

직류 전기철도 성능시험을 위한 레일전위시험 적용연구

정호성, 장동욱, 한문섭, 박현준
한국철도기술연구원 전기신호연구본부

A study on Rail Potential Test adaptation for Performance test of DC Railway system

Hosung Jung, Donguk Jang, Moonseob Han, Hyunjune Park
Korea Railroad Research Institute

Abstract - This paper present adaptation method of rail potential test to verify DC railway system's performance and safety. For protection of person and utility caused by rail potential rise, international standard to limit rail potential rise is made and rail potential is tested at the time of plan and construction of DC railway system in foreign country. So, we need rail potential test at the opening time and prepare a continuous monitoring technique of rail potential and a limitation method of rail potential rise. For these, we describe cause of rail potential rise, international standard about rail potential, protection principle, an example of calculation and measurement, and adaptation method for performance test.

1. 서 론

직류 전기철도에서는 주행레일을 귀환회로로 사용하기 때문에 주행레일에 귀환전류가 흘러 레일의 전위가 상승하게 된다. 전위상승을 방지하기 위해서 레일을 접지하는 것이 좋은 방안이지만 레일을 대지에 접지하는 경우에는 대지로 누설전류가 증가하여 지하에 매설된 금속제에 전식을 발생시키는 원인이 된다. 따라서 국내에서는 누설전류로 인한 전식을 최소화하기 위해 비접지방식을 채택하여 운영하고 있다. 이러한 비접지 방식에서는 열차가 운행 중이거나 지라고장이 발생한 경우에 레일의 전위가 상승하게 된다. 이러한 레일전위 상승을 이용하여 지라고장을 검출하고 있으나 정상적인 열차 운행 중이거나 지라고장시 발생하는 레일전위 상승으로 인한 인체 및 설비에 미치는 전기적인 충격에 대해서는 특별한 대책을 수립하고 있지 않다. 이러한 레일전위 상승으로 인한 인체 및 설비를 보호하기 위해서 해외에서는 레일전위 상승을 일정 크기 이내로 제한하기 위한 기준을 수립하고 시스템 설계, 시공 및 준공시점에서 레일전위시험을 시행하고 있다. 따라서 본 논문에서는 국내의 직류 전기철도 성능 및 안정성을 확보하기 위해 레일전위 상승원인, 레일전위와 관련한 기준, 보호방법, 해석 및 측정방안 및 성능시험 적용방안을 제시하고자 한다.

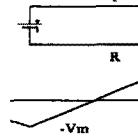
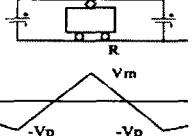
2. 본 론

2.1 레일전위

직류 전기철도에서는 주행레일을 귀환회로로 사용하기 때문에 주행레일에 귀환전류가 흘러 레일과 대지사이의 대지저항을 통해 누설전류가 발생한다. 국내에서는 이러한 누설전류로 인한 지하 금속 매설물의 전식을 최소화하기 위해서 비접지방식을 채택하고 있다. 이로 인해 열차 운행이나 지라고장시에 레일전위가 상승하게 되며, 이로 인해 인체 및 설비의 손상 등을 야기할 수 있다. 표 1은 비접지 방식의 직류 전기철도 급전방식에 따라

열차 운행에 따른 레일전위의 분포 및 크기를 나타낸 것이다. 병렬급전방식에서는 변전소 중간에서 최대부하시 레일전위 상승이 최대가 되며 변전소에 최소가 된다[1].

표 1. 최대 레일전위 발생조건 및 계산식

급전방식	단일급전방식	병렬급전방식
최대 레일전위 발생조건	최원단 최대부하시 부하 및 변전소 지점	양 변전소 중앙에서 최대부하시 부하지점
레일전위 분포		
계산식 (V)	$V_m = \frac{1}{2} B(1 - \exp^{-\alpha t})$	$V_m = \frac{1}{2} B(1 - \exp^{-\alpha t})$ $V_p = \frac{1}{4} B(1 - \exp^{-\alpha t})^2$

$$\alpha = \sqrt{R/G_R} : \text{레일의 감쇠 정수}$$

$$\delta = \sqrt{R/G_R} : \text{레일의 특성 저항 } (\Omega)$$

$$I(A) : \text{부하전류}$$

$$t(km) : (\text{변전소}) \text{ 부하점에서의 거리}$$

이러한 레일전위 상승으로 인한 위험을 억제하기 위해서는 레일전위 상승에 대한 기준을 수립하고 이에 따라 시스템을 설치, 운영해야 한다. 이를 위해 유럽에서는 레일접지방식을 주로 사용하고 있으며 최근에는 변전소의 부급전선과 접지사이에 다이오드를 삽입한 다이오드방식과 Back to Back 사이리스터를 삽입한 RPCD(Rail Protection Control Device)방식 등이 속속 적용되고 있다. 국내의 경우에는 주로 비접지방식이 주종을 이루고 있는데 최근 들어 경량전철 건설에 따라 RPCD방식 등의 적용이 검토되고 있다.

2.2 위험전압에 대한 국제기준

레일전위 상승으로 인한 위험전압과 관련하여 IEC 62128-1에서 레일전위 상승으로 인한 위험을 대비하기 위해 인체에 위해를 가할 수 있는 전위 및 지속시간 등을 제시하고 있다[2].

IEC 62128-1에서 제시한 허용 가능한 레일전위의 크기는 크게 전류가 흐르는 시간에 따라 분류한다. 먼저 고장조건인 짧은 시간 조건에서는 접촉전압으로 제시하고 있으며, 일반적인 동작조건에서는 일시적 조건과 영구적 조건에서는 신체허용전압을 제시하고 있다. 여기서 허용전압은 최악의 조건을 고려한 최대값이며 고장조건에서

의 보호장치 및 스위치는 정상적인 동작을 가정한다. 먼저 전류가 흐르는 지속시간조건에 대해서는 표 2에서와 같이 정의하였다.

표 2. 지속시간 조건

조건	t [s]
짧은 시간	≤ 0.5
일시적	$0.5 < t \leq 300$
영구적	> 300

표 3은 고장조건인 짧은 시간 조건에서 직류 시스템의 최대 허용 접촉전압을 나타낸 것으로 접촉전압은 표 3에서 제시한 값을 초과해서는 안 된다.

표 3. 짧은 시간조건에서의 최대 허용접촉전압(Ut)

t [s]	Ut [V]
0.02	940
0.05	770
0.1	660
0.2	535
0.3	480
0.4	435
0.5	395

표 4는 동작조건에서 일시적으로 발생하는 직류 시스템에서의 최대 신체접촉전압을 나타낸 것으로 신체접촉전압은 표 4에서 제시한 값을 초과해서는 안 된다.

표 4. 일시적 시간조건에서의 최대 신체접촉전압(Ua)

t [s]	Ua [V]
0.6	310
0.7	270
0.8	240
0.9	200
1.0	170
≤ 300	150

직류 시스템에서의 영구적인 조건에서는 신체접촉전압의 한계가 60V이어야 하는 작업장 또는 이와 유사한 장소를 제외하고는 120V를 초과해서는 안 된다.

또한 기준에서는 허용할 수 없는 높은 접촉전압 및 신체접촉전압이 발생할 수 있는지를 판단하기 위해, 해당 지점에서 귀선 도체의 전압강하를 기준으로 하여 정상 동작 및 고장 조건에 대한 레일 전위를 평가하도록 하고 있다. 이를 위해 예측값과 측정값의 비교를 통해 레일 전위의 기준 준수 여부를 판별하고 있으며, 규정된 값을 초과하는 경우에는 레일전위를 감소시키기 위한 적절한 조치를 취하도록 하고 있다.

2.3 지락고장에 따른 레일전위 상승 및 보호

직류 급전회로 내에서 지락고장 발생한 경우에는 그림 1과 같이 부급전선과 대지간의 전위가 상승하게 되고 전위의 크기가 일정 크기 이상으로 상승하는 경우에 고장율을 검출하는 접지계전기(64P)를 적용하고 있다[1][3].

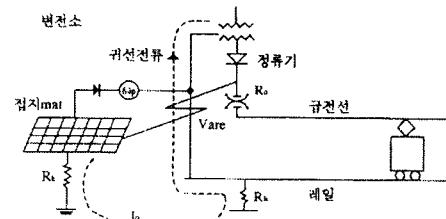


그림 1. 지락고장 보호방식

지락고장 발생시 접지계전기(64P)에 발생하는 전압은 식 (1)과 같이 표현된다.

$$V_{61} = 1500 - V_{arc} \times (R_E + R_R) / (R_E + R_R + R_O) \quad (1)$$

V_{arc} : 아크 전압(경험 값 : 300V)

R_E : 변전소 접지 매트의 저항

R_R : 레일의 대지 누설 저항

R_O : 변전소의 내부 저항

일반적으로 변전소의 내부 저항은 0.1Ω 이하이며, 변전소 접지 매트의 저항과 레일의 대지누설저항의 합은 5Ω 정도로 되기 때문에 64P에는 1200V에 가까운 전압이 발생한다. 하지만 각 운영노선의 열차운행 조건, 대지저항, 급전구간 등의 조건이 달라 부급전선에 나타나는 전압의 크기가 다르게 나타나기 때문에 운영기관마다 접지계전기의 정정값을 달리 설정하고 있다. 운영기관에서는 30~600V까지 정정이 가능하고 3ms~0.1s이내에 동작하는 계전기를 적용하고 있으며, 정상적인 운전상황에서 계전기의 오동작을 방지하고 지락고장시에 정확한 동작할 수 있도록 계전기를 정정하고 있다. 하지만 레일전위로부터의 안전 확보 및 보호계전기의 신뢰성을 확보하기 위해서 정상적인 운전조건 및 고장발생시 나타나는 최대 레일전위 크기 및 접지계전기의 성능 등을 종합적으로 고려해야 할 필요가 있다.

2.4 레일전위 해석 및 측정

직류 전기철도 설계에 있어 레일전위 상승으로 인한 인체 및 설비 손상을 예방하기 위해서는 레일전위에 대한 예측이 요구된다. 레일전위 크기는 급전압, 전차선 및 레일저항, 변전소간 간격, 레일과 대지간의 누설저항, 그리고 열차 운행 특성에 따라 크게 변화한다. 따라서 직류 급전계통을 그림 2와 같이 단순화된 모델로 등가화하여 계산하는 방법으로부터 다양한 구성요소를 상세 모델링하여 컴퓨터 시뮬레이션에 의한 예측방법 등이 있다. 그림 2는 직류 전기철도 시스템을 직류변전소, 차량, 전차선 및 레일로 구성된 회로에 레일과 대지간의 컨덕턴스가 있는 회로로 등가화한 것이다.

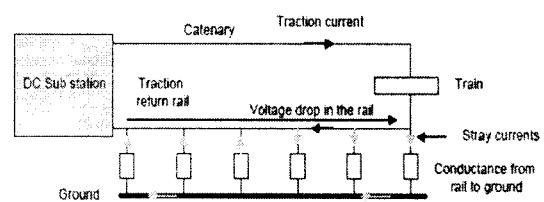


그림 2. 비접지방식의 등가회로

그림 3은 단순화된 등가회로로부터 레일전위를 산출하기 위해 Shunt Energization 모델을 나타낸 것이다. 급전회로는 레일간이 규칙적으로 본딩되어 있고 레일저항과 대지간의 컨덕턴스가 일정하다고 가정하여 단일 커션

도체를 단순화하고, 길이가 1인 선로에서 우측단에 병렬 저항 R_s 를 갖는 전류원 I_s 가 인가되고 레일저항 R 과 레일과 대지간 컨덕턴스 G 가 일정한 값을 갖는 분포회로로 모델링하였다. 레일전위 및 레일전류를 구하기 위해식 (2)과식 (3)과같이 분포방정식을 세워산출할수있다. 그림 4는 두변전소간을 1대의 전동차가 운행할경우에비접지회로모델에서 레일전위의크기를나타낸것이다[4],[5].

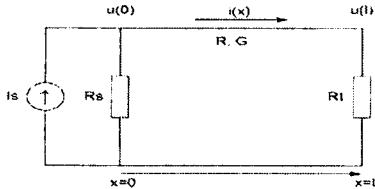


그림 3. Shunt Energization의 선로

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

$$u(x) = -R_0(C_1 e^{\gamma x} - C_2 e^{-\gamma x}) \quad (3)$$

여기서, $u(x)$: 레일전위(V)

$i(x)$: 레일전류(A)

C_1, C_2 : 상수

γ (전파정수, $1/m$) = \sqrt{RG}

R_0 (선로특성저항, Ω) = $\sqrt{\frac{R}{G}}$

R : 레일저항($\frac{\Omega}{Km}$)

G : 레일과대지간누설콘덴터스($\frac{S}{Km}$)

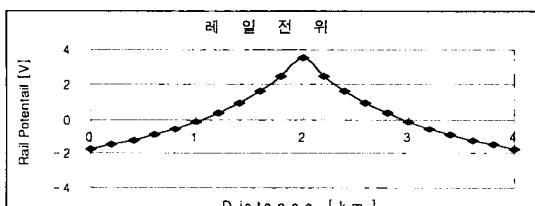


그림 4. 레일전위 해석사례

그림 5는 변전소에서 측정한 레일전위의 실측파형으로 열차의 운행 상황에 따라 레일전위가 크게 변화하고 있음을 알 수 있다. 레일전위는 변전소 간격, 대지저항 등의 시스템 조건뿐만 아니라 해당 구간에서의 다수의 차량이 역행, 회생 및 타행을 불규칙적으로 반복, 수행하고 있어 단순한 계산 결과와는 많은 차이가 있음을 알 수 있다. 따라서 시스템의 레일전위 상승에 대한 시스템의 안정성을 검증하기 위해서 예측을 통한 시스템 설계와 열차 운행에 의한 현장측정을 통해 검증할 필요가 있다[6].

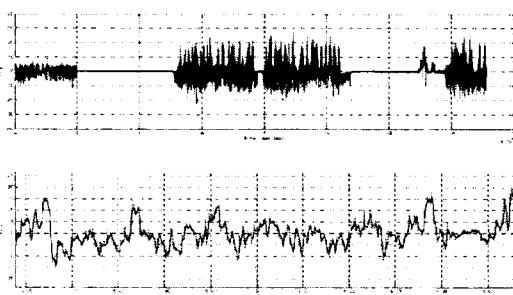


그림 5. 운행구간에서의 레일전위 측정결과

2.5 도시철도 성능시험 적용검토

열차가 정상적으로 운행하는 조건에서 레일전위 상승으로 인해 인명 및 타설비에 미치는 영향을 확인하고 보호계전기의 동작의 정확도를 검증하기 위해 직류 전기철도에서의 레일전위 측정시험이 필요하다[7].

시험조건은 직류 전력시스템은 실제 운영조건과 동일한 조건에서 열차 및 보호계전기는 정상적인 상태를 유지해야 한다. 시험은 차량 한 대 운행에 따른 레일전위 상승과 최종설계 용량에서의 레일전위 상승을 측정해야 한다. 다만 시스템 개통시에는 최종설계 용량으로 시험하기 위한 차량 등의 조건을 만족할 수 없기 때문에 개통 시점에서의 최대 부하조건에 대해 시험을 수행하도록 해야 한다.

측정은 IEC 62128-1에서 규정된 조건에서 차량운행 중에 레일전위상승이 최대로 상승할 것을 예측되는 지점에 DC 전압계를 설치하고 차량운행 중에 레일전위를 측정한다. 측정된 레일전위는 IEC 62128-1에서 규정된 레일전위 내내인지를 판별하여 정상적인 운행 조건에서 레일전위가 규정된 값 이상으로 상승하는 경우에는 적절한 대책을 수립한 후에 열차 운행이 되도록 해야 한다.

보호계전기의 정확한 동작 확인을 위해서는 임의의 고장을 발생시키고 이에 따라 레일전위 상승에 따른 보호계전기의 동작을 확인해야 한다. 하지만 설계통에서 임의의 고장을 발생시키는 시험의 경우에는 대규모의 고장전류로 인해 차단기 등의 일부 보호설비에 충격을 가할 수 있기 때문에 시스템 설계사, 설비제작사, 시스템 운영자간의 충분한 검토를 통해야 한다. 따라서 설계통 고장시험이 어려운 경우에는 보호계전기 동작을 검증하기 위해서는 보호계전기 동작특성을 확인하는 시험으로 대체할 수 있다.

3. 결 론

본 논문에서는 국내의 직류 전기철도 성능 및 안정성을 검증하기 위해 레일전위시험에 대한 적용방안을 제시하였다. 이를 위해 레일전위 상승원인, 레일전위와 관련한 기준, 보호방법, 해석 및 측정방안 및 성능시험 적용방안을 제시하였다.

레일전위 상승으로 인한 인체 및 설비를 보호하기 위해서 해외에서는 레일전위 상승을 일정 크기 이내로 제한하기 위한 기준을 수립하고 시스템 설계, 시공 및 준공시점에서 레일전위 상승시험을 시행하고 있다. 국내에서도 시스템 안전 확보를 위해서 레일전위에 대한 시스템 설계 및 시공시에 국제기준에 대한 적합성 여부를 성능시험 등을 통해 검증해야 하며, 열차 운행후도 레일전위를 지속적인 모니터링 해야 하며 기준값을 초과하는 경우를 대비하여 적절한 억제대책을 적용할 수 있는 방안을 마련해야 한다.

【참고문헌】

- [1] 직류전기철도 보호기술 조사전문위원회, “직류 전기철도에 서의 보호 및 보호협조에 관한 조사”, 일본전기학회, 1994
- [2] 한국표준협회, “KS C IEC 62128-1 철도용 고정설비-제1부 : 전기 안전 및 접지에 관련된 보호 조치”, 2006
- [3] 김성길, “도시철도기기자료집(7) 전기”, 서울특별시 지하철 건설본부, 2005
- [4] 한문섭, 정호성, “직류급전시스템의 레일전위와 누설전류 관점에서의 설계 파라미터 연구”, 한국철도학회 춘계학술대회, 2007.5
- [5] Chien Hsing Lee, Chien Jung Lu, “Assessment of Grounding Schemes on Rail Potential and Stray Currents in a DC Transit System”, IEEE Transactions on power delivery, 2006
- [6] Keith Griffiths, “Stray Current Control an application of Ohm’s law”, EMC in Railways, 2006
- [7] 한국철도기술연구원, “도시철도 전력시스템 표준화 연구”, 2007.6