

철도 지하구간에 대한 효율적인 접지방안에 대한 연구

Study on the effective earthing method in underground section of railways

김양수* 김재문**
Kim, Yang-Soo Kim, Jae-Moon

ABSTRACT

Power Supply System for electric railways is diversified with technical development and is required high technologies. especially, recently there is required many research and development for earthing to ensure safety of people and protection of installations. Generally, leakage resistance is high between rail and ground at tunnel section of subway. because of short circuit of feeding line, earthing interference by transient overvoltage between signals and communication system, and insulation failure, it can damage to human and equipments. To minimize these obstacles, earthing equipment is installed at underground section of railway, but it brings about problems in accordance with operate each earthing system to be not enough required protection provisions for electrified railways.

This paper proposes effective earthing method to be concerned about installation cost and maintenance. The validity of the proposed earth method is verified by simulation results at underground section of railways.

1. 서론

산업화 발전에 따른 철도의 전력공급시스템은 갈수록 다양화(多樣化)되고 고도(高度)의 기술력이 요구되고 있으며, 특히 최근에는 인체와 설비의 안전 확보에 많은 연구와 개발이 요구되고 있다. 따라서 도심을 통과하는 전철시스템은 지하 터널구간에 존재하게 되는데, 일반적으로 도상과 침목사이에 진동 억제용 고무판을 사용하고 있어 레일과 대지간의 누설저항이 비교적 높다. 또한 동일 터널 내에 있는 다수 변전소의 접지계통이 터널 내부의 구조물 등에 연계 접속되어 있는 경우가 많아 전차선 및 급전선의 지락사고와 내, 외부에서의 과도이상전압 등에 의한 이상전압 침입시에 전력, 신호 및 통신기기간의 접지간섭 또는 전위차에 의하여 기기의 절연과피 및 인체에 손상을 줄 수 있다[1,2]. 이와 같은 장애를 억제하기 위하여 철도 지하구간에 접지설비를 하고 있으나 접지시스템에 대한 시설기준이 미흡하여 각 설비별로 각각 운용되어 이에 따른 문제점이 발생되고 있다. 그러므로 철도 지하구간에서의 통신설비의 안전 확보를 위하여 효율적인 접지방안을 수립하고 수립된 접지방식에 의한 설계 및 시설기준 마련이 시급히 필요하다[3].

본 논문에서는 철도 지하구간에 대한 특수성을 고려하여 전력설비, 신호제어설비, 통신설비 등에 대하여 종합적으로 조사, 분석하여 철도 지하구간에 대한 효율적인 접지방안을 제시하였다. 이를 위해 국내외 철도지하구간의 접지설비 현황을 살펴보고, 각각의 접지설비에 대한 분석을 통해 시뮬레이션을 수행하였으며, 제시된 접지방안에 대한 타당성을 입증하였다.

2. 접지에 대한 이론적 고찰

접지란 대지에 전기적 단자를 설치하고 이를 전기적 장치와 연결하는 것을 의미하며, 전기설비

* 한국철도대학 교수, 정회원
** 한국철도대학 교수, 정회원

와 대지 사이에 확실한 전기적 접속을 실현하려는 기술이다[4]. 일반적으로 접지는 감전, 화재, 뇌, 서지, 노이즈 및 전기설비 등의 안정과 안전에 있으므로 인명과 재산을 보호하기 위해서 국가는 접지에 관한 법규를 제정하여 의무적으로 접지를 실시토록 하고 있다. 접지가 필요한 설비에는 전력설비, 통신설비, 컴퓨터, 피뢰설비, 전기 방식설비 등 다양한 설비가 있다.

접지전극에 흐르는 전류에 의한 접지전극 주위의 대지전위 분포를 고찰하기 위해 그림 1과 같이 접지전극을 반구 모양이라고 가정하면, 접지 전극의 접지 전류가 흐르면 접지 전극뿐만 아니라 그 주위에 대지에도 전위가 분포한다. 대지가 무한 거리까지 균질 등방성이고 대지 저항률을 $\rho[\Omega \cdot m]$ 라고 하면, 반구 전극의 중심에서 거리 x 인 곳의 저항 dR 은 식 (1)과 같이 표현된다 [5-8].

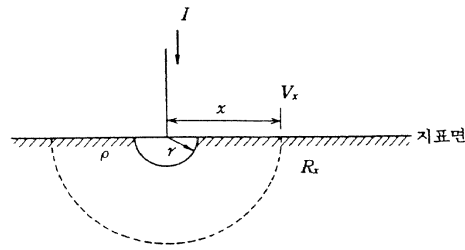


그림 1 접지전류에 따른 대지 전위

$$dR = \rho \frac{dx}{2\pi x^2} \quad (1)$$

따라서 x 지점에서 무한대 지점까지 포함되는 저항을 R_x 라 하면, 식 (1)에 의해 dR 을 x 에서 ∞ 까지 적분하여 구하면 식 (2)와 같다.

$$R_x = \int_x^\infty dR = \frac{\rho}{2\pi} \int_x^\infty \frac{dx}{x^2} = \frac{\rho}{2\pi x} \quad (2)$$

x 점의 전위를 V_x (무한거리를 기준으로 함)로 하면 식 (2)에서 R_x 에 접지 전류 I 를 곱하면 얻어지므로 식 (3)과 같이 표현된다.

$$V_x = \frac{\rho I}{2\pi x} \quad (3)$$

식 (3)을 이용하여 지표면의 전위 분포를 도식화하면 그림 2와 같은 분포로 된다. V_x 에 대해 $x = r$ 로 하면 반구형태의 전극 자체의 전위 V 로 되며, 식 (4)는 반구형태의 전극의 접지저항을 구할 때 얻어지는 식과 일치한다.

$$V = \frac{\rho I}{2\pi r} \quad (4)$$

그림 2에서 알 수 있듯이 대지 전위는 접지 전극으로부터의 거리에 반비례하여 떨어질수록 작아진다. 중심부의 평탄한 부분은 접지 전극이 존재하는 부분이며, 대지에 ΔV 만큼 전압이 걸릴 가능성이 매우 크게 된다.

접지 전극에는 여러 원인에 의해 접지 전류가 흐른다. 옥외 설치된 송배전선의 접지 전극에는 뇌격전류가 주로 흐르며, 옥내의 전기 설비에 연결된 접지 전극에는 지락 사고가 발생할 때 지락 전류가 흐른다. 따라서 접지 전극에 접지 전류가 흐를 때 접지 전극 근처에 대지 전위가 상승하여 인체 및 주변 기기 등에 해를 입힌다.

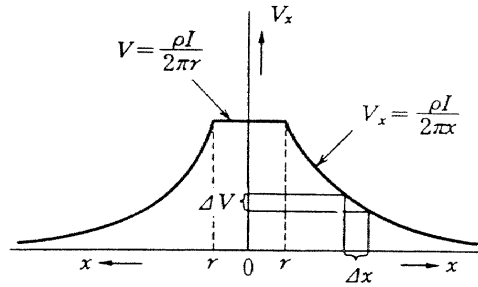


그림 2 접지전류에 의한 대지 전위상승

한편 접지 전류에 의한 대지전위 상승보다 전위 경도가 매우 중요한 의미를 갖는다. 식 (3)을 미분하면 전위 경도는 식(5)와 같이 구해진다.

$$\frac{dV_x}{dx} = -\frac{\rho I}{2\pi x^2} \quad (5)$$

식 (5)에서 알 수 있듯이 전위 경도는 전극에서의 거리 x 의 제곱에 반비례한다. 즉, 전위 경도는 전극 근처에서 가장 크고 전극에서 멀어짐에 따라 급속하게 떨어진다. 또한 전위 경도는 접지 전류의 크기 및 대지 저항률 ρ 에 비례하므로 접지 전류가 많이 흐르는 경우 전위 경도가 상대적으로 매우 크게 되어 인체 및 주변기기 등의 위험성이 높다.

3. 국내의 철도지하구간에서의 접지설비 현황

3.1 국내현황

수도권 및 산업선 전철의 경우 대부분 지상구간으로 되어 있으나, 지하구간은 수도권전철의 과천선, 분당선 등이 있으며 산업선 전철은 지하구간은 없고 일부 터널구간이 있다. 지금까지 관련 규정에 입각하여 접지 대상별, 접지 종류별 구분 접지하기 위하여 독립접지 방식이 채용되어 왔으나 최근에는 통신, 신호 등과 통합제어시스템으로 설치되는 추세에 있다. 표 1은 수도권 및 산업선전철의 분야별 접지방식을 보여준다[3].

표 1 수도권 전철 지하구간 접지방식

구분	접지방식
전차선로 접지방식	비 절연보호방식, 매설접지방식
변전소 접지방식	독립접지 (LA+ 기기) : 공동접지 원방제어용 : 단독접지
전기실 접지	독립접지
통신실 접지	독립접지
신호실 접지	독립접지

한편 도시전철은 대부분 지하구간으로 되어 있으며 지하구간의 경우 변전실 및 전기실이 지하철 역사 내 또는 차량기지에 배치되므로 일반건물에 비하여 대지가 넓어 접지극의 설치간격을 확보하는 데는 큰 어려움이 없다. 그러나 정거장 건물의 형태는 좁고 긴 장방형 터널식으로 접지극 시공이 현실적으로 곤란하므로 현재까지는 변전실 또는 전기실 외벽 부근에 매설하여 접지선을 실내로 유입하여 사용하고 있다. 표 2는 도시전철(지하철) 지하구간의 접지방식을 나타낸 것이다.

표 2 도시전철(지하철) 접지방식

구분	접지방식
전차선로 접지방식	비 접지
변전소 접지방식	[서울지하철]1,2,3,4호선 : 독립접지 (AC/DC) : 메시 접지에 의한 공통접지 원방제어용 : 단독접지 [도시철도]5,6,8호선 : 독립접지 (AC/DC) : 메시 접지에 의한 공통접지 원방제어용 : 단독접지
전기실 접지	[서울지하철]1,2,3,4호선 : 독립접지 [도시철도]5,6,7,8호선 : 독립접지 (AC/DC) : 메시 접지에 의한 공통접지
통신실 접지	[서울지하철]1,2,3,4호선 : 독립접지 [도시철도]5,6,7,8호선 : 공용접지
신호실 접지	[서울지하철]1,2,3,4호선 : 독립접지 [도시철도]5,6,7,8호선 : 공용접지

3.2 국외현황

서구 철도 선진국인 독일, 프랑스 등에서 구 전차선로에 독립 접지방식을 사용하였으나 최근에 매설접지에 의한 공용 접지방식을 사용하고 있다. 그림 3과 같이 선로를 따라 터널을 접지전극으로 하며 터널 보강재와 가공전차선로 구성재는 레일전위를 감소시키며 접촉전압에 대한 보호를 위해 선로 접지에 연결하고 있다. 귀선회로의 접지 연결은 터널 내 선로 접지를 위한 가공전차선로 기기와 다른 콘크리트 구조물에 접속되어 있다[8,9].

한편 전력 공급을 위한 지하변전소 접지방식은 그림 4에서 보듯이 메시 접지에 의한 공용접지를 적용하고 있으며, 신호 및 통신 설비는 공용접지를 사용하고 있다.

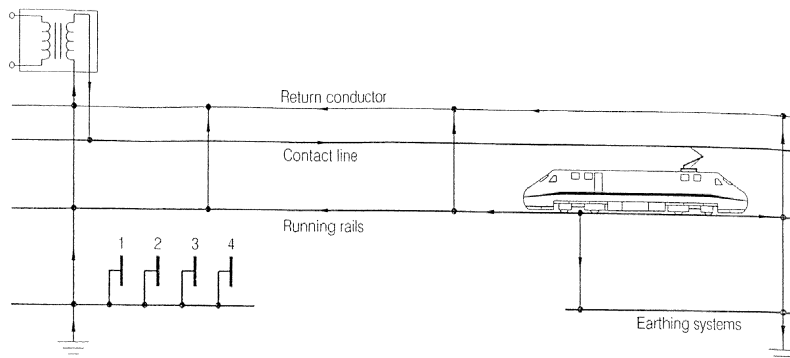


그림 3 접지 귀선전류와 AC 철도의 사용되는 귀선로 접지.

1. 중, 고전압 보호 접지
2. 저전압 보호 접지
3. 통신, 신호 시스템 접지
4. 뇌 보호접지

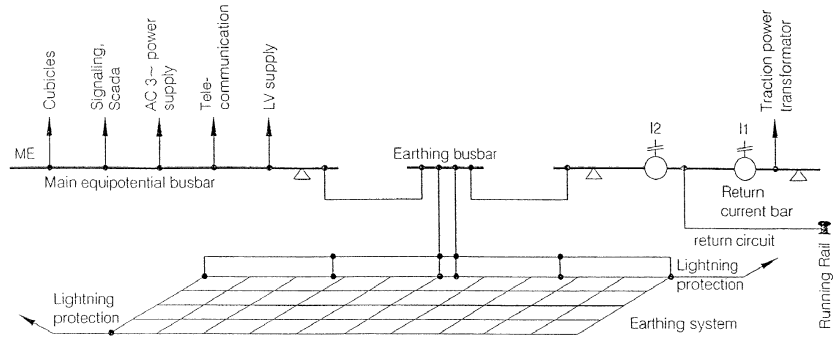


그림 4 변전소내의 귀선로와 접지

4. 시뮬레이션

상기에서 언급한 철도 지하구간의 접지설비의 분석 및 검토를 토대로 접지방식에 따른 시뮬레이션을 하였으며, 시뮬레이션 도구는 PSIM을 사용하였다. 직류전철 구간 및 교류전철구간에 대한 독립접지, 공용 접지 및 구조체를 이용한 공용 접지방식에 대해 수행하였다.

4.1 독립접지(직류전철 구간 DC 1500V)

그림 5는 직류전철 구간(DC 1500V)에서 독립 접지를 하였을 때의 시뮬레이션 회로를 보여준다. 독립 접지저항을 $0.75[\Omega]$ 로 하였으며, 두 접지 사이에 대지 저항률이 존재하므로 거리에 따른 저항(500, 2k, 4k, ..., 7k)을 두었으며 0.1초 후 지락 사고가 발생한다고 가정하였다. 만약 대지 저항률 $\rho = 100[\Omega.m]$ 이라고 가정하면, 식 (4)에 의하여 V1인 지점은 지락 지점으로부터 20m 거리가 된다. 그림 6은 그림 5에 대한 시뮬레이션 결과로 지락 지점에 따른 전위분포를 나타내며 2절의 이론적 도식화와 일치함을 알 수 있다.

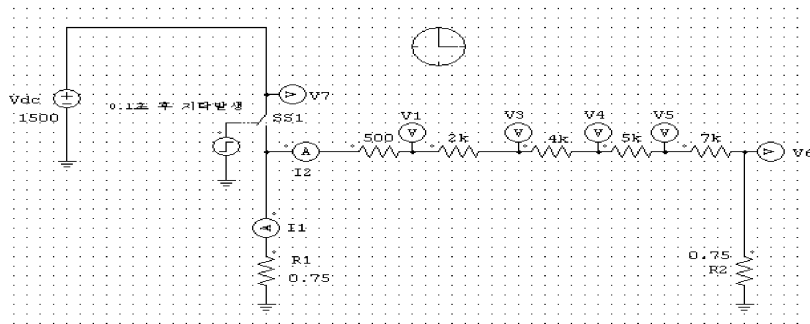


그림 5 기기별 독립 접지방식을 한 경우(접지저항 : 0.75Ω)

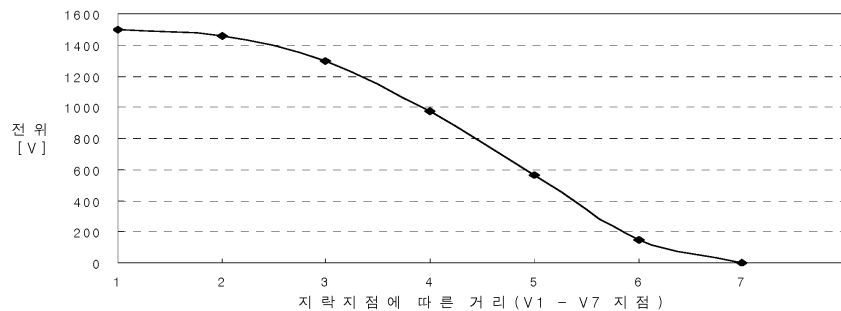


그림 6 지락 지점에 따른 대지 전위분포

4.2 독립접지(교류전철 구간 AC 25000V)

그림 7은 교류전철 구간(AC 25000V)에서 독립 접지를 하였을 때의 시뮬레이션 회로를 보여준다. 독립 접지저항은 지락전류의 크기를 고려하여 1[Ω]로 하였으며, 두 개의 접지 사이에 거리에 따른 저항(500, 4k, ..., 20k)을 두어 0.1초 후 지락 사고가 발생한다고 가정하였다. 부하인 전기동차에 전류가 흐르다가 0.1초 되는 시점에 지락 사고가 발생하면 접지저항 R1으로 25KA 정도의 전류가 흐르게 된다. 그림 8은 지락 지점의 거리에 따른 대지 전위값을 나타낸다. 그림 6과 마찬가지로 전위분포 곡선을 보여준다.

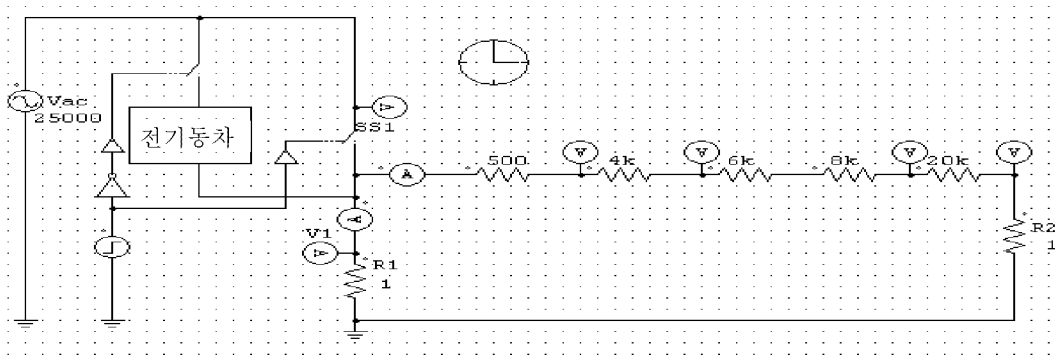


그림 7 기기별 독립접지를 한 경우(접지저항: 1Ω)

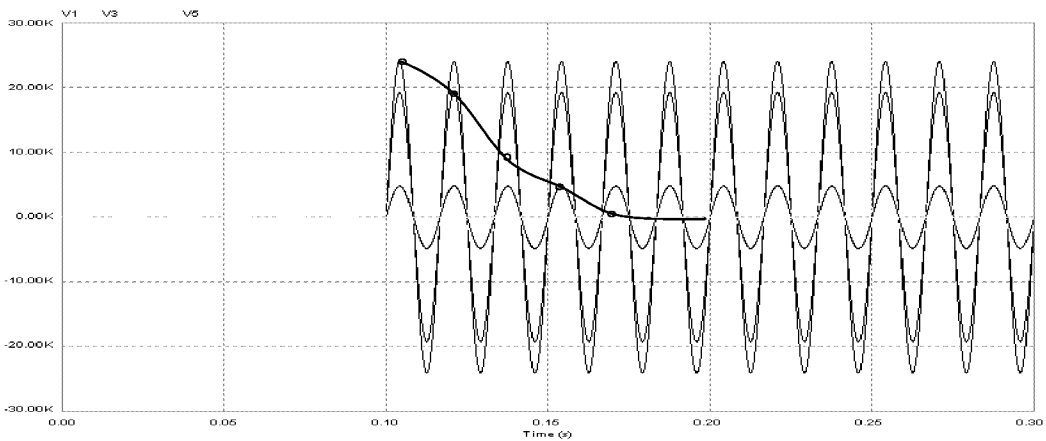


그림 8 지락 지점의 거리에 따른 전위값

4.3 공용접지(직류전철 구간 DC 1500V)

전차선로를 운행 중인 전기동차의 부하 등가저항 10[Ω], 접지저항 0.75 [Ω]으로 가정하여 시뮬레이션을 하였다. 접지와 접지 사이의 연계선의 저항은 0.1[Ω], 접지와 접지 사이의 대지 저항률에 의하여 지락 사고가 발생한 지점으로부터 거리에 따라 저항을 그림 9와 같이 가정하였다.

그림 10은 0.1초 후 지락 사고가 발생했을 때의 지락전류 및 대지 누설전류를 나타낸다. 지락 전류는 3.8kA 정도 흐르고 있으며 대지 누설전류는 8mA가 흐르고 있음을 보여준다. 한편 그림 11은 지락 지점으로부터 거리에 따른 전위분포 곡선을 보여주는데, 지락 지점과 다른 지점의 전위차가 단독 접지방식에 비해 상당히 작음을 보여준다. 이는 두 접지 사이에 연계선을 연결함으로써 지락전류가 크게 접지저항을 통해 흐르고 지면상의 대지저항에는 상대적으로 전류가 흐르지 않아 전위차가 작다는 것을 의미한다.

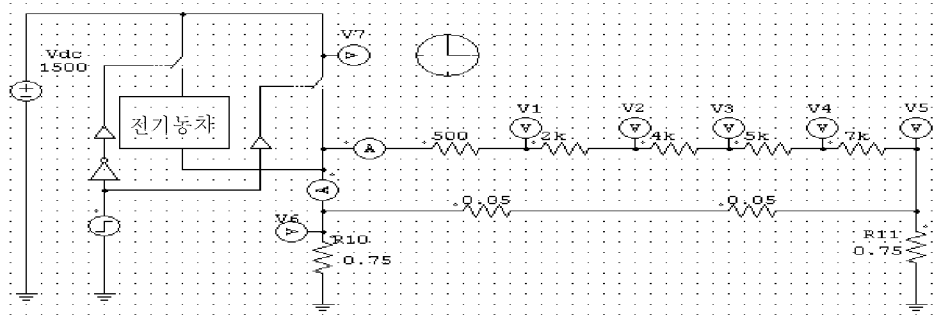


그림 9 직류전철(DC 1500V)에서 가선이 지락된 경우(접지저항 0.75Ω)

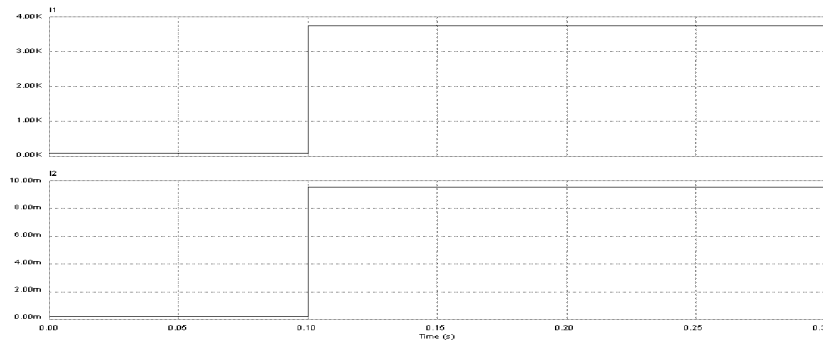


그림 10 0.1초 후 지락전류 및 대지 누설전류

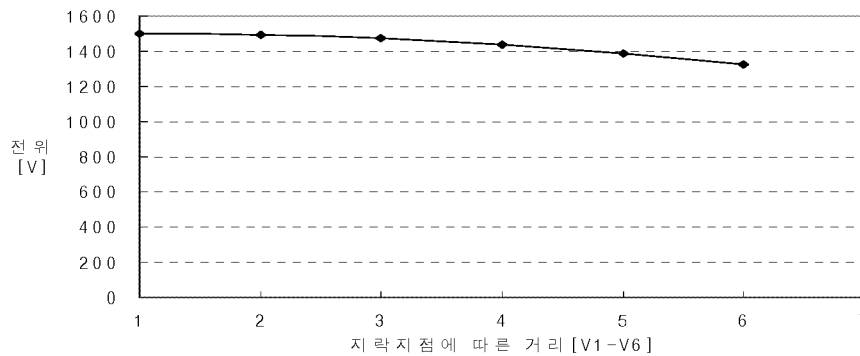


그림 11 지락 지점에 따른 거리의 대지 전위분포

4.4 구조체를 이용한 공용접지

구조체가 철골조, 철근 콘크리트조로 이루어진 건축물에 구조체의 일부인 철골이나 철근에 접지선을 부착함으로써 접지극 역할을 갖도록 하는 개념이다. 따라서 도시철도 운행 구간 중에 지하에 존재하는 전철역이나 반지하 형태의 건축물을 이루는 전철역 등 외부에서 배관 등을 따라 접지선이 들어와서 각종 기기에 접지선을 연결하는 경우, 구축비용이 많이 들거나 접지선 처리 등에 어려움이 있는 지하구간에 대해 서구 선진 철도국가의 접지방식과 같이 구조체 접지를 고려한다.

도시철도 운행 구간에서 전철역 내에 존재하는 전기동차와 변전실, 통신실, 전산실, 기기실 등 다양한 부하가 존재한다. 이들 부하에 DC 1500[V] 전압이 공급되고 있으며 0.1초 되는 시점에서 공급 전원선이 지락 사고가 발생하였을 경우에 대한 시뮬레이션 회로를 그림 12에 나타내었다. 접지저항을 동일하게 0.1[Ω]로 가정하였으며 구조체 대지 사이에 존재하는 6개의 접지저항이 병렬로 이루어져 있으므로 등가 접지저항은 0.017[Ω]이 된다. 표 3은 전철역 내부인 구조체 내부에 존재하는 다양한 부하가 급전 계통에 병렬로 연결되었다고 가정하고 시뮬레이션을 하기 위한

각 부하에 대한 등가저항과 부하에 흐르는 평균 전류를 나타내었다.

그림 13은 지락 사고 발생에 따른 접지 전류 파형으로 대지와 구조체 사이에 접지저항이 동일하므로 지락 사고가 발생한 지점과는 무관하게 접지저항에 분배된 전류가 접지저항을 통해 대지로 흘러 들어감을 알 수 있다. 즉 접지저항이 0.1[Ω]이 6개로 이루어진 병렬회로이므로 지락전류 1500[A]가 나누어져 한 개의 접지저항에는 750[A]가 흐른다. 이것은 교류전철 구간에서 공급되는 25,000[V]에 대한 시뮬레이션 결과에 동일한 결과를 보여주고 있는데, 국부적으로 구조체 접지저항이 다르다면 이에 따라 흐르는 지락전류도 다르게 대지에 흐름을 의미한다.

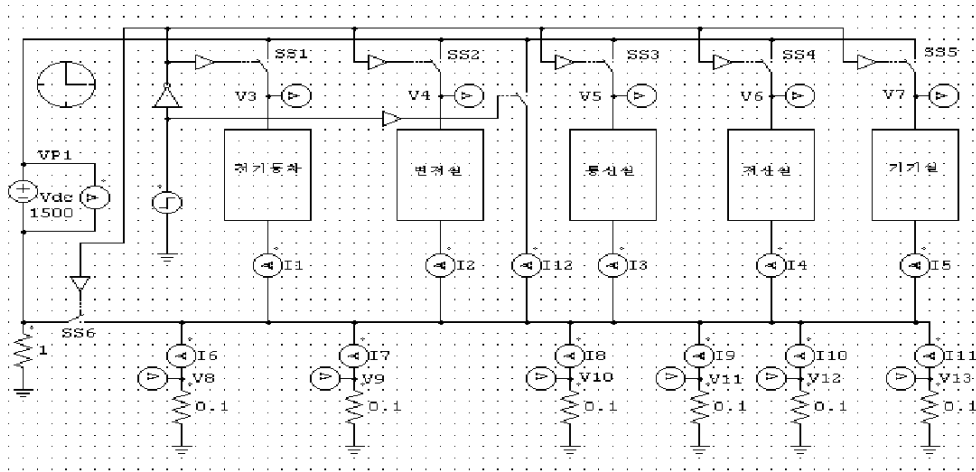


그림 12 직류전철 구간에서 지락 사고가 발생하였을 경우

표 3 시뮬레이션용 부하 파라미터

구분	등가 부하저항[Ω]	평균 부하전류[A]
전기동차	15	100
변전실	10	150
통신실	75	20
제안실	50	30
기기실	5	300

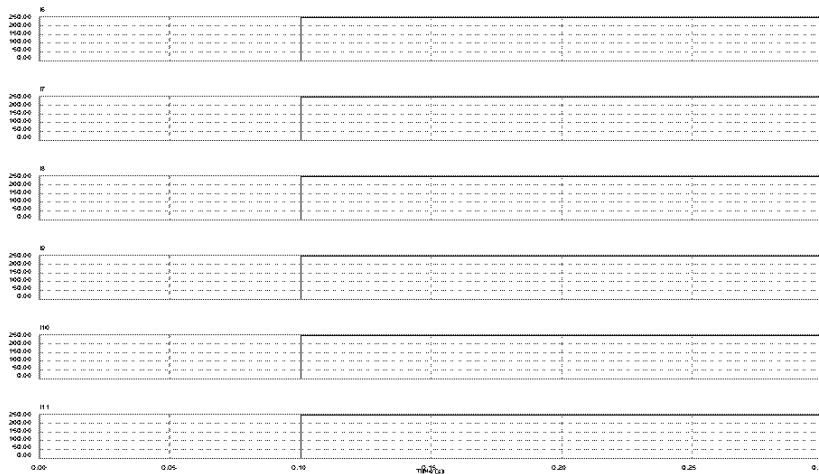


그림 13 지락 사고 발생에 따른 접지 전류 파형

5. 결 론

철도 지하구간의 접지설비에 대해 단독 접지방식, 공용 접지방식 그리고 구조체를 이용한 공용 접지방식에 대해 시뮬레이션을 하였다. 전압원은 DC 1500[V], AC 25,000[V]에 대해 각각의 접지방식을 적용하였으며, 지락 사고에 따른 대지 전위분포를 고찰하였으며 시뮬레이션을 통해 얻은 결과는 다음과 같다.

- 1) 단독 접지방식은 기기 설비마다 접지를 따로 설치하므로 접지저항을 변화시키며 시뮬레이션을 한 결과 지락 지점을 기준으로 상대적 위치에 따른 전위분포 곡선을 가졌으며, 항상 일정한 패턴을 유지하였다.
- 2) 공용 접지방식은 시뮬레이션 한 결과 두 개의 기기 설비 사이에는 단독 접지방식을 한 경우에 비해 전위차가 현저히 줄어들어 전위차에 대한 기기 손상의 부담을 줄일 수 있다.
- 3) 철근 콘크리트 구조체로 이루어진 전철역인 경우 구조체 대지 사이에 가상의 접지저항이 존재하고 격자형태로 이루어진 접지저항으로 전류가 흐르므로 구조체 전체가 등전위를 이룬다. 시뮬레이션을 한 결과 접지저항을 통해 지락전류가 분배되어 흐르고 기기 설비에 대해 전압을 고찰한 결과 부하저항이 다르더라도 기기 설비간 전위차가 거의 없음을 알 수 있었다.

전철역이 콘크리트 구조체로 이루어진 경우 외부로부터 접지선을 유입하여 기기 설비간에 설치하는 등이 설치 환경이 열악하고 접지 구축에 따른 비용적인 측면을 고려하였을 때, 구조체를 이용한 공용접지를 적용하면 독립 접지 혹은 공용 접지에 비해 매우 효율적이라고 사료된다.

참고문헌

1. 이복희 (2000년), “접지의 핵심기초기술”, pp.179-187
2. IEC-TC-64, Pub. 479, “Effects of current passing through the human body”, IEC Report 1984.
3. 철도청 전기국, “접지설비”, 1999.
4. 이영수 외 1인, “접지설계입문”, 동일출판사.
5. T. Takahashi, T. Kawase : “Analysis of Combined Earth Resistance for Parallel Driven Rods in Multilayered Earth”, Scripts Technical, Inc. Wiley Company.
6. H. B. Dwight, “Calculation of Resistance to ground”, Electrical Engineering, No.12, 1936.
7. 김진오 외 4인(2004년), “고밀도 건축물에 적용할 접지시공기술 및 법규 개선방안 연구”, KECA연구논문집, 한국전기공사협회, pp. 245-271
8. “Contact Lines for Electric Railways”, SIEMENS
9. A Freud(1983), “Effective Computer Grounding”, EC & M, Vol. 82. No.5