낙뢰 피해 최소화를 위한 공동 접지망 구성

Common Earth Network constitution for minimize surge damage

김용규*, 백종현**, 최경일***, 류근수****

KIM Yong-Kyu, BAEK Jong-Hyun, CHOI Kyoung-Il, YOO Keun-Su

ABSTRACT

Surge proof equipment is an installation to make surge flow on the ground promptly so as to reduce surge-related damage on infrastructure, not to prevent surge from falling down on infrastructure directly. Compared with classical line individual earth, High speed line common earth has higher surge characteristic and plays a significant role to prevent infrastructure damage and injuries from surge, or short circuit accident between 25kV catenary and rail. In this paper, we analyzed the case of accident that caused communication/signaling system impaired while a tractor crossing level crossing at Honam line; in addition, we examined the accident reduction measures to minimize injury and property damage from cutting accidents with respect to common earth network.

1. 서론

기후 조건에 따라 낙뢰는 주로 음전하를 갖는 구름과 대지 사이의 온도차에 따라 발생한다. 대지는 양 정전 부하를, 구름의 하층은 음 정전 부하를 받게 되며, 전기장은 구름과 돌출 건물 또는 언덕 지역 간에 방전 전류가 크게 상승할 때까지 증가한다. 만약 방전 전류가 유지하기 어려운 수준에 도달하면, 낙뢰를 발생시키며, 이는 면적(㎢)과 시간(년)에 의해 평균 낙뢰를 Keraunic 지수로 표시한다. 이들 지수는 대지의 경우 약 “2”로 주어지지만, 산악 지대의 경우에는 “10”까지 도달할 수 있다. 또한 낙뢰와 함께 폭풍우가 동반되며, 폭풍우는 거대한 특수 열을 방출함으로써 낙뢰, 천둥, 전자 방사, 대지 과전압과 대전류 밀도 등을 유발하는 원인을 제공한다. 대지 과전압은 절연부에 비해 매우 큰 값을 가지며, 구름과 대지사이에 주어지는 큰 전류 밀도는 임의의 전도체에 대해 1㎲의 시간 동안 최대 200kA까지 도달할 수 있으며, 낙뢰가 발생할 지역을 예측하는 것은 쉽지 않기 때문에 모든 철도 시스템 관련 신호기계실, 신호소, 등과 같이 전기 전자 장비, 컴퓨터 및 Vital 안전 설비가 설치된 장소에는 낙뢰로부터 기기 보호를 위한 설비를 필요로 한다.

철도 시스템에서 낙뢰로부터 선로변 시설물을 보호하기 위해서는 다음과 같은 기초적인 원리를 기본으로 특성화된다. : 첫 번째로 낙뢰는 지리적인 위치에 의존함에 따라 국내의 경우에도 KTX 운행 지역에 대해 Keraunic 지수를 조사한다면 KTX 운행에 도움이 될 것으로 예상된다. 두 번째로 낙뢰는 지면의 고유 저항에 의존함으로서 지면의 고유 저항이 매우 높

* 책임저자 : 정회원, 한국철도기술연구원 열차제어통신연구실, 실장
E-mail : ygkiml@krri.re.kr
TEL : (031)460-5434 FAX : (031)460-5449
** 정회원, 한국철도기술연구원 열차제어통신연구실, 선임연구원
*** 정회원, 한국철도공사 전기기술단 부장,
**** 정회원, 한국철도시설공단 기술연구소 부장

은 경우에는 낙뢰가 떨어질 때 금속 구조물과 대지 깊숙한 곳 사이의 전압이 매우 높게 상승하게 된다. 이로 인해 시설물을 보호하기 위한 추가 장치를 필요로 한다. 세 번째로 낙뢰로 인한 피해는 낙뢰가 직접적으로 시설물에 떨어지는 경우, 관련 피해는 매우 크며, 비록 낙뢰 보호 장치가 설치되어 있어도 신호나 통신 관련 설비의 피해를 막을 수 있는 방법은 존재하지 않는다. 그러나 대부분의 낙뢰는 신호 또는 통신 설비가 전차선 보다 낮은 위치에 설치됨에 따라 직접적인 영향을 받지 않는다. 낙뢰가 간접적으로 시설물에 떨어지는 경우에는 낙뢰로 인한 피해를 충분히 감소할 수 있으며, 이는 쉽게 통제할 수 있다. 마지막으로 낙뢰는 공중에 가설한 금속망, 특히 전기가 흐르는 매체를 타고 선로변 시설물 또는 신호기계실로 유입됨으로서 변압기나 컨버터, 정류기 등과 같은 전기 공급 장치는 항상 낙뢰 위험에 노출되는 것으로

2. 낙뢰로부터의 시설물 보호 원리

철도 시스템에서 낙뢰는 주로 가공지선 또는 전차선에 떨어지며, 낙뢰에 동반되는 대 전류는 전기철도의 전력 급전 설비, Standby 장비 및 철도 시스템의 전기 기기를 파괴할 수 있으나, 이러한 현상은 서지 피뢰기를 사용함으로써 관련 전류를 대지로 흐르도록 유도할 수 있다. 여기서 Standby 장비는 주로 철도 시스템에서 Standby 모드를 위해 설치된 매우 낮은 임피던스를 갖는 축전기로 낙뢰에 의한 고주파 과전압 천이에 매우 효과적인 충격 흡수 장치로 작용한다. 가공지선은 각각의 전차선주를 통해 접지망에 연결되며, 낙뢰 전류는 접지 케이블 연결망을 통해 흐른다. 이는 트로프에 설치된 도관 내부의 신호 및 통신 선로에 영향을 인가할 수 있는 전자파 간섭을 생성할 수 있다. 선로변에 설치된 신호소 및 통신소 또는 관련 전기 설비가 설치된 장소에도 가끔 낙뢰에 의한 충격의 영향을 받을 수 있지만 이러한 현상은 전차선, 공중보호선, 철주, 전차선주, 선로를 포함하는 전기 철도 시스템의 광범위한 금속 구조의 접지망에 의해 거의 발생하지 않을 것으로 예측된다. 가장 간단한 형태의 낙뢰로부터의 보호 시스템 구성은 낙뢰 피뢰침, 접지망, 서지 피뢰기 등으로 지붕에 설치되는 낙뢰 피뢰침은 직접 도선을 통해 접지망에 연결된다. 접지에 관한 사항은 단독 접지와 공동 접지로 분류되며, 낙뢰 및 과전압으로부터의 유지보수 요원 보호는 물론 철도 시스템 전기 설비 보호의 중요한 역할을 한다. 서지 피뢰기, 차폐 변압기 등도 부분적으로 낙뢰에 대한 보호 작용을 실행하지만, 유지보수 요원 및 전기 설비의 보호 시스템이 여러 가지 다양한 특수 규정에 부합될지라도 철도 시스템에서는 낙뢰, 과전압, EMI로부터의 유지보수 요원 및 전기 설비 보호를 위한 가장 중요한 방안은 접지망 구성 방식과 함께 고려되어야 한다. 이러한 사항은 전기철도 시스템에서 처음으로 공동 접지방식을 사용하여 낙뢰로부터의 피해를 최소화한 프랑스 철도청에서 검증되고, 규정화하였다. 낙뢰 및 과전압으로부터의 유지보수 요원 보호 시스템의 원리는 낙뢰가 발생한 경우에 유지보수 요원의 보호를 위해 최대한 가까운 경로를 통해 낙뢰 전류를 지하의 접지망으로 유도하기 위한 통로 구성을 의미한다. 이는 낙뢰 전류를 유도하거나 제거할 수 없기 때문에 낙뢰 전류를 간단하게 차단하고 큰 장애없이 접지망으로 전송해야 하며, 유지보수 요원 보호는 유럽 규정 EN50122.1에 명시되어 있다.

그림 1은 이러한 규정에 대한 내용으로 시간에 대한 전차선 전류 감전 전압을 나타낸다. 만약 1000V의 전압이 유지보수 요원에게 감전된 경우, 감전 경과 시간이 0.05초 이하에서만 유지보수 요원의 안전을 보장할 수 있다는 것을 그림 1에서 확인할 수 있다. 또한 감전 시간이 길면 길수록 감전 전압은 더욱 더 작어야만 인명 피해를 최대한 감소할 수 있음을 쉽게 확인할 수 있다. 그림 1은 현재 유럽에서 사용하고 있는 유지보수 요원 보호 관련 규정

(EN50122.1)으로, 반드시 만족하도록 명시되어 있으며, 접지망 구성, EMI로부터의 신호 시스템 보호, 신호기계실 접지망 설계, 낙뢰 보호 장비 및 낙뢰 보호 원리 등은 이러한 규정을 충족하기 위해 연구되었으며, 프랑스 철도청의 경우에는 공동 접지망 구성을 통하여 위의 규정을 준수하고 있다.

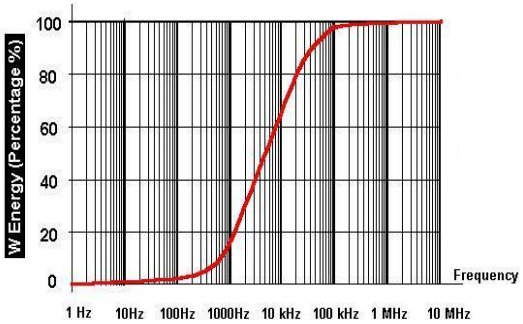

그림 1. 낙뢰 에너지 분포율

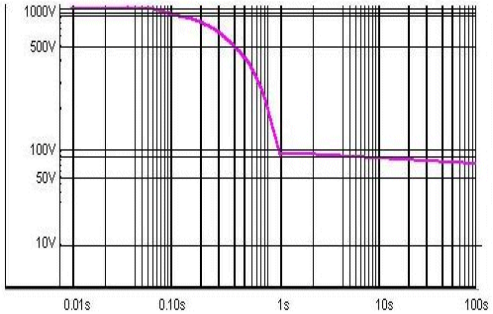

그림 2. 시간에 따른 감전 허용 전압

3. 공동접지망의 낙뢰 보호 효과

낙뢰전류는 대부분의 경우 대지와 절연되어 있는 고지대에서 대지에 연결되어 있는 저지대 쪽으로 이동한다. 이러한 낙뢰전류는 때때로 가공지선을 통해 흐르며, 가공지선은 이러한 전류를 역과 건널목까지 운반한다. 수 kHz의 주파수를 갖는 낙뢰 전류는 10kA 이상의 매우 강한 전류로 주어질 수 있기 때문에 가장 빠르고 직접적인 통로를 통해 즉시 대지에 방류해야 한다. 전류가 흐를 때 토양의 표면은 단시간 동안 높은 전위(>1 kV)에 도달하며, 금속 장비와 구조물들은 큰 크기의 전위의 영향을 받지 않기 위해 모든 지점에서 대지와 레일, 금속구조물간에 완벽한 등전위를 실현해야 할 절대적인 필요성을 갖는다. 따라서 낙뢰는 신호 또는 통신 장비를 통과하지 않고 가능한 최소의 저항을 가진 가장 빠른 접지망을 통해 대지로 유도되도록 구성되어야 하며, 금속체 구조물, 랙, 함 및 부품들은 상호간에, 그리고 접지망에 전기적으로 연결함으로서 등전위를 구성하여 인명 및 재산을 보호할 수 있는 공동 접지망의 개념이 도입되었다. 표 1은 프랑스 TGV 고속선과 기존선의 낙뢰로 인한 장애건수를 나타낸다. 표 1에서 공동 접지망을 사용하는 TGV 고속선의 Km 당 장애건수는 기존선의 장애건수보다 상대적으로 낮음을 알 수 있다. 이는 매설 접지 케이블을 설치하여 공동 접지망을 구성함으로써 장애율이 저하된 것으로 조사되었다.

표 1 2004년 프랑스철도청 낙뢰 통계

	TGV 지중해선 (리옹-마르세이유)	TGV 북선 (깔레-루아씨)	기존선
길이 (km)	309	303	18,000
장애수	10	9	1259
장애/km	0.032	0.029	0.069

낙뢰로부터 유지보수 요원을 보호하기 위한 프랑스 철도청의 공동 접지망 구성도는 그림 3과 같다. 그림 2에서 각각의 선로는 궤도회로의 임피던스 본드 중성점, 전차선 보호를 위한 2 개의 전차선 보호선, 선로변 장벽, 건물, 교량, 터널의 모든 금속재 구조, 각각의 전력용 변압기 및 단권변압기의 중성점, 매설 접지 케이블(BEC : Buried Earth Cable)이 연결

되어 있음을 쉽게 확인할 수 있다. 또한 귀선 전류의 평형 및 각각의 궤도에 인가되는 선로 및 접지 전압의 감소를 위해 사용하는 건넘선과 반건넘선이 1500m로 주어짐으로서 고속선의 UM71 궤도회로 실제 길이에 부합되도록 구성되어 있음을 알 수 있다.

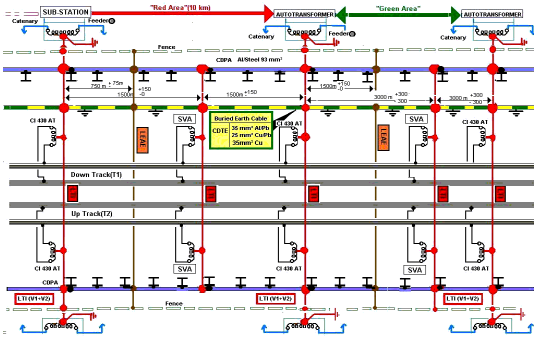

그림 3. 프랑스철도청의 접지망 구성

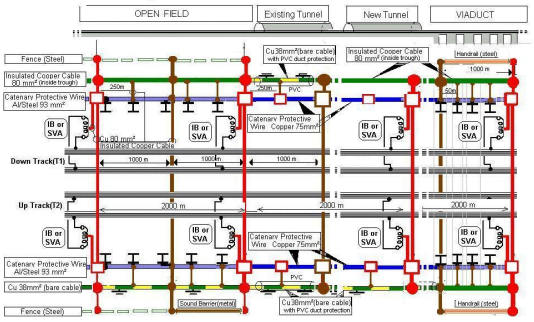

그림 4. 경부고속선의 접지망 구성

그림 4는 경부고속선의 접지망 구성도를 나타낸다. 경부고속선과 프랑스 고속선의 접지망은 단지 매설 접지선의 시공에 따른 차이점이 존재할 뿐, 동일한 원리에 의해 구성되어 있다. 그림 2의 프랑스 고속선의 접지망은 매설 접지선이 선로변의 한 방향에 대해 주어진 반면, 그림 3의 우리나라의 고속선 접지망의 경우에는 선로변 양측에 모두 매설 접지선이 시공되어 있다. 이는 고속선의 대부분이 터널과 교량으로 주어짐에 따라 접지선 시공상의 어려움 등으로 인해 선로변 양측에 매설 접지선을 시공한 것으로 추정되며, 접지 효과 측면에서는 단 방향 설치와 큰 차이점을 갖지 않는다.

4. 호남선 지락 설비 검토

2005년 10월 호남선 건널목에서 트랙터가 전차선 지락 사고를 일으켜 건널목과 역내 통신/신호 시설물에 대한 피해를 유발하였다. 이에 따라 전차선 지락으로 피해가 발생한 건널목과 인근의 신호기계실 보호설비와 장비의 특성을 조사하였다. 호남선은 TI21 AF 궤도회로를 사용함에 따라 IN500 이라는 임피던스 본드가 설치되어 있다. 이는 최소한 매 3km마다 임피던스 본드의 중성점을 매설접지선과 전차선 보호선에 상호 연결한다. 또한 귀선 전류는 열차가 운행하는 선로의 레일, 각각의 선로에 설치된 임피던스 본드의 중성점을 통한 인근의 다른 선로의 레일, 전주에 설치되어 간접적으로 대지에 연결된 2개의 가공지선, 매설 접지선, 단독 접지 단자 및 대지와 접촉하는 금속체 전체와 관련된 접지망을 통해 흐르게 된다. 이러한 견인 귀선전류를 방류하는 접지망은 실제로 매우 복잡하며, 급전소 앞 레일에서 전류는 최대치가 되고 대지로 흐르는 전류는 양 급전소 사이에서 최대가 된다. 이는 접지망 전체가 변전소와 SP, SSP 방향으로의 전류의 귀선에 기여함을 의미한다. 귀선 전류와 관련하여 귀선전류의 분포를 좀 더 명확히 규명하기 위해 함열 SSP(69,195 km)와 황등 SSP(79,432 km) 사이에 설치되어 있는 대지와 레일에 연결된 보호설비에 대한 블록도 및 예상 귀선전류를 그림 4와 같이 구성하였다.

만약 함열 구간에서 가령 전차선 전류가 100A라고 가정한다면, 함열 SSP에서의 귀선 전류는 60A, 황등 SSP에서는 40A로 추정되며, 접지망의 전류는 각각 30A와 20A로 추정된다. 그러나 용성 건널목의 접지선의 측정 귀선 전류 10A는 접지망의 매쉬 구조를 고려한다면 약간 큰 것으로 분석된다. 따라서 지락 방지를 위해서는 관련 구간에 대한 임피던스 본드의 전류 분산을 점검해 볼 필요가 있다.

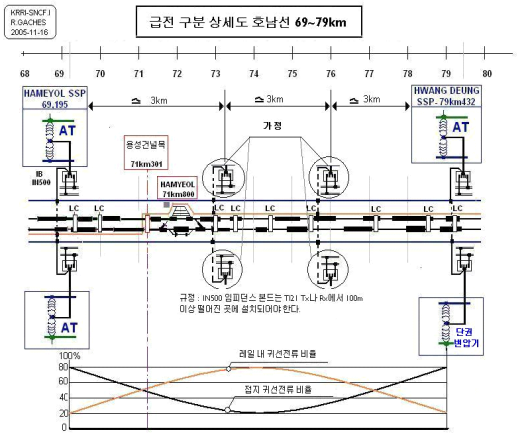

그림 4. 급전 구분소 상세도

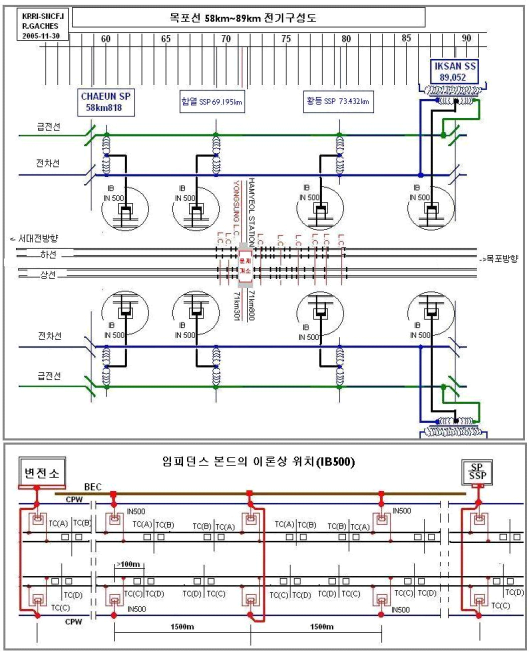

그림 5. 임피던스 본드의 위치

5. 공동 접지망에 의한 낙뢰 피해 방지

낙뢰로부터의 가장 기본적이며, 가장 완벽한 보호 방안인 접지망은 다음과 같은 형태로 구성되어야 한다. : 첫 번째로 매설 접지 케이블은 접지망의 기본적인 구조를 형성한다. 청동 재질의 등전위 접지 바를 중간 매개체로 하여 접지망에 연결한다. 참고로 서울-동대구간 경부 고속선에는 최소한 수 km마다 공동 접지를 위한 매설 접지 케이블이 상행선과 하행선 모두에 설치되어 있다. 이들 거리는 고속선에 전력을 공급하는 변전소의 전방에서는 기존 거리보다 더욱 단축하여 설치한다.

두 번째로 모든 금속체로 구성된 물질은 등 전위 접지 바에 연결하며, 접지 케이블의 연결은 가능한 짧고 구부러지지 않도록 구성한다. 이때 연결선은 금속판이나 케이블 피복이 등 전위 접지 바에 잘 연결 되어 있는지 확인하며, 접지 케이블이 구부러지면 낙뢰 전류의 주파수가 상승해도 수치가 0이 아닌 Z= L.ω의 임피던스를 갖는 케이블 선로를 구성하기 때문에 가능하면 케이블은 구부리지 않고 설치한다.

세 번째로 신호 또는 통신 기계실과 같은 건물은 기초공사 시 건물 주위를 구리선으로 에워싼 후 등 전위 접지 바에 접지선을 연결함으로써 접지망을 형성한다. 이러한 방법으로 구성된 접지망은 매우 미세한 접지 저항만을 내포하기 때문에 대기로부터 방출되는 고전압을 효과적으로 감소시킬 수 있다. 토양의 고유 저항이 200Ω.m로 측정될지라도 이러한 접지망 구성 방법을 적용하는 경우에는 쉽게 접지 저항값을 1Ω 이하로 감소시킬 수 있다.

마지막으로 낙뢰 전류의 통과가 예상되는 전력원의 임피던스는 가능한 미소하게 해야 한다. 특히, 축전지를 구성하는 각각의 구성 전지의 내부 저항은 0.05Ω에 근접한 값을 가져야 한다. 이러한 조건이 충족됨으로써 축전지는 고주파에서 나타나는 교란에 대해 단락 회로와 같은 특성으로 동작하며, 결과적으로는 전체 시설물에 대해 낙뢰로부터 시설물을 보호하는 양질의 버퍼 역할을 하게 된다. 특히 다음과 같은 설비에는 우선적으로 피뢰기(Arrester) 또는 서지 보호기를 설치하여 낙뢰로부터의 보호 조치를 실행해야 한다.

1) 전력 공급원의 진입선(3상 또는 단상)과 중성선을 통해 설비함 또는 전원 랙의 입력단으로 전력을 배분하는 케이블,
2) 특히 전자 또는 컴퓨터 장비와 같이 저전압을 사용하는 장비에 있어서 과도 전압이 공급될 때 민감하게 작용하는 일부 장비.

추가적으로 운영 및 유지보수 측면에 있어서 접지 시스템은 다음과 같은 몇 가지 특수한 사항에 대해 모니터링을 실시해야 한다.

1) 시설물의 내부 보호 모드(예 : 단락 시 네트워크 연결 해제)
2) 금속 재질의 접지와 설비가 장착된 금속함 간의 상호 연결
3) 단 거리의 등전위 접지 바에 연결된 접지선(구부러지지 않아야 함)
4) 접지망에 대한 매년 검측

6. 결론

본 논문에서는 전기철도에서의 낙뢰 피해 최소화를 위한 방안에 대해 검토하였다. 이를 위해 2005년 발생한 낙뢰 피해 사례에 대한 현장 실사를 통해 낙뢰에 의한 피해 영향, 문제점 등을 상세 조사하였다. 조사 결과, 공동 접지망의 구성은 낙뢰 피해 방지를 위한 최상의 시스템으로 주어짐과 동시에 낙뢰 피해를 방지하기 위해서는 공동 접지망의 최적 구성 방안이 필요함과 동시에, 주어진 최적 방안을 준수하여 시공해야 함을 확인할 수 있었다.
따라서 정확한 공동 접지망의 원칙에 따라 접지망이 구성된다면, 선로변에서 발생하는 낙뢰의 대부분은 인명 및 재산에 피해를 유발하지 않을 것으로 예상되지만, 이러한 검토는 기존에 사용한 낙뢰 방지 설비와의 연계 방안에 대해서도 추가적으로 검토해야 할 것으로 예상된다.

참고문헌

1. 김용규 외 2인, “공동 접지망 구성 요소 LEAE와 LTI 분석”, 대한전기학회 하계학술대회 논문집 (B), pp 1242-1244, 2001. 7.
3. 김용규, 류창근, “2×25kV 급전 방식에서의 공동 접지망 적용에 따른 귀선 전류의 영향”, 2002년09월, 대한전기학회 논문집. vol. 51B, No 9, pp 509-514, 2002.9
4. Y.K.KIM and al, "Estimation and Measurement of traction return current on Gyeoungbu electrification line", 2001 ICCAS, pp 1458-1461, 2001. 10.
5. 이길노 외 3명, “전기철도시스템의 접지 유형에 따른 귀선 전류 비교”, 정보 및 제어 학술대회 논문집, pp 53-55, 2005.
6. 이길노 외 3명, “궤도회로에서의 공동접지와 단독접지 인터페이스”, 한국철도학회 추계학술대회 논문집, 2005.
7. 김용규외 3명, “공동 접지망에서의 접지 저항값 시뮬레이션 및 측정”, 2006 대한전기학회 하계학술대회
8. 김용규, 백종현, 양도철, 고속선 신호기계실의 낙뢰에 의한 장애 분석, 2008 대한전기학회 하계학술대논문집, pp 1065-1066, 2007.07