[输电线路]

35 kV三芯电缆终端头多次接地着火事故原因浅析

文/唐山三友氯碱有限责任公司　陈永顺

简要介绍了35 kV三芯电缆终端头两次接地事故，通过对弧光接地、树枝劣化、电缆头制作工艺及直流耐压试验成因分析，确定了故障原因，为减少和避免此类故障的发生，提高供电可靠性具有重要的意义。

电缆是输送电能必不可少的电气材料，电缆事故的发生，尤其是在企业中，不仅会中断正常生产，而且可能引起一系列的恶性联锁事故，甚至是安全事故。针对我公司2014年几次35 kV热缩电缆终端头事故进行原因分析，规范了我公司电缆终端头制作方法，并对我公司35 kV系统准备加装消弧柜，以防止弧光接地的发生。

事故现象

2014年2月11日站内进线电缆头接地冒烟起火，7月25日和11月9日站内电容器电缆头接地冒烟起火，2015年1月10日站内电解变压器出线电缆头接地冒烟起火，这几起事故故障现象相同，后台监控均发接地报警，接地相电压下降，未接地相电压升高，故障点均发生在电缆头应力管处，而且，火光均是在将起火线路切除后消失。

原因分析

事故现场和事故发生时变电站运行状况说明，电网运行状况良好，不存在超负荷运行、母线电压不平衡、操作及雷击过电压等情况，电缆敷设符合规程要求，所以电缆头的烧毁事故与电网运行状况无直接关系。

如果单相接地故障为金属性接地，则故障相的电压降为零，其余两健全相对地电压升高为线电压，电气设备正常运行情况下应能承受这种过电压而不损坏。运行中的单相接地故障一般过程是间歇性电弧接地—稳定电弧接地—金属接地，根据实测，间歇性电弧接地持续时间可达0.2~2 s，频率可达300~3 000 Hz；稳定电弧接地持续时间可达2~10 s，最后，故障点被烧熔成为金属性接地。但是，间歇性弧光接地会在系统中产生3.5倍相电压峰值的过电压，势必会造成电气设备内绝缘的积累性损伤，而且，在间歇性电弧接地暂态过程中，实际系统会形成多频振荡回路，最大高频振荡电流可达数百安甚至上千安培。现我公司35 kV母线安装有消弧线圈，系统发生接地时补偿电流满足要求，同时，消弧线圈脱谐度设定为5%，残留较小，电弧应能可靠熄灭，但当发生弧光接地时，消弧线圈只是补偿工频电容电流，而实际通过接地点的电流不仅有工频电容电流，而且包含大量的高频电流，以电缆线路为主的供电电网，绝缘击穿或电弧重燃时过渡过程中的高频电流，可达数百安甚至上千安，而这些高频电流就可以维持电弧的持续燃烧，甚至在某些情况下，因消弧线圈的存在，电弧重燃可能在恢复电压最大这一不利时刻发生。

我公司从建厂至今，35 kV电缆采用的均为交联电缆。

交联电缆绝缘层有如下优点。

1）优良的电气性能。耐电强度高（长期工频击穿强度20~30 kV/m，冲击击穿强度40~65 kV/

m），介损小（工频时tan δ =0.00 02~0.001），介电常数小（2.3~2.5）；其中，空气的工频击穿强度为1.7~2.1 kV/m，也是局部放电起始场强。

2）耐热性能好（连续工作温度90 ℃），因而载流量较大。

3）不受落差限制。

但也有如下缺点。

1）耐局部放电性能差，受杂质和气隙及水分的影响很大，在这些缺陷处易产生局部电场集中，发生局部放电，造成不可恢复的永久性损坏。

2）热膨胀系数大，热机械应力效应严重。

所以，交联电缆的生产特别强调纯净，尤其是高压超高压电缆的质量更是由材料的纯净度决定的。对于交联电缆附件，除了结构设计正确合理外，最重要的问题也是清洁问题，尤其是附件所涉及绝缘界面往往是电场易变的地方，一旦有杂质、气隙等，其绝缘性能会显著下降。

交联电缆发生事故的主要原因有机械损伤、铜屏蔽带断裂、绝缘受潮、电缆过热及过电压、材料缺陷、电缆头制作工艺、树枝劣化和直流耐压试验等。

针对以上原因并结合现场电缆运行情况检查分析，机械损伤、铜屏蔽带断裂、电缆过热及过电压和材料缺陷均可排除。

以下对树枝劣化、电缆头制作工艺及直流耐压试验做简单说明。

1）有机材料的树枝化是由于材料内部细微开裂造成的，“树枝”就是这种中空开裂现象的统称。细微开裂的引发可以是原有亚微观裂纹的存在，或气隙、水分或化学杂质的存在，或无任何裂纹的存在，只是极高的场强导致冷发射电子引发裂缝。从高场强处、气隙、含水的空洞和杂质等处引发树枝核心后，向三维立体空间发展。一般是沿电力线方向，也有因材料的原因而出现垂直电力线方向的树枝，这些树枝延伸发展到场强所至的对极（整个绝缘厚度，最后发生整体击穿，从引发树枝萌芽到发展至对极的时间可以是几分钟、几十分钟、几年或十几年。水中运行的电缆、线芯进水的电缆、绝缘中含有水分的电缆以及护套内进入潮湿空气的电缆容易引发水树枝，水树枝是在电场和水分同时存在的条件下产生的。而处于高场强的不连续界面（气隙、杂质和电缆内外半导层界面）特别容易引发电树枝，电树枝往往在高场强集中地微裂纹转变为裂缝或开裂处形成树枝。交联电缆在制造过程中不可避免地存在微观制造缺陷（微孔、杂质），以及电力电缆在运输、敷设和安装过程中诸如主绝缘和外护套机械应力损伤、终端和中间头安装质量、现场施工环境条件和员工技术素质控制等不利因素影响，随着水分缓慢地侵入（吸附、扩散或迁移），电缆绝缘介质在电场、水分和杂质等绝缘缺陷的协同作用下，逐步产生树枝状早期劣化，当树枝状劣化贯穿介质或转变成电树枝，最终导致电力电缆本体或电缆附件发生试验击穿和运行击穿故障。

2）由于热缩电缆附件具有电气性能和耐热性较好、安装简便及价格便宜等优点，我公司35 kV及以下电缆头普遍采用热缩电缆附件。但热缩电缆终端头的制作工艺虽简单，却受环境温度、湿度影响较大，即使是完全按照制作工艺制作，在制作电缆头切断电缆外屏蔽层后，将引起电场畸变，切断处电场应力较为集中，该处绝缘成为薄弱环节，应力管虽然在某种程度上起到分散电场应力的作用，但长期运行势必老化，引起绝缘破坏。

3）制作电缆头工艺存在的问题。应力管与护套管烘烤不够充分，密封不严，致使有空气进入的可能，而且我公司地处沿海，空气湿度以及空气中所含盐分较高，长期运行势必在有空气的地方形成绝缘材料的水树枝状况，引起绝缘破坏，这一点从故障电缆以及对运行5年以上电缆头检查时发现的现象可以得到确认，铜屏蔽层有发黑及绿色铜锈；在制作电缆头切断电缆外半导层后，断口不齐，将引起电场严重畸变，并在外半导层断口尖端放电，加速水树枝转变形成电树枝，并影响绝缘直至造成绝缘破坏、击穿，通过电缆头照片可以清楚地看到放电及绝缘破坏情况，如图1所示。

图1　电缆头照片

4）安装试验以及预防性试验时，按照部颁标准进行直流耐压试验可能对电缆局部造成损伤。

直流耐压试验对发现纸绝缘电缆缺陷十分有效，但对交联聚乙烯绝缘电缆则未必有效，而且还可能产生负作用，主要表现在以下几个方面。

1）在直流电压作用下，其绝缘层中的电场强度是按绝缘强度正比例分布，但交联聚乙烯电缆绝缘层有一定的杂质，如甲烷、乙醇等，将导致电缆绝缘层中的电场分布不均匀，不能有效检测出绝缘的薄弱点。

2）交联聚乙烯绝缘电缆的一个致命弱点是绝缘内容易产生水树枝，一旦产生水树枝，在直流电压下，会迅速转变为电树枝，并形成放电，加速了绝缘劣化，以至于在运行工频电压作用下形成击穿。

3）现场进行直流高压试验时，发生闪络或击穿可能会对其他正常的电缆和接头的绝缘造成危害。

4）直流高压试验有累积效应，将加速绝缘老化。交联聚乙烯绝缘电缆在直流电压下会积累单极性电荷，一旦有了由于直流耐压试验引起的单极性空间电荷，需要很长时间才能将这种电荷释放，电缆如果在直流残余电荷未完全释放之前投运，直流电压便会叠加在工频电压峰值上，使得电缆上的电压值远远超过其额定电压，它将加速绝缘老化缩短使用寿命，严重的会发生绝缘击穿，而我公司对这些中压交联电缆每年都进行预防性试验，这也是电缆故障原因之一。

图2是对运行5年以上电缆检查时发现的现象，综合事故现场的情况，可以确定，造成两次电缆事故的直接原因就是电缆头制作存在问题，间接原因就是直流耐压试验。

图2　电缆检查实物图

结束语

通过对两次事故分析，消弧线圈其实并不能完全补偿单相弧光接地电流，不可避免地会发生电缆起火事故；特别值得注意的是电缆头的制作一定要规范，提高施工质量；同时建议对交联绝缘电缆预防性试验直流耐压试验周期适当延长。EA

（收稿日期：2015.04.07）

（编辑：刘群点）

（上接第69页）

胀冷缩在伸缩节补偿范围内。

2）固定支撑强度要满足温度补偿伸缩节变形需要。必须能够提供在极限条件下母线壳体热胀冷缩使温度补偿伸缩节变形时所需的支撑反力。

3）母线端部固定支撑需要提高强度。这是由于盲板力的作用，母线端部固定支撑需要承受更大的载荷。

4）滑动支撑的允许滑动距离需要与温度补偿伸缩节变形量相匹配。压力平衡型伸缩节与偏角补偿型伸缩节的补偿变形量由较大的差异，设计时需特别注意。

结束语

GIS产品工程设计中母线的设计一般都是内容最多、工作量最大的部分，母线工程设计质量的优劣决定了整个GIS产品的设计质量。GIS母线工程设计中需要充分考虑工程的整体布局和环境条件，结合母线设备中外壳、内导、伸缩节和支撑等零部件的结构特点，确定包含GIS母线整体布局、波纹管设置数量和位置、支架的布置等内容的工程设计方案。方案的制订需要综合考虑设备的电气和机械可靠性，而机械可靠性是保证电气可靠性的基础。

随着GIS产品技术的日臻完善，需要在工程设计中认真总结、深入研究，不断提升工程设计质量。EA

（收稿日期：2014.11.06）

（编辑：刘群点）