

지중배전케이블의 활선 열화진단기술

정 동 원*, 김 상 준**

(*한전기술연구원 배전연구실 책임연구원

**동 연구원 선임연구원)

1. 서 론

우리나라의 지중배전용케이블로서 주로 사용되고 있는 CV케이블은 운전실적이 20년에 이르고 있으며, 이러한 CV케이블을 지중에 설치한 후 6~8년이 경과하면 수트리라고하는 열화현상이 발생한다. 즉, 케이블 내부에 수분이 생성·잔존·침입한 상태에서 장기간 사용하면 절연체내에 수트리현상이 발생하여 절연성능이 현저하게 저하한다.

따라서 세계 각국에서는 배전용 CV케이블의 耐水Tree성능을 향상시키기 위한 연구개발을 진행하고 있다.

그러나 이러한 노력에도 불구하고 지중배전선로에서 발생하는 불의의 정전사고로 인한 각종 폐해를 방지하기 위하여 열화진단을 실시할 필요가 있다. 즉, 예기치 못한 정전으로 인한 수용가의 피해 방지, 사고점 탐사와 사고복구에 소요되는 시간의 경감, 케이블의 교체주기를 결정함으로써 계획적이고도 효율적인 투자계획 수립 및 전력공급신뢰도의 향상을 도모하기 위하여 정기적으로 열화진단을 실시하게 된다.

한편, 유럽의 여러나라에서는 케이블을 직매하는 경우가 대부분이기 때문에 무보수와 무점검을 원칙으로하고 있으며, 열화진단보다는 오히려 사고발생 시 사고점검출등과 같이 신속대응할 수 있는 방안을 모색하고 있는 형편이다.

그러나 근래 CV케이블로 변경함에 따라서 고장

점검출이 곤란하게되므로 우리나라와 같이 방호관내에 CV케이블을 수납시키고 있는 편이다.

22KV CV케이블은 수트리열화로 인하여 파괴에 이르는 양상이 6.6KV CV케이블과 다르다.

즉, 6.6KV CV케이블에서는 수트리가 내부반도전층과 외부반도전층 사이를 橋絡시킴으로써 비로소 파괴에 이른다고 생각되어지며, 열화진단방법도 어느 정도 확립되어 가고 있다.

한편, 22KV CV케이블에서는 수트리열화와 절연파괴에 이르는 양상에 관한 데이터 및 열화진단 방법에 대하여 확실한 것이 없으므로 향후 연구검토가 더욱 필요하다.

최근 사회적인 여건변화와 전산계산기등의 보급으로 인하여 배전선로를 휴전시키기가 곤란하고, 휴전작업의 계획시 장기간이 소요되며, 진단에 필요한 장비가 상당하고, 원상 복구후 송전에 장시간이 필요하며, 열화진단시 직류 고전압인가(인가전압이 낮으면 불량케이블을 검출할 수 없음)에 따른 케이블의 열화촉진 및 절연파괴사고의 유발 등 현행 방법과 같은 휴전에 의한 직류고전압 열화진단 방법에도 문제가 많다.

따라서 수용가에 대한 봉사수준을 향상하고, 휴전작업으로 인한 정전시간을 경감하며, 열화진단에 소요되는 장비와 인력을 경감시키기 위하여 케이블 절연성능의 열화진단을 활선상태(교류전압이 인가되어 운전중인 상태)에서 실시하여야 할 필요성이 매년 높아가고 있다.

2. CV케이블의 활선열화진단기술

운전중 절연열화진단법은 여러가지인데 이 중에서 전력케이블에 적용할 수 있는 방법과 현재 사용상황을 정리하면 표 1과 같다.

여기에서는 현재 사용중이거나 개발중인 방법중에서 직류전압중첩 누설전류법, 직류성분법, 활선 $\tan \delta$ 법, 저주파중첩 누설전류법, 접지선전류법, 맥동전류 파형법에 대하여 그 원리와 특징을 설명하고자 한다.

2.1 직류전압중첩 누설전류법

이 방법은 GPT의 중성점 또는 코일을 통하여 직접 배전선로에 직류전압을 중첩시키고 활선상태에서 절연체에 흐르는 직류누설전류를 측정하여 절연저항을 측정하는 것이다.

열화케이블에 대하여 활선상태로 50V 정도의 낮은 직류전압을 중첩시키기만 하여도 큰 직류누설전류가 흐르기 때문에 열화를 충분히 검출할 수가 있다.

그림 1은 누설전류를 측정하여 절연저항을 측정하는 형태의 회로를, 그림 2는 Bridge회로를 응용하여 절연저항을 측정하는 측정기의 회로도를 나타낸다.

그림 3은 직류전압중첩시의 절연저항치와 직류누설전류측정법에 의한 절연저항치와의 관계를 나타낸 것이다.

표 1. 비전용케이블의 운전중 절연진단법의 사용상황

측정법 · 검출법의 종류	열화형태 · 이상현상			
	수트리	전기트리	부분방전	발열현상
직류전압중첩누설전류	A	A		
직류성분법	A	A		
활선 $\tan \delta$ 법	A			
저주파중첩 누설전류법	B	A		
접지선전류법	A	A		
맥동전류파형법	A	B		
온도측정법	A			A
부분방전전하법	B	B	B	
초음파(AE)법	B	C	B	

A : 실적, 현장측정자료 있음
 B : 연구중, 시제품과 측정자료 있음
 C : 탁상 검토단계

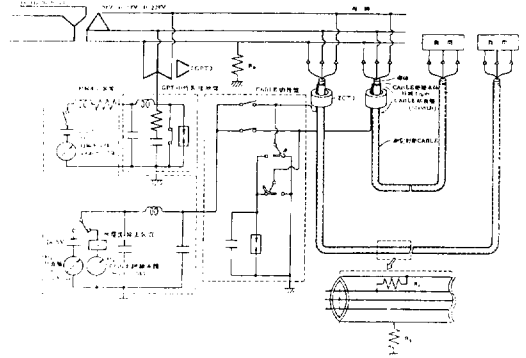


그림 1 직류전압중첩 누설전류를 이용한 절연저항의 측정회로

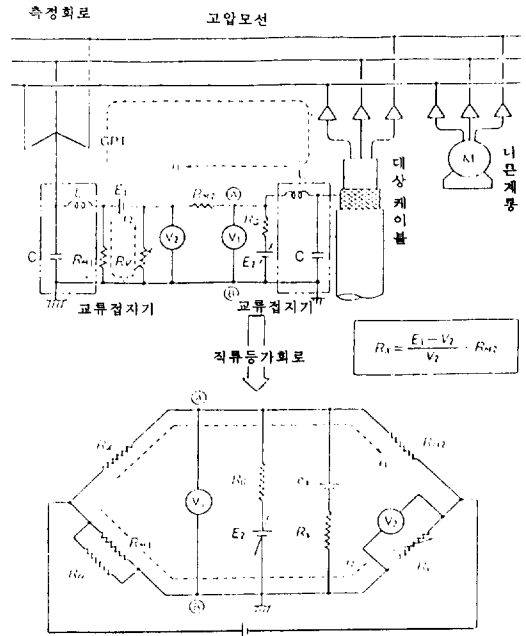


그림 2 Bridge를 응용한 절연저항의 측정회로도
 RM1 : 기준저항, RV : 가변저항, RG : 검출용저항,
 E1, E2 : 직류전원
 es : 극부전지, V1 : Balance용 전압계,
 V2 : 측정용 전압계

그림 4에 철거케이블을 이용하여 조사한 직류전압 중첩시의 절연저항치와 상용주파 파괴전압과의 관계를 나타낸다. 본 방식으로서 측정전에 미주전

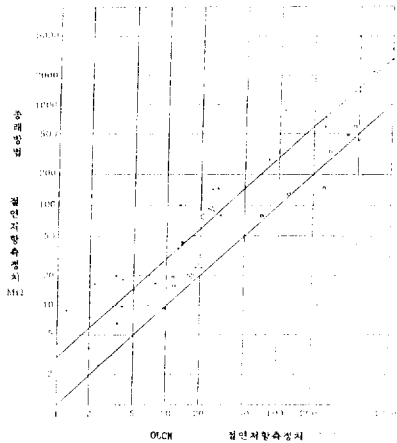


그림 3 직류전압 중첩시의 절연저항치의 직류누설 전류 측정법에 의한 절연저항치와의 비교

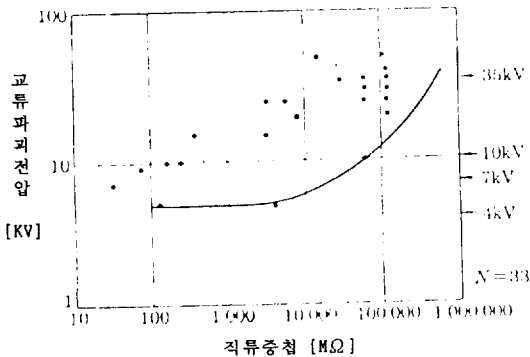


그림 4 직류전압중첩시의 절연저항치와의 교류과피 전압과의 관계

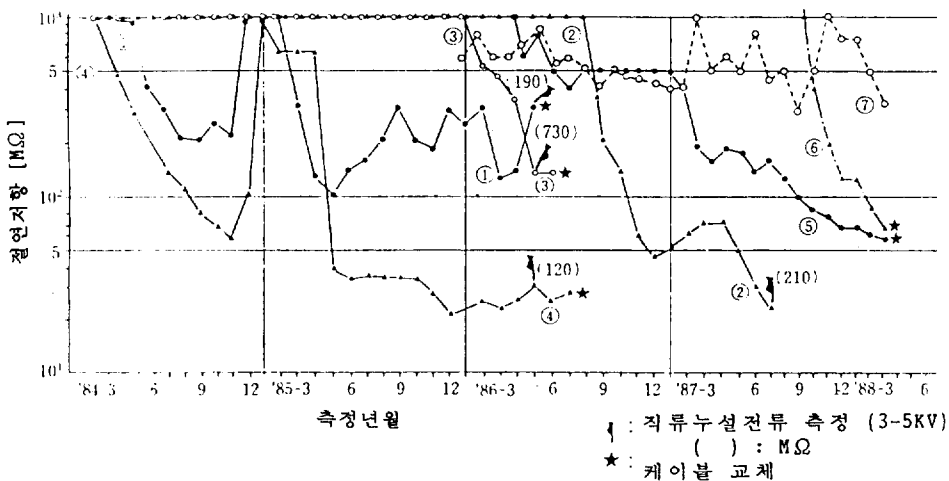


그림 5 직류전압중첩법에 의한 절연저항치의 경년 변화

표 2. 22KV CV케이블의 측정치에 대한 판정기준 및 케이블 조치에

측정대상	측정치	평가	케이블조치
본체 절연	5,000MΩ 이상	양호	계속사용
저항 Ri	5,000MΩ 미만	輕主意	주의하면서 계속 사용
	1,000MΩ 이상		
	1,000MΩ 미만	中主意	부분적으로 교체를 시작
	100MΩ 미만		
100MΩ 미만	重主意	케이블을 즉시 교체	
방식층 절연	1,000MΩ 이상	양호	계속사용
저항 Rs	1,000MΩ 미만	불량	불량개소는 부분수리하여 계속 사용

류와 평형을 이루게 하는 역전압을 인가한다든가, 직류중첩전류의 극성을 正負 역전시키는 방법등에 의하여 미주전류의 영향을 제거한 고정확도의 측정이 가능하다.

6KV CV케이블에서 장기간에 걸쳐 측정할 예를 그림 5에 나타내었는데, 절연저항이 요주의 영역(1,000MΩ 이하)에 들어간 경년변화를 나타낸다.

절연저항이 100-300MΩ의 영역에 들어간 것은 1년정도이내에 케이블교체등의 대책을 시행하고 있다.

2.2 직류성분법

수트리가 발생·진전하고 있는 CV케이블의 수트리부위는 침·평판전극의 정류작용과 똑같은 현상이 있으며, 수트리가 발생하고 있는 CV케이블에

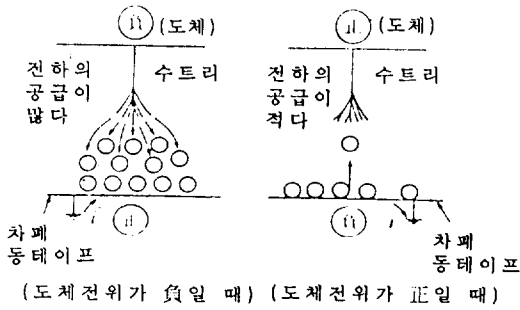


그림 6 수트리의 정류작용 모델

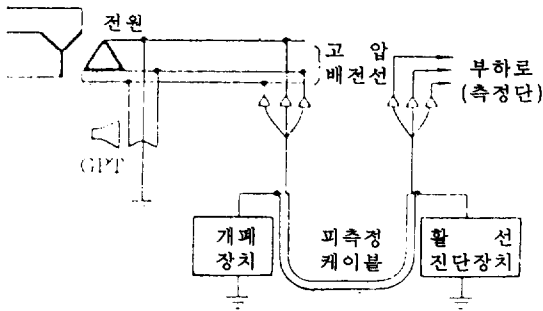


그림 7 직류성분법의 측정회로도

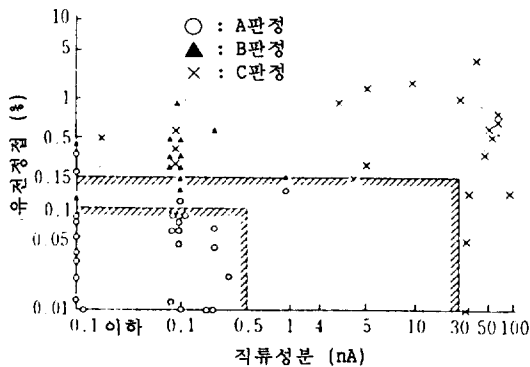


그림 8 직류성분 전류치와 활선 tanδ에 의한 절연 열화 판정례

표 3. 직류성분법의 판정기준예

A판정	직류성분이 0.5nA이하이고, tan δ가 0.1% 이하
B판정	A판정, C판정 이외
C판정	직류성분이 30nA이상, 또는 tan δ가 0.15% 이상

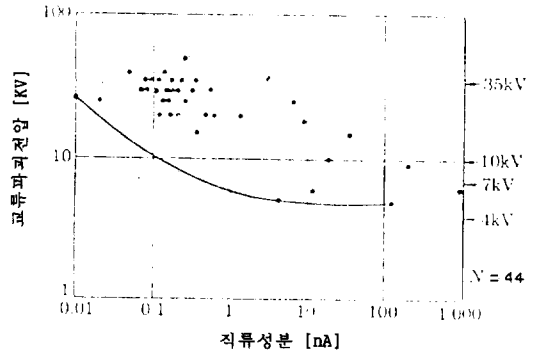


그림 9 직류성분 전류치와 교류과과전압과의 관계

교류전압을 인가할 경우 한쪽 방향으로 직류전류가 발생한다.

따라서 교류 충전전류중에는 미소한 직류성분이 함유되어 있으며, 이러한 직류성분이 CV케이블의 열화신호이기 때문에 그림 7과 같은 측정회로를 이용하여 활선으로 절연체에 흐르는 전류의 직류성분을 측정한다.

차폐동테이프와 대지사이의 접지선에 흐르는 직류전류를 측정함으로써 고압충전부에 접촉하지 않고 직접 직류전류를 측정할 수가 있으며 활선진단이 이루어지고 있다.

또한 직류중첩법과는 달리 특별한 전원장치가 불필요하며 측정을 간단하게 할 수가 있다.

그림 8에 나타낸 바와 같이 tan δ의 측정자료와 병용하여 표 3의 판정기준으로 판정하고 있는 예도 있다.

이렇게 함으로써 휴전측정과 거의 똑같은 판정이 가능하다. 또한 速走電流(stray current)대책으로서 연산에 의하여 제거하는 방법, 연속측정함으로써 쉬스 절연저항치로부터 미주전류분을 계산하여 제거하는 방법이 제안되고 있다.

그림 9에 철거케이블을 이용하여 조사한 직류성분과 상용주파 과과전압과의 관계를 나타낸다.

직류중첩법과 비교하여 열화검출감도는 낮지만 직류성분이 커지면 상용주파 과과전압이 저하하는 경향이 나타난다.

2.3 활선 tanδ법(誘電正接法)

종래 Schering Bridge에 의한 tan δ법 대신에,

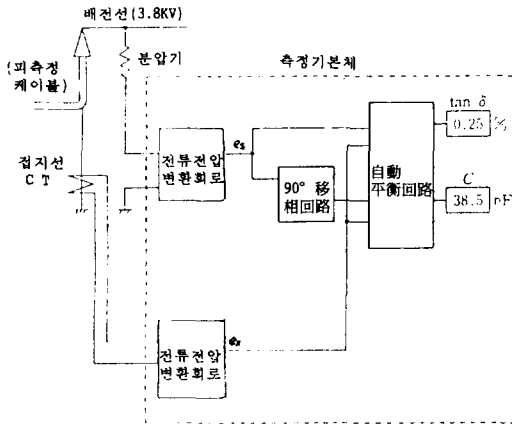


그림 10 활선tanδ의 측정회로

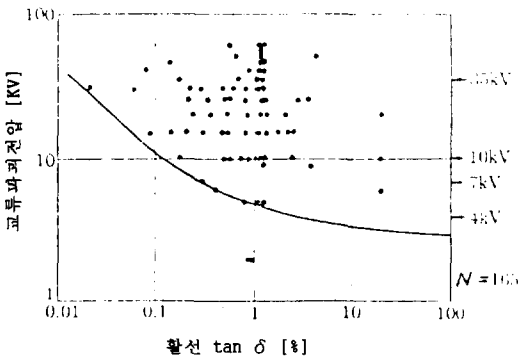


그림 11 활선tanδ의 교류파괴전압치와의 관계

근래에는 그림 10과 같이 활선상태에서 tanδ를 측정할 수 있는 장치가 개발되고 있다.

케이블리드선에 분압기를 접속하여 활선상태로 측정한 전압요소와, 케이블 절연체와 접지선에 흐르는 전류(CT에 의하여 측정)와의 위상차를 검출하여 측정기내의 자동평형회로부터 tanδ를 구하므로 특별한 고압전원장치가 필요없다.

2.4 저주파중첩 누설전류법

배전케이블의 고압선과 접지선 사이에 저주파전압(7.5Hz, 20V)을 중첩하면, 케이블 절연체에는 유효분 전류와 무효분 전류가 흐르는데, 케이블의 접지선에 흐르는 저주파전류중에서 유효분 전류를 검출하여 절연저항치를 측정하는 방법이다.

이로써 케이블의 열화정도를 판정하는데, 절연저

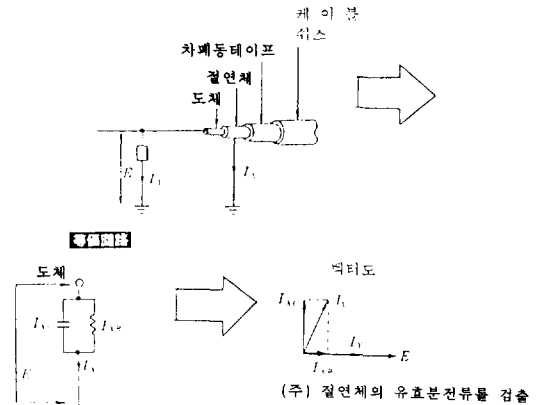


그림 12 CV케이블의 절연체와 전류 벡터도

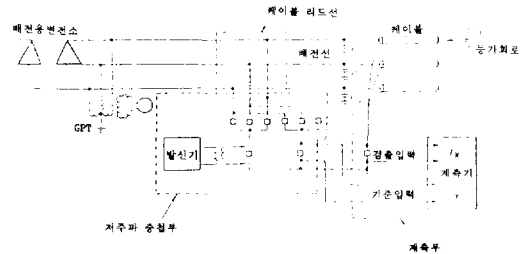


그림 13 저주파중첩에 의한 절연저항의 측정회로도

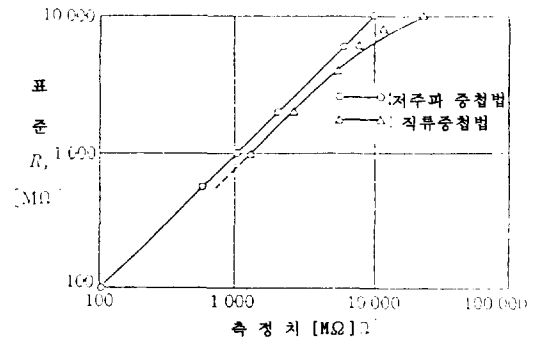


그림 14 표준저항에 의한 저주파중첩법과 직류전압 중첩법의 비교

항치와 교류파괴전압과의 상관관계가 크다.

저주파중첩 누설전류법의 측정회로를 그림 12에 나타낸다.

판정기준으로서는 직류중첩 누설전류법과 똑같이 절연저항치 1,000MΩ미만을 목표치로 한다.

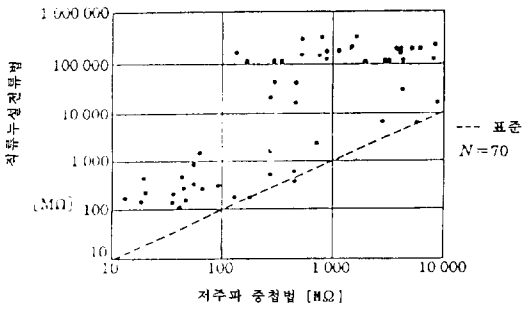


그림 15 저주파중첩법과 직류누설전류법과의 비교

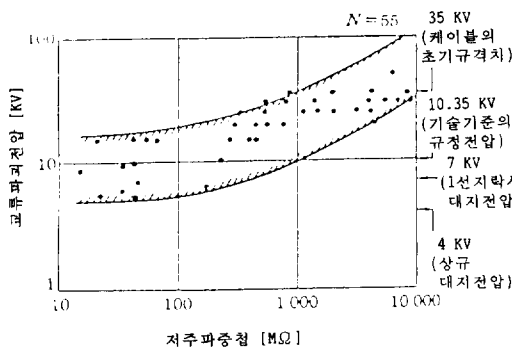


그림 16 저주파중첩법에 의한 절연저항치와 교류파괴전압과의 관계

2.5 접지선 전류법

수트리가 발생하여 진전하고 있는 CV케이블은 수트리열화에 의하여 케이블의 정전용량이 증가한다고 하며, 그림 17에 나타낸 바와 같이 內導수트리 길이와 절연파괴전압 V_{BD} , $\tan\delta$ 및 정전용량 증가율 ΔC 와의 사이에 양호한 상관관계가 나타난다.

수트리열화시에는 접지선 전류가 증가하므로 이로써 수트리 열화를 진단할 수가 있다.

접지선전류 측정방식의 회로예를 그림 18에 나타낸다.

6KV 철거 CV케이블에 대하여 접지선 전류 (I_g)의 전압특성을 측정한 결과는 그림 19와 같다.

3상 사이에 차이가 있다는 점, 각상 모두 열화되지 않은 시료와의 사이에 차이가 있다는 것을 나타내고 있다.

현장에서 실측한 데이터를 더욱 축적할 필요가 있다.

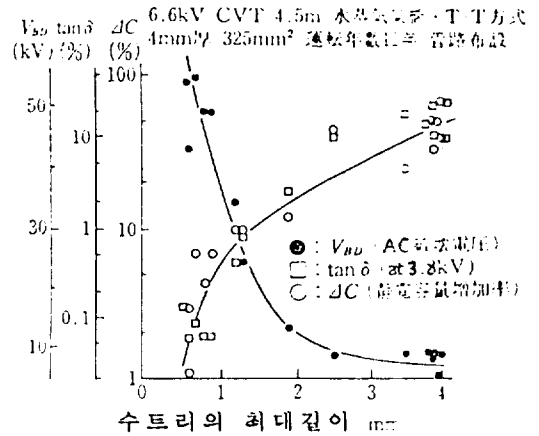


그림 17 수트리 길이와 절연파괴전압 V_{BD} , $\tan\delta$ 및 정전용량 증가율 ΔC 와의 상관관계

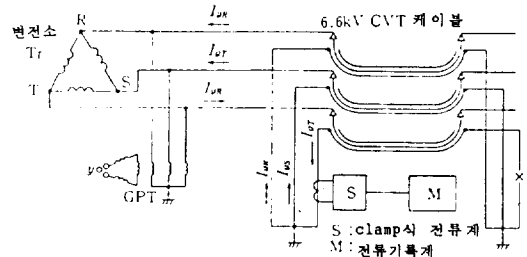


그림 18 접지선전류의 측정회로

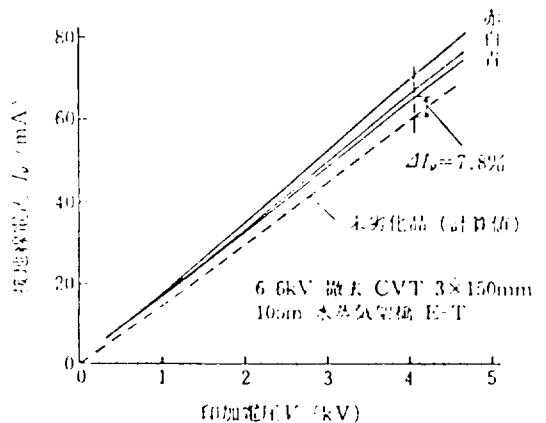


그림 19 CV케이블의 접지선전류-인가전압 특성

2.6 맥동전류검출법

고압케이블에 교류전압을 인가한 상태에서, 수트리열화부위의 정전용량이 변화하기 때문에 발생하

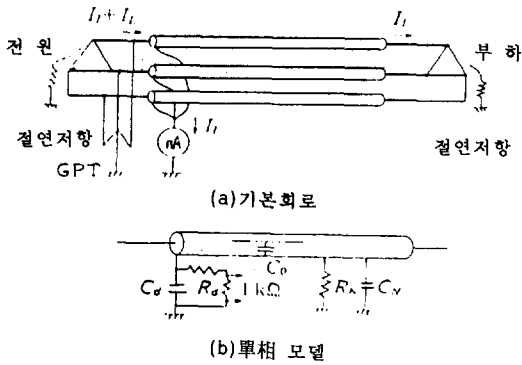


그림 20 맥동전류검출법의 측정회로

는 (상용주파수보다 낮은) 주파수를 맥동으로서 관측하는 것이다.

맥동전류검출법의 측정회로를 그림 20에 나타내었으며, 현장에서 실측한 데이터가 적기 때문에 앞으로 현장 실측데이터를 더욱 축적할 필요가 있다.

2.7 케이블 온도 측정법

절연열화진단은 아니지만, 최근 광파이버 온도분포센서가 개발되어, 케이블의 상시감시나 이상예보 시스템에 이용되고 있다.

2.7.1 광파이버 온도분포센서

광파이버에 입사한 pulse光에 의하여 발생하는 Raman 後方 散亂光의 강도로부터 광파이버에 연결한 온도를 연속적으로 측정할 수 있다(그림 21).

이 Raman 後方 散亂光은 미약한 신호이므로, 노이즈의 영향을 제거하기 위하여 평균화처리를 하고

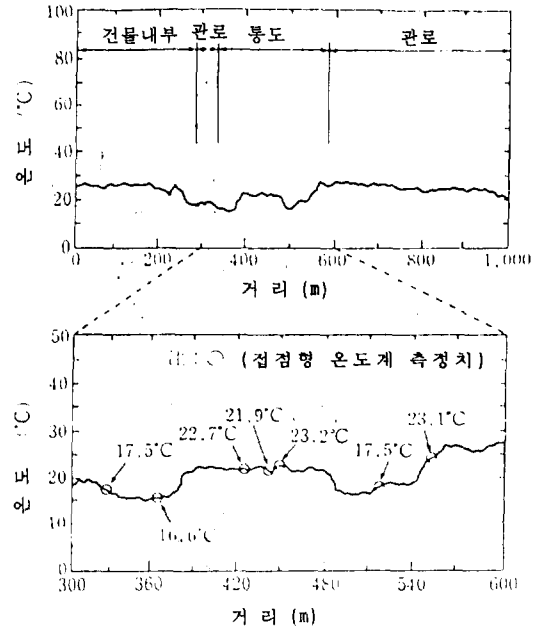


그림 22. 경과지에 따른 케이블선로의 온도분포

있다. 또한 펄스가 입사한 때로부터 後方 散亂光이 되돌아 올 때까지의 시간차로부터 측정점의 위치를 정할 수가 있다.

2.7.2 측정 성능

온도분포센서의 특성으로서 보통 사용하고 있는 점점형 온도센서와는 달리 온도정확도 및 측정온도 범위와 더불어, 계측거리 및 거리분해능 등과 같은 거리에 관한 특성도 중요해진다.

표 4에는 현재까지 보고되어 있는 광파이버 온도분포센서의 규격을 나타낸다.

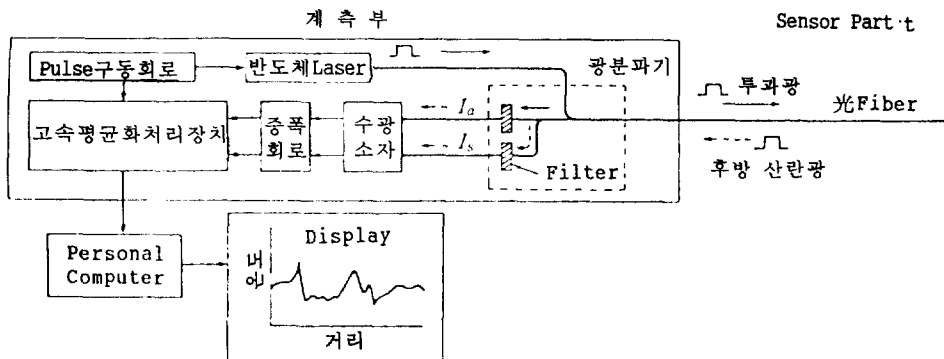


그림 21 광파이버 온도분포센서의 구성

표 4. 광파이버 온도분포센서의 규격

항 목	단위	A사	B사	C사	D사
계측거리	km	2	2	1	2
거리분해능	m	1	3	10	7.5
온도정확도	℃	±1	±3	±1	±1
측정온도 범위	℃	-50~+150	-50~+150	0~+60	-50~+125

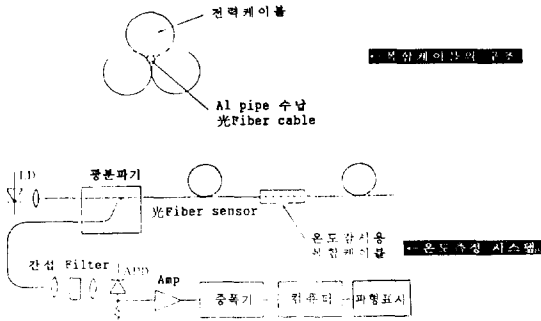


그림 23. 복합케이블의 구조와 온도측정 시스템

2.7.3 측정례

광파이버식 온도분포센서가 실제 선로에 적용되기 시작하고 있으며, 이러한 측정결과의 한 예를 그림 22에 나타낸다.

통도부에는 배수용 물받이가 있으며 주변온도는 약 20℃이다.

또한 동일 통도부에서도 약 30℃인 부분은 케이블피트 모래메움부분이다. 관로부는 비교적 온도가 일정한데 이는 수냉관의 효과이다.

이와같이 장소에 따라서 온도차가 있다는 것을 명확하게 알 수가 있다.

3. 향후 활선열화진단기술의 개발과제

운전상태에서 케이블을 감시하고, 절연열화를 진단할 필요성은 향후 더욱 커지리라 생각되어진다. 이에 따라서 배전용 케이블에서는 각종 활선진단장치가 개발되었는데, 값싸고 간편하며 신뢰도가 높은 결정적인 진단방법이 없다는 것이 현실이다.

일반적으로 활선측정시 외부와 내부의 노이즈가 많고, 조건이 열악한 상황에서 측정해야하므로 측

정정도나 감도가 충분하지 못한 경우가 많다. 이에 대하여 사용자는 활선진단으로써 모든 것을 알고자 하는 희망을 갖고 있기 때문에 연구개발이나 기술개발이 필요하다.

우선은 현장이나 실험실에서 활선진단과 휴선진단을 병용하는 방법을 이용하여, 현재 제안되고 있는 활선진단법의 정확도향상에 노력을 기울일 필요가 있다.

특히 우리나라와 같은 22.9KV 다중접지 배전용 케이블선로에 본문의 활선열화진단기술을 응용하고자 할 경우,

- ① 외부의 전원으로 중첩시키지 않아야 한다.
- ② 접지선 계통을 분리시키지 않아야 한다.
- ③ 접지선 계통에 함유되어 있는 각종 noise를 억제하거나 제거하는 기술을 확립하여야 한다.

이와같이 활선열화진단기술은 아직 확립되어 있는 것은 없으며, 향후 검출 감도와 검출 정확도가 더욱 높아진 측정기의 개발, 현장 적용성의 증대, 센서기술과 해석기술의 개발, 전문가시스템등의 지식공학을 원용하여 데이터 베이스의 축적과 정비에 의한 시계열관리 및 예측관리(열화진단전문가시스템), 복수의 특성정보에 의한 정확도가 높은 종합판정법을 확립하여 가는 것이 필요하다.

참 고 문 헌

- [1] 지중 송배전 기술 Workshop, 한전기술연구원, 1989. 3. 24
- [2] 배전용 CN-CV 케이블과 접속재의 열화사고 방지대책에 관한 연구(I), 한전기술연구원, 1990. 7
- [3] 배전용 CN-CV 케이블과 접속재의 열화사고 방지대책에 관한 연구(II), 한전기술연구원, 1991. 7
- [4] 배전용 CN-CV 케이블의 접속재의 열화사고 방지대책에 관한 연구(III), 한전 기술 연구원, 1992. 11
- [5] 지중배전 기술세미나, 한전기술연구원, 1992. 9. 25
- [6] 배전기자재 열화진단기술, 전기협동연구 제 43 권 2호, 전기협동연구회, 1987. 10
- [7] 특별고압 CV 케이블의 설비실태와 절연진단

기술의 동향, 전기학회 기술보고 II부 266호, 전기학회, 1988. 3

[8] 특별고압 회전기·Cable의 절연열화진단기술, 전기학회 기술보고 II부 267호, 전기학회, 1988. 3

[9] 전력설비의 운전중 절연진단기술, 전기학회 기술보고 II부 402호, 전기학회, 1992. 1

[10] 지중배전 케이블의 신뢰성 향상기술, 전기학회 기술보고 II부 404호, 전기학회, 1992. 1



정동원(鄭銅元)

1946년 10월 12일생, 1973년 부산대 전기공학과 졸업. 1981년 연세대 산업대학원 전기공학과 졸업(석사), 1973년 한전입사. 현재 한전기술연구원 배전연구실 책임연구원.



김상준(金相俊)

1951년 2월 7일생. 1986년 서울산업대학 졸업. 1991년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(석사), 1976년 한전입사. 현재 한전기술연구원 배전연구실 선임연구원