

고속철도 시스템의 레일 전위 상승 해석

명성호*, 이재복*, 이종우**, 이장무**
 *한국전기연구소, **한국철도기술연구원

Analysis on Voltage Rise of Rail in High speed Railway System

Myung Sung Ho*, Lee Jae Bok*, Lee Jong Woo**, Lee Jang Moo**
 KERI*, KRRI**

Abstract - In electric railway system, potential of rail has been risen, for return-current flows through rail. The magnitude of rising voltage is different to railway feed system, ground admittance of rail and the load current. If rising voltage of rail is large, electric shock can be occurred to passengers and maintenance-worker. In this paper, we estimate the rising voltage of rail in high speed railway system and check the safety to human beings

1. 서 론

전기철도에서는 전기차량의 전류가 레일을 귀회로하여 흐르게 되므로 레일의 특성임피던스와 부하전류에 의한 전위가 생기며 그 크기는 급전방식, 회로구성, 레일의 대지어드미턴스 및 부하전류의 크기와 위치 등에 따라 다르다. 레일 전류가 클 경우에는 승객이 승하차시에 전격을 받거나, 레일 보수원이 전격을 받는 일 등이 발생할 수 있다. 고속철도의 레일 전위 계산을 위해서는 전차선, 레일, 피더 세가지 선로 각각의 대지귀로 자기 임피던스와 도체간의 상호 임피던스를 사용하게 된다. 본 연구에서는 레일 전위 상승의 가혹한 경우를 계산하기 위하여 AT간격 7km, 열차간격 3km로 하면 하나의 AT구간 내에는 3대의 열차가 운행된다고 가정하고 레일의 대지어드미턴스는 일반적으로 AT 급전계통의 경우 (0.2 - 2.0) S/Km 이므로 레일의 대지어드미턴스를 0.2, 1.2, 2.0의 3가지 경우를 가정하여 시뮬레이션 하였으며, 이의 결과가 인체에 미치는 전격 안전성에 대하여 검토하고자 한다.

2. 교류 AT 급전방식의 레일 전압 계산 이론

그림 1에서 AT₁과 AT₂에서 단일부하에 급전하는 경우 부하에는 AT₁에서 I₁, AT₂에서 I₂ 전류가 공급된다고 가정한다. AT₂에 공급되는 전류 (I₂/2)는 전차선과 급전선에 흐르고 이 전류에 의해 레일에 발생하는 유도전류 i 는

$$i = \frac{I_2}{2} \frac{Z_{TR} - Z_{FR}}{Z_{RR}} \quad (1)$$

여기서 Z_{FR}는 피더와 레일간의 상호유도임피던스이고 Z_{TR} ≃ Z_{FR} 이므로 (I₂/2)에 의해 레일에 발생하는 유도전류는 무시할 수 있다. 따라서 그림 1의 회로는 그림 2의 회로도와 같이 간소화 되며 레일의 유도전류에 관해서는 전차선에 I₁, I₂ 가 단독으로 흐르는 것으로 생각할 수 있다.

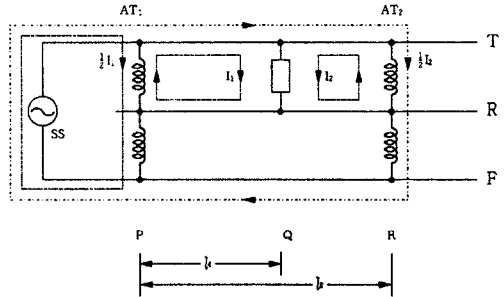


그림 1. AT급전의 전류분포

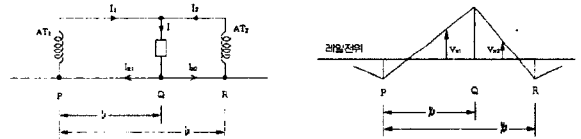


그림 2. AT급전의 전위분포

또한, 양 AT의 전류분담은 다음 식(2)와 같이 근사적으로 부하점거리에 반비례하므로 AT급전회로의 전류분포는 AT점을 급전점으로 생각할 수 있다.

$$I = I_1 + I_2$$

$$I_1/I_2 = \frac{l_2 - l_1}{l_1} \quad (2)$$

AT점과 부하간의 레일전위는 다음 그림 3과 같으며 레일 전위는 각 구간에서 전송선로이론에 의해 식(3)과 같이 표현된다.

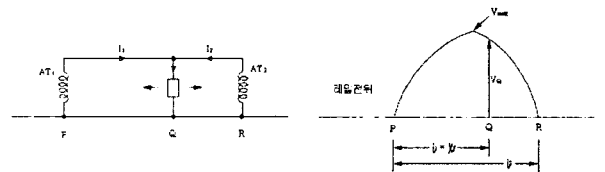


그림 3. 부하점의 레일전위

PQ간 :

$$V_{x1} = \frac{1}{2} (1-n_0) I \cdot Z_0 \left\{ -\frac{l_2-l_1}{l_2} \varepsilon^{-r l_1} + \frac{l_2-l_1}{l_2} \varepsilon^{-r(l_1-x_1)} + \frac{l_1}{l_2} \varepsilon^{-r(l_1-x_1)} - \frac{l_1}{l_2} \varepsilon^{-r(l_2-x_1)} \right\} \quad (3.a)$$

QR간 :

$$V_{x2} = \frac{1}{2} (1-n_0) I \cdot Z_0 \left\{ \frac{l_2-l_1}{l_2} \varepsilon^{-r(x_2-l_1)} - \frac{l_2-l_1}{l_2} \varepsilon^{-r x_2} - \frac{l_1}{l_2} \varepsilon^{-r(l_2-x_2)} + \frac{l_1}{l_2} \varepsilon^{-r(x_2-l_1)} \right\} \quad (3.b)$$

식 (3.a)에서 $X_1 = l_1$ 을 대입하면 부하점의 레일전위는 다음식 (4)와 같이 표현된다.

$$V_Q = \frac{1}{2} (1-n_0) I \cdot Z_0 \frac{1}{l_2} \left[(l_2-l_1)(1-\varepsilon^{-r l_1}) + l_1(1-\varepsilon^{-r(l_2-l_1)}) \right] \quad (4)$$

특히 부하점 Q가 양 AT의 중앙에 있을 때 $l_1 = l_2/2$ 를 대입하면 다음식 (5)와 같이 레일전위가 가장 높다.

$$V_{max} = \frac{1}{2} (1-n_0) I \cdot Z_0 (1-\varepsilon^{-r \frac{l_2}{2}}) \quad (5)$$

실제의 AT 방식에서는 다음 그림 4와 같이 급전회로 보호상 OPC(보호선)을 설치하고 AT점과 AT간 중앙점에서 OPC를 레일과 접속하면 레일전류는 OPC로 분류되며, 특히 부하가 AT중앙점에 있을 경우 AT 중앙점의 레일전위는 약 2/3로 저하된다. 부하점의 레일전위 최고치를 간단히 구하려면 중앙점 부하시의 레일전위 식(5)에 OPC에 의한 분류효과를 고려해서 다음 식(6)에서 구할 수 있다.

$$V_{max} = \frac{1}{K_p} \frac{1}{2} (1-n_0) I \cdot Z_0 (1-\varepsilon^{-r \frac{l_2}{2}}) \quad (6)$$

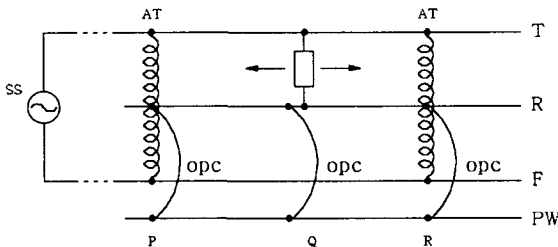


그림 4. AT 급전방식(OPC 포함)

여기서 K_p 는 OPC의 분류효과계수이며 선구간에 따라 다소 다르지만 $K_p = 1.36$ 정도이다.

3. 레일전위의 안전치

전기철도의 레일전위상승은 일반승객이나 선로보수원의 안전을 위해 제한치 (또는 목표치)가 제정되어야 한다. 레일전위의 목표치를 고려할 때는 역 플랫폼과 일반구간으로 나누는 것이 바람직하다. 즉 역의 플랫폼은 불

특정다수의 승객이 대상이므로 어느 정도 큰 인체저항을 기대할 수 없는 반면, 역 이외의 일반구간에서는 장갑이나 안전화를 착용한 작업원을 대상으로 하기 때문이다.

표 1은 독일의 전기규격 VDE 0141/264에 나타난 제한전압으로 단시간 계속의 전압허용치를 나타낸다.

표 1. VDE 허용접촉전압

구분 \ 통전시간(s)	1.0	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1
VDE허용보폭전압(V)	90	100	-	105	-	140	170
VDE허용접촉전압(V)	60	75	80	95	110	135	185

위 표에 의하면 통전시간 1.0초인 경우의 허용접촉전압을 상용주파교류로는 60V이며 역 플랫폼에서의 일반공중 허용접촉전압을 정하는 데에 참고가 된다.

일반구간인 경우에는 선로보수작업시 장갑과 안전화를 착용하는 것을 조건으로 하면 젖은 상태에서도 인체저항은 40 kΩ 정도이므로 플랫폼의 제한전압의 1.5 ~ 2.0배 정도는 허용될 것으로 생각되므로 레일전압의 안전치는 플랫폼에서는 60V, 일반구간에서는 교류구간 120V 정도가 타당하다고 생각된다.

4. 고속철도의 레일 전위 계산 및 안전성 평가

고속철도의 레일 전위 계산을 위해서는 전차선, 레일, 피더 세가지 선로가 상호 관련되어 전력을 공급하므로 이 주요 세가지 선로 각각의 대지귀로 자기 임피던스와 도체간의 상호 임피던스를 사용하게 된다. 급전계통 임피던스는 다음 표2와 같은 급전계통 선로정수(상행선 단선트랙, 측약 3×3행렬)를 이용하였다.

표 2. 급전계통 선로정수

도체군	전차선 도체군	피더 도체군	레일 도체군
전차선 도체군	0.1431 + 0.1899i	0.0302 - 0.1498i	0.0271 - 0.1123i
급전선 도체군	0.0302 - 0.1498i	0.0629 - 0.0644i	0.0256 - 0.1451i
레일 도체군	0.0271 - 0.1123i	0.0256 - 0.1451i	0.1355 + 0.3116i

레일 전위 상승의 가혹한 경우를 계산하기 위하여 AT간격 7km, 열차간격 3km로 하면 하나의 AT구간 내에는 그림 5와 같이 3대의 열차가 운행된다고 가정한다. 3대의 열차가 운행될 때의 레일전위는 각 열차가 단독으로 운행되는 경우의 레일전위를 구하여 중첩하면 구할 수 있다. 그리고 레일의 대지어드미턴스는 일반적으로 AT 급전계통의 경우 (0.2 - 2.0) S/Km 이므로 아래의 각 계산과정에서는 레일의 대지어드미턴스를 0.2, 1.2, 2.0의 3가지 경우를 가정하여 시뮬레이션 하였으며 그 결과는 그림 6에서 부터 그림 10까지에 나타내었다.

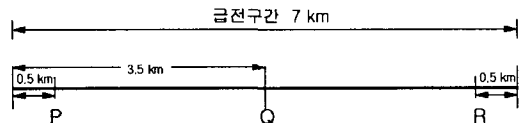


그림 5. 열차의 위치

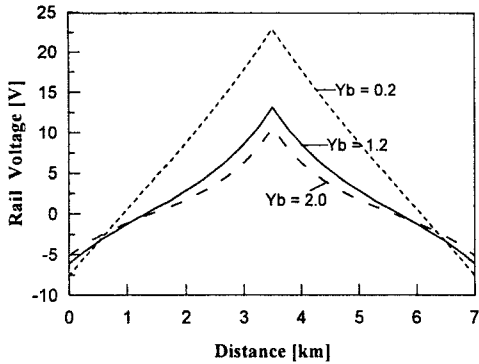


그림 6. 열차가 중앙점 Q 위치에 1대만 있는 경우



그림 9. 열차가 P 위치와 R 위치에 2대 있는 경우

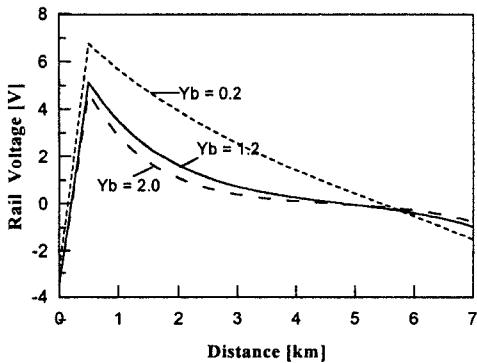


그림 7. 열차가 P 위치에 1대만 있는 경우

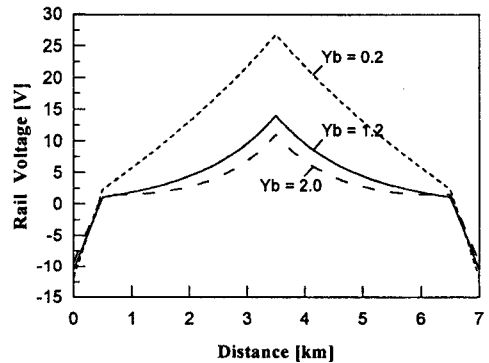


그림 10. 열차가 중앙점 Q 위치와 P 위치 및 R에 3대 모두 있는 경우

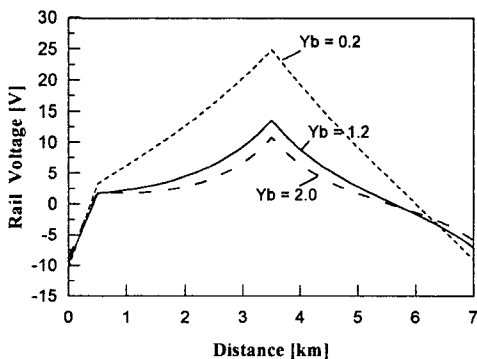


그림 8. 열차가 중앙점 Q 위치와 P 위치에 2대 있는 경우

5. 결론

본 연구에서는 레일 전위 상승의 가혹한 경우를 계산하기 위하여 AT간격 7km, 열차간격 3km로 하면 하나의 AT구간 내에는 3대의 열차가 운행된다고 가정하고 레일의 대지어드미턴스는 일반적으로 AT 급전계통의 경우 (0.2 - 2.0) S/Km 이므로 레일의 대지어드미턴스를 0.2, 1.2, 2.0의 3가지 경우를 가정하여 시뮬레이션 하였다. 계산 결과 레일전위가 상승값은 열차가 중앙점 위치에 1대만 있는 경우에는 최대 10~23V, 열차가 AT 변압기 위치에 1대만 있는 경우에는 최대 5~7V, 열차가 중앙점과 AT 변압기 위치에 2대 있는 경우에는 최대 11~25V, 열차가 AT 변압기 양 위치에 2대 있는 경우에는 최대 4.8~5.2V, 열차가 3대 모두 있는 경우에는 최대 11~26V로 계산되어 안전 제한목표인 60V 미만으로써 문제가 없는 것으로 판명되었다.

(참 고 문 헌)

계산 결과 레일전위가 상승값은 열차가 중앙점 Q 위치에 1대만 있는 경우에는 최대 10~23V, 열차가 P 나 R 위치에 1대만 있는 경우에는 최대 5~7V, 열차가 중앙점 Q 위치와 P 나 R 위치에 2대 있는 경우에는 최대 11~25V, 열차가 P 위치와 R 위치에 2대 있는 경우에는 최대 4.8~5.2V, 열차가 중앙점 Q 위치와 P 위치 및 R에 3대 모두 있는 경우에는 최대 11~26V로 계산되었다.

- [1] “電氣鐵道要覽”, 鐵道電化協會, (昭48)
- [2] 渡辺, “交流電回路の保護, 電力と鐵道”, 鐵道電化 20, No.7 (183),
- [3] “레일전위와 그 대책”, 철도기술연구보고, 1989
- [4] 황치우, “파천선 건설 전기방식 검토 최종보고서”, 한국전기연구소, pp100-127. 1990