

케이블 절연열화진단과 실 계통 적용

이동영*, 김주용, 송일근
 위덕대학교 전기공학과*, 한전 전력연구원 전력계통연구소

Insulation Diagnostics of Power Cables and Application to Real Distribution System

Dong-Young Yi*, Ju-Yong Kim, Il-Keun Song
 Dept. of Electrical Eng., Uiduk University*, KEPCO KEPRI

Abstract - In this work, we have performed the application experiment for real distribution line to diagnose the underground power cables using DC voltage decay measurement system. We have also performed the Isothermal Relaxation Current test for the same distribution line using KDA-1. We could confirmed possibility of grading the insulation aging state of underground power cables. Therefore, we conclude that it is possible to apply DC voltage decay method to the real distribution line.

하다고 볼 수 있다. 단심케이블의 경우 도체표면에 단위 길이당 전하 Q가 충전되었을 때 시정수 τ 는 다음 (식 2)와 같이 표현된다.

$$V = V_0 e^{-\frac{t}{RC}} = V_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \quad \text{〈식 1〉}$$

위 (식 1)의 시정수 τ 는 다음 식과 같이 구할 수 있다.

$$\tau = R \times C = \epsilon \cdot \rho \quad \text{〈식 2〉}$$

위 식에서 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.

1. 서 론

국내 지중케이블의 노후화와 이에 따른 사고의 집중으로 현장에서 사고 전에 신속하게 대처할 수 있는 간편한 전기적진단장치의 필요성이 긴급하게 대두되고 있다. 전력케이블의 열화진단에 사용되는 시험방법은 직류법, 교류법, 초저주파법, 교직중첩법 등으로 대별된다. 기존에 사용해 왔던 직류누설전류법(시험전압 DC 30kV)은 고압의 직류전압을 장시간 인가함으로써 케이블절연체 자체에 공간전하축적등의 해악을 끼침이 보고됨에 따라 그 사용을 제한하고 있는 실정이다. 최근에는 등온완화전류법(Isothermal Relaxation Current)을 이용한 사선진단장치가 이미 개발되어 한전등의 선로에서 시사용 중에 있으며 국내에서는 직류전압감쇄법을 이용한 진단장치 시작품을 개발한 바 있다.

본 연구에서는 시작품 형태로 개발된 진단장치를 이용하여 실제 배전계통에서 현장시험을 실시하고 그 현장적용성과 절연열화진단 가능성을 검토하였다. 아울러 이미 상품화되어 사용중인 KDA-1을 동일 선로에 적용하여 직류전압감쇄법과의 비교시험을 행하였다.

2. 본 론

2.1 직류전압감쇄법

직류전압감쇄법은 케이블에 일정시간 동안 직류전압을 인가하였다가 제거한 후 케이블에 충전된 전하가 케이블 절연체를 통해 방전되는 것을 관찰하여 케이블의 절연상태를 판정하는 방법으로 측정이 간단하고 비교적 짧은 시간에 열화판정이 가능하며 또한 측정신호가 전압임대도 외부잡음등의 영향을 적게 받는 장점이 있다. 단심케이블의 경우 그 등가회로를 R-C 병렬회로로 볼 수 있으며 케이블의 열화가 심해지면 R-C 등가회로에 저항 R'가 병렬로 연결되는 효과가 나타날 것이다. 그림 1.은 CV 케이블의 등가회로 및 구조도이다. 케이블에 직류전압을 인가한 후 스위치 (SW)를 개방시키면 C₀에 충전된 전하가 R을 통해 방전된다. 이때 스위치 개방후 초기 충전전압을 V₀라고 하면 시간에 따른 전압 V의 변화식은 (식 1)과 같다.

시정수 τ 가 클수록 전압감소는 완만하고 절연이 양호

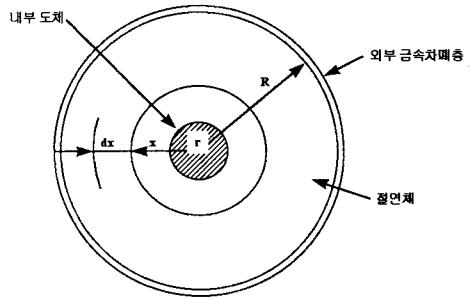
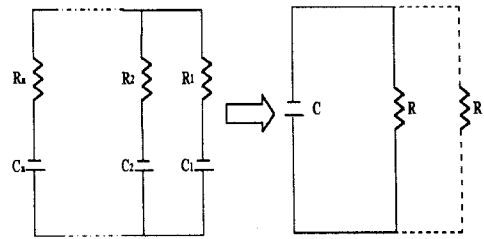


그림 1. CV 케이블의 등가회로 및 구조도

2.2 직류전압감쇄 시험장치의 구성

시험장치 구성의 핵심요소는 케이블의 열화현상을 검출해내는 수단으로 직류전압의 시간적 감소를 측정하는 직류감쇄전압의 측정이다. 따라서 피계측량인 전압의 정확한 측정이 올바른 열화진단을 위해 필수적이다. 그러나 접촉식 계측기를 이용한 어떠한 계측의 경우에도 측

정하고자 하는 물리량의 왜곡이 없는 측정이 불가능하며 그 정도의 차이만이 존재하므로 (식 3)과 같은 부하 효과를 고려해야한다. 그림 2.는 직류감쇄전압 측정시험의 개념도이다.

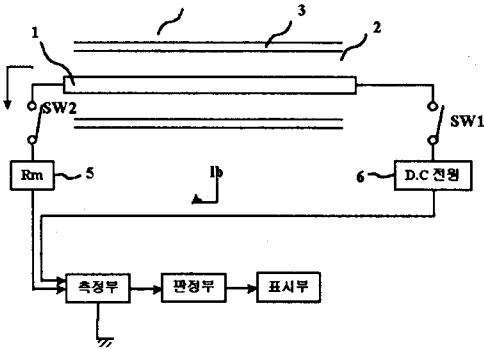


그림 2. 진단용 측정장치 하드웨어 구성도

일반적으로 22.9 kV CN/CV 케이블의 절연저항과 정전용량은 각각 km당 1.5~3 GΩ, 0.21~0.38 μF 정도로 매우 큰 값을 지니고 있다. 이때 시정수 τ는 다음 (식 3)과 같이 표현된다.

$$\tau = R \times C = C_c \times \frac{R_m R_c}{R_m + R_c} \quad \text{(식 3)}$$

위 식에서 보면 R_m이 R_c에 비해 크면 클수록 측정오차가 감소한다. 따라서 측정오차를 1% 이내로 유지하기 위해 본 시험에서는 측정장치의 내부저항을 내압 10kV, 600 GΩ 이상으로 하였다.

시험전원의 투입과 차단은 일단 수작업으로 행하였으며 측정결과는 진단용 컴퓨터에 내장된 실시간 데이터 표시 및 저장 프로그램에 의해 컴퓨터에 기록되며 시험 종료후 열화진단을 할 수 있도록 하였다. 시험전압은 22.9kV CN/CV 케이블을 진단대상으로 하여 10kV DC로 설정하였다. 시험전압의 투입 및 지속시간은 30분으로 하였으며 감쇄전압의 측정시간은 10분이다. 시험에 사용된 고압DC전원은 50kV, 3mA의 정격을 지닌 Glassman사의 직류전원이다. 그리고 시험종료후 방전시 발생하는 surge로 인한 입력부의 손상을 방지하기 위해 측정모듈상에 보호회로를 구성하였다. 진단시험의 절차는 직류전원 가압시 즉 충전시 직류전압감쇄법에 의한 진단을 보완하기 위한 보조시험으로 직류누설전류를 측정하도록 하고 충전종료후 전원을 제거하고 직류감쇄전압을 측정하도록 하였다.

2.3 등온완화전류법

등온완화전류법(Isothermal Relaxation Current)은 케이블에 일정전압을 인가하여 충분한 시간동안 충전시킨 후 방전전류의 과도성분을 측정하여 절연의 열화정도를 판정하는 것이다. 이때 방전전류의 과도성분은 직류전원 가압시 나타나는 과도성분 즉, 흡수전류와 유사하며 이 흡수전류는 분극에 의해 좌우되므로 방전시 과도전류도 절연체내에 수트리등의 결함이 존재하는 경우 이로 인한 성분이 상당히 큰 양으로 시간적으로 지연되어 나오게 된다. 즉, 건전요소에 의한 성분과 열화요소에 의한 성분은 그 크기와 시간적 발현이 상이하므로 이를 이용하여 절연열화 상태를 진단하게 되는 것이다. 아래 표 1.은 열화된 절연체내의 분극의 종류 및 완화시간을 보여준다.(2)

표 1. 분극의 종류 및 완화시간

분극의 종류	완화시간 [sec]	Trap level [eV]
Insulation volume	3 - 6	0.66 - 0.68
Layer Boundaries	12 - 80	0.70 - 0.76
Aging(수트리등)	150 - 250	0.77 - 0.80

본 시험에 사용된 시험장치는 독일 seba dynatronic사의 KDA-1이며 장치의 시험전압은 1kV DC이고 가압시간, 측정시간 각 30분씩 총 60분의 상당의 측정시간이 소요된다. 진단결과는 Aging Factor라는 정량화된 결과로 주어지며 이에 따라 New, Medium, Old, Critical의 네 가지 범주로 판정결과를 준다.

2.4 실 계통 적용시험

직류전압감쇄법의 실 계통 적용시험을 위해 한국전력 부산지사의 실제 배전계통에서 현장시험을 실시하고 그 현장적용성과 절연열화진단 가능성을 검토하였다. 아울러 이미 상용화되어 사용중인 KDA-1을 동일 선로에 적용하여 직류전압감쇄법과의 비교시험을 행하였다. 다음 그림 3.~ 그림 5.은 22.9kV CN/CV 325mm² 실 선로에 대한 직류전압감쇄 시험결과이며, 표 1.은 동일선로에 대한 등온완화전류 시험결과이다.

그림 3.을 보면 B상이 가장 열화된 상태이고 A상, C상의 순으로 케이블의 열화정도가 심함을 보여준다. 등온완화전류시험 결과를 보면 Aging Factor가 직류전압감쇄법의 결과와 비슷한 경향을 보임을 알 수 있다. 그러나 직류전압감쇄시험 결과에 의하면 -그 기준이 잠정적이긴 하나- B상은 불량, C,A상은 요주의 영역에 들어 있으나 등온완화전류법의 경우 B,C상 Critical, A상 old의 판정결과를 나타내었다. 현재의 상태로는 어떤 판정결과가 신뢰성이 있는지 판별하기는 쉽지 않으며 더욱이 판정결과를 케이블의 교체여부를 결정하기 위한 기준으로 삼기 위해서는 향후 계속적인 연구와 실 선로에 대한 시험결과 축적을 통해 그 기준이 재정립되어야 하리라 생각된다. 하지만 양 시험법 모두 Aging Factor 등에 의한 진단 대상 케이블의 열화정도에 대한 서열화는 가능하며 그 결과도 어느 정도 일치한다. 그림 4.의 경우도 그림 3.의 결과와 유사하며 직류전압감쇄법에 의한 열화정도의 서열화는 가능함을 확인하였다. 즉 두 시험결과를 보면 동일 D/L의 경우 상간 열화경향은 거의 일치하며 열화정도의 서열화도 신뢰성을 가질 수 있음을 알 수 있었다. 그러나 상이한 D/L의 경우 Aging Factor와 직류전압 감쇄정도의 절대적 비교는 곤란하다는 사실도 아울러 확인하였다.

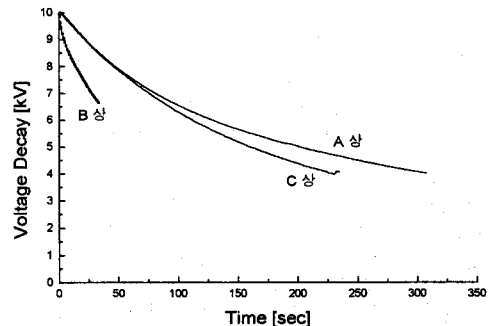


그림 3. 실 계통 적용결과(서면1-1PSW#4~고려 1-1PSW#4, 150m, 325mm², 1991)

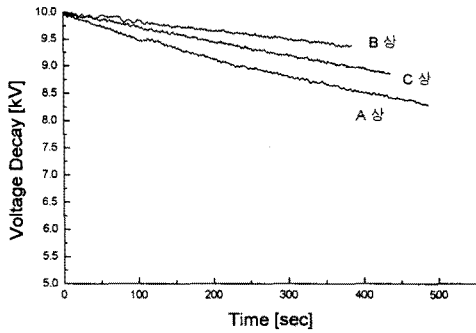


그림 4. 실 계통 적용결과(서면3-1PSW#4~서면 3PSW#1, 138m, 325mm², 1985)

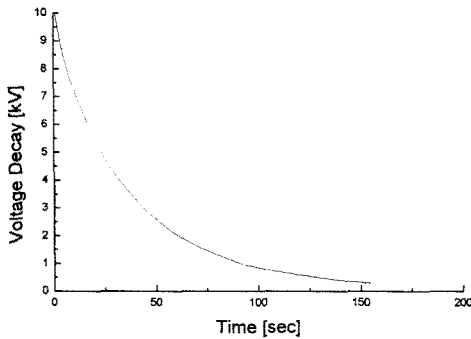


그림 5. 실 계통 적용결과(서면2-1PSW#4~서면 2PSW#1, 94m, 325mm², 1984)

그림 5.는 현장 여건상 A상의 경우에 대한 시험결과만을 보여주고 있다. 열화정도는 케이블의 절연상태가 극히 불량함을 보여주고 있으며 등온완화전류법에 의한 결과도 Aging Factor가 약 8.765에 달해 Critical 중에서도 매우 심각한 상태를 나타내고 있어 두 시험법의 열화경향 판정의 일치성을 확인할 수 있었다.

표 1. 등온완화전류 시험결과

구간명	선로환경	Aging Factor
서면1-1PSW#4~ 고려1-1PSW#4	150m, 325mm ² 1991	A상=1.864 B상=6.310 C상=2.883
서면3-1PSW#4~ 서면3PSW#1	138m, 325mm ² 1985	A상=2.924 B상=2.076 C상=2.513
서면2-1PSW#4~ 서면2PSW#1	94m, 325mm ² 1984	A상=8.765 B상 C상

결론적으로 직류전압감쇄법에 의한 전력케이블의 열화진단결과와 등온완화전류법(KDA-1)에 의한 결과는 동일 D/L의 경우 상간 열화경향 일치하고 따라서 두 시험법 모두 대상케이블의 열화정도 서열화는 가능함을 확인하였다. 그러나 직류전압 감쇄정도와 Aging Factor의 절대치 비교는 곤란하며 두 시험법의 신뢰성 여부와 그 결과의 절대적 비교는 향후 두 진단법의 열화요소별 검출성능에 대한 연구를 통해 확인되고 검증되어야 하리

라 생각된다. 즉, 직류전압감쇄법의 경우 열화형태나 요소가 어떠한가에 관계없이 대상 케이블의 전반적 절연저항의 저하여부를 판별하는데 비해 등온완화전류법은 그 원리상 수트리등에 의한 deep trap이 형성되면 이로 인해 변화하는 완화전류를 검출하는 것이다. 따라서 직류전압감쇄법이 미시적인 열화여부를 검출하기 곤란한 단점이 있는 반면 등온완화전류법은 수트리등이 발생하지 않은 열화는 검출이 힘들고 포설 또는 생산 초기 케이블의 경우 케이블 내에 포함되어있는 첨가물 등의 저분자량 물질이 deep trap으로 작용하여 건전케이블을 불량케이블로 오판할 가능성이 있다. 따라서 향후 두 시험법의 열화형태별 검출성능등에 대한 보다 면밀한 연구가 필요하며 두 시험법의 상호보완 방법에 대한 검토가 필요하리라 사료된다.

3. 결 론

본 연구에서는 직류전압감쇄법을 기본 시험법으로 채택하여 케이블의 열화정도를 측정하고 열화상태를 진단할 수 있는 진단장치 시작품을 이용하여 실 선로에서 진단시험을 향하여 그 적용가능성을 검토하였다. 아울러 상용화되어 사용중인 등온완화전류 시험장비를 동일선로에 적용하여 그 결과를 비교하였다.

본 연구에 사용된 직류감쇄전압 시험장치는 부하효과를 고려한 저항식 측정법을 채택하고 측정모듈의 내부저항은 600GΩ이상, 내압 10kV의 단일저항으로 하여 통상의 측정구간에서 오차가 1%이하가 되도록 하였다. 그리고 시험전원의 투입과 차단은 일단 수작업으로 행하였으며 측정결과는 진단용 컴퓨터에 내장된 실시간 데이터 표시 및 저장 프로그램에 의해 컴퓨터에 기록되며 시험종료후 열화진단을 할 수 있도록 하였다. 시험전압은 22.9kV CN/CV 케이블을 진단대상으로 하여 10kV DC로 설정하였으며 고압DC전원은 50kV, 3mA의 정격을 지닌 Glassman사의 직류전원이다. 그리고 시험종료후 방전시 발생하는 surge로 인한 입력부의 손상을 방지하기 위해 측정모듈상에 보호회로를 구성하였다.

시험결과를 보면 직류전압감쇄법에 의한 전력케이블의 열화진단결과와 등온완화전류법(KDA-1)에 의한 결과는 직류전압 감쇄정도와 Aging Factor의 절대치 비교는 곤란하나, 동일 D/L의 경우 상간 열화경향 일치하고 두 시험법 모두 대상케이블의 열화정도 서열화는 가능함을 확인하였다. 이상과 같이 직류전압감쇄법에 의한 실 선로에서의 열화판정 가능성을 확인하였으며 최소한 열화정도의 서열화에 대한 신뢰성 있는 판별은 가능함을 알 수 있었다. 그러나 두 시험법에 의한 결과의 절대비교는 어려우며 직류전압감쇄법의 경우 열화형태나 요소가 어떠한가에 관계없이 대상 케이블의 전반적 절연저항의 저하여부를 판별하므로 미시적인 열화여부를 검출하기 곤란한 단점이 있는 반면 등온완화전류법은 수트리등이 발생하지 않은 열화는 검출이 힘들고 포설 또는 생산 초기 케이블의 경우 케이블 내에 포함되어있는 첨가물 등의 저분자량 물질이 deep trap으로 작용하여 건전케이블을 불량케이블로 오판할 가능성이 있으므로 향후 두 시험법의 열화형태별 검출성능등에 대한 보다 면밀한 연구가 필요하며 두 시험법의 신뢰성 여부와 그 결과의 절대적 비교는 향후 두 진단법의 열화요소별 검출성능에 대한 연구를 통해 확인되고 검증되어야 하리라 생각된다.

(참 고 문 헌)

- (1) M. Beigert H.G. kraz, "Destruction Free Aging Diagnosis of Power Cable Insulation Using the Isothermal relaxation Current Analysis", Conference Record of ISEI, pp.17-21, 1994.
- (2) 한국전력공사 기술연구원, "배전용 CN-CV케이블과 접속재의 열화조사 및 방지대책에 관한 연구" 한국전력공사 연구보고, 1992.11