

직류 급전시스템에서의 지락고장에 따른 전압상승 시뮬레이션

정호성, 한문섭, 박 영, 정상기, 권삼영  
한국철도기술연구원

Voltage rising simulation due to the ground fault in DC traction system

Hosung Jung, Moonseob Han, Young Park, Sanggi Chung, Samyoung Kwon  
Korea Railroad Research Institute

**Abstract** - DC traction system can damage human and other facilities due to the rising of rail potential. Therefore the earth fault detection relay protects system using rail potential induced in train operation and ground fault. However the conventional protection system cannot operate due to the fault resistance and might operate unwanted voltage rising due to the other substation ground fault. So this paper models DC traction system using PSCAD/EMTDC and simulates the rail potential rising. We can estimate the rail potential rising in DC traction system through the various simulation.

1. 서 론

직류 급전시스템은 레일을 귀환회로로 사용하기 때문에 레일로부터 누설되는 누설전류와 레일 전위상승이 발생한다. 국내의 경우에는 누설전류로 인한 지하 금속매설물에 영향을 최소화하기 위해 비접지 방식을 채택하여 운영하고 있으며 이러한 비접지 시스템에서는 열차 운행이나 지락사고시 레일전위의 상승으로 인해 인체 및 타 설비의 피해가 우려된다.

이러한 레일전위로 인한 인체 피해를 없애기 위해 IEC 62128-1에서는 지속시간에 따른 인체허용전압을 제시하고 있다. 또한 지락사고시 발생하는 레일전위 상승으로부터 인체 및 설비 보호를 위한 지락보호 시스템을 운영하고 있다. 하지만 기존에 운영되고 있는 지락보호 시스템의 경우 고장저항에 의한 부동작 및 급격한 레일 전위 상승으로 인한 동작의 우려가 있다.

따라서 본 논문에서는 전력해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 직류 급전시스템을 모델링하고, 기존의 지락보호 시스템의 운영 및 개선을 위해 열차 운행과 지락사고시 레일전위 크기에 대한 시뮬레이션을 수행하였다.

2. 본 론

2.1 직류 급전시스템에서의 레일전위 상승

직류 급전시스템은 접지방식에 따라 비접지, 직접접지, 다이오드 접지 등으로 구분할 수 있다. 접지방식에 따라 레일전위 및 누설전류의 크기가 다르게 나타나며, 국내에서는 누설전류로 인한 지하 금속매설물에 영향을 최소화하기 위해 비접지 방식을 채택하여 운영하고 있다. 그림 1은 비접지 방식에서의 차량 위치에 따른 레일전위 크기를 나타낸 것으로 일반적으로 변전소와 차량위치의 중간 지점을 기준으로 차량위치 방향으로는 정극성(+), 변전소 방향으로는 부극성(-)의 레일 전위가 나타난다 [1].

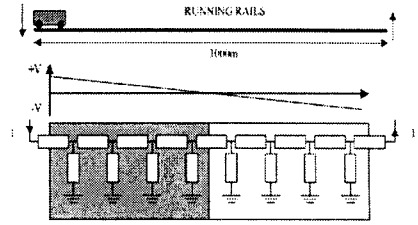


그림 1. 직류 급전시스템과 레일전위

2.2 인체 허용전압

직류 급전시스템에서의 레일전위 상승으로 인한 위험 전압과 관련하여 IEC 62128-1에서 인체에 위해를 가할 수 있는 전위 및 지속시간 등을 제시하고 있다[2].

표 1은 전류가 흐르는 지속시간에 대한 조건을 제시한 것으로 먼저 고장조건인 짧은 시간 조건에서는 접촉전압으로, 일반적인 동작조건인 일시적 조건과 영구적 조건에서는 신체허용전압을 제시하고 있다.

표 1. 지속시간 조건

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

표 2는 고장조건인 짧은 시간 조건에서 직류시스템의 최대 허용접촉전압과 동작조건에서 일시적으로 발생하는 직류시스템에서의 최대 신체접촉전압을 나타낸 것이다.

표 2. 짧은 시간조건에서의 최대 허용접촉전압(Ut) 및 일시적 시간조건에서의 최대 신체접촉전압(Ua)

t [s]	Ut [V]	t [s]	Ua [V]
0.02	940	0.6	310
0.05	770	0.7	270
0.1	660	0.8	240
0.2	535	0.9	200
0.3	480	1.0	170
0.4	435	≤ 300	150
0.5	395		

영구적인 조건에서는 신체접촉전압의 한계가 60V이내 이어야 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.

### 2.3 지락사고 보호시스템

직류 급전시스템에서는 단락사고(전차선과 레일간의 접촉)와 지락사고(전차선과 대지와 의 접촉)가 발생한다. 단락사고시에는 전차선과 레일간의 폐회로가 구성되어 사고전류를 이용하여 변전소의 보호계전기 및 직류 고속도차단기로 사고를 검출할 수 있다. 이에 반해 비접지방식에서 지락사고가 발생하는 경우에는 전차선과 대지간의 폐회로가 구성되지 않아 레일에 전위가 상승하며 이를 이용하여 지락사고를 검출하고 있다. 그림 2는 직류 급전시스템의 지락사고 검출 시스템으로 지락사고시 부급전선과 대지간의 전위 상승을 검출하여 고장을 판별하는 접지계전기(64P)를 적용하고 있다[3,4].

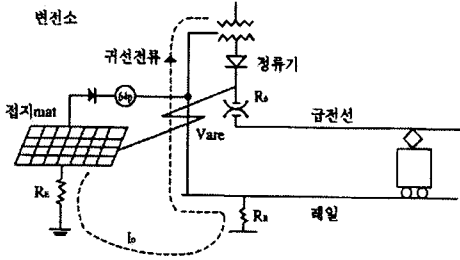


그림 2. 지락사고 보호방식

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

$$V_{64} = 1500 - V_{arc} \times (R_E + R_R) / (R_E + R_R + R_O) \quad (1)$$

$V_{arc}$ : 아크 전압(경험값 : 300V)

$R_E$ : 변전소 접지 매트 저항

$R_R$ : 레일의 대지 누설 저항

$R_O$ : 변전소의 내부 저항

일반적으로 지락사고시 부급전선에서는 1200V에 가까운 전압이 발생하지만 각 운영노선의 열차운행 조건, 대지저항, 급전구간 등의 조건이 달라 부급전선에 나타나는 전압의 크기가 다르게 나타나기 때문에 운영기관마다 접지계전기의 정정값을 달리 선정하고 있다. 운영기관에서는 30~600V까지 정정이 가능하고 3ms~0.1s 이내에 동작하는 계전기를 적용하거나 IEC 62128-1에서 제시하고 있는 인체허용 전압에 따라 자동으로 동작하는 계전기를 적용하고 있다.

하지만 기존의 지락보호 시스템의 경우 지락사고시 고장저항의 크기가 커지는 경우에는 부동작할 우려가 있으며, 또한 인근 변전소의 지락사고로 인한 전위 상승으로 인해 고장이 발생하지 않는 변전소의 보호시스템도 동작하여 대규모 정전이 발생할 우려가 있다. 따라서 정상적인 운전조건 및 사고발생시 나타나는 최대 레일전위 크기에 대한 예측을 통해 기존의 보호시스템의 운영 및 개선이 필요하다.

### 2.4 레일전위 해석을 직류 급전시스템 모델링

레일전위 크기를 시뮬레이션하기 위해서 전력해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 직류변전소, 차량, 그리고 전차선과 레일 및 레일과 대지간의 컨덕턴스로 구성된 회로를 모델링하였다. 그림 3은 수전 전압원, 3권선 변압기 및 다이오드 정류기로 구성된 직류변전소를 모델링한 것이며, 그림 4는 전차선로, 레일, 궤도, 대지저항 및 구성요소간의 상호 임피던스로 구성된 귀환회로를 모델링한 것이다. 또한 표 3은 직류 급전시스템 구성 모델의 주요 사양 및 대표값을 나타낸 것이다[5,6].

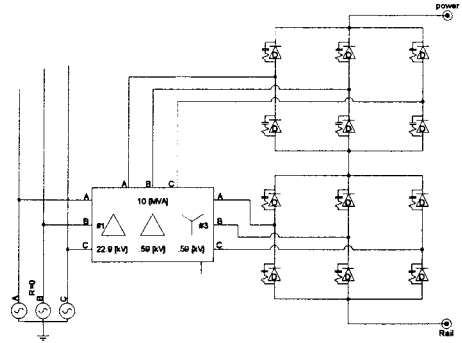


그림 3. 직류변전소 모델

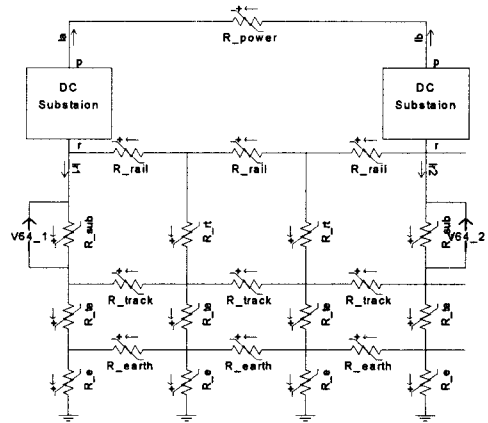


그림 4. 직류 급전회로 모델

표 3. 모델 사양 및 대표값

모델	사양 및 대표값
수전 전압원	22.9 kV, 200 MVA 이상
3권선 변압기	4520 KVA×2, 22.9/0.59 kV, Δ-Δ-Y
정류기	12 pulse diode, DC 1.5 kV 출력
R <sub>power</sub> (T-bar)	0.0203 Ω/km
R <sub>rail</sub> (레일)	0.0148Ω/km, 60kg 병렬 2본
R <sub>track</sub> (궤도)	50Ω/km
R <sub>earth</sub> (대지)	30Ω/km

### 2.5 시뮬레이션

레일전위의 크기를 예측하기 위해 그림 5와 같이 5개 직류변전소가 4km 간격으로 구성된 직류 급전시스템을 모델링하였다. 레일전위는 급전전압, 전차선 및 레일저항, 변전소간 간격, 레일과 대지간의 누설저항 등에 의해 영향을 받으며, 본 논문에서는 최대부하전류로 운전되는 열차의 운행조건 및 사고 조건에 따른 레일전위 크기를 시뮬레이션 하였다.

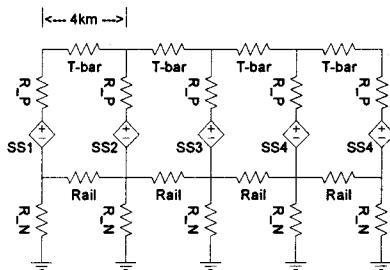


그림 5. 모델계통

그림 6은 열차 운행에 따른 레일전위 크기를 비교한 것으로, 변전소 2와 변전소 3 구간에서 최대 전류의 차량 한 대가 운전하는 경우 변전소 2를 기준으로 차량위치가 0%, 25%, 50%, 75%, 100%(변전소 3)에 위치하는 경우에 5개 변전소의 레일전위 크기를 나타낸 것이다. 대체적으로 차량 운행으로 인해 변전소에서 전위가 부극성이지만 변전소 지점에 차량이 지나갈 때에는 해당 변전소의 전위가 정극성으로 변함을 확인할 수 있다.

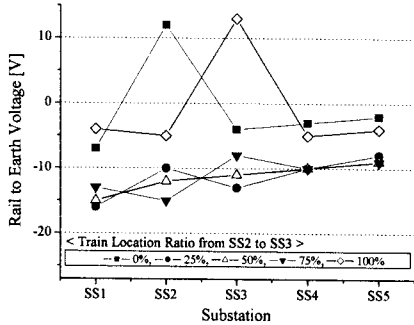


그림 6. 열차 운행에 따른 레일전위

그림 7은 변전소 3과 변전소 4의 중간지점에서 단락 및 지락사고 발생시의 5개 변전소의 레일전위 값을 나타낸 것이다. 단락사고의 경우에 최대 레일전위가 대략 -120V까지 발생하는 반면에 지락사고의 경우에 지락사고가 발생한 변전소 구간에서 -500V이상으로 전위가 상승하였으며 고장이 발생하지 않은 구간은 변전소의 레일전위도 최대 -300V까지 증가함을 확인할 수 있다.

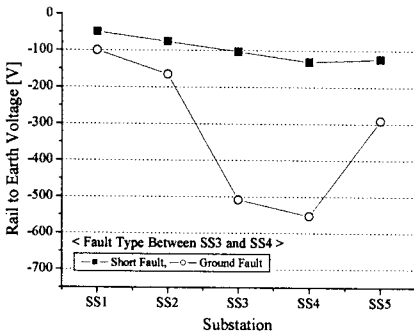


그림 7. 단락사고 및 지락사고시의 레일전위

그림 8은 변전소 3과 변전소 4의 중간지점에서 발생한 지락사고시 사고저항의 크기에 따른 레일전위 상승값을 비교한 것이다. 사고지점의 사고저항이 50[Ω] 이상이 되는 경우에는 레일전위 상승이 -300[V] 이내여서 접지계 전기 정정값에 따라 사고검출이 불가능할 수 있다.

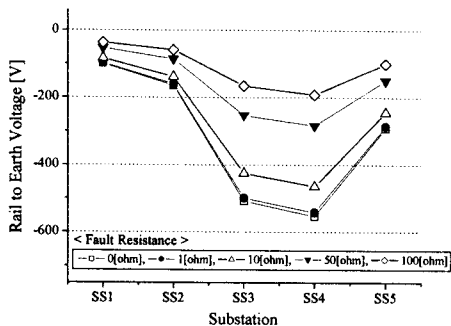


그림 8. 사고저항 크기에 따른 레일전위

그림 9는 변전소 3과 변전소 4의 구간에서 변전소 3을 기준으로 0%, 25%, 50%, 75%, 100%(변전소 4) 지점에서 지락사고가 발생한 경우의 5개 변전소의 레일전위의 크기를 나타낸 것이다. 변전소 및 지락사고 위치에 따라 레일전위 크기가 다르게 나타나지만 일부 지락사고의 경우에는 지락사고가 발생한 변전소 3과 변전소 4 이외의 변전소에서도 -300V 이상의 큰 레일전위가 발생함을 알 수 있다. 이러한 레일전위 상승은 사고구간 뿐만 아니라 정상 구간의 변전소의 전력공급을 차단할 수 있어 직류 급전구간의 전체적인 정전을 야기할 수도 있다

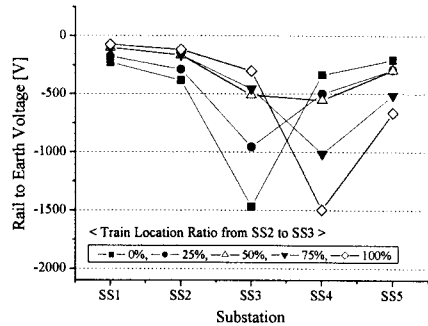


그림 9. 사고위치에 따른 레일전위

### 3. 결 론

본 논문에서는 열차 운행 및 지락사고시의 레일전위 크기를 예측하기 위해 PSCAD/EMTDC를 이용하여 직류 급전시스템을 모델링하였다. 최대부하의 열차 운행에 따라 변전소의 부극의 전위가 부극이 나타남을 확인하였으며, 단락사고시에는 사고시 레일전위의 상승이 크게 증가하지 않은 반면에 지락사고시에는 사고구간의 양 변전소의 전위가 상승하였다. 또한 지락사고시 고장저항의 크기가 커지는 경우에 레일전위 상승이 크지 않아 보호시스템의 사고검출이 어려웠으며, 지락사고의 위치에 따라 고장구간의 변전소뿐만 아니라 고장구간 이외의 변전소에서도 상당히 큰 레일전위가 상승하여 대규모 정전이 발생할 수도 있음을 확인하였다.

향후에는 직류 급전시스템의 파라미터에 따른 레일전위 분석 및 보다 신뢰성 있는 보호시스템에 대한 연구가 진행되어야 한다.

### 감사의 글

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

### [참고 문헌]

- [1] Ian Cotton, "Stray Current Control in DC Mass Transit Systems", IEEE Transactions on vehicular technology, 2005
- [2] 한국표준협회, "KS C IEC 62128-1 철도용 고정설비-제1부 : 전기 안전 및 접지에 관련된 보호 조치", 2006
- [3] 직류전기철도 보호기술 조사전문위원회, "직류 전기철도에서의 보호 및 보호협조에 관한 조사", 일본전기학회, 1994
- [4] 김성길, "도시철도기술자료집(7) 전기", 서울특별시 지하철건설본부, 2005
- [5] 한문섭, 정호성, "직류급전시스템의 레일전위와 누설전류 관점에서의 설계 파라미터 연구", 한국철도학회 춘계학술대회, 2007.5
- [6] Shi-Lin Chen, "Analysis of Rail Potential and Stray Current for Taipei Metro", IEEE Transactions on vehicular technology, 2005