

户外真空断路器绝缘强度的分析

徐建源¹, 任春为¹, 王博²

(1. 沈阳工业大学电气工程学院, 辽宁 沈阳 110023; 2. 南京因泰莱配电自动化设备有限公司, 江苏 南京 211100)

Analysis of Insulation Strength of 12 kV Outdoor Circuit Breaker

XU Jian-yuan¹, REN Chun-wei¹, WANG Bo²

(1. School of Electric Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110023, China;
2. Nanjing Intelligent Distribution Automation Equipment Co. Ltd., Nanjing 211100, China)

摘要: 应用 ANSYS 软件分析计算了支柱式 12 kV 户外真空断路器真空灭弧室外表面的电场强度, 得出在不同填充材料、气泡和不同外绝缘材料时的电场强度及分布曲线; 分析得出不同条件对真空灭弧室外表面电场强度的影响, 用以提高户外真空断路器灭弧室外表面的绝缘性能。

关键词: 户外真空断路器; 真空灭弧室; 绝缘强度

中图分类号: TM56

文献标识码: A

Abstract: The exterior surface electric fields have been analyzed and calculated for 12 kV vacuum interrupter of outdoor vacuum circuit breaker under different conditions based on ANSYS. The electric field intensities and distribution curves with different materials, air bubbles, and exterior insulation materials, are obtained. To enhance the insulation performance, the influences of different conditions on insulation strength of exterior surface for vacuum interrupter are analyzed.

Key words: outdoor vacuum circuit breaker;
vacuum interrupter; insulation strength

0 引言

真空灭弧室的绝缘性能是影响真空断路器绝缘性能的重要因素之一, 特别是对户外真空断路器。为满足户外绝缘的要求, 对于真空灭弧室的外表面还要采用额外的绝缘措施, 如外包特殊绝缘材料, 或将灭弧室放置在绝缘介质中。以往对于真空灭弧室本身的绝缘特性的分析已经做了大量的研究工作, 但是对于在不同填充物中, 以及气泡的存在对真空灭弧室外表面绝缘性能的影响方面的研究还有待于进一步丰富和深入。本文采用有限元法对几种不同情况下的真空灭弧室外表面的电场强度进行了分析计算。

1 数学模型的建立

本文以支柱式 12 kV 户外真空断路器为对象, 高压部位及真空灭弧室的基本结构见图 1。由于真空灭弧室的结构为轴对称性, 因此其电场计算可简化为二维轴对称场求解问题, 也可以通过分析二分之一的场域即可推知其整体的分布。真空灭弧室的放大模型见图 2, 图中, A 区为真空灭弧室的瓷套, B 区为灭弧室的瓷套与上支柱绝缘套筒之间的填充物(如空气、硅脂), C 区是真空断路器的上支柱绝缘套筒, 材料为户外环氧树脂或硅橡胶。设定静触头 D、动触头 E 的开距为 10 mm, 由于灭弧室内有屏蔽罩, 它是一个悬浮电位, 因此对其进行了耦合。求解时在动触头、静触头两端加载 42 kV 工频电压(根据额定电压 12 kV 所需工频耐压水平)。



图 1 支柱式 12 kV 户外真空断路器结构模型

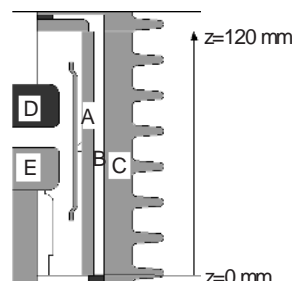


图 2 真空灭弧室的放大模型

屏蔽罩的悬浮电位求解满足以下条件:

$$\begin{cases} \nabla^2 = 0 \\ = U_f \\ \oint \frac{\partial}{\partial n} ds = E_p \end{cases}$$

式中: U_f 为悬浮屏蔽罩的求解电位; s 为表面积;

收稿日期: 2006-03-22

作者简介: 徐建源(1962-), 男, 教授, 博士, 从事配电系统自动化、高压电器设备、SF₆ 断路器开断性能及气流中电弧理论等领域的研究。

E_p 为一很小的常数(取 10^{-12} V), 计算前 U_F 被初始假定, 通过计算求得悬浮电位值^[1]。

笔者以真空灭弧室瓷套外表面的电场分布状况为分析的对象。首先通过改变填充物的相对介电常数以及在填充物中设有气泡时, 求出区域 A 与区域 B 交界面处的电场强度值及分布曲线。具体分为: ①模型中真空灭弧室的瓷套与上支柱绝缘套筒之间填充物为空气; ②模型中填充物为硅脂(取相对介电常数为 2.8^[2]); ③模型中填充物为硅脂, 但是其中有气泡。这 3 种模型中外绝缘均为环氧树脂。其次, 还对比分析计算了不同外绝缘材料对真空灭弧室外表面处绝缘强度的影响: ①模型中真空灭弧室外绝缘

采用户外环氧树脂; ②模型中外绝缘采用硅橡胶; ③模型把真空灭弧室放在空气中。这 3 种模型中填充物均为硅脂。

2 电场计算及结果分析

2.1 填充物不同时真空灭弧室外表面绝缘强度的分析计算

图 3~图 4 是不同填充物和有气泡时真空灭弧室的等电位分布图和真空灭弧室外表面的电场强度及真空灭弧室外沿瓷表面的电场强度分量的曲线。

在实际中, 真空断路器填充物中的气泡位置是不确定的, 本文对气泡进行了假设。通常情况不同

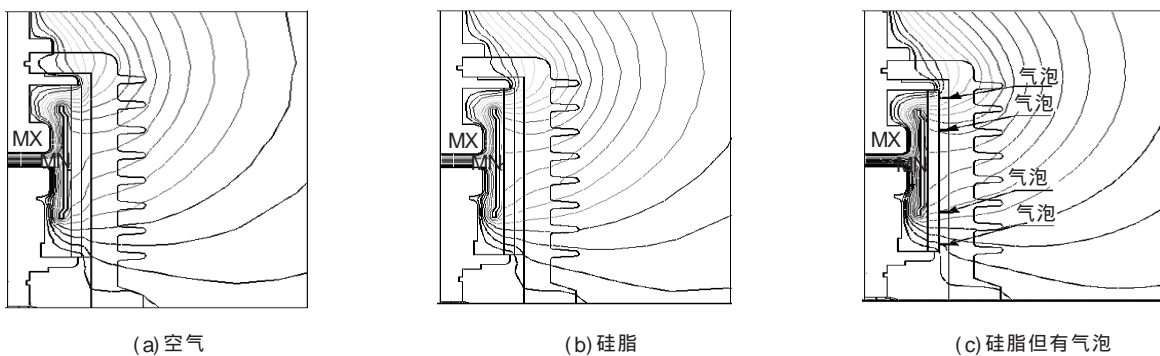


图 3 填充物分别为空气、硅脂、硅脂但有气泡时的等位线分布图

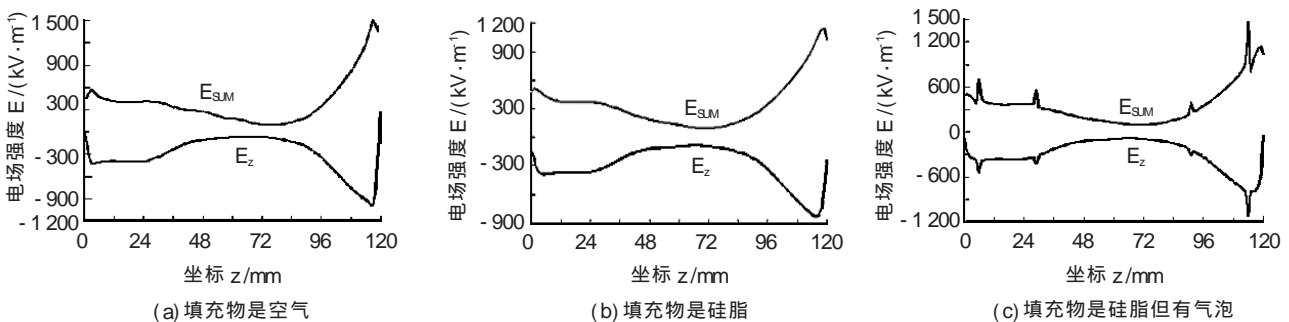


图 4 灭弧室外表面的电场强度及沿瓷表面分量

注: E_{sum} 为真空灭弧室外表面的电场强度矢量和; E_z 表示真空灭弧室外沿瓷表面的电场强度分量(正方向与 z 的正方向相反)(下表同)。

绝缘介质介电常数的比值关系会影响整个绝缘系统的场强分布, 而硅脂和气泡(空气)的介电常数的比值关系是一定的, 且笔者旨在定性分析气泡的影响, 因此气泡的大小和数量对定性分析并无影响, 所以简化了分析模型。分析时假设了填充物中较均匀地分布着 4 个长度 5 mm 宽度 1 mm 矩形气泡。在曲线图 4 中, 横轴 z 为沿真空灭弧室轴向位置, 纵轴为电场强度 E , 其中, E_{sum} 为真空灭弧室外表面的电场强度矢量和, E_z 表示真空灭弧室外沿瓷表面的电场强度分量(正方向与 z 的正方向相反)。

由图中可以看出当外绝缘介质为均匀介质时, 真空灭弧室的电场分布中强度相对较大的地方主要集中在动、静触头端部, 屏蔽罩两端部。真空灭

弧室外表面的电场强度相对较小, 只有真空灭弧室外表面接近真空灭弧室两侧端盖处的电场强度值相对于沿表面其他位置的值较大。

不同填充物时真空灭弧室外场强度分量数值见表 1, 真空灭弧室外表面最大场强度值和电场强度矢量最大值见表 2。从分析的结果可知, 电场强度以及沿瓷表面电场强度分量对于不同的绝缘介质具有不同的分布规律。当采用硅脂作为填充物时, 真空灭弧室外表面电场强度矢量和最大值比采用空气作为填充物时减小 23.96%; 但是, 当填充物是硅脂且硅脂中有气泡时, 在气泡出现的地方电场强度就会增加, 可以使真空灭弧室外表面电场强度最大值比没有气泡时增加 28.73%。由于真空灭弧室外沿瓷表面

表 1 不同填充物时真空灭弧室外沿瓷表面场强度分量 E_z 的部分值及比值

坐标 z/mm	E_z (填充物是空气)/(kV·m ⁻¹)	E_z (填充物是硅脂)/(kV·m ⁻¹)	填充物是硅脂与空气的差值百分比/%	E_z (填充物是硅脂但有气泡)/(kV·m ⁻¹)	有无气泡的差值百分比/%
0	35.77	-136.36	281.21	-57.52	-57.81
10	-397.69	-370.87	-6.74	-367.31	-0.96
20	-403.31	-370.19	-8.21	-367.81	-0.64
30	-338.94	-314.93	-7.08	-324.09	2.91
40	-172.59	-180.61	4.65	-178.05	-1.42
50	-95.04	-114.60	20.58	-113.45	-1.00
60	-71.80	-95.07	32.41	-94.37	-0.74
70	-62.93	-88.99	44.41	-88.02	-1.09
80	-101.27	-126.59	25.00	-124.76	-1.45
90	-197.10	-224.59	13.95	-230.71	2.72
100	-476.56	-441.71	-7.31	-440.63	-0.24
110	-810.20	-716.29	-11.59	-710.21	-0.85
120	274.76	-238.93	-13.04	-38.54	-83.87

注: 百分比中负号表示百分数减小, 以下同。

表 2 真空灭弧室外表面最大电场强度值及沿瓷表面电场强度分量最大值

填充物类型	沿瓷表面电场强度分量最大值 $E_{z,max}$ /(kV·m ⁻¹)	沿瓷表面电场强度分量最大值时的坐标/mm	沿瓷表面电场强度分量最大值与空气时的差值百分比/%	电场强度最大值 $E_{3,M,max}$ /(kV·m ⁻¹)	电场强度最大值与空气介质的差值百分比/%
空气	998.99	117	-	1507.2	-
硅脂	835.95	116	-16.32	1146.0	-23.96
硅脂有气泡	1124.7	114	12.58	1475.2	-2.12

电场强度分量是决定真空灭弧室外表面绝缘的重要因素, 因此重点研究沿瓷表面电场强度分量。真空灭弧室外沿瓷表面电场强度分量最大值在填充物是硅脂时比是空气时减小 16.32%; 真空灭弧室外沿瓷表面电场强度分量最大值在填充物是硅脂但是硅脂中有气泡时, 比没有气泡时增加 34.54%, 并且大于填充物单纯是空气时的值。由此可见, 气泡对真空灭弧室外沿瓷表面电场强度分量影响很大。气泡的产生会降低真空灭弧室的沿面耐压强度, 增大击穿几率。

真空灭弧室上下端盖、瓷套、填充物三交界处是绝缘强度比较薄弱的地方。针对这一特点, 通常在 35 kV 电压等级以上的真空灭弧室中为降低其金属、瓷套和填充物交界面处的电场强度值, 往往通过加金属屏蔽罩的方式使交界面处电场强度降低。而

对于笔者所选 12 kV 户外真空断路器用灭弧室, 由于其内部只有一个主屏蔽罩, 在上下出线端部未加屏蔽罩、均压屏蔽罩等, 因此有必要对这一部位的绝缘强度进行分析。对于该灭弧室结构, 当填充物是硅脂时, 该部位电场强度可以达到 3.24 kV/mm, 但尚小于硅脂的击穿场强 9 kV/mm, 结果显示其绝缘是可靠的, 不会造成击穿。

2.2 外绝缘材料不同时真空灭弧室外表面绝缘强度的分析计算

针对户外真空断路器外绝缘是环氧树脂、硅橡胶和空气时 (即对应于户内开关情况无外绝缘材料时) 的等电位分布、灭弧室外表面的电场强度及其切向分量进行了分析计算, 结果曲线见图 5~图 6。真空灭弧室外电场强度分量的数值见表 3, 真空灭弧

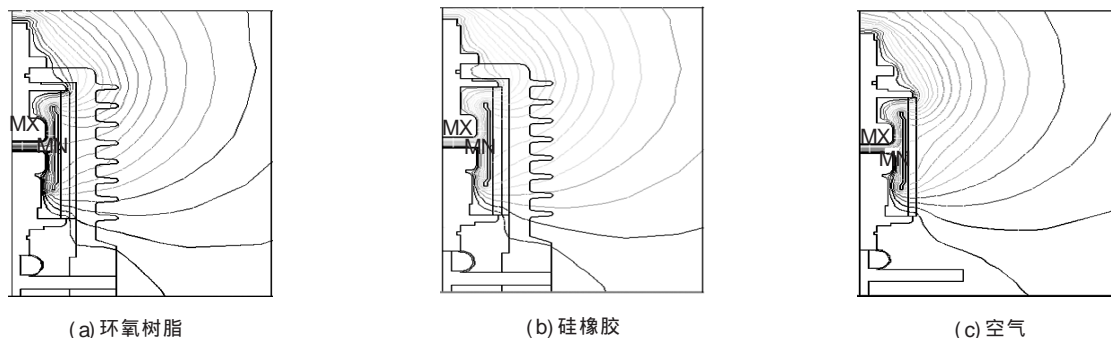


图 5 外绝缘是环氧树脂、硅橡胶时及空气时的等位线分布图

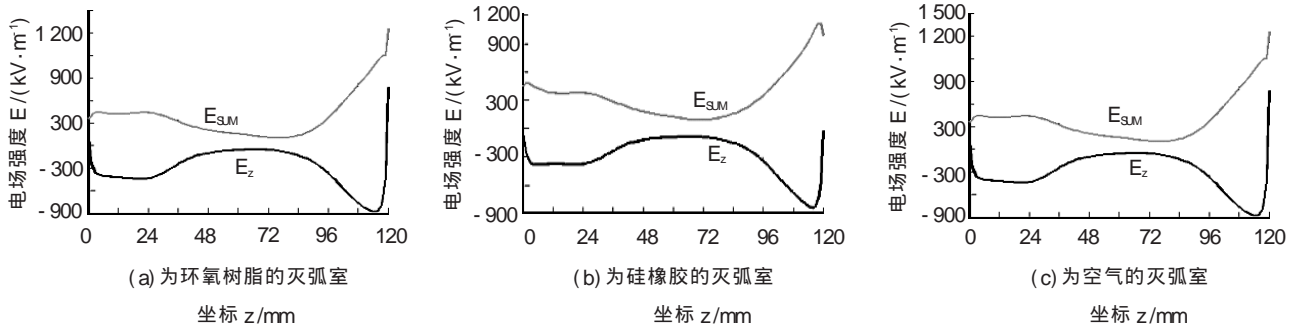


图6 外绝缘分别为环氧树脂、硅橡胶、空气的灭弧室外表面的电场强度及沿瓷表面分量

表3 外绝缘不同时真空灭弧室外沿瓷表面电场强度分量 E_z 的部分值及比值

坐标 z/mm	E_z (外绝缘是环氧树脂)/(kV·m ⁻¹)	E_z (外绝缘是硅橡胶)/(kV·m ⁻¹)	外绝缘是硅橡胶与环氧树脂时的差值百分比/%	E_z (外绝缘是空气)/(kV·m ⁻¹)	外绝缘是空气时与环氧树脂时的差值百分比/%
0	-136.36	-44.00	-67.73	61.44	-54.94
10	-370.87	-373.48	0.70	-409.40	10.39
20	-370.19	-379.03	2.39	-439.96	18.85
30	-314.93	-320.85	1.88	-360.68	14.53
40	-180.61	-181.24	0.35	-176.59	-2.34
50	-114.60	-111.06	-3.09	-85.90	-25.04
60	-95.07	-89.71	-5.64	-58.01	-38.98
70	-88.99	-83.45	-6.23	-47.98	-46.08
80	-126.59	-123.53	-3.20	-93.48	-26.16
90	-224.59	-222.89	-0.76	-215.74	-3.94
100	-441.71	-454.63	2.92	-506.80	14.74
110	-716.29	-728.20	1.66	-821.98	14.76
120	-238.93	-31.39	-86.86	774.04	223.96

表4 真空灭弧室外表面最大电场强度值及其沿瓷表面分量

外绝缘	沿瓷表面电场强度分量最大值 E_{zmax} /(kV·m ⁻¹)	沿瓷表面电场强度分量最大值时的坐标 /mm	沿瓷表面电场强度分量最大值与环氧树脂时的差值百分比/%	电场强度最大值 E_{SUMmax} /(kV·m ⁻¹)	电场强度最大值与环氧树脂时的差值百分比/%
环氧树脂	-835.95	116	-	1146.0	-
硅橡胶	-837.47	116	0.18	1116.2	-2.60
空气	-887.74	114	6.20	1567.9	36.82

室外最大电场强度及瓷表面分量值见表4。

从上面的分析计算结果可以看出，当采用硅橡胶或者采用环氧树脂作为外绝缘材料时，对真空灭弧室外沿瓷表面电场强度分量最大值影响不大，两者相差只有0.18%。但同在空气中相比还是有影响的。其中沿瓷表面电场强度分量比纯在空气中减小约6.20%，而电场强度矢量和比纯在空气中减小约36.82%。

3 结论

(1) 在空气中沿瓷表面的击穿场强约为 $E_{击穿}=0.50 \text{ kV/mm}^{[3]}$ ，而本文的计算结果为 $E_{zmax}=0.999 \text{ kV/mm}$ ，因此如真空灭弧室外表面不采取措施则有可能产生沿面放电。当采用硅脂作为填充物时， $E_{zmax}=0.836 \text{ kV/mm}$ ，并且硅脂的击穿场强 $E_{击穿}=9 \text{ kV/mm}$ ，因此可以采用硅脂作为填充物。

(2) 如果硅脂填充物中有气泡，则在气泡产生的地方沿瓷表面电场强度分量增加到 $E_{zmax}=1.125 \text{ kV/mm}$ ，比没有填充物时的值还要大，所以更容易在气泡部位造成击穿，因此在采用填充物来提高真空灭弧室外绝缘强度时要尽量避免气泡的产生。

(3) 采用硅橡胶或环氧树脂作为户外真空断路器外绝缘材料时，两者对电场分布影响差别不大。

参考文献:

- [1] 曹云东, 刘晓明, 王尔智, 等. 12 kV 户外真空断路器电场数值计算与分析[J]. 高压电器, 2002, 38(3): 14-15.
- [2] 冯亚清, 马志瀛. 真空断路器灭弧室外表面绝缘及其电场计算[J]. 高电压技术, 2003, 19(3): 18-20.
- [3] 刘其昶. 电气绝缘结构设计原理[M] (下册). 北京: 机械工业出版社, 1981.