

국내 배전급 XLPE 케이블의 절연 진단 기술 동향

강성화 교수 (충청대학 소방안전과) | 최한식 실장 (중소기업청 시험연구지원팀) | 윤재훈 박사과정 (충북대학교 전기공학과)

1. 서론

오늘날 전력사용이 급증하면서 부하가 대용량화 되는 추세에 따라 전기설비의 규모는 점차 대규모화 되고 사회는 점점 고도 정보화 사회로 발전되고 있다. 따라서 설비의 사고 및 정전 사고 등은 높은 전기적 의존을 가진 고도 산업사회에 막대한 경제적 손실 및 장애를 가져다준다. 한편, 도시환경의 미화 차원에서 지중 송배전선로는 점차 증가하고 특히 전력 케이블은 주로 공장 또는 대도시의 도로지하에 분포하고 있어 사고 시 복구에 많은 시간이 필요하며 교통 및 산업 활동에 막대한 피해를 끼치게 된다.

전력설비의 가장 큰 역할은 전력의 안정적인 공급이다. 전력의 안정적 공급은 변압기, 전력용 케이블, 각종 절연물 등의 기기들이 제 성능을 유지하는 것이 선행이 되어야 한다. 성능 유지를 위해서는 제조 시 결함 없는 제품을 만드는 것이 최선책이겠으나, 이는 절연물의 제조 여건상 불가능한 것이다. 따라서 전기기기를 적절한 시기에 유지, 보수하고 시기에 맞춰 교체하는 것이 가장 타당한 방법이 될 것이다. 현재 유지·보수의 시기들을 평가하는 것이 사선방식 (Off-line diagnosis method)이며, 그 방법도 다양하게 소개 되고 있다.

만약 유지·보수의 시기를 놓치게 되어 전력기기에서 사고가 발생하게 되면 큰 경제적인 손실은 물론 정전으로 인한 수용가의 피해가 발생하게 되며

전력품질의 신뢰성이 저하되는 결과를 초래하게 될 것이다. 따라서 사고를 미연에 방지하기 위해서는 적절한 전력설비 진단을 통한 교체시기의 선정이 무엇보다도 필요하다. 전력기기내의 사고 유형은 구조적인 결함, 운전 중 외부적인 요인으로 인한 결함, 기기 내부의 요인으로 발생하는 결함 등 다양하게 존재한다. 이중 구조적인 결함 및 운전 중의 외부적인 결함은 육안으로 확인할 수 있고, 절연협조 등으로 사고를 미리 차단할 수 있는 부분이 있지만, 기기 내부 결함으로 인한 사고는 그 특성상 판단하기 매우 어려운 점이 있다.

우리나라에서는 송배전용 케이블로 XLPE 케이블 (이하 CV 케이블이라 칭함)을 포설하기 시작한지 30년에 이르고 있으며, 이러한 CV 케이블은 설치한 후 설치환경 및 사용조건에 다르겠지만, 6~8년이 경과하면 열화가 발생하여 사고가 발생한다는 많은 절연파괴사고 사례 보고가 있다. 또한 국내의 전력용 케이블 설치 추세는 가공 전선로 보다 지중 전선로의 비중이 높아져 가고 있다. 지중전선로가 지하에 포설되는 이유 때문에 절연사고는 발생도 빈번하게 발생하고, 사고의 유형 및 고장점을 탐지하는 것은 매우 어려운 문제이며, 다른 여타의 전력기기보다 빈번하게 발생되고 있는 실정이다. 따라서 전력용 케이블의 유지·보수 및 교체는 시기적절하게 이루어져야만 사고를 방지할 수 있다. 현재 국내 전력기기의 유지보수기술은 시간기준정비 (Time based maintenance)에서 상태기준정비 (Condition based maintenance) 및 신뢰성 기반 정비 (Reliability



centered maintenance)로 바뀌고 있다. 이것을 실현하기 위해서는 전압스트레스 열화의 요인 중 하나인 부분방전에 의한 진단법을 사용할 수 있다. 전력기기내의 부분방전 발생신호에는 기기의 절연상태에 대한 정보가 다수 포함되어 있기 때문에, 좋은 절연 진단 파라미터가 될 수 있다.

2. 국내외 전력케이블의 사고현황

2.1 국내의 케이블 절연열화 사고 현황

한전에서 발표한 2001년도 지중배전선로 고장분석 및 예방대책 자료에서는 표 1에서 보는 바와 같이 1997년~2001년 설비별 고장사례건수 중 케이블 및 접속재가 약 82%로 지중고장의 대부분을 차지하고 있다. 그리고 표 2와 같이 원인별 고장사례건수 통계를 보면 외상에 의한 사고가 39%, 열화에 의한 사고가 44%를 차지하고 있다. 한편, 표 3과 같이 1991년도 한전의 지중선 고장현황 중 케이블 및 접속재의 사고 분석 자료를 보면 외상에 의한 사고가 40%, 외상 이외의 사고가 60%를 차지하고 있으며, 외상 이

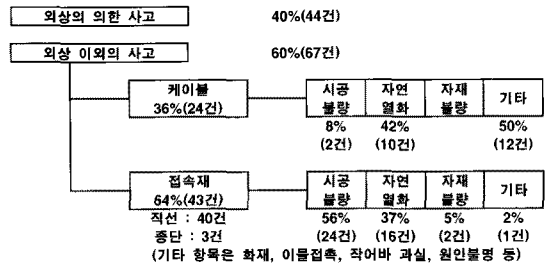
표 1. 지중배전선로 고장분석.

	케이블	접속재	개폐기	변압기	기타	계
2001년	153	45	20	22	2	242
2000년	139	39	25	20	4	227
1999년	117	43	12	15	3	190
1998년	97	45	16	11	3	172
1997년	118	42	8	18	2	188
평균 점유율	61%	21%	8%	8.4%	1.6%	100%

표 2. 원인별 고장사례 건수.

	외상	열화	제작불량	시공불량	기타	계
2001년	101	113	15	4	9	242
2000년	82	112	16	2	15	227
1999년	67	104	8	1	10	190
1998년	61	56	13	9	33	172
1997년	85	67	5	6	25	188
평균 점유율	39	44	5.6	2.4	9	100

표 3. 한전의 지중선 고장현황.



외의 사고 60%에 대해 분석해보면 케이블이 36%, 접속재가 64%를 차지하고 있으며, 케이블에서는 절연 열화가 42%로 높은 사고원인으로 점유하고 있으며, 접속재에서는 시공불량이 56%로 가장 높은 것으로 나타났다. 따라서 표 1~표 3의 통계자료를 종합 분석하여 보면 지중 배전선로 설비에 있어 케이블과 접속재의 효과적인 관리가 필요하며 특히 외상에 의한 사고에 대한 대책이 필요하다.

외상에 의한 사고는 타설시 시공을 위한 도로 굴착작업 시 발생되고 있는 것도 많이 차지하고 있을 것으로 판단되지만, 다음에 기술하는 일본에서의 사고통계 및 CV 케이블에서 대부분을 차지하는 열화의 원인으로 파악되는 수트리 (WATER TREE)가 케이블 외피의 손상부분을 통해 침입하는 수분에 의해 열화가 진행된다는 주요 케이블 사고원인으로 되는 점을 간과할 수 없기 때문에 케이블 포설 시 외피가 손상되지 않도록 공사하는 것이 중요하다. 그리고 또한 접속재에서는 시공불량이 과반수를 차지하고 있는 통계와 더불어 케이블과 접속재의 설치 시공 관리가 더욱 철저해야 한다는 것을 알 수 있으며, 또한, 장기간 운전 중에 발생하는 열화사고를 미연에 방지하고, 신뢰도를 제고하기 위해서도 정기적으로 케이블 및 접속재의 절연 진단을 실시해야 할 것으로 판단된다.

2.2 국외의 케이블 절연열화 사고의 현황

일본의 경우 1955년 후반, 배전선에 CV 케이블을 처음 사용한 이래 현재 배전용 케이블로서의 자리를 완전히 굳혀왔고 매년 막대한 양의 CV 케이블이 출하 및 포설되고 있다. 일본의 6.6 KV 고압배전선로

의 원인별 사고를 분석해보면 표2.4와 같이 외상에 의한 사고가 약 42%, 외상이외의 사고가 약 78%를 점유하고 있다. 이것은 한국에서의 케이블과 접속재 부분만 분석한 표 3과 같이 외상에 의해 전계가 집중되면서 부분방전의 발생으로 인하여 설치초기에 사고가 많이 발생하는 것으로 판단되며, 케이블은 약 7년 후부터 손상된 외피 부분 통하여 수분침투에 의한 수트리 열화, 습식가교방식을 사용한 케이블 제조 시 발생하는 수분함유에 의한 수트리 열화 또는 특히 중단접속재의 잘못된 시공으로 인한 수분침투에 의한 사고와 외상이외의 사고비율이 거의 같은 비율이라는 점이다. 그러나 일본에서는 6.6 kV 배전선로의 원인별 사고 건수 중 외상이외의 사고비율을 분석해보면 접속재가 약 40%, 케이블이 약 60%를 차지하고 있다. 일본에서의 고압배전선로의 사용 연수와 사고건수는 접속재의 경우 설치 후 약 7년 이내에 사고가 많이 발생하고 있는 것에 반하여, 케이블에서는 설치 후 약 7년 이후부터 급격히 증가하고 있다. 이것은 접속재에서는 잘못 시공한 부분에 대한 수트리 열화 등에 의해 열화사고가 발생되고 있는 것으로 판단된다.

CV 케이블의 포설 환경과 사고건수 통계분석자료를 보면 CV 케이블에서 수분이 존재할 수 있는 직매, 피트, 맨홀과 같은 포설환경에서 대부분의 케이블사고가 발생하고 있다. 또한 이 사항도 수분과 밀접한 함수관계를 가지고 있어 CV 케이블에서 가장 문제가 되는 물(수분) 존재여부는, 다음에 기술하는 수트리(WATER TREE)열화와 밀접한 관계를 가지고 있다는 사실을 말해주고 있다.

표 4. 일본의 고압배전선로의 원인별 사고건수.

사고원인	3.3 kV 배전선로		6.6 kV 배전선로	
	건수	%	건수	%
열화	67(12)	58.8	192(49)	24.7
자연열화	5(0)	4.4	27(3)	3.5
외상	49(17)	12.3	325(2)	41.8
시공, 자재불량	19(17)	16.7	140(110)	18.0
기타	9(4)	7.9	93(20)	12.0
합계	114(35)	100	777(184)	100

주) ()의 수치는 접속재의 사고건수를 의미함.

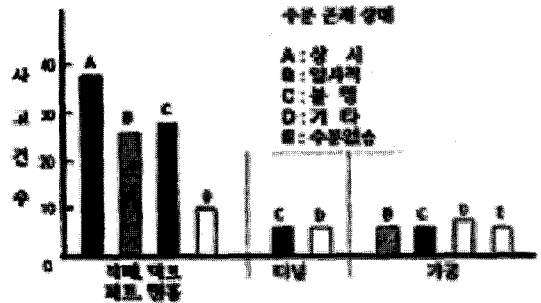


그림 1. 일본의 CV 케이블의 포설환경과 사고건수.

2.3 전압스트레스에 의한 절연열화 요인

절연물에 전압이 인가되게 되면 전계가 발생하게 된다. 절연물에 인가되는 전계에 기인하는 것으로는 다음과 같은 원인들이 있다.

- (1) 전도전류 : 줄열로서 열적효과를 나타내는 이외에 이온전도에 있어서는 전기화학효과를 일으킨다.
- (2) 유전체손 : 교류전계하에서 발생하며 열적효과를 일으킨다.
- (3) 전자력, 정전력 : 단락전류라든가 고전압에 의하여 발생하는 힘으로 기계적 효과를 나타낸다.
- (4) 부분방전 : 국부적인 고전계에서 기체, 액체의 부분방전이 일어나면 열적작용, 입자충격작용, 여기분자라든가 이온에 의한 화학작용이 일어난다. 이렇게 발생된 부분방전은 전력기 내에서 전기트리로 진전이 되어, 결국 절연 파괴에 이르게 된다.

3. 케이블의 절연 열화 시험법

활선상태에서 전력케이블의 절연상태를 진단하는 방법은 여러 가지가 개발되어 있으며, 현재에도 계속 연구 중에 있다. 이것을 정리하면 다음 표와 같다.

표 5. 활선상태에서의 진단법의 종류.

진단법의 종류	열화형태·이상현상			
	수트리	전기트리	부분방전	발열현상
직류전압중첩법	A	A	B	
직류성분법	A	A		
활선 Tanδ법	A			
저주파중첩법	A	A		
교류중첩법	A	A		
직류BIAS법	A	A		
맥동검출법	A	B		
접지선전류법	A	A		
손실전류고조파법	A	A		
온도측정법				A
부분방전하법	B	B	B	
초음파(AE)법	B	C	B	

여기서는 제품이 개발되어 사용 중이거나 현장 시험 중인 방법 중에서 직류 성분법, 직류 전압 중첩법, 활선 Tanδ법, 저주파 중첩법, 교류 중첩법, 직류 바이어스법, 맥동검출법에 대해 원리와 특징을 설명하고자 한다.

3.1 직류성분법

교류전압이 인가된 수트리열화 CV 케이블의 접지선에 흐르는 충전전류(교류전류)에는 산화동에 의한 정류작용으로 nA~μA 정도의 미소 직류성분이 포함되어 있다. 내도 수트리를 Model화한 경우 도체축이 -극성으로 되면 수트리의 선단으로부터 전하가

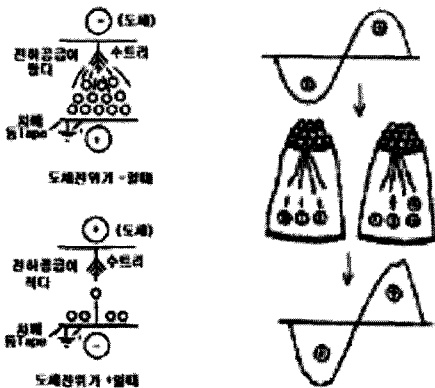


그림 2. 수트리의 정류작용 모델 및 충전전류파형.

공급되어, 차폐 동태일로 이동한다. 도체축이 +로 되면 차폐 동태이로부터 공급은 많지 않다. 즉 전원 전압의 +, -극성의 사이클에서 전하의 거동이 달라 전원전압의 피크치 부근의 전류파형이 왜곡되어 비대칭으로 된다. 이 비대칭성분은 직류와 많은 교류 성분으로 구성되어 있다고 보고되고 있다.

측정 시에는 접지용변압기(GPT), 고압배전선, 피 측정 CABLE, 진단장치 및 대지로 폐회로가 구성된다. 진단장치에서 측정되는 직류성분은 매우 미소하지만 이 직류성분이 CV 케이블의 열화 신호이기 때문에 직류성분만 검출한다. 이러한 직류성분을 교류성분과 분리하여 검출하기 위해서는 직류성분 검출감도가 10^{-10} A (0.1 nA) 정도가 필요하며, 저역 통과 필터를 사용하여 직류성분만 검출하고 있다. 표 6에 직류성분의 판정기준 예를 나타냈다.

직류 성분법에 의한 측정 시 특징 및 유의점은 다음과 같다.

- (1) 별도의 과전용 전원장치가 불필요하다.
- (2) 접지선을 이용하여, 충전부에 접촉하지 않고 측정할 수 있으므로 안전하고 간편하다.
- (3) 직류성분전류는 미약하기 때문에 외피 스위절연저항값이 낮으면 미주전류의 영향을 받기 쉬워 오측정될 우려가 있다. 따라서 미주전류와 직류성분전류의 판별이 필요하여, 몇 가지의 미주전류 제거법이 개발되어 있다.
- (4) 케이블 단말부의 표면누설저항이 낮으면 스위절연저항 값이 낮아지는 것 같은 현상이 발생하여 측정오차의 원인으로 되기 때문에 단말부 청소와 우천 시 측정은 피하는 것이 좋다.
- (5) 절연층에 내도수트리와 외도수트리가 병존 시

표 6. 직류성분법의 판정기준.

판정	Printer 표시	직류성분 (nA)	재측정주기
불량	A	100 이상	조기 교체 필요
중주의	B1	10 이상 ~ 100 미만	1년 이내
경주의	B2	1 이상 ~ 10 미만	3년 이내
양호	C	1 미만	5~7년 주기
판정유부	*	스위절연저항이 1 MΩ 이하	

오진단 우려가 있다.

- (6) 별도의 전원을 교류에 중첩하지 않는 직류성분법에서는 특고압 CV 케이블에서의 열화진단이 불가능하고, 접속재의 절연진단도 불가능하다. 따라서 직류 성분법을 보완한 진단법이후에 기술하는 직류 BIAS법이 제안되고 있다.

3.2 직류전압중첩법

GPT (또는 접지변압기)의 1차 중성점을 통하여 고압모선에 직류 50V를 교류전압에 중첩시키고, 활성상태에서 전력케이블 도체와 차폐동 테이프 간에 흐르는 직류누설전류를 측정하여 절연저항을 산출하는 것이다.

측정 시에는 접지용변압기 (GPT), 고압배전선, 피측정 CABLE, 측정기, 대지 및 직류전원으로 폐회로가 구성된다. 표 7에 직류전압중첩법에 의한 고압전력케이블의 판정기준 예를 표시하였다.

직류 전압 중첩법에 의한 측정 시 특징 및 유의점은 다음과 같다.

- (1) 직류고압누설전류법과 직류 전압 중첩법에 의해 측정된 절연저항치는 비교적 좋은 상관관계를 가지고 있다.
- (2) 직류전압중첩법에 의한 절연저항치는 6 kV급

전력케이블에서는 직류 인가전압 5~6kV의 절연저항치에 상당한다.

- (3) 특고압 CV 케이블의 열화진단에 적용되고 있다.
- (4) 미주전류가 변동하고 있는 경우, 측정 오차가 크게 되는 경우가 있다.
- (5) 단말부의 표면누설저항이 낮으면 측정오차의 원인으로 된다.
- (6) GPT에 높은 직류전압을 장시간(수 시간이상) 인가되면, 상별 여자전류가 불균형하게 제작된 GPT에서는 자속포화가 생겨 영상전압이 발생하여 변전소 릴레이의 오동작 원인이 될 수 있지만, GPT에 교류접지기를 설치하는 것과 동시에 수분 동안만 50V를 인가시키는 설계보완구성으로, 실제 현장에서는 문제가 발생되고 있지 않다.

3.3 활선 Tanδ법

절연재료에서는 교류전계가 인가되는 경우 전기적 에너지가 열에너지로 변화하는 과정에서 손실이 발생한다. 이 손실량을 전기적으로는 Tanδ (유전정접이라 함)라고 부른다. 이 Tanδ는 절연재료의 유전율에 의해 나타나는 정전용량에 대해 90도의 늦은 위상각을 갖는 저항성부하에 대한 용량성 부하의 비율로 표시되는 상대값이다. 이 Tanδ법의 측정원리는 전력케이블에 인가되는 인가전압과 차폐접지선에 흐르는 전류의 위상차를 측정해서 Tanδ를 산출하고 이 Tanδ의 크기로 열화 상태를 판정하는 것이다. 측정이 활선 하에서 이루어지므로 별도의 고압 전원장치가 필요치 않다는 장점이 있으나, 전압을 측정하기 위해서는 충전부에 접촉이 필요하므로 위험성이 있고, 평균적 열화검출에는 유효하지만 트리발생과 균열 등의 국부적인 열화를 검출하는 것은 상당히 어렵다.

Tanδ 측정법을 원리에 따라 나누면 Bridge법, 위상차법, 전력계법, 열류계법 등으로 나눌 수 있다. 이 가운데 Bridge법 및 전력계법은 회로의 평형상태를 조정할 필요가 있기 때문에, 만약 자동화된다고 하여도 그만큼 복잡한 회로가 될 것이다. 또한, 열류계법은 부하로서 전류에 따라 발생하는 발열이 생기는

표 7. 직류전압중첩법의 열화판정기준.

측정대상	측정치	평가	케이블조치
본체 절연저항 Ri	1,000 MΩ 이상	양호	사용계속
	1,000 MΩ 미만 100 MΩ 이상	경주의	사용계속
	100 MΩ 미만 10 MΩ 이상	중주의	경계 하에서 사용 계속, 교체 준비
	10 MΩ 미만	엄중주의	케이블 교체
방식중 절연저항 Rs	1,000 MΩ 이상	양호	사용계속
	1,000 MΩ 미만	불량	사용계속, 단, 불량개소 수리
제동절연 저항 Rb	불량치의 기준은 없고, 1년경과하여 원래 값보다 떨어지지 않으면 양호한 것으로 한다.		

표 8. 활선 Tanδ 판정기준.

판정	측정치 (Tanδ)	진단
양호	0.5% 미만	
요주의	0.5% 이상 5% 미만	수트리 발생
불량	5% 이상	수트리 상당히 진전 내전압 극히 저하

경우의 활선진단법으로 적용 가능하지만 정밀도 면에서 어느 정도 문제점이 있다. 따라서 현재 발표되고 있는 활선상태의 Tanδ 측정 장치는 대부분 위상차법을 적용하고 있다.

Tanδ 측정법의 특징 및 유의점은 다음과 같다.

- (1) 차폐접지선에서 CT에 의해 전류를 검출한다.
- (2) 특별한 고압원전장치가 필요 없다.
- (3) 전압측정을 위해 충전부에 접촉할 필요가 있으나, GPT의 2차 전압을 이용하는 방법이 개발되어 충전부에 접촉할 필요가 없다.
- (4) 국부적인 열화 검출은 어렵다.

3.4 저주파중첩법

케이블의 도체와 차폐층간에 저주파전압을 인가한 때에 흐르는 전류 중 손실전류만을 검출, 교류절연저항을 산출하여 열화의 정도를 판정하는 방법이다.

측정회로에는 충전전류 Cancel방식과 이외에 브리지방식이 있다. 충전전류 Cancel방식은 주로 6kV 급 CV 케이블의 열화진단에 사용되고 있는 것으로, 7.5 Hz - 20 V 고정조건으로 측정한다. 충전전류를 Cancel하기 때문에 기준신호를 기초로 충전전류와 역위상의 성분을 만들어 산출하고 있다.

한편, 브리지방식은 표준 콘덴서를 사용한 CR의 브리지회로를 구성하여, 동입력으로 측정하는 것으로, 임의의 조건에 있어서 자동측정이 가능하다. 이 두 가지 방법 모두 활선, 정전상태에 상관없이 측정 가능하다. 활선측정시의 저주파전압은 브리지 방식의 경우, 접지용변압기(GPT) 중성점으로 중첩 등 여러 가지의 중첩방식에 의해 측정이 가능하다. 그러나 통상은 콘덴서를 Y결선하여, 그 중성점으로부터 삼

표 9. 저주파중첩법의 판정기준.

판정	활선측정결과	조치	판정의근거
불량	400 MΩ 이하	조기 교체 (2~3개월 이내) 계획	1선 지락시의 대지간 전압 (6.9 kV) 이하에서 절연파괴를 일으킬 가능성이 있음
요주의	400 MΩ 초과 1,000 MΩ 이하	1년 후에 재측정	1선 지락시의 대지간 전압 (6.9 kV) 이하에서 절연파괴를 일으킬 가능성은 적지만, 전기설비기준의 내전압치 (10.35 kV) 이하에서 절연파괴를 일으킬 가능성이 있음
양호	1,000 MΩ 초과	정기절연 진단의 계속 실시	전기설비기준의 내전압치 (10.57 kV) 이하에서 절연파괴를 일으킬 가능성이 적다

상에 중첩하기 때문에 고전압선로의 중첩용 케이블의 접속을 간접 활선공사를 한다.

저주파중첩법의 특징 및 측정 시 유의사항은 다음과 같다.

- (1) 진단결과의 신뢰성이 높다.
- (2) 저주파, 저전압 때문에 전원의 용량을 작게 할 수 있다.
- (3) 관통 수트리 열화에 한하지 않고, 미관통 수트리 열화 검출도 가능하다. 현재 6 kV 배전선에만 적용되고 있으나, 일반 공장과 특고압 케이블에 적용하기에는 아직 많은 과제가 남아있다.
- (4) 관통 수트리와 미관통 수트리 모두 검출가능하지만 아직까지는 명확히 관통 수트리인지, 미관통수트리인지 알 수 없다. 따라서 필드에서는 활선진단의 결과가 요주의 및 불량으로 판정된 케이블은 별도 직류 누설전류법에 의한 정전진단을 실시하고 있다.
- (5) 측정원리상 손실전류가 큰 것일수록 열화가 진행되고 있다는 결과가 나오기 때문에, 열화가 되지 않는 상태라도 손실전류가 큰 것은 활선 진단만으로는 요주의 또는 불량으로 판정될 수 있기 때문에 주의가 필요하다. 특히, 케이블단말 종류에 따라 측정치가 크게 변동할 요인이 있으므로, 진단 전에 단말의 사양을 확

인할 필요가 있다.

3.5 교류중첩법

교류중첩법은 케이블의 차폐층에 상용주파수의 2배 +1 Hz의 교류전압을 중첩하여, 수트리 열화에 기인한 1 Hz의 열화신호를 검출하는 방법이다. 수트리 열화케이블에서는 상용주파수 +1 Hz부근의 전압을 중첩한 때, 측정된 열화신호가 가장 크게 된다. 이것 때문에 본 방법에서는 상용주파수 +1 Hz의 전압을 중첩하여, 1 Hz의 열화신호를 검출하고 있다.

케이블 차폐층에 교류전압을 중첩하기 때문에 고압부로의 연결 접촉 작업이 필요하지 않아, 활선상태에서도 간편하게 측정할 수 있다. 6 kV급 CV 케이블의 판정기준으로서 표 10과 같이 제안되어 있다.

교류중첩법의 특징 및 측정 시 유의 사항은 다음과 같다.

- (1) 케이블의 접지선으로부터 전압을 중첩할 수 있어 측정이 간편하다.
- (2) 전압을 중첩하는 것과 동시에, 이미 알고 있는 열화신호 (1 Hz)를 검출하기 때문에, 측정정도가 높다는 보고가 있다.
- (3) 현재 6 kV 케이블 절연 진단에만 사용되고 있다. 이후의 진단법은 새로운 진단법이므로, 실선로에서의 측정 DATA가 많지 않다. 따라서 향후 DATA의 축적이 필요하고, 실제 현장에서의 진단 시 문제점에 대한 개선 및 보완이 필요하다.

3.6 활선 하 케이블 절연 감시장치 (OLCM)

국내에서 사용되는 활선 전력케이블의 절연상태

표 10. 교류중첩법의 판정기준.

판정	기준
양호	I_{sa} (1 Hz의 전류) < 10 nA
불량	$I_{sa} \geq 10$ nA
판정불능	쉬스절연저항 < 250 K Ω

를 진단하는 장치는 일본의 직류전압중첩법에 해당되는 OLCM과 직류성분법에 해당되는 수트리 활선 진단장치이다. OLCM에는 고정식 (AOLCM)과 휴대식 (APOLCM)이 있다.

고정식 OLCM은 측정장치, 중앙감시장치, GPT 중성점접지반으로 구성되고, 휴대식 OLCM은 비접

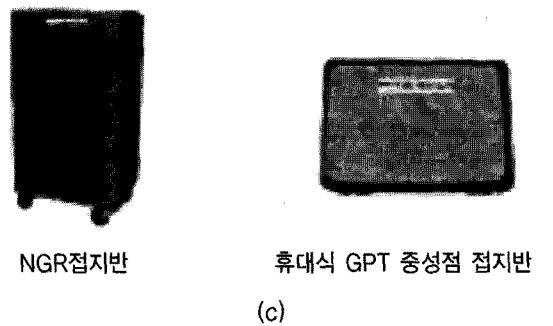
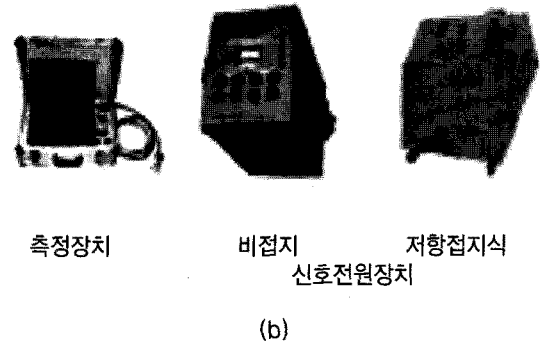
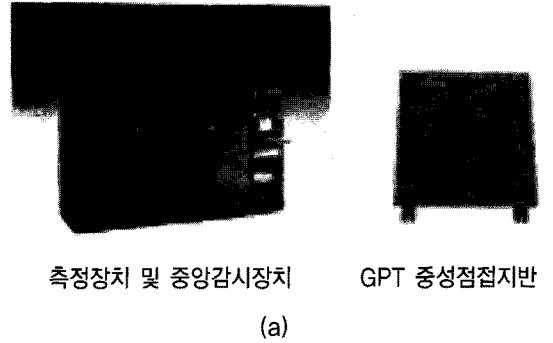


그림 3. OLCM 외관.

표 11. OLCM 측정항목 및 측정범위.

측정항목	기호	측정범위
절연층 절연저항	R1	2~30,000 Mohm
방식층 절연저항	RS	0~4,000 Kohm
동차폐 단선저항	RT	0~1 Kohm
계통 절연저항	RB	1~20,000 Kohm

지계통에서는 측정장치, 신호전원장치, GPT 중성점 접지반으로 구성되며, 저항접지계통에서는 측정장치, 신호전원장치, NGR 접지반, GPT 중성점 접지반으로 구성된다.

OLCM에서는 케이블의 도체와 쉬스 간의 절연층 절연저항과, 쉬스와 대지접지간 외피의 방식층 절연저항과 계통 BUS와 대지간의 계통절연 저항을 측정 대상으로 하고 있다. 특히 고정식 OLCM에서는 케이블 동차폐단선 여부를 알 수 있는 동차폐단선저항을 Option 기능도 갖추고 있으며, 케이블계통에 연결되어 있는 단말접속재의 이상여부를 감시할 수 있도록 Software를 개선하여 시험 중에 있다.

3.7 수트리 활선 진단장치

케이블도체에 별도의 전원을 중첩하지 않는 방법으로는 고압케이블의 절연 열화진단에 한계가 있다는 것을 파악하여 2001년에 GPT를 통해 도체에 직류를 중첩 인가하는 직류 BIAS법 (직류중첩법과 유사)을 사용한 장치를 제품화하게 되었다.

표 12. 1990년대 수트리 진단장치의 사양.

품명	정격
측정기	<ul style="list-style-type: none"> • 사용전원: DC 12V • 연속사용기간: 6h(내장 Battery 전원) • 직류전류측정범위: 1 nA ~ 1 mA • 사용온도: 0~40 ℃
강제접지기	<ul style="list-style-type: none"> • 사용전원: DC 12V • 연속사용기간: 6h(내장 Battery 전원) • 사용온도: 0~40 ℃ • 내전압: AC 7,200 V 60 sec 이상 • 내전류: AC 4,000 A 0.4 sec 1회
부속품	측정리드선, 충전기, 표준기 외

표 13. 2001년 수트리 진단장치의 사양.

항목		사양
측정장치	직류성분측정범위	±0.1 nA ~ ±1 mA
		측정오차 ± 5% (Full scale)
		주위온도: 0~40 ℃
	교류전류 측정범위	0.1 nA ~ 100 mA
쉬즈절연저항 측정범위	11 kΩ ~ 2,000 MΩ	
전원	DC 12 V (Battery)	
접지 보호 장치	Arrester 동작전압	AC 90 ± 10 V (파고치)
	전류검출회로 검출전류	AC 0.9 ± 0.1 A (파고치)
	전원	DC 12 V (Battery)

현재 국내에 수입하여 사용되고 있는 장치들은 1990년대의 수트리 진단장치의 사양에 해당되는 것으로, 11 KV 이상의 특별고압 케이블의 열화진단에는 사용할 수 없으며, 방식층(외피)이 불량한 케이블 및 단말접속재의 열화진단에도 사용할 수 없다는 점에도 유의해야 한다.

3.8 부분방전 측정

부분방전 발생을 위한 모델 시편은 전력용 케이블에서 발생가능성이 높은 결함을 채택하며, 이 모델 시편은 주로 코로나방전, 보이드 방전, 전기트리 방전을 발생시키기 위한 것이다. 시험용 케이블 제작 시 5종류의 결함을 갖는 시편에 대한 부분방전 분포특성을 검토하기 위한 것이며, 결함의 구성은 표 14와 같다.

국부적인 전계의 집중에 의해 발생하는 부분방전은 그 원인에 따라, 즉 부분방전원에 따라 서로 다른

표 14. Defects of Specimen.

시편번호	결함종류
1번	정상시편(22.9 kV CNC 케이블)
2번	외부 반도전층 제거
3번	내부 반도전층 제거
4번	보이드(발생 시도)
5번	천 결함
6번	동분

부분방전 특성을 나타낸다. 결함의 제작은 정확한 부분방전원을 얻기 위한 기초적인 단계로써 전력용 케이블 내에서 발생 가능한 다양한 결함을 모의하여야 한다. 이를 위해서 케이블의 외부반도전층, 내부반도전층, 가스층이 결핍된 시료 (보이드 발생용)를 제작하고 불순물 (천 결함, 동분)을 첨가한 시료를 제작하고, 시편에 전압을 인가하여 부분방전을 발생시켜 데이터를 취득한다.

다음 그림 4는 부분방전 측정회로의 일예이다. 정상시편을 포함한 총 6개의 시료를 5개의 기업에서 라운딩 테스트를 하여 측정 데이터의 신뢰도를 높였다. 그림 5는 부분방전 측정장치 및 시편 케이블 사진이다.

총 6개의 시료를 각각 라운딩 테스트를 실시하였

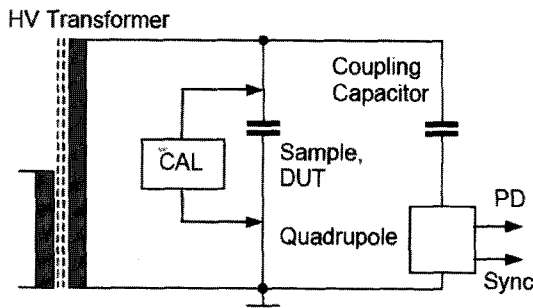


그림 4. 시험회로.

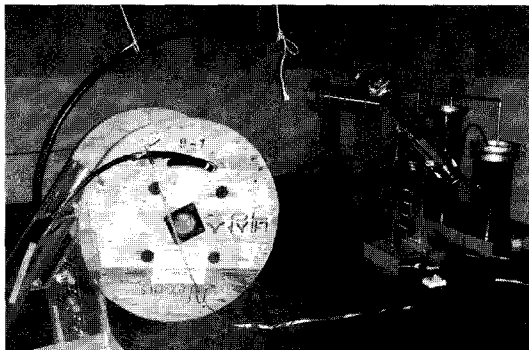


그림 5. 시험장치.

표 15. 결함에 따른 부분방전 분포.

결함종류	결함별 PD패턴
외부반도전층 결핍	Graph showing PD pulses corresponding to an external semi-conducting layer defect. The pulses are concentrated at the top of the voltage waveform.
내부반도전층 결핍	Graph showing PD pulses corresponding to an internal semi-conducting layer defect. The pulses are concentrated at the bottom of the voltage waveform.
metal particle	Graph showing PD pulses corresponding to a metal particle. The pulses are irregular and occur throughout the voltage cycle.
fiber	Graph showing PD pulses corresponding to a fiber defect. The pulses are sharp and occur at specific points in the voltage cycle.
가스층 결핍	Graph showing PD pulses corresponding to a gas layer defect. The pulses are dense and occur throughout the voltage cycle.

고, 이는 PD측정값과 분포가 시험환경에 따라 차이를 가질 수 있기 때문에 정확한 값을 비교하려는 의도이다. 전압 인가 시 Calibration한 후 5 kV 단위로 승압하였다. Calibration은 시료를 교체할 때마다 5 pC으로 하였다. 규격상 배전급 케이블의 경우 23 kV에서 5 pC 이하이면 사실상 PD 시험을 Pass한다. 그



렇기 때문에 최초 4회 시험까지는 시험전압을 23 kV 까지 승압하였고 결함에 따른 PD 패턴을 분석하기 위해서 마지막 시험에서는 23 kV 이상으로 승압하여 부분방전 값이 5 pC 이상일 때의 부분방전 패턴을 확인하였다. 다음의 표 15는 라운딩 테스트를 통해 측정된 PD 데이터를 위상과 방전횟수로 각각 표시한 것이다. 각 결함의 종류에 따라서 부분방전의 분포와 횟수가 차이가 있음을 알 수 있다. 이는 결함 종류에 따라서 보이드 방전이나, 코로나 방전 등 방전원을 각기 달리하기 때문이다.

4. 결론

국내의 전력기기는 현재 친환경적이며, 소형·경량화 및 높은 안정성의 고용량화를 요구받고 있다. 이런 시대적인 흐름은 지구 온난화의 환경규제와 설치장소의 제한 및 전력수요의 급증에 따른 현상이며, 이의 실현을 위해 전력산업에 종사하는 많은 연구자들이 노력을 하고 있다. 전력설비의 진단은 예전부터 연구의 진행이 이루어져 많은 논문과 연구결과가 발표되고 있지만, 확실한 대안을 제시해 주고 있지는 못한다. 운전 중에 전력설비를 진단하는 것은 외부의 환경에 영향을 받고, 육안으로 확인되지 않는 많은 결함들이 발견되기 때문이다. 사고가 많이 발생하는 설비중 하나인 전력용 케이블의 경우에는 현재 지하에 포설되는 경우가 많아 이런 상황이 더욱 심각하게 나타난다. 본 테마 기획에서는 전력용 케이블의 진단을 위한 연구를 목적으로 국내외의 케이블 사고현황과 절연열화 사고의 여러 가지 원인 중 전압스트레스에 의한 열화요인을 살펴보고 활선상태에서의 진단법과 국내에 실제 적용되는 진단법을 열거하였다. 마지막으로 케이블 절연열화의 한 파라미터인 다양한 결함들에서 발생하는 부분방전 신호를 검출하여, 분포특성을 파악해 결함의 원인과 종류를 판별하였다.

참고 문헌

- [1] 김보경외, "고압 및 특고압 전력케이블의 절연진단 및 유지보수 관리방법"
- [2] R. Bartnikas, "Partial Discharges, Their mechanism, Detection and Measurement", IEEE Trans. on EI, Vol. 9, No. 5, p. 763 - 778, 2002.
- [3] F. H. Kreuger, "Partial Discharge Detection in High-Voltage Equipment", Temple Press, p. 1-14, 1989.
- [4] 무로후시 다쓰야 (2007), "고압케이블의 활선 열화 진단장치/부분방전 검출장치"
- [5] 카시무라 히도시(2006), "케이블 수명과 보수 관리", 전기설비학회지
- [6] F. H. Kreuger, E. Gulski, and A. Krivda, "Classification of Partial Discharge", IEEE Trans. on EI, Vol. 28, No. 6, p. 917 - 922, 1993.
- [7] E. Gulski and F. H. Kreuger, "Computer-aided recognition of Discharge Sources", IEEE Trans. on EI, Vol. 27, No. 1, p. 82 - 97, 1992.
- [8] 이노우에 가즈야(2005), "고압케이블의 사고통계와 절연열화진단에 대해"
- [9] 오노즈카 키이치, 타니 마코토(2007), "Diagnosis of Aged-Deterioration Electric Insulation of Operating High Voltage CV Cables", 전기설비학회지
- [10] B. Fruth and L. Niemer, "The Importance of Statistical Characteristics of Partial Discharge Data", IEEE Trans. on EI, Vol. 27, No. 1, p. 60 - 65, 1992.

저|자|약|력



성 명 : 강성화

◆ 학 력

- 1997년
충북대학교 대학원 전기공학과
공학박사

◆ 경 력

- 1992년 생산기술연구원 연구원
- 1998년 MIT 고전압연구실 Visiting
Scientist
- 1993년 - 현재 충청대학 교수



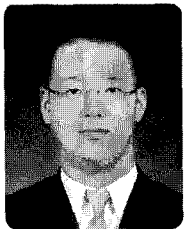
성 명 : 최한식

◆ 학 력

- 1997년
충북대학교 대학원 전기공학과
공학석사

◆ 경 력

- 1995년 국립공업기술원(현 기술표준원)
- 1998년 - 현재 중소기업청 시험연구지원팀 실장



성 명 : 윤재훈

◆ 학 력

- 2007년
충북대학교 공과대학 전기공학과
공학사
- 2009년
충북대학교 공과대학 전기공학과
공학석사
- 현재
충북대학교 대학원 전기공학과
박사과정

