dots \dots \\
& -R_{i-1}I_{i-1} + (R_{i-1} + Z_{gi} + R_i)I_i - R_i I_{i+1} = (Z_{gi} - Z_{mi})I_F \tag{4.1} \\
& \quad \dots \dots \dots \\
& (Z_{g1} + R_1)I_1 - R_1 I_2 = (Z_{g1} - Z_{m1})I_F \\
& -(Z_{g1} - Z_{m1})I_1 - (Z_{g2} - Z_{m2})I_2 - \dots - (Z_{gn} - Z_{mn})I_n = V - \left(\sum_{i=1}^n Z_{ai} + \sum_{i=1}^n Z_{gi} - 2 \sum_{i=1}^n Z_{mi} \right) I_F
\end{aligned}$$

2. 일반적인 전력계통에 대한 모델

그림 3.4와 같은 일반적인 송전계통의 고장전류 분배를 위한 식은 다음에 의해서 주어진다. 말단변전소의 총수가 K이고, k 번째 말단변전소의 총 경간수가 n_k 인 경우에 각 루프의 식을 유도하면 다음과 같다.

(루프 n_k)

$$-(Z_{gn}^k - Z_{mn}^k)I_F^k - R_{n-1}^k I_{n-1}^k + (R_{n-1}^k + Z_{gn}^k + R_n^k)I_n^k = 0$$

(루프 $n_k - 1$)

$$-(Z_{gn-1}^k - Z_{mn-1}^k)I_F^k - R_{n-2}^k I_{n-2}^k + (R_{n-2}^k + Z_{gn-1}^k + R_{n-1}^k)I_{n-1}^k - R_{n-1}^k I_n^k = 0$$

(루프 $n_k - 2$)

$$-(Z_{gn-2}^k - Z_{mn-2}^k)I_F^k - R_{n-3}^k I_{n-3}^k + (R_{n-3}^k + Z_{gn-2}^k + R_{n-2}^k)I_{n-2}^k - R_{n-2}^k I_{n-1}^k = 0$$

$\dots \dots \dots$

(루프 i)

$$-(Z_{gi}^k - Z_{mi}^k)I_F^k - R_{i-1}^k I_{i-1}^k + (R_{i-1}^k + Z_{gi}^k + R_i^k)I_i^k - R_i^k I_{i+1}^k = 0$$

.....

(루프 1)

$$-(Z_{g1}^k - Z_{m1}^k)I_F^k - R_0^k I_0^k + (R_0^k + Z_{g1}^k + R_1^k)I_1^k - R_1^k I_2^k = 0$$

(루프 0)

$$\begin{aligned} & (\sum_{i=1}^{n_k} Z_{ai}^k)I_F^k + (\sum_{i=1}^{n_k} Z_{gi}^k)I_F^k - 2(\sum_{i=1}^{n_k} Z_{mi}^k)I_F^k - (Z_{g1}^k - Z_{m1}^k)I_1^k - (Z_{g2}^k - Z_{m2}^k)I_2^k - \dots - (Z_{gn}^k - Z_{mn}^k)I_n^k \\ & = V^k \end{aligned}$$

위의 식에서 G변전소의 그리드 전류 I_0^k ($I_0^k = I_1^k$)의 관계가 있으며, 각 루프의 전류 I_i^k ($i = 2, 3, \dots, n_k$) 은 총 고장전류 I_F^k 와 그리드 전류 I_0^k 의 향으로 표시된다. 단순한 전력계통에서와 마찬가지로 각 루프의 전류가 미지수가 되므로 루프 방정식을 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & -R_{n-1}^k I_{n-1}^k + (R_{n-1}^k + Z_{gn}^k + R_n^k)I_n^k = (Z_{gn}^k - Z_{mn}^k)I_F^k \\ & -R_{n-2}^k I_{n-2}^k + (R_{n-2}^k + Z_{gn-1}^k + R_{n-1}^k)I_{n-1}^k - R_{n-1}^k I_n^k = (Z_{gn-1}^k - Z_{mn-1}^k)I_F^k \\ & -R_{n-3}^k I_{n-3}^k + (R_{n-3}^k + Z_{gn-2}^k + R_{n-2}^k)I_{n-2}^k - R_{n-2}^k I_{n-1}^k = (Z_{gn-2}^k - Z_{mn-2}^k)I_F^k \\ & \dots \dots \dots \\ & -R_{i-1}^k I_{i-1}^k + (R_{i-1}^k + Z_{gi}^k + R_i^k)I_i^k - R_i^k I_{i+1}^k = (Z_{gi}^k - Z_{mi}^k)I_F^k \tag{4.2} \\ & \dots \dots \dots \\ & (Z_{g1}^k + R_1^k)I_1^k - R_1^k I_2^k = (Z_{g1}^k - Z_{m1}^k)I_F^k \\ & -(Z_{g1}^k - Z_{m1}^k)I_1^k - (Z_{g2}^k - Z_{m2}^k)I_2^k - \dots - (Z_{gn}^k - Z_{mn}^k)I_n^k = \\ & \qquad \qquad \qquad V^k - (\sum_{i=1}^{n_k} Z_{ai}^k + \sum_{i=1}^{n_k} Z_{gi}^k - 2\sum_{i=1}^{n_k} Z_{mi}^k)I_F^k \end{aligned}$$

일반적인 전력계통에서 고장이 발생한 변전소 접지그리드에 유입되는 총 고장전류는 다음과 같이 정의되며,

$$\begin{aligned}
 I_F &= I_F^1 + I_F^2 + \dots + I_F^K \\
 &= \sum_{i=1}^K I_F^i
 \end{aligned}
 \tag{4.3}$$

따라서 각 말단변전소와 구성되는 각각의 회로가 선형회로의 성질을 가지고 있다면, 복잡한 K개의 식 (4.2)를 한번에 풀 것이 아니라, 회로의 해법 중에서 중첩의 원리 (Principle of Superposition)을 이용하여 식 (4.2)를 K번 풀어서 각각의 접지계통에 흐르는 전류를 합하면 계산시간의 단축은 물론 쉽게 고장 변전소의 접지계통에 흐르는 총 전류를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 I_0 &= I_1^1 + I_1^2 + \dots + I_1^K \\
 &= \sum_{i=1}^K I_1^i
 \end{aligned}
 \tag{4.4}$$

3. 제안하는 해법

위의 식 (4.2)를 미지수와 기지수로 분리하여 다시 정리하면 다음의 선형 행렬방정식이 된다.

$$[A][x] = [C]
 \tag{4.5}$$

여기서, A : 계수 행렬, $(n_k + 1) \times n_k$

x : 미지수 벡터, $n_k \times 1$

C : 기지수 벡터, $(n_k + 1) \times 1$

위 식에서 미지수 벡터 x 를 구하기 위하여

$$[A]^T[A][x] = [A]^T[C] \quad (4.6)$$

로 정리할 수 있고, 다시

$$[x] = ([A]^T[A])^{-1}[A]^T[C] \quad (4.7)$$

와 같이 미지수 벡터 x 를 구하면 된다. 이렇게 구한 미지수는 각각의 폐회로에 흐르는 전류를 나타내며, 관심의 대상 변전소인 G변전소의 그리드 전류를 구하면 된다.

B. 접지도체의 전류분포 계산

1. 제안된 계산법

접지그리드에서 접하게 되는 접지그리드가 상호 연결된 복수개의 접지그리드에서 리턴전극에 의한 상호간의 근접효과 영향을 고려하는 등의 보다 복잡한 해석문제를 다룰 때 이에 적합한 최적 해석기법을 선정이 중요하게 된다.

그림 3.4와 같이 2층 구조의 대지에 매설되어 있는 도체 $j(j=1, \dots, n)$ 가 n 개로 구성된 접지그리드라고 하면, 도체 j 는 직선도체이고 길이는 접지그리드의 전체 길이에 비해 대단히 작다 ($l_j \ll L$). 각각의 도체 j 의 중심좌표 (x_j, y_j, z_j) 점에서 도체 i 에 의해 유도되는 전위를 V , 전류밀도 분포계수 S_i 를 도입하여 그리드 도체의 전압강하를 무시하면 다음과 같은 식이 성립된다.

$$\begin{aligned} S_1 V_{11} + S_2 V_{21} + \dots + S_1 V_{i1} + \dots & S_n V_{n1} = V \\ S_1 V_{12} + S_2 V_{22} + \dots + S_1 V_{i2} + \dots & S_n V_{n2} = V \\ \vdots & \vdots \\ S_1 V_{1j} + S_2 V_{2j} + \dots + S_1 V_{ij} + \dots & S_n V_{nj} = V \\ \vdots & \vdots \\ S_1 V_{1n} + S_2 V_{2n} + \dots + S_1 V_{in} + \dots & S_n V_{nn} = V \end{aligned} \quad (4.8)$$

여기서, V : 접지전극의 전위 상승값

식 (4.8)은 n 개의 연립방정식으로 $(n+1)$ 개의 미지수 (V : 미지수)를 가지고 있으며, 다음과 같은 행렬방정식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} [V_{ij}][S_j] &= V[1] \\ [S_j] &= V[V_{ij}]^{-1}[1] \end{aligned} \quad (4.9)$$

이 식의 해는 $(V-1)$ 로 가정하면 기지의 경계조건 (주입전류를 알면 적당한 비례계수를 곱한다)에 따라 S_j 를 조정하여 구할 수 있다.

C. 지표면 전위분포의 해석적 기법

접지도체의 해석을 위한 복합적인 대지구조에서 그린함수의 적용은 매우 어려운 문제이다. 따라서 접지도체의 해석을 위한 방법으로 유한요소법(Finite Element Method)이 제안되었다.

접지도체의 전류-장의 해를 V 로 표현하고 경계조건 Q 에 의하여 표현이 된다면, 장-영역(Field Domain)에서의 전위분포는 $\varphi(x, y, z)$ 로 표현된다. FEM을 이용하여 이 문제를 해결하려면 먼저 직각좌표에서 접지도체를 포함하는 대지구조를 장-영역에서 분할한다. 4면체 단위는 대지 특성 영역 V 와 경계조건 Q 를 사용하여 삼각형으로 표현된다. 그림 4.1은 4면체 단위의 기하학적 구조를 보인 것이다.

4면체 단위의 인덱스 번호를 e 라고 하고, 4면체 단위의 총 번호를 M 이라고 한다면 $e = 1, 2, \dots, M$ 이다. 각각의 e 단위체의 꼭지점은 노드라고 하고, 1, 2, 3 및 4로 표현된다.

직각 좌표계에서 최소 전위에너지의 원리에 의한 장-영역 V 를 분할하고, 단위 e 에서 변화분은 다음과 같다.

$$F(\varphi^e) = - \int_V \gamma^e \left\{ \left(\frac{\partial \varphi^e}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \varphi^e}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial \varphi^e}{\partial z} \right)^2 + \varphi^e J_v \right\} dV - 2 \int_{S_2} \varphi^e J_{s2} dS \quad (4.10)$$

여기서, S_2 : 2번 형의 경계면

J_{S2} : 주어진 면에서의 전류 밀도

J_V : 몸체 전류 밀도

단위 e 에서의 장-분포특성 $\varphi(x, y, z)$ 를 다항식의 $\varphi^e(x, y, z)$ 로 표현된다.

$$\varphi^e(x, y, z) = N_1^e \varphi_1^2 + N_2^e \varphi_2^2 + N_3^e \varphi_3^2 + N_4^e \varphi_4^2 \quad (4.11)$$

식 (4.11)에서 N_i^e ($i = 1, 2, 3, 4$) 는 4면체의 상대함수로서

$$N_i^e(x, y, z) = \frac{1}{6\Delta} (a_i^e + b_i^e x + c_i^e y + d_i^e z), \quad (i = 1, 2, 3, 4) \quad (4.12)$$

여기서, Δ : 단위 e 의 부피

$$\Delta = \frac{1}{6} \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ x_1^e & x_2^e & x_3^e & x_4^e \\ y_1^e & y_2^e & y_3^e & y_4^e \\ z_1^e & z_2^e & z_3^e & z_4^e \end{vmatrix} \quad (4.13)$$

$a_i^e, b_i^e, c_i^e, d_i^e$ ($i = 1, 2, 3, 4$) : 노드 조건으로부터 결정되는 계수

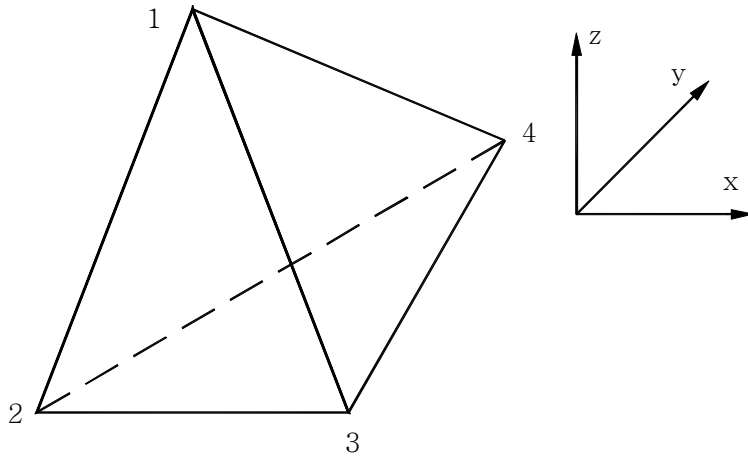


Fig. 4.1 Geometrical Structure of a Tetrahedron

4면체의 장-분포 $[\varphi^e(x, y, z)]$ 의 근사식은

$$\varphi^e(x, y, z) = [N_1^e, N_2^e, N_3^e, N_4^e] \begin{Bmatrix} \varphi_1^e \\ \varphi_2^e \\ \varphi_3^e \\ \varphi_4^e \end{Bmatrix} \quad (4.14)$$

와 같이 표현되며, 보간 함수 $\varphi^e(x, y, z)$ 를 도입하여 식 (4.10)을 정리하면 다음 식과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial F(\varphi^e)}{\partial \varphi_i^e} &= \sum_{j=1}^4 \int_{V^e} \gamma^e \left\{ \frac{\partial N_i^e}{\partial x} \frac{\partial N_j^e}{\partial x} + \frac{\partial N_i^e}{\partial y} \frac{\partial N_j^e}{\partial y} + \frac{\partial N_i^e}{\partial z} \frac{\partial N_j^e}{\partial z} + N_j^e J_\nu \right\} \varphi_j^e dV \\ &- 2 \int_{S_2^e} N_i^e J_{s2} dS = 0 \end{aligned} \quad (4.15)$$

식 (4.15)는 행렬로 표현하면

$$\frac{\partial F(\varphi^e)}{\partial \varphi_i^e} = K^e \varphi^e - f^e = 0 \quad (4.16)$$

이 되고, 이 점에서 단위 e 에서 장-분포 특성은 대수방정식으로 정리된다.

$$K^e \varphi^e = f^e \quad (4.17)$$

$$\text{여기서, } K^e = \begin{bmatrix} K_{11}^e & K_{12}^e & K_{13}^e & K_{14}^e \\ K_{21}^e & K_{22}^e & K_{23}^e & K_{24}^e \\ K_{31}^e & K_{32}^e & K_{33}^e & K_{34}^e \\ K_{41}^e & K_{42}^e & K_{43}^e & K_{44}^e \end{bmatrix}, f^e = \begin{bmatrix} f_1^e \\ f_2^e \\ f_3^e \\ f_4^e \end{bmatrix}, \varphi^e = \begin{bmatrix} \varphi_1^e \\ \varphi_2^e \\ \varphi_3^e \\ \varphi_4^e \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

모든 장-영역 V 에 대한 대수방정식을 정리하면 다음과 같다.

$$K\varphi = f \tag{4.19}$$

여기서, 강성 행렬 $K = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} & \cdots & K_{1n} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} & \cdots & K_{2n} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} & \cdots & K_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ K_{n1} & K_{n2} & K_{n3} & \cdots & K_{nn} \end{bmatrix}$,

작용 벡터 $f = [f_1, f_2, f_3, \dots, f_n]^T$,

거동 벡터 $\varphi = [\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \dots, \varphi_n]^T$

식 (4.19)를 이용하여 지표면의 전위분포를 계산하면 된다.

D. 제안하는 접지시스템 설계

설계기술자는 해석적인 방법을 이용하여 예비적인 접지시스템을 수립하여야 한다. 이것은 보통 예비적인 계산과 경험에 의하여 얻어진다. 이러한 초기 계산의 목적은 가능한 한 최적으로 위험전압으로부터 안전한 전극을 얻기 위한 것이다. 일단 이러한 안전조건을 만족하는 전극의 결과는 컴퓨터프로그램에 의해서 얻어질 것이다. 그림 4.2는 접지시스템 설계와 시공에 대한 흐름도를 보인 것이다.

접지시스템의 설계를 위한 완전한 단계적인 과정의 순서는 다음과 같다.

- 1) 접지 대상지역에 대한 대지 저항률을 측정한다.
- 2) 측정으로부터 얻어진 자료로 대지 파라미터를 결정한다.
- 3) 접지 시스템의 골격을 수립하기 위해 필요한 예비적인 계산과 접지전극의 크기를 구한다.
- 4) 적당한 프로그램을 사용하여 고장전류의 배분을 결정하여 접지전극에 흐르는 고장전류를 결정한다.
- 5) 정확한 접지도체의 구성을 고려한 대지 전위상승을 계산하여 접지저항의 크기를 결정한다.
- 6) 고장전류의 접지전류를 기초로 하여 다양한 위치 P에서의 대지 지표면 전위 V_p 를 적당한 프로그램을 사용하여 계산한다.
 - a) 접지 시스템 위 어떤 위치에서의 최저값 V_p 를 선택한다.
 - b) 전극의 경계에서 1[m] 떨어진 두 점 사이에서 전위의 최대 변화분을 선택한다.
$$V_{smax} = V_m - V_n$$
- 7) 접지시스템의 안전에 대한 적정성을 검사한다.
 - a) 대지 전위상승 V_e 는 설계한계 5 [kV]로 결정한다.
 - b) 접촉전압 V_t 는 최대 안전 허용값 E_t 를 초과하지 않아야 한다.
 - c) 보폭전압 V_s 는 최대 안전 허용값 E_s 를 초과하지 않아야 한다.
- 8) 대지전위상승, 접촉전압 및 보폭전압 중에서 하나 또는 그 이상이 만족되지 않는다면, 기본설계를 최적화하기 위해 필요한 3)단계에서 다시 계산을 반복하여 만족할 때까지 계산한다.

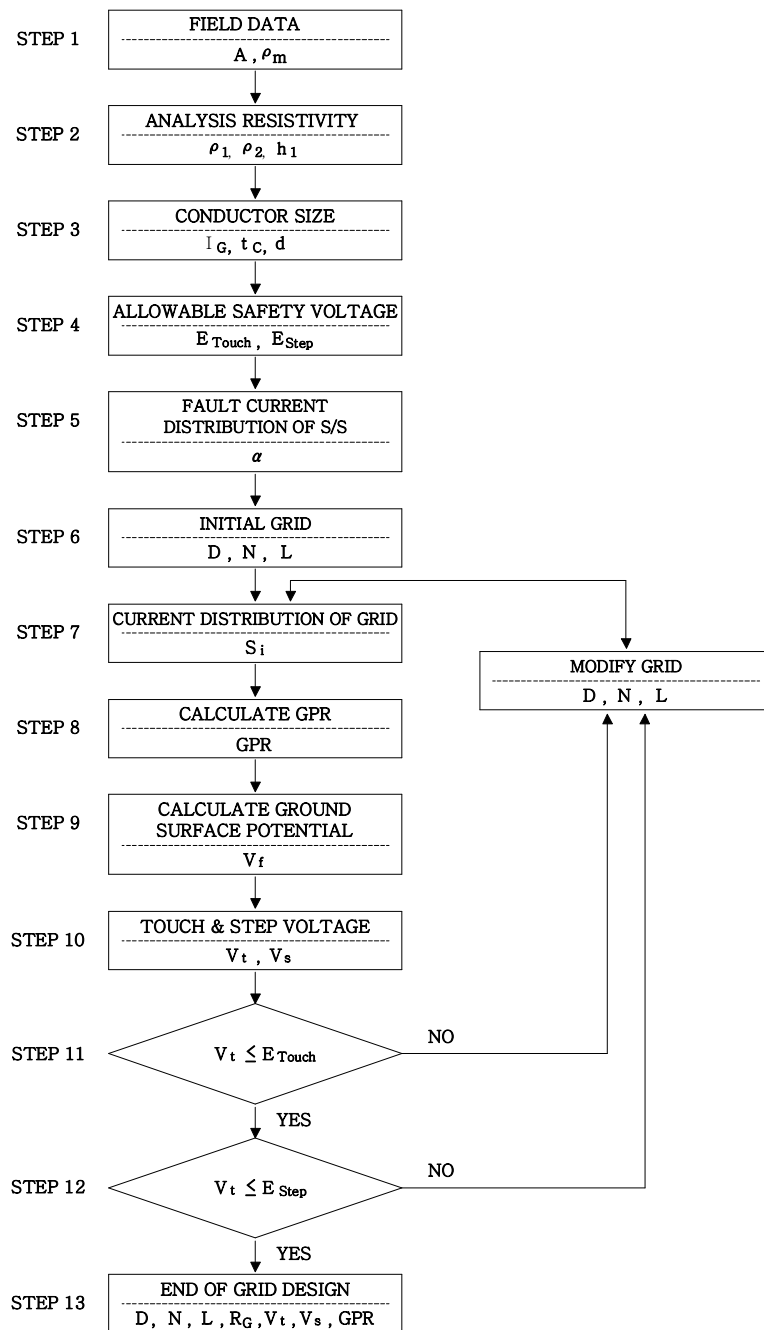


Fig. 4.2 Flowchart of Proposed Method

V. 시뮬레이션 결과 및 검토

전기설비에서 접지시스템에서 고장전류에 의한 전위상승은 인체의 안전이나 설비의 안정적 운전에 영향을 미치는 매우 중요한 값이다. 따라서 접지전극의 설계 및 해석을 위한 지표면 전위상승을 계산하는 과정은 필수적인 것이며, 이 과정에서 접지전극에 유입되는 고장전류의 크기, 접지그리드의 고장전류 분포 및 접지전극의 저항값도 중요한 요소이다.

이러한 중요한 요소인 접지전극에 유입되는 고장전류의 분류계수를 결정하기 위하여 송전계통에 대한 모델링을 통한 계산 알고리즘, 접지그리드의 고장전류 분포를 계산하기 위한 알고리즘, 접지그리드의 지표면 전위상승 값을 계산하는 문제에 대하여 일반적으로 대지 저항률, 특히 지층의 구조가 매우 중요한 변수임에도 불구하고 실제의 지층구조가 아닌 등가화된 단일 지층구조의 파라미터를 사용하고 있으며, 고장전류의 분류계수나 접지그리드의 고장전류 분포 등에 대한 계산이 정확하게 이루어지지 않고 있어서 접지의 그리드 설계 및 해석이 이루어지는 관계로 실제의 현상이 제대로 파악되지 않는 문제점이 있는 것이다.

따라서 본 논문에서는 다중의 송전 계통망이 연결된 접지그리드의 설계를 위한 고장전류의 분류계산을 위한 알고리즘, 접지그리드의 고장전류 분포를 계산하기 위한 알고리즘 및 접지그리드의 전위상승 값을 계산하기 위한 알고리즘 등을 제안하였다.

다층구조의 대지 저항률에서 대지 저항률의 변화와 표토층의 재료와 두께의 변화에 대한 허용 안전전압의 변화특성, 철탑 및 터미널 변전소의 접지저항 변화 등을 통한 다중의 송전 계통망에 연결된 접지그리드의 유입 고장전류의 분류계수의 변화와 접지그리드의 고장전류 분포, 다층구조 대지모델에서의 접지전극에 대한 전위해석을 위한 제안된 알고리즘을 적용하여 접지그리드 설계 및 해석에 대하여 사례연구를 통하여 검증하였다.

A. 허용 안전전압의 계산

1. 등가 2층 대지구조 모델

대지구조 변화에 대한 인체의 허용 안전전압을 보다 정확히 계산하기 위하여 대지구조 모델을 그림 5.1과 같은 수평 2층 모델을 적용하였다. 수평 2층 대지구조모델에 대한 경우의 수는 표 5.1과 같다. 상층의 대지저항률(ρ_1)은 50~2,000 [Ω -m], 반사계수(K)는 -0.7~0.7 및 상층의 두께(h)는 0.5~20 [m]를 가정하였다. 그림 5.2는 반사계수 K의 변화에 대한 하층의 대지저항률 변화를 보인 것이다.

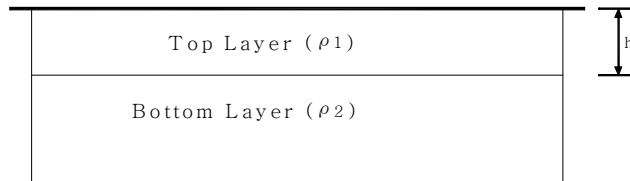


Fig. 5.1 2-Layered Soil Model

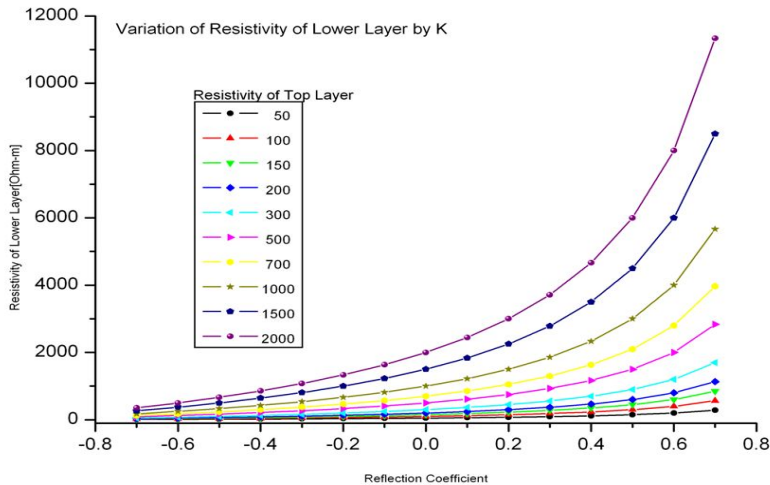


Fig. 5.2 Variation of Top-Layer Soil Resistivity

Table 5.1 Lower-Layered Earth Resistivity according to Soil Structure Model

ρ_1 반사 계수(K)	50	100	150	200	300	500	700	1000	1500	2000
-0.7	8.8	17.6	26.5	35.3	52.9	88.2	123.5	176.5	264.7	352.9
-0.6	12.5	25	37.5	50	75	125	175	250	375	500
-0.5	16.7	33.3	50	66.7	100	166.7	233.3	333.3	500	666.7
-0.4	21.4	42.9	64.3	85.7	128.6	214.3	300	428.6	642.9	857.1
-0.3	26.9	53.8	80.8	107.7	161.5	269.2	376.9	538.5	807.7	1076.9
-0.2	33.3	66.7	100	133.3	200	333.3	466.7	666.7	1000	1333.3
-0.1	40.9	81.8	122.7	163.6	245.5	409.1	572.7	818.2	1227.3	1636.4
0.0	50	100	150	200	300	500	700	1000	1500	2000
0.1	61.1	122.2	183.3	244.4	366.7	611.1	855.6	1222.2	1833.3	2444.4
0.2	75	150	225	300	450	750	1050	1500	2250	3000
0.3	92.9	185.7	278.6	371.4	557.1	928.6	1300	1857.1	2785.7	3714.3
0.4	116.7	233.3	350	466.7	700	1166.7	1633.3	2333.3	3500	4666.7
0.5	150	300	450	600	900	1500	2100	3000	4500	6000
0.6	200	400	600	800	1200	2000	2800	4000	6000	8000
0.7	283.3	566.7	850	1133.3	1700	2833.3	3966.7	5666.7	8500	11333.3

2. 표토층의 재료 및 두께

변전소 안에서 인체가 위치하는 지점의 넓은 면적을 자갈이나 아스팔트와 같이 저항률이 높은 재료를 일정한 두께의 층으로 덮는 경우에는 신발과 대지와와의 접촉저항이 증가한다. 표토층의 두께를 0.08~0.15[m]사이에서 0.1[m] 단위로 변화시키면서 인체의 허용 안전전압을 계산하였으며, 또한, 표토층의 재료에 대한 저항률도 1000, 1500, 2500, 3000, 5000, 6000, 8000 및 10000[Ω·m]로 변화시키면서 인체의 허용 안전전압을 계산하였다. 수평 2층 구조 모델로 가정한 변전소의 설치장소에 대하여 상층의 대지저항률을 변화시키면서 반사계수 K 및 상층의 두께 변화에 대한 인체의 허용 안전전압을 계산하여 그 특성을 비교하였다.

3. 표토층의 두께별 허용 안전전압

상층의 대지저항률, 반사계수 및 표토층의 저항률을 일정하게 하고 표토층의 두께만을 변화시키는 경우에 대한(상층의 대지 저항률이 $100[\Omega\text{-m}]$, 반사계수 $K=0.0$, 표토층의 저항률 $3000[\Omega\text{-m}]$ 로 고정시킨 경우) 허용 안전전압의 변화를 보인 것이 그림 5.3이다.

그림 5.3에서 보는 바와 같이 표토층의 두께가 두꺼워질 수록 허용 안전전압의 크기가 증가하는 것을 확인할 수 있다.

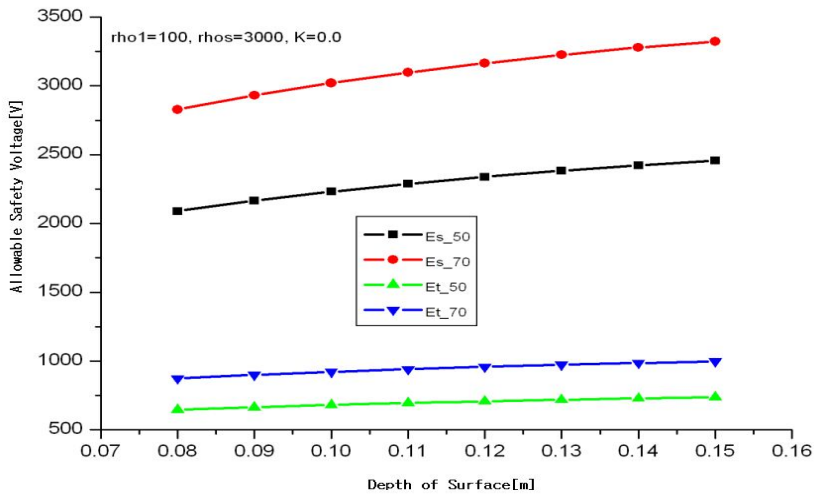


Fig. 5.3 Allowable Safety Voltage by Surface Soil Depth

4. 표토층의 재료별 허용 안전전압

표토층의 재료를 저항률별로 변화시키면서 허용 안전전압의 변화를 계산하였다. 그림 5.4는 상층의 대지저항률이 $100[\Omega\text{-m}]$ 이고, 반사계수 $K=0.0$, 표토층의 두께를 $0.1[\text{m}]$ 로 고정시킨 경우에 대한 표토층의 재료별 허용 안전전압의 변화를 보인 것이다.

그림 5.4에서 보는 바와 같이 표토층의 재료별 허용 안전전압 특성은 재료의 저항률이

증가할수록 선형적으로 변화하는 것을 확인할 수 있다.

그림 5.5은 상층의 대지 저항률이 2000[Ω-m] 이고, 반사계수 K=0.0, 표토층의 두께를 0.1[m]로 고정시킨 경우에 대한 표토층의 재료별 허용 안전전압의 변화를 보인 것이다.

그림 5.5에서도 표토층의 재료별 허용 안전전압의 변화 특성은 재료의 저항률이 증가할수록 선형의 특성으로 변화하는 것을 확인할 수 있으며, 표토층의 저항률이 2000[Ω-m]인 경우에 허용 접촉전압의 변화가 다른 경우와 다르게 나타나고 있음을 확인할 수 있다.

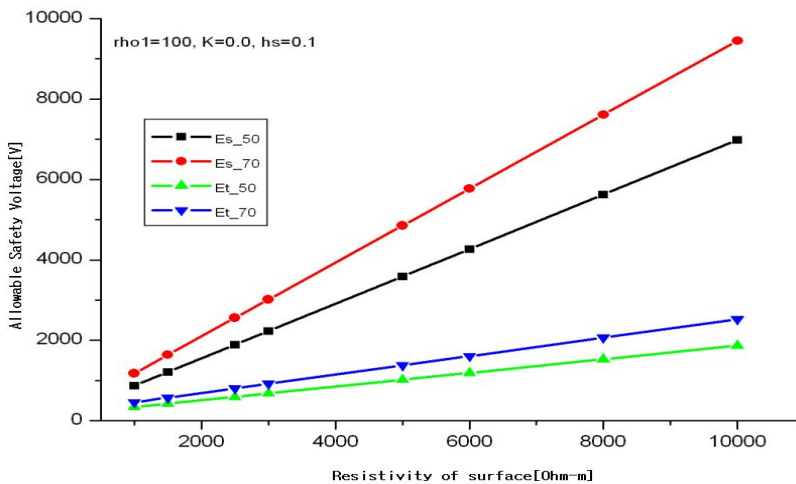


Fig. 5.4 Allowable Safety Voltage by Surface Soil Material

5. 반사계수의 변화별 허용 안전전압

상층의 대지 저항률, 상층의 깊이 및 표토층의 저항률을 고정시키고 반사계수 K를 -0.7 부터 0.7까지 변화시키면서 허용 안전전압의 변화 특성을 계산하였다. 그림 5.6은 상층의 대지 저항률이 300[Ω-m] 이고, 상층의 깊이는 1.0[m], 표토층의 두께와 저항률은 각각 0.1[m]과 3000[Ω-m]으로 고정시킨 경우에 대한 허용 안전전압의 변화를 보인 것이다.

그림 5.6에서 보는 바와 같이 반사계수가 커지면서 상층의 대지 저항률도 커져서 표토층의 역할을 하게 되면서 허용 안전전압의 변화가 크게 나타나고 있음을 확인할 수 있다.

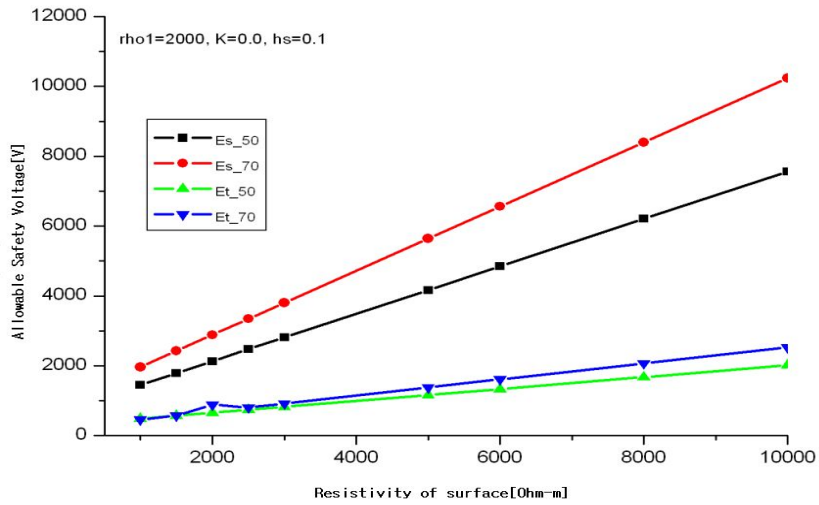


Fig. 5.5 Allowable Safety Voltage by Surface Soil Material

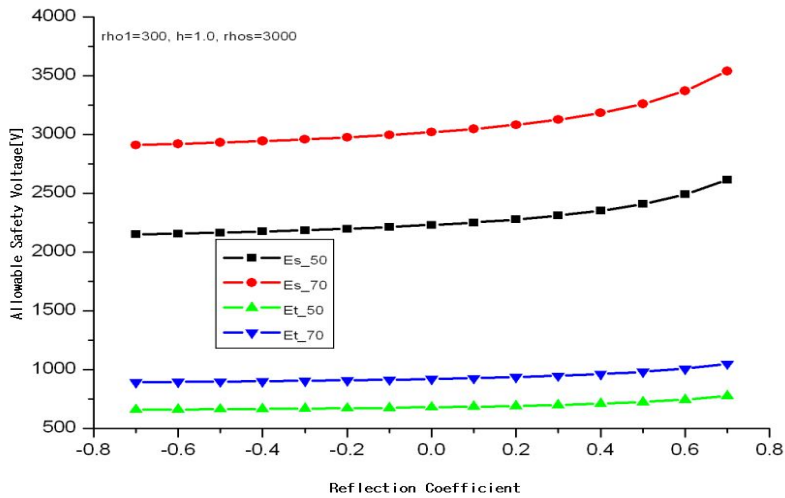


Fig. 5.6 Allowable Safety Voltage by Reflection Coefficient

6. 상층의 깊이 변화별 허용 안전전압

상층의 대지 저항률, 표토층의 두께 및 저항률을 고정시키고 상층의 깊이를 변화시키면서 반사계수 $K=0.5$ 와 -0.5 인 경우에 대하여 허용 안전전압의 변화특성을 계산하였다.

그림 5.7은 상층의 대지 저항률 $300[\Omega\text{-m}]$, 표토층 두께 $0.1[\text{m}]$, 표토층 저항률 $3000[\Omega\text{-m}]$ 인 경우에 허용 보폭전압의 변화를 보인 것이다.

그림 5.7에서 보는 바와 같이 상층의 깊이 변화에 대하여 반사계수가 -0.5 인 경우에는 허용 보폭전압의 변화가 적게 나타나고 있으나, 반사계수가 0.5 인 경우에는 허용 보폭전압의 변화가 크게 나타나고 있다. 이러한 현상은 하층의 대지 저항률이 상층의 대지 저항률보다 큰 상태에서 상층의 깊이 변화에 따라 허용 보폭전압이 증가한다는 점을 확인할 수 있다.

그림 5.8은 상층의 대지 저항률 $300[\Omega\text{-m}]$, 표토층 두께 $0.1[\text{m}]$, 표토층 저항률 $3000[\Omega\text{-m}]$ 인 경우에 허용 접촉전압의 변화를 보인 것이다.

그림 5.8에서도 보는 바와 같이 상층의 깊이 변화에 대하여 반사계수가 -0.5 인 경우에는 허용 접촉전압의 변화가 적게 나타나고 있으나, 반사계수가 0.5 인 경우에는 허용 접촉전압의 변화가 크게 나타나고 있음을 확인할 수 있다.

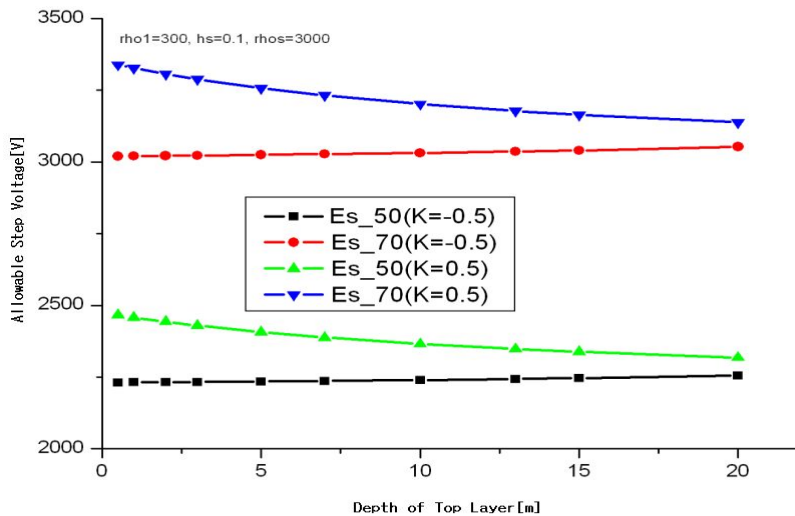


Fig. 5.7 Allowable Step Voltage by Top-Layer Depth

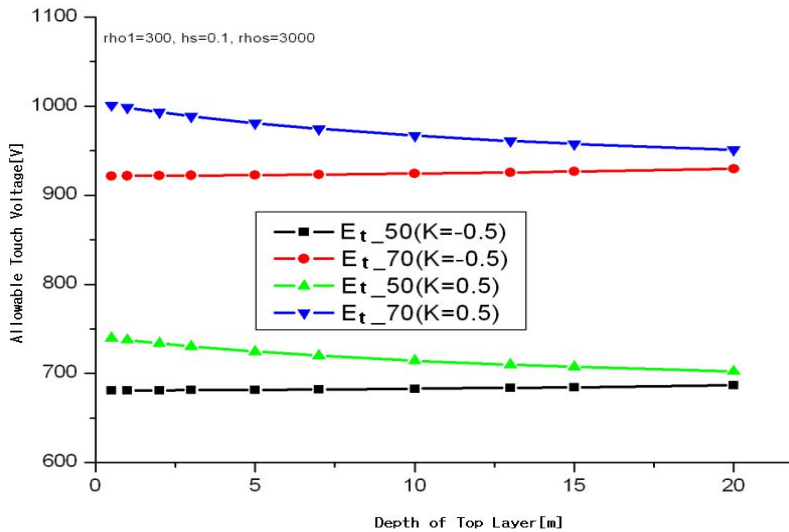


Fig. 5.8 Allowable Touch Voltage by Top-Layer Depth

7. 검토 결과

본 논문에서는 변전소 그리드 접지전극 설계의 기준으로 사용되고 있는 IEEE Std. 80-2000을 기본으로 변전소 설계대상 설치장소의 지층구조에 따라 위험전압의 한계 값 변화에 대하여 검토한 결과,

- 가. 표토층의 두께가 두꺼워질 수록 허용 안전전압(보폭 및 접촉전압)의 크기가 증가한다.
- 나. 표토층의 재료별 특성에서 저항률이 높을 수록 허용 안전전압의 크기가 선형적으로 증가한다. 다만, 상층의 대지 저항률이 표토층 재료의 저항률과 같을 경우에는 접촉전압의 변화가 다르게 나타난다.
- 다. 반사계수의 변화별 허용 안전전압은 반사계수가 증가방향으로 커질 수록 변화하는 정도가 크게 나타난다.
- 라. 상층의 깊이 변화별 허용 안전전압의 변화는 반사계수가 감소인 경우에는 변화가 매우 작게 나타나지만, 반사계수가 증가인 경우에는 크게 나타나고 있음을 확인하였다.

B. 유입전류 분포계산

제안한 고장전류의 변전소 접지계통 유입전류를 계산하기 위한 알고리즘의 효용성을 입증하기 위하여 그림 5.9의 예제 시스템에 대하여 사례연구를 수행하였다. 이 예제 시스템은 4개의 말단 변전소를 가지며, 각 말단 변전소로의 고장전류는 표 5.2에 정리하였다. 또한, 사례 대상 변전소에 대한 접지저항, 송전선로의 길이, 회선수, 첩탑에 관한 자료 등을 표 5.3에 정리하였다.

표 5.3에서 보는 바와 같이 고장이 발생한 변전소에서 각 말단 변전소까지의 거리는 31, 40, 38 및 35 [km]로서, 각 송전선로의 송전탑수는 각각 93, 120, 100 및 110기가 설치된다.

Table 5.2 Fault Current of the Substation

터미널 S/S	3상 단락 고장전류 [A]	1선 지락 고장전류 [A]
Ter 1	1125-j7782	998-j6302
Ter 2	606-j2019	582-j1776
Ter 3	695-j3515	426-j2699
Ter 4	414-j1934	284-j1413
대상변전소합계	2842-j15250(15.5 kA)	2292-j12190(12.4 kA)

Table 5.3 Data about the Substation

터미널 명	변전소 접지저항	송전선로 길이	회선수	첩탑수	첩탑저항
Main S/S	5.0[Ω]	-			
Ter. 1	5.0[Ω]	31[km]	2	93	40[Ω]
Ter. 2	5.0[Ω]	40[km]	2	120	40[Ω]
Ter. 3	2.0[Ω]	38[km]	2	100	40[Ω]
Ter. 4	2.0[Ω]	35[km]	2	110	40[Ω]

1. 예제시스템에 대한 사례연구

고장전류의 분류를 계산하기 위하여 개발한 프로그램을 이용하여 예제시스템에 대하여 1선 지락고장을 상정하여 고장전류의 분포를 계산한 결과, 총 고장전류의 크기가 12403 [A]인 것에 대하여 4768 [A]가 고장이 발생한 사례대상 변전소의 접지망으로 흐르고, 약 7655 [A] 정도가 가공지선을 통하여 흐르는 것으로 결과가 나와서 총 고장전류에 대한 접지망 유입전류의 비가 약 38.4 [%]정도로서 사례대상 변전소의 고장전류 분배계수는 0.38이라는 것을 의미한다.

그림 5.10에는 본 사례연구에서 사용된 예제시스템의 송전철탑 모양과 규격을 보여 주고 있으며, 각 철탑의 접지저항은 각각 40 [Ω]으로 가정하였다.

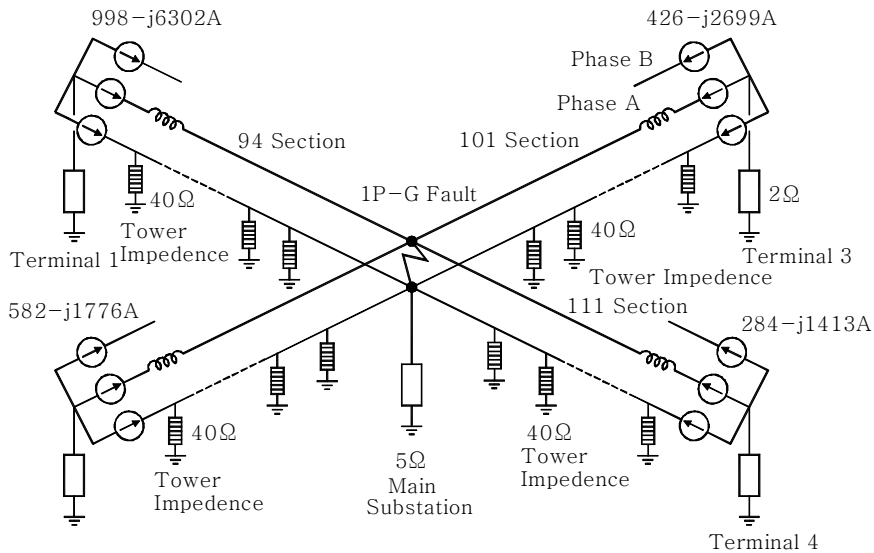


Fig. 5.9 Sample Power System

철탑의 형태상 분류해 보면 사각, 방형, 문형, 우두형, 회전형, MC 형 철탑들이 있는데 이중 그림 5.10에 나온 송전철탑은 사각철탑으로 이는 전선로 방향과 직각 방향의 강도가 같게끔 단면을 정방향으로 설계한 구조의 것으로서 가장 일반적인 것이며 2회선용으로 주로 이 형태의 철탑이 사용하고 있어 예제 시스템 송전철탑으로 활용하였다.

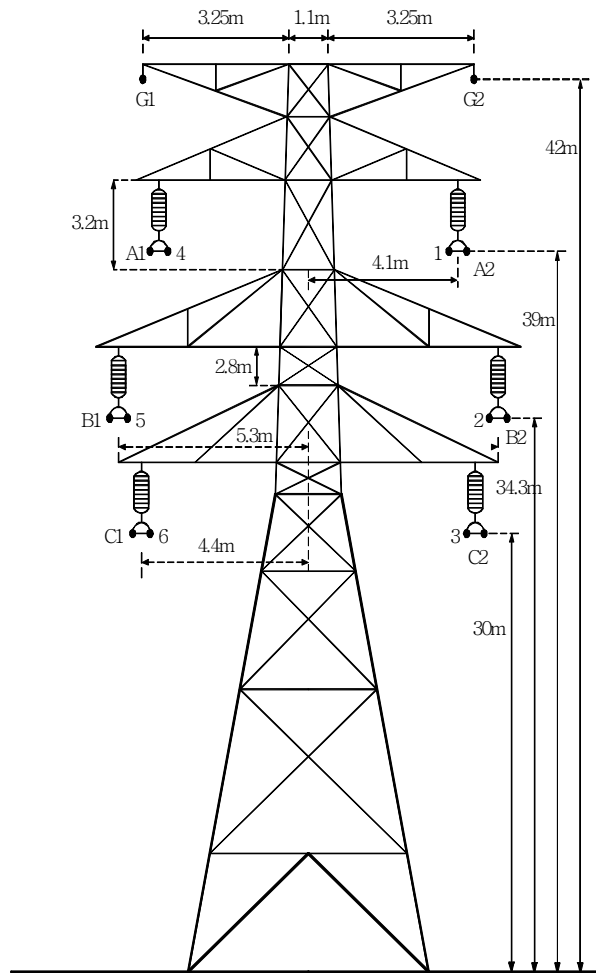


Fig. 5.10 T/L Tower

2. 고장전류의 분류계수에 대한 감도 분석

예제 시스템의 변전소에 대하여 고장전류의 접지망 유입전류의 분류계수에 대한 감도(Sensitivity) 분석을 위하여 각 변전소의 접지저항 크기와 철탑의 접지저항 크기를 변화시키면서 사례연구를 수행하였으며, 이 결과를 종합적으로 정리하여 표 5.4에는 사례 대상변전소의 접지저항은 5.0 [Ω]으로, 철탑의 접지저항은 15.0 [Ω]으로 고정시키고 말단 변전소의 접지저항만을 0.1~20.0[Ω]으로 변화시킨 경우에 대한 분류계수의 변화를 정리하였으며, 그림 5.11에 나타냈다. 표 5.4와 그림 5.11에서 볼 수 있듯이 말단 변전소의 접지저항 변화에 대해서는 대상 변전소에 대한 고장전류의 분류계수가 0.1355에서 0.1570으로 변화하여 크게 변하지 않음을 알 수 있다.

표 5.5에는 말단 변전소와 철탑의 접지저항은 일정하게 유지하면서 설계대상 변전소의 접지저항을 0.1~10.0[Ω]으로 변화시키는 경우에 대한 고장전류 분류계수의 변화를 정리하였으며, 그림 5.12는 분류계수의 변화를 보인 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 대상 변전소의 접지저항 변화에 대하여 분류계수가 0.9006~0.0760까지 매우 큰 변화가 있음을 알 수 있다.

Table 5.4 Change of End-Substation Ground Resistance

터미널 명	구분	터미널 변전소 접지저항 변화					비 고
Main S/S	접지저항	5.0[Ω]					철탑접지 저항 : 15[Ω]
Ter. 1	접지저항	0.1	1.0	5.0	10.0	20.0	
Ter. 2	접지저항	0.1	1.0	5.0	10.0	20.0	
Ter. 3	접지저항	0.1	1.0	5.0	10.0	20.0	
Ter. 4	접지저항	0.1	1.0	5.0	10.0	20.0	
결과	고장전류	12423.1 [A]					1선지락
	GPR	8414.0	8985.0	9538.0	9572.5	9753.5	
	유입전류	1682.8	1797.0	1907.6	1914.3	1950.7	
	분류계수	0.1355	0.1447	0.1536	0.1541	0.1570	

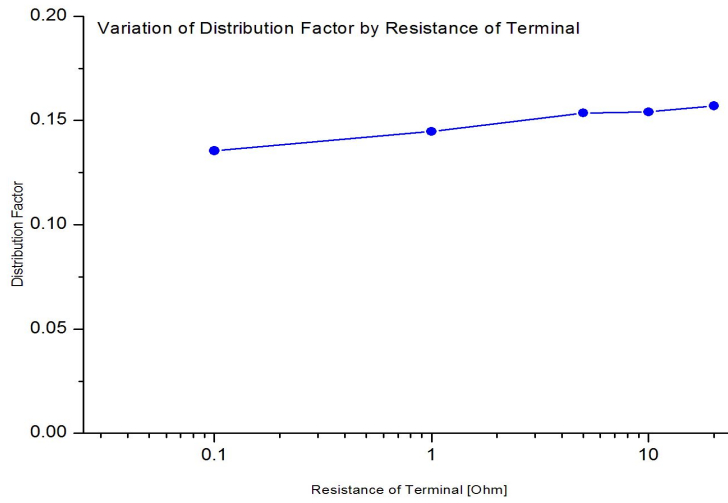


Fig. 5.11 Distribution Factor vs Terminal S/S Resistance

Table 5.5 Change of Sample Substation Ground Resistance

터미널명	구분	예제 대상 변전소 접지저항 변화					비 고
Main S/S	접지저항	0.1	0.5	1.0	5.0	10.0	철탑접지 저항 : 15[Ω]
Ter. 1	접지저항	1.0					
Ter. 2	접지저항	1.0					
Ter. 3	접지저항	1.0					
Ter. 4	접지저항	1.0					
결과	고장전류	12423.1 [A]					1선지락
	GPR	1118.8	4138.5	6058.6	8985.0	9441.0	
	유입전류	11187.6	8277.0	6058.6	1797.0	944.1	
	분류계수	0.9006	0.6663	0.4878	0.1447	0.0760	

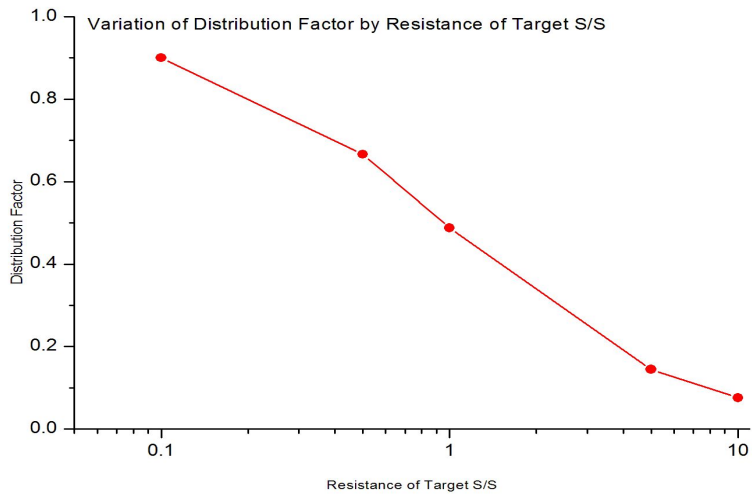


Fig. 5.12 Distribution Factor vs Target S/S Resistance

또한, 표 5.6에서는 터미널 변전소들의 접지저항은 1.0[Ω], 목표 변전소의 접지저항은 5.0[Ω]으로 유지하면서 철탁의 저항만을 1.0~25.0[Ω]까지 변화시킨 경우에 대한 결과를 정리한 것이고, 그림 5.13은 그 변화를 보여주고 있는데, 이 변화에 대해서도 고장 전류의 분류계수가 크게 변하고 있는 점을 알 수 있다.

Table 5.6 Change of Tower Ground Resistance

터미널 명	구분	철탁 접지저항의 변화					비 고
Main S/S	접지저항	5.0					변전소
Ter. 1	접지저항	25.0	10.0	7.0	5.0	1.0	1.0[Ω]
Ter. 2	접지저항	25.0	10.0	7.0	5.0	1.0	1.0[Ω]
Ter. 3	접지저항	25.0	10.0	7.0	5.0	1.0	1.0[Ω]
Ter. 4	접지저항	25.0	10.0	7.0	5.0	1.0	1.0[Ω]
결과	고장전류	12423.1 [A]					1선지락
	GPR	12635.0	7018.5	5913.0	4784.0	3073.0	
	유입전류	2527.0	1403.7	1182.6	956.8	614.6	
	분류계수	0.2034	0.1130	0.0952	0.0770	0.0495	

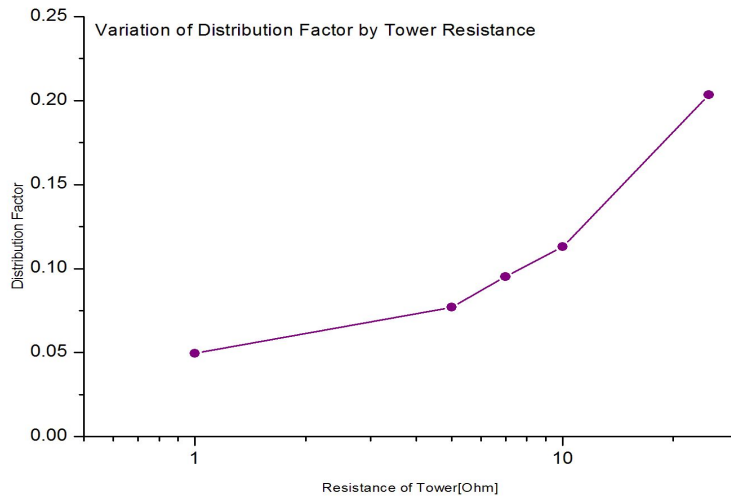


Fig. 5.13 Distribution Factor vs Tower Resistance

3. 검토 결과

변전소 접지그리드의 설계과정에서 고장전류의 분류계수에 대한 민감도를 분석하기 위하여 터미널 변전소의 접지저항 변화, 설계대상 변전소의 목표 접지저항 변화 및 송전선로 철탑의 접지저항을 변화시키는 경우에 대하여 분류계수의 변화를 분석하였다.

말단 변전소의 접지저항만을 0.1~20.0[Ω]으로 변화시킨 경우 대상 변전소에 대한 고장전류의 분류계수가 0.1355에서 0.1570으로 변화하여 크게 변하지 않았으며, 설계대상 변전소의 접지저항을 0.1~10.0[Ω]으로 변화시키는 경우는 분류계수가 0.9006~0.0760까지 매우 큰 변화가 있음을 알 수 있다. 또한, 철탑의 저항만을 1.0~25.0[Ω]까지 변화시킨 경우에 대해서도 고장전류의 분류계수가 0.0495~0.2034로 크게 변하고 있는 점을 알 수 있다. 따라서 고장전류의 분류계수에 크게 영향을 미치는 요소는 대상 변전소와 철탑의 접지저항이라고 할 수 있다. 변전소의 접지설계를 하는 과정에 필요로 하는 고장전류의 분류계수는 일정한 계수로 적용되는 것이 아니라 접지설계 대상 변전소에 연결되는 송전선로와 조건에 따라 다르게 적용되어야 하며, 이를 위해서는 반드시 고장전류의 접지망 유입전류를 계산하는 단계가 접지를 설계하는 과정에 포함되어야 한다.

C. 접지그리드 전극의 설계 및 해석

1. 전위분포 계산 알고리즘의 검증

제안한 유한요소법을 이용한 다층구조의 대지에 임의의 형태로 매설된 접지전극의 대지 전위계산 알고리즘에 대한 효용성 평가를 위하여 결과가 알려진 그리드 접지전극에 대하여 사례연구를 수행하였다. 그림 5.14는 사례연구를 위한 그리드와 접지봉으로 구성된 접지전극을 나타내며, 그리드의 한 변이 60.96 [m]인 정사각형, 접지도체의 지름이 0.01 [m], 그리드의 간격은 각 변 모두 15.24 [m]이고, 대지표면에서 0.5 [m] 깊이에 묻혀 있다. 대지구조는 2층구조로서, 상층의 대지 저항률 300 [Ω -m]과 상층의 깊이는 4.572 [m]이고, 하층의 대지 저항률은 100 [Ω -m]이다. 접지봉은 그리드 하나 건너 하나씩 모두 9개가 매설되어 있으며, 길이는 9.144 [m], 지름이 0.0127 [m]이다. 그림 5.15는 본 논문에서 제안한 프로그램의 결과로부터 그려진 그리드 접지전극의 형상을 보인 것이다.

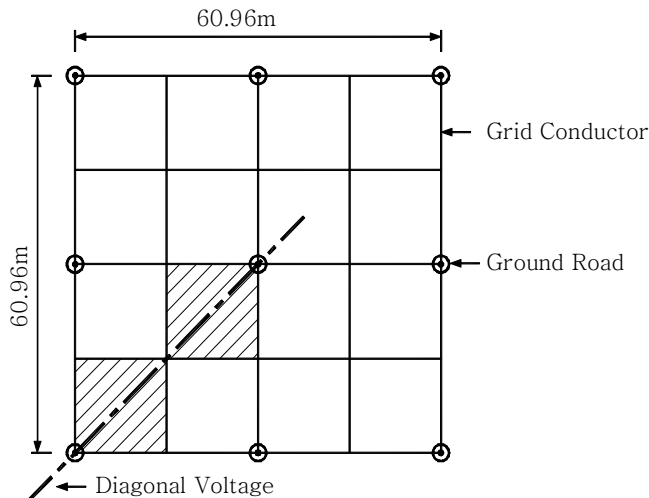


Fig. 5.14 Characteristics of Sample Electrode

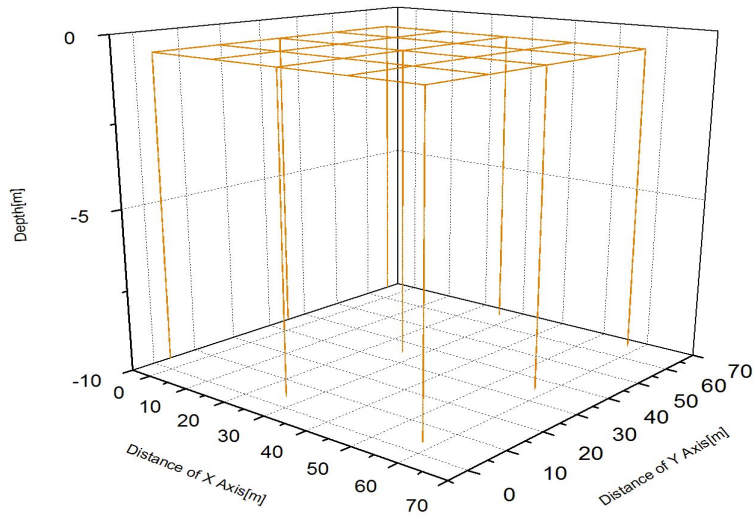


Fig. 5.15 Arrangement of Sample Electrode

제안한 유한요소법에 의한 임의의 형태로 매설된 접지전극의 전위계산 프로그램을 이용하여 예제 접지전극에 대한 대지전위분포의 결과를 비교하였다. 그림 5.16은 예제 접지전극에 대한 전위분포의 결과이다.

그림 5.17은 제안한 유한요소법에 의한 결과를 보인 것으로서, 그림에서 보는 바와 같이 문헌의 계산 결과는 메시전압(E_m)이 GPR의 49.66[%]이고, 최대 보폭전압(E_s)이 GPR의 18.33[%]인 값에 대하여 제안한 방법에 의한 계산 결과도 메시전압(E_m)이 GPR의 49.52[%], 최대 보폭전압(E_s)이 GPR의 17.98[%]로서 결과가 거의 일치하는 것을 볼 수 있다.

그림 5.18은 제안한 유한요소법에 의하여 임의의 형태로 매설된 접지전극의 전위계산 프로그램을 이용하여 예제 접지전극에 대한 전체적인 대지 전위분포의 결과를 보인 것이고, 그림 5.19와 5.20은 접촉전압 및 보폭전압의 분포를 각각 보인 것이다.

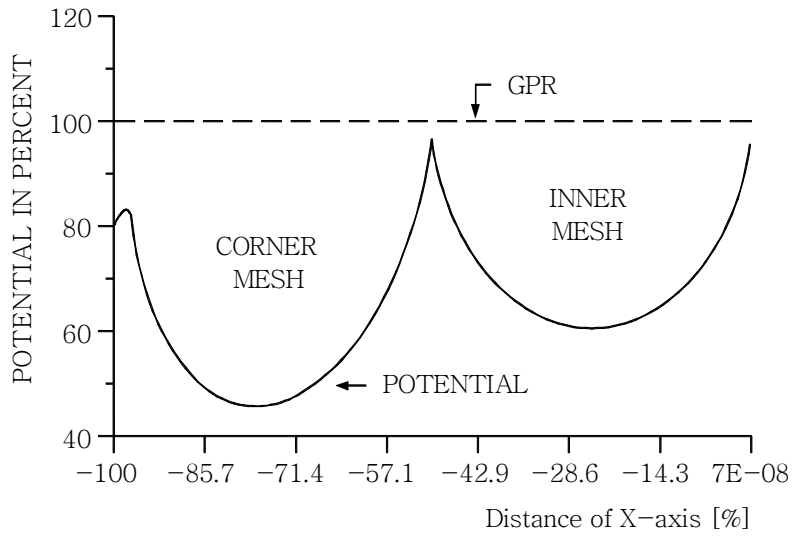


Fig. 5.16 Result of Potential Distribution

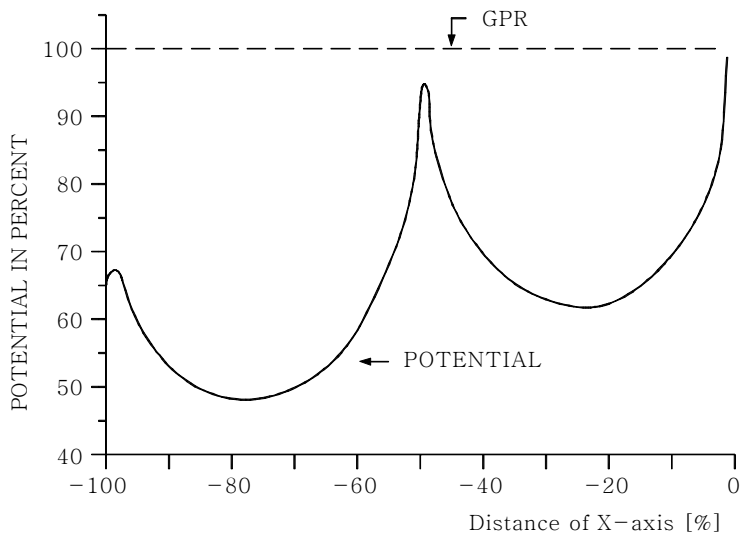


Fig. 5.17 Potential Distribution by Proposed Method

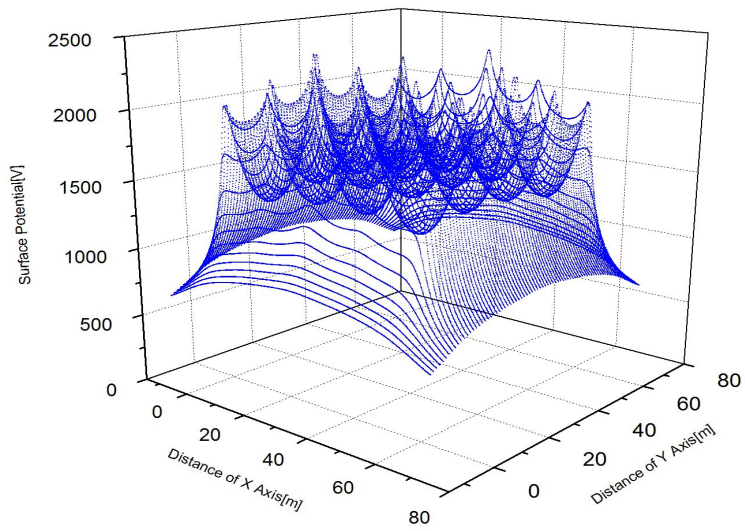


Fig. 5.18 Surface Potential Distribution of Grid System

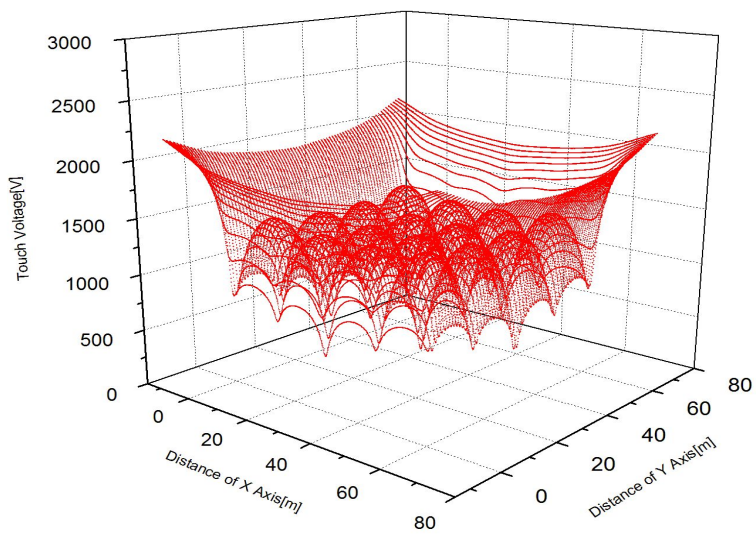


Fig. 5.19 Touch Voltage Distribution of Grid System

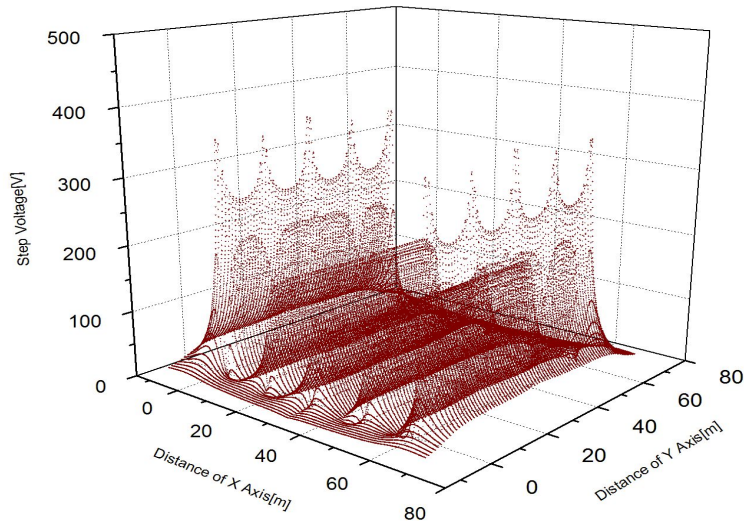


Fig. 5.20 Step Voltage Distribution of Grid System

2. 전위분포 계산 알고리즘에 의한 접지해석

임의의 형태로 배치된 접지그리드에 대한 해석을 위하여 제안한 유한요소법에 의한 전위분포 계산 알고리즘을 이용하여 실제의 다층구조의 대지 저항률을 단일지층 구조로 변환하는 등가 대지 저항률에 의한 접지시스템과 등가 2층구조의 대지모델에 의한 접지전극의 계산결과를 비교하였으며, 등가 2층구조 대지모델과 접지도체의 정밀한 모델링에 의한 접지전극의 설계 및 해석을 위한 방법론의 실용성을 검증하기 위하여 접지그리드 전극을 설계하고 해석하였다. 실제 다층구조의 대지 저항률을 단일지층 구조로 변환하는 등가 대지 저항률에 의한 접지전극과 등가 2층구조의 대지모델에 의한 접지전극을 비교하기 위하여 그림 5.1과 같이 위층의 대지 저항률이 $100[\Omega \cdot m]$, 아래층의 대지 저항률이 $1000[\Omega \cdot m]$ 인 모델 I과 위층의 대지 저항률이 $1000[\Omega \cdot m]$, 아래층의 대지 저항률이 $100[\Omega \cdot m]$ 인 모델 II의 2층구조 대지모델을 사용하였다.

(1) 단일지층 구조

앞에서 제안한 두 가지의 등가 2층구조 대지모델에 대하여 $50 \times 50 [m^2]$ 의 면적에 5[m] 간격의 메시 접지전극을 설계하여 계산한 결과를 비교하였다. 두 가지의 대지구조 모델에서 등가 깊이 50[m]에 대한 단층구조의 대지 저항률은 위층의 두께가 25[m]라고 한다면 똑같이 $181.82 [\Omega \cdot m]$ 를 나타내므로 단일지층 구조의 대지 저항률에 의하여 접지전극을 설계하는 방법인 IEEE Std-80에서 사용되는 절차에 따라 그리드 접지전극을 해석하였다. 이 방법은 접지저항의 크기만을 얻기 위한 접지전극의 설계가 아닌 대지 표면의 전위상승 값을 계산하는 방법이다. 이때 고장전류 1000[A]가 접지전극에 흐르는 것으로 가정하였다.

이 방법에 의한 설계결과는 단층구조의 대지 저항률이 같기 때문에 설계결과가 같게 나온다는 것을 알 수 있다. 표 5.7에 IEEE Std-80에 의한 설계결과를 보였다.

Table 5.7 Results of Design by IEEE Std-80

항 목	대 상	모델 I & II	비 고
	접지도체의 길이[m]	1100	
	허용 접촉전압[V]	970.30	몸무게 50[kg]
	최대 접촉전압[V]	293.85	
	허용 보폭전압[V]	3292.99	몸무게 50[kg]
	최대 보폭전압[V]	184.96	
	접지 저항의 크기[Ω]	1.74361	
	대지 전위상승(GPR)[V]	1743.61	

접지대상 면적에 대하여 고장 지속시간을 0.5[초]로 한 경우에 허용 접촉전압과 허용 보폭전압이 각각 970.30과 3292.99[V]인데 대하여 접지 대상 지점에서의 최대 접촉전압과 최대 보폭전압이 293.85과 184.96[V]로 계산되어 안전전압의 관점에서 만족스러운 결과를 보이고 있는 반면 접지저항의 크기는 $1.74 [\Omega]$ 으로 계산되었다. 또한, 대지 전위

상승(GPR) 값도 1743.61[V]로서, 기준 값인 5000[V] 보다 낮은 값으로 계산되어서 모든 조건이 IEEE Std 80의 기준을 만족시키는 것으로 나타났다.

(2) 2층구조 대지모델

접지그리드 전극에 대한 설계 및 해석을 IEEE Std-80에 의한다는 것은 접지전극의 설계 혹은 해석에서 가장 중요한 요소인 대지 저항률을 단층구조의 증가화된 대지 저항률을 사용하여야 한다는 방법의 한계 때문에 정확하다고 볼 수 없다. IEEE Std-80 방법의 한계란 접지전극 설계 및 해석방법은 대지의 구조를 단층으로 증가화하여 해석한다는 점과 임의의 모양으로 배치되는 접지전극에 대하여는 해석할 수 없다는 한계에 도달하게 된다. 따라서 본 논문에서는 대지 저항률을 증가 2층 대지구조로 해석하며, 임의의 접지전극 배치에 대해서도 해석이 가능한 대지전위를 계산하는 시뮬레이션 방법을 이용하였다.

증가 2층구조의 대지모델을 사용하는 대지전위를 계산하는 시뮬레이션 결과를 두 가지의 대지모델에 대하여 비교함으로써 단층구조의 대지 저항률에 의한 계산결과가 증가 2층구조의 대지모델을 사용하는 계산결과와 상당한 차이를 나타내고 있어서 정밀한 접지시스템의 설계와 해석을 위해서는 대지모델이 2층의 구조가 되어야 하는 적합성을 나타내고자 한다. 그림 5.21은 제안한 전위분포 계산에 의한 접지전극 해석 프로그램으로부터 얻어진 접지전극의 배치도이다.

Table 5.8 Results of Design and Analysis for Grounding System

구 분 항 목	IEEE 방식	시뮬레이션 방식	
	모델 I & II	모델 I	모델 II
접지저항[Ω]	1.74	2.01	6.40
GPR[V]	1743.61	2012.19	6401.17
접촉전압[V]	293.85	235.91	644.21
보폭전압[V]	184.96	25.75	212.62
대지 구조	단층구조	증가 2층 구조	

표 5.8은 각각의 대지모델에 대한 접지시스템 설계의 계산결과를 요약한 것으로서, 표에서 보는 바와 같이 대지를 등가 2층 구조로 계산한 결과는 대지구조 모델 I에서 접지저항 값은 2.01[Ω]으로 나타나서 단층구조로 계산한 IEEE 방법의 결과 1.74[Ω]과 비교적 비슷한 값을 보이고 있으나, 대지구조 모델 II의 접지저항 값의 계산 결과는 6.40[Ω]으로 계산되어 IEEE 방법의 결과와 상당히 큰 오차를 보이는 것으로 나타났다.

이러한 결과는 단층구조의 등가 대지 저항률에 의한 접지전극의 설계는 실제의 대지구조가 충분히 반영이 되지 않고 있음을 알 수 있어서, 접지전극이 임의의 형태로 배치되는 접지그리드 전극의 설계 및 해석을 위해서는 대지구조의 특성을 반영할 수 있는 2층 구조의 대지모델이 사용되어야 함을 의미한다.

그림 5.22와 5.23에는 각각의 대지구조 모델에 대한 지표면 전위분포를 보인 것이며, 그림 5.24와 5.25는 접촉전압 분포, 그림 5.26과 5.27은 보폭전압의 분포를 각각 보인 것이다. 그림 5.22와 5.23에서 보는 바와 같이 지층구조의 모델에 따라 GPR은 2012.19와 6401.17[V]로 나타나서, 등가 단일지층 구조모델을 사용하는 IEEE Std. 방식의 1743.61[V]와 큰 차이를 보이고 있으며, 접촉전압과 보폭전압도 큰 차이를 보이고 있음을 확인할 수 있다.

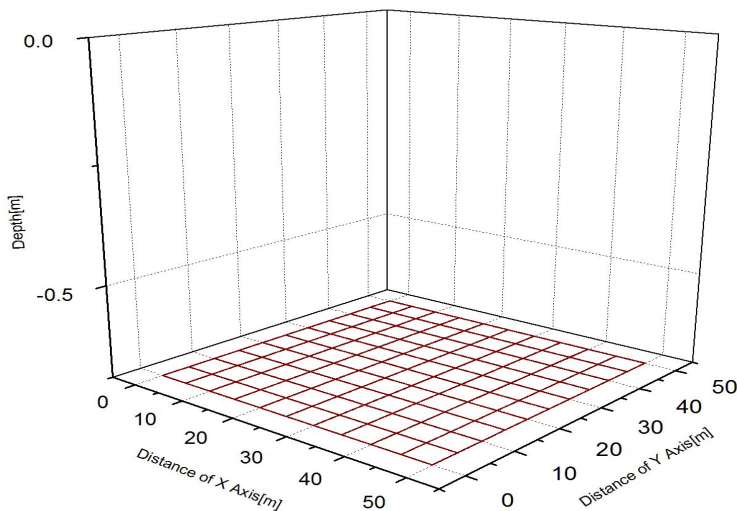


Fig. 5.21 Arrangement of Ground Grid

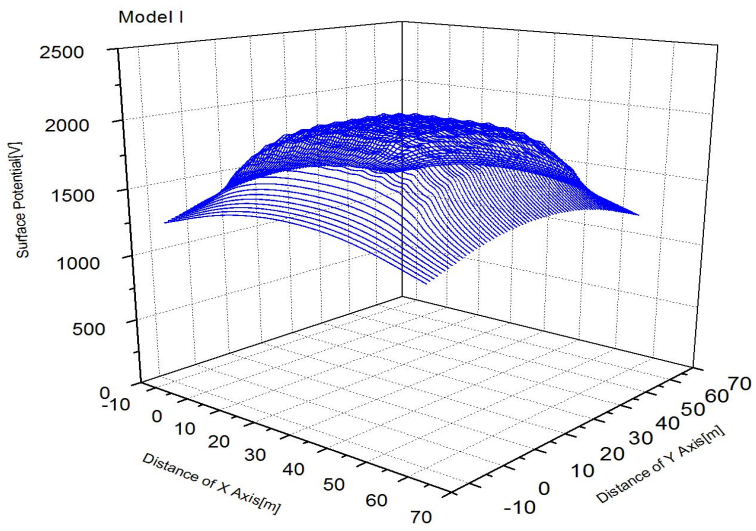


Fig. 5.22 Surface Potential Distribution of Model I

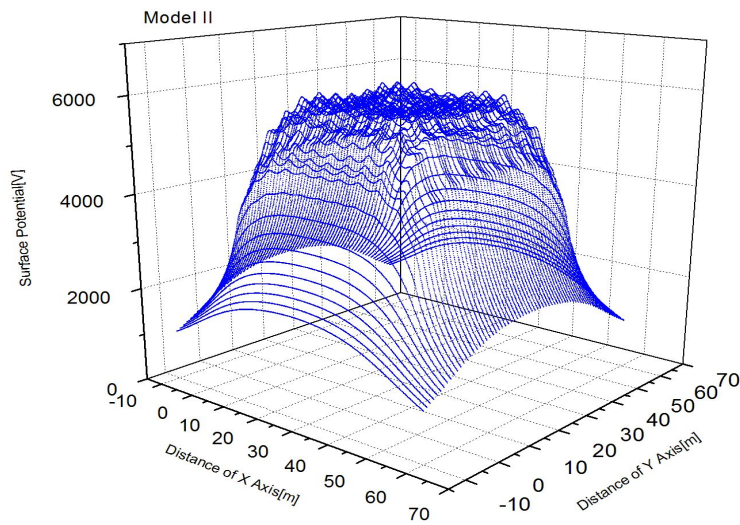


Fig. 5.23 Surface Potential Distribution of Model II

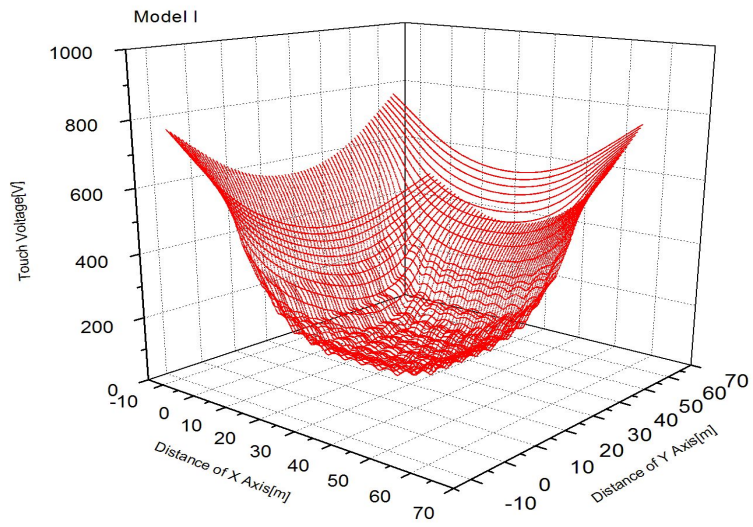


Fig. 5.24 Touch Voltage Distribution of Model I

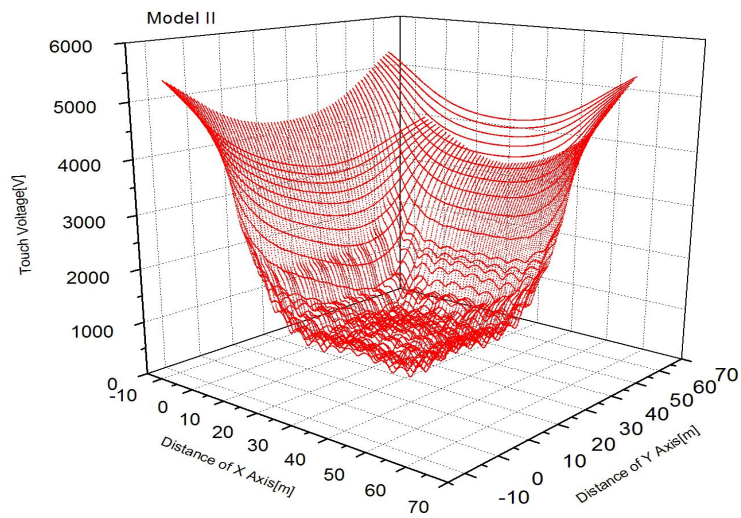


Fig. 5.25 Touch Voltage Distribution of Model II

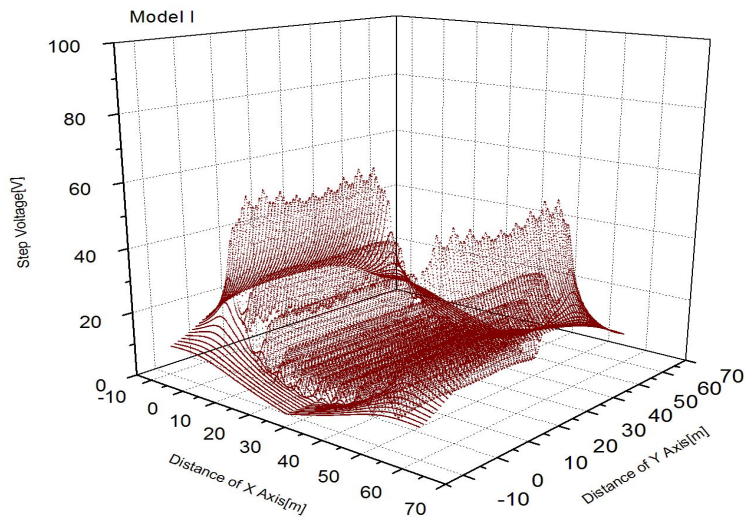


Fig. 5.26 Step Voltage Distribution of Model I

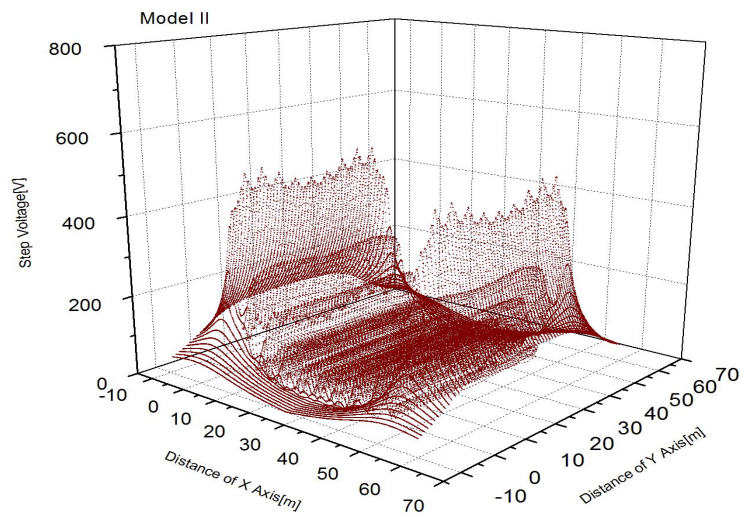


Fig. 5.27 Step Voltage Distribution of Model II

3. 검토 결과

본 논문에서 제안한 유한요소법에 의한 임의의 형태로 매설된 접지전극의 전위계산 프로그램을 이용하여 대지 전위분포를 이미 결과가 알려진 예제 그리드 접지전극에 대하여 결과를 비교한 결과, 예제 그리드 접지전극의 이미 알려진 계산 결과는 메시전압(E_m)이 GPR의 49.66[%]이고, 최대 보폭전압(E_s)이 GPR의 18.33[%]인 값에 대하여 제안된 유한요소법에 의한 계산 결과도 메시전압(E_m)이 GPR의 49.52[%]이고, 최대 보폭전압(E_s)이 GPR의 17.98[%]로서 결과가 거의 일치하는 것을 볼 수 있다.

대지를 등가 2층구조로 계산한 결과는 대지구조 모델 I에서 접지 저항값은 2.01[Ω]으로 나타나서 단일지층 구조로 계산한 IEEE Std. 방법의 결과 1.74[Ω]과 비교적 비슷한 값을 보이고 있으나, 대지구조 모델 II의 접지 저항값의 계산결과는 6.40[Ω]으로 계산되어 IEEE 방법의 결과와 상당히 큰 오차를 보이는 것으로 나타났다.

또한, 지층구조의 모델에 따라 GPR은 2012.19와 6401.17[V]로 나타나서, 등가 단일지층 구조모델을 사용하는 IEEE Std. 방식의 1743.61[V]와는 큰 차이를 보이고 있으며, 접촉전압과 보폭전압도 큰 차이를 보이고 있음을 확인할 수 있다.

따라서 이러한 결과는 단층구조의 등가 대지 저항률에 의한 접지전극의 설계는 실제의 대지구조가 충분히 반영이 되지 않고 있음을 알 수 있어서, 접지전극이 임의의 형태로 배치되는 그리드 접지전극의 설계 및 해석을 위해서는 대지구조의 특성을 반영할 수 있는 2층구조의 대지모델을 포함한 다층구조의 모델이 사용되어야 함을 의미한다.

VI. 결 론

전기에너지를 사용하는 전력설비에서 고장은 필연적으로 발생하며, 특히 지락고장이 발생하면 고장전류가 대지로 흘러가게 되어 전기설비의 구내 및 주변에 전위차가 나타나게 되어 인체의 안전이나 설비의 절연과피 등의 위험을 발생시킨다. 이러한 위험에 대비하기 위한 것이 전기설비의 접지시스템으로, 우리나라와 같이 국토의 면적이 작아서 충분한 전력설비의 용지를 확보하기 곤란하거나 주변 환경과의 조화, 인구 밀집지역인 도심이나 산악지 등의 대지 저항률이 큰 경우에 적절한 접지시스템을 설계하여 대지전위의 상승을 억제하고, 고장전류의 크기를 제어하는 등의 적절한 대책을 세워야 한다.

전기설비에서 접지시스템은 고장전류에 의한 전위상승은 인체의 안전이나 설비의 안정적 운전에 영향을 미치는 매우 중요한 값이다. 따라서 접지전극의 설계 및 해석을 위한 지표면 전위상승을 계산하는 과정은 필수적인 것이며, 이 과정에서 접지전극에 유입되는 고장전류의 크기, 접지그리드의 고장전류 분포 및 접지전극의 저항값도 중요한 요소이다.

이러한 중요한 요소인 접지전극에 유입되는 고장전류의 분류계수를 결정하기 위하여 송전계통에 대한 모델링을 통한 계산 알고리즘, 접지그리드의 고장전류 분포를 계산하기 위한 알고리즘, 접지그리드의 지표면 전위상승 값을 계산하는 문제에 대하여 일반적으로 대지 저항률, 특히 지층의 구조가 매우 중요한 변수임에도 불구하고 실제의 지층구조가 아닌 등가화된 단일지층 구조의 파라미터를 사용하고 있고, 고장전류의 분류계수나 접지그리드의 고장전류 분포 등에 대한 계산이 정확하게 이루어지지 않은 상태에서 접지그리드 설계 및 해석이 이루어지는 관계로 실제의 현상이 제대로 파악되지 않는 문제점이 있는 것이다.

본 논문에서는 다중의 송전계통망이 연결된 접지그리드의 설계를 위한 고장전류의 분류계산을 위한 알고리즘, 접지그리드의 고장전류 분포를 계산하기 위한 알고리즘 및

접지그리드의 전위상승 값을 계산하기 위한 알고리즘 등을 제안하였다.

제안된 알고리즘 등의 효용성을 검증하기 위하여 다층구조의 대지 저항률에서 대지 저항률의 변화와 표토층의 재료와 두께의 변화에 대한 허용 안전전압의 변화특성, 철탑 및 터미널 변전소의 접지저항 변화 등을 통한 다중의 송전계통망에 연결된 접지그리드의 유입 고장전류의 분류계수의 변화와 접지그리드의 고장전류 분포, 다층구조 대지모델에서의 접지전극에 대한 전위해석을 통한 접지그리드 설계 및 해석에 대하여 사례를 연구하였다.

(1) 변전소 그리드 접지전극 설계의 기준으로 사용되고 있는 IEEE Std. 80-2000을 기본으로 변전소 설계대상 설치장소의 지층구조에 따라 위험전압의 한계 값 변화에 대하여 검토한 결과, 표토층의 두께가 두꺼워질 수록 허용 안전전압(보폭 및 접촉전압)의 크기가 증가하며, 표토층의 재료별 특성에서 저항률이 높을 수록 허용 안전전압의 크기가 선형적으로 증가하였다. 다만, 상층의 대지 저항률이 표토층 재료의 저항률과 같을 경우에는 접촉전압의 변화가 다르게 나타났다. 또한, 반사계수의 변화별 허용 안전전압은 반사계수가 증가방향으로 커질 수록 변화하는 정도가 크게 나타나며, 상층의 깊이 변화별 허용 안전전압의 변화는 반사계수가 감소인 경우에는 변화가 매우 작게 나타나지만, 반사계수가 증가인 경우에는 크게 나타나고 있음을 확인하였다.

따라서 대지구조의 변화에 따른 허용 안전전압의 변화를 분석한 결과는 변전소와 같은 대형 접지시스템의 그리드 설계를 할 때 참고자료로 적용할 수 있을 것이며, 추후 다층구조의 대지구조에서도 적용이 가능한 일반적인 허용 안전전압 모델에 대한 연구가 필요할 것으로 사료된다.

(2) 변전소 접지그리드의 설계과정에서 고장전류의 분류계수에 대한 민감도를 분석하기 위하여 터미널 변전소의 접지저항 변화, 설계 목표 대상변전소의 목표 접지저항 변화 및 송전선로 철탑의 접지저항을 변화시키는 경우에 대하여 분류계수의 변화를 분석하였다.

말단 변전소의 접지저항만을 증가시킨 경우에 대해서는 대상 변전소에 대한 고장전류의 분류계수는 크게 변하지 않았으며, 설계대상 변전소의 접지저항을 증가시키는 경우에 대하여 분류계수는 매우 크게 감소하는 변화가 있음을 알 수 있다. 또한, 철탑의 저항만을 증가시키면 고장전류의 분류계수가 크게 증가하는 변화가 있는 점을 알 수 있다. 따라서 고장전류의 분류계수에 크게 영향을 미치는 요소는 대상 변전소와 철탑의 접지저항이라고 할 수 있다.

변전소의 접지설계를 하는 과정에 필요로 하는 고장전류의 분류계수는 앞에서 검토한 바와 같이 일정한 계수로 적용되는 것이 아니라 접지설계 대상 변전소에 연결되는 송전선로와 조건에 따라 다르게 적용되어야 하며, 이를 위해서는 반드시 고장전류의 접지망 유입전류를 계산하는 단계가 접지를 설계하는 과정에 포함되어야 한다.

(3) 본 논문에서 제안한 유한요소법에 의한 임의의 형태로 매설된 접지전극의 전위계산 프로그램을 이용하여 대지 전위분포를 이미 결과가 알려진 예제 그리드 접지전극에 대하여 값을 비교한 결과, 예제 그리드 접지전극의 이미 알려진 계산 결과의 메시전압과 최대 보폭전압(E_s)이 제안된 유한요소법에 의해 계산된 메시전압이나 최대 보폭전압(E_s)이 거의 일치하는 것을 볼 수 있다.

대지를 등가 2층구조로 계산한 결과는 대지구조 모델 I에서 접지저항 값은 2.01[Ω]으로 나타나서 단일지층 구조로 계산한 IEEE Std. 방법의 결과 1.74[Ω]과 비교적 비슷한 값을 보이고 있으나, 대지구조 모델 II의 접지저항 값의 계산 결과는 6.40[Ω]으로 계산되어 IEEE 방법의 결과와 상당히 큰 오차를 보이는 것으로 나타났다.

또한, 지층구조의 모델에 따라 큰 차이를 보이고 있으며, 등가 단일지층 구조모델을 사용하는 IEEE Std. 방식의 결과와도 큰 차이를 보이고 있으며, 접촉전압과 보폭전압도 큰 차이를 보이고 있음을 확인할 수 있다.

따라서 이러한 결과는 단층구조의 등가 대지 저항률에 의한 접지전극의 설계는 실제의 대지구조가 충분히 반영이 되지 않고 있음을 알 수 있어서, 접지전극이 임의의 형

대로 배치되는 그리드 접지전극의 설계 및 해석을 위해서는 대지구조의 특성을 반영할 수 있는 2층구조의 대지모델을 포함한 다층구조의 모델이 사용되어야 함을 의미한다.

제안된 방법에서 대형 접지전극의 설계와 해석을 IEEE Std. 80에서 적용하는 단일 지층 구조의 결과와 제안된 방법의 다층구조 모델에 대하여 적용한 결과를 비교하여 접지전극의 설계 및 해석을 위한 대지구조 모델은 다층구조 모델이 적용되어야 한다는 점을 확인하였으며, 철탑 및 터미널 변전소의 접지저항 변화 등을 통한 다중의 송전계 통망에 연결된 접지그리드의 유입 고장전류의 분류계수의 변화와 접지그리드의 고장전 류 분포의 계산도 필수적임을 확인하였다.

앞으로 변전소의 그리드 접지전극의 접지효과를 증대하기 위한 최적의 접지 설계기 술을 완성하기 위해서는 좀 더 많은 연구와 프로그램의 개발이 요구되며, 국내에서도 많은 전기기술자들이 이 분야에 대한 관심을 기울여야 할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- [1] IEEE Std. 80, IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding, 2000.
- [2] Sunde, E. D., Earth Conduction effects in Transmission Systems, Dover Pub, 1968.
- [3] Tagg, G. F., Earth Resistance, George Newness Limited, 1964.
- [4] Meliopoulos, A. P. S., Power System Grounding and Transients, Marcel Dekker, Inc, 1988.
- [5] EPRI, Transmission Line Grounding, Vol.1, Research Project 1494-1, Report EL 2695, Principal Author F.Dawalibi, 1982.
- [6] 高橋健彦, 이형수역, 接地設計 入門, 통일출판사, 음사, 1993.
- [7] 高橋健彦, 이형수역, 接地技術 入門, 통일출판사, 음사, 1995.
- [8] F. Dawalibi, "Ground fault current distribution between soil and neutral conductors", IEEE PAS, Vol. 99, No. 2, pp 452~461, 1980.
- [9] F. Dawalibi, D. Mukhedkar, D. Bensted, "Measured and computed current densities in buried ground conductors", IEEE PAS, Vol. 100, No. 8, Aug, pp 4083~4092, 1981.
- [10] R. J. Gustafson, "Neutral-to-earth voltage and ground current effects in livestock facilities", IEEE PAS, Vol. 101, No. 7, pp 2090~2095, 1982.

- [11] L. Levey, "Calculation of ground fault currents using an equivalent circuit and a simplified ladder network", IEEE PAS, Vol. 101, No. 8, Aug, pp 2491~2497, 1982.
- [12] W. Bogajewski, F. Dawalibi, Y. Gervais, D. Mukhedkar, "Effects of sustained ground fault current on concrete poles", IEEE PAS, Vol. 101, No. 8, Aug, pp 2686~2693, 1982.
- [13] A. P. Meliopoulos, R. P. Webb, E. B. Joy, S. Patel, "Computation of maximum earth current in substation switchyards", IEEE PAS, Vol. 102, No. 9, Sep, pp 3131~3139, 1983.
- [14] F. Dawalibi, George B. Niles, "Measurements and computations of fault current distribution on overhead transmission lines", IEEE PAS, Vol. 103, No. 3, Mar, pp 553~560, 1984.
- [15] B. Thapar, sunil K. Madan, "Current for design of grounding systems", IEEE PAS, Vol. 103, No. 9, Sep, pp 2633~2638, 1984.
- [16] H. B. Gooi, S. A. Sebo, "Distribution of ground fault currents along transmission lines - An improved algorithm", IEEE PAS, Vol. 104, No. 3, Mar, pp 663~670, 1985.
- [17] J. Fortin, H. G. Sarmiento, D. Mukhedkar, "Field measurement of ground fault current distribution and substation ground impedance", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. PWRD-1, No. 3, July, pp 48~60, 1986.

- [18] A. N. Guven, S. A. Sebo, "Analysis of ground fault current distribution along underground cables", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. PWRD-1, No. 4, Oct, pp 9~18, 1986.
- [19] J. Robert Eaton, Edwin Cohen Electric power transmission systems, Prentice-Hall, Inc, 1991.
- [20] IEEE Std 142-2007, IEEE Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants, 2007.
- [21] IEEE Std 1100-2005, IEEE Recommended Practice for Electric Powering and Grounding Electronic Equipment, 2005.
- [22] NESC(National Electrical Safety Code), 2006 Edition.
- [23] IEC 60479-1, Effects of current on human beings and livestock - part 1: General aspects, The International Electrotechnical Commission, 2005.
- [24] Chien-Hsing Lee & A. P. Meliopoulos "A Comparison of IEC 479-1 and IEEE Standardd-80 on Grounding Safety Criteria" IEEE Trans. Vol. 23, No. 5, pp 612-621, 1999.
- [25] P. G. Biegelmeier, W. R. Lee " New considerations on the threshold of ventricular fibrillation for AC shocks at 50-60Hz" IEE proceedings Vol. 1270, No.2, pt. A, March, pp 103-110, 1980.
- [26] SES Ltd., Power System Grounding and Electromagnetic Field, Technical Seminar, San Francisco, 1994.

- [27] G. Parise, "A Summary of the IEC Protection Against Electric Shock", IEEE Trans. on Industry Applications, SEP/OCT 1998.
- [28] Institute of Electrical and Electronic Engineering, IEEE Brown book, IEEE standard-399, 1980, Industrial and commercial power system analysis, IEEE New York, 1980.
- [29] Institute of Electrical and Electronic Engineering, IEEE green book, IEEE standard-142, 1982, IEEE recommended practice for grounding of industrial and commercial power systems, IEEE New York, 1982.
- [30] Dawalibi, F. and Mukhedkar, D., "Optimum Design of Substation Grounding in Two-Layer Earth Structure; Part I - Analytical Study, Part II - Comparison Between Theoretical and Experimental Results, Part III - Study of Grounding Grids Performance and New Electrodes Configuration", IEEE Trans. PAS, Vol. PAS-94, No. 2, pp 252-261, 262-266, 267-272, 1975.
- [31] R. Verma, D. Mukhedkar, "Ground fault current distribution in substation towers and ground wire", IEEE PAS, Vol. 98, No. 3, May/June, pp 724~730, 1979.
- [32] T. Yoshida, T. Sakakibara, K. terasaka, I. Miwa, "Distribution of induced grounding current in large-capacity GIS using multipoint grounding system", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. PWRD-1, No. 43, Oct, pp 120~128, 1986.
- [33] D. L. Garrett, J. G. Myers, S. G. Patel, "Determination of maximum substation grounding system fault current using graphical analysis", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. PWRD-2, No. 3, pp 725~732, 1987.

- [34] W. K. Daily, Farid Dawalibi, "Cost reduction and minimization of land based on an accurate determination of fault current distribution in shield wires and grounding systems", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 8, No. 1, Jan, pp 97~103, 1993.
- [35] Eric T. B. Gross, Richard B. Wise, "Grounding grid for high voltage stations, II-resistance of large rectangular plate", AIEE, Trans. October, pp 801-819, 1955.
- [36] Eric T. B. Gross, Robert S. Hollitch, "Grounding grid for high voltage stations, III-resistance of rectangular grid", AIEE, Trans. October, pp 926-935, 1956.
- [37] J. Zaborszky, "Efficiency of grounding grids with non-uniform soil", AIEE, Trans. December, pp 1230-1233, 1956.
- [38] F. Dawalibi, D. Mukhedkar, "Multi step analysis of interconnected grounding electrodes", IEEE Trans. Vol. PAS-95, No.1, Jan/Feb, pp 113-119, 1976.
- [39] J. Nahman, D. Salamon, "Analytical expressions for the resistance of roadbeds and of combined grounding system in non-uniform soil", IEEE Trans. Vol.PWRD-1 No.3 July, pp 90-96, 1986.
- [40] R. Verma, D. Mukhedkar, "Ground fault current distribution in substation towers and ground wire", IEEE PAS, Vol. 98, No. 3, May/June, pp 724~730, 1979
- [41] F. Dawalibi, "Ground fault current distribution between soil and neutral conductors", IEEE PAS, Vol. 99, No. 2, pp 452~461, 1980.

- [42] L. Levey, "Calculation of ground fault currents using an equivalent circuit and a simplified ladder network", IEEE PAS, Vol. 101, No. 8, Aug, pp 2491~2497, 1982.
- [43] B. Thapar, sunil K. Madan, "Current for design of grounding systems", IEEE PAS, Vol. 103, No. 9, Sep, pp 2633~2638, 1984.
- [44] Dawalibi, F. and Mukhedkar, D., "Parametric Analysis of Grounding Systems", IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-98, No. 5, pp 1659~1668, 1979.
- [45] Robert J. Heppe, "Computation of Potential at Surface above an Energized Grid or Other Electrode, Allowing for Non-uniform Current Distribution", IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-98, No. 6, 1979.
- [46] J. G. Severak, W. k. Dick, T. H. Dodds, R. H. Heppe, "Safe substation grounding PART-I", Report of substation committee working group 78.1 "IEEE 80 guide for safety in AC substation. Review" IEEE Trans. Vol. PAS-100, No.9 September, pp 4281-4290, 1981.
- [47] J. G. Severak, R. U. Benson, W. k. Dick, T. H. Dodds, D. L. Garret, J. E. Idzkowski, R. P. Keil, S. G. Patel, M. E. R. H. Heppe, "Safe substation grounding PART-II", Report of substation committee working group 78.1 "IEEE 80 guide for safety in AC substation. Review" IEEE Trans. Vol. PAS-101, No.10 October, pp 4006-4023, 1982.
- [48] J. G. Severak, "Optimized grounding grid design using variable spacing technique" IEEE trans. vol. PAS-95, No. 1, Jan/Feb, pp 362-373, 1975.

- [49] F. Dawalibi, D. Mukhedkar, "Resistance measurement of large grounding systems" IEEE Trans. Vol. PAS-98, No. 6, Nov/Dec, pp 90-101, 1979.
- [50] F. Dawalibi, D. Mukhedkar, "Parametric Analytic of grounding grids", IEEE trans. Vol.PAS-98. No.5, No.5, Sept/Oct, pp 1659-1668, 1979.
- [51] L. G. Zukerman,"simplified analysis of rectangular grounding grids" IEEE trans. vol. PAS-98, No. 5, Sept/Oct, pp 1777-1785, 1979.
- [52] Robert J. Heppel,"Step potentials and body currents near grounds in two-layer earth", IEEE trans. vol. PAS-98, No. 1, Jan/Feb, pp 45-59, 1979.
- [53] Robert J. Heppel, "Computation of potential at surface above an energized grid or other electrode allowing for non-uniform current distribution", IEEE Trans. Vol. PAS-98, No. 6, Nov/Dec 79 pp 1978-1987, 1979.
- [54] D. L. Garrett, H. J. Holley, "Calculation of substation grounding system resistance using matrix techniques", IEEE Trans. Vol. PAS-99 No.5 Sept/Oct, pp 2008-2011, 1980.
- [55] F. Dawalibi, D. Mukhdkar, D. Bensted,"Measured and computed current densities in buried ground conductors", IEEE Trans. Vol. PAS-100, No.8 August, pp 4083-4092, 1981.
- [56] E. B. Joy, N. Paile, T. E. Brewer, R. E. Wilson, R. P. Webb, and A. P. Meliopoulos, "Graphical data for ground grid analysis", IEEE Trans. Vol. PAS-102 No.9 September, pp 3038-3048, 1983.

감사의 글

끝이 보이지 않아 막막하기만 하던 시간을 보내고 어느덧 논문의 마지막 장 감사의 글을 쓸 수 있게 됨을 기뻐하며 그동안 고마웠던 모든 분들에게 감사의 인사를 드리고자 합니다.

그중에서 특히 보람된 결실이 맺어지기까지 항상 모든 일에 세심한 지도와 가르침을 주시고 또한 학문적 용기를 북돋아 주신 조금배 교수님께 진심으로 감사 인사 드립니다. 학사 때 지도교수님으로 부족한 제자임에도 불구하고 대견하다 칭찬해 주시며 포기하지 않도록 믿어주신 백형래 교수님, 온화한 미소로 지켜봐 주시고 미진한 부분에 대하여 지도해 주신 이우선 교수님, 학위 논문이 완성되기까지 세세한 부분까지 이끌어 주시고 다듬어 주신 최효상 교수님, 먼길 마다하지 않고 달려와 주시고 성심 성의껏 심사해 주신 심건보 교수님 감사합니다. 그리고 따뜻한 격려와 지도를 아끼지 않고 해주신 조선대학교 전기공학과 모든 교수님께 감사 드립니다.

늘 가까이서 지켜봐 주시고 앞에서 이끌어 주신 장용해, 김대곤, 최문한, 김현철 선배님, 뒤에서 밀어주고 응원해 준 최연옥, 이강연, 정병호, 박정민, 오만석, 장인혁, 모든 CUPEL 회원님들 감사합니다. 바쁜 일정 속에서도 매주 도와준 고마운 태양광발전 실험실 후배 이권, 김기현, 전범준, 나현준, 김청담, 김형지에게 진심으로 고맙다는 말 전합니다. 많이 부족하고 어설피 큰며느리 믿어 주시고 사랑해 주신 아버님, 어머님 그리고 시댁 식구들 모두 감사합니다. 매일 잊지 않고 막내딸위해 기도해 주시고 보살펴 주신 아버지, 어머니, 그리고 친정 식구들 고맙습니다.

끝으로 오늘이 오기까지 힘든 가운데 지지해 주고 버팀목이 되어준 남편 서진종 사랑합니다. 바쁘다는 핑계로 잘 챙겨주지도 못해 항상 미안한 나의 소중한 보물 서나해, 서나현, 서순영 많이 사랑하고 지금처럼 건강하고 멋진 모습으로 잘 자라주길 바라며 엄마 옆에 있어줘서 행복하다는 말 전합니다.

2013年 12月

文 銀 兒