

[断路器]

高压断路器套管增爬裙的应用及电性能分析

文/西安西电开关电气有限公司 伦智达 史俊 路媛婧 吉波波 赵寒旭

户外高压断路器套管易受到工业污秽、自然界盐碱及粉尘等的污染，当这些污染物被湿润时，易形成套管表面泄漏电流通路，导致污秽闪络放电，造成安全隐患。在瓷套管外加装增爬裙是目前经济且常用的改造方案。

空气间隙和绝缘材料构成了高压断路器套管的外绝缘。但运行中，户外设备的套管常常受到粉尘、工业污秽以及鸟粪等的污染。干燥情况下，套管绝缘件表面污秽物的电阻较大，但在细雨、雪以及露水等气候情况下，污秽物被湿润，此时其表面电导和泄漏电流剧增，致使套管绝缘件的闪络电压明显降低，甚至会发生工作电压下污秽放电的事故。

此外，某些电站内设备按当时地区的污区等级设计外绝缘爬距。后由于盐密、灰密等综合污秽污染加剧，致使污区等级升级至更高一级，对断路器的套管造成了安全隐患。

解决措施

现变电站大部分断路器套管都是瓷套管，如果整体更换抗污闪能力更强的复合套管，必须进行大规模的停电改造，需要大量的经费，同时会加大工作量，且带来一定的安全隐患。

根据《国家电网公司十八项电网重大反事故措施》中防污闪涂料与防污闪辅助伞裙的要求：加装防污闪辅助伞裙是防止变电设备污闪的重要补充措

施，其使用应符合“防污闪辅助伞裙使用指导性意见”的要求。本文中防污闪辅助伞裙简称增爬裙。

增爬裙是采用硫化硅橡胶绝缘材料，通过模压等工艺制成的硅橡胶伞裙。其覆盖在瓷、玻璃伞裙的上表面，并通过粘合剂将它与原瓷、玻璃伞裙的上表面粘合在一起，构成组合绝缘。

加装增爬裙后的瓷套管有效地增加了爬距，同时用防污材料制成的增爬裙可以改善套管表面的污秽状况。另外，增爬裙具有极强的憎水性，这种材料表面上的水形成了水滴，污秽物质难以随着水层湿润附着在绝缘表面，导电的通路（污水桥）难以形成，极大地改善了防污闪特性。

在瓷套管外增装增爬伞裙的同时，在瓷套表面喷涂 RTV 涂料，可增强瓷套的憎水性、电气绝缘性及耐腐蚀性。该措施已被广泛应用于输变电设备现场，以满足防污的需要。

加装增爬裙设计

依据标准 DL/T 1469—2015《输变电设备外绝缘用硅橡胶辅助伞裙使用导则》中 4.3 要求：增爬

裙的安装需满足以下条件:

1) 尺寸。当绝缘子的平均直径小于 300 mm 时, 增爬裙伸出长度出应为 80~100 mm; 当绝缘子的平均直径不小于 300 mm 时, 增爬裙伸出长度应为 100~120 mm。

2) 数量。变电设备的增爬裙推荐安装数量见标准 DL/T 1469—2015, 对于 550 kV 套管, 推荐数量为 8~10 片。

3) 安装位置。对于 220 kV 及以下电压等级, 增爬裙的安装间距不小于 300 mm; 对于 330 kV 及以上电压等级, 间距不小于 400 mm; 增爬裙应沿套管轴向大致等距离分布, 且应安装在大伞上; 增爬裙不宜安装在套管的最高电场强度位置。

4) 增爬裙安装表面应粘接良好, 安装后应进行抗变形性能试验。

套管电性能对比分析

套管的伞裙形状和电场强度对绝缘子的漏电起痕和蚀损有重要影响。局部过高场强区的存在都会诱导绝缘子表面局部电晕, 导致硅橡胶因漏电起痕和蚀损, 最终发展为绝缘子闪络。因此, 在设计瓷套管加装增爬裙时, 务必重视套管的电场分布情况。

1. 套管计算模型

图 1 为本文研究的加装增爬裙后的套管形态图。为增强出线套管的外绝缘能力, 高电位的上法兰接线端子处增设外屏蔽; 中间屏蔽可进一步改善瓷套下法兰处内电场的分布, 降低该处的最大场强; 中心导体通常采用铝管, 其直径由导体的电流密度及外壳半径决定; 瓷套选用高强度瓷制作, 以满足强度要求; 该瓷套内 SF₆ 充气压力为 0.5 MPa; 绝缘盆子材质为环氧树脂, 具有绝

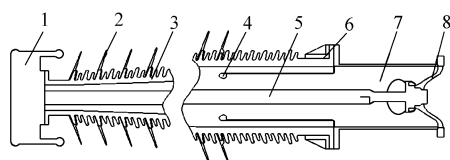


图 1 加装增爬裙套管形态图

1—外屏蔽 2—增爬裙 3—瓷套 4—中间屏蔽 5—中心导体 6—套管金具 7—SF₆ 气体 8—绝缘盆子

缘以及分隔气室的作用; 增爬裙材料为硫化硅橡胶。

2. 计算要求

电场计算中, 各材料的介电常数 (文中用 ϵ_r 表示) 赋值见表 1。

表 1 套管材料介电常数

材料	ϵ_r	材料	ϵ_r
SF ₆	1.002	绝缘盆子	3.5
瓷套	6	增爬裙	3

按照 GCB/GIS 出线套管设计的计算要求, 需对该套管进行雷电冲击电压下及相电压、工频耐受电压的电场强度计算。其中, 场强计算结果需满足如下要求:

1) 雷电冲击电压下, 0.4 MPa SF₆ 气压时光洁导体场强设计基准值 E_1 为 24 kV/mm, 瓷件内表面允许切向雷电冲击场强 $E_T = 0.5E_1$, 且大气中绝缘子表面的最大场强值应小于空气的击穿场强值 3 kV/mm。

2) 额定相电压条件下, 大气中瓷件及复合绝缘子表面允许安全工作切向电场为 E_2 , 套管表面可能产生局放的场强为 E_3 。工程应用中, 若 E_2 值超过 0.7 kV/mm, 将导致绝缘子的电蚀, 电蚀的发展可引起外闪。

3) 工频耐受电压条件下, 套管金具的允许场强为 E_j , 若应用中 E_j 超过要求值较多, 会导致金属四周空气严重电离以致外闪。其中, E_2 、 E_3 和 E_j 场强允许值见表 2。

表 2 大气中绝缘件表面场强允许值

(单位: kV/mm)

工作切向场强允许值 E_2	0.4
产生局部放电的场强 E_3	0.7
金具允许场强 E_j	1.2

3. 计算结果分析

通过有限元分析软件对图 1 所示模型按照文中的计算要求进行了仿真计算。同时为了对比加装增爬裙对断路器套管电场分布的影响, 也对瓷套管进行了电场分析。

1) 由图 2、图 3 可见, 该套管在雷电冲击电压

作用下, E_i 最大值为 22.84 kV/mm; E_T 最大值为 1.87 kV/mm。最大场强位置都位于中间屏蔽端部所对应的位置。

未加装增爬裙的套管于该雷电冲击电压下, E_i 最大值为 22.38 kV/mm; E_T 最大值为 1.91 kV/mm。

如图 4 所示, 雷电冲击电压工况下, 加装增爬

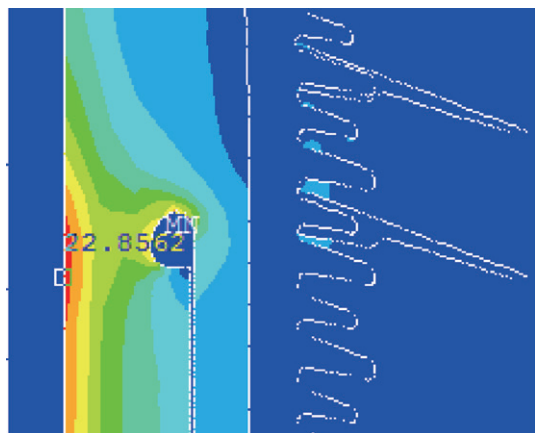


图 2 雷电冲击电压下套管场强

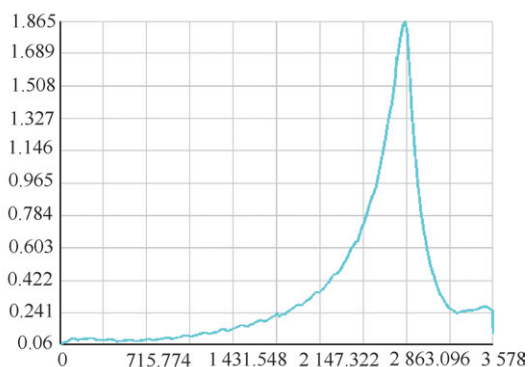


图 3 雷电冲击电压下套管内壁切向场强

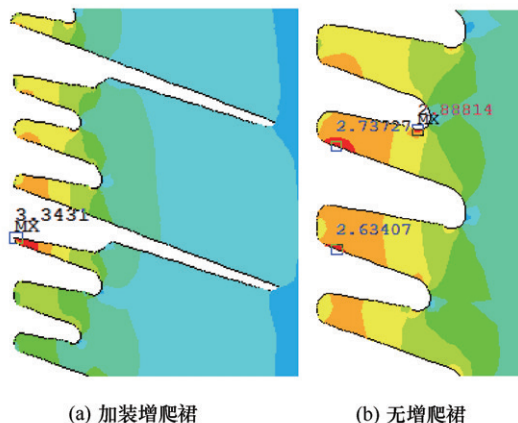


图 4 雷电冲击电压下绝缘件最大场强

裙与未加装增爬裙, 大气中绝缘子表面的最大场强值分别为 3.34 kV/mm 及 2.88 kV/mm。

由以上雷电冲击作用下的电场计算结果可见, 加装增爬裙会使与中间屏蔽端部位置对应的增爬裙与瓷套粘接夹角处的电场发生畸变, 导致该位置绝缘子的最大场强增大 0.46 kV/mm, 同时使导体表面的最大场强 E_i 增加 0.46 kV/mm。

虽然加装增爬裙后, 导体表面最大场强 E_i 仍在绝缘裕度以内, 但绝缘子表面的最大场强值已高于空气的击穿场强值 3 kV/mm, 该状况将会导致冲击电压工况下该界面位置的空气电离, 而导致树枝状放电腐蚀。

2) 由图 5 可见, 额定相电压条件下, 套管绝缘子外表面场强 E_3 最大值为 0.47 kV/mm; 图 6 为图 5 中两个硅橡胶伞群及之间的瓷伞群表面的切向电场 E_2 最大值为 0.47 kV/mm, 位于最靠近套管最大场强位置的增爬裙与瓷套粘接位置的夹角处。

未加装增爬裙的套管在该额定相电压下, 瓷套表面场强 E_3 最大值为 0.37 kV/mm; 瓷套表面的切向电场 E_2 最大值为 0.37 kV/mm。

由以上结果可见, 加装增爬裙后, 由于增爬裙与瓷套粘接夹角位置处的电场畸变, 在额定相电压下, 套管外表面场强 E_3 及切向场强 E_2 都增加了 0.14 kV/mm。且套管外表面切向场强超过了 E_2 的要求值 0.40 kV/mm, 给套管的可靠运行带来了安全隐患。

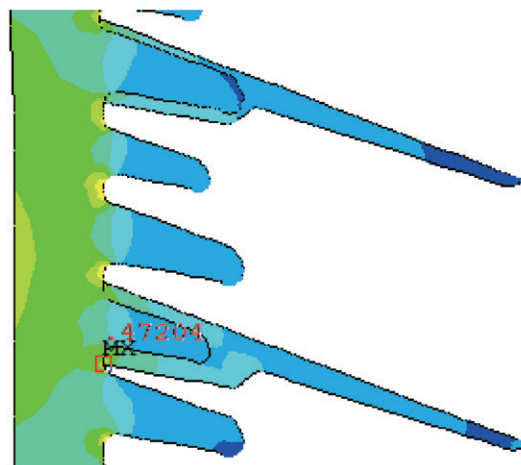


图 5 相电压下加装增爬裙套管最大场强

(下转第 64 页)

电流互感器输出测量距离远的多，更易满足有化工厂装置区与变配电室远距离的实际情况。

工程实例分析

在延长石油某试验示范项目中，冲洗泵电动机功率为 45 kW，距离变电所距离为 400 m，电流互感器选用 AKH-0.66-I 100/1（额定输出容量为 10 V·A），现场操作柱上选用的电流表为 6L 系列，负荷为 0.4 V·A，那么在测量回路线路上的功率消耗不能大于 9.6 V·A。在初版设计成品文件中，采用 ZRA-KVVP-1.5 mm² 控制电缆。经计算，从表 2 中查的 1.5 mm² 电缆在测量回路线路上的功率损耗 9.87 V·A 不能满足设计需要，可以采取以下方法解决：对测量回路采用两根 1.5 mm² 电缆芯并联跨接在一起，使测量回路线路的等效面积 $A = 3 \text{ mm}^2$ 。从表 6 中就可以看出，在电流互感器额定输

表 6 $A = 3 \text{ mm}^2$ 时测量回路线路上的功率损耗 S_x
(单位: V·A)

长度/m	导线截面积/mm ²			
	5A	3A	1A	0.6A
100	30.83	11.10	1.23	0.44
200	61.67	22.20	2.47	0.89
300	92.50	33.30	3.70	1.33
400	123.33	44.40	4.93	1.78
500	154.17	55.50	6.17	2.22

出为 1 A 时，测量回路线路上的功率损耗仅为 4.93 V·A，在电流互感器额定输出为 0.6 A 时，测量回路线路上的功率损耗仅为 1.78 V·A，均能满足设计需要。

结束语

经过上述分析，可以看出在低压电动机计量回路的设计中，更提倡选用 □/1A 电流互感器：

1) 测量回路线路上的功率损耗降低，能够直接满足设计要求。

2) 在选用相同额定输出容量的电流互感器及相同截面积的测量回路线路的情况下，□/1A 电流互感器比 □/5A 电流互感器输出测量距离远的多，更易满足有化工厂装置区与变配电室远距离的实际情况。

3) 选用 □/1A 电流互感器，电流测量回路线路按照规范要求选择 1.5 mm² 截面积的电缆基本上可以满足设计要求（个别远距离回路可以采用多根并联跨接的形式解决），不必再放大电缆截面积，节约线路投资，同时使得现场施工接线方便。EA

(收稿日期: 2021.05.08)

(上接 51 页)

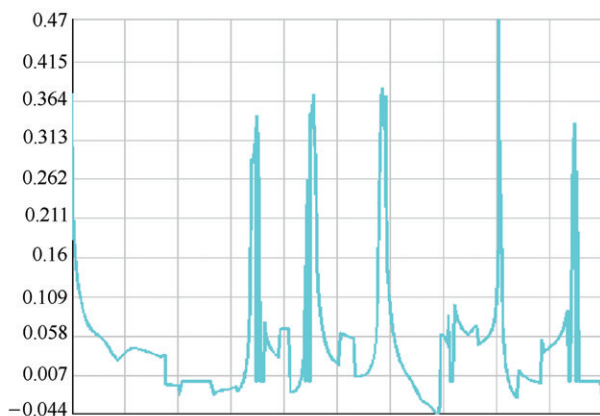


图 6 相电压下套管外表面最大切向场强

3) 由于该模型中增爬伞群相对远离金具，其对套管金具的允许场强值 E_j 影响较小，该处暂不分析。

结束语

在瓷套管外加装增爬裙及瓷套表面喷涂 RTV

是目前经济且常用的改造方案。文中对某断路器的瓷套管进行了加装增爬裙的设计，并对初步设计的加装增爬裙的套管模型进行了电性能对比分析。发现瓷套管加装增爬裙虽达到了防污的效果，但是其造成的电场畸变仍然会影响绝缘子的电气性能。

对于内部装有中间屏蔽的断路器套管，屏蔽端部对应的导体位置为套管最大场强位置。增爬裙安装在该最大场强对应位置时，套管该处绝缘子的电场分布畸变最为严重，且超出了套管电性能设计的安全裕度。而增爬裙安置在其他位置对套管绝缘子的电场影响较小，且仍在安全裕度范围内。因此，对于内部装有中间屏蔽的断路器套管，应避免在中间屏蔽端部即断路器套管最大场强位置加装增爬裙。EA

(收稿日期: 2021.05.25)