

## 국내 지중배전케이블에 대한 수트리 열화진단기술 현장 시험 결과

이재봉\*, 정종만\*, 박철배\*, 이재옥\*\*, 목영수\*\*\*  
 \* 한전전력연구원, \*\* 한전 시흥지점, \*\*\* 한전 중부지점

### Field Test Results for Water-tree Diagnosis Technologies of Domestic Underground Distribution Cable

Lee Jae-bong\*, Joung Jong-man\*, Park Chul-bae\*, Lee Jae-ok\*\*, Mok Young-soo\*\*  
 \*KEPCO/KEPRI, \*\*KEPCO

**Abstract** - 1986년 제조되어 국내 지중배전계통의 관로에서 20년간 사용된 CNCV케이블에 대하여 IRC(Iso-thermal Relaxation Current) 측정법을 사용하는 진단장비와 0.1Hz 극저주파 Tan-delta 측정법을 사용하는 진단장비로 케이블의 수트리 열화 진단을 시행하고 철거한 후 교류파괴전압시험을 수행하였다. 각 진단장비의 진단결과와 교류파괴전압시험 결과, 수트리의 존재여부를 비교하였다. VLF Tan-delta 측정법을 사용하는 진단장비가 교류파괴전압시험결과, 수트리의 유무 등과 상관성이 비교적 높게 나타났다. 통계적으로 신뢰성을 확보할 수 있도록 지속적인 비교 검증시험을 추진할 계획이다.

나오는데 걸리는 시간에 차이가 있음을 많은 연구를 통하여 밝혀내고 이것을 측정하여 수트리의 유무를 진단하는 것이다. 이때 흘러나오는 전류는 아주 미약하여 수  $\mu$ A로부터 수 pA에 이르는 값으로 나타나므로 측정 장비의 정밀도가 아주 높아야 한다.

### 1. 서 론

국내의 지중화율은 2004년 이후 10%를 초과하고 있고 서울과 대전은 40%를 초과하고 있다. 이와 같은 배전계통의 지중화율은 환경 개선을 원하는 고객의 요구에 따라 앞으로도 꾸준히 증가할 것으로 보인다. 80년대에 시설된 지중배전케이블은 20년간의 장기 사용으로 인하여 열화에 의한 고장이 증가하고 있는 상태이다. 그러나 사용환경이 양호한 곳의 케이블은 여전히 정상 성능을 보이는 경우가 많다. 따라서 사용기간에 따라 일괄적으로 케이블을 교체하는 것은 경제적이지 못하며, 사용 기간에 따라 교체하더라도 초기고장률도 높은 경우가 있기 때문에 케이블의 교체만으로 고장을 방지하는 효과가 제대로 나타나기는 어렵다. 따라서 열화가 많이 진행되어 고장 발생 확률이 높은 케이블을 선별하여 교체하는 것이 고장확률을 줄이고 경제적인 것으로 생각된다.

현장에서 케이블의 열화를 진단하는 방법으로 현재 한전에서는 IRC(Isothermal Relaxation Current 등온완화전류) 측정법이 적용된 독일 Seba Dinatoric의 KDA-1 장비를 사용하고 있으며, 2001년에는 VLF(Very Low Frequency 극저주파) 전원을 사용하여 유전정점을 측정하는 오스트리아 BAUR사의 VLF tan $\delta$  진단장비를 1대 도입하여 시험 사용하고 있다. 이들 두 장비는 주로 케이블의 수트리를 진단하는 장비로서 국제적으로 많이 사용되고 있다.

본 논문에서는 위 두 진단장비를 사용하여 1986년에 설치되어 사용되고 있는 지중배전케이블에 대하여 진단을 실시하고 케이블을 철거하여 교류절연파괴전압시험을 실시하여 진단결과에 대하여 검증하고자 하였다.

### 2. 본 론

#### 2.1 열화진단 원리

##### 2.1.1 IRC 측정법(IRC, Isothermal Relaxation Current)

IRC 측정법은 Isothermal Relaxation Current(등온완화전류) 측정법을 말하며 Seba Dinatoric사의 KDA-1에서 사용하는 방법이다.

IRC 측정법은 그림 1과 같이 절연층 내부 각 층에 형성된 수트리에 충전된 전하가 빠져 나오는데 걸리는 시간이 각기 다르다는 사실에 착안하여 시간에 따라 흘러나오는 전류를 측정하여 수트리의 유무와 정도를 추정하는 기술이 IRC 측정법이다.

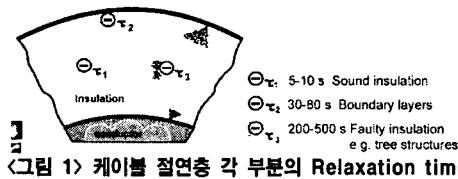


그림 1) 케이블 절연층 각 부분의 Relaxation time

그림 1에서 보듯이 절연체 내부의 어느 곳에 수트리가 존재하느냐에 따라 전하가 빠져 나오는데 걸리는 시간이 다르게 나타난다. 절연체의 건전한 부분에서는 5~10초 만에 모든 전하가 빠져나오게 되는데 그림 2에서  $t_0$  구간에 해당한다. 다음 단계로 전극과 절연체의 계면(반도전층)에 충전되어 있던 전하가 빠져나오게 되는데 역 30~80초가 걸린다. 마지막으로 절연체 내부에 형성된 수트리에 충전된 전하가 빠져나오며 이것은 200~500초가 걸린다.

이와 같이 절연체의 각 부분에 충전된 전하가 방전되어 누설전류로 흘러

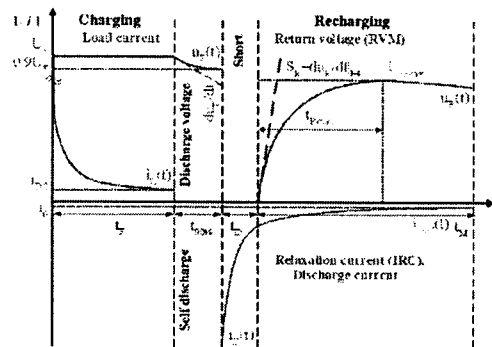


그림 2) IRC 및 RVM의 시간에 따른 전압 및 전류 변화 곡선

이와 같은 IRC 측정법을 적용한 진단장비가 seba Dinatoric사의 KDA-1이며, 한전에서는 1997년부터 본 장비의 Aging Factor 수치를 활용하여 케이블 열화진단에 사용하고 있다.

##### 2.1.2 VLF tan $\delta$ 측정법

tan $\delta$ 의 정의는 Resistive loss 전류와 Capacitive 전류의 비 또는 유효전력과 무효전력의 비로 정의되며 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\tan \delta = \frac{I_R}{I_C} = \frac{\text{true power}}{\text{reactive power}} = \frac{V^2/R}{V^2\omega C} = \frac{1}{\omega CR}$$

절연체 내부에 수트리가 발생하면 절연저항이 감소되어 손실전류가 증가하고 이것은 tan $\delta$ 의 증가로 나타나게 되며 이를 통하여 절연체 내부의 이상 정황을 진단할 수 있다는 원리이다.

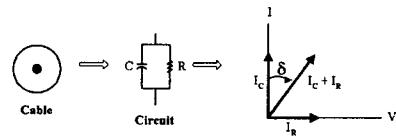
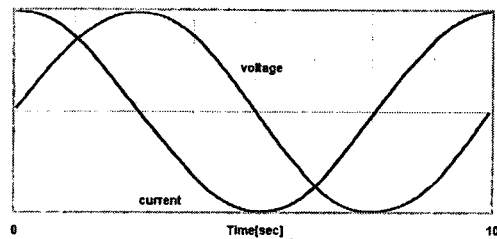


그림 3) tan $\delta$ 의 정의



$$\text{Dissipation Factor } \tan \delta = \frac{\text{true power}}{\text{reactive power}} = \frac{U^2/R}{U^2\omega C} = \frac{1}{\omega CR}$$

그림 4) VLF tan $\delta$ 의 정의 및 측정

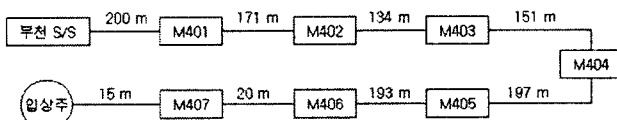
tan $\delta$  측정법은 절연체의 이상 유무 진단에 가장 많이 사용되어 왔던 진단 방법이다. 고전압 절연체는 절연저항이 매우 높고 커패시터를 가지기 때문에 그림 4와 같이 절연체의 정전용량에 의하여 누설전류의 위상이 전압

의 위상과 90° 차이가 발생한다. 그러나 이것은 이상적인 조건에서의 상황이며, 절연체 내부의 저항성분에 의하여 약간의 편차가 발생한다. 이러한 편차를  $\tan\delta$ 로 표현하는데  $\tan\delta$ 가 클수록 절연체의 내부에 누설전류의 저항성분에 의한 영향이 증가함을 나타내며, 이것은 절연체에 이상이 발생하고 있음을 나타낸다.  $\tan\delta$ 를 측정하는 방법은 여러 가지 방법이 있을 수 있는데, 휘스톤브릿지의 원리를 이용하여 직접 측정하는 방법과 전압과 전류의 위상차로부터 측정하는 방법 등이 있다.

실제 환경에서는 정밀한 고전압 AC 전원이 구비되어 있으므로 주로 휘스톤브릿지를 사용하여 측정하는데, 현장의 측정에서는 고전압 AC 전원의 크기와 무게 때문에 사용하기가 곤란하므로 가볍고 DC의 영향이 없는 0.1 Hz VLF 전원을 사용하는데 여기서는 전압과 전류의 위상차를 구하여 측정하는 방법을 사용하고 있다. 특히 0.1 Hz의 저주파를 사용하며 위상차를 정밀하게 측정하여야 하므로 VLF 전원의 품질이 매우 중요하다. 주변의 노이즈는 주로 전압 전류의 크기에 영향을 미치게 되므로 위상차의 변화에 미치는 영향은 미미한 수준으로 볼 수 있다. 즉,  $\tan\delta$  측정법은 주변의 노이즈에 거의 영향을 받지 않는 진단방법이다.

## 2.2 열화진단 대상 케이블

본 논문에서 진단장비의 비교를 위하여 열화진단을 시행한 대상 케이블은 1986년 대한전선에서 제조하여 한전 부천지점에 설치되어 운전한 22.9kV CV/CN 325 mm 이다. 해당 케이블 구간은 2005년 5월에 슈트리 열화에 의한 절연고장이 발생한 실적이 있으며, 전체 구간을 나누어 KDA-1과 VLF  $\tan\delta$  진단장비로 측정하였다.



〈그림 5〉 열화진단 구간 케이블(M000은 맨홀 번호)

## 2.3 열화진단 측정결과

표 1은 2005년 5월 12일 M402 맨홀에서 케이블에 고장이 발생하기 전 IRC 측정에 의한 Aging Factor 수치 및 열화판정 결과이다. M404호 맨홀에서 부천 변전소 방향과 부하측 입상주 방향으로 측정한 결과이며, 주변의 노이즈가 비교적 적은 심야에 측정된 결과 케이블 상태가 모두 양호한 것으로 판정되었다.

〈표 1〉 고장 발생 전 IRC 측정 결과(2004.03.21 심야측정)

측정구간	측정값	열화판정	비고
S/S ~ M404	A상	1.500	M402 60cm 지점 고장 (2005.05.12)
	B상	1.460	
	C상	1.546	
M404 ~ 입상주	A상	1.736	
	B상	1.599	
	C상	1.664	

맨홀 M402에서 고장이 발생한 다음 날 맨홀 M402에서 IRC를 측정할 결과 표 2와 같이 절반은 측정결과가 산출되지 않았다. 1년 전 양호 판정되었던 케이블이 1년 만에 약 50%가 측정이 안되는 상황이 되었다. 이것은 케이블의 상태가 급격하게 악화된 것일 수도 있고, 주간에 측정함에 따라 주변의 노이즈가 측정장비에 영향을 미친 것일 수도 있다. IRC 측정은 수 pA 수준의 미세 전류를 측정하므로 주변의 노이즈에 매우 민감함을 다시 확인할 수 있다.

〈표 2〉 고장 발생 후 IRC 측정 결과(2005.05.13 주간측정)

측정구간	측정값	열화판정	비고
S/S ~ M402	A상	1.732	M402 60cm 지점 고장 (2005.05.12)
	B상	막대불량	
	C상	1.861	
M402 ~ M403	A상	1.738	
	B상	분석불가	
	C상	분석불가	

〈표 3〉 VLF  $\tan\delta$  측정 결과(2005.05.19 주간측정)

측정구간		$\tan\delta$ 측정값		열화판정	비고
		@U <sub>0</sub>	@2U <sub>0</sub>		
M403 ~ M404	A상	5.165	12.706	불량	다른 구간은 장비 문제로 측정 못함.
	B상	2.546	5.403		
	C상	4.915	8.006		
M404 ~ 입상주	A상	0.642	0.914	양호	
	B상	0.546	0.751		
	C상	0.665	3.063		

IRC 측정에 의한 열화진단결과를 얻기 관련하여 VLF  $\tan\delta$  진단장비로 열화진단을 실시하였으며, 그 결과를 표 3에 나타내었다. 진단에 실패한 경우는 없었으며, 상기 구간 측정 후 진단장비에 에러가 발생하여 타 구간은

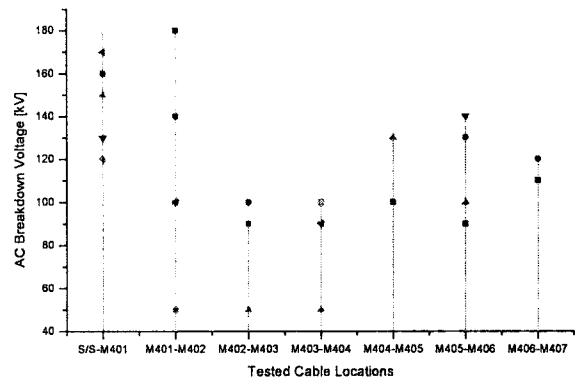
측정하지 못하였다. VLF  $\tan\delta$  진단에서는 M403-M404 구간이 열화로 인하여 불량한 상태인 것으로 판정하였다. M404부터 입상주까지의 구간은 C상만 불량한 것으로 판정하였다.

이상과 같은 IRC 및 VLF  $\tan\delta$  진단결과를 검증해 보기 위하여 표 4와 같이 시료를 발취하여 교류절연파괴시험을 수행하였다.

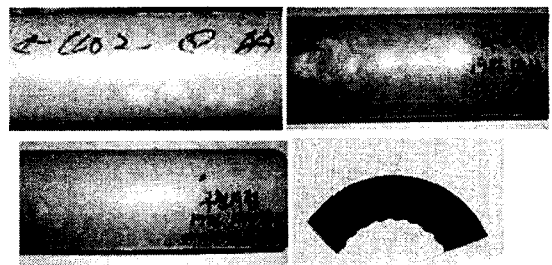
〈표 4〉 교류절연파괴시험용 케이블 시료발취 내역

시료 발취 구간	발취내용(15m)	총시료수
부천 S/S ~ M401	각 상별 3개	9
M401 ~ M402	각 상별 3개	9
M402 ~ M403	각 상별 1개	3
M403 ~ M404	각 상별 3개	9
M404 ~ M405	각 상별 1개	3
M405 ~ M406	각 상별 1개	3
M406 ~ M407	각 상별 1개	3

각 구간별 교류절연파괴시험결과는 그림 7과 같이 나타났으며, 이들 중 50kV에서 파괴된 시료들에서는 그림 8과 같이 절연체 내부에서 슈트리가 다량 발견되었다.



〈그림 6〉 교류파괴시험 결과



〈그림 7〉 50kV에서 파괴된 케이블 시료에서 발견된 슈트리

## 3. 결 론

- 이상과 같은 진단 및 시험결과 다음과 같은 결론을 유추할 수 있다.
1. IRC 진단법은 주변의 노이즈에 매우 민감하므로 노이즈의 영향을 받지 않도록 유의하여 측정하여야 한다.
  2. VLF  $\tan\delta$  진단방법에 의한 열화판정 결과는 교류절연파괴시험 결과와 상관성이 크게 나타났다.
  3. VLF  $\tan\delta$  진단방법에 의한 열화판정 결과는 케이블 절연체 내부의 슈트리 발생 여부를 판단하는데 유용할 것으로 기대된다.
- 한편 2004년에는 VLF 전원을 사용하여 현장에서 케이블을 시험 및 진단하는 국제 규격(IEEE Std. 400.2 "IEEE Guide for Field Testing of Shielded Power Cable Systems Using Very Low Frequency")이 제정되었다. 이 규격에는 케이블의 준공시험과 열화진단을 위한 시험 및 진단방법이 제시되어 있고 거기에 사용되는 적절한 전원의 파형도 소개되어 있다. 국제적으로 VLF 전원을 사용한 현장의 시험 및 열화진단이 크게 확대되고 있는 추세이고 그에 따라 VLF 시험 및 진단장비의 공급업체가 증가하고 있다. 국내에서도 VLF를 이용한 케이블의 시험 및 진단이 활성화될 것으로 기대된다.

## 〔참 고 문 헌〕

- [1] IEEE Std. 400.2-2004 IEEE Guide for Field Testing of Shielded Power Cable Systems Using Very Low Frequency
- [2] 이계봉, 정종만, "부천지점 지중배전케이블 절연파괴시험 분석보고서", 한전전력연구원 2005