

腐蚀性硫对变压器内部电场分布的影响研究

针对腐蚀性硫与变压器内部的铜、银等金属发生反应生成硫化亚铜、硫化银导致变压器故障的问题，建立了腐蚀性硫作用下变压器内电场的模型，利用有限元方法对不同情况下的电场分布进行了仿真研究。

刘 旸¹ 赵义松¹ 郭 铁¹ 周志强² 宋云东¹ / 1. 国网辽宁省电力有限公司
电力科学研究院 2. 国网辽宁省电力有限公司

0 引言

电力变压器是电力系统的重要设备，变压器油的绝缘性能直接影响变压器的安全稳定运行。变压器油多为石油经提炼精制而成，其中含有石油中的硫、氧和氮等元素^[1-3]。腐蚀性硫引发了多起变压器事故引起国内外专家的高度重视，目前腐蚀性硫的生成机理已得到初步认识^[4-5]。本文在理论分析的基础上建立腐蚀性硫作用下变压器油的电场模型，运用有限元方法对电场分布进行仿真研究。

1 硫化银对变压器电场分布的影响

“黑化”现象是变压器油中的活性硫与镀银层作用生成硫化银附着在导体的表面而造成的。银的“黑化”现象所造成的绝缘闪络事故非常令人注目。分接开关事故中，触头中的银被油中硫的化合物（例如 SO_2 、 H_2S ）污染时，在镀银触头表面形成一层很薄的硫化银的黑色膜层，并被X射线衍射法所确认。该膜层的导电性能差，接触电阻成千倍增大，对电接触的危害极大。这种形成黑色硫化银的触头往往接触不良而过热，形成放电点过热而损坏。刚生成的硫化银不会立即造成事故，当形成的硫

化银薄膜达到一定的厚度时，由于热膨胀系数的不同，在实际运行中，其分界面因往复受热而处于周期性的应力作用之下。时间一长，促使薄膜剥离，并在强电场内开始脱落，这些小的薄膜片在油中漂浮运动，附着在电极间的绝缘物上，使电场发生变化，或者在油中沿着电磁力线排列起来或堵塞在绕组间，或与分接头间桥接而造成绝缘闪络或击穿。某220 kV变电站2[#]主变压器发生投运过程中跳闸事故，解体后发现开关触头严重烧损，经光谱仪测定，触头表面黑色物质为 Ag_2S 。腐蚀性硫引起分接开关烧损情况如图1所示。

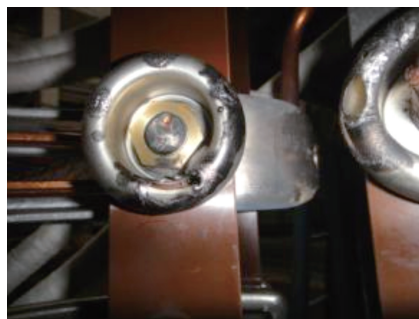


图1 腐蚀性硫引起分接开关烧损情况

2 3D建模与仿真

Ag_2S 为黑色粉末，化学性质非常稳定，半导体，电导率约为105 S/m，相对介电常数为2.7~3.1。

针对 Ag_2S 对变压器绝缘结构的影响作出以下模型并进行仿真。

采用平行双极板模型，上下平面半径为10 mm，极板间距为10 mm，中间注满变压器油，在高度为5 mm的位置创建硫化银模型。变压器油属性：电阻



刘 旸/高级工程师

关键词/Keywords

变压器·
腐蚀性硫·
电场分布·

率 $1\ 013\ \Omega\cdot\text{m}$ ，介电常数2.2；硫化银属性：电导率 $105\ \text{S/m}$ ，介电常数3。

边界条件：上极板施加40 kV交流电压，下极板为地电位，这样平均场强为4 kV/mm。硫化银模型设置为悬浮电极属性，其余边界为开放边界条件。模型如图2所示。

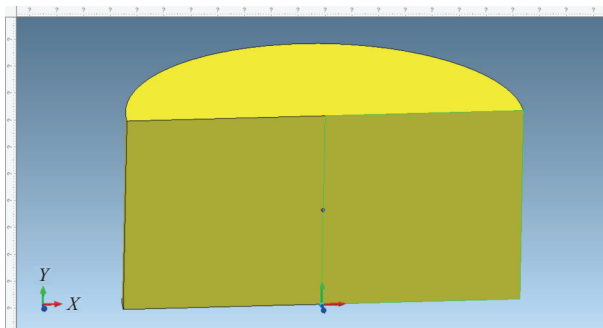


图2 模型

对模型进行三维剖分并进行时变电场仿真^[6]，由于硫化银模型尺寸非常小，采用局部高密剖分，模型表面自适应25%剖分。剖分如图3所示。

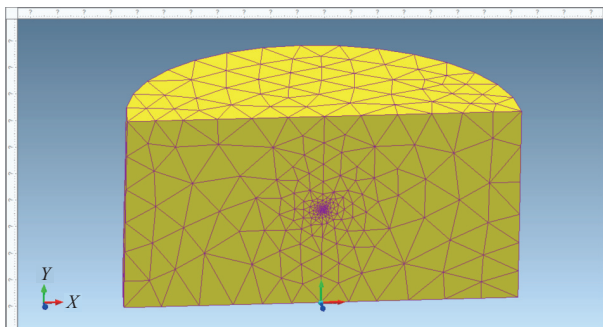


图3 剖分

模型1：对半径为0.1 mm的球形硫化银分别在0.5~5 mm高度位置进行仿真。

仿真结果：在球形硫化银上下端部电场强度最大，且与球形硫化银所在高度位置无关，电场强度最大值为12.067 kV/mm，场强分布如图4所示。

由仿真结果可以推测：球形硫化银外部畸变电场范围约为圆球直径的2.5倍。根据此推测建立球形距离极板0.2 mm位置的仿真，如图5所示。

场强最大值提高至12.838 kV/mm。考虑到球形硫化银附着在电极表面的情况，建立模型并进行仿真，结果如图6所示。

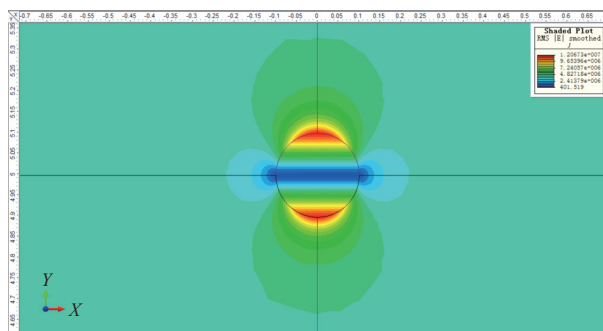


图4 模型1电场分布

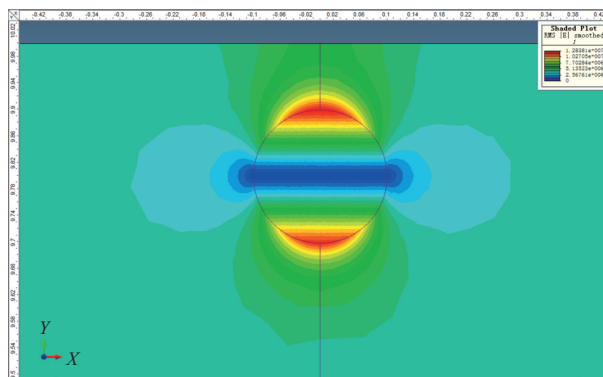


图5 模型1在0.2 mm高度位置电场分布

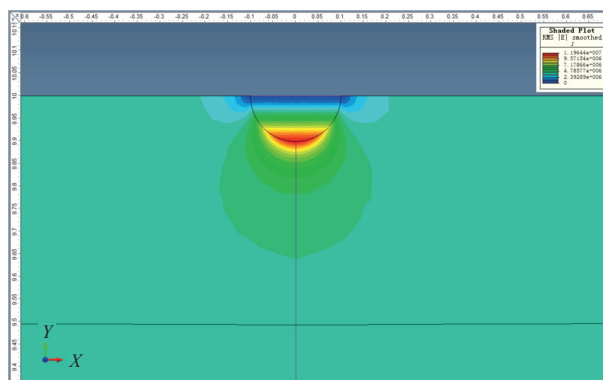


图6 模型1附着在电极上时电场分布

场强最大值为11.964 kV/mm。与油中悬浮球形硫化银的情况非常接近。

结论1：油中悬浮硫化银颗粒（球形）表面畸变电场范围约为球形半径的2.5倍，最大场强约为油中场强的3倍，且位置集中在靠近两极板的位置，而模型中部场强非常低，部分区域场强甚至降为0。考虑到实际油中悬浮颗粒半径往往非常小，则球形颗粒状硫化银对电场分布的影响比较小。在颗粒刚刚脱离极板且距离非常近时（小于颗粒半径的2.5倍）场强最大值还会稍微提高。

模型2：对悬浮在5 mm高度的0.01~1.0 mm半径的球形硫化银分别进行仿真。

仿真结果：在各个半径的球形硫化银表面场强最大值及电场分布与0.1 mm半径球形硫化银时完全相同。

结论2：球形硫化银表面电场分布与半径无关。

模型3：对悬浮在5 mm高度的长方体硫化银（长0.1 mm，高0.1 mm，宽0.02~0.1 mm）分别进行仿真。

仿真结果如图7所示。

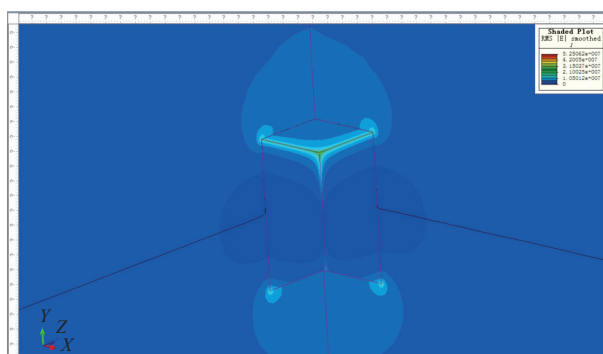


图7 模型3电场分布

场强最大值均为52.506 kV/mm。最大场强出现在上下尖角及长方体上下棱处，尖角处场强为52.506 kV/mm，上下表面棱处场强18.620 kV/mm。

结论3：油中悬浮硫化银表面电场强度集中在尖端或不规则的表面，且最大场强数值与平滑部分尺寸无关。

模型4：对悬浮在5 mm高度的圆锥形硫化银进行仿真，底面半径0.05 mm，高0.05 mm。

仿真结果如图8所示。

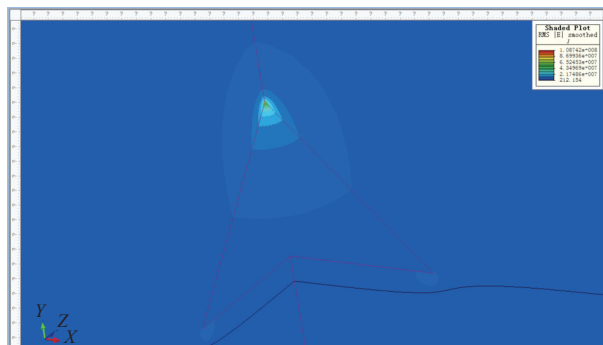


图8 模型4电场分布

场强最大值为108.742 kV/mm。最大场强出现

在圆锥的上尖端，其余部分场强非常小，接近于油中场强。

结论4：油中悬浮硫化银表面电场强度集中在靠近极板的尖端或不规则的表面，且由该尖端（或不规则）部位向平滑部位电场强度陡降。

3 结束语

变压器油中悬浮硫化银碎片，其表面电场分布集中在靠近电极或接地位置的区域，由于受到电场力的作用，硫化银碎片的尖端会转向，而指向电极或接地位置，从而导致场强进一步提升，所以硫化银碎片越不规则，其表面最大场强越大。当其表面场强超过变压器油的最大击穿场强时，硫化银表面就会发生局部放电现象，进而导致变压器绝缘结构破坏甚至击穿。

当变压器油中具有硫化银碎片时，在硫化银碎片的尖端会比平均场强提高20倍，因此在较低的电压作用下，硫化银碎片尖端处就开始发生局部放电，当电压升高就会产生电极之间的放电击穿。

参考文献

- [1] 李睿，曹顺安，等．变压器油中腐蚀性硫的研究现状[J]．变压器，2009，46(2)：19-20.
- [2] 任双赞，钟力生，等．变压器油中腐蚀性硫的检测标准及测量方法研究[J]．高压电器，2011，47(7)：40-41.
- [3] 张德明．分接开关绝缘故障及其诊断[J]．变压器，2008，45(12)：40-41.
- [4] 钱艺华，李智，等．广东电网500 kV变压器绝缘油腐蚀性硫普查与处理[J]．高压电器，2010，46(12)：104-105.
- [5] 彭伟，陆志浩，等．大型变压器绝缘油含硫量测试方法及腐蚀性硫初步研究[J]．华东电力，2008，36(1)：61-62.
- [6] 李晓丹，李水清，方临川，等．基于三相GIS电场分布的模型简化研究[J]．电气工程学报，2015，10(11)：58-62.

(收稿日期：2017-03-07) EA