

교류전기철도 매설접지방식에서의 레일전위 해석

창상훈* 오광해* 김주락* 최규형* 김정훈**
*한국철도기술연구원, **홍익대학교

Analysis on Rail Potential on the AC Electric Railway Grounding System

Sanghoon Chang KwanghaeOh Joorak Kim Kyuhyung Choi Junghoon Kim
Korea Railroad Research Institute, Hongik University

Abstract - Railway electrification results in Electromagnetic Interference, which affects a life and a equipment. Therefore, a plan against EMI must be considered.

This study presents accurate simulation to examine a reason rail potential rise and how to design ground connection and draw up a plan of an optimal buried grounding system according to section.

1. 서 론

철도의 전철화 설계에서 핵심적 부분을 이루는 것 중의 하나로 접지시스템을 들 수 있으며, 최근 유럽에서 이와 관련된 일련의 유럽 단일 규격(EN)을 제정하여 설계에 반영하도록 있다. 주된 내용은 전기철도에서 인체 안전과 설비보호를 위한 구체적인 요구사항을 다루고 있는데, 이를 충족하기 위하여 적절한 접지와 분당을 하도록 하고 있다.

우리 나라에서도 최근 철도 현대화 사업의 일환으로 고속철도의 건설과 기존철도의 전철화에 노력을 집중하고 있는 가운데, 전철화 노선에서 인체 및 전자장비 보호에 대한 특별한 대책이 필요하게 되었다.

전기철도 시스템은 ① 가공전차선로, 전기차 및 레일로 구성되는 급전계통, ② 제전기를 이용한 신호궤도회로, 본드 및 전철기, ③ 각종 통신·제어설비, ④ 열차통신을 위한 각종 무선설비, ⑤ 기타 전원으로 사용되는 고압 배전선로로 구성되어 있다. 이들 사이의 유도원(①)과 피유도원(②, ③, ④) 사이에는 유도, 전도 및 정전결합이 발생되어 인체 및 장비에 감전과 장애를 일으키게 된다. 이 중 유도성과 전도성 결합은 계통에 고장이 발생하였을 때 크게 나며, 고장의 형태는 상용주파수 영역의 고장과 낙뢰나 뇌썩지 등과 같은 과도상태일 때의 두 가지로 고려할 수 있는데, 본 논문에서는 지락고장 등 상용주파수 영역에서의 고장을 다루고자 한다. 고장으로 인한 지표면 전위상승 때문에 유도원과 피유도원 사이에 전위차가 발생하는 전위차를 안전기준 이하가 되도록 설계를 하는 것이 필요하며, 이는 접지와 분당을 통한 접지시스템의 구축을 통해 달성될 수 있다.

본 논문에서는 교류전기철도 접지방식의 표준으로 적용되고 있는 매설접지 구성방식에 따른 레일전위 분포 해석을 통하여 유용성을 검증해 보고자 한다.

2. 전차선로 회로점수 예측

AT급전방식의 전차선로는 일반적으로 상·하선별로 급전선, 전차선, 조가선, 가공보호선, 매설접지선으로 구성되어 있다. 이들 전차선로는 상·하선별로 전차선과 조가선이 일정간격의 드로퍼에 의해 연결되어 있고 상·하선 레일, 가공보호선, 매설접지선이 서

로 연결되어 있다. 이러한 시스템을 실제적으로 해석하기 위해서는 각 도체들이 서로 연결되지 않은 상태로 가정하는 것보다는 상선 급전선, 하선 급전선, 상·하선 각각의 전차선 도체군(전차선+조가선), 레일 도체군(상하선 레일, 상하선 가공보호선, 상하선 매설접지선)의 5개 도체군으로 모델링 하는 것이 현실적이다.

여러 도체를 하나의 등가 도체군으로 구성하는 대표적인 방법으로는 기하학적 평균반경(GMR)을 이용하는 방법이 있다.

GMR은 근거리 도체들 간의 기하학적 평균 거리가 된다. 그런데 철도 시스템의 도체를 등가도체군으로 구성하기 위해 GMR을 적용하는 것은 무리가 있다. 그 이유는 레일 도체군을 구성하는 도체들의 도체반경에 비해 가공보호선과 접지선의 거리가 7.5m, 가공보호선간 거리는 10.5m, 상선 가공보호선과 하선 레일과의 거리가 10m가 되므로 이들 도체들을 GMR에 의해 하나의 등가 도체로 구성하는데는 어려움이 있기 때문이다.

2.1 전차선로 시스템 구성

그림 1은 전차선로 시스템의 기하학적인 구조를 나타낸다. 이 전차선의 각 트랙은 하나의 전차선(4, 6), 조가선(3, 5), 급전선(1, 2), 가공 보호선(11, 12), 접지선(13, 14), 두 조의 레일(7, 8과 9, 10)로 구성된다. 전차선로 시스템은 14개의 도체로 구성되어 있으나 전차선과 조가선은 드로퍼로 연결되어있고 상·하행 레일과 가공보호선, 매설접지선이 공통으로 연결되어 있다. 결국, 전차선로 시스템을 14개의 도체로 구성하기 보다는 서로 연결된 도체들을 그룹핑함으로써 하나의 도체군으로 나타내는 것이 현실적일 것이다.

따라서 도체들을 5개의 도체군으로 나타낼 수 있으며, 첫째, 물체 도체군은 상행 급전선(1), 하행 급전선(2), 셋째 도체군은 상행 전차선(4)과 조가선(3), 넷째 도체군은 하행 전차선(6)과 조가선(5)으로 구성되고 다섯째 도체군은 레일(7,8,9,10), 가공보호선(11,12), 접지선(13,14)으로 구성된다.

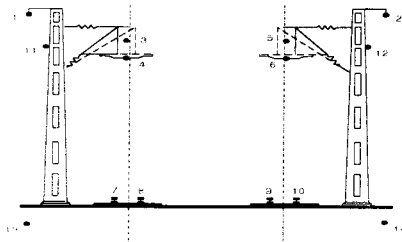


그림 1. 전차선로의 기하학적 구조

2.2 5도체 등가 회로 모델

본 연구에서 제안한 도체 등가화 과정의 흐름도는 그림2와 같다. 도체 정보 입력에서는 각 도체에 대한 높이, 도체간 거리, 반지름, 비투자율 등이 입력자료로 들어간다. 서로 연결된 도체를 분류하고 그룹핑한다. 그룹핑된 도체들은 등가 임피던스 및 커패시턴스의 계산을 통해 등가 회로로 구성하여 이에 대한 선로 정수를 출력한다.

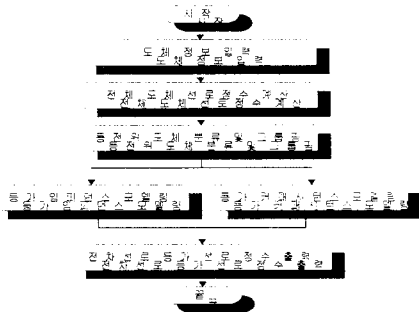


그림2. 도체 등가화 과정의 흐름도

2.3 5도체 등가 회로모델에 의한 선로정수 계산

제안한 5도체 등가 회로 모델에 대한 선로정수 계산을 실시하였다. 표1은 대상 전차선로 도체의 제원을 나타낸 것이며 표2는 표1의 도체에 대한 선로정수 계산 결과이다.

표1. 전차선로 도체 제원

	단면적 [cm]	비유전율	비투자율	저항 [Ω/km]	지름 [cm]
Rail	76.35	1	100	0.0126	4.93
Contact wire	1.7	1	1	0.104	1.549
Messenger wire	0.8	1	1	0.276	1.15
Feeder	1.5	1	1	0.118	1.6
Protective wire	0.75	1	1	0.239	1.11
GV80	0.8	1	1	0.229	1.08
Buried earth cable	0.38	1	1	0.5379	1.11

표2. 선로임피던스 계산결과(대지교유저항200[Ω.m])

	C1	F1	R	C2	F2
전차선군(상선) [C1]	0.1479 +j0.7418	0.0566 +j0.4686	0.0605 +j0.4042	0.0586 +j0.4245	0.0582 +j0.3980
급전선(상선) [F1]	0.0566 +j0.4686	0.1763 +j0.9185	0.0587 +j0.3971	0.0582 +j0.3980	0.0583 +j0.3837
레일도체군 [R]	0.0605 +j0.4042	0.0587 +j0.3971	0.1230 +j0.5347	0.0618 +j0.4003	0.0602 +j0.3924
급전선(하선) [C2]	0.0586 +j0.4245	0.0582 +j0.3980	0.0618 +j0.4003	0.1479 +j0.7418	0.0566 +j0.4686
전차선군(하선) [F2]	0.0582 +j0.3980	0.0583 +j0.3837	0.0602 +j0.3924	0.0566 +j0.4686	0.1763 +j0.9185

3. 레일전위상승 해석 시뮬레이션

3.1. 급전시스템 모델링

접지시스템에 대한 정상상태, 고장상태에서의 레일전위 특성을 해석하기 위하여 선로, 접지개소, AT, 고장개소, 구분소, 변전소, 차량에 대하여 모델링을 실시하였으며 그림3, 4에 고장개소 및 차량에 대한 모델링

링 결과를 나타낸다.

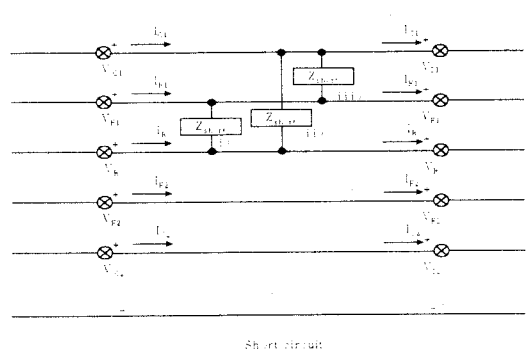


그림3. 고장발생개소 모델링

○ 전차선과 레일이 단락된 경우

$$\begin{aligned}
 V_{C1} &= V_{C1}, \quad V_{F1} = V_{F1}, \quad V_R = V_R, \quad V_{C2} = V_{C2}, \quad V_{F2} = V_{F2} \\
 I_{C1} &= I_{C1} + \frac{1}{Z_{short}}(V_{C1} - V_R), \quad I_{F1} = I_{F1}, \quad I_R = I_R + \frac{1}{Z_{short}}(V_R - V_{C1}) \\
 I_{C2} &= I_{C2}, \quad I_{F2} = I_{F2}
 \end{aligned} \tag{1}$$

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

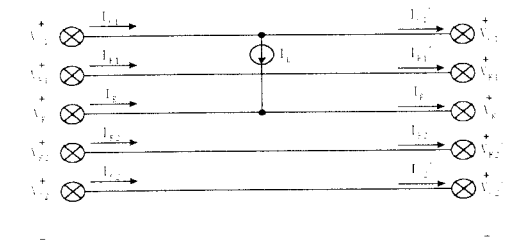


그림4. 전기차량 모델링

$$\begin{aligned}
 V_{C1} &= V_{C1}, \quad V_{F1} = V_{F1}, \quad V_R = V_R, \quad V_{C2} = V_{C2}, \quad V_{F2} = V_{F2} \\
 I_{C1} &= I_t + I_{C1}, \quad I_{F1} = I_{F1}, \quad I_R = -I_t + I_R, \quad I_{C2} = I_{C2}, \quad I_{F2} = I_{F2}
 \end{aligned}$$

$$\begin{bmatrix} V_{C1} \\ V_{F1} \\ V_R \\ V_{C2} \\ V_{F2} \\ I_{C1} \\ I_{F1} \\ I_R \\ I_{C2} \\ I_{F2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & & & & & & & & & & \\ & 1 & & & & & & & & & \\ & & 1 & & & & & & & & \\ & & & 1 & & & & & & & \\ & & & & 1 & & & & & & \\ \hline & & & & & 1 & & & & & \\ & & & & & & 1 & & & & \\ & & & & & & & 1 & & & \\ & & & & & & & & 1 & & \\ & & & & & & & & & 1 & \\ & & & & & & & & & & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{C1} \\ I_{F1} \\ I_R \\ I_{C2} \\ I_{F2} \\ I_{C1} \\ I_{F1} \\ I_R \\ I_{C2} \\ I_{F2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -I_t \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

3.2 시뮬레이션 조건

표3은 레일 전위 분포 시뮬레이션을 위한 조건이다. 이때 식(2)에 의거 대지저항을 변화에 따른 매설접지저항을 구하여 R_{earth} 값을 선정하였다.

표3. 시뮬레이션 조건

기호	설명	값
Z_m	M상 변압기 임피던스	$0.264 + j8.218$
Z_{at}	단권변압기 임피던스	$j0.35$
R_{earth}	대지저항	

$$R = \frac{\rho}{2\pi} \left(\ln \frac{2l}{r} + \ln \frac{1}{t} - 2 + \frac{2t}{l} - \frac{t^2}{l^2} - \frac{t^2}{l^2} + \frac{t^4}{8l^2} \right) [\Omega] \quad (2)$$

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

이 때, 대지고유저항을 200, 500, 1,000[$\Omega \cdot m$]의 세가지 경우의 R_{earth} 를 구하며, 접지방범은 (i) 한 쪽만 매설접지선이 있을 경우(case 1), (ii) 양쪽에 매설접지선이 있는 경우(case2), (iii) 한쪽은 매설접지선+한쪽은 GV80접지선(case3)의 세가지 경우를 선정하였다. 따라서 총 9가지 경우의 시뮬레이션을 수행한다.

4. 사례연구

4.1 정상상태에서의 레일전위 해석

- 차량이 변전소에서 500m와 15km 거리에 있는 경우(부하전류 800A)

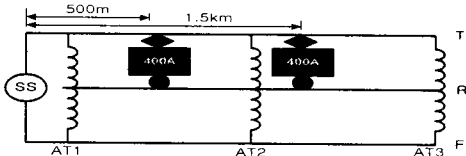


그림5. 차량부하 위치

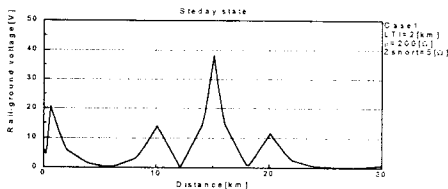


그림6. 부하전류 800A일 때의 레일전위

4.2 고장발생시 대지저항을 변화에 따른 레일전위

- case 1

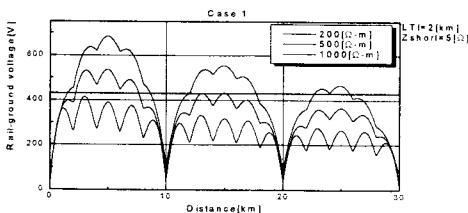


그림7. 한 쪽만 매설접지선이 있을 경우 레일전위 해석

- case 2

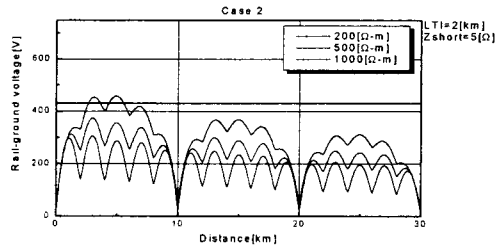


그림8. 양쪽에 매설접지선이 있는 경우 레일전위 해석

- case 3

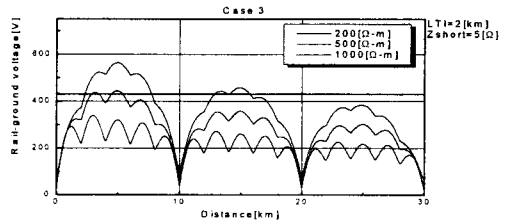


그림9. 매설접지선+GV80이 있는 경우 레일전위 해석

5. 결론

본 논문은 교류전기철도 매설접지방식에서 정상상태 및 고장상태에서의 레일전위에 대한 해석을 통하여 안전성을 검증하는 연구로서 결론을 요약하면 다음과 같다.

- 정상상태(정상상태 $t > 300$)에서는 차량부하가 증가(800A)하여도 EN50122-1에서 권고하는 기준치 60[V]이하의 조건을 만족하고 있다.
- 고장상태(고장시간 $t = 200ms$)에서 매설접지선을 한 쪽 선로에만 설치할 경우에 대지고유저항이 1,000 [$\Omega \cdot m$]에서는 기준치인 650[V]를 초과하는 것으로 나타났다.
- 접지선을 매설하는 개소가 암반이 많을 경우에는 레일전위가 기준치를 초과할 우려가 있으므로 횡단접속선의 접속간격을 단축하거나 매설접지선을 양쪽 선로에 포설하는 방법(또는 매설접지선+GV 80mm)을 적용하여 레일전위를 기준치 이하로 해야만 사고발생시 안전을 보장할 수 있다.

(참고문헌)

- [1] 장상훈 외, 이상전압 억제를 위한 접지시스템 연구, 한국철도기술연구원, 2000, 12
- [2] BS EN 50122-1 : 1998
- [3] Seoul-Pusan High Speed Rail Project Transmittal Sheet, "Specifications for Traction Current Return, Earthing and Protections" pp1~33, 1996.6
- [4] 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