

직류 전동차용 피뢰기 진단기술

Diagnostic Techniques for DC Electric Railway Arresters

길 경 석*, 송 재 용**, 문 승 보***, 한 주 섭§, 박 대 원§§
G. S. Kil*, J. Y. Song**, S. B. Moon***, J. S. Han§, D. W. Park§§

ABSTRACT

This paper describes the performance evaluation and the diagnostic technique for DC railway arresters. We carried out field measurements on DC electric train to know the frequency and the magnitude of surge currents generated. Surge currents of 1 ~ 3 times were recorded in one running service route and their magnitudes were ranges of 150 A ~ 2 kA.

A surge current generator which produces 8/20 μ s, 10 kA was set-up and an acceleration experiment was carried out to propose an optimum diagnostic standard for the DC electric railway arresters. After the repetitive application of 3,000 times, the reference voltage decreased by 4.5 % and the leakage current was below 10 μ A at 1650 V, maximum continuous operating voltage (MCOV). Also, we designed a railway arrester tester which is based on the experimental results. The tester analyzes reference voltage and leakage current automatically, and decides the arrester condition.

1. 서 론

전기 철도용 변전소와 급전계통, 전동차에는 뇌운에 의한 대전현상이나 낙뢰로 인하여 외부로부터의 직격뢰와 유도뢰에 의한 과도과전압(Very Fast Transient Overvoltages, VFTO)과 내부 급전계통 운영에 필요한 차단기의 동작, 전력변환기기의 사용으로 인한 개폐과전압이 빈번하게 발생한다. 과도과전압은 정상운전전압보다 최대 십 수배에 달하므로 과도과전압의 침입시 계통에 연계되어 있는 애자, 부상, 변압기, 차단기 등의 전력설비와 각종의 저압용 전기·전자·신호·통신 기기의 절연을 위협하게 된다. 이에 대해 경제적, 기술적으로 가장 효과적인 대책은 전압-전류의 비선형 저항특성이 우수한 산화아연(ZnO)형 피뢰기(Lightning Arrester)를 기기 또는 선로에 병렬로 설치하는 것이다^{[1],[2]}. 그러나 피뢰기도 제조사의 결함이나 사용 환경에서의 흡습, 이상전압에 대하여 반복되는 보호동작으로 열화가 진전되며, 열화된 피뢰기가 계통에 설치되어 있으면 정상운전전압에서도 누설전류에 의해 과열되고, 열폭주에 도달하면서 피뢰기의 단락으로 인한 지락사고로 진전하여 2차적인 인적·물적 사고를 유발시킨다^{[3],[4]}.

특히, 전기철도용 변전소, 급전선로 및 전동차에 설치되어 있는 피뢰기의 사고시는 단순한 정전이외에 동 계통에서 급전을 받고 있는 전동차의 운행이 중지되므로 기술적, 경제적 손실과 신뢰성 저하 등의 문제가 크다. 따라서 전기철도 계통에 설치되는 피뢰기는 검수단계부터 품질관리와 운영 중 열화 정도를 진단하는 것에 의해 피뢰기의 성능을 예측하여, 열화된 피뢰기를 사전에 제거하여야 한다. 이들 과정에서 피뢰기로 인한 사고를 예방하여 전력공급의 신뢰성을 향상시키고 전동차 및 급전선로의 동작 신뢰성을 확보할 필요가 있으므로, 전철용 피뢰기의 종류와 설치 대상별로 기술과 장치의 개발이 필요하다.

* 한국해양대학교 부교수, 정회원

** 한국해양대학교 전기전자공학부 Post-doc., 정회원

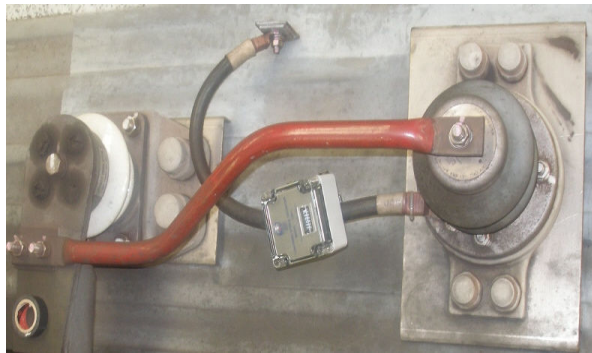
*** 한국해양대학교 대학원 석사과정, 정회원

§ 한국철도기술연구원 연구원, 정회원

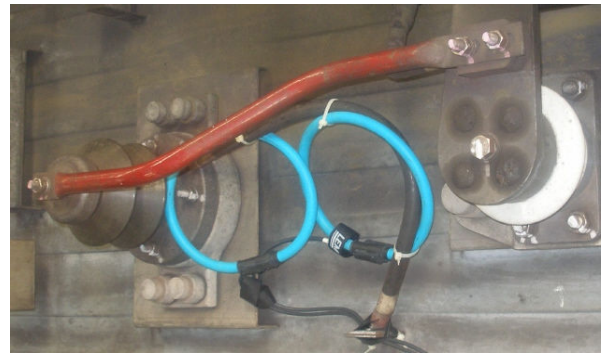
본 논문에서는 일부 전철구간의 현장 계측을 통하여 자료를 수집·분석하고, 직류 피뢰기에 대한 가속 열화 시험을 수행하여 피뢰기의 특성을 평가하였으며, 이들 결과로부터 진단 및 검수 기술, 장치 개발 등 직류 전동차용 피뢰기 진단 기술에 관하여 연구하였다.

2. 현장 계측 및 분석

직류 전동차용 피뢰기의 동작빈도와 서지전류의 크기 측정으로부터 피뢰기 진단 및 검수에 관한 자료를 확보하기 위하여 실제 운행 중인 차량에서 현장 계측을 수행하였다. 현장 계측에 사용된 장비는 서지카운터와 전력분석기(Power recorder, RPM1650, Fluke)로 그림 1과 같이 직류 전동차용 피뢰기의 접지선에 설치하였다. 현장 측정에 사용된 서지 카운터는 8/20 μ s 표준 뇌임펄스 전류에 대하여 1.2 kA 이상일 때 동작하도록 구성되어 있으며, 로고스키 코일에서 측정된 서지전류는 전력분석기를 통해 측정과 분석이 이루어진다. 서지카운터의 동작이나 로고스키 코일에서 서지전류가 측정되는 것은 전차선로에서 발생된 서지에 대하여 피뢰기의 보호동작이 수행되는 것을 의미한다.



(a) 서지카운터의 설치 모습

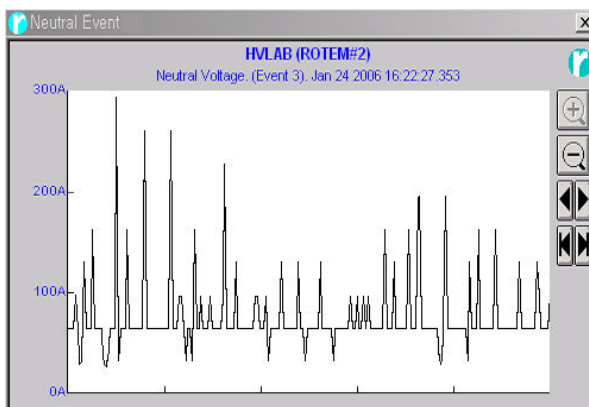


(b) 전류센서의 설치 모습

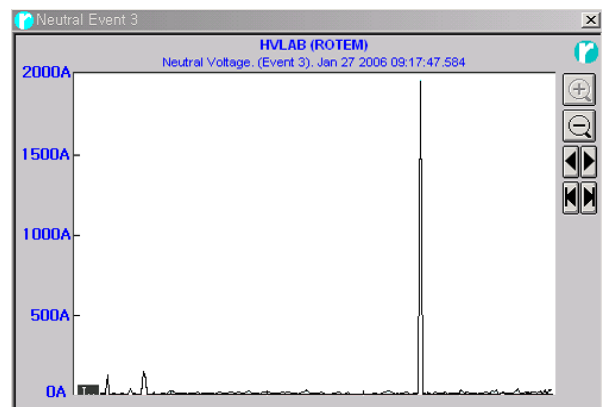
그림 1 현장 측정 사진

Fig. 1 Photographs of field measurement

현장 측정은 1회 운행 기준 왕복 2시간 30분이 소요되는 전동차의 실제 운행구간에서 실시하였으며, 시험용 차량에서 총 3회에 걸쳐 측정을 수행하였다. 측정 결과 서지카운터는 동작하지 않았으며, 로고스키 코일에서 그림 2와 같이 서지전류가 관측되었다. 그림 2에서 측정된 서지전류의 크기는 약 150 A ~ 2 kA 사이의 값으로 발생빈도는 1회 운행시 대략 1 ~ 3회 정도의 서지전류가 발생하는 것으로 측정되었다.



(a)



(b)

그림 2 측정된 서지전류의 예

Fig. 2 Measured waveforms of surge current

측정 대상 지하철 구간에서 전동차의 운행횟수는 1일 4 ~ 7회 정도 운행되며, 2일 운행 후 1일 정지 및 점검의 형태로 운용되므로 1일 서지 발생빈도는 5 ~ 20회 정도이고, 이를 연간으로 환산하면 최소 1,000회 이상 서지에 대한 피뢰기의 보호동작이 이루어지는 것으로 추정된다. 또한 현장 측정 결과에서 1.5 kA 이상의 서지전류도 4회 이상 관측되므로 피뢰기에 의한 사고방지를 위해서는 주기적인 진단과 점검이 이루어져야 할 것으로 판단된다.

3. 피뢰기 특성 평가

직류전동차용 피뢰기의 정확한 진단기술 개발을 위해서는 정확한 현장 측정을 통해 서지 또는 과전압의 발생빈도를 파악하는 것뿐만 아니라 피뢰기의 서지에 대한 특성을 파악하는 것이 중요하다. 따라서 본 연구에서는 그림 3과 같이 8/20 μ s 표준 뇌임펄스 전류 발생기를 제작하여 인위적으로 5 kA의 서지전류를 인가하는 가속 열화 실험을 수행하였다. 실험에 사용된 피뢰기는 현재 직류전동차 탑재형으로 광범위하게 사용되고 있는 모델로 전기적인 사양은 표 1과 같다.

8/20 μ s 표준 뇌임펄스 전류에 대한 피뢰기의 동작특성은 그림 4에 나타낸 것과 같이 5 kA의 서지전류가 인가될 때 제한전압은 5.25 kV로 나타났다. 전동차에 설치된 전기설비는 피뢰기의 제한전압 범위에서 보호가 이루어지며, 전기설비의 절연내력은 피뢰기의 제한전압보다 높게 설계되므로 초기의 제한전압 특성을 유지한다면 절연과피 사고는 발생하지 않는다. 그러나 피뢰기가 열화되면 제한전압도 높아지기 때문에 열화된 피뢰기가 설치되어 있는 경우, 1차적인 보호동작이 이루어지지 못하고, 오히려 2차사고 유발의 원인으로 작용한다.



그림 3 서지발생장치의 사진
Fig. 3 Photograph of surge generator

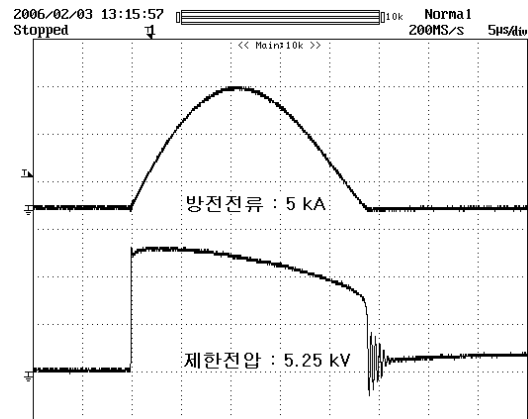


그림 4 서지전류 및 제한전압 파형
Fig. 4 Typical waveforms of surge current and clamping voltage

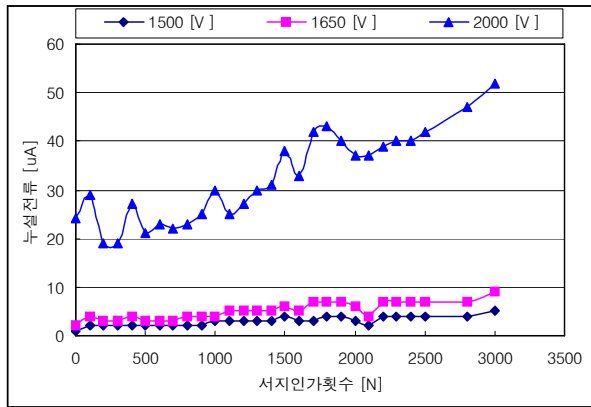
표 1 직류전동차용 피뢰기의 사양
Table 1 Specification of DC electric railway arrester

종 류	ZnO Gapless형 Polymer Housing
정격전압	2,000 [V _{DC}]
최대연속사용전압 (MCOV)	1,650 [V _{DC}]
방전내량	8/20 μ s 10 [kA]

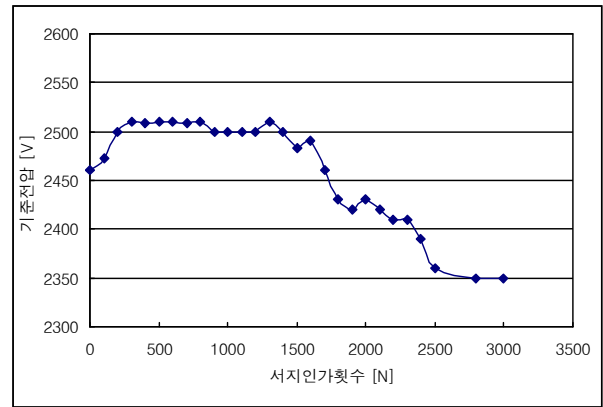
피뢰기 특성평가를 위한 가속 열화 실험에서는 100 회 단위로 서지를 인가하고, 100 회 인가시마다 누설전류와 기준전압의 변화를 측정하였다. 누설전류의 측정은 정확한 진단 파라미터 도출을 위하여 공칭 운전전압 1,500 V, 최대 연속 사용전압 1,650 V, 정격전압 2,000 V에서 누설전류의 변화를 측정하였

다. 또한 피뢰기의 진단항목 중 하나인 기준전압은 열화 정도에 따라 감소하는 경향을 나타내므로 서지 인가횟수에 따른 기준전압의 변화도 관측하였다.

가속 열화 실험 결과는 그림 5에 나타난 것과 같이 서지 인가횟수에 따라 약 1,500회까지 누설전류는 미세하게 증가하는 것으로 측정되었으며, 기준전압은 거의 변화가 관측되지 않았다. 그러나 1,500회 이후에는 누설전류가 지속적으로 증가하는데, 특히 운전전압 및 최대 연속 사용전압에서는 변화가 작게 나타나지만, 정격전압에서는 누설전류가 크게 증가하는 경향을 나타내었다. 또한 기준전압도 1,500회 이후에서 감소하는 폭이 비교적 크게 나타나는 것으로 관측되었다. 따라서 직류전동차용 피뢰기의 경우, 서지에 대한 보호동작에 따라 열화가 진행되며, 열화 정도는 누설전류와 기준전압의 변화를 측정하는 것으로 진단이 가능함을 확인하였다.



(a) 누설전류 변화



(b) 기준전압 변화

그림 5 서지인가에 따른 누설전류와 기준전압의 변화

Fig. 5 Changes of leakage current and reference voltage to the surge current

4. 직류용 피뢰기 진단장치

산화아연형 캡리스 피뢰기는 직류에서 운전 중 저항분 누설전류만 흐르게 되므로 교류에서 운영되는 피뢰기에 비해 관리가 용이하다.

본 연구에서 고려한 대상 피뢰기는 신품(S1, S2) 및 기존 전동차에서 수거된 기사용품(S3, S4)으로 정격전압은 동일하지만 최대 연속 사용전압은 신품의 경우 1,650 V이고, 기사용품은 1,500 V의 사양을 갖는다. 또한 부산지하철 급전계통의 정격전압은 DC 1,500 V이지만 상시 DC 1,500 ~ 1,650 V 범위이므로 피뢰기의 최대연속 사용전압은 1,650 V 이상이 되어야 한다. 따라서 누설전류 분석을 이용하여 진단을 수행하는 경우 급전계통의 정격전압(1,500 V), 최대 운전전압(1,650 V), 피뢰기 정격전압(2,000 V)에서 누설전류의 크기를 고려해야 한다. 기준전압(V_{ref} , Reference Voltage)은 저항분 누설전류 1 mA가 흐르는 직류전압으로 정상상태일 때의 기준전압에 비해 10% 이상 감소하는 경우, 운전전압에서 100 μ A 이상의 누설전류가 흐르게 되어 발열현상을 수반할 수 있으므로 이를 기준으로 피뢰기 진단을 수행하는 것이 바람직하다.

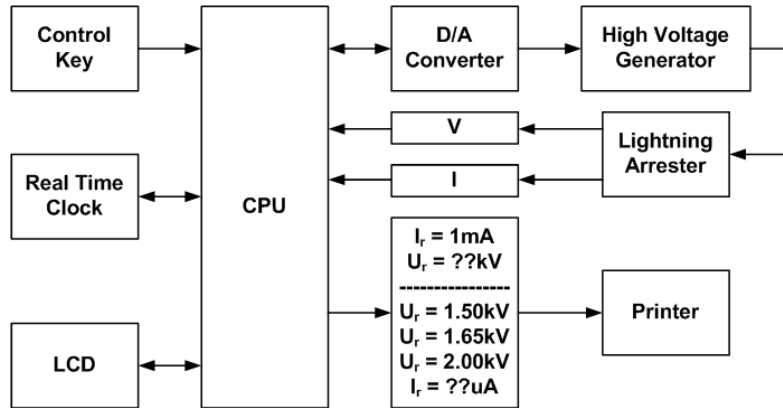
4.1 진단장치의 구성

현장 측정 결과와 가속 열화 실험결과를 바탕으로 그림 6에 나타난 것과 같이 직류용 피뢰기 진단장치를 설계·제작하였다.

진단장치는 원칩 마이크로프로세서를 기반으로 시험전압 조정을 위한 D/A 컨버터, 인가전압 및 누설전류 측정을 위한 A/D 컨버터, LCD 표시장치, 내장형 프린터로 구성되며, 시험전압 인가 및 누설전류의 측정이 자동적으로 이루어지도록 하였다. 또한 직류고전압을 일정한 비율(100 V/s)로 증가시키면서 1,500 V, 1,650 V 및 2,000 V에서 누설전류가 자동으로 측정되도록 하였으며, 기준전압의 측정도 가능하

다. 특히 직류전압에서의 누설전류는 인가하는 시험전압의 증가비율에 따라 크기가 크게 달라지기 때문에 시험전압의 자동증가와 측정이 필수적이다.

누설전류 및 기준전압의 측정이 완료되면 자동으로 시험전압의 공급이 차단되며, 마지막으로 공급된 인가전압과 측정된 누설전류의 값이 표시되고, 내장형 프린터를 통하여 측정값을 인쇄할 수 있다.



(a) 구성



(b) 사진

2006/03/07	21:06:12
2378 [V]	1023 [uA]
2006/03/07	21:07:11
1003 [V]	0 [uA]
1505 [V]	2 [uA]
1652 [V]	6 [uA]
1807 [V]	14 [uA]
2006 [V]	51 [uA]

(c) 프린터 출력의 예

그림 6 직류용 피뢰기 진단장치

Fig. 6 Prototype diagnostic equipment for DC railway arrester

4.2 적용실험

시제작한 직류용 피뢰기 진단장치를 이용하여 신품 피뢰기(S1, S2) 및 기사용 피뢰기를 대상으로 적용실험을 수행하였다. 진단장치를 이용하여 누설전류 및 기준전압을 측정된 결과, 표 2와 같은 결과를 얻었다.

신품 피뢰기(S1, S2)를 대상으로 측정된 누설전류의 값은 최대 연속 사용전압(1,650 V)에서 10 μ A 이하, 정격전압(2,000 V)에서 20 ~ 50 μ A로 낮게 측정되었다. 기사용 피뢰기(S3, S4)는 급전계통의 정격전압(1,500 V)에서 수십 μ A 이상 흐르는 것으로 관측되었으며, 정격전압에서는 2.2 mA 이상의 누설전류가 측정되었다. 특히 최대 운전전압 1,650 V에서는 100 μ A 이상의 누설전류가 흐르므로 전동차 운행 중 피뢰기에서의 발열 현상을 수반하게 되고, 발열 현상의 증가는 누설전류의 증가로 이어지며, 최종적으로는 단락사고로 이어져 피뢰기가 폭발하고, 급전계통의 지락 사고로 이어지게 된다.

기준전압의 측정결과에서도 신품 피뢰기에서는 2,300 V 이상으로 높게 측정되지만, 기사용 피뢰기에서는 각각 1,380 V와 1,920 V로 피뢰기의 열화에 따라 기준전압이 낮아지는 것으로 측정되었다.

따라서 본 연구에서 제작한 직류용 피뢰기 진단장치는 운전전압 및 정격전압에서의 누설전류와 기준전압에 대한 측정과 분석이 가능하므로 신품 피뢰기의 검수, 기설치된 피뢰기에 대한 진단에 충분히 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

표 2 피뢰기 특성 분석 결과

Table 2 Analysis results of arrester characteristics

시료 번호	I[μ A] at 1,500[V _{DC}]	I[μ A] at 1,650[V _{DC}]	I[μ A] at 2,000[V _{DC}]	V _{ref} [V _{DC}]	비고
S1	1	2	24	2,460	신품
S2	2	4	54	2,300	신품
S3	1,950	2,700	10mA이상	1,380	불량
S4	37	117	2,200	1,920	열화,교체

5. 결 론

본 논문에서는 직류 전동차용 피뢰기의 성능 평가 및 진단 기술에 대하여 중점적으로 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

직류 전동차에 설치된 피뢰기를 대상으로 피뢰기의 동작빈도와 방전전류의 계측과 분석을 수행하였다. 현장 측정은 1회 운행에 약 2시간 30분이 소요되었으며, 3회의 측정결과로부터 서지전류의 발생빈도는 1회 운행시 1 ~ 3회, 방전 전류는 150 A ~ 2 kA이었다.

피뢰기의 최적 진단 기술과 기준, 주기 등을 제시하기 위하여 8/20 μ s 5 kA의 표준 뇌충격전류를 1분 간격으로 인가하는 가속실험을 수행한 결과, 누설전류는 서서히 증가되고 기준전압은 감소하는 경향을 나타내었으며, 3,000 회의 뇌충격 전류의 인가에도 기준 전압은 4.5 % 감소, 최대 연속 사용전압에서 누설전류는 10 μ A이하로 양호한 상태를 유지하였다.

전동차 1대 1일 5회 운행이라고 할 때, 1회 운행시 1 ~ 3회의 5 kA 서지 발생을 고려하면 1년 이내에 정상운전전압 하에서 사고를 발생시킬 만한 열화는 없을 것이다. 그러나 피뢰기 설치조건에서의 흡습과 표면 오염, 기계적 진동 등을 고려하여 1년까지는 6개월에 1회, 1년경과 후 월상(3개월 주기)점검이 적절한 것으로 판단된다.

현장 계측과 특성 실험으로부터 급전선로의 최대 운전전압을 1,650 V로 가정하고 피뢰기의 검수와 진단에 요구되는 장치를 설계하였다. 이 장치를 활용하면 비전문가도 피뢰기의 상태를 분석할 수 있으므로 피뢰기에 의한 사고를 충분히 예방할 수 있을 것으로 기대한다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력연구원(R-2005-B-138)주관으로 수행된 과제임.

참고문헌

1. R.A.Sargent et al., "Effects of Multiple Impulse Currents on the Microstructure and Electrical Properties of Metal-oxide Varistors", IEEE Transaction on Electrical Insulation, Vol.27, No.3, pp.586 ~ 592, 1992.
2. Peter Hase1, Overvoltage protection of low-voltage systems, The Institution of Electrical Engineers, p.358, 2004.
3. T.K.Gupta, "Application of zinc oxide varistors", Journal of the American Ceramic Society, Vol.73, No.7, pp.1817 ~ 1840, 1990.
4. O.Nigol, "Methods for Analyzing the Performance of Gapless Metal Oxide Surge Arresters", IEEE Transaction on Power Delivery, Vol.7, No.3, pp.1256 ~ 1262, 1992.