

[开关设备]

第三代核电AP1000中压开关柜特点及快速灭弧装置的应用

文/国核工程有限公司 方福春
中核核电运行管理有限公司 鲁金枝

AP1000是第三代先进压水堆核电厂，该厂对设备的可靠性要求比较高，核岛中压开关柜的可靠性是整个核岛安全供电的基本保障。中压开关柜如果发生电弧故障可能会产生非常大的破坏作用，首先介绍了AP1000核岛中压开关柜的特点以及开关柜内产生电弧故障的原因，电弧故障的形成过程，以及常见的弧光保护措施。介绍了弧光保护在中压开关设备中的重要性，通过分析快速灭弧装置的工作原理以及结构特点，说明为了满足AP1000对中压开关柜高可靠性要求，在该中压开关柜中安装快速灭弧装置的必要性。

第三代核电技术AP1000主要特征是采用非能动安全原理，使核电厂的系统、设备和构筑物大幅度简化，安全性、可靠性和经济性大幅度提高。由于AP1000的非能动安全特性使厂外电源没有安全相关性能，因此不需要多重的厂外电源，但是对于中压开关柜整体结构以及开关柜内设备的可靠性要求比较高。开关柜内部电弧故障是一种不可预测的偶发事故。故障发生时，电弧燃烧所释放的巨大的能量产生的各种有害效应，将对设备及附近人员造成严重的伤害。与大多数人非常熟悉的火灾情况相比，电弧故障是一种发展非常快的事件，它在一个非常短的时间内高度集中释放所有的能量，可能对附近工作人员造成致命的危害。因此，必须做好严格的防护措施来保证人身以及设备的安全。

中压开关柜结构特点

AP1000核岛中压开关柜包括柜体、泄压通

道、母线、抽出式真空断路器、继电保护装置、电压互感器、电流互感器、继电器、开关、熔断器、仪表、指示装置及其他必要的设备。该中压开关柜由两段母线组成，开关柜组应能够有效地从UAT、RAT或DG处接受电能并将其配送至LC变压器及其他中压负荷，并具有保护、控制和检测功能。

每台开关柜应为金属铠装、IACAFLR级并配置PM级隔板，设备运行连续性为LSC2B类。带多层隔室包括控制元件、可抽出断路器、互感器、接地开关以及垂直布置的共箱母线和电缆连接装置。需要满足GB 50260中关于抗震的相关要求，地震设防烈度为8度。

带安全玻璃的观察窗的防护等级以及强度应至少与断路器室一致，应防止静电积聚，柜体的防护等级为IP42。必须设置带钥匙操作的机械联锁装置，比如当高压隔室的柜门打开时，断路器或互感器不能进入工作位置；防止下游接地开关合

闸时投入上游电源等。

为了满足相关节能规范要求，开关柜应安装能量管理系统。

开关柜内部控制线应采用多股铜芯导线，额定工作温度为90℃，由于AP1000核电站的整体要求，所有导线都应具有低烟、无卤和阻燃特性，并能够通过GB/T 18380.11中垂直燃烧试验。

开关柜对弧光保护的要求

内部电弧故障是开关柜最不易发生的故障之一，但是它理论上仍然可由各种因素造成，如：因绝缘件老化而引起的绝缘降低，如恶劣的环境和高污染的空气对绝缘件的影响；大气过电压和操作过电压；运行人员的误操作；闭锁机构失效；因主回路接触面腐蚀或连接螺栓松动导致发热；小动物进入开关柜内；安装或维护时遗留物件在柜内。

这些因素最终反映到开关柜上都是电流的急剧增加，导致开关柜内温度上升、电动力增大，形成内部燃弧故障。根据国外的研究和试验结果，故障电弧的形成可分为以下4个阶段。

1) 压缩阶段。持续时间约5~15 ms。在这一阶段温度上升，并产生动态压力波。

2) 膨胀阶段。持续时间约5~15 ms。在这一阶段短暂的时间内，因燃弧区和周围空气之间存在压力差，开始产生气流。

3) 排放阶段。这一阶段可能持续几百毫秒。在这一阶段由于电弧能量继续输入燃弧点，产生空气流、气流和微粒流。这种强力高速气流的热量及所带的炽热微粒，内部电弧开始形成对外部的影响。

4) 热效应阶段，亦即为燃弧的最后阶段。在这一阶段最终包围短路电弧的空气几乎达到电弧的温度。从这一阶段开始，大部分燃弧能量作用于开关设备的固体零部件。此时开关设备有烧穿的危险。故障清除后，这一阶段随之结束。

开关柜发生内部弧光故障产生的能量可高达8~60 MW，它主要与电弧的燃烧时间以及短路电流有关值。电弧燃烧持续时间超过100 ms，所释放的能量开始急剧增加，大约100 ms左右电缆开始燃烧，150 ms左右铜排燃烧，到了200 ms左右钢材

开始燃烧，如图1所示。

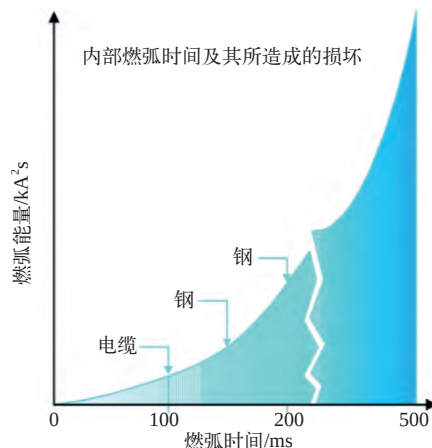


图1 开关柜内部燃弧时间及其所造成的损坏图

从图1及上述分析可以看出，开关柜内燃弧时间小于5 ms时，无任何影响，可直接使用；燃弧时间为5~35 ms时，没有显著的损坏，一般可以在检验绝缘电阻后投入使用；燃弧时间为35~100 ms时，损坏较小，在开关柜再次投入运行以前需要进行清洁或可能的某些小的修理；燃弧时间为100~500 ms时，设备损坏很严重，必须更换部分设备才可以再投入运行。

也就是说，开关柜可以承受的电弧燃烧时间为100 ms。因此，必须将内部电弧的持续时间限制在100 ms之内，越快则对开关柜越有利。

常见的几种弧光保护模式

目前国内绝大部分开关柜使用的燃弧故障保护仍沿用传统的依靠断路器来熄灭故障电弧的做法，使燃弧故障的电弧持续时间始终需要较长的时间，无法进一步突破。具体分析如下。

1) 微动开关保护。依靠安装在开关柜3个高压隔室的泄压板上的微动开关来切除电源，为防止误动，在跳闸前加上过电流信号作为闭锁。但该种方式的可靠性相对较低，尤其是在微动开关出现损坏的情况下，误动的风险较高。

2) 气体压力传感器保护。依靠安装在三个高压隔室的气体压力传感器感知是否有内燃弧故障发生。由于开关柜的结构比较特殊，同一个隔室不同的部位其压力是不同的，保护厂家对柜体的结构不甚了解，因此设计出的产品并不能满足实际需求。

3) 弧光保护。传统的弧光保护是依靠弧光传感器检测是否有燃弧故障发生，但从检测到信号到断路器完全分闸需要一个较长的时间，也不能

(下转第91页)

护能正确及时动作使触电人员立即脱离电源，所以尽管短路电流较大，但是给人身造成的伤害相对而言会较小。

4. 对断路器的影响

选择中性点不接地和消弧线圈接地系统，在发生单相接地故障时线路断路器不跳闸，改为中性点经电阻接地系统，在发生单相接地故障时线路断路器要跳闸，因而出现了“频繁跳闸，设备烧损”和“维修工作量增加”的担心。但根据我国城市配电网的长期运行经验证明是不会的。究其原因故障电流不大，单相接地故障入地电流限制在1~2 kA以内，断路器开断单相短路条件比开断相间短路的情况要好得多，不会引起断路器的烧损。而中性点不接地和消弧线圈接地系统，在单相电弧接地故障引发相间短路故障的概率是很高的。

结论及建议

确定电网中性点的接地方式是一个系统工

程，应该综合考虑供电可靠性、网络结构、过电压保护、绝缘配合、继电保护、人身安全和运行经验等有关问题。从实际出发，对各种接地方式进行技术经济分析，权衡利弊。针对大庆油田配电网现状，建议采取以下接地方式的选择。

1) 以架空线为主的辐射形配电网中，系统电容电流小于10 A的，继续保持中性点不接地运行方式。当电容电流增大时，考虑按规范要求改为经消弧线圈或经电阻接地的运行方式。

2) 以电缆为主的配电系统，当系统电容电流大于30 A，在条件许可的情况下，改为中性点经电阻接地运行方式。

3) 已经采取经消弧线圈接地的6 kV系统，应对系统电容电流的变化进行统计。考虑到电缆线路不断增加的趋势，当电容电流过大、补偿有困难时，考虑改为经电阻接地的运行方式。EA

(收稿日期：2016.01.09)

(编辑：刘群点)

(上接第85页)

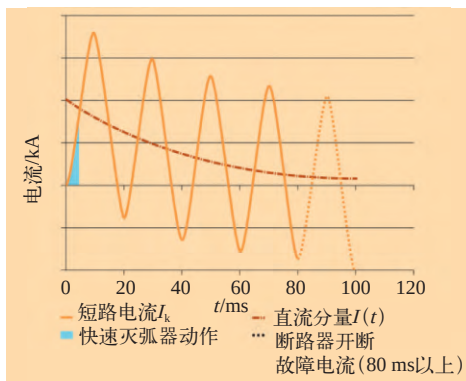


图2 快速灭弧装置的时间曲线

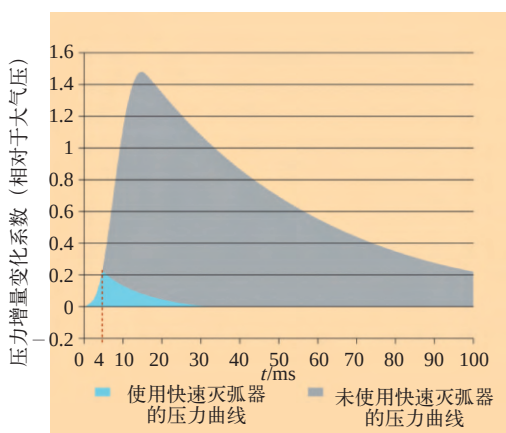


图3 快速灭弧后的柜内压力曲线

完全满足快速消除故障的要求。

快速灭弧装置的应用及分析

快速灭弧装置通过持续监测保护范围内的系统电流和弧光信号，迅速可靠地判断是否有电弧故障发生。如果装置判断电弧故障已经发生，检测控制装置将立即触发3个一次主元件动作，实现系统三相金属性接地短路。三相金属性接地短路阻抗远远低于电弧故障点的弧阻，大部分故障电流将流向一次主元件形成的短路点，故障点的弧压急剧降低，电弧无法持续而立即熄灭。最后，通过上级断路器开断来切除一次主元件处的短路故障电流。

从图2及图3可以看出，快速灭弧装置能够将故障电流尚未达到第一个峰值时切断，且在开关柜内产生极小的压力，基本上不影响柜体的正常使用。

结束语

AP1000核岛中压开关柜的内燃弧故障保护首选是快速灭弧装置。EA

(收稿日期：2016.03.17)

(编辑：刘群点)