

# 직류급전시스템의 레일전위와 누설전류 관점에서의 설계 파라미터 연구

## Considering design parameters in terms of rail potential and leakage current in DC feeding system

한문섭\*  
Han, Moonseob

정호성\*\*  
Jung, Ho-Sung

---

### ABSTRACT

DC feeding system is mainly floating but the rail potential and the leakage current are created because of long parallelism between rails and ground. Rail potential causes electric shock to human and leakage current causes electrolytic corrosion to nearby the buried metals. Therefore the design technologies to reduce, protect and monitor these effects are important recent DC feeding system.

Normally during designing DC feeding system in terms of rail potential and leakage current, there are about 10 parameters. Four design parameters among those is analysed based on propagation theory that is utilized in order to simulate grounding system.

---

### 1. 서 론

직류급전시스템의 접지방식은 접지와 비접지방식으로 크게 구분된다. 최초에는 비접지방식을 주로 사용하였지만 대지 전압과 누설전류로 인한 문제로 인해 접지방식을 주로 사용하고 있다. 최근에는 변전소와 접지사이에 다이오드를 삽입한 다이오드방식과 Back to Back 사이리스터를 삽입한 RPCD(Rail Protection Control Device)방식 등이 속속 채용되고 있다. 우리나라에서는 주로 비접지방식이 주종을 이루고 있는데 최근 경전철건설에 따라 새로운 RPCD방식 등의 채용이 이루어지고 있다.

직류급전시스템에서 전동차 부하가 전차선로와 레일을 따라 이동하게 되어 레일이 귀선회로를 구성하게 된다. 비접지방식의 경우 두 레일은 대지와는 절연이 되어 있지만 상당히 길게 대지와 평행을 이루어 설치되기 때문에 레일전위와 누설전류가 발생하게 된다. 대개 레일전위는 인체에 전기적인 쇼크를 주고 누설전류는 레일근방의 매설된 도체 등에 전식을 일으키는 원인이 되어 설계시 중요한 요소가 된다. 최근 들어 이러한 문제를 줄이기 위한 설계, 차폐 및 모니터링을 위한 방법이 제안되고 있다.[4]

접지방식의 레일전위와 누설전류를 해석하기 위해 대지를 송전라인으로 가정하여 전파방정식을 사용하였다. 주로 접지 설계시 10가지의 파라미터를 고려할 수 있으나 본 연구에서는 주된 4개의 파라미터를 이용하여 레일전위와 누설전류의 변화를 살펴보았다.

---

\* 한국철도기술연구원, 전력연구팀, 회원

E-mail : mshan@krri.re.kr

TEL : (031)460-5420 FAX : (031)460-5459

\*\* 한국철도기술연구원, 전력연구팀, 회원

E-mail : hsjung@krri.re.kr

TEL : (031)460-5139 FAX : (031)460-5459

## 2. 본 문

### 2.1 직류급전시스템의 접지방식

직류급전시스템의 접지방식을 크게 접지와 비접지방식으로 구분된다.

그림1은 비접지방식에 대한 레일전위를 나타내고 있으며 전동차 위치에서  $+V$ 와 변전소 위치에서  $-V$ 의 레일전위가 발생한다. 즉 전동차에서부터 누설전류가 레일에서 대지로 흐르고 중간점을 지나면 대지에서부터 레일로 누설전류가 흘러 레일전위 부호가 반대가 됨을 알 수 있다. 비접지방식은 현 직류급전시스템에서 가장 많이 사용되는 시스템이다.

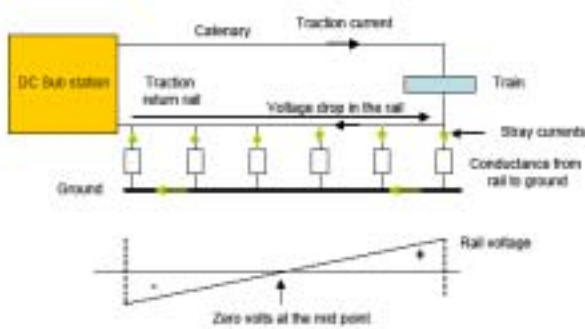


그림1. 비접지방식의 레일전위

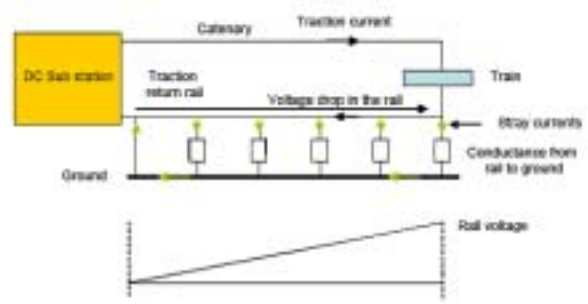


그림2. 접지방식의 레일전위

그림2는 접지방식에 대한 레일전위를 나타내고 있으며 전동차 위치에서  $2V$ 와 변전소 위치에서  $0$ 의 레일전위가 발생한다. 즉 변전소에 레일이 접지가 되어 있어 전동차 위치에서부터 변전소 위치까지 레일로부터 대지로 누설전류가 흐름을 알 수 있다. 접지방식은 최초 직류급전시스템에서 채용되었던 시스템이다.

최근에는 레일전위 및 누설전류를 줄이기 위해 변전소 위치에서 레일과 접지 간에 다이오드 또는 Back to Back 사이리스터 등을 설치한 시스템이 적용되고 있다. 한편 급전전압  $630VDC$ 를 사용하는 영국의 런던지하철(LUL ; London Underground Limited)에서는 레일전위 및 누설전류를 줄이기 위한 고유의 방식으로 그림3과 같이 Fourth Rail방식을 채택하고 있으며 일반적으로 귀선로로 사용하는 2개의 레일은 전동차 운행용으로만 사용하고 4번째 레일을 부가적으로 설치하여 귀선( $-210VDC$ )으로 사용하고 있다.



그림3. 영국 런던지하철 Fourth Rail

### 2.2 레일전위와 누설전류 산출을 위한 회로해석

레일간이 규칙적으로 분당 되어 있다면 단일 귀선 도체도 고려될 수 있으며 레일저항과 레일과 대지간 콘덕턴스가 일정하다면 간단한 모델화가 가능하다.

그림4와 같이 길이가  $l$ 인 선로에서 우측단에 병렬 저항  $R_s$ 를 갖는 전류원  $I_s$ 가 인가되고(Shunt Energization) 레일저항  $R$ 과 레일과 대지간 콘덕턴스  $G$ 가 일정한 값을 갖는 분포회로라 고려하면 레

일에 흐르는 전류와 전압은 다음 식과 같다.[1]

$$i(x) = C_1 e^{\gamma x} + C_2 e^{-\gamma x} \quad (1)$$

$$u(x) = -R_0 (C_1 e^{\gamma x} - C_2 e^{-\gamma x}) \quad (2)$$

$$\text{단, } \gamma = \sqrt{RG}$$

$$R_0 = \sqrt{\frac{R}{G}}$$

- $u(x)$ : 레일전위 (V)
- $i(x)$ : 레일전류 (A)
- $R$ : 레일저항 ( $\frac{\Omega}{Km}$ )
- $G$ : 레일과대지간누설컨덕턴스 ( $\frac{S}{Km}$ )
- $\gamma$ : 전파정수 ( $\frac{1}{m}$ )
- $R_0$ : 선로의특성저항 ( $\Omega$ )
- $C_1, C_2$ : 상수

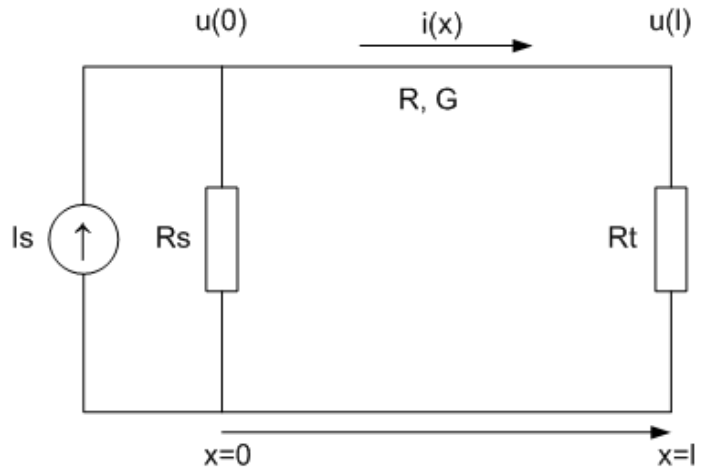


그림4. Shunt Energization의 선로

여기서 임의의 위치  $x$ 에서의 누설전류  $I_L$ 는 다음식과 같다.

$$I_L(x) = I_L(x-) + i(x) - i(x-) \quad (3)$$

위 식을 풀기 위해서는  $C_1$ 과  $C_2$ 의 상수를 구하여야 한다.

그림5와 같이 거리가 1인 2개의 변전소 사이를 1대의 전동차가 운행할 때를 고려하여 전동차와 양측 변전소에서 흐르는 전류를 알 경우, P1과 P2, P2와 P3영역의 레일 전류와 전위는 다음 식과 같다.[2]

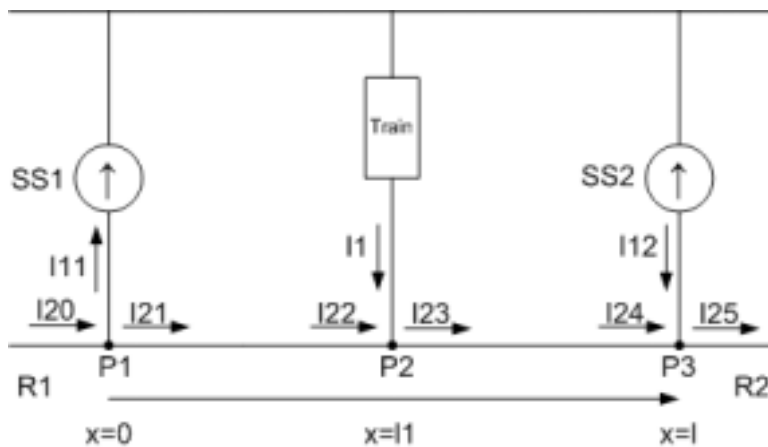


그림5. 회로해석 모델

P1과 P2영역에서,

$$i(x) = C_1 e^{\gamma x} + C_2 e^{-\gamma x} \quad (4)$$

$$u(x) = -R_0 (C_1 e^{\gamma x} - C_2 e^{-\gamma x}) \quad (5)$$

P2와 P3영역에서,

$$i(x) = C_3 e^{\gamma x} + C_4 e^{-\gamma x} \quad (6)$$

$$u(x) = -R_0(C_3 e^{\gamma x} - C_4 e^{-\gamma x}) \quad (7)$$

C1, C2, C3와 C4의 모르는 상수를 구하기 위해 각 P1, P2와 P3 노드에서의 전류와 P2 노드에서의 전압을 Kirchhoff 법칙으로 정리하면 다음 식과 같다. R1과 R2는 각각 P1과 P2 노드에서 바깥으로 본 저항을 의미한다.

$$(1 - k_1)C_1 + (1 + k_1)C_2 = -I_{11} \quad (8)$$

$$e^{\gamma l_1} C_1 - e^{-\gamma l_1} C_3 = -\frac{I_1}{2} \quad (9)$$

$$e^{-\gamma l_1} C_2 - e^{-\gamma l_1} C_4 = -\frac{I_1}{2} \quad (10)$$

$$(1 + k_2)C_3 e^{\gamma l} + (1 - k_2)C_4 e^{-\gamma l} = -I_{12} \quad (11)$$

$$\text{단, } k_1 = \frac{R_0}{R_1}$$

$$k_2 = \frac{R_0}{R_2}$$

### 2.3 파라미터 분석[3]

그림5와 같이 두 변전소간을 1대의 전동차가 운행하는 조건으로 파라미터 분석을 수행하였다. 레일전위와 누설전류에 대한 설계 파라미터는 대략적으로 9가지로 나눌 수 있으며 그중 레일저항, 레일과 대지간 콘덕턴스, 귀선전류 및 변전소간 거리의 변화에 대해 2.2항의 방법을 이용하여 해석적으로 결과를 도출하였다. 그 외의 파라미터로는 회생제동이 고려하여야 할 것으로 판단된다.

그림6과 7은 각각 비접지방식과 접지방식에서의 레일전위와 누설전류의 거리에 따른 변화를 보여주고 있다.

본 연구에서는 비접지방식에서의 파라미터 분석을 수행한다.

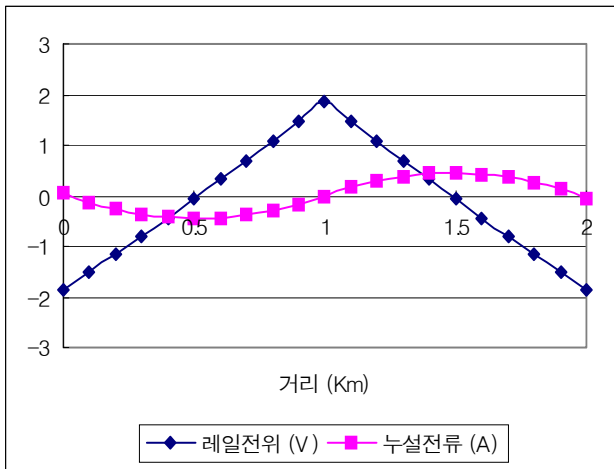


그림6. 비접지방식의 경우의 레일전위와 누설전류

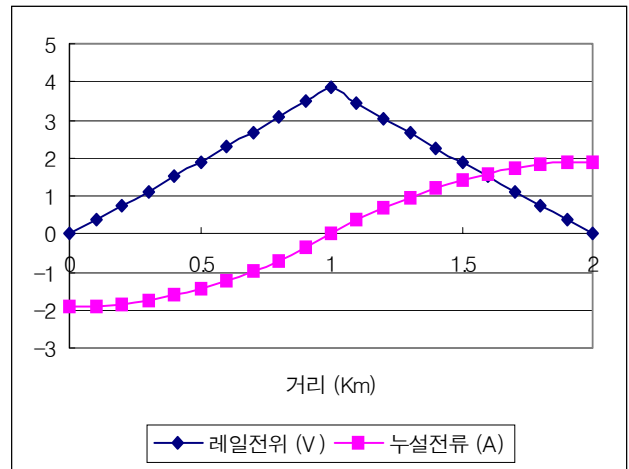


그림7. 접지방식의 경우의 레일전위와 누설전류

#### (1) 레일저항과 레일과 대지간 콘덕턴스

그림8과 9는 레일과 대지간 콘덕턴스가 0.1, 1 및 10 S/Km 일때의 레일저항변화에 따른 레일 전위와 누설전류의 변화를 보여주고 있다.

레일저항이 증가함에 따라 레일전위가 커지고 누설전류가 작아짐을 알 수 있다. 그리고 레일과 대지간 콘덕턴스가 0.1에서 10배씩 증가할 때 레일전위는 감소하고 누설전류는 증가함을 볼 수 있다. 이는 당연한 결과라 할 수 있지만 콘덕턴스의 변화를 볼 때 0.1에서 1로의 변화와 1에서 10으로의 변화추이를 보면 1에서 10으로 변화량이 많음을 알 수 있으며 콘덕턴스 증가에 따라 레일전위가 감소하고 누설전류는 증가함을 알 수 있다.

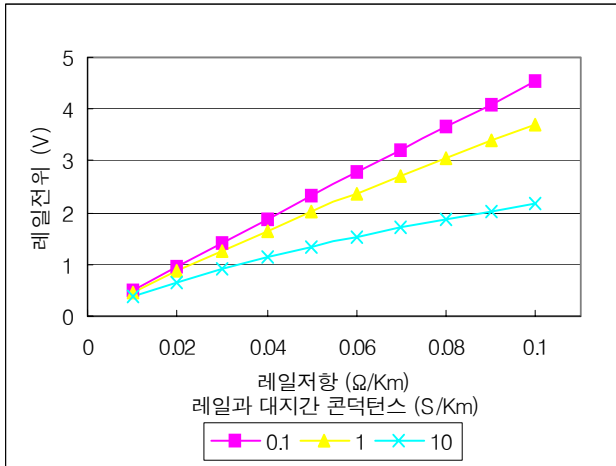


그림8. 레일저항에 따른 레일전위분포 (일정 레일과 대지간 콘덕턴스)

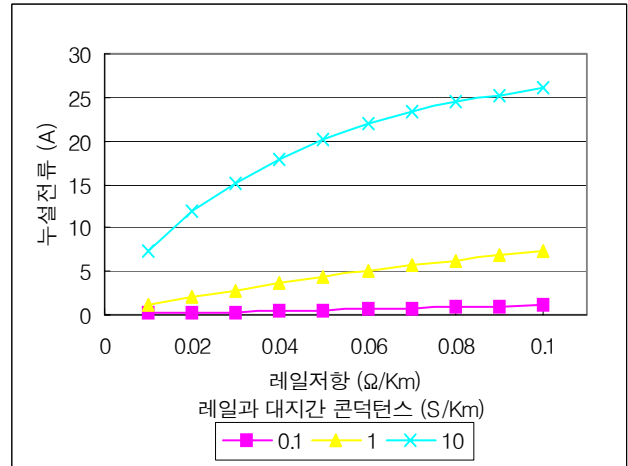


그림9. 레일저항에 따른 누설전류변화 (일정 레일과 대지간 콘덕턴스)

## (2) 귀선전류와 변전소간 거리

그림10과 11은 귀선전류와 변전소간의 거리를 변화하면서 레일전위와 누설전류의 변화를 보여 주고 있으며 두 파라미터는 거의 비례적인 관계를 갖는 것을 알 수 있다.

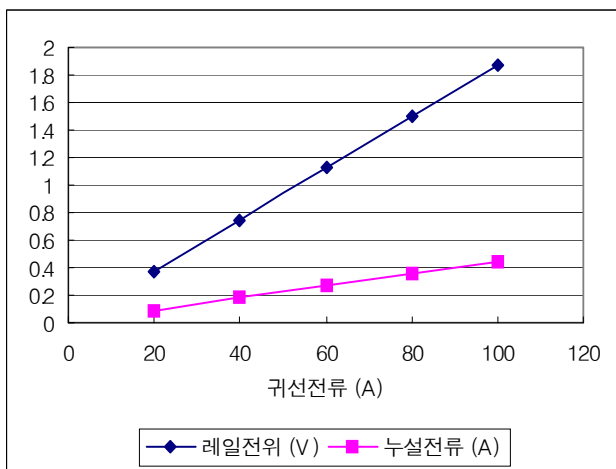


그림10. 귀선전류에 따른 파라미터 변화

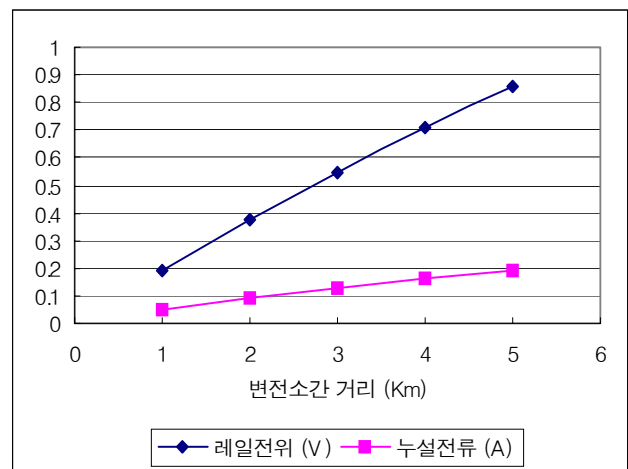


그림11. 변전소간 거리에 따른 파라미터 변화

## 3. 결 론

본 연구에서는 직류전기철도에서 인체의 전기적인 쇼크와 인근 매설 도체에 전식을 일으키게 하는 원인인 레일전위와 누설전류에 대한 규명을 위해 해석적인 방법에 의해 설계 파라미터 분석을 실시하였다.

레일전위와 누설전류를 구하기 위해 Shunt Energization 모델을 기본으로 전과방정식을 이용하여 레일전위와 누설전류 산출하였다.

사례연구를 위해 두 변전소간을 1대의 전동차가 운행할 경우를 고려하여 수행하였으며 결과는 다음과 같다.

1. 레일저항의 크기와 레일전위/누설전류는 비례적인 관계를 갖는다.
2. 레일과 대지간의 콘덕턴스의 증가에 따라 레일전위는 감소하고 누설전류가 증가하므로 콘덕턴스 선정 및 변화에 세심한 주의가 필요하다.
3. 귀선전류의 크기와 변전소간의 거리에 따라 레일전위와 누설전류는 거의 비례적인 관계를 갖는 것을 알 수 있었다.

전과방정식에 의한 해석기법은 거리에 따른 오차가 존재하면 향후 본 해석기법을 발전시켜 실제 시험을 통하여 신뢰성을 향상시켜 실제 적용이 가능한 프로그램화를 실현할 계획이다.

#### 참고문헌

1. J. G. Yu and C. J. Goodman, "Modeling of rail potential rise and leakage current in DC rail transit systems," in Inst. Elect. Eng. Colloq. Stray Current Effects of DC Railways and Tramways, London, U.K., Oct. 1990, pp. 221-226.
2. Chien-Hsing Lee and Chien-Jung Lu, "Assessment of Grounding Schemes on Rail Potential and Stray Currents in a DC Transit System", IEEE Transactions on power delivery, Vol. 21, No. 4, October 2006 pp. 1941-1947
3. Stray current corrosion management strategies for dc traction system, P.J.aylott, IEE Seminar
4. Stray Current Control-an application of Ohm's law, Keith Griffiths, EMC in Railways, 28 September 2006