

직류급전시스템에서의 귀환전류 변화비를 이용한 표유전류 실시간 감시기법에 관한 연구

논 문
60-4-34

A Study on the Real Time Measuring Technique of Stray Current by Using Return Current Ratio in the DC Railway System

정 호 성[†] · 박 영^{*} · 김 형 칠^{**} · 민 명 환^{***} · 신 명 철[§]

(Hosung Jung · Young Park · Hyengchul Kim · Myung-Hwan Min · Myong-Chul Shin)

Abstract - In DC electric railways, while an electric rail car is driving, a part of the working current returned to the substation through rails leaks into the ground. Such a stray current causes railway facilities and metal objects to corrode electrolytically. Therefore, change of stray current needs to be monitored constantly. But so far in domestic, the research on stray current measuring techniques and system adaption are insufficient. To estimate stray current, this paper addresses a method of monitoring the return current that is returned into the negative pole of the substation in real time.

Key Words : DC Railway system, Electrolytic corrosion, Rail potential, Return current ratio, Stray current

1. 서 론

직류급전시스템에서는 전동차가 주행할 때 주행레일을 통하여 변전소로 귀환되는 운전전류의 일부가 대지로 누설되며, 이러한 누설로 인한 표유전류는 철도시설물뿐만 아니라 지하에 매설되어 있는 금속체에 전식을 일으키게 되는 요인이 된다. 따라서 레일에서 누설되는 전류량을 줄이기 위해서 대부분의 귀환레일은 대지와 절연시키고 있다. 하지만 표유전류의 크기는 운행조건에 따른 운전전류의 변화 및 시스템 노후화에 따른 각종 파라미터의 변화로 인해 항상 변화하게 된다. 따라서 이러한 표유전류의 변화를 지속적으로 모니터링할 필요가 있으나 아직까지 국내에서는 이러한 시스템에 대한 연구나 시스템 적용이 미비한 실정이다.

본 논문에서는 표유전류를 크기를 예측하기 위하여 변전소 부극으로 귀환하는 귀환전류를 실시간으로 계측하는 방안을 제시하였다. 변전소로 귀환되는 귀환전류는 레일, 표유전류포집망과 접지망으로부터 변전소 부극으로 인입되는 전류를 계측하여 알 수 있고, 전류 크기의 변화에 따른 표유전류의 변화를 예측할 수 있다. 또한 전류가 누설되는 구간을 예측하기 위해 계측된 귀환전류의 크기를 비교하는 방안을 제시하고, 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

2. 본 문

2.1 표유전류 및 허용기준

직류급전시스템에서는 주행레일이 귀선으로 이용되며 주

행레일을 별도로 접지시키지 않아도 주행레일이 대지 위에 설치되고, 레일과 대지 사이의 절연이 완전하지 않으므로 귀선전류의 일부는 대지로 누설된다. 이렇게 누설되는 전류를 누설전류 혹은 표유전류라 한다. 일반적으로 누설되는 표유전류의 크기는 차량 부하전류, 레일의 저항 및 변전소 간격의 자승에 비례하고 누설저항에 반비례 한다. 그리고 레일 전위가 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 대지로부터 유입된다. 일반적으로 표유전류 I_{stray} 은 식 (1)과 같다[1-3].

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

- K : 비례상수
- I : 레일전류[A]
- r : 단위길이당 레일저항 [Ω /km]
- W : 레일의 누설저항
- L : 변전소 사이의 간격 [km]

따라서 표유전류를 줄이기 위해서는 변전소간 간격을 줄이고 레일저항이 작은 귀환레일을 사용하며 레일과 노반 사이의 절연자재를 사용하여 누설저항을 증가시켜야 한다. 하지만 철도시스템은 광범위한 공간에 설치되며, 열차의 운행 패턴에 따라 운전전류가 수시로 변화하기 때문에 표유전류 및 레일전류의 크기는 항상 변화한다. 마찬가지로 표유전류의 크기도 측정시간 및 측정위치에 따라 항상 변화하기 때문에 표유전류에 영향을 미치는 요소의 값을 정확하게 산출할 수 없다[4].

따라서 국제기준인 IEC 62128-2와 BS EN 50122-2 초안에서는 타 설비에 영향을 미치지 않은 평균 표유전류의 크

[†] 교신저자, 정회원 : 한국철도기술연구원 전철전력연구실 선임연구원

E-mail : hsjung@krti.re.kr

^{*} 정 회 원 : 한국철도기술연구원 전철전력연구실 선임연구원

^{**} 정 회 원 : 한국철도기술연구원 전철전력연구실 실장

^{***} 준 회 원 : 성균관대 전기전자 및 컴퓨터학과 석사과정

[§] 펠로우회원 : 성균관대 전기전자 및 컴퓨터학과 교수

접수일자 : 2011년 2월 14일

최종완료 : 2011년 3월 17일

기와 표유전류에 직접적으로 영향을 미치는 레일전위의 크기에 대한 권장값을 제시하고 있다. 식 (2)은 경험상으로 증명된 단위 길이당 허용되는 평균 표유전류의 크기이다 [5,6,7].

$$I_{max} = 2.4[mA/m] \quad (2)$$

I_{max} : 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.

개방형(Open-type) :

$$\begin{aligned} G' &\leq 0.5[S/km], \text{ per unit track} \\ U_{RE} &\leq +5[V] \end{aligned} \quad (3)$$

폐쇄형(Closed-type):

$$\begin{aligned} G' &\leq 2.5[S/km], \text{ per unit track} \\ U_{RE} &\leq +1[V] \end{aligned} \quad (4)$$

평균 레일전위의 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[8,9].

$$\begin{aligned} G' &= I' / U_{RE} \\ I' &= 2.5[mA/m] \end{aligned} \quad (5)$$

표유전류를 직접 측정하는 것이 어렵기 때문에 일반적으로 귀환회로의 대지에 대한 저항 값이나 열차 운행에 따라 발생하는 레일전위의 크기 변화를 통해 예측할 수 있다. 단위 길이 당 레일의 도전성이 크게 변화하는 경우에는 선로에 따라 레일전위가 변화한다. 따라서 시스템 건설 시 표유전류에 대한 허용기준을 만족하는 기준 값을 설정한 후 열차운행에 따른 레일전위 값과 기준 값과의 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 단위길이 당 도전성에서 결함이 있음을 나타내고 그러한 결함은 표유전류 상황에 영향을 미칠 수 있음을 의미한다.

그림 1은 기존의 표유전류 크기 예측기법을 나타낸다. 기존의 방식은 레일과 대지간의 레일전위 모니터링을 통해 표

유전류를 예측하고 있다. 이 기법에서는 크게 레일과 대지간의 전위를 측정하기 위한 통신기반의 전압센서를 변전소 및 역사 등의 레일전위를 측정하기 위한 중요 지점에 설치하여 레일전위를 측정한다. 레일전위의 크기는 열차운행 패턴에 따라 상시 달라질 수 있기 때문에 일일 교통량의 차이에 영향을 받지 않기 위해, 24시간 평균시간의 레일전위 값을 사용하고 있다. 이러한 레일전위 평균값에 변화가 있으면 레일 대 대지 도전성의 변화가 일어났을 가능성이 있으며 표유전류의 변화를 감지할 수 있다. 하지만 레일전위 모니터링 기법에서는 표유전류 허용기준에 따른 기준 값의 선정이 매우 중요하며, 표유전류 크기의 기준 값을 선정하기 어려운 기존 시스템에서는 적용하기에 어려운 단점이 있다. 레일전위 평균값의 변화 추이를 가지고, 대지에 접촉해 있는 설치물과 귀환회로가 전기적으로 절연되지 못한 지점의 위치는 알 수 있지만, 표유전류값은 측정할 수 없다.

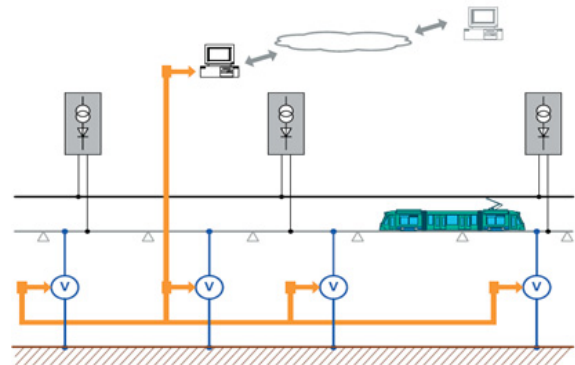


그림 1 실시간 레일전위 모니터링을 통한 예측 기법
Fig. 1 Real time measuring technique of rail potential

2.2 실시간 표유전류 모니터링을 통한 예측기법의 구성 및 기능

직류급전시스템에서는 변전소의 정극(+) 모선을 통해 각 피더로 유출되는 모든 전류는 식(6)과 같이 레일 등을 통해 연결된 부극(-) 모선으로 유입된다.

$$I_{POS} = I_{NEG} \quad (6)$$

다만 부극으로 유입되는 과정에서 일부 전류가 레일에서 누설되어 지하의 금속체 등을 통해 흐르게 되고 변전소 부극 인근에서 유입되게 된다. 최근에 건설되고 있는 대부분의 직류급전시스템에서는 이러한 누설되는 전류로 인한 지하금속매설물에 피해를 최소화하기 위해 케도 하부에 도상철근을 이용하여 표유전류포집망을 설치하고 있어 일부 표유전류가 표유전류포집망을 통해 흐를 수 있으며, 또한 지하에 매설된 접지망을 통해 부극으로 귀환될 수 있다[10].

그림 2는 표유전류감시시스템의 구성도를 나타낸다. 기존의 설치된 변전소의 운행레일에서 귀환되는 전류, 부극과 표유전류포집망 및 접지망을 다이오드로 연결하고 연결회로를 통해 귀환하는 전류를 실시간으로 측정한다. 그리고 각 지

점에 흐르는 귀환전류를 실시간으로 감시하고 측정된 전류값 비(ratio)의 변화를 통해 레일과 대지 간의 절연상태를 감시한다.

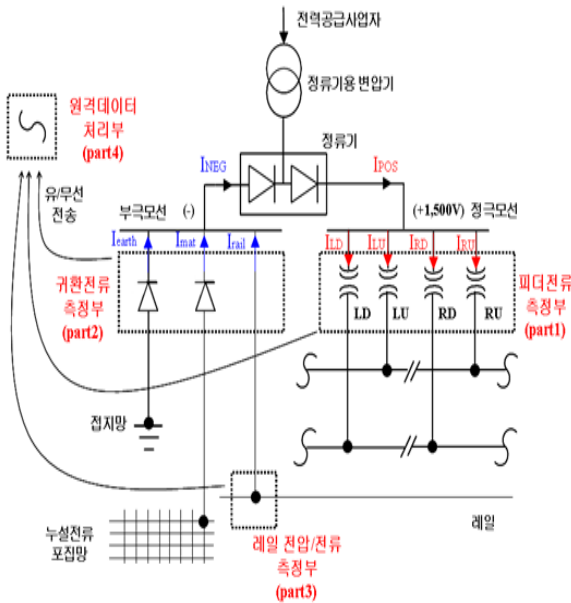


그림 2 표유전류 감시 시스템 개략도
Fig. 2 Description of stray current monitoring system

- I_{POS} : 정극(+모선)을 통해 피더로 유출되는 전류
- I_{NEG} : 부극(-)모선으로 유입되는 전류
- I_{earth} : 접지망을 통해 부극으로 흐르는 전류
- I_{mat} : 표유전류포집망을 통해 부극으로 흐르는 피더전류
- I_{rail} : 레일을 통해 부극으로 흐르는 피더전류
- I_{LU}, I_{LD} : 변전소 좌측으로 흐르는 상, 하행선 전류
- I_{RU}, I_{RD} : 변전소 우측으로 흐르는 상, 하행선 전류

위 시스템은 크게 정극의 피더 전류를 측정하는 측정부(part1), 부극의 전류를 측정하는 측정부(part2), 레일에서의 전압, 전류를 측정하는 측정부(part3) 및 각 부에서 측정된 데이터를 취득하여 최종적인 표유전류 발생 여부를 판별하는 원격데이터 처리부(part4)로 구성되어 있다.

정극의 피더 전류를 측정하는 피더전류 측정부(part1)는 별도의 전류 센서를 설치하지 않고 기존의 각 피더의 보호 및 데이터 계측을 위해 설치된 직류 CT를 통해 전류값을 취득할 수 있으며, 데이터를 전송하기 위해 유·무선 데이터 전송장치만 설치하면 된다.

부극의 전류를 측정하는 귀환전류 측정부(part2)는 크게 운행레일과 부극을 연결하는 케이블을 통해 흐르는 귀환전류를 측정하는 부분과 접지망으로부터 귀환하는 귀환전류를 측정하는 부분, 그리고 표유전류포집망으로부터 귀환되는 귀환전류를 측정하는 부분으로 구성된다. 일반적으로 레일에서 부극으로 귀환되는 부분은 전류용량에 따라 여러 개의

케이블로 구성된 기존의 시스템에 전류센서를 설치하고 그 합을 계산하여 레일을 통해 귀환되는 전류량을 계산할 수 있다. 또한 접지망 및 포집망에서 부극으로 흐르는 전류는 접지망 및 포집망과 부극 사이에 추가로 다이오드를 삽입하여 연결하고 이 다이오드 통해 흐르는 전류를 측정함으로써 계측한다. 다이오드를 삽입함으로써 레일에서 접지망 및 포집망으로 흐르는 역전류를 방지할 수 있다.

그림 3은 귀환전류를 측정하기 위한 상세 구성도이다.

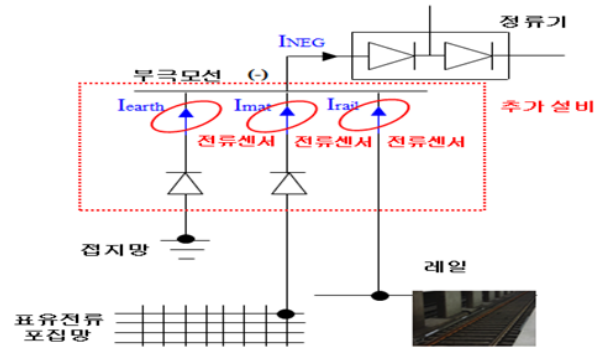


그림 3 귀환전류비측정을 위한 상세 구성도
Fig. 3 Detailed description for measuring return current ratio

이와 같이 부극으로 흐르는 레일전류, 포집망 전류, 접지망 전류를 측정하고 각각의 측정된 전류비의 변화를 통해 대지와 레일간의 절연 정도를 예측할 수 있다. 일시적인 전류비의 변화에 의해 누설 정도를 파악하는 것이 무리가 있기 때문에 취득된 데이터를 원격 데이터처리부로 전송하고 여기서 24시간 평균 전류비 또는 주간, 월간 단위로 데이터를 처리한다.

- 정극모선의 전류(I_{POS})와 부극모선의 전류(I_{NEG})의 합

$$I_{POS} = I_{LD} + I_{LU} + I_{RD} + I_{RU} \quad (7)$$

$$I_{NEG} = I_{rail} + I_{mat} + I_{earth} \quad (8)$$

- I_{RU}, I_{RD} : 변전소 우측으로 흐르는 상, 하행선 피더전류
- I_{LU}, I_{LD} : 변전소 좌측으로 흐르는 상, 하행선 피더전류

- 부극모선에서의 유입되는 3부분의 전류 분배비

$$I_{rail} : I_{mat} : I_{earth} \quad (9)$$

레일에서의 전압, 전류를 측정하는 측정부(part3)는 변전소에 인입되는 레일에 흐르는 전류 및 전압을 측정하는 부분이다. 대지와 레일간의 절연이 노후화 되어 레일로 귀환되는 전류에 비해 접지망 또는 포집망을 통해 흐르는 전류가 증가함을 통해 표유전류 발생을 예측할 수 있지만 접지망 및 포집망의 경우 각각의 노선에 따라 구분되어 설치되어 있지 않기 때문에 해당 노선 및 구간을 구분할 수 없다. 따라서 누설되는 구간을 예측하기 위해서 변전소에 인입되는 각각의 선로에서 흐르는 레일의 전류 및 전압을 계측함

으로써 해당 노선 및 구간을 한정할 수 있다. 이를 위해 변전소에 인입되는 좌우, 상하행선 4개 부분에 전류센서를 부착하여 각 레일에 흐르는 전류를 측정한다. 또한 레일과 변전소 접지 간의 전압크기를 측정하여 4개의 레일 전압 크기를 비교함으로써 절연이 노후화된 구간을 예측할 수 있다. 그림 4는 변전소에 인입되는 레일의 전류 및 전압을 측정하기 위한 상세 구성도를 나타낸다.

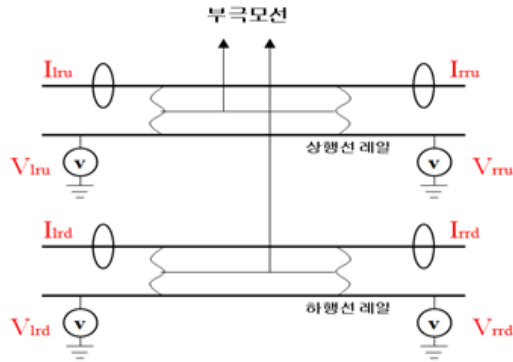


그림 4 변전소 부극모선에서의 측정 구성도
Fig. 4 Measurement description in negative feeder

- 4개 레일에 흐르는 레일의 전류 크기 및 전류비, 전압 크기

$$I_{rld} : I_{rlu} : I_{rdd} : I_{rru} \quad (10)$$

$$V_{rld} : V_{rlu} : V_{rdd} : V_{rru} \quad (11)$$

I_{rld}, I_{rlu} : 부극모선 좌측에서 유입되는 상, 하행선 레일 전류

I_{rdd}, I_{rru} : 부극모선 우측에서 유입되는 상, 하행선 레일 전류

V_{rld}, V_{rlu} : 부극모선 좌측에서의 상, 하행선 레일전위

V_{rdd}, V_{rru} : 부극모선 우측에서의 상, 하행선 레일전위

2.3. 시뮬레이션 결과

2.3.1 직류급전시스템 모델링

직류급전시스템의 레일전위와 표유전류의 크기를 예측하기 위해 PSCAD/EMTDC를 이용하여 모델링을 수행하였다. 가공 전차선로(R_{power}), 레일(R_{rail}), 표유전류 포집망(R_{mat}) 및 지하금속매설물(R_{pipe})의 직렬 임피던스와 구성요소 상호 간의 병렬 임피던스로 구성된 귀환회로로 모델링하였다. 또한 일반적으로 병렬 급전하는 변전소간의 거리를 4[km] 내외이므로 귀환회로의 길이는 차량이 양 변전소 중간지점에 있다고 가정하여 2[km]로 선정하였다. 그리고 귀환회로를 10%(200m) 간격으로 나누고, 부하 모델은 운전

최저전압인 1,000[V]까지 전압강하가 되게 하는 부하전류가 흐를 수 있도록 저항소자로 모델링하였다. 또한 정류기로부터의 전차선까지의 정급전선과 정류기 부극으로부터 레일까지의 부급전선은 임피던스 모델로 모델링하였다

2.3.2 레일절연상태 변화에 따른 귀환전류비 측정 시뮬레이션

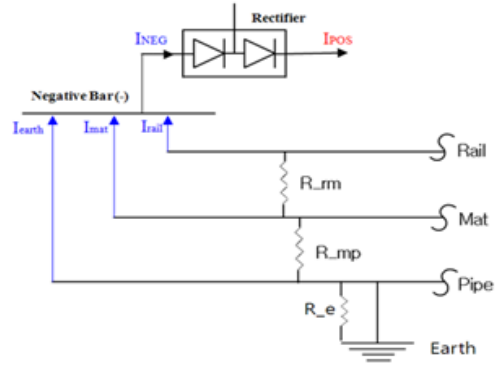


그림 5 귀환전류비 측정구성도
Fig. 5 Measurement description of return current ratio

먼저 레일과 대지 사이의 표유전류를 측정하기 위해 R_{rm} (레일과 표유전류포획망 사이의 저항)의 크기를 500, 50, 5[Ω/km]로 변화시켜 가며 시뮬레이션을 수행하였다.

그림 6은 그 결과를 나타낸다. 그래프 좌측 값은 정극 모선을 통해 피더로 유출되는 전류(I_{POS})와 레일을 통해 부극으로 흐르는 피더전류(I_{rail})량을 나타내며, 우측 값은 표유전류포획망을 통해 부극으로 흐르는 피더전류(I_{mat})와 접지망을 통해 부극으로 흐르는 전류(I_{earth})량을 나타낸다. I_{POS} 와 I_{rail} 의 값에 비해 누설되는 전류 I_{mat} 와 I_{earth} 값이 매우 작으므로 좌우측에 구별하여 나타내었다. 레일과 대지 사이의 누설저항이 작아질 때 귀환레일에서 누설되는 전류의 양이 증가하여 레일을 통해 부극으로 인입되는 전류의 양은 감소하고, 표유전류포획망으로부터 인입되는 전류는 증가함을 확인할 수 있다.

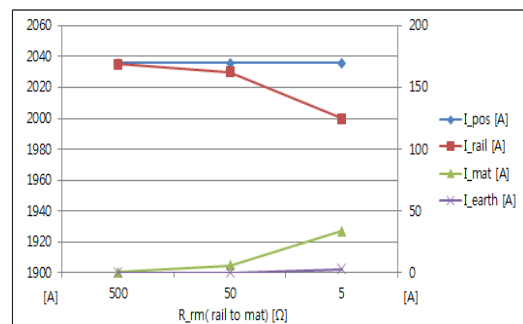


그림 6 레일과 표유전류포획망(mat) 사이의 절연상태 변화 시 표유전류
Fig. 6 Stray current in changing insulation condition between rail and mat

직류급전시스템에서는, 레일로부터 누설되는 표유전류를 포집하기 위해 표유전류포획망이 콘크리트 궤도 아래 설치되어 있다. 대부분의 표유전류는 포획망을 통해 변전소로 귀환하지만 일부의 전류는 지하의 금속매설물로 누설된다. 그리고 그것은 금속매설물의 전식에 영향을 준다.

그림 7은 한 지점에서 R_{rm} , R_{mp} (포획망과 금속매설물 사이의 저항), R_e (금속매설물과 대지 사이의 저항)의 크기가 변화할 때의 표유전류 변화를 나타낸 것이다. 그 결과, 한 지점에서 절연과 파괴나 절연이 노후하면 레일에서 누설된 전류가 금속매설물로 유입되어 흐르는 것을 확인할 수 있다.

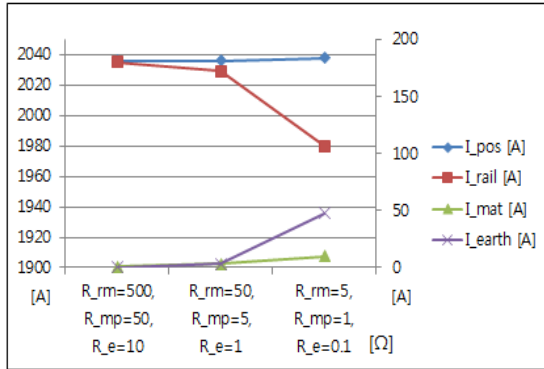


그림 7 한 지점에서 부분적인 절연과 파괴 시 표유전류 변화
Fig. 7 Change of stray current when insulation changes partially

그림 8은 부하저항 값의 변화에 따른 표유전류의 흐름을 보여준다. 여기서 차량은 차량최저운행전압인 1,000[V]까지 전압강하가 되게 하는 부하전류가 흐를 수 있도록 저항소자로 모델링하였다. 그 결과 변전소 정극에서 공급되는 전류의 양은 부하저항의 변화에 따라 크게 변하지만 표유전류의 양은 비교적 크게 변하지 않는 것을 확인할 수 있다.

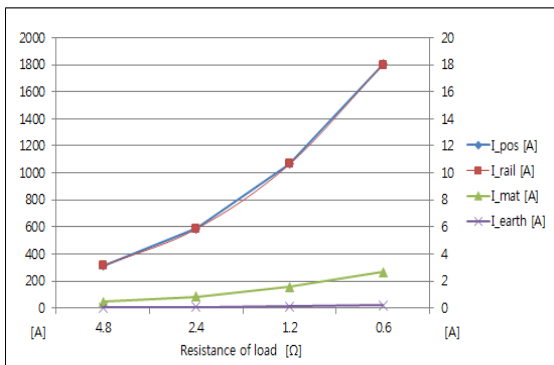


그림 8 부하의 변화에 따른 표유전류의 변화
Fig. 8 Change of stray current depending on change in load

2.3.3 표유전류 발생구간 측정 시뮬레이션

2.3.2절에서 레일과 대지 사이의 절연이 약화될 때, 표유전류가 증가하는 것을 시뮬레이션을 통해 검증하였다. 식 (10)과 같이 변전소 부극으로 인입되는 상하행선 좌우 측 4

개의 레일전류를 측정하고 비교함으로써 절연이 노후화된 구간을 예측할 수 있다.

그림 9는 변전소를 기준으로 상행선 우측 부분의 절연상태가 변화했을 때의 레일전류의 변화를 나타낸다. 이 때 부하차량은 변전소와 변전소의 중간지점에 있다고 가정하고, 또한 모든 구간(상, 하행선 좌, 우측)에 차량이 있다고 가정하여 시뮬레이션을 하였다. 그 결과, 절연이 약화된 구간에서는 전류의 크기가 비교적 크게 증가하고 다른 구간에서는 전류의 크기가 감소하는 것을 확인할 수 있다.

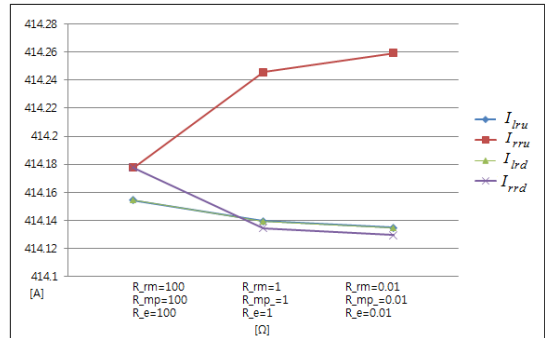


그림 9 한 지점의 부분적 절연상태 변화에 따른 전류량 변화(모든 구간에 차량이 있을 시)

Fig. 9 Change of current depending on insulation condition partially at a point

하지만 열차의 운행패턴이나 열차의 위치, 그리고 각 구간마다 운행하는 열차의 개수에 따라 레일전류는 수시로 변하기 때문에 일시적인 전류량의 비교로는 누설구간을 파악할 수가 없다. 따라서 각 구간별 24시간 평균 레일전류의 양으로 각 구간의 레일의 절연상태를 예측해야 한다.

그림 10은 구간별 열차의 운행 유무에 따른 시뮬레이션을 하여, 각 상황에 따라 취득된 값의 평균값을 나타낸다. 한 구간에서 절연의 노후나 파괴로 인해 절연상태가 약화되었을 때, 해당 구간의 레일전류 평균값이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 따라서 24시간 평균 레일전류값을 비교하여 그 값이 비교적 큰 구간의 절연상태가 양호하지 않다는 것을 예측할 수 있다.

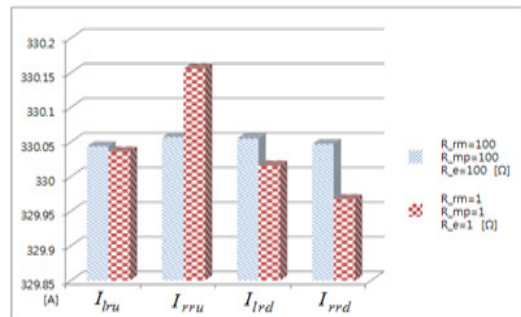


그림 10 한 구간의 부분적 절연상태 변화에 따른 각 구간의 24시간 평균 레일전류값

Fig. 10 24 hour average rail current at each point depending on change of partial insulation condition at a point

3. 결 론

본 논문에서는 실시간으로 표유전류를 측정하는 기법을 제시했다. 이 기법은 각 지점으로 흐르는 귀환전류를 감시하여 레일과 대지 사이의 절연상태를 측정하는 것이다. 표유전류에 큰 영향을 주는 요소들을 분석하기 위해 다양한 상황에서의 시뮬레이션을 수행하였다. 그 결과, 레일과 대지 사이의 절연상태가 악화될수록 전류는 표유전류포획망으로 누설되고, 한 지점에서 부분적인 절연과파나 절연상태가 노후할 때 지하매설물로 누설되는 전류가 증가함을 확인할 수 있었다. 또한 부하의 변화에 따른 표유전류의 변화를 확인할 수 있었다. 그리고 변전소 부근으로 들어오는 상하행선 좌, 우측의 레일전류의 양을 비교함으로써 누설로 인한 표유전류 발생 구간을 예측할 수 있다.

이 시스템으로 레일전위와 표유전류를 실시간으로 감시할 수 있으며, 이것으로 레일과 대지 사이의 절연상태를 측정할 수 있다. 따라서 절연상태가 양호하지 못한 지점을 찾아낼 수 있고, 표유전류로 인한 지하매설물의 전식 또한 방지할 수 있다.

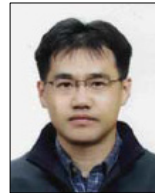
감사의 글

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] Korea Railway Research Institute, "Investigation of the real time stray current monitoring techniques on the DC railway system", Korean Institute of Electrical Engineers, 2009
- [6] 한국표준협회, "KS C IEC 62128-1 철도용 고정설비-제1부: 전기 안전 및 접지에 관련된 보호 조치", 2006
- [7] 한국표준협회, "KS C IEC 62128-2 철도용 고정설비-제2부: 직류 건인 시스템의 표류 전류 영향에 대한 보호규정", 2006
- [8] 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
- [9] Mercury instruments limited, "Application note No.8 - stray current monitoring on D.C. electrified lines."
- [10] Yii-Shen Tzeng and Chien-Hsing Lee, "Analysis of Rail Potential and Stray Currents in a Direct-Current Transit system", IEEE Transaction on power delivery, vol.25, No.3, pp 1516-1525, July 2010

저 자 소 개



정 호 성 (鄭 滙 聖)

1971년 10월 4일생. 1998년 성균관대학교 전기공학과 졸업(공학석사). 2002년 성균관대학교 전기전자 및 컴퓨터공학부 졸업(공학박사). 현재 한국철도기술연구원 전철전력연구실 선임연구원
Tel : 031-460-5116
Fax : 031-460-5459
E-mail : hsjung@krri.re.kr



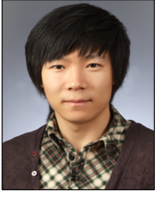
박 영 (朴 暎)

1973년 11월 3일생. 2000년 성균관대학교 전기전자 및 컴퓨터공학부졸업(공학석사). 2004년 동대학원 동학과 졸업(공학박사). 현재 한국철도기술연구원 전철전력연구실 선임연구원
Tel : 031-460-5424
Fax : 031-460-5459
E-mail : ypark@krri.re.kr



김 형 철 (金 炯 徹)

1967년 9월 30일생 1993년 고려대학교 전기공학과 졸업 공학석사. 2003년 Texas A&M University 전기공학과졸업(공학박사). 현재 한국철도기술연구원 전철전력연구실 실장
Tel : 031-460-5450
Fax : 031-460-5459
E-mail : hckim@krri.re.kr



민 명 환 (閔 明 煥)

1981년 2월 8일생. 2010년 숭실대학교 전기공학과 졸업(학사). 2010년~현재 성균관대학교 전기전자 및 컴퓨터공학부 석사과정.

Tel : 031-290-7161

E-mail : mhmin@skku.ac.kr



신 명 철 (申 明 澈)

1970년 성균관대 전기공학과 졸업.
1978년 연세대학교 대학원 전기공학과졸업(박사). 1975년~1978년 충북대학교 전기공학과 조교수.
2000년~2001년 미국펜실바니아 주립대학교 방문교수.

1978년~현재 성균관대학교 전기전자 및 컴퓨터공학부교수.
2005년~2007년 대한전기학회장.

2005년~2007년 성균관대학교 자연과학캠퍼스 부총장

Tel : 031-290-7103

FAX : 031-290-7168

E-mail : meshin@yurim.skku.ac.kr