

# 전기철도 급전시스템의 매설접지 방식 유용성 평가

## Evaluation of Efficiency for Grounding System on the Electrified Railways

창상훈\* 한문섭\*\* 이장무\*\*\* 이형수\*\*\*\* 김정훈\*\*\*\*\*

Chang, Sang-Hoon Han, Moon -Sub Lee, Chang-Moo Lee, Hyung-Soo Kim, Jung-Hoon

### ABSTRACT

Recently, the Korea National Railways (KNR) is undertaking a program of electrification of the existing railway routes. In order to implement the ongoing plan, KNR authorized a preliminary engineering study of its electrical systems. This effort included a comprehensive analysis of new grounding networks. The new grounding system runs in parallel with the rails and is connected to all metal structures such as rails, overhead protection wires and substation grounding grids etc., creating an equipotential ground network. This paper presents a study on coupling levels that can disturb signaling and telecommunications in adoption of the new grounding network. The simulation for the study is carried out using Matlab software. Several different scenarios are analyzed, including the load condition and a few fault conditions with different fault locations. The induced potentials on the communication cables are computed. The effect of the buried ground wires is also analyzed by comparing the results with and without the presence of the ground wires. The results presented in the paper can be used as a reference for estimating coupling levels in similar rail systems.

### 1. 서론

철도의 전철화 설계에서 핵심적 부분을 이루는 것 중의 하나로 접지시스템을 들 수 있으며, 최근 유럽에서 이와 관련된 일련의 유럽 단일 규격(EN)을 제정하여 설계에 반영하도록 있다[1]. 주된 내용은 전기철도에서 인체 안전과 설비보호를 위한 구체적인 요구사항을 다루고 있는데, 이를 충족하기 위하여 적절한 접지와 본딩을 하도록 하고 있다.

우리 나라에서도 최근 철도 현대화 사업의 일환으로 고속철도의 건설과 기존철도의 전철화에 노력을 집중하고 있는 가운데, 전철화 노선에서 인체 및 전자장비 보호에 대한 특별한 대책이 필요하게 되었다[2].

전기철도 시스템은 ① 가공전차선로, 전기차 및 레일로 구성되는 급전계통, ② 계전기를 이용한 신호케도회로, 본드 및 전철기, ③ 각종 통신·제어설비, ④ 열차통신을 위한 각종 무선설비, ⑤ 기타 전원으로 사용되는 고압 배전선로로 구성되어 있다. 이들 사이에는 유도원(①, ⑤)과 피유도원(②, ③, ④) 사이에는 유도, 전도 및 정전결합이 발생되어 인체 및 장비에 감전과 장애를 일으키게 된다. 이 중 유도성과 전도성 결합은 계통에 고장이 발생하였을 때 크게 나며, 고장의 형태는 상용주파수 영역의 고장과 낙뢰나 뇌썩지 등과 같은 과도상태일 때의 두 가지로 고려할 수 있는데 여기서는 지락고장 등 상용주파수 영역의 고장을 다루고자 한다. 고장으로 인한 지표면 전위상승 때문에 유도원과 피유도원 사이에 전위차가 발생하는 전위차를 안전기준 이하가 되도록 설계를 하는 것이 필요하며, 이는 접지와 본딩을 통한 접지시스템을 구축을 통해 달성될 수 있다.

\* 한국철도기술연구원 책임연구원, 정회원  
\*\* 한국철도기술연구원 선임연구원, 정회원  
\*\*\* 한국철도기술연구원 주임연구원, 정회원  
\*\*\*\* 한국산업안전공단 책임연구원, 비회원  
\*\*\*\*\* 홍익대학교 전기제어공학과 교수, 정회원

이 연구에서는 우리 나라 전기철도에서 동일계통에 다른 방식의 접지, 즉 여러 접지 중별로 적용한 접지방식과 전위차 발생을 최소화하기 위한 등전위 유지에 중점을 둔 매설접지 방식의 장단점을 비교하고자 하였다[3]. 전자는 지금까지 전철에서 적용하여온 방식이고 후자는 고속철도의 도입과 함께 향후에 적용하고자하는 방식이다[4~7].

여기서는 Matlab[7]을 이용하여 실제계를 모의하고 유도성 및 전도성 결합의 정량적 계산을 통하여 양 방법을 해석하고자 하였다.

## 2. 지락고장 시뮬레이션

지락발생시 전위분포 해석을 위한 AT급전회로의 모델을 Fig. 2-1에 나타냈다. 선로 임피던스는 Carson-Pollaczek의 예측계산 결과를 적용하였다.

전차선로에서의 지락고장 시뮬레이션을 위해 그림과 같이 전철변전소의 M상과 T상중 한 상만을 고려하여 전차선로의 전체거리를 20km로 하고 10km 위치에 보조급전구분소(SSP), 20km 위치에 급전구분소(SP)가 설치되어 있다고 가정하였다. 또한 지락은 전차선이 레일에 접촉된 경우를 고려하였다.

지락 시뮬레이션을 위하여 레일과 대지간의 누설저항을 청정시와 우천시로 구별하여 각각  $10^4 \Omega$ 과  $10 \Omega$ 으로 고려하고, 전철변전소로부터 1, 5, 10, 15와 20km 지점에 지락 시킨 경우를 모의하였다.

### (1) 회로 모델링

AT급전회로의 모델링은 시뮬레이션의 정확성을 높이기 위해 PI( $\pi$ )등가형 선로모델을 사용하였으며, Fig. 2-4에서 보는바와 같이 AC 전원과 리액터를 이용하여 스코트 변압기를 포함한 전원을, 전차선과 급전선 및 보호선을 레일과의 PI 분포회로로 하여 전차선로를, 스위치를 사용하여 전차선의 대지지락을 모델링 하였다.

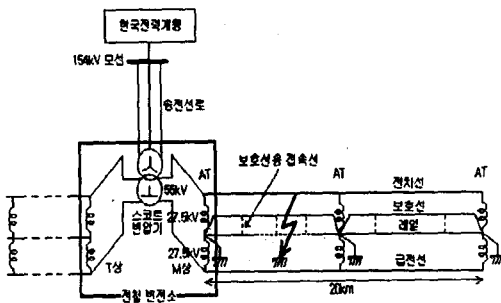


Fig. 2-1 전철급전회로 고장발생 개념도

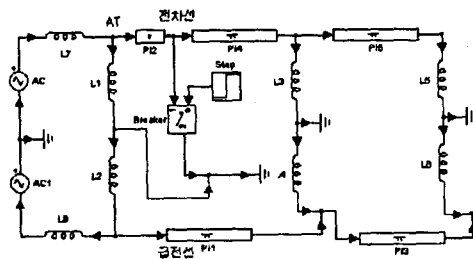


Fig. 2-2 지락 시뮬레이션 Matlab 모델

### 2) 시뮬레이션 결과

Fig. 2-3은 우천시 지락위치(변전소로부터 1, 5, 10, 15와 20km 지점)에 따른 전철변전소로부터의 거리별 보호선의 전위분포를 나타낸 것으로 변전소에 가까운 지점에서 지락이 발생하였을 때 전위상승이 가장 큰 것으로 나타났으며, AT가 설치된 지점에서 변압기의 영향으로 5, 10, 15km지점 지락사고 모의시에 전위가 상승한다.

Fig. 2-4는 청정시 지락사고에 대한 결과를 나타낸 것으로 우천시 보다 전체적으로 전위분포가 높게 나타났는데 이는 고저항 지락에 기인한다.

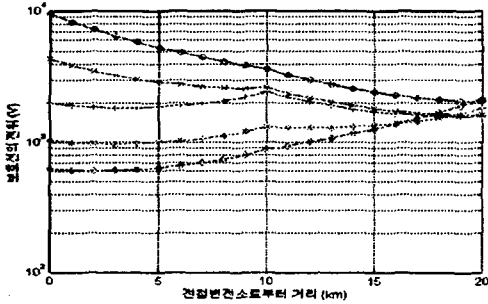


Fig. 2-3 우천시 지락위치에 따른 보호선 전위분포

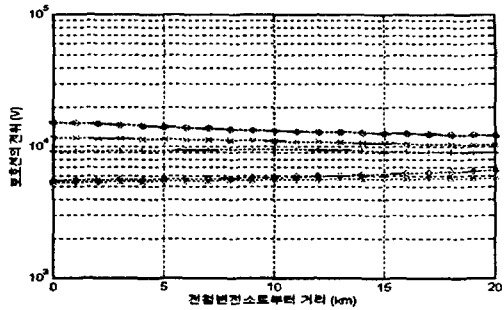


Fig. 2-4 청정시 지락위치에 따른 보호선 전위분포

### 3. 사례연구

지락사고가 발생할 때 레일전위 및 신호·통신기기에 가해지는 유도전압의 크기에 대해 기존 접지방식과 매설접지방식(공용접지)을 구성하여 시물레이션을 실시하였다. 레일전위 및 신호·통신기기에 가해지는 유도전압의 기준은 ITU, EN 50122, 철도통신시설규정의 권고치를 기준으로 평가하였다. 즉, 레일전위는 정상 운전상태에서 60 V이하, 고장상태에서 650 V(0.2 s 이내)이하를 기준으로 하였으며 신호·통신기기의 내전압은 2,000V이내를 기준으로 하였다. 기존접지방식의 구성도와 매설접지방식의 구성도를 Fig. 3-1과 3-2에 나타냈다.

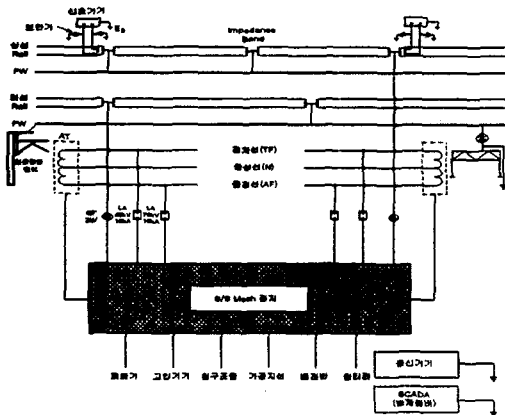


Fig. 3-1 전기철도 기존접지방식 구성도

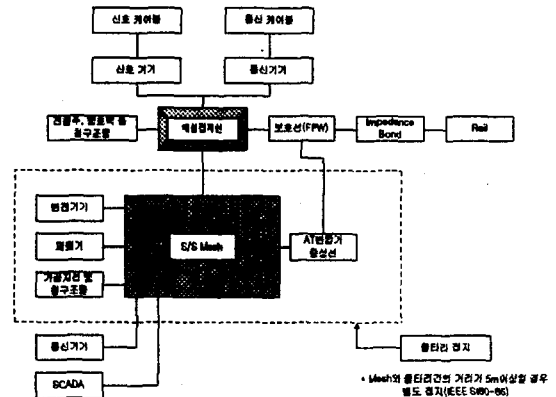


Fig. 3-2 매설접지방식 구성도

#### 3-1 기존접지방식과 매설접지방식 비교 시물레이션

##### 가. 회로 모델링

시물레이션 구간은 전철화 설계가 완료된 충주SS~음성SP(23.78km)간을 선정하였으며, 선로 임피던스는 시물레이션의 정확성을 기하기 위해 실제 측정값을 적용하였다. 기존접지방식은

충북선 설계방식과 동일한 영동선(영주-철암), 매설접지방식은 고속철도시험선 구간(신청주S S~용정SP)의 것을 적용하였으며, Table 3-1과 같다.

Table 3-1 시물레이션에 적용한 선로 임피던스

임피던스	기존 접지방식	매설 접지방식
전 원	0.22+j0.11	0.22+j0.11
전차선	0.1417+j0.3231	0.1417+j0.3231
보호선/레일/매설접지	0.0906+j0.1575	0.0547+j0.1215
급전선	0.1617+j0.4783	0.1617+j0.4783
정전용량	$9.4 \times 10^{-9}$	$9.4 \times 10^{-9}$

지락사고 발생시 레일전위 및 신호·통신기기의 전위분포 해석을 위한 AT급전회로의 모델링 결과를 Fig. 3-1에 나타내었으며, 시물레이션을 정확히 모사하기 위해 PI( $\pi$ )등가형 선로모델을 사용하였다. 이상전압에 대한 해석은 Matlab을 사용하였으며, 시물레이션은 다음과 같은 방법으로 수행되었다.

각 접지시스템 구성(기존접지방식, 매설접지방식)시 변전소, 말단, AT중간에서 이상전압이 발생한 것으로 가정하여 이때의 고장전류, 레일전위, 신호·통신기기에서 전위상승에 대해 분석하였으며 이상전압이 발생한 선로의 반대측 선로에 유도되는 현상에 대해서도 영향을 분석하는 방법으로 수행되었다.

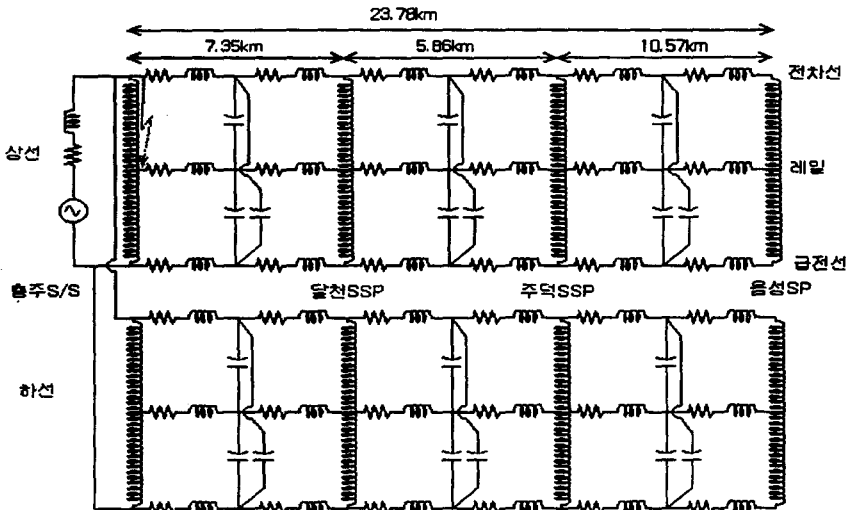


Fig. 3-3 시물레이션에 적용하기 위한 AT급전회로 모델링

### 나. 시물레이션 결과

#### (1) 고장전류

지락에 의한 고장이 변전소측에서 발생한 경우와 선로 말단인 구분소측에서 발생한 경우에 대해 모의한 결과 고장전류는 기존접지방식의 경우 변전소측에서 고장이 발생하였을 때 약

11kA이며 고장이 발생하지 않은 반대측 선로에는 약 2kA가 유도되는 것으로 분석되었다. 또한 구분소측에서 고장이 발생한 경우에는 말단측에서 최고 2kA정도이며, 반대측 선로에는 거의 유도에 의한 영향이 없는 것으로 분석되었다.

Fig. 3-4~3-8은 시뮬레이션 결과를 나타낸 것이다.

(2) 레일전위분포 해석

각 접지방식별로 전차선로의 지락사고 발생시 레일전위에 대한 시뮬레이션 결과는 다음과 같다. 변전소측에서 고장이 발생한 것을 가정하여 각 접지방식별로 레일전위 분포에 대한 시뮬레이션 결과 매설접지방식이 기존접지방식에 비해 약 20%~80%정도 레일전위가 낮은 것으로 분석되었다. 또한 말단측(SP)측에서 고장이 발생한 것을 가정하여 각 접지방식별로 레일전위 분포에 대한 시뮬레이션 결과 매설접지방식이 기존접지방식에 비해 약 10%~60%정도 레일전위가 낮은 것으로 분석되었다.

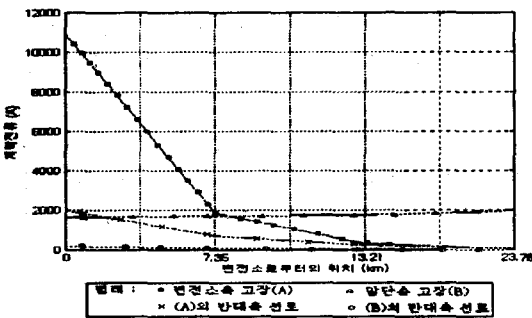


Fig. 3-4 기존접지방식 고장전류

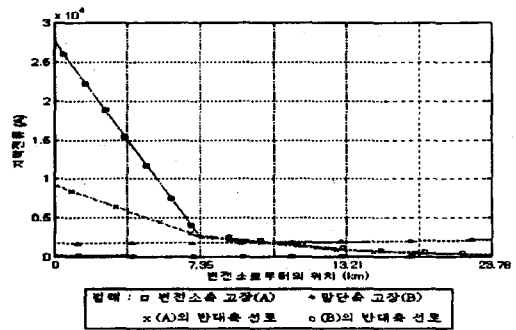


Fig. 3-5 매설접지방식 고장전류

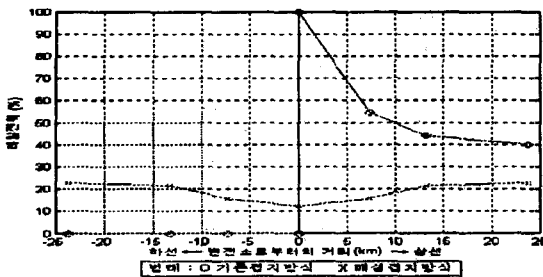


Fig. 3-6 변전소측 고장시 접지방식별 레일전위 비교

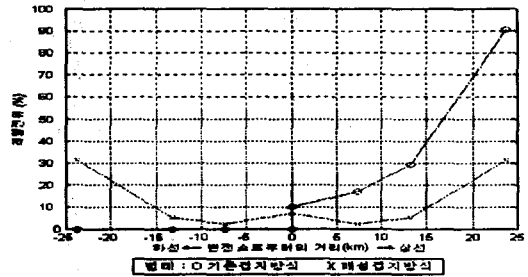


Fig. 3-7 말단측(SP) 고장시 접지방식별 레일전위 비교

(3) 접지방식별 신호·통신기기 전위분포

고장이 발생한 경우 각 접지방식별로 신호·통신기기에 유도되는 전위를 분석한 결과 매설 접지방식이 기존접지방식에 비해 약 15~40%정도 낮아 안전한 것으로 분석되었다.

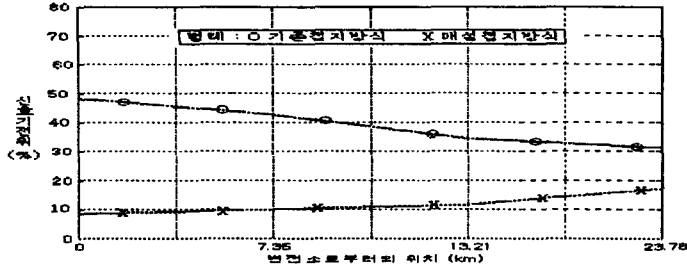


Fig. 3-8 접지방식별 신호·통신기기에 가해지는 유도전압

#### 4. 결 론

전철급전회로에서 고장이 발생하였을 때 전위차로 인한 안전성을 검토하기 위해 기존접지방식과 매설접지방식에 대해 비교 시뮬레이션을 통해 검증하였다. 시뮬레이션 결과는 다음과 같다.

(i) 고장전류에 대한 분석결과 기존접지방식이 11kA, 매설접지방식이 27kA로 고장발생시 기존접지방식의 경우 고장전류가 대지 또는 타 계통에 분류되어 흐르는데 비해 매설접지방식의 경우 고장전류의 대부분이 변전소로 유입되어 타 계통에 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

(ii) 전기차 운행시(정상상태) 레일전위(ITU 권고치 : 60V이하)는 기존접지방식이 40~80V, 매설접지방식이 30V이하로 귀선회로를 구성하고 있는 각 선로의 임피던스가 기존접지방식에 비해 매설접지방식이 상대적으로 저임피던스 회로를 구성하고 있으므로 전위상승이 낮다.

(iii) 고장발생시 레일전위(ITU 권고치 : 650V이하/고장시간 0.2s)는 기존접지방식과 매설접지방식 모두 650V이하로 고장지속시간이 레일전위의 크기를 결정하는 요인이 되는데 기존접지방식의 경우 고저항 지락으로 인한 사고를 검지하기 곤란하여 고장지속시간이 길어질 경우 허용 접촉전압에 비해 높은 값이 되므로 안전성에 문제가 있다.

(iv) 고장시 신호·통신기기 유도전압(저압기기 내전압 기준 : 2000V이하)은 기존접지방식이 2,000V이하, 매설접지방식이 1,300V이하로 고장발생시 고장전류의 변전소 유입 여부에 따라 결정되는 값으로 기존접지방식의 경우 대지 또는 레일을 통해 신호·통신기기에 유도되거나 직접 접촉이 우려되어 고장지점과 인접되어 있을 때 대지전위 상승에 의한 전위차로 손손될 우려가 있으나 매설접지방식의 경우에는 모든 접지를 공유함으로써 전위차에 의한 손상에 대해서는 보호가 가능함을 알 수 있다.

각 접지방식에 대한 비교 검토결과 기존접지방식에 비해 매설접지방식이 레일전위(정상·고장상태), 약전기에 유도되는 전위, 변전소로 귀환되는 고장전류 유입을 등에서 보다 효과적이다. 있다.

위 결과는 시뮬레이션에 의한 레일 및 대지전위 등에 대한 분석을 실시한 것으로 실제 매설접지방식이 구성되는 충복선, 경부선 등에 대해 대지전위상승(GPR)을 실측하여 시뮬레이션의 유용성을 검증하여 전기철도 접지시스템 표준으로 적용여부를 판정할 필요가 있다.

#### [참고문헌]

1. CENELEC, "EN 50121-1 Railway applications-Fixed installations, Part 1: Protective provisions relating to electrical safety and earthing", 1997
2. Seoul-Pusan High Speed Rail Project Transmittal Sheet, "Specifications for Traction Current Return, Earthing and Protections", pp.1~33, 1996. 6

3. Hyungsoo Lee, Jinho Song, Keunbae Ryu, Sanghoon Chang, "Computation of Inductive Coupling Between Electrified Railways and Communication Cables", WCRR '99, Kokubunji-shi, Japan, October 19- October 22, 1999
4. N. Nedelchev, "Influence of Earth Connection on the Operation of Railway Track Circuit" IEE Proc-Electr. Power Appl. vol. 144, No. 3, pp.215~219, 1997.3
5. K.S Bahra and P.G. Batty, "Earthing And Bonding of Electrified Railways", IEE International conference on Electric Railways, pp. 296~302, 1998
6. Egid Schneider and Erlangen, "Bahnrückstromführung und Eadung bei Bahnanlagen1, 2" Elektrische Bahnen 96(1998)4, pp. 85~90, 1998. 4
7. Egid Schneider, "Combating EMI Through Earthing System Design", EMC rail the Brewerv, London, 1999. 10