

직류전기철도에서의 실시간 누설전류 계측기법에 관한 조사분석

정호성, 한문섭, 박 영, 김형철, 김진호
한국철도기술연구원

Investigation of the real time stray current monitoring techniques
on the DC railway system

Hosung Jung, Moonseob Han, Young Park, Hyengchul Kim, Jinho Kim
Korea Railroad Research Institute

Abstract - This paper presents the real time stray current monitoring techniques on the DC railway system. These techniques are two types. The first one is the rail potential measurement technique between running rail and earthing mats on the important locations such as substation, station, and so on. And the second one is measurement technique of stray current through substation earthing mats and from collection mats, and continuous monitoring of return currents through the running rails. We need to apply these techniques on DC railway system to monitor stray current periodically and maintain the system properly.

1. 서 론

직류 전기철도에서는 전동차가 주행할 때 주행레일을 통하여 변전소로 귀환되는 운영전류의 일부가 대지로 누설되며, 이러한 표유전류는 철도시설물 뿐만 아니라 지하에 매설되어 있는 금속체에 전식을 일으키게 되는 요인이 된다. 따라서 레일에서 누설되는 표유전류를 줄이기 위해서 대부분의 귀환레일은 대지와 절연시키고 있다. 국내의 경우에도 이러한 표유전류 및 레일전위에 영향을 미치는 요인인 운영전류, 변전소간 거리, 트랙과 다른 귀환회로와의 도전성, 레일의 저항, 그리고 크로스 본드의 간격 등은 직류 전기철도 설계시부터 고려되고 있다.

하지만 표유전류 및 레일전위의 크기는 운행조건에 따른 운영전류의 변화 및 시스템 노후화에 따른 각종 파라미터의 변화로 인해 항상 변화하게 된다. 따라서 이러한 표유전류 및 레일전위의 변화를 지속적으로 모니터링할 필요가 있으나 아직까지 국내에서는 이러한 시스템에 대한 연구나 적용이 검토되고 있지 않은 실정이다. 따라서 본 논문에서는 해외에서 적용되고 있는 실시간 표유전류 계측 기법에 대한 원리 및 시스템에 대한 분석을 통해 국내 적용성 등을 검토하였다.

2. 본 론

2.1 표유전류 및 허용기준

직류 전기철도에서는 주행레일을 귀선으로 활용하고 있어 주행레일을 별도로 접지시키지 않아도 주행레일이 대지위에 설치되므로 귀환전류의 일부는 대지로 누설된다. 일반적으로 누설되는 표유전류의 크기는 차량 부하 전류, 레일의 저항 및 변전소 간격의 자수에 비례하고 누설저항에 반비례 한다. 그리고 레일전위가 정극성(+)인 경우에는 전류가 레일로부터 대지로 유출되고 부극성(-)의 경우에는 대지로부터 레일로 유입된다. 즉 표유전류는 전위 영(0)의 중성점을 기준으로 부하측에서는 레일로부터 대지를 향하여 유출되고 변전소측에서는 대지

로부터 유입된다. 일반적으로 표유전류 I_i 은 식 (1)과 같다[1-3].

$$I_i = K \cdot I \cdot \frac{r}{W} \cdot L^2 \quad (1)$$

여기서 K : 비례상수
 I : 레일전류 [A]
 r : 단위길이의 귀선저항 [Ω/km]
 W : 레일의 누설저항
 L : 변전소 간격 [km]

따라서 표유전류를 줄이기 위해서는 변전소간 간격을 줄이고 레일저항이 작은 귀환레일을 사용하며 레일과 노반사이의 절연자재를 사용하여 누설저항을 증가시켜야 한다.

하지만 철도시스템은 광범위한 공간에 설치되며, 열차의 운행패턴에 따라 운영전류가 수시로 변화하기 때문에 표유전류 및 레일전위의 크기는 그림 1과 같이 항상 변화한다. 이와 같이 측정시간 및 측정위치에 따라 표유전류의 크기가 항상 변화하기 때문에 표유전류에 영향을 미치는 요소의 값을 정확하게 산출할 수 없다[4].

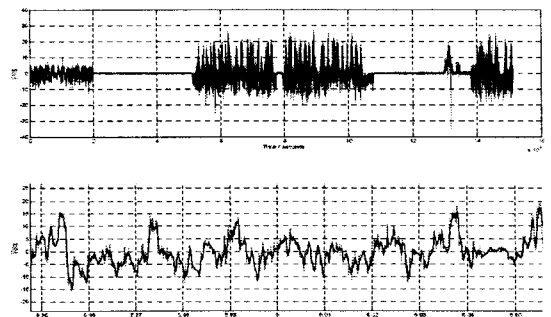


그림 1. 운행구간에서의 레일전위 측정사례

따라서 국제기준인 IEC 62128-2와 BS EN 50122-2 초안에서는 타 설비에 영향을 미치지 않은 평균 표유전류의 크기와 표유전류에 직접적으로 영향을 미치는 레일전위의 크기에 대한 권장값을 제시하고 있다. 식 (2)은 경험상으로 증명된 단위 길이당 허용되는 평균 표유전류의 크기이다[5,6].

$$I'_{max} = 2.4 \text{ mA/m} \quad (2)$$

단일 트랙 선로의 단위 길이당 평균 표유전류

이중 트랙 선로에서 표유전류 최대 평균치는 단위 트랙 평균치에 2를 곱한 값이며, 2개 이상의 트랙에서는 이 수치를 그에 따라 증가한다. 또한 평균값은 24 시간

또는 그 배수 기간 동안의 양의 표유전류 부분의 합만을 고려한다.

실질적으로 표유전류를 직접적으로 측정하는 것은 어렵기 때문에 일반적으로 레일전위의 크기와 트랙의 도전성을 이용하여 허용값을 제시하고 있다. 식(3)과 식(4)에서와 같이 단위 길이당 도전성(G')과 레일전위(U_{RE})의 값이 허용값 아래인 경우에는 표유전류에 대한 영향이 크지 않을 것으로 판단하고 있다.

$$\begin{aligned} \text{개방형} : G' &\leq \text{단위트랙당 } 0.5 \text{ S/km} \\ U_{RE} &\leq +5V \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \text{폐쇄형} : G' &\leq \text{단위트랙당 } 2.5 \text{ S/km} \\ U_{RE} &\leq +1V \end{aligned} \quad (4)$$

평균 레일전위 U_{RE} 의 경우에 레일전위는 양의 값만으로 산출하며, 평균 기간은 24시간 또는 그 배수 기간으로 한다. 만약에 식(3)과 식(4)의 요건을 만족하지 못하는 경우에는 식(5)와 같은 방식으로 허용값을 산출하게 된다.

$$G' = I'/U_{RE} \quad (5)$$

여기서, I' = 트랙 당 2.5 m/A

여기서도 이중 트랙 선로의 경우에는 단위 길이당 최대 도전성 값에 2를 곱해야 한다. 2개 이상의 트랙 역시 그에 따라 값이 커진다. 또한 건축완료 시에는 길이당 허용 도전성이 만족되었음을 입증하여야 한다.

또한 강화 트랙베드, 터널 또는 교량 등과 같이 철골 철근 콘크리트 또는 금속 구조물로 구성된 시스템에서는 구조물에 미치는 영향을 고려하기 위해 구조물 대 대지의 전압변동을 고려해야 하며, 일반적으로 최고 교통량 시간에 매립 콘크리트 구조물 철골에 대한 전위 변동 평균치가 +200mV를 넘지 않는 경우에는 표유전류에 대한 영향이 크지 않다고 제시하고 있다.

2.2 레일전압 측정의 의한 감시기법

전식에 의한 귀환회로의 손상방지와 주변 금속 구조물의 손상방지를 위해 지속적인 표유전류의 변화에 대한 감시가 요구된다. 하지만 표유전류를 직접 측정하는 것이 어렵기 때문에 일반적으로 귀환회로의 대지에 대한 저항값이나 열차 운행에 따라 발생하는 레일전위의 크기 변화를 통해 예측할 수 있다.

단위 길이당 레일의 도전성이 크게 변화하는 경우에는 선로를 따라 레일전위가 변화한다. 따라서 시스템 건설 시 표유전류에 대한 허용기준을 만족하는 기준값을 설정한 후 열차운행에 따른 레일전위 값과 기준값과의 차이를 통해 표유전류의 변화를 실시간으로 예측할 수 있다. 선로를 따라 레일 전위가 변화한다는 것은 귀환회로의 도전성 변화, 귀환회로와 대지 사이의 연결 불량, 레일 체결장치의 오염 등으로 인해 단위 길이당 도전성에서 결함이 있음을 나타내고 그러한 결함은 표유전류 상황에 영향을 미칠 수 있음을 의미한다.

그림 2은 지속적인 레일전위 측정을 통해 표유전류의 영향을 감시하는 시스템의 개략도이다[6]. 실시간으로 레일전위 모니터링을 통한 표유전류를 예측하는 기법에서는 크게 레일과 대지간의 전위를 측정하기 위한 통신기반의 전압센서를 변전소 및 역사 등의 레일전위를 측정하기 위한 중요 지점에 설치하여 레일전위를 측정한다. 일반적으로 센서간의 거리는 1-3km 간격으로 설치하며, 측정된 각 지점의 레일전위는 중앙처리시스템에서 표유전류의 변화를 평가하게 되고 모델이나 인터넷 등을 통해 사령 또는 감시 및 제어기가 필요한 곳으로 데이터를 전송할 수 있는 시스템으로 구성되어 있다. 레일전위의 크기는 열차운행 패턴에 따라 상시 달라질 수 있기 때문

에 일일 교통량의 차이에 영향을 받지 않지 않기 위해, 24시간 평균시간의 레일전위 값을 사용하고 있다. 따라서 이러한 레일전위 평균값에 변화가 있으면 레일 대 대지 도전성의 변화가 일어났을 가능성이 있으며 표유전류의 증가가 우려된다.

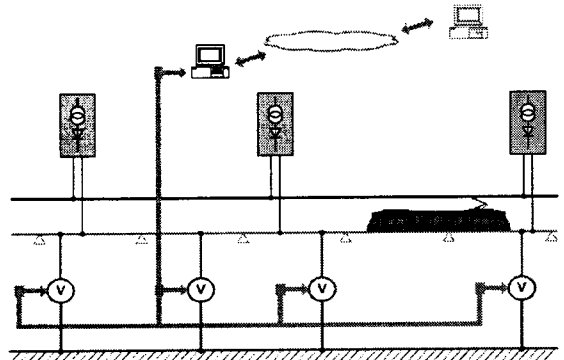


그림 2. 실시간 레일전위 모니터링을 통한 예측기법

이와 같은 기법에서는 표유전류 허용기준에 따른 기준값의 선정이 매우 중요하며, 표유전류 크기의 기준값을 선정하기 어려운 기존 시스템에서는 적용하기에 어려움이 있는 단점이 있다. 선로를 따라 형성되는 레일전위의 특징은 변전소의 위치, 열차시간패턴, 전인과 계동방식 측면에서의 열차 특성 등으로 결정된다. 또한 이 방식으로 대지에 접촉해 있는 설치물과 귀환회로가 전기적으로 완전히 분리되지 못한 지점의 위치를 찾아낼 수가 있다. 또한 유지보수를 위해 사령 등에서 데이터를 수집할 수 있는 시스템을 갖추고 있어 레일과 대지의 연결 상태 및 위치를 자동으로 표시할 수 있는 기능이 있다. 그림 3은 측정된 레일전위 평균값의 변화 추이를 나타낸 것이다.

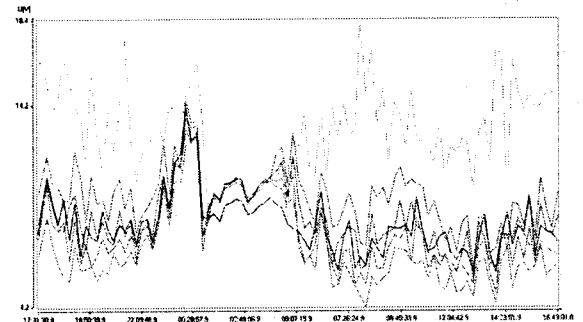


그림 3. 실시간 레일전위 측정사례

2.3 변전소에서의 귀환전류 측정을 통한 감시기법

열차 운행시에 열차 위치에서 누설된 전류는 접지망, 누설전류 포집망(도상철근), 기타 지하금속 매설물 등을 흘러 변전소의 부극으로 흐르게 된다. 따라서 변전소의 운행레일에서 귀환되는 전류와 누설전류 포집망과 접지망을 통해 귀환하는 전류를 실시간으로 측정하여 시스템에 대한 표유전류를 감시하는 기법이다. 그림 4는 탠처스터 매트로 2단계 구간 변전소에 설치된 표유전류 감시 시스템을 나타낸 것이다[7].

표유전류 감시시스템은 크게 운행레일과 부극을 연결하는 케이블을 통해 흐르는 귀환전류를 측정하는 유니트(BD)와 접지망으로부터 귀환하는 귀환전류와 레일전위를 측정하는 유니트(BB), 그리고 누설전류 포집망으로부터 귀환되는 귀환전류를 측정하는 유니트(BC)으로 구성되어 있다.

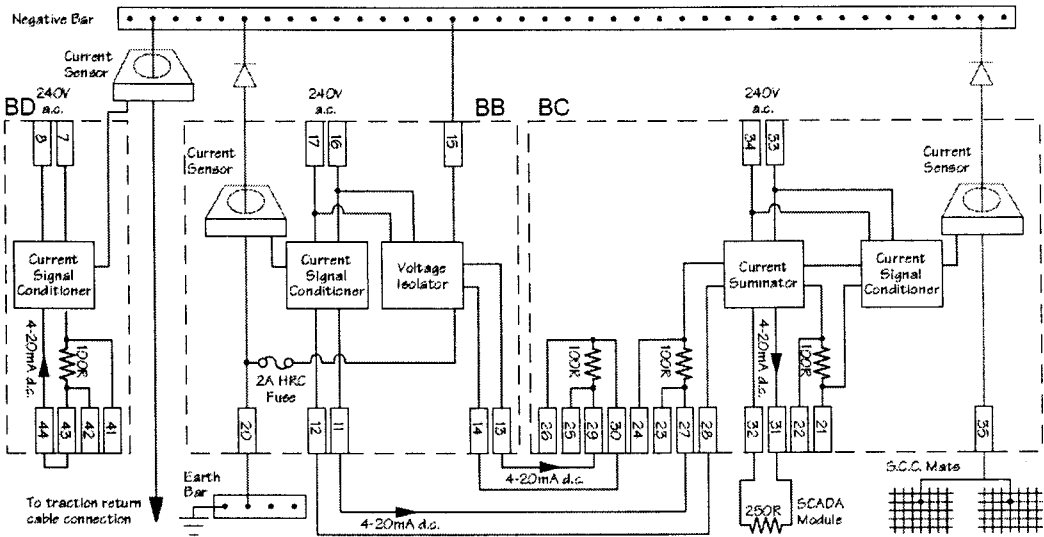


그림 4. 맨체스터 매트로 2단계 구간 포유전류 감시시스템 개략도

각각의 측정 유닛트는 홀센서를 이용하여 각각의 전류를 계측하고 계측한 값에 따라 4-20mA 범위로 출력을 내보내도록 구성되어 있으며, 시스템의 구성설비는 사고시에 발생하는 사고전류와 전압상승에 대비하여 설계되어 있다.

레일전위를 측정하기 위한 유닛트(BB)에서는 0.4V에서 2V 범위내에서 변화하는 100Ω 전류선트를 이용하여 레일과 접지망간의 전위를 측정하도록 되어 있다. 또한 누설전류 포집망과 레일간의 귀환전류를 측정하는 유닛트(BC)에는 다이오드를 통해 누설전류 포집망으로부터 부극으로 흘러들어 가는 전류를 측정하도록 되어 있다. 또한 접지망과 누설전류 포집망으로부터 귀환하는 포유전류는 스카다로 전송되어 변전소간에 흐르는 전체적인 포유전류를 실시간으로 감시할 수 있다.

이러한 시스템은 변전소에서 흘러 들어오는 포유전류를 직접적으로 측정할 수 있으며, 운행전류에 따른 포유전류의 변화 및 부극의 레일전위를 감시할 수 있다. 또한 누설전류 포집망과 레일간의 다이오드로 연결함으로써 해당 측정유닛트가 선택배류기와 같은 기능을 수행할 수 있다

3. 결 론

본 논문에서는 직류 전기철도에 흐르는 포유전류를 실시간으로 감시할 수 있는 기법에 대해 제시하였다. 포유전류를 측정하는 기법은 크게 레일과 접지간에 레일전위를 측정하는 기법과 변전소 접지망과 누설전류 포집망으로부터 부극으로 흘러 들어오는 포유전류를 측정하는 기법이 있다. 국내의 경우에도 포유전류에 대한 주기적인 측정 및 감시를 위해 실시간으로 포유전류를 측정하여 스카다 등에서 종합 감시할 수 있는 시스템의 적용이 필요하다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 도시철도표준화2단계연구개발사업의 연구비지원(07도시철도표준화A01)에 의해 수행되었습니다.

[참 고 문 헌]

- [1] Ian Cotton, "Stray Current Control in DC Mass Transit Systems", IEEE Transactions on vehicular technology, 2005
- [2] 직류전기철도 보호기술 조사전문위원회, "직류 전기철도에서의 보호 및 보호협조에 관한 조사", 일본전기학회, 1994
- [3] 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
- [4] Keith Griffiths, "Stray Current Control-an application of Ohm's law", EMC in Railways, 2006
- [5] 한국표준협회, "KS C IEC 62128-1 철도용 고정설비-제1부 : 전기 안전 및 접지에 관련된 보호 조치", 2006
- [6] BSI standard, "Draft BS EN 50122-2 Railway application - Fixed installations - Electrical safety, earthing and bonding Part2 : Provisions against the effects of stray currents caused by d.c. traction systems", 2008
- [7] Mercury instruments limited, "Application note No.8 - stray current monitoring on D.C. electrified lines."