

# 电力电缆故障的诊断及防范

陆 锋

(上海交通大学,上海 200126)

**摘 要:**介绍了各种电力电缆故障的发生原因及故障种类,阐述了电缆故障测试步骤,常用测定故障距离的电桥法、低压脉冲法、故障点烧穿法、冲闪法、直闪法等及各自适用的场合。介绍了故障点的精确定位及电缆在线监测技术。根据现场的实际情况提出了技术和组织防范措施。

**关键词:**电缆故障;故障测试;防范措施;在线检测

**中图分类号:**TM 726.4 **文献标识码:**B **文章编号:**1006-6357(2006)06-0020-04

近年来电力电缆在电力系统中得到广泛的应用。电缆在运行过程中因为种种原因发生故障,发生故障后如果不能快速的检测出故障点的确切位置,对事故及时进行处理与及时恢复送电,将给电网和用户带来巨大的损失,也给人民生活带来不便。因此,当电力电缆发生故障时,必须迅速、准确地判定故障性质和位置,及时排除故障以保障生产的正常进行。本文对常见的电缆故障性质和原因进行了分析,列举了常用的电缆故障诊断方法,并提出了防范措施以降低电缆事故的发生率。

## 1 造成电缆故障的原因

电缆故障的最直接原因是绝缘降低而被击穿。导致绝缘降低的因素很多,根据实际运行经验,归纳起来不外乎以下几种情况。

1) 外力损伤。由近几年的运行分析来看,尤其是在经济高速发展中的上海浦东,现在相当多的电缆故障都是由于机械损伤引起的。比如:电缆敷设安装时不规范施工,容易造成机械损伤;在直埋电缆上搞土建施工也极易将运行中的电缆损伤等。有时如果损伤不严重,要几个月甚至几年才会导致损伤部位彻底击穿形成故障,有时破坏严重的可能发生短路故障,直接影响电网和用电单位的安全生产。

2) 绝缘受潮。这种情况也很常见,一般发生在直埋或排管里的电缆接头处。比如:电缆接头制作不合格和在潮湿的气候条件下做接头,会使接头进水或混入水蒸气,时间久了在电场作用下形成水树枝,逐渐损害电缆的绝缘强度而造成故障。

3) 化学腐蚀。电缆直接埋在有酸碱作用的地区,往往会造成电缆的铠装、铅皮或外护层被腐蚀,保护层因长期遭受化学腐蚀或电解腐蚀,致使保护层失效,绝缘降低,也会导致电缆故障。化工单位的电缆腐蚀情况就相当严重。

4) 长期过负荷运行。超负荷运行,由于电流的热效应,负载电流通过电缆时必然导致导体发热,同时电荷的集肤效应以及钢铠的涡流损耗、绝缘介质损耗也会产生附加热量,从而使电缆温度升高。长期超负荷运行时,过高的温度会加速绝缘的老化,以至绝缘被击穿。尤其在炎热的夏季,电缆的温升常常导致电缆绝缘薄弱处首先被击穿,因此在夏季,电缆的故障也就特别多。

5) 电缆接头故障。电缆接头是电缆线路中最薄弱的环节,由人员直接过失(施工不良)引发的电缆接头故障时常发生。施工人员在制作电缆接头过程中,如果有接头压接不紧、加热不充分等原因,都会导致电缆头绝缘降低,从而引发事故。

6) 环境和温度。电缆所处的外界环境和热源也会造成电缆温度过高、绝缘击穿,甚至爆炸起火。

7) 电缆本体的正常老化或自然灾害等其他原因。

## 2 电缆故障的类型

1) 电缆单相接地故障或多相接地故障。一般接地电阻在100 kΩ以下为低阻接地故障,100 kΩ以上为高阻接地故障。

2) 短路故障。电缆两相短路故障或三相短路故障,一般电阻在100 kΩ以下为低阻短路故障,100 kΩ以上为高阻短路故障。

3) 断线故障。电缆导体一相断开或多相断开。

4) 闪络故障。当试验电压升到某一值时,电缆泄漏电流突然升高,并且测量表针呈规律性摆动,电压稍下降时,此现象消失,但电缆绝缘仍有极高的阻值,表明电缆存在故障,但该故障点没有形成电阻通道,在较高电压时产生瞬时击穿的故障称为闪络性故障。

接地故障、短路故障一般由于电缆本体绝缘老化、外力损坏等原因造成;断线故障一般由于短路电流、外力损坏造成;闪络故障一般由于接头质量问题、电缆本体制造质量等原因造成。

### 3 电缆故障测试的基本步骤

当电缆发生故障后,首先应判断电缆的故障性质,然后针对故障性质选择相应的故障测寻方法进行测试。

#### 3.1 故障性质的判断

1) 故障性质的判断通常分以下三个步骤。

(1) 确定是否为短路(接地)故障,可将电缆脱离供电系统后,用绝缘电阻表测量每相对地绝缘电阻。通过测试绝缘电阻,判断电缆是否为短路故障。

(2) 确定是否为断线故障,可进行导体的连续性试验,测试导体直流电阻。通过直流电阻值判断是否存在断线故障。

(3) 确定是否为闪络故障,可对电缆进行耐压试验。如果出现不连续的击穿现象,则判断电缆线路存在闪络故障。

2) 故障测寻方法的选择。有了准确的故障性质判定结论后,便可选择合适的探测仪器和确定测寻方法。电缆故障相应的测寻方法有以下几种。

(1) 接地故障:①低阻故障采用低压脉冲法、电桥法、冲闪法;②高阻故障采用直闪法、冲闪法、二次脉冲法;③三相短路采用低压脉冲法、电桥法。

(2) 断线故障:采用低压脉冲法。

(3) 闪络故障:采用直闪法、冲闪法、二次脉冲法。

#### 3.2 电缆故障距离的测定

常用电缆故障距离测定的方法有电桥法、低

压脉冲法、故障点烧穿法、冲闪法、直闪法、二次脉冲法等。

1) 电桥法。电桥法是利用回路电桥平衡法对电缆故障点测寻,其最大优点是精度高。

2) 低压脉冲法。低压脉冲法是测试时向电缆注入一低压脉冲,该脉冲沿电缆传播到阻抗不匹配点,如断路点、短路点、中接头等,通过故障点反射脉冲与发射脉冲的时间差原理来测距。根据波形极性还可判断故障性质,如短路故障的反射脉冲与发射脉冲极性相反,断路故障反射脉冲与发射脉冲极性向同,因此低压脉冲法适用于测试交联电缆低阻、短路、断路故障。低压脉冲法的最大优点是使用方便。

以上两种方法共同的最大障碍是无法测试高阻故障和闪络故障。所以在测试高阻故障、闪络故障时常常结合下面的几种方法。

3) 故障点烧穿法。加大电流将故障处烧穿,使其绝缘电阻降低以达到可以使用电桥法或低压脉冲法测量的目的。在使用故障点烧穿法测寻交联电缆故障时有时发现,经过几次大电流烧过后,大多数故障点电阻不会降低还会有所升高,然而纸绝缘电缆故障则很少有这种现象。这是因为交联(XLPE)电缆其材料的特殊性,当电缆击穿点放电时电弧的高温使 XLPE 瞬间分解炭化,形成导电通道。炭化后的 XLPE 和原材料的附着力很小,在电弧的吹力作用下,又使这些炭化颗粒离开 XLPE 表面,露出基本正常的 XLPE 来,对外表现就是高阻击穿现象。当多次在击穿点电弧放电,导致故障击穿点的电阻趋于一较高值。

4) 冲闪法。逐渐增加电压给电容器充电,当电压到达某一值,球间隙击穿,电容对电缆放电,高压脉冲信号施加于电缆使故障点击穿,通过分析故障点击穿放电所产生的脉冲电流波形,测试故障点距离。

5) 直闪法。逐渐增加电容上电压到达某一值,电缆故障点击穿。高压脉冲信号施加于电缆使故障点击穿,通过分析故障点击穿放电所产生的脉冲电流波形,确定故障点距离。

冲闪法与直闪法是比较常用的检测方法,冲闪法与直闪法的区别是,“直闪法”为去掉球间隙直接对电缆加高压脉冲信号。

6) 二次脉冲法。由回波仪释放一个发射脉

冲,在高阻或间歇性电缆故障点不能被反射,仪器将显示整个电缆长度的波形存储起来,此波形图叫“完好轨迹”。高压电容器放电,使电缆故障点发生闪络,故障点的电弧就变为非常低的电阻。同时回波仪被触发送出第二个发射脉冲,此加在高压信号上的脉冲将从故障点反射。这样,带自动数据处理的回波仪存储故障点反射波形,并将完好地和故障的轨迹进行叠加,两条轨迹将有一个清楚的发散点。这个发散点就是故障点的反射波形点。二次脉冲法其特点是易操作、多功能,回波图形解释简易。

二次脉冲法是20世纪90年代发明的测试技术,是目前较先进的测试方法,现在国内使用此方法的也逐渐多了起来,现有使用者都使用的进口设备。

#### 4 电缆故障点的精确定位

在测定电缆故障点的距离后,我们要对故障进行精确定点。首先要查看电缆敷设时的原始资料,对电缆的走向、敷设方式进行了解。在已测得的定位距离附近使用声测法、跨步电压法确定故障点。

声测法是给故障电缆加上一足够高的冲击电压,使故障点发生闪络放电,产生相当大的“啪、啪”放电声,同时,会在电缆的外皮与大地形成的回路中感应出环流来,这一环流在电缆周围产生脉冲磁场。用一个包含接地麦克风接收器和耳机的听音装置在地面探测。故障点离麦克风的距离越近,闪络声就越大。在监听声音信号的同时,接收到脉冲磁场信号,即可判断该声音是由故障点放电产生的,故障点就在附近,否则可认为是干扰。在故障点位置能探测到闪络声的最大值。

由于交联聚乙烯电缆内部存在大量无规则的气隙,放电时击穿处发出的声音会在交联电缆的填充物内漫射,在一大段电缆内部都听得见声音,且大小基本相同,如果不是有明显的击穿点,放电声音很难辨别。当遇到电缆本体内闪络或故障点附近有空腔共振(如电缆沟)的情况,放电时,不仅声音会在很大范围内都能听见,而且音量大小相同,这就很难做到精确定位。鉴于目前尚未有更好的技术,不能够完善地解决精确定点的问题,只有根据预定位距离和电缆资料,掀开电缆沟盖板

或挖开直埋段的路面,直接在电缆本体上进行定点工作。遇到噪声太大、放电声音太小而听不清楚时,可在夜深人静时再听,这时监听效果还是比较好的。

### 5 电力电缆在线监测在电缆故障防范方面的应用

#### 5.1 在线检测的基本原理

电力电缆的在线检测是个新兴的课题,其基本原理是对电力电缆的各项数据如介质损耗( $\text{tg}\delta$ )及运行温度等进行采集、分析、判断,争取在故障发生之前发现电缆的早期缺陷,采取停电检修,防患未然。目前电缆的在线检测技术主要有介质损耗( $\text{tg}\delta$ )在线检测技术、绝缘树枝状老化直流分量在线检测技术、迭加直流电流法在线绝缘诊断技术、迭加交流电流法在线绝缘诊断技术、电缆护套绝缘电阻在线检测技术、电缆介质绝缘电阻在线检测技术、电缆屏蔽层化学电势在线检测技术等等约十多种。

一种新的基于人工神经网络的地下电缆线路的故障定位技术已经提出。在系统故障期间,输电线路各种不同地点的一系列的测量电压、电流作为样本输入到专门的神经网络中,这个样本被拿来同故障样本相比较以识别故障位置。

电缆故障测距专家系统将专家知识库作为电脑的基本数据库,用一套规则来维护和更新该数据库。知识库可以从以往的故障事件中提取,并可以在实际应用中修改。应用实时专家系统,能大量地减少由于缺陷引起的故障,或者极大地减少故障诊断的时间,从而提高供电可靠率;但是其缺点也是十分明显:由于需要建立一个原来不存在的监视系统,这要消耗大量的人力物力。因为技术也尚未完善,所以在实施过程中还存在很多技术难题。目前国内外都在进行相关的实践和研究,相信不久这项技术将会得到完善。

#### 5.2 在线检测在电缆故障诊断方面的应用

据相关资料反映,有种光纤复合电缆被应用于电缆故障的诊断,这种方式有着几方面的优点:①光纤传感技术用于地下电力电缆的故障检测,具有方法简便、定位快速准确和不受电磁干扰;②光纤复合电缆对于电缆接头进行监测,能预防由

接头引起的电缆故障。

利用这种光纤复合电缆来进行电缆故障定位以及接头实时监测的原理是:基于电缆故障时电弧所发出的大量热量,引起故障点周围温度的急剧变化,或电缆接头质量下降,引起接触电阻增大,导致发热量变大。光纤复合电缆系统通过放置在电缆的铜屏蔽层内的光纤温度传感器对电缆及接头的温度进行监测,根据故障前后温度的对比分析,从而达到迅速定位故障点或缺陷点的目的。

## 6 电缆故障的防范

电缆故障的成因虽然复杂,但只要围绕提高绝缘强度和加强绝缘监测,采取积极的措施,减少电缆故障是可能的。

### 6.1 预防电缆故障的技术措施

1) 按照电缆规定运行周期及时调换旧电缆。比如以交联聚乙烯电缆取代油浸绝缘电缆。但是交联电缆也有超过运行寿命就容易坏的缺点,因此也需要按其周期及时调换新电缆。

2) 改进电缆终端制作工艺。比如早期油纸电缆终端大多数使用铸铁电缆终端,这种电缆终端经常容易漏油损坏,而环氧树脂电缆终端具有较高的机械强度和耐压强度、吸水率低、化学性能稳定、与金属粘结力强、密封性能好,采用这种电缆终端,基本上可解决电缆漏油等问题,提高电缆的绝缘性能。

3) 安装温度监测装置。电缆故障的发生必然伴随着温度的升高,因此可采用温度监测装置,实时反映电缆的温度状况,有利于提早发现故障,并可及时发出警告,提醒运行人员采取措施,避免事故扩大。

4) 防火降温措施。在变电所内电缆使用阻燃电缆,或涂防火漆,在电缆密集处装设防火隔板,用防火泥堵孔,防止因少数电缆故障造成大面积电缆事故。按工艺规程敷设电缆,应尽量避免电缆过于密集,这样可防止温度过高而造成绝缘老化。

### 6.2 预防电缆故障的组织措施

1) 制定完善的巡视制度。电缆的巡视部门是预防外力破坏最直接、最有效的部门。巡视部门应按规定周期进行巡视。巡视应包括以下内

容:①查看电缆是否受到外力破坏;②电缆有无被腐蚀及水浸情况;③电缆绝缘有无破损和放电现象;④查看电缆终端的温度;⑤检查电缆保护装置是否完好。

2) 电压及负荷检测。为防止绝缘老化,线路电压一般不应比电缆额定电压高出15%。经常测量和监视电缆的负荷情况,保持电缆线路在规定的允许持续载流量下运行,一旦发生电缆线路过负荷的现象,应立即与相关部门协调制定有效方案。

3) 严格按规程要求敷设电缆。电缆相当一部分的故障原因是由于敷设电缆的质量问题。因此敷设电缆应根据实际地面建筑情况及周围环境,选用穿管、电缆沟、排管、直埋等方式。要严格按照标准要求敷设施工,加强工程施工中现场的监管力度以及工程完工后的竣工验收。

4) 线路施工监护交底。在电缆线路附近施工时,应有熟悉电缆走向的人员在现场指导、监护,避免电缆受到外力损伤,保证人身安全。

## 7 结论

在实际工作中,电缆的故障类型和故障原因是多种多样的,电缆故障产生的根源一般是积患已久和管理不善。所以只要提高相关人员的主观认识,采取得力措施,精心维护,积极预防,电缆事故是可以减少甚至杜绝的。采用合理的方法和仪器来准确判断电缆故障性质,往往有事半功倍的作用,可以迅速找到故障点及时处理故障。而新兴的在线监测技术能对各种电缆缺陷及早发现,防患未然。

加强预防措施,以防范为主,是降低电缆故障率最有效的方式。加强对重要电缆线路的监测,及时在故障前发现缺陷,从而减少电缆故障的发生,毕竟故障后测寻技术是种被动的技术,远远不如主动的预防措施有效,这对保障电网的安全运行,提高供电可靠性有着重大意义。

### 参考文献

- 1 史传卿. 电力电缆安装运行技术问答[M]. 北京: 中国电力出版社, 2006年.

收稿日期: 2006年5月