



KEPCO의 지중배전케이블 열화진단기술 적용 방향



황 광 수
한국전력공사 배전운영처 지중배전팀장

1. 개 황

우리나라는 1972년부터 가교폴리에틸렌(XLPE) 절연체를 이용한 MV급 지중케이블을 본격적으로 적용하기 시작

하였다. 이후 매년 6.5%정도의 증가추세를 보여 2011년 12월 기준 30,000C-km이상의 MV급 케이블이 설치되었다.

케이블 유지보수 측면에서 보면, 과거에는 산업경제의

급성장과 도심지의 재개발, 대형 건축물의 신축 등으로 지중화사업이 본격적으로 이루어짐에 따라 전력망 확충에 큰 비중을 두었으나, 산업성장이 둔화된 반면 관련 기술이 발달된 오늘날에 있어서는 확충된 설비를 최적의 상태로 유지 관리하는 것으로 패러다임이 변하고 있다.

특히, 최근에는 지중설비의 동맥(動脈)으로 볼 수 있는 케이블에 대한 관리방법이 중요한 화두가 되고 있으며, 최적관리의 전제조건인 열화진단 분야가 KEPCO가 이끌고 나가야 할 새로운 개척분야로서 많은 역량과 기술적 노하우가 요구되고 있다.

이에 따라 2010년에는 VLF TD/PD를 새로운 진단 기법으로 적용하였다. 또한, 케이블 설치공사 준공 검수 시험으로 0.1Hz 저주파 교류내 전압시험을 도입하였으며, 활선 PD진단장치를 자체 개발하여 현장 적용을 추진하는 등 MV급 지중설비의 관리기법에 있어 큰 전환점을 만들어 가고 있다.

2. 지중배전케이블 열화진단기술

전력용 케이블이라 함은 물성공학과 전기공학의 유기적인 결합에 의한 산물이라 할 수 있다. 특고압 또는 초고압 전력의 장거리 송전과 전력계통 구성을 담당하는 것이 전기공학분야라면, 전력손실을 최소화하고 송전능력을 향상시키며 더불어 계통의 안전성(Safety)과 안정성(Stability)을 확보하는 것이 물성공학의 영역이라 할 수 있다.

이러한 양쪽 분야의 상관관계를 토대로 새로운 절연 물질과 제조공정의 개발이 진행되고 있다. 케이블이 현장에 설치되어 전압이 인가되고 전류가 통전된 이후

부터 물질의 노후화, 외부환경 영향(손상 등), 제조상 결함의 진전 등 절연물질 특성과 전기적 특성 간 균형이 무너지면서 소위 말하는 열화(Aging)가 진행되고 결국 절연체 파괴에 따른 지락고장으로 이어지게 된다. 이때 지락고장이 발생하기 전 절연물질의 화학적 특성과 전기적 특성간의 불균형 정도를 밝혀내는 것이 전력계통 관리를 위한 진단분야에 해당한다.

진단기능은 케이블의 전기적·물리적 상태를 측정하는 단순 계측기능과 이를 바탕으로 열화원인 Factor(주변 환경요인, 운영상태 등) 도출을 통한 수명예측까지 가능하여야 한다. 따라서 계통의 최적관리는 정확한 진단기능 수반을 전제로 하여야 하며, 정확한 진단은 케이블의 구조적 특성, 고분자 절연체의 화학적·물리적 특성, 진단장비의 계측특성 및 케이블 설비의 현장 시공 상태에 대한 확인을 전제조건으로 한다.

KEPCO에서는 상기의 모든 특성을 체계화 하고 진단 기준의 계량화를 위한 진단 History DB화를 추진하고 있으며, 「설비진단센터」라는 특수조직을 구성하여 케이블을 비롯한 모든 전력설비에 대한 진단 전문가 그룹을 운영하고 있다.

가. 케이블 역사

케이블은 1812년 바론 실링이 상트페테르부르크에 위치한 네바강 지하의 광산을 폭파하기 위해 도선으로 사용한 고주절연 케이블을 모태로 한다.

이후 전신(Telegraphy)망과 조명설비의 수요에 의해 지속적으로 케이블이 개발되기 시작했다. 초창기의 케이블은 절연체로 고무, 로진(송진을 증류하여 얻는 천연수지), 구타페르카(나무이름, 고무질을 함유한 유액이 저장되어 있음) 등이 적용되었으나, 필요한 절연특성을 만족시키지 못하였다.

이후 1890년 페란티(Sebastian Ziani de Ferranti)에 의해 지(紙)절연 케이블이 개발·적용되었다. 지절연 케이블은 높은 절연강도, 낮은 유전손실(Dielectric Dissioation Factor) 등 우수한 전기적 특성을 가졌으며, 오늘날까지 그 규격이 사용되고 있다. 1941년 폴리에틸렌 고분자 화합물의 개발은 케이블 분야에 엄청난 변화를 초래하게 되었다. 폴리에틸렌(PE)은 1947년 15kV급 케이블 절연체 적용을 시작으로 1960년대 초반 지중 배전네트워크의 출현과 함께 본격적으로 사용되기 시작하였다. 폴리에틸렌의 사출형 제작특성은 높은 생산성, 물질 자체의 높은 수분저항력과 분자밀도에 비례하는 절연특성 등 케이블의 절연체로써 과거의 모든 절연 물질을 대체할 수 있을 정도였다. 이후 폴리에틸렌의 열(熱)적 특성을 강화시킨 가교폴리에틸렌(XLPE)이 1959년 개발되어 현재 전 세계 케이블 시장의 80%이상을 차지하고 있다.

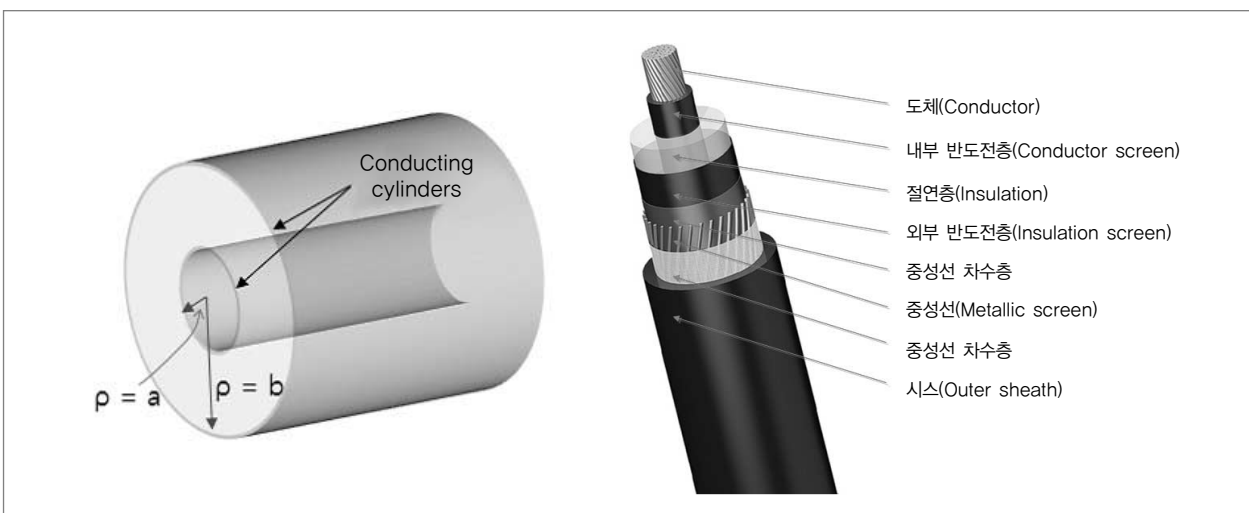
KEPCO의 경우 1970년 대한전선에서 XLPE 케이블 개발에 성공함으로써 이전 SLTA 및 SLL케이블을 대체하기 시작하여 현재 모든 지중케이블은 XLPE 케이블로 구성되었다.

국내의 케이블 산업 역시 해외추세에 맞추어 특성을 강화시킨 케이블이 지속적으로 개발되었다.

1993년 기존 흡식가교방식에서 건식가교방식으로 전환한 차수형 케이블(CNCV), 1995년 도체의 수분침투 억제기능을 가진 수밀형 케이블(CNCV-W), 1998년 외피에 난연성 재질을 적용한 난연 케이블(FR CNCO-W), 1999년 절연체의 수트리 특성을 억제시킨 TR CNCV-W 케이블, 2005년 외피 투습도 억제를 위한 외피 충실형 케이블(TR CNCE-W)을 비롯하여 2009년 알루미늄 도체를 적용한 TR CNCE-W/AL까지 지속적인 연구개발이 진행되어 왔다.

나. 전력케이블 구조 및 특성

전력케이블은 기본적으로 Cylindrical Capacitor의 구조를 따른다. 케이블 내부 도체에 생성된 전하는 쿨롱의 법칙에 따라 전계를 형성하여 외부로 방출된다. 방출된 전계는 외부의 도전체에 유도전압을 유기시키므로 이를 차단하기 위해서는 외부도체로 가우스 폐곡면을 구성하여 접지시켜야 한다. 이 외부도체가 케이블의 차폐층(중성선, sheath 등)이라 한다.



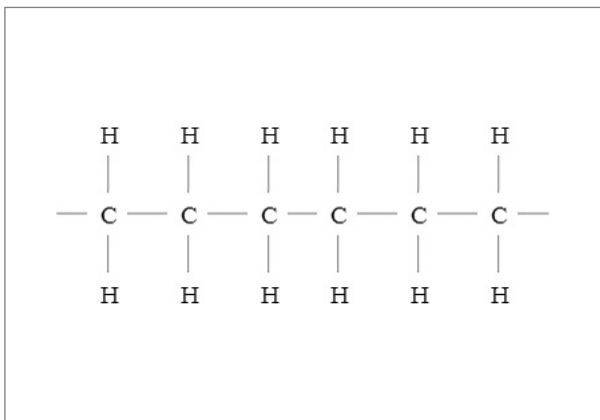
[그림 1] Cylindrical Capacitor와 전력케이블 구조



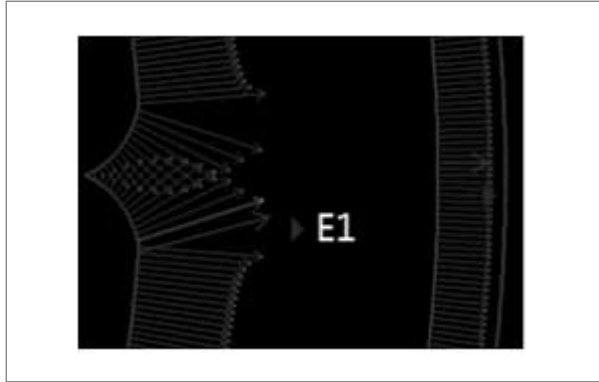
[그림 2] 반도체 형상

KEPCO는 다중접지방식을 운영하므로 지락고장 시 고장전류가 차폐층을 통하여 귀로해야 하므로 큰 고장 전류를 감당할 수 있도록 소선으로 구성된 동심중성선을 차폐층으로 적용한다. 케이블당 중성선 면적을 도체 면적의 1/3로 규정함으로써 3상 계통에서 단상도체 지락 고장 시 고장전류를 3상 중성선이 분담하여 통전하도록 하고 있다.

도체와 절연체 사이에 내부반도체층, 절연체와 중성선 사이에 외부반도체층이라는 탄소(Carbon)가 함유된 폴리에틸렌 반도체 물질이 덮여있다. 이 반도체층의 역할은 도체의 계면을 평활하게 하여 도체에서 발생하는 전계가 방사 형태로 균일하게 분산되도록 하고 도체



[그림 4] PE 분자구조

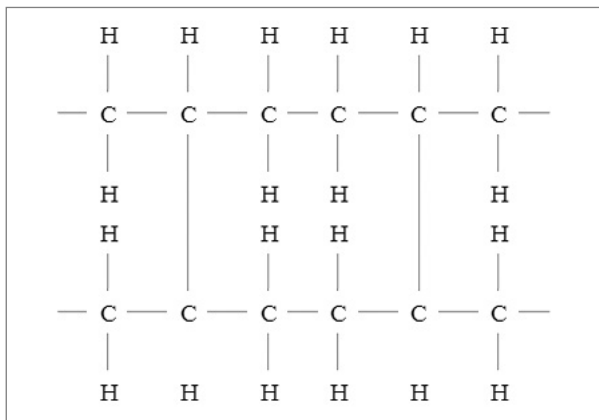


[그림 3] 전계의 균등분포

외부에 가우스 폐곡면을 형성하여 중성선에 도체 반대 극성의 전위를 전달함으로써 접지를 통하여 중성선과 대지전위를 일치시키는 두 가지 역할로 구분된다.

다. 가교폴리에틸렌(XLPE) 절연체

가교(Cross-linked)폴리에틸렌은 케이블의 전기적 특정 중 절연내력을 결정짓는 가장 중요한 요소이다. 폴리에틸렌 고분자의 탄소(Carbon)원소끼리 결합시키는 과정을 가교라 하고 가교된 고분자는 분자 간 결합력이 높아져 고온내열특성이 강화된다. 일반적으로 폴리에틸렌은 70℃의 내열특성을 갖는 반면 가교폴리에틸렌은 90℃의 내열특성을 갖는다.



[그림 5] XLPE 분자구조

높은 내열특성은 동일조건에서 송전용량이 증대된다. 지중 9공 관로에 설치되는 케이블의 경우 70℃ 절연체는 상(相)당 260A를 통전시키는 반면 90℃ 절연체는 337A까지 용량을 증대시킬 수 있다. 이러한 열적특성 강화를 위한 절연체 제조과정 중의 하나인 가교공정은 폴리에틸렌에 DCP(Di-Cumyl Peroxide)의 고온가압 처리로 이루어진다.

고온으로 인해 Radical을 형성한 DCP는 폴리에틸렌의 각 원자와 결합을 함으로써 아세토페논, 큐밀알콜, 메틸스티렌, 메탄, 물과 같은 가교부산물을 생성시킨다. 이러한 부산물들은 가교 후 건조과정에서 제거되지만 이러한 물질들이 케이블 수트리 발생의 주요원인을 제공한다.

절연체 가교 시 생성되는 가교부산물은 결국 절연체 내 미소공간(Micro-Void)을 생성하고 부산물이 건조과정을 통해 배출되어도 부산물이 차지하고 있는 미소공간은 남게 된다. 사용 중인 케이블 절연체가 수분과 만나게 되면 절연체 계면에서 미소공간으로 수분이 침투하는 경로가 형성된다. 이러한 현상이 XLPE 절연체의 주요 열화(劣化)특성인 수트리 현상이다.

라. 케이블 열화현상

가교폴리에틸렌의 내부 불순물 또는 표면 손상부에서 물과 전계의 복합작용으로 인하여 Micro-Crack이 발생, 이로부터 폴리에틸렌 분자간의 가교계면을 파괴/분리 하면서 Tree 형상으로 Crack이 진행되는 현상을 트리(Tree)라 일컫는다. 결국 수트리의 시작은 수분이 폴리에틸렌의 비결정질 영역으로 침투할 능력이 있을 때만 가능하다고 말할 수 있으며, 이러한 침투영역은 불순물이나 스크래치 등에 의해 폴리머 체인이 끊어져 극성을 띠는 경우에 발생한다. 절연체 계면을 침투하여 생성된

수트리는 절연체의 미소공간을 따라 진행을 하며 결국 케이블 심선과 중성선 사이의 통전채널을 형성함으로써 고장으로 이어지는 결과를 초래하게 된다.

그러나 수트리가 케이블 절연파괴의 직접적인 요인으로는 작용하지 않는다. 케이블 절연파괴의 최종단계는 부분방전에 의한 것으로 수트리는 부분방전으로 전이되기 전까지 수분에 의한 고장발생의 토대를 마련하게 된다. 수트리 외 부분방전을 발생시킬 수 있는 원인으로 케이블 내 불순물이나 공극, 반도전층의 돌기 등이 있으며 고장으로의 진행과정은 다음과 같다.

- ① 불순물 → 전계집중 → 발열 → 미소공극생성/확대 → 부분방전
- ② 공극(Void) → 부분방전 → 발열 → 공극의 확대 → 부분방전
- ③ 수트리 → 전계집중 → 발열 → 미소공극생성/확대 → 부분방전



[그림 6] 전기트리



[그림 7] 불순물 방전

결과적으로 케이블 절연파괴의 직접적인 원인은 부분방전이며 부분방전의 발생은 크게 제품품질(불순물, 결합 등)과 운영환경(수트리)에 의해 정해진다. 이러한 절연파괴 원인에 따라, KEPCO에서 추진하고 있는 케이블 진단은 양질의 제품과 표준 시공철차로 초기 시공 상태를 확인하기 위한 「케이블 준공시험」과 운영환경에 따른 케이블 열화정도(수트리 생성여부, 부분방전 발생 여부)를 판별하기 위한 「케이블 상태진단」으로 분류한다.

마. 케이블 진단

우리가 일반적으로 지칭하는 진단장비는 엄밀히 분류하면 진단장비와 계측장비로 분류할 수 있다. 가령, 측정된 값으로 케이블의 현재 상태를 양호, 요주의, 불량 또는 잔여수명 몇 년 등으로 나타내는 것을 진단장비라 설명할 수 있으며, 측정값을 나타내는 것은 계측장비로 분류할 수 있다.

KEPCO의 경우 1998년 도입·적용한 케이블 진단장비 KDA-1(현 CDS)은 DC 1,000V를 인가한 후 누설전류를 측정하여 시간대별 누설전류량 유형을 신경망(Neural Network) 분석로직으로 케이블 상태를 정상, 요주의, 불량의 세 단계로 분석한다. 이와 같이 장비 자체에서 계측과 분석 및 결과도출을 할 경우 진단장비라 할 수 있으며, 정확한 분석을 위해서는 유형별 DB량과 분석로직이 매우 중요한 관건이 된다. 예를 들어 신경망(Neural Network) 분석로직에 학습되지 않은 유형이 측정될 경우 오진(誤診)의 위험성이 있다. 이때 오진 구분을 위한 Raw Data 판독은 분석로직 내에서 이뤄지기 때문에 현실적으로 불가능하다.

KEPCO에서는 2010년부터 케이블진단 기본 장비를 VLF TD/PD로 전격 전환하였으며, VLF TD/PD 측정값에 의한 케이블 판단기준을 수립·운영하고 있다.

VLF장비는 케이블에 교류 시험전압을 인가하여 전압과 전류의 위상각 차이를 측정(TD)하고 TDR(Time

Domain Reflection)기반의 부분방전(PD) 파형을 측정하는 계측장비이다. 계측장비로 측정된 값은 측정 Database를 토대로 작성된 판정기준 Table에 의해 상태를 결정하게 된다.

이와 같은 경우 Raw-Data를 기반으로 축적된 경험값에 근거한 인위적 진단을 따르므로 열화의 원인추적과 근본적 대처방법을 강구할 수 있는 기회를 제공하게 된다. 또한, 케이블에 위해가 되지 않는 범위의 높은 시험전압을 인가하므로 주변 환경적 요소나 측정거리에 제한을 받지 않으며 보다 정확한 계측값을 도출할 수 있다.

KEPCO의 설비진단 기술방향은 현재 상태를 바탕으로 잔존수명을 예측하고 그 예측 값의 오차를 최소화하는 것을 목표로 하고 있다. 잔존수명을 예측하기 위해서는 통계학을 적용하여야 하며 수명예측의 오차는 다양한 측정인자와 정확한 측정값으로 최소화할 수 있다.

케이블의 경우 TD값의 변화, 부하전류량의 변동이력, 고장전류 통전이력, 시설환경 등을 열화인자로 하여 열화 가속도를 도출함으로써 현재의 상태판정과 함께 향후 잔여수명까지 진단하게 된다. 따라서 수트리 형성정도를 하나의 열화인자로 측정하기 위한 표준계측장비로 VLF TD/PD를 전격 도입하였으며, 분석진단 전문 인력으로 구성된 설비진단센터를 2011년 구축하여 운영 중에 있다.



[그림 8] 케이블 진단차량



[그림 9] 차량장착 진단설비

다만, 케이블 진단 통계분석의 저해요인인 자재결함은 통계적 유형을 가지지 않기 때문에 측정인자 DB에 원초적 제거가 필요하다. KEPCO 규격에 따른 직경 6.6mm의 XLPE절연체는 0.1Hz 교류내전압 시험에서 60분 내에 모든 결합점이 적출되는 특성이 있기 때문에 KEPCO에서는 자재결함의 본질적 제거를 위해 VLF 내전압 시험을 도입·적용 중에 있다.

3. 전망

안정적인 설비운영은 정확한 진단을 전제로 한다. 정확한 진단은 케이블 상태에 대한 정밀한 측정으로부터 나오며, 측정값에 대한 명확한 판단기준이 뒤따라야 한다. 판단기준은 케이블 상태에 대한 통계적 기법을 활용하여 정의한다.

KEPCO는 현재의 상태와 더불어 향후 잔존수명 예측 까지 진단의 범주에 포함한 포괄적 진단체계 수립을 위해 전문 진단인력으로 구성된 설비진단센터를 구축하였으며 방대한 양(量)의 계측 Database를 축적하고 있다. 실제 2010년부터 지중케이블 열화유형 분석에 의한 선별적 진단을 시행하여 1,158C-km 진단 중 불량케이블

194C-km을 적출하는 등 진단 실효성을 높이고 있다.

이렇게 축적된 기술을 바탕으로 2012년 KEPCO는 VLF 판단기준을 3단계에서 6단계로 세분화하였다. 2개 측정인자(TD, DTD)에서 새롭게 2개 인자인 STDEV, Skirt를 추가 도입하여 적용 중에 있다. 이는 2012년 IEEE Std400-2 개정예정 버전에서의 3개 측정인자 운영보다 앞선 측정인자를 운영함으로써, 전 세계를 통하여 케이블 열화진단기술에서 선도적 위치를 꿈꾸고 있는 것이다.

[표 1] 측정인자

현행	개선	해설
TD	TD	시험전압에 대한 유전을 변화율 측정
DTD	DTD	시험전압에 대한 유전율 안정도 측정
-	STDEV	시험시간에 대한 상태안정도 측정
-	Skirt	단시간 상태변화량 측정

또한, 내시경에 비유되는 정밀측정 장비인 VLF운영에 있어, 진단의 속응성을 높이기 위해 활선PD 진단 장비를 개발하여 시범운영 중에 있다.

이러한 기술들이 접목되고 방대한 Data들이 체계적으로 축적된다면 향후에는 세계 최고의 신경망(Neural Network) 분석시스템을 운영하는 케이블 진단분야 Global No.1으로 도약할 수 있을 것이다. KEA

[표 2] 6단계 VLF 판단기준

(단위 : $\times 10^{-3}$)

Degradation Index	TD (1.0Uo)	DTD (1.5Uo~0.5Uo)	STDEV (1.0Uo)	Skirt (1.0Uo)	Degradation Index
A(정상)	1.0	0.5	-	-	-
B(관심)	2.0	1.2	-	-	-
C(요주의)	6.0	6.0	0.10	0.30	D(이상)
D(이상)	10.0	12.0	0.20	0.60	E(불량)
E(불량)	27.0	60.0	0.70	2.20	F(임박)
F(임박)	27.0	60.0	-	-	-
Left Condition	OR		OR		-
	AND				Right Condition