

# 전기철도 AT급전방식 보호시스템 최적구성 방안 연구

## A Study on the Protection System for AT Feeding on the Electric Railway

창상훈\* 이형수\*\* 홍재승\*\*\* 김정훈\*\*\*

Chang, Sang-Hoon Lee, Hyung-Soo Hong, Jae Seung Kim, Jung Hoon

### ABSTRACT

The safe operation of electric railways is greatly dependant on its protective systems. The system so-called Fault Protection Wire(FW) is now widely adapted to protect in AT feeding systems. It is connected between the feeder and trolley circuit to return the fault current to autotransformers at substation. This paper computed the distribution of fault currents at FW in the system and also evaluated the safety from electric shock when ground fault or flashover occur in the feeding system. The results show FW is useful to protect power supply network from fault in electric railways

### 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 파급효과를 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.

AT급전의 보호방식에서 사용되고 있는 섬락보호지선은 사고전류를 보호선으로 흐르도록 하여 급속회로를 구성함으로써 변전소에서 사고검출을 용이하게 하여 신속, 정확한 회로차단의 보호동작을 가능하게 한다. 특히, 역구내에서 급속지지물에 인명이 접촉하여 발생할 수 있는 감전의 위험성으로부터 보호하는 측면에서 정확한 분석이 필요하다.

본 논문에서는 이와 같은 관점에서 섬락이나 지락 등의 사고시에 섬락보호지선을 통하여 흐르는 사고전류의 분포를 정확하게 해석하여 설비 보호 및 인체의 감전위험으로부터 안전성 여부를 시뮬레이션을 통하여 검증하고자 하였다.

### 2. AT급전방식 기술분석 및 지락발생시 전류분포 해석

전기철도 급전회로에 발생하는 고전압의 대다수는 뇌와 스위치의 개폐에 의해 발생하는 과도적인 과전압으로 일반적으로 surge전압이라 한다. Surge 전압의 특징은 전압의 상승속도가 상당히 빠르는데 유도뢰에 의한 surge 전압의 경우는 전압이 0에서 peak치에 도달하기까지의 시간은 2~10 $\mu$ s이다.

\* 한국철도기술연구원 책임연구원, 정회원

\*\* 한국산업기술연구원 책임연구원, 정회원

\*\*\* 홍익대학교 석사과정, 학생회원

\*\*\*\* 홍익대학교 교수, 정회원

전기가 전달되는 속도는  $300m/\mu s$ 이므로 이 시간영역에서 변화하는 전압은 진행파로서의 성질을 가지고 있다. 예로서  $1\mu s$ 에서 전압이 peak치  $e(V)$ 에 도달하는 surge 전압은 전하(電荷)의 집단이 선로 상을 진행하는 현상으로 볼 수 있는데 이 진행하는 전하량을  $i(A)$ (ampere=C/s)라 했을 때  $Z_0 = e/i$ 를 surge 임피던스라 한다. surge 임피던스는 교류회로의 임피던스와는 다르며 선로의 길이에 관계되어  $Z_0 = \sqrt{L/C}$ (선로저항 R은 무시)로 결정되는 값이다. 예를들면 surge 임피던스  $300\Omega$ 의 선로를  $100A$ 의 서어지 전류가 진행하면  $300\Omega \times 100A = 30kV$ 의 전압이 대지에 대하여 발생한다. 또 진행파는 선로의 접속점과 말단에서 반사현상을 일으킨다. 특히 선로말단 부근에서는 반사현상에 의해 전압이 2배로 상승한다. 이 개념도는 그림 2.1과 같다.

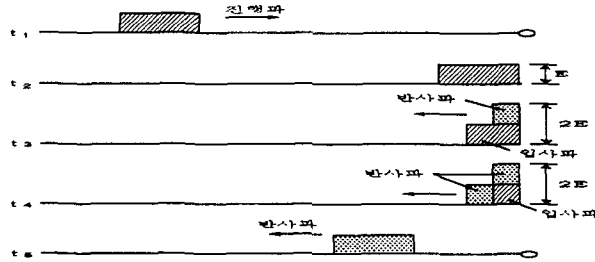


그림 2.1 진행파 개념도

## 2.1 AT급전회로 기술특성

### (1) 전류분포 및 등가회로

AT방식은 대전류용 교류급전회로로서 (i) BT방식과 같은 section이 필요 없으며, (ii) 보수면에서 보안도와 신뢰도가 높고, (iii) 전자유도(電磁誘導)경감효과가 좋은 특징을 가지고 있으며, (iv) 급전전압이 높아 전차선로의 전압강하가 적으므로 변전소 간격을 멀리할 수 있는 장점을 가지고 있다.

AT방식은 망상(網狀)회로이기 때문에 전류분포를 간단히 파악하기 어려운 이유는 부하점에서 원방에 있는 전차선과 급전선에도 전류가 흐르기 때문이다. 그림2.2는 부하를 중심으로 좌우에 전류가 분포되는 양상을 나타낸 것이다. 즉 부하전류  $100A$ 의  $1/2$ 인  $50A$ 가 전원측 전차선(T)으로 유입되고 급전선(AF)에  $50A$ 의 전류가 전원측으로 귀환된다.

그러나 그림2.2는 회로가 복잡하므로 그림2.3과 같이 등가회로를 구성하여 전류분포를 해석한다.

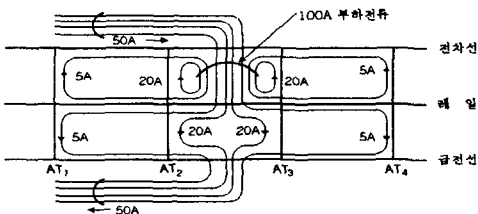


그림2.2 AT방식 전류분포도

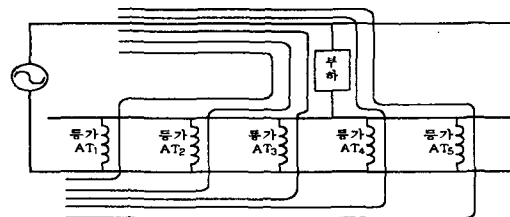


그림2.3 AT방식 등가회로도

### (2) 선로 임피던스 특성

AT급전방식은 그림2.4와 같이 약  $10km$ 간격으로 AT를 배치하고 권선의 한쪽을 전차선에, 다른 쪽은 급전선에 그리고 중앙을 레일에 접속한다. AT급전방식은 전차선의 section구성을 간단하게 하고 변전소 급전전압을 전차선 전압의 2배로 함으로써 변전소 간격을 길게 할 수 있고 대전력

의 공급에 적합하다.

선로 임피던스는 AT점 및 CPW(보호선용 접속선)점을 절점으로하여 확대되며 복잡해진다. 선로 임피던스를 거리계전기의 보호영역을 나타내는 저항R-리액턴스 X도를 그림으로 나타내면 그림 2.4(b)와 같다. 즉 선로 임피던스 작은 AT방식의 경우 약 75°가 된다.

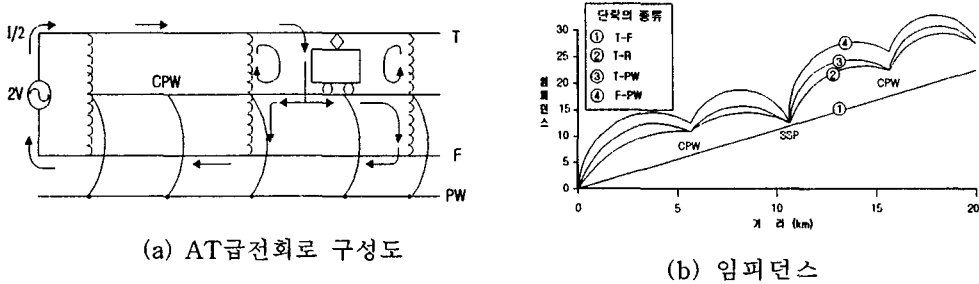


그림 2.4 AT급전회로 구성과 임피던스

### (3) 전자유도 경감효과

AT방식의 전자유도 경감효과는 그림 2.4와 같이 전기차가 AT의 중간부분에 있을 경우 귀선 전류는 전기차를 중심으로 좌우로 분류하여 레일로 누설되기 때문에 근접통신선 등에 전자유도전압은 각각 반대방향으로 발생한다. 따라서 통신선 전체로 보면 전자유도전압은 줄어들게 된다.

AT방식의 유도특성에 영향을 주는 요인은 부하의 크기 외에 (i) AT의 설치간격, (ii) AT의 누설임피던스, (iii) 가선구조, (iv) 레일의 누설저항 등이 있다. 레일의 누설저항은 궤도의 조건에 의해 거의 고정화되어 있으며 가선구조도 절연거리, 지지물 하중, 강도 및 경계성 등을 고려하여 가능한 한 유도로 인한 장애를 줄이기 위해 배치되어 있다.

AT급전방식의 유도장해 대책으로는 AT 설치간격과 AT 누설임피던스의 조합을 가장 경제적으로 하는 것이 중요하다. AT 설치간격을 크게 할 경우 AT의 소요용량 및 설치장소 등 기술적·경제적인 효과를 기대할 수 있지만 유도장해가 증가하게 된다. 반면 AT누설임피던스를 작게 할 경우 유도장해는 경감하지만 AT의 가격이 증가하여 아주 비경제적이므로 실제로는 AT 누설임피던스는 경제성을 벗어나지 않는 범위에서 설계하고 AT간격은 통신선의 유도장해와 관련해서 선정하는 것이 바람직하며 통상 AT누설임피던스는 0.45Ω에서 결정하고 AT의 간격은 8~12km로 하는 것이 일반적이다.

### (4) 보안기의 효용성 검증

보안기의 사용목적은 지락사고시의 지락점 전위상승억제, 레일전위 상승억제 및 사고전류의 급속회로 구성을 목적으로 한다.

따라서 피뢰기와 같은 속류차단 능력은 필요 없고 방전전압도 실효치로 나타낸다. 방전gap의 기본적인 동작원리를 그림 2.5에 나타낸다.

또 방전gap은 그 사용목적에서 surge전압에 의해 빈번하게 동작하는 것은 방전특성의 열화(劣化)로 이어지므로 좋지 않다. surge전압에 의해 빈번하게 방전하는 경우에는 C 또는 CR surge absorber를 방전gap과 병렬로 접속하여 surge를 흡수하는 방법도 있다. 이러한 surge전압의 발생은 전기차가 역구내의 section을 통과할 때 이선현상에 의해 발생하는 경우가 많은데 보안기의 불필요한 방전을 방지하기 위한 별도의 장치를 설치하여 surge전압을 억제하고 있는 예가 있다.

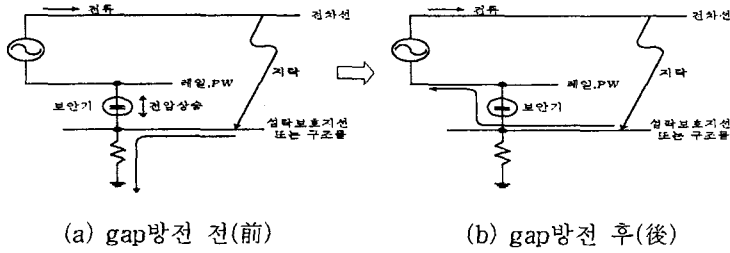


그림 2.5 보안기의 동작원리

## 2.2 지락사고 발생시 전류분포 해석(역구내)

전차선로 섬락보호설비는 교류전차선로에서 애자섬락 등의 지락사고가 발생할 때 전철변전소에서 사고검출을 확실하게 하여 사고의 확대를 억제하기 위해 사고전류의 귀로 금속회로를 구성하는 설비이다. 여기서는 지락사고 발생시 섬락보호지선에 의한 사고전류 분포에 대한 해석을 실시하여 유용성을 검증하고자 한다.

### (1) 해석모델

#### (가) 개요

역구내에서의 지락(또는 애자섬락) 사고를 모의하기 위하여, 접지 및 전자계 해석용 S/W인 CDEGS(Current Distribution, Electromagnetic interference, Grounding and Soil structure analysis)를 사용하여, 전철계통을 모델링하고 해석하였다. 캐나다의 SES社에 의해 개발되어온 CDEGS는 토양구조 해석모델인 RESAP, 지중 및 가공의 충전도체에 의한 전자계 계산모델인 MALT/MALZ/HIFREQ, 선로정수 계산모델인 TRALIN, 회로해석모델인 FCDIST/SPLITS 및 고속 푸리에 변환(Fourier Transform) 모델인 FFTSES의 8개 계산모델로 이루어져 있다.

여기서는 이 모듈을 이용하여 현재 AT 급전구간의 섬락보호방식인 섬락보호지선에 대한 유용성을 검증하고 지락시 대지전위 분포를 시뮬레이션을 통해 예측하고자 한다. 구체적으로 HIFREQ를 이용하여 역구내 플랫폼 근처에 서로 가까이 위치한 레일이나 철주 등의 도전결합의 영향을 고려하고 플랫폼상에 서있는 인체에 대한 감전위험성을 평가하고 애자의 섬락과 전차선 또는 급전선의 지락 등 사고시 전류경로별 전류분포를 정확하게 계산하기 위하여 컴퓨터 모델을 구성하고 모의실험을 수행하였다. 그림 2.6은 해석모델에 대한 2가지 접근법, 즉 회로모델법과 전자계 모델법에 대한 흐름도를 나타내고 있으며, EMTP 해석법과 비교하여 나타내었다.

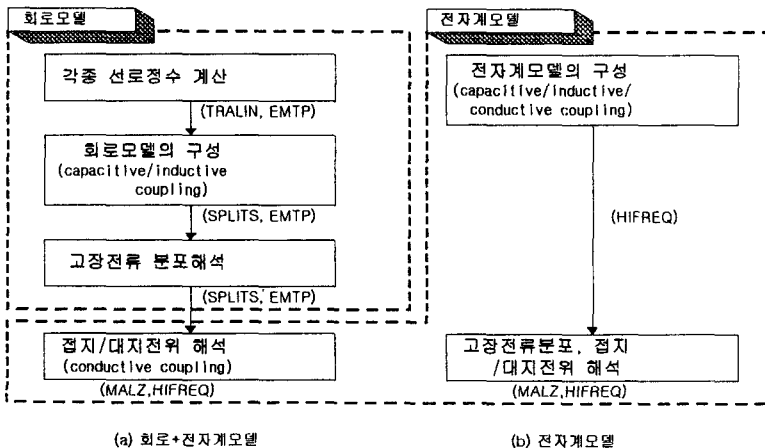


그림 2.6 소프트웨어(CDEGS)를 이용한 두 가지 해석방법의 예

(나) 전원단 모델

전원단은 전차선에 25kV의 정전압원과 25Ω의 전원임피던스가 직렬로 연결되어, 고장전류를 공급하도록 구성하였다(그림 2.7 참조). 전원단 접지망은 25 m x 25 m의 정방형으로 가정하였으며, 이 때의 접지저항은 0.89 Ω으로 계산되었다. 레일과 보호선(PW) 및 전차선이 전원단의 접지망에 연결되어 있어, 전차선은 고장전류의 공급통로가 되고, 레일과 보호선은 고장전류의 귀로를 형성한다. 전원단의 접지망을 통해서는 대지를 통해 귀환하는 전류를 흡수하게 되어, 전원단에서 외부로 나가는 전류의 대수합은 언제나 0(zero)가 되고 키르히호프 법칙을 만족한다.

(다) 섬락보호지선 접지모델

섬락보호지선 양단의 제1종 접지는 그림 2.8과 같은 수평2층 토양구조(표토층은 1500 Ω-m의 콘크리트이며 층 두께는 1 m, 심층은 100 Ω-m의 저항률을 갖는 대지)에 매설된 접지망으로 모의된다. 접지망의 면적은 제1종 접지저항의 기준치인 10 Ω 이하가 되도록 조정하였는데, 여기서는 접지저항이 8.9 Ω으로 계산되었다.

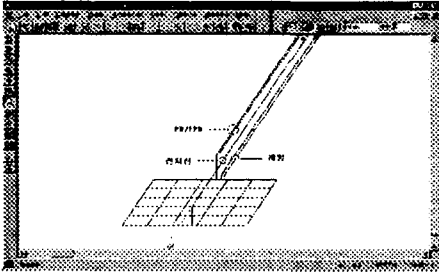


그림2.7 전원단의 등가모델

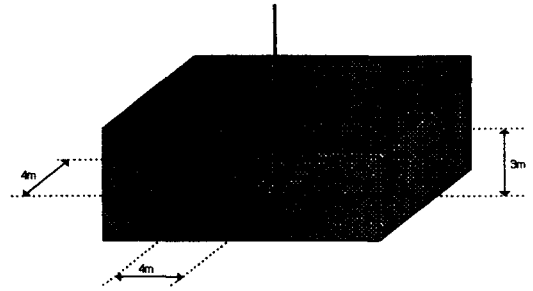


그림2.8 제1종 접지 모델

(라) 플랫폼, 철주 및 인체 모델

플랫폼 위에서 철주에 접촉하고 있는 인체 안전에 대한 평가를 위한 모델링은 그림 2.9와 같다. 인체저항은 IEEE의 AC변전소 접지설계 가이드인 IEEE Std 80-1986(pp.35)을 참조하여 최악의 경우인 1000Ω을 가정하였고, 영국 접지설계 기준인 BS 7354(Design of high voltage open terminal station)을 참조하여 한쪽 발의 신발저항은 4000 Ω을 적용하였다.

한쪽 발의 접지저항은 IEEE Std 80-1986(pp.37)에 따라 반경이 0.08 m인 금속원판의 접지저항으로 가정하였다. HIFREQ 에서 도체는 가는 선(thin wire)만으로 모델링 하여야 하므로, 반경 0.08m의 원판전극과 유사한 접지저항이 계산되도록 0.2 m 길이의 십자형태 접지전극으로 한쪽 발의 접지를 모의하였다. 철주는 직경이 0.2 m이며, 전기적 재질은 구리(Cu)에 대한 비저항률은 13.0, 비투자율은 17.0, 비유전율은 1.0 인 Annealed steel로 가정하였다.

플랫폼은 저항률 1500 Ω-m을 갖는 1m 두께의 콘크리트로 가정하고, 콘크리트 아래의 자연토양의 저항률은 100 [Ω-m]를 적용하였다. 이 때 콘크리트와 토양의 구리에 대한 비투자율, 비유전율은 각각 1.0으로 동일하다고 가정하였다.

(마) 레일 모델

레일(50kg/m)은 대지와 접촉하고 있는 부분을 원으로 환산하였으며 이때 직경 D=0.025 m 이다. 대부분의 전기철도 급전시스템 해석에서 레일은 대지와 절연되어 있는 것으로 가정하여 해석하고 있으나, 실제에 있어서는 대지로 누설이 발생하고 있으므로 이를 고려하여 그림 2.10과 같이 레일 둘레에 두께 0.001m로 절연코팅이 되어 있는 것으로 모의하였다. 여기서, 코팅의 저항률을 변화 시킴으로서, 레일의 단위 길이당 누설저항을 조절할 수 있도록 하였다. 누설저항은 그림 2.10과 같은

레일도체가 모의된 레일의 길이 4.7 km에 걸쳐 500Ω-m 대지에 매설되어 있을 때의 접지임피던스를 계산하고, 여기에 4.7km를 곱함으로써 km당 접지저항(=누설저항)을 계산하였고 계산결과의 해석은 레일의 코팅 저항률이 1,000 kΩ 일 때를 적용하였다.

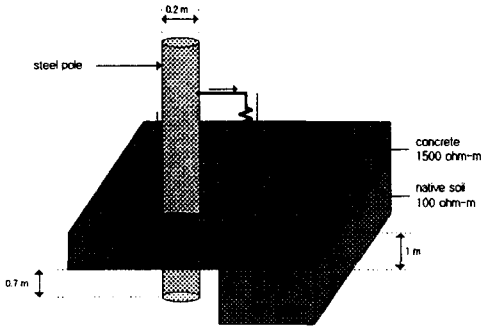


그림 2.9 수평2층 토양모델링에 의한 플랫폼 등가모델과 인체의 등가모델

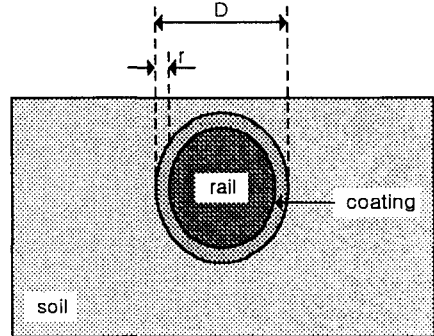


그림2.10 레일 모델링

### 3. 지락사고시 고장전류 분포 해석

지금까지의 모델링에 대하여 모의한 결과에 대한 결과를 보안기 작동 전과 작동 후로 구분하여 기술하기로 한다.

(1) 보안기 작동 전 전원단에서 전류 분포

그림 2.11~13은 철주와 전차선 사이의 사고로 인하여 절연파괴가 발생하여 보안기가 동작하기 전의 전류분포를 계산한 결과를 보인 것이다.

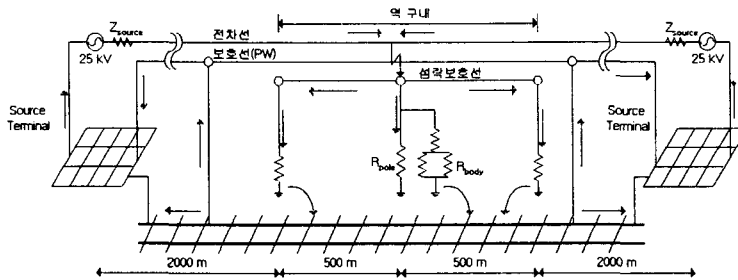


그림2.11 HIFREQ모델과 고장전류의 분포

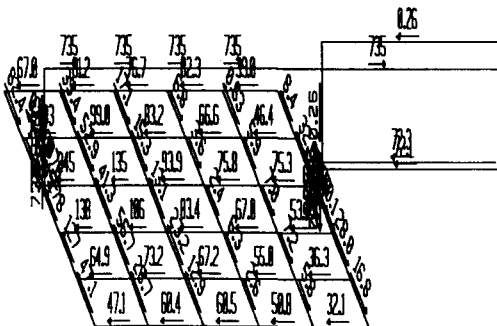


그림2.12 전원단에서 전류분포 (단위:A)

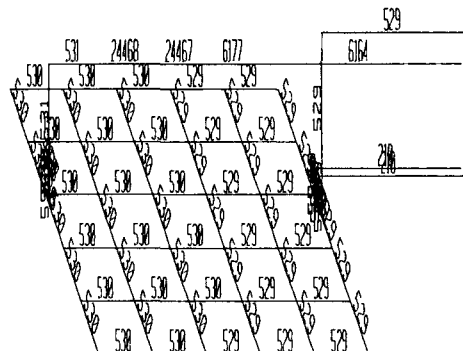


그림2.13 전원단에서 전위분포 (단위:V)

그림 2.12는 전원단에서 고장전류 분포를 나타낸 것이며, 그림 2.13은 전위 분포를 나타낸 것이다. 전원단에서 전차선을 통해 공급되는 고장전류는 735A 이며, 레일을 통해서 약 19.5%인 144.4 A가 귀환(보호선용 접속선이 중간에 설치되었을 경우에는 이를 통하여 보호선으로 약 83%가 귀환됨)되는 것을 알 수 있다. 따라서, 대지를 통해 전원단 접지망으로 흡수되는 전류의 크기는 약 590A(=735-144.4; 약 80%)가 된다. 전원단의 접지저항 0.89 Ω에 대지 귀로전류 -590 A(방향이 반대)를 곱하면, 그림 2.13에서와 같은 약 -525 V의 접지전위를 얻을 수 있다. 이 때 보호선(PW)을 통해 전원단으로 귀로하는 전류는 보안기가 작동하기 전의 상태이므로 흐르지 않는 상태가 된다.

(2) 보안기 작동 후 전원단에서 전류 분포

그림 2.14~16은 철주와 전차선사이의 절연파괴가 발생하여 보안기가 동작하여 섬락보호지선이 PW와 단락된 상태에서의 전류분포를 계산한 결과를 보인것으로 이를 세부적으로 고찰하기로 한다.

그림 2.14에서 보면, 고장전류의 경로는 전원단→섬락보호지선이 되며, 섬락보호지선에서 양단의 접지를 통해 전위상승이 발생하여 보안기가 작동하여 PW와 철주를 통하여 전원단으로 귀로하게 된다. 이 때 전원단의 전류분포를 보면, 전원단에서 전차선을 통해 공급되는 고장전류는 969 A이며, 레일을 통해서 21.1 A가 귀환하며, PW를 통해서 936 A가 귀환한다.

따라서, 대부분의 고장전류는 PW를 통하여 전원단으로 귀로를 형성하기 때문에 대지를 통해 전원단 접지망으로 흡수되는 전류의 크기는 약 12A (=969A- 21.1 A - 936A)이다.

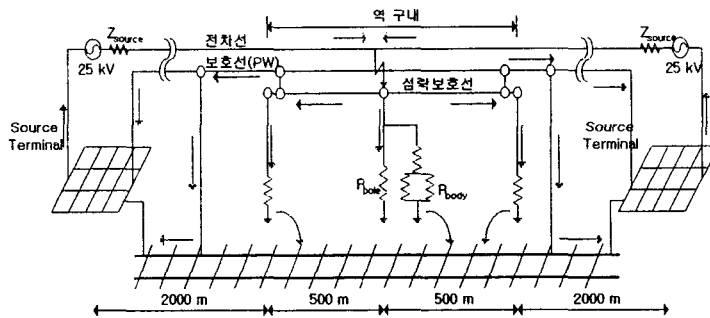


그림 2.11 HIFREQ모델과 고장전류의 분포(보안기 작동 후)

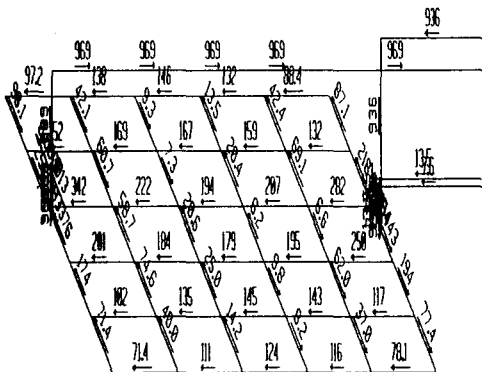


그림 2.12 전원단에서의 전류분포

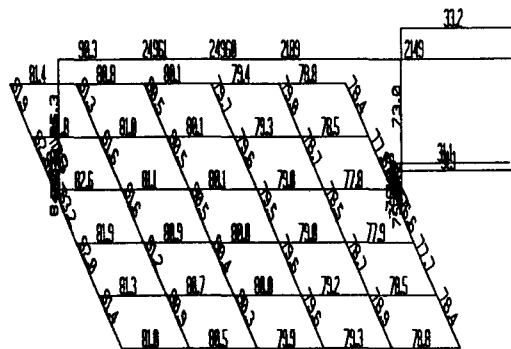


그림 2.13 전원단에서 전위분포

#### 4. 해석결과

##### (1) 보안기 작동 전

그림 2.17은 플랫폼 위에 설치된 철주를 통해 흐르는 고장전류의 분포를 나타낸 것으로 철주 상단의 1360 A의 전류는 섬락보호지선으로 흐르는 전류이며, 그 아래에 흐르는 1469 A의 전류는 전원양단에서 유입되는 고장전류( $735A \times 2 = 1470A$ )와 일치되고 있다. 따라서, 철주를 통하여 흐르는 전류는 전원단 유입 고장전류와 섬락보호지선을 통해 유출되는 전류의 차인 109 A가 흐르게 된다.

##### (2) 보안기 작동 후

그림 2.18은 플랫폼 위에 설치된 철주를 통해 흐르는 고장전류의 분포를 나타낸 것으로 PW를 통해 양 쪽 전원단으로 귀로하는 고장전류는 1931 A, 철주를 통하여 흐르는 전류는 20 A 이다.



그림 2.17 철주에서의 전류분포(보안기 작동 전)

그림 2.18 철주에서의 전류분포(보안기 작동 후)

#### 5. 결과검토

- (i) 역구내의 보호방식은 이중절연방식의 실용상 결함이 있어 섬락보호방식을 적용하고 있는데 시뮬레이션 결과 사고발생시 사고경로 확보 등에 상당히 유용성이 있음이 입증되었다.
- (ii) 지락사고 발생시 대부분의 고장전류는 PW를 통하여 전원단으로 귀로를 형성하기 때문에 대지를 통해 전원단 접지망으로 흡수되는 전류의 크기는 매우 작다.
- (iii) 이 때 대지전위 상승은 525V로 EN50122에서 규정하고 있는 안전기준치인 650V (0.2초 이내)를 충족시키고 있다.
- (iv) 섬락보호지선 방식은 보안기(3kV)에 의해 사고경로를 확보하기 때문에 동작의 확실성을 기하기 위해서는 2개 병렬로 구성하여 사용할 필요가 있다.

#### [참고문헌]

1. F.P Dawalibi, F. Donoso, "Integrated Analysis Software for Grounding, EMF and EMI", IEEE Computer Applications in Power, Vol. 6, No. 2, pp.19~24, 1993
2. Toyomi Gondo, "Plan of Electrified Equipments with AT Form.", Electric Railway, vol.2, No. 3
3. R.J.Hill, "On-line Simulation of Voltage Regulation in Auto transformer-Fed AC Electric Railroad Traction Networks", IEEE Trans. on Vehicular Technology, Vol.42, No.3, Aug., 1993
4. R.J.Hill, "Modelling Rail Track Electrical Behavior Using Two-Dimensional Finite Elements"IEEE, 1996
5. Gao Shi-bin, He Wel-Jun, Chen Xiao-Chuan, "Study on Complex Grounding Fault Protection with High-Impedance for AT Feeding Traction System", Computer in Railway, 1994
6. 岡井政彦, "電氣鐵道システムにおける 耐雷設計技術 I ~ IV" 鐵道と電氣技術, 1993.9~1993.12