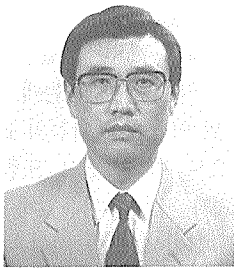


# 케이블 劣化診斷 技術의 動向



金星電線(株)  
韓基萬理事

## 1. 序 論

오늘날 電力使用이 急增하면서 負荷가 大容量化 되어감에 따라 電氣設備가 점차 大規模化 되어가고 있다. 또한 社會는 더욱 高度情報化 社會로 發展되어 가고 있어 設備의 事故 및 停電등은 높은 電氣的 依存度를 가진 高度 産業社會에 막대한 經濟的 損失 및 障礙를 가져다 주게 된다. 또한 都市環境의 美化 次元에서 地中配電線路가 漸次 增加하고 특히 이들은 大都市의 道路 地盤하에 分布하고 있어 事故시 事故復舊에 많은 時間이 必要하며 交通 및 産業活動에 큰 被害를 끼치게 된다. 특히 電力設備 事故중에서도 많은 部分을 차지하고 있는 것은 地中配電用 電力케이블로 주로 CV 케이블이며 또한 每年 상당한 양이 出荷되고 있다.

그러나 이러한 케이블이 長期間 使用되면서 케이블 敷設環境 등에 따라 絶緣體중에 수트리가 發生하여 絶緣性能이 저하되거나 또한 근래에 敷設한 케이블이라 할지라도 시공시 不良 및 其他 열악한 環境

에 놓여있게 되면 短時間에 絶緣破壞 事故에 이룰 수가 있어 設備 및 受用家에 圓滑한 電力供給 및 事故의 미연 防止를 위해 케이블 劣化狀態의 定期的 診斷과 이를 위한 豫防 診斷技術의 開發이 必要로 되고 있다. 從來에는 이를 위한 診斷技術로는 單純한 肉眼觀察 및 正전을 하여 메-가 등을 利用하는 測定 水準이었으나 근래에는 보다 效率的이고 精密한 技術의 開發로 診斷이 행하여 지고 있다. 그리고 高度 情報化 社會가 되어감에 따른 正전의 어려움으로 인해 活線狀態에서 測定하는 診斷의 必要性이 높아져, 이에 대한 研究도 活潑히 進行되고 있다.

여기서는 이와같이 케이블의 劣化診斷을 위해 最近까지 實用化 및 研究開發되고 있는 國內外的 各種 絶緣劣化 診斷技術의 動向에 대해 알아보기로 한다.

## 2 本 論

케이블의 劣化診斷 技術을 알아보기 이전에 어떻게 케이블에 絶緣劣化가 생기는지 그 原因에 대해 알아본 다음 劣化診斷 技術의 動向에 대해 논하고자 한다.

### 2.1 케이블에서의 絶緣劣化

電力케이블에 利用되고 있는 각종 高分子 絶緣材料는 熱, 電氣, 環境 및 機械的 要因 등에 의한 스트레스를 장기간 받아오면서 初期의 물성치를 유지하지 못하고 變質되기도 하고 극단적인 경우 파괴되기도 한다. 이것을 劣化라 하며 이로인해 壽命이 저하하게 되는데 이는 주로 複合作用에 의해 일어나지만 아직까지 複合劣化 要因은 충분히 糾明하지는 못하고 있다. 케이블의 絶緣事故의 대부분은 수트리에 의한 劣化로서 이의 發生原因과 進展 메카니즘은 매우 複雜하고 複合的인 要因에 의해 發生하기 때문에 이에 대한 研究도 活潑히 進行되어 오고 있다. 다음은 이러한 여러가지 劣化要因들에 대해 簡略히 說明해 보기로 한다.

#### 1) 熱劣化

열에 의해 高分子 絶緣材料가 변하는 것으로 酸化, 熱分解, 熱變形 등이 있다. 絶緣材料가 酸素에 長期間 露出되고 열을 받으면 고분자 材料의 酸化反應이 進行되어 材料의 變質, 變色, 龜裂 및 收縮 現象이

일어나고 또한 고분자가 分解되어 중합, 해리되어 Ion性 生成物 등을 생성시켜 絶緣性能을 저하시킨다.

#### 2) 電氣劣化

絶緣體內에 공극 및 보이드 등이 있게 되면 部分 放電이 일어나 絶緣體의 性能을 저하시키며 突起 및 異物등이 存在할 때는 국부적으로 높은 전계가 걸리어 電氣트리를 發生, 進展시켜 내전압 性能의 저하를 가져온다.

#### 3) 吸水劣化(수트리 劣化)

絶緣體內에 보이드, 계면의 공극에 전계가 걸리고 이 때 水分이 含有되면 수트리가 發生하여 絶緣性能의 저하를 가져온다.

#### 4) 化學的 劣化

오일, 化學藥品등에 의해 膨脹, 鎔解, 龜裂, 化學트리 등의 發生으로 絶緣性能이 저하되는 劣化이다.

#### 5) 機械的 劣化

케이블에 가해지는 機械的 스트레스에 의한 열화로써, 단락사고시의 전자력 및 正常運轉시의 振動과 長期間의 荷重에 의한 疲勞劣化로 이것에 의해 絶緣性能이 저하한다.

### 2.2 케이블 劣化診斷 技術

10년전까지만 해도 高壓케이블을 診斷하는 데는 메-가 시험이 큰 역할을 해 왔는데 현재 이 試驗으로는 곤란하게 된 이유는 케이블의 絶緣材料가 고무에서 플라스틱으로 변화하였고 또한 高壓케이블을 診斷하는데 時間과 努力을 여유있게 가질 수가 없기 때문이다. 현재 메-가에 의한 시험은 技術的인 면에서 인가전압이 낮기때문에 1,000MΩ 이상은 精確히 측정할 수 없고(CV 케이블은 10,000MΩ 정도에서 劣化判定을 하고 있음) 인가전압 上昇에 따른 絶緣抵抗의 급격한 變化나 측정값이 낮은 電流, 킥 現象 등은 測定할 수 없는 缺點이 있어 CV 케이블 診斷에는 별로 유용하지 않게 되었다.

現在까지 電力케이블의 絶緣劣化 診斷 試驗法으로 여러가지가 提案되어 있는데 송전을 中斷하고 測定을 행하는 非活線 測定法이 從來부터 活用되어 오고 있고 이중 특히 誘電正接, 直流 漏泄電流法 등이 代表的이며 以外에도 部分放電, 殘留電壓法, 吸收電流法, 殘留電荷法, 電荷減鎖法 등이 지금까지 活用되어 지고 있는 方法들이다. 한편 最近에 무정전으로 행하는 活線 診斷法이 수년간 현저한 進歩를 이루어 直

流成分法, 直流重疊法, 誘電正接法등이 實線路에 使用되고 있으며 또한 접지선 전류법, 맥동전류법, 저주파 중첩법등이 最近 開發되어 研究되고 있다. 그리고 OF 케이블에 있어서의 劣化診斷 方法으로는 유층의 가스를 分析하여 診斷하는 方法이 있으며 컴퓨터와 光技術을 應用하여 케이블의 診斷을 상시로 하는 自動監視 시스템의 상품화가 推進되고 있다. 그리고 現在에는 이러한 여러가지 測定法을 活用하여 最近의 FUZZY 理論을 利用하여 케이블의 絶緣狀態를 診斷하는 專門家 시스템의 開發도 活潑히 進行되고 있다. 以上에서 언급한 各種 診斷法에 대해 알아보면 다음과 같다.

### 2.2.1 非活線 劣化診斷 技術

從來부터 지금까지 주로 행하여 오던 케이블 劣化 診斷法으로 診斷測定試驗 동안 線路의 電壓을 정전하고 행하는 技術이다. 이 技術의 代表的인 方法은 直流漏泄 電流法과  $\tan \delta$  法으로, 測定되어진 Data도 많이 蓄積되어 있고 또한 이에 대한 研究도 높은 水準까지 되어 있어 現在는 가장 信賴性이 높은 方法 중의 하나라고 할 수 있다.

다음은 이들 몇몇 非活線 診斷技術의 特徵에 관한 것이다.

#### 1) 메-가 試驗

最近까지 간략히 現場에서 使用되어 오던 試驗法인데 精密度 側面에서 問題가 있다. 또한 劣화된 케이블의 絶緣抵抗 測定 레벨이  $10^3 M\Omega$  以上에서 微弱한 變化로 나타나므로 劣化現象의 早期發見에는 限界가 있다.

#### 2) 直流漏泄電流法

OF 케이블부터 CV 케이블까지 널리 使用되어 오던 試驗法으로 最近의 研究結果 直流漏泄電流로 수트리 成長의 段階的 診斷은 어렵지만 貫通 수트리 存在시 檢出은 매우 容易한 것으로 判明되었다. 따라서 直流漏泄 電流法은 조장이 긴 케이블의 국부적인 劣化 檢出이 容易하며 수트리의 存在 有無의 判斷에 매우 効果적이다.

#### 3) 誘電正接法

直流漏泄 電流法과 並行하여 널리 使用되는 試驗法으로 直流漏泄電流가 국부적인 劣化의 檢出에 容易하다면 誘電正接法은 貫通 수트리가 아닌 廣範圍한 수트리 存在의 境遇 檢出이 容易하다. 하지만 대

型의 電源供給 장치가 케이블의 정전용량 관계로 必要하다는 短點이 있다.

#### 4) 部分放電法

部分放電의 測定은 케이블 및 接續部의 보이드, 外傷, 차폐층의 異常 등을 檢出하는데 效果적이지만 수트리의 檢出 能力은 낮다. 이것은 수트리의 境遇 수  $\mu m$ 이하의 채널이 形成되어 있어서 部分放電의 發生이 原理적으로 不可能하기 때문이다. 그리고 現場 適用 測定時 Noise의 除去가 困難하고 감도가 양호한 設備가 필요한 短點이 있다.

#### 5) 殘留電壓法

케이블 絶緣體에 소정의 直流電壓을 인가한 후 電壓을 除去하면 케이블 絶緣體에 充電되었던 電荷는 케이블의 絶緣 抵抗을 통해 放電하는데 이 때 케이블의 絶緣性能이 양호한 境遇 장시간이 必要하며 나쁜 境遇 단시간에 放電을 하므로 電壓 인가 및 除去 후 소정의 時間 경과후 殘存되어 있는 電壓을 測定하여 케이블 絶緣狀態의 良, 不良을 判別하는 試驗法이다.

#### 6) 超低周波法

試驗電源으로 超低周波(0.1Hz 정현파)를 利用하여 部分放電, 정전용량을 측정하여 絶緣의 狀態를 判別하는 方法이다. 이것은 外部로부터의 誘導와 雜音의 影響등이 쉽게 區別이 되어 이들의 除去가 容易하며 誘電損, 部分放電의 發生頻도가 작아 絶緣體에 끼치는 損傷이 작다.

以上에서의 非活線 測定法의 現況을 簡略히 다음 <표-1>에 整理해 놓았다.

### 2.2.2 活線 劣化診斷 技術

近年 社會가 高度 情報化 되어감에 따라 무정전의 高信賴度의 電力供給의 要求가 높아져 정전이 매우 困難한 狀況이 되고 있어, 活線狀態에서 케이블의 劣化診斷을 행하는 方法의 研究, 開發이 活潑히 進行되어 왔고 實際로 實用化 및 商品화되어 現場에 活用도 되고 있다. 이러한 測定方法으로는 運轉中에 케이블의 접지선으로 부터 信號를 檢出해 내는 直流成分法과 소정의 直流電壓을 인가해 測定하는 直流重疊法 그리고 운전상태의 電壓, 電流로부터 測定되는 활선  $\tan \delta$ 法이 있으며 또한 이들의 結果를 複合적으로 活用하여 判定을 행하는 複合判定法이 행하여지고 있다.

〈표-1〉 非活線 劣化診斷 技術의 現況

診斷 電壓	測定 法	檢出 原理	實用 現況	判定 基準		
				양 호	要注意	불 량
직 류	絶緣抵抗法 (메-가법)	絶緣抵抗의 저하	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 널리 使用</li> <li>• 使用實績 많음</li> </ul>	2,000 MΩ↑	2,000~1,000MΩ	1,000 MΩ↓
	直流漏泄電流法			0.1 μA↓	0.1~1 μA	10 μA↑
	전위감쇄법	誘電緩和特性變化	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 一部에서 採用되고 있음</li> <li>• 開發 試驗 중</li> </ul>	DATA 蓄積 中		
	放電吸收電流法					
	殘留電壓法					
	殘留電荷法					
교 류	誘電正接法 (tanδ法)	誘電緩和特性變化	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 널리 使用</li> <li>• 使用實績 많음</li> </ul>	0.1~0.5%	0.5~5%	5% 以上
	部分放電法	部分放電 發生				

그리고 最近 開發되고 있는 方法으로는 接地線 電流法, 交流損失 電流法, 저주파 중첩법 등이 있다.

1) 直流成分法

케이블의 絶緣體에 交流 電壓 인가시, 수트리가 存在하면 이의 整流 作用에 의해 直流成分이 發生하는 것을 이용하여 運轉中の 接地線으로 부터 이러한 직류성분을 檢出하여 劣化診斷을 행하는 方法이다. 그러나 수 nA 정도의 微少 電流를 관측해야 하므로 高精度의 측정기기가 필요하다.

2) 直流重疊法

通電中の 케이블에 接續되어진 변압기의 中性點을 통해 直流 50V 정도를 인가하여 케이블 絶緣體를 관

통하여 차폐층으로 흐르는 直流漏泄電流를 고감도 전류계로 測定해 絶緣抵抗值로 나타내는 方法이다. 그러나 直流重疊에 의한 다른 기기로의 영향에 대한 주의를 기울여야 한다.

3) 活線 tan δ 法

케이블 絶緣體 중에 수트리가 多數 發生되면 誘電正接이 增加하는 것을 利用하여 케이블에 인가되어진 電壓을 분압기로 測定하고, 充電電流(접지선전류)는 CT를 使用하여 電壓信號의 위상차로 부터 tan δ를 測定하는 方法이다.

以上에서의 活線 測定法의 現況을 다음 〈표-2〉에 簡略히 整理해 놓았다.

〈표-2〉 活線 劣化診斷 技術의 現況

측 정 법	검출 원리	실용 현황	관 정 기 준		
			양 호	要注意	불 량
直流成分法	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 수트리 發生시 直流成分, 맥동의 발생</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 現在 試驗에 使用 중 또는 現場 檢定試驗 중</li> </ul>	1nA↓		100nA↑
直流重疊法	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 수트리 發生시 直流成分 發生</li> <li>• 絶緣抵抗 저하</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 現在 試驗에 使用 중</li> <li>• 撤去 케이블에서 DATA 蓄積 中</li> </ul>	10 <sup>4</sup> ~10 <sup>3</sup> MΩ↑		2×10 <sup>3</sup> ~10MΩ

측 정 법	검출원리	실용현황	관 정 기 준		
			양 호	要 注 意	불 량
誘電正接法	• 誘電緩和 特性變化 (絶緣抵抗 저하 包含) "	• 現場檢定 試驗 중	0.1% ↓		5% ↑
接地線電流法		• 最近 提案 開發 중에 있음 • 實驗室 DATA 蓄積 中	-		
低周波重疊法					
交流損失 電流法					
脈動檢出法	• 수트리 發生시 脈動 發生				
複合判定法	• 誘電緩和 및 直流成分	• 實驗室 내 DATA 蓄積 中 • 現場 檢定 實驗중	(暫定) 0.1% ↓ 이며 0.5nA ↓		0.15% 以上이며 30nA ↑

以上에서와 같은 活線狀態에서의 케이블 劣化狀態 測定에서는 아직까지 몇몇가지 문제점이 補完되어야 하는 면이 있다. 예를들면 실제 測定시 運轉중 케이블 차폐층의 접지선을 끊어 측정기를 連結하여 試驗을 할 때, 試驗케이블 以外的 電氣機器 및 외래 雜音의 影響으로 測定程度가 저하하는 등의 問題點이 있고 또한 測定回路 상으로 흐르는 迷走電流를 없애는 것도 向後의 活線診斷의 精密度를 높이는 課題의 하나가 되고 있다. 그리고 測定回路의 구성상 몇가지 活線 測定法은 케이블 시스템이 다중접지로 되어 있는 境遇 適用이 어려운 境遇도 있어 포설 시스템에 구애받지 않고 어떤 境遇이든 適用할 수 있는 診斷 시스템의 研究도 必要한 狀況이다.

2.2.3 OF 케이블의 劣化診斷 技術

OF 케이블의 경우, 케이블 뿐만 아니라 接續部와 端末등이 完全히 絶緣油로서 채워져 給油시스템에 의해 加壓이 되고 있기 때문에 基本的으로 劣化가 일어나기가 어려운 構造로 되어 있다. 그래서 OF 케이블의 劣化診斷에 있어서는 系統上의 유압을 감시하는 등의 日常的인 點檢과 特別히 要求되는 線路의 絶緣油를 採取하여 分析하는 方法등이 있다.

1) 油壓의 監視

OF 케이블에 있어서 유압의 監視는 漏油의 與否 및 유압의 크기 등으로 區分이 되며 通常 警報장치가 設置되어 있어 定期的인 巡察에 의해 點檢되고 있다.

2) 絶緣油의 分析

絶緣油의 調査로는 絶緣油내의 가스 分析, 絶緣油의 特性調査등이 있는데 가스분석에 있어서는 絶緣油가 酸化劣化, 熱劣化, 과전 劣화된 境遇 가스가 分解되면서 서로 다른 特性의 가스를 生成시킨다. 이 生成된 가스는 絶緣油중에 鎔解되어 이의 추출 分析으로 劣化의 原因, 程度 및 絶緣劣化의 位置까지도 推定이 可能하다. 그리고 OF 케이블에 外傷 및 누유 그리고 水分등의 浸入이 있는 境遇, 케이블의  $\tan \delta$ 의 增大 및 絶緣抵抗의 저하 그리고 絶緣破壞 強度의 저하가 있게 된다. 또한 연공작업시 過熱 및 運轉중의 국부적 異常 高溫으로 인해 絶緣油가 劣化되는 경우도 있다. 따라서 OF 케이블 線路에서 絶緣油를 샘플링하여 誘電正接, 體積 抵抗率, 水分 含有量과 絶緣破壞 試驗 그리고 가스分析 등을 통해 診斷을 行하여 오고 있다.

2.2.4 送電用 케이블에서의 劣化診斷 技術

送電用 케이블에서는 配電用 케이블에서와는 달리 劣化와 關聯된 DATA가 그리 많지가 않다. 따라서 最近 研究되고 있는 것은 部分放電 測定法과 광화이버를 利用한 直流漏泄 電流의 測定法등이 있다. 部分放電 測定法은 케이블의 外傷과 특히 接續의 缺陷 등을 檢出하기 위한 目的의 試驗으로 電氣의 펄스법과 AE 센서를 利用한 超音波法이 研究되고 있다. 그리고 直流漏泄 電流測定의 境遇 送電用 케이블의 端末은 高壓이고 氣中放電이 있기 때문에 正確한 計測이 어려워, 高壓端에 氣中放電의 影響을 받지 않게 하여 그 곳에 광센서를 設置, 漏泄電流를 測定한다.

2.2.5 絶緣劣化 診斷에서의 Expert 시스템

最近에는 高壓케이블의 絶緣診斷 DATA의 處理를 完全 自動화하여 診斷을 行하는 方法이 活用되고 있는데 이는 상시로 케이블의 運轉狀態를 監視하고 이상 發生시 警告등으로 이상을 通知하고 또한 정규 診斷시 생기는 人力 및 其他 資源의 消費를 줄이는 새로운 應用技術이다. 이는 케이블의 各種 狀態를 測定 計測機器에서 일정한 週기로 여러 測定項目에 대해 自動 測定을 行하고 이의 結果를 光 화이버를 통해 上位시스템 또는 中央 制御室 컴퓨터로 傳送하여 DATA의 記錄과 評價등을 하여 事故의 豫測 및 事故防止를 하는 것이다. 또한 케이블의 絶緣 劣化診斷을 통한 判定의 기준은 劣化現象의 要因에 의해 複雜하고 포설環境, 製造形式에 의해서도 左右되어 명확한 基準이 確立되어 있지 않다. 따라서 現在에는 각 分野의 診斷 專門家の 經驗과 독자적인 判定기준에 근거하여 判定를 하고 있는 現황이다.

그러나 최근 專門技術者 및 現場經驗이 풍부한 숙련자의 확보가 어려워지기 때문에 이 分野에서도 專門家 시스템(Expert System)의 有效性이 확인되어 急速도로 實用化되고 있다. 그리고 여기에서 종래에 判定基準의 境界 부분에서 판단이 명확히 구분되는 短點을 보완하여 요즘은 각 測定 項目의 判定境界 전후 값의 余裕치를 고려하여 케이블의 狀態를 判定하는 FUZZY 理論을 도입하고 있다. 이 시스템의 실행 결과 專門技術者의 診斷結果와 상당히 一致하는 效果를 얻고 있다고 報告되고 있다.

2.3 其他의 診斷技術 動向

케이블의 事故防止를 위한 劣化診斷의 必要性이 크게 대두되면서 上記에서 言及했던 여러가지 技術들을 綜合적으로 活用하여, 각각의 診斷對象의 포설 環境에 맞게 그리고 케이블의 種類에 따라 活용이 容易하도록 여러 診斷 設備가 하나의 車輛에 설치되

어진 移動用 診斷 車輛의 開發 및 活용도 活潑히 實用化되고 있다.

3. 結 論

3.1 劣化診斷 技術의 現況

社會의 高度化 및 使用電力의 대응량화에 따라 地中 配電線路가 늘어나면서 케이블 이상으로 인한 劣化事故의 미연방지가 徹底히 要求되고 있다. 이런 事故의 事前방지를 위한 劣化診斷 技術의 現況을 要約하면 다음과 같다.

非活線 劣化診斷 方法이 現在까지 많은 DATA의 蓄積과 함께 信賴性이 높은 技術로 活용되고 있으며 代表的인 것으로 直流漏泄 電流法과 誘電正接法이 있다. 그리고 最近 정전을 하지 않고 行하는 診斷技術의 要求가 높아져 확산상의 劣化診斷 技術이 活潑히 研究 進行되어 直流成分法 등의 몇몇 技術은 應用化 段階에 있고 實驗室적으로 DATA의 蓄積 중에 있는 것도 있다. 또한 最近에 發達한 컴퓨터 技術, 光 技術 및 FUZZY 理論을 導入한 專門家 시스템이 活潑히 개발되고 있다. OF 케이블의 경우 相對적으로 劣化事故가 작아 보통 진단이 必要한 경우 絶緣油의 分析등을 통해 점검을 하는 수준이다.

3.2 今後의 展望

금후로의 케이블 劣化診斷 技術의 展望은 線路를 정전하지 않고 진단을 行하는 活線劣化 診斷 方法으로 꾸준한 발전이 豫想되며 또한 새롭게 發展되어 오는 각종 센서의 技術과 컴퓨터를 이용한 精確한 計測技術의 確立으로 연구가 進行되리라 전망된다. 그리고 統計的 DATA 處理 技術을 應用하여 측정되어 진 케이블의 殘存 壽命을 精確히 豫測하는 技術도 필수불가결한 解決要素가 되고 있다.