

전기철도용 피뢰기 선정에 관한 연구

A Study on the Selection of Lightning Arrester for DC Electric Traction Vehicles

길 경 석*, 송 재 용**, 김 일 권***, 문 승 보***, 한 주 섭§
G. S. Kil*, J. Y. Song**, I. L. Kim***, S. B. Moon***, J. S. Han§

ABSTRACT

Selection and application recommendations of lightning arresters for DC electric traction vehicles are presented. To decide arrester specification such as continuous operating voltage (COV, U_C), rated voltage (U_R), and nominal discharge current (I_n), variations of system voltage and surge currents flowing arresters were analyzed in running-service of traction vehicles. System voltages increased up to 1,800 V during anti-breaking. Surge currents recorded 3 times per running-service-route and their magnitudes were ranges of 150 A ~ 2 kA.

From the field measurement and consideration of EN50163, COV, U_C , and U_R for the 1,500 V_{DC} traction vehicles were proposed.

1. 서 론

전기에너지가 사용되는 저·고압 전력계통에는 외부로부터의 낙뢰나 계통내의 기기동작에 의해 정상운전전압보다 최대 십 수배를 넘는 과도전압(overvoltages)이 발생할 수 있다. 과도전압의 발생시는 동일 계통에 연계되어 있는 애자, 부싱, 변압기, 차단기 및 인버터 등의 전력설비와 각종의 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)}.

과도전압은 교류전원계통에서 뿐만 아니라 전기철도와 같은 직류전원계통에서도 심각한 문제를 유발시키므로 피뢰기의 사용이 일반화되어 있다. 그럼에도 불구하고 현재까지 교류전원계통에서 피뢰기의 선정과 관리를 위한 과도전압의 발생, 절연협조 및 열화진단기술 등에 대한 연구가 수행되어 왔다.

직류 전기철도분야에서는 단순히 급전계통의 공칭전압과 방전내량만 규정되어 있을 뿐, 우리나라의 전기철도의 운전특성에 적합한 피뢰기의 선정과 관리에 대한 연구는 전무한 실정이다⁽³⁾⁻⁽⁷⁾.

피뢰기는 제조시 결함, 사용 환경에서의 열화 및 부적절한 선정 등으로 정상 운전중에도 전력공급 사고를 발생시킬 수 있다. 이는 운전전압에서도 피뢰기의 누설전류로 과열되고, 열폭주(thermal runaway)에 도달하면서 지락사고로 진전하여 2차적인 인적·물적 사고를 유발시킨다.

따라서 피뢰기의 선정에 있어서는 정상상태에서 운전특성을 고려하여 최적의 보호특성과 타기기와의 절연협조를 고려하여야 한다.

* 한국해양대학교 전기전자공학부 부교수, 정회원

** 한국해양대학교 전기전자공학부 Post-doc., 정회원

*** 한국해양대학교 대학원, 정회원

§ 한국철도기술연구원 연구원, 정회원

이들 배경으로부터 본 논문에서는 공칭전압 직류 1,500 V 직류전동차에 탑재되는 차량용 피뢰기를 대상으로 운전특성에 대한 분석과 관련 국제규격을 검토하여, 조사대상 전동차에 적합한 피뢰기의 선정기준에 대하여 제시하였다.

2. 현장 계측 및 분석

전술한 바와 같이 피보호 기기에 적합한 피뢰기의 선정을 위해서는 피뢰기의 운전상태에 대한 분석이 선행되어야 한다. 피뢰기 열화의 주된 요인은 외부로부터 침입하는 서지와 운전상태에서 급전전압의 일시적인 상승에 의한 과전압이 대부분을 차지한다.

직류전동차에는 급전선과 집전장치인 팬토그래프(pantograph)의 접촉 불량, 인버터 사용에 의한 서지전류와 과전압의 발생 및 회생제동에 의한 급전전압의 상승이 빈번하다. 따라서 피뢰기에 영향을 주는 요인으로 전동차 운행구간에서 과도과전압의 발생빈도와 급전계통에서 전동차에 공급되는 가선전압의 변동에 대한 정확한 측정과 분석이 필요하다.

본 연구에서는 그림 1과 같이 팬토그래프에 연결되는 피뢰기의 고압단자에 고전압 프로브(1000:1, DC ~ 70 MHz)를, 접지단자에는 로고우스키 센서(Rogowski coil)를 설치하고 고속의 전력분석기로 서지전류와 과전압의 발생, 운전전압의 변동을 측정하였다.



(a) High voltage probe



(b) Rogowski sensors

그림 1 전압(고전압 프로브) - 전류(로고스키코일) 센서 설치

Fig. 1 Installation of high voltage probe and Rogowski sensors

이들 측정은 총 37구간으로 1회 운행을 기준으로 왕복 2시간 30분이 소요되며, 3회에 걸쳐 수행하였다. 3차례의 측정으로부터 서지전류 및 과도과전압의 크기와 발생빈도 각 구간에서 최대운전전압과 상시운전전압을 분석할 수 있었다.

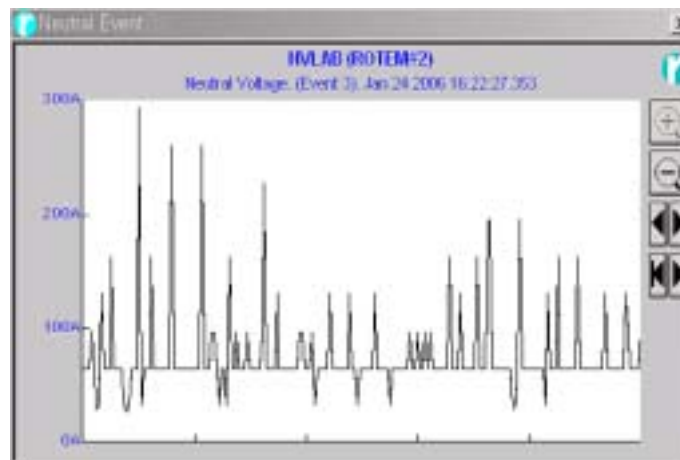
2.1 서지 전류의 측정

그림 2는 고속 전력분석기에 기록된 서지전류의 예를 나타낸 것으로, 여러 차례의 측정에서 그림

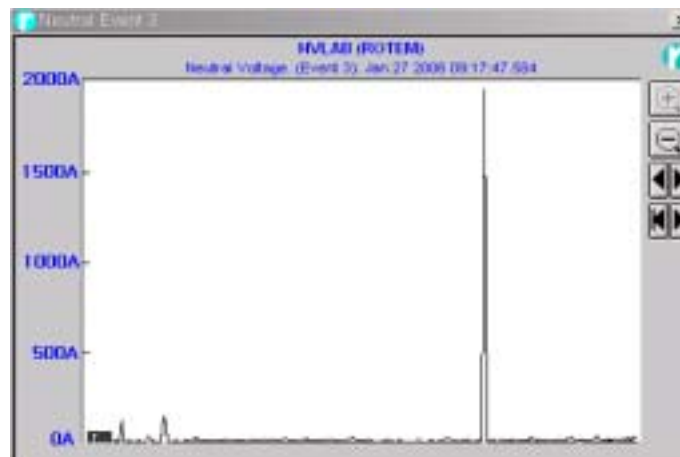
2(a)와 같이 150 A~2 kA 범위의 서지전류가 1회 운행시 2~5회 발생하였다. 측정대상 운행구간에서 전동차의 운행횟수는 1일 4~7회이며, 2일 운행 후 1일 정지와 점검의 형태로 운영되므로 1일 서지 발생 빈도는 10~30회 정도이고, 이를 연간으로 환산하면 최소 1,000회 이상 피뢰기의 보호동작이 이루어지는 것으로 추정할 수 있다.

또한 방전전류의 크기가 1.5 kA 이상으로 피뢰기를 열화시키고 전동차 전기설비에 영향을 줄 수 있는 서지도 4회 관측되었다. 이는 서지에 대해 피뢰기가 보호동작을 하여 후단에 연결된 전기전자기기를 보호하고 있으므로, 전동차에서 피뢰기의 역할이 중요함을 의미한다.

그림 2(b)는 전동차가 특정 구간 운행시 기록된 것으로, 수 분 간격으로 100 A~340 A의 서지전류가 발생하였다. 전류의 크기만으로 볼 때, 피뢰기를 급격히 열화시키지 않으나, 과전압이 짧은 시간에 반복적으로 발생하기 때문에 장기적 열화에 영향을 줄 것이다.



(a) 1930 A



(b) 150-300 A

그림 2 측정된 서지전류의 예

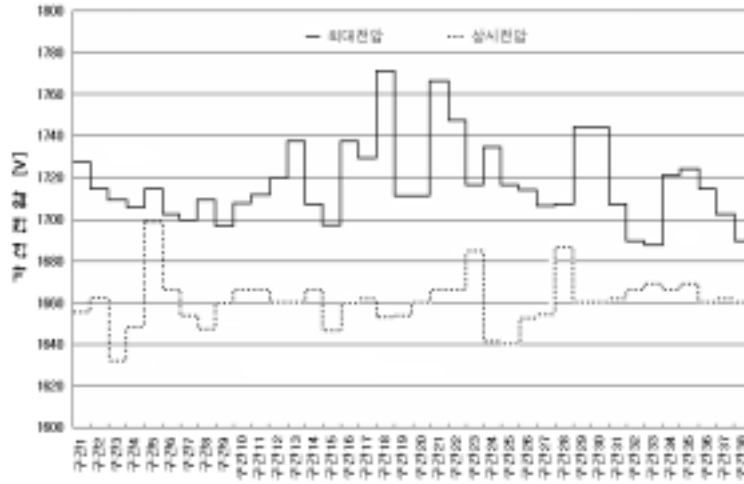
Fig. 2 Measured waveforms of surge current

2.2 운전전압의 측정

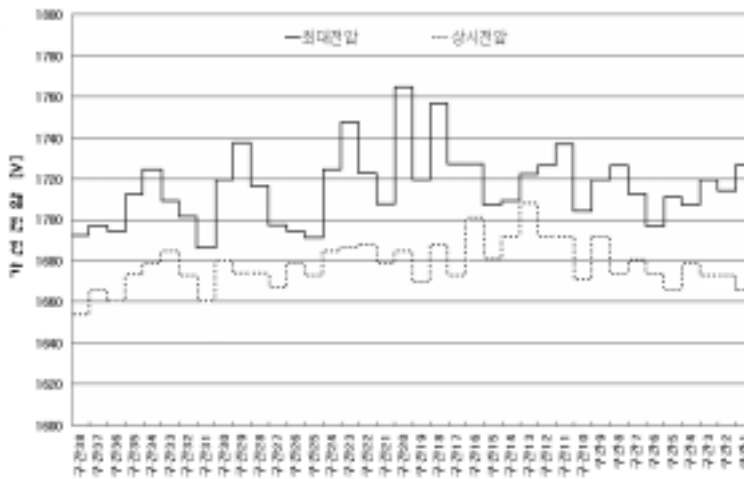
전동차 운행 중 운전전압의 최대값과 상시전압은 피뢰기 선정에 있어 중요한 파라미터이다. 그림 3에 전동차 운전 중 구간별 전압 변동에 대한 측정 결과를 나타내었다. 대상 전동차는 회생제동 방식을 사용하며, 급전계통의 공칭전압은 1,500 V이지만, 상시전압이 전 구간에서 공칭전압보다 높게 관측되었다. 운행 중 발생하는 최대 운전전압은 1,700~1,800 V 사이로 나타났으며, 현재 본 시스템에 설치되어 있는 피뢰기는 연속사용전압(COV; continuous operating voltage)이 1,650 V이므로 측정 결과로 볼 때,

운영 중에 운전과전압으로 열화가 발생하는 것으로 추정된다.

이러한 경우에 피뢰기의 열화가 발생하게 되면, 보장된 수명보다도 운전과전압에 의해 빨리 열화가 진행되어 소손이 발생할 수 있다.



(a) 상행



(b) 하행

그림 3 운전전압의 변동

Fig. 3 Variations of operation voltage

3. 피뢰기의 최적선정에 대한 검토

운영 중 전동차의 서지전류와 운전전압 측정결과로부터 대상 전동차의 경우에는 서지전류의 발생빈도는 연간 1,000회 이상으로 추정되며, 서지전류의 크기는 최대 2kA로 나타났다. 운전전압의 변동은 선로 공칭전압에 비해 최대 20% 정도의 변동이 발생하고, 상시전압도 1,650V 이상으로 기록되었다.

피뢰기의 운전상태에 대한 분석 결과, 그림 4와 같이 운전 중 지속되는 최대전압으로부터 피뢰기의 연속사용전압(COV, U_c)을 결정할 수 있으며, 일시적 과전압의 크기로부터 정격전압(Rated voltage, U_r)을 선정할 수 있다. 또한 서지전류의 크기는 피뢰기의 방전내량(I_d)을 결정하는 중요한 파라미터가 된다.

운전전압의 변동은 피뢰기의 정격전압과 연속사용전압을 결정하는 요소로 직류철도에 관한 규격 EN50163에서 정의하는 전압범위를 고려해야 한다⁽⁸⁾. 본 규격에서는 선로의 공칭전압보다 초과하는 전압을 그림 4와 표 1에서와 같이 구분하고 있으며, U_{max1} 에 의해 최대연속사용전압을 선정해야 하며, U_{max2} 에 대한 정의로부터 정격전압을 선정할 수 있다.

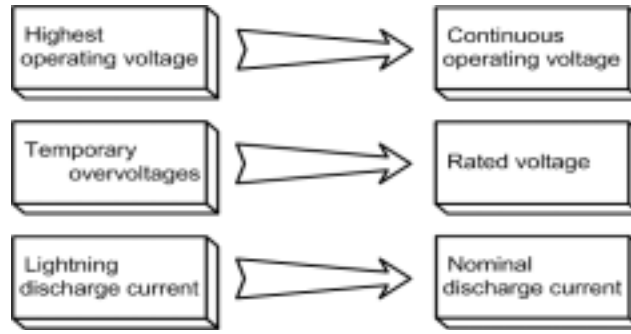


그림 4 피뢰기 선정의 주요 파라미터

Fig. 4. Main parameters for the selection of lightning arrester

표 1 전동차의 전압 레벨

Table 1 Voltage level of electric traction vehicles

Electrification System	Nominal voltage U_n	Highest permanent voltage U_{max1}	Highest non-permanent voltage U_{max2}	Overvoltages U_{max3}
D. C. (mean values)	600	720	770	
	750	900	950	, 1269
	1,500	1,800	1,950	2,538
	3,000	3,600	3,900	5,075
A. C (rms values)	15,000	17,250	18,000	24,311
	25,000	27,500	29,000	38,746

본 연구에서 선로의 공칭전압은 1,500 V이므로 연속운전전압의 크기가 1,800 V까지 상승할 수 있기 때문에 피뢰기 선정에 있어 연속사용전압은 1,800 V 이상이 되어야 운전전압에서 보장된 수명을 확보할 수 있다.

일시적으로 발생하는 과전압은 1,950 V이므로 피뢰기의 정격전압은 2,000 V 이상이 적합하다. 상기 조건에 의해 피뢰기가 선정되면 피보호기기와의 절연협조면에서 피보호기기의 절연레벨(BIL, Basic Impulse Insulation Level)을 고려하여, 피뢰기의 공칭방전전류에 대한 제한전압(clamping voltage)을 검토해야한다.

현재 전동차에 적용하고 있는 피뢰기의 정격전압은 2,000 V이고, 연속사용전압은 1,650 V이다. 측정 결과와 EN50163을 비교·분석으로부터, 이들 피뢰기는 정상적인 운전상태에서도 열화가 발생할 가능성이 있으며, 서지에 대한 반복동작으로 피뢰기의 열화가 발생한 경우에는 운전전압에 의해 급속히 열화가 진전되어 지락이나 정전과 같은 2차적 사고를 유발시킬 수 있다.

본 논문의 내용은 특정시간대에 전동차 운행 중 운전전압의 변동과 서지의 발생빈도를 측정한 결과로부터 제시한 것으로, 모든 차량의 운행조건에 적용되는 것은 아니다. 그러나 동일 사양으로 설계된 직류전동차 탑재용 피뢰기의 선정 자료로 충분히 활용될 수 있을 것이다.

4. 결 론

본 논문은 운행 중인 전동차에서 피뢰기의 동작과 전동차 운전전압의 변화를 측정하고 관련 국제규격을 검토하여, 시험대상 구간의 전동차에 적합한 피뢰기의 선정에 대하여 기술하였다.

현장측정결과, 서지전류의 발생빈도는 전동차 1회 운행시 3회 정도 발생하는 것으로 나타났으며, 연간으로 환산할 경우 1,000회 이상으로 추정된다. 또한 이들 서지전류의 크기는 150 A ~ 2,000 A이었다.

전동차 운전전압은 급전선로의 공칭전압 1,500 V에 비해 20 % 이상 변동하였으며, 최대 1,800 V까지 기록되었다. 따라서 본 연구의 전동차에는 정격전압 2,000 V 이상, 연속사용전압은 1,800 V 이상의 피뢰기를 적용하는 것이 바람직하다.

본 논문의 내용은 일부 급전계통에서 운행 중인 직류전동차의 현장측정결과로부터 선정조건을 제시한 것이므로 모든 직류전동차에 일괄적으로 적용할 수는 없지만 동일 사양으로 설계된 직류전동차 탑재용 피뢰기의 선정 자료로 충분히 활용될 수 있다.

본 논문에서 기술한 바와 같이 서지전류의 발생빈도 및 크기, 가선전압의 변동에 대한 분석이 선행된다면, 대상 전동차에 적합한 피뢰기 사양을 제시할 수 있을 것으로 생각한다. 이러한 선정방법의 적용으로 피뢰기에 의한 사고를 최소화하여 전동차 운행의 신뢰성을 향상시킬 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 Hasse1, 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.
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 Hasse1, Overvoltage protection of low-voltage systems, The Institution of Electrical Engineers, 2004.
3. IEC 60099-4, Surge arresters- Part 4: Metal-oxide surge arresters without gaps for a. c. systems, International Electrotechnical Commission, 2003.
4. IEC 60099-5, Surge arresters- Part 5: Selection and application recommendations, International Electrotechnical Commission, 2001,
5. K. Denno, High Voltage Engineering in Power System, pp. 31~37, 1992.
6. S. Shirakawa et al., "Maintenance of surge arrester by a portable arrester leakage current detector", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 3, No. 3, pp. 998-1003, 1988.
7. 酸化亞鉛形避雷器の特性評価試験法調, 酸化亞鉛形避雷器の特性評価試験法調査專門委員會委員, 日本電氣學會技術報告 第474号, 1993.
8. EN50163, Railway applications- Supply voltages of traction systems, 1988.