

전기철도 접지시스템 혼용 운용시 고장전류 해석

Analysis of Fault Current for the Electric Railway Grounding System

창상훈* 김주락** 이형수*** 김정훈****
Chang, Sang-Hoon Kim, Joo-Rak Lee, Hyung-Soo Kim, Jung-Hoon

Abstract

This study is carried out using a circuit model approach. First, the self and shunt impedances of all the conductors in the rail system and the mutual impedances between different conductors are computed. Then, a circuit representing the both rail systems at interfaces including the rails, feeders, protection wires, contact wires, ground wires is built. Auto-transformers in the system are also represented in the circuit model. The circuit model is then processed using a circuit solver based on a double-elimination method.

Several different scenarios are analyzed, including the load conditions and a few fault conditions with different fault locations. The effect of the buried ground wires is also analyzed by comparing the results with and without the presence of the ground wires. The analysis procedure presented in the paper demonstrated an accurate way of computing fault current distribution and EMC at interfaces between both systems. The results presented in the paper can be used as a reference for estimating interference levels in similar rail systems

1. 서론

전기철도에서 보호설비의 고장은 열차의 정상운행에 지장을 초래하여 사회적으로 커다란 영향을 미치게 되므로, 설비의 신뢰성 향상을 위하여 안전, 관리, 운용 등에 대한 지속적인 기술개발 등 많은 노력이 필요하다.

보호설비는 급전회로의 특성에 따라 여러 가지 방식이 적용되고 있으며, 여러 조건에 따라 발생하는 전기적 이상현상에 대해 급전회로를 보호하여 정상적인 급전을 확보하는 것이 무엇보다 중요하다. 애자 섬락이나 지락 등 급전에 지장을 초래하는 사고가 발생하는 경우 신속하게 사고를 감지하여 회로를 차단함으로써 그 과급효과를 최소화하고 사고점 부근의 대지전위 상승을 억제하여 지지물 및 근처에 설치되어 있는 통신·신호선 등의 저압선로와 기기의 절연파괴 및 인체를 감전으로부터 보호하는 조치가 필요하다. 이를 위해서는 변전소와 전차선로의 절연협조가 관건이 된다.

* 한국철도기술연구원 책임연구원, 정회원

** 한국철도기술연구원 연구원, 정회원

*** 한국산업안전공단 산업안전보건연구원 책임연구원, 정회원

**** 홍익대학교 전자전기공학부 교수, 정회원

지금까지 우리 나라 전기철도에서 시스템을 보호하는 방식은 주로 일본철도에서 시행되어 온 섬락보호방식과 이중절연방식을 도입하여 그대로 적용하여 왔다. 그러나, 경부고속철도에서 프랑스 국영철도(SNCF)의 고속철도를 도입함에 따라 비절연 보호방식을 채택하였다[1]. 이 보호방식은 전력, 신호, 통신 등에 등전위 구성을 위하여 레일과 병행하여 접지선을 매설하고 가공 비절연 보호선(FPW)과 레일 및 선로의 모든 금속구조물을 이에 접속하는 접지-분당시스템을 구성하는 것이다. 이러한 기술적 추세에 따라 이미 섬락보호방식이나 이중절연방식으로 구성된 기존 전철화 구간에서 비절연 보호방식의 새로운 전철화 사업이 진행되면서 서로 다른 보호방식의 전차선로가 동일 지지물에 설치되는 인터페이스 구간이 존재하게 되었다. 이러한 구간에서 보호방식이 다른 전차선로에 지락 등의 사고가 발생하였을 때의 영향에 대한 기술적 검토가 필요하다.

따라서, 본 연구에서는 상기한 문제가 전철 보호시스템에 미치는 영향을 경원선과 중앙선이 공유되는 회기역을 대상으로 시뮬레이션을 통한 분석과 이에 대한 대책을 수립하여 향후 전철화 사업에 기술 가이드 라인으로 제시하는데 그 목적이 있다.

2. 전기철도 매설접지(공용접지)방식 기술적 특징

급전계통의 부하인 전기차는 그 특성상 시동과 정지가 빈번하게 반복되고 큰 전인력으로 주행하여야 하므로 대용량의 부하전력이 필요하다. 오늘날 대용량 부하의 증가, 전압강하의 감소, 통신선로 유도장애 개선 등의 이유로 AT급전방식이 선호되고 있는 추세에 있다.

이와 함께 급전계통을 보호하는 방식으로 유럽 여러 나라에서 광범위하게 채택되고 있는 매설접지방식이 우리 나라에서도 도입되어 기존철도의 전철화 사업인 충북선에 적용되기 시작하였으며, 경부고속철도에서는 이미 적용되었다. 이 방식은 가공보호선, 레일, 매설접지선 등이 전차선과 병행하여 설치되어 일정한 간격으로 서로 연결되어 있어, 전철 급전선로 부하전류와 지락이나 단락 등의 고장이 발생하였을 때 레일과 대지간에 나타날 수 있는 위험전압을 억제하고 고장전류를 변전소로 용이하게 되돌아갈 수 있는 귀회로를 구성하는 접지시스템을 구축하는 것을 말한다.

매설접지방식의 기본개념은 IEC(국제전기표준회의)에서 규정하고 있는 등전위 개념에 그 기초를 두고 있다. 이를 근간으로 하여 유럽의 전기철도 설계에서 공통적으로 적용되는 규격 EN 50122-1, Railway Applications, Part 1: Protective provisions relating to electrical safety and earthing(전기안전과 접지에 관한 보호규정)은 1997년말 제정되었으며, 유럽의 모든 전기철도는 이 규정의 바탕으로 각 국의 전기철도 시스템에 적합하게 적용하고 있다. 주요 내용은 전기철도에서 선로를 통하여 흐르는 큰 전류에 대한 인체 및 장비 보호에 대한 여러 사항을 다루고 있다. 보호의 기본개념은 급전회로의 직접접지를 통해서 고장전류를 신속하게 전원으로 되돌아갈 수 있게 하여 안전을 도모하는 것이다. 가장 효과적인 방법은 등전위 접지망을 구축할 수 있도록 될 수 있는 대로 많이 금속구조물을 상호 연결하는 것이다. 즉, 등전위망을 이룰 수 있도록 일정한 간격으로 다음의 것들을 상호 연결하도록 한다.

- 주행 레일
- 매설접지선
- 가공 보호선

등전위 구성을 위한 원칙은 일반적으로 다음과 같다.

- 귀로전류가 변전소로 쉽게 되돌아갈 수 있는 적절한 귀회로를 구성하도록 한다.
- 가공전주의 기초와 접속하여 대지와 접속한다.
- 급전선이나 전차선의 단선, 섬락 등으로 인한 고장전류가 흐를 수 있는 귀로를 형성하도록 한다.
- 정상운전 또는 고장상태에서 접촉전압이 규정된 한계를 초과하지 않도록 한다.
- 대지와와의 정전용량으로 인한 전위가 안전한계를 초과하지 않도록 한다.

· 귀로전류 또는 고장전류가 레일 등의 정상적인 귀로를 통하지 않고 금속펜스 등의 경로를 통해 변전소로 되돌아 가지 않도록 한다.

이와 같은 설계원칙을 달성하기 위하여 고장전류의 경로와 전류의 귀로를 형성하는 다음과 같은 모든 경로는 본당하도록 한다.

- 역 구조물, 과선교, 가공선로와 대지적으로 접속되는 가스·수도관 등
- 가공선로 아래 또는 위의 철구조물 또는 철근 콘크리트 구조물
- 궤도를 따라 설치된 신호·통신 케이블 또는 금속펜스
- 철도구역 내의 고압 배전선로 등

Fig. 2-1은 우리 나라 전기철도에서 매설접지방식의 접지망 구성도를 나타낸 것이다.

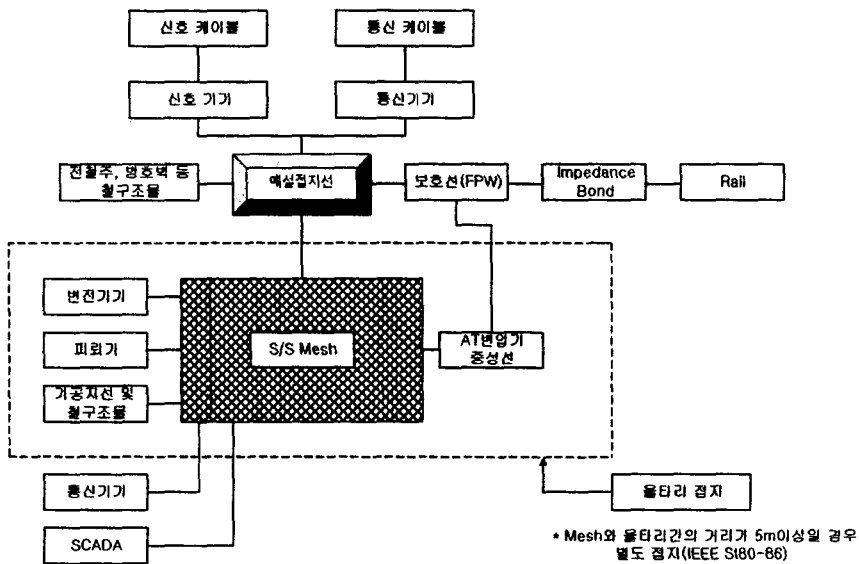


Fig. 2-1 매설접지방식 구성도

3. 상이한 보호방식의 인터페이스 구간 고장전류 해석

가. 현황분석

앞으로 우리 나라에서 건설되는 전기철도는 공용접지라는 보호방식을 채택함에 따라 기존에 건설 운영되고 있는 구간에서 동일한 지지물(비임 등)에 상이한 보호방식의 급전선로가 가설될 수 있는데, 이러한 구간에서 보호방식이 다른 전차선로에 지락 등의 사고가 발생하였을 때의 영향에 대한 기술적 검토가 필요하다. 그 예로서 섬락보호방식의 경원선과 비절연 보호방식(FPW)의 중앙선이 분기되는 회기역을 들 수 있다. 이 역의 경원선과 중앙선 전차선로를 공유하는 철구 지지물에서 경원선 가공선로의 애자에서 섬락이 발생할 경우 고장전류의 일부가 철구 지지물을 경유하여 중앙선의 가공선로로 흘러 가공보호선과 접속되어 있는 레일을 통할 때 중앙선 쪽의 차단기가 먼저 동작되어 고장이 발생한 경원선에서는 고장발생여부를 감지할 수 없는 경우가 발생할 수 있다.

나. 해석 모델링

보호방식이 서로 다른 전철계통이 동일 지지물에 의해 가선되어 있을 때 고장전류 해석을 위한 컴퓨터 모델링에는 SES社의 회로해석 프로그램인 SPLITS[2, 3]를 이용하였다. 이 프로그램은 다단자, 다상회로망을 일반적인 등가회로망으로 표현하여 선로의 자기 임피던스, 병렬 임피던스 및 상호 임피던스와 상호 유도성 임피던스의 파라미터들을 Carson[4]과 Nakagawa[5]의 방정식으로 구하는 알고리즘을 이용하여 개발되었다. 이를 이용하면 다상 전력계통의 정상상태 또는 고장상태에서 단락회로의 전류분포를 계산할 수 있으며 도체간의 유도결합, 도전결합 또는 정전결합으로 인한 유도전압을 계산할 수 있다.

본 연구에서 전철계통의 모델 구간은 회기역을 중심으로 성북SSP와 왕십리SP 사이의 경원선 구간과 회기SP와 도농S/S 사이의 중앙선 구간이며, Fig. 3-1은 해석구간의 급전계통도를 나타낸 것이다.

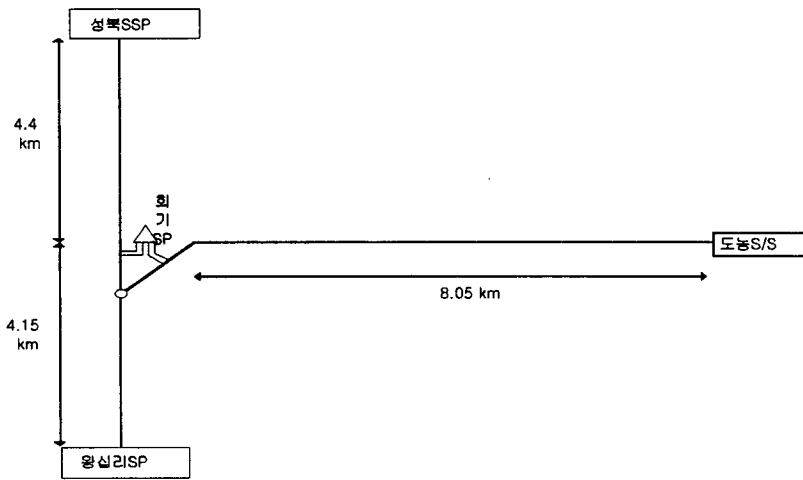


Fig. 3-1 해석구간의 전철계통도

(1) 전원단 모델

회기역 구내사고시 고장전류의 공급원이 되는 성북SSP, 왕십리SP 및 도농S/S 이후구간은 55/27.5 kV의 AT와 전원임피던스 및 정전압원이 직렬로 연결된 등가전원단으로 표현하였다. 가장 가혹한 고장전류를 얻기 위하여 전원단 임피던스는 AT의 임피던스($Z_s=2.5\Omega$)만을 고려하였다[6]. 각 전원단은 27.5 kV의 정전압원과 전원단 임피던스가 직렬로 연결되어 있고, 상행선과 하행선에 공급되는 전압의 위상차는 90° 로 가정하였다.

나. 선로정수 계산

전기철도에서는 전동차의 부하전류가 레일을 귀로로 하여 흐르게 되므로 선로의 임피던스에 따라 레일전위 상승에 영향을 미치며, 급전계통의 임피던스는 급전선, 전차선과 레일 및 대지저항률에 따라 결정된다. 그런데, 일반 전력계통은 삼상전류가 동일한 세 개의 상도체를 통하여 흐르기 때문에 그 현상

을 해석하기가 쉽지만 철도의 급전계통은 급전선과 전차선, 레일의 자기임피던스가 각각 다를 뿐 아니라 레일의 상호 임피던스는 대지저항률과 온도 등 주변환경에 따라 다르게 된다. 지금까지 주로 Carson의 계산식이 주로 이용되어 왔으며, 최근에는 EMTP나 유한요소법을 이용한 선로정수 계산법이 제안되고 있다. 이 연구에서 선로의 자기임피던스는 참고문헌 [7]을 참조하였으며, 각 선로간 상호임피던스는 선로정수 계산프로그램인 TRALIN[8]을 이용하여 계산하였으며, 이때 대지저항률은 모두 $100\Omega \cdot m$ 로 가정하였다.

섬락보호선은 회기역 구내 양쪽 끝에서 1종 접지(10Ω)되어 있으며, 레일의 누설저항은 참고문헌[7]의 pp.24를 참조하여 청정시 $5,000\Omega/km (= 100,000\Omega / 20 km)$, 우천시 $0.5[\Omega/km] (= 10\Omega / 20 km)$ 의 두 가지 경우를 가정하였다.

전기철도에서는 전동차의 부하전류가 레일을 귀로로 하여 흐르게 되므로 선로의 임피던스에 따라 레일전위 상승에 영향을 미치며, 급전계통의 임피던스는 급전선, 전차선과 레일 및 대지저항률에 따라 결정된다. 이때 대지저항률은 일반적으로 모델에 적용하는 $100\Omega \cdot m$ 로 가정하였다. 레일의 누설저항은 레일전위의 상승과 밀접한 관계가 있는데, 주변온도나 기온 등 외부환경에 따라 달라진다. 이 연구에서는 청정시 $5,000\Omega/km (= 100,000\Omega / 20 km)$, 우천시 $0.5[\Omega/km] (= 10\Omega/20 km)$ 의 두가지 경우를 가정하였다.

Fig. 3-2는 급전계통도에서 SPLITS를 이용하여 구성한 전철계통의 회로모델을 나타낸 것이다. 이 계통에서 상정한 고장 시나리오는 Table 3-1과 같이 16가지 경우이다. Fig. 3-3 및 3-4는 고장 시나리오를 그림으로 나타낸 것이다.

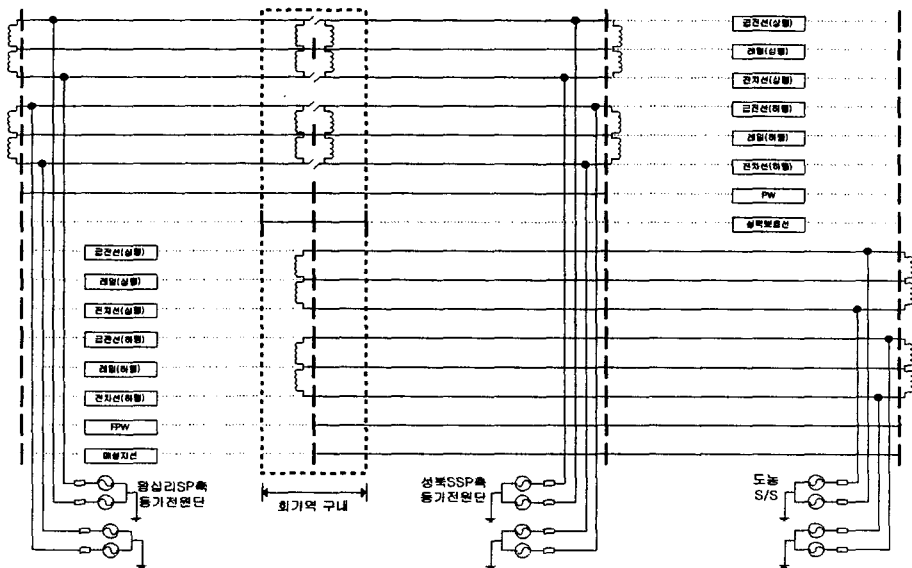


Fig. 3-2 전철계통의 회로모델

Table 3-1 고장 시나리오

시나리오	고장 지점	고장점 구간 번호	고장전류원
1	중앙선 전차선-레일 단락	#58	도농 S/S
2	“ 전차선-급전선 단락	“	“
3	“ 전차선-FPW 단락	“	“
4	“ 급전선-FPW 단락	“	“
5	경원선 전차선-레일 단락	“	성북 SSP
6	“ 전차선-급전선 단락	“	“
7	“ 전차선-PW 단락	“	“
8	“ 급전선-PW 단락	“	“
9	“ 전차선-섬락보호선 단락	“	“
10	“ 급전선-섬락보호선 단락	“	“
11	“ 전차선-레일 단락	#50	왕십리 SP
12	“ 전차선-급전선 단락	“	“
13	“ 전차선-PW 단락	“	“
14	“ 급전선-PW 단락	“	“
15	“ 전차선-섬락보호선 단락	“	“
16	“ 급전선-섬락보호선 단락	“	“

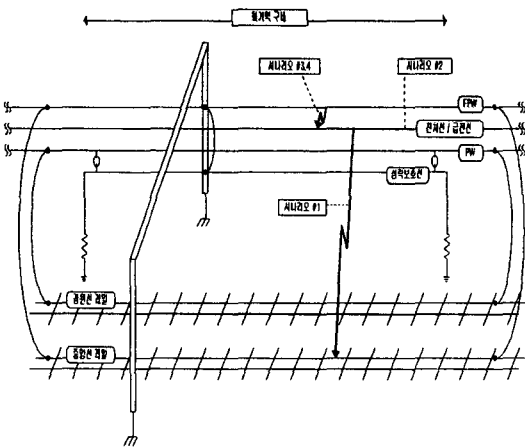


Fig. 3-3 중앙선 구간 고장 시나리오

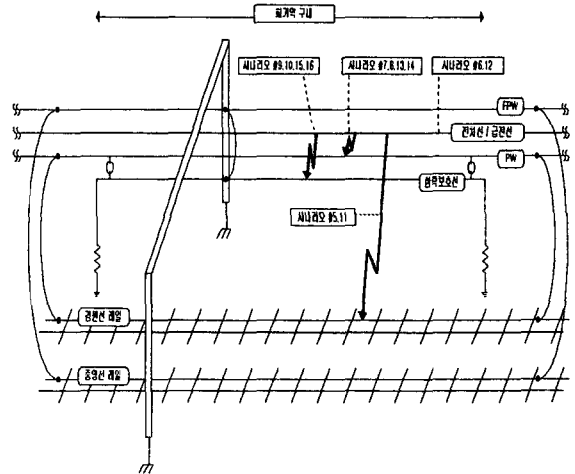


Fig. 3-4 경원선 구간 고장 시나리오

4. 고장전류분포 해석결과

가. 매설접지방식(비절연 보호선) 구간

중앙선 구간의 단락사고시 시나리오별로 고장전류의 크기는 약 4.5~5.2 kA로 계산되었으며, 중앙선 급전선-FPW 단락사고(시나리오 4)시 고장전류 크기가 5.2 kA로 가장 큰 값이 계산되었고 PW 및 섬락보호선에 흐르는 전류도 가장 큰 것으로 나타났다. 이 경우 고장전류 분포는 Fig. 4-1과 같다.

중앙선 고장시 어느 경우는 경원선 구간의 섬락보호선 양단 전위상승값은 최대 1,000 V를 초과하지 않으므로 섬락보호선과 PW간 보안기는 동작하지 않으며, PW에 흐르는 전류는 최대 32 A로 계산됨에 따라 중앙선 구간의 단락사고가 경원선 구간에 미치는 영향이 크지 않은 것으로 나타났다.

우천시에는 레일의 누설저항이 0.5 Ω/km로 작아지고 따라서 레일을 통한 누설전류도 커진다. 이 경우에도 급전선-FPW간 단락사고시 경원선 구간의 PW와 섬락보호선에 가장 많은 전류가 흐르는 것으로 계산되었다. Fig. 4-2는 이때의 고장전류 분포이며 표시된 값은 전류의 크기만을 나타낸 것이다.

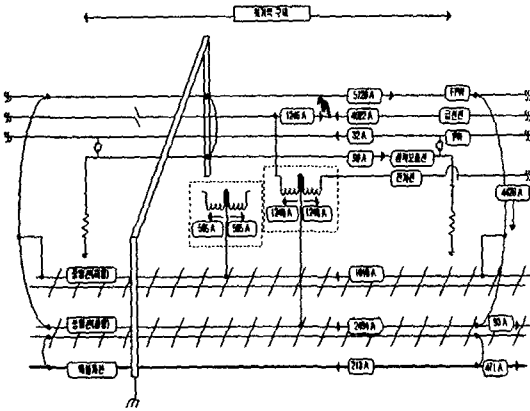


Fig. 4-1 급전선-FPW 단락사고시 고장전류 분포(청정, 시나리오 4)

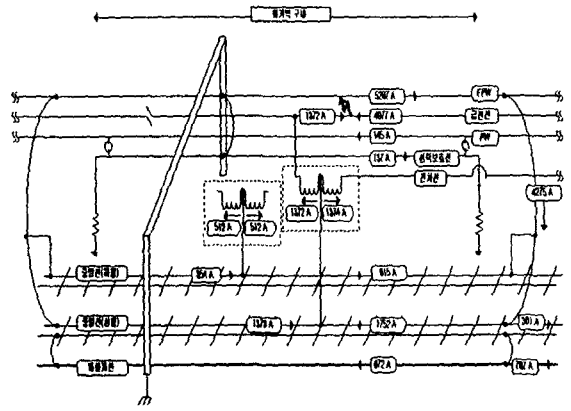


Fig. 4-2 급전선-FPW 단락사고시 고장전류 분포(우천, 시나리오 4)

나. 절연 보호선 구간

절연보호선구간(경원선)의 사고는 성북 SSP 쪽으로부터 고장전류가 유입될 때와 왕십리 SP쪽으로부터 고장전류가 유입되는 경우로 2종류의 시나리오를 가정하였으며, 상정사고는 ① 전차선-레일간, ② 전차선-급전선간, ③ 전차선-PW간, ④ 급전선-PW간, ⑤ 전차선-섬락보호선간, ⑥ 급전선-섬락보호선간의 6가지를 가정하였다.

회기역 구내 철구 지지물을 통하여 경원선 구간의 섬락보호선과 중앙선 구간의 FFW가 연결되어 있으므로 경원선 구간에서 급전선 또는 전차선이 섬락보호선과 단락되는 경우(시나리오 9,10 / 시나리오 15,16)에는 중앙선 구간의 FFW로도 많은 고장전류가 흐르는 것으로 계산되었다.

Fig. 4-3은 청정일 경우 성북 SSP쪽 전차선-섬락보호선 단락사고시 고장전류 분포를 보인 것이다. 가정한 모든 상정사고에서 섬락보호선 양단의 1종 접지전위 값은 최고 170 V를 넘지 않았으므로, PW-섬락보호선간 보안기가 동작할 가능성이 없기 때문에 경원선은 고장으로 인식되지 않아 계속하여 지락된 전차선에 전력이 공급되므로 고장파급이 커질 우려가 있다. 또한 중앙선에는 계속하여 차단기가 동작하게 되므로 고장판별의 혼돈을 초래하게 된다.

우천시 레일의 누설저항이 0.5 Ω/km로 낮아져서 레일을 통한 누설전류가 커지는 경우에는 시나리오 10(성북SSP 쪽 급전선-섬락보호선 단락사고)에서 중앙선 구간의 FFW에 가장 큰 전류가 흐르며, 시나리오 15(Fig. 4-4, 왕십리 SP쪽 전차선-섬락보호선 단락사고)에서 섬락보호선 양단의 1종 접지의 전위상승이 가장 큰 것으로 계산되었다. 고장판별의 혼돈은 청정시 보다 더 심각하므로 이에 대한 대책이 필요하다.

