

피뢰기를 고려한 자가용 전기설비 인입선로의 직류누설전류시험에 관한 연구

A Study on the DC Leakage Current Test for Power Cable of Private Electrical Facilities considering Lightning Arrester

정기석[†] · 길형준^{*}
(Ki-Seok Jeong · Hyoung-Jun Gil)

Abstract - Private electrical facilities are judged whether it is suitable for the insulation aging condition of their incoming underground cables using DC leakage current test method. In the case where the service point of utility is the secondary side of cut out switch installed in the electric pole, there is a problem that it is difficult to separate the lightning arresters(LA) because of their high position of the pole. Therefore, the field test voltage is applied at value lower than DC 30 kV, which are stated in the inspection guideline. However, this test could reduced the insulation performance of the LA by accelerating the electrical stress of the metal oxide varistor element in the pre-breakdown region. In this study, we analyzed the relationship between the DC test voltage and the leakage current using the non-destructive DC high voltage equipment with leakage current measurement function. The results show that the leakage current increases sharply above the specified test voltage. As a consequence, it could be contributed to improve insulation aging inspection method by selecting the possible test area on the VI characteristic curve of the pre-breakdown area of the LA.

Key Words : Cable insulation aging, DC leakage current, LA, Periodic inspection, Private electrical facilities

1. 서 론

국내 자가용 전기설비의 특고압 수전 연결점은 가공선로의 경우 한전 전주 컷아웃스위치(COS : cut out switch) 2차 측으로 되어있다. 인입케이블은 일반적으로 지중전선로 형태로 수급지점에서 수용가 측까지 연결되며, 법정검사기관의 사용전 검사와 정기검사를 통해 해당설비의 안전성을 관리 받고 있다. 인입케이블의 정기검사는 3년 주기로 실시되며, 이 중 절연열화 검사항목은 설비의 경년변화에 따른 열화 정도를 고려하여 사용전 검사 시 인가전압에 50~60%에 해당하는 30 kV의 직류전압을 최댓값으로 적용하고 있다[1-3]. 국내 수용가설비 측 특고압 인입케이블의 절연진단 방법은 직류누설전류시험법(DC leakage current method)을 활용하여 전로의 절연상태에 대한 적합 여부를 판단 받고 있으나, 책임분계점이 그림 1과 같이 특고압 전주의 COS인 경우 인입케이블과 배전용 피뢰기가 높은 위치에서 접속되어 있어 분리가 곤란한 현장에로상황이 발생하고 있다. 이러한 상황에서 기존 시험값에 따른 피뢰기 소손 또는 고장이 발생하여 실제

검사 현장에서는 피뢰기가 접속된 경우 검사업무처리방법에 명시된 최대 시험전압인 30 kV보다 낮은 시험전압을 경험적으로 적용하고 있다. 해당 시험은 피뢰기의 예비항복영역(pre-defined breakdown region)에서 누설전류에 의한 금속 산화물 배리스터(MOV : metal oxide varistor) 소자의 전기적 열화 스트레스를 촉진하여 피뢰기 절연성능 저하에 영향을 미칠 수 있으므로 명확한 시험기준이 마련되어야 한다.

본 연구에서는 배전선로용 피뢰기의 직류누설전류 측정을 통해 인가되는 직류시험전압과 누설전류 발생의 상관성을 분석해보

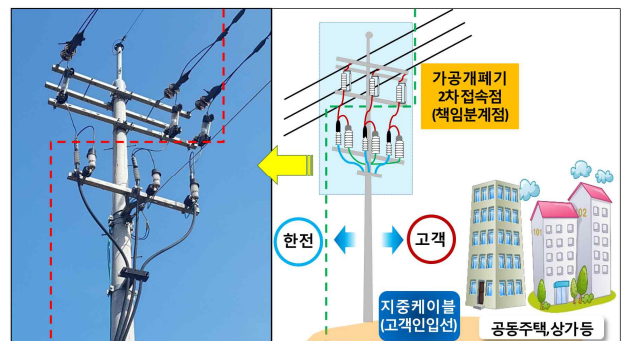


그림 1 자가용 전기설비의 가공 인입계통

Fig. 1 Service entrance system for private electrical facilities by utility overhead lines

[†] Corresponding Author : Electrical Safety Research Institute, Korea Electrical Safety Corporation, Korea.
E-mail: jksowl@kesco.or.kr

^{*} Electrical Safety Research Institute, Korea Electrical Safety Corporation, Korea.

Received : November 8, 2017; Accepted : December 27, 2017

았다. 시험방법은 정격전압 18 kV, 공칭방전전류 2.5 kA의 배전용 피뢰기를 시료로 선정하여 시험전압에 따른 누설전류를 고감도 누설전류 측정 기능을 가진 비파괴 직류 고전압 장비를 활용하여 측정하였다. 시험결과 3 kV 단위의 직류전압 인가 시 특정값 이상에서 누설전류가 급격히 증가함을 확인하였다. 시험결과를 토대로 시험전압과 누설전류 간의 상관성을 분석하고 전압-전류 특성 곡선 상의 가능한 시험영역을 제안하였다.

2. 자가용 전기설비 검사현황

2.1 케이블 절연열화 검사방법

자가용 전기설비의 케이블 절연내력 시험방법은 전기설비 기술기준 및 판정기준 제 13조(전로의 절연저항 및 절연내력)에서 상기 케이블을 포함한 내용을 명시하고 있으나, 케이블의 신설 또는 사용 중인 케이블을 구분하고 있지 않다.

국내 22.9 kV 배전계통은 CNCV(XLPE insulated, concentric neutral conductor with water blocking tapes and PVC sheathed power cable)를 적용하고 있으며, 절연내력에 관한 검사는 관련 법정검사기관의 사용전 검사와 정기검사를 통해 수행된다. 표 1과 같이 사용전 검사의 경우 신설된 케이블에 연속 10 분간 최대 교류시험전압의 2배에 해당하는 직류전압을 인가한다. 정기 검사의 경우 3년마다 수행되며, 사용 중인 케이블의 열화 정도를 고려하여 사용전 검사 전압의 50~60%에 해당하는 30 kV 직류전압을 인가한다.

표 1 케이블 절연내력시험 기준

Table 1 Application criteria of dielectric withstand and diagnostic test for power cable

교류시험전압	직류시험전압		전압상승폭
	신설	사용 중	
24.2 kV × 0.92 = 22.064 kV	22.064 kV × 0.92 × 2 = 44.128 kV	30 kV	3 kV (10단계)

법정검사기관의 ‘검사업무 처리방법’에 명시된 케이블의 검사방법은 1,000 V 또는 2,000 V의 절연저항계를 이용하여 절연저항이 3 MΩ 이상일 경우 수행하며, 케이블의 각 심선 간 및 대지 간에 시험전압을 연속하여 10분간 가하여 이에 견디어야 한다[1]. 표 1과 같이 단계적으로 전압을 인가하여 최종시험전압 10분 후의 누설전류를 $\mu\text{A}/\text{km}$ 로 환산하며, 상간불평형률, 성극비(PI : polarization index) 산정을 위하여 최종시험전압을 인가한 후 1 분경과 시 누설전류와 10분 후 누설전류를 측정 및 기록한다.

해당 검사방법의 판정기준은 국내의 경우 표 2와 같이 누설전류의 크기, 상간 불평형률, 성극비 중에서 요주의가 2개 이상인 경우 부적합으로 판정한다. 누설전류의 크기는 케이블 길이가 1 km 이내인 경우 10 μA , 케이블 길이가 1 km 이상인 경우 1 km로 환산한 값의 누설전류가 10 μA 이상이면 요주의로 판정한다.

표 2 사용중 케이블의 직류누설전류시험 판정기준

Table 2 Periodic inspection criteria of DC leakage current method for serviced-aged power cables

항목	판정기준		근거
	양호	요주의	
누설전류의 크기	10 $\mu\text{A}/\text{km}$ 이하	10 $\mu\text{A}/\text{km}$ 초과	최대 직류 30 kV 인가
성극비	1 이상	1 미만	
상간 불평형률	200 % 미만	200 % 이상	

2.2 케이블 직류누설전류시험법

직류누설전류 측정법은 케이블의 도체 상호간 또는 연피 간에 직류 고전압을 가하고 전류의 변화와 크기를 측정방법으로 전선 내부의 열화 상태에 따라서 직류누설전류는 시간에 따른 변화 및 형태가 다르게 나타날 수 있다[4]. 케이블의 절연열화 시험 방법은 전원의 종류, 환선 여부에 따라 절연저항법, 직류누설전류시험법, 유전정접법($\tan\delta$: dielectric tangent), 부분방전법(PD : partial discharge) 등 다양한 시험법이 존재하며, 측정 장비의 소형화, 휴대성을 장점으로 직류누설전류시험법이 가장 널리 적용되어 왔다.

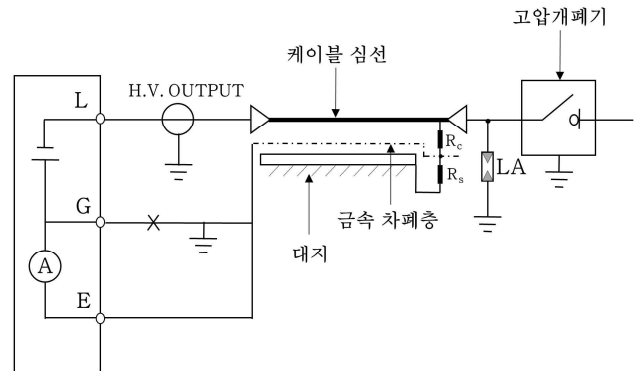


그림 2 피뢰기 접속 케이블의 직류누설전류측정 회로도

Fig. 2 A circuit diagram of DC leakage current measurement for power cable with LA

현재 국내 자가용 설비의 특고압 케이블은 그림 2와 같이 고감도 누설전류 측정 기능을 가진 비파괴 직류 고전압 장비(non-destructive DC HIPOT tester)를 활용하여 절연 상태를 주기적으로 관리 받고 있다. 측정은 해당 시료의 상황에 따라 측정 회로를 다르게 적용한다.

해당 장비(DAHP-6020)의 경우 가드(그림 2의 G)와 접지(ground) 단자 간 점퍼결선(G 단자접지방식)과 리턴(그림 2의 E)과 접지 단자 간 점퍼결선으로 구분된다. 전자의 경우 대지에 흐르는 누설전류를 제외한 실제 시험대상물의 누설전류 값만 측정 가능하나, 시험대상이 접지되지 않은 경우에만 적용가능하다. 국내 케이블 실드의 경우 항상 접지되어 있기 때문에 접지-리턴 접

퍼결선 시험방법을 적용한다.

상기 결선은 분리된 시험대상물 또는 안으로 흐르는 누설전류와 대기누설전류를 구분하지 못하지만 전체적인 누설전류 측정을 통한 전선의 내부 절연상태를 점검할 때 사용한다. 그림 2와 같이 케이블 절연체의 절연저항(R_c)과 시스의 절연저항(R_s)에 의한 누설전류가 모두 전류계를 통해 측정된다.

2.3 피뢰기의 비선형 전압-전류 특성

피뢰기는 직렬갭 유무에 따라 갭형(gap)과 갭리스(gapless)형으로 구분된다. 최근 비직선성의 성능이 높고 방전내량이 큰 산화아연(ZnO : zinc oxide)을 특성요소로 하는 갭리스형 피뢰기가 배전계통에 주로 적용되고 있으며, 일반적으로 그림 3과 같이 상용주파전압을 포함한 예비항복영역(pre-breakdown region)에서 수 μA ~ 수십 μA 의 미소누설전류가 발생한다.

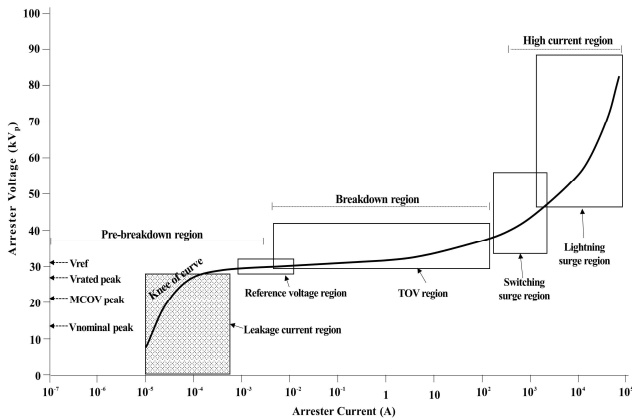


그림 3 ZnO 갭리스형 피뢰기의 비선형 전압전류 특성곡선
Fig. 3 Nonlinear voltage and current characteristic curve of ZnO gapless lightning arrester

피뢰기는 낙뢰 또는 개폐 썬지 등의 이상전압을 일정치 이하로 저감시켜 변압기 등의 피 보호기기의 절연 파괴를 방지하고 방전한 후 상용주파전압에 흐르는 속류(following current)를 신속히 차단하여 계통을 정상적인 상태로 유지시키는 기능을 가진다. 이와 같이 속류를 차단할 수 있는 상용주파 교류전압의 실효치를 피뢰기의 정격전압(V_{rated} : rated voltage)으로 정의하며 시스템의 접지방식에 따라 결정한다. 피뢰기의 비선형동작특성은 상용주파 방전개시전압(power frequency spark over voltage) 또는 제조사별 직류 허용개시전압을 기준으로 이하에서는 절연체로 동작하며 초과 시 도체로 동작한다. 피뢰기 단자 간에 연속적으로 공급되는 상용주파 최대전압의 실효치를 최대연속운전전압(MCOV : maximum continuous operating voltage)으로 정의한다.

배전선로용 피뢰기의 경우 그림 3과 같이 정격전압은 18 kVrms이며, MCOV는 15.3 kVrms를 가진다. 또한 예비항복영역에서는 피뢰기가 절연체로 동작하기 때문에 최대 수십 μA 의 누설전류만 접지 측으로 흐르게 된다. 그러나 누설전류 값을 아무런 기준 없이 무작정 인정해 줄 경우 소자에 흐르는 열로 인해 MOV

소자가 절연체로서의 역할을 상실하는 경우가 발생한다. 따라서 일반적으로 1 mA를 기준전류로 설정하고 피뢰기에 걸리는 전압을 기준전압(V_{ref} : reference voltage)으로 정하고 누설전류의 허용치를 관리하게 된다[5].

3. 직류누설전류 실험

3.1 실험조건 및 구성

본 연구에서는 표 3과 같이 피뢰기 기기 특성 및 케이블 접속 실증실험을 사례연구로 수행하였다. 실험은 표 4와 같이 비파괴 직류고전압 시험기(DAHP 6020)을 이용하여 미소 누설전류 측정이 가능한 전류계로 3 kV 단위의 단계별 시험전압에 따른 누설전류를 측정하였다.

표 3 사례 연구

Table 3 Experimental case studies

실험조건		사례구분
기기 단독실험	-	A
케이블 접속 실증실험	피뢰기 분리	B
	피뢰기 접속	C
	3년 경과	D

피뢰기 및 케이블 시료 사양을 포함한 실험조건에 대한 상세 내용은 표 4에 나타내었다. 기기 특성실험은 LA의 1, 2차 측을 각각 그림 2의 실험장비의 L 단자와 E 단자에 연결하여 총 9개의 시료에 대해 10회 반복 측정하였다.

표 4 실험 조건

Table 4 Experimental conditions

구분	내용	값	단위
시험 전원	모델명	DAHP 6020	-
	최대 출력전압	30	kV
	전압 변동량	3	kV
	안정화시간	1	min
피뢰기	시료수	9	EA
	특성소자	ZnO	-
	정격전압	18	kVrms
	공칭방전전류	2.5	kA
	MCOV	15.3	kVrms
케이블	AC방전개시전압	27	kVrms
	시료수	4	EA
	종류	CNCV-W	-
	단면적	60	mm ²
공장	70	m	

피뢰기가 접속된 케이블의 실제 검사현장을 실증하기 위한 실험환경은 그림 4와 같이 설계하고 그림 5와 같이 피뢰기 접속 유무에 따른 실험을 수행하였다.

실험방법은 그림 2와 같이 실험장비의 케이블 심선과 접지에 각각 L 단자와 E 단자를 연결하여 최대 30 kV의 직류전압을 연속 1분간 3 kV 단위로 승압하였다. 여기서 인가시간은 케이블 길이를 고려한 전체 축적전류(I_T)의 안정화 시간으로 실험적 데이터를 통해 선정하였다.

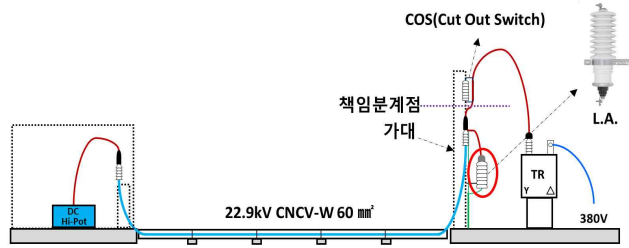
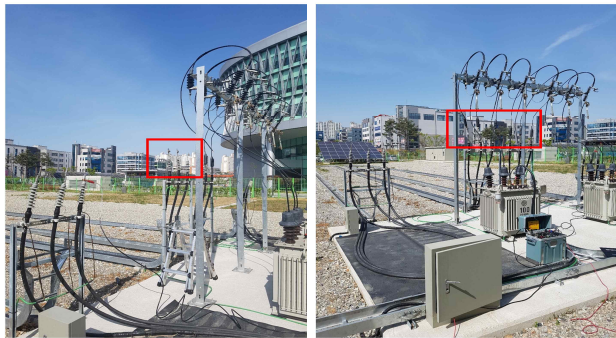


그림 4 피뢰기 접속 케이블 직류누설전류 실증실험 개념도
 Fig. 4 Conceptual diagram of DC leakage current test for power cable with LA

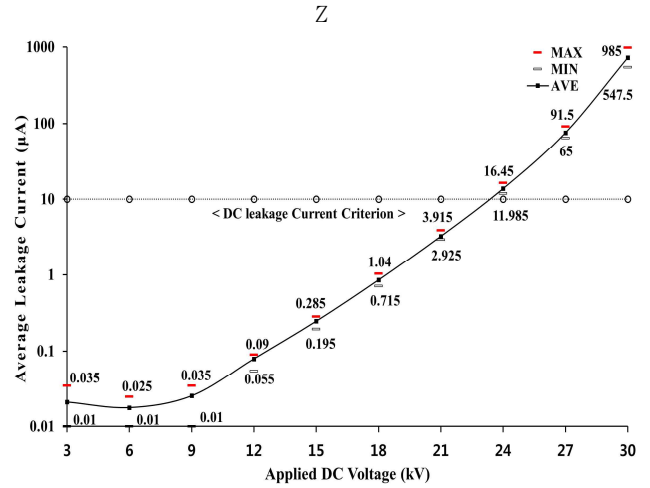


(a) 피뢰기 분리조건 (b) 피뢰기 접속조건

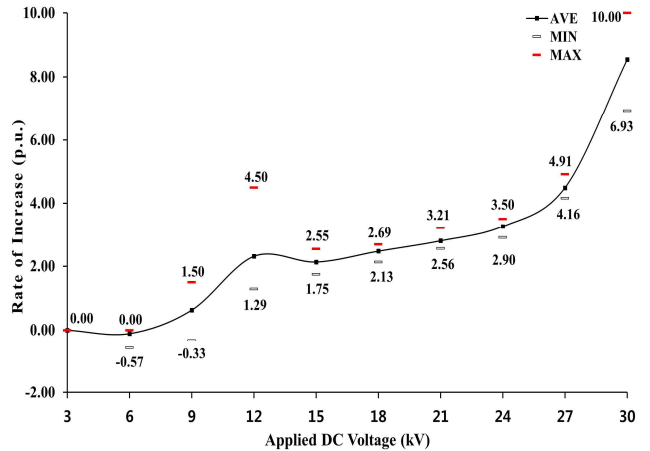
그림 5 피뢰기 접속유무에 따른 케이블 직류누설전류실험
 Fig. 5 DC leakage current test of power cables according to connection of LA samples

3.2 실험결과

최대 30 kV의 직류전압에 따른 ZnO 피뢰기 누설전류의 측정 결과는 그림 6(a)에 나타내었다. 측정 결과 최대 시험전압에서 최대 985 μ A의 누설전류가 발생하였고, 피뢰기의 전압인자인 최대 상용주파전압(18.6 kVp), MCOV(21.6 kVp) 그리고 정격전압(25.5 kVp)에 해당하는 시험전압 영역에서 최대 수십 μ A의 누설전류가 발생함을 확인하였다. 또한, 케이블 절연열화 판정기준인 10 μ A과 비교할 경우 약 24 kV의 직류전압 이상에서 측정결과가 판정기준 값을 초과하였다. 그림 6(b)는 누설전류 증가율을 도식화 한 것으로 특정 전압 이상에서 뚜렷한 증가 양상을 나타내었다.



(a) Average leakage current in μ A



(b) Rate of Increase in p.u.

그림 6 피뢰기의 직류누설전류 측정결과 (사례 A)
 Fig. 6 DC leakage current measurement results of LA (Case A)

케이블 실증실험 환경에서 피뢰기의 접속 유무에 따른 직류누설전류 측정결과는 그림 7과 같이 나타내었고, 표 5와 같이 누설전류비율을 분석하였다. 그림 7(a)는 피뢰기가 분리된 케이블만 실험한 경우로 모든 시험전압 값에서 검사 판정기준인 10 μ A를 충족하는 것을 확인하였다. 그림 7(b)는 피뢰기가 접속된 사례로 피뢰기의 사용 연수가 긴 경우 상대적으로 많은 누설전류가 흐르는 것을 확인하였다. 이는 피뢰기의 염분 등의 오손 및 지속적인 전기적 스트레스에 의한 열화로 특성요소 내 전위분포가 변화되어 초기 기준전압이 변동되었을 것으로 추정된다.

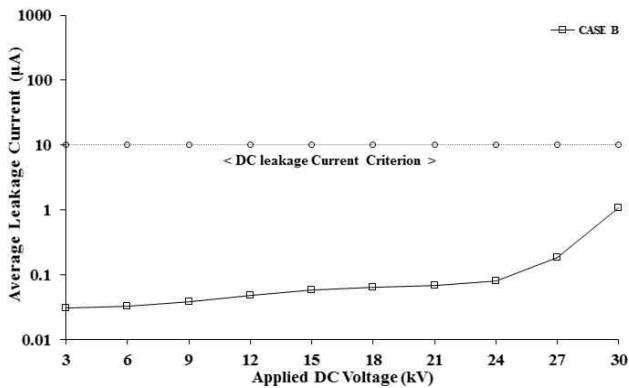
표 5의 누설전류 비율 분석결과 시험전압이 높아질수록 피뢰기의 누설전류 비율이 증가하여 최대 시험전압인 직류 30 kV에서 사례 B에 의한 누설전류는 사례 D 대비 약 0.16 %만 차지하며, 이는 해당 시험 결과가 대부분 의존한다는 것을 의미한다.

그림 8은 실증실험 결과를 일반적인 피뢰기의 전압전류 특성 곡선에 도식화 한 것으로, 예비항복영역에서 인가전원의 특성 상 기준 AC 전원에 비해 완만한 누설전류 곡선을 가지는 것을 확인

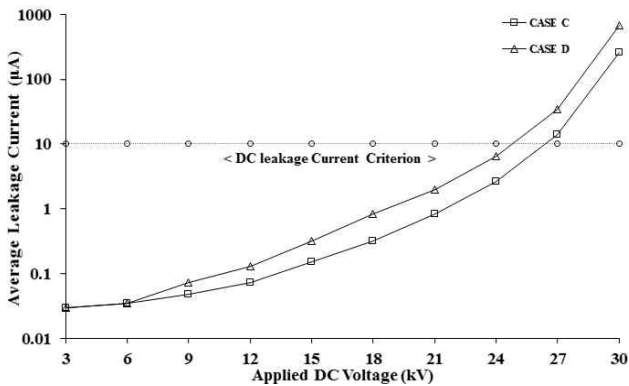
표 5 시험전압별 직류누설전류 측정결과 요약

Table 5 Summary of experimental results of DC leakage current test according to the applied test voltages

시험전압 [kV]	직류누설전류 [μA]			누설전류비율 ($B/D \times 100$) [%]
	사례 B	사례 C	사례 D	
3	0.030	0.030	0.030	100.0
6	0.030	0.035	0.035	92.86
9	0.038	0.048	0.073	51.72
12	0.048	0.073	0.128	37.25
15	0.058	0.153	0.323	17.83
18	0.063	0.320	0.823	7.60
21	0.068	0.823	2.008	3.36
24	0.080	2.675	6.450	1.24
27	0.183	13.98	34.83	0.52
30	1.080	255.0	677.5	0.16



(a) Cable without LA (CASE B)



(b) Cable with LA (CASE C, D)

그림 7 피뢰기 접속유무에 따른 케이블 직류누설전류 측정결과

Fig. 7 DC leakage current measurement results of power cables w/o LA

하였다.

기기 실험과 실증 실험을 종합적으로 분석해 볼 때 피뢰기를 접속한 경우 케이블 직류시험전압의 최댓값은 케이블 절연열화 판정기준인 10 μA 초과 여부를 고려하여 MCOV의 첨두값인 21.6 kVp 이하로 하향 선정할 필요가 있다.

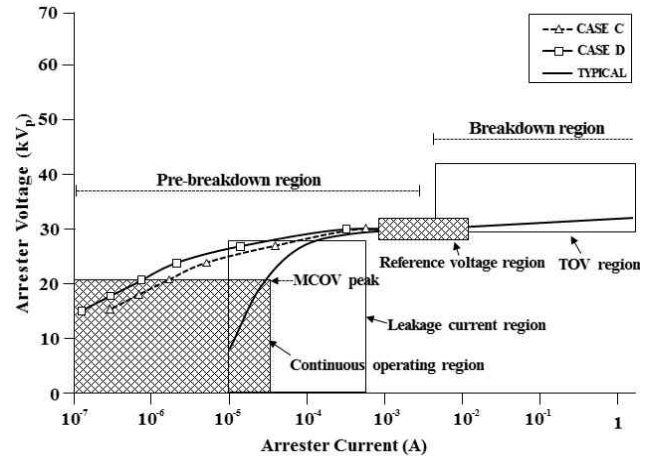


그림 8 피뢰기 전압전류특성을 고려한 직류누설전류 시험영역 선정
Fig. 8 Selection of DC leakage current test region considering VI characteristics of LA

3. 결 론

본 논문에서는 자가용 수용가 설비의 케이블과 배전선로용 피뢰기가 접속된 조건에서 직류 누설전류시험과 피뢰기 전압전류 특성을 분석하고 피뢰기 기기 및 케이블 실증실험을 수행하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 실험결과 피뢰기가 분리된 조건의 검사 판정기준인 10 μA 를 충족하였으며, 접속조건의 사례와 비교할 경우 피뢰기의 누설전류 비율이 높은 비중을 차지함으로써 해당 시험 수행 시 반드시 고려할 필요가 있다.
- 2) 측정된 누설전류 결과 직류전압 24 kV를 기준으로 케이블 판정기준 값인 10 μA 을 초과하며, 약 3% 이상의 뚜렷한 증가 양상을 보였다. 이는 피뢰기의 비선형 전압전류 특성에 의해 피뢰기가 방전되었음을 의미한다.
- 3) 배전용 피뢰기의 사용 연수와 적용유무에 따른 실증 실험 결과 사용 연수가 긴 피뢰기의 경우 상대적으로 많은 누설전류가 흐르는 것을 확인하였고, 이는 피뢰기의 염분 등의 오손 및 지속적인 전기적 스트레스에 의한 열화로 특성요소 내 전위분포가 변화되어 방전개시전압이 변동되었을 것으로 추정된다.
- 4) 실험결과 자가용 설비의 케이블 절연열화 시험 시 피뢰기를 접속한 경우 직류 시험전압의 최댓값은 MCOV의 첨두값인 21.6 kVp보다 하향 선정하는 것이 바람직할 것으로 사료된다.

References

- [1] C. David Mercier, Sid Ticker, "DC Field Test for Medium-Voltage Cables: Why Can No One Agree?," IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 34, No. 6, pp. 1366-1370, NOV/DEC 1998.
- [2] Sang-Woo Lee, "A Study on the decision method of the deterioration of the electrical insulation of XLPE Power Cable by DC High Voltage Method," M.Sc. Thesis, Dept. of Electrical Engineering, Seoul National University of Technology, 2006.
- [3] Korea Electrical Safety Corporation, "Inspection work processing instructions," 2015.
- [4] D. U. Jang, K. W. Lee, C. Y. Lee, S. H. Park and Y. S. Kim, "Analysis on Measurement Results to Examine the Cable Degradation of Railway Vehicle," The Proceeding of KSR Spring Conference, pp.1353-1357, May 2014.
- [5] Arrester works, "Arrester Reference Voltage", <http://www.arresterworks.com> (Accessed 8 NOV 2017)

저 자 소 개



정 기 석 (Ki-Seok Jeong)

1985년 3월 30일생. 2008년 경북대 전자전기 컴퓨터학부 졸업. 2010년 동 대학원 전자전기 컴퓨터학부 졸업(석사). 2014년 동 대학원 전자전기컴퓨터학부 졸업(박사). 2014년~2016년 한국철도기술연구원 광역도시철도시스템 연구실 박사후연구원. 2016년~현재 한국전기 안전공사 전기안전연구원 연구원.



길 형 준 (Hyung-Jun Gil)

1969년 8월 27일생. 1997년 인하대 전기공학과 졸업. 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2006년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 2000년~현재 한국전기안전공사 전기안전연구원 책임연구원.