

직류철도의 레일누설전류 및 전위평가

Evaluation of Rail Leakage Current and Potential in DC Railway

한문섭[†] · 정호성* · 김주락* · 길경석**

Moonseob Han · Ho-Sung Jung · Ju-Rak Kim · Gyung-Suk Kil

Abstract DC feeding system is mainly floating but rail potential and leakage current are due to long parallelism between rails and ground, namely rail resistance and rail to ground conductance. Rail potential causes electric shock to human and rail leakage current causes electrolytic corrosion to nearby the buried metals. Therefore the design technologies to reduce, protect and monitor these effects are important in recent DC feeding system. Rail potential and leakage current are analysed based on propagation theory that is utilized. Monitoring and controlling rail leakage current is proposed in order to maintain rail resistance and rail to ground conductance.

Keywords : DC Railway, Rail Leakage Current, Rail Potential

요 지 직류급전시스템은 주로 비접지방식을 사용하지만 레일과 대지간이 긴 거리를 평행하게 구성되어 레일저항과 레일-대지간 콘덕턴스가 존재하여 레일전위와 누설전류가 발생한다. 레일전위는 인체에 전기적 쇼크를 주고 누설전류는 인근 매설 철구조물에 전해적 부식을 주게 된다. 그러므로 이러한 영향을 줄이고, 방지와 감시하는 설계기술이 현 직류급전시스템에서는 중요한 요소이다. 레일전위와 누설전류의 해석은 전파이론에 의해 이루어졌으며 레일저항과 레일-대지간 콘덕턴스의 상태를 유지하기 위해 레일누설전류를 감시/제어하는 방안이 제안되었다.

주요어 : 직류철도, 누설전류, 레일전위

1. 서론

직류급전시스템에서는 전동차 부하가 전차선로와 레일을 따라 이동하게 되어 레일이 귀선회로로 구성된다. 현재 국내에서 사용되는 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[1].

레일전위와 누설전류를 결정하는 중요한 요소로는 레일

저항과 레일-대지간 콘덕턴스이지만 레일저항은 쉽게 측정이 가능하나 콘덕턴스는 정확한 측정이 곤란하다. 레일전위와 누설전류는 쉽게 측정이 되어 이 두 파라미터를 모니터링하면서 제한을 할 경우 레일저항과 레일-대지간 콘덕턴스를 제한할 수 있을 것이다.

본 논문에서는 접지방식에 따른 레일전위와 누설전류를 해석하기 위해 대지를 송전라인으로 가정하여 전파방정식을 사용하였다. 일반적으로 접지 설계시 10가지의 파라미터를 고려할 수 있으나 주요 4개의 파라미터를 이용하여 레일전위와 누설전류의 변화를 살펴보았다. 그리고 레일전위 또는 누설전류를 제한하기 위하여 적절한 관리기법을 제시하였다.

2. 해석 및 파라미터 분석

2.1 직류급전시스템의 접지방식

직류급전시스템의 접지방식은 크게 접지와 비접지방식으로 구분된다.

[†] 책임저자 : 정희원, 한국철도기술연구원, 집전전력연구실, 책임연구원
E-mail : mshan@krii.re.kr

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

* 정희원, 한국철도기술연구원, 집전전력연구실, 선임연구원

** 정희원, 한국해양대학교, 전기전자공학부, 교수

Fig. 1은 비접지방식에 대한 레일전위를 나타내고 있으며 전동차 위치에서 +V와 변전소 위치에서 -V의 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.

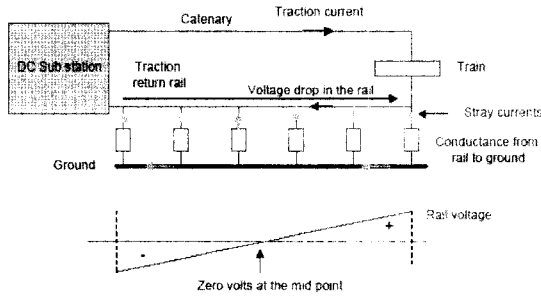


Fig. 1. Floating System

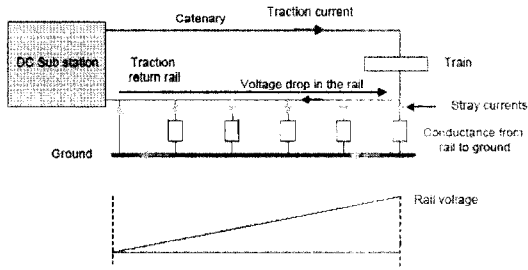


Fig. 2. Non-floating System

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



Fig. 3. Fourth Rail

최근에는 레일전위 및 누설전류를 줄이기 위해 변전소 위치에서 레일과 접지 간에 다이오드 또는 Back to Back 사이리스터 등을 설치한 시스템이 적용되고 있다. 한편 급전전압 630VDC를 사용하는 영국의 런던지하철(LUL; London Underground Limited)에서는 레일전위 및 누설전류를 줄이기 위한 고유의 방식으로 Fig. 3과 같이 Fourth Rail방식을 채택하고 있으며, 일반적으로 귀선로로 사용하는 2개의 레일은 전동차 운행용으로만 사용하고 4번째 레일을 부가적으로 설치하여 귀선(-210VDC)으로 사용하고 있다.

2.2 레일전위와 누설전류 산출을 위한 회로해석

레일전위와 누설전류 해석을 위해 레일이 규칙적으로 분당 되어 있다면 단일 귀선 도체로 고려될 수 있으며 레일저항과 레일과 대지간 콘택턴스가 일정하다면 간단한 모델화가 가능하다.

Fig. 4와 같이 길이가 l 인 선로에서 좌측단에 병렬 저항 R_s 를 갖는 전류원 I_s 가 인가되고(Shunt Energization) 레일저항 R 과 레일과 대지간 콘택턴스 G 가 일정한 값을 갖는 분포회로라 고려하면 레일에 흐르는 전류와 전압은 다음 식과 같다[2].

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

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

$$\text{단, } \gamma = \sqrt{RG}$$

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

$u(x)$: 레일전위(V)

$i(x)$: 레일전류(A)

R : 레일저항($\frac{\Omega}{km}$)

G : 레일과 대지간 누설콘택턴스($\frac{S}{km}$)

γ : 전파정수($\frac{1}{km}$)

R_0 : 선로의특성저항(Ω)

C_1, C_2 : 상수

여기서 임의의 위치 x 에서의 누설전류 I_L 는 다음 식과 같다.

$$I_L(x) = I_L(x-) + i(x) - i(x-) \tag{3}$$

위 식을 풀기 위해서는 C_1 과 C_2 의 상수를 구하여야 한다.

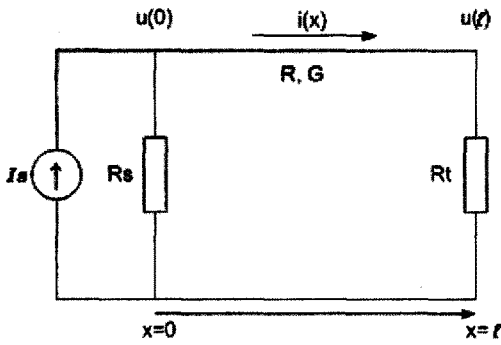


Fig. 4. Shunt Energization

Fig. 5와 같이 거리가 l 인 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[3].

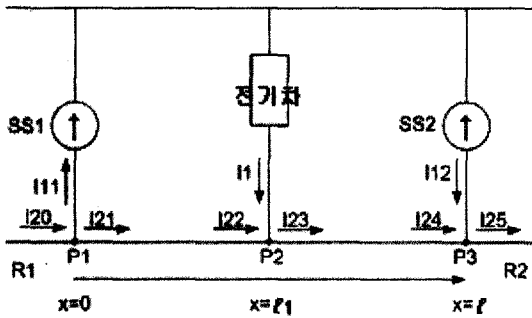


Fig. 5. Analysis Model

Fig. 5의 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,

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

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

C_1, C_2, C_3 와 C_4 의 모르는 상수를 구하기 위해 각 P1, P2와 P3 노드에서의 전류와 P2 노드에서의 전압을 Kirchhoff 법칙으로 정리하면 다음 식과 같다. R_1 과 R_2 는 각각 P1과 P3노드에서 본 저항을 의미한다.

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

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

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

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

$$\text{단, } k_1 = \frac{R_0}{R_1}$$

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

2.3 파라미터 분석[4,5]

Fig. 5와 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 결과를 도출하였다. 그 외의 파라미터로는 회생제동이 고려되어야 할 것으로 판단된다.

Fig. 6과 7은 각각 비접지방식과 접지방식에서의 레일전위와 누설전류의 거리에 따른 변화를 보여주고 있으며 파라미터 분석은 비접지방식만을 수행하였다(조건: 부하 100A, 레일저항 $0.04\Omega/\text{km}$, 레일-대지간 콘덕턴스 $0.1\text{S}/\text{km}$).

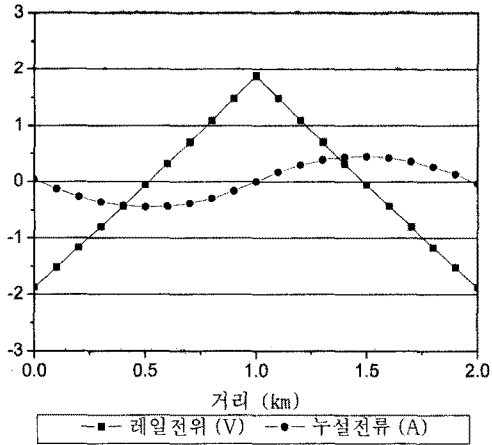


Fig. 6. Rail Leakage Current and Potential in Floating

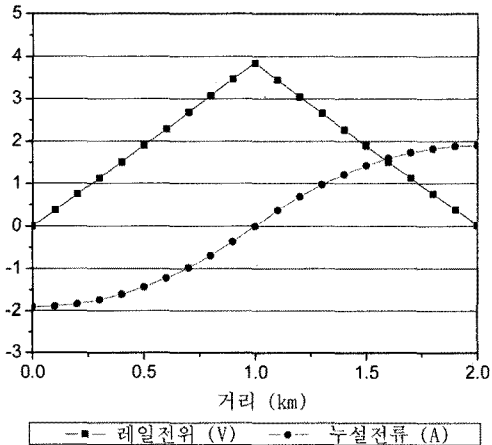


Fig. 7. Rail Leakage Current and Potential in Non-floating

2.3.1 레일저항과 레일과 대지간 콘덕턴스

Fig. 8과 9는 레일과 대지간 콘덕턴스가 0.1, 1 및 10 S/km 일때의 레일저항변화에 따른 레일전위와 누설전류의 변화를 보여주고 있다.

레일저항이 증가함에 따라 레일전위와 누설전류가 증가함을 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 0.1에서 1로의 변화와 1에서 10으로의 변화 추이를 보면 1에서 10으로 변화량이 많음을 알 수 있으며 콘덕턴스 증가에 따라 레일전위가 감소하고 누설전류는 증가함을 알 수 있다.

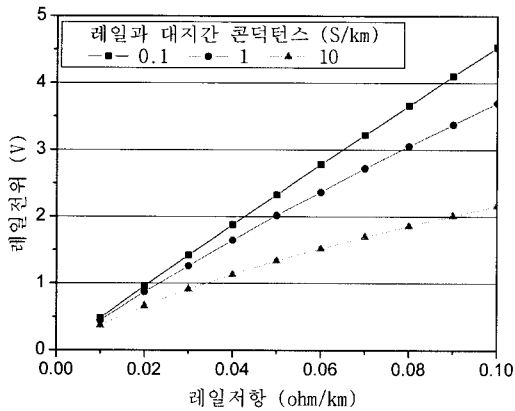


Fig. 8. Rail Potential vs. Rail Resistance (Constant Rail to Ground Conductance)

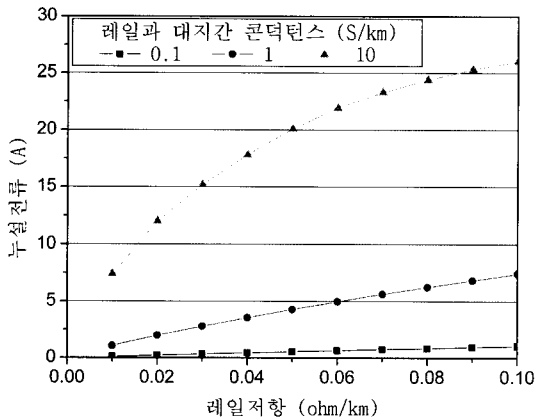


Fig. 9. Rail Leakage Current vs. Rail Resistance (Constant Rail to Ground Conductance)

2.3.2 귀선전류와 변전소간 거리

Fig. 10과 11은 귀선전류와 변전소간의 거리를 변화하면서 레일전위와 누설전류의 변화를 보여주고 있으며 두 파라미터는 거의 비례적인 관계를 갖는 것을 알 수 있다.

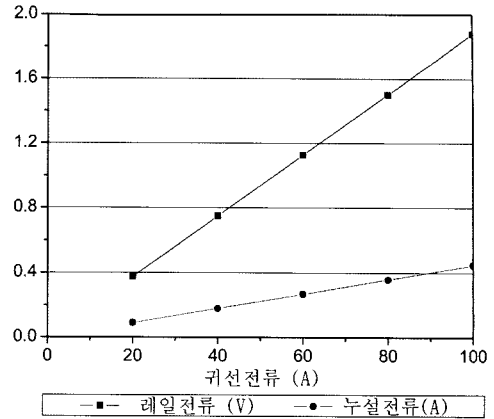


Fig. 10. Rail Leakage Current and Potential vs. Return Current

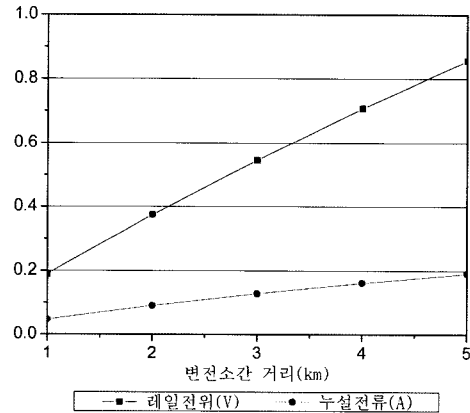


Fig. 11. Rail Leakage Current and Potential vs. Distance between Substations

3. 레일전위 및 누설전류 관리방안

3.1 레일전위 제한을 위한 관리방안[6]

변전소간의 거리를 변화하면서 레일전위와 레일-대지간 콘덕턴스간의 관계를 검토한다. 실제로 건설후 유지보수체계는 상당히 중요하다. 특히 레일-대지간 콘덕턴스는 중요 인자로 0.1에서 2.5S/km 범위를 갖는다.

레일전위는 레일저항과 레일-대지간 콘덕턴스에 따라 변한다. 측정에 의해 레일저항을 구하는 것은 쉽고 변화가 그리 크지 않으나, 레일-대지간 콘덕턴스는 측정으로 구하기는 쉽지 않으며 온도, 습도 등의 환경변수에 따라 변화된다.

Fig. 12는 변전소간의 거리를 2, 5, 10 및 20km로 변화시킬 때, 레일전위와 레일-대지간 콘덕턴스간의 관계를 나타내고 있다. 콘덕턴스는 건설 초기에는 1S/km 이하지만 운영시간이 흐름에 따라 증가될 것이다.

결과적으로 설계 및 유지보수시에는 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

- (1) 변전소간의 거리가 2km인 경우 레일-대지간 콘덕턴

스의 변화에 따른 레일전위의 변화는 미소하다. 설계시 레일전위는 변전소간의 거리에 따라 좌우된다.

(2) 레일-대지간 콘덕턴스가 감소함에 따라 레일전위는 증가한다. 유지보수시 레일전위의 변화는 레일-대지간 콘덕턴스와는 관계가 없다.

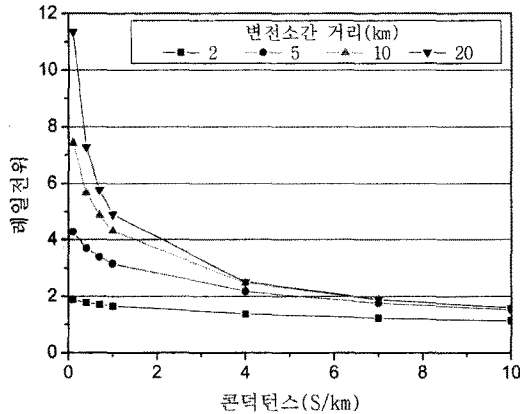


Fig. 12. Rail Potential vs. Rail to Ground Conductance and Distance between Substations

3.2 레일누설전류 제한을 위한 관리방안[7]

3.1에서는 변전소간 거리가 2km일 때 레일전위는 레일-대지간 콘덕턴스에 따라 크게 변화가 없는 것으로 나타났으며 레일저항에 비례하여 증가한다. 그러므로 레일전위는 레일저항과 밀접한 관계가 있어 관리가 필요하다. 하지만 레일저항의 경우 시간이나 환경에 따라 크게 변하지 않으므로 주기가 짧은 레일저항의 측정은 필요가 없다.

레일누설전류의 경우를 검토하기 위해 레일-대지간 콘덕턴스를 0.1에서 1.1S/km까지, 레일저항을 0.04에서 0.14Ω/km까지 증가시키면서 누설전류의 변화는 Fig. 13과 같다.

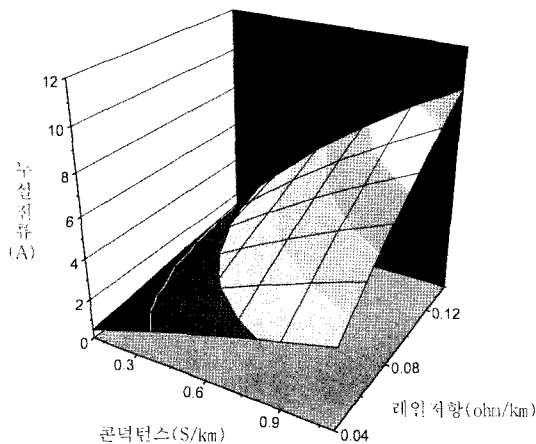


Fig. 13. Rail Leakage Current vs. Rail Resistance and Distance between Substations

Fig. 13에서 레일-대지간 콘덕턴스 변화에 따른 누설전

류의 변화를 보면 Fig. 14와 같다. 누설전류는 레일-대지간 콘덕턴스가 0.1S/km 초기치 만을 보면 레일저항의 변화에 따라 거의 비례관계를 갖고 있음을 알 수 있으며 또한 레일-대지간 콘덕턴스의 증가량도 비례관계를 갖고 있다.

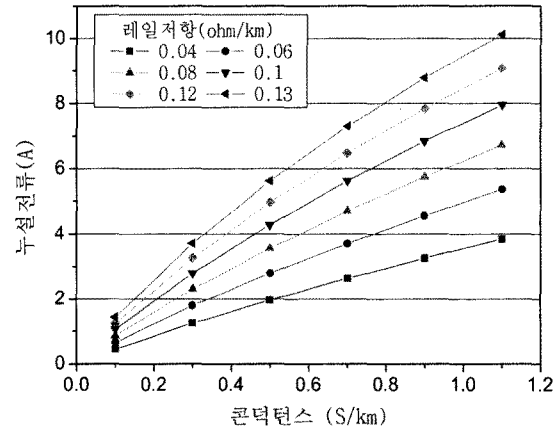


Fig. 14. Rail Leakage Current vs. Rail Resistance and Rail to Ground Conductance

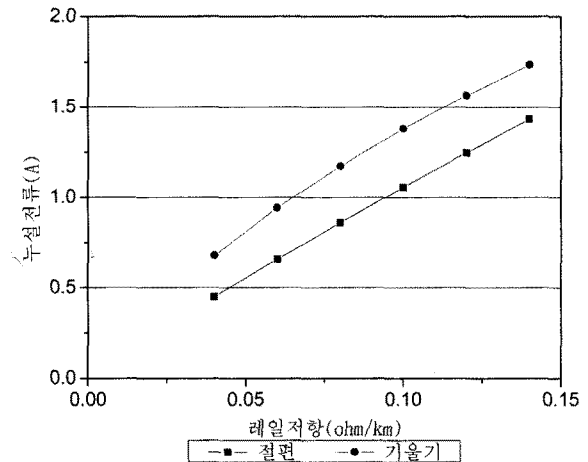


Fig. 15. relation between leakage current and rail resistance

이는 레일저항이 정해지면 식 (12)와 같이 되어 결과적으로 레일-대지간 콘덕턴스변화에 대한 누설전류를 찾아낼 수 있다. 반대로 누설전류와 레일저항이 정해지면 레일-대지간 콘덕턴스를 제한 할 수 있으며 그 결과는 Fig. 15와 같다.

$$I_L = f(R, G) = g(R) + G * h(R) \quad (12)$$

4. 결론

본 연구에서는 비접지 직류급전시스템에서 문제시 되는 레일누설전류와 전위를 제한하기 위한 방안을 마련하였다. 두 파라미터 해석을 위해 전파방정식을 사용하였으며 양

변전소 중간에 차량이 있을 경우의 일반 모델을 사용하여 그 특성을 분석하였다.

결과적으로 변전소간의 거리가 2km일 경우, 레일전위는 레일의 저항이 크게 변화하지 않으므로 레일-대지간 콘덕턴스에 따라 큰 변화가 없어 레일전위를 제한하여 대지를 관리 하기는 어렵다.

결론적으로 레일누설전류는 레일저항의 변화에 따라 거의 비례관계를 갖고 있음을 알 수 있으며, 레일-대지간 콘덕턴스의 증가량도 비례관계를 갖고 있어 레일누설전류를 제한 한다면 레일저항을 알 경우 레일-대지간 콘덕턴스를 측정하지 않아도 예측이 가능하다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 도시철도표준화2단계연구개발 사업의 연구비지원(07도시철도표준화A01)에 의해 수행되었습니다.

참고 문헌

1. Keith Griffiths(2006), Stray Current Control-an application of Ohm's law, EMC in Railways, 28 September
2. J. G. Yu and C. J. Goodman(1990), Modeling of rail potential rise and leakage current in DC rail transit systems, Inst. Elect. Eng. Colloq. Stray Current Effects of DC Railways and Tramways, London, U.K., October
3. Chien-Hsing Lee and Chien-Jung Lu(2006), 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
4. P.J.aylott, Stray current corrosion management strategies for DC traction system, IEE Seminar
5. 한문섭(2007), 직류급전시스템의 레일전위와 누설전류 관점에서의 설계 파라미터 연구, 한국철도학회 춘계학술대회
6. 한문섭(2008), 직류급전시스템에서의 누설전류 고찰, 대한전기학회 전력기술부문회 전력계통연구회 춘계학술대회
7. Moonseob Han(2008), Investigation of rail potential on the rails in DC Railway, ICEE

접수일(2008년 8월 26일), 수정일(2009년 1월 9일),
게재확정일(2009년 2월 3일)