

浅析电力电缆故障测试技术与应用

蒋 俊

(常州供电公司, 江苏 常州 213002)

摘 要:随着国民经济的快速发展和城市建设规划的迫切需要, 电力电缆的应用迅速增长, 从而导致电缆故障明显增加。为了提高供电可靠性就必须以最短的时间修复故障, 然而电力电缆是埋设于地下的电力线路, 不能用眼睛直接发现故障点。如果不能及时查找出故障点的位置就更不用谈到修复故障, 所以如何快速准确的测试出电力电缆故障的位置, 是修复电力电缆故障提高电网供电可靠、减少经济损失的关键所在。本文对各种可能出现的电缆故障的测试方法以及国内外一些先进测试设备进行概述, 并介绍电缆故障测试设备的应用体会。

关键词: 电缆; 故障; 设备; 测试

0 引言

随着城市建设的发展, 电力电缆在城网供电中所占的比重之越来越大, 在城市的市区经过几年的整治, 电力电缆正逐步取代了架空线, 成为了城市配电网的主角。但随着电缆数量的增多及运行时间的延长, 电缆的故障也越来越频繁。由于电缆线路的隐蔽性及运行单位运行资料的不完善, 以及测试设备的局限性等原因, 使电缆故障的查找非常困难。另一方面随着科技的进步, 现代检测技术与电子计算机结合应用, 各种测量方法及仪器的精度也得到进一步提高。国内外众多测试设备及技术并存。如何合理地选择故障测试设备, 准确快速地查找出电缆故障, 缩短故障停电时间, 就成了电缆运行人员非常关心且值得探讨和交流的焦点。

某公司鉴于原来的电缆故障测试设备的落后, 在测故障时往往要花上几天的时间, 严重影响了故障修复时间, 因此我购买了全套奥地利 Baur 公司的车载电缆设备, 使得能有机会接触国内外先进的电缆故障测试设备, 并先后参加了奥地利 Baur 公司以及国内的山东科汇等公司的电缆故障测试培训学习。本文将主要概述目前国内外新近的电缆故障测试技术及应用情况, 并结合电缆故障测试设备的具体使用情况进行分析总结。

2 电力电缆故障测试的方法及运用

2.1 电力电缆故障分类

电力电缆故障按性质可分为串联(断线)故障和并联(短路)故障两种。后者按绝缘外是否有金属护

套或屏蔽, 可分为主绝缘故障(外有金属屏蔽), 外护套故障(无金属屏蔽)的故障。主绝缘故障根据测试的方法不同, 按故障点的绝缘电阻 R_f 大小可分为三种: ①金属性短路(低阻)故障其中 R_f 不同仪器及方法选择各不同, 一般 $R_f < 10 Z$ 。(Z 。为电缆波阻抗); ②高阻故障; ③闪络性故障。三者之间没有绝对的界线, 主要由现场测试测试方法去区分, 与设备的容量及内阻有关。

2.2 电缆故障的测试方法及比较

根据上述电缆故障的分类目前国内外有各种不同的测试方法, 但测试步骤均相同, 即①进行故障诊断②根据诊断结果进行故障点预定位③进行故障点精确定点。

对于各种故障及其相应的方法如下表所示:

表 1 各种电缆故障常用的测试方法对应表

故障类型	R_f 值	间隙的击穿情况	预定位方法	精确定位法
断路故障	∞	在直流或高压脉冲作用下击穿	低压脉冲反射法 电桥法	声磁同步法
低压故障	小于 $10 Z$	R_f 不是太低时可用高压脉冲击穿	低压脉冲反射法 电桥法	音频感应法 电流方向法
高阻故障	大于 $10 Z$	高压脉冲击穿	二次脉冲法 冲闪法(电流法) (电压法), 高阻电桥法	声响法 声磁同步法
闪络性故障	∞	直流或高压脉冲击穿	二次脉冲法(直流耐压击穿后用) 直流闪试法(电流法)(电压法)	声磁同步法
外护套故障			高压电桥法 压降法	跨步电压法 声磁同步法

2.3 电力电缆测试方法的发展

70 年代初期, 世界上广泛使用电桥法及低压脉冲反射法进行电力电缆故障测试, 两者对低阻故障很准确, 但对高阻故障不适用, 故常常结合烧穿法。之后出现了直流闪测法, 分别测试闪络性故障和高阻故障, 两者均可分为电流闪测法和电压闪测法, 取样参数不同, 各有优缺点。电压取样法可测率高, 波形清晰易判, 盲区比电流法少一倍, 但接线复杂, 分压过大时对人及仪器有危险, 电流取样法正好相反, 接线简单, 但波形干扰大, 不易判别盲区大。在当时我国电力部门应用十分得广泛, 且应用经验比较丰富, 但仪器有盲区, 且波形有时不够明显, 靠人为判断, 有时未能成功, 仪器的精度及误差相对较大。

到了 90 年代发明了二次脉冲法试验技术, 均为低压脉冲, 准确易用, 结合高压发生器发射冲击闪络技术, 在故障点起弧的瞬间, 通过内部装置触发发射低压脉冲在故障点闪络处发生短路反射, 并将波形记忆在仪器中电弧熄灭后, 复发一正常的低压测量脉冲到电缆中, 此低压脉冲在故障处没有击穿产生通路直接到达电缆末端, 并在电缆末端发生开路反射, 将两次低压脉冲波形进行对比, 非常容易判断故障点位置。仪器可自动匹配, 自动判断, 计算出故障点的距离。

二次脉冲法的出现使得电缆高阻故障测试变得十分简单, 成为最先进的测试方法, 以我公司购置的 Baur 的电缆测试车为例, 该设备与国内生产高压电流式电压法测试相比较, 具有以下优点:

(1) 一体化设计, 结构紧凑, 只要接入电源, 接好地线连接被测电缆就可进行各种测试方法的操作, 接线简单, 切换容易, 安全可靠。

(2) 自动化程度高, 实现自动匹配, 自动保护, 自动判断, 自动计算, 并可以进行打印或将图形存入软盘, 在计算机进行数据分析。

(3) 无盲区问题。

(4) 精度高。Baur 公司 IRG300 回波仪采样频率已达 200MHz, 以波速为 $V=160\text{m}/\mu\text{s}$ 计算, 精确度高达 0.4m。由于这套仪器的自动化程度高精确, 操作简单, 克服了电流电压冲击法的不足, 有效解决了高阻故障测试的困难, 只要波速度选择正确, 测量结果非常准确。

国内的故障测试仪在技术上达到了较高的水平, 但仪器的精度以及全套系统整体细致设计均未及进口设备, 特别是简单的机械质量方面未能令人满意。

2.4 其它测试设备

为能应付所有可能出现的电缆故障, 应配置全套的电缆故障测试设备。如电缆识别仪, 电缆路径测试仪, 预定位设备(含电桥, 回波反射仪以及配套的高压装置及信号发生器), 精确定位仪(跨步电压法, 声磁同步法, 音频定位仪)等等, 特别是对于不知路径的直埋电缆故障若没有路径测试仪, 根本无法测试, 除非将整条电缆挖出来。对于普通的路径测试仪在实际测试中受地下平行金属管线干扰较大甚至误差。德国 Seba 公司所开发的专利产品能很好地解决干扰问题, 主要是通过双感应线圈将最大法波最小法的倒转波进行叠加处理, 有效解决干扰问题。

2.5 电缆故障测试中人的因素

现场测试人员形象地形容电缆故障测试“三分靠人, 七分靠仪器”。测试人员的理论知识, 实践经验, 电缆运行管理的到位, 电缆运行资料(长度, 路径, 接头位置两端是否预留等)的完善, 对电缆故障测试是事半功倍的。上海就是一个很好的例子, 他们主要使用国产设备较多, 包括电桥法等也一样可以很快找出故障点, 同样可以管理好上万的电缆线路。究其原因, 主要是上海电缆的运行管理基础好, 电缆资料齐全, 且其测试人员有丰富的故障测试经验, 精通测试理论设备使用熟练, 由此可见人因素的重要性。

2.6 对电缆故障测试设备选择配置的几点意见

2.6.1 高压冲击发生器中的电容量 C 与电缆测试的关系

国外的仪器制造商采用 2 μF 或 4 μF 的电容, 他们认为 4 μF 已足够, 我们认为对于较长的电缆线路或闪络故障, 或绝缘电阻特别大或以及低压电缆故障的测试, 在实际的测试中常常得不到波形。冲击能量 $W=CU^2$ 电压 U 受到仪器体积限制且不能过大, 不应超过预试电压的 50%--70%, 只要考虑到故障点可能由末端反射电压叠加后才造成造成击穿, 叠加电压过大对主绝缘有不利影响。因此当 U 一定时 W 与 C 是成正比关系, 电容量越大, 冲击能量越大, 故障点起弧时间越长, 放电越彻底, 越

容易得到测试波形,对于低压电缆尤为突出。国外仪器主要实现了自动延弧装置或加宽冲击脉冲延长起弧时间功能,且触发脉冲配合较好。因此进行设备配置选择时最好选择较大的电容,以适应不同电缆故障测试的需要。当然,增大电容将会增大设备重量的体积,使仪器显得笨重,且还要改变仪匹配。

2.6.2 采样频率与仪器精度有关

如: Baur 的 IRG300 的采样频率为 200MHz,以波速度 $V=160\text{m}/\mu\text{s}$ 为例,波形每采样点代表距离: $L=V/2\Delta t=160/2\times 1/200=0.4\text{ m}$ 。即该仪器精度为 0.4m。而一些国产仪器的采样频率为 20MHz, $L=V/2\Delta t=4\text{ m}$ 。即精度为 4m,误差可想而知,为减少测试误差,应尽可能选择大的采样频率。

2.6.3 择更多电压等级的设备

对于 110kV 高压电缆以上的故障测试,由于电缆电容大,且击穿电压可能高,应选择更多电压等级的设备,以适合高电缆测试的需要。

3 几起典型的电缆故障测试实例

以下是近几年在多次电缆的故障测试中几起较为典型且有借鉴意义的测试实例,均采用 Baur 公司的电缆测试仪车进行测试。

3.1 两相低阻接地

2009 年 4 月 16 日,地点: 市区,电缆型号 10kV XLPE 三芯电缆,故障性质: 两相低阻接地。

分别采用二次脉冲法和低压脉冲法测试,结果相同。由于该电缆能够提供较精确的长度,为 407m,根据好相波形及总长可以计算出波速为 160m/us 与经验值 168m/us 相差较大,两个值分别测得的故障点距离为 187.2m 及 196.6m,测量后发现正好在 20m 的排管中,在管口两端挖开 4m,加周期高压冲击信号听不到声音,可能是由于低阻故障没法听到声音,判断故障可能在管中,但现场施工方认为不可能。因无法精确定位又接近天黑,于是再进行一次仔细的预定位,并且将杆脚下的预留长度挖出进行仔细丈量长度,按 160m/us 计算,测得故障点应在管口 2.7m 处,按 168m/us 计算应在管中 11.9m 处,决定将电缆在管口处锯断。拖出电缆后发现了故障点,通过丈量长度,确定故障点距离管口大约 2.7m 处,且为外力损伤导致。这次测试说明了: 1) 电缆数据的准确提供非常重要,这也是唯一一次采用 $V=160\text{m}/\mu\text{s}$ 测试的 10kVXLPE 电缆,结果非常准确。

2) 若不是仪器精确度高,对所测结果没有信心,就下不了决心锯断电缆,也就没办法定点,这也是提供了一种处理方法: 遇到管中电缆低阻故障,先在管的另一端将电缆锯断,拉出电缆查找。因为在管中的故障点修复也只能锯断电缆重新在管两端做接头,这需要确认预定位的准确性,因为锯断电缆查找是逼不得已的方法。

3.2 单相高阻接地

2010 年 8 月 27 日,地点市区,电缆型号: 10kVXLPE 三芯电缆,故障性质: 单相高阻接地。

这根电缆由于投运时间较久,无任何数据可查,且路径比较复杂。这是对电缆故障测试仪器的一次考验。使用电缆路径测试仪测出电缆的路径和深度,发现这电缆埋深已经达到 2m,且部分已被建在房屋下。接着采用二次脉冲法进行预定位并采用经检波速度 $V=168\text{m}/\mu\text{s}$ 测得电缆总那个为 783m,故障点距离为 336m,按所测路径量至 336m 处,刚好在一房屋下,最后加冲击信号,采用声磁同步法定出故障点的位置为 336.4 处,非常准确。本次测试是对整套测试设备的检验,也是一次很好的培训,进一步验证了 10kVXLPE 三芯电缆 $V=168\text{m}/\mu\text{s}$ 的准确性。这也说明了在故障测试中,运行数据的重要性,整套仪器加上完善的数据是实现准确定位的双重保证。

3.3 闪络性高阻故障

2003 年 12 月 3 日,地点市区,电缆型号: 10kV 单芯 XLPE 电缆,故障性质: 闪络性高阻故障。

10kV 中行线改造完成后,试验发现一相绝缘电阻为 35MΩ,泄漏较大。送电 3min 后保护跳闸,第二天测得设备绝缘电阻为 4MΩ。采用二次脉冲法加压 10kV(4uF)没有击穿,加压至 15kV,得到一次击穿波形,再也没有测到波形。加至 20kV 后仍没有结果,根据第一次测试结果在 1070m 处,丈量后没有发现异常,下午再次进行测试,发现加至 5kV 已经击穿,到 1070m 现场听到前面有响声,测得距离在 1101m 处。发现波速为 $V=172\text{m}/\mu\text{s}$ 非常准确。现场打开电缆沟盖板发现有水迹,故障点就在接头处,周围电缆已熏黑。调查后发现该处电缆沟冒烟,被附近保安淋了一桶水,正是午餐时间。经分析认为,由于电缆沟比较干燥,冲击电压将接头处水份慢慢蒸干,击穿点绝缘电阻由小变大,并着火冒烟,被淋湿后绝缘电阻下降,故可以测出波形。由此可知,

XLPE 电缆与油纸电缆不同,油纸电缆击穿越多次,形成的炭道就越大,绝缘电阻越低。而 XLPE 电缆则不同,击穿后故障处水份很快被蒸干,由于冲击的电弧吹力作用将通道清干,使绝缘电阻升高,但过一段时间受潮后绝缘电阻又将下来。因此应该特别珍惜前几次击穿波形。

3.4 未击穿泄漏电流过大

2009 年 9 月,地点:市区,电缆型号:10kVXLPE 三芯电缆,故障性质:未击穿泄漏电流过大。

第二矿机厂在做 10kV 电缆预试时发现 C 相绝缘电阻仅为 $5M\Omega$,且泄漏电流非常大。采用 10kV 到 20kV 的冲击电压进行测试均没有发生击穿,加至 25kV 时泄漏电流突然增大,说明已发生击穿。再采用二次脉冲法加 15kV 的冲击电压很快得到波形,结果很准确,正好在电缆接头上。本次实例说明对于闪络性故障,采用冲击电压不能击穿时,可进行常规的试验,使其击穿。同时,对电缆故障测试设备提出要求,应能进行中压电缆的耐压试验,以利于故障的快速查找。

4 结论

从奥地利 Baur 电缆测试车在对多次绝缘故障的测试中,成功率达到 99%且都在较短时间内定出故障点。对于电缆故障测试我们有如下几点体会:

(1) 电缆故障测试给电缆运行管理提出要求。因此在验收时必须严格把关,而且要求提供完善的电缆数据(长度、路径、接头位置等)。资料齐全,故障测试也就事半功倍。

(2) 对于进口与国产仪器的问题,认为:进口设备性能和质量好,价格较高是物有所值,而当所辖电缆达到一定规模后,停电损失与仪器的价格是不可比的。

(3) 几点应用心得:

1) 根据多次测试的验证,在没有得到准确的电缆长度时,波速度经验值选取是测试能否准确的关键,表 2 是几组波速度值是经过多次实践的测试检验的结果,但非绝对。根据电缆的准确长度,及完好相的反射法去计算出该电缆的波速度,才是正确的。

表 2 不同类型电缆波速的选择对应表

电缆类型	m/us
XLPE 三芯电缆	84
XLPE 单芯电缆	86
PVC	75~80
油纸电缆	78~85

2) 主绝缘故障的预定位比较容易实现,但是精确定位却很难,相反,外护套故障的预定位比较困难,精确定位却非常准备容易。在特殊情况下两者是可以结合使用的(当绝缘及外护套故障共点时),不妨一试。

3) 全套进口电缆测试设备应该具有测试所有电缆故障测试的功能,对于闪络性故障或者高压电缆故障可以采用衰减法进行测试。

4) 对于低压电缆测试,因为接头施工时地线连接不规范,测试时应该注意电缆地线与接地分开,当电缆一端测不到明显波形时,可以在另一端测试,总可得到较好的波形。

5) 进行预定位时的误差包括: a) 仪器本身的误差; b) 量度误差; c) 波速度取值不当的误差; d) 波形判断误差; 其中, a 由仪器本身决定, b 对预定位影响较大, 量度时应特别注意两端电缆是否有预留圈, c 最好根据已知准确长度计算, d 取决于仪器的性能及测试者的经验。

6) 预定位时当所测电缆较长时测不出波形,可以加大冲击电压或者适当调节触发延时时间得到波形。

参考文献:

- [1] 徐丙垠,李胜祥,陈宗军.电力电缆故障探测技术[M].北京:机械工业出版社,1999.
- [2] 奥地利 Baur 公司电缆测试车技术资料[Z].

作者简介:

蒋 俊 (1963-), 男, 江苏常州人, 工程师, 从事电力电缆的运行工作。