

# 中压电力电缆状态检测技术及应用

沈飞飞<sup>1</sup>, 张建梁<sup>2</sup>, 吕培强<sup>2</sup>, 杨启明<sup>2</sup>, 莫宏伟<sup>2</sup>, 王一<sup>2</sup>, 杨杰<sup>3</sup>, 徐铨<sup>3</sup>

(1.扬州供电公司, 江苏扬州 225000; 2.苏州供电公司, 江苏苏州 215000;

3.哈尔滨理工大学电气与电子工程学院, 黑龙江哈尔滨 150080)

**摘要:**目前,在中压电力电缆状态监测与检测过程中,水树评价与评估方法相关经验不足和积累数据缺失。基于此分析不同程度开展的破坏性检测、非破坏性检测、在线监测、非电量分析法等各自的优势与缺点,提出了状态监测与检测新技术,实践应用红外诊断、在线局放、阻尼振荡波状态检测、超低频介损测试及新型传感监测技术的优势,可用于实时监测并分析中压电缆及附件设备的局部放电的状态,使得检测结果更为可靠,较好地弥补了现有中压交联电缆绝缘性能监测手段存在的局限和不足。

**关键词:**状态检测;交联聚乙烯;实践应用;评估分析

**中图分类号:** TM206

**文献标志码:** B

**文章编号:** 1009-0665(2013)06-0055-04

在我国城乡配电网网架中, XLPE 电缆由于其优异的介电性能以及安装、运行维护方便的特点,得到了较广泛应用。目前局部区域电缆网已经接近或超过 20 年,按照 30 年至 40 年电缆设计预期寿命,需要提前评估这些在役电缆的运行工况、老化程度以及预期寿命,合理安排状态评价对现役不同老化程度的电缆进行状态检修,亟需深入探究中压电缆在长期运行工况下存在的局部放电现象,由此积累的一些不良效应和这些微弱的放电能量的积聚将缓慢地损伤绝缘,最终导致电缆线路绝缘击穿,发生突发性被迫停运故障,势必严重影响供电可靠性和优质服务水平。因此,基于中压电力电缆状态监测与检测的新技术应用,意在有效地了解电缆及附属设备的运行状况,合理安排局部更新和维修计划,进而提高 XLPE 电缆的供电可靠性和运行寿命,具有极为重要的经济价值和社会效益。

## 1 电力电缆状态测试技术综述

目前,电力电缆一般测试技术方法如图 1 所示。

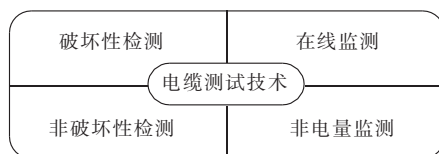


图 1 电力电缆测试技术

(1) 破坏性检测方法及其评估。通过对被试电缆加压,使得运行电缆在额定电压作用下不显现的水树等隐性缺陷,加速在高电场下连续或不连续发展,集中表现局部放电大幅度甚至突变增加,存在水树发展为电树,现场往往发生击穿现象。

(2) 非破坏性检测方法及其评估。有主流等温松弛电流法、介电频谱法、残余电荷法、损耗电流谐波分量法等。其中等温松弛电流法,是通过观测水树等缺陷引起的界面极化强度随水树变化而正向变化,同时依据电缆绝缘材料中的本体与电极的极化,基本维持不变不与投运年限相关的特点,得到导致水树缺陷的极化值与本体极化值的比值作为老化趋势的判据<sup>[1]</sup>;介电频谱法,是通过介电频谱随着外加电压的变化判定水树等缺陷的极化强度增加,或者采用检测水树的介质损耗随水树发展长度及含量的变化值,确定相应损耗的增加。

(3) 在线监测技术。利用较大比重水树枝的非线性效应,通过测量电流中的谐波分量中三次谐波量或直流成份,积累测量数据比过来研判电缆的老化程度。通常电缆局部放电在线监测方法关注电缆附件及两侧电缆局部放电变化量的检测。

(4) 非电量监测技术。一是直接测量抽检材料中水树枝的长度和含量的分布,推算电缆的老化程度和剩余寿命。二是量测其热延伸的变化度确定材料的劣化程度;或者采用动态机械谱、差热分析等方法,测量电缆绝缘的热力学曲线,换算活化能的变化间接反映电缆的老化程度。

## 2 在线和离线局放测试方法比较

在线和离线局放测试特点如表 1 所示。

表 1 在线和离线局放测试特点

局放测试	优点	缺点
在线局放	不需停电,定位电缆附件缺陷	监测少部分电缆缺陷,无法量化
离线局放	精确定位放电源等故障,可比性强	需停电,升压电源等设备配合

(1) 在线局部放电监测技术。优点是可以在运行中测试而不需停电;可以定位大多数电缆附件缺陷和少数电缆缺陷;一般不需要额外的电源;在现场的环境中测试(包括负载、温度等),有助于了解电缆绝缘的实际状况<sup>[2]</sup>。缺点是只能监测到少部分电缆缺陷;局放脉冲信号随着电缆长度衰减很快,准确的局放分布图已经不可能;缺乏统一标准和标定方法,不同测试结果缺乏可比性;测试技术复杂度较高;一般都需要分段测试,对于较长的直埋电缆测试更为困难。且测定和评估只能在额定电压水平下,对背景噪声的处理有一定难度;另外在线局部放电监测系统不能按照 IEC 的标准进行校准,局放水平无法量化,也不具备可比性。

(2) 离线局部放电检测技术。优点是测试结果与出厂测试有可比性;可高于运行电压测试,有助于判别缺陷类型;可以比较精确地定位放电源等故障;干扰少,测试结果比较可信;可以测试数公里长的电缆线路;操作相对比较简单,能较快给出测试结果;可以得到局部放电起始点压(PDIV)和局部放电熄灭电压(PDEV)。缺点是需要设备停电,且升压电源等设备体积比较大、比较重。

### 3 状态测试新技术的应用

电缆状态监测的核心是获取状态评估信息的及时性、准确性和科学性,通过对异常、缺陷部位的发展趋势、严重程度作出判断,从而制定合理的检修计划。在状态检测过程中,关键是通过运行巡测、在线监测、局放测试等手段获取电缆状态数据。

#### 3.1 在线测温

红外诊断作为一种先进的不停电检测技术,在国家电网《输变电设备状态检修试验规程》中作为电缆及附件的例行试验项目。以 2012 年 8 月 10 kV 114 曹合线 86-1-41-1(1 号)电缆终端及连接部位红外检测工况为例:电缆终端头型号 WRSY-10/3.2 70 mm<sup>2</sup>,出厂日期 2000 年 11 月,投运日期 2001 年 3 月,测试仪器 HY6800+7°,测试距离 8 m,环境参照体温 29.63 °C,风速 2.0 m/s,辐射系数 0.90,测得表面温度 104.24 °C,换算温差 74.61 °C。

(1) 参照《带电设备红外诊断应用规范》DL/T 664—2008 附录 A 电流致热型设备缺陷诊断判据:一般缺陷(温差不超过 15 K,未达到重要缺陷的要求),严重缺陷(热点温度>90 °C或 $\delta \geq 80\%$ ),危急缺陷(热点温度>130 °C或 $\delta \geq 95\%$ )<sup>[3]</sup>。

(2) 研判设备类别和部位,电缆终端头与金属部件的连接;热像特征,以线夹以下电缆终端头为中心的热像,热点明显;故障特征,局部发热不良。

#### 3.2 在线局放

本项目应用 HVPD 公司研发的 PDSurveyor 手持式局部放电在线巡检仪的 TEV 局放检测功能,对苏州工业园区 64 座配电所(开闭所)的 82 台开关和分支电缆进行局放检测,测试记录如表 2 所示。

表 2 测试记录表

配电所名	开关柜编号	TEV/dB
腾飞开闭所	261	18,18,21
腾飞开闭所	280	19,17,21
.....	.....	.....
克曼开闭所(I厂)	2A2	19,17,19
克曼开闭所(I厂)	2A2 后	20,20,20

参照 PDSurveyor 局放测试导则,根据 TEV 测试结果对局放水平状态进行分类,分类区间如表 3 所示。

表 3 分类区间表

指示灯颜色	TEV 值范围 /dB	状态说明
LED1 绿色指示灯	15	OK/无放电
LED2-3 黄色指示灯	20~25	中度放电 / 监测
LED4-5 橙色指示灯	30~35	中高度放电 / 检查
LED6 红色指示灯	40~45	高度放电 / 禁止运行并试验

由于表 3 局部放电各种状态对应 TEV 数值间存在空挡,因此对表 3 进行修正,修正后的局部放电状态表如表 4 所示。

表 4 修正后的局部放电状态表

TEV 值范围 /dB	状态说明
(0,17.5]	OK/无放电
(17.5,27.5]	中度放电 / 监测
(27.5,37.5]	中高度放电 / 检查
(37.5,47.5]	高度放电 / 禁止运行并试验

根据修正后的局部放电状态分类表,对表 2 所示测试结果进行分类,形成基于 TEV 测试的局部放电状态统计结果:无放电状态点 / TEV 值范围(0,17.5],共 70 个;中度放电状态点 / TEV 值范围(17.5,27.5],共 254 个;中高度放电状态点 / TEV 值范围(27.5,37.5],共 27 个;高度放电状态点 / TEV 值范围(37.5,47.5],共 3 个。

为了验证表 4 局部放电状态划分的合理性,采用以上局部放电状态统计结果进行方差分析。分析过程中,每一个状态数据视为一区组。由于在 4 种状态中被测数据量不等,所有运用方差分析中不等重复数的单因素方差分析来检验。以下为计算过程。

试验数据分组  $t=4, i=1, \dots, t$ , 各区组重复数分别为无放电状态点  $r_1=70$ , 中度放电状态点  $r_2=254$ , 中高度放电状态点  $r_3=27$  和高度放电状态点  $r_4=3$ , 则试验数

据总数  $r_i=r_1+r_2+r_3+r_4=354$ 。

试验数据总和:

$$T_{..} = \sum_{i=1}^t \sum_{j=1}^{r_i} x_{ji} \quad (1)$$

其中组内和:

$$T_{.i} = \sum_{j=1}^{r_i} x_{ji} \quad (2)$$

式(2)中:  $i=1, \dots, t$ ;  $x_{ji}$  为试验指标。

$r$  个试验数据的总平方和:

$$S_T = \sum_{i=1}^t \sum_{j=1}^{r_i} x_{ji}^2 - \frac{1}{r} T_{..}^2 \quad (3)$$

组间平方和:

$$S_A = \sum_{i=1}^t \frac{1}{r} T_{.i}^2 - \frac{1}{r} T_{..}^2 \quad (4)$$

组内平方和:

$$S_E = S_T - S_A \quad (5)$$

计算得到组间平方和  $S_A=5\ 816.00$ ; 自由度  $f_A=4-1=3$ ; 组内平方和  $S_E=864.51$ ; 自由度  $f_E=354-4=350$ ; 均

方  $\bar{S}_A = \frac{S_A}{f_A} \approx 1\ 938.67$ ; 均方  $\bar{S}_E = \frac{S_E}{f_E} \approx 2.47$ ;  $F = \frac{\bar{S}_A}{\bar{S}_E} \approx$

784.89。根据上述计算结果,得到方差分析表,如表5所示。

表5 方差分析表

方差来源	平方和	自由度	方差
组内	864.51	350	2.47
组间	5 816.00	3	1 938.67
总和	6 680.51	353	—

查方差表,当  $f_1=3, f_2=350, F_{0.01}(3, 350)=3.78; F > F_{0.01}(3, 350)$ 。上述方差分析表明表4的状态划分是合理的。根据表4所示修正后的局部放电状态表,本项目对苏州工业园区64座配电所(开闭所)的82台开关和分支电缆进行局放检测结果可知:苏州工业园区64座配电所(开闭所)的82台开关和分支电缆中,无放电的比例为20%,中度放电的比例为71%,中高度放电为8%,高度放电的比例为1%。

### 3.3 离线检测

#### 3.3.1 阻尼振荡波状态检测

基于时域反射法的局放源定位及振荡波形阻尼衰减的介质损耗测量,采用阻尼振荡波电压代替工频交流电压作为测电压,符合 IEC 60270 有关脉冲电流法局放现场测试标准要求,现场采用阻尼振荡波测试装置使得被测电缆在较低的测试电压即可暴露局部放电,主要依据是振荡波激励下测得的现场局部放电谱图,一旦发现局部放电,立即停止局部放电测量,可以

有效保护被测电缆线路,避免意外击穿故障。但对于电缆长度小于100m的短电缆,存在局放定位盲区;另外,通过数学公式计算得到的介质损耗测量结果的有效性、准确性尚待进一步验证。

#### 3.3.2 0.1 Hz 超低频电压下介损测试

苏州华池街配电所20kV电力电缆介损测试。测试时间:2011年8月24日;测试地点:华池街配电所;被测电缆型号:YJV22-3\*300mm<sup>2</sup>-12/20kV;长度:1.235km;电缆投运时间:1998年;测试环境温度:29~30℃;相对湿度85%。

(1) 测试方法:0.1 Hz 超低频电压下,采用高压侧采样的电缆介损测试系统,对被测电缆进行  $0.5U_0, 1.0U_0, 1.5U_0, 2.0U_0$  4个阶段的升压,记录介损(介损变化率)随测试电压的变化曲线。

(2) 通过本次实测数据得到以下结论:①A相的介损变化率  $(2U_0-U_0)=0.445\%$ ;B相的介损变化率  $(2U_0-U_0)=0.323\%$ ;C相的介损变化率  $(2U_0-U_0)=0.278\%$ 。依据 IEEE 400—2001《有屏蔽层电力电缆系统绝缘层现场型试验与评估导则》的介损变化率超过0.1%作为立刻更换、完全老化状态的判据,被试电缆处于老化状态,建议更换中间接头后再次复查。②对运检单位来说,应尽早对相关龄段电缆状态跟踪评价,避免交联绝缘层里水树枝迅速转化成电树枝造成的大范围停电故障。

#### 3.3.3 损耗电流谐波分量检测

以苏州工业园区现场试验案例说明,测试时间为2012年6月;被测试电缆情况:型号YJV22-3\*240mm<sup>2</sup>-8.7/15kV;2002年投入运行;线路长度:378m。采用3kV(5kV,7kV,9kV)谐振电压幅值,其中以B相电缆测试结果为例,在3kV,5kV,7kV,9kV试验电压下的损耗电流波形及损耗电流谐波分量显示,最大介质损耗值分别为0.0335%,0.0341%,0.0359%,0.0497%,均小于0.1%,且损耗电流三次谐波不明显,说明该相电缆绝缘状态良好。

## 4 新型传感监测技术

### 4.1 设置传感器

在现场局部放电监测时,由于采用了不同的信号处理技术,所以在时域与频域中同步辨析出交变场中监测到的各种信号<sup>[4]</sup>。

(1) 高频电流传感器用于监测高频脉冲泄漏电流。采用钳式关合高频电流传感器,自电缆接地屏蔽线或就近电气设备外壳接地线上取得脉冲电流信号,无须在加装时停运电缆及设备;利用罗哥夫斯基线圈从电气设备的接地线处测取信号,信号频率可达到30MHz,大幅提升了局部放电的测量频率。

(2) 超声波传感器用于测量伴随局部放电产生的超声波信号,现场可直接利用该信号或者结合电脉冲、电磁波信号对局放源进行物理定位,并判别局部放电的类型<sup>[5]</sup>。

(3) 甚高频传感器用于监测高频的电磁波信号,通过采集由局部放电现象伴随的电磁波信号(其频率可达3 GHz以上)从而达到检测放电信号的作用。

#### 4.2 设置滤波器

(1) 带通滤波器用于处理高频电流传感器信号的频率范围为100 kHz~30 MHz,超声波传感器频带范围为80~300 kHz。

(2) 由于带阻滤波器仅滤除频率介于高频及低频间的信号,所以其他频率的信号均可通过,在波形监测过程中可采用该滤波器滤除干扰<sup>[6]</sup>。

(3) 自适应滤波器可滤除波形监测过程中的某些连续噪声。对于现场某些较强连续噪声的环境中,可采用该滤波器,但根据奈科斯特稳定性判据(Nyquist Theorem),滤波器上限截止频率应等于或小于1/2采样频率。

#### 4.3 智能级应用软件

(1) 人机界面:动态显示二维、三维图像;实现图表、二维图形、三维图形、幅值-脉冲、相位-脉冲等灵活显示方式。

(2) 通信方面:全面支持RS-232/422/485,USB,TCP/IP,Modem等通信模式;跟踪模式下可自动测量及下载数据。

(3) 综合诊断:方便现场直观准确地对波形做出诊断及分析;历史数据比对提示功能等。

### 5 结束语

实践应用红外诊断、在线局放、阻尼振荡波状态检测、超低频介损测试及新型传感监测技术,可用于实时

检测并分析中压电缆及附件设备的局部放电的状态,使得检测结果更为可靠。同时由于区域性使用的交联聚乙烯材料、生产工艺标准规范不尽一致,电缆管沟结构、敷设方式、运行年限的不同特点,测试系统抗干扰能力随之存在一些差异,研究老化因子与敷设方式、运行年限、批次电缆型号、规格等信息的相关性,以化学分析、介电频谱、绝缘电阻等方法进行验证,修正不同年限电缆老化评估判据。另外值得关注的是,结合现有的微弱信号检测技术,抗干扰的硬件和软件技术,采集的有效信息非常微弱,仍不能完全满足现场测试对精度的要求。所以进一步丰富、完善基于中压电力电缆状态监测与检测的新技术发展,为后续在线监测技术和高电压等级电缆线路绝缘状态诊断研究,具有进一步推广的价值和应用前景。

#### 参考文献:

- [1] 段乃欣,马翠姣,邱 昌,等. 交联聚乙烯电缆敷设后的局部放电检测[J]. 供用电,2001,18(4):12-14.
- [2] 李华春. 电缆局部放电在线检测方法的分析比较[J]. 电力设备,2005,06(5):29-32.
- [3] 罗俊华,马翠姣,邱 昌. XLPE 电力电缆局部放电在线检测[J]. 高电压技术,1999(4):32-34.
- [4] 周亚非,秦 阳. 在线局部放电监测技术的实际应用[J]. 高电压技术,2001,27(1):30-31,34.
- [5] 王 凯,杨娟娟,徐 洋,等. 超高频技术检测高压电力电缆及接头中局部放电的研究[J]. 电线电缆,2002(3):35-37,46.
- [6] 游一捷,黄 继,邓巨怡,等. 用局放超声故障探测仪探测电缆头故障[J]. 高压电缆,2000(1).

#### 作者简介:

沈飞飞(1978),男,江苏苏州人,高级工程师,从事配电网运行检修工作;  
张栋梁(1976),男,江苏苏州人,高级工程师,从事配电网运行检修工作;  
吕培强(1969),男,江苏苏州人,高级工程师,从事配电网运行检修工作。

### Medium Voltage Power Cable State Detection Technology and Application

SHEN Feifei<sup>1</sup>, ZHANG Jianliang<sup>2</sup>, LYU Peiqiang<sup>2</sup>, YANG Qiming<sup>2</sup>, MO Hongwei<sup>2</sup>, WANG Yi<sup>2</sup>, YANG Jie<sup>3</sup>, XU Cheng<sup>3</sup>

(1. Yangzhou power supply company, Yangzhou 225000, China; 2. Suzhou Power Supply Company, Suzhou 215000, China;

3. College of electrical and electronic engineering, Harbin University of Science and Technology, Haerbin 150080, China )

**Abstract:** At present, water tree based evaluation methods used for medium voltage power cable condition monitoring and testing are inexperienced and lack of accumulated data. Therefore, the analyses, such as destructive testing, non-destructive detection, on-line monitoring, and non-electricity analysis derived from are naturally with disadvantages. For coupling with these disadvantages, a new technology of condition monitoring and testing is proposed with the utilizations of infrared diagnosis, online partial discharge, damped oscillation wave status online detection, ultra-low frequency dielectric loss test and new sensing monitoring technology. The proposed technology can be used for real-time monitoring and analysis of partial discharge of medium voltage cable and accessory equipment, which can obtain a more reliable result.

**Key words:** State monitoring; Crosslinked polyethylene; Practical application; Evaluation analysis