



고압 및 특고압 전력케이블의 절연진단 및 유지보수 관리방법 ②

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 절연열화원인 및 열화
PROCESS
 - 2.3. 전력케이블의 절연진단 현상, 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

3. 정전상태에서의 전력케이블 절연진단법 상세

정전상태에서 전력케이블의 절연상태를 진단하는 각종 절연진단법을 정리하면 다음 표15와 같다.

표15. 전력케이블의 정전 절연진단법 종류

직류법	절연저항측정법, 직류누설전류법, 전위감쇄법, 내전압시험법, 회복전압법, 역흡수전류법, 잔류전압법, 과도직류전류법, 등온완화전류법
교류법 (상용주파법)	유전정접법, 정전용량측정법, 내전압시험법, 교류손실전류법
초저주파법	유전정접법, 부분방전법, 정전용량측정법
준삼각파법	부분방전법
교직중첩법	유전정접법, 부분방전법, 직류분시험법

다음에 상기 표15의 각종 절연진단법중 주요 방법에 관해서 상세하게 기술하고자 한다.

3.1 절연저항측정법

(1) 측정원리

절연저항계는 일반적으로 [메가]로 불리워지고 있고 전지식과 회전식이 있다. 케이블에 직류전

압을 인가하여 누설전류를 측정하는 것으로, 그림 5와 같이 충전전류가 순간적으로 흐르지만, 다음에 흡수전류는 감소하여 누설 전류만 잔존한다. 이 때문에 절연저항 측정은 일반적으로 직류전압인가로부터 1분 경과후의 값을 계측한다. 케이블의 등가회로는 그림 6와 같이된다.

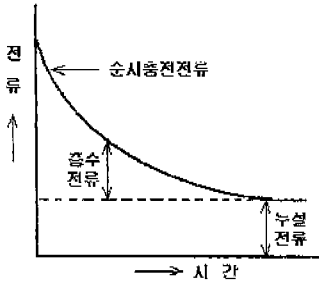


그림5 직류충전특성

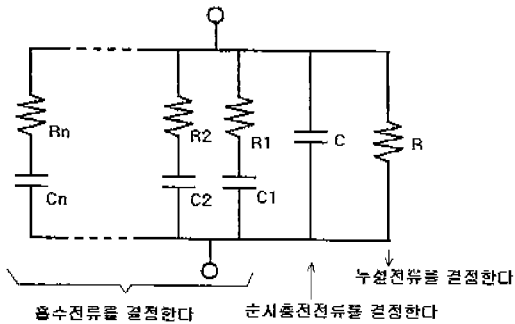


그림6. 케이블의 등가회로

주요 메가의 종류는 다음 표와 같으며, 최근에는 5,000V,10,000V 및 전압조정이 가능한 초절연 저항계가 많이 시판되고 있다.

표16. 주요 메가 종류

정격전압(V)	유호측정범위(MΩ)	종양누금(MΩ)*
100	0.02~20	0.5
200	0.05~50	1
500	0.1~100	2
500	1~1,000	20
1,000	2~2,000	50
2,000	5~5,000	100

(2) 측정회로 및 측정결과

절연저항계에서의 절연저항시험은 그림 7과 같이 각 도체와 차폐층간의 절연저항을 심선별로 측정한다.

고전압을 인가하는 경우, 표면의 누설전류의 흐르는 부분에 전선을 감아, 보호단자G에 접속하면 표면의 누설전류는 지시계에 흐르지 않기 때문에, 절연체의 저항치만을 측정할 수 있다.

또, 시험전압은 케이블의 정격전압을 넘지 않게 인가하는 것이 바람직하다.

절연저항계는 시험시의 환경, 특히 습도의 영향을 받기 쉬우므로, 측정시의 날씨, 온도, 습도를 기록하여 평가때, 참고로 한다.

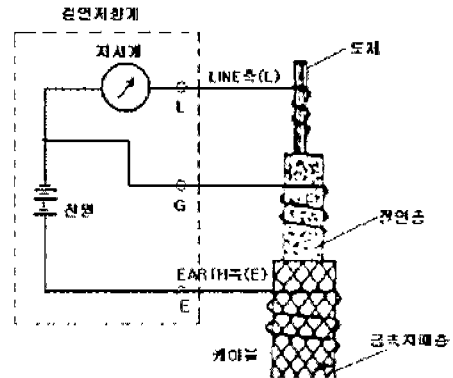


그림 7. 고압케이블의 절연저항 측정방법

(3) 판정기준

절연저항계에서의 열화판정기준을 정확히 정하는 것은 현재에서는 어렵고, 한개의 참고치로서의 판정기준을 표17에 표시하였다. 이 예에서는 측정전압 2,000V이상에서는 누설전류환산 1uA 이하를 양호의 판정기준으로 하고 있다.

측정치는 환경과 케이블의 구조, SIZE 등에 따라 변화하므로, 정기적으로 측정하여 장기적인 변화경향으로부터 절연의 상태를 판단하는 것이 바람직하다.





표17. 고압케이블(CV)절연저항의 판정기준치 예

측정전압(V)	절연저항치(Mohm)	판정
1,000 2,000	2,000이상 500이상~2,000미만 500미만	양호 요주의 불량
5,000	5,000이상 500이상~5,000미만 500미만	양호 요주의 불량
10,000	10,000이상 1,000이상~10,000미만 1,000미만	양호 요주의 불량

(4) 절연저항측정법의 특징 및 문제점

- ① 이점으로서, 절연저항계는 소형경량으로 어떤 장소에서도 간단히 취급할 수 있고, 또 조작도 간단하여, 종래부터 많이 사용되고 있다는 것을 들 수 있다.
- ② 문제점으로서 열화진행이 매우 작은 열화를 측정할 수 없고, 측정외부환경의 영향 등으로 측정결과 오차가 커서, 일반적으로 참고치로 사용하는 경우가 많아지고 있다.

(5) 절연저항측정법에 대한 검토

다음과 같은 사항이 있다는 것에 유념해야 한다.

- ① 측정시료에 인가하는 전압치가 일정치 않은 것으로 500V메가, 1,000V메가 등이 일컬어지고 있지만, 이것이 측정대상에 인가되는 전압치를 말하는 것은 아니다. 메가는 큰 내부저항(표준저항)을 가진 발전기이다. 발생전압은 1,000V라고 해도 측정대상에 걸리는 전압은 절연저항치에 따라 0V~1,000V까지 변화한다.(제조사는 특수회로의 채용으로 표16의 중앙눈금의 저항치에서는 전압이 90%가 걸린다고 하고 있지만, 그것보다 낮은 저항에서는 역시 0V까지 저하한다.) 즉, 메가에 의한 절연저항측정은 고정된 전압인가상태에서 값이 얻어지고 있는 것이 아니고 변화하는 전압에 의한 측정치가 얻어지고 있다. 일반적으로 절연체의 절연저항은 인가전압에 비례해서 누설전류가 비례하는 것으로 알고

있으나, 인가전압을 증가시켜도 누설전류가 변화하지 않을때도 있고, 인가전압을 증가시키면 누설전류가 급격히 증가하다가 절연과괴가 일어나는 것도 있다.

- ② 인가전압극성은 MINUS뿐이다. 인가전압극성은 MINUS만을 얻을 수 있고, PLUS극성은 접지되어 있다. 측정대상이 CABLE이라면 도체에는 MINUS극성밖에 인가할 수 없다.
- ③ 정전용량이 크면 충전에 시간이 걸린다. 최근의 전자적인 메가는 특히 측정대상의 정전용량이 크면 충전에 시간이 꽤 많이 걸린다. 따라서, 고압이상의 케이블 절연진단에 있어서, 메가는 사용면에서는 간편·안전하고, 다른 절연열화진단법을 적용한 경우에 적용전후의 측정대상의 성능변화의 유무를 체크하는 데에 적당한 측정계기라 할 수 있다.

3-2. 직류누설전류법

(1) 측정원리

CV케이블에 직류전압을 인가하여, 흡수전류 및 누설 전류를 측정하여, 그 절대치, 전류-시간 특성, 특이점 유무에 따라 CV케이블의 열화의 상태를 판정하는 방법이다. 그림8에 대표적인 직류누설전류 측정회로 예를 표시하였다. 그림9에 누설전류의 시간특성 예를 표시한 것으로, 누설전류치가 크고, 전류가 측정시간에 따라 함께 증가하는 경우에는 케이블의 열화가능성이 높다.

(2) 측정결과의 판정방법과 판정기준

고압 및 특고압 CV케이블에서는 일반적으로 표18의 측정조건으로 누설전류를 기록하여, 다음의 항목으로 판정한다.

표18. 직류누설전류법의 시험전압 예

정격전압	측정전압		측정시간	비고 직류내전압(kV)
	제 1Step	제 2Step		
3.3kV	5	8	5~7분	3.45×1.5×2=10.3
6.6kV	10	16	5~7분	6.9×1.5×2=20.7
11kV	15	25	5~7분	11.5×1.25×2=28.7
22kV	30	50	5~7분	23×1.25×2=57.5

- ① 누설전류(μA) : 전압인가시간의 최종전류치
- ② 절연저항(Mohm) = 인가전압(V) / 누설전류(μA)
- ③ 성극비 = 전압인가 1분후의 전류치 / 전압인가후 규정시간의 전류치
- ④ 불평형율 = (각상누설전류의 최대치 - 최소치) / 3상 누설전류의 평균치
- ⑤ 약점비 = 제1 STEP전압의 절연저항 / 제2 STEP전압의 절연저항
- ⑥ 키크현상유무

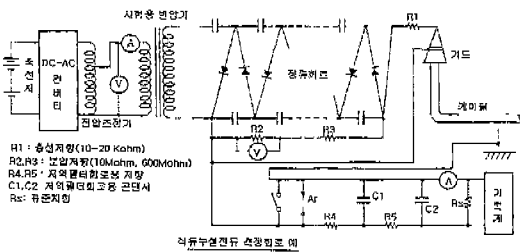
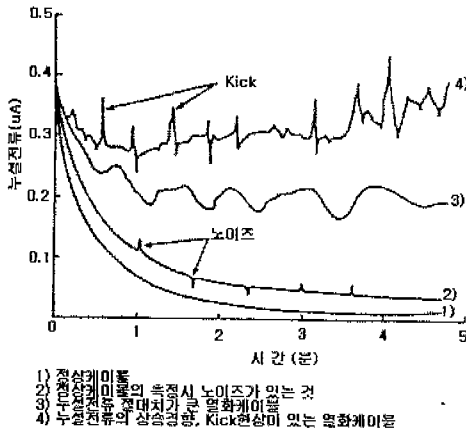


그림 8 직류누설전류 측정회로



누설전류의 시간특성 예

그림9. 직류누설전류의 시간특성 예

판정기준은 각 회사와 사용자에 따라 다르겠지만, 일례를 표19, 표20에 표시한다.

표19. 일본의 6kV CV케이블 판정기준 예

	관서전력	중부전력	신일본제철
인가전압	2-4-6-8-10kV으로 step상승하고, 10kV 10분 측정	10kV, 3분후 16kV 7분 측정	6, 10kV에서 10분 측정
누설전류	양호: 0.1 μA 이하 요주의: 0.1~1.0 μA 불량: 1.0 μA 초과	양호: 0.3 μA 이하 요주의: 0.3~5.0 μA 불량: 5.0 μA 초과	양호: 0.1 μA 이하 요주의: 0.1~1.0 μA 불량: 1.0 μA 초과
성극비	불량·심승경향	양호: 1.0초과 요주의: 1.0미만	양호: 1.0초과 요주의: 1.0미만
불평형율	-	-	양호: 200%미만 요주의: 200%초과
키크현상	불량: 있음	요주의: 있음	요주의: 있음
약점비	-	-	양호: 2.0미만 요주의: 2.0초과

(주) 선로길이가 1,000m이상의 경우는 Km환산한 값을 사용하는 경우도 있다.

표20. 국내의 22kV CV케이블 판정기준 예

	양호	요주의	불량	비고
누설전류	10 $\mu A/km$ 이하	11~50 $\mu A/km$	51 $\mu A/km$ 이상	22.9kV CN-CV 케이블, 한전 기준 인가전압 : DC30kV
성극비			1미만	
불평형율			200%이상	
키크현상			있음	

(3) 직류누설전류법에 대한 검토

① 1차 전원이 매우 안정된 전원을 사용하여야 된다.

여기서 1차전원이라함은 측정장치에 공급되는 전원을 말하며, 이 전원이 안정되지 않으면 케이블 도체로 공급되는 측정인가고전압이 변동하게 된다.

측정인가 직류고전압이 변동되면 키크현상, 성극비의 이상유무를 파악하는 것이 불가능하게 된다.

그리고, 뒤에 기술하는 내전압시험에 사용되는 장비도 일반적으로 국내에서 사용되는 장비의 1차 전원은 일반적으로 AC110, 220V를 사용하고 있고, 매우 정밀한 정전압장치가 내장되어 있지 않으므로 케이블



도체로 공급인가되는 직류고전압도 장비의 1차 전원의 변동에 의해 불안정하다는 사항에 유의해야 한다.

- ② 누설전류의 변동을 알 수 있는 기록계 부착이 필요하다.

보다 확실한 킭현상과 성극비의 이상유무를 파악하기 위해서는 누설전류의 흐름을 파악할 수 있는 기록계에 의한 감시가 필요하다.

- ③ 출력전압계가 부착되는 것이 필수이다.

인가전압은 조정가변이지만 측정대상의 절연저항의 크기에 따라 같은 조정위치에서 전압이 다를 수 있다.

- ④ 낮은 전압부터 step별로 전압인가가 필요하다.

열화된 cable에 처음부터 큰 전압(내압시험에 해당하는 전압)을 인가하면, 절연의 비회복성으로 더 절연을 저하시키거나 절연파괴사고를 일으킬 우려가 있다. 따라서 처음부터 규정된 측정전압을 인가하지 않고 규정 전압의 1/2 또는 1/3정도의 전압을 먼저 측정하여 시간적으로 누설전류가 증가하지 않고, 안정한 상태에 있고 불량현상이 나오지 않으면 다음 step전압으로 이동하여 측정하는 것이 바람직하다.

- ⑤ 누설전류에 못지않게 킭현상, 약점비, 성극비의 data가 중요하며, 누설전류절대치가 매우 낮은 영역 즉, 절연이 매우 높은 영역에서는 성극비와 약점비가 불량으로 측정될 가능성이 있는데, 이것은 측정기의 최소분해능 때문에 발생할 수 있으므로, 이 사항도 고려하여 성극비와 약점비를 판단하여야 한다.

- ⑥ 킭현상 유무를 판단시는 노이즈나 잡음 침입유무를 검토하는 것이 바람직하다.

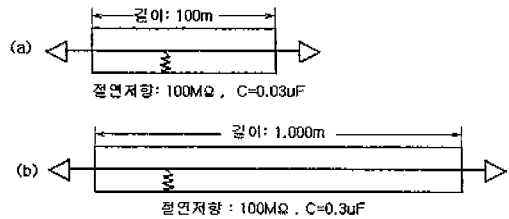
고압이상의 전력케이블의 누설전류를 측정 시에는 누설전류가 미세하기 때문에 접지전위의 변동이나 주변의 전자파에 의해서도 누설전류가 현탕할 수 있으므로, 직류누설전류측정시에는 다른 장소에서의 작업이나 기기의 운전에 의한 영향을 배제 할 수 있도록

조치가 필요하며, 특히 전철이나 철로 주변에 있어서는 전철이나 기차의 운행에 의한 접지전위 변동영향을 배제하여야 한다.

- ⑦ 접속재의 오염으로 인한 누설전류의 증가 또는 변동을 고려하여야 한다.

따라서 직류누설전류측정전에 접속재의 표면을청소할 필요가 있다.

- ⑧ 누설전류치는 전력회사와 같은 장거리 구간이나 전체적으로 열화가 진행되는 케이블(대략20년 이상 사용)에서는 km당 환산한 누설전류치로 판정될 수 있으나, 1km이하의 케이블이나 십수년이하 사용된 케이블에서는 누설전류 절대치로 판정하는 것이 바람직한 것으로 생각된다. 주된 이유는 케이블의 열화는 전체적으로 열화가 발생 진행되는 것보다는 국부적으로 열화가 진행되는 것이 대부분이기 때문이다.



위 그림은 케이블길이는 다르지만 100MΩ이라는 동일한 국부열화가 생겼다고 가정한 경우에 있어, 직류누설전류범으로 1kV전압을 인가하였을 때, (a) 케이블이나 (b)케이블 모두 10uA누설전류가 측정될 것이다. 이것을 km당 환산하게 되면(a) 케이블은 100uA/km,(b)케이블은 10uA/km이다.

따라서 열화정도가 동일 케이블이 누설전류를 km당으로 환산하면 길이차이 배수만큼 길이가 짧은 케이블이 더 열화된 것으로 판단할 수 있는 오류가 발생하지만, 누설전류 절대치로 판단하면 동일한 열화가 발생한 것으로 판단할 수 있다는 것에 유의해야 한다.

3-3. 직류내전압시험

케이블 절연체에 규정의 직류고전압을 일정시간

인가하여 그때의 절연파괴의 유무를 조사하여 절연상태의 양부를 판정하는 시험이다. 본래는 전선로의 준공검사로써 실시되고 있다. 따라서 엄밀하게는 절연열화진단 하기 위한 시험이 아니고, 케이블의 절연성능을 기본적으로 보증하기 위한 목적으로 실시되고 있다.

이 시험은 작업이 비교적 간단하고 단시간에 결과를 얻을 수 있다는 장점이 있지만, 측정대상케이블이 열화 정도가 심한 경우 케이블을 파괴시킬 위험성이 있기 때문에 비파괴시험이어야 한다는 열화진단시험의 본래 목적에는 맞지 않다.

(1) 측정원리 및 회로

직류누설전류법과 유사하지만 장치에 공급되는 1차 전원전압의 변동이 매우 적어야 할 필요는 없다.

그리고, 인가전압은 표18의 내전압으로 10분간 인가하고 있다.

(2) 시험결과의 검토

직류내전압시험의 결과로 절연체의 열화의 정도를 아는 것은 일반적으로 곤란하다. 그러나 시험 후의 케이블은 적어도 어느 일정기간 성능을 보증할 수 있고, 운전중의 절연파괴사고를 어느 정도 예방하는 것이 가능하다.

(3) 직류내전압시험법에 대한 검토

① 이 방법의 발상 루트를 살펴보면 2가지가 있다.

첫째는 약자를 버리는 발상에 의한 것이고, 둘째는 단순히 신폴케이블에 요구되는 내압 시험으로 몇년 사용한 케이블이어도 시험내전압에 견디어야 한다는 것에 기초를 둔 것이다.

전자에서는 인가 내전압을 어느 정도로 설정하는 것이 타당한가하는 의문이 끊임없이 따라 다닌다. 이것에 대한 해답을 얻는 것은 지극히 곤란하다. 약자를 버리는 발상을 깊게 파고 들어가 보면 다음과 같이 된다. 어떤 시험전압치(교류 혹은 직류)를 설정하여 그 전압을 사용중인 케이블에 주기적으로 인가·시험하여 이때 파괴되는 케이블은 향후 안심하고 사용할 수 없기 때문에 사용중

에 파괴되어 매우 당황하는 것보다도 정전시켜 시험중에 파괴되기 때문에 피해도 작을 것이라는 것이다.

후자의 발상은 전자의 시험전압치로서 새로운 케이블 포설준공시에 전기설비기준으로 규정하고 있는 내압시험치를 적용하고 있다는 것에 틀림없다.

기술기준에서는 표18의 내전압치(10분인가)가 규정되어 있다.

이상 2가지의 발상에 기초하여 내압시험법에 의한 열화감시는 어느것도 파괴시험 형태를 가지고 있어 비파괴시험 영역을 벗어났기 때문에 열화진단의 목적에서 벗어난 것이다.

② 다음에는 국내에서 일반적으로 직류 내전압 시험장비로 비파괴 절연진단을 할 수 있는가에 대해 검토해본다.

상기에서 검토한 바와 같이 본래 직류내전압 시험은 케이블의 포설준공시에 장비가 대형인 교류내전압을 실시할 수 없어 장비가 소형이고 간단한 직류내전압을 실시하고 있기 때문에 직류내전압시험은 비파괴절연진단에는 사용할 수 없는 것이 일반적 사항이지만, 정밀한 직류누설측정장비가 없는 경우에는 직류내전압장비로 비파괴열화진단을 실시하고 있는 것이 국내의 현 상태이다. 그러면 직류 내전압장비로 케이블의 열화진단하기 위해서는 도체로 인가되는 직류전압의 안정성을 유지하기 위한 조치(별도의DC-AC컨버터 추가)가 필요하고, 도체로 인가하는 전압을 표18의 내전압이 아닌 제1step, 제2step 전압보다 낮은 전압을 step별로 천천히 인가하면서 해당 step에서 안정된 누설전류를 측정하면서 누설전류의 급격한 변동여부(직현상)를 조사할 필요가 있다.

그리고, 약점비,성극비도 측정·계산하여 누설전류 절대치와 더불어 종합판단하면 직류누설전류측정법 보다는 정밀하지 못하지만 전력케이블의 비파괴 열화진단이 가능할 것으로 판단된다.

다음호에 계속됩니다.