

철도급전시스템 사고발생시 대지전위상승 억제 대책

창상훈* 오광해* 허범** 김정훈***
*한국철도기술연구원, **철도청, ***홍익대학교

Analysis of Rail Potential on the AC Electric Railway Grounding System

Sanghoon Chang*, Kwanghae Oh*, Beom Heo**, Junghoon Kim***
*Korea Railroad Research Institute, **Korean National Railroad, ***Hongik University

Abstract - This study presents accurate simulation to examine a reason rail potential rise and how to design ground connection(Cross Connection Cable, CCC) and draw up a plan of an optimal buried grounding system according to section.

에 전차선로 및 고장발생개소, 차량에 대한 모델링 결과를 나타내었다.

1. 서 론

전기철도의 전기설비에서 고장은 필연적으로 일어나는 것이며, 특히 지락고장이 발생하면 고장전류가 대지로 흘러가게 되어 전기설비의 내부 및 주변에 전위차가 발생하여 인체의 안전이나 설비의 절연에 위협을 초래하게 된다. 더욱이 최근에 전기차량의 출력 증가로 전력사용의 수요가 급속하게 증가함에 따라 고장용량도 증가하고 있으므로 상대적으로 고장전류에 의한 대지전위의 상승이 커져서 인체의 안전이나 설비의 절연 등에 미치는 위험도 커지고 있는 실정이다. 이러한 위험에 대비하기 위한 것이 전기설비의 접지시스템인데, 우리나라와 같이 국토의 면적이 작아서 충분한 전기철도 전력설비의 용지를 확보하기 곤란하거나 주변 환경과의 조화, 인구 밀집지역인 도심이나 산악지 등의 대지저항률이 큰 경우에 적절한 접지시스템을 설계하여 대지전위의 상승을 억제하고, 고장전류의 크기를 제어하는 등의 대책을 세우지 않으면 안된다.

전기철도와 같이 다수의 접지계통이 있는 경우에는 각각 독립된 접지공사를 하고 있는데도 불구하고 대지를 공유함으로써 크고 작은 상호간섭을 일으키는 경우가 많다. 예를 들면 계통이 다른 접지전극을 기존설비에 접근하여 설치하면 한쪽계통의 접지전류에 의한 전위상승이 다른 정상적인 계통에 영향을 주게 되어 사고를 유발하는 경우가 있으므로 대지를 통한 타 접지계통과의 간섭에 대해 고려해야 한다.

현재의 전기철도 접지계통은 각 설비의 필요에 따라 설치·운영함으로써 상호간섭이 발생할 가능성이 있으므로 효율적인 접지효과를 기대하기 어렵고 타 계통 설비에 영향을 주어 기기의 오동작을 유발시키거나 소손시켜 설비의 신뢰성을 크게 약화시키는 등의 문제점을 가지고 있으며, 전차선로나 고압배전선로 지락사고시 대지전위의 상승으로 약전계통(신호, 통신, 원격제어설비)에 유입되어 relay 및 전자장치 등을 소손시키는 사례가 발생하고 있는 실정이다.

여기서는 교류전기철도 급전시스템에서 지락사고가 발생하였을 때 대지전위 상승을 억제하여 인명 및 설비를 보호하기 위한 횡단접속선 설치간격의 최적 방안에 대하여 검토하고 그 대안을 제시하고자 한다.

2. 교류급전시스템 모델링

급전회로의 고장상태에서의 대지전위상승 특성을 해석하기 위하여 선로, 접지개소, AT, 고장개소, 구분소, 변전소, 차량에 대하여 모델링을 실시하였으며 그림1~3

○ 전차선로 도체군별

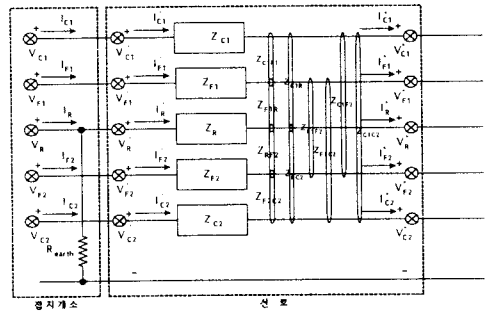
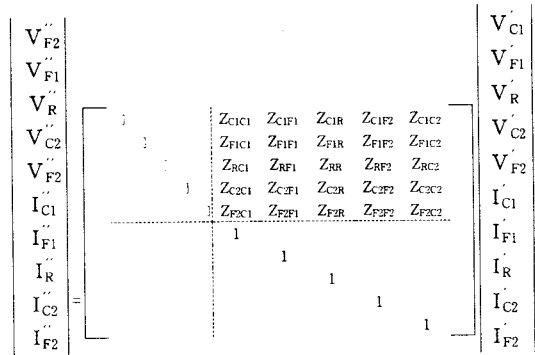


그림1. 전차선로 도체군별 모델링



○ 고장발생개소

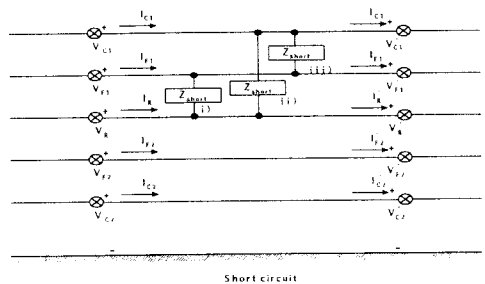


그림2. 고장발생개소 모델링

i) 급전선과 레일이 단락된 경우

$$V_{C1} = V'_{C1}, V_{F1} = V'_{F1}, V_R = V'_R, V_{C2} = V'_{C2}, V_{F2} = V'_{F2}$$

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

$$I_{C2} = I'_{C2}, I_{F2} = I'_{F2} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} V_{C1} \\ V_{F1} \\ V_R \\ V_{C2} \\ V_{F2} \\ I_{C1} \\ I_{F1} \\ I_R \\ I_{C2} \\ I_{F2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \hline 0 & \frac{1}{Z_{short}} & -\frac{1}{Z_{short}} & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{Z_{short}} & \frac{1}{Z_{short}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V'_{C1} \\ V'_{F1} \\ V'_R \\ V'_{C2} \\ V'_{F2} \\ I'_{C1} \\ I'_{F1} \\ I'_R \\ I'_{C2} \\ I'_{F2} \end{bmatrix}$$

ii) 전차선과 레일이 단락된 경우

$$V_{C1} = V'_{C1}, V_{F1} = V'_{F1}, V_R = V'_R, V_{C2} = V'_{C2}, V_{F2} = V'_{F2}$$

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

$$I_{C2} = I'_{C2}, I_{F2} = I'_{F2} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} V_{C1} \\ V_{F1} \\ V_R \\ V_{C2} \\ V_{F2} \\ I_{C1} \\ I_{F1} \\ I_R \\ I_{C2} \\ I_{F2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \hline \frac{1}{Z_{short}} & 0 & -\frac{1}{Z_{short}} & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\frac{1}{Z_{short}} & 0 & \frac{1}{Z_{short}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ \frac{1}{Z_{short}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V'_{C1} \\ V'_{F1} \\ V'_R \\ V'_{C2} \\ V'_{F2} \\ I'_{C1} \\ I'_{F1} \\ I'_R \\ I'_{C2} \\ I'_{F2} \end{bmatrix}$$

iii) 전차선과 급전선이 단락된 경우

$$V_{C1} = V'_{C1}, V_{F1} = V'_{F1}, V_R = V'_R, V_{C2} = V'_{C2}, V_{F2} = V'_{F2}$$

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

$$I_{C2} = I'_{C2}, I_{F2} = I'_{F2} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} V_{C1} \\ V_{F1} \\ V_R \\ V_{C2} \\ V_{F2} \\ I_{C1} \\ I_{F1} \\ I_R \\ I_{C2} \\ I_{F2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \hline \frac{1}{Z_{short}} & -\frac{1}{Z_{short}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{1}{Z_{short}} & \frac{1}{Z_{short}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V'_{C1} \\ V'_{F1} \\ V'_R \\ V'_{C2} \\ V'_{F2} \\ I'_{C1} \\ I'_{F1} \\ I'_R \\ I'_{C2} \\ I'_{F2} \end{bmatrix}$$

○ 전기차량

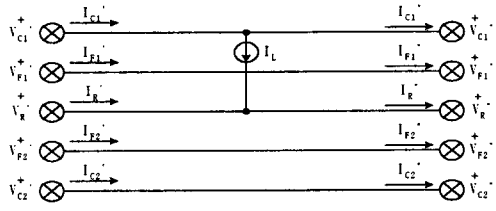


그림3. 전기차량 모델링

$$V_{C1} = V'_{C1}, V_{F1} = V'_{F1}, V_R = V'_R, V_{C2} = V'_{C2}, V_{F2} = V'_{F2}$$

$$I_{C1} = I_L + I'_{C1}, I_{F1} = I'_{F1}, I_R = -I_L + I'_R, I_{C2} = I'_{C2}, I_{F2} = I'_{F2}$$

$$\begin{bmatrix} V_{C1} \\ V_{F1} \\ V_R \\ V_{C2} \\ V_{F2} \\ I_{C1} \\ I_{F1} \\ I_R \\ I_{C2} \\ I_{F2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & & & & & & & & & \\ & 1 & & & & & & & & \\ & & 1 & & & & & & & \\ & & & 1 & & & & & & \\ & & & & 1 & & & & & \\ & & & & & 1 & & & & \\ \hline & & & & & & 1 & & & \\ & & & & & & & 1 & & \\ & & & & & & & & 1 & \\ & & & & & & & & & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V'_{C1} \\ V'_{F1} \\ V'_R \\ V'_{C2} \\ V'_{F2} \\ I'_{C1} \\ I'_{F1} \\ I'_R \\ I'_{C2} \\ I'_{F2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \\ \\ \\ \\ \\ \\ I_L \\ \\ \\ -I_L \end{bmatrix}$$

3. 시뮬레이션 조건

3.1 교류전기철도 접지시스템 구성

교류전철구간의 선로에서 견인부하전류의 연속적인 귀환회로와 고장전류가 변전소로 귀환하는 경로를 제공하고 허용전압과 접촉전압의 안전을 확보하기 위해 접지망이 구성되어야 하며 접지망은 궤도회로에 의해 결정된다.

전기차는 팬터그래프를 통하여 전차선 시스템으로부터 전력을 공급하게 되며 견인전류는 주행레일, 접지선과 대지 또는 주행선로, 대지, 접지선 등 귀환 도체를 경유하여 유도성 간섭을 발생시키며 전철변전소로 귀환된다.

교류전기철도 급전시스템은 외부에 노출되어 있기 때문에 지락 및 단락의 영향을 받기 쉽다. 따라서 일정한 설계기준에 의해 접지망이 설계되어야 하는데 다음에 제시하는 조건을 최소한 준수해야 한다.

○ 유도 혹은 단락접촉에 의해서 발생된 급속/대지 구조물 전위상승을 억제하기 위한 가장 효과적인 보호는 등전위를 목적으로 급속 구조물간 상호 연결을 가능한 한 많이 한다.

○ 우발적인 단선이 발생하였을 경우에 노선망에 유도된 전압 값을 줄이기 위해서 상호 접속길이를 가능한 한 작게하는 것이 적합하다.

○ 매설접지방식은 특히 국제철도연합(U.I.C.)과 국제전선전화자문위원회(CCITT)에 의해 개정되고 국제통신 연합(U.I.T.)에 의해 다음의 기준에 의해 구성되며 본 연구에서는 이 기준을 적용하기로 한다.

- 인체허용 전류 : 15mA
- 구조물/대지 전압의 최대값 : 650V(200ms이내)
- 정상상태 레일전위
 - (i) 대중이 접근하기 쉬운 지역 : 60 V
 - (ii) 대중이 접근하기 어려운 지역 : 150 V

다음 그림4는 매설접지방식의 구성도를 나타낸 것이다.

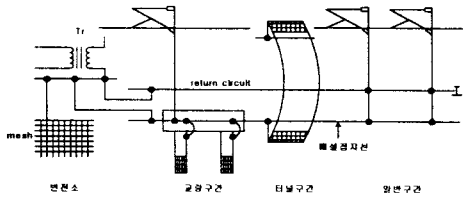


그림4. 교류전기철도 접지망 구성도

3.2 시뮬레이션 조건

| 기호 | 설명 | 값 |
|--------------------|-------------|----------------|
| Zm | M상 변압기 임피던스 | 0.264 + j8.218 |
| Zat | 단권변압기 임피던스 | j0.35 |
| R _{earth} | 대지저항 | |

다음 식 (4)에 의거 대지저항을 변화에 따른 매설 접지저항을 구하여 R_{earth} 값을 선정하였다.

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

- 여기서, r : 매설접지선의 반지름[mm],
- t : 매설깊이[m],
- ρ : 대지고유저항[Ω · m],
- l : 매설접지선 길이[m]
- Z_{short} (단락저항) = 5 [Ω]

대지저항을 200, 500, 1,000[Ω · m]으로 변화시키며 R_{earth}를 구한다.

* 대지전위 상승 기준(EN50122-1)

| 구분 | 집속전압(V) | 레일-대지간 전압 |
|--------------|---------|-----------|
| 정상상태 t=300s | 60 | 120 |
| 정상상태 t=300ms | 65 | 130 |
| 고장상태 t=300ms | 430 | 874 |
| 고장상태 t=200ms | 650 | 1,340 |

4. 사례연구(고장발생시)

4.1 대지저항을 변화에 의한 레일전위

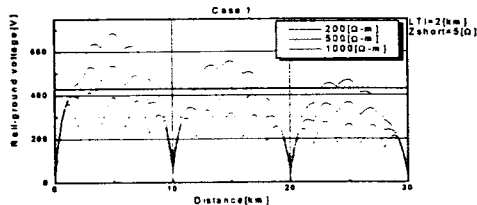
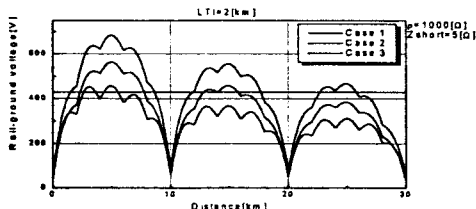


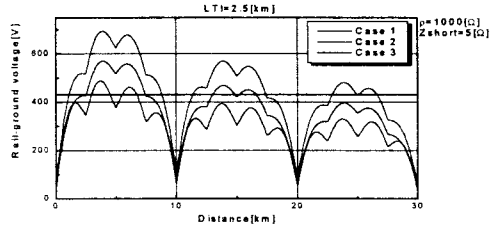
그림4. 대지저항을 변화에 의한 레일전위 해석 결과

4.2 횡단접속점 변화에 의한 레일전위

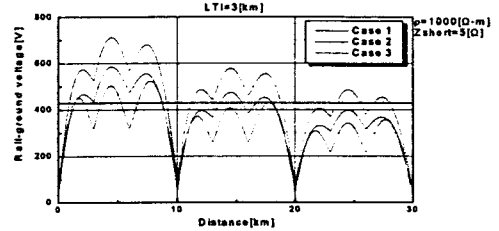
○ CASE 1(횡단접속점 간격 2.0km)



○ CASE 2(횡단접속점 간격 2.5km)



○ CASE 3(횡단접속점 간격 3.0km)



5. 결론

본 논문은 교류전기철도 매설접지방식에서 고장발생시 레일(대지)전위상승에 대한 해석결과로 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 고장상태(고장시간 t=200ms)에서 대지고유저항의 크기에 따라 레일전위상승 정도가 다르게 나타나며, 대지고유저항이 1,000[Ω · m]에서는 기준치인 650V를 초과하는 것으로 나타났다.
- 대지고유저항을 1,000[Ω · m]로 놓고 횡단접속점을 변경(2km, 2.5km, 3km)하여 시뮬레이션 한 결과 2.0km이상인 경우에는 EN50122-1에서 권고하고 있는 650[V]를 초과한다.
- 고장발생시 레일전위상승 기준치인 650[V](고장시간 t=200ms)를 만족시키기 위해서는 횡단접속을 2km 이하로 하며, 특히 전철변전소 인접지역(10km 전·후)에서는 고장전류를 변전소로 신속하게 전송시키기 위해서는 횡단접속점을 1[km]이하로(0.8km이상) 단축시키면 설비 및 인체의 안전을 보장할 수 있다.
- 향후 기준선을 매설접지(공용접지)방식으로 개량할 경우에 인체 및 설비의 안전확보를 위한 접지시설기 준수립을 통한 정밀한 시공이 이루어져야 한다.

(참 고 문 헌)

- [1] BS EN 50122-1 : 1998
- [2] Seoul-Pusan High Speed Rail Project Transmittal Sheet, "Specifications for Traction Current Return, Earthing and Protections" pp1 ~ 33, 1996.6
- [3] H Puntis, "Design of Earthing and Bonding Systems for 25kV A.C. Electrified Lines", RailTrack PLC, RT/E/S/21085 ISSUE I, pp1 ~ 35, 1998. 8
- [4] 창상훈 외, 이상전압 억제를 위한 접지시스템 연구, 한국철도기술연구원, 2000. 12