



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](#) 

2015年 8月

2015年 8月
博士學位論文

博士學位論文

전기철도의

이상전압

대책을

관한

공통접지시스템에

대한

연구

李鎔美

전기철도의 이상전압 대책을 위한 공통접지시스템에 관한 연구

朝鮮大學校 大學院

電氣工學科

李 鎔 美

전기철도의 이상전압 대책을 위한 공통접지시스템에 관한 연구

A Study on the Common Grounding System
for the Abnormal Voltage Countermeasure
of the Electric Railway

2015年 8月 25日

朝鮮大學校 大學院

電氣工學科

李 鎔 美

전기철도의 이상전압대책을 위한
공통접지시스템에 관한 연구

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.

2015年 4月

朝鮮大學校 大學院

電氣工學科

李鎔美

李鎔美의 博士學位 論文을 認准함

委員長 朝鮮大學校 教授 李 愚 宣 印

委員 朝鮮大學校 教授 淮 孝 祥 印

委員 朝鮮大學校 教授 沈 建 輔 印

委員 弘益大學校 研究教授 崔 然 玉 印

委員 朝鮮大學校 教授 曹 錦 倍 印

2015年 6月

朝鮮大學校 大學院

목 차

ABSTRACT

I. 서 론	1
II. 철도 급전계통에서의 이상전압	3
A. 이상전압의 종류	5
1. 외부 이상전압 : 외뢰	5
a. 직격뢰에 의한 서지	6
b. 유도뢰에 의한 서지	8
2. 내부 이상전압 : 내뢰	8
a. 지속성 서지	9
b. 개폐서지	10
B. 이상전압의 특징	13
C. 서지의 영향	15
1. 급전계통의 영향	15
2. 기기에 대한 영향	15
3. 직격뢰에 의한 영향	16
D. 이상전압의 영향과 접지시스템	18
E. 이상전압의 영향에 대한 대책	21

1. 전철변전설비 접지 구성	21
2. 전차선로 설비의 이상전압 억제	22
3. 통신설비 이상전압 억제	23
4. 신호설비 이상전압 억제	24
Ⅲ. 전기안전과 철도급전시스템의 국제 기준	25
A. 감전전류에 대한 안전한계	25
1. 켈펜(Keoppen)에 의한 안전기준	26
a. 통전전류가 수직으로 흐른 경우	26
b. 통전전류가 수평 또는 부분적으로 흐를 경우	27
2. 안전전류 기준	28
3. 달질과 비겔마이어의 결과 비교	29
4. 국제기술기준에 의한 안전전류기준	30
B. 접지시스템과 인체의 위험전압	33
1. 대지 전위상승(GPR)과 대지표면 전위	34
2. 접촉전압	35
3. 보폭전압	35
4. 메시전압	35
C. 감전전류와 안전전압	36
1. 감전전류와 안전전류	36
2. 안전전압	37
D. KS C IEC62128-1의 기준	39

1. 주요 내용	39
a. 적용 범위	39
b. 감전에 대한 보호 조치	39
c. 레일 전위의 위험에 대한 보호	41
d. 변전소 및 개폐소에 대한 보호	43
e. 귀선 전류회로와 접지도체	43
2. 설계기준	44
IV. 지표면 전위 계산 알고리즘	46
A. 그린함수의 원리	46
B. 영상법에 의한 전위 해석	49
C. 적분방법에 의한 전위계산	52
V. 이상전압의 측정	56
A. 정상운전 상태의 대지전위 측정	56
1. 측정 회로 및 측정방법	57
2. 측정 결과 검토	57
B. 고장 상태의 대지전위 측정	61
1. 측정회로 및 측정방법	61
2. 측정결과 검토	62
a. 상행선지락 (상행선 측정)	63

b. 하행선지락 (하행선 측정).....	63
c. 측정 결과 검토.....	64
C. 차량기지에서의 대지전위 측정	70
1. 측정 회로 및 측정방법	70
a. 고속철도 차량의 MCB 투입시	71
b. 고속철도 차량의 MCB 투입상태(전압 인가상태).....	72
c. 고속철도 차량의 MCB 개방시	73
d. 고속철도 차량의 MCB 개방상태(전압 무인가상태).....	74
2. 측정 결과 검토.....	75
VI. 시뮬레이션 및 결과 검토.....	78
A. 이상전압 발생의 시뮬레이션.....	78
1. 전철 급전계통의 고장전류 모델.....	78
a. 전철 급전계통.....	78
b. 전원계통 임피던스.....	79
c. 급전회로의 선로정수.....	80
d. 전철 급전계통의 회로모델.....	85
2. 전기철도 급전계통 단락사고시 접지전류의 영향검토.....	85
3. 매설지선의 회선수에 의한 영향검토.....	87
a. 매설지선 2회선을 시공하는 경우.....	87
b. 매설지선 1회선을 시공하는 경우.....	88
c. 교량구간에서 매설지선 1회선을 시공하는 경우.....	90

d. 검토 결과 및 고찰	92
B. 매설지선의 회선수와 인출선 간격의 전위분포 해석	93
1. 접지저항과 최대 전위의 분석	94
2. 매설지선 2회선을 시공하는 경우	95
3. 매설지선 1회선을 시공하는 경우	97
4. 결과 검토 및 고찰	98
C. 지락사고시 전위상승과 대지 저항률의 관계 분석	99
1. 시뮬레이션	99
2. 시뮬레이션 결과 검토	101
VII. 결 론	103

참 고 문 헌

LIST OF TABLES

Table 2.1 Overvoltage of AC Rail System·····	4
Table 3.1 Body Current by Reaction·····	26
Table 3.2 Risk Degree of Current Path·····	27
Table 3.3 Condition of Period ·····	41
Table 3.4 Allowable Touch Voltages at the Short Time·····	42
Table 3.5 Allowable Touch Voltages at the Temporary Condition·····	42
Table 5.1 Results of Measurement(Normal Operation)·····	59
Table 5.2 Measurement of Tests·····	68
Table 6.1 Line Characteristics of AT System·····	80
Table 6.2 Conditions of Calculation·····	82
Table 6.3 Constants of Circuit ($\rho=100$ [Ωm])·····	84
Table 6.4 Constants of Line(Self Impedance) ($\rho=100$ [Ωm])·····	85
Table 6.5 Maximum value of Rail Potential ·····	92
Table 6.6 Results of Potential Distribution·····	98

LIST OF FIGURES

Fig. 2.1. Process of Lightning	5
Fig. 2.2. Kind of Lightning by Process	6
Fig. 2.3. Phase-to-ground Fault in 3-Phase System	9
Fig. 2.4. Ground Fault of Power System	10
Fig. 2.5. Propagation of Abnormal Voltage	13
Fig. 2.6. Reflection of Traveling Wave	14
Fig. 2.7 Grounding Conductor of S/S	21
Fig. 2.8 Protective Device of Substation	22
Fig. 3.1 Threshold Current for Safety	28
Fig. 3.2 Fibrillating Current vs Body Weight	29
Fig. 3.3 Comparison of Current and Time	30
Fig. 3.4 Time/Current Zones of Effects on Persons	32
Fig. 3.5 Distribution of Surface Potential of Mesh Electrode	33
Fig. 3.6 Equivalent Circuit of Touch and Step Voltage	37
Fig. 3.7 Protection by Clearance	40
Fig. 3.8 Standing Surface for Persons to live parts	40
Fig. 3.9 Construction of Common Grounding	44
Fig. 3.10 Grounding System by KS C IEC62128-1	45
Fig. 4.1 Point Electrode and Image in Soil	49
Fig. 4.2 Linear Electrode in Soil	51
Fig. 4.3 Arbitrarily Arrangement of Linear Conductor	53

Fig. 5.1 Diagram of Measurement	57
Fig. 5.2 Results of Ground Potential(No-load)	58
Fig. 5.3 Results of Ground Potential(KTX)	58
Fig. 5.4 Results of Ground Potential(Normal Car)	59
Fig. 5.5 Concepts of Tests	61
Fig. 5.6 Diagram of Measurement	62
Fig. 5.7 Potential Distribution(Ground-Fault)	63
Fig. 5.8 Potential Distribution(Ground-Fault)	64
Fig. 5.9 Comparison of Potential Distribution	65
Fig. 5.10 Comparison of Potential Distribution for Box	65
Fig. 5.11 Potential Distribution(Rail-Earth)	66
Fig. 5.12 Potential Distribution(F-GV 70mm ²)	67
Fig. 5.13 Potential Distribution(CU 35mm ²)	67
Fig. 5.14 Potential Distribution(Solid grounding)	68
Fig. 5.15 Diagram of Test	70
Fig. 5.16 Potential Distribution(MCB close)	72
Fig. 5.17 Potential Distribution(MCB on)	73
Fig. 5.18 Potential Distribution(MCB open)	74
Fig. 5.19 Potential Distribution(no Voltage)	75
Fig. 6.1 Concepts of Faults of Power system	78
Fig. 6.2 Diagram of Railway Power System	79
Fig. 6.3 Standard of Pole at AT Power system	80
Fig. 6.4 Equivalent Circuit of Power System	82
Fig. 6.5 Thevnin's Equivalent Circuit	84

Fig. 6.6 Railway Line for Simulation	85
Fig. 6.7 Soil Leakage Current Distribution	86
Fig. 6.8 Surface Ground Potential by Distance	86
Fig. 6.9 Distribution of Rail Potential(Two Counterpoise)	87
Fig. 6.10 Distribution of Fault Current(Two Counterpoise)	88
Fig. 6.11 Distribution of Rail Potential(one Counterpoise)	89
Fig. 6.12 Distribution of Fault Current(one Counterpoise)	89
Fig. 6.13 Distribution of Rail Potential(one Counterpoise)	90
Fig. 6.14 Equivalent Model of Bridge	91
Fig. 6.15 Distribution of Fault Current(Bridge)	91
Fig. 6.16 Sample of Grounding System	93
Fig. 6.17 Variation of Grounding Resistance	94
Fig. 6.18 Variation of Maximum Potential	95
Fig. 6.19 Potential Distribution(C-2, Distance 50[m])	96
Fig. 6.20 Potential Distribution(C-2, Distance 200[m])	96
Fig. 6.21 Potential Distribution(C-1, Distance 50[m])	97
Fig. 6.22 Potential Distribution(C-1, Distance 200[m])	97
Fig. 6.23 Potential for Single-Layer	99
Fig. 6.24 Potential for Two-Layer	100
Fig. 6.25 Touch Voltage for Single-Layer	100
Fig. 6.26 Touch Voltage for Two-Layer	101

ABSTRACT

A Study on the Common Grounding System for the Abnormal Voltage Countermeasure of the Electric Railway

Lee YongMi

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

Department of Electrical Engineering,

Graduate School of Chosun University

Grounding is the establishment of a common reference voltage (typically 0 [V]) between power sources and/or electrical equipment. Electrical ground faults, short circuits, lightning, and transients can occur in electrical power supply and distribution system or the facilities power systems. These design criteria specify requirements for the protective provisions relating to electrical safety in structures associated with the traction system and to any structures that may be endangered by traction power supply system or the facilities power system, and to any automatic train control, communications, or other electronic equipment that must be protected from electrical shocks.

Grounding, bonding and lightning protection shall be designed to address three purposes : personal safety; equipment, cabling and building protection; and equipment noise reduction. In principle, to assure the integrity of the grounding and

bonding systems and the longevity of the system components, particularly for buried or encased elements, the bonding and grounding designs shall create duplicate electrical continuity paths and provide for redundancy in jumpers and bonds.

Grounding, bonding, and lightning protection is multi-disciplinary in nature. The design shall consider and mitigate the negative effects of lightning, grounding potential rise, contact with electrical power circuit, and induction. The various discipline designers must collaborate with one another to coordinate the overall grounding and bonding design, so that a consistent approach is used and applied by each discipline in the development of the electrical, power and structural grounding and bonding and lightning protection.

I. 서 론

전력설비에서 전기에너지를 사용하는 과정에서 인축이나 기타 설비에 관하여 피해를 가할 경우, 혹은 설비의 외부로부터 전력설비가 손상을 입을 우려가 있는 경우에 대비하여 보호설비를 설치하게 되며, 특히 전력설비의 고장이나 낙뢰 등으로 인한 이상전압의 발생에 대한 보호설비가 접지시스템(Grounding system)이다. 전력설비에서 고장이나 낙뢰현상은 필연적으로 일어나게 되며, 특히 지락고장 발생 시 접지전극을 통하여 고장전류가 대지로 흘러가게 되고 전기설비 구내 및 주변설비에 전위차가 발생하게 되어 설비 내 및 주변설비에 위치하는 인체 및 안전 설비의 절연에 관련하여 위험을 초래하게 된다. 최근 전력 수요가 급속하게 성장함에 따라서 전력설비도 증대되는 추세이며, 전력설비의 고장용량도 증가 및 고장전류에 의해 대지전위의 상승이 커져 인체와 설비의 안전 및 절연 등에 미치는 위험도 증대되고 있다. 이러한 위험에 대비하기 위한 접지시스템 구축의 목적은 전기설비 주변에 위치하는 인체 등의 감전사고 방지 및 전력기기의 손상을 방지하기 위한 것으로 기본적인 대지표면의 전위상승을 억제하여야 하며 전위경도를 작게 하여야만 효과적이다. 따라서 같은 크기의 고장전류가 흐른다면 접지전극의 접지저항 크기와 대지표면의 전위상승도 비례적으로 작게 나타날 것이며, 따라서 대지표면의 전위경도도 작게 되어 안전성은 물론 전력기기의 동작 확보에 의한 안전성 또한 확보할 수 있다. 그러나 인체 및 동물 등의 대형 접지전극 부분에서 접지저항의 크기의 안전성을 평가하는 것에는 감전사고 방지의 목적을 위해 효과적이지 못하다[1]~[7].

전기철도의 급전계통에서도 고장은 상시로 일어나는 것이며, 지락고장 등에 의한 이상전압이 발생하면 전기철도 급전계통의 내부 및 주변의 신호·통신설비 등에 전위차가 발생하여 인체 감전사고발생 및 설비의 오동작 운용에 이상을 발생시키게 된다. 최근 전기차량의 출력 증가로 인한 전력수요가 급속하게 증가함에 따라 고장전압 및 전류에 의한 용량도 증가하여 대지전위의 상승폭이 커지게 된다. 이러한 위험성을 방지하기 위해 전기철도설비의 접지시스템으로서 이에 적합한 접지시스템을 구성하여 대지전위의 상승 억제 및 고장 전압에 의한 고장전류의 크기 제어 등의 대책이 시급한 현실이다.[11]~[15].

현재 국내 철도노선에 공통접지방식의 접지계통은 각각의 설비들을 공통으로 연결하여 설치·운용함으로써 상호 문제점이 발생할 가능성이 낮으며, 효율적인 접지효과를 기대할 수 있고 전차선로 및 고압배전선로에서 지락사고가 발생하는 경우, 대지전위의 상승으로 원격제어설비, 통신, 신호등 약전계통에 relay 및 전자장치 등으로 유입되어 오동작 및 소손 사고 등의 피해가 발생할 것이다.

따라서 본 논문에서는 전기철도 급전계통에서 인명사고 및 설비를 보호하기 위해 시설된 접지설비 운영실태 등을 조사·분석[11]~[15]하고 철도시스템의 이상전압에 대한 문제의 종합적인 검토를 위한 철도시스템에서 이상전압의 발생, 미치는 영향 등을 분석하였다.

철도 시스템에서 발생하는 지락 및 낙뢰사고 등 다양한 사고 사례를 바탕으로 이상전압 발생현황 및 메카니즘을 분석[28]~[37]하고, 접지계통에 끼치는 영향의 규명 및 기존의 문제점들을 분석하여 전위상승의 문제점을 최소화할 수 있는 대책을 제시하기 위해 지락사고시 대지에 방전되는 고장전류 전위상승 값을 예상하여 이를 바탕으로 주변기기 및 보호계통 기기에 가해지는 전위차가 오동작 및 손상을 미치지 않는 범위 내로 유지될 수 있는 공통접지시스템을 구축하는 방안[33]~[41]을 제시하였다.

II. 철도 급전계통에서의 이상전압

전기철도에서 전기설비는 가공전차선로, 전기차량 및 레일로 구성되는 고전압 전력급전계통과 계전기를 이용한 신호궤도회로, 전철기, 본드 및 각종 열차통신을 위한 각종 무선설비 및 통신·제어 설비 등 기타 사용되는 고압 배전선로 등의 전압계급이 다른 여러 전기설비로 구성되어 있다.

특히 전기철도의 급전계통은 대지와 불완전한 절연의 레일이 포함되어 있으며 전기철도 설비의 절연은 충분한 절연거리 확보가 어려우므로 절연수준도 일반 전력계통의 송전선로 등과 비교하면 절연수준이 낮은 수준으로 설계되어 있는 레일에 따라 통신기기 및 신호기기가 배치되어 있다는 점이 특징이다. 따라서 낙뢰의 발생에 의한 서지 전압에 의하여 가공선로 및 고압 회로측의 절연과괴사고와 뇌격전류가 레일이나 접지계통으로 흘러서 신호회로 혹은 통신회로 및 저압회로 등으로 피해가 확산될 수 있다.

최근 철도시스템의 인텔리전트화와 함께 신호궤도회로 설비, 통신설비는 기본이고, 전철변전소 및 배전선로 등의 전력제어에 대한 디지털화가 진행되고 있으며 다수의 전자장치들이 철도연변에 설비되어 있어 이에 관한 보호대책이 요구된다.

전기철도 급전계통의 전기적인 절연은 상시적으로 급전전압에 견뎌야 하며 전차선 지락사고 개폐 서지에 의한 이상전압 및 뇌에 의한 외부 이상전압에도 견뎌야 하며, 정상전압을 초과하는 큰 이상전압에 대하여 피뢰기, 가공지선, 보호선, 방전설비 및 매설접지, 매시접지, 공용접지 등을 이용하여 이상전압 저감을 위한 회로의 합리적인 설계를 구성 하고 있다.

전기철도의 급전계통에서 발생하는 이상전압에 대해서 교류 방식의 사례를 표 2-1에 정리하였으며 전기철도의 급전계통에서 발생하는 내부 서지는 비교적 낮으며 절연설계에 있어 주로 뇌 서지에 대하여 고려한 후 전기철도의 가공선로와 급전선 등의 지상높이는 가공선로에 발생하는 낙뢰를 바탕으로 하는 과전압은 표 2.1의 값을 적용하여 기준 한다.

Table 2.1 Overvoltage of AC Rail System

항 목		Maximum operating voltage	Over voltage drain	Over voltage(kV)
개폐 서지에 의한 이상전압		27.5[kV]	2.0 ~ 2.5	60 ~ 70
팬터그래프의 이선 등에 의한 이상전압			1.5 ~ 2.0	40 ~ 60
뇌 서지 전압	유도뢰		3.6 ~ 5.5	100 ~ 150
	직격뢰		11 ~ 88	300 ~ 500
전차선로의 진행파 전압			애자의 flashover 전압	250 ~ 300

전기철도의 급전계통에서 발생하는 이상전압에는 기준도 및 파고치가 대단히 큰 것도 있어서 변전소의 각종 기기 및 모선 지지애자 등의 절연내력을 모든 이상전압에 견디도록 설계한다는 것은 경제적인 관점에서 곤란하다.

따라서 이들 이상전압에 대하여는 특별한 보호 장치를 설치하거나 또는 절연에 대한 안전한 정도까지 이상전압의 기준도 및 파고치를 저감시켜 그 이하의 이상전압에 대해서는 충분한 절연내력을 갖도록 설계한다.

전기철도시스템의 급전계통에서 발생하는 이상전압은 외부 이상전압(외뢰)과 내부 이상전압(내뢰)으로 나누어진다.

외부이상전압은 뇌(雷)로 인해 발생하는 것으로 뇌의 직접적인 전격에 의한 충격성 이상전압으로 직격뢰 및 뇌운(雷雲)의 정전유도에 의한 유도뢰가 있다. 내부이상전압은 순간적으로 혹은 단속적으로 정상적인 운전 전압을 넘어서 발생하는 이상전압으로서, 과도 및 지속성 이상전압이 있다. 상용주파의 지속성 이상전압은 1선 지락시 전위상승, 서지전압, 소호리액터 접지 계통 직렬공진, 부하차단시 발전기의 전위상승 등이 있고 과도 차단기 개폐 시 발생하는 개폐서지 및 아크지락, 간헐성 아크지락시에 발생하는 과도 이상전압이 있다.

A. 이상전압의 종류

서지현상은 전기철도 선로에서 발생할 수 있는 급전계통에 이상전압 발생의 주원인이 되고 인체의 감전사고 등으로 이어지는 이상전압은 계통 및 기기의 절연과괴로 이어지며 서지의 발생원인에 따라 외부 및 내부 이상전압으로 분류할 수 있다. 외부이상전압인 외뢰(外雷)는 직격뢰, 유도뢰로 나눈다. 또한, 내부 이상전압인 내뢰(內雷)는 지속적인 내뢰와 과도적인 내뢰로 나눌 수 있으며 과도적인 내뢰는 고장시의 과도적인 이상전압과 개폐시의 과도적인 이상전압(개폐서지)으로 나눌 수 있다.

1. 외부 이상전압 : 외뢰

낙뢰는 전하가 축적되는 구름 속에 발생된 뇌운에 의하여 전하의 방전현상이며 아래 지표면에는 전하가 축적된 뇌운이 형성되어 하부 전하와 반대 극성인 전하가 유기되며 두 전하측간 전위 강도가 증가하여 공기 절연 파괴 내력 초과시 불꽃 방전이 발생하는 낙뢰가 발생한다. 낙뢰의 진행 과정 특성을 나타낸 것이 그림 2.1이다.

그림 2.1(a)는 낙뢰의 진행 과정을 회전형 카메라에 의해 촬영한 것을 나타내고 있으며 시간에 따라 좌에서 우로 진행되는 뇌격을 촬영 하고, 그림 2.1(b)는 이것을 정지형 카메라로 촬영한 것이며 그림 2.1(a)와 같이 뇌격은 구름에서 빛이 약한 선구 방전 및 선행방전이 발생하여 대지로 향하게 된다.

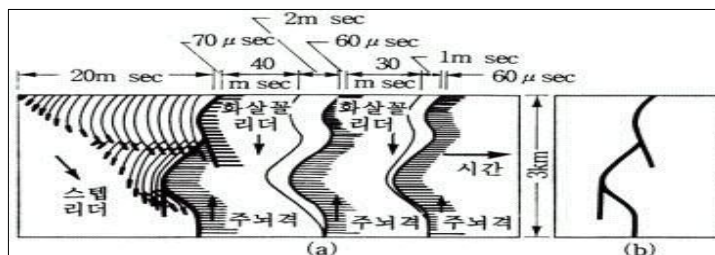


Fig. 2.1. Process of Lightning

그림 2.1(a)과 같이 선행방전의 선단이 대지에서 스트리머가 발생하여 양자가 결합하는 순간 대지로부터 주뇌격인 주방전, 귀환뇌격이 된다. 뇌운으로부터 대지로 향하는 선행방전은 단계적으로 진행하게 되고 이를 스텝리더 즉 계단형 선행 방전이라 하며 일반적으로 스텝리더는 뇌운내의 양전하 및 음전하 지역에서 국부적인 절연파괴로 시작 되며 대지로 접근하면 상향 방전을 통한 전하가 방전로 중 하나가 스텝 리더 선단과 선행 방전로에 주입되어 결합한다.

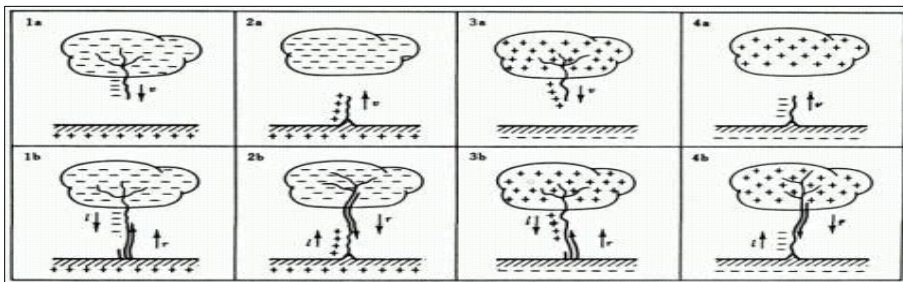


Fig. 2.2. Kind of Lightning by Process

그림 2.2는 주방전 진행 방향, 뇌운 극성에 의한 낙뢰분류를 나타내었으며, 상향 방전 중 스텝리더 선단과 결합 시 선단 부근은 대지전위와 같아지며 남은 부분의 선행 방전로는 음전하로 대전된다. 선행 방전로는 주뇌격의 강한 빛을 통과시키는 전송로로 작용하며 주 뇌격의 파동 값과 대지 사이에 대 전류가 흐르게 되고 선행 방전로의 상단에 분포한 음전하는 뇌격의 하단의 도전성 방전로를 통해 대지방향으로 하강하게 된다.

직격뢰 및 유도뢰는 뇌격을 받는 방법에 따라 분류할 수 있으며, 뇌방전의 주방전이 직접 뇌격을 일으키는 직격뢰를 의미하며, 직격뢰의 뇌격에 의해 고전압이 유기된 경와 뇌 방전에 의해 주위에 유기된 고전압에 의한 유도뢰의 경우로 분류된다.

a. 직격뢰에 의한 서지

선로 도체에 뇌 서지가 침입하는 경우로서 역섬락, 경간 역섬락 등이 있으며 선로 도체에는 매우 높은 서지과도전압이 발생한다.

(1) 섬락(flash over)

애자 등 절연지지물은 직격뢰를 받으면 뇌 전압에 파괴되는 현상이 발생하며 인접전주에서 연속적으로 일어나는 섬락 후의 파이전압이 높을 경우가 있다. 선로 도체에 애자의 섬락전압으로 결정되는 뇌 서지가 선로에 침입되어 진행하게 되는 직격뢰를 받게 된다.

(2) 역섬락(reverse flash-over)

가공공동지선 및 철탁의 낙뢰가 있는 경우 접지저항이 높으면 철탁의 전위가 상승하여 애자에 역섬락이 발생하여 선로도체에 서지가 침입하게 된다.

$$V_0 = I_L(K - C)Z_T + E \quad (2-1)$$

$$I_L = \frac{V_0 - E}{(K - C)Z_T} = \frac{kV - E}{(K_C)Z_T}$$

여기서,

- V_0 : 아크혼의 Flash-over 전압[kV]
- I_L : 역섬락 발생전류[kA]
- V : 아크 혼의 50% flash-over 전압[kV]
- E : 교류전압 파고치[kV]
- k : 보정계수(보통 1.193)
- K : 금속 지지물내 전위상승률
- C : 가공지선과 선로도체와의 결합율
- Z_T : 금속지지물 전위상승 임피던스[Ω]

(3) 경간 역섬락

배선 경간 중앙부측의 가공공동지선이 전격을 받았을 경우 선로도체에 대해 직접 역섬락으로 인한 선로도체에 서지가 침입한다. 가끔 급파두 준도의 낙뢰가 경간의 중앙에 위치해 있을 때 금속지지물에서 반사파가 들어오기 전에 낙뢰점의 전위가

상승함으로 가공지선에서 역섬락이 선로도체를 향해 발생하게 된다. 경간의 가공공 동지선 및 선로도체의 절연거리를 충분히 확보한 후에 차폐가 양호하도록 한다.

$$E_m = \frac{l}{300} \left(\frac{Z}{2} \right) S \quad [\text{kV}] \quad (2-2)$$

여기서,

E_m : 최대전압[kV]

S : 전격(電擊)의 파두준도[kA/ μ s]

Z : 가공선의 서어지 임피던스[Ω]

l : 경간거리[m]

b. 유도뢰에 의한 서지

뇌운에서 대지와와의 방전 및 또는 뇌운간의 방전에 의해 서지가 선로도체에 생기는 경우와 선로도체로 침입하는 서지는 선로도체의 상공에 뇌운이 발생하여 정전 유도로 인한 전하가 선로도체에 발생한 후에 선로도체의 대지쪽에 생긴 전하는 누설저항 또는 중성점을 통하여 대지로 흐르므로 도체의 뇌운에 가까운 쪽에 생긴 뇌운에 의해 구속 전하가 뇌운의 방전 현황에 따라 발생하며 이와 같은 선로도체와 대지간에 생기는 전위차가 유도뢰이다.

$$V = \alpha E_0 h \quad [\text{kV}] \quad (2-3)$$

여기서,

V : 최고전위[kV]

E_0 : 뇌방전 지표면 부근의 뇌운에 의한 전위경도 [kV/m]

h : 선로도체의 지상높이[m]

α : 구속전하 및 뇌방전 상황에 따라 정해지는 정수(경합계수) < 1

2. 내부 이상전압 : 내뢰

전기철도 급전시스템 설비 내에서 발생하는 이상전압 및 서지로서, 차단기 등의 개폐에 따른 과도 이상전압과 공진현상 등에 의한 지속성 과전압으로 분류된다.

a. 지속성 서지

지락사고에 따라 페란티 현상, 전위상승, 공진현상 및 부하차단 등이 있고, 전철급전회로에서 발생하기 쉬운 지락사고에 따른 전위상승과 공진현상이다. 3상 송배전계통에서는 중성점 저항접지방식 및 또는 비접지방식의 경우 3상 중 1상에 1선지락이 생기면 건전 선로의 대지전위는 최대로 정상시의 $\sqrt{3}$ 배로 상승하는 것으로 그림 2.3과 같이 알려 지고 있다.

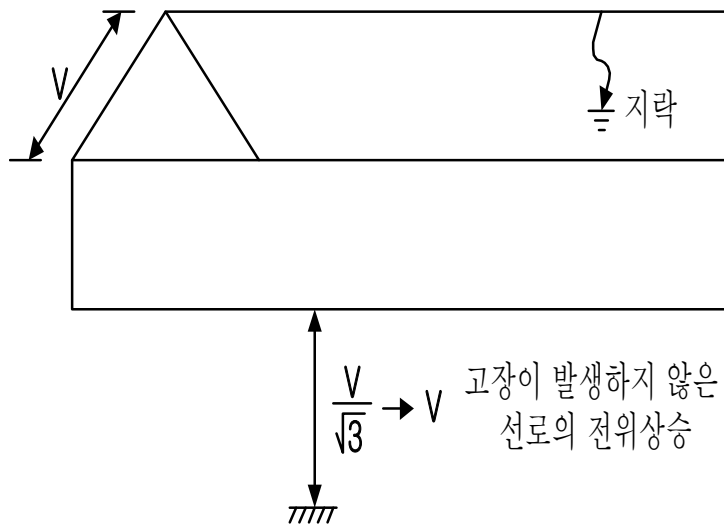


Fig. 2.3. Phase-to-ground Fault in 3-Phase System

전기철도에서는 레일과 전차선간에 부하가 있는 단상 교류 및 직류회로로 구성되어 있고 회로에는 대지간의 절연은 고압회로의 절연과는 다른 접지설비가 없는 급전회로는 레일의 누설저항에 의한 저항접지시스템으로 볼 수 있다.

대지전압은 공칭전압의 송전계통의 대지전압보다도 $\sqrt{3}$ 배 높은 1선 지락 전위

상승 값의 전압이 된다.

따라서 전기철도 급전회로설비에서 그림 2.4와 같이 전차선 지락사고가 발생한 경우, 전차선측의 대지전압은 지속적으로 낮아지므로 고압측에 과전압이 발생할 위험은 없으며, 레일의 대지전압 상승 또는 지락점 부근의 대지전압의 상승과 같은 현상이 발생하기 때문에 선로에 시설되어 있는 약전회로인 신호·통신설비와 같은 절연협조가 필요하다.

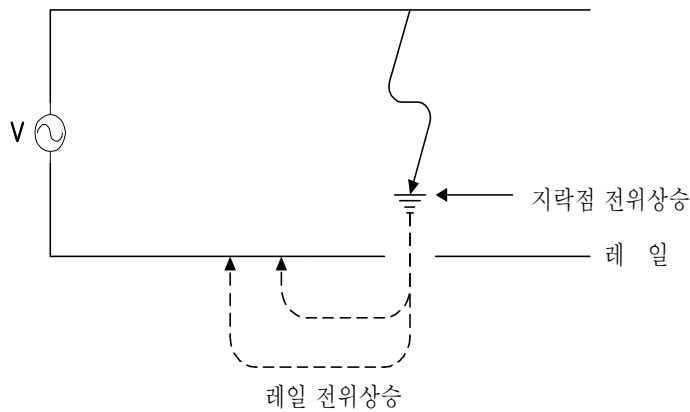


Fig. 2.4. Ground Fault of Power System

전철급전회로는 인덕턴스 및 정전용량이 존재하기 때문에 정전용량에 축적된 정전 에너지와 인덕턴스에 축적된 전자적 에너지가 서로 교차하는 현상이 발생한다. 인덕턴스와 정전용량이 에너지를 서로 교차하여 주고받는 주기에 맞춰 외부에서 에너지가 공급되면 LC간에 진동에너지는 증가하고 이에 따라 과전압이 발생하면서 전철급회로에서 고조파에 의해 발생하는 공진현상이라 한다.

b. 개폐서지

개폐서지는 낮은 과고값의 뇌서지에 비해 계속시간이 수 ms로 길기 때문에 기기의 절연에 큰 영향을 준다.

(1) 무부하 선로의 개폐서지

최대값 E_m 일 때의 교류전압은 투입 시 선로 끝부분에 변압기 등 기기가 접속 되었을 때, 서지 임피던스 측에서 개방단과 같으며 전압 파는 양의 반사로 인해 2배 값인 투입 서지는 E_m 이 되지만 고속도 재투입일 경우 및 선로에 역극성의 전하가 남아 있을 경우 높은 서지가 발생하는 경우도 있으며, 차단기로 무부하 선로의 충전 전류는 위상이 90도 전압보다 앞서고 전압은 전류 영점에서 최대값인 E_m 이 되는 선로에 전압이 잔류하게 된다.

반 사이클 후에는 극간 $2E_m$ 인 전압으로 인해 절연회복이 충분하지 못한다면 재점호가 발생하고 전원전압으로 잔류전압이 급격히 되돌아가려고 진동을 일으켜 최대 $3E_m$ 에 이르는 서지를 발생하며, 전원에서 진동성 충전전류가 선로를 흐르고 전류 영점(zero)에서 충전전류 차단이 이루어진다. 차단기의 절연 회복이 불충분할 때는 재점호 현상이 발생하게 되며 차단과 재 점호를 반복하게 된다면 잔류전압은 점차 증가하여 큰 서지가 발생하게 되며 최대 4배 이상인 경우도 있다. 콘덴서형 계기용 변압기 및 무 부하선로의 충전전류를 차단기로 차단하기 위해 재점호 및 차단이 반복되는 차단기 개폐서지가 발생하게 되며, 단로기의 개폐 속도는 차단기 보다 늦으므로 재점호를 반복하여 서지의 발생횟수가 많아 대개 2~3배에 이르는 경우도 있다.

(2) 유도성 소전류 차단

서지는 가스차단기, 공기차단기, 진공차단기를 사용해서 변압기의 무부하 여자 전류로 인해 전동기 측의 지연전류를 차단할 때 발생하며, 지연 소전류를 차단에서 영점이 되지 않는 지점에서 전류 차단 및 강제차단 할 때 발생하는 개폐·투입서지이다.

$$v = \sqrt{\frac{L}{C} i_0^2 + e^2} \approx \sqrt{\frac{L}{C}} i_0 \quad (2-4)$$

여기서, L : 코일의 등가 임피던스

C : 코일의 등가 캐패시턴스

i_0 : 순간 전류차단 값[A]

e : 순간 부하측의 대지전압[V]

$\sqrt{\frac{L}{C}}$: 서지 임피던스

전류의 재 차단으로 인해 서지가 발생하였을 경우 차단기의 극간 절연이 충분히 확보되지 않을 경우 재 발호 및 소호가 되며, 단시간에 의해 반복될 경우 반복 재 발호 서지가 발생하게 되며, 재발호시 회로에 흐르는 고주파전류가 강제적으로 전류를 영점(zero)값을 만들기 때문에 고조파 소호가 원인이며, 최대 5~6배가 되는 경우가 있으며, 기기의 여자 및 기동시 돌입전류, 전력변환장치 작동시 발생하는 서지, 콘테서, 충전기기의 충전시 발생하는 서지, 고조파 발생기기의 작동시 발생하는 서지 인해 발생하는 서지 등이 있다.

B. 이상전압의 특징

서지 전압은 전압 상승속도가 급격히 빠르고 유도뢰에 의한 서지 전압은 0V에서 최대치에 도달하기까지의 시간은 $2\sim 10\mu s$ 정도이며 전기가 전달되는 속도는 $300m/\mu s$ 이며, 그림 2.5와 같이 변화하는 전압은 이 시간영역에서 진행파로서의 성질을 가지고 있다.

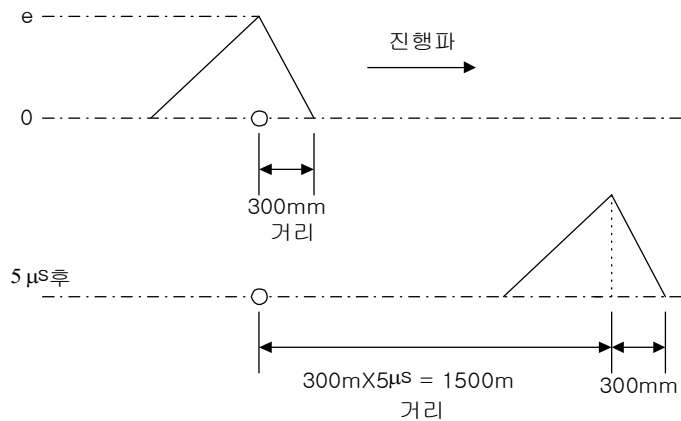


Fig. 2.5. Propagation of Abnormal Voltage

예로서 $1\mu s$ 에서 전압이 최대치 $e[V]$ 의 서지 전압은 전하 집단이 선로측으로 진행하는 현상이며, 전하량을 $i[A]$ 라 했을 때 $Z_0 = e/i$ 를 서지 임피던스라 한다. 교류회로의 임피던스와는 다른 서지 임피던스는 선로의 길이에 관계되어 $Z_0 = \sqrt{L/C}$ (선로저항 R 은 무시)로 결정되는 값이며 선로상의 서지 임피던스 $200[\Omega]$ 은 $200[A]$ 의 서지 전류가 진행시 $200[\Omega] \times 200[A] = 40[kV]$ 의 전압이 대지에 발생하고 진행파는 선로의 말단과 접속점에서 반사현상을 일으킨다. 특히 전압이 2배로 상승하는 선로 말단부근에서는 반사현상에 의한다.

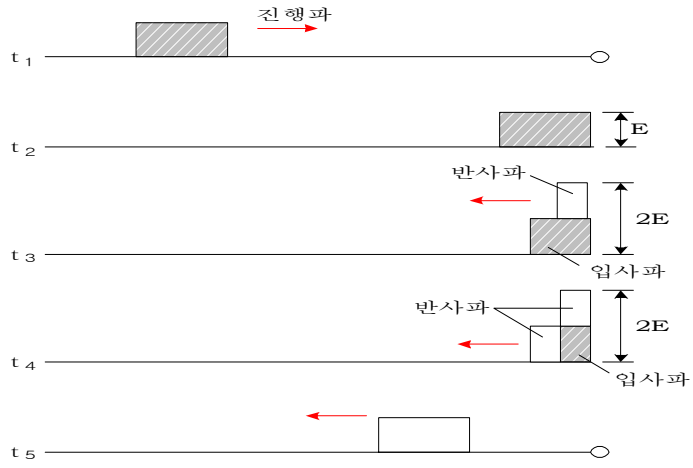


Fig. 2.6. Reflection of Traveling Wave

C. 서지의 영향

전기철도의 급전계통에 서지가 발생하면 이상전압과 고조파를 동반하게 된다. 급전계통에서 기기 등의 절연열화 및 절연파괴를 유발하게 되므로 부득이한 운전 정지의 경우가 발생하고 2차적으로 승객에 대한 서비스의 저하를 가져오게 된다. 특히 최근에는 신호·통신설비 등 전차시스템 등이 전자화되어 고품질 및 신뢰성, 경제성 등이 있는 전력의 공급을 요구하고 있고 또한 고조파의 영향이 매우 높음으로 서지의 영향에 대한 대응책이 절실히 요구되고 있다.

1. 급전계통의 영향

서지전압은 급전 계통에 있어서 상용주파수 운전전압에 의한 지속적으로 전기적인 영향을 받고 있으며 서지전압의 원인에 의한 급전계통의 설비 기능을 정지시키는 정상전압을 초과한 순간적으로 발생하는 충격적인 스트레스를 받을 수 있고 지락 등의 발생에 의한 인명에 치명적인 영향을 줄 수 있다.

또한 절연파괴가 되지 않더라도 급전계통 설비의 절연열화 및 전기적인 스트레스를 통해 계통에 피로를 주는 경우가 있으며 회로의 오동작 원인이기도 한다.

2. 기기에 대한 영향

이상전압은 전차선 및 신호선을 따라서 반사 또는 감소 등을 반복하면서 파급되어 계통에 연결되며, 주변에 있는 신호기기, 통신기기, 전력기기 등에 침입하여 기능을 저하시키거나 오동작의 원인이 된다. 최근 신호·통신 기기 등의 다양한 첨단 반도체가 사용되고 있으며, 전력용 제어회로 및 저압회로 등에 여러 과도서지로 인한 영향이 지속적으로 나타나며 과도전압에 및 고조파에 의한 서지의 영향이 있는 것으로 구분된다.

과도 서지전압에 의해 애자의 열화 또는 파손, 지지물의 손상, 전력기기의 절연파

피, 순시전압강하 등으로 인한 전력변환장치의 운전정지 또는 소음·과열, 전자장비의 오동작을 발생시키며, 계통의 공진현상으로 인한 진동·소음·과열 등의 콘덴서의 과열, 계전기 및 통신선로의 유도 장애 및 기기의 오동작, 고조파 성분의 전압 왜곡이 심각해지면서 전자기기의 오동작 및 수명과 성능을 저하 시키는 등을 발생하는 고조파로 인한 영향이 있다.

3. 직격뢰에 의한 영향

낙뢰가 선로에 침입 시 전압은 먼저 그 선로의 고유한 임피던스(서지 임피던스)에 의해 결정 되며, 전류(I)는 처음 두 부분으로 나누어지며 서지전압(U)이 다음과 같이 생성 된다.

$$U = Z \times I/2 \quad (2-5)$$

여기서, U : 서지전압[kV]

Z : 그 선로의 서지 임피던스[Ω]

I : 서지전류[KA]

만약 10 [KA]의 낙뢰전류 및 400 [Ω]의 서지 임피던스를 가정한다면 직격뢰에 의한 서지 전압은 2,000 [KV]가 되며, 10 [Ω]의 낮은 실효 임피던스에 대해 10 [KA]의 뇌격 전류를 가정하여 선로의 전압은 100 [KV]가 된다. 따라서 전기철도의 급전계통에서 직격뢰는 일반적으로 시스템 손상 및 오동작을 일으키며, 절연 수준을 초과하는 과전압을 일반적으로 피해를 줄이기에는 어렵다.

직격뢰는 기준도 및 파고치가 가장 크며 급전계통 및 급전소의 절연내력이 이에 대응할 수 있도록 설계한다는 것과 피뢰기 등으로 완전히 보호한다는 것은 현실적으로 불가능하다. 그러므로 급전계통의 변전소와 같이 직격뢰를 받을 가능성이 있는 장소 및 변전소 자체는 물론 약 1 [km] 범위내에 가공 급전계통에 대해 가공지선을 설치하고 그 것을 다중 연결 접지해서 그 접지저항을 극력 저하시켜 직격뢰의 변전

소 침입을 방지한다. 그러나 고압의 낙뢰가 장치에 직접 떨어지는 직격뢰 및 어떠한 이상전압 및 낙뢰로부터 보호시스템의 민감한 전자부품을 완벽하게 보호하기는 어려울 것이다.

직격뢰 또는 유도뢰에 의한 신호 및 통신케이블은 높은 뇌서지 전압이 발생하며, 신호장비의 소손이나 오동작이 증가하고 있는 추세이다. 근접한 거리에서 발생한 낙뢰로 인해 발생하는 과도과전압 및 서지의 침입으로 ATP용 LEU의 서지보호기가 손상되거나, 변압기 및 신호전원실 배전반 판넬의 LEU 배선용 차단기가 소손되는 경우도 있었다.

D. 이상전압의 영향과 접지시스템

철도 시스템에서 직격뢰 및 유도뢰가 가공지선 또는 전차선에 침입하게 되며 전기철도의 전력 급전 설비, 철도 시스템의 전기 기기 및 Standby 장비들을 낙뢰로 인해 발생하는 전류가 파괴할 수 있으나, 서지 피뢰기를 사용하여 낙뢰로 인해 발생하는 전류를 대지로 흐르도록 유도할 수 있다. Standby 모드를 위해 설치된 철도 시스템에서 매우 낮은 임피던스를 갖는 축전기로 고주파 과전압 천이에 대단한 효과를 기대할 수 있는 Standby 충격 흡수 장치로 작용한다.

가공지선은 각각의 전차선주를 통해 접지시스템에 연결되며, 트로프에 설치된 관 내부의 통신 선로 및 신호에 영향을 끼칠 수 있는 전자파에 의한 문제점을 생성할 수 있는 낙뢰 전류는 접지 케이블 연결망을 통해 흐르게 된다. 철주, 전차선주, 전차선, 공중보호선, 선로를 포함한 전기 철도 시스템의 광범위한 접지시스템에 의해 거의 발생하지 않을 것으로 예측되며, 선로에 설치된 통신소 및 신호소 또는 전기철도설비가 설치된 장소에도 낙뢰에 의한 충격의 영향을 받을 수 있다. 낙뢰로부터의 보호시스템구성은 서지 피뢰기, 낙뢰 피뢰침, 접지시스템 등으로 지붕에 설치되는 직접 도선을 통해 접지시스템에 연결된다.

접지시스템은 공동 접지 및 단독 접지로 분류되며, 유지보수 요원 보호 및 철도 시스템 설비 보호는 과전압 및 낙뢰 등으로부터의 중요한 역할을 하게 된다. 부분적으로 차폐 변압기, 서지피뢰기 등도 낙뢰에 의한 보호 작용을 실행할 수 있지만, 유지·보수 요원 피해 및 전기철도설비의 보호 시스템이 여러 다양한 특수 규정에 부적합할지라도 낙뢰, 과전압, EMI로부터의 유지·보수 요원 및 설비 보호를 위한 가장 중요한 방안은 접지시스템 구성 방식과 함께 고려되어야 하며, 최초로 공동 접지방식을 사용하여 낙뢰로부터의 피해를 최소화한 프랑스 철도청에서 검증 및 규정한 전기철도 시스템이다.

과전압 및 낙뢰로부터의 유지·보수 요원 보호를 위한 시스템의 원리는 낙뢰가 발생한 경우 근접한 경로를 통해 낙뢰 전류를 접지시스템으로 유도하기 위한 통로 구성을 의미하며, 제거하거나 유도할 수 없기 때문에 낙뢰 전류를 간단하게 차단

하고 별다른 문제점 없이 접지시스템으로 전송해야 하고, 유지·보수 요원 보호는 유럽 EN50122.1에 표기되어 있다.

유럽 규정 EN50122.1에서는 예를 들어 1000 [V]의 전압이 인체에 감전된 경우 경과 시간이 0.05초 이하에서 유지·보수 요원의 안전을 보장하며 시간에 대한 전차선 전류 감전 전압을 나타내고 감전 시간이 길수록 감전 전압은 최소화 되어야 인명 피해를 최대한 감소시킬 수 있음을 확인할 수 있다. 현재 사용하고 있는 유지·보수 요원 보호 관련 유럽 규정(EN50122.1)에 의거, EMI로부터의 신호 시스템 보호, 접지시스템 구성, 신호기계실 접지시스템 설계, 낙뢰 보호 장비 및 원리 등은 이러한 규정을 충족시키기 위해 연구된 전기철도 시스템이다.

대부분의 경우 낙뢰 전류는 대지와 절연되며 고지대에서 대지에 접촉 되어 있는 저지대 쪽으로 이동하며 가공지선을 통해 흐르는 경우가 발생하여 전류를 역과 건널목까지 운반하여 수 [kHz]의 주파수의 낙뢰 전류는 10 [kA] 이상의 대단히 강한 전류로 주어질 수 있는 위험성이 높기 때문에 가장 빠르고 직접적으로 즉시 대지에 방류해야 한다. 단시간 동안 전류가 흐를 시 토양의 표면은 높은 전위(>1 [kV])에 다달으며, 금속 구조물 및 장비들은 큰 전위의 영향을 차단하기 위해 모든 지점의 대지와 레일, 금속 구조물 및 장비들간에 확실한 등전위를 실현해야 한다. 낙뢰는 통신 장비 또는 신호를 통과하지 않고 최소의 저항을 가진 가장 빠른 접지 시스템을 통해 대지로 방류되도록 구성되어야 하며, 금속체 구조물, 함, 랙 등의 부품들은 상호간 접지시스템에 전기적으로 연결함으로써 등전위를 구성하여 인명 및 재산을 보호할 수 있는 공통 접지시스템이 도입되었다.

낙뢰로부터의 가장 기본적이며 완벽한 보호 방안인 접지시스템은 매설 접지 케이블은 접지망의 기본적인 구조를 형성하며 접지 바는 청동 재질의 중간 매개체로 하여 접지시스템에 연결한다. 우리나라 서울-동대구간 경부 고속선로에는 최소한의 [km]마다 공동 접지를 위한 매설 접지 케이블이 상행선과 하행선 모두에 설치되어 있으며, 고속선로에 전력을 공급하는 변전소의 전방에서는 기존거리보다 더욱 단축하여 설치하게 된다.

등 전위 접지를 금속체로 구성된 물질의 접지바를 연결하며, 접지 케이블의 연결은 가능한 짧고 구부러지지 않도록 구성하여야 하며, 연결선은 금속판 및 케이블

피복 등 전위 접지 바측에 연결 여부를 제대로 확인해야 하며, 접지 케이블이 구부러지거나 낙뢰 전류의 주파수가 상승해도 수치가 0이 아닌 $Z = L\omega$ 의 임피던스를 갖는 케이블 선로를 구성하여 가능한 구부러지지 않게 설치한다.

통신 기계실 및 신호 설비와 같은 건물은 기초공사 시에 있어 건물 주위를 구리선으로 설치한 후 접지 바에 접지선을 연결함으로써 접지시스템을 형성하여 구성된 접지시스템은 최소한의 접지 저항만을 내포하기 때문에 방출되는 대기로부터 고전압을 효과적으로 감퇴시켜 토양의 대지 저항률이 $200[\Omega \cdot m]$ 가 되더라도 이러한 접지시스템 구성하여 접지 저항 값을 $1[\Omega]$ 이하로 감소시킬 수 있다.

결론적으로 낙뢰 전류의 통과가 예상되는 전력원 측의 임피던스는 가능한 최소화해야 하며 축전지를 구성하는 구성 전지의 내부 저항은 $0.05 [\Omega]$ 에 근접한 값을 구성하여야 한다. 위와 같은 조건으로 축전지는 고주파에서 나타나는 단락 회로와 특성으로 동작하며, 전체 시설물을 양질의 버퍼 역할로 낙뢰로부터 보호하게 된다.

특히 진입선의 3상 및 단상과 중성선을 통한 설비함 및 전원 랙의 입력측으로 전력을 배분하는 컴퓨터 장비 및 케이블, 전자와 같이 저전압을 사용하는 장비에 있어 과도 전압이 공급될 때 피뢰기(Arrester) 또는 서지 보호기를 우선적으로 설치하여 낙뢰로부터의 보호 조치를 해야 한다.

E. 이상전압의 영향에 대한 대책

1. 전철변전설비 접지 구성

지락전류 또는 뇌격전류가 유입되면 기기 및 철 구조물 등 접지전위가 상승하고, 대지에는 전위차가 발생하게 되며, 전위차의 발생 및 전위의 상승에 의해 인체에 전류가 흐를 경우 감전사고를 초래하며, 기기에 절연을 파괴시키는 사고가 발생하고 전철변전설비 접지의 목적은 이와 같은 사고를 미연에 방지하는데 있다.

전철 급전용 변전설비는 전화 등의 통신설비 및 수전설비를 매개로 외부에 접속되어 있으며, 전철설비의 낙뢰 및 지락, 단락, 통신선로 사고 시에 이상을 미치지 않기 위해 통신케이블 보안장치 등의 접속점 측에 대지전위상승 억제를 위한 피뢰기가 사용되고 있으며 피뢰기 접지는 접지전류에 의해 대지전위상승의 영향을 받지 않도록 일반적인 변전소에서 MESH 접지에서 50 [m]이상 떨어진 지점에 독립한 접지전극을 매설하여 직각을 이루는 것을 원칙으로 선정하고 있으며, 그림 2.7은 전철 급전용 변전소의 MESH 접지 방식에 의한 공통접지의 개념도를 나타낸 것이다.

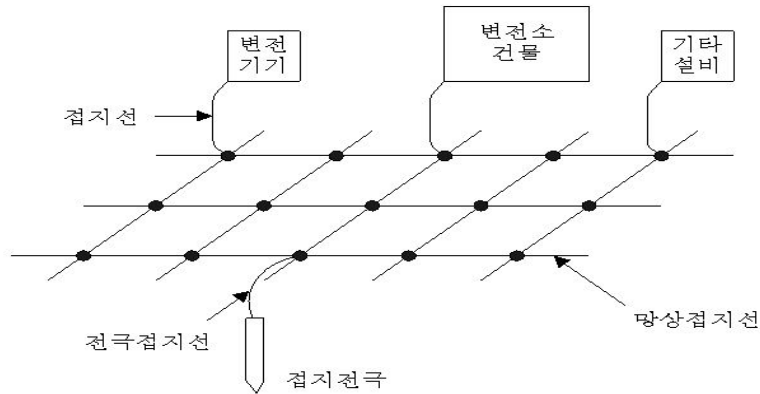


Fig. 2.7 Grounding Conductor of S/S

변전소 구내의 지락전류에 의해 유도된 서지 및 대지전위 상승 대부분인 변전소 및 선로측 등의 전력 계통 사고의 이상전압은 전철변전설비의 각종 통신회선 및 약전기기

의 절연 파괴 때문에 절연보호를 위한 보호 장치 및 보안기가 설치되어 있다.

보안방식은 그림 2.7과 같이 대지전압이 설비내의 MESH에 접속된 보안기와 MESH접지에서 50 [m]의 원방접지에 접속된 보안기 사이에 인가되도록 구성되어 있고, 그림 2-8은 접지방식 및 원격제어장치용 보안기 구성에 관한 것으로 원격제어 장치 각각의 회선마다 2극 보안기를 사용하여, 각 회선의 보안기에 방전개시전압이 다르기 때문에 순간적으로 선간잔류전압이 발생하여 선간잔류전압에 의한 원격제어 장치의 relay 접점을 사용하고 그림 2.8과 같이 5극 피뢰 관을 사용 한다.

원방접지측의 보안기는 지락 시 교류 측의 대지전위가 상승할 때 접지측 보안기와 함께 방전시킨 후 연락선에 유도하는 뇌 서지로부터 케이블을 보호 및 퓨즈의 끊어주는 등의 역할을 하고 있다.

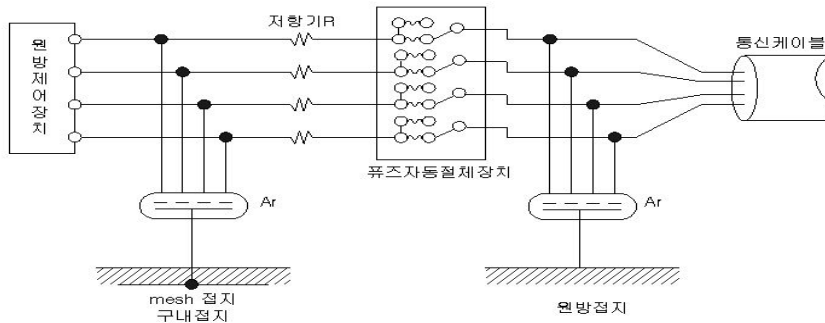


Fig. 2.8 Protective Device of Substation

2. 전차선로 설비의 이상전압 억제

상시 급전전압 및 이상전압에 의해 견뎌야 하는 전차선로 설비는 전차선의 개폐 서지에 의해 발생하는 이상전압 및 지락사고 및 이상전압에 견뎌야 하며 경제적인 면에서 안전한 설비를 구축 및 필요이상의 과 절연은 피하여 전력설비의 절연설계를 하여야 하며, 전압을 초과하는 큰 이상전압에 대해서는 가공공동지선, 보호선, 피뢰기, 방전기 으로 인한 이상전압 억제를 한다.

전철 급전용 변전소의 급전 인출개소 및 팬토그래프 설치 위치에는 전차선에서 발생하는 이상전압을 억제할 위한 피뢰기가 설치되어야 하며, 선로의 애자 절연강도는 일반적으로 유도뢰 및 직격뢰에 의한 이상전압보다 높아 전차선로 애자 보호를 위한 일반적으로 급전회로 중간에 분산되어 전력기기 보호용 피뢰기만 있으며 피뢰기의 접지 저항값은 10 [Ω]이하를 규정으로 하고 있다.

AT급전설비 방식중 보호선은 지락사고의 검출을 용이하게 하기 위해 사용되는 낙뢰 충격 시 보호 및 상용주파에 의한 속류에 의해 발생하며 상시적으로 레일과 병렬로 구성되고 있어 선로 임피던스를 저감시키고 있다.

3. 통신설비 이상전압 억제

바리스터, 피뢰관 등의 통전방류 디바이스는 일정전압 이상의 서지전압이 인가 시 단락상태가 되어 자동 스위치처럼 동작하며 일반적으로 단락형 보안기 또는 방류형 보안기라고 한다.

급전용 전원회로 및 통신용 입출력 회선은 기기에 접속된 외선으로서 서지전압은 상시 유도되므로 각각의 회선에 보안기 Ar_1 , Ar_2 및 Ar_3 를 삽입하여 각 보안기의 기기의 외함 및 접지단자를 접속하여 접지하는 방법이 사용되어 왔다.

전철 급전용 선로에 유도된 낙뢰서지에 대하여 배전용 Ar_1 이 동작하여 접선과 같이 접지측에 흘러 전원부가 보호되는데 접지측에는 전위상승이 일어나고, 접지 저항이 30[Ω], 전류가 200[A]라고 가정한다면 접지측의 전위상승은 6,000[V]에 이르게 되며, 통신선의 원방전위로 통신측 단자 및 기기의 외함간에는 6,000[V]의 전위상승으로 인한 전압이 인가되므로 Ar_1 만 있을 경우에는 내부에 절연파괴 사고가 발생할 수 있으며, 양쪽 통신회로에 보안기 Ar_2 , Ar_3 를 삽입하게 되면 낙뢰서지의 일부는 통신 회로 측으로 흐르게 되고 기기의 인가전압은 각 보안기의 서지동작 전압 1,000 [V] 이하로 억제되어 보호가 이루어지고 있다. 낙뢰 서지 통과식 보안기로서 어느 회선에 유도된 낙뢰 서지에 대해서 보안기를 통한 기기의 외측을 통과시켜 내부에 침입시키지 않는 방식이다.

4. 신호설비 이상전압 억제

일반적으로 많은 산업계 분야 또는 철도설비에서는 약전용 전자기기에 대한 내뢰 대책으로서 설비의 제어선 및 전원선 등을 직접 또는 보안장치를 바탕으로 사용한 접지법이 널리 사용되고 있으며, 철도신호설비 중에는 장치를 대지로부터 격리시키는 방법이 적용되고 있고 가장 큰 내뢰대책의 특징이다.

철도신호설비는 열차주행의 안전 확보 및 효율적인 열차운행을 위한 설비이며 역구내에서는 노선이 복잡하게 되고, 분기 또는 집합됨으로서 방향을 지시하는 신호기가 다수 설치되었고, 선로를 절체 하는 전철기, 신호기, 궤도회로에 의해 감지되는 열차 및 차량들의 유무등과 상호 밀접한 것으로 제어 및 취급에는 일정한 순서 및 제한을 설치한 장치가 연동기이며, 이를 중심으로 신호기와 궤도회로, 전철기 등을 포함한 연동장치와 현장기기가 접속된다.

레일에는 귀선전류에 의해 주파수 및 레일의 대지전위는 항상 변화하고 있으며, 직접적으로 신호기기의 동작에 심각한 영향을 주기도 한다. 이와 같은 철도신호설비는 통신설비 및 전자교환기와 같은 원격제어 장치등을 변전소내 설치환경에 비해 열악하고, 외부 영향에 의한 서지전압 등 이상전압이 항상 노출되어 있기 때문에 명확한 대책 수립이 요구된다.

신호설비에서의 낙뢰, 단락 및 지락사고 등의 대책 수립에 관하여 뇌에 의한 피해를 줄여야 하는 목적과 동시에 대책 시스템장치를 구성하고 있는 특성 및 기능이 특성이 손상되지 않는다는 기준으로 해야 하며 fail-safe성의 유지, 유효성, 신호장치의 안정성 및 오동작 방지를 동시에 만족하여야 한다.

내뢰대책으로서 신호설비 각 장치를 연속접지 및 일점접지를 하는 것이 세계적인 추세이며 그 유효성이 입증되고 있으며, 비접지에 의한 fail-safe 확보 및 저해되지 않고 대지전위의 변동을 포함한 전기차량 귀선전류의 영향을 받기 쉬운 환경에서의 접지함으로서 안전성 확보 및 검증을 통한 내뢰대책이 구축되어야 한다.

Ⅲ. 전기안전과 철도급전시스템의 국제 기준

전기설비에서 감전사고는 주로 인체가 전기설비에 직·간접적으로 접촉하여 발생되며, 감전사고의 형태로서 절연파괴에 의한 아크감전, 전격에 의한 감전, 전기에 의한 감전 및 낙뢰에 의한 감전사고 등으로 분류할 수 있으며, 접지설비가 실시된 전기설비의 절연열화 및 고장, 사고 등에 의해 발생하는 누설 전류가 인체에 미치는 위험성을 등을 파악하여 국제 기술기준 등에서 정의하였다.

또한 전기철도 분야를 포함한 모든 전기 설비나 장비에 대한 기준이나 규격에 대하여 국제 규격화 추세에 따라 IEC(국제전기기술위원회)의 국제 규격으로 부합화를 진행하고 있으며, 본 논문에서는 교류 급전시스템에서 지상에 설치되는 설비의 전기적 안전성에 관한 대책 및 급전시스템에서 확보하기 위한 필요 사항은 다음과 같다.

첫째 각 급별 설비의 감전보호 대책은 간접 접촉에 대한 보호, 직접 접촉에 대한 보호, 가공 전차선 구역 및 팬토그래프 구내의 금속 구조물에 대한 보호이다.

둘째 급전시스템의 위험에 대한 통신설비 및 전력설비 등 기타 전기설비의 보호 대책이며 셋째 레일 전위의 위험에 대한 보호 대책이다.

따라서 이와 같은 필요 사항을 구체적으로 규정하고 있는 ‘KS C IEC 62128-1(2006) 철도용 고정 설비 - 전기안전 및 접지에 관련된 보호 조치’에 대한 내용은 사람의 안전 및 기기의 보호 대책으로서 계통 접지를 규정하고 있으며, 레일과 계통 접지 및 전차선 한계 내에 존재하는 노출 충전부와의 분당 등에 대하여 규정하고 있다.

A. 감전전류에 대한 안전한계

인체에 미치는 감전전류의 영향에 대하여 감전사고 사례를 조사 및 분석하여 통전전류의 경로가 손-몸통-다리로 되며, 통전 시간이 1초 이내인 경우, 전류를 4가지의 등급으로 인체의 생리적 반응에 따라 분류 한다. 인체에 통전전류의 크기는 1등급에서 약 25[mA]이하인 전류를 감지하는 상태에서 심장박동의 신경계통 등의 영향은 없지만

자발적으로 이탈 불가능하게 되는 상태이다. 2등급에서는 인체가 견딜 수 있는 25~80[mA]인 통전전류로서 심장박동의 불규칙 혹은 혈압상승 및 심장정지의 상태가 되며, 50[mA]에서는 사람에 따라 실신상태에 이르기기도 하며, 3등급에서는 크기가 80~3000[mA]인 통전전류로서 심실세동의 상태 및 실신에 이르게 되며, 4등급에서는 통전 전류가 3000[mA]이상이며, 부정맥 폐기종이 발생하고 회복이 불가능한 심장정지의 위험한 상태가 되며, 전류범위에 대한 인체의 작용과 전류 값은 표 3.1과 같다.

Table 3.1 Body Current by Reaction

분류	생 리 작 용	전류의 크기[mA]
1등급	- 자발적 이탈이 불가능한 경우 - 심장 및 신경 계통 이상 없음	약 25 이하
2등급	- 참을 수 있는 전류 - 혈압상승, 심장맥동 불규칙, 심장정지	25~80
3등급	- 심실세동 및 실신	80~3000
4등급	-혈압상승으로 인한 회복불가 및 심장정지 -부정맥 폐기종	약 3000 이상

1. 켈펜(Keppen)에 의한 안전기준

a. 통전전류가 수직으로 흐른 경우

1등급은 통전전류가 0~25[mA] 이하로 1[mA]이하는 느낄 수 없으며 5[mA]이하는 가벼운 경직 또는 마비 현상이 나타나고 15[mA]이하는 이탈 가능한 경련현상

15[mA]이상이면 경련현상이 일어난다. 2등급은 통전전류가 25~80[mA]로 혈압이 상승하고 심장의 불규칙적인 박동, 50[mA]이상에서는 실신한다. 3등급은 통전전류가 80[mA]이상 3~8[A]이하로 심실세동으로 인해 약 0.3초 이상에서 사망한다. 4등급은 통전전류가 3~8[A]이상으로 피부 내·외부화상 및 통전중 심장마비로 인한 사망, 화상 및 탄화로 인한 사망한다.

b. 통전전류가 수평 또는 부분적으로 흐를 경우

전류가 흐르는 경로에 따라 인체에 심실 세동의 한계를 넘는 전류가 흐를 시 심장은 분로역할을 하게 되므로 위험도는 달라지고, 표 3.2는 통전 경로별 위험도를 나타낸 것으로 숫자가 클수록 위험도가 더욱 높아지는 것을 의미하며, 감전에 의한 통전전류의 크기 및 시간 등에 의하여 결정되며, 대전류는 짧은시간에도 위험을 초래하며, 소전류는 장시간 통전이 되어도 안전하며, 감전전류의 안전한계를 식 (3-1)과 같이 대전류 및 소전류 즉, 크기에 따라 통전시간이 일정한 값(50 [mA · s])을 갖도록 명시하였다.

$$I \cdot t = 50 [mA \cdot s] \quad (3-1)$$

여기서, I : 인체 통전전류[mA]

t : 통전시간[s]

Table 3.2 Risk Degree of Current Path

통 전 경 로	위 험 도
왼손-가슴	1.5
오른손-가슴	1.3
왼손-한발 또는 양발	1.0
양손-양발	1.0
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

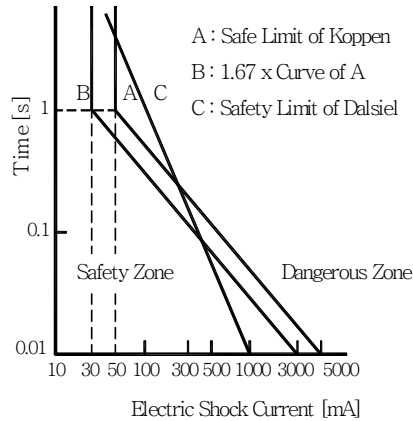


Fig. 3.1 Threshold Current for Safety

식 (3-1)을 그래프로 나타낸 것이 그림 3.1에서 A선을 경계로 하여 우측 상단측이 위험한 범위이며, 왼쪽의 하단측이 안전한 범위이며, 인체 통과전류는 A선측과 같이 $50[\text{mA} \cdot \text{s}]$ 이하의 경우 안전한계 전류는 시간과 상관없는 경우이다. B선은 전류와 시간을 곱한 $30[\text{mA} \cdot \text{s}]$ 의 경우로 A선에 대한 안전율을 고려하고 국외에서는 대부분 B선을 사용하며, 달질의 안전 한계선은 C선을 나타낸다.

2. 안전전류 기준

국외의 경우 안전전류의 기준을 달질의 연구결과로 대부분 사용하고 있으며 감전사고 시 위험도는 인체에 인가된 전력에 비례한다는 관점에서의 아래의 자료를 바탕으로 인체 감전시 감전전류의 한계를 체중에 따라 다르다고 정의하며 관계를 그림 3.2과 같이 나타냈다.

다양한 실험의 결과로부터 심실세동전류 및 체중과의 함수관계를 가정한 후 일반적으로 사람들은 99.5[%]가 심실세동의 사고가 일어나지 않도록 통전전류의 크기 및 통전시간의 관계를 안전하게 견딜 수 있도록 다음과 같이 정의하였다.

$$I_B = \frac{k}{\sqrt{t_s}} \tag{3-2}$$

여기서, I_B : 통전전류[mA]

t_s : 통전시간[s]

$k = 0.116$ (체중 50[kg]인 경우)

$k = 0.157$ (체중 70[kg]인 경우)

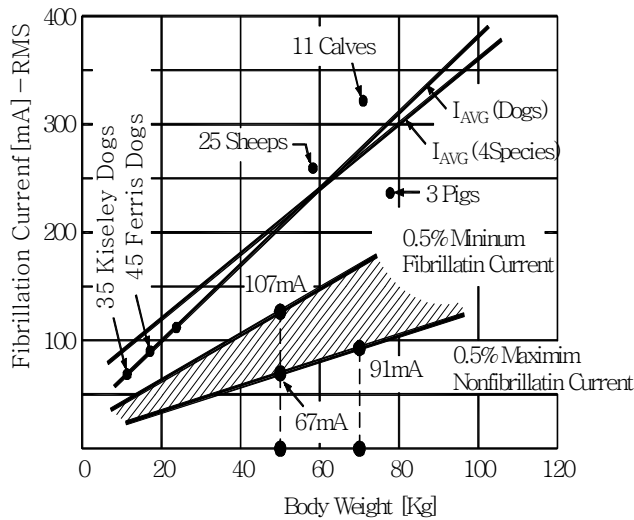


Fig. 3.2 Fibrillating Current vs Body Weight

3. 달질과 비겔마이어의 결과 비교

오스트리아에서 발표된 그림 3.3과 같이 달질과 비겔마이어의 연구 결과를 바탕으로 인체의 체중에 따라 심실세동전류 및 통전시간의 관계가 통전시간의 범위에 관계없이 표기하였으나, 아래의 연구결과에 의해 통전전류 및 시이의 특정한 범위를 벗어나게 될 시 일정한 위험도를 가지는 것으로 표시되고 있다.

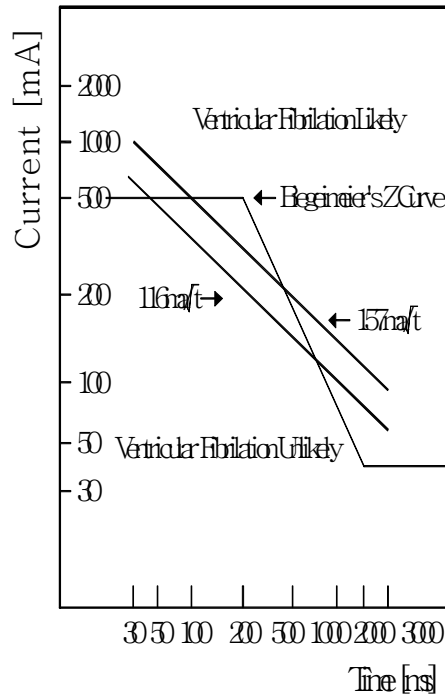


Fig. 3.3 Comparison of Current and Time

위와 같은 연구결과에 의해 위험도는 통전전류 500[mA], 통전시간 0.2초 이내 및 2.0 이상에서도 지속적인 위험정도를 나타내고, 그 밖의 구간에서 통전전류의 크기와 통전시간의 관계가 일정 하게 비례하는 특성을 나타낸다. 0.03~3.0초 사이의 범위에서는 심실세동이 심장의 박동주기와 밀접한 관련이 있고, 0.06~0.3초 범위에서는 보다 위험성이 훨씬 더 작아진다는 점이다.

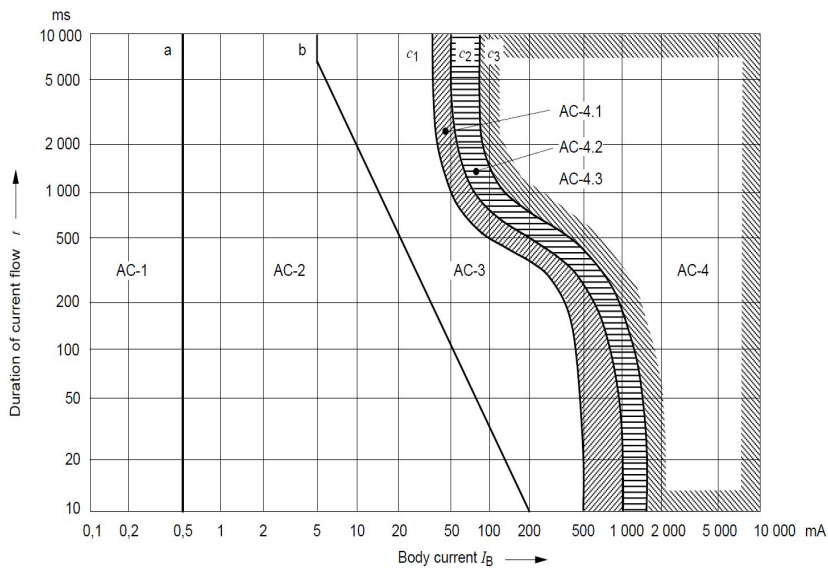
4. 국제기술기준에 의한 안전전류기준

일반적으로 사람들이 감지할 수 있는 감지전류는 통전전류가 0.5~12[mA]로서 느낌을 느낄 수 있는 정도의 크기이며, 전류는 10~15[mA] 정도의 통전전류가 흘러서 근육이 수축되는 정도의 크기이다. 수십[mA]의 심실세동전류는 혈액순환 기능이 지장

을 받고, 심근에 경련이 일어나 사망에 이를 수 있고, 인체 감전사고를 방지 하기 위해 통전전류 차단하는 방법을 고려 할 필요가 있다.

국제전기기술위원회는 IEC TC-64에서 감전전류는 안전한계에 대한 국제적 기준을 심의한 결과, 인체에 미치는 전류의 영향에 대하여 그림 3.4와 같이 직류 및 교류인 경우, 감전보호 대책의 기초 자료로 안전한계곡선 Pub. 479인체를 통과하는 전류의 영향을 사용하고 있으며, 외국의 연구 결과를 적용한 최근 반영한 새로운 기준이 제정되었다. 비겔마이어의 특정한 범위의 통전전류 및 통전시간에서의 일정한 위험도를 나타내며 달질의 통전전류 및 통전시간의 관계에 따른 위험도의 영역을 좀 더 세분화 하여 나타낸 것이다.

그림 3.4에서 인체에 미치는 직류 및 교류전류의 영향에 대한 내용은 다음과 같다. AC-1는 영향이 없는 감지전류로서 0.5[mA]정도이다. AC-2는 인체에 위험성이 거의 없으며 이탈한계전류로서 10[mA] 정도이다. AC-3는 예상치 못한 장애가 없으며, 2초 이상 통전시 호흡곤란, 심장자극 및 근육 경련 등이 발생한다. AC-4 : 심각한 장애가 발생하며 통전전류 시간경과 및 크기에 크기에 따라 화상, 호흡정지, 심장정지 등이 발생한다.



(a) AC Case

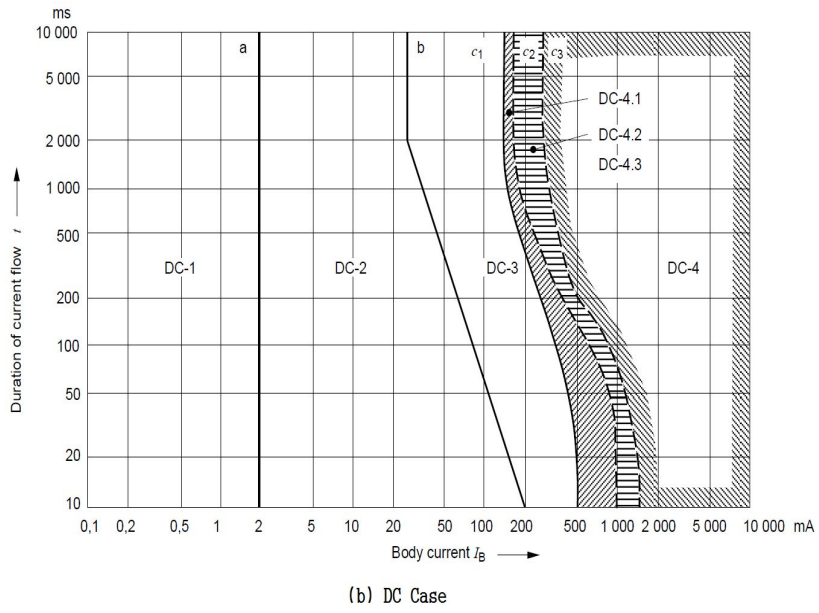


Fig. 3.4 Time/Current Zones of Effects on Persons

B. 접지시스템과 인체의 위험전압

접지시스템의 접지의 목적은 전기설비의 고장 및 낙뢰 및 서지 등에 의한 이상전류가 대지전위상승을 억제하고 인체감전사고 및 전력기기의 손상방지를 위한 것이며, 접지도체를 통한 이상전류가 흐를 시 대지표면의 전위를 낮게 하기 위해 접지 저항 값이 극히 작아야 한다. 접지 목적에 맞는 규정과 기준이 있어야 하며, 우리나라와 일본은 접지에 대한 규정 및 기준이 설계의 여러 조건 등, 대지의 특성 및 환경적요인, 접지대상 대지의 크기 등을 외면하고 접지저항의 크기만으로 정해져 있으나 국외에서는 접지전극에 의한 대지 전위상승, 접촉전압, 보폭전압, 전이전압 등의 크기를 제한하고 있다.

일반적으로 접지봉이나 메쉬 형태의 접지시스템을 대지에 매설하여 접지전극으로 사용하며 계통의 불평형 부하에 의한 불평형 전류 및 접지전극에 흐르는 전류는 계통이나 계통의 외부에서 발생하는 낙뢰 및 서지전류, 누설전류, 고장전류, 등으로 구분되며 대지에 흡수된다.

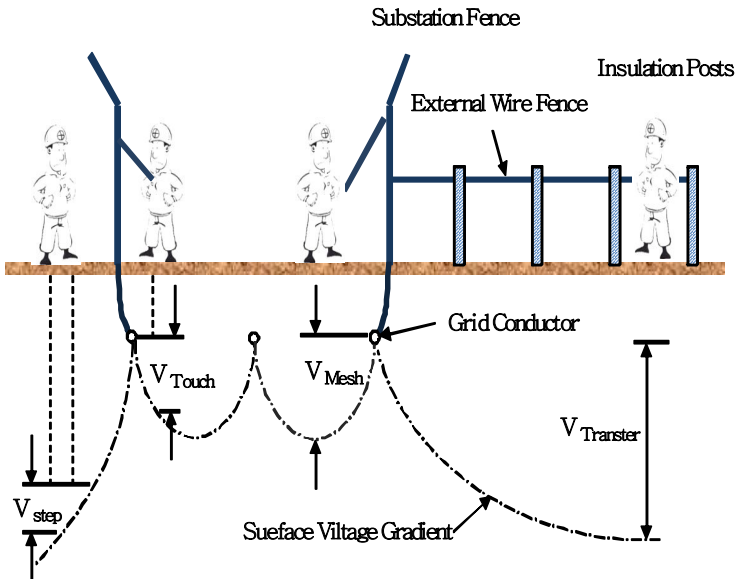


Fig. 3.5 Distribution of Surface Potential of Mesh Electrode

접지전극과 대지 사이에 전기적 저항이 없이 전류가 접지전극으로 유입되는 이상적인 경우에 완벽한 결합 또는 대지에 흡수되는 저항률이 매우 낮아 전류의 흐름에 아무런 장애가 없는 것이다. 그러나 상당히 큰 값을 가지고 있는 대지 저항률은 접지전극과 대지 사이에 발생하는 접촉저항이 접지전극을 통하여 대지로 방전되는 전류가 영향을 받게 되어 전류흐름의 방해에 의하여 전위가 상승하게 되며, 그 크기는 유입된 전류와 저항을 곱한 크기로 표현되며 일반적으로 이 전위를 대지전위로 정의하며, 접지전극의 표면에서 나타나는 최대의 대지전위를 대지 전위상승(Ground Potential Rise : GPR) 이라고 한다. 예를 들어, 대지특성이 전기적으로 균질하다고 유입된 전류의 유입점을 바탕으로 방사성 모양으로 퍼져나가는 형상을 상정하여, 유입점으로부터 멀어질수록 전류분포가 작아져서 대지전위는 낮아지며, 충분히 멀리 떨어진 거리에서는 전위가 영이 되어 영 전위점이 되고 그림 3.5는 메시형태의 접지전극에 전류가 유입된 경우에 나타나는 대지표면 전위의 분포를 보인 것이다.

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

접지저항이 R 인 접지전극의 대지 전위상승 E_{GPR} 는 식 (3-3)과 같이 표현되며,

$$E_{GPR} = R \cdot I_e \quad (3-3)$$

I_e 는 총 지락고장 전류 I_f 의 일부분이 접지전극을 통하여 대지에 잔류된 전류를 나타내며, 대지 전위상승 E_{GPR} 을 정확히 계산하기 위해, 지락 및 고장전류 값에 대한 접지전극의 주입전류 I_e 와 R 사이의 관계를 결정한다.

전력설비 내부에 접지전극이 설치된 경계부근 외부의 한 점 P에서의 대지면 E_p 전위 값은 접촉전압 및 보폭전압을 결정하는 관점에서 매우 중요하며 대지면 전위 분포의 계산은 대지구조 및 접지전극의 형태에 따라 일반적으로 복잡한 프로그램을 이용하거나 계산하는 목적으로의 프로그램은 극히 소수이다.

2. 접촉전압 : E_t

전기설비간 접지전극에 고장으로 인한 고장전류가 유입했을 때 최대전압 대지면 전위 상승이 나타나고, 일정한 거리가 떨어진 전기설비로부터 나타나는 그 점의 대지면 전위와의 차이, 그리고 접촉전압이란 일정한 거리에 떨어져 서 있는 사람의 손이 접촉했을 때 접촉점의 손과 발 사이에 나타나는 전위차라고 정의한다. 접촉전압은 대지면 전위 상승으로 인한 임의의 한 점에서 대지면 표면 전위와의 차로 표시 되어, 대지면 표면 분포곡선의 경사가 클수록 접촉전압이 크게 나타나면서 인체에 영향을 주면서 대지면 전위 분포곡선의 경사가 적게 되도록 접지전극을 설계하는 과정을 거쳐야 한다. 접촉전압 E_t 의 최대값은 식(3-4)와 같다.

$$E_t = E_{GPR} - E_p \quad (3-4)$$

3. 보폭전압 : E_s

접지전극 위에 사람이 서 있을 경우, 접촉하고 있는 두 발이 대지면 표면 전위 분포곡선에서 전위차가 보폭전압으로 정의되고, 일반적으로 대지면 전위차를 1[m] 거리사이로 나타내며 대지면 전위 분포곡선의 경사가 심할수록 보폭전압도 크게 나타나며 보폭전압 E_s 의 최대값은 식(3-5)와 같이 결정한다.

$$E_s = E_{p1} - E_{p2} \quad (3-5)$$

여기서, E_{p1} 과 E_{p2} 은 양발이 위치한 점에서의 대지면 전위이다.

4. 메시전압 : E_m

메시 접지전극 위에 최대의 접촉전압을 메시전압(mesh voltage)이라고 나타내며, 접지전극의 간격이 큰 경우에 메시전압 또 한 크게 나타나게 된다.

C. 감전전류와 안전전압

1. 감전전류와 안전전류

감전에 의한 전기적 충격에 의해서 죽음에 이르는 일반적인 메커니즘은 심실의 세동이 원인이라고 알려져 있으며, 전류의 크기가 상승하면서 처음에 느낄 수 있는 소량의 느낌은 근육의 수축에 의한 것이며, 더욱 상승하면 동반 되는 열에 대한 감각이 증가하면서, 근육수축이 동반되고, 도체를 완화시킬 수 없는 전류 최종 값까지 도달하게 되며, 접촉한 도체에 대전류가 흐를 때, 숨쉬기가 어렵고, 인체의 근육이 굳어지며, 무의식중에 심실 세동이 연속적으로 일어나고 더욱 큰 전류는 사망에 이를 수 있다.

실험을 통하여 식 (3-6)과 같은 심실세동은 전원 주파수 및 신체 체중의 함수가 되는 주파수와 8.3[ms]~5[s]까지의 충격기간에 대한 감전 방정식이다.

$$i_{\max} = \frac{0.116}{\sqrt{t}} \text{ (rms amperes)} \quad (3-6)$$

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

최대 허용 전류

t : 전기적 충격 시간[초]

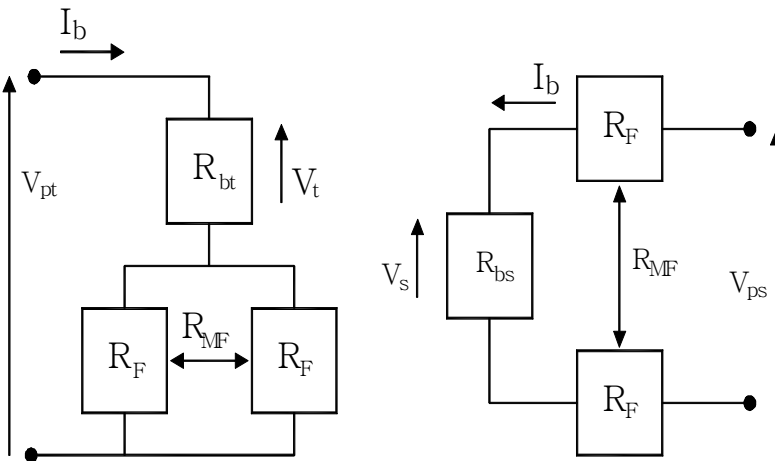
지락고장은 보호계전 동작실패의 경우에 보조 계전기의 작동은 긴 시간이 필요하게 되며, 10 주기 안에 제거 되며 대부분의 경우 최대 제거시간은 0.5[s]로 가정하여 결과적으로 치명적인 감전사고가 발생할 확률은 매우 낮다고 할 수 있다.

인체에 대하여 안전한 안전전류 i_b 는 식 (3-7)과 같다.

$$i_b \leq i_{\max} \quad (3-7)$$

2. 안전전압

그림 3.6은 접촉 및 보폭전위에 의한 인체에 흐르는 전류를 두 가지 경로 나누어 첫 번째 경로는 배와 발을 포함하고 두 번째는 손, 가슴 및 발을 포함하는 경로로 나뉘며 이러한 전류에 의한 충격전압 및 접촉전압과 보폭전압으로 접지 설계를 위한 인체의 저항은 1000~3000[Ω] 사이의 범위로서 보통 1000[Ω]의 저항 값을 선택한다.



(a) Touch Voltage

(b) Step Voltage

Fig. 3.6 Equivalent Circuit of Touch and Step Voltage

예를 들어 손과 발 사이에 V_t [V]가 인가되고 발에는 V_s 가 적용된다고 가정하여 (3-8)과 (3-9)과 같이 인체에 흐르는 전류는 식으로 정의된다.

$$i_{bt} = \frac{V_t}{1000 + 1.5\rho_s} \quad (\text{feet in parallel}) \quad (3-8)$$

$$i_{bs} = \frac{V_s}{1000 + 6\rho_s} \quad (\text{feet in series}) \quad (3-9)$$

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 (3-10)과 (3-11)의 관계식이 얻어진다.

$$V_t \leq \frac{116 + 0.174\rho_s}{\sqrt{t}} = E_t \quad [\text{V}] \quad (3-10)$$

$$V_s \leq \frac{116 + 0.696\rho_s}{\sqrt{t}} = E_s \quad [\text{V}] \quad (3-11)$$

여기서, E_t 와 E_s 는 각각 최대 접촉전압과 보폭전압을 나타내며, 전력설비의 접지 설계에서 어려운 위험전압은 접촉전압 E_t 이다.

D. KS C IEC62128-1의 기준

전기철도 급전시스템에서 설비의 전기적 안전성에 관한 필요 사항을 구체적으로 규정하고 있는 ‘KS C IEC 62128-1(2006) 철도용 고정 설비: 설비의 전기적 안전 및 접지 보호 조치’는 사람의 안전 및 기기의 보호 대책으로서 계통 접지와 레일과 계통 접지 및 전차선 한계 내에 존재하는 노출 충전부와의 본딩 등을 규정하고 있다.

1. 주요 내용

a. 적용 범위

이 규격에서는 교류 및 직류 견인 장치와 관련된 전기 안전 관련 보호 조치 및 견인 전원 공급 장치의 고정 설비는 보호 조치에 대한 요구 사항을 규정한다. 이 규격은 전기 견인 장치 내에서 유지 보수 작업을 하는 동안 전기 안전을 보장하는 데 필요한 모든 고정 설비에도 적용된다. 또한, 전기 견인 장치에 대한 새로운 모든 선로 그리고 기존 선로에 대한 모든 주요 규정에 적용된다. 즉, 철도, 노면 전차, 고가철도 및 지하철, 등산 철도, 트롤리버스 시스템 및 자기 부상 시스템 같은 유도 대중 운송 시스템, 자재 운송 시스템에 적용된다.

b. 감전에 대한 보호 조치

(1) 직접 접촉에 대한 보호

가공접촉선 계통에서 공간거리에 의한 보호와 장애물에 의한 보호로 구분된다. 공간 거리에 의한 보호는 사람이 접근할 수 있는 보행표면의 경우, 가공 접촉선 계통의 충전부 뿐만 아니라 차량 외부의 임의의 충전부와의 직접 접촉을 방지하기 위한 그림 3.7과 같은 공간거리의 보행 표면보호 방법이 있다. 충전부와의 직접 접촉에 대한 보호를 위해 충전부에 대한 보행 표면의 위치에 따라 장애물을 설치하는 그림 3.8과 같은 방법이 있다.

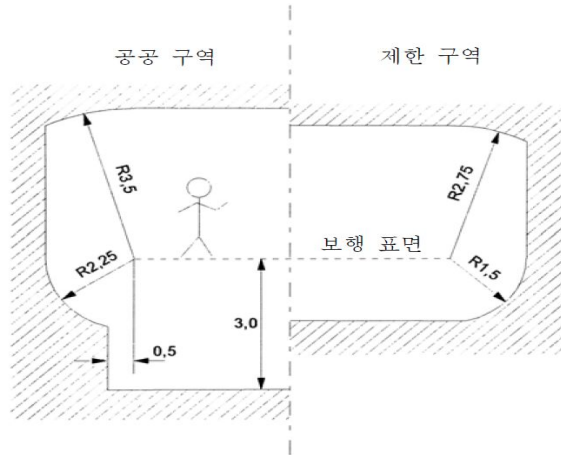


Fig. 3.7 Protection by Clearance

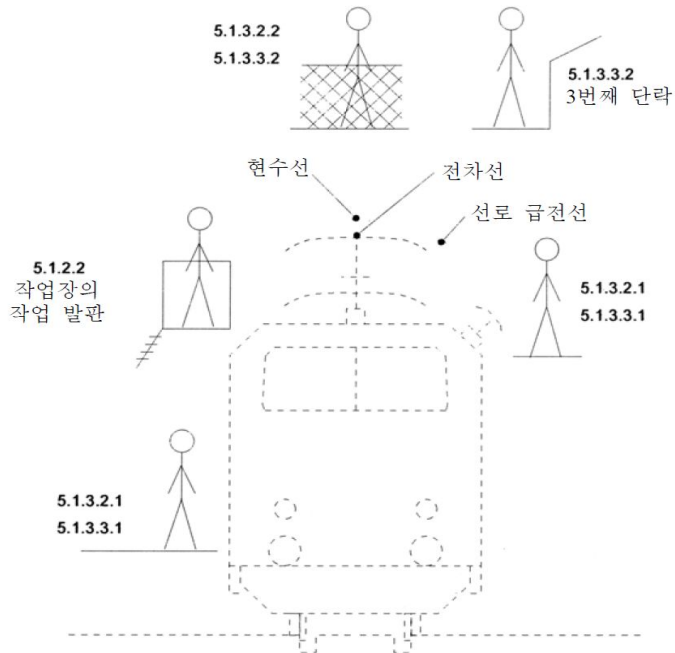


Fig. 3.8 Standing Surface for Persons to live parts

(2) 간접 접촉에 대한 보호

가공접촉선 계통의 노출 도전부에 대한 간접 접촉 보호조치를 제공해야 한다. 견인 장치에서 시스템 고장과 사람의 안전을 위해 고장 조건에서 전류의 전도를 위해 귀로를 활용하는 직접 견인장치 접지이다.

(3) 가공 접촉선이나 팬토그래프 구역의 전도성 혹은 금속성 구조물

파손된 가공 접촉선이나 탈선된 팬토그래프에 의해 충전되는 전체 또는 부분적 전도성 구조물(예: 강철 구조물, 보강 콘크리트 구조물)과 금속성 구조물(예: 가공 접촉선용 전주, 보강 콘크리트 전주, 금속성 울타리, 배수관, 비전기 견인 장치의 주행 레일)의 경우, 위험한 접촉 전압에 대한 보호 조치를 취해야 한다. 교류 견인 장치에서 전기 기기를 지지하지 않거나 포함하지 않는, 수평 방향으로 2 m 이하에 있는 전도성 구조물의 경우에는 보호 조치를 취할 필요가 없다. 팬토그래프 구역에 위치한 전도성 구조물 부품에 규정된 견인 장치 접지 대신, 팬토그래프 구역에 장애물을 설치할 수 있다. 장애물은 가공 접촉선과 구조물 부품 사이에 위치해야 하며, 견인 장치 접지에 연결되어야 한다. 그 폭은 팬토그래프 구역과 최소한 동일해야 하고, 구조물 부품의 끝을 최소한 0.5 m 넘어가야 한다.

c. 레일 전위의 위험에 대한 보호

시간과 지역에 따라 레일 전위는 고장 조건 및 동작 조건에서 신체 접촉 전압을 유도한다. 제시된 값은 허용 가능한 최대 값으로 모두 실효값을 나타낸다. 전압이 매우 크게 변동할 경우, 가장 불리한 조건을 고려할 수 있는 시간 간격을 신중하게 선택하여 허용 가능한 신체 접촉전압은 표 3.3에 제시된 기간에 따라 분류되며, 짧은 시간은 접촉전압에만 적용된다.

Table 3.3 Condition of Period

조 건	시 간	비 고
짧은 시간	≤ 0.5	t 는 통전 시간[초]
일시적	$0.5 < t \leq 300$	“
영구적	$300 <$	“

교류 견인장치에서 시간 조건별 최대 허용 접촉전압을 분류하면 다음과 같다.

(1) 짧은 시간 조건

짧은 시간조건에서 최대 허용 접촉전압은 표 3.4와 같다.

Table 3.4 Allowable Touch Voltages at the Short Time

통전 시간 t [초]	허용 접촉전압 U_t [V]	비 고
0.02	940	전압은 실효값
0.05	935	
0.1	842	
0.2	670	
0.3	497	
0.4	305	
0.5	225	

(2) 일시적 조건

일시적 시간조건에서 최대 허용 접촉전압은 표 3.5와 같다.

Table 3.5 Allowable Touch Voltages at the Temporary Condition

통전 시간 t [초]	허용 접촉전압 U_a [V]	비 고
0.6	160	전압은 실효값
0.7	130	
0.8	110	
0.9	90	
1.0	80	
≤ 300	65	

(3) 영구적 조건

신체 접촉전압은 한계가 25 [V]실효값이어야 하는 작업장과 같은 유사한 장소를 제외하고, 60[V]를 초과하지 않아야 한다.

(4) 레일 전위

레일 전위는 주행 레일에 흐르는 최대 동작전류와 단락전류를 사용하고, 단락전류에 의한 레일 전위는 초기 단락전류를 사용하며, 레일 전위가 기준값을 초과 시 레일전위를 저감하기 위한 방법은 다음과 같다. 레일의 접지저항을 낮추며 모든 금속도체를 등전위 본딩을 한다. 유도성 결합을 고려한 귀선회로를 보강하고 전압 제한장치를 설치하고 지표면을 절연하며 고장회로의 차단 시간을 조정한다.

d. 변전소 및 개폐소에 대한 보호

변전소 및 개폐소와 같은 장소는 접지 및 전기안전에 관한 모든 문제에 대해 IEC 61936-1에 부합해야 한다. 고장 조건에서 또는 정상 조건에서 견인 장치에 의해 발생한 허용 접촉/신체 접촉 전압은 표 3.4와 표 3.5에 제시된 값을 초과하지 않아야 하며 교류 견인장치에서, 변전소와 개폐소의 귀로와 접지시스템을 직접 연결해야 하고 접촉선을 위한 개폐 장치 설비에 회로 차단기를 설치해야 한다.

e. 귀선 전류회로와 접지도체

직접 또는 임피던스 접합을 통해, 최소한 2개의 귀선 케이블을 사용하여 각 변전소를 주행 레일, 귀선도체, 귀선 도체 레일에 연결한다. 귀선 케이블은 하나의 귀선 케이블 고장을 참작하여, 최대 부하 전류에 충분해야 한다. 도구를 사용하지 않고는 풀 수 있는 퓨즈, 잠글 수 없는 스위치, 조인트 스트랩을 귀로에 설치해서는 안 된다. 귀로에 스위치를 설치할 때마다 또 다른 스위치를 공급 회로에 설치하고, 공급 스위치를 개방하기 전에 귀로스위치를 개방할 수 없도록 귀로스위치가 연동되어야 한다. 견인 귀선 전류를 운반하는 데 사용하는 주행 레일의 레일 이음매를 레일 이음매로 접합해야 한다. 이것은 또한 건널목 구성 부품에도 적용된다. 견인 귀선 전류 경로의 연속성을 보장하기 위해 적합한 간격으로 궤도 간 교차 접합을 제공하여, 정상 동작 및 고장 조건

하에서 접촉/신체 접촉 전압에 대한 안전 기준을 달성해야 한다. 궤도 간 교차 접합의 연결을 위한 특정한 대책은 사용하고 있는 궤도 회로 대책과 전체 견인 전원 공급 시스템 설계를 고려해야 한다. 모든 도체는 정상 동작이나 단락의 경우에 견인 귀선 전류에 의해 생성될 수 있는 열부하를 충족하도록 설계되어야 한다. 기계적인 이유로 이들 도체는 50 [mm]의 최소 횡단면적을 가져야 한다. 모든 설비 접지 도체 및 전극은 IEC 61936-1에서 규정대로 설계하고 구성해야 한다. 이것은 특히 기계적 강도와 부식의 열 효과를 고려하여, 재료 선택 및 치수 표시에 적용된다.

2. 설계기준

KS C IEC62128-1에서 제안하는 전기철도에 적용하는 공통접지 방식의 설계기준의 개념을 도입한 계통의 구성도를 보인 것이 그림 3.9이다.

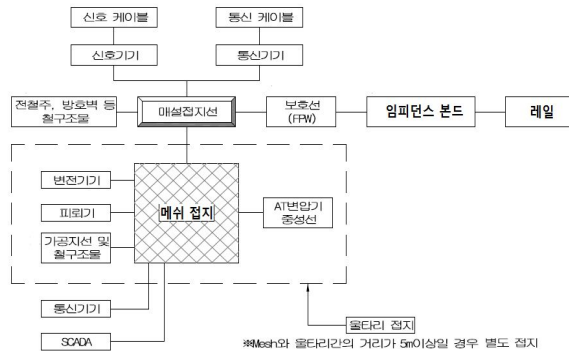


Fig. 3.9 Construction of Common Grounding

전기철도에서 KS C IEC62128-1에서 제안하는 접지방식인 공통접지방식을 도입한 설계기준의 내용은 다음과 같이 요약할 수 있으며, KS C IEC62128-1에서 제안하는 접지방식에 의한 레일, 귀선회로와 주변 설비들을 모두 연결한 공통접지방식을 보인 것이 그림 3.10이다.

선로의 대지 임피던스를 작게 하고, 금속성 구조물을 등전위화 하여 도체의 전기적인 연속성을 유지한다. 등전위를 위한 연동연선의 매설 접지선은 접속선 및 절연접지선

등을 설치하여, 전차선로의 구조물과 지지물에 연속적으로 접속된 가공 보호선을 설치하도록 한다. 공통접지를 위한 매설 접지선 및 가공 보호선과 절연 접지선은 횡단 접속한 궤도관을 매설 접지선과 가공보호선을 등전위 접속하여 임피던스 본드 중성점에 접속한다.

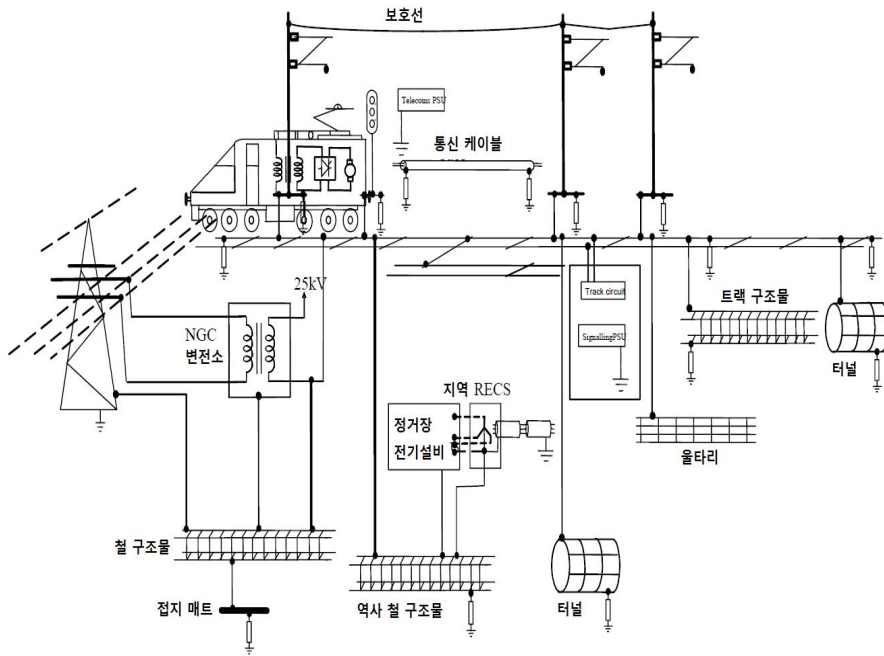


Fig. 3.10 Grounding System by KS C IEC62128-1

IV. 지표면 전위 계산 알고리즘

대지에 묻힌 접지전극에 유입된 고장전류에 의한 접지시스템의 지표면 전위 분포는 인체의 안전이나 설비의 안정적 운전에 영향을 미치는 매우 중요한 값이며, 지표면 전위 분포 결과에 따라서 보폭전압 및 접촉전압과 메시전압 등을 계산하는 기초가 되고, 접지전극의 해석 및 설계를 위한 전위상승을 계산하는 과정은 필수적이며, 접지전극의 저항값도 중요한 요소이다. 접지전극의 접지 저항 값을 산출하는 문제는 중요한 요소이며, 대지 저항률 즉 지층의 구조가 매우 중요한 변수이며, 단일 지층 구조의 파라미터를 증가화하여 접지전극 해석 및 설계는 실제현상이 제대로 파악되지 않는 단점이 있으며, 임의의 모양을 구성하여 접지그리드에 대한 유입된 고장전류에 의해 해석적 기법은 지표면 전위를 계산하기 위해 고장전류를 임의의 점에서 전위를 계산하는 그린함수의 원리를 이용하여 GPR과 접지전극의 대지면 전위분포를 계산한다.

A. 그린함수의 원리

전기철도 접지시스템의 특성을 해석하기 위한 기본 조건의 정태 전류장 이론에 기초한다는 것으로 매설된 접지그리드에 전류 I 가 유입되면 무한한 거리의 한 점을 영전위의 기준점으로 지정하여 접지전극의 유입전류에 의한 임의의 한 점 P 에서의 전위는 그린함수 원리에 의해 다음과 같이 계산식을 정의한다.

$$V_P = \iint_S G(P, Q) J(Q) dS \quad (4-1)$$

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

$G(P, Q)$: 접지도체에 대응되는 그린함수

해석을 위한 접지도체 표면의 한 점인 Q 점에 유입되는 단위 전류밀도에 의해 임의의 한 점 P 에서의 전위가 표현되고, 대지로 흘러가는 전체의 누설전류 접지도체를 통하는 모든 전류 I 와 같으며 다음과 같이 정리된다.

$$I = \iint_S J(Q) dS \quad (4-2)$$

접지도체의 전위 강하를 무시한다면 경계면에서의 경계조건은

$$V_r = C \quad (4-3)$$

이 된다. 여기서 C 는 상수이다.

식 (4-1)로부터 (4-3)의 방정식은 접지도체의 전위분포를 계산하기 위한 것이며, 수치해석기법을 적용하기 위한 접지도체를 n 개의 작은 도체로 나누어 중첩의 원리를 적용하여 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,

$$L = \sum_{j=1}^n L_j \quad (4-4)$$

$$I = \sum_{j=1}^n I_j \quad (4-5)$$

와 같이 정리된다. 그러면 접지도체 L 에 흐르는 전류 I 에 의하여 임의의 한 점 P 에서의 전위는 중첩의 원리를 적용하여 계산 한다.

$$V_P = \sum_{j=1}^n G(P, O_j) I_j \quad (4-6)$$

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 전체

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.

$$V_P = \sum_{j=1}^n R_{ij} I_j \quad (4-7)$$

B. 영상법에 의한 전위 해석

접지그리드는 점전극 및 선형도체로 구성된 복합시스템으로 해석하여야 하며 대지를 단일매질의 전위라고 한다면 모든 점에서의 전위를 계산하기 위하여 중첩의 원리를 적용하기에 적합하고 대지 또는 접지도체 지면층의 모든 극점의 전위는 전체적인 전위의 합으로 미소 접지전극을 해석할 수 있다.

복합 접지도체는 다량의 선형 미소 도체로 나누고, P 점에서의 전위는 대지에서의 점전극에 의하여 계산한다.

$$V_P = \frac{I\rho}{4\pi} \left(\frac{1}{r} + \frac{1}{r'} \right) \quad (4-8)$$

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.

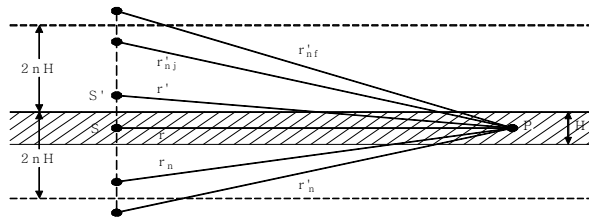


Fig. 4.1 Point Electrode and Image in Soil

그림 4.1의 다층 대지구조 모델에서 보인 바와 같이 2층 대지구조에서 P 점에서의 전위는 영상법의 원리를 이용한다.

$$V_P = \frac{I\rho_1}{4\pi} \left(\frac{1}{r} + \frac{1}{r'} \right) + \frac{I\rho_1}{4\pi} \sum_{n=1}^{\infty} K^n \left(\frac{1}{r_n} + \frac{1}{r'_n} + \frac{1}{r_{nj}} + \frac{1}{r'_{nj}} \right) \quad (4-9)$$

여기서, K 는 대지의 반사계수

$$K = \frac{(\rho_2 - \rho_1)}{(\rho_2 + \rho_1)} \quad (4-10)$$

ρ_1 : 상층의 대지 저항률[Ω -m]

ρ_2 : 하층의 대지 저항률[Ω -m]

2층 대지구조에서 전극 S 와 P 점이 상층에 있을 때의 전위는 다음과 표현된다.

$$\begin{aligned} V_P = & \frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2 + (h-z)^2}} + \frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2 + (h+z)^2}} \\ & + \sum_{n=1}^{\infty} K^n \left[\frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2 + (2nH+h-z)^2}} + \frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2 + (2nH+h+z)^2}} \right. \\ & \left. + \frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2 + (2nH-h-z)^2}} + \frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2 + (2nH-h+z)^2}} \right] \end{aligned} \quad (4-11)$$

여기서, H : 상층의 깊이

h : 점전극과 지표면과의 거리

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

$$V_P = \frac{\rho_2 I}{4\pi} (1-K) \sum_{n=0}^{\infty} K^n \left[\frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2 + (2nH+h+z)^2}} + \frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2 + (2nH+h-z)^2}} \right] \quad (4-12)$$

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

$$V_P = \frac{\rho_1 I}{4\pi} (1+K) \sum_{n=0}^{\infty} K^n \left[\frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2 + (2nH+h+z)^2}} + \frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2 + (2nH+h-z)^2}} \right] \quad (4-13)$$

그림 4.2와 같은 선형 도체가 (x_1, y_1, z_1) 와 (x_2, y_2, z_2) 좌표에 위치하여 있을 때 임의의 한 점 P 는 (x_0, y_0, z_0) 에서의 전위는

$$V_P = \frac{\rho I}{4\pi L_s} \left[\int_0^{L_s} \frac{dr}{s} + \int_0^{L_s} \frac{dr}{s'} \right] \quad (4-14)$$

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

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

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

$$R_2 = [(x_2 - x_0)^2 + (y_2 - y_0)^2 + (z_2 - z_0)^2]^{1/2} \quad (4-15)$$

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

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

이 되어, 다시 정리하면 다음과 같다.

$$V_P = \frac{\rho I}{4\pi L_s} \left[\ln \left(\frac{L_s - R_1 \cos\theta + (R_1^2 + L_s^2 - 2L_s R_1 \cos\theta)^{1/2}}{R_1 (1 - \cos\theta)} \right) + \ln \left(\frac{L_s - R'_1 \cos\theta' + (R_1'^2 + L_s^2 - 2L_s R'_1 \cos\theta')^{1/2}}{R'_1 (1 - \cos\theta')} \right) \right] \quad (4-16)$$

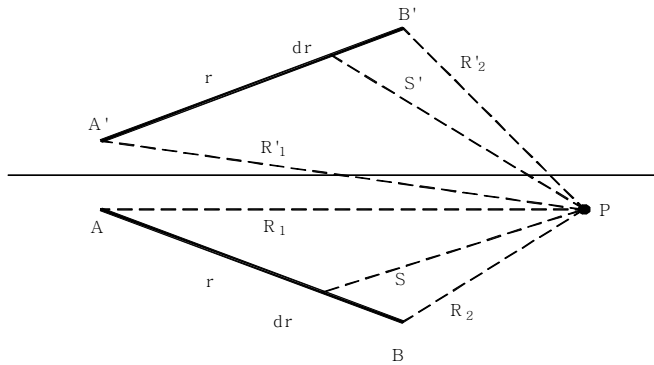


Fig. 4.2 Linear Electrode in Soil

C. 적분방법에 의한 전위계산

다층구조의 대지 상층에 깊이 e 로 수평의 직선도체를 고려하여 지표면의 한 점 $M(x_0, y_0, z_0)$ 에서의 전위를 구하기 위해 도체전극은 서로 연결된 직선도체로 구성 되어, 각각의 직선도체는 균등한 전류밀도를 갖는 조건을 가정하여, 도체의 미소부분 du 에 의한 관측점 $M(u_0, v_0, w_0)$ 에서의 전위의 함수식은 다음과 같다.

$$dV = \theta(w_0) + \theta(w_0 + 2z_s) \quad (4-17)$$

$$\begin{aligned} \text{여기서, } \theta(w_0) = & \frac{\rho_1 i du}{4\pi} \left[\frac{1}{\sqrt{(u-u_0)^2 + v_0^2 + w_0^2}} \right. \\ & + \sum_{n=1}^{\infty} k^n \left(\frac{1}{\sqrt{(u-u_0)^2 + v_0^2 + (2nh+w_0)^2}} \right. \\ & \left. \left. + \frac{1}{\sqrt{(u-u_0)^2 + v_0^2 + (2nh-w_0)^2}} \right) \right] \end{aligned} \quad (4-18)$$

M 점에서의 전체적인 전위는

$$V = \int_{u_s=0}^{u_p} \theta(w_0) du + \int_{u_s=0}^{u_p} \theta(w_0 + 2z_s) du \quad (4-19)$$

$$\begin{aligned} \text{여기서 } \int_0^{u_p} \theta(w_0) du = & \frac{\rho_1 i}{4\pi} \left[\text{Ln} \left(\frac{u_p - u_0 + \sqrt{(u_p - u_0)^2 + v_0^2 + w_0^2}}{-u_0 + \sqrt{u_0^2 + v_0^2 + w_0^2}} \right) \right. \\ & + \sum_{n=1}^{\infty} k^n \text{Ln} \left(\frac{(u_p - u_0) + \sqrt{(u_p - u_0)^2 + v_0^2 + (2nh + w_0)^2}}{-u_0 + \sqrt{u_0^2 + v_0^2 + (2nh + w_0)^2}} \right) \\ & \left. + \sum_{n=1}^{\infty} k^n \text{Ln} \left(\frac{(u_p - u_0) + \sqrt{(u_p - u_0)^2 + v_0^2 + (2nh - w_0)^2}}{-u_0 + \sqrt{u_0^2 + v_0^2 + (2nh - w_0)^2}} \right) \right] \end{aligned} \quad (4-20)$$

$\int_0^{u_p} \theta(w_0 + 2z_s)$ 는 식 (4-20)에서 w_0 대신에 $w_0 + 2z_s$ 을 대입하여 V 는 다음과

같은 간단한 형태로 표현될 수 있다.

$$V = \frac{\rho_1 I}{4\pi L} \psi[u_p, u_0, v_0, w_0] + \psi[u_p, u_0, v_0, (w_0 + 2z_s)] \quad (4-21)$$

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

$$\begin{aligned} u_p &= (x_p - x_s) \cos\alpha + (y_p - y_s) \sin\alpha \\ u_0 &= (x_0 - x_s) \cos\alpha + (y_0 - y_s) \sin\alpha \\ v_0 &= (y_0 - y_s) \cos\alpha - (x_0 - x_s) \sin\alpha \\ w_0 &= z_0 - z_s \end{aligned} \quad (4-22)$$

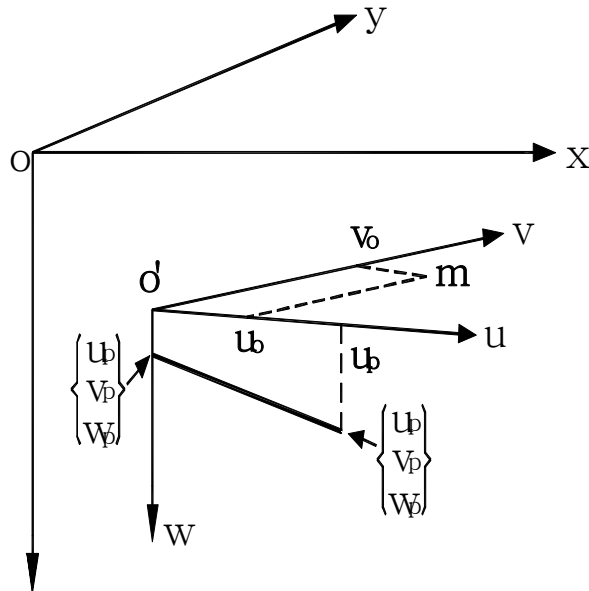


Fig. 4.3 Arbitrarily Arrangement of Linear Conductor

임의의 형태로 매설되어 있는 다층 대지구조의 상층부 직선 도체를 그림 4.3에 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.

새로운 등가 수평도체의 특성은 식(4-23)과 같으며 점 $M(u_0, v_0, 0)$ 에서 도체로 인한 전위는 $0'u$ 축상의 점 $M'(u'_0, v'_0, 0)$ 에서 수평 도체에 의한 전위와 같으며,

$$\begin{aligned} u'_s &= v'_s = w'_s = 0 \\ v'_p &= w'_p = 0 \\ u'_p &= \sqrt{u_p^2 + (w_p - w_s)^2} \end{aligned} \quad (4-23)$$

새로운 측정점 M'의 좌표는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} u'_0 &= [u_p u_0 + w_s (w_s - w_p)] / u'_p \\ v'_0 &= [u_0^2 + v_0^2 + w_s^2 - u_0'^2]^{\frac{1}{2}} \\ w'_0 &= w_0 = 0 \end{aligned} \quad (4-24)$$

직선도체의 전극이 상호연결되어 메시 접지전극과 같으며, 임의의 전극에 대한 상층부 (x_0, y_0, z_0) 의 전위는 식(4-21)에서 계산 값과 같이 각 직선도체 전위의 합과 같고 예를 들어 각각의 직선도체가 j 로 표기된다면, 전체 전위는 다음과 같으며,

$$V = \frac{\rho_1 I}{4\pi L} \sum_{j=1}^m \{ \Psi_j [u_p, u_0, v_0, w_0] + \Psi_j [u_p, u_0, v_0, (w_0 + 2z_s)] \} \quad (4-25)$$

여기서, L : 매설된 도체의 전체 길이

m : 직선도체 수

메시 접지도체와 같은 상호 결합된 임의의 직선도체의 전위계산을 위해 다음과 같은 파라미터들의 함수로 나타낸다.

$$V = f(\rho_1, k, I, L, x_s, y_s, z_s, x_p, y_p, z_p, x_0, y_0, z_0, \alpha) \quad (4-26)$$

전위를 구하는 식 (4-26)에 관하여 도체표면의 전위(GPR) 값을 산출하여 인가된 전류로 나눈다면 접지도체의 접지저항을 구할 수 있고, 지표면의 전위분포를 구함으로써 지면에서의 보폭전압 및 접촉전압의 분포를 구할 수 있다.

V. 이상전압의 측정

전기철도설비에서 고장은 일반적으로 일어나는 것이며, 특히 지락 발생 고장전류가 접지전극 등을 통하여 대지로 방전되게 하여 전기설비 주변 및 내부에 전위차가 발생하여 인체 및 설비의 안전 등 절연 특성에 위험이 초래되며, 최근에 전기철도차량의 출력 증가로 인해 전력 수요가 급속하게 증가하였고, 상대적으로 고장전류에 의한 대지전위의 상승폭이 커지고 있으며, 이는 설비의 고장용량이 증가하고 있기 때문이다. 결과적으로, 대지전위 상승 폭 증가는 설비의 절연 및 인체의 안전등에 미치는 영향이 위험의 증폭으로 연결되며 이와 같은 위험에 대비하기 위한 것이 전기철도 및 모든 전기설비의 접지는 적합한 시스템을 설계하여 대지전위 상승 억제 및 고장 전류를 제어하는 등의 대책이 시급한 현실이다. 본 논문에서는 전기철도 급전계통에서 발생하는 고장이나 뇌격 등에 의한 이상전압 측정을 하기 위하여 운전되고 있는 전기철도 구간에서 철로 주변의 전기설비에 나타나는 대지전위의 측정을 위한 측정시스템을 구성하고, 전기철도 차량의 정상적인 운행에 의한 이상전압(대지 전위), 철도 급전계통에서 임의로 지락고장을 발생시켰을 때의 이상전압 및 공통접지시스템으로 시공된 차량기지 에서 차량에 전원을 공급하는 순간 등에 대한 이상전압을 측정하였다.

A. 정상운전 상태의 대지전위 측정

고속 및 일반 철도의 운행구간에서 전기기관차의 정상 운전 및 사고 시 대지전위를 측정하기 위해 운전되고 있는 구간에서 측정시스템을 구성하고, 대지전위를 측정하기 위한 방법 및 이론 등을 정립한다.

전기철도 급전계통의 전기철도 차량이 운전되는 구간에서 철도차량이 정상적으로 운전 중인 상태에 대한 선로변의 대지전위를 측정하는 시험을 실시하였으며, 시험결과를 분석하여 전기 차량이 정상적으로 운전되는 경우에 선로변의 대지전위가 인체에 영향을 미치는 정도를 검토하였다. 고속 및 일반 전기철도 운행구간에서 전기기관차 운행 시 정상 상태에서 대지전위를 측정하는데 목적이 있다.

1. 측정 회로 및 측정방법

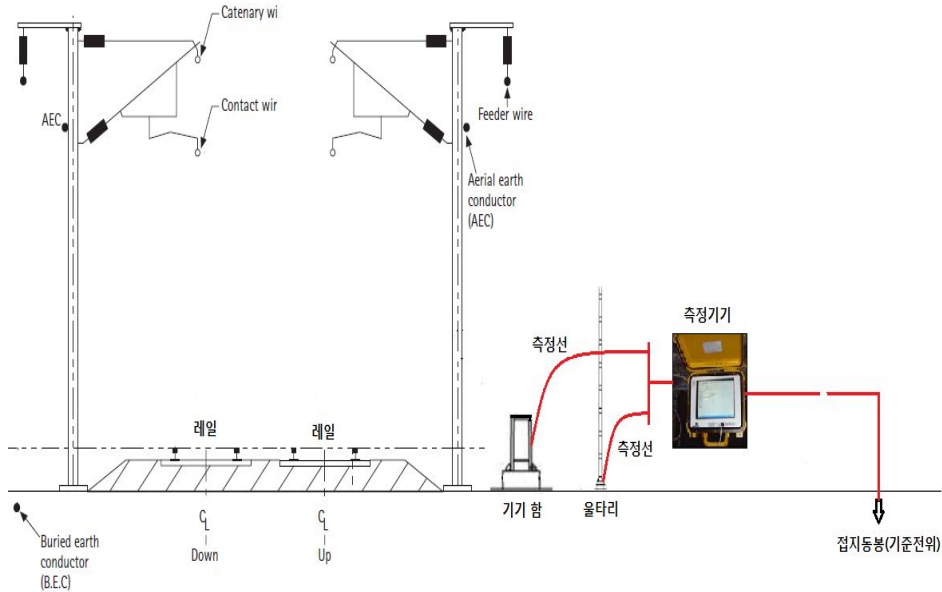


Fig. 5.1 Diagram of Measurement

그림 5.1의 측정회로는 전기철도 급전계통의 철도차량 정산 운전시에 울타리와 외함 등의 전위 측정을 하기 위한 목적으로 약 50[m] 정도의 거리를 이격 한 후에 접지 동봉을 시공하여 영전위 점 즉 기준전위를 잡고, 그 점을 기준으로 울타리 및 외함에 대하여 정상 운전시의 대지전위를 측정하는 회로이다. 측정항목은 전기철도 차량의 정상상태 운전시 접지식 울타리, 비접지식 대지전위, 접지식 철재기둥(CCTV 지지주)의 전위를 측정하였다.

2. 측정 결과 검토

전기철도 급전계통에서 전기철도 차량의 정상 상태 운전시 그림 5.2는 무부하 상태, 그림 5.3은 KTX 운전상태, 그림 5.4는 무궁화 열차 운전상태의 대지전위 측정 데이터에 대한 분석결과를 나타내고 있다.

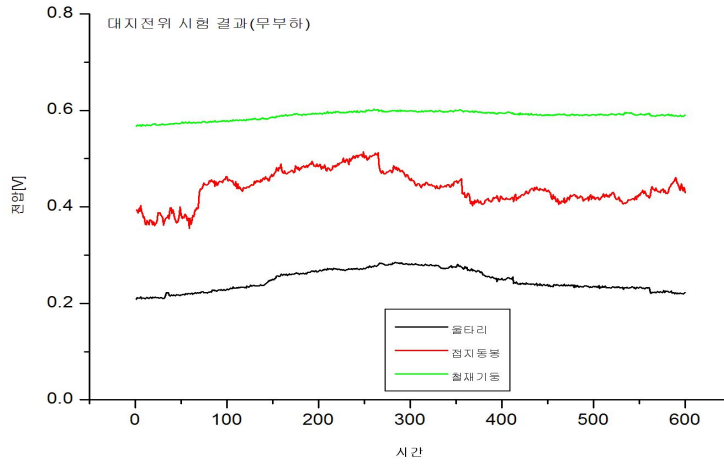


Fig. 5.2 Results of Ground Potential(No-load)

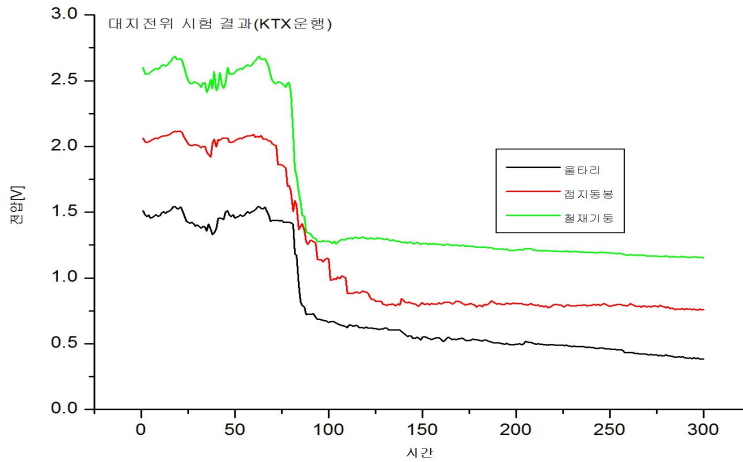


Fig. 5.3 Results of Ground Potential(KTX)

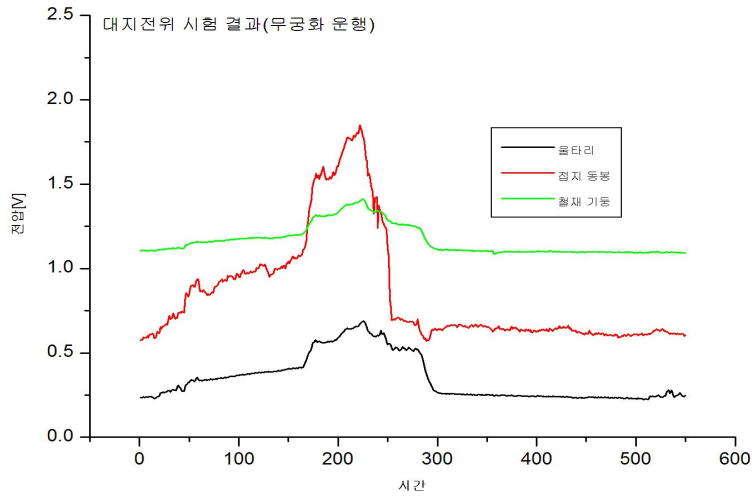


Fig. 5.4 Results of Ground Potential(Normal Car)

Table 5.1 Results of Measurement(Normal Operation)

구 분	대지 전위[V]		
	울타리(접지)	CCTV 지지주(접지)	접지 동봉(비접지)
무부하 상태	0.238	0.585	0.458
KTX 운전	1.54	2.67	2.11
무궁화 열차	0.69	1.41	1.85

전기철도 급전계통에서 전기철도 차량의 정상 운전상태 시의 대지전위 측정 데이터에 대한 분석 결과는 다음과 같다

첫째 열차가 운행되지 않는 무부하 상태에서 접지된 울타리의 전위가 0.238[V], 비접지인 CCTV 지지주(철재 기둥) 근처의 대지전위는 0.458[V] 및 접지된 CCTV 지지주(철재 기둥)의 전위는 0.585[V]를 나타내고 있다.

둘째 KTX가 운전(상행)되는 상태에서는 접지된 울타리의 전위가 1.54[V], 비접지인

CCTV 지지주(철재 기둥) 근처의 대지전위는 2.11[V] 및 접지된 CCTV 지지주(철재 기둥)의 전위는 2.67[V]를 나타내고 있다.

셋째 무궁화 열차가 운전되는 상태에서는 접지된 울타리의 전위가 0.69[V], 비접지인 CCTV 지지주(철재 기둥) 근처의 대지전위는 1.85[V] 및 접지된 CCTV 지지주(철재 기둥)의 전위는 1.41[V]를 나타내고 있다.

넷째 대지전위의 측정데이터를 분석한 결과 정상적인 운전 상태에서는 모든 대지전위가 안전한 상태임을 알 수 있다. 특히 비접지 상태인 경우에 더 낮은 전위를 나타내고 있다.

B. 고장 상태의 대지전위 측정

1. 측정회로 및 측정방법

그림 5.5의 전기철도 급전계통에서 인공으로 지락(단락) 고장을 발생시키는 점에서 고장 지락전류에 의한 고장점 주변에 유기되는 대지전위를 측정하기 위한 것이다. 시험 항목은 지락고장 및 사고시 설비고장에 의한 이상전압 측정과 지락고장 및 사고시 설비고장에 의한 신호기기 이상전압 측정이다. 시험방법은 시험 장소의 위치에서 시험 지락 전선을 설치한 후 변전소에서 차단기를 투입하여 시험지락을 발생시키고, 지락고장에 의한 레일 및 주변 기기 등의 이상전압과 접지전극의 연결 방법별 대지전위 등을 측정한다. 시험장비는 전력 분석기, Line CT 및 VT, 접지저항 측정 장치, 오실로스코프 등의 장비를 활용한다. 지락지점의 측정회로는 시험 지락 측정지점에서 그림 5.6과 같이 레일연결측, 시험지락측, 접지측의 전선 등에 이상전압 측정을 위한 주변의 신호기기에 이상전압을 측정하기 위한 및 전압계 및 전력분석기를 설치한다.

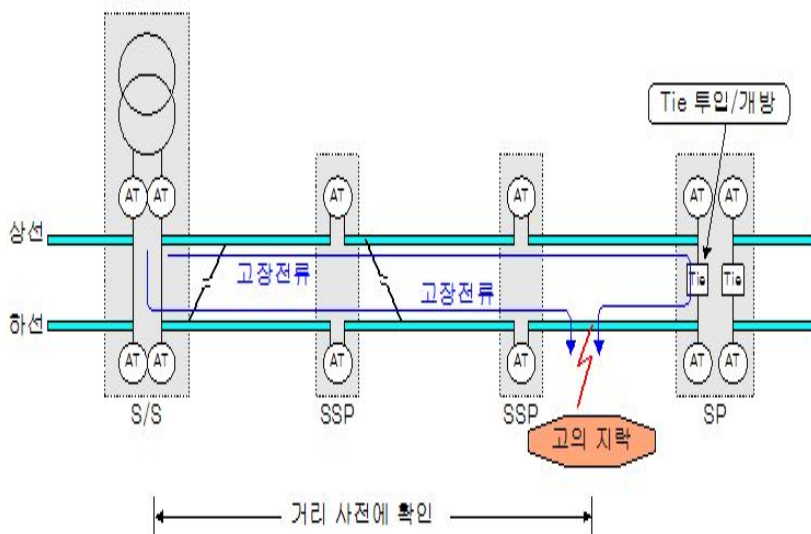


Fig. 5.5 Concepts of Tests

그림 5.6의 측정회로는 기기외함 및 레일 등의 전위 측정을 목적으로 약 30[m] 정도의 거리를 두고 접지동봉을 타설하여 기준전위점, 즉 상대 영전위점을 잡고 기준 전위점을 기준으로 레일, 주변의 신호기기함, 매설접지선 및 외함에 대하여 지락고장시의 이상전압을 측정하는 회로이며, 전차선과 접지선 사이에 시험지락 전선을 연결하여 지락고장 시, 지락전류 I_F 가 흐르고, 이 지락고장 전류는 FPW와 접지선으로 분류하게 된다. 접지선으로 흐르는 전류 I_g 는 임피던스 분당선 및 매설지선과 레일로 다시 분류하게 되며, 분류된 전류가 각각의 임피던스와 작용하여 전위를 발생시키는 것이며, 본 시험에서는 설정한 레일 및 기기외함, 기준영전위점 및 매설접지선에 발생하는 전위를 VT로 결선하여 접지동봉을 이용하여 측정하는 회로이다.

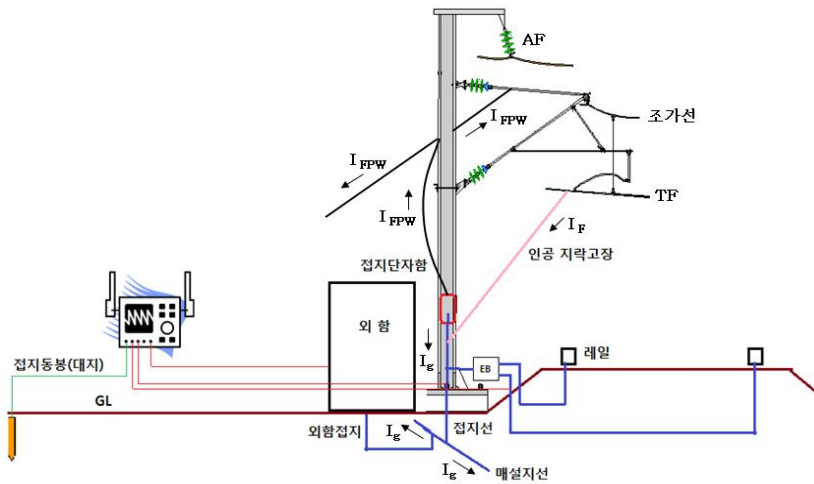


Fig. 5.6 Diagram of Measurement

2. 측정결과 검토

전기철도 급전계통에서 상부측과 하행선에서 각각 인공적으로 지락고장을 발생시키는 경우에 대한 대지전위 측정데이터에 대한 분석결과는 다음과 같다.

a. 상행선지락 (상행선 측정)

전기철도 급전계통에서 시험 지락 고장점을 상행선에서 발생시키는 경우에 상행선 측에서 측정한 값을 정리한 것이다.

그림 5.7은 상행선측 전철주에서 시험지락 전선을 이용한 상행선을 시험지락 시킨 경우에 기준 전위점을 기준으로 레일 및 외함과 매설접지전극에 발생하는 전위와 레일 및 매설접지전극에 발생하는 전위를 측정한 결과이다.

그림 5.7 과 같이 기준 전위점을 기준으로 레일 및 외함, 매설접지전극과 레일 사이의 전위는 최대 10[V] 정도로 나타나며, 매설접지전극에는 지락 시 순간적으로 발생하는 전압은 최대 80[V] 정도가 나타난다.

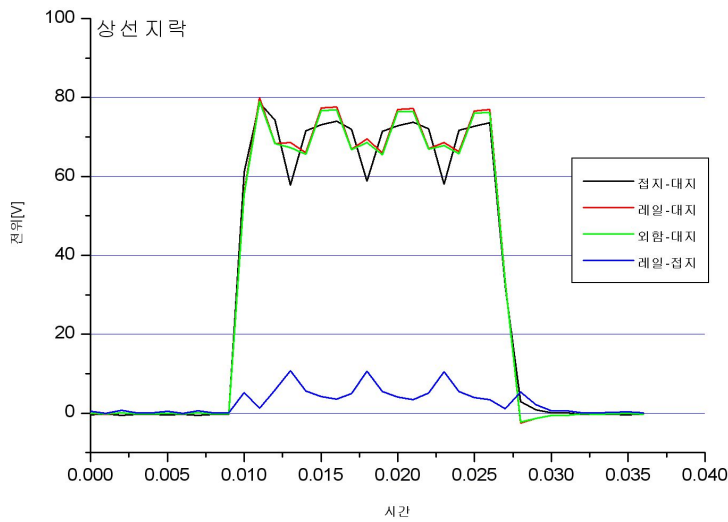


Fig. 5.7 Potential Distribution(Ground-Fault)

b. 하행선지락 (하행선 측정)

시험 지락고장점을 하선에서 발생시키는 경우에 상행선 측에서 측정한 값을 정리한 것이다.

그림 5.8은 하행선에서 시험지락 전선을 이용하여 상행선을 1차로 시험지락 시킨 경우 기준 전위점을 기준으로 레일 및 외함과 매설접지전극에 나타나는 전위 및 레일

과 매설접지전극의 전위를 측정 한 결과이다.

그림 5.8 과 같이 기준 전위점을 기준으로 매설접지전극, 레일 및 외함에 지락고장 순간에 나타나는 전압은 최대 70[V] 정도가 나타나며, 매설접지전극과 레일 사이의 전위는 최대 10[V] 정도의 크기를 나타낸다.

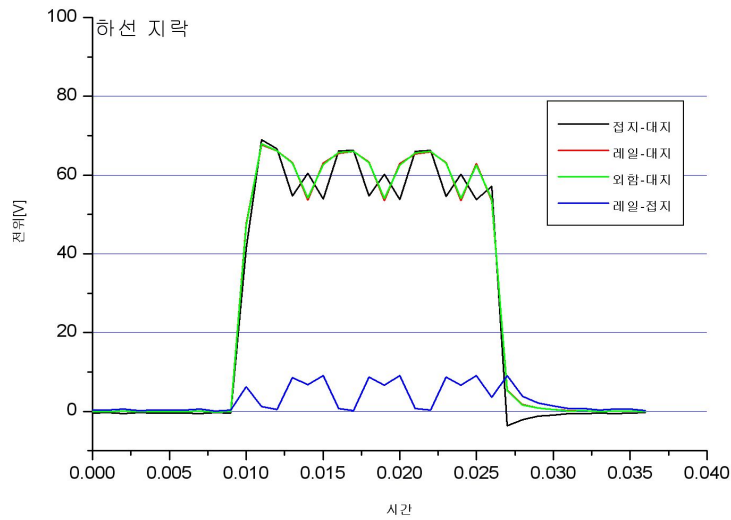


Fig. 5.8 Potential Distribution(Ground-Fault)

c. 측정 결과 검토

같은 지락고장 위치에서 상행선과 하행선에서 지락고장이 발생한 경우에 대한 각각의 전위를 비교하였다.

(1) 접지 - 대지 전위

그림 5.9는 상행선과 하행선에서 시험 지락고장이 발생한 경우 접지전극과 기준 전위점의 이상전압 측정값을 비교한 것으로서, 상행선 측 이상전압은 약 20[V] 정도의 차이를 확인 할 수 있다.

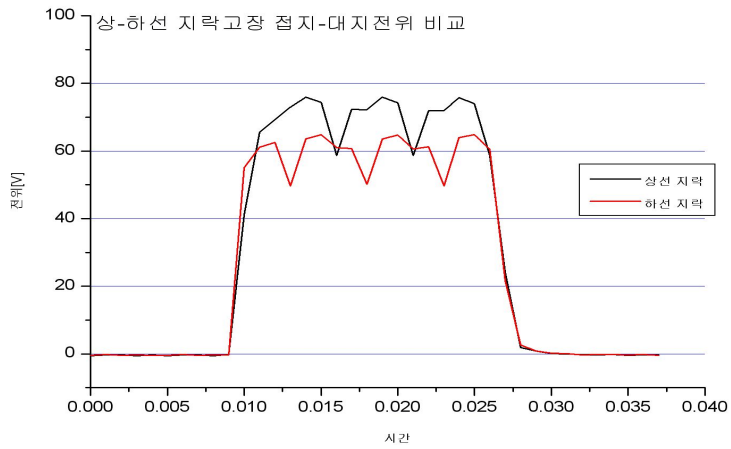


Fig. 5.9 Comparison of Potential Distribution

(2) 외함 - 대지 전위

그림 5.10은 상행선과 하행선에서 시험으로 지락고장이 발생한 경우 기준 전위점과 신호기 외함과의 이상전압 측정값을 비교한 것이다.

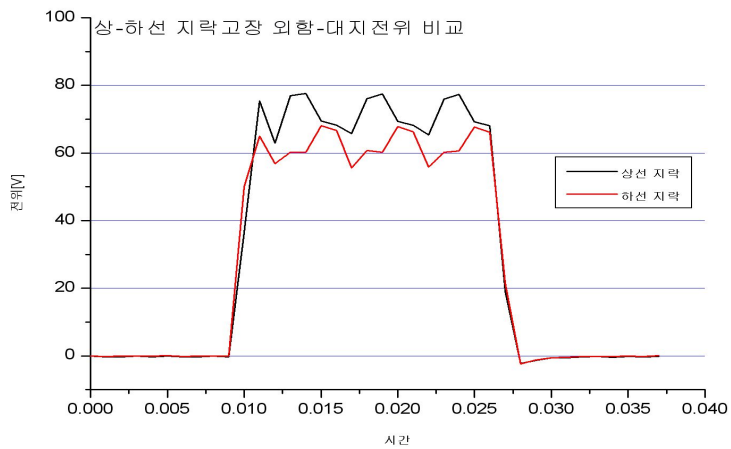


Fig. 5.10 Comparison of Potential Distribution for Box

(3) 레일 - 접지 전위

그림 5.11은 상행선과 하행선에서 인공으로 지락고장이 발생한 경우에 접지전극과 레일과의 이상전압 측정값을 비교하여 그림 5.7에서 보는 바와 같이 레일과 접지전극의 이상전압이 약 10[V] 이며, 레일과 접지전극이 연결되어 있는 것을 확인할 수 있다.



Fig. 5.11 Potential Distribution(Rail-Earth)

(4) 측정 결과

전기철도 급전계통에서 인공적으로 지락고장을 발생시키는 경우에 대하여 공통접지전극으로부터 일정한 거리에서의 대지전위를 측정하기 위하여 각각의 측정점을 연결하는 방법, 즉 나동선으로 연결하는 방법, 절연전선으로 연결하는 방법 및 단독접지전극으로 연결하는 방법에 따른 대지전위 측정데이터에 대한 결과는 다음과 같다. 그림 5.12는 본딩 F-GV 70mm²에 대한 지표면 전위를 그림 5.13은 본딩 CU 35mm²에 대한 지표면 전위를 그림 5.14는 단독접지에 대한 지표면 전위를 나타내고 있다.

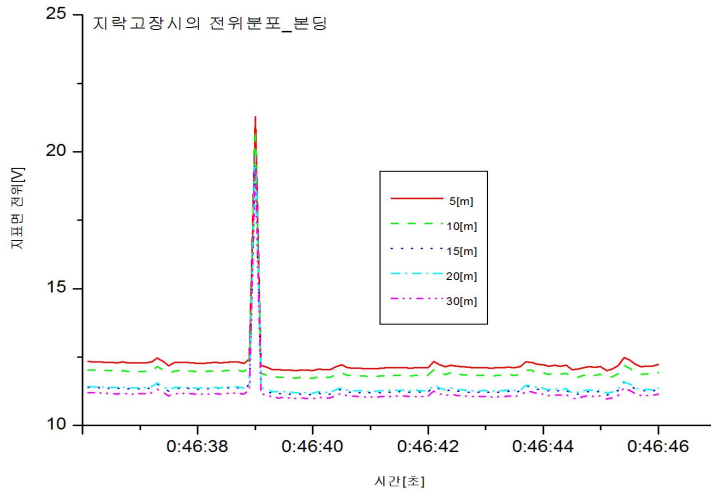


Fig. 5.12 Potential Distribution(F-GV 70mm²)

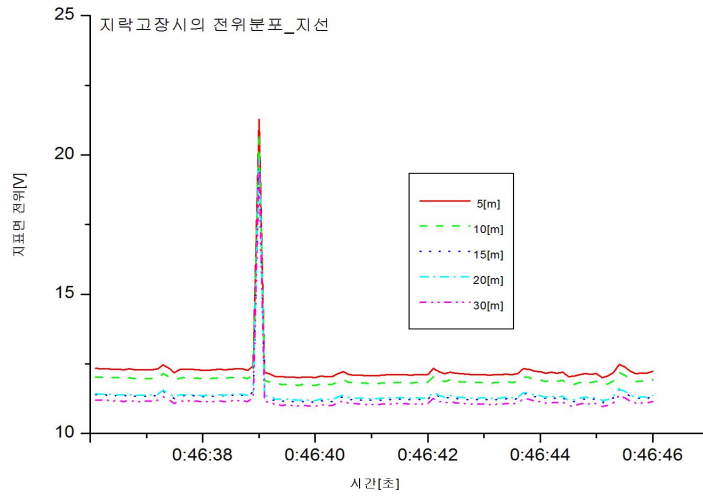


Fig. 5.13 Potential Distribution(CU 35mm²)

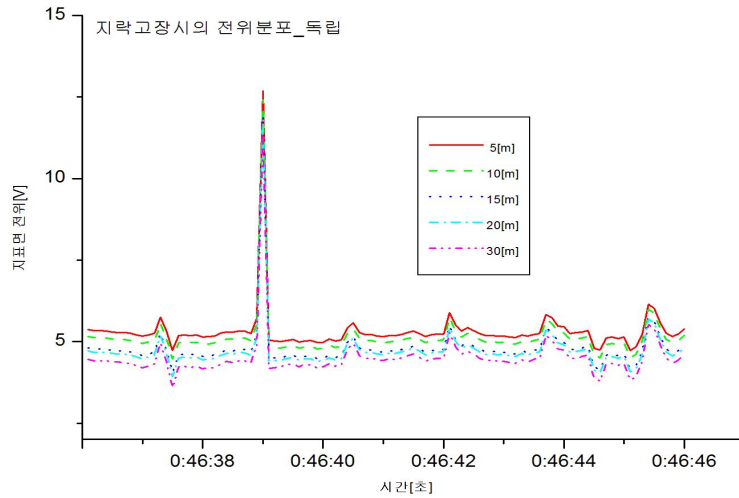


Fig. 5.14 Potential Distribution(Solid grounding)

전기철도 급전계통에서 인공적으로 지락고장을 발생시키는 경우에 대하여 고장 발생시의 대지전위 측정 데이터에 대한 분석 결과는 표 5.2에서 보는 바와 같이 모든 경우에 안전전압의 범위에 만족하는 것을 알 수 있다.

Table 5.2 Measurement of Tests

거 리[m]	대지 전위[V]		
	나동선 연결	GV전선 연결	접지동봉(비접지)
5	18.00	21.27	12.69
10	15.86	20.78	12.42
15	15.41	19.88	11.93
20	14.34	19.87	11.81
30	13.68	18.41	11.34

고장발생 시에 측정의 조건별로 대지전위 측정 결과를 거리의 변화에 따라 분석한 결과에 의하면 각각의 측정점을 나동선(CU 35mm²)으로 연결한 경우에 거리의 변화에 따라 대지전위의 강하가 GV전선(F-GV 95mm²)으로 연결한 경우나 단독 접지방식으로 측정한 경우 보다 급격하게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 측정된 모든 대지전위가 위험전압의 한계값 보다 작게 나타나고 있어서 안전한 상태임을 알 수 있다. 특히 비 접지 상태인 접지 동봉의 전위가 공통접지에 연결된 도체의 전위보다 낮게 나타나고 있음을 알 수 있다.

C. 차량기지에서의 대지전위 측정

KTX 차량의 MCB 동작시에 발생할 수 있는 차량기지 구내의 접지전위를 측정하는데 목적이 있다.

1. 측정 회로 및 측정방법

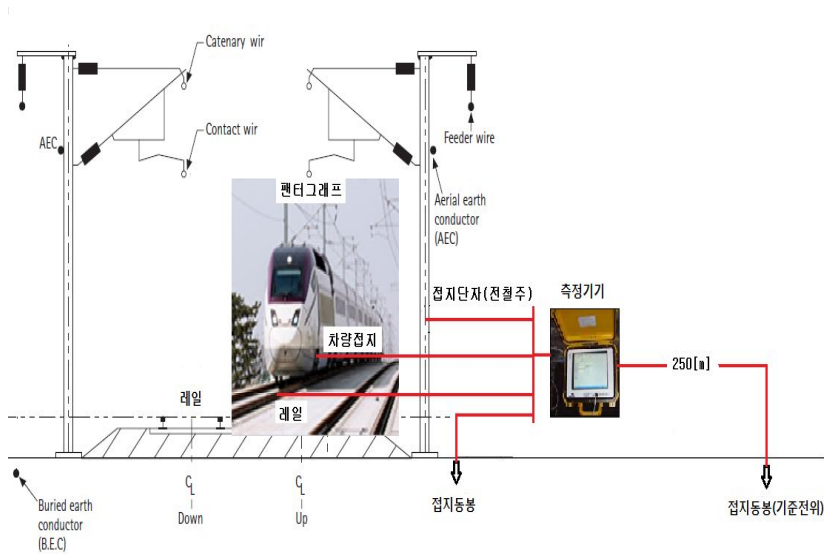


Fig. 5.15 Diagram of Test

그림 5.15의 측정회로는 차량기지 구내에서 KTX 차량의 MCB 동작시 접지단자(전철주), 레일, 차량접지단자 및 접지동봉(전철주 주변에 설치) 등의 전위를 측정하기 위해 접지동봉을 약 250[m] 정도의 거리에 시공하여 기준전위점과 상대 영전위점을 기준으로 잡았으며, 영전위점을 기준으로 접지단자(전철주), 레일, 차량접지단자 및 접지동봉(전철주 주변에 설치) 등에 대하여 KTX 차량의 MCB 동작시의 대지전위를 측정하는 회로이다. 측정내용은 공통접지시스템으로 시공된 전기철도 차량기지에서도 고

속철도 차량의 전원 연결 상태에 따른 접지단자(전철주), 접지동봉 및 레일의 전위를 측정하였으며 다음과 같이 고속철도 차량의 MCB 투입시, 고속철도 차량의 MCB 투입 상태, 고속철도 차량의 MCB 개방시, 고속철도 차량의 MCB 개방상태의 4가지로 분류하였다.

a. 고속철도 차량의 MCB 투입시

공통접지시스템이 시공된 차량기지의 도착고에서 고속철도 차량의 MCB 투입동작시의 접지단자(전철주), 접지계통과 분리된 접지동봉 및 레일의 대지전위 측정 데이터에 대한 측정결과는 그림 5.16과 같다. 단, ch 1(흑색):접지단자(전철주), ch 2(적색):접지동봉(접지계통과 분리), ch 3(연두색):레일

공통접지시스템으로 시공된 차량기지의 도착고에서 차량의 MCB 투입시 나타나는 대지전위의 측정 데이터에 대한 분석 결과는 다음과 같다.

첫째 KTX 차량의 MCB 3차 투입시 접지단자(전철주)의 대지전위는 1.211→5.033→1.296[V]로, 차량기지의 접지계통과 별도로 설치한 접지동봉의 전위는 0.839→18.238→1.911[V] 및 차량이 정지한 레일의 대지전위는 1.271→5.063→1.357[V]의 변화를 나타낸다.

둘째 KTX 차량의 MCB 투입시 차량기지의 접지계통과 연결된 접지단자(전철주) 및 차량이 운전되는 레일의 전위는 최소 0.993[V]에서 투입시점에 최대 5.033[V]로 증가했다가 MCB 동작전의 정상전위로 복귀되고 있으나, 차량기지의 접지계통과 별도로 설치된 전철주 부근의 접지동봉에서는 최소전위 0.839[V]에서 최대전위 18.238[V]까지 큰 변동 후에 MCB 동작전의 정상상태 전위로 복귀되는 것을 확인할 수 있다.

셋째 차량의 MCB 투입시 발생하는 대지전위의 측정데이터를 분석한 결과 차량기지의 접지계통과 연결된 부분의 대지전위는 낮게 나타나는 반면에 차량기지의 접지계통과 분리된 접지동봉에서 대지전위의 변화가 크게 나타나는 것은 차량기지의 접지계통이 접지단자(전철주) 및 레일 등은 본딩이 되어 있는 것으로 판단된다.

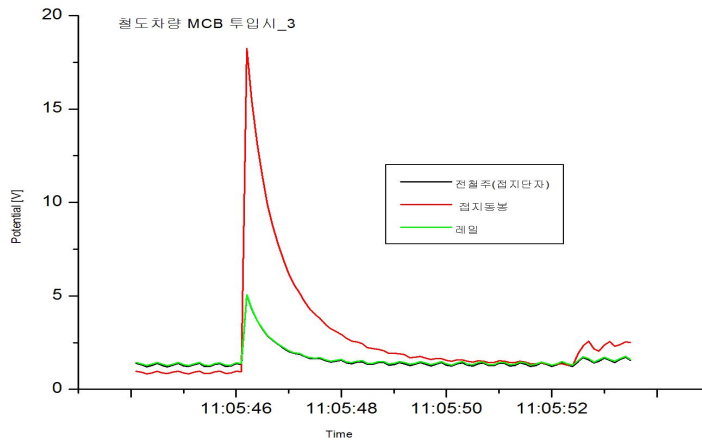


Fig. 5.16 Potential Distribution(MCB close)

b. 고속철도 차량의 MCB 투입상태(전압 인가상태)

차량기지의 도착고에서 고속철도 차량의 MCB 투입동작 후에 차량에 전압이 인가된 상태의 대지전위 측정 데이터에 대한 측정결과는 그림 5.17과 같다. (단, ch 1(흑색):접지단자(전철주), ch 2(적색):접지동봉(접지계통과 분리), ch 3(연두색):레일)

차량기지의 도착고에서 차량의 MCB 투입상태(전압 인가상태)시 나타나는 대지전위의 측정 데이터에 대한 분석 결과는 다음과 같다

첫째 KTX 차량의 MCB 투입상태 접지단자(전철주)의 대지전위는 1.479~1.783[V]로, 차량기지의 접지계통과 별도로 설치한 접지동봉의 전위는 1.981~2.749[V] 및 레일의 대지전위는 1.449~1.799[V]의 범위에서 변화를 나타내고 있다.

둘째 KTX 차량의 MCB 투입상태에서 차량기지의 접지계통과 연결된 접지단자(전철주) 및 차량이 운전되는 레일의 전위는 최소 1.449[V]에서 최대 1.909[V]의 범위에서 운전되고 있으며, 차량기지의 접지계통과 별도로 설치된 전철주 부근의 접지동봉에서도 최소전위 1.981[V]에서 최대전위 2.761[V]까지 범위에서 차량기지의 접지계통과 연결된 부분의 전위보다 높게 나타나고 있음을 확인할 수 있다.

셋째 차량의 MCB 투입상태에서 발생하는 대지전위의 측정데이터를 분석한 결과 차량

기지의 접지계통과 연결된 부분의 대지전위 보다 차량기지의 접지계통과 분리된 접지동봉에서 대지전위의 변화가 크게 나타나는 것을 확인하였다.

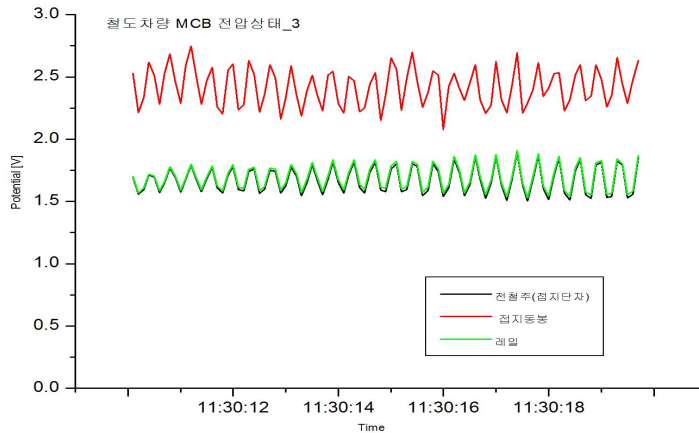


Fig. 5.17 Potential Distribution(MCB on)

c. 고속철도 차량의 MCB 개방시

차량기지의 도착고에서 고속철도 차량의 MCB 개방동작시의 대지전위 측정 데이터에 대한 측정결과는 그림 5.18과 같다. (단, ch 1(흑색):접지단자(전철주), ch 2(적색):접지동봉(접지계통과 분리), ch 3(연두색):레일)

차량기지에서 고속철도 차량의 MCB 개방시 나타나는 대지전위의 측정 데이터에 대한 분석 결과는 다음과 같다

첫째 KTX 차량의 MCB 개방시 접지단자(전철주)의 대지전위는 1.630→1.311[V]로, 차량기지의 접지계통과 별도로 설치한 접지동봉의 전위는 2.502→0.945[V] 및 레일의 대지전위는 1.727→1.399[V]의 변화를 나타낸다.

둘째 KTX 차량의 MCB 개방시 차량기지의 접지계통과 연결된 접지단자(전철주) 및 차량이 운전되는 레일의 전위는 최대 1.723[V]에서 개방시점에 최소 0.944[V]로 감소하여 무전압상태 전위로 복귀되고 있으나, 차량기지의 접지계통과 별도로 설

치된 접지동봉에서는 최대전위 2.516[V]에서 최소전위 0.771[V]까지 큰 변동을 발생시킨 후에 무전압상태의 전위로 복귀되는 것을 확인할 수 있다

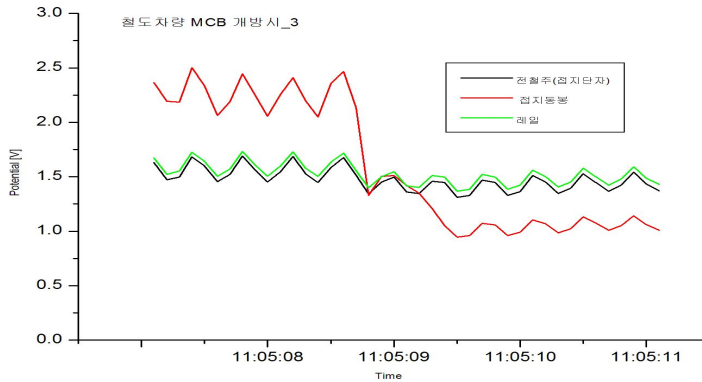


Fig. 5.18 Potential Distribution(MCB open)

d. 고속철도 차량의 MCB 개방상태(전압 무인가상태)

차량기지의 도착고에서 고속철도 차량의 MCB 개방동작 후에 차량에 전압이 인가되지 않은 상태의 대지전위 측정 데이터에 대한 측정결과는 그림 5.19와 같다. (단, ch 1(후색):접지단자(전철주), ch 2(적색):접지동봉(접지계통과 분리), ch 3(연두색):레일)

차량기지에서 차량의 MCB 개방상태에서 나타나는 대지전위의 측정 데이터에 대한 분석 결과는 다음과 같다

첫째 차량의 MCB 개방상태에서 접지단자(전철주)의 대지전위는 최대 1.492[V], 최소 전위는 1.011[V]로, 차량기지의 접지계통과 별도로 설치한 접지동봉의 전위는 최대 1.429[V], 최소전위는 0.721[V]이며, 레일의 대지전위는 최대전위 1.581[V] 및 최소전위 1.102[V]의 변화를 나타내고 있다.

둘째 KTX 차량의 MCB 개방상태에서 차량기지의 접지계통과 연결된 접지단자(전철주) 및 차량이 운전되는 레일의 전위는 최대 1.581[V]에서 최소 1.011[V]의 범위를 나타내고 있으나, 차량기지의 접지계통과 별도로 설치된 전철주 부근의 접지

동봉에서는 최대전위 1.429[V]에서 최소전위 0.721[V]까지 큰 변동을 나타내는 것을 확인할 수 있다.

셋째 이러한 결과는 차량기지의 접지계통과 연결된 부분에서 대지전위의 변동범위가 작게 나타나는 반면에 차량기지의 접지계통과 분리된 접지동봉에서 대지전위의 변화가 크게 나타나는 것은 고양차량기지의 접지계통에서 등전위화를 위한 접지 시설이 보완이 필요한 것으로 판단된다.

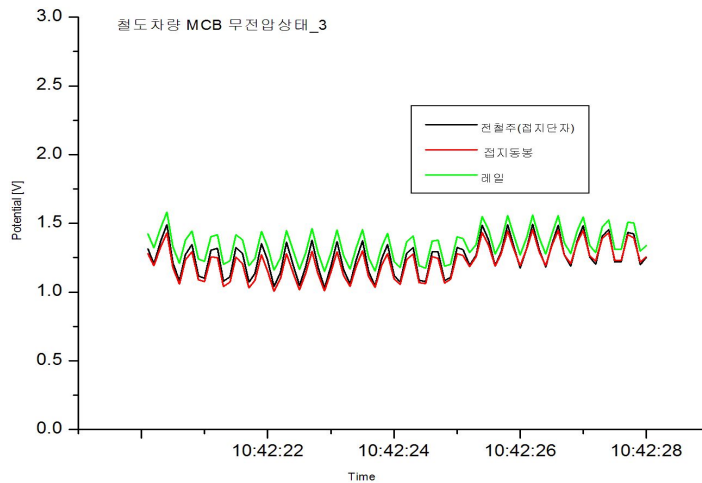


Fig. 5.19 Potential Distribution(no Voltage)

2. 측정 결과 검토

본 시험은 고속철도 차량의 MCB 동작시에 발생할 수 있는 차량지기 구내의 접지전위를 측정하는데 목적이 있다.

이러한 목적을 위하여 차량지기 구내에서 KTX 차량의 MCB 동작시 접지단자(전철주), 레일, 차량접지단자 및 접지동봉(전철주 주변에 설치) 등의 등의 전위를 측정하기 위

하여 약 250[m] 정도의 거리를 이격하여 접지동봉을 타설하여 기준영전위 점을 잡았으며, 영전위점을 기준으로 접지단자(전철주), 레일, 차량접지단자 및 접지동봉(전철주 주변에 설치) 등에 대하여 고속철도 차량의 MCB 동작시의 대지전위 및 차량의 팬토그래프 개방시의 대지전위 등을 측정하고 분석하였다. 측정한 자료를 검토한 결과는 다음과 같다.

첫째 차량의 MCB 투입시 발생하는 대지전위의 측정데이터를 분석한 결과 차량기지의 접지계통과 연결된 부분의 대지전위는 낮게 나타나는 반면에 차량기지의 접지계통과 분리된 접지동봉에서 대지전위의 변화가 크게 나타나는 것을 확인하였으며, MCB의 개방시에도 차량기지의 접지계통과 연결된 부분의 대지전위는 낮게 나타나는 반면에 차량기지의 접지계통과 분리된 접지동봉에서 대지전위의 변화가 크게 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

둘째 차량의 MCB 투입상태(전원 인가상태) 및 개방상태(전원 무인가 상태)에서도 차량기지의 접지계통과 연결된 부분의 대지전위는 낮게 나타나는 반면에 차량기지의 접지계통과 분리된 접지동봉에서 대지전위의 변화가 크게 나타나는 것을 확인하였다.

셋째 차량의 MCB 투입 및 개방 동작시 차량기지의 접지계통과 연결된 부분에서 발생하는 대지전위의 측정데이터를 분석한 결과 투입동작이 일어나는 차량의 부근에서는 전위의 변화가 큰 반면에 접지단자(전철주)의 전위 변화는 상대적으로 작게 나타나고 있다. 또한, KTX 차량의 MCB 투입상태(전압 인가) 및 개방상태(무전압 인가)시 접지단자(전철주)의 대지전위가 차량접지의 전위와 레일의 전위보다 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

넷째 또한, 차량의 팬토그래프를 개방한 상태(무전압 인가)시 접지단자(전철주)의 대지전위가 차량접지의 전위와 레일의 전위보다 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

다섯째 차량의 MCB 동작 및 운전시 발생하는 대지전위의 측정데이터를 분석한 결과 차량기지의 접지계통과 연결된 부분의 대지전위는 낮게 나타나는 반면에 차량기지의 접지계통과 분리된 접지동봉에서 대지전위의 변화가 크게 나타나는 현상과 투입 및 개방동작이 일어나는 차량의 부근에서는 전위의 변화가 큰 반면

에 접지단자(전철주)의 전위 변화는 상대적으로 작게 나타나는 것은 차량기지의 접지계통이 접지단자(전철주) 및 레일 등은 본딩이 되어 있으나, 차량기지 내의 등전위 본딩을 위한 접지시스템 등의 시설에 대한 보완이 필요한 것으로 판단된다.

VI. 시뮬레이션 및 결과 검토

A. 이상전압 발생의 시뮬레이션

그림 6.1과 같이 전차선로 지락고장의 시뮬레이션을 위해 전철변전소의 M상 또는 T상중 한 상만을 전체거리의 전차선로 구분소 사이에 보조구분소가 설치되어 있다고 가정하며 지락고장은 전차선이 레일에 접촉된 경우를 고려하고 지락 발생 시 전위분포 해석을 위한 AT급전회로의 모델링 결과를 그림 6.1에 나타내고 선로 임피던스는 Carson-Pollaczek의 예측 결과를 적용한다.

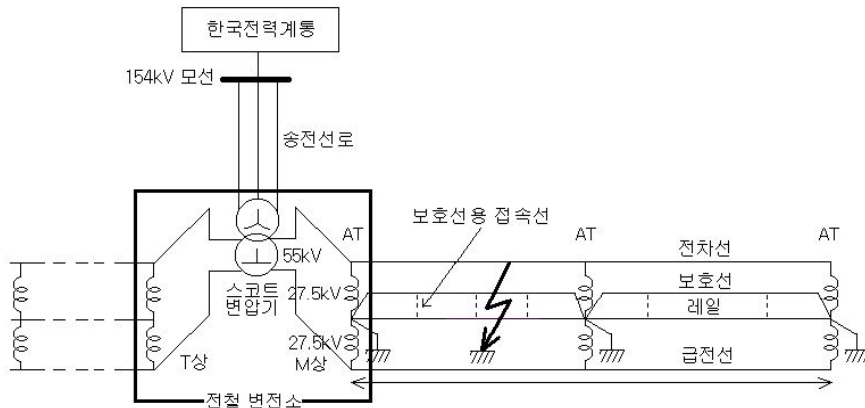


Fig. 6.1 Concepts of Faults of Power system

1. 전철 급전계통의 고장전류 모델

a. 전철 급전계통

그림 6.2는 사례 시스템에서 전철 급전 계통의 급전구분소와 변전소 사이에 보조구분소가 두 군데 배치되어 레일 및 전차선간 단락 사고시 각각의 계통 회로의 고장 전류 해석을 위해, 구분소 및 보조구분소 각각에 AT가 설치되어 있고 전력공급은 변전소에서 이루어진다.

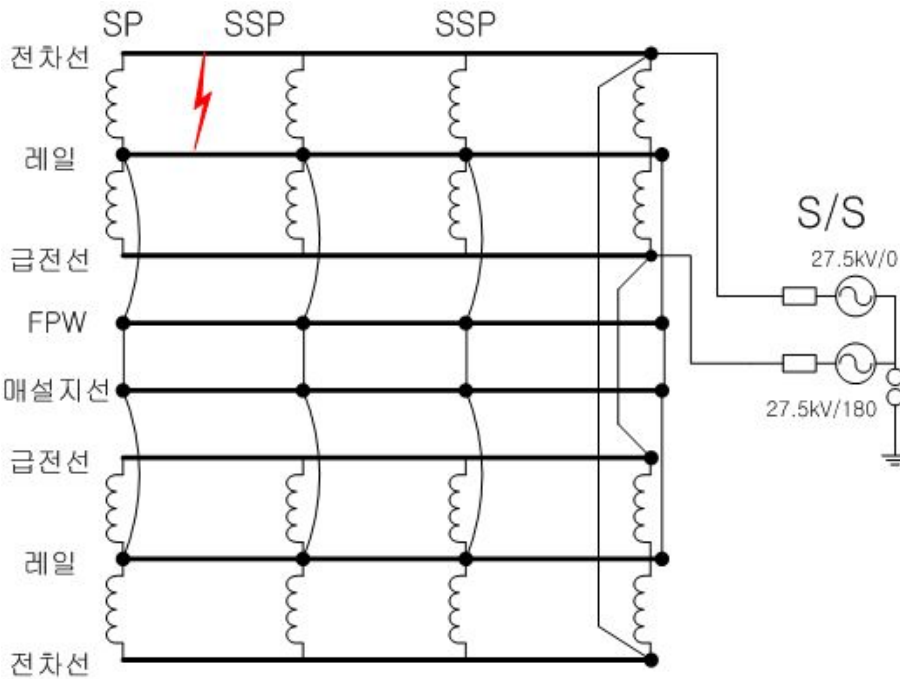


Fig. 6.2 Diagram of Railway Power System

b. 전원계통 임피던스

전원단 전압강하를 표현하기 위한 전철부하 및 지락사고 모의시 변전소의 전원임피던스는 값을 다음과 같이 가정하여,

- o Scott 2차측까지의 전원임피던스 : $0.73569 + j 36.84267 \%$
- 계통 임피던스 : $0.508 + j 2.583 \%$
 (단락용량 3,799 MVA, 100 MVA, 154 kV기준)
- 송전선로 임피던스 : $0.228 + j0.926 \%$ (ACSR 240 4.5 km)
- Scott변압기 임피던스 : 33.3%
 (30/40 MVA, 상별 15 MVA, %Z=10%, 2대 병렬운전)
- $0.73569 + j 36.84267 \%$ = $(0.508 + j 2.583) + (0.228 + j 0.926) + j 33.3)$

c. 급전회로의 선로정수

표 6.1은 급전시스템 해석을 위한 급전회로의 선종을 나타내며 그림 6.3은 AT급전 방식 표준 장주도이다.

Table 6.1 Line Characteristics of AT System

선종류	규격	도체직경	전기저항
보호선	ACSR 95mm ²	13.5mm	0.301Ω/km
급전선	ACSR 160mm ²	18.2mm	0.182Ω/km
전차선	CU 110mm ²	12.34mm	0.1592Ω/km
조가선	CDCU 70mm ²	10.5mm	0.3315Ω/km
레일	50kg/m	90.4mm	0.017Ω/km
매설지선	접지선 38mm ²	6.9558mm	-

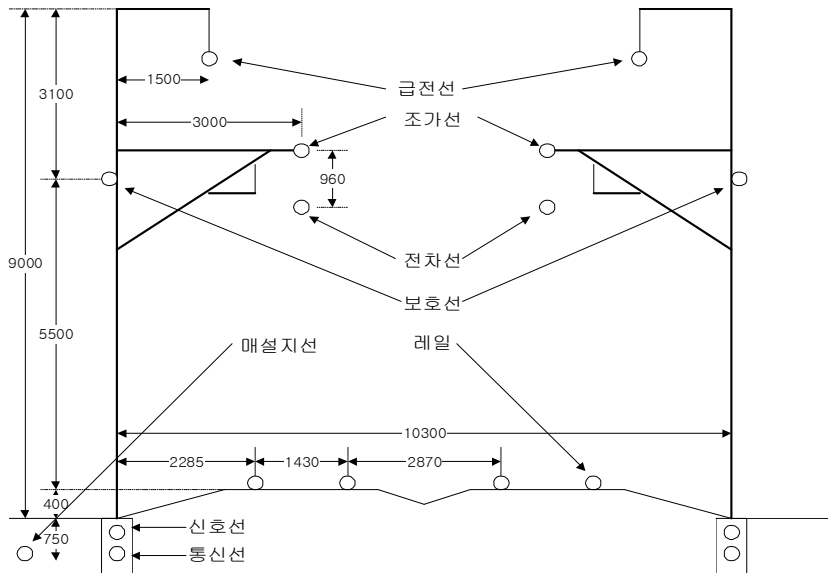


Fig. 6.3 Standard of Pole at AT Power system

Carson-Pollaczek의 계산식을 이용하여 계산한 레일의 대지귀로 임피던스는 다음과 같다. 보조구분소 부근의 대지 저항률은 100 [Ω -m]로 가정하여 계산하였다.

$$\text{Rail 의 등가저항 : } r_R = 0.017 [\Omega/\text{km}]$$

$$\text{등가반경 : } r = 4.52 [\text{cm}]$$

(1) 내부 임피던스

$$\begin{aligned} Z_{R1} &= r_R + j\omega\mu \times 10^{-4}/2 \quad (\mu = 100) \\ &= 0.017 + j1.885 [\Omega/\text{km}] \end{aligned}$$

(2) 외부 임피던스

$$\begin{aligned} Z_{R2} &= \left\{ \omega \left(\frac{\pi}{2} - \frac{4x}{3\sqrt{2}} \right) + j\omega \left(4.605 \log_{10} \frac{4h}{rx} + \frac{4x}{3\sqrt{2}} - 0.1544 \right) \right\} \times 10^{-4} \\ &= 0.0591 + j 1.7164 [\Omega/\text{km}] \quad (\rho=100 [\Omega\text{m}]) \\ &\quad h ; 60 [\text{cm}] \\ &\quad x = 4\pi h \sqrt{20f/\rho} \times 10^{-4} = 0.0026 \quad (\rho = 100 [\Omega\text{-m}] \text{ 인 경우}) \end{aligned}$$

(3) 자기 임피던스

$$\begin{aligned} Z_R &= Z_{R1} + Z_{R2} \\ &= 0.0761 + j 3.6014 [\Omega/\text{km}] \quad (\rho=100 [\Omega\text{m}]) \end{aligned}$$

손실이 발생하는 레일 및 매설지선은 실이 있는 매질 내에 위치하며, 대지로의 누설 저항을 고려하여, Carson-Pollaczek의 원리를 이용하여 정확한 선로정수를 산출하기 곤란하므로 전철 급전계통의 모델에서 사용할 수 있는 정확한 선로정수를 계산한다.

접지임피던스 계산을 위한 레일과 매설지선의 전자계모델을 구성하고, 산출된 접지 임피던스를 이용한 매설지선 등가 회로모델을 도출하는 과정을 기술하고 표 6.2는 매설지선을 모델링하기 위한 무한대 길이인 조건이다. AT급전회로의 모델링은 PI(π) 등가형 선로모델을 사용하여 시뮬레이션의 정확성을 높였으며 그림 6.4와 같이 전기 철도 급전계통의 다중접지방식에서 지락고장이 발생한 경우 사다리꼴의 등가회로로 나타내어 전위분포를 계산하여 유도한다.

Table 6.2 Conditions of Calculation

항 목	시험 조건
매설길이	50 [km]
매설깊이	0.75 [m]
도체면적	38 [mm ²]
대지저항율	100 [Ω m]

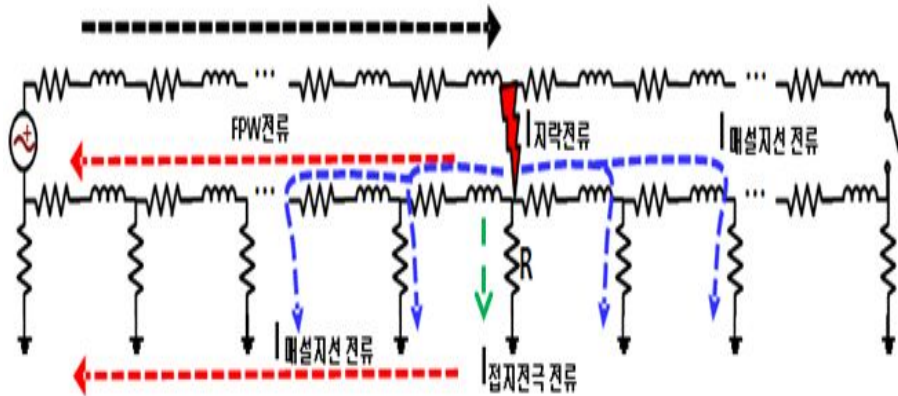


Fig. 6.4 Equivalent Circuit of Power System

그림 6.4의 철도 급전계통의 등가회로는 그림 6.5와 같은 단순한 테브난 등가회로로 할 수 있으며, 그림 6.5에서 고장전류와 전위상승값은 식 (6-1)과 (6-2)로 표현된다.

$$\begin{aligned}
 I_{fault} &= I_{neutral} + I_{ground} & (6-1) \\
 &= (1 - K) \times I_{fault} + K \times I_{fault}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 V_N &= I_{ground} \times Z_N & (6-2) \\
 &= (I_{fault} \times K) \times Z_N
 \end{aligned}$$

여기서, I_{fault} : 고장전류 (= FPW 귀로전류 + 대지 귀로전류)

$I_{neutral}$: FPW 귀로전류

I_{ground} : 대지 귀로전류

$K = 1 - \frac{Z_m}{Z_n}$: 차폐계수

Z_m : 상호임피던스

Z_n : 자기임피던스

$Z_N = R // \frac{Z_{th}}{2}$: FPW 합성 임피던스

$Z_{th} = \frac{\sqrt{Z_n^2 + 4Z_n R_{ave}}}{2}$: FPW의 테브난 등가임피던스

R_{ave} : FPW의 개별 접지저항값

R : 고장점 직하 장주(매설지선)의 접지저항값

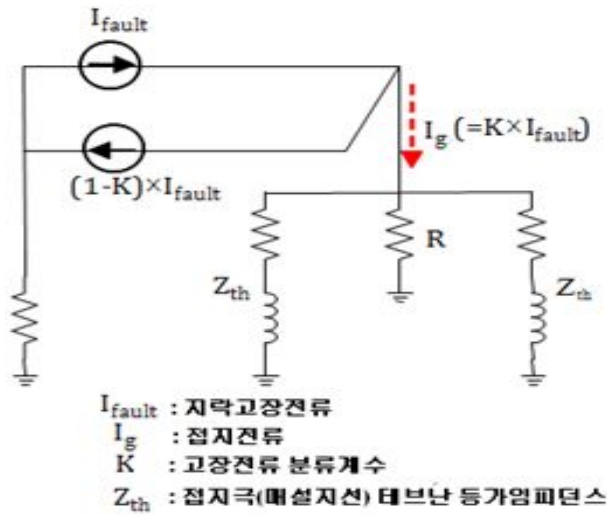


Fig. 6.5 Thevenin's Equivalent Circuit

그림 6.4에서 Z_n 을 무시했을 때 매설지선의 접지저항 R 은 간단히 계산할 수 있으며, 길이(L)가 50 km이고 도체의 굵기가 38 [mm²], 매설깊이(h)가 0.75 [m]일 때 km당 매설지선의 접지저항(R_g)은 0.5757[Ω]이 된다. 매설지선의 사다리 회로망의 선로정수는 표 6.3과 같이 구할 수 있다.

Table 6.3 Constants of Circuit ($\rho=100$ [Ωm])

	회로정수(단위길이)	
	매 100 [m]	매 1 [km]
Z_n	R = 0.011 [Ω], L = 0.0469 [mH]	R = 0.1024 [Ω], L = 0.3471 [mH]
R_g	4.1757 [Ω]	0.41757 [Ω]

Table 6.4 Constants of Line(Self Impedance) ($\rho=100$ [Ωm])

	급전선로	self impedance
1-6	보호선	$0.36645 + j 0.91526$ [Ω/km]
2-7	전차선	$0.18498 + j 0.69352$ [Ω/km]
3-8	급전선	$0.25407 + j 0.87925$ [Ω/km]
4-9	레일	$0.0761 + j 2.8474$ [Ω/km]
5-10	매설지선	$0.228 + j 0.198$ [$\Omega/0.1\text{km}$]

1) Phase No. 1~5 : 상선, 6~10 : 하선

d. 전철 급전계통의 회로모델

그림 6.6의 전철 급전계통의 보조구분소와 변전소간 거리는 약 28.9 km로서, 100m를 1개의 구간으로 구분하여 약 289구간을 갖는 회로모델로 나타낸다.

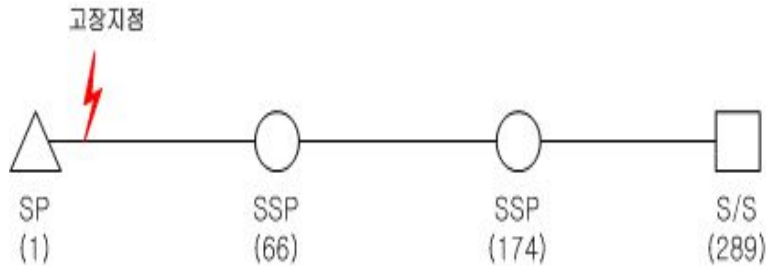


Fig. 6.6 Railway Line for Simulation

2. 전기철도 급전계통 단락사고시 접지전류의 영향검토

고장전류의 일부는 접지된 매설지선을 통해 대지로 방전되며, 그림 6.7은 매설지선 100[m]당 대지누설전류의 계산결과를 시스템에서 지락 고장이 발생한 경우에 보인 것이다. 그림 6.8은 사례 시스템에서 지락고장이 발생한 경우 고장점 부근의 지표면 전위분포를 계산한 결과 이고, 그림 6.8과 같이 전위 및 전위경도는 레일로부터 거리가

떨어질수록 급격히 감소한다. 레일 및 전차선 사이에 지락고장이 발생 시, 사고점으로 부터 20[m]이상 이격 될 시 전위경도는 급격히 감소하지만 지표면 전위는 레일 주변에 급격히 상승하게 된다.

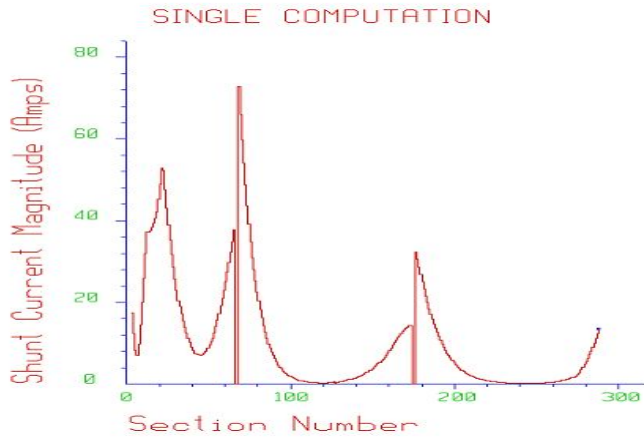


Fig. 6.7 Soil Leakage Current Distribution

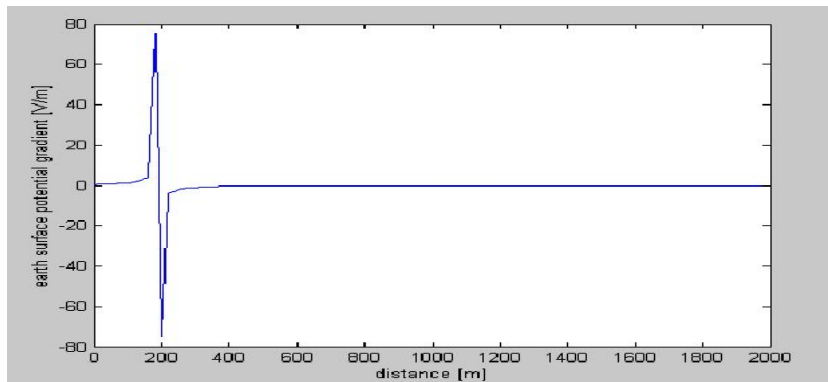


Fig. 6.8 Surface Ground Potential by Distance

3. 매설지선의 회선수에 의한 영향검토

전기철도 급전계통에서 매설지선은 공통접지를 위해 설치되며 회선 수에 의한 영향 검토를 하기 위해 매설지선을 상·하선 2회선을 양쪽에 시공하는 경우와 및 상행선 또는 하행선의 한쪽만을 시공하는 방법 및 교량구간에서의 매설지선을 1회선만 시공하는 경우의 시뮬레이션을 수행하였다.

a. 매설지선 2회선을 시공하는 경우

매설지선을 2회선 상·하선에 설치한 경우 그림 6.2의 지락고장이 전기철도 급전계통 설비에서 발생한 경우 레일전위의 분포의 시뮬레이션 결과 값을 보인 것이 그림 6.9이며 고장 점의 레일전위가 131[V] 나타난다.

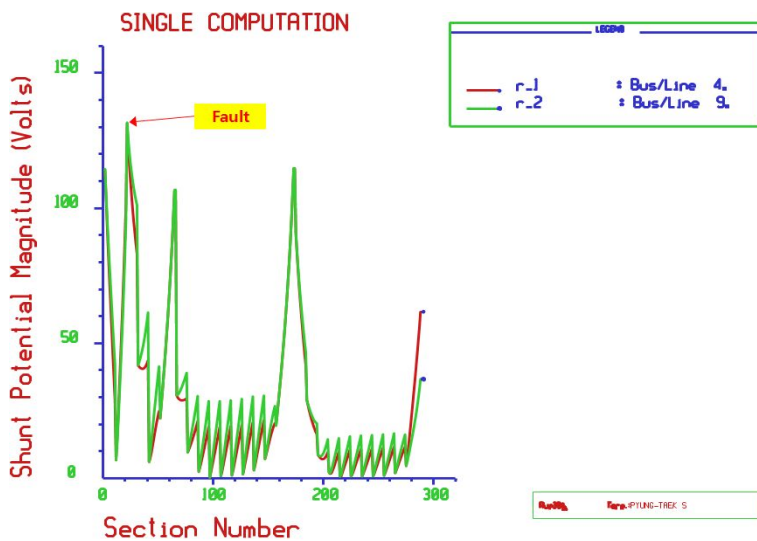


Fig. 6.9 Distribution of Rail Potential(Two Counterpoise)

그림 6.10은 매설지선을 2회선의 경우 지락고장에 의한 급전계통에 흐르는 고장전류의 분포도 이다.

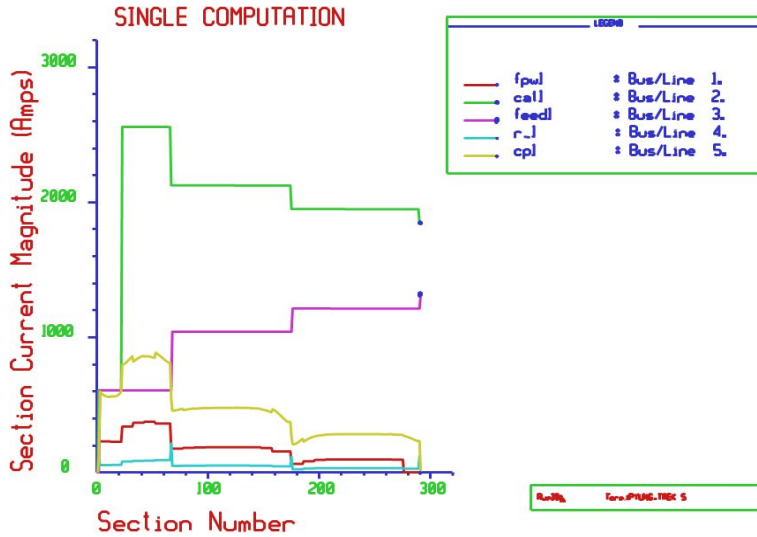


Fig. 6.10 Distribution of Fault Current(Two Counterpoise)

b. 매설지선 1회선을 시공하는 경우

매설지선을 1회선 상행선 또는 하행선에 설치한 경우를 상정하여 전기철도 급전계통에서 지락고장이 발생한 경우에 대한 시뮬레이션 결과 값 중 레일전위의 분포는 고장점의 레일전위가 247[V]가 그림 6.11과 같이 나타내고 있으며, 매설지선을 1회선 또는 2회선을 시공하는 경우 지락고장 등이 발생하였을 때 레일전위의 크기의 차이가 나타나는 것을 알 수 있으나, 레일전위의 상한값에 미치지 못하는 값으로서 1회선의 매설지선만을 시공하여도 전기철도 급전계통의 운용이나 안전에 영향이 없음을 시뮬레이션을 위한 사례 전기철도 급전계통에 대한 결과로 알 수 있다. 그림 6.12는 지락고장에 의한 각각의 급전계통에 흐르는 고장전류의 분포 및 매설 지선을 1회선 시공한 경우이다.

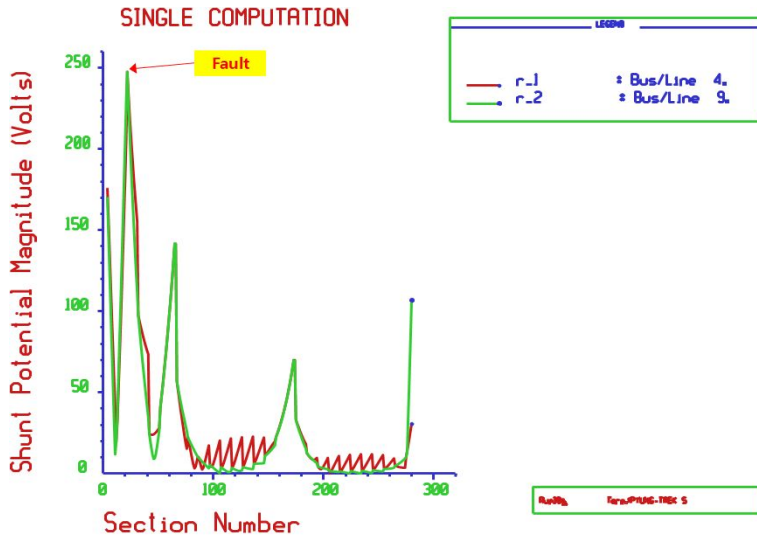


Fig. 6.11 Distribution of Rail Potential(one Counterpoise)

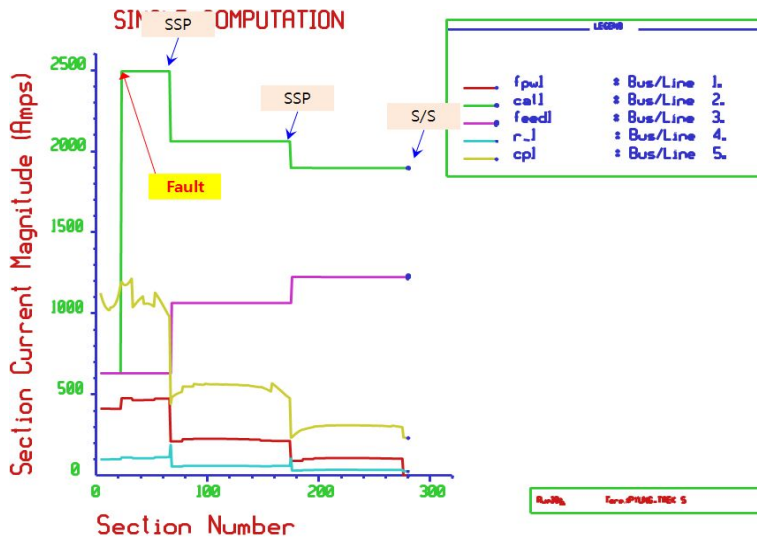


Fig. 6.12 Distribution of Fault Current(one Counterpoise)

c. 교량구간에서 매설지선 1회선을 시공하는 경우

교량구간에서 전기철도 급전계통에서 지락고장이 발생한 경우 매설지선을 1회선 상행선 또는 하행선에 설치한 경우를 상정하여 시뮬레이션 결과 중에서 레일전위의 분포를 보인 것이 그림 6.13이며 고장 점의 레일전위가 345[V] 나타나는 것을 확인할 수 있으며, 교량구간에서는 50[m] 구간마다 교각에서 접지전극을 시공하여 매설지선에 연결하고 있으므로 접지효과가 크게 나타날 것으로 예상하였으나, 시뮬레이션에서는 그림 6.14와 같이 교각구조체의 간략모델링을 한 이유 때문에 각 교각구조체의 접지저항이 높게 나타나는 결과를 보이고 있어서 고장점의 레일전위가 높게 나타난 것으로 판단된다. 그림 6.15는 교량구간에서 매설지선을 1회선의 경우 지락고장에 의한 급전계통의 고장전류의 분포도이다.

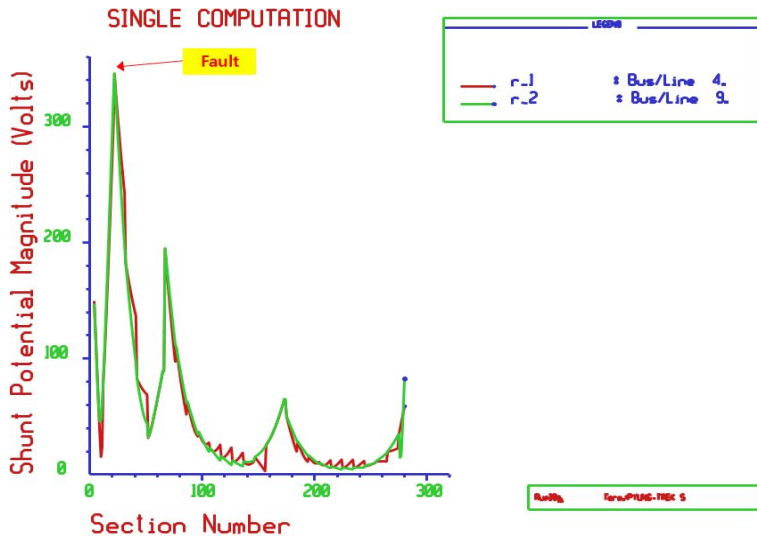


Fig. 6.13 Distribution of Rail Potential(one Counterpoise)

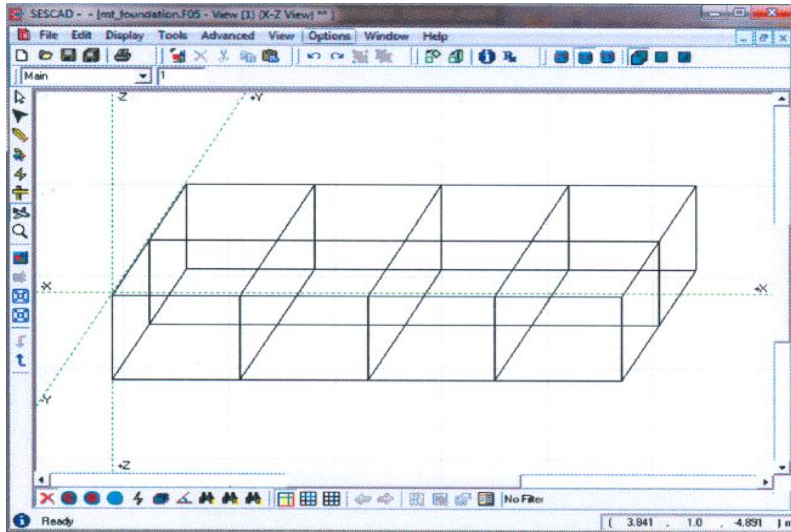


Fig. 6.14 Equivalent Model of Bridge

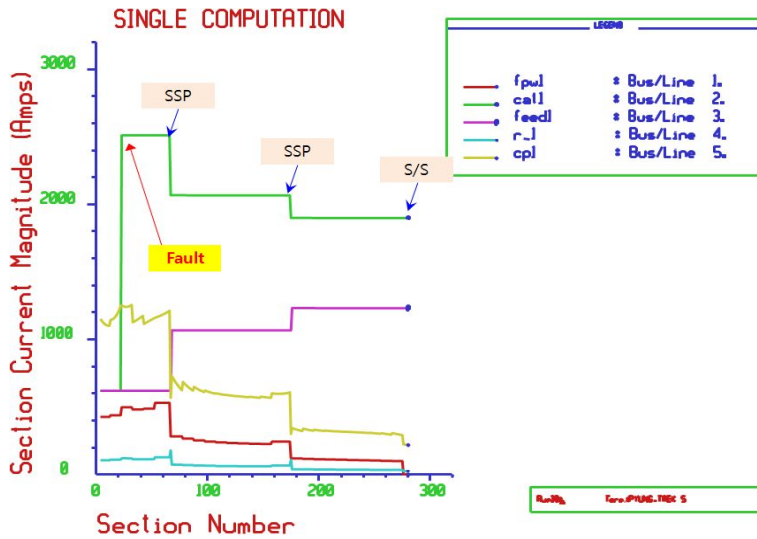


Fig. 6.15 Distribution of Fault Current(Bridge)

d. 검토 결과 및 고찰

전기철도 급전계통에서 공통접지를 위하여 설치되는 매설지선을 상하선 양쪽에 2회선을 시공하는 경우와 상선 혹은 하선의 한쪽만을 시공하는 경우 및 교량구간에서 매설지선을 1회선만 시설하는 경우에 대하여 시뮬레이션을 통한 영향을 평가한 결과, 표 6.5에서 보는 바와 같이 고장점의 레일전위가 매설지선 2회선 시공의 경우에 131[V], 매설지선 1회선의 경우 247[V]로 나타나고 있으나, 레일전위의 위험 한계값에는 미치지 못하므로 매설지선은 1회선만 시공하여도 안전에는 문제가 없을 것으로 판단된다.

Table 6.5 Maximum value of Rail Potential

	고장점 레일전위	비 고
매설지선 2조	131 V	위험전압 만족
매설지선 1조	247 V	“
매설지선 1조 (교각)	345 V	“

B. 매설지선의 회선수와 인출선 간격의 전위분포 해석

공용접지를 위해 설치되는 매설지선의 인출선 및 회선수와 간격에 의해 전위분포 해석을 통하여 위험 전위를 검토하고, 위험 전위를 검토하기 위하여 매설지선을 상하선 2회선을 시공하는 경우 및 상행선 또는 하행선의 1회선을 시공하는 경우 인출선을 50, 100, 150, 200 및 250 [m] 간격으로 시공할 경우에 대하여 급전계통 접지시스템의 접지저항과 전위분포의 계산을 위한 시뮬레이션을 수행하였다.

전위분포 해석을 위한 시뮬레이션을 위하여 그림 6.16과 같은 접지계통에서 구간을 2,000[m]로 한정하였으며, 지락고장은 선로의 중간지점(0[m] 지점)에서 발생한 것으로 가정하였으며 지락고장 등에 의하여 발생한 고장전류 중에서 접지전극으로 흐르는 고장전류의 크기는 1,000[A]로 가정하였다.

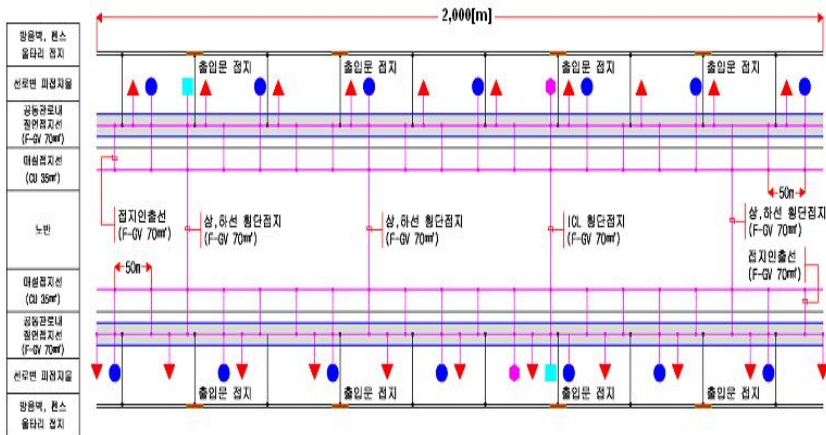


Fig. 6.16 Sample of Grounding System

1. 접지저항과 최대 전위의 분석

그림 6.16의 계통의 중간지점에서 전차선과 접지선이 단락 시 지락고장 등의 발생한 경우에 매설지선을 상·하행선 2회선에 설치한 경우 및 상행선 또는 하행선에 1회선만 설치한 경우를 비교하여 공동관로의 접지선과 매설접지선을 연결하는 인출선의 간격을 50, 100, 150, 200 및 250 [m] 간격으로 매설지선의 접지저항 및 전위값의 최대 크기를 비교한 것이 그림 6.17과 6.18이다. 그림 6.17에서 보는 바와 같이 공동관로의 접지선과 매설접지선을 결선하는 인출선의 간격에 따라 접지저항의 크기 변화는 거의 없으며, 매설지선의 1회선 및 2회선의 설치에 따른 접지저항의 크기 변화는 미세한 차이가 있을 수 있지만 큰 영향은 없는 것을 확인할 수 있다. 그림 6.18과 같이 공동관로의 접지선과 매설접지선을 연결하는 인출선의 간격에 따른 급전계통에서의 지락고장 전류에 의한 최대 전위 값의 크기도 변화가 거의 없으며, 매설지선의 1회선 또는 2회선의 설치에 따른 접지저항 값의 크기 변화는 미세한 차이가 있을 수 있지만 큰 영향은 없는 것을 확인할 수 있다.

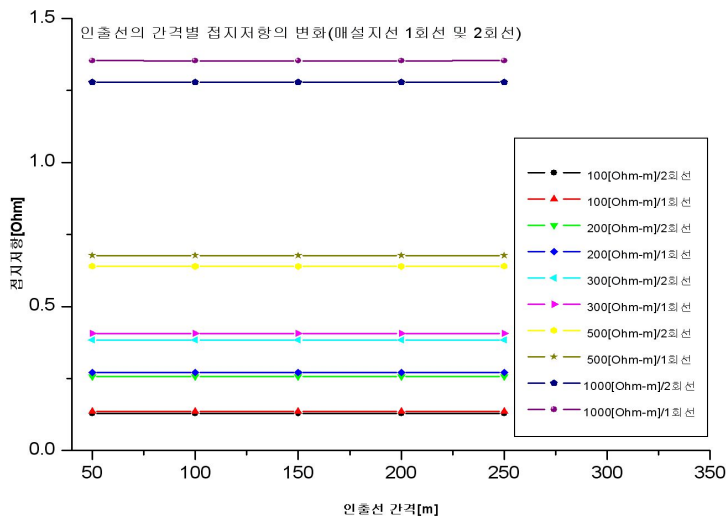


Fig. 6.17 Variation of Grounding Resistance

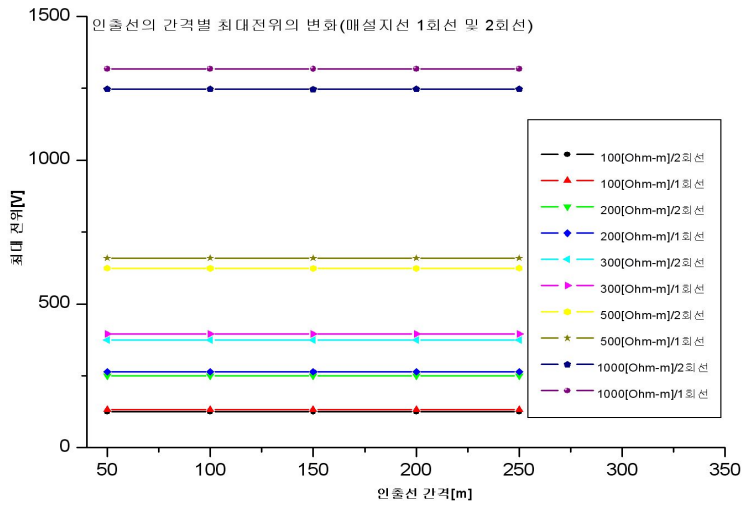


Fig. 6.18 Variation of Maximum Potential

2. 매설지선 2회선을 시공하는 경우

매설지선을 상하행선 양쪽에 설치하는 경우에 대지저항률이 100[Ω-m]일 때, 인출선을 50, 100, 150, 200 및 250 [m] 간격으로 시공할 경우에 대한 시뮬레이션을 수행하고 50 및 200[m]의 결과는 그림 6.19 및 6.20이며, 아래와 같이 지락 고장점 선로길이 방향의 0[m] 지점에서 발생한 것으로 가정하여 전위가 가장 높게 나타나는 고장점에서의 경우를 확인 할 수 있고, 인출선이 간격과 상관없이 모든 경우 126[V] 정도를 나타내고 있음을 알 수 있다.

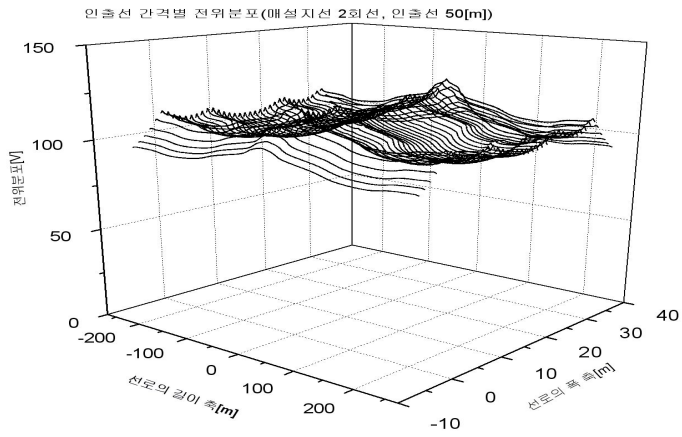


Fig. 6.19 Potential Distribution(C-2, Distance 50[m])

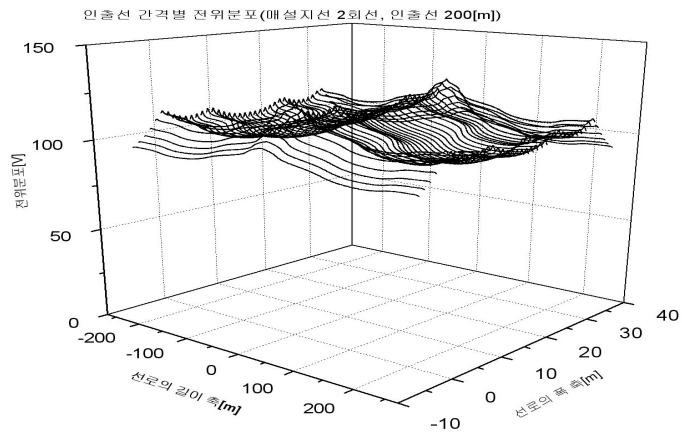


Fig. 6.20 Potential Distribution(C-2, Distance 200[m])

3. 매설지선 1회선을 시공하는 경우

매설지선을 상행선 혹은 하행선 한쪽에만 설치하는 경우에 대지 저항률이 100[Ω-m]일 때, 인출선을 50, 100, 150, 200 및 250 [m] 간격으로 시공할 경우에 대한 시뮬레이션을 수행하고, 50 및 200 [m]의 결과는 그림 6.21 및 6.22이다.

그림에서 보는 바와 같이 전위가 가장 높게 나타나는 고장점에서 확인 할 수 있으며, 인출선의 간격과 상관없이 모든 경우 133[V] 정도를 나타내고 있다.

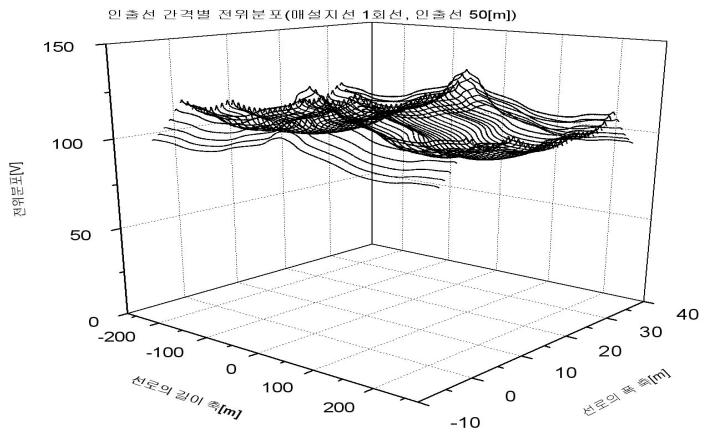


Fig. 6.21 Potential Distribution(C-1, Distance 50[m])

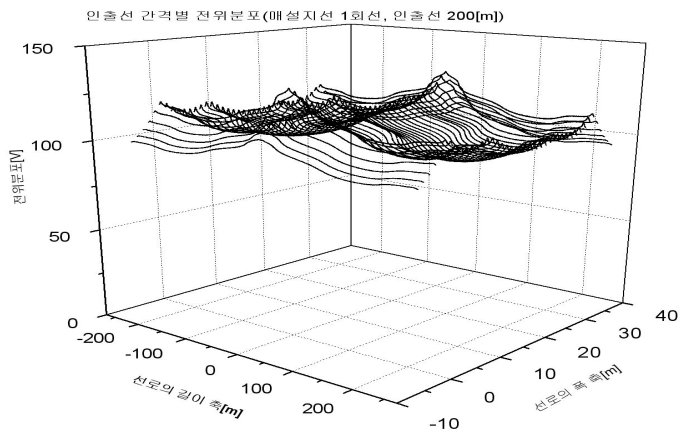


Fig. 6.22 Potential Distribution(C-1, Distance 200[m])

4. 결과 검토 및 고찰

전기철도 급전계통에서 지락고장이 발생한 경우에 시뮬레이션을 통하여 인출선의 간격 및 매설지선의 시공 회선수에 따른 전위분포에 관하여 검토한 결과를 종합적으로 정리하면 접지시스템에서 공동관로의 접지선과 매설접지선을 연결하는 인출선의 간격에 따른 급전계통의 시스템의 접지저항 값 크기는 거의 일정하며, 매설지선의 1회선 또는 2회선의 설치에 따라 접지저항 값의 크기 변화는 약간의 미세한 차이가 있을 수 있지만 큰 영향은 없는 것을 확인할 수 있다.

표 6.6은 전기철도 급전계통의 접지시스템에서 대지 저항률이 100[Ω-m]일 때 매설지선의 설치 회선수와 인출선의 간격에 의한 접지저항의 크기와 전위분포 영향을 정리한 것이다.

Table 6.6 Results of Potential Distribution

		최대 전위 [V]	접지저항 [Ω]	비고
매설지선 2회선	인출선 50[m]	125.493	0.1287	
	인출선 100[m]	125.455	0.1286	
	인출선 150[m]	125.440	0.1286	
	인출선 200[m]	125.454	0.1286	
	인출선 250[m]	125.493	0.1287	
매설지선 1회선	인출선 50[m]	132.567	0.1360	
	인출선 100[m]	132.550	0.1361	
	인출선 150[m]	132.543	0.1361	
	인출선 200[m]	132.552	0.1361	
	인출선 250[m]	132.578	0.1362	

C. 지락사고시 전위상승과 대지 저항률의 관계 분석

1. 시뮬레이션

정상 운전시 부하전류 및 고장전류에 의한 대지전위 분포를 현장에서 모두 측정하여 안전성을 평가하는 것은 불가능하므로 대지전위 분포의 특성을 나타내는 파라미터인 대지 저항률의 변화에 대한 시뮬레이션으로 전위상승과의 관계분석을 분석하였다.

유기전위와 대지 저항률과의 관계를 분석하기 위하여 1) 단일 지층구조에서 대지저항률이 50~2500[Ω-m]으로 단계적으로 변화시킨 경우와 2) 2지층구조에서 상층의 대지저항률이 200[Ω-m]일 때 하층의 대지 저항률이 50~2466.7[Ω-m]사이에서 단계적으로 변화시키고, 상층의 깊이를 1.0[m]로 하였으며, 고장전류는 1[kA], 고장시간은 KS C IEC 62128-1에서 순시시간에서 0.5[sec](시간이 짧아질수록 허용 위험전압의 크기가 커짐)로 하여 지표면의 전위분포와 접촉전압에 대하여 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 6.23는 단일 지층구조의 대지전위 시뮬레이션 결과를 그림 6.24는 2지층 구조의 대지전위 시뮬레이션 결과를 그림 6.25는 단일지층구조의 접촉전압 시뮬레이션 결과를 그림 6.26은 2지층 구조의 접촉전압 시뮬레이션 결과를 나타내고 있다.

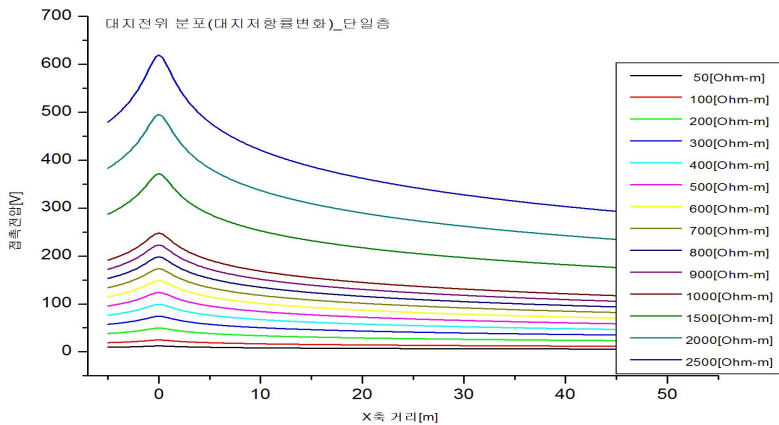


Fig. 6.23 Potential for Single-Layer

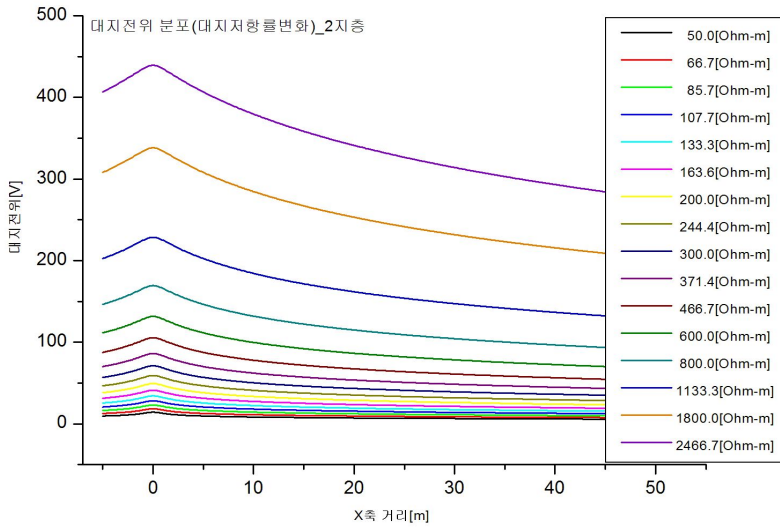


Fig. 6.24 Potential for Two-Layer

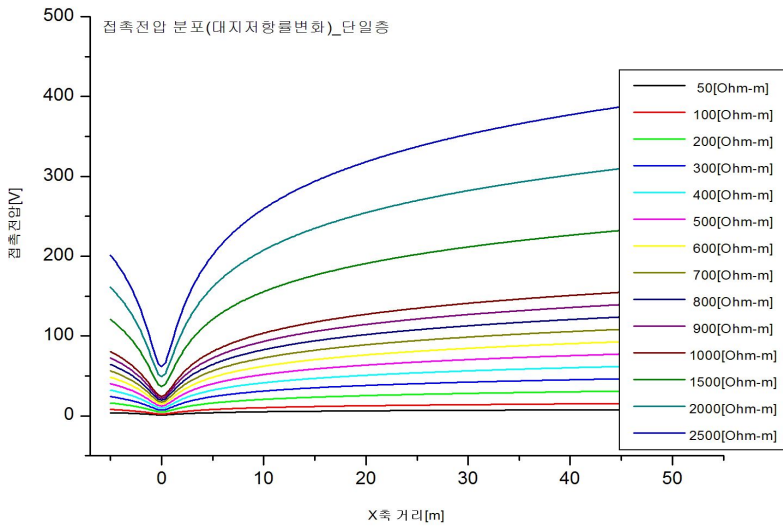


Fig. 6.25 Touch Voltage for Single-Layer

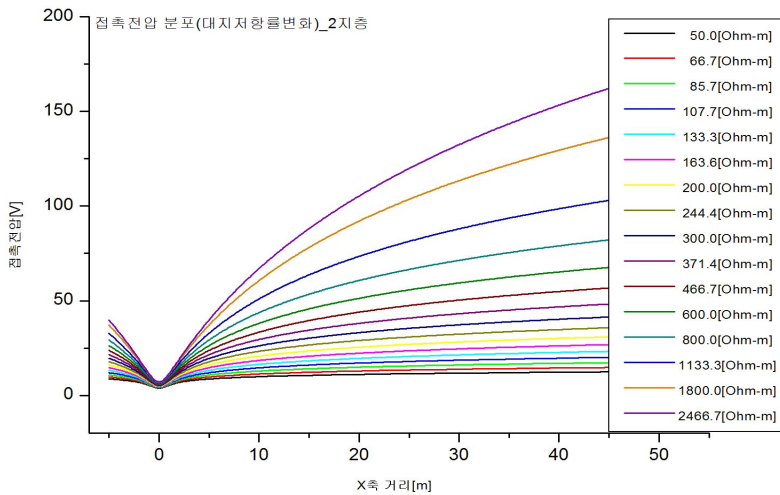


Fig. 6.26 Touch Voltage for Two-Layer

2. 시뮬레이션 결과 검토

정상적인 열차 운행시의 부하전류 혹은 고장이 발생한 경우의 고장전류 등에 의하여 선로 연변의 금속체에 유기되는 전위와 대지 저항률과의 관계를 분석하기 위하여 단일 지층구조와 2지층 구조에서 대지 저항률을 변화시키면서 공통 접지전극에 흐르는 전류에 의하여 나타나는 지표면의 전위분포에 대하여 시뮬레이션을 수행한 결과는 다음과 같다

첫째 단일지층 구조 및 2지층 구조에서 동일하게 대지 저항률이 커지면서 공통접지 도체를 중심으로 높은 지표면 전위가 나타나며, 거리가 멀어지면 전위의 크기가 급격히 떨어지는 것을 확인할 수 있다. 또한 단일지층 구조에서 대지 저항률의 변화에 대한 접촉전압의 크기를 비교한 결과에 의하면 대지 저항률의 크기가 커질수록 접촉전압의 크기가 급격하게 크게 나타나며, 공통접지 도체의 주변에서 변화의 크기가 매우 큰 것을 확인할 수 있다.

둘째 KS C IEC62128-1에서 규정하고 있는 짧은 시간 조건에서의 허용접촉전압 U_t [V]에 대한 평가에서 통전시간을 0.5[초]인 경우에 225[V]보다도 낮은 조건으로부터 접촉전압 분포 결과로부터 거리를 보면 대지저항률이 가장 높은 경우에 대

하여 공통접지 도체로부터 5[m]이상이 되면 허용접촉전압 U_t [V]이 225[V]보다 높아지므로 공통접지 도체로부터 직선거리로 5[m]이내의 한계거리라고 할 수 있다. 셋째 따라서 선로의 공사구간이 깎기 또는 돌기 구간에 공통접지 전극으로부터 직선거리로 5[m] 이상의 거리에 설치되는 금속체(울타리 등)와 교량하부에 시설되는 울타리 등의 설비에 대한 접지는 공통접지 전극에 연결하지 않아도 되는 것으로 판단된다.

또한, 공통접지방식에서 철도선로로부터 일정거리 또는 교량하부에 시설되는 울타리의 접지시공에 대한 기준을 개선하기 위하여 열차 운행시 선로 연변의 울타리 등 금속체에 유기되는 유기전압과 대지저항울과의 관계 분석(지표면 전위와 접촉전압에 대한 시뮬레이션)을 검토하였다. 위의 내용을 검토한 결과는 다음과 같다.

첫째 대지 저항률의 크기가 커질수록 지표면 전위와 접촉전압의 크기가 급격하게 크게 증가하며, 공통접지 도체의 주변에서 지표면 전위와 접촉전압 변화의 크기가 매우 큰 것을 확인할 수 있다.

둘째 KS C IEC62128-1에서 규정하고 있는 짧은 시간 조건에서의 허용접촉전압 U_t [V]에 대한 평가에서 통전시간을 0.5[초]인 경우에 225[V]보다도 낮아야 한다는 조건으로부터 접촉전압 분포 결과로부터 거리를 보면 공통접지 도체로부터 5[m]이상이 되면 허용접촉전압 U_t [V]이 225[V]보다 높아지므로 공통접지 도체로부터 5[m]이내의 한계거리라고 할 수 있다.

셋째 따라서 공통접지 전극으로부터 일정한 거리(5[m] 이상) 직선거리에 설치되는 선로연변의 금속체, 특히 교량하부에 시설되는 울타리 등의 접지설비는 공통접지 전극에 연결하지 않고 단독 접지를 시행할 수도 있을 것으로 판단된다.

Ⅶ. 결 론

전기철도 급전계통의 고장은 상시 발생할 수 있으며 일어나며, 지락사고 및 고장 등에 의한 이상전압이 발생하면 전기철도 급전계통의 내부 및 주변의 신호·통신설비 등에 전위차가 발생함으로 인체 감전사고 및 설비의 오동작 및 운용에 이상을 발생시키게 되며, 대지전위 상승폭의 증가는 인체의 안전이나 설비의 절연 등에 미치는 위험의 증폭의 결과를 초래하고 있다. 사고를 방지하기 위한 전기설비의 접지시스템으로서 전기철도에 대한 적절한 시스템을 설계 구성하여 대지전위의 상승 억제 및 고장전류 제어 등의 대책이 시급한 현실이다.

따라서 본 논문에서는 전기철도 급전계통에서 인명 및 설비를 보호하기 위해서는 현재 시설된 접지설비 운영실태 등을 조사·분석하고 철도시스템의 이상전압에 대한 문제의 종합적인 검토를 위한 철도시스템에서 이상전압의 발생, 미치는 영향 등을 분석하였으며, 지락사고시 대지에 유입되는 고장전류 및 전위상승 예측을 통하여 보호계통의 기기 및 주변기기에 가해지는 전위차가 기기에 손상을 미치지 않도록 유지될 수 있는 공통접지시스템을 구축하는 방안을 제시하였다.

본 논문에서 전기철도 급전계통에 대한 현장에서의 측정과 시뮬레이션 등을 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 전기철도 급전계통에서 전기철도 차량의 정상 운전시 이상전압의 측정 결과 정상적인 운전 상태에서는 모든 대지전위가 안전한 상태임을 알 수 있으며, 특히 비접지 상태인 경우에 더 낮은 전위를 나타내고 있다.
- (2) 전기철도 급전계통에서 인공지락 고장시 이상전압의 측정 결과, 시험지락을 시킨 경우에 기준 영점을 기준으로 레일 및 외함과 매설접지전극에 나타나는 전위와 레일 및 매설접지전극에 나타나는 안전기준 전위에 항상 만족한다. 또한 고장발생 시에 측정의 조건별로 대지전위 측정 결과를 거리의 변화에 따라 분석한 결과에 의하면 측정된 모든 대지전위가 위험전압의 한계값 보다 작게 나타나고 있어서 안전한 상태임을 알 수 있다. 특히 비접지 상태인 접지 동봉의 전위가 공통접지에 연결된 도체의 전위 보다 낮게 나타나고 있음을 알 수 있다.
- (3) 차량기지 구내에서 KTX 차량의 MCB 동작시 대지전위 및 차량의 팬토그래프 개방시

의 대지전위는 차량기지의 접지계통과 연결된 부분의 대지전위는 낮게 나타나는 반면에 차량기지의 접지계통과 분리된 접지동봉에서 대지전위의 변화가 크게 나타나는 것을 확인하였다. 또한 차량의 MCB 투입상태(전원 인가상태) 및 개방상태(전원 무인가상태)에서도 차량기지의 접지계통과 연결된 부분의 대지전위는 낮게 나타나는 반면에 차량기지의 접지계통과 분리된 접지동봉에서 대지전위의 변화가 크게 나타나는 것을 확인하였다. 차량의 MCB 동작 및 운전시 발생하는 대지전위의 측정데이터를 분석한 결과 차량기지의 접지계통과 연결된 부분의 대지전위는 낮게 나타나는 반면에 차량기지의 접지계통과 분리된 접지동봉에서 대지전위의 변화가 크게 나타나는 현상과 투입 및 개방동작이 일어나는 차량의 부근에서는 전위의 변화가 큰 반면에 접지단자(전철주)의 전위 변화는 상대적으로 작게 나타나는 것은 차량기지의 접지계통이 접지단자(전철주) 및 레일 등은 본딩이 되어 있으나, 차량기지 내의 등전위 본딩을 위한 접지시스템 등의 시설에 대한 보완이 필요한 것으로 판단된다.

(4) 전기철도 급전계통에서 지락고장이 발생한 경우에 시뮬레이션을 통하여 매설지선의 시공 수 및 인출선 간격에 따른 전위분포에 관하여 검토한 결과를 종합적으로 정리하면, 접지시스템에서 공동관로의 접지선과 매설접지선을 연결하여 간격에 따른 급전계통의 접지시스템의 접지저항 값의 크기는 거의 변화가 없었다.

(5) 공통접지방식에서 열차 운행시 선로 연변의 울타리 등 금속체에 유기되는 유기전압과 대지저항율과의 관계 분석(지표면 전위와 접촉전압에 대한 시뮬레이션)을 검토한 결과, 대지 저항률의 크기가 커질수록 지표면 전위와 접촉전압의 크기가 급격하게 크게 증가하며, 공통접지 도체의 주변에서 지표면 전위와 접촉전압 변화의 크기가 매우 큰 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과로부터 KS C IEC62128-1에서 규정하고 있는 짧은 시간 조건에서의 허용접촉전압 U_t [V]에 대한 평가에서 공통접지 도체로부터 5[m] 이상이 되면 허용접촉전압이 높아지므로 공통접지 도체로부터 5[m]이내의 거리가 한계거리라고 할 수 있다. 따라서 공통접지 전극으로부터 직선거리로 일정한 거리(5[m] 이상)에 설치되는 선로연변의 금속체, 특히 교량하부에 시설되는 울타리 등의 접지설비는 공통접지 전극에 연결하지 않고 단독 접지를 시행할 수도 있을 것으로 판단된다.

본 논문에서는 전기철도 급전계통에서 발생하는 이상전압에 대한 대책에 대한 제안을 위하여 현장에서 전기차량의 정상적인 운전 상태, 인공으로 지락고장을 발생시킨 경우 등에 대하여 이상전압을 측정하여 분석하고, 측정이 불가능한 경우에 대한 내용은 시뮬레이션을 통하여 분석하였으며, 이에 대한 대책으로서 공통접지시스템을 제안하였다.

본 논문에서 다루지 못한 부분들에 대하여는 추후 추가적인 검토가 필요할 것으로 사료되며, 이 논문이 이 부분에 대한 연구의 시작이 되는 초석이 되기를 바란다.

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] Wilhelm Rudolph, Safety of Electrical Installations up to 1000 Volts, VDE-Verlag Gmbh, 1990
- [9] EPRI, Distribution Grounding Vol. 1: Handbook, TR-106661-V1, 3066-01, 1996.
- [10] Nippon Chiko Co., 大地抵抗率의 測定と 接地方式, 1998.
- [11] 철도청 건설본부, “매설 접지방식 시공지침(안)”, 2002. 5.

- [12] 한국철도시설공단, “철도 전철전력설비 시설지침”, 2010.02.10.
- [13] 철도시설공단, “호남고속철도 기존선 이설구간 지장 신호설비 실시설계”, 2010.06.
- [14] 한국철도기술연구원, “전철급전회로이상전압 억제를 위한 접지시스템 연구”, 1999
- [15] 한국철도기술연구원, “철도전력공급 안정화 연구”, 2011.
- [16] IEEE Std. 81, IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance and Earth Surface Potentials of a Ground System, 1983.
- [17] ITU-T Rec.K.66 Appendix IV
- [18] ITU-T Rec.K.33 PROTECTION AGAINST INTERFERENCE
- [19] IEC-62128-1 7. Protection against the danger of rail potential
- [20] IEC Publication 364, Electrical installations of buildings.
- [21] IEC Publication 364-4-41, Protection against electric shock, 1982.
- [22] IEC Publication 364-5-54, Earthing arrangements and protective conductor, 1980. Amendment 1, 1982
- [23] IEC Publication 50, International electrotechnical vocabulary, Chapter 826,

1982 and Chapter 604, 1987

- [24] IEC Publication 1024, Protection of structures against lightning.
- [25] IEEE std 142-1991 「IEEE Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems」 Green Book,1992
- [26] 「National Electrical Code」 2005
- [27] 「Stallcup's Electrical Data Book」 James G, stallcup 1999
- [28] F. P. Dawalibi, F. Donoso, "Integrated Analysis Software for Grounding , EMF and EMI", IEEE Computer Applications in Power, Vol. 6, No. 2, pp. 19~24
- [29] R.J.Hill, "On-line Simulation of Voltage Regulation in Autotransformer-Fed AC Electric Railroad Traction Networks", IEEE Trans. on Vehicular Technology, Vol. 42, No. 3, Aug., 1993
- [30] G.Shi-bin, H.Wei-jun, C.Xiao-chuan, "Study on Complex Grounding Fault Protection With High-Impedance For AT Feeding Traction System", 5th International Conference on Development in Power System Protection, 1993
- [31] K.S.Bahra, P.G.Batty, "Earthing and Bonding of Electrified Railways", International Conference on Developments in Mass Transit Systems, April, 1998
- [32] H.Roussel, "Power Supply for the Atlantic TGV High Speed Line",

International Conference on Mail Line Railway Electrification, 1989

- [33] B.Mellitt, J.Allan, Z.Shao, W.Johnston, C.Goodman, "Computer-based methods for induced-voltage calculations in AC railways", IEE proc., Vol. 137, No. 1, Jan., 1990

- [34] R.J.Hill, I.H.Cevik, "Parallel Computer Simulation of Autotransformer-Fed AC Traction Networks", Railroad Conference, 1990

- [36] D. Haluza, "Lightning, Ground Potential Rise, and Electrical Damage, Protecting Wayside Equipment on the MTA Long Island Rail Road", IEEE, 1996

- [37] H. Harima, "Lightning Protection of Railway Signal System", The Journal of the Institute of Electrical Installation Engineers of Japan, Vol. 18, No. 7, July, 1988

- [38] CCITT Directives, "Inducing-currents and Voltages in Electrified Railway System", Geneva, 1989

- [39] R. Natarajan, T. A. Kneschke, " Short Circuit Curents of the SEPTA's Traction Power Distribution System", Industrial & Commercial Power Systems Technical Conference, IEEE, pp. 15-21, 1994

- [40] T. Takahashi, T. Kawase : Analysis of Combined Earth Resistance for Parallel Driven Rods in Multilayered Earth, Scripts Technical, Inc. Wiley Company.

- [41] A Freud, Effective Computer Grounding, EC & M, Vol.82, No.5, 1983.
- [42] H. B. Dwight, Calculation of Resistance to ground, Electrical Engineering, No.12, 1936.
- [43] G. Parise, "A Summary of the IEC Protection Against Electric Shock", IEEE Trans. on Industry Applications, SEP/OCT 1998.
- [44] Institute of Electrical and Electronic Engineering, IEEE Brown book, IEEE standard-399, 1980, Industrial and commercial power system analysis, IEEE New York, 1980
- [45] 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
- [46] 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, 1975, pp. 252-261, 262-266, 267-272

감사의 글

설렘과 두려움으로 시작한 대학원. 이제야 비로소 모든 과정을 마치며 많은 가르침과 도움을 주신 여러분께 감사의 인사를 전하려고 합니다.

먼저 본 논문이 완성되기까지 부족한 저에게 항상 자상한 지도와 배려를 해주신 조금배 지도교수님께 깊은 감사와 존경의 마음을 드립니다. 바쁘신 중에도 본 논문의 부족한 점을 지적해 주시고 가르침을 주신 이우선 교수님, 최효상 교수님, 심건보 교수님, 최연옥 교수님께 진심으로 감사드립니다.

지난 박사과정 이수에 아낌없는 지원과 용기를 주신 한국폴리텍대학 광주캠퍼스 안희석 학장님, 정진홍, 한국현, 나문수 처장님, 고재홍, 양정태 교수님을 비롯한 전기과 교수님들과 모든 교직원님께 감사의 마음을 전합니다. 또한 배움의 길로 안내해 주시고 어렵고 힘들 때 많은 도움을 주신 학교법인 김현철 산학지원팀장님께 깊은 감사를 드립니다. 대학원 기간 동안 많은 힘이 되어준 전력전자연구실 학형들 및 동료 대학원생들께도 고마움을 표합니다.

늘 밝은 에너지로 올바른 길을 가도록 가르쳐주시는 부모님과 친정식구들, 막내며느리를 사랑으로 감싸주시는 시아버님과 시댁식구들께 깊은 감사를 드립니다.

무엇보다도 항상 격려해주고 응원하며 든든한 버팀목이 되어 지켜준 영원한 친구인 사랑하는 남편 이양표, 사랑스럽고 건강하게 잘 자라고 있는 큰딸 서울, 귀여운 애교로 항상 웃음을 선사하는 둘째 딸 여빈이와 오늘의 기쁨을 같이 하고자 합니다. 마지막으로 오늘이 있기까지 많은 가르침과 도움을 주신 모든 분들께 진심으로 감사드리며 항상 건강하시고 행복하시기를 기원합니다.

2015년 7월
이 용 미 올림