

직류 전차 탑재용 피뢰기 설계 및 기본성능평가

Basis Performance Evaluation and Design of Direct Current Arresters of Railway Rolling Stock

김 석 수* · 이 운 용 · 허 종 철* · 한 세 원 · 조 한 구
(Suk-Su Kim · Un-Yong Lee · Jong-Chul Her · Se-Won Han · Han-Goo Cho)

Abstract

The main objective of this paper is to design and test a new type of polymer ZnO surge arrester for DC power system of railroad vehicles. The rated voltage is 1500V direct current. The main research works are focused on structure design by finite element method, rating voltage, temporary over voltage and studies of characteristics of polymeric surge arrester.

Key Words : Polymer surge arrester(폴리머 피뢰기), Railway rolling stock(철도 차량), Electric field analysis(전계해석), Finite element method(유한요소법),

1. 서 론

직류 전철에 탑재되는 피뢰기는 뇌서지, 개폐서지, 직류 과전압 등의 스트레스들로부터 차량을 보호한다. 전철 시스템에서 사용되는 피뢰기는 가혹한 기후조건, 기계적 진동 등에 노출되며, 이들 환경에서 열적, 기계적, 전기적 안정성을 유지해야한다.

직류 회로 보호용으로 적용되는 피뢰기는 다른 피뢰기에 비해 보다 엄격한 사양이 요구되는 것이 일반적이다. 철도 차량용 피뢰기의 경우 전기적 조건으로는 1)회로가 일선 지락계로 이루어지므로 과전압이 일반 전력용과 비교하여 훨씬 높고, 2)피뢰기의 상시 인가전압 파형 왜율도 클 뿐 아니라 3)개폐서지 발생 빈도 또한 높은 조건이므로 엄격한 사양이 요구되는 것이 현실이다. 또한 구조상 차량 진동에 충분히 견딜 수 있는 내진 강도가 필요하며 차량 지상 탑재형의 경우에는 높은 내오손성과 소형화 그리고 유지 보수를 위한 계량화가 이루어 져야한다.

한국전기연구소 전략기술연구단

한국전기연구소 산업협력부*

국내 선로(공칭전압 DC 1500V)에 적용되던 무공극형(gapless type) 산화아연 피뢰기는 종래 공극형(gap type) 피뢰기와 비교하면 제한전압, 개폐서지 동작책무, 보호성능, 중량 등에서 훨씬 우수한 특성을 갖는다. 또한 기존 자기하우징 피뢰기의 경우, 섬락에 의해 파괴되면 그 파편이 비산하면서 주위의 전력기기에 손상을 주며, 외부형상의 설계에 있어서 제조상의 제약이 있어 누설거리를 늘리는 것 등 설계상에 많은 어려움이 따른다. 그러나, 고분자 하우징 피뢰기는 자기 하우징 피뢰기의 한계를 극복하도록 설계 및 제조가 가능하다는 장점을 가지고 있다. 또한 자기 하우징 피뢰기에 비해 내오손 성능이 우수하여 도심지의 여러 가지 오손물질이 많은 지역에 적절히 이용될 수 있다.

본 연구에서는 피뢰기의 규격과 시험 요소를 검토하여 직류 차량용 피뢰기의 기본적인 정격 및 에너지 내량 설계, 그리고, 직류 회로조건이 갖는 서지 환경을 고려한 방전등급 및 제한전압 특성을 설계하였으며, 모델 형상들을 설계한 후 전계해석과 기본 시험등에 대하여 검토하였다.

2. 직류 전차 피뢰기 설계

2.1. 시스템 설계

피뢰기는 전력 시스템을 이상 서지로부터 보호하는 중요한 전력 기기이므로 시스템의 동작 조건에 안전하게 운전되어야 한다. 이러한 조건을 만족시키기 위해서는 특히 TOV(temperatory over voltage)가 인가되는 환경 아래에서 시스템이 어떻게 동작되는지를 정확히 판단해야 한다. 그러나, 정확한 TOV 동작조건을 이해하기는 불가능하기 때문에 피뢰기의 선택에 있어서 충분한 안전 여유(safety margin)를 갖도록 설계될 필요가 있다.

피뢰기의 적절한 연속동작전압(U_c)과 TOV 내량을 선택하는 것은 피뢰기 설계의 가장 우선적인 요소이다. 어떤 환경에서도 피뢰기의 연속동작전압은 피뢰기 양단자의 실제 연속사용전압보다 크거나 같아야 한다. 교류 3상 시스템의 경우 접지와 상간에 연결된 실제 연속 사용 전압은 (시스템전압/ $\sqrt{3}$)이 되고 상과 상간의 실제 연속 사용 전압은 시스템전압과 같게된다. 마찬가지로 직류 차량용 시스템의 경우는 시스템 전압과 실제 연속 사용 전압은 같은 값을 갖는다.

TOV의 크기와 동작시간 또한 서지 스트레스에 대한 피뢰기의 에너지 내량을 설계하는 중요한 요소들이다. 주어진 사양에 맞도록 피뢰기를 선택하는 것은 보호레벨, TOV 내량 그리고, 에너지 내량과의 복합적이고 포괄적인 문제이다. ZnO 바리스터 직렬 블록 수를 늘려 TOV 내량을 증가시키는 경우 시스템 전압 스트레스에 의한 피뢰기의 장기 내구성은 향상되지만 주어진 보호 절연 레벨에서 피뢰기에 가해지는 보호 여유가 감소하게 되는 문제점이 발생한다.

우선 시스템에 가해지는 최대 시스템 전압을 알아야 한다. 단지 일반적인 시스템 전압만이 주어지는 경우 최대 시스템 전압은 일반적인 시스템 전압의 5~10% 높게 설정하면 된다.

가장 일반적으로 알려진 TOV는 단상 지락사고에 의한 TOV이다. 3상 교류의 경우 그 크기는 (최대 시스템 전압/ $\sqrt{3}$)에 사고 지락계수 k 를 곱한 값으로 나타난다. 여기서, 지락계수 k 는 접지조건에 따라 결정되는 상수이다. 일반적으로 교류 시스템의 지락계수는 약 1.2에서 1.7의 값으로 알려져 있는데 직

접접지 방식의 경우는 지락계수를 약 1.4, 중성점 접지 방식의 경우는 약 1.73의 지락계수를 갖는다고 판단한다. 직류 차량용 시스템의 경우 직접 접지 방식이 채택되므로 지락계수는 약 1.4 정도로 다루는 것이 타당하다.

TOV 지속시간은 시스템의 조건이 매우 다양하여 일괄하여 정확히 판단하기는 힘들다. 교류 고전압의 직접접지의 경우 약 1~3초 그리고 배전급 직접접지의 경우 약 3~10초 정도 지속되는 것으로 알려져 있다. 중성점 접지방식의 경우 지속시간이 수초에서 수 시간까지 지속되기 때문에 직접접지 보다 더 중요하게 다루어져야 한다. 예견되는 TOV 지속시간이 2시간 이상일 경우 이는 지속 TOV로 간주하여 피뢰기를 설정하는 것이 안전하다.

일반적으로 지락사고(earth fault)나 부하 반발(load rejection)에 의해 발생하는 TOV가 주로 다루어진다. 그러나 어떤 네트워크에서는 공진 과전압(resonance overvoltage)이 발생하기도 한다. 일반적인 교류 송전 시스템이나 배전 시스템의 경우 이러한 공진 과전압은 적당한 시스템 설계를 통해 피할 수 있으므로 피뢰기의 TOV 내량 설정에 심각한 고려 대상은 아니다.

어떤 경우 회로가 부분적인 비유효 접지 구간을 유지하게 되는 기간이 발생하여 지락계수가 증가하게 된다. 이 기간 중 혹시 발생하게 되는 지락사고는 보다 높은 TOV를 가져오게 되어 피뢰기 사고가 발생할 수도 있다. 이러한 사고의 발생은 드물지만 보다 높은 안전을 유지해야하는 시스템의 경우 높은 TOV 내량과 보호 레벨을 갖는 피뢰기의 설계가 필요하다.

직류 차량용 피뢰기의 경우 실제 사용 연속동작 전압은 최대 시스템 전압보다 높게 설계된다. 여기서 적용하는 직류 차량용 피뢰기의 시스템 정격은 DC 1500V로 설정되어 있으므로 실제 연속사용동작 전압은 이보다 큰 값으로 설계되어야 한다. 일반적인 시스템의 경우 연속사용전압을 보다 쉽게 선택하는 방법은 IEC 99-4에서 추천하는 시스템 전압에 대한 연속 사용 전압 테이블을 참고하면 간편하다.

직류 차량용의 경우 실제 연속사용전압은 최대 시스템 전압인 1500V 보다 크게 설정하게 되며 비정상 동작 조건을 감안하면 최대 10%의 큰 값 즉 1650 V

이상은 되어야 한다.

2.2. 형상 설계

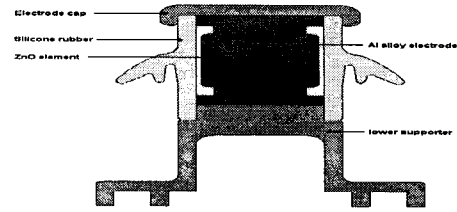
고분자 하우징 피뢰기의 설계기술은 전기적 절연 성능을 확보하기 위한 절연설계와 피뢰기의 기능을 확보하기 위한 구조설계, 고장전류에 대한 방폭설계 그리고 계면/접착 설계로 분류할 수 있다. 절연설계는 재료의 선택, 안정적인 절연형상, 누설거리 등이 해당되며 구조설계는 ZnO 소자와 전극과의 기밀설계, 계면접착 설계, 고장전류에 대한 방폭구조 등에 해당된다. 기능에 따른 특성설계는 선로의 서지보호 등급을 고려하여 소자의 선택과 직선절연 거리를 산정할 수 있다. 이러한 설계기초를 바탕으로 피뢰기를 모델링하여 전개해석을 하였으며, 모델은 3가지로 선정하였다.

그림 1과 같이, 전체적인 구조는 상·하부 사이에 ZnO소자가 들어있고, 그 주위는 FRP로 둘러싸인다. 외부하우징은 내오손 성능이 우수한 실리콘고무를 선택하였다. 3가지 모델의 차이점은 외부하우징의 형상이다. 모델 1은 갓이 한 개이며 누설거리가 175mm이고, 모델 2와 3은 갓이 두 개로 이루어져 있으며, 누설거리는 225mm이다. 모델 2와 3의 차이는 1번갓의 위치로, 모델 2보다 모델 3이 1번갓이 전극캡으로부터 보다 멀리 떨어져 있다.

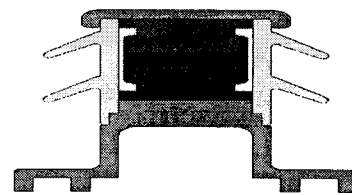
그림 2는 모델 1에 대한 등전위선 분포(피뢰기 연속동작전압 2000V)를 나타낸 것이다. 등전위선이 조밀한 곳은 전극캡 주위임을 알 수 있다.

각 모델들에 대한 전계값을 계산한 결과, 모델 1, 2, 3의 최대 전계값은 2.34×10^5 , 2.52×10^5 , 2.38×10^5 [V/m]이었으며, 그 위치는 전극캡과 고분자 하우징이 만나는 부분이었다. 세 모델에 대한 전계분포를 비교하기 위해, 그림 3과 같이 최대전계값을 같은 값으로 낮춰 전계분포를 나타내어 보았다. 전반적으로 전계집중이 나타나는 곳은 세 모델이 마찬가지로 전극캡 주위, 피뢰기 내부 계면들에서 나타나고 있다. 또한 모델 1보다 누설거리를 확장시킨 모델 2, 3에서 1번갓의 색깔분포를 비교해보면, 큰 변화는 아니지만 모델 3의 경우가 전계집중이 보다 완화된 모습을 볼 수 있다.

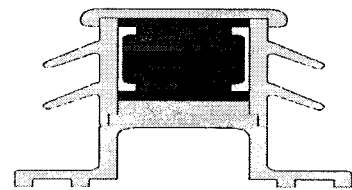
3. 피뢰기의 기본성능시험



Model 1



Model 2



Model 3

그림 1. Model 형상 설계

가. 누설전류시험

완제품 피뢰기에 정격전압을 10초간 인가하여 안정된 상태에서 누설전류를 측정하며 시험기준은 2mA 이하이며 결과는 0.165mA로 양호하였다.

나. 동작개시전압시험

시험방법은 피뢰기 양단자에 DC 1mA를 인가하여, 단자간의 전압을 측정한다. 시험기준은 DC 2300 V 이상을 요구한다. 시험결과는 2720 V로 양호하였다.

다. 제한전압시험

시험방법은 피뢰기에 규정의 충격전류를 인가하여 단자간의 전압을 측정한다. 시험파형은 파두장은 7~9 μ s, 파미장은 18~22 μ s, 충격전류는 2, 5, 10kA

이며 시험결과는 표 1과 같다

표 1. 제한전압 시험 결과

시험기준		시험결과			판정
전류 (kA)	전압 (V)	전류 (kA)	전압 (V)	OSC. No.	
2	4500 이하	2.06	3930	PT01	양호
5	5000 이하	5.16	4370	PT02	양호
10	5500 이하	10.39	4970	PT03	양호

라. 단시간 대전류 방전특성시험

시험방법은 피뢰기에 규정의 충격전류를 인가한다. 시험파형은 파두장은 3.5~4.5 μ s, 파미장은 9~11 μ s, 충격전류는 100kA \pm 10%, 시험횟수는 2회, 회간간격은 주위온도로 생각하였으며, 시험기준은 시험 전·후의 제한전압 변화율이 10% 이내 이어야 하며, 또한 피뢰기 소자에 관통, 성락 및 균열 등의 손상이 없어야 한다. 시험결과 표 2, 3과 같다.

표 2. 대전류 충격전류-전압 측정

	충격전류(kA)	제한전압(kV)
1st	90.67	11.77
2nd	91.46	11.45

표 3. 시험 전, 후 뇌충격 제한전압시험 및 육안검사

	뇌충격제한전압시험 (8/20 μ s)				육안검사
	충격전류 (kA)	제한전압 (kV)	OSC. No.	변화율 (%)	
시험 전	5.16	4.37	PT02	0	성락 및 균열등의 손상없음
시험 후	5.08	4.37	PT04		

[참고문헌]

[1] Hirokazu Teraszka, "Gapless Surge Arresters for Electric Power Systems", TOSIBA Review, 34(2), 1979

[2] Takatugu Yamaya, "Gapless Surge Arresters for Shinkansen Electric Coaches of Japanese National Railways", TOSIBA Review, 34(2), 1979.

[3] 日本電氣學會技術報告, "酸化亞鉛素子の 新適用技術動向", 579호, 1996(2).

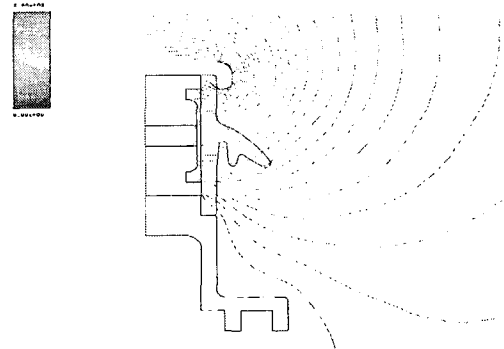


그림 2. 모델 1에 대한 등전위선 분포

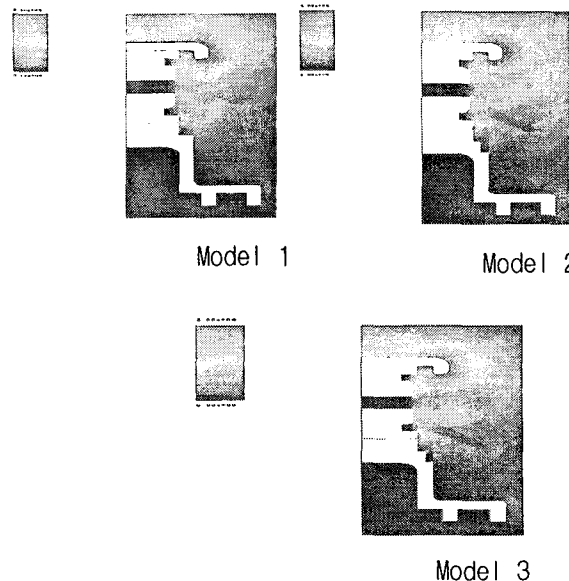


그림 3. Model 1, 2, 3의 전계분포