

微环境对高压开关柜电场分布及绝缘净距离的影响研究

陈 荣¹, 曹 梦¹, 田 涛², 邢向上¹, 宋晓博¹, 何 金¹

(1. 国网天津市电力公司电力科学研究院, 天津 300384;

2. 国网天津市电力公司宁河供电分公司, 天津 301500)

摘 要:潮湿污秽等微环境极易引发高压开关柜放电或绝缘击穿故障。为提高开关柜设计及运行水平,本研究对高压开关柜微环境下的内部电场分布特性及绝缘净距离进行仿真计算研究。首先基于COMSOL仿真软件建立40.5 kV高压开关柜母线室多物理场有限元仿真模型,获得开关柜母线室中温度、湿度分布。利用数值分析方法研究有无微环境下的电场分布特性,基于空气流注放电起始判据,利用COMSOL与MATLAB软件计算微环境下的绝缘净距离。最后研究微环境下不同绝缘隔板布置参数(厚度和位置)对电场分布和绝缘净距离的影响。结果表明:在高温高湿的环境下,母线室最高温度可达347.15 K,整体温度呈现上高下低的梯度分布;绝缘隔板处于低温高湿度区域,容易积聚湿污;微环境下母排尖端电场和绝缘净距离降低,但绝缘隔板表面电场增大,沿面闪络概率增大。

关键词:高压开关柜;微环境;绝缘隔板;电场分布;绝缘净距离

中图分类号:TM854 文献标志码:A 文章编号:1009-9239(2021)08-0083-06

DOI:10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2021.08.013

Effects of Micro-environment on Electric Field Distribution and Minimum Discharge Distance of High Voltage Switchgear

CHEN Rong¹, CAO Meng¹, TIAN Tao², XING Xiangshang¹, SONG Xiaobo¹, HE Jin¹

(1. Electric Power Research Institute, State Grid Tianjin Electric Power Company, Tianjin 300384, China;

2. Ninghe Power Supply Branch, State Grid Tianjin Electric Power Company, Tianjin 301500, China)

Abstract: In humid and dirty environment, it is easy for high voltage switchgear to trigger discharge or insulation breakdown fault. To improve the design and operation level of high voltage switchgear, we simulated the electric field distribution of high voltage switchgear under micro-environment and calculated the minimum discharge distance. Firstly, a multi-physical field finite element simulation model of bus chamber for 40.5 kV high voltage switchgear was established by COMSOL simulation software, and the temperature and humidity distribution in the bus chamber were obtained. The electric field distribution characteristics in the presence or absence of micro-environment were studied by numerical analysis method. Based on the air streamer discharge initiation criterion, the minimum discharge distance in micro-environment was calculated by COMSOL and MATLAB software. Finally, the influence of different insulation partition layout parameters (thickness, location) on the electric field distribution and minimum discharge distance in micro-environment was studied. The results show that the maximum temperature in the bus bar chamber can reach 347.15 K under high temperature and high humidity environment, and the overall temperature presents a gradient distribution of upper and lower. The insulating partition, which is located in the area of low temperature and high humidity, is easy to accumulate wet dirt. In the

收稿日期:2020-10-25 修回日期:2020-12-04

基金项目:国网天津市电力公司科技项目(KJ20-1-40)

作者简介:陈荣(1984-),女(汉族),湖北武汉人,高级工程师,主要从事高压开关设备试验及运检技术的研究;通信作者:何金(1986-),男(汉族),福建福州人,高级工程师,主要从事设备带电检测技术的研究。

micro-environment, the electric field at the bus tip and the minimum discharge distance decrease, but the surface electric field increases, and the flashover probability increases.

Key words: HV switchgear; micro-environment; insulation partition; electric field distribution; discharge distance

0 引言

高压开关柜作为连接输电网和配电网之间的枢纽道路,对配电网可靠性的提升起到至关重要的作用。高压开关柜故障频发成为配网可靠性提升的主要障碍。与此同时,随着以空气为主要绝缘介质的开关柜智能化与小型化的发展与应用,开关柜空间尺寸以及占地面积大幅减小,为保证开关柜绝缘水平不下降,大量绝缘隔板应用于开关柜内,这就要求开关柜具有更高的绝缘可靠性^[1-2]。然而,现有开关柜的结构设计及电气布置方式仍遵从80年代的设计标准,无法满足如今智能化与小型化的需求。同时,工艺制造技术的不完善以及设计上缺少对实际运行工况的考虑导致开关柜绝缘性能难以达到预期效果。

近年来,高压开关柜内局部放电频发。2010—2015年,根据27家省级电网公司40.5 kV开关柜故障案例统计分析结果,开关柜绝缘裕度不足、温升过高、频繁放电等问题,60%是由于开关柜小型化后内部绝缘器件不合理布置导致的绝缘距离不足、绝缘性能降低造成的^[3-5]。根据故障分析原因主要有:①运行微环境的影响。开关柜内运行环境差、温度高、湿度大、污秽严重,造成绝缘故障频发;②柜内器件布置不合理,导致设备空间小、结构紧凑、绝缘距离较小;③绝缘隔板材料问题。母排之间加装绝缘隔板,由于隔板材料易吸水,受潮后逐渐老化,导致绝缘水平降低。因此,开关柜内产生局部放电主要是在微环境的影响下,较小的安全距离以及绝缘隔板老化的原因造成的。对于绝缘隔板而言,绝缘隔板材料材质差、凝露、老化、绝缘隔板与带电体空气净距离不足是造成局放的主要原因^[6-8]。李璟等^[9]通过对比国内标准和国际标准,得到绝缘净距离的计算方法。王磊等^[10]为得到海拔2 000 m下35 kV开关柜的绝缘净距离,对目前开关柜的8种常规结构进行试验研究,得出35 kV开关柜母排在海拔2 000 m的空气绝缘净距离为425 m。张建安等^[11]提出高压开关柜的绝缘水平不仅取决于绝缘净距离,还与绝缘材料、制造工艺水平、运行环境,特别是与带电导体的形状、电场分布状况等因素有关。目前的绝缘净距离计算缺少考虑微环境对绝

缘净距离的影响,而微环境会显著影响高压开关柜的绝缘水平。因此,有必要开展考虑微环境的高压开关柜绝缘净距离计算与绝缘隔板改造方案研究,为配电可靠性的提升奠定基础。

本研究建立高压开关柜母线室电-热-湿多场耦合物理模型,获取高压开关柜内部微环境情况,研究微环境对电场分布的影响,并结合空气的流注起始判据计算微环境下开关柜的绝缘净距离。

1 仿真模型与参数

1.1 几何模型

高压开关柜内部由电缆室、母线室、断路器室等部分构成,其中每个隔室又由多个元件组成。其中母线室内部包含高压开关柜内部主要绝缘构件,并且母线室内部事故发生概率较高,因此本研究将研究对象设为高压开关柜母线室。参考40.5 kV高压开关柜设备实际尺寸,建立母线室仿真模型,模型中包括ABC三相母排、穿墙套管、触头和触头盒、金属外壳以及绝缘隔板,如图1所示。

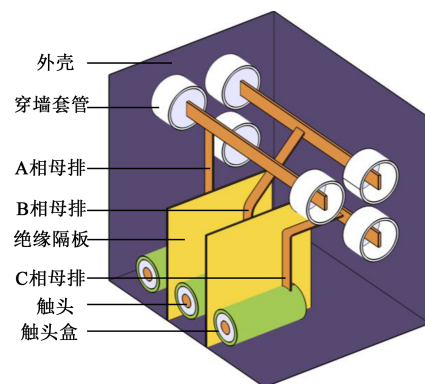


图1 高压开关柜母线室示意图

Fig.1 The schematic diagram of busbar chamber

1.2 仿真模型

本研究基于开关柜实际运行条件利用多物理场有限元分析软件COMSOL建立电-热-湿仿真模型,此仿真模型可以较为准确地体现开关柜内部电-热-湿分布情况。仿真模型的控制方程如式(1)~(4)所示。

$$\nabla J = 0 \quad (1)$$

$$J = \sigma E + j\omega D \quad (2)$$

$$E = -\nabla V \tag{3}$$

$$D = \epsilon_0 \epsilon_r E \tag{4}$$

式(1)~(4)中: J 为电流密度,单位为 A/m^2 ; E 为电场强度,单位为 kV/cm ; σ 为电导率,单位为 S/m ; V 为电势,单位为 V ; D 为电位移矢量,单位为 C/m^2 ; ϵ_0 和 ϵ_r 分别为真空中和材料的介电常数,单位为 F/m 。

母线室内部的温度升高主要是母排通过大电流产生焦耳热造成的,母线室内部热量传递主要有3种途径:热传导、热对流和热辐射。根据热力学定律,3种热量传递途径的方程分别如式(5)、式(6)~(8)、式(9)所示^[12-13]。

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p u \cdot \nabla T + \nabla \cdot (-k \nabla T) = Q \tag{5}$$

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho(u \cdot \nabla)u = -\nabla[-p \cdot I + \mu(\nabla u + (\nabla u)^T - \frac{2}{3}\mu(\nabla \cdot u)I)] + \rho g \tag{6}$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \cdot u) = 0 \tag{7}$$

$$\rho = \frac{pM}{RT} \tag{8}$$

$$-n \cdot (-k \nabla T) = \epsilon \sigma (T_{amb}^4 - T^4) \tag{9}$$

式(5)~(9)中: ρ 为空气密度,单位为 kg/m^3 ; Q 为母排的热功率,单位为 W ; C_p 为材料比热容,单位为 $J/(kg \cdot K)$; k 为热导率,单位为 $W/(m \cdot K)$; T 为温度,单位为 K ; u 为空气流速,单位为 m/s ; μ 为空气粘性系数; g 为重力加速度,单位为 m/s^2 ; p 为大气压; M 为空气相对分子量; σ 为玻耳兹曼常数; T_{amb} 为环境温度; ϵ 为材料辐射系数; R 为气体常数; I 为单位矩阵。

母线室内部水分主要来源于外界环境湿气的扩散。根据Fick扩散第二定律,可以计算母线室内部湿度分布,其数学计算公式如式(10)所示。

$$\begin{cases} w = \frac{w_1}{w_{1sat}} \\ \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} = \frac{1}{D} \cdot \frac{\partial w}{\partial t} \end{cases} \tag{10}$$

式(10)中: w 为相对湿度; w_1 为绝对湿度; w_{1sat} 为饱和含湿量; D 为湿扩散系数。

1.3 材料与参数设置

本研究设置环境温度为 $308.15 K (35^\circ C)$,环境湿度为 80% ,母线电流为 $1250 A$,由焦耳定律可计算母排发热功率。为简化计算,母线室外壁设置相应的对流换热系数。母线室内部空气域设置层流物理场,以此计算母线室内部空气流动情况,从而计算空气湿度分布。金属、环氧等材料表面设置热辐射边界条件。根据实际开关柜母线室材料设置相应的物理参数,如表1所示^[6,17]。

表1 仿真参数

Tab.1 The simulation parameters

结构	材料	热导率 k /(W/(m·K))	比热容 C_p /(J/(kg·K))	辐射系数 ϵ	相对介电常数
母线/触头	铜	400.00	385.00	0.30	—
触头盒	环氧树脂	0.90	120.00	0.80	4.50
穿墙套管	陶瓷	2.00	140.00	0.85	3.20
外壳	铝	16.00	56.00	0.30	—
绝缘气体	空气	0.0028	620.00	—	1.00
绝缘隔板	SMC	163.00	900.00	0.80	3.20

按照正常运行工况母排电压幅值为 $40.5 kV$,由于ABC三相母排依次落后 120° ,故电压分别设置为 0 、 $-35 kV$ 、 $+35 kV$,同时将母线室外壳接地,绝缘隔板尺寸为 $700 mm \times 800 mm \times 5 mm$ 。

1.4 基于流注放电计算绝缘净距离

国标和IEC标准均对高压电气设备的最小安全绝缘净距离有规定,但高压开关柜结构复杂,依据标准进行的计算过于粗略,会导致绝缘净距离过大造成浪费或者绝缘净距离过小造成安全隐患。本研究依据高压开关柜电场分布和空气流注放电起始判据,进行更为精确的绝缘净距离计算。

依据流注放电理论可知,在电场力作用下,电子会沿电场线运动,与气体分子碰撞后形成电子崩,当初崩中的电子数达到一定值时流注起始,放电发生,其临界判据如式(11)所示。

$$\int_0^{z_c} (\alpha - \eta) dz \geq 18.42 \tag{11}$$

式(11)中: α 为空气中电子的碰撞电离系数, cm^{-1} ; η 为电子的附着系数, cm^{-1} ;二者差值被定义为净电离系数,是关于约化电场 E/N 的函数,单位为 $V/cm^{21[5]}$,其中 E 为电场强度,单位为 kV/cm ,可以通过仿真计算获得; N 为单位体积内气体粒子数, cm^{-3} ,可由玻尔兹曼方程确定,受温度和气压的影响; z_c 为临界电子崩长度, $\alpha = \eta$ 则为 z_c 所在位置。

根据仿真计算得到的高压开关柜电场分布,可以获得空气的碰撞电离系数 α 和电子附着系数 η 分布。改变母排之间绝缘净距离 L ,使其刚好不满足流注起始判据,从而确定开关柜最小绝缘净距离 L_{min} ,以上步骤基于MATLAB软件实现。

2 开关柜内部温度/湿度场分布

经过 25 h 后,开关柜内部最大温度趋于不变,说明开关柜内外热量交换达到平衡,内部温度达到稳定,其截面温度分布如图 2 所示。从图 2 可以看出,因为母排是母线室内部的主要热源,热量主要集中在母排附近,所以母排具有较高的温度,其附近温度最高为 347.15 K(74℃)。触头盒内部散热较差,也达到较高的温度。而在母排出口与外界热量交换较多,其温度只有 313 K。母线室整体温度分布呈现上高下低的梯度分布,这是因为在气体对流的作用下,受热膨胀的空气将热量从母线室底部带到母线室上方,从而导致母线室上方温度较高。在长期高温下,母线室内部材料的绝缘性能会下降,不利于开关柜的稳定运行,因此需要增设通风装置,提高母线室内部通风降温能力。

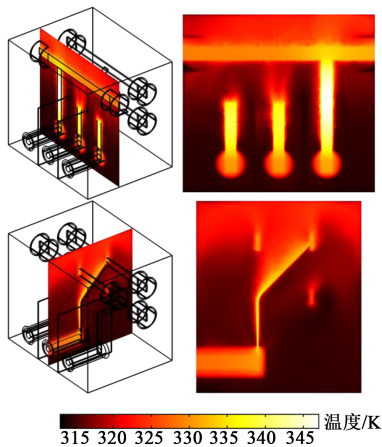


图 2 母线室温度场分布

Fig.2 The temperature distribution of busbar chamber

图 3 为母线室湿度场的仿真结果。从图 3 可以看出,相对于金属材料,绝缘材料更容易吸湿,相对湿度更高,最高达到了 0.71%。绝缘隔板相对湿度较高,当母排附近高温气体遇到低温的隔板时,达到隔板表面空气所能包含的最大含水量时,就会发生凝露现象,凝露的产生会导致绝缘隔板电场畸变,容易诱发沿面闪络^[16]。

3 微环境对电场分布和绝缘净距离的影响

在潮湿污秽的环境中,绝缘隔板表面水膜容易溶解大气中的污秽颗粒物,导致水膜中的离子浓度升高,导致电导率和介电常数发生变化,最终影响电场分布。根据文献[17]研究结果设置绝缘隔板表面湿污层相对介电常数和电导率分别为 30 S/m 和 0.6 S/m;根据文献[18]可知,潮湿污秽空气电导率远大于干燥空气,因此根据文献资料设置湿空气电导

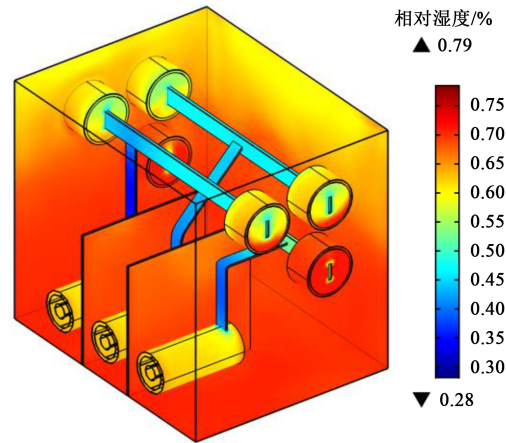


图 3 母线室相对湿度分布

Fig.3 The relative humidity distribution of busbar chamber

率为 10^{-8} S/m,以此研究微环境对电场分布和绝缘净距离的影响。

3.1 微环境对电场分布的影响

图 4 为母线室电场分布。从图 4 可以看出,触头盒区域、穿墙套管区域、母排尖端的电场集中情况较为严重,电场分布极不均匀。图 5 为母线室内部截面电场分布。从图 5 中可以看出,母排尖端附近电场强度较高,最大可达 36.2 kV/cm,母排中间的空气电场强度也达到了 22.75 kV/cm。图 6 为绝缘隔板表面电场分布。从图 6 可以看出,处于母线盒

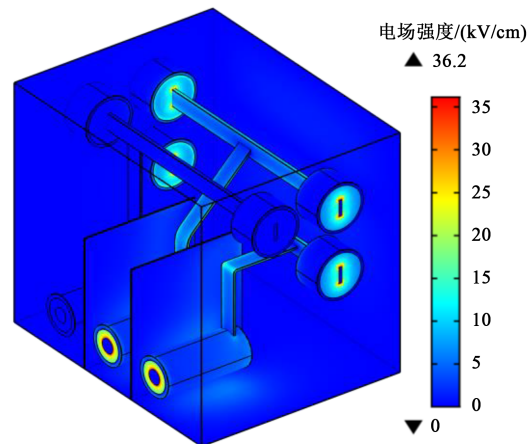


图 4 母线室电场分布

Fig.4 The electric field distribution in busbar chamber

中间和母排之间部分电场较高,最高达到了 2.24 kV/cm,这是因为在此区域电场线较为集中,导致电场较高。绝缘隔板表面电场过高会引发沿面闪络,引发绝缘故障,不利于开关柜稳定运行。

图 7 对比了有无微环境下的最大电场强度。从图 7 可以看出,潮湿污秽的微环境导致绝缘隔板表

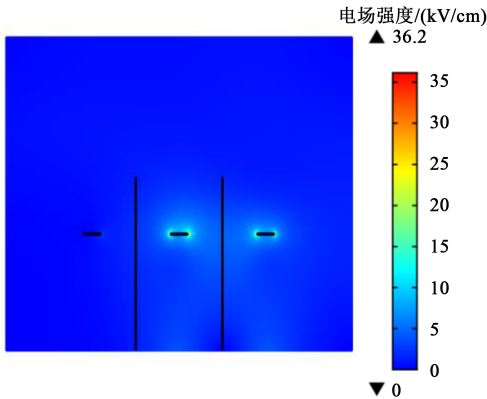


图5 母线室截面电场分布

Fig.5 Distribution electric field in the section of busbar chamber

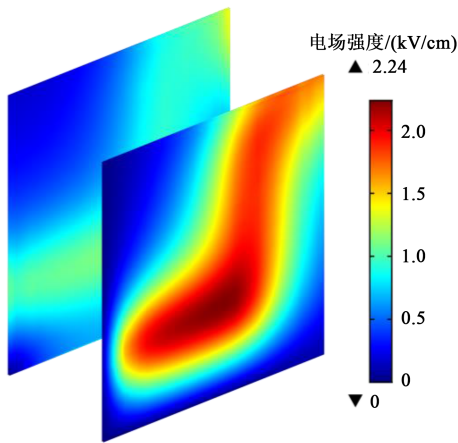


图6 绝缘隔板表面电场分布

Fig.6 Surface electric field distribution of insulating partition

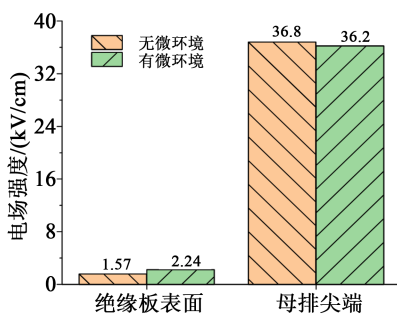


图7 有无微环境下的最大电场强度

Fig.7 Maximum electric field strength with or without micro-environment

面最大电场增强,母排尖端最大电场下降。根据电磁场理论可知,多层电介质电场分布由电介质材料电导率和相对介电常数决定。在交流电场下,材料电阻远大于材料电容,其电场分布取决于材料的相对介电常数,电阻对电场的影响可以忽略。然而潮

湿导致空气电导率增大,电阻率减小,相比于材料电容,材料的电阻不可忽略。所以空气电导率增大导致空气分压降低,绝缘隔板分压增大,绝缘隔板电场增加,母排尖端电场减弱。

3.2 微环境对绝缘净距离的影响

基于流注放电理论计算微环境下的母线间绝缘净距离。图8为母线室电势分布和电场线分布,通过沿电场线对电离系数积分,以此计算绝缘净距离。经计算得出有无微环境下的绝缘净距离分别为368 mm和361 mm,微环境下的绝缘净距离小于干燥空气。其原因是:一方面净电离系数和电场成正比相关,微环境下电极尖端电场削弱导致净电离系数降低;另一方面湿空气中的水分子可捕获放电过程中的电子,对电子具有吸附作用,吸附系数升高导致净电离系数降低^[19]。二者共同作用使得微环境下的母排尖端更不容易放电,绝缘净距离减小。然而,微环境的绝缘净距离减小,并不意味着绝缘性能的提升。微环境湿度的增加虽然会抑制活性物质的生成,例如过氧化氢、臭氧等,但这些强氧化性物质会引发绝缘隔板等绝缘材料的化学分子链断链,造成绝缘性能降低^[20]。较大的湿度会导致绝缘隔板表面电荷迁移形成电荷积聚,引起电场畸变,诱发沿面闪络,导致绝缘隔板劣化,最终造成绝缘隔板击穿故障^[21]。因此在实际工作中,为保证开关柜内部较低湿度,应加设通风干燥设备^[22]。

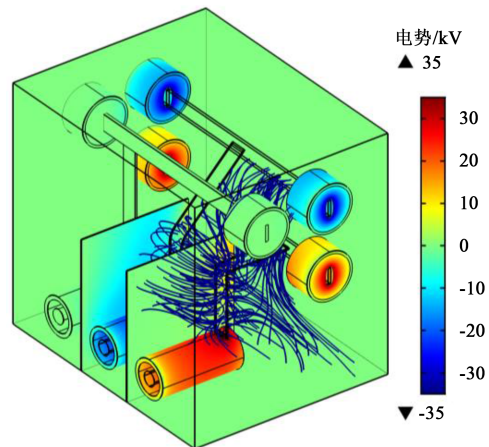


图8 母线室电势分布和电场线

Fig.8 Potential distribution and electric field line of busbar chamber

3.3 绝缘隔板布置参数对电场分布和绝缘净距离的影响

表2为绝缘隔板厚度对母排尖端和绝缘隔板表面电场的影。从表2可以看出,随着绝缘隔板厚

度的不断增加,母排尖端和绝缘隔板表面场强升高,绝缘净距离也随之增大,因此绝缘隔板不宜太厚。根据文献[23]可知,绝缘隔板太薄会导致隔板内部出现小孔,引发隔板击穿故障,因此隔板厚度选取5 mm左右较为合适。

表2 绝缘隔板厚度对电场分布和绝缘净距离的影响

Tab.2 Influence of insulation partition thickness on the electric field distribution and minimum discharge distance

隔板厚度 /mm	母排尖端场强 /(kV/cm)	隔板表面场强 /(kV/cm)	绝缘净距离 /mm
3	36.10	2.23	358
5	36.20	2.24	361
8	36.50	2.25	362
10	36.60	2.26	363

表3为绝缘隔板相对位置对电场分布和绝缘净距离的影响,其中0代表绝缘隔板放置在母排中间, ± 10 mm表示由中间位置向A相靠近或远离10 mm。

表3 绝缘隔板位置对电场分布和绝缘净距离的影响

Tab.3 Influence of insulation partition position on the electric field distribution and minimum discharge distance

隔板位置 /mm	母排尖端场强 /(kV/cm)	隔板表面场强 /(kV/cm)	绝缘净距离 /mm
-20	36.50	2.27	374
-10	36.30	2.25	363
0	36.20	2.24	361
10	36.30	2.24	362
20	36.40	2.26	363

从表3可以看出,绝缘隔板无论是靠近向A相还是靠近B相,母排尖端、绝缘隔板表面场强以及绝缘净距离都会增大,因此绝缘隔板最好位于AB母排中间。

4 结论

(1)在高温高湿的环境下,母线室最高温度达347.15 K,整体温度呈现上高下低的梯度分布。绝缘隔板处于低温高湿度区域,容易积聚湿污。

(2)微环境会影响母线室内部电场分布,微环境下绝缘隔板表面电场畸变严重,容易诱发闪络故障。

(3)通过改变绝缘隔板布置参数,发现覆有湿

污的绝缘隔板厚度增大,绝缘隔板表面及母排尖端电场增强,绝缘净距离增大;绝缘隔板位置位于AB母排之间时电场最低,绝缘净距离最小。

参考文献:

- [1] 张凯,陈丽安,黄留留.基于有限元法的固体绝缘开关柜温度场仿真研究[J].高压电器,2018,54(12):76-81.
- [2] 王海燕,陈硕,朱志豪,等.固体开关柜环氧树脂材料绝缘特性研究[J].绝缘材料,2019,52(2):35-40.
- [3] 庞先海,冀立鹏,景皓.40.5kV高压开关柜绝缘故障原因分析及处理[J].河北电力技术,2017,36(3):31-33.
- [4] 王隽.中压开关柜绝缘方式和绝缘事故分析[J].绝缘材料,2008,41(3):15-20.
- [5] 赵琳,王劲鹤,叶丽雅,等.基于数值仿真的小型化开关柜绝缘件优化设计与布置[J].浙江电力,2019,38(3):25-31.
- [6] 李元,薛建议,任双赞,等.高压开关柜温湿度分布的三维数值模拟研究[J].电工技术学报,2019,34(24):5095-5103.
- [7] 景皓,庞先海,张智远,等.高压开关柜内绝缘隔板放电原因分析及防范措施[J].河北电力技术,2018,37(5):42-45.
- [8] 刘衍,尹桂来,龙国华,等.应用理化分析探索40.5kV开关柜绝缘隔板放电原因[J].高压电器,2019,55(9):222-229.
- [9] 李璟,常阿飞.电气安全净距计算方法的对比分析[J].华电技术,2013,35(3):26-28.
- [10] 王磊,赵现平,董俊,等.2000m海拔35kV开关柜母排结构安全净距试验研究[J].高压电器,2013(4):66-70.
- [11] 张建安,张颐钟.谈高压开关柜的安全净距问题[J].江苏电器,2005(2):27-29.
- [12] 刘云鹏,郭沁.高压开关柜电缆室温湿度场数值计算分析[J].高压电器,2017,53(9):6-10,16.
- [13] 程显,韩书谟,何周,等.40.5kV环保型气体绝缘开关柜气室结构设计[J].高电压技术,2015,41(8):2772-2779.
- [14] 付鲁军,陈雪飞,辛昭昭,等.气体绝缘开关柜多物理耦合场仿真及分析[J].高压电器,2019,55(12):38-45.
- [15] MORROW R, LOWKE J J. Streamer propagation in air[J]. Journal of Physics D Applied Physics,1999(30):614-627.
- [16] 刘云鹏,吕玉坤,王佳文,等.水珠对复合绝缘子表面电场畸变特性的影响[J].电网技术,2020,27(10):1-7.
- [17] 董海燕,张友鹏,董海龙.基于三维模型的染污复合绝缘子电场特性分析[J].兰州交通大学学报,2019,38(3):46-51,57.
- [18] 董冰冰,蒋兴良,黄俊,等.雾对棒-板空气间隙交流放电特性的影响[J].高电压技术,2014,40(5):1339-1344.
- [19] 徐明铭.空气湿度对直流电晕放电影响的研究[D].济南:山东大学,2014.
- [20] LIN L Y, KANG A L, SONG J C, et al. Influences of humidity and temperature on oil contamination discharge of HV motor stator windings[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2016,23(5):2695-2703.
- [21] 张亚茹,王勇,黄青丹,等.湿度对空气电击穿特性的影响[J].电器与能效管理技术,2019(21):1-6.
- [22] 彭诗怡,阮江军,杜志叶,等.不同散热条件对开关柜母线室温度分布影响探究[J].电工电能新技术,2018,37(8):48-57.
- [23] 李俊豪,吴小钊,李玲玲,等.环保气体开关柜中复合绝缘结构绝缘特性[J].科学技术与工程,2018,18(14):37-42.