

# 고압 및 특고압 전력케이블의 절연진단 및 유지보수 관리방법 ③

김보경 / 메가파워테크 대표  
목영수 / 한국전력공사 중부지점 지중배전부 과장  
이관우 / 호원대학교 교수  
박대희 / 원광대학교 교수



## 목 차

1. 서론
2. 전력케이블의 사고분석, 열화원인 및 절연진단  
현상
  - 2.1. 지중전력케이블의 사고현황 및 실태
  - 2.2. 전력케이블의 절연열화요인 및 열화  
PROCESS
  - 2.3. 전력케이블의 절연진단현상, 문제점 및 대책
3. 정전상태에서의 전력케이블 절연진단법 상세
4. 활선상태에서의 전력케이블 절연진단법 상세
5. 국내에서의 활선절연진단법 동향 및 적용사례
6. 전력케이블 유지보수방법
7. 맺은 말

### (4) 내전압시험법의 동향

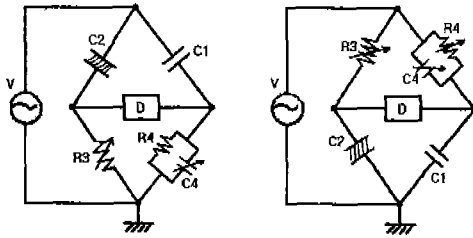
상용주파에 의한 내전압시험은 수트리 열화정도와 잔존파괴성능의 관계 및 수트리 진전속도 등이 아직 명확해지지 않았지만, 전력케이블의 열화진단에 유용할 것으로 생각되며, 케이블 길이가 긴 경우에는 전원용량 때문에 시험설비가 대형화되어지는 문제가 있다. 최근에는 교류내전압시험과 동등한 능력을 갖고 건전케이블에 미치는 영향이 작고 시험설비가 작아질 수 있는 이점을 가진 감쇠진동파법, 초저주파법 등이 검토되고 있다.

### 3-4. 유전정접법(Tan $\delta$ 측정)

#### (1) 측정원리

CV케이블의 유전정접은  $Tan\delta = 1/\omega CR$ 로 표현되므로, 수트리열화 등에 의한 절연저항 R의 감소가 Tan $\delta$ 의 증가로 관측될 수 있다.

Tan $\delta$ 측정하는 2개의 기본회로를 그림10에 표시하고, 특징을 표21에 정리하였다.



(1) 차폐브리지 회로 (2) 역 차폐브리지 회로  
 C2: 측정CABLE C1: 표준콘덴서  
 R3, R4, C4: 브리지 구성소자  
 V: 전원 D: 필름검류정지

그림 10. Tanδ측정의 기본회로

표21. Tanδ측정 기본회로의 특징

No	항목	쉐링브리지회로	역쉐링브리지회로
1	측정대상케이블의 저전압측 접지 취급	접지를 분리해야 한다.	접지된 상태에서 측정가능
2	Tanδ측정시의 조정소자 전압	저전압이다.	고전압(시험전압)이다.

(2) 측정결과의 판정기준

시험전압 및 판정기준은 각 메이커와 USER에 따라 다르지만, 일례를 표22에 정리하였다.

표22. CV케이블의 Tanδ측정의 시험전압 및 판정기준

케이블 전압	시험전압	판정기준
3.3kV	1.0kV, 1.9kV	양호 : 0.2%이하
6.6kV	1.9kV, 3.8kV	주의 : 0.2~5.0%
22kV	3.0kV, 5.0kV	불량 : 5.0%초과

(3) 유전정점법에 대한 검토

- ① Tanδ의 실측치 : Tanδ의 실측치의 증가는 흡수, 수트리 진전에 따른 절연체 자체에서의 Tanδ 증가와 쉬스침수에 수반하는 차폐동 테이프의 부식 및 외부반도전층의 저항 증가에 의한 Tanδ증가의 복합치로 표현되므로, 주의가 필요하다.
- ② 케이블 길이의 영향 : Tanδ는 케이블의 열

화가 평균화되어 표현되므로, 국부적인 열화가 발생하여도 케이블 길이가 길게 되면 Tanδ는 작은 값으로 된다.

따라서, 판정기준의 결정에는 주의가 필요하고, 케이블 길이에 대한 보정도 제안되고 있다.

- ③ 외부전자계에 의한 유도 영향을 받아 오차가 크다는 문제점이 있다. 케이블 길이가 작을 때는 큰 문제가 없지만, 실제 포설현장의 케이블은 길게 포설되어 있으므로 어느 부분에서 외부자계가 쇄교하게 되면 유도전류가 측정회로에 유입되어 오차가 크게 발생하며 이 영향을 제거하는 것이 쉽지 않다.

- ④ 전원장치가 대규모라는 점도 문제이다. 상기 사항을 종합 분석해보면 전력기기의 열화를 검출하는 데에 있어 매우 중요한 요인으로 판단되어, 측정대상이 한 장소에 집중 설치되어 있는 전력기기 또는 실험실적인 케이블 열화를 진단하는 데에 적용가능하지만, 길게 포설되어 있는 케이블에서 열화를 검출하는 데에는 문제가 많아 실제 케이블 절연진단에는 적용상 한계가 많아 전력케이블 절연진단에는 실효성이 없다고 볼 수 있다.

3-5. 전위감쇄법(직류전압감쇄법)

(1) 측정원리

전위감쇄법과 직류전압감쇄법의 측정원리는 동일하므로 먼저 전위감쇄법에 대해 설명한 후 직류전압감쇄법에 대해 간략하게 설명한다. 전위감쇄법의 측정원리는 그림11와 같이 측정대상 케이블의 도체에 직류전압(규정인가전압)을 인가하여 고압SW를 off한(직류인가전압개방) 후, 그림12 전압계에 측정되는 판정전압까지 소요되는 시간특성을 측정하는 것이다.

한편, 직류전압감쇄법은 일정시간 동안 규정한 직류전압(일례 : 10kV)을 측정대상 케이블의 도체에 인가하고, 고압SW를 off하여 정해진 시간(일례: 5분)이 경과한 후의 전압계에 측정되

는 전압을 측정하는 것이다. 그리고 전위감쇄법은 일본에서 1980년대 초에 개발된 것이고, 직류전압감쇄법은 국내의 한전에서 1980년대 말에 개량된 것이라 볼 수 있다.

(2) 측정결과 판정방법

시험전압 및 판정기준은 표23에 전위감쇄법을, 표24에 직류전압감쇄법을 정리하였다.

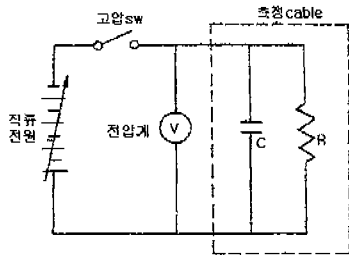


그림11. 전위감쇄법 측정원리

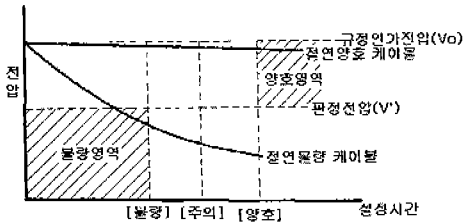


그림12. 전위감쇄법의 측정량 관계

표23. 전위감쇄법에 의한 판정기준 예

전압	인가전압	판정전압	케이블종류	판정설정시간(s)		
				양호	주의	불량
3.3kV	3.0kV	2.5kV	CV cable	186	140	93
			BN cable	64	48	32
6.6kV	5.0kV	3.0kV	CV cable	520	390	260
			BN cable	180	135	90

표24. 직류전압감쇄법에 의한 판정기준 예

케이블 종류	케이블 규격	판정기준		
		양호	주의	불량
22.9kV CN-CV	60sq	6.2kV이상	0.9~6.2kV	0.9kV이하
	200sq	7.3kV이상	2.1~7.3kV	2.1kV이하
	325sq	7.7kV이상	2.7~7.7kV	2.7kV이하

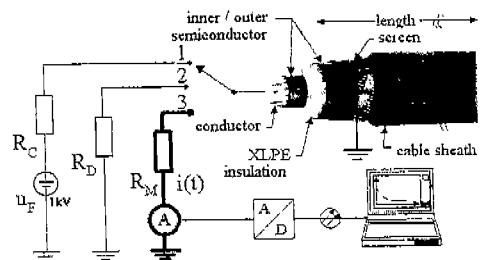
(3) 전위감쇄법(직류전압감쇄법)에 대한 검토

- ① 직류전압을 사용하기 때문에 측정장치가 소형이라는 점과 측정시에 외부잡음의 영향을 잘 받지 않는다는 잇점이 있다.
- ② 단말부의 오손과 측정시의 습도 영향을 받기 쉽다는 측정상의 단점이 있다.
- ③ 보다 중요한 문제점은 상기에서 설명한 유전 정접법(Tanδ)법과 같이 측정원리상 국부열화를 검출하기 어렵기 때문에 국부열화된 케이블을 양호한 것으로 오판정할 가능성이 있다 점에 유의해야 한다.

3-6. 등온완화전류법

(1) 측정원리

이 방법은 1990년말에 유럽에서 개발된 방법으로 절연체의 방전특성변화를 이용하여 케이블의 중합 절연체 상태를 판정하는 것으로 중합성체 구조중의 특성에너지수준에서 전하의 흐름이 트랩(trap)된다는 사실을 이용한 것으로 그림13의 측정회로에서 케이블 도체에 직류전압(1kV)을 일정시간(30분) 인가한 후 전원을 분리하여 단시간(5초)동안 접지로 연결하여 용량성분을 제거한 후에 완화전류를 측정하여 Aging Factor(열화계수)를 계산하여 케이블 열화상태를 판정한다.



- 1: dc Poling  $t_p = 1800\text{ s}$
- 2: Discharging  $t_D = 5\text{ s}$
- 3: Measurement  $t_M = 1800\text{ s}$

그림13. 등온완화전류법의 측정회로

이 등온완화전류법(Isothermal Relaxation Current Analysis, IRC)을 이용한 장비로 KDA-1이 현재 국내에서 일부 현장 적용중에 있다.

(2) 측정결과와 판정기준

시험전압 및 판정기준의 일례를 표25에 정리하였고, 주의로 판정된 경우는 5년 이내 재진단, 불량인 경우는 불량부위 수리 또는 교체를, 판정이 보류된 것은 1년 이내 재진단을 권장하고 있다.

표25. 등온완화전류법의 판정기준 및 시험전압

	양호	주의	불량	시험전압
Aging Factor (열화계수)	1.85미만	1.85~2.3 (1.85~2.6)	2.3초과 (2.6초과)	DC1kV

(주) ( )안의 수치는 한전의 판정기준임.

(3) 등온완화전류법에 대한 검토

- ① 다른 직류를 이용한 측정법에 비해 낮은 직류 전압 (1kV)를 사용하고 있다.
- ② 1도체절연 측정당 1시간이상 장시간이 소요되고 있고, 또한 현재 3상일괄로 측정되지 못해 3상을 측정하기 위해서는 최소한 3시간이 소요된다.
- ③ 수트리 등이 발생하지 않는 열화는 검출이 힘들고, 신규 포설 케이블의 경우 케이블 내에 포함되어 있는 첨가물 등의 저분자량 물질이 deep trap으로 작용하여 전선케이블을 불량케이블로 오판정할 가능성이 있다는 지적이 있다.
- ④ 상기의 전위감쇄법(직류전압감쇄법 포함)과 같이 전구간의 평균열화를 검출하는 것으로 국부열화를 검출할 수 없다는 문제점이 있어, 길이에 따른 국부 열화 케이블이 전선케이블로 오판정 가능성이 있다.
- ⑤ 외부환경 요인(접지 노이즈, 진동, 바람 등)을 받기 쉬워, 판정보류(판정불가) 진단되는 경우가 많다는 보고도 있다.

중인 전위감쇄법(직류전압 감쇄법)과 등온완화전류법에 대해 검토하였다. 지금부터는 개발중인 여러 진단법에 대해 간략하게 설명하고자 한다.

(1) 잔류전압법(회복전압법)

수트리열화된 CV케이블에 전압인가 후, 도체를 접지하고 다시 개방하면 시간경과에 따라 어느 정도의 전압이 도체에 회복된다. 이 절연체 내에 공간전하 또는 주입전하에 의해 발생하는 시간적인 지연특성을 갖는 전압을 잔류전압 또는 회복전압이라 부르며 CV케이블의 수트리 열화진단에 이용한다.

잔류전압의 측정은 그림14에 표시하였고, 일반적인 측정순서는

- ① 케이블에 직류전압을 인가한다.  
(1kV/mm x 절연두께mm를 10분간)
  - ② 도체를 일단 저항 접지한다(10초간)
  - ③ 접지를 해체하여 도체로 회복하여 가는 전압을 측정한다.(수분~수십분)이다.
- 측정에는 고입력 임피던스( $10^{15}\Omega$ 이상)의 측정기를 사용한다.

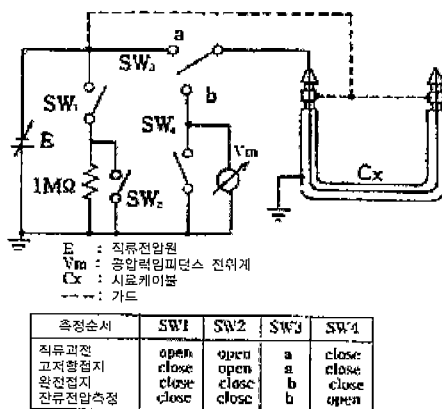


그림14. 잔류전압의 측정회로와 순서

그러나, 22kV CV케이블에서 교류과과 데이터와 비교해서 반드시 명료한 상관관을 얻을 수 없는 경우도 있고, 잔류전압에 의한 열화판정기준이 제안되어있는 것은 없지만, 이 방법의 이점은 측

정기가 소형이다라는 것과 측정치가 수V~수십 V로 비교적 커서 내 노이즈성에 유리한 점이 있다. 한편, 단말오손과 흡수의 영향, 측정시의 케이블 온도에 영향을 받는다는 등의 문제가 있어 주의가 필요하다는 지적이 있다.

(2) 역흡수전류법

역흡수전류의 발생원리는 잔류전압법과 거의 동일하다.

전자는 완화가 늦은 분극전하성분을 도체개방시의 유기 전압으로 하여 고임피던스측정기에 의해 검출하는 것에 대하여, 본 방법에서는 도체 단락시의 전류로서 저임피던스측정에서 검출한다. 측정회로를 그림15에 표시한다.

측정순서는 잔류전압측정과 거의 동일하다.

3.3/6.6kV CV케이블용으로서, 직류 100V/5분간 인가한 후에 2초간 접지하여, 그 후 28초간에 흐르는 전류를 적분하여 전하량Q의 자동측정을 하는 장치의 개발예가 있다.

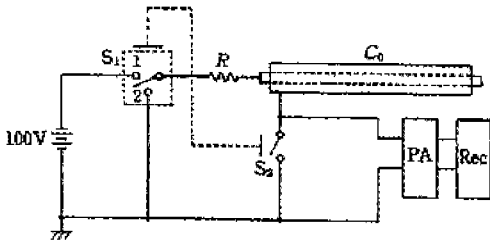


그림15. 역흡수전류의 측정방법

본 방법의 이점도 경량 소형 측정기를 제작하는 것이지만, 접지상태에 있는 케이블에서 nA정도의 전류를 측정할 필요가 있기 때문에 노이즈와 유도의 영향을 받기 쉽고, 단말오손의 영향을 받을 수 있다는 문제점이 지적되고 있다.

(3) 부분방전법

부분방전측정은 초고압CV케이블의 결함검출기술으로서 근래 특히 많이 사용되고 있다. 그러나, 수트리에서 발생하는 부분방전은 절연파괴의 최종단계인 전기 트리의 발생·진전에 기인

하기 때문에 부분방전측정을 전력케이블열화진단에 이용하는 의의는 없으며, 적용에도 없고, 단말접속재의 열화진단에 일부 사용되고 있는 것이 현재 상태이므로, 여기서는 자세한 설명은 하지않기로 한다.

(4) 잔류전하법

케이블에 직류를 인가하고, 일단접지한 후에 교류전압을 인가하여, 교류전압에 중첩되어 유출하는 과도직류전류(잔류전하)를 검출하는 것이다. 수트리열화케이블의 열화상태와 잔류전하량이 있다는 것이 알려져 있기 때문에 검출한 전하량을 사용하여 열화진단한다.

잔류전하측정회로는 그림16, 그림17가 사용되고 있고, 그림16에서는 접지회로에 흐르는 직류 전류성분 $I_d(t)$ 를 측정하여 그 시간적분으로부터 잔류전하를 구하는 방법이다.

잔류전하는  $Q(t) = \int I_d(t)dt$  이다.

열화가 진행되어 파괴강도가 떨어질수록 잔류전하량값이 크게된다. 그림17에서는 측정대상 케이블 시료Cx의 잔류전압에 상당하는 콘덴서의 전극간 직류전압성분 $V_s(t)$ 를 측정하여 정전용량과  $V_s(t)$ 의 적산으로 잔류전하를 구하는 방법이다.

잔류전하량은  $Q(t) = (C_s + C_{s1} + C_{s2}) \cdot V_s(t) = (C_{s1} + C_{s2}) \cdot V_s(t)$  이다.

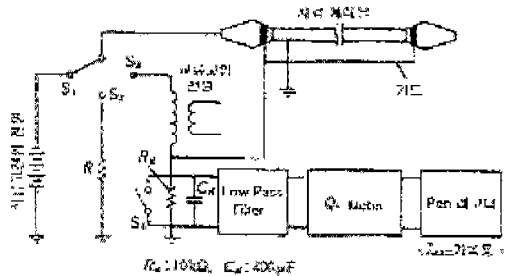


그림16. 잔류전하측정회로 (1)

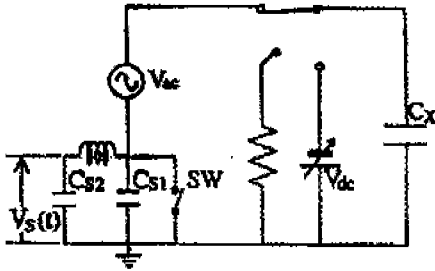


그림17. 전류손실측정회로 (2)

이 방법은 국부열화 검출의 정확도가 높고, 측정치가 크므로 측정하기 쉽고 외피 절연상태에 영향 받지 않고 직류누설전류법과 병용 사용가능하다는 장점이 있지만, 직류전원과 교류전원이 필요하고 교류전원은 큰 전원용량을 필요로 하고 포설환경 및 수분함유량에 대한 고려가 필요하다는 문제점이 지적되고 있다.

(5) 교류손실전류법

교류손실전류법은 교류인가시에 케이블 절연체에 흐르는 전류중 손실전류 성분을 측정하여 손실전류에 포함되어 있는 고조파(특히 제3고조파)를 절연진단에 이용하는 것이다. 고조파 전류의 발생원리는 수트리의 전류 전압특성이 비직선적이라는 것에 기인하며 원리적으로 비관통 수트리 검출도 가능하고, 정전상태에서의 CV케이블 열화진단법이지만 장래에서는 활선상태에서도 열화진단이 가능할 것으로 생각된다.

측정회로는 여러 가지가 있지만 그림18에 대표적 측정회로를 나타냈다.

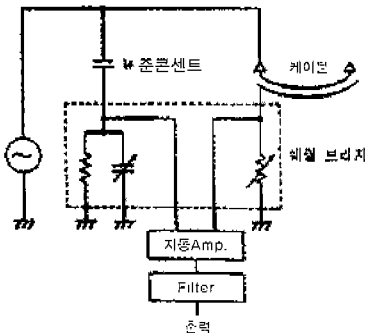


그림18. 교류손실전류 측정회로 예

아직 측정 실례가 적고 열화판정기준이 정립되어 있지 않는 등이 현재의 상태이다.

다음호에 계속됩니다

2004 국제 전력전자 및 전기설비전시회 일정

1. 명칭
  - 국제전력전자 및 전기설비전시회 (ELECTRIC KOREA)
  - International Power Electronic & Electric System Exhibition
2. 주최
  - 한국전력기술협회
3. 주관
  - K.Fairs (주)/ (주)서울메세인터내셔널 / 나노커뮤니케이션
4. 후원
  - 산업자원부/에너지관리공단/한국전기안전공사/대한전기학회/대한전기협회/전기전자재료학회/전력전자학회/한국전선공업협동조합/한국조명·전기설비학회/한국전기연구원
5. 개최 목적
  - 전력산업 및 전기기술의 발전을 도모
  - 전력전자 및 전기설비 기자재의 국제경쟁력을 증진
6. 개최 기간
  - 2004. 4. 20(화) ~ 4. 22(목)/3일간
7. 개최장소
  - COEX (한국종합전시장 인도양홀)
8. 개최규모
  - 120개업체, 380부스
9. 전시회 행사 내용
  - 전력전자 및 전기설비 기자재 전시
  - 기술세미나(학술대회) 개최
10. 전시품목
  - 전력전자·전력품질 및 네트워크 시스템
  - 전기설비 및 관련기자재
11. 참가신청
  - 신청기간 : 2004. 3. 10 (부스 소진시 조기마감)
  - 신청방법 : 참가신청서(전시회안내 홈페이지에서 다운로드)를 작성하여 사업자등록증사본과 함께 송부
  - 기타 전시회 관련 사항은 전시회안내 홈페이지 ([www.electrickorea.org](http://www.electrickorea.org))참고 및 협회(02-875-4474), K.Fairs(02-555-7153), (주)서울메세인터내셔널(02-6000-1513), 나노커뮤니케이션(02-841-0017)로 문의하시기 바랍니다.