

교류전기철도 레일전위 저감을 위한 통합접지시스템의 횡단접속선 설치기준에 관한 연구

오승현, 창상훈*

우송대학교 철도시스템학과 (철도전기공학코스)

A Study on the Standard for Installation of LTI in the Integrated Grounding System for Reducing Rail Potential of AC Electric Railway

Seung-Hyun Oh, Sang-Hoon Chang*

Department of Railway Systems (Railway Electrical Engineering Course), Woosong University

요약 일반전기 공급 장치와는 달리 전기철도에서는 선로를 통하여 수 kA의 운전 전류가 흐르기 때문에 인체의 접근과 직접적인 접촉을 피해야 한다. 특히 전차선로의 지락 또는 단락고장이 발생하면 고장전류가 선로나 대지로 흘러가게 되어 전기 설비의 내부 및 주변에 전위차가 발생하여 인체의 안전이나 설비의 절연에 위험을 초래한다. 이러한 위험에 대비하기 위해 교류 전기철도에서는 통합 접지방식을 채택하고 있다. 통합 접지방식에서 횡단접속선 간격에 따른 레일 전위 변화량을 분석하고 KSC IEC62128-1 기준에 적합한지 확인하여야 한다.

본 논문에서는 국내 교류 전기철도 통합 접지시스템의 횡단접속선 설치기준에 대하여 분석하고 대안을 제시하였다.

Abstract The aim of this study was to analyze the standards for installing cross-connection lines in the integrated grounding system of AC electric railways in South Korea and to suggest alternatives.

Unlike general electricity supply devices, in an electric railway, several kiloamps of operating current flow through the tracks, so direct contact with the human body should be avoided. When a line-to-ground fault or a short circuit occurs, a fault current flows to the track or the ground, causing a potential difference inside and around the electrical equipment, which is a risk for human safety or insulation of the equipment. To prepare for these risks, the AC electric railway uses an integrated grounding method. The amount of rail potential change according to the LTI (Liaison Transversale Integrate) interval in the integrated grounding method shall be analyzed and verified as conforming to KSC IEC62128-1 standard.

Keywords : Alternating Current Electric Railway, Integrated Grounding System, Short Circuit Fault, LTI, Raising Rail Potential

1. 서론

철도의 전철화는 전차선 전압에 의해 전자계 현상이 발생하기 때문에 사람과 주변 시설을 위한 대책을 세워 설계하도록 요구하고 있다. 가선(도체, 인접한 금속체와

접지)의 전위는 전원과 차량 운행 거리에 따라 변한다.

이 전위는 유도 또는 도체에서 전류 교변에 비례하는 전기 결합에 의해 발생하며, 이 전기적 결합(커플링)의 원인으로 발생하는 현상을 막기 위한 보호 방법의 결정이 필요하다.

본 논문은 우송대학교 연구과제로 수행되었음.

*Corresponding Author : Sang-Hoon Chang(Woosong Univ.)

email: shrailway@wsu.ac.kr

Received August 7, 2023

Revised September 15, 2023

Accepted November 3, 2023

Published November 30, 2023

특히 전차선로의 지락 또는 단락고장이 발생하면 고장 전류가 선로나 대지로 흘러가게 되어 전기설비의 내부 및 주변에 전위차가 발생하여 인체의 안전이나 설비의 절연에 위험을 초래하게 된다. 더욱이 최근에 전기차량의 출력 증가로 전력 사용의 수요가 급속하게 증가함에 따라 용량도 증가하고 있으므로 상대적으로 고장전류에 의한 대지 전위의 상승이 커져서 인체의 안전이나 설비의 절연 등에 미치는 위험도 커지고 있는 실정이다. 이러한 위험에 대비하기 위해 교류 전기철도에서는 통합 접지방식을 채택하고 있다.

우리나라 교류 전기철도 시스템의 급전 계통은 단상 교류 2×25 kV AT(단권 변압기) 방식을 표준으로 하고 있으며, 통합 접지망의 구성은 주어진 전력 공급 시스템에 기본을 두고 전철화에 사용된 궤도 회로의 특성에 따라 모든 접지 관련 설계 변수가 변하는 특성이 있다.

교류 전기철도에서의 통합 접지방식의 기본 개념은 국제 전기 표준회의에서 규정하고 있는 등 전위 개념에 그 기초를 두고 있다. 이를 근간으로 하여 전기철도 설계에서 공통적으로 적용되는 규격 KS C IEC 62128-1(2016, 전기 안전 및 접지에 관련된 보호 조치)로 일부 국가를 제외하고 거의 모든 전기철도는 이 규정을 바탕으로 시스템에 적합하게 적용되고 있다. 이 규정의 주요 내용은 전기철도에서 선로를 통하여 흐르는 큰 전류에 대한 인체 및 장비 보호에 대한 여러 사항을 다루고 있다. 보호의 기본 개념은 급전 회로의 접지를 통해서 고장전류를 신속하게 전원으로 되돌아갈 수 있게 하여 안전을 도모하는 것이다. 가장 효과적인 방법은 등전위 접지망을 구축할 수 있도록 될 수 있는 대로 많은 금속 구조물을 상호 연결하는 것이다[1-3].

이 접지방식은 철도 선로의 선로변을 따라서 ① 성토나 절토 부분은 지하에 접지선을 매설하고, ② 고가나 교량 부분은 교각의 철근 및 상판의 철근 구조물을 전기적으로 대지와 접속하며, ③ 터널 부분은 터널 내공의 아치 라이닝 또는 ④ 터널 내공의 복스 라이닝의 철근 구조물을 전기적으로 대지와 접속한다. 위에서 설명한 ①, ②, ③, ④를 서로 연결 접속하여 등전위 본당하고 철도 선로와 병행하여 땅속에 매설된 매설접지선 및 공동관로에 수용된 절연 접지선에 접지기능이 필요한 설비나 기계, 기구, 구조물을 유지보수 관리에 합당하고 안전하게 접속해서 전기적 지락 사고 시 또는 열차 중부하 운전 시에 발생할 수 있는 대지 전위 상승을 최대한 억제될 수 있도록 하는 접지방식이다.

통합 접지 원리는 고속선 설비 각각의 금속 부분 및

임피던스 본드 중성점은 매설 접지선과 선로에 연결되며, 단권변압기는 비절연보호선, 선로 및 매설접지선에 연결된다. 접지망 구성을 위해 반전념선 및 횡단접속선(LTI: Liaison Transversale Integrate, 이하 LTI)이 사용된다. 이는 귀선 전류의 평형 및 각각의 궤도에 인가되는 선로 및 접지 전압의 감소를 실행하기 위해 주로 사용하며, 일반적으로 반전념선(LEAE)은 동일 궤도에 존재하는 각각의 접지 장비에 대한 1/2 횡단선 접속으로, 횡단접속선(LTI)은 상행, 하행 궤도에 부착된 설비 모두에 대한 횡단 통합 접속의 의미로 주어진다[4-6].

시뮬레이션을 통하여 단락고장 상태에서 LTI 간격(1.5 km, 3 km) 설정하여 레일 전위의 변화량을 분석하고 횡단접속선 설치 기준안을 제시하고자 한다.

2. 통합접지시스템 분석

2.1 교류 전기철도 통합접지시스템 특성 해석

2.1.1 통합 접지계통 급전시스템 모델링

전기철도 급전 시스템을 해석하는 것에 있어 가장 먼저 선행되어야 할 것은 시스템을 구성하고 있는 각 구성요소의 회로 모델링이다. 이 시스템의 구성요소는 한전의 3상 전력을 수전 받아 스코트 변압기를 통해 2상(M 상, T 상)으로 변환하는 전원계통, 레일에서 유입되는 전류를 전차선과 급전선으로 분류시켜 주는 단권변압기, 전기차에 전력을 공급해 주는 역할을 하는 전차선로 등이 있다. 우리나라에 도입되어 운용되고 있는 AT 급전 시스템은 설비 구성 방식에 따라 비접지계통 급전 시스템(6단자망), 통합 접지계통 급전 시스템(10단자망), 차량기지계통 급전 시스템(4단자망)으로 나누어진다[7,8]. 이 중에서 통합 접지계통 급전시스템에 대한 모델링을 실시하고 모델링을 통해 접지 시스템에 대한 고장상태에서의 레일전위 특성을 해석하고자 한다. 통합 접지계통 급전 시스템 모델링 결과는 다음과 같다[9-11].

가. 전원계통

단상의 대용량 전철 전력을 공급받기 위해서는 3상 전력 계통과 연계되어야 한다. 이를 위해 철도 교류 급전회로는 보통 스코트변압기에 의해 단상으로 변환된 전력을 전차선, 급전선, 레일을 통해서 차량에 공급한다. 이러한 급전용 스코트 변압기는 3상을 2상으로 변환하고 있기 때문에 일반적으로 3상 용량의 1/2이 2차측 단상용량이 된다. 또한 급전측으로 환산한 전원 임피던스는 2배로

고려되므로 M상 증가부하는 $Z_M = 2Z_S + Z_{TR}$, T상 증가부하는 $Z_T = 2Z_S + Z_{TR}$ 가 된다. 여기서 Z_S 는 전원측 증가 임피던스가 되고 Z_{TR} 은 스코트 변압기의 M상 또는 T상 임피던스가 된다. 따라서 전원 및 주변압기 증가회로를 나타내면 Fig. 1과 같다.

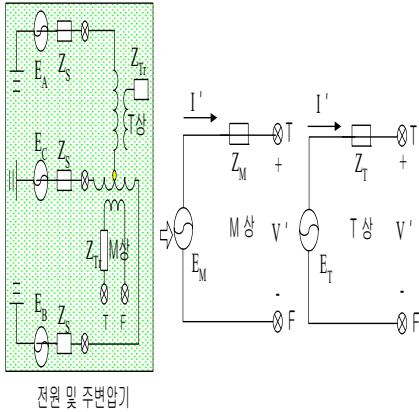


Fig. 1. Equivalent Circuit Model at SS : Power utility and Main transformer

나. 전차선로

전차선로 시스템의 기하학적인 구조를 나타내고 있다. 이 전차선로의 각 트랙은 하나의 전차선, 조가선, 급전선, 가공 보호선, 접지선, 두 조의 레일로 구성된다. 전차선로 시스템은 14개의 도체로 구성되어 있으나 전차선과 조가선은 드로퍼로 연결되어 있고 상·하행 레일과 가공 보호선, 접지선이 공통으로 연결되어 있다. 결국, 전차선로 시스템을 14개의 도체로 구성하기보다는 서로 연결된 도체 군으로 구성된 시스템으로 생각해야 될 것이다. 따라서 서로 연결된 도체들을 분류함으로써 하나의 도체 그룹으로 나타낼 수 있다.

따라서 도체들을 5개의 도체 그룹으로 나타내게 되는데 첫째, 둘째 도체 그룹은 상행 급전선, 하행 급전선, 셋째 도체 그룹은 상행 전차선과 조가선, 넷째 도체 그룹은 하행 전차선과 조가선으로 구성되고 다섯째 도체 그룹은 레일, 가공 보호선, 접지선으로 구성된다.

전차선로는 도체 군의 자기임피던스 뿐만 아니라 상호 임피던스 및 선간 어드미턴스를 포함하고 있다. 따라서 전차선로의 단위 길이당 선로정수를 T형 등가 회로로 표현하면 Fig. 2와 같다[9-11].

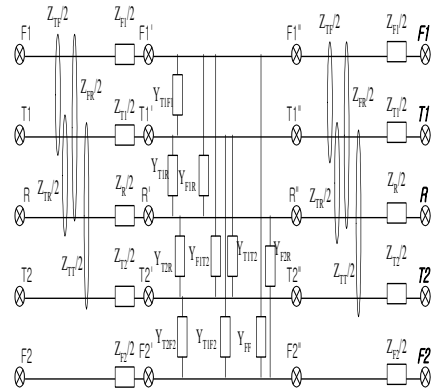


Fig. 2. Equivalent-T Circuit Model for Catenary

다. 단권변압기

(1) 급전 구분소용

Fig. 3와 같이 전차선로의 말단에 위치한 구분소 단권 변압기의 1:1 권수비에 의해, 상하선 단권변압기의 전차선과 중성점 사이의 전압을 V_1, V_2 라고 하면 각각의 급전선과 레일사이의 전압은 $-V_1, -V_2$ 가 된다. 또한 단권변압기로 유입되는 상하선 전차선으로부터 단권변압기로 유입되는 전류를 각각 I_1, I_2 라고 하면 상하선의 급전선으로부터 유입되는 전류도 각각 I_1, I_2 가 된다[9-11].

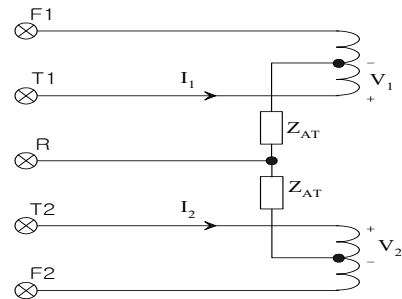


Fig. 3. Equivalent Circuit of Auto-Transformer at SP

(2) 병렬 급전구분소

Fig. 4와 같이 단권변압기는 전차선로의 선간에 병렬로 접속되므로 1차측단자의 전압은 2차측 단자의 전압과 동일하다. 또한 권수비 1:1의 특성을 고려하면 1차측 단자의 전류는 2차측 단자의 전류에 중성점 전류의 1/2를 더한 값과 같게 된다.

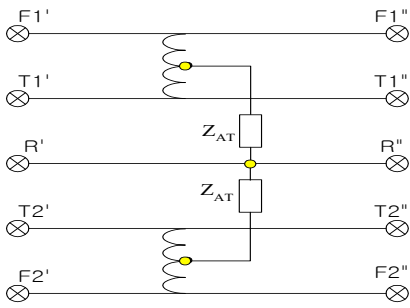


Fig. 4. Equivalent Circuit of Auto-Transformer at SSP

라. 고장개소

전기철도의 전기설비에서 고장은 필연적으로 일어나며, 특히 단락고장이 발생하면 고장전류가 흘러가게 되어 주변 전기설비의 전위차가 발생하여 인체의 안전이나 설비의 절연에 위험을 초래하게 된다.

단락고장이 발생하고 고장전류가 흐르게 되어 고장임피던스 값을 산출한다. Fig. 5에서 1)은 급전선과 레일이 단락한 경우이고, 2)는 전차선과 레일이 단락한 경우이고, 3)은 전차선과 급전선이 단락한 경우이다. 고장개소에서 전차선, 급전선, 레일이 단락한 3가지 경우로 모델링하였다.

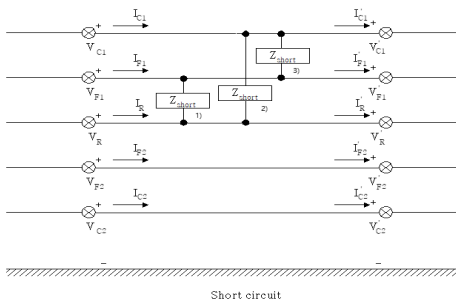


Fig. 5. Modeling of a Failure Place

1) 급전선과 레일이 단락된 경우

급전선과 레일이 단락하여 I_{F1} 과 I_R 이 고장전류로 흐르게 된다.

$$I_{F1} = I'_{F1} + \frac{1}{Z_{short}}(V'_{F1} - V_R) \quad (1)$$

$$I_R = I'_R + \frac{1}{Z_{short}}(V_R - V'_{F1}) \quad (2)$$

이라는 값으로 고장전류가 흐르게 된다. Eq. (1), (2)과 같이 급전선과 레일의 단락고장에 따른 모델링 표현하였다.

2) 전차선과 레일이 단락된 경우

전차선과 레일이 단락하여 I_{C1} 과 I_R 이 고장전류로 흐르게 된다.

$$I_{C1} = I'_{C1} + \frac{1}{Z_{short}}(V'_{C1} - V_R) \quad (3)$$

$$I_R = I'_R + \frac{1}{Z_{short}}(V_R - V'_{C1}) \quad (4)$$

이라는 값으로 고장전류가 흐르게 된다. Eq. (3), (4)과 같이 전차선과 레일의 단락고장에 따른 모델링을 표현하였다.

3) 전차선과 급전선이 단락된 경우

전차선과 급전선이 단락하여 I_{C1} 과 I_{F1} 이 고장전류로 흐르게 된다.

$$I_{C1} = I'_{C1} + \frac{1}{Z_{short}}(V'_{C1} - V'_{F1}) \quad (5)$$

$$I_{F1} = I'_{F1} + \frac{1}{Z_{short}}(V'_{F1} - V'_{C1}) \quad (6)$$

이라는 값으로 고장전류가 흐르게 된다. Eq. (5), (6)과 같이 전차선과 레일의 단락고장에 따른 모델링을 표현하였다.

3. 시뮬레이션을 통한 레일전위 해석

3.1 시뮬레이션 조건 및 계산

3.1.1 단락 사고 시뮬레이션

시뮬레이션 사고의 종류는 전차선과 레일이 단락 시 발생하는 경우를 가정했으며, 사고는 0.2초에 발생하여 0.3초간 지속되는 것으로 가정하였다. 모델의 구성은 AT 단권 변압기가 10 km마다 설치되어 있는 것으로 가정하였다.

전차선과 레일이 단락 시에 고장전류, 사고지점 레일 전압 상승, AT 단권 변압기 유입전류를 분석할 수 있다. 또한 한 쪽에만 매설접지한 경우(case1)와 양 쪽에 매설 접지를 한 경우(case2)를 비교 분석하였다.

시뮬레이션 조건으로 단락 저항은 5Ω, 2Ω으로 설정하였고, 대지저항률은 200 Ω·m, 500 Ω·m, 1000 Ω·m으로 설정하였고, LTI간격을 1.5 km와 3 km으로 설정하여 비교 분석하였다.

3.1.2 시뮬레이션 계산

시뮬레이션에서 필요로 하는 요소들은 크게 임피던스, 접지저항 등이 있다. 먼저 전기철도에서 임피던스 계산 기법은 Carson-Pollaczek에 의한 등가회로 기법이 사용되고 있었다. 철도 회로는 레일, 임피던스, 차량, 전차선으로 구성된 하나의 폐회로로 구성되며, 회로 해석법에서 임피던스 계산은 중요한 파라미터가 된다. 대지귀로를 구성하는 전선로의 외부임피던스 구하고, 대지귀로를 구성하는 전선 간의 상호임피던스를 계산한다[12,13].

$$Z_0 = \left[\omega \left(\frac{\pi}{2} - \frac{4X}{3\sqrt{2}} \right) + j\omega \left(2 \log \frac{4h}{\gamma r x} + \frac{4X}{3\sqrt{2}} + 1 \right) \right] \times 10^{-4} (\Omega / km) \quad (7)$$

$$Z_w = \left[\omega \left(\frac{\pi}{2} - \frac{4x'}{3\sqrt{2}(h_1+h_2)} \right) + j\omega \left(2 \log \frac{2}{\gamma x' \sqrt{b^2+(h_1-h_2)^2}} + \frac{4x'}{3\sqrt{2}(h_1+h_2)} + 1 \right) \right] \times 10^{-4} (\Omega / km) \quad (8)$$

따라서 Eq. (7), (8)와 같은 식으로 외부임피던스, 상호 임피던스를 계산한다.

경부 고속철도 접지시스템은 프랑스 TGV에 적용한 매설접지방식을 이용하고 있다. 이 접지 방식은 철도 선로의 선로변을 따라서 토공구간은 땅속에 접지선을 매설하고, 고가나 교량구간은 교각의 철근 및 상판의 철근 구조물을 전기적으로 대지와 접촉하며 터널구간은 터널내공의 아치라이닝 또는 터널내공의 복스라이닝의 철근 구조물을 전기적으로 대지와 접촉하는 방식이다. 매설접지방식의 접지저항은 선상 전극의 Tagg& Dwight 계산식으로 이용한다[14].

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \left(\ln \frac{2l}{r} + \ln \frac{l}{t} - 2 + \frac{2t}{l} - \frac{t^2}{l^2} + \frac{t^4}{8l^2} \right) \quad (9)$$

여기서,

- r : Radius of Buried Grounding Line [mm],
- t : Buried Depth [m],
- ρ: Earth Resistivity [Ω · m],
- l : Length of Buried Grounding Line [m]

Eq. (9)와 같은 식에 데이터 값을 대입하여 접지저항을 구한다. 다음 Table 1은 실제 고속선의 제원이다. 실제 제원 값들을 대입하여 시뮬레이션을 하였다.

Table 1. The Location of the Conductors

Conductors	Open Track	
	X[m]	Y[m]
Rail	-3.22	0.6
Rail	-1.78	0.6
Contact wire	-2.15	5.8
Messenger wire	-2.15	6.76
Fedder	-3.75	8.062
Protect wire	-5.15	6.1
Protect wire		
GV80	-6.15	0
Buried earth cable	-6.15	-0.75
Rail	1.78	0.6
Rail	3.22	0.6
Contact wire	2.15	5.8
Messenger wire	2.15	6.76
Feeder	3.75	8.062
Protective wire	5.15	6.1
Ground conductor	6.15	0

3.2 시뮬레이션 결과 및 분석

가) 전차선 레일단락시 단락저항 변화에 따른 고장전류 해석

Fig. 6 시뮬레이션은 변전소와의 거리에 따른 고장전류 변화값을 표현한 그래프이다. 단락저항 5 Ω, 2 Ω, 0.5 Ω 세 가지 경우로 시뮬레이션을 하였다. 단락저항 5 Ω 인 경우는 고저항 지락사고이며 노반에 전차선이 떨어진 상황을 뜻한다. 이 때 단락 변전소에서 흐르는 전류는 5000 A 이다. 2 Ω인 경우는 고저항 지락사고 이며 레일 주변에 전차선이 떨어진 상황을 뜻한다. 이 때 단락 변전소에서 흐르는 전류는 9000 A 이다. 0.5 Ω인 경우는 레일에 전차선이 떨어진 상황을 뜻한다. 이 때 단락 변전소에서 흐르는 전류는 12000 A 이라는 결과가 나왔다. 공통적으로 변전소와의 거리가 멀어질수록 고장전류 값이 낮아지는 것을 확인할 수 있다.

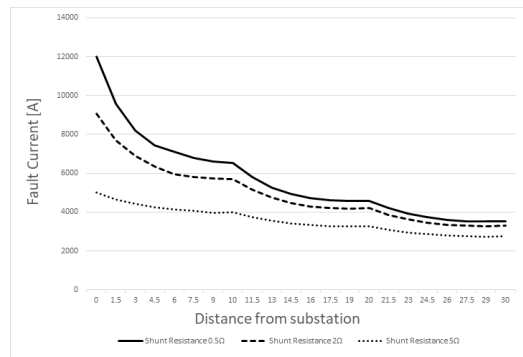


Fig. 6. Fault Current According to Substation Distance

나) 전차선과 레일단락시 대지저항을 변화에 따른 레일전위 해석

1) 한 쪽에만 매설접지선을 접지하는 것을 case1 단락저항이 5 Ω 이면서 LTI 간격을 1.5 km, 3 km으로 설정하였다.

LTI간격이 1.5 km일 때는 최대 대지전위가 대지저항률 1000 Ω·m 인 경우에 557 V 이었다. LTI간격이 3km일 때는 최대 대지전위가 대지저항률 1000 Ω·m 인 경우에 708 V 이었다. Fig. 7은 KS C IEC 규정에 부합하는 결과 나왔고, Fig. 8의 대지저항률 1000 Ω·m인 경우에 KS C IEC 규정에 부합하지 못하는 결과가 나왔다.

두 그래프 공통적으로 대지저항률이 높은 곳에서 대지전위가 최고치로 상승하는 모습을 보이며 변전소와 변전소 사이 가운데 지점(5 km)부근에서 가장 높은 대지전위상승을 볼 수 있다.

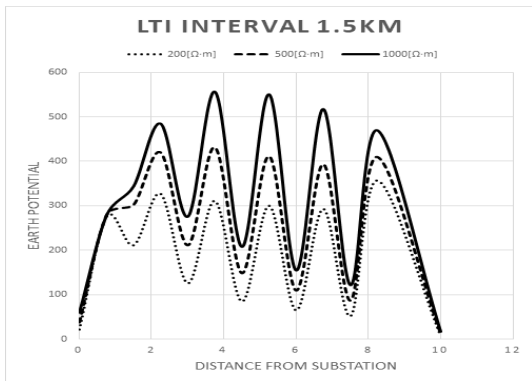


Fig. 7. Graph of The Earth Potential When the LTI Interval is 1.5 km (Shunt Resistance = 50 Ω) Case1

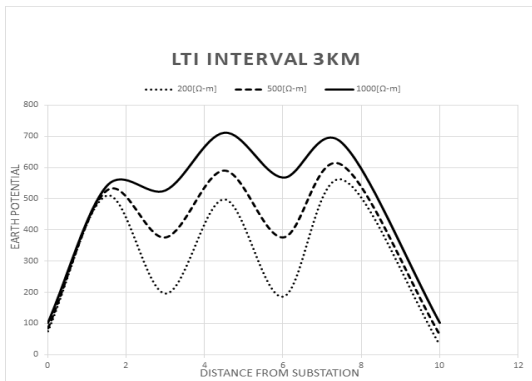


Fig. 8. Graph of The Earth Potential When The LTI Interval is 3 km (Shunt Resistance = 50 Ω) Case1

단락저항이 2 Ω 이면서 LTI 간격을 1.5 km, 3 km으로 설정하였다.

LTI간격이 1.5 km일 때는 최대대지전위가 대지저항률 1000 Ω·m 인 경우에 1004 V 이었다. LTI간격이 3 km일 때는 대지저항률 1000 Ω·m인 경우에 1145 V 이었다.

Fig. 9 일 때는 대지저항률 500, 1000 Ω·m 인 경우 부합하지 못하는 결과가 나왔고, Fig. 10 일 때는 대지저항률 모든 경우에서 부합하지 못하는 결과가 나왔다.

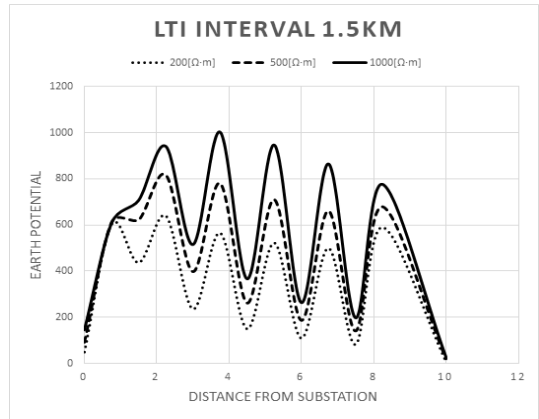


Fig. 9. Graph of The Earth Potential When The LTI Interval is 1.5 km (Shunt Resistance = 20 Ω) Case1

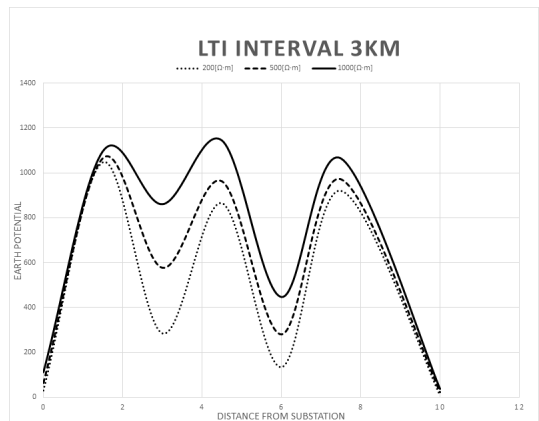


Fig. 10. Graph of The Earth Potential When The LTI Interval is 3 km (Shunt Resistance = 20 Ω) Case1

2) 양쪽에 매설 접지선을 접지하는 것을 case2

단락저항이 5 Ω 이면서 LTI 간격을 1.5 km, 3 km으로 설정하였다. Fig. 11일 때는 최대 대지전위가 대지저

항률 1000 Ω·m 인 경우에 371 V 이었다. Fig. 12일 때는 최대 대지전위가 대지저항률 1000 Ω·m 인 경우에 501 V 이었다. 양쪽에 매설접지선을 접지한 경우에는 LTI 간격 1.5 km, 3 km 두 경우 모두 KS C IEC 규정에 부합하는 결과가 나왔다.

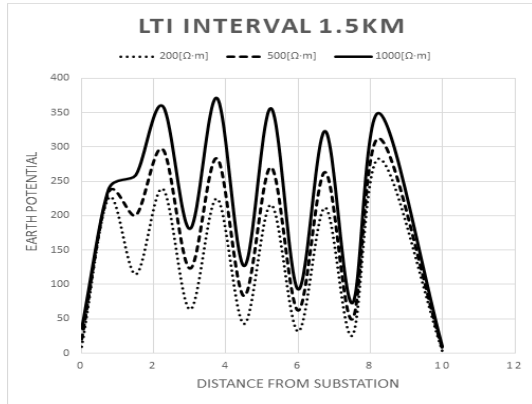


Fig. 11. Graph of The Earth Potential When The LTI Interval is 1.5 km (Shunt Resistance = 5 Ω) Case2

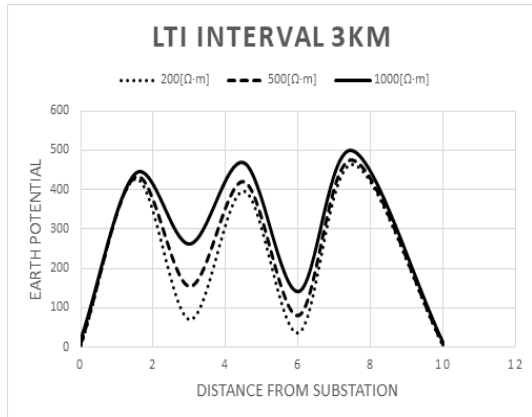


Fig. 12. Graph of The Earth Potential When The LTI Interval is 3 km (Shunt Resistance = 5 Ω) Case2

단락 저항이 2 Ω 이면서 LTI 간격을 1.5 km, 3 km 으로 설정 하였다. 양쪽에 매설접지선을 접지하고, 단락 저항이 2 Ω 일 때 LTI 간격을 1.5 km, 3 km 로 설정하여 시뮬레이션 하였다. Fig. 13일 때는 최대 대지전위가 대지저항률 1000 Ω·m 인 경우에 848 V 이었다. Fig. 14일 때는 최대 대지전위가 대지저항률 1000 Ω·m 인 경우에 976 V 이었다. LTI 간격이 1.5 km 일 때는 대지저항률 500, 1000 Ω·m 인 경우 부합하지 못하는 결과가

나왔고, LTI 간격이 3 km 일 때는 대지저항률 모든 경우에서 부합하지 못하는 결과가 나왔다.

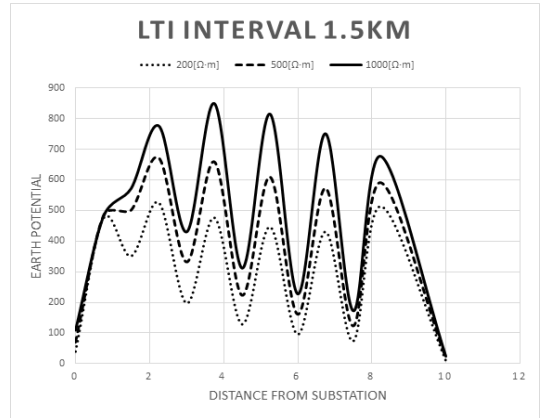


Fig. 13. Graph of The Earth Potential When The LTI Interval is 1.5 km (Shunt Resistance = 2 Ω) Case2

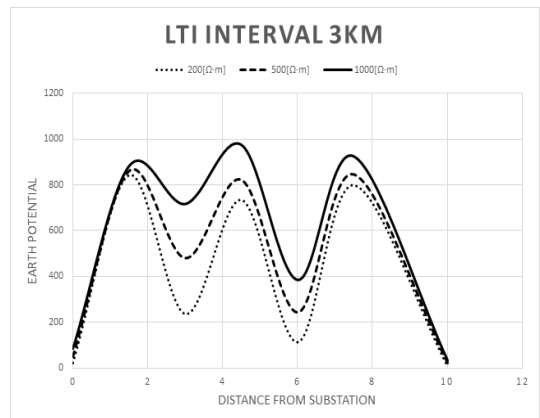


Fig. 14. Graph of The Earth Potential When The LTI Interval is 3 km (Shunt Resistance = 2 Ω) Case2

Table 2. Simulation Results Case1

LTI interval	Ground Resistance Rate	200 Ω·m	500 Ω·m	1000 Ω·m	pass / fail
		Shunt Resistance 5 Ω	Shunt Resistance 5 Ω	Shunt Resistance 5 Ω	
1.5km	Shunt Resistance 5 Ω	311V	432V	557V	pass
3km	Shunt Resistance 5 Ω	550V	610V	708V	fail
1.5km	Shunt Resistance 2 Ω	640V	816V	1004V	fail
3km	Shunt Resistance 2 Ω	1047V	1067V	1145V	fail

Table 3. Simulation Results Case2

Ground Resistance Rate		200 Ω · m	500 Ω · m	1000 Ω · m	pass / fail
LTI interval					
1.5km	Shunt Resistance 5 Ω	283V	312V	371V	pass
3km		464V	475V	501V	pass
1.5km	Shunt Resistance 2 Ω	514V	671V	848V	fail
3km		844V	861V	976V	fail

Table 4. KS C IEC 62128-1 Maximum Allowable Contact Voltage for Train under Short Time Conditions

t [s]	U_t [V]
0.02	940
0.05	935
0.1	842
0.2	670
0.3	497
0.4	305
0.5	225

Table 4은 KS C IEC 62128-1에 규정된 열차의 최대 허용 접촉 전압이다. 전기철도 시스템에서는 차단기 동작이 0.2초 이내에 동작하기 때문에 대지 전위는 670 V 를 초과하지 않아야 한다. LTI 간격이 3 km일 때는 대부분이 fail의 결과를 보이고 있다. 대지저항률이 높은 구간에서는 LTI 간격에 따라 대지 전위의 큰 차이를 보이고 있다. 시뮬레이션 결과 LTI 간격을 1.5 km 일 때 KS C IEC 규정에 적합하다. 또한 양 쪽 매설접지 한 경우(case2)가 한 쪽 매설접지 한 경우(case1) 보다 대지 전위가 낮게 나온 결과를 보이고 있다. 하지만 양쪽으로 매설하게 되면 매설비용이 2배로 요구되기 때문에 경제성 분석까지 이루어져야 한다.

4. 결론

본 논문에서는 매설지선 방식의 통합 접지시스템 방식인 전기철도 전력 공급계통에서 단락고장이 발생한 경우에 이상전압의 변화에 대해 분석하기 위하여 교류 전기철도에서 각 개소를 모델링하고 전차선과 레일이 단락되는 시험을 통해 이상전압을 측정하였다. 이를 통해 고장

전류와 대지전위의 상황별 변화를 분석하였다. 그 결과, 전차선과 레일 단락사고 발생시 비절연보호선과 궤도간에 단락 회로가 형성되는 경우, 횡단접속선(LTI) 설치 간격이 1.5 km, 3 km 에서 대지전위가 1000 V 까지 상승할 수 있음을 알 수 있었다. 두 개의 LTI 사이에서 단락이 발생한 경우, Staff와 선로변 기기에 대해 효율적인 보호를 실행하여야한다. 두 개의 LTI 사이에서 단락 회로가 형성된 경우, 이의 영향은 두 개의 LTI간의 거리에 의존한다. 시뮬레이션 결과에서 알 수 있듯이 LTI 간격이 3 km 인 경우에는 레일전위가 KS C IEC 규정에 부합하지 않으며, LTI의 간격이 1.5 km 인 경우와 양 쪽에 매설접지하는 방식이 단락회로에 따른 전압차를 최소화할 수 있음을 알 수 있다.

후 기

본 논문은 2023년도 우송대학교 교내학술연구조성비 지원에 의하여 이루어진 연구입니다.

References

- [1] B. H. Lee, Basic Concepts of Integrated Grounding System, Proceedings of the Korean institute of illuminating and electrical installation engineers, Vol.30 No.4, pp. 3-11, 2016.
- [2] H. J. Lee, A Study of Grounding system for Electric railway system, Department of Railway Electrical and Signal Engineering master, Graduate School of Seoul National University of Science and Technology.
- [3] K. H. Lee, Global Earthing System, Proceedings of the Korean institute of illuminating and electrical installation engineers, Vol.25 No.3, pp. 55-58, 2011.
- [4] Y. K. Kim, C. K. RYU, Effects of the Common Earth Network on the Traction Return Current in 2×25 kV Power Supply System, TRANSACTIONS- KOREAN INSTITUTE OF ELECTRICAL ENGINEERS B, vol.51, no.9, pp. 509-514, 2002.
- [5] Y. K. Kim, D. C. Yang, C. K. Ryu, Analysis of Common earth network components LEAE and LTI, Journal of Electrical Engineering & Technology, Vol.2001 No.7, pp. 1242-1244, 2001.
- [6] J. H. Baek, Analysis of Return Current by Common Earth on Electrical Line of the Gyeongbu Line, Korea Railroad Research Institute, Vol. 11, No. 12 pp. 4968-4974, 2010.
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2010.11.12.4968>

- [7] H. K. Jung, Modeling for power feeding system of DC electric railway using the PSCAD/EMTDC, journal of the korean society for railway, Vol. No.10, pp. 733-737, 2015.
- [8] W. G. Jo, A Study on the Modeling Analysis of the Rail Potential in DC Traction Power System, Department of Railway Electrical and Signal Engineering Ph.D, Graduate School of Seoul National University of Science and Technology, 2010.
DOI: <https://doi.org/10.5207/JIEIE.2010.24.6.138>
- [9] S. H. Chang, Characteristic Analysis of Transient Ground Impedance with High Frequency Band on the AT Electric Railway Integrated Earthing System, Journal of Electrical Engineering & Technology, Vol. 2021 No.10, pp 1554-1558, 2021.
DOI: <https://doi.org/10.5370/KIEE.2021.70.10.1554>
- [10] S. H. Chang, Analysis of Transient Characteristics when Lighting Strikes in AC Electric Railway Catenary facilities, journal of the korean society for railway, Vol.25 No.5, pp 346-353, 2022.
DOI: <https://doi.org/10.7782/JKSR.2022.25.5.346>
- [11] S. H. Chang, Multi-port Modeling Steady State Analysis and Power Quality Assessment in the Electric Railway Power System, Department of Power System Engineering Ph.D, Hongik University, 2022.
- [12] K. P. Kang, O. H. Lee, C. Y. Park, R. H. Cho, The Basic Analysis on Techniques of Impedance Calculation in Railway System, JOURNAL OF THE KOREAN SOCIETY FOR RAILWAY, Vol.- No.-, pp. 21-27, 2006.
- [13] S. G. Chung, S. Y. Kwon, S. H. Chang, D. U. Jang, Study of the Applicability of the Carson Line Model for the Series Reactance Calculation of the Power Feeding Lines with no Ground Return, Journal of Electrical Engineering & Technology, Vol.58 No.2 [2009], pp 225-231, 2009.
- [14] H. T. Kim, A Study on Improvement of Electric Railway Grounding Equipment Design Criteria, Department of Rail Systems Master, Woosong University, 2012.

오 승 현(Seung-Hyun Oh)

[정회원]



- 2013년 3월 ~ 2019년 8월 : 우송대학교 철도전기시스템학과 학사 졸업
- 2020년 3월 ~ 2021년 2월 : 우송대학교 철도시스템학과 (철도전기공학코스) 석사 졸업

• 2022년 3월 ~ 현재 : 우송대학교 철도시스템학과 (철도전기공학코스) 박사과정 재학중

<관심분야>

전철/전력시스템 해석, 철도신호시스템제어공학

창 상 훈(Sang-Hoon Chang)

[정회원]



- 1998년 3월 ~ 2002년 2월 : 홍익대학원 전기·정보·제어공학과 전력시스템공학전공 공학박사
- 1994년 7월 ~ 2019년 6월 : 한국철도기술연구원 수석연구원
- 2019년 7월 ~ 현재 : 우송대학교 철도시스템학과 교수

<관심분야>

철도급전시스템해석, 에너지공급기술