

고압 및 특고압 전력케이블의 절연진단 및 유지보수 관리방법(4)

김 보경/메가파워테크 대표
 목 영수/한국전력공사 중부지점 지중배전부 과장
 이 관우/호원대학교 교수
 박 대희/원광대학교 교수

목 차

1. 서론
2. 전력케이블의 사고분석, 열화원인 및 절연진단 현상
 - 2.1. 지중전력케이블의 사고현황 및 실태
 - 2.2. 전력케이블의 절연열화요인 및 열화PROCESS
 - 2.3. 전력케이블의 절연진단 현상, 문제점 및 대책
3. 정전상태에서의 전력케이블 절연진단법 상세
4. 활선상태에서의 전력케이블 절연진단법 상세
 - 4-1. 직류성분법
 - 4-2. 직류전압중첩법
 - 4-3. 활선Tanδ법
 - 4-4. 저주파중첩법
 - 4-5. 교류중첩법
 - 4-6. 직류BIAS법
 - 4-7. 맥동검출법
5. 국내에서의 활선절연진단법 동향 및 적용사례
6. 전력케이블 유지보수방법
7. 맺은 말

4. 활선상태에서의 전력케이블 절연진단법 상세
 활선상태에서 전력케이블의 절연상태를 진단하는 방법은 여러 가지가 개발되어있고, 현재도 계속 연구중인 방법들이 있다. 이것을 정리하면 표26와 같다.

표26. 활선열화진단법의 사용상황

진단법의 종류	열화형태. 이상현상			
	수트리	전기트리	부분방전	발열현상
직류전압중첩법	A	A	B	
직류성분법	A	A		
활선Tanδ법	A			
저주파중첩법	A	A		
교류중첩법	A	A		
직류BIAS법	A	A		
맥동검출법	A	B		
접지선전류법	A	A		
손실전류고조파법	A	A		
온도측정법				A
부분방전전하법	B	B	B	
초음파(AE)법	B	C	B	

A: 실적, 현장측정자료 있음, B: 연구중, 시작품과 측정자료 있음, C: 연구검토단계

여기서는 제품이 개발되어 사용중이거나, 현장시험중인 방법중에서 직류성분법, 직류전압중첩법, 활선Tanδ법, 저주파중첩법, 교류중첩법, 직류BIAS법, 맥동검출법에 대해 그원리와 특징을 설명하고자 한다.

4-1. 직류성분법

1) 측정원리

교류전압이 인가된 수트리열화CV케이블의 접지선에 흐르는 충전전류(교류전류)에는 산화동에 의한 정류 작용으로 nA~uA정도의 미소 직류성분이 포함되어 있다. 이러한 직류성분의 발생상황을 설명을 그림19을 통해 설명되고 있다. 그림19은 내도수트리를 Model화한 것으로, 도체축이 -극성으로 되면 수트리의 선단으로부터 전하가 공급되어, 차폐동Tape로 이동한다. 도체축이 +로되면 차폐동Tape으로부터 공급은 조금밖에 안된다. 즉 전원전압의 + -극성의 사이클에서 전하의 거동이 달라 그림20와 같이 전원전압의 피크치 부근의 전류파형이 왜곡되어 비대칭

으로 된다.이 비대칭성분은 직류와 많은 교류성분으로 구성되어 있다고 보고되고 있다.

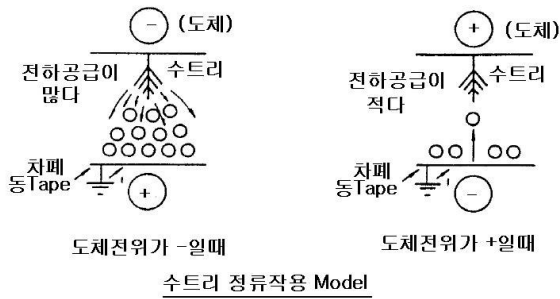


그림19. 수트리의 정류작용Model

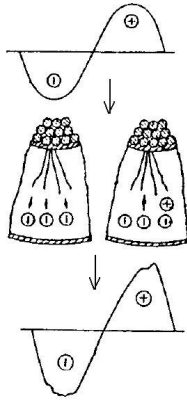


그림20. 수트리 발생케이블의 충전전류파형

2) 측정회로 및 측정결과

그림21는 직류성분법의 측정회로도이고, 측정시에는 접지용변압기(GPT), 고압배전선, 피측정CABLE,진단장치로 및 대지로 폐회로가 구성된다.

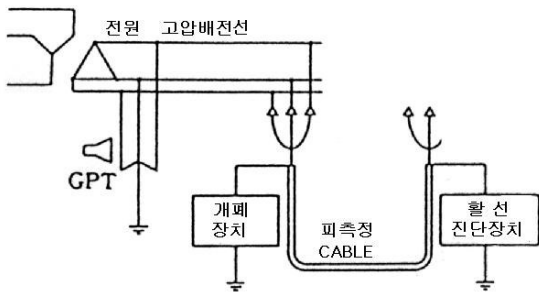


그림21. 직류성분 측정회로도

진단장치에서 측정되는 직류성분은 매우 미소하지만 이 직류성분이 CV케이블의 열화신호이기 때문에 그림21과 같은 측정회로를 사용하여 직류성분만 검출한다. 이러한 직류성분을 교류성분과 분리하여 검출하기 위해서는 직류성분 검출감도가 $10^{-10}A$ (0.1nA)정도가 필요하며, Low-Pass Filter사용하여 직류성분만 검출하고 있다.

3) 판정기준

표27에 직류성분의 판정기준 예를 나타냈다.

표27. 직류성분법의 판정기준 예

판정	Printer표시	직류성분(nA)	재측정주기
불량	A	100이상	조기 교체필요
중주의	B1	10이상~100미만	1년이내
경주의	B2	1이상~10미만	3년이내
양호	C	1미만	5~7년주기
판정유보	*	쉬스절연저항이 1Mohm이하	

4) 특징 및 측정시의 유의점

직류성분법의 특징과 측정시 유의점은 다음과 같다.

(1) 특징

- ① 별도의 과전용 전원장치가 불필요하다.
- ② 접지선을 이용하여, 충전부에 접촉하지 않고 측정할 수 있으므로, 안전하고 간편하다.

(2) 유의점

- ① 직류성분전류는 미약하기 때문에 외피 쉬스 절연저항값이 낮으면 미주전류의 영향을 받기 쉬어 오측정될 우려가 있다. 따라서 미주전류와 직류성분전류의 판별이 필요하여, 몇가지의 미주전류 제거법이 개발되어 있다.
- ② 케이블 단말부의 표면누설저항이 낮으면 쉬스 절연저항 값이 낮아지는 것 같은 현상이 발생하여 측정오차의 원인으로 되기 때문에 단말부 청소와 우천시 측정에는 피하는 것이 좋다.
- ③ 절연층에 내도수트리와 외도수트리가 병존시 오진단 우려가 있다.
- ④ 별도의 전원을 교류에 중첩하지 않는 직류 성분법에서는 특고압CV케이블에서의 열화진단이 불가능하고, 접속재의 절연진단도 불가능하다. 따라서 직류성분법을 보완한 진단법이 후에 기술하는 직류BIAS법이 제안되고 있다.

4-2 직류전압중첩법

1) 측정원리

GPT(또는 접지변압기)의 1차 중성점을 통하여 고압 모선에 직류50V를 교류전압에 중첩시키고,활선상태에서 전력케이블 도체와 차폐동Tape간에 흐르는 직류누설전류를 측정하여 절연저항을 산출하는 것이다.

2) 측정회로 및 측정결과

그림22는 직류전압중첩법의 측정회로도이고, 측정시에는 접지용변압기(GPT), 고압배전선,피측정CABLE,측정기,대지 및 직류전원으로 폐회로가 구성된다.

그림23은 종래의 정전진단법으로 측정한 절연저항치와 직류전압중첩법으로 측정한 절연저항치와 관계를 나타낸 것으로, 종래의 정전진단법인 고압직류누설전류법의 DATA와 많은 상관관계를 갖고 있다는 것을 알 수 있다.

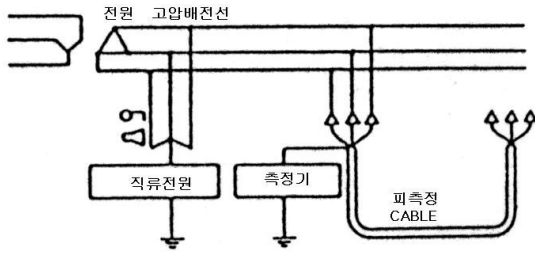


그림 22. 직류전압중첩법의 측정회로

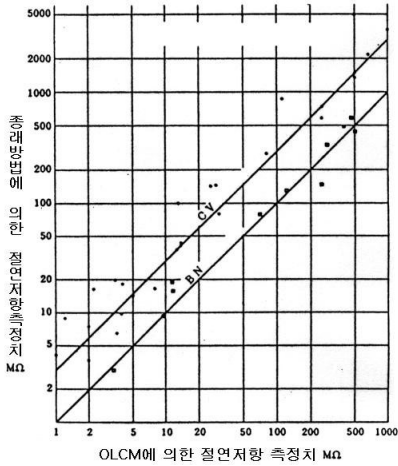


그림 23. 활선 직류전압중첩법으로 측정한 절연저항치와 종래 정전상태의 직류고압누설전류법으로 측정한 절연저항치와의 관계

3) 판정기준

표28에 직류전압중첩법에 의한 고압전력케이블의 판정기준 예를 표시하였다.

표28. 직류전압중첩법의 열화판정기준 예

측정대상	측정치	평가	케이블 조치
본체 절연저항 Ri	1,000MΩ이상	양호	사용계속
	1,000MΩ미만 100MΩ이상	경주의	사용계속
	100MΩ미만 10MΩ이상	중주의	경계하에서 사용계속 교체준비
	10MΩ미만	엄중주의	케이블 교체
방식층 절연저항 Rs	1,000KΩ이상	양호	사용계속
	1,000KΩ미만	불량	사용계속, 단, 불량개소 수리
계통절연저항 Rb	불량치의 기준은 없고, 1년경과하여 원래값보다 떨어지지 않으면 양호한 것으로 한다.		

4) 특징 및 측정시의 유의점

직류전압중첩법의 특징과 측정상의 유의점은 다음과 같다.

① 특징

- 직류고압누설전류법과 직류전압중첩법에 의해 측정된 절연저항치는 비교적 좋은 상관관계를 가지고 있다.

- 직류전압중첩법에 의한 절연저항치는 6KV급 전력케이블에서는 직류인가전압5~6KV의 절연저항치에 상당한다.
- 특별CV케이블의 열화진단에 적용되고 있으며, 단말접속재의 감시기능을 추가하여 현장 적용 시험중에 있다.

② 유의점

- 미주전류가 변동하고 있는 경우, 측정오차가 크게 되는 경우가 있다.
- 단말부의 표면누설저항이 낮으면 측정오차의 원인으로 된다.
- GPT에 높은 직류전압을 장시간(수시간이상) 인가되면,상별여자전류가 불균형되게 제작된 GPT에서는 자속포화가 생겨,영상전압이 발생하여 변전소 릴레이의 오동작의 원인으로 될 수 있지만, GPT에 교류접지기를 설치하는 것과 동시에 수분동안만 50V를 인가시키는 설계보완구성으로, 실제 현장에서는 전혀 문제가 발생되고 있지 않는다.

4-3 활선Tanδ법

1) 측정원리

일반적인 실제의 절연재료에서는 교류전계가 인가되는 경우 전기적 에너지가 열 에너지로 변화하는 손실이 발생한다. 이 손실량을 전기적으로는 Tanδ (유전정접이라 함)라고 부른다.그림24은 Tanδ의 개념도를 나타낸 그림으로서, 이 Tanδ는 절연재료의 유전율에 의해 나타나는 정전용량에 대해 90도의 낮은 위상각을 갖는 저항성부하특성으로서, 용량성 부하에 대한 비율로 표시되는 상대값이다.

이 Tanδ법의 측정원리는 전력케이블에 인가되는 인가전압과 차폐접지선에 흐르는 전류의 위상차를 측정해서 Tanδ를 산출하여 이 Tanδ의 크기로 열화 상태를 판정하는 것이다.

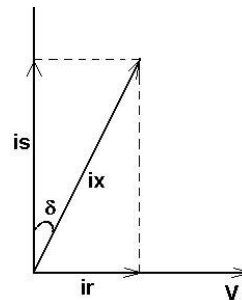


그림24 Tanδ개념도

2) 측정회로 및 측정결과

Tanδ측정법을 원리에 따라 나누면 Bridge법, 위상차법, 전력계법, 열류계법등으로 나눌 수 있다. 이 가운데 Bridge법 및 전력계법은 회로의 평형상태를 조정할 필요가 있기 때문에, 만약 자동화된다고 하여도 그만큼 복잡한 회로가 될 것을 예상할 수 있다. 또한, 열류계법은 부하로서 전류에 따라 발생하는 발열이 생기는 경우의 활선진단법으로 적용

가능하지만 정밀도 면에서 어느 정도 문제점이 있다. 따라서, 현재 발표되고 있는 활선상태의 Tanδ 측정 장치는 대부분 위상차법을 적용하고 있다. 그림25에 위상차법을 이용한 측정회로이다. 분압기를 통해 전압과 CT를 통해 전류를 측정해 이 전압과 전류의 위상차로부터 정전용량치와 Tanδ치를 구하는 것이다.

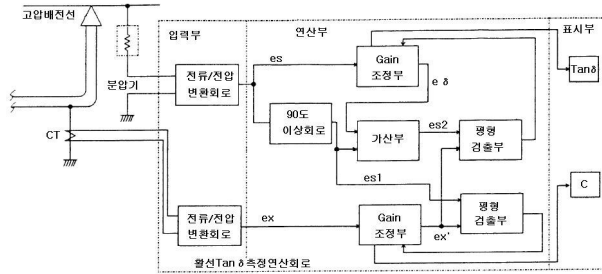


그림25. 활선Tanδ법의 측정회로

3) 판정기준

표29. 활선Tanδ의 판정기준 예

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

4) 특징 및 측정시의 유의점

활선Tanδ법의 특징과 측정시 유의점은 다음과 같다.

① 특징

- 차폐접지선에서 CT에 의해 전류를 검출하므로 접지선을 띄울 필요가 없다.
- 특별한 고압전원장치가 필요없다.

② 유의점

- 전압측정을 위해 충전부에 접촉할 필요가 있으나, GPT의 2차 전압을 이용하는 방법이 개발되어 충전부에 접촉할 필요가 없다.
- 국부적인 열화 검출은 어렵다.

4-4. 저주파중첩법

1) 측정원리

케이블의 도체와 차폐층간에 저주파전압을 인가한 때에 흐르는 전류중 손실전류만을 검출하여, 교류 절연저항을 산출하여, 열화의 정도를 판정하는 방법이다.

2) 측정회로 및 측정방법

이 측정회로에는 그림 26과 같은 충전전류 cancel 방식과 이외에 브리지방식이 있다.

충전전류cancel방식은 주로 6KV급 CV케이블의 열화 진단에 사용되고 있는 것으로, 7.5Hz-20V 고정조건

으로 측정한다. 충전전류를 cancel하기 때문에 기준 신호를 기초로 충전전류와 역위상의 성분을 만들어 산출하고 있다.

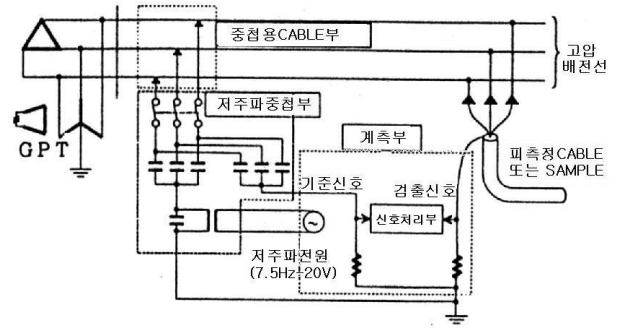


그림 26. 충전전류 CANCEL방식의 측정회로

한편, 브리지방식은 표준 콘덴서를 사용한 CR의 브리지회로를 구성하여, 차동입력으로 측정을 한 것으로, 임의의 조건에 있어서 자동측정이 가능하다 이 두가지 방법 모두 활선, 정전상태에 상관없이 측정가능하다. 활선측정시의 저주파전압은 브리지 방식의 경우, 접지용변압기(GPT) 중성점으로 중첩 등 여러 가지의 중첩방식에 의해 측정이 가능하다. 그러나, 통상은 콘덴서를 Y결선하여, 그 중성점 으로부터 삼상에 중첩하기 때문에 고전압선로의 중첩용 케이블의 접속을 간접 활선공사를 한다.

3) 판정기준

6.6KV CV케이블의 판정기준을 표30에 나타냈다.

표30. 저주파중첩법의 판정기준 예

판정	활선측정결과	조치	판정의 근거
불량	400MΩ이하	조기 교체 (2~3개월 이내) 계획	1선지락시의 대지간 전압(6.9KV)이하에서 절연파괴를 일으킬 가능성이 있음
요주의	400MΩ초과 1,000MΩ이하	1년후에 재측정	1선지락시의 대지간 전압(6.9KV)이하에서 절연파괴를 일으킬 가능성은 적지만, 전기설비기준의내전압치(10.35KV)이하에서 절연파괴를 일으킬 가능성이 있음
양호	1,000MΩ초과	정기절연진단의 계속 실시	전기설비기준의 내전압치(10.35KV)이하에서 절연파괴를 일으킬 가능성이 적다

4) 특징 및 측정시의 유의점

저주파중첩법의 특징으로는 다음을 들 수 있다.

- ① 진단결과와 신뢰성이 높다는 보고도 있다.
- ② 저주파, 저전압 때문에 전원의 용량을 작게 할 수 있다.
- ③ 관통수트리열화에 한하지 않고, 미관통 수트리열화 검출도 가능성이 있고, 현재 6kV배전선에만 적용되고 있으나, 일반공장과 특고압 케이블로 적용에는 아직 많은 과제가 남아있다.

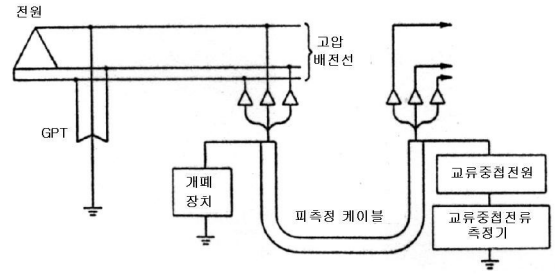


그림27. 교류중첩법의 측정회로

측정시의 유의점으로서는 다음과 같다.

- ① 관통 수트리와 미관통 수트리 모두 검출가능 하지만 아직까지는 명확히 관통 수트리인지, 미관통수트리인지 알 수 없다.따라서 필드에서는 활선진단의 결과가 요주의 및 불량으로 판정된 케이블은 별도 직류누설전류법에 의한 정전진단을 실시하고 있다.
- ② 측정원리상 손실전류가 큰 것일수록 열화가 진행되고 있다는 결과가 나오기 때문에, 열화가 되지 않는 상태라도 손실전류가 큰 것은 활선진단만으로는 요주의 또는 불량으로 판정될 수 있기 때문에 주의가 필요하다. 특히, 케이블 단말 종류에 따라 측정치가 크게 변동할 요인이 있으므로, 진단전에 단말의 사양을 확인할 필요가 있다.

4-5. 교류중첩법

1) 측정원리

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

2) 측정회로 및 측정결과

그림27에 기본적인 측정회로를 표시하였다. 본 방법에서는 케이블 차폐층에 교류전압을 중첩하기때문에 고압부로의 연결 접착작업이 필요하지 않아, 활선상태에서도 간편하게 측정할 수 있다.

3) 판정기준

6KV급 CV케이블의 판정기준으로서 표31과 같이 제안되어 있다.

표31. 교류중첩법의 판정기준 예

판 정	기 준
양 호	$I_{sa}(1\text{Hz의 전류}) < 10\text{nA}$
불 량	$I_{sa} \geq 10\text{nA}$
판정불능	슈스절연저항 $< 250\text{K}\Omega$

4) 특징 및 측정시의 유의점

교류중첩법의 특징으로는 다음의 점을 들 수 있다.

- ① 케이블의 접지선으로부터 전압을 중첩할 수 있어, 측정이 간편하다.
- ② 전압을 중첩하는 것과 동시에, 이미 알고 있는 열화신호(1Hz)를 검출하기 때문에, 측정정도가 높다는 보고가 있다.
- ③ 현재 6kV 케이블 절연진단에만 사용되고 있다. 금후의 과제는 새로운 진단법이므로, 실선로에서의 측정DATA가 많지 않다. 따라서, 향후 DATA의 축적이 필요하고, 실제 현장에서의 진단상 문제점 개선 보완이 필요할 것이다.

4-6. 직류BIAS법

1) 측정원리

교류과전에 의해 미약한 직류성분이 발생하고 있는 수트리열화 케이블에 직류전압을 BIAS하면 직류 성분이 증가한다. 이 직류 BIAS전압에 의한 직류 성분의 증가비율은 열화가 큰 케이블일수록 크다. 피측정케이블에 사용주파수의 상용사용전압을 인가하여 직류성분을 측정하고, 그 후 직류성분이 증대하는 방향으로 1,000V(정전진단법의 직류BIAS법) 또는 50V(활선진단법의 직류BIAS법)의 직류전압을 BIAS하여 직류성분을 측정하여, 그 크기로부터

열화상태를 판정하는 것이다.

본 방법은 22KV급 CV케이블을 대상으로 한 정전 진단법이었지만, 직류성분을 보완하는 진단법으로 최근에 개발되어 활선상태에서 진단이 가능하게 구성된 것이 직류BIAS법이다.

2) 측정회로 및 측정결과

그림 28은 정전 진단법에 해당하는 측정회로도로서, 과전TRANS의 2차측의 저압측에 바이패스용 직류 전원과 측정장치를 접속하여, 직류BIAS시의 직류 성분을 측정한다.

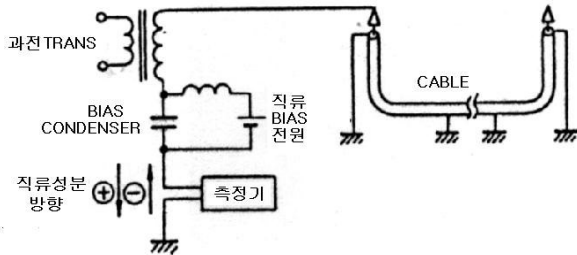


그림 28. 정전진단법에 해당하는 직류BIAS법의 측정회로

그림 29은 직류성분을 보완한 활선 직류BIAS법에 해당하는 측정회로도로서, 직류 ±50V를 GPT 1차 중성점을 통해서 케이블 도체로 중첩시키는 것이다. 직류전압중첩법과 매우 유사한 회로이다.

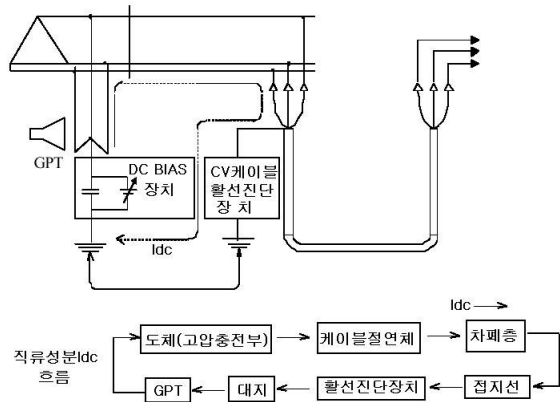


그림 29. 활선진단법에 해당하는 직류BIAS법
그림 29에서 알 수 있듯이 직류성분 Idc의 흐름은 GPT 1차중성점,도체,케이블 절연체, 차폐층접지선, 활선진단장치,대지접지를 통해 DC BIAS장치로 흐르게 된다.

그림 30는 R상은 열화케이블이고, S상 및 T상은 건전케이블의 경우에 있어, 직류BIAS전압 중첩에

다른 직류성분을 관찰한 DATA이다. 건전(S,T상) 케이블은 직류성분이 직류BIAS전압의 크기에 관계 없이 거의 흐르지 않으나, 열화케이블은 직류BIAS 전압이 클수록 직류성분이 많이 흐르고 있다.

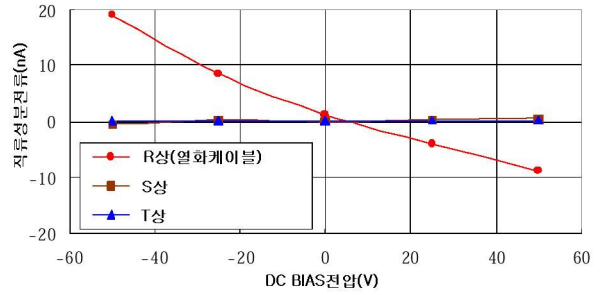


그림 30. 직류BIAS전압에 따른 직류성분의 실측예

3) 판정기준

표32은 정전진단법에 해당하는 직류BIAS법의 열화판정기준과 조치법을 나타냈다.

표32. 직류BIAS법(정전진단법)의 판정기준 예

레벨	직류성분	교류잔존 성능	잔존절연 두께	파괴까지 시간	진단주기
1	10nA미만	30KV이상	0.8mm	5.5년	5년
2	10nA이상 100nA미만	25KV이상	0.6mm	3.5년	3년
3	100nA이상 500nA미만	20KV이상	0.4mm	1.5년	1년
4	500nA이상	20KV미만	0.4mm이하	1.5년 미만	내압시험 (AC20KV)

4) 특징 및 측정상의 유의점

직류BIAS법의 특징으로서 다음의 점을 들 수 있다.

- 교류과전시의 직류성분의 크기와 극성으로부터 직류BIAS전압의 크기와 극성을 결정하기 때문에 측정중에 케이블을 절연파괴시키지 않는다.

측정상의 유의점은 다음과 같다.

- ① 케이블의 단말부의 표면누설저항이 낮으면 측정오차의 원인으로 되기 때문에, 단말부의 청소와 우천시 측정 피하는 등의 주의가 필요하다.
- ② 직류성분과 마찬가지로 미주전류의 영향을 받기 쉽다.
- ③ 직류전압중첩법과 마찬가지로 직류50V를 GPT 1차중성점을 통하여 중첩하기 때문에 GPT에 장시간 중첩하지 않도록 하는 설계가 필요하다.

4-7. 맥동검출법

1) 측정원리

맥동검출법은 수트리의 수분에서 도전성이 증가한 절연 열화부를 통하여 흐르는 전류신호를 검출하는 방법이다.

2) 측정회로

그림 31에 측정회로를 나타냈다. 운전중의 케이블 차폐의 신호 검출단 측만을 일단접지하여, 3상의 접지선을 일괄하여 전류검출회로를 삽입한다. 검출신호로서 LOW PASS FILTER(LPF)에서 사용 주파수 성분을 제거한 후, 협대역 공진증폭으로 1Hz를 검출하고 있다. 또, 활선측정에서는 선로의 차폐를 접지할 의무가 있다. 그 결과, 상용주파수에서는 저저항의 접지로 되므로, 검출신호는 상용주파수를 피하기 위해 1Hz의 신호 외에 쉬스절연 저항Rs 및 영상상당의 전압 Vs를 각각 절환하여 측정하고 있다.

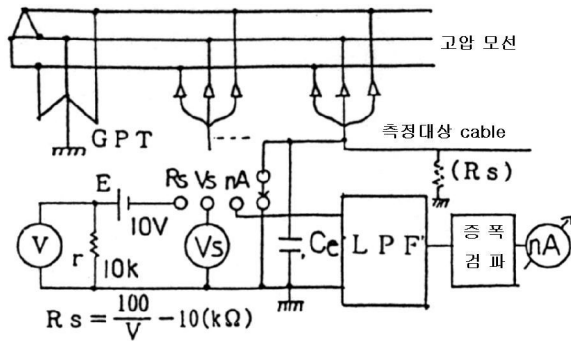


그림 31. 맥동검출법의 측정회로

3) 판정기준

실선로에서는 표33에 표시한 잠정 기준을 설정하여, 절연상태를 판정하고 있다.

맥동검출법에서는 검출전류의 신호원은 운전중의 선로의 전압변화이다. 그래서 돌발적인 큰 잡음의 영향을 받기 어렵기 때문에, 최대응답은 없고, 전압변화의 최종 유지치에 대한 최소의 검출전류 Level에서 검출신호를 직류 누설전류치와 비교 평가하고 있다.

4) 문제점 및 기타

맥동검출법의 활선측정은 회로구성상 쉬스절연 이상의 영향을 매우 심하게 받을 수가 있다. 그 때문에 표34에 표시한 것과 같이 주절연의 이상만을 쉬스절연이상과 분리하여 단독으로 검출하는 것은 곤란하다. 그래서 측정결과로부터 이상이 있는 선로를 찾고, 그 후 직류누설전류

측정등에 의한 정전진단 병용이 필요하다. 요약하면 표34에 표시한 Case 2내지 Case 4의 구별이 활선 측정만으로는 곤란하다. 따라서 활선측정을 보완하는 정전진단측정이 필요하다.

표33. 맥동검출법의 판정기준 예

검출전류	쉬스절연	판정	조 치
0.05nA이하	Rs : 1MΩ이상	A	사용계속 정기점검 주기로 측정한다.
0.05nA초과 0.2nA미만		B	사용계속, 단, 주주의 반년이내에 재측정, 경향감시한다.
0.2nA이상		C0	가능한 빨리 정지하여 절연총 절연을 정밀진단 (직류누설전류법)에 의해 판정
-	Rs : 1MΩ미만	C1	주절연은 정밀진단(직류누설전류)으로 판정 쉬스의 불량개소를 조사, 가능한 부분보수를 실시

표34. 쉬스절연과 본체 절연총절연의 조합과 측정결과

	CASE 1	CASE 2	CASE 3	CASE 4
주절연	O	X	O	X
쉬스	O	O	X	X
(측정)	O	X		