

직류전동차용 피뢰기 진단기술

Diagnostic Techniques of Lightning Arresters for DC Electric Traction Vehicles

길경석[†] · 송재용* · 김일권** · 문승보*** · 신광철***

Gyung-Suk Kil · Jae-Yong Song · Il-Kwon Kim · Seung-Bo Moon · Gwang-Chul Shin

Abstract

This paper dealt with the performance evaluation and the diagnostic techniques of lightning arresters for DC electric traction vehicle. Field Measurements on the protective operation of lightning arresters against surge currents were carried out on running vehicles to acquire the data necessary for the diagnosis. The frequency and the magnitude of surge events were analyzed. Surge currents of 1~3 times were recorded in one running service route and their magnitudes were ranges of 150 A~2 kA. Also, an acceleration experiment on a lightning arrester by the standard lightning impulse current of 8/20 us and 5 kA was performed to know the aging characteristics. After the surge current application of 3,000 times, the reference voltage decreased by 4.5 %, and the leakage current was below 10 uA at the continuous operating voltage and about 50 uA at the rated voltage. From the experimental results, we propose a decision level of leakage current for the arrester used in this paper and designed an arrester tester which analyzes arrester condition by the magnitude of leakage current.

Keywords : DC electric traction vehicle(직류전동차), Arrester(피뢰기), Diagnostic technique(진단기술), Surge current(서지전류), Continuous operating voltage(연속사용전압), Rated voltage(정격전압)

1. 서론

전기철도용 변전소와 급전계통, 전동차 등의 전력설비에
는 낙뢰와 같은 외부로부터의 과도 과전압(transient
overvoltage)과 내부 급전계통 운영에 요구되는 차단기의 동
작, 팬토그래프(pantograph)와 급전선의 이동 접촉, 인버터
와 같은 전력변환기기의 사용으로 개폐 과전압이 빈번하게
발생하고 있다. 이들 과도과전압은 정상 운전전압보다 수
배~십 수배에 달하므로 과도과전압의 침입 또는 발생시는
계통에 연계되어 있는 절연전선, 애자, 부상, 변압기, 차단
기, 인버터 등의 전력설비와 각종 저압용 전기·전자·신호·
통신 기기의 절연을 위협한다[1,2]. 이와 같은 과도과전압에
대해 경제적, 기술적으로 가장 효과적인 보호대책은 전압

-전류의 비선형 저항특성이 우수한 산화아연형 피뢰기
(lightning arrester)를 기기 또는 선로에 병렬로 설치하는 것
이다[3,4].

한편, 피뢰기도 제조시의 결함이나 사용 환경에서의 흡습,
이상전압에 대하여 반복되는 보호동작으로 열화가 진전되며,
열화된 피뢰기가 계통에 설치되어 있으면 정상운전전압에서
도 누설전류에 의해 과열되고, 열폭주(thermal runaway)에
도달하면서 피뢰기의 단락으로 인한 지락사고로 전력공급
의 중단과 화재 등 2차적인 인적·물적 사고를 유발시킬 수
있다[5-7].

특히, 전기철도용 변전소, 급전선로 및 전동차에 설치되
어 있는 피뢰기의 사고시는 정전 등으로 동일계통에서 급전
을 받고 있는 전동차의 운행이 모두 중지되므로 기술적, 경
제적 손실과 신뢰성 저하 등의 문제가 발생한다. 따라서 전
기철도의 급전계통에 설치되는 피뢰기는 검수단계부터 품
질관리와 운영 중에 열화 정도를 진단하고 피뢰기의 성능을
예측하여 열화된 피뢰기를 사전에 교체하여야 한다. 현재까
지 교류계통에서 피뢰기의 특성이나 진단기술과 관련한 연

† 책임저자 : 정회원, 한국해양대학교 전기전자공학부 부교수
E-mail : kilgs@hhu.ac.kr
TEL : (051)410-4414 FAX : (051)403-1127

* 정회원, 한국해양대학교 전기전자공학부 Post-Doc.

** 정회원, 한국해양대학교 전기전자공학부 박사과정

*** 정회원, 한국해양대학교 전기전자공학부 석사과정

구개발은 활발히 진행되어 왔으나, 직류계통에서의 연구는 거의 수행되지 않아 향후 직류철도분야에서는 이들에 대한 많은 연구가 절실히 필요하다.

본 논문에서는 직류 전동차에 설치된 피뢰기의 열화로 발생하는 사고를 예방하여 전력공급의 신뢰성 확보를 목적으로, 전철 운영구간에서 현장계측을 통하여 관련 자료를 확보하였다. 또한 현재 사용되고 있는 직류 피뢰기의 표준 뇌임펄스 전류에 대한 가속열화실험을 수행하여 피뢰기의 특성을 평가하고, 이들 결과로부터 직류 전동차용 피뢰기의 진단기술과 장치 등에 대하여 제안하였다.

2. 현장계측 및 분석

피뢰기는 제조시 결함을 제외하면 운전과전압과 서지전류에 대한 반복되는 보호동작으로 열화가 진전되므로 운전 중 피뢰기의 서지전류에 대한 동작빈도와 서지의 크기를 측정·분석하였다. 급전선로에 발생한 서지전류는 그림 1과 같이 피뢰기의 접지선에 설치된 서지카운터와 로고우스키(Rogowski) 센서에 의해 검출되고, 실시간으로 분해능 4 MS/s의 전력분석기에 저장된다. 현장계측은 총 37구간으로 1회 운영을 기준으로 왕복 2시간 30분이 소요되며, 3회에 걸쳐 수행하였다.

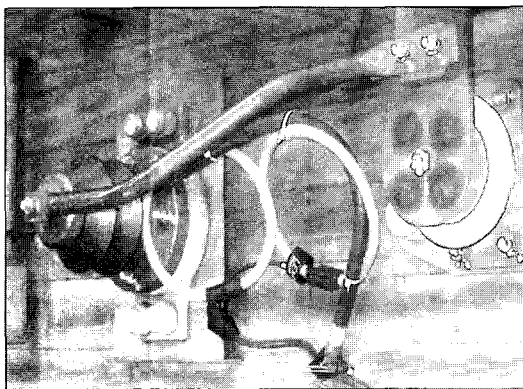


Fig. 1. Installation of Rogowski sensors

서지전류의 발생은 표 1과 같이 요약할 수 있으며, 그림 2에는 로고우스키 센서에서 검출된 서지전류의 측정 예를 나타내었다. 서지전류의 최대값은 1,930 A 이었으며, 매 회 150 A ~ 2 kA 사이의 서지가 2 ~ 5 회씩 관측되었다.

측정 대상 운행 구간에서 전동차의 운행횟수는 1일 4 ~ 7 회이며, 2일 운행 후 1일 정지 중에 점검 형태로 운영되는 조건에서 피뢰기는 1일 10 ~ 30 회 동작한다. 이를 연간으로 환산하면 최소 1,000 회 이상이 될 것으로 추정한다.

Table 1. Recorded surge events

구분	시각	구간	크기
1	1월20일00시00분	시각 장치 없음	1,200 [A]
2	1월20일00시00분	"	1,200 [A]
3	1월24일14시13분	상행 기지창 → 구간 1	150 ~ 300 [A]
4	1월24일14시15분	상행 구간 1 → 구간 2	720 [A]
5	1월24일15시40분	하행 구간37 → 구간36	250 [A]
6	1월24일15시46분	하행 구간34 → 구간33	1,180 [A]
7	1월24일16시22분	하행 구간 1 → 기지창	150 ~ 300 [A]
8	1월27일09시20분	상행 기지창 → 구간 1	250 [A]
9	1월27일11시09분	하행 구간29 → 구간28	1,930 [A]
10	1월27일12시15분	하행 구간 1 → 기지창	150 [A]

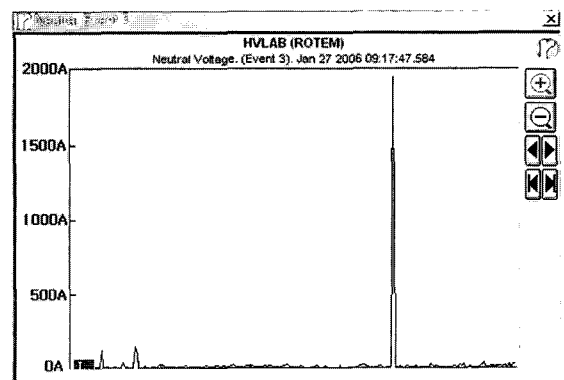


Fig. 2. Example of measured surge current

3. 전기적 특성 평가

직류 전동차용 피뢰기의 정확한 진단기술 개발을 위해서는 현장계측을 통한 서지전류의 크기와 발생빈도를 파악하는 것뿐만 아니라, 피뢰기의 서지전류에 대한 열화 진전 특성을 분석하는 것이 중요하다. 따라서 본 논문에서는 국제규격 IEC 60099-4에 규정된 시험절차의 일부를 준용하여 가속열화실험을 수행하였다[8].

그림 3은 가속열화실험에 사용한 표준 뇌임펄스 전류 발생장치로 8/20 us, 5 kA의 서지전류를 피뢰기에 인가할 수 있다. 본 가속열화실험에는 직류전동차에 탑재되는 정격전압 2,000 V의 산화아연형 피뢰기로 전기적인 사양은 표 2와 같다. 8/20 us 서지전류에 대한 본 피뢰기의 응답특성은 그림 4에 나타난 것과 같이 5 kA의 서지전류가 인가될 때 제한전압의 최대값은 5.25 kV로 나타났다. 전동차에 설치된 전력설비는 외부 과전압 발생시 피뢰기의 제한전압 범위내에서 보호가 이루어지며, 설계시 피보호 기기의 절연전압은 피뢰기의 제한전압보다 높게 설정되므로 피뢰기가 정상적으로 동작하면 절연파괴로 인한 사고는 발생하지 않는다.

피뢰기가 열화되면 서지전류에 대한 제한전압이 낮아지고, 정상상태에서의 누설전류는 증가한다.

제한전압이 낮아지더라도 피뢰기의 보호 동작에는 문제가 없지만, 열화에 따른 누설전류의 증가는 정상상태에서도 큰 누설전류가 흐르게 되어 열폭주 현상을 수반하며, 최종적으로 지락사고로 이어진다. 특히, 운전전압이 안정적으로 공급된다면 피뢰기의 주된 열화 요인은 서지전류에 의해 발생한다[9-12]. 따라서 본 연구에서는 인위적으로 서지전류를 인가하고, 이에 따른 누설전류와 기준전압의 변화를 분석하기 위한 가속열화실험을 수행하였다. 가속열화실험에서는 1분 간격으로 서지전류를 인가하고, 100 회 인가시마

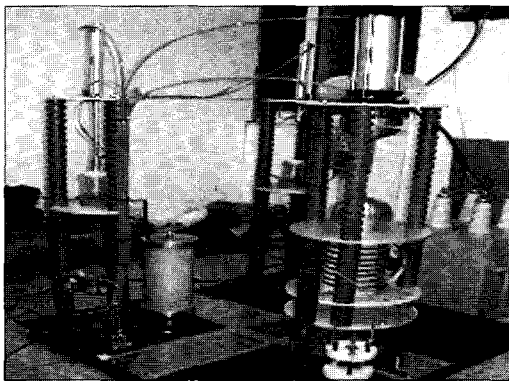


Fig. 3. Photograph of a surge generator

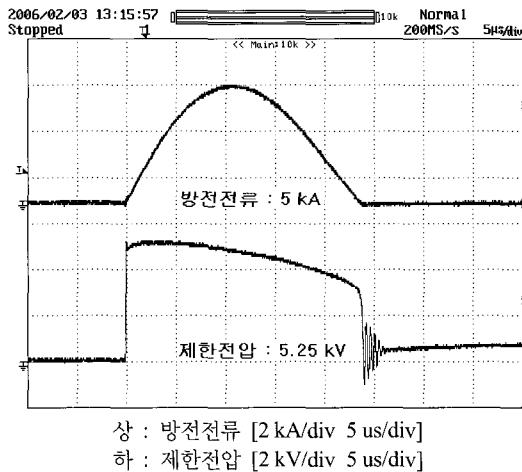


Fig. 4. Typical waveforms of surge current and clamping voltage

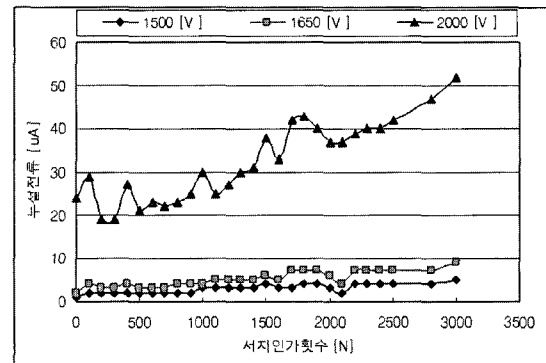
Table 2. Specification of the arrester

형식	ZnO Gapless형 Polymer Housing
정격전압(U_r)	2,000 [V _{DC}]
기준전압(U_{ref})	2,500 [V _{DC}] at 1 [mA]
연속사용전압(U_c)	1,650 [V _{DC}]
방전내량(I_d)	8/20 [us], 10 [kA]

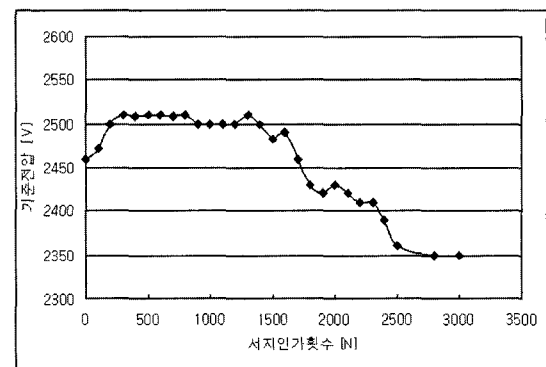
다 누설전류와 기준전압의 변화를 측정하였다. 누설전류는 정확한 진단 파라미터 도출을 위하여 공칭 운전전압 1,500 V, 피뢰기의 연속사용전압 1,650 V 및 정격전압 2,000 V에서 각각 측정하였다. 또한 피뢰기의 진단항목 중 하나인 기준전압은 열화 정도에 따라 감소하는 경향을 나타내므로 서지인가횟수에 따른 기준전압의 변화도 관측하였다.

그림 5에는 피뢰기에 서지전류 인가시 누설전류의 변화 예를 나타낸 것이다. 서지전류의 인가 후 누설전류의 측정은 급전선로의 공칭전압 1,500 V, 피뢰기의 연속사용전압 1,650 V와 정격전압 2,000 V에서 측정하였다. 이들 전압에서 누설전류를 측정하는 것은 피뢰기 자체의 운전특성에 따른 누설전류와 급전선로의 운전전압 변동에 따른 누설전류의 변화를 비교함으로써 열화 진단에 필요한 누설전류의 기준을 도출하기 위함이다.

서지전류의 인가횟수에 따라 1,500 회까지 누설전류는 미소하게 증가하고 기준전압은 거의 변화가 없었다. 급전선로의 공칭전압과 연속사용전압에서는 변화가 작게 나타났지만, 정격전압에서는 누설전류가 크게 증가하는 경향을 보였



(a) Changes of leakage current



(b) Changes of the reference voltage

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

다. 그러나 1,500 회 이후부터는 누설전류가 급격히 증가하는 현상을 나타내는데, 이는 지속적인 서지전류의 인가에 의한 보호동작으로 피뢰기가 빠르게 열화가 진행되고 있음을 의미한다[13]. 이와 같이 가속열화실험의 결과로부터 직류전동차 탑재용 피뢰기는 서지에 대한 보호동작에 따라 열화가 진행되므로 열화 정도를 누설전류와 기준전압의 변화를 측정하는 것으로 진단이 가능하다.

4. 피뢰기 진단장치

산화이온형 갭리스 피뢰기는 직류에서 운전 중 저항분 누설전류만 흐르게 되므로 교류에서 운영되는 피뢰기에 비해 관리가 용이하다.

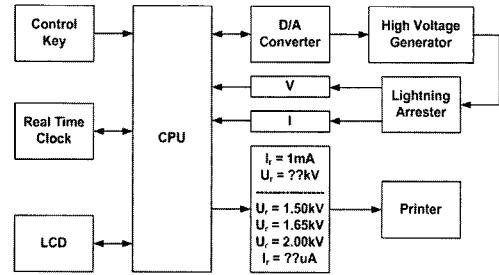
본 논문에 사용된 대상 피뢰기는 신품(S1, S2) 및 기존 전동차에서 수거된 기사용품(S3, S4)으로 정격전압은 동일하지만 연속사용전압은 신품의 경우 1,650 V이고, 기사용품은 1,500 V의 사양을 갖는다. 이들 피뢰기가 설치되어 운영 중인 급전계통의 정격전압은 DC 1,500 V이지만 상시 DC 1,500~1,650 V 범위이므로 피뢰기의 연속사용전압은 1,650 V 이상이 되어야 한다.

따라서 누설전류 분석으로부터 진단을 수행하는 경우 급전계통의 공칭전압, 피뢰기의 연속사용전압과 정격전압에서 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 급격한 열화가 진전되므로 이를 기준으로 피뢰기 진단을 수행하는 것이 바람직하다.

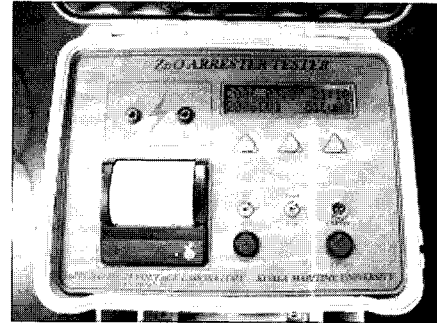
4.1 설계 및 제작

현장계측 결과와 가속열화실험 결과를 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. 피뢰기 진단에는 직류고전압을 일정한 비율(100 V/s)로 증가시키면서 1,500 V, 1,650 V 및 2,000 V에서 누설전류가 자동으로 저장되도록 하였으며, 기준전압의 측정도 가능하다. 특히 직류전압에서의 누설전류는 인가하는 시험전압의 증가비율에 따라 크기가 크게 달라지기 때문에 시험전압의 자동증가와 측정이 중요한 변수이다. 누설전류 및 기준전압의 측정이 완료되면 자동으로 시험전압의 공급이 차단되며,



(a) Block diagram



(b) Photograph

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) Example of a printed data

Fig. 6. The prototype arrester tester

마지막으로 공급된 인가전압과 측정된 누설전류의 값이 표시되고, 내장형 프린터를 통하여 측정값을 출력할 수 있다.

4.2 적용실험

시제작한 직류용 피뢰기 진단장치를 이용하여 신품 피뢰기(S1, S2) 및 기사용 피뢰기를 대상으로 적용실험을 수행하였다. 진단장치를 이용하여 누설전류 및 기준전압을 측정한 결과, 표 3과 같은 결과를 얻었다. 신품 피뢰기(S1, S2)를 대상으로 측정된 누설전류의 값은 연속사용전압(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 최대운전전압 1,650 V에서는 100 μ A 이상의 누설전류가 흐르므로 전동차 운행 중 피뢰기에서의 발열 현상을 수반하게 되고, 발열 현상의 증가는 누설전류의 증가로 이어지며, 최종적으로

Table 3. Test results on the lightning arresters

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

로는 단락사고로 이어져 피뢰기가 폭발하면서, 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 논문에서 제작한 직류용 피뢰기 진단장치는 운전전압 및 정격전압에서의 누설전류와 기준전압에 대한 측정과 분석이 가능하므로 신품 피뢰기의 검수, 기설치된 피뢰기에 대한 진단에 충분히 활용 될 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결론

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

직류 전동차에 설치된 피뢰기를 대상으로 피뢰기의 동작 빈도와 방전전류의 계측과 분석을 수행하였다. 현장계측은 1 회 운행에 약 2시간 30분이 소요되었으며, 3 회의 측정결과로부터 서지전류의 발생빈도는 1 회 운행시 2~5 회, 방전전류는 150 A ~ 2 kA 이었다.

피뢰기의 최적 진단기술과 기준, 주기 등을 제시하기 위하여 8/20 us 5 kA의 표준 뇌임펄스 전류를 1분 간격으로 인가하는 가속열화실험을 수행한 결과, 누설전류는 서서히 증가되고 기준전압은 감소하는 경향을 나타내었으며, 3,000 회의 뇌임펄스 전류의 인가에도 기준전압은 4.5 % 감소, 연속사용전압에서 누설전류는 10 uA 이하로 양호한 상태를 유지하였다.

현장계측과 가속열화실험 결과로부터 전동차 1대 1일 5 회 운행이라고 할 때, 1 회 운행시 2~5 회의 5 kA 서지 발생을 고려하면 1년 이내에 정상운전전압 하에서 사고를 발생시킬 만한 열화는 없을 것이다. 그러나 피뢰기 설치조건에서의 흡습과 표면 오염, 기계적 진동 등 환경적 요인을 고려하여 점검주기를 설정해야 할 것이다.

피뢰기의 상태는 누설전류와 기준전압의 변화로부터 진단이 가능하며, 열화진전시 누설전류는 연속사용전압에서 100

uA 이상 그리고 기준전압이 10 % 이상 감소한 경우 급속히 증가하므로 이 값을 기준으로 피뢰기를 교체하는 것이 바람직하다. 또한 본 논문에서는 실험결과에 기초하여 전동차용 피뢰기의 상태를 분석할 수 있는 진단장치를 설계하였으며, 이 장치를 활용하면 비전문가도 피뢰기의 상태를 알 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.

참고 문헌

1. Mazen Abdel-Salam et al., 2000, High-Voltage Engineering Theory and Practice, pp.447-453.
2. W.C.Hart, E.W.Malone, 1998, Lightning and Lightning Protection, pp.1.1-2.15.
3. Peter Hassel, 2004, Overvoltage protection of low-voltage systems, The Institution of Electrical Engineers, pp.67-125.
4. P. P. Barker et al., 1993, "Characteristics of Lightning Surge Measured at Metal Oxide Distribution Arresters", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.8, No.1, pp.301-310.
5. T. K. Gupta, 1990, "Application of zinc oxide varistors", Journal of the American Ceramic Society, Vol.73, No.7, pp.1817-1840.
6. O. Nigol, 1992, "Methods for Analyzing the Performance of Gapless Metal Oxide Surge Arresters", IEEE Transaction on Power Delivery, Vol.7, No.3, pp.1256-1262.
7. 길경석, 한주섭, 한문섭, 2004, "철도용 피뢰기의 열화진전에 관한 연구", 한국철도학회논문집, 제7권, 제4호, pp.307-311.
8. IEC 60099-4, 2003, Surge arresters - Part 4: Metal-oxide surge arresters without gaps for a.c. systems, International Electrotechnical Commission, pp.61-77.
9. 길경석, 한주섭, 김정배, 2003, "피뢰기 열화진단을 위한 저항분 누설전류의 측정장치", 대한전기학회논문지, 제52C권, 제10호, pp.469-476.
10. 길경석 외, 2002, "뇌충격전류에 의한 산화아연형 피뢰기 소자의 전기적 특성과 피뢰기 열화진단전문가 시스템", 대한전기학회논문지, 제51C권, 제4호, pp.152-157.
11. 길경석, 송재용, 박진길, 1999, "가스튜브-브와 산화아연 바리스터의 PSpice 모델", 한국마린엔지니어링학회논문지, 제23권, 제2호, pp.150-158.
12. IEEE Working group 3.4.11, 1992, "Modeling of Metal Oxide Arresters", IEEE Transaction on Power Delivery, Vol.7, No.1, pp.302-310.
13. 길경석, 한주섭, 2000, "다중 뇌충격전류에 의한 산화아연형 피뢰기 소자의 특성변화", 대한전기학회논문지, 제51C권, 제4호, pp.685-690.