

배전용 지중케이블 열화진단장비의 현장적용 사례분석

이수묵, *이중관
한전 중앙교육원, *한전 용인지점

The analysis of applied examples of cable diagnosis instrument for underground distribution system

Suemuk Yi, Joongkwan Lee
KEPCO

Abstract - 우리나라에서 현재 적용중인 배전용 지중케이블은 1973년 처음 도입되어 도시의 중심 변화와 변전소 인출개소 및 신도시 택지개발 지역 등에 주로 설치되어 현재는 약 17,231 C-km (2002.12말 기준)에 이르러 있다. '86 아시안 게임과 '88 서울올림픽을 대비해 설치했던 케이블들은 설치 당시의 열악한 제작, 시공 및 관리 기술의 부족으로 많은 문제점을 가지고 있다. 이런 불량케이블이나 20년이상된 노후케이블의 절연상태를 파악하기 위해 현재 적용 기준으로 되어있는 등온완화전류법을 이용한 열화진단장비를 현장에 적용해 보고 사례를 분석해보므로써 이 장비의 문제점과 향후 개선방향을 모색해 보았다.

를 판정한다. 시험은 Forming (전압 가압) 단계 30분, 도체 방전 5초, Relaxation (방전) 단계 30분의 순서로 약1시간이 소요된다.

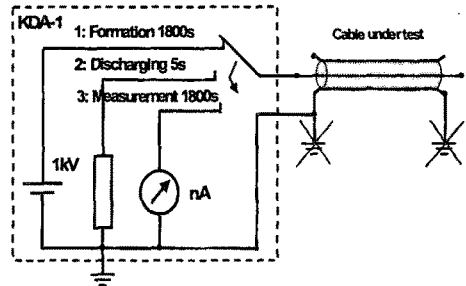


그림 1. 등온완화전류법의 시험도

1. 서 론

노후된 배전케이블의 증가와 더불어 열화고장 발생도 계속적으로 증가하고 있으나 지중케이블의 설치 환경이 주로 도심지의 변화나 신도시 택지지구 중심가 등으로 고장에 따른 정전의 과급 영향이 일상생활의 불편함을 넘어 경제적 손실은 물론 사회적인 문제까지 야기할 수 있을 정도로 매우 크다.

2.1.2 절연 상태 판정 기법

케이블 절연 상태 판정은 절연층에서의 방전특성 즉 방전시간과 절연상태와의 관계로 알 수 있으며 이를 위해 Aging Factor가 사용된다.

전력회사로써는 본연의 임무인 양질의 전력을 공급하기 위해서 케이블의 고장예방을 위한 케이블 절연열화상태를 사전에 파악해 보므로써 고장이 발생하기 전에 절연을 보강하거나 케이블 자체를 교체하는 예방보전기법을 도입하여 적용하고 있다.

표 1은 케이블내의 특히 주절연층의 계면 및 경계 분극특성에 따름s 완화시간을 나타낸 것이다.

이에 현재 한전에서 적용하고 있는 케이블 열화진단기준인 등온완화전류법을 알아보고 이 이론을 이용한 KDA-1 장비를 현장에 적용한 사례를 통해, field 맞는 실용적인 케이블 열화진단장비의 개선방향을 알아보고자 한다.

표 1. 완화시간 및 Trap Energy

	relaxation times τ [S]	trap energy W_H [eV]
(Sound) τ_1	3 ... 16	0.68 ... 0.72
(Boundary) τ_2	16 ... 65	0.72 ... 0.76
(Faulty) τ_3	140 ... 650	0.76 ... 0.83

2. 본 론

2.1 케이블 열화 진단기술

케이블 열화상태를 알아보기 위한 방법으로 현장에 적용되고 있는 기술은 크게 DC전압법, 등온완화전류법, 직류전압감쇄법 등이 있다. 과거에는 주로 DC 전압법을 많이 적용해 왔으나 이 방법의 공간전하 축적 등 문제점이 발표되면서 사용되지 않고 있으며, 현재 직류전압감쇄법을 적용한 CMI라는 국산 장비도 개발이 되었으나 많이 사용되지 않고 주로 등온완화전류법을 이용한 KDA-1장비를 적용하고 있다.

여기서, τ_1 은 진전한 절연층 내부에 존재하는 계면분극인 결정과 비정질 계면 등의 완화시간이며, τ_2 는 주절연층과 반도체층 계면에서의 분극으로 인한 완화시간이고, τ_3 는 수트리와 같은 열화요소에 의한 완화시간이다.

2.1.1 등온완화전류법의 시험도 및 원리

등온완화전류법은 절연체의 방전 특성변화를 이용하여 케이블의 종합절연체 상태를 판정하는 것으로 중합성체 구조중의 특정에너지수준에서 전하의 흐름이 trap된다는 사실에 기인한 것이다.

Aging Factor(열화계수)는 그림 2와 그림 3과 같이 열화에 따른 τ_2 와 τ_3 의 상대적 변화로부터 계산된다.

2.1.3 등온완화전류법 특성

등온완화전류법은 검출 요소가 수트리 발생, 진행, 진전 등의 기타 열화 등으로 도체와 중성선 사이의 모든 계면 탈분극특성을 통해 완화전류분의 양적 검출로 수트리 밀도를 알 수 있다

이 방법의 시험은 그림 1과 같이 케이블에 직류전압(DC 1kV)을 일정시간 인가한 후 전원을 분리하고 단시간 접지하여 용량성분을 제거한 후에 완화전류를 측정하여 Aging Factor(열화 계수값)를 계산하며 케이블 열화상태

시험전압이 DC 1kV로 저전압 시험이 가능하여 시험시 케이블 자체에 손상을 주지 않는 안전한 시험법으로, 온도와 무관하게 열화의 진전을 검출할 수 있으나 3상 동시진단 이 불가능하고 습도 및 외래 잡음 등의 영향을 받는다.

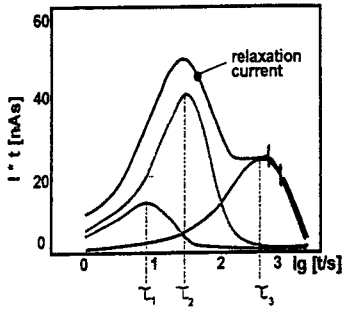


그림 2. 전력케이블의 완화전류

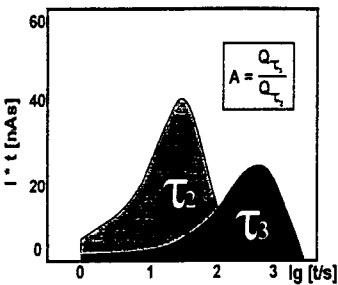


그림 3. Aging Factor 계산

2.2 한전에서 적용중인 케이블 열화진단 기준

배전용 지중케이블이 처음 도입된 이후 적용 되어오던 직류전압에 의한 누설전류법은 이 가압된 직류전압에 의한 절연층의 공간 전하 축적과 높은 전압(DC 30kV)을 가압함에 따른 케이블 자체 손상 우려 등의 문제점과 세계적인 추세에 따라 사용하지 않고, 한전에서는 2001년부터 배전용 케이블에 대한 열화 상태 판정을 위해 독일에서 개발한 IRC(Isothermal Relaxation Analysis) 이론인 등온완화전류법을 이용한 KDA-1이라는 장비를 적용하고 있다.

2.2.1 케이블 열화 진단 주기

케이블 진단을 위해서는 운전중인 케이블을 정전시켜야 하며 이에 따른 선로절체 등 선로 운용면에서의 불합리성 때문에 전체 선로를 일괄적으로 진단을 시행하지 않고 고장 개연성이 있는 선로에 대해 선별적으로 일정한 term을 가지고 시행하고 있다.

- 고장실적 있는 케이블은 고장 발생일로부터 1년 이내
- 설치 후 10년 또는 20년 경과된 다음과 같은 상태의 케이블은 선별적 시행
 - 외피 손상, 중성선 부식 등이 있는 케이블
 - 판로 침수 등 설치상태가 취약한 케이블
 - 과부하 운전 실적이 많은 케이블
 - 고장전류통전에 의해 케이블손상이 우려되는 케이블
 - 열적, 화학적, 기계적, 전기적 충격을 받은 케이블
 - 공동구 등 중요 설치장소 및 중요수용 공급 케이블
 - 기타 열화상태 확인이 필요하다고 판단되는 케이블
- 설치 후 30년 이상 경과된 케이블이나 진단결과가 주요인 케이블은 5년에 1회 다시 시행하고 있다.

2.2.2 열화 진단 방법

진단장비는 등온완화전류 측정장비인 KDA-1 (독일, SEBA 제작)을 사용하고 있으며 1구간 진단에 소요되는 시간은 상당 1시간 이상으로, 보통 3상을 동시에 하는

경우에 준비작업 시간 등을 고려할 때 약 3시간 30분 정도로 소요되며, field에서는 하루에 2구간을 진단할 수 있다.

정확한 진단을 위한 조건으로는 케이블 양단 즉 소선과 중성선을 분리시키고 케이블의 접지점 (중간 접속점의 중성선과 접지선)을 분리해야 하며, 운전 중이던 케이블은 진단의 신뢰성(등온 유지)을 높이기 위해 정전 후 4시간 후에 진단 (정격전류 20% 부하 이하인 경우 즉시 가능)하고 계속적인 진단을 위해서는 기기의 충전용량이 완전 충전 후 5.5h 연속사용이 가능하여 2개 구간을 시행시에는 중간에 20분 이상 재충전이 필요하다.

2.2.3 케이블 열화 진단 판정 기준

KDA-1이 제공하는 열화판정 인자로는 Aging Factor (열화계수), 막대그래프, 잔여절연강도 등이 있으나 한전에서는 현재 주로 Aging Factor로만 판정을 하고 있으며 케이블 열화 진단 후 상태 판정 기준은 제작업체에서 제시한 수치를 표2 와 같이 적용하고 있다.

표 2. XLPE 케이블 열화 판정 기준

Aging Factor	1.85 미만	1.85~2.60	2.60* 초과
판정기준	양호 (Middle)	요주의 (Old)	불량 (Critical)

* 최근 제작업체에서 제시한 수치인 2.3을 한전 자체에서 2.6으로 조정함.

2.2.4 케이블 열화 진단 후 처리

케이블 열화 진단 후 절연상태가 양호한 경우에는 계속적인 정상 운전을, 주요인 경우는 5년 이내 재진단 및 불량인 경우는 cable cure 등의 절연 보강이나 케이블 자체를 교체하고 있으며, aging factor가 산출되지 않고 막대그래프만 표시된 경우로 판정이 불량인 경우에만 1년 이내에 다시 진단토록 하고 있다.

2.3 현장 적용사례 분석

한전 교육원에서는 2002년에 KDA-1 장비를 구입하여 2003년부터 사업소 현장을 대상으로 열화진단 업무를 지원하고 있으며, 전국사업소를 대상으로 올해 약 100개소를 진단 예정으로 현재 까지 진행된 29개소 (진단 상수는 86개소)를 대상으로 사례를 분석해 보았다.

2.3.1 KDA-1 적용 사례

현장 적용은 변전소, 입상개소, 개폐기, 맨홀 등 다양한 장소이었으며, 케이블 평균길이는 주로 1km이하이고, 진단 구간내 접속수량은 약2개 정도이며 제작년수는 평균 15년에서 20년 정도로 표 3과 같다.

표 3. 케이블 진단 내역

구분	변전소			입상주	개폐기	맨홀	계
	옥외	옥내	소계				
진단구간	10	2	12	8	8	1	29
진단상수	29	6	35	24	24	3	86
점유율 (%)	34	7	41	28	28	3	100

표 4. 케이블 구간별 고장 내역

구분	200m미만	200~1000m	1000m 초과	계
진단상수	15	56	15	86
점유율(%)	17	65	17	100

2.3.2 현장 적용 결과

KDA-1을 현장에 적용한 결과를 보면 그림 4와 같은

며, 판정 결과가 나온 38건중 양호가 18건, 요주의가 15건이고 불량은 5건으로, 불량이 판정결과분의 약6%로 다른 용역기관에서 진단한 결과인 불량률 약50%와는 많은 차이점을 보여주고 있다. 이 결과는 열화계수가 자동으로 산출되지 않을 경우는 열화판정 상수를 방전곡선을 통해 인위적으로 계산하는 수동방식을 교육원에서는 적용하지 않았으며, 순수 장비 자체의 자동계산에 의한 방법을 채택한 결과이다.

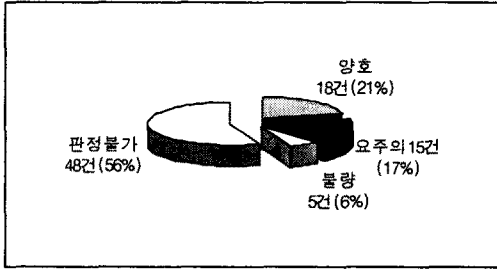


그림 4. 케이블 진단 결과

진단 지역이 주로 시외지역으로 진단 여건이 양호한 지역이었으나, 판정불가가 약56%로 표 5에서와 같이 전체적으로 유사하게 나왔으며, 이 결과는 진단 주변 환경의 영향은 적다고 판단되며, 기기자체의 결함이나, KDA-1 장비의 현장 적용성의 문제(노이즈 영향, 습기 및 진동 등 현장 여건의 민감성)로 정확한 분석을 위해서는 더 많은 사례분석이 필요하다.

표 5. 판정 불가 내역

구분	변전소			입상주	개폐기	맨홀	계
	옥외	옥내	소계				
개소	10	6	16	14	16	2	48
점유율 (%)	21	13	33	29	33	4	100

진단장비가 Agng factor 값을 자동으로 산출하지 못하는 경우는

- 전철개소 주변등 고조파나 노이즈 유입에 의한 영향, 0 2km이상 선로는 선로가 길어짐에 따라 접지점(중간 접속)의 증가로 접지선의 노이즈 영향에 의한 영향 (진단 사례 결과도 전부 판정불가 나옴),
- 입상개소에서는 측정기 연결 리드선이 길어짐(보통 10m이상)에 따라 리드선 영향과 바람에 의한 리드선의 흔들림 영향 등,
- 개폐기에서는 엘보의 완전 분리가 현장에서는 불가능하여 다른 부품 사용에 의한 도체와 리드선 연결점의 접촉불량 영향 등으로 판단된다.

2.3.3 현 열화진단장비의 문제점

진단방법상의 문제점을 보면 진단 소요시간이 한 구간 당 3시간 이상의 장시간 소요되어 시행상의 어려움은 물론 진단중의 외부 환경 영향 (노이즈, 흔들림, 바람, 진동)을 많이 받을 수 있으며, 케이블 진단은 보통 한 구간에 3상을 동시에 진단하고 있으나 현 장비는 한상씩 3번해야 하는 불편함이 있다.

현재의 판정기준은 케이블 열화진단장비 제작업체(독일, Seba)에서 제시한 진단결과 판정기준을 준용하고 있으나, 판정기준에 대한 신뢰성 검증이 미흡한 상태이다.

2.4 현재 적용중인 열화진단기준의 개선 방향

열화진단기준의 신뢰도 제고를 위해서는 절연 파괴강도와 관련된 도출을 통한 신뢰성 검증이 단편적인 특정개소가 아닌 다양한 대상지역의 현장 시험이 수반되어야 하

고. 진단의 정확성을 위해서는 노이즈 등의 영향을 제거하는 필터의 보완이 필요하다.

진단장비의 실용성과 편리성을 넓히기 위해서는 3상 동시 진단장비의 개선이 필수적이고, 본 장비는 케이블 절연상태를 전구간의 전체적 평균값을 보여주는 것으로 국부개소의 결함까지를 판정할 수 있는 다중진단장비로의 업그레이드가 필요하며, 보다 실질적인 활성화를 위해서는 운전중인 상황에서 진단할 수 있는 활성진단장치 개발이 절실하다.

3. 결 론

지중케이블 열화상태를 알아보기 위해 현재 한전자체 기준으로 되어 있는 등온완화전류법을 이용한 KDA-1를 사용하여 현장에 적용해 본 결과 사례의 약 50%이상이 판정 불가가 나와 케이블의 절연상태를 판정 할 수 없었으며, 이는 기기의 신뢰성을 판단하기에 앞서 현장 적용성에 많은 개선점이 필요함을 보여 주고 있다.

진단조건으로 요구되고 있는 접지선 분리조건은 현장 특성상 맨홀내의 중성선 분리는 현실적으로 불가능함을 고려하여 기기 자체 필터 개선이 더욱 효과적이라 판단되며, 열화진단의 효율성을 높이기 위해서는 진단 시간의 단축과 3상 동시 작업이 이루어져야 한다.

열화진단 기준을 적용함에 있어서는 열화진단 기법상의 특징을 감안하여 특정기법의 특정 장비만을 기준으로 하기보다는 다양한 현장특성을 고려할 수 있도록 2~3개 진단장비의 적용이 더욱 현실적이라 판단된다.

[참 고 문 헌]

- [1] M. Beigert, R. Madarasz: Predictive Maintenance and Proof tests on MV-cables, DISEE, Slovak Republic, 2000.
- [2] G. Hoff, H.-G. Kranz, "Isothermal Relaxation Current Analysis: A New Non-destructive Diagnostic Tool for Polymeric Power Distribution Cables" April 1999 IEEE / PES Panel on Diagnostic Measurement Techniques for Power Cables, New Orleans,
- [3] John Densley: Aging mechanism and Diagnostics for Power Cables- An overview, IEEE/PES Transmission and distribution, USA, 1999.