

전차 선로용 DC 피뢰기 설계 기술

한 세 원, 조 한 구

한국전기연구원 신소재응용연구그룹

The Design Technology of DC Arrester for Track Line

Han, Se Won, Cho, Han Goo

Advanced Electrical Materials Group, KERI

**Abstract** - 전차 선로용으로 적용되는 직류 피뢰기의 설계 기술을 소개하였다. 현재 국내에 사용되는 전차 선로 서지 보호용 직류 피뢰기는 전량 수입에 의존하고 있다. 안전한 피뢰기를 설계하기 위해서 적용 구간의 임펄스 서지 환경을 파악하고 이에 맞는 적절한 내량의 피뢰기를 설계하는 것이 요구된다. 특히 직류 구간의 경우 과도 서지 발생의 형태가 기존 계통 환경과 다르기 때문에 피뢰기 보호범위와 정격의 설정에 주의가 요구된다.

직류 회로 시스템이 적용되는 주 사용처는 전차용 회로와 화학 공장용 회로를 들 수 있다. 일반적으로 전압은 비교적 낮지만 큰 전류가 흐르는 경우가 많다. 또한 인덕턴스(L)에 축적되는 에너지를 수반하는 서지가 발생하므로 이러한 문제를 잘 검토할 필요가 있다. 직류 철도 회로에서는 차량의 퓨즈나 차단기에서 사고 전류를 차단할 때 회로 인덕턴스에 축적된 에너지에 의해 판도 그래프나 트로리 선의 전압이 상승하게 된다.

1. 서 론

피뢰기를 설계하기 위해서는 적절한 정격 산정과 에너지 내량을 확보하는 것이 요구된다. 현재 전차 선로용 직류 피뢰기는 안정성과 내열화성을 갖도록 몇가지 설계적 요인을 포함하고 있다. 기존 교류용 피뢰기보다 열화 에너지가 크기 때문에 이에 견딜수 있는 ZnO 바리스터 소자의 제작이 필요하고 상시 과전에 의한 열화를 줄이는 방안으로 직렬 공극(GAP)을 갖도록 설계되어 있다. 따라서 제한전압 특성이나 서지 에너지 흡수 특성에서 공극을 고려한 설계기술이 필요하다. 본 연구에서는 전차 선로의 서지 환경을 검토하고 적절한 제한전압 특성 및 서지 내량을 설계하였다. 한편 공극의 역할과 ZnO 소자와의 서지 흡수 특성을 설계하는 방법 등을 고찰하였다.

그림 1은 현재 선로에 운전 중인 1500V 전차용 급전선에 유기 되는 전형적인 과도 전압의 발생 빈도와 크기를 비교한 것이다. 급전선에 발생하는 이상 상승 전압의 크기는 주로 2.5~4.0 kV의 값을 가지고 발생하는 것으로 나타나는데 이러한 과전압 특성은 피뢰기의 보호 특성을 설정하는 기초 자료가 된다.

2. 본 론

2-1. 서지 환경

현재 국내에 사용되는 전차 선로 서지 보호용 직류 피뢰기는 전량 수입에 의존하고 있다. 정격의 설정이나 서지 환경에 관해서는 주로 우리와 비슷한 일본의 전차 선로 환경 조건에 준하여 결정되어 있다. 현재 전차 선로 보호용 직류 피뢰기의 일반적인 서지 전압 특성은 표 1과 같다.

표 1. 직류 피뢰기의 일반적인 서지 특성

| 피뢰기 특성              |   | 비율(%) |
|---------------------|---|-------|
| 정격 전압<br>(해당 단위 전압) | 1,000V<br>1,500V<br>기타                                    | ■     |
| 임펄스 응답<br>계서 전압     | 5,000V 이하<br>10,000V 이하<br>15,000V 이하<br>20,000V 이하<br>기타 | ■     |
| 직류 정격<br>계서 전압      | 4,500V 이하<br>5,000V 이하<br>9,000V 이하<br>기타                 | ■     |
| 제한 전압               | 1,000A-1,000V<br>1,000A-10,000V                           | ■     |
|                     | 1,000A-10,000V<br>5,000A-10,000V                          | ■     |
|                     | 1,000A-25,000V<br>5,000A-25,000V                          | ■     |
|                     | 5,000A-5,000V<br>10,000A-5,000V                           | ■     |
|                     | 기타  | ■     |

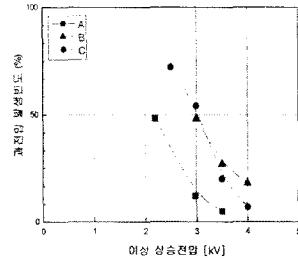


그림 1. 1500V 전차용 급전선에 유기 되는 전형적인 과도 전압 발생 빈도와 크기

서지 특성은 이상 과전압의 크기 뿐 아니라 지속 시간(duration time)도 중요하다. 그림 2에서 알 수 있듯이 서지 차단 시스템에 따라 서지의 파형과 지속시간은 차이를 갖는다. 자기 소호식 차단기에 의해 차단이 이루어지는 경우 차단전류는 약 1300A, 차단 피크 전압은 약 4300V의 값을 갖는 파형 특성을 나타내는데 이는 퓨즈에 의해 전류를 차단하는 경우 발생하는 차단 전류 약 715A, 차단 피크 전압 약 3320V와 비교하면 큰 서지 에너지를 갖는 형태이다. 하지만 전차의 경우 차단 초기에 전류를 크게 감소시키지 못하지만 약 40ms 정도 후반부에 이르면 전류가 급격히 감소하게 된다.

이 결과 서지 전압의 후반부는 유기 인덕턴스와 전류 변화와의 다음과 같은  $(-L \cdot di/dt)$  관계식에 의해 상승하게 된다. 후자의 퓨즈 차단의 경우는 차단 초기 순간적으로 퓨즈가 용단되어 아크가 발생 시 전류가 급속히 감소하는데 이 때 가장 높은 전압이 먼저 발생하고 이후 차단 후반부에 이르러서 아크 전류가 크게 감소하면서 이때 제2의 피크 전압을 갖는 차단 특징을 나타낸다. 이러한 특성은 직류 회로의 인덕턴스 성분과 이에 축적되는 서지 에너지의 관계에서 발생하는 현상으로 교류 회

로의 차단 특성과는 또 다른 특징임을 알 수 있다.

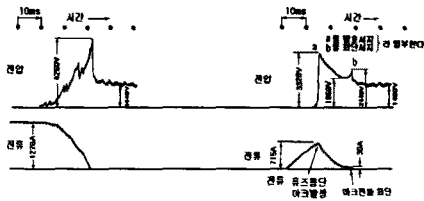


그림 2. 직류 회로에 발생하는 과전압 특성

### 2-2. 보호 범위

전차 선로 보호용 피뢰기는 보호 대상물이 주로 애자 되어 있어 방전 내량이 크고 제한 전압도 일반적으로 크다. 피뢰기의 설치 간격은 보호 범위의 보통 2배 정도를 취한다. 그림 3와 같이 보호 범위는 피뢰기의 방전 개시 전압(제한 전압과 접지 전위 상승분의 합이 방전 개시 전압보다도 낮아야 한다)을 고려하여 다음과 같은 관계식으로 나타낼 수 있다.

$$L \leq (v/2S)(V_f - V_s) \dots (1)$$

여기서 L은 보호 범위(m), v는 가선 상 뇌서지 전달 속도( $\sim 300\text{m}/\mu\text{s}$ ),  $V_f$ 는 애자의 섬락 전압(kV),  $V_s$ 는 피뢰기 방전 개시 전압(kV) 그리고 S는 뇌서지 급준도( $\text{kV}/\mu\text{s}$ )를 나타낸다.

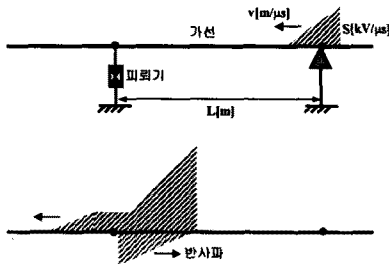


그림 3. 피뢰기 보호 범위 설정 모델

따라서 보호 범위를 결정하는 주된 파라메타는 애자 섬락 전압과 뇌서지 급준도이다. 애자 섬락 전압은 사용하는 애자의 종류에 의해 결정되므로 뇌서지의 급준도가 어느 정도까지 작용하는가 하는 문제가 중요하게 된다.

그림 4는 전형적인 피뢰기 보호 범위를 계산한 예이다. 설치 간격을 500m 이하로 하기 위해서는 서지 급준도가 매우 낮은 경우에 해당된다. 일반적으로 급준도 100~200  $\text{kV}/\mu\text{s}$ 의 경우를 고려하여 피뢰기 보호 범위는 대략 250~500m 범위로 설계하는 것이 보통이다.

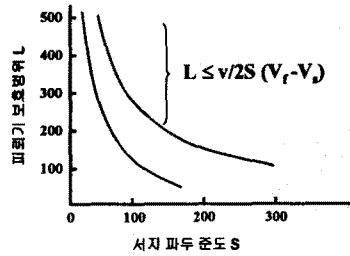


그림 4. 피뢰기의 보호 범위 계산 예

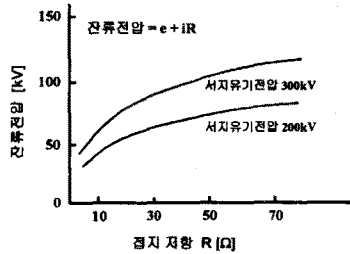


그림 5. 접지 저항과 잔류 전압 특성

선로용 피뢰기의 제한 전압과 가선에 유기되는 전압이 있다면 피뢰기가 동작할 경우 가선에 잔류하는 전압 e (제한 전압 + 접지 전위 상승값)는 다음과 같은 관계식으로 나타낼 수 있다.

$$e = 4,300i^{0.22} \dots (2)$$

$$E - (Z/2)i = e_a + iR \dots (3)$$

여기서 E는 가선에 유기되는 전압(kV), Z는 가선 유입 서지 임피던스( $\sim 200\Omega$ ),  $e_a$ 는 피뢰기 방전 전류 i에 대응하는 제한 전압(kV), i는 피뢰기 방전 전류(kA), R는 피뢰기 접지 저항( $\Omega$ )이다. 이때 유기 전압을 200kV와 300kV로 가정하면 접지 저항에 따른 선로 잔류 전압 특성을 그림 5와 같다. 이러한 제한 전압과 잔류 전압 특성으로부터 방전 개시 전압을 구하면 다음 그림 6과 같다.

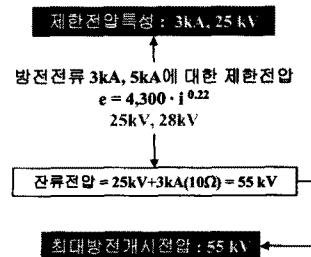
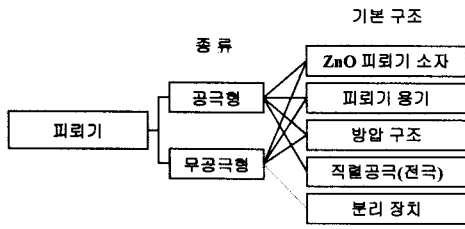


그림 6. 방전 전류에 따른 방전 개시 전압 특성

### 2-3. 동작 원리

피뢰기는 기존 SiC 소자를 사용하는 경우 직렬 공극(gap)을 갖는 구조로 제작되었다. 비선형 특성이 우수한 ZnO 소자가 장착된 피뢰기의 경우 적용 개소의 특성에 따라 직렬 공극이 있는 경우와 없는 경우 두 가지가 모두 사용된다. 그림 7에서는 이러한 공극형과 무공극형의 종류에 따른 기본 구조의 차이점을 간단히 설명한



것이다.

그림 7. 기본 구조 비교

직류 전차 선로 보호용으로 공극형 ZnO 피뢰기가 사용되는 이유는 다음과 같다.

- ▶ 일반 전력용 피뢰기보다 엄격한 사양 요구.
- ▶ 1선 접지계로 과전압과 상시 인가 전압 에너지가 크다.
- ▶ 개폐 서지 발생 빈도가 높아 사고 위험이 크다.
- ▶ 교류 선로의 경우 전압-전류 인가 파형이 자연적 0점 확보가 되어 속류차단이 수월하지만 직류 선로의 경우 자연적 0점 확보가 불가능하여 강제 0점 방식이 채용되어 이에 대한 안전을 고려한다.

공극형 피뢰기의 기본 동작 특성은 그림 9와 같다. 직렬 공극의 방전 개시 전압은 피뢰기 소자의 제한 전압보다 높게 설계된다. 피뢰기의 제한 전압 이상으로 넘어서지 않음에 따라 직렬 공극에서 방전이 이루어지고 이후 ZnO 소자의 제한 전압 특성에 따라 넘어서는 흡수된다. 하지만 이러한 과정은 공극과 피뢰기의 적절한 협조(coordination)가 이루어 지게 설계되는 것이 중요하다.

직류 공극형 피뢰기를 설계하기 위해서는 피뢰기 소자의 제한 전압 특성외에 공극의 길이를 적절히 설계하는 것이 중요하다. 일반적으로 피뢰기의 경우 속류 차단 능력, 상용 주파 내전압, 개폐 서지 내전압 그리고 뇌서지, 절연 협조 기능 등이 만족되도록 설계된다. 이때 이들 특성은 공극의 길이를 설정하는 기준으로 영향을 미친다. 그림 8은 이러한 공극 길이를 설계하기 위한 기본 알고리즘과 설계치를 나타낸 것이다.

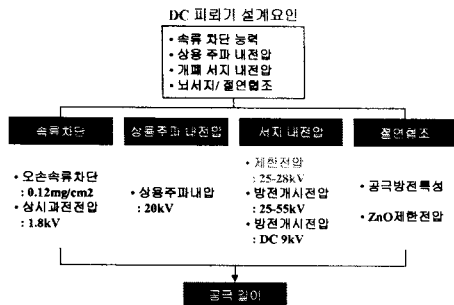


그림 8. 직렬 공극 길이 설정 요소

### 2-4. 피뢰기 시험 및 정격

일반적인 전력용 피뢰기의 경우 대표적인 적용 기준으로 IEC, ANSI, JEC 등이 적용되면 국내의 경우 이러한 국제 규격을 참고로 한 KS, EB 등 규격이 만들어져 적용되고 있지만 아직 철도 차량용 직류 피뢰기로 제한된 시험 및 적용 기준은 없다. JIS E 5003에서는 구

체적으로 철도 차량용 직류 피뢰기의 시험 방법을 규정하고 있다. 일반 전력용 피뢰기 및 장치와 전기적 특성 시험 방법이나 구성은 거의 유사하지만 직류 철도 차량을 염두에 둔 진동 시험 등의 안정성 평가 항목이 추가되어 있다. 표 2는 JIS E 5003에 규정된 시험 항목을 간추린 목록이다. 여기서 특히 진동 시험의 경우 JIS E 4031(철도 차량 부품의 진동 시험 방법)에 따로 취급하도록 되어 있으며 국내의 경우 이 부분은 KS B 8144-1992 에서 잘 규정하여 운용되고있다.

이러한 규격과 시험 요소를 검토한 결과 직류 피뢰기의 경우 기본적인 정격 설계나 에너지 내량 설정의 방법은 기존 전력용과 유사한 형태로 이루어진다. 하지만 앞절에서 언급한 바와 같이 직류 회로 조건이 갖는 서지 환경을 고려한 방전 등급 및 제한 전압 특성의 설계 그리고 장기 내구성을 확보할 수 있는 기준이 중요하다. 표 5는 현재 국내에 사용되고 있는 직류 피뢰기의 성능 비교 표를 나타낸 것이다.

표 2. 직류용 피뢰기의 성능 비교 표

| 특성           |           | 형태          | Gap type          | Gapless type                |
|--------------|-----------|-------------|-------------------|-----------------------------|
| 공칭전압         |           |             | DC 1,500V         | DC 1,500V                   |
| 정격전압         |           |             | DC 1,800V         | DC 2,000V                   |
| 공칭방전전류       |           |             | 5kA(8/20 $\mu$ s) | 5kA(8/20 $\mu$ s)           |
| 방전 특성        | 임펄스       | 100%        | 5,500V이하          | -                           |
|              |           | 0.5 $\mu$ s | 6,300V이하          | -                           |
|              | DC        | 4,300V이하    | -                 |                             |
| 동작개시전압 (하한치) |           |             | -                 | V <sub>1st,DC</sub> : 2.6kV |
| 제한전압         | 2kA       | 4,500V이하    | 4,500V이하          |                             |
|              | 5kA       | 5,500V이하    | 5,000V이하          |                             |
|              | 10kA      | 6,500V이하    | 5,500V이하          |                             |
| 개폐서지동작책무     | 표준 (800A) | 10회         | 20회               |                             |
|              | 인가 전압     | DC 1,800V   | DC 2,000V         |                             |

### (참 고 문 헌)

- [1] A. J. Erikson, C. L. Penman, and D. V. Meal, Review of five years lightning research on an 11kV test line. IEE Lightning and Power System Conference Paper, 1984.
- [2] F. De la Rosa and S. Lundquist, Lightning-induced Voltages in Distribution Power Lines. IEE Lightning and Power System Conference Paper, 1984.
- [3] A. Mayer, Overvoltage Protection for AC Traction Power Supplies and Vehicles. ABB Review, (3), 23-29, 1994
- [4] Wei-Han Wu and Fan-Liu Zhang, Numerical Calculation on Overvoltages of Power System. Science Press, Beijing, China, 1989.
- [5] Users Manual of Line-Frequency Parameters Program of Multiple-Conductors System. China: Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, 1985.
- [6] H. W. Dommel and I. I. Dommel, Transients Program Users Manual. Canada: Department of Electrical Engineering, the University of British Columbia, 1978.

Email : swan@keri.re.kr & hgcho@keri.re.kr