

비접지 급전시스템에서의 레일전위상승과 누설전류 계산

Calculation methods for the rail potential rise and the stray current in the ungrounded DC traction system

정 상 기¹⁾ 박 현 준²⁾ 권 삼 영³⁾ 배 창 한⁴⁾
Chung, Sanggi Park, Hyun Joon Kwon, Sam Young Bai Chang Han

ABSTRACT

DC traction power system is operated ungrounded to minimize the stray current. This causes rail potential increase and makes hazardous condition to the person in touch with running rails. To prevent the hazardous condition, maximum allowable limits on rail potential rise are set by regulations in advanced foreign countries. In this paper, the simplified calculation methods for the rail potential rise and the stray currents are discussed.

1. 서론

DC 전기철도 급전시스템에서 부극(negative) 레일의 설치방법은 기기나 인명의 안전에 치명적인 영향을 미칠 수 있다. 전기철도 차량이 비도체인 고무차륜이 아닌 철제차륜이 장착되어 있을 경우는 더욱 그러하다. 철제차륜 시스템에 있어서는 주행레일을 DC 급전시스템의 귀환회로로 이용하는 것이 가장 경제적이다. 주행레일에 귀환전류가 흐를 때 레일의 전위가 상승하는 데 레일전위 상승은 레일에 접촉하고 있는 사람의 안전에 위협이 될 수 있다. 이 레일 전위의 상승을 방지하기 위해서는 귀환레일을 접지하는 것이 가장 효과적이나 귀환레일을 접지 할 경우 대지로의 누설전류가 증가하므로 지하에 매설된 금속 체의 시설물에 전식을 일으킨다. 이 전식 문제 때문에 DC 급전시스템의 귀환회로는 비접지로 설치된다. 비접지 DC 급전시스템에서 부극레일의 전위 상승은 피할 수 없다. 다만 인명에 위험한 수준까지 오르지 않도록 시스템 설계 시 확인하여야 한다. 또한 주행레일을 별도로 접지시키지는 않아도 주행레일이 대지위에 설치되므로 대지로 누설전류가 흐른다. 이 누설전류의 양도 적절히 제어되어야 한다. 레일전위 상승 값 및 누설전류의 크기는 시스템 전압, 레일의 저항, 변전소간 간격, 접지저항 값 등에 따라 변하고 무엇보다도 부하 크기 및 부하위치에 따라 변한다. 따라서 정확한 레일전위 상승 값 및 누설전류의 양을 계산하기 위해서는 컴퓨터로 시뮬레이션을 수행하는 것이 가장 적절하다. 본문에서는 그러나, 컴퓨터 시뮬레이션 없이 간략하게 수 계산으로 대략적인 레일전위상승 및 누설전류 계산방법으로 그 동안 산업계에서 사용하던 방법을 정리해 본다.

2. 본문

-
- 1) 정상기, 회원, 한국철도기술연구원, 전기신호연구본부
E-mail : sgchung@krri.re.kr
TEL : (031)460-5733 FAX : (031)460-5459
 - 2) 박현준, 한국철도기술연구원
 - 3) 권삼영, 한국철도기술연구원
 - 4) 배창한, 한국철도기술연구원

2.1 레일전위상승 및 인체에 미치는 영향

누설전류가 흐르는 회로의 등가회로는 그림 1과 같이 나타낼 수 있다. 등가회로에서 보듯이 누설전류의 크기에 영향을 주는 중요한 4 요소는 I_T (차량의 부하전류), V_N (귀환전류에 의해 부극레일에 발생하는 전압강하), R_L (부하점에서의 부극레일의 유효접지저항)과 R_S (변전소에서의 부극레일의 유효접지저항)이다. 이 4가지 요소들은 서로 함수관계에 있다. 이 등가회로로부터 간략화 된 유용한 수식을 얻기 위해 중요한 가정이 필요하다. 그것은 R_N (부극레일의 저항)이 R_L 및 R_S 보다 매우 작아서 $I_T \approx I_N$ 하는 것이다. 차량부하전류 I_T 를 알면 식(3)에 의해 V_N 을 구하고 식(1) 및 식(2)에 의해 부극레일 및 변전소 부극의 전위를 계산할 수 있다. R_G 는 단위길이 당 부극레일의 대지로의 누설저항을 가리키며 L_L 는 차량으로부터 변전소까지의 거리의 합이다. L_S 는 변전소 부극에 연결된 부극레일의 합이다. 그림 2에서 변전소 간의 거리는 L_1 , 변전소 B와 차량 간의 거리가 L_2 일 경우 변전소 A 및 변전소 B 부극의 유효접지저항은 각각 $\frac{R_G}{L_1+L_2}$ 의 동일한 값을 갖고 차량의 유효접지저항은 $\frac{R_G}{L_2}$ 이다.

$$V_{GL} \approx \frac{R_L}{R_L + R_S} \cdot V_N \quad \text{----- (1)}$$

$$V_{GS} \approx \frac{R_S}{R_L + R_S} \cdot V_N \quad \text{----- (2)}$$

$$V_N = I_N \cdot R_N \quad \text{----- (3)}$$

$$R_L = \frac{R_G}{L_L} \quad \text{----- (4)}$$

$$R_S = \frac{R_G}{L_S} \quad \text{----- (5)}$$

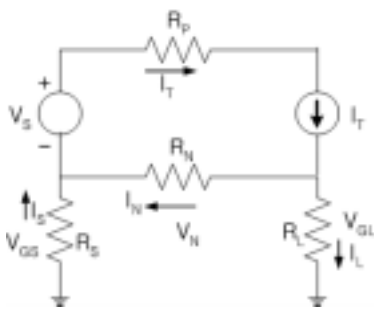


Fig. 1 Basic Stray Current Model

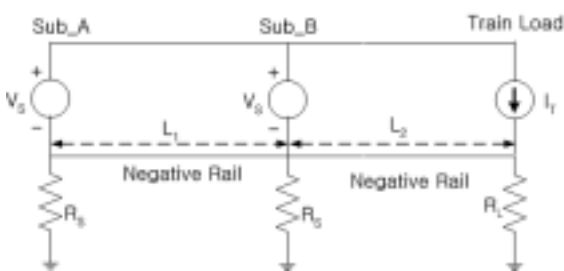


Fig. 2 Sample system for the calculation of the effective grounding resistance

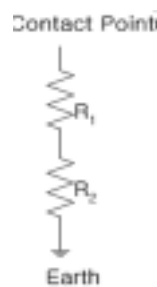


Fig 3 simple model for human body

레일전위상승과 관련되어 2가지 문제점이 야기될 수 있다. 하나는 사람이 부극레일과 접촉하였을 경우 얼마나 안전한가의 문제이고 또 하나는 지하매설 급속시설물에 전식을 일으킬 수 있는 누설전류에 관한 것이다. 아직 최대레일전위상승치를 제시한 표준화된 국제규격은 없으며 각 전기철도 운영기관마다 나름대로의 최대 허용치를 갖고 있다. 구미 선진국 전기철도 운영기관에서는 레일전위상승의 최대허용치를 일반적으로 50~90V로 하고 있는 것으로 조사되었다. 사실 인체에 위험을 초래하는 것은 접촉전압(touch potential)이 아니라 인체에 흐르는 전류 양과 전류가 흐르는 시간의 곱이다. 인체의 안전에 위협이 될 수 있는 전류 양 및 시간은 식()와 같이 알려지고 있다.

$$I_k = \frac{348}{\sqrt{t}} \quad \text{-----} \quad (6)$$

식(6)에서 t 는 second 단위의 시간이며, I_k 는 milliampere 단위의 전류 양이다. 즉 사람이 부극레일을 안전하게 접촉하는 시간은 식(6)의 t 보다 훨씬 짧은 시간이어야 한다. 인체를 등가전기회로로 간략하게 표시하면 그림 3과 같다. 그림 3에서 R_1 은 사람의 발과 바닥 사이의 접촉저항을 나타내며 그 값은 일반적으로 $3\rho_s$ 로 알려져 있다. 사람이 2발을 디디고 있을 경우 인체와 바닥 간의 접촉저항은 $1.5\rho_s$ 가 된다. ρ_s 는 바닥면의 단위길이 당 저항 값이다. R_2 는 사람의 손부터 발까지의 총 인체저항이다. 이상 설명된 것을 그림 4의 예를 들어 계산하여 보자.

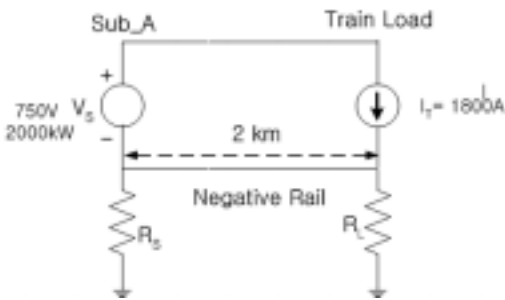


Fig. 4 Sample system for the potential rise calculation

그림 4 정류기용 변압기 및 정류기의 전압변동율을 6%로하면 DC 750V 단의 전원측 저항은 식(6)에 의해 0.0169 ohm이 된다. 차량부하전류=1800A, 정극 급전선의 저항=0.015 ohm/km, 부극 급전선의 저항= 0.015/km. 부극레일의 누설저항= 300 ohm/km로 가정하면 R_s , R_L , V_{GS} 및 V_{GL} 은 식 (7)~(11)과 같이 계산된다. 식(7)에서 R_s 의 계산 시 분모에 2를 곱한 것은 변전소 부극에 하선 상선의 귀환회로가 연결되어 있기 때문이다.

$$R_s = \frac{R_G}{2 \times 2} = 75 \Omega \quad \text{-----} \quad (7)$$

$$R_L = \frac{R_G}{2} = 150 \Omega \quad \text{-----} \quad (8)$$

$$V_N = 2 \cdot .015 \cdot 1800 = 54 V \quad \text{-----} \quad (9)$$

$$V_{GS} \approx \frac{R_s}{R_L + R_s} \cdot V_N = \frac{75}{75 + 150} \cdot 54 = 18 V \quad \text{-----} \quad (10)$$

$$V_{GL} \approx \frac{R_L}{R_L + R_s} \cdot V_N = \frac{150}{75 + 150} \cdot 54 = 36 V \quad \text{-----} \quad (11)$$

식(11)과 같이 차량 위치의 레일전위는 36V가 되고 이 레일을 사람이 젖은 콘크리트($\rho_s = 100 \Omega \cdot m$)에 서서 접촉한다고 할 때 인체에 흐르는 전류 I_k 는 식(12)와 같이 된다. 만약 1800A의 부하전류가 계속된다고 가정하면 사람이 부극레일을 접촉할 수 있는 시간은 식(13)과 같이 123초 미만이어야 한다.

$$I_k = \frac{V_{GL}}{R_1 + R_2} = \frac{36}{1000 + 150} = 31.3 \text{ mA} \quad \text{----- (12)}$$

$$t = \left(\frac{348}{31.3}\right)^2 = 123.6 \text{ sec} \quad \text{----- (13)}$$

2.2 누설전류의 계산

그림 1에서 차량과 변전소 A 간의 거리를 l 부극레일의 단위 r 이라 하면 부극레일에서 발생하는 전압 강하 V_N 은 식(14)와 같이 되며 변전소 B가 비접지되어 있을 경우 차량으로부터 변전소까지 부극레일의 전위를 표시하면 그림 5와 같이 된다.

$$V_N = I_N \cdot r \cdot l \quad \text{----- (14)}$$

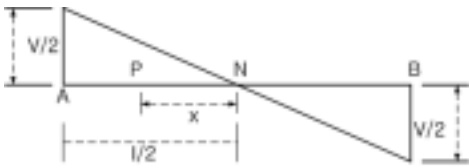


그림 5 Negative rail potential

그림 5에서 N으로부터 x 거리의 점 P에서의 전위 V_P 는 식(15)와 같이되고 P에서의 단위길이 당 누설 전류는 식(16)과 같이 된다.

$$V_P = I \cdot r \cdot x \quad \text{----- (16)}$$

$$I_{LP} = \frac{V_P}{R_G} = I \cdot \frac{r}{R_G} \cdot x \quad \text{----- (17)}$$

또한 누설전류의 총계 I_L 은 식(17)을 N에서 A까지 적분하여 구할 수 있다(식 18참조)

$$\begin{aligned} I_L &= \int_0^{l/2} I_{LP} dx = \int_0^{l/2} I \cdot \frac{r}{R_G} \cdot x dx = I \cdot \frac{r}{R_G} \int_0^{l/2} x dx \\ &= I \cdot \frac{r}{R_G} \cdot \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{l}{2}\right)^2 = \frac{1}{8} I \cdot \frac{r}{R_G} l^2 \quad \text{----- (19)} \end{aligned}$$

식(19)는 그림 1처럼 변전소가 1개만 있는 경우를 생각한 것인데 실제로는 변전소가 변전소 B 반대편으로 계속 있어서 병렬로 전력을 공급하고 있다. 이러한 반대편에 있는 변전소는 변전소 B 부극에 접지효과를 가져오는데 이것을 고려하면 그림 5의 레일전위 모습은 그림 6 및 그림 7과 같이 된다.

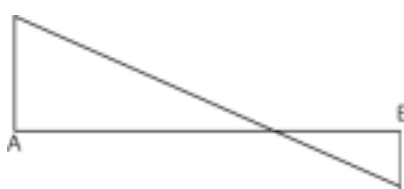
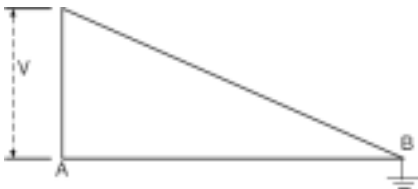


Fig 6 Negative rail potential

Fig 7 Negative rail potential

그림 6의 상황을 고려하면 누설전류에 관한 식은 식(19)에서 $l/2$ 을 l 로 바꾸어 식(20)과 같이 된다. 실제의 경우 그림 7과 같이 되므로 계수 1/2을 1/3로 바꾸면 식(21)과 같이 된다.

$$I_L = \frac{1}{2} I \cdot \frac{r}{R_G} l^2 \quad \text{----- (20)}$$

$$I_L = \frac{1}{3} I \cdot \frac{r}{R_G} l^2 \quad \text{----- (21)}$$

식 (21)에서는 변전소 1개에서 공급받는 것만 고려하였는데 실제로는 차량부하전류는 차량의 양쪽에 위치한 변전소로부터 함께 공급 받고 차량이 양 변전소 사이의 한 가운데 위치해 있을 경우는 양변전소로

부터 1/2씩 공급받는다고 볼 수 있다. 그리하여 식(21)을 다시 쓰면

$$I_L = 2 \cdot \frac{1}{3} \cdot \frac{I}{2} \cdot \frac{r}{R_G} l^2 = \frac{1}{3} I \cdot \frac{r}{R_G} l^2 \quad \text{-----} \quad (22)$$

또한 l 을 변전소간 간격 L 의 1/2로 하면 식(22)는 식(23)과 같이 된다.

$$I_L = \frac{1}{12} I \cdot \frac{r}{R_G} L^2 \quad \text{-----} \quad (23)$$

예로서 부하전류 2000A, $r=0.01\Omega/km$, $R_G=5\Omega km$ 이고 변전소간 간격이 4km 인 경우 변전소간 총 누설전류는 식(24)와 같이 계산된다.

$$I_L = \frac{1}{12} I \cdot \frac{r}{R_G} L^2 = \frac{1}{12} 2000 \cdot \frac{0.01}{5} \cdot 4^2 = 5.33 A \quad \text{-----} \quad (24)$$

식(23)에서와 같이 총 누설전류는 부하전류, 레일저항 및 변전소간 간격의 자승에 비례하고 누설저항에 반비례한다. 따라서 누설전류를 줄이기 위해서는 변전소간 간격을 줄이고 레일저항이 작은 귀환레일을 사용하고, 레일과 노반사이에 절연자재를 사용하여 누설저항을 증가시켜야 한다.

3. 결론

본문에서는 레일전위상승, 누설전류의 계산을 시뮬레이션 없이 간략하게 수 계산으로 하는 방법에 대해서 논의하였다. 그러나 보다 정확한 값을 얻기 위해서는 시뮬레이션이 수행되어야 한다. 수 계산은 타당성 검토단계나 기본설계 단계에서 이용될 수 있다. 또한 레일전위상승, 누설전류 값을 감소시키기 위하여 시스템을 운영하면서 수행할 수 있는 일은 별로 없다. 시스템의 타당성 검토나 기본설계 시 충분히 고려되어야 한다.

참고문헌

- [1] Kink D. Pham, Ralph S. Thomas, Walt E. Stinger, "Analysis of stray current, Track-to earth potentials & substation negative grounding in DC traction electrification system", 2001 IEEE/ASME Joint Rail Conference, April, 2001
- [2] 동경 전식방지대책위원회, "전식방지대책", 2004년 1월