

고압전력케이블 현장진단시험용 종합 직류시험설비의 검토

류희석\*, 강동식, 심종태, 이호진  
한국전기연구소, 한국전기연구소, (주)태광, (주)태광

Design of a composite diagnostic DC test apparatus for high voltage power cable

Ryoo, Hee-Suk, Kang, Dong-Sik, Sim, Jong-Tae, Lee, Ho-Jin  
KERI, KERI, TAEKWANG, TAEKWANG

**Abstract** - Developments of effective and economic diagnostic apparatus for industrial plastic insulated high voltage power cables are in discontented condition still. Some report told that DC high voltage was damaged plastic insulation of a partially aged power cable to lead breakdown easily. But now, we have no alternative tools of DC diagnostic apparatus, and we try to reduce a possibility of hazard DC diagnosis. DC diagnostic apparatus still have many advantages to field cable engineer, like low price, portability, easy applications and sufficient data.

Main hazard of DC diagnosis is excessive high of applied voltage. Recent developments for DC diagnosis use considerably low voltage. But new test methods need special measuring device and manipulator, like high input impedance voltmeter, low leakage current high voltage switches, etc. So that reason, new DC diagnostic devices are normally very expensive and have low efficiency, economically. We try to design a composite test device for 3~4 newly developed method, have economical benefit th industrial engineer.

1. 서 론

고압·특고압 플라스틱 절연 전력케이블에 대한 유효한 현장용 진단설비가 아직 개발되지 못하고 있다. 현장진단 시험에 사용되는 직류 고전압이 플라스틱 절연 전력케이블에 나쁜 영향을 준다는 보고가 있으나, 적절한 대체수단이 없는 현재로서 나타난 문제점을 해결 또는 최소화할 수 있다면 운반의 편리성, 경제성 등 장점이 많은 직류진단설비는 산업현장에서 효율적으로 사용될 수 있을 것이다.

직류진단시험의 단점을 최소화하면서 장점을 살릴 수 있는 시험법들을 검토하고 산업현장 적용을 위한 경제성과 효율성의 확보를 위해 최근 개발된 여러 가지 진단법을 실시할 수 있는 복합진단설비를 검토·설계했다.

2. 본 론

2.1 직류시험법 및 시험설비의 검토

XLPE전력케이블의 직류 비파괴진단시험으로서 가장 먼저 사용된 방법은 지절연케이블에서부터 사용된 누설전류측정법이다. 고전적인 누설전류시험법은 인가전압이 지나치게 높고 측정결과가 온·습도 등 주위환경의 영향을 많이 받기 때문에 성극비, 불평형을, 약점비, CR값 등을 분석함으로써 흡수전류와 충전전류의 영향을 최소화하는 방법이 적용되기도 하고, 주위환경의 영향을 주로 받는 기중방전전류와 표면누설전류를 최소화하기 위한 광fiber측정법, 직류peak전류법, 고감도측정법 등

개선된 측정법이 사용되기도 하였으나 근본 문제점을 해결하지는 못하였고, 새로운 시험법들이 개발되었다.

XLPE는 무극성 고분자이기 때문에 정전계 분극은 완화시간이 짧은 전자분극의 형태로 나타나며, 열화 되지 않은 상태에서는 직류 충·방전전류가 단시간에 일정 값에 도달하며 절연체에 측정되는 흡수전류 및 전류전하도 거의 없다고 할 수 있다. 그러나 XLPE에 OH기와 carbonyl기 등 극성기를 갖는 수tree가 발생하면 완화시간이 긴 공간전하분극(이온분극)이 형성되기 때문에 직류 충·방전시 그림1.(b)와 같은 흡수전류 및 역흡수전류가 발생한다. 이 전류의 시간변화에 대응하여 절연체에는 그림1.(c)와 같은 흡수전하, 잔류전하가 발생한다.

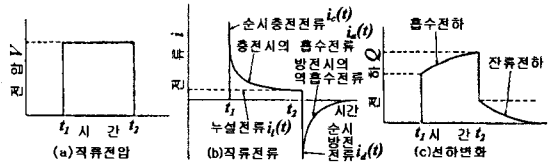


그림1. 직류 충·방전시 전류 및 전하의 시간적 변화  
이러한 수tree발생에 따른 절연체의 직류전하의 움직임에 착안하여 새로운 진단법들이 개발되었다.

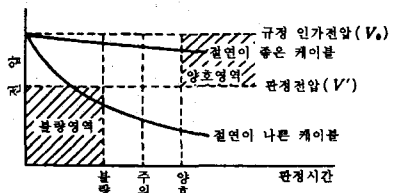
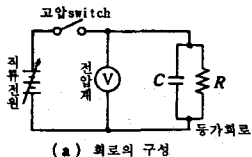
- (1)직류전압인가 후 도체를 개방하고 전위감쇄량을 측정 (전위감쇄법)
- (2)직류전압인가 후 충전전하를 제거하고 다시 개방된 도체의 잔류전압을 측정(잔류전압법 또는 회복전압법)
- (3)직류전압인가 후 충전전하를 제거하고 교류전압을 인가하면서 잔류전하를 측정(잔류전하법)
- (4)직류전압인가 후 충전전하를 제거하고 역흡수전류를 측정(역흡수전류법)

2.1.1 전위감쇄법

인가전압을 낮추면 누설전류가 매우 적어진다. 측정이 어려운 이 미소전류보다 전하량의 누설에 의해 감소되는 전하의 양, 전압을 측정하는 방법이다.

실제로는 그림 2.(a)와 같은 회로에서 케이블에 직류고전압을 인가하고 전원을 분리한 다음 전압계만을 연결하여 전압이 감쇄되는 그림2.(b)와 같은 도체전압의 시간적 변화를 기록한다.

전위감쇄법의 특징은 ①케이블에 남아있는 전



(b) 측정량의 관계

그림2. 전위감쇄법의 측정원리

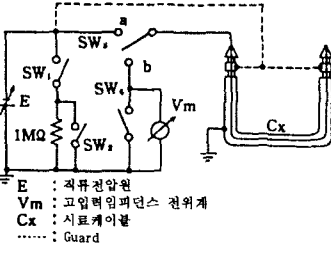
압을 측정하므로 전원전압 변동의 영향을 받지 않으며, ②방전시간은 케이블의 CR로서 결정되기 때문에 정격전압(절연두께), 길이, 단면적 등과 무관하여 측정 결과를 케이블의 길이에 따라 환산하지 않아도 된다. ③측정회로가 Open loop이기 때문에 유도잡음이 최소화되어 고감도측정이 가능하다는 장점이 있다.

그러나 기본적으로 누설전류측정과 같은 범주이기 때문에 케이블 종단접속재 표면의 오손 및 흡습, 습도로 인한 기중 방전전류 등의 영향을 많이 받는다. 특히 측정기의 선택과 습도의 영향에 주의 할 필요가 있다.

또 하나의 주의사항은 회로에 포함된 유일한 측정기인 전압계의 입력임피던스에 대한 사항이다. 전압계의 입력임피던스가 충전전하 방전시의 절연저항 값보다 낮을 경우, 측정되는 방전경향이 시료의 특성보다는 전압계 특성을 나타내므로 시료에 따른 측정값의 차이가 적어 측정감도를 낮추게 된다. 고감도 측정을 위해서는 전압계의 입력임피던스가 케이블 절연저항보다 커야한다. 저절연 케이블의 경우 절연저항이 낮은 편이기 때문에 수백MΩ정도이면 충분하나 XLPE케이블의 경우에는 케이블 자체의 임피던스가 대단히 높기 때문에 측정기의 입력임피던스가  $10^{10}\Omega$  이상이 필요하게 되어 주의를 요한다.

### 2.1.2 잔류전압법(회복전압법)

수tree열화 된 XLPE케이블에 전압인가 후, 도체를 접지하고 다시 개방하면 시간 경과에 따라 어느 정도의 전압이 도체에 회복된다. 이 절연체 내의 공간전하 또는 주입전하에 의해 발생하는 시간적인 지연 특성을 갖는 전압을 잔류전압 또는 회복전압이라 부르며 XLPE케이블의 수tree 열화진단에 이용한다



측정순서	SW <sub>1</sub>	SW <sub>2</sub>	SW <sub>3</sub>	SW <sub>4</sub>
직류파전	개	개	a	폐
고저항검지	폐	개	a	폐
완전검지	폐	폐	b	폐
잔류전압측정	폐	폐	b	개

그림3. 잔류전압 측정회로 표1. 잔류전압의 측정조건

파전 전압	1kV/mm <sup>2</sup> 절연두께
파전 시간	10분
접지 시간	10초
전압 측정시간	10분

### 2.1.3 잔류전하법

잔류전하법은 잔류전압법에서 회복전압으로 측정하는 절연체의 공간전하, 주입전하 또는 잔류전하를 교류전압을 이용 외부회로전류(교류방출전류  $I_{dAC}$ )로 추출하고 교류방출전류 시간적분( $Q_1 = \int I_{dAC}(t) dt$ , 잔류전하)으로 열화진단을 시행하는 방법이다.

수tree열화 된 XLPE케이블에 직류전압인가 후, 도체 접지 시 방출전류  $I_d$ (초기방출전류) 및 그 후의 교류방출전류  $I_{dAC}$ 를 측정한다. 결과인 그림4.에서 초기방출전류가 감소된 후에도 상당한 양의 전하가 절연체 중에 잔류하고 있는 것을 알 수 있다. 이와 같은 구속력이 강한 잔류전하의 존재는 수tree 열화XLPE케이블에 교류전압을 인가하는 경우와 같은 형태로 절연체 안으로 주입에 의

한 전하축적이 있다는 것을 시사하고 있는 것이다.

일반적으로 그림5.와 같은 회로에서 직류전압을 일정한 시간동안 인가(전하주입)한 후, 초기방출전류가 최소로 일정값이 될 때까지 도체를 접지(역흡수전하 방출)한다.

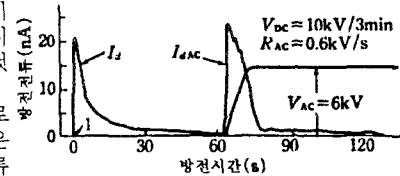
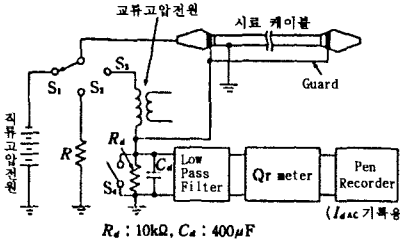


그림4. 수tree열화 케이블 방전전류변화

한 후, 초기방출전류가 최소로 일정값이 될 때까지 도체를 접지(역흡수전하 방출)한다. 접지시간은 3~10분 정도이고, 초기방출전류 감쇄 후, 측정기 영점을 맞춘다. 이 과정에서 외부유도전압 및 측정기의



순서	SW <sub>1</sub>	SW <sub>2</sub>	SW <sub>3</sub>	SW <sub>4</sub>	과 정	시간(추천안)
I	○	×	×	○	전하주입	10분( $t_{dc}$ )
II	×	○	×	○	역흡수전하 방출	5분( $t_e$ )
III	×	×	○	×	잔류전하 측정	1분( $t_o$ )

### 그림5. 잔류전하 측정회로

Offset전압이 제거된다. 다음으로 교류전압을 일정 비율로 인가하여 잔류전하 및 교류방출전류를 측정한다.

이 방법은 직류와 교류가 모두 필요하지만 특성 값이 비교적 크기 때문에 외부잡음 영향이 적고  $\tan \delta$  등과 다르게 특성 값이 열화 되지 않은 부분보다는 열화부분의 특성에 의해 결정되기 때문에 국부적인 열화의 진단에 효과적이다는 장점이 인정되고 있다. 잔류전하측정법은 미소 열화현상의 진단에 적합한 것으로 평가된다.

### 2.1.4 역흡수전류 측정법

그림6.과 같이 수tree열화 케이블은 정상에 비해 손흡수전류가 관찰된다. 원인은 수tree열화부에서의 공간전하분극현상 가운데 완화시간이 긴 분극현상이 포함되어 있기 때문으로 추정되고 있다. 역흡수전류 특성은  $\tan \delta$ 와 같은 형태로서 케이블 전체 길이의 평균적인 열화 특성을 나타내는 것이지만 DC0.1~1kV 정도의 저전압, 소용량으로 측정이 가능하므로 측정장치 자동화가 쉽고, 측정 시 위험성이 적다는 장점을 가지고 있다.

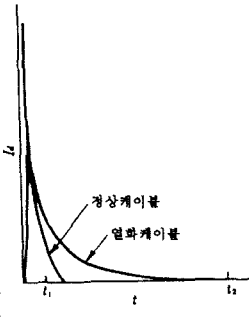


그림6. 역흡수전류특성

역흡수전류는  $10^{-9} \sim 10^{-8} A$  정도의 미세 값이므로 측정시 아래 사항들을 잘 이해하여 외부로부터의 외란 유입을 충분히 고려해야 한다.

- ① 직류전압의 발생 : 수분침투로 열화가 심한 경우와 관통 수tree의 경우에는 전압인가 없이도 수십~수백mV의 직류전압이 관찰된다. 이온에 의한 국부전지작용으로 추정되고 있지만 역흡수전류 측정에 장애가 되기도 하고 이 발생전압 자체를 열화판정의 지표로 삼기도 한다. 따라서 측정에 앞서 직류발생전압의 유무를 측정할 필요가 있다.
- ② 케이블 단말부 열화 : 케이블 종단 오손은 외란을 발생시킨다. 특히 종단접속상 내부가 흡수열화 되어있는 경우, 잔류전하 증가 원인이 된다.
- ③ 타 회선으로부터의 유도 : 측정선로와 병렬로 포설되어 있는 선로로 인하여 수백mV의 교류전압이 유기되는 경우가 있어 Filter삽입 등 조치가 필요하다.

측정은 순시방전전류의 영향 제거를 위하여 전압인가 종료 후 단시간 도체를 접지하고 일정시간( $t_2-t_1$ )에서의 방전전하를 측정한다. 자동측정에서는 시료케이블에 직류 1kV를 인가한 후 3초간 도체를 접지하고, 접지 개방 후 30초의 역흡수전류 적분치Q와 캐이블C를 자동 측정하여  $[(Q/C) \times 100]$ 을 표시한다. 전압인가시간은 케이블 길이에 따라 변화되며, 1kV인가 시 누설전류 및 수tree 열화부의 국부전지작용 발생전압도 측정 가능하다.

### 2.1.4 필요시험설비의 검토

각 시험법  
에서 특징적  
으로 사용되  
는 설비들을  
표2.에 종합  
하였다. 이  
중 기록계,  
고감도전류계,  
및 지역여파  
기는 상용 계  
측기 또는 상  
용module을 사용할 수 있으므로 제외하고 나머지 설비의 제작 필요성 또는 가능성을 검토한다.

표2. 새로운 시험법의 사용기기

시험법 사용기기	전위 감쇄	잔류 전압	잔류 전하	역흡수 전류
시험전원	●	●	●	●
기록계	●	●	●	●
고압switch	●	●	●	●
고입력저항 전압계	●	●		
지역 여파기			●	
잔류전하 측정기			●	
고감도전류계				●

용module을 사용할 수 있으므로 제외하고 나머지 설비의 제작 필요성 또는 가능성을 검토한다.

의뢰기, 집진기 등에 많이 사용되는 직류전원은 주로 전류부하의 안정성에 특성을 갖춘 설비이기 때문에 누설전류만 부담하면서 출력전압에 대해 높은 안정성을 필요로 하고 출력을 영전압에서부터 조절해야 되는 진단설비용 전원은 새로 설계·제작하는 것이 경제적·효율적이다.

switching module은 저전류 고전압의 차단이 목적이므로 전류부하 차단이 목적인 상용 제품보다는 누설전류가 적고 고전압의 이격이 확실한 구조로 제작할 필요가 있다. 고입력저항 전압계와 잔류전하측정기도 기존 상용제품은 단일목적에만 사용되는 고도의 자동화된 외산 설비로서 가격이 지나치게 높아 경제성 있는 module을 제작할 필요가 있다. 여기서는 우선 기본이 되는 전원장치와 고입력저항 전압계에 대해 설계하였다.

### 2.2 직류전원설비의 설계 및 제작

직류고전압의 발생원리는 정류형과 정전형이 있다. 정전형은 Van de Graaff발전기로 대표되는 고전적인 발생법으로서 2,700kV 2.1mA 정도를 얻기도 하였다. 최근 고전압 정류소자의 개발로 정류형이 주로 사용되고 있으며 산업체에서 필요한 정도에는 편리한 방식이다. 교류에서 직류를 발생시키는 대표적인 회로로서 반파·전파 정류회로와 함께 고전압발생에 사용되는 Delon-Greiner회로, Villard회로, Zimmermann회로, Schenkel회로, Cockcroft-Walton회로 등이 있다. 일반적인 Cockcroft-Walton회로에도 부하특성 개선을 위해 대칭형, 대칭inverse형 등이 있다.

운용중 선로의 새로운 시험법들에서는 10kV가 사용되고 있다. 직류전원 개발목표는 12kV, 3mA를 개발 목표로 하였다.

기본회로로 일반Cockcroft-Walton회로를 2단으로 사용하였다. 출력전압 변동의 최소화와 현장전원인 직류 12V로부터 150kHz 구형파 교류를 발생시켜 페라이트 코어 변압기로 승압하고 다시 직류전압으로 배압정류하였다. 다음 그림7.은 시험제작된 직류전원module로서 다음과 같은 특성을 갖는다.

- 부하시 최대 ripple 전압 : 15.91V (0.13%)
- 부하시 평균출력전압 : 11.94kV (99.5%)
- 부하시 Voltage drop : 53.0V (0.44%)

### 2.3 고 입력저항 전압계의 설계

전압감쇄법 및 잔류전압측정법에서 사용하기 위한 것으로 공통특성은 입력impedance가  $10^{15}$ Ω정도가 필요

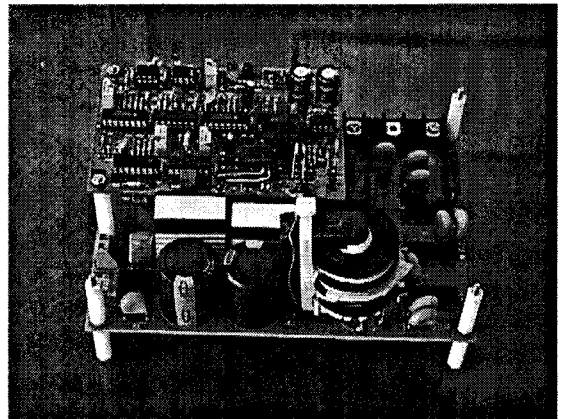


그림7. DC12kV 시험전원module  
하다는 것이고 서로 다른 점은 측정범위이다. 따라서 수십kV에서 수십V까지 범위조정이 가능해야 한다.

직류고전압을 측정하는 방법으로는 일반적으로 구 gap, 정전저압계, 고저항배율기, 저항분압기에 의한 방법이 있다. 표준화된 구gap법은 수십kV 이상에서 사용되며, 정전전압계는 전압범위와 선형성에 문제가 있다. 저항배율기와 저항분압기는  $10^9 \Omega$  이상의 입력임피던스를 확보하면 측정전류가 너무 적어 Noise와의 구분이 어렵고 지시계기에도 문제가 있다.

회전전압계(generating voltmeter, 또는 rotary voltmeter)와 진동전압계(Swing voltmeter)는 고전압전극과 접지전극사이의 콘덴서 정전용량을 주기적으로 변화시켜 그 충·방전에 따른 전하의 흐름을 측정함으로써 콘덴서의 충·방전을 유발시키는 인가전압의 크기를 측정하는 것이다.

회전형 전계측정기(ceiling-mounted type rotary voltmeter, 뇌 관측 시 지상 전계강도 측정기로 사용되는 장치는 field mill이라고 부른다.)는 앞서의 회전전압계와 같은 원리로 고전압전극에 대항하는 접지전극 표면의 유도전하의 변화를 이용하고 있다. 그림8.에서

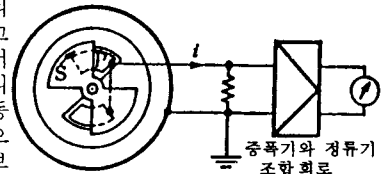


그림8. 회전형 전계측정기

따라 노출되었다가 S에 의해 가려지는 상황이 반복해서 발생한다. 따라서 고전압전극에서 출발한 전기력선은 P에 도달하기도 하고 S에 의해 차폐되기도 하기 때문에 P에 생기는 유도전하도 발생·소멸을 반복하게 된다.

본 연구에서는 제작상 편의성 검토 결과 회전원판속을 선정하고 12/6/1/0.5/0.1kV 등으로 측정범위를 변화시킬 수 있는 전압계를 설계 제작 중이다.

### 3. 결 론

본 연구는 "지중케이블 진단 및 유지보수기술 개발"을 위한 엔지니어링기술 개발사업으로서 산업현장용 진단설비 개발을 위한 경제적·효율적인 직류시험설비 개발과정을 진행하고 있다. 우선 직류전원과 고입력저항 직류전압계를 설계·제작하고 있으며 계속 고압switch와 교류가 복합되는 잔류전하측정기도 개발할 예정이다.

### (참 고 문 헌)

- [1] "특별고압 회전기·케이블의 절연열화진단기술", 전기학회기술보고 II부 No. 267, 1988