

[断路器]

一起变电所线路热备用开关崩毁事故的分析

文/中油电能供电公司杏南运维部变电检修队 谢宝全

对一起变电所热备用开关崩毁事故进行了分析，通过分析认为开关崩毁的主要原因是雷电过电压在热备用线路开关处发生全反射。针对此类事故提出了预防措施，并通过绝缘配合计算提出经常热备用断路器应在10 m内加装避雷器。

在电力系统中，断路器作为电网主要开断设备，直接崩毁的事故并不多见。这是因为断路器相对其他设备而言绝缘裕量是比较高的，在各种过电压侵袭电力设备过程中，相对绝缘薄弱的环节（比如电缆头、电压互感器等）会先被过电压击穿，一般保护会及时将故障部位切除，从而避免了事故扩大。

2016年6月，油田电网南部地区杏V-3变电所发生一起断路器崩毁事故，事故调查情况如下。6月21日12时21分，杏V-3 35 kV杏五V-3线路开关51237开关A、B相崩毁，杏南一次侧35 kV杏V-3线345距离Ⅱ段保护动作，开关跳闸，重合闸不成功，龙河一次变电所35 kV杏五线01943距离Ⅱ段保护动作，开关跳闸，重合闸不成功，同时杏五变电所杏五V-3线过电流Ⅱ段保护动作，开关拒跳。杏五变电所、杏V-3变电所全所失电。杏V-3变电所运行人员检查发现35 kV杏五V-3线路开关51237开关A、B相下半部完全崩毁，被导线挂在开关底座上，地下四处瓷瓶碎片，刀开关部分瓷瓶被牵连崩坏。

当日为雷雨大风天气。调取变电所监控视频显示，在事故发生的瞬间，空中有强烈闪光，应为强烈雷闪。随后由于全所失电，监控视频

中断。当时杏五V-3线路开关51237开关为热备用状态。调取线路雷电监测数据，12时21分，在杏五V-3线路30~31#附近监测有雷电活动，杏V-3终端杆为36#，线路巡线未发现雷击痕迹。

杏五V-3变电所实际是2015年新投运的变电所，2016年4月刚刚进行交接，交接过程中全项目进行的交接试验，包括交流耐压等试验均为合格。从这一点来看，51237因本体绝缘缺陷导致故障的可能不大。51237线路终端杆有带串联间隙避雷器。当时变电所主接线为单母线分段接线方式，两条线路进线，只有一条线路进线（即51236线路）处于供电状态。终端杆到变电所龙门架的距离为20 m。

事故原因分析

从事故调查情况来看，事故主要原因是线路遭受雷电冲击过电压，在线路终端即热备用开关处，发生全反射，瞬间过电压超出了断路器雷电冲击电压承受上限，造成断路器绝缘击穿，雷电冲击能量释放，将断路器本体崩碎。由于线路开关处于热备用状态，那么变电所的避雷器就无法保护断路器线路侧。另外事故发生时还有一个细

节,断路器为柱式结构,当时线路侧刀开关(即导线)是接在下侧接线板,由于上侧接线板还有一个断路器内部断口间的绝缘,相比之下,下侧接线对地绝缘要薄弱一些。

按常用35 kV线路带串联间隙避雷器的残压设计,基本为120~124 kV之间,粗略估算全反射瞬间的雷电冲击电压峰值在240 kV左右,这个数值远高于35 kV断路器的雷电冲击耐压185 kV(峰值)的,所以发生断路器崩毁也就并不奇怪了。由于实际雷电冲击快波电压的幅值与避雷器保护设备的距离以及雷电发生点距离有关,所以关键在于避雷器到底能否保护线路断路器。

线路避雷器的保护范围下过电压的计算

在避雷器动作时,被保护设备在雷电冲击波下的冲击电压需要通过公式进行计算。按绝缘配合中的公式计算

$$U_{\text{ap}} = U_{\text{pl}} + 2ST; U_{\text{p}} \geq 2ST \quad (1)$$

$$U_{\text{p}} = 2U_{\text{pl}}; U_{\text{pl}} < 2ST \quad (2)$$

$$S = \frac{1}{nK_{\text{co}}X} \quad (3)$$

$$T = \frac{L}{c} \quad (4)$$

式中, U_{pl} 是避雷器雷电冲击保护电压,单位为kV; S 是侵入波陡度,单位为kV/ μs ; T 是行波传播时间,单位为 μs ; K_{co} 是电晕衰减常数,单位为 $\mu\text{s}/\text{kV}\cdot\text{m}$; X 是雷击点和变电站的距离,单位为m; n 是进线数; L 是被保护设备与避雷器间电气距离,单位为m; c 是光速, $c = 300 \text{ m}/\mu\text{s}$ 。

以上公式中, K_{co} 查表为 $1.5 \times 10^{-6} \mu\text{s}/(\text{kV}\cdot\text{m})$ 。由于开关热备用,进线相当于1条,雷击点距离为5个档距(35 kV线路档距150 m),即750 m,加避雷器距离断路器距离,实际当时终端杆距离开关为25 m, U_{pl} 取避雷器残压120 kV,综合计算得到

$$S = 1/(nK_{\text{co}}X) = 1/(1.5 \times 10^{-6} \mu\text{s}/(\text{kV}\cdot\text{m}) \times 775) = 860 (\text{kV}/\mu\text{s});$$

$$U_{\text{p}} = U_{\text{pl}} + 2ST = 120 + 2 \times 860 \times 25/300 = 120 + 143.3 = 263.3 (\text{kV});$$

由于 $U_{\text{pl}} < 2ST$, 故采用公式(2)

$$U_{\text{p}} = 2U_{\text{pl}} = 240 (\text{kV})$$

这个数值与前面按全反射估算的数值是一致的。过电压的数值主要与被保护设备和避雷器之间的距离相关,如果要限定雷电过电压数值,显

然只有缩短避雷器与保护设备的距离才能有效地降低雷电冲击电压峰值的幅值,按35 kV断路器的雷电冲击耐压185 kV(峰值)反向计算,得到距离应该在11.36 m之内,如果取整的话,那么可取10 m。也就是说,如果避雷器安装位置在线路开关10 m以内,能较有效防止类似此次事故中发生距离终端较近(小于1 000 m)的雷电过电压危害。

当然以上仅仅是从理论计算分析,实际情况要比这复杂,可能有较大误差,但可以确认一点,避雷器安装位置越近,保护效果越好。热备用线路断路器由于其运行方式,相比常规运行方式断路器在雷电冲击下会承受更高的过电压,因此应在近距离安装避雷器进行保护。

线路热备用断路器反事故措施

根据以上计算分析,认为可以采取以下措施预防此类事故。

1) 在线路经常热备用断路器线路侧10 m以内装设避雷器。避雷器可以采用带串联间隙的氧化锌避雷器,安装位置建议在线路进线龙门架构上,这样基本保证距离被保护断路器在5 m以内,同时与其他设备有足够的安装距离。通过相关文献的雷电事故统计可以看到,线路终端杆装设避雷器发生此类事故极少,虽然其主要讨论的是110 kV以上系统,与中低压小电流接地系统有所区别,但是同样具有参考价值。

2) 类似柱式开关,改变线路开关结线方式,将线路侧结线接在开关的触头断口上侧接线板。相比之下,断路器下侧接线部分是断路器绝缘相对薄弱点,同时由于断路器断开口有较高的绝缘强度,在过电压侵袭时能分担一部分过电压峰值,这样可以降低过电压危害设备的风险。这一措施适用于所有线路开关,有助于减少因线路过电压造成事故的可能。

结束语

线路热备用断路器由于运行方式特殊,无法受到变电所内避雷器保护;同时线路终端杆避雷器电气距离较远,在近距离发生雷电冲击时,不足以保护断路器。EA

(收稿日期: 2020.01.03)

(编辑: 朱金凤)