직류 전기철도에서의 레일전위 및 누설전류 해석을 위한 시뮬레이션 모델링

A Simulation Modeling for Rail Potential and Leakage Current Analysis in DC Traction System

윤임중* 이종우**

Yoon, Yim-Joong **Lee, Jong-Woo**

ABSTRACT

In DC traction systems, a part of feedback current returning through rails becomes leakage current, illumination on a metal laid underground results from the leakage current to ground. To prevent the leakage current on rails, feedback rails almost have insulated with the ground. Insulation between rails and the ground causes that the earth method changes a isolated method in DC traction systems. the rail potential rise results in the isolated method. the rail potential rise causes an electric shock when a person touches the ground and rolling stock.

To decrease the rail potential rise and leakage current, there are methods for reducing the feedback resistance and current of rails, increasing the leakage resistance, decreasing the distance between substations. But it are necessary to forecast and analyze the rail potential and amplitude of leakage current.

In this paper, we modeled DC traction systems and feedback circuit to simulate the rail potential and amplitude of leakage current using PSCAD/EMTDC that is power analysis program, forecasted the rail potential and amplitude of leakage current about changing various parameters in the electric circuit. By using the simulation model, we easily will forecast the rail potential and amplitude of leakage current in case of a level of basic design and maintenance in electric railway systems, valuably use basic data in case of system selection.

1. 서 론

직류 전기철도 시스템에서 전동차가 주행할 때 주행레일을 통하여 귀환전류의 일부는 누설전류가 되며, 대지로의 누설전류는 지하에 매설되어 있는 금속체에 전식을 일으키게 되는 요인이 된다. 레일에서의 누설전류를 방지하기 위해서 대부분의 귀환레일은 대지와 절연시키고 있으며, 대지와 레일의 절연은 직류 전기철도 급전시스템을 비접지방식으로 되게 한다. 비접지방식은 레일전위 상승을 동반하게 되며 레일전위 상승은 사람이 대지와 차체와의 접촉이 되었을 경우 감전 사고를 일으킬 수 있다.

레일전위 상승 및 누설전류를 저감시키기 위해서는 레일의 귀선저항을 저감, 누설저항 증대와 변전소 간격 단축, 레일전류의 경감 등의 대책이 있으나 이러한 시스템 도입에 따른 레일전위 및 누설전류의 크기에 대한 예측 및 분석이 필요하다.

따라서 본 논문에서는 전력해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 레일전위 및 누설전류의 크기를 시뮬레이션 할 수 있도록 직류 급전시스템 및 귀환회로를 모델링하고, 다양한 회로 파라미터 변화에 따른 레일전위 및 누설전류의 크기를 예측하였다. 이러한 시뮬레이션 모델을 이용함으로써 전기철도 시스템의 기본설계 단계 및 유지보수시에 레일전위와 누설전류의 크기를 쉽게 예측할 수 있으며 시스템 결정에 기초자료로 활용할 수 있다.

* 서울산업대학교 철도전문대학원 철도전기신호공학과 석사과정, 비회원
E-mail : eleengr@hanmail.net
TEL : (02)948-0088 FAX : (02)949-4613
** 서울산업대학교 철도전문대학원 철도전기신호공학과 교수, 정회원

2. 레일전위 및 누설전류

2.1 레일전위

레일전위의 상승을 방지하기 위해서는 귀환레일을 접지하는 것이 효과적이나 귀환레일을 접지할 경우 대지로의 누설전류가 증가하게 되어 지하에 매설된 금속체의 시설물에 전식을 일으키게 된다. 레일전위의 상승 및 누설전류의 크기는 전동차 급전전압, 레일의 선로저항, 변전소간 간격 및 누설저항 등에 따라 변하고 전동차 부하용량과 부하위치에 따라서도 변하게 된다[1]. 전기철도 귀선에서는 전동차 운행에 의해 전압강하가 발생하며 전압강하가 클수록 부하전류가 커지게 되어 레일전위 값도 증가하게 된다. 전동차와 변전소간 전압강하 V는 식 (1)과 같다.

$$V = \frac{1}{2} i_0 \cdot r \cdot L^2 \, [V] \tag{1}$$

여기서 r : 레일의 저항 $[\Omega/km]$

i_0 : 분포 부하전류 $[A/km]$

L : 변전소간 간격 $[km]$

따라서 전압강하가 레일의 저항과 분포 부하전류, 변전소간 거리의 자승에 비례하므로 전압강하를 줄이기 위해서는 선로의 저항이 작은 레일을 사용하고 부하전류를 감소하며 변전소 간격을 짧게 한다. 따라서 레일전위는 부하전류, 레일의 고유저항에 비례하며 부하점과 변전소간의 거리가 멀어질수록 높아진다.

그리고 일반적으로 비접지 방식에서 레일전위는 전동차 위치에서 정극성(+)의 레일전위가 발생하고 변전소 위치에서는 부극성(-)의 레일전위가 발생한다. 반면에 접지방식은 전동차 위치에서 비접지방식의 2배 정도의 전압이 발생하고 변전소 위치에서는 $0V$의 레일전위가 발생한다.

2.2 누설전류

직류 전기철도에서는 주행레일을 귀선으로 활용하고 있어 주행레일을 별도로 접지시키지 않아도 주행레일이 대지위에 설치되므로 귀선전류의 일부는 대지로 누설된다. 누설전류의 크기는 레일의 전위, 차량 부하전류, 레일의 저항 및 변전소 간격의 자승에 비례하고 누설저항에 반비례 한다[1]. 그리고 레일전위가 정극성(+)인 경우에는 전류가 레일로부터 대지로 유출되고 부극성(-)의 경우에는 대지로부터 레일로 유입된다. 즉 누설전류는 전위 영(0)의 중성점을 기준으로 부하측에서는 레일로부터 대지를 향하여 유출되고 변전소 측에서는 대지로부터 유입된다. 누설전류 I_l 은 식 (2)과 같다.

$$I_l = K \cdot I \cdot \frac{r}{W} \cdot L^2 \tag{2}$$

여기서 K : 비례상수

I : 레일전류 $[A]$

r : 단위길이의 귀선저항 $[\Omega/km]$

W : 레일의 누설저항

L : 변전소 간격 $[km]$

따라서 누설전류를 줄이기 위해서는 변전소간 간격을 줄이고 레일저항이 작은 귀환레일을 사용하며 레일과 노반사이의 절연자재를 사용하여 누설저항을 증가시켜야 한다.

3. 직류 급전시스템 모델링

직류 급전시스템의 레일전위와 누설전류의 크기를 예측하기 위해 PSCAD/EMTDC를 이용하여 모델링을 수행하였다. PSCAD/EMTDC는 전력해석 프로그램으로 일반 전력계통 및 철도 전철전력계통 해석에 널리 활용되고 있으며, 직류 급전시스템 해석을 위해 크게 직류변전소, 급전회로, 부하 및 정·부급전선으로 단순화하여 모델링하였다[2].

그림 1은 교류 22,900[V]를 수전 받아 전동차 공급전압인 직류 1,500[V]로 전압을 변환하는 직류변전소를 모델링한 것으로 교류전원, 변압기 및 정류기로 모델링을 하였으며, 기기 사양은 표 1과 같다. 정류기부극의 접지방식에 따라 크게 비접지방식과 접지방식으로 나눌 수 있으며 본 논문에서는 국내에 적용되고 있는 비접지 방식으로 시뮬레이션을 수행하였다.

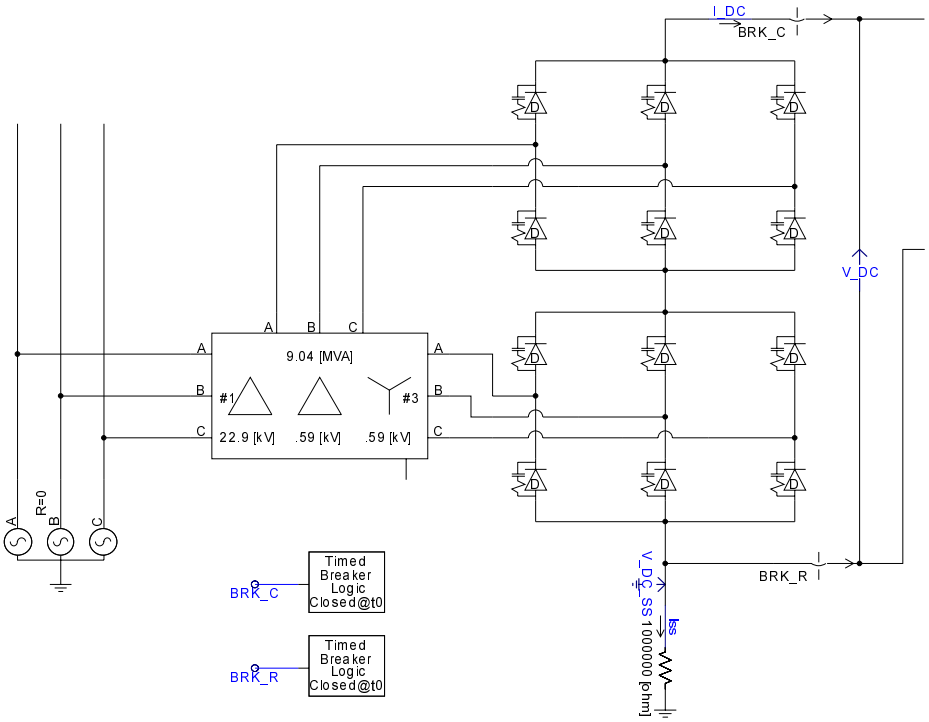

그림 1. 직류변전소 모델링

표 1. 직류변전소 구성요소 사양

모델	항목	사양	비고
수전 전압원	수전전압	22.9 kV	
	단락용량	200 MVA 이상	
변압기	결선	Δ-Δ-Y	
	용량 및 전압	4520 KVA×2, 22.9/0.59 kV	
정류기	펄스	12 pulse diode 정류기	
	출력	DC 1.5 kV	

레일전위 및 누설전류의 예측은 레일을 포함한 귀환회로 모델링에 따라 다양한 방법이 활용되고 있다. 전파방정식을 이용한 수학적인 접근뿐만 아니라 귀환회로를 레일 직렬임피던스와 레일과 대지사이의 병렬 임피던스로 구성한 방법, CDEGS프로그램을 이용한 대지저항 포함한 해석 등이 있다[3,4]. 본 논문에서는 그림 2와 같이 가공 전차선로(R_power), 레일(R_rail), 누설전류 포집망(R_mat) 및 지하 금속매설물(R_pipe)의 직렬 임피던스와 구성요소 상호간의 병렬 임피던스로 구성된 귀환회로로 모델링하였다. 또한 일반적으로 병렬 급전하는 변전소간의 거리를 4[km] 내외이므로 귀환회로의 길이는 차량이 양 변전소 중간지점에 있다고 가정하여 2[km]로 선정하였다. 그리고 귀환회로를 10%(200m) 간격으로 나누워 모델링하였으며 각 구성요소의 사양 및 시뮬레이션에 적용한 값은 표 2에 나타내었다.

그리고 부하 모델은 운전 최저전압인 1,000[V]까지 전압강하가 되게 하는 부하전류가 흐를 수 있도록 저항소자로 모델링하였다. 또한 정류기로부터의 전차선까지의 정급전선과 정류기 부극으로부터 레일까지의 부급전선은 임피던스 모델로 모델링하였다[5].

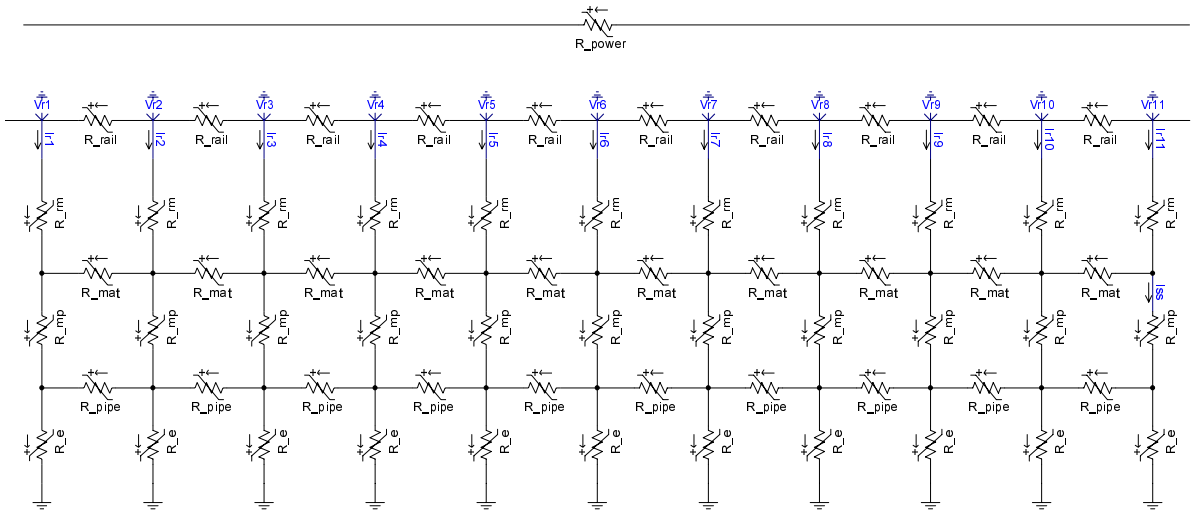

그림 2. 직류 급전회로 모델링

표 2. 직류 급전회로 사양

모델	항목	대표값	비고
R_power	가공 전차선로	0.0203Ω/km	T-bar
R_rail	레일	0.0148Ω/km	60kg 병렬 2본
R_mat	누설전류 포집망	0.5Ω/km	도전율:0.1[Ω㎟/m], 직경:15.9㎜, 2본
R_pipe	지하 금속매설물	1.437mΩ/km	외경:0.61m, 내경:0.512m, 매설깊이:20.1m
-	정급전선	2.31mΩ+j0.01415mH	3.3kV FR-CV 400㎟/1C×4, 200m
-	부급전선	0.615mΩ+0.00423mH	600V FR-CV 500㎟/1C×6×2, 200m

4. 시뮬레이션

4.1 접지방식에 따른 레일전위

접지방식에 따른 레일전위의 크기를 비교하기 위해 비접지 방식과 접지방식에 대해 시뮬레이션을 수행하였다. 비접지 방식에서는 정류기 부극을 1[MΩ]으로 절연하였으며, 접지방식은 접지저항을 1[Ω]로 하였다.

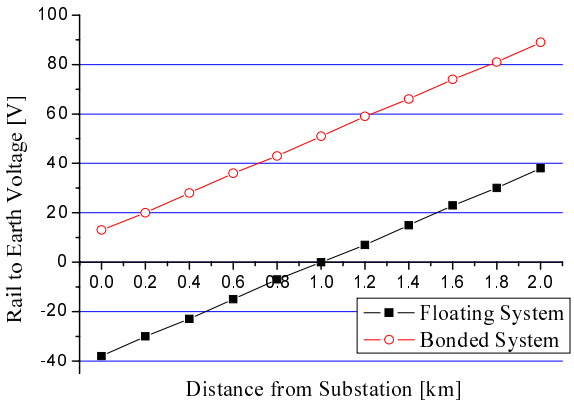

그림 3. 접지방식에 따른 레일전위 크기

그림 3은 접지방식에 따른 레일전위 크기를 나타낸 것으로 비접지 방식에서는 변전소와 차량의 중간지점을 기준으로 차량 방향으로 양, 변전소 방향으로는 음의 레일전위가 발생한다. 이에 반해 접지시스템에서 변전소에는 0V, 그리고 차량위치에서는 최대전압이 발생하며, 동일한 조건에서 최대 레일전위의 크기가 비접지방식에 비해 2배 정도임을 알 수 있다. 다만 시뮬레이션 결과에서 변전소 부근의 레일전위가 0V 아닌 것은 부급전선로 인한 전압강하로 나타난 것이다.

4.2 레일저항 및 레일과 대지간 누설저항 변화에 따른 레일전위 및 누설전류 크기

레일저항과 레일과 대지간의 누설저항 변화에 따른 레일전위와 누설전류의 크기를 예측하기 위해 표 2에 제시한 레일저항의 크기가 대표값의 0.1배에서 10배까지 증가하는 경우에 레일과 대지간 누설저항의 크기를 30, 300, 3000[Ω/km]로 변화시키면서 비교하였다.

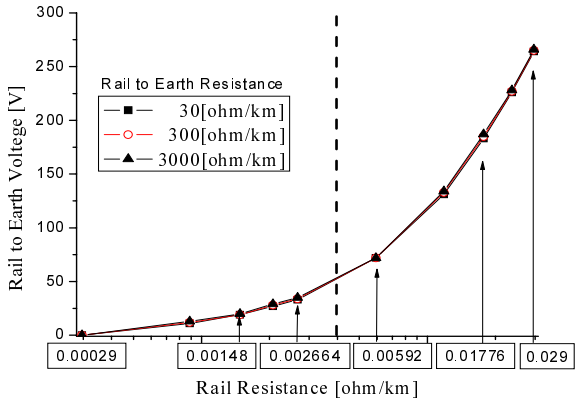

그림 4. 레일저항 변화에 따른 레일전위

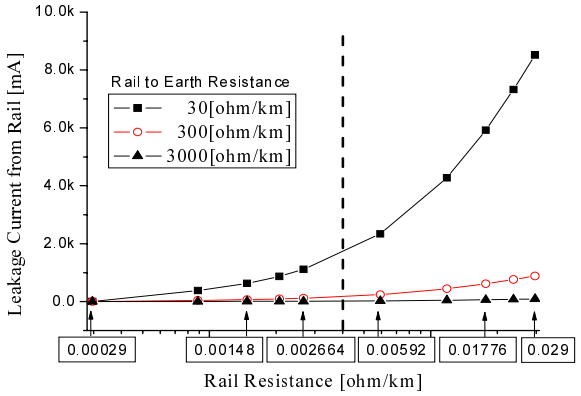

그림 5. 레일저항 변화에 따른 누설전류

그림 4에서와 같이 레일전위 크기는 레일저항의 크기가 커질수록 커지지만 레일과 대지간의 누설저항 변화에 대해서는 거의 영향을 받지 않음을 알 수 있다. 반면에 그림 5에서와 같이 누설전류의 크기는 레일저항이 커질 때와 레일과 대지간의 누설저항이 작아지는 경우에 누설전류가 커짐을 알 수 있다.

4.3 누설전류 포집망 임피던스 변화에 따른 누설전류

레일로부터 누설되는 전류를 포집하기 위해 콘크리트 궤도하부에 도상철근을 이용한 누설전류 포집망을 구성하고 있다. 레일로부터 누설되는 대부분의 누설전류는 포집망을 통해 변전소로 귀환하지만 일부 누설전류는 지하 금속매설물까지 누설되어 지하 금속매설물의 전식에 영향을 미친다. 따라서 누설전류 포집망의 임피던스 변화에 따른 누설전류의 크기를 예측하였다.

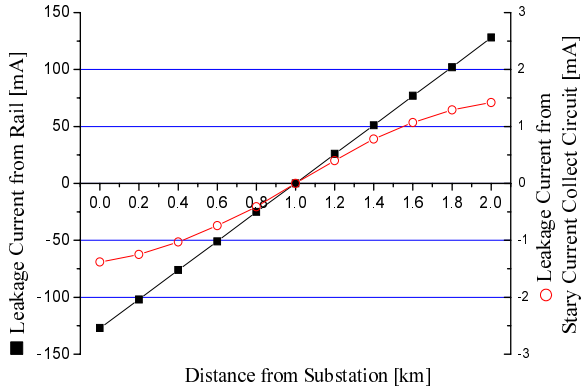

그림 6. 거리에 따른 레일 및 포집망의 누설전류

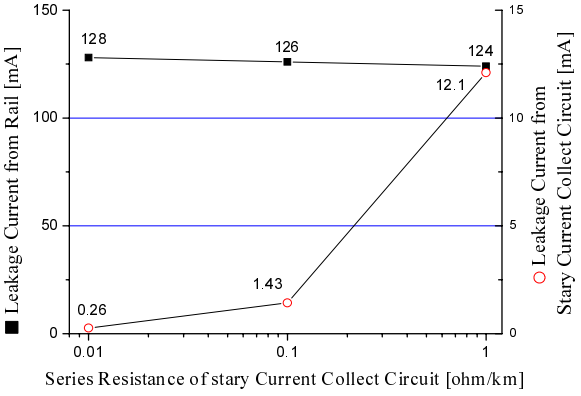

그림 7. 포집망의 저항변화에 따른 누설전류 비교

그림 6은 변전소로부터 거리에 따른 레일로부터 누설전류 포집망으로 누설되는 누설전류와 누설전류 포집망으로부터 지하 금속매설물로 누설되는 누설전류의 크기를 나타낸 것이다. 차량 위치부터 누설되는 누설전류가 변전소 부근에서는 정류기 부극으로 흘러 들어옴을 알 수 있으며, 레일로부터 누설되는 전류의 대략 1/100배의 누설전류가 포집망을 통과하여 지하 금속매설물로 흘러 들어감을 알 수 있다. 그림 7은 포집망의 임피던스가 표 2의 대표값의 0.1배, 10배로 변화하는 경우 최대 누설전류의 크기를 비교한 것이다. 포집망의 임피던스의 변화가 레일의 누설전류의 크기에는 크게 영향을 미치지 않는 데에 반해 포집망의 임피던스가 0.1배가 되는 경우에 대부분의 누설전류가 포집망을 통해 변전소의 부극

으로 귀환하지만 포집망의 임피던스가 10배로 증가하는 경우에는 레일 누설전류의 1/10배의 누설전류가 지하 금속매설물로 흘러 들어가 전식에 영향이 커짐을 예측할 수 있다.

4.4 사고전류에 따른 레일전위 및 누설전류

직류 급전시스템에서 발생하는 단락사고(전차선과 레일 단락)와 지락사고(전차선과 접지 단락) 발생시 레일전위 및 누설전류의 크기를 예측하였다. 고장 발생지점은 전체 급전회로 거리의 50%지점(변전소에서 1km 지점)에 발생하도록 시뮬레이션을 수행하였다.

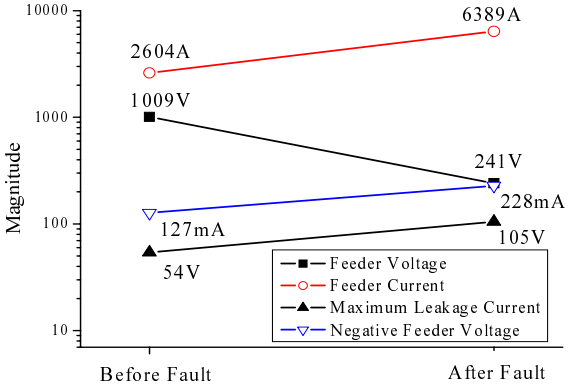

그림 8. 단락사고시 레일전위 및 누설전류

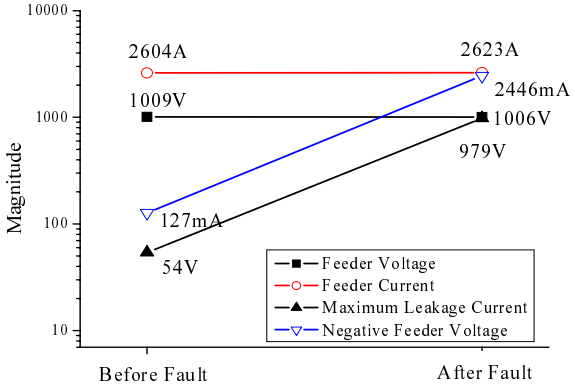

그림 9. 지락사고시 레일전위 및 누설전류

그림 8은 단락사고시 결과를 나타낸 것으로 사고 발생시 사고전류가 매우 커지는 반면 사고발생 전에 비해 사고발생 후의 레일전위나 누설전류의 크기는 크게 증가하지 않았음을 알 수 있다. 그림 9는 지락사고시 결과를 나타낸 것으로 사고전류는 크게 증가하지 않았지만 레일전위는 최대 979[V]까지 상승하였으며 누설전류도 2446[mA]까지 증가되어 인체 및 인근 설비의 큰 영향이 미칠 것으로 예측된다.

5. 결 론

레일전위와 누설전류의 크기를 분석하기 위해 본 논문에서는 전력해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 직류 급전시스템을 모델링하고 다양한 파라미터 변화에 따른 시뮬레이션을 수행하였다. 귀환회로의 접지유무에 따라 레일전위의 크기는 비접지 방식에서 변전소와 차량위치의 중간지점을 기준으로 차량 방향으로는 정극성(+), 변전소 방향으로는 부극성(-)의 레일전위가 발생하였으며, 접지방식에서는 변전소에서는 0V, 차량 위치에서는 비접지 방식에 비해 2배 정도 임을 알 수 있었다.

레일전위의 크기는 레일저항의 크기에 비례하며, 누설전류의 크기는 레일저항의 크기에 비례하고, 레일과 대지간의 누설저항 크기에 반비례함을 확인하였다. 그리고 누설전류 포집망의 임피던스가 커짐에 따라 레일로부터 누설되는 전류가 지하 금속매설물로 비례하여 흘러 들어갔으며, 단락사고 발생시에는 레일전위와 누설전류가 크게 증가하지 않았지만 지락사고 발생 시는 모두 크게 증가되었음이 확인할 수 있었다.

참고문헌

1. 정상기(2006), “비접지 급전시스템에서의 레일전위상승과 누설전류 계산”, 한국철도학회 추계학술대회
2. 한국철도기술연구원(2007), “도시철도 전력시스템 표준화 연구”, 한국철도기술연구원
3. 한문섭(2007), “직류급전시스템의 레일전위와 누설전류 관점에서의 설계 파라미터 연구”, 한국철도학회 춘계학술대회
4. Ian Cotton(2005), "Stray Current Control in DC Mass Transit Systems", IEEE Transactions on Vehicular Technology
5. 서울특별시지하철공사(2005) “지하철 1~4호선 전력설비 정밀안전진단 보고서”, 서울특별시지하철공사