Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers (2010) 24(10) : 78~84
DOI : 10.5207/JIEIE.2010.24.10.078

논문 24-10-12

다른 굵기의 6/10[kV]급 CV 케이블 직선접속부 안전성 평가

(A Safety Assessment of Splice of 6/10[kV] Class CV Cables with Different Conductor Size)

정종욱* · 김선구 · 정진수
(Jong-Wook Jung · Sun-Gu Kim · Jin-Soo Jung)

Abstract

This paper describes the safety assessment of power cable splices connecting different sized 6/10[kV] class power cables. To assess the safety, AC withstand voltage tests, partial discharge tests and impulse tests were carried out to the cable splice specimens and thermal rise due to overload and cross section of joint were examined as well.

As a result, a breakdown due to the 4.5[U_0](27[kV_{ac}]) application could not found for 5 minutes. Under 1.73[U_0](10.4[kV_{ac}]) application, partial discharges of 4~8[pC] were detected. In impulse tests, all the specimens withstood to the standard waveforms of 75[kV_{peak}](1.2×50[μs]) without any breakdowns. In addition, the temperature on the splice rose by 3[℃] when the 200[A] flew through the splice for 20minutes, however the thermal rise of 3[℃] was considered due to the atmospheric temperature. After all the electrical tests, the cross section of the splice was visually examined. The conditions of the conductors of both 185[㎟] and 240[㎟] were good.

Key Words : Safety assessment, Power cable splices, AC withstand voltage tests, Partial discharge tests, Impulse tests, Thermal rise, Visual examination

1. 서 론

전력케이블은 지중 송전이나 배전을 위해 도체 위에 비닐, 폴리에틸렌, 가교폴리에틸렌 등의 절연재료를 원형의 압출물로 성형한 것으로 전력계통에서의 역할이 매우 중요하다. 그러나 고압 및 특고압 설비에서 모선, 고압배선, 인입전선로 등과 같은 전력케이블 사고가 차지하는 비율은 2008년의 경우 전체 건수의 약 12.8[%]나 되어 결코 간과될 수 없는 수준에 이르고 있다. 전력케이블은 일단 사고가 발생하면 광범위한 정전을 수반하므로 전력 공급의 신뢰성과 안정성 확보를 위해 제조·유지관리는 물론 시공 시에도 높은 신뢰성이 요구된다.

본 논문은 최근 IEC로 표준화되어 온 전력케이블 중 240[㎟] 굵기의 CV 케이블을 표준화 이전에 기포설된 185[㎟] CV 케이블 선로에 접속 시 발생하는 접속부위에 대해 안전성을 평가하기 위한 것이다.

* 주저자 : 한국전기안전공사 전기안전연구원 선임연구원
Tel : 031-580-3073, Fax : 031-580-3070
E-mail : phdjung@korea.com
접수일자 : 2010년 7월 12일
1차심사 : 2010년 7월 14일, 2차심사 : 2010년 7월 27일
심사완료 : 2010년 8월 4일

2. 전력케이블류 사고통계

한국전기안전공사에서 발간하고 있는 2009년도 통계분석보고서에 따르면, 2008년에 모선, 고압배선 및 인입전선로와 같은 케이블류에서 발생한 사고는 각각 49건, 17건 및 149건으로 전체의 2.9[%], 1.0[%] 및 8.9[%]를 점하고 있다[1].

고압 및 특고압 설비에서 발생한 케이블류의 사고현황을 표 1에 나타내었다.

표 1. 고압 · 특고압설비 사고현황
Table 1. A status quo of failure in H.V equipments

구분	모선	고압 배선	인입 전선로	지지물 애자류	LA	MOF	COS	PF
건	49	17	149	44	81	179	321	121
[%]	2.9	1.0	8.9	2.6	4.9	10.7	19.3	7.3
구분	변압기	수배전반	차단기류	계전기류	고압 콘덴서	접지 설비	고압부하 설비	수배전개 폐기
건	193	35	113	29	8	4	24	261
[%]	11.6	2.1	6.8	1.7	0.5	0.2	1.4	15.7

일본은 케이블 및 부속자재의 도입 역사가 국내보다 길어 보다 정확한 분석이 이루어지고 있다. 일본의 경우 6.6[kV] 고압 배전선로의 사고를 보면 표 2에 나타낸 바와 같이 외상에 의한 사고가 약 41.8[%], 외상 이외의 사고가 약 58.2[%]를 차지하고 있으며, 외상 이외의 사고 비율을 보면 접속재가 약 40[%], 케이블 자체가 약 60[%]로서 접속재의 설치 · 시공 · 관리가 보다 철저히 이루어져야 함을 시사하고 있다[2].

표 2. 일본 고압 배전선로의 원인별 사고건수
Table 2. Failures by causes in H.V distribution lines in Japan

사고 원인	외상	열화	자연 열화	시공 · 자재 불량	기타	합계
건	325(2)	192(49)	27(3)	140(110)	93(20)	777(184)
비율([%])	41.8	24.7	3.5	18.0	12.0	100

주) ( )의 수치는 접속재의 사고건수를 의미

일본의 고압 배전선로 사용년수와 사고건수를 분석한 바에 따르면, 접속재는 설치 후 약 7년이 지나면서 급속히 증가한다고 보고되고 있다[2]. 특히 직선접속재에서의 사고가 종단접속재보다 많은 것으로 미루어 시공불량에 의한 결함에 전계가 집중되고 있음을 간접적으로 알 수 있다.

3. 전력케이블 내 방전 형태와 고장

본 연구에서는 XLPE를 주절연재로 채용한 전력케이블을 대상으로 하고 있으며, 두 케이블을 접속한 직선접속재 내부에서 발생할 수 있는 다양한 방전의 형태를 그림 1에 나타내었다.

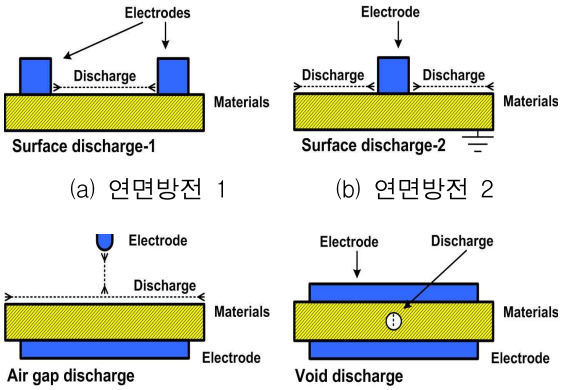


그림 1. 직선접속재 내부 방전
Fig. 1. Internal discharges in cable splice

XLPE라는 고상 절연재가 채용된 전력케이블은 대표적인 비수리계 설비로서 액상 절연재를 채용한 유입형 전력설비와는 달리 설치 이후 철거까지 별다른 수리 없이 지속적으로 사용하고 있다. 전력케이블의 경우에도 정격전압 이하에서는 평상 시 선로와 대지 간이 XLPE로 절연되고 있으므로, 시간에 따른 고장율의 변화로 표현되는 수명주기가 1회로 종료되는 기본적인 욕조곡선의 형태를 띠며[3], 이를 그림 2에 나타내었다.

그림 2에 보인 바와 같이, 초기고장기에 발생하는 고장은 제품의 품질결함, 설치 불량, 오동작 등으로 인

한 사고가 대부분이며, 특히 전력케이블의 경우, 제품의 결함은 케이블 자체의 결함은 물론 케이블을 제조한 이후의 조립 공정에서도 고장을 유발할만한 오류가 발견되는 경우가 많다. 반면 안정화시기에 접어들어서는 과부하나 외부충격 등에 의한 사고가 발생할 수 있으며, 전력케이블이 노후될 경우에는 트리의 발생과 절연체의 열화 등에 의한 고장율이 점차 증가하게 된다.

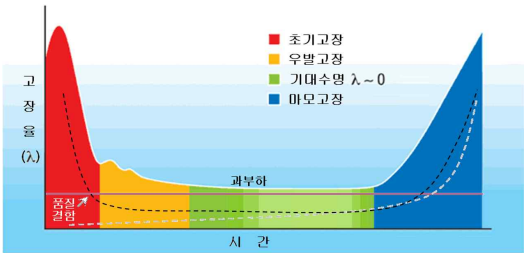


그림 2. 욕조곡선
Fig. 2. Bath-tub curve

4. 다른 굵기 6/10[kV]급 CV 케이블 접속한 직선접속재 안전성 평가장치 구성

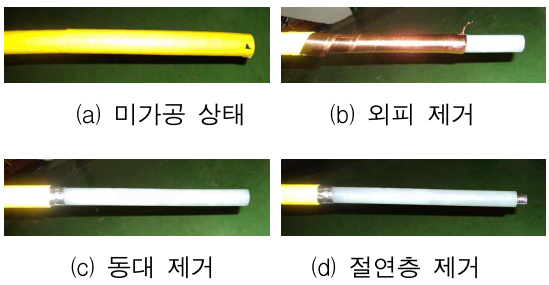
표 3. 직선접속재 시험조건 및 관련기준
Table 3. Testing condition and standards of splice

시험항목	시 험 조 건	관련기준
AC 내전압	4.5[U_0]에서 5분간 AC 또는 4[U_0]에서 15분간 d.c.[4]	KS C IEC 60502
부분방전	1.73[U_0]에서 최대 10[pC][4]	
임펄스	각 극에서 10회[5]	
통전 시 발열시험	200[A](평상 시 부하전류의 약 1.18배)로 20분간 통전 시 발열 측정	×
단면검사	모든 시험 완료 후 접속재 단면에 대해 육안검사	×

지중 배전선로는 전력케이블과 이를 연결하는 접속부로 구성되어 있다. 전력케이블의 품질은 제조공장에서 정밀한 방법으로 검사되고 있으나 현장에서 시공되는 접속부는 인력에 의해 조립되므로 시공 관리가 어렵고 시공 중 발생하는 결함을 검출하기가 매우 곤란하다. 더욱이 서로 다른 굵기의 전력케이블을 직선접속재로 서로 접속하였을 때 접속부에서 발생할 수 있는 잠재적 위험요인은 적절한 진단방법을 이용하여 사전에 검출되어야 한다. 이를 위해 직선접속재에 대해 다음과 같은 시험을 실시하였다.

4.1 시험장치 구성

다른 굵기의 6/10[kV]급 CV 케이블을 직선접속재로 접속하였을 때의 안전성을 평가하기 위해 AC 내전압 시험, 부분방전 시험, 임펄스 시험, 통전 시 발열 측정을 실시하였으며, 기계적 조임·눌림 상태를 관찰하기 위해 직선접속부의 단면에 대해 육안검사를 실시하였다. 시료는 그림 3과 같이 동일조건으로 가공한 A, B 및 C 시료 3조를 준비하였다. 시험은 10.8[℃]의 온도, 50[%]의 습도 하에서 실시되었다.



(a) 미가공 상태 (b) 외피 제거

(c) 동대 제거 (d) 절연층 제거

그림 3. 시료 가공
Fig. 3. Pre-treatment of cable specimen

4.1.1 AC 내전압 시험

AC 내전압 시험을 실시하기 위해 그림 4와 같은 장치를 구성하였다.

그림 4에 보인 바와 같이, 외피와 절연체를 벗겨낸 시료 양단 중 한쪽 말단의 심선에는 최대 200[kV]까지 인가할 수 있는 상용주파 고전압발생장치를 접속하고 다른 쪽 말단의 금속차폐층은 접지하였다. 시험전압은 3[kV/s]의 전압상승율로 4.5[U_0]인 27[kV]까지 인가하면서 절연체의 절연파괴 유무를 관찰하였다. 이때 전압의 크기는 고전압프루브로 분압되어 제어실

내에 있는 분석장치로 입력된다. 시험은 A상에 대해 먼저 실시한 후 B상, C상을 병렬로 접속하여 한번에 실시하였다.

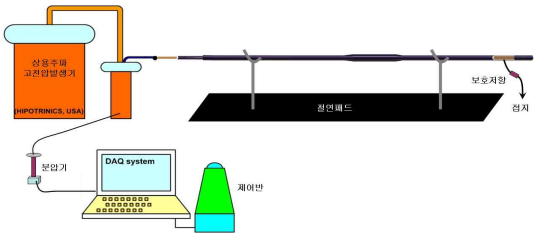


그림 4. AC 내전압 시험장치
Fig. 4. AC withstand voltage test

4.1.2 부분방전 시험

부분방전 시험을 실시하기 위해 그림 5와 같은 장치를 구성하였다.

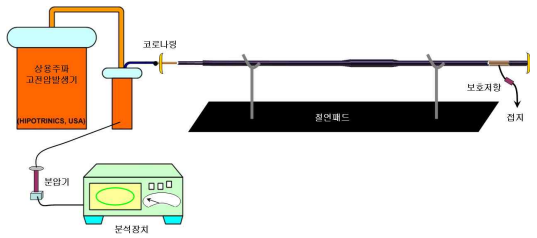


그림 5. 부분방전 시험장치
Fig. 5. Partial discharge test

그림 5에 보인 바와 같이, 가공된 시료 양단에 대해 전기적으로는 AC 내전압 시험과 동일하게 접속하고 케이블의 양 쪽 말단에서 발생하여 실험결과에 영향을 줄 수 있는 코로나를 억제하기 위한 코로나링을 설치한 후 1.73[U_0]에 해당하는 10.4[kV]의 전압을 인가하고 부분방전을 측정하였다. 시험은 A상, B상 및 C상 각각에 대해 따로 실시하였다.

4.1.3 임펄스 시험

임펄스 시험을 실시하기 위해 그림 6과 같은 장치를 구성하였다.

그림 6에 보인 바와 같이, 가공된 시료 양단 중 한쪽 말단의 심선에는 최대 400[kV]까지 인가할 수 있는 임펄스 발생장치를 접속하고 다른 쪽 말단의 금속차폐층은 접지하였다. 전반적인 시험절차는 KS C IEC 60230에 준해 진행되었으며, 시험전압은 1.2×50[μs]의 파두장 및 파미장을 지닌 표준파형을 정극성, 부극성 각각 10회씩 인가한 후 절연체의 절연파괴 유무를 관찰하였다. 이때 전압의 크기는 제어반 내부에 있는 고압 프루브로 분압되어 제어실 내에 있는 제어장치로 입력된다. 시험은 A상에 대해 먼저 실시한 후 B상, C상을 병렬로 접속하여 한번에 실시하였다.

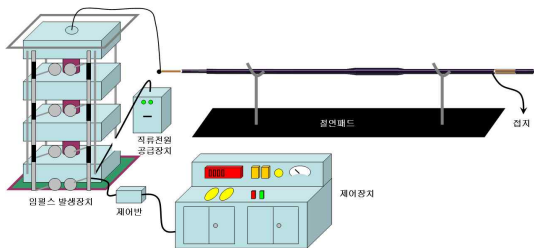


그림 6. 임펄스 시험장치
Fig. 6. Impulse test

4.1.4 통전 시 발열시험

통전 시 발열상태를 관찰하기 위해 그림 7과 같은 장치를 구성하였다.

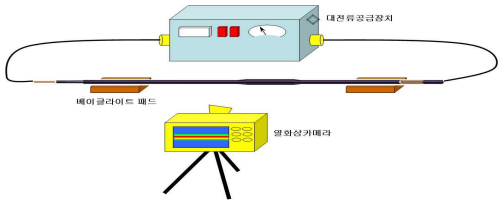


그림 7. 통전 시 발열 측정장치
Fig. 7. Thermal image test to energized conductor

그림 7에 보인 바와 같이, 통전 시 발열시험을 위해 가공된 시료 양쪽 말단의 심선에 최대 30[kA]까지 공급할 수 있는 대전류발생장치를 접속한 후 부하전류 170[A]의 약 1.18배에 해당하는 200[A]의 통전전류를 공급하면서 열화상카메라를 통해 20분간 직선 접속부의 온도상승을 관찰하였다. 전술했던 다른 시험들과는 달리, 본 시험은 19.5[℃]의 온도, 46[%]의 습도 조건에서 A상, B상 및 C상 각각에 대해 따로 실시하였다.

4.1.5 직선접속재 단면 육안검사

모든 전기적 시험이 완료된 시료에 대해 각 시료의 접속부마다 2개소를 워터젯으로 절단한 후 직선접속재 단면의 조임·눌림 상태를 관찰하였다.

5. 직선접속재 시험결과 고찰

4장에서 설명했던 바와 같이 서로 다른 굵기의 CV 케이블 직선접속재 안전성 평가를 위한 시험장치를 구성하고 관련기준에 명시된 방법대로 전압·전류를 인가한 후 절연체의 절연파괴 유무 또는 접속부의 온도상승, 단면상태 등을 관찰하였다.

5.1 AC 내전압 시험

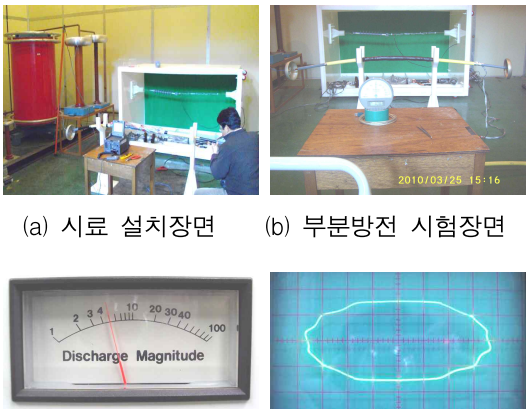
서로 다른 굵기의 케이블을 접속한 직선접속재에 대해 AC 내전압 시험을 실시한 결과, KS C IEC 60502에서 최소 요구사항으로 제시하고 있는 4.5[U_0], 5분간의 가압상태에서 절연체의 절연파괴가 발생하지 되지 않아 직선접속부에는 AC 내전압에 의한 이상이 전혀 없음을 확인하였다. 시험장면을 그림 8에 나타내었다.

(a) 가공된 케이블 시료 말단 (b) 케이블 시료 설치

그림 8. AC 내전압 시험
Fig. 8. AC withstand voltage test

5.2 부분방전 시험

서로 다른 굵기의 케이블을 접속한 직선접속재에 대해 부분방전 시험을 실시한 결과, KS C IEC 60502에서 최소 요구사항으로 제시하고 있는 1.73[U_0]인 약 10.4[kV]에서 10[pC] 이하인 4.0~8.0[pC]이 측정되었고 Lissajous 타원 상에서도 전원주파수의 노이즈로 간주되는 약간의 왜형만이 나타났을뿐 특징적인 부분방전이 관찰되지 않아 직선접속부에는 부분방전에 의한 이상이 전혀 없음을 확인하였다. 시험장면을 그림 9에 나타내었다.



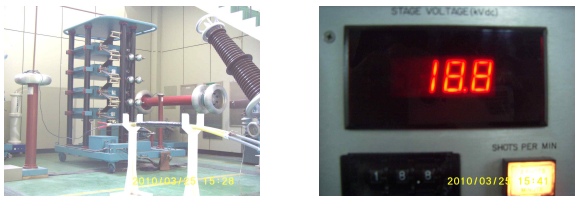
(a) 시료 설치장면 (b) 부분방전 시험장면

(c) 부분방전량 (d) Lissajous 타원

그림 9. 부분방전 시험
Fig. 9. Partial discharge test

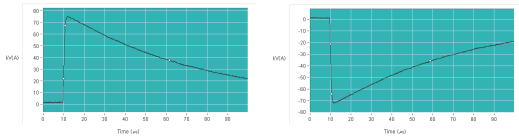
5.3 임펄스 시험

서로 다른 굵기의 CV 케이블을 접속한 직선접속재에 대해 KS C IEC 60502에서 제시한 75[kV]의 정극성 및 부극성 임펄스 전압을 각각 10회씩 인가한 결과, 동 기준에서 최소 요구사항으로 제시하고 있는 절연체의 절연파괴가 발생하지 되지 않아 직선접속부에는 임펄스 전압에 의한 이상이 전혀 없음을 확인하였다. 임펄스 시험장면과 인가된 표준 임펄스 파형을 그림 10과 그림 11에 각각 나타내었다.



(a) 임펄스 시험장면 (b) 인가전압(75[kV])

그림 10. 임펄스 시험
Fig. 10. Impulse test

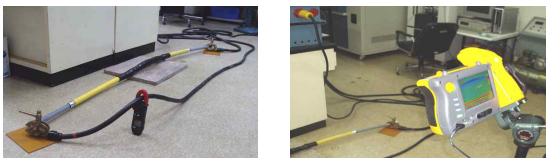


(a) 정극성 (b) 부극성

그림 11. 표준 임펄스 파형
Fig. 11. Standard impulse waveforms

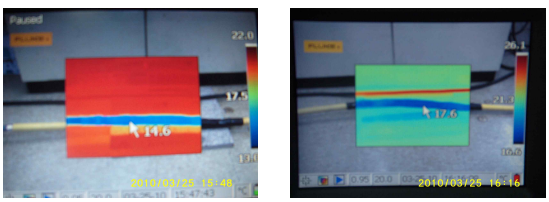
5.4 통전 시 발열시험

서로 다른 굵기의 CV 케이블을 접속한 직선접속재에 통상적인 부하전류 170[A]의 약 1.18배에 해당하는 200[A]의 전류를 20분간 공급하면서 열화상카메라로 직선접속재의 온도 상승을 관찰한 결과, 14.6[℃]에서 주위온도보다 오히려 낮은 17.6[℃]로 상승하였으나, 이 3[℃]의 온도상승분은 통전보다는 주위온도로 인한 것으로 사료되었을 뿐 특기할만한 발열상태가 전혀 관찰되지 않았다. 통전 시 발열 시험장면과 관찰된 열화상을 그림 12에 나타내었다.



(a) 통전 시 발열 시험 (b) 열화상카메라

(c) 19.5[℃], 46[%] (d) 공급전류(200.1[A])



(e) 통전 전(14.6[℃]) (f) 20분 통전 시(17.6[℃])

그림 12. 통전 시 발열시험
Fig. 12. Thermal test in energized conductor

5.5 CV 케이블 직선접속재 단면 검사

모든 전기적 시험을 완료한 시료 3조에 대해 직선접속재의 슬리브 내부 조임 · 눌림 상태를 관찰하기 위해 워터젯을 이용하여 각 조당 2개소씩 절단한 결과, 단면적이 185[㎟]와 240[㎟]인 심선의 조임 · 눌림 상태가 모두 양호한 것으로 판단되었다. 그림 13에 이를 나타내었다.

(a) 185[㎟]측 절단면 (b) 240[㎟]측 절단면 (c) 185[㎟]측 절단면(비접속부)

그림 13. 직선접속재 단면 검사
Fig. 13. Cross section of cable splice

6. 결 론

본 연구에서는 서로 다른 굵기의 CV 케이블을 접속한 직선접속재에 대해 안전성을 평가하였다. 이를 위해 KS C IEC 60502에 준한 전기적 시험 및 연구목적을 달성하기 위해 추가적으로 필요할 것으로 판단된 통전 시 온도 상승 및 단면에 대한 육안검사를 실시하였다. 직선접속재로 접속된 6/10[kV]급 CV 케이블 시료 3조에 대한 안전성을 진단한 결과, 4.5[U_0]에 해당하는 27[kV]의 AC 내전압 시험에서 5분간 절연파괴가 발생하지 않았고 이어 실시한 부분방전 시험에서도 1.73[U_0]에 해당하는 10.4[kV]의 전압을 인가한 상태에서 10[pC] 이하인 4~8[pC]의 부분방전량만이 관찰되었다. 또한 임펄스 시험에서도 표준파형의 75[kV_{peak}] 임펄스 전압에서 절연파괴가 발생하지 않았다. 통전 시 발열시험에서는 200[A]를 공급하면서 20분간 관찰한 결과 초기온도보다 3[℃]만큼의 온도상승이 관찰되었으나, 이는 통전에 의한 발열이라기보다는 주위온도에 의한 온도상승인 것으로 사료되었다. 전기적 시험 완료 후 마지막으로 실시한 직선접속부 단면검사 결과, 185[㎟] 및 240[㎟]측 심선 모두 조임 ·

눌림 상태가 양호한 것으로 판단되었다.

지금까지 서로 다른 굵기의 CV 케이블을 접속한 직선접속재 안전성 평가 결과, 185[㎟] 및 240[㎟] 단면적의 케이블을 185[㎟]용 슬리브로 접속했을 경우, 전기적 및 이로 인한 열적·기계적 안전성에서도 특기할만한 이상이 발견되지 않았다. 다만, 전기적 안전성보다도 직선접속부를 통한 수분침투 억제, 외피 손상 방지, 서로 다른 굵기의 CV 케이블을 접속한 직선접속재에 대한 철저한 이력 기록 등, 추후 관리적 측면에 보다 주의를 기울여야 할 것으로 사료된다.

본 연구는 삼성코닝정밀유리(주)의 재정적 지원을 받아 수행되었으며, 이에 깊이 감사 드립니다.

References

[1] 한국전기안전공사, 전기재해통계분석, 지식경제부, 제18호, p.70, 2009.

[2] 김보경 외 3, 고압 및 특고압 전력케이블의 절연진단 및 유지보수 관리방법(1), 전력기술인, 2003. 11.

[3] Dennis J. Wilkins, Part One - The Bathtub Curve, Infant Mortality and Burn-in, http://cxjr.21ic.org/user1/111/archives/2009/58265.html, 2009. 4.

[4] 정격 전압 1~30[kV] 압출 성형 절연 전력 케이블 및 그 부속품-제4부 : 정격 전압 6~30[kV] 케이블용 부속품에 대한 시험 요구, KS C IEC 60502-4 : 2006, 한국표준협회, p.7, 2006.

[5] 정격 전압 1~30[kV] 압출 성형 절연 전력 케이블 및 그 부속품-제2부 : 케이블(6[kV] 및 30[kV]), KS C IEC 60502-2 : 2005, 한국표준협회, pp.10-11, 2006.

◇ 저자소개 ◇

정종욱(鄭鍾旭)
1969년 2월 17일생. 1992년 숭실대학교 전기공학과 졸업. 1997년/2003년 동대학원 전기공학과 졸업(석/박사, 전기전자재료 및 대전력 전공). 현재 한국전기안전공사 전기안전연구원 선임연구원.

김선구(金善球)
1961년 2월 25일생. 1985년 한양대학교 전기공학과 졸업. 2009년 서울시립대 전기공학과 졸업(석사, 제어계측 전공). 현재 한국전기안전공사 전기안전연구원 책임연구원.

정진수(鄭鎭洙)
1976년 9월 12일생. 2003년 명지대학교 전기공학과 졸업. 2005년 동대학원 전기공학과 졸업(석사, 전력계통 전공). 현재 한국전기안전공사 전기안전연구원 선임보연구원.