

직류전압감쇄법을 이용한 전력케이블의 절연열화진단

이동영, 김상준, 김주용, 송일근
전력연구원 전력계통연구실

Diagnostics of Power Cables using DC Voltage Decay method

Dong-Young Yi, Sang-Joon Kim, Ju-Yong Kim and Il-Keun Song
Korea Electric Power Research Institute (KEPRI)

Abstract - In this work, we have developed the off-line diagnostic system for power cable insulation using DC voltage decay method to diagnose the insulation degradation of underground power cables. Measurement errors of diagnostic system are less than 1% for $1T\Omega$ internal resistor. We have also developed measurement and diagnostic programs for win95 which is suitable for the database construction and the management of data. We could conclude that it is possible to apply this system to the multi-grounded underground cable systems.

1. 서 론

도시화의 증가와 환경문제의 대두로 인해 전력설비의 지중화가 급속히 진행되고 있고 이에 따라 전력공급의 안정성 및 신뢰도 확보를 위해 전력설비 절연열화예방진단의 필요성이 절실한 실정이다. 진단방법은 직류누설전류법, 유전정전법, 흡수전류법 등의 사선진단법과 직류성분법, 교류손실전류법, 저주파중첩법등의 활선진단법이 사용 중에 있거나 이미 개발되어 있으며 최근에는 부분방전의 측정을 통한 사선 및 활선 상태에서의 진단장치 개발에 대한 연구가 매우 활발하다. 전력연구원에서는 기존에 사용해 오던 직류누설전류법(시험전압 DC 30kV)이 공간전하축적등의 문제가 있어 현재사용을 제한하고 있는 실정이다.

본 논문은 상대적으로 시험전압이 낮고 다중접지 시스템에 적용가능하며 케이블구조에 영향을 받지 않는 시험법인 직류전압감쇄법을 이용한 진단장치를 개발하여 현장적용성을 검토하고 현장 데이터의 체계적 관리를 통해 향후 새로운 진단장치의 개발과 진단신뢰도를 향상시키는데 그 목적이 있다.

2. 이론적 고찰

직류전압감쇄법은 케이블에 일정시간 동안 직류전압을 인가하였다가 제거한 후 케이블에 충전된 전하가 케이블절연체를 통해 방전되는 것을 관찰하여 케이블의 절연상태를 판정하는 방법으로 측정이 간단하고 비교적 짧은 시간에 열화판정이 가능하며 또한 측정신호가 전압이므로 외부잡음등의 영향을 적게 받는 장점이 있다.

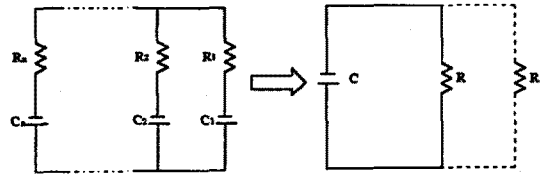
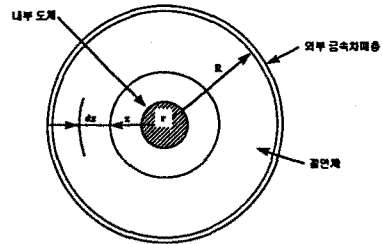


그림 1. 단심케이블의 구조 및 등가회로

그림 1.은 단심케이블의 구조와 그 등가회로이다. 만약 케이블의 열화가 심해지면 위 등가회로에 저항 R' 가 병렬로 연결되는 효과가 나타날 것이다. 그림 2.는 직류전압감쇄법 시험의 결선도이며 R_e , C_e , R_m 은 각각 케이블의 등가저항, 정전용량, 측정장치 내부임피던스이다. 케이블에 직류전압을 인가한 후 스위치(SW)를 개방시키면 C_e 에 충전된 전하가 R 을 통해 방전된다. 이때 스위치 개방후 초기 충전전압을 V_0 라고 하면 시간에 따른 전압 V 의 변화식은 식(1)과 같다.

$$V = V_0 e^{-\frac{t}{\tau C}} = V_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (1)$$

즉 시정수 τ 가 클수록 전압감소는 완만하고 절연이 양호하다고 볼 수 있다. 그림 1.과 같은 단심 케이블의 경우 도체표면에 단위길이당 전하Q가 충전되었을 때 도체와 외부 차폐층 사이의 전위차 V, 케이블 단위길이당 정전용량 C 그리고 단위길이당 저항 R은 식 (2),(3),(4)와 같다.

$$V = \int_r^d E \cdot dx = \frac{Q}{2\pi\epsilon} \ln \frac{d}{r} \quad (2)$$

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{2\pi\epsilon}{\ln \frac{d}{r}} \text{ [F/m]} \quad (3)$$

$$R = \int_r^d \frac{\rho}{2\pi x} \cdot dx = \frac{\rho}{2\pi} \ln \frac{r}{d} \text{ [\Omega m]} \quad (4)$$

위 (2)(3)(4)식으로부터 시정수 τ 를 다음 식과 같이 구할 수 있다.

$$\tau = R \times C = \epsilon \cdot \rho \quad (5)$$

위식에서 ϵ 과 ρ 는 각각 케이블절연체의 유전율과 저항률이다. 이 식에서 보는바와 같이 전압감쇄의 속도를 나타내는 시정수 τ 는 절연체 고유의 물성인 유전율과 저항률만의 함수가 되어 케이블의 크기나 길이와 같은 케이블구조와 무관하게 케이블의 절연열화 상태를 판정할 수 있다.

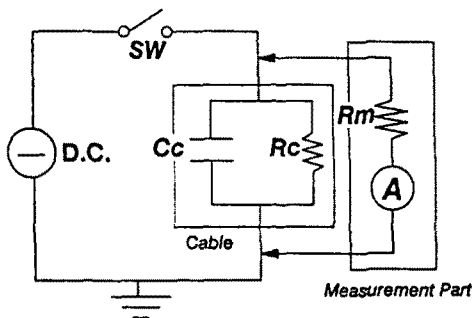


그림 2. 직류전압감쇄시험 개념도

3. 진단장치의 구성 및 시험

3.1 진단장치의 원리 및 구성

본 논문은 케이블의 열화현상을 검출해내는 수단으로 직류전압의 시간적 감소를 측정하는 직류전압 감쇄법에 관한 연구가 주요 목적이다. 따라서 피계측량인 전압의 정확한 측정이 올바른 열화진단을 위해 필수적이다. 그러나 접촉식 계측기를 이용한

어떠한 계측의 경우에도 측정하고자 하는 물리량의 왜곡이 없이는 계측이 불가능하며 그 정도의 차이만이 존재한다. 전압계는 저항식과 정전식의 두 가지로 대별할 수 있으며 측정대상인 지중케이블의 경우 등가절연저항과 용량이 매우 크기 때문에 내부저항이 큰 정전전압계(electrostatic voltmeter)를 사용해야하나 오차범위가 최하 2.5%이상이고 외부진동에 민감하며 목측만이 가능하여 오차가 매우 클 뿐만 아니라 무게가 약 15kg정도로 무겁고 크기가 커서 현장적용이 매우 어렵고 정확한 열화상태의 판정이 사실상 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 측정과 판정의 자동화를 위해 상기와 같은 정전전압계의 결점을 극복할 수 있는 부하효과를 고려한 저항식 측정법을 이용하여 진단장치를 구성하였다.

일반적으로 22.9kV CN/CV 케이블의 절연저항과 정전용량은 각각 1km당 1.5~3G Ω , 0.21~0.38 μ F정도로 매우 큰 값을 지니고 있다. 이때 시정수 τ 는 다음 식(6)과 같이 표현된다.

$$\tau = R \times C = C_c \times \frac{R_m R_c}{R_m + R_c} \quad (6)$$

위 식에서 보면 R_m 이 R_c 에 비해 크면 클수록 측정오차가 감소한다. 따라서 측정오차를 1% 이내로 유지하기 위해서는 $R_m : R_c$ 가 100 : 1 이상이어야 하므로 케이블의 절연저항이 3G Ω /km 정도라면 케이블의 길이가 0.5km, 1km일 경우 측정장치의 내부저항은 각각 600G Ω , 300G Ω 이상이 되어야 한다. 본 연구에서는 우선 구입 가능한 최대저항인 10G Ω 60개를 직렬 연결하여 내부저항이 600G Ω 인 측정모듈과 DOS용 측정 및 진단프로그램을 개발하여 현장에서 채취한 시료를 대상으로 시험을 실시하였다. 그러나 시제작된 진단장치는 저항들간의 연결불완전으로 인한 stray capacitance 발생과 이로 인한 전압, 전류간의 시간지연 및 고압부에서의 포화현상이 나타나고 또 기계적 충격에 매우 취약하며 전체 진단장치의 무게가 무거워져 휴대가 불편한 단점과 또 케이블 길이가 500m이하인 경우 오차가 1% 이상이 되어 짧은 선로를 측정대상으로 하는 경우 측정오차의 증가하고 외부습기 유입시 표면저항의 감소로 인한 저항셀 전체의 등가저항이 600G Ω 이하로 감소하는 등의 심각한 문제가 있었다.

3.2 진단장치의 개선

본 연구에서는 이러한 단점을 보완하기 위해 내부저항을 내압 10kV, 1T Ω 의 단일저항으로 대체하여 전압, 전류시간지연 및 비선형성을 제거함으로써 측정의 신뢰도 및 안정성을 높이고 실선로에서 통상의 측정구간인 300m 이상에서 1%이하의 측정오차를 확보할 수 있도록 하였다. 또한 매우 큰 표

면저항과 발수성을 지닌 Teflon을 이용하여 연면누설거리를 확보할 수 있는 고저항셀을 특별히 제작함으로써 외부의 습기 등으로 인한 표면저항의 영향을 최소화하였다. 그리고 시험종료후 방전시 발생하는 surge로 인한 입력부의 손상을 방지하기 위해 측정모듈상에 보호회로를 구성하였다. 진단장치의 구성은 그림 3.에서 보는 바와 같이 직류전압인가시 누설전류를 측정하고 SW1을 개방시킨 후 직류감쇄전압을 측정할 수 있도록 함으로써 기존의 누설전류시험을 동시에 실시할 수 있도록 하였다.

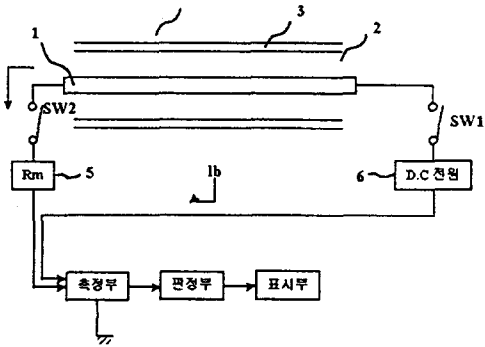


그림 3. 진단장치 개념도

상기와 같이 측정된 데이터는 측정모듈의 직렬포트(serial port)를 거쳐 PC와 인터페이스 시키고 직류누설전류와 감쇄전압의 실시간 표시가 가능하도록 측정프로그램을 구성하였으며 이러한 측정결과를 바탕으로 케이블의 열화상태를 판정할 수 있는 판정프로그램을 별도로 작성하였다. 측정 및 판정 프로그램은 win95환경하에서 작동하도록 하였으며 측정결과 및 진단기준을 데이터베이스화할 수 있도록 소프트웨어를 구성함으로써 진단시험결과와의 관리를 용이하게 하고 진단결과가 축적됨에 따라 진단기준의 신뢰도를 높일 수 있도록 하였다. 진단프로그램의 구성을 그림 4.에 나타내었다.

직류전압감쇄법에 의한 케이블열화판정기준은 현재까지 한전에서 시행하고 있는 직류누설전류시험법의 기준치를 근거로 작성하였으며 케이블규격에 따른 22.9kV CN/CV 케이블의 기준시정수를 표 1.에 나타내었다. 표 1.은 잠정적 판정기준이며 현장시험을 통한 데이터의 축적과 함께 수정, 보완함으로써 진단의 신뢰도를 계속 높여 나가도록 할 예정이다.

표 1. 22.9kV CN/CV 케이블의 기준시정수

케이블규격[mm ²]	60	200	325
정전용량[μF/km]	0.21	0.32	0.38
시정수 τ [초]	양호 10[μA/km]	630	960
	불량 50[μA/km]	126	192

3.3 진단장치 적용시험

이상과 같이 구성한 진단장치를 이용하여 현장에서 채취한 케이블과 현장선로를 대상으로 적용시험을 실시하고 그 결과를 그림 5.에 나타내었다.

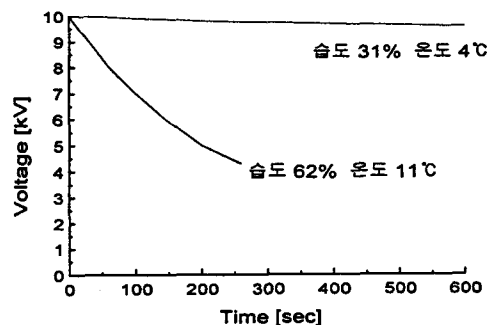
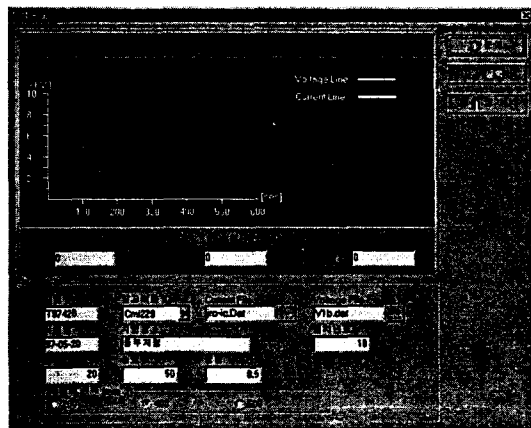
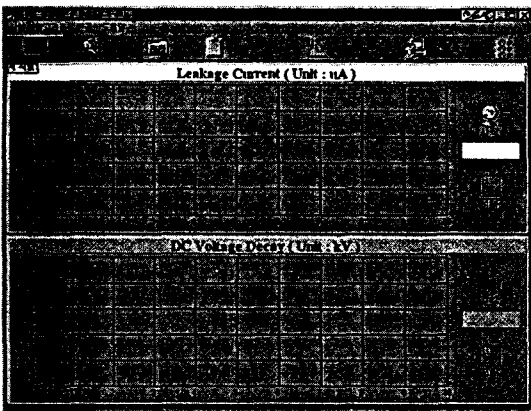


그림 5(a). 직류감쇄전압 시험결과(제작년도 84년, 325mm², 길이 38m)

그림 5(a).는 제작년도 84년, 325mm², 길이 38m의 현장채취시료에 대한 시험결과이다. 동일 케이블의 경우에도 습도에 따라 상이한 결과를 보이고 있으며 이는 채취시료의 경우 케이블 길이가 짧아 등가저항이 크므로 측정오차가 증가할 뿐만 아니라

그림 4. 측정 및 진단프로그램

상대적으로 케이블 단말부의 영향이 크므로 습도가 높을 경우 케이블 중단부의 영향이 증가하여 신뢰성 있는 절연열화판정이 어려움을 나타낸다. 길이가 비교적 긴 현장선로의 경우에도 단말부의 영향이 상대적으로 작긴 하나 케이블절연체 열화상태의 정확한 판정을 위해서는 상온의 건조한 날씨에 진단시험을 시행함이 바람직함을 알 수 있다. 그림 5(b)는 포설년도 91년, 공장 1550m, 325mm²의 현장케이블에 대한 시험결과이며 시험조건은 온도 25℃, 습도 33%이다. 현장시험결과 케이블상태는 아주 양호한 것으로 판정되었으며 측정설비의 현장적용시 우려되었던 잡음이나 surge의 유입에 의한 교란 등은 무시할만한 수준이었다.

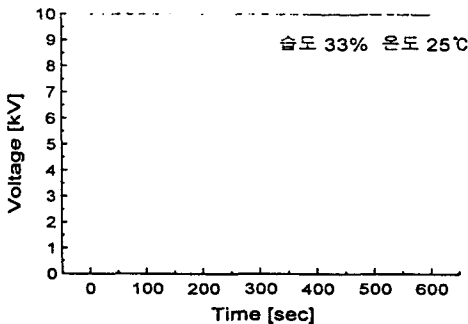


그림 5(b). 직류감쇄전압 시험결과(설치년도 91년 11월, 325mm², 길이 1550m)

4. 결론

본 논문에서는 직류전압감쇄법을 기본 시험법으로 채택하여 케이블의 열화상태를 자동으로 판정하고 측정결과와 데이터베이스화가 가능한 진단시스템을 개발하고 그 적용가능성을 검토하였다.

직류감쇄전압의 측정법으로 부하효과를 고려한 저항식 측정법을 채택하고 기 개발한 측정모듈의 내부저항을 600GΩ에서 내압 10kV, 1TΩ의 단일저항으로 대체하여 전압, 전류시간지연 및 비선형성을 제거함으로써 측정의 신뢰도 및 안정성을 높이고 진단장치를 휴대 가능하도록 소형경량화하였으며 실선로에서 통상의 측정구간인 300m이상에서 1%이하의 측정오차를 확보할 수 있도록 하였다. 또한 Teflon을 이용한 고저항셀을 특별히 제작하여 외부의 습기 등으로 인한 표면저항의 영향을 최소화하였다. 그리고 직류감쇄전압의 측정에 선행하여 가압시 기존의 누설전류시험을 동시에 실시할 수 있도록 시스템을 구성하였다. 측정 및 판정프로그램은 win95환경 하에서 작동하도록 하였으며 측정결과 및 진단기준을 데이터베이스화할 수 있도록 소프트웨어를 구성함으로써 진단시험결과와 관리를 용이하게 하고 진단결과가 축적됨에 따라 진단기준의 신뢰도를 높일 수 있도록 하였다.

이상과 같이 제작된 진단장치를 이용하여 현장에서 채취한 시료케이블과 현재 사용중인 배전선로를 대상으로 적용시험을 실시한 결과 현장적용성이 있는 것으로 판단되었으며 측정 및 진단의 신뢰도를 높이기 위해서는 대표적 시험선로를 선정하여 지속적으로 장기적인 현장시험을 통한 데이터의 축적 및 분석이 필수적이라 하겠다.

또한 신뢰성있는 케이블의 수명평가 및 교체여부 결정을 위해서는 다양한 전기적진단방법의 일체화를 통한 종합적 비교분석 및 진단이 필요할 뿐만 아니라 선로의 사고이력, 케이블 포설환경등 다양한 요소에 대한 데이터베이스화를 진단과 동시에 실시하여 체계적인 판단을 할 수 있도록 해야할 것이다.

향후 시험전압을 5kV이하로 낮추어 진단시험이 절연체에 줄지도 모르는 영향을 최소화 할 수 있도록 장치를 개발하고 고압스위칭, 제어 가능한 고압 DC모듈, 측정보드의 PC 베이스화, 고속측정모듈개발등을 통해 누설전류뿐만 아니라 등온완화전류법 등의 측정이 가능한 종합적인 진단시스템을 개발하고 새로운 측정기법연구를 위한 토대를 마련할 예정이다.

[참 고 문 헌]

- [1] "전기설비의 진단기술", 일본전기학회, 1990.
- [2] "배전기재열화진단기술", 전기협동연구, 제43권, 제2호.
- [3] "배전케이블 수명예측 기준결정 및 열화진단 시스템 구축", 1차년도 중간보고서 전력연구원, 1996.