[断路器]

12 kV真空断路器配柜现场绝缘问题的分析及改进

文/ABB（中国）有限公司　洪小雅

不同厂家的12 kV真空断路器和开关柜配合验证工频耐压42 kV／1 min时，很多时候不能通过工频耐压试验。基于现场情况，提出了改进措施，快速解决现场绝缘问题；以及在设计上优化断路器和开关柜，根本上提高配合时的绝缘性能，满足工频耐压42 kV／1 min要求，减少现场改造工作量。

真空断路器的绝缘介质高真空，且具有体积小、重量轻、适用于频繁操作和灭弧不用检修的优点，广泛应用于10 kV电力系统中。现有真空断路器极柱主要有环氧树脂材料和尼龙材料，两者都具有较高绝缘性能，且能实现极柱免维护。

根据GB/T 1984—2014图标，12 kV真空断路器验证型式试验时，只需配合一款开关柜试验，所以并不能保证配合其他开关柜时不会出现绝缘性能问题。因为各个制造厂家的设计参数并不一致，尤其是在关键零件主安装板的开孔形状上多种多样，有圆形、有矩形，还有八边形等，从而导致绝缘性能差异较大，且绝缘表现同时还和设计、加工因素和使用环境等有较大关系。开关柜和断路器配合产生的绝缘问题占了中压产品事故率的很大比例，尤其在12 kV/1 250 A及以下电流规格上。本文以12 kV/1 250 A真空断路器举例说明。

市场上，12 kV/1 250 A开关柜触头盒直径主要有两种，108 mm和100 mm。在配合同等的12 kV/1 250 A断路器配置下，采用小内径的触头盒，电气主回路真空断路器触臂触指与地电位柜体主安装板的空气净距变小，降低12 kV断路器配合开关柜的绝缘性能表现，从而增大开关设备运行风险。

空气击穿电压估算值计算公式为

$$E = U_{max} \times d/f \qquad (1)$$

式中，场强U_{max}一般取3 kV/mm。d是导体到地电位的距离；f是不均匀系数。

不均匀系数f可根据图1曲线查得，与几何特性系数$P=(r+d)/r$有关，r是圆导体的直径。

开关柜断路器室示意图如图2所示。不同电极结构的不均匀系数如图1所示。

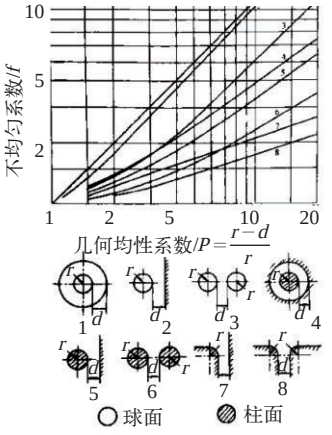

图1　不同电极结构的不均匀系数

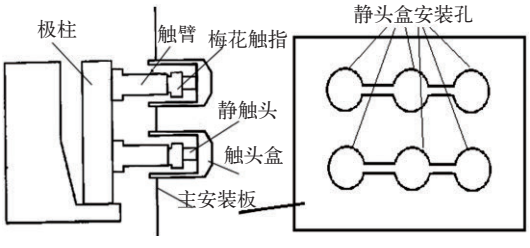

图2　开关柜断路器室示意图

12 kV/1 250 A开关设备大部分等效于图1系列4和系列5的电极排布，主安装板结构见图2，本文选择系列4电极结构来计算。12 kV真空断路器的触指等同于圆导体，则圆导体$r=45$ mm，主安装板开孔位是最近的地电位，如图3所示。

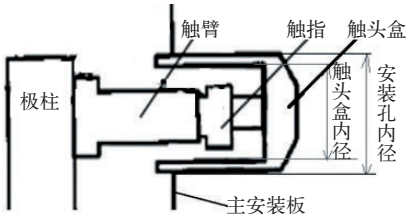

图3　开关柜断路器室示意图

假设触头盒内径为108 mm，则主安装板开孔处半径为67 mm，几何特性系数$P=1.5$，由图1曲线可得$f\approx1.25$。

$$d=(67-45)\text{ mm}=22\text{ mm}$$

根据式（1）计算，$E=53$ kV。

假设触头盒内径为100 mm，则主安装板开孔处内径为63 mm，几何特性系数$P=1.4$，图2可得$f\approx1.2$。

$$d=63-45=18\text{ mm}$$

根据式（1）计算，$E=45$ kV。

如果开关柜选用直径100 mm的触头盒，配合12 kV断路器验证工频耐压时，根据公式计算，耐压强度为45 kV，理论上讲完全可以通过工频耐压42 kV/1 min验证。可是由于主安装板是钣金件，在加工安装孔时，如果工艺没处理好，金属端面就不是平整的，会存在毛刺，导致在5～10 kV工作时的绝缘性能减低。钣金件截断面不平整示意图如图4所示。同时，考虑绝缘性能受批次，清洁度的影响，所以有一定的概率会出现绝缘问题。

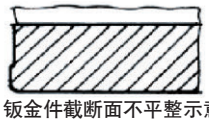

图4　钣金件截断面不平整示意图

本文采用有限元分析软件模拟开关设备在工频耐压试验时的电场分布不均匀系数3，电气主回路加载42 kV高电压，开关柜壳体接地，即开关柜主安装板为地电位。开关设备中发生放电击穿现象主要是空气击穿，且空气在均匀电场中的击穿场强为3 kV/mm，实际开关设备中基本上不存在均匀电场，导致空气的击穿场强小于3 kV/mm，工频耐压经验击穿场强为1.5 kV/mm，极不均匀电场情况下更低。图5是电场分析简化模型。图6是空气层电场强度。图7是简化模型电场分布及绝缘薄弱点位置。由图6和图7可知，断路器上电场强度集中的位置是触臂靠近极柱侧（图7薄弱点2）和梅花触指靠近触臂端（图7薄弱点1），而开关柜上电场强度集中的部分为主安装板触头盒安装孔部位（图7薄弱点3），开关柜上电场强度集中部位位于主安装板圆形孔与方形槽的交点处，最大值大约为1.5 kV/mm，有一定的绝缘放电风险。根据分析结果，如图7所示的薄弱点1，2，3的存在，会导致薄弱点1或2直接对薄弱点3放电。如果绝缘层材料耐压性能较差，且有浇注缺陷（如空气气泡，金属颗粒）存在时，触臂的缺陷点会对薄弱点3放电击穿。如图8红色框内所示的放电轨，电场分析结果与实际相符合。

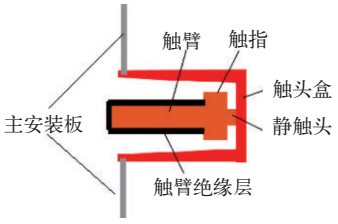

图5　绝缘分析简化模型

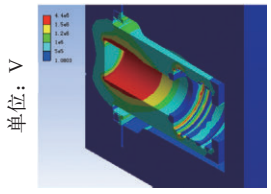

图6　空气层电场强度

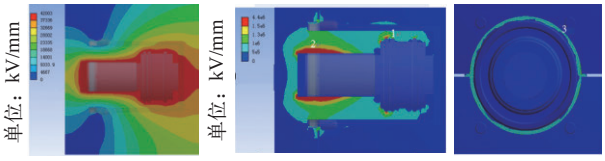

图7　简化模型电场分布及绝缘薄弱点位置

薄弱点1—触指靠近触臂端　薄弱点2—断路器触臂靠近极柱端
薄弱点3—开关柜主安装板触头盒安装孔

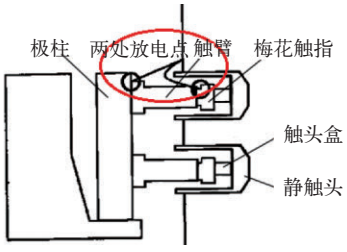

图8　放电路径示意图

根据电场分析得出的薄弱点位置，采用相应的措施以提供开关设备的绝缘水平，增加开关设备的实际运行寿命。

断路器改进措施

1）现场，在绝缘薄弱位置烘热缩套要覆盖到

（下转第59页）

（3）DC10 kV端口

如图8所示，分析方法与高压交流端口相同，不考虑冗余配置，仍需要10个DAB模块。其故障率为$r_{1-10\,kV\,DC}=0.363\,01$（次/a）。

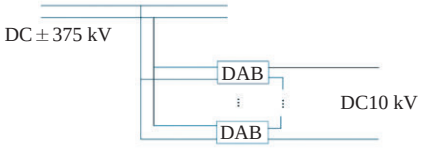

图8　级联型10 kV DC端口

修复时间取为DAB更换备用时间10 h，即$r_{1-10\,kV\,DC}=10$ h。级联型端口可靠性参数如下表所示。

表　级联型端口可靠性参数

端口	故障率/（次/a）	修复时间/h	故障概率
AC10 kV	12.509 16	16	2.28×10^{-2}
DC10 kV	3.630 1	10	4.14×10^{-3}
AC380 V	0.002 299 6	26	6.83×10^{-6}

结束语

本文简单介绍了一种高压侧采用级联型H桥的电能路由器的结构，因其各端口结构功能相对独立，因此，通过分析其包含的模块的可靠性，从端口的角度分析了电能路由器的可靠性。本文对于研究使用电能路由器的供电系统的可靠性有着重要的意义。当电能路由器在供电系统中工作时，若某个端口发生故障，其余端口仍可正常工作，因此，可以从端口的角度分析供电系统中供电电源到输出端的所有路径，从而分析计算供电系统的可靠性。EA

（收稿日期：2018.09.30）
（编辑：朱金凤）

（上接第56页）

触指侧和极柱侧，即热缩套长度要长于原有触臂绝缘罩的两端，增加电气爬电距离。

2）设计上，在12 kV真空断路器的触臂和极柱间增加密封件，阻断真空断路器对开关柜主安装板触头盒孔的放电路径。

3）设计上，优化12 kV真空断路器的触臂绝缘罩形状，采用伞裙设计以增加爬电距离，消除真空断路器触指侧对开关柜主安装板触头盒孔的放电路径。试验表明，伞裙设计可提供4～6 kV工频耐压。

开关柜改进措施

1）现场应去除金属零件上的毛刺，尤其是开关柜主安装板触头盒安装孔要保证无毛刺。现有主安装板的加工工艺有激光切割和模具冲孔，激光切割的精度高且毛刺少，模具冲孔精度低且毛刺多，如图4所示。如果采用模具冲孔加工主安装板，建议追加去除毛刺工序。

2）投入运行前，要清洁触头盒，尽量做到无油污和少灰尘。触头盒清洁度直接影响共绝缘性能。

3）在开关柜主安装板触头盒安装孔的金属缝填充玻璃胶，不留空隙，用绝缘性能较高的玻璃胶取代绝缘性能低的空气。在同样电场条件下，高绝缘性能的玻璃胶不会产生击穿现象，在空气中则会产生击穿问题。

4）触头盒直径采用常规的108 mm，且增加内裙边设计，增大空气净距和爬电距离，提高断路器配柜的绝缘性能。

5）采用整体式触头盒设计，减少开关柜主安装板开孔。且触头盒安装孔的金属缝隙要远离断路器触臂，增大空气爬距，提高断路器配柜的绝缘性能。

现场的情况复杂多变，在验证12 kV真空断路器配合开关柜的工频耐压试验时，同时要根据GB/T 16927.1—2011和GB/T 1984—2014规定的大气标准条件下计算大气修正系数以及海拔的影响，调整工频耐压试验数值。通常，当相对湿度大于80%时，破坏性放电会变得不规则，特别是当破坏性放电发生在绝缘表面时，所以不建议在相对湿度大于80%时验证工频耐压试验。EA

（收稿日期：2018.11.25）
（编辑：朱金凤）