

DOI:10.12158/j.2096-3203.2022.01.007

空间电荷及金属颗粒对换流变阀侧套管的电场分布影响

孟旋, 郭若琛, 袁文泽, 李军浩

(西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049)

摘要:换流变压器阀侧套管承受交、直流复合电压,对套管的性能和质量有严格的要求。直流电压下,不同介质界面处空间电荷积聚会引起局部电场的畸变,金属颗粒的存在也会大幅提高局部场强,二者均会降低套管的绝缘性能。文中根据换流变压器阀侧套管的结构,采用有限元分析软件,建立了阀侧套管的仿真模型,分析了加入空间电荷后不同类型电压下套管的电场分布以及金属颗粒对局部电场的影响。结果表明,直流电压下介质界面处空间电荷更容易积聚,交直流复合电压下空间电荷能够引发套管内部局部电场的畸变。与交流电压相比,直流电压下金属颗粒对局部电场的畸变程度影响更大,在SF₆气体中金属颗粒对电场畸变程度的影响大小与其所在位置的关系不大。

关键词:交直流复合电压;阀侧套管;电场分布;空间电荷;金属颗粒;电场畸变

中图分类号:TM42

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2022)01-0048-08

0 引言

换流变压器是高压直流输电系统中必不可少的电力设备,其将交流系统和直流系统隔离开来,并实现交流输电网络与直流输电网络间的联络^[1-3]。换流变压器工作在直流输电系统下,其阀侧套管连接到换流阀,阀侧套管上承受的是直流电压与不同频率、相位、幅值的交流电压叠加而成的交直流复合电压^[4-8]。交流电压和直流电压下的电场分布规律不同,探究不同类型电压下阀侧套管电场分布的差异,对电场分布优化以及故障仿真研究等具有重要意义。

空间电荷的存在对于阀侧套管的绝缘强度有非常复杂的影响,因此,在研究阀侧套管的电场分布时必须考虑空间电荷的影响。在直流高电压下,每种介质的相对介电常数和电阻率有很大差异,在传导电流的作用下会造成介质分界面空间电荷的局部积累,从而导致局部电场畸变,对该处电场强度起到增强或者削弱的效果^[9-12]。另外,长时间空间电荷的积累还会加速绝缘介质老化,影响介质的绝缘性能,最终引发绝缘介质击穿^[13-14]。在电力设备的生产、组装与运行过程中,会由于残留、污染、摩擦等因素在设备中留有极微小的金属颗粒^[15-20],换流变压器阀侧套管也不例外。套管中存在金属颗粒时,局部电场的大幅畸变会导致设备绝缘性能下降,严重威胁设备的正常运行^[21-22]。对于典型交流、直流工况下的换流变压器阀侧套管电场分布的

研究已经较为成熟,近年来也有一些学者针对交直流复合电压下的电场分布进行研究,然而并未考虑空间电荷对电场分布的影响。此外缺乏考虑空间电荷影响、设备内部存在金属颗粒等异物时电场分布的比较与分析,因此,该部分内容有待研究。

文中阐述了换流变阀侧套管的电场分布特点,并选用有限元仿真软件对换流变阀侧套管进行建模仿真与分析。计算了考虑空间电荷影响前后,不同类型电压下套管电场分布的情况,分析了空间电荷对套管电场分布的影响。在模型中加入金属颗粒,对比不同类型电压下金属颗粒附近的电场畸变程度,分析金属颗粒对套管电场分布的影响。文中的研究对设备绝缘结构优化有参考价值,对改善设备绝缘性能、保障设备安全运行具有重要意义。

1 换流变压器阀侧套管的模型构建

环氧树脂浸纸电容式套管由于其优越的局放性能、无油可避免爆炸危险以及适应环境温度等优点得到了广泛使用。套管主要由4个部分构成:最内层是导电杆,次内层是环氧树脂浸纸绝缘的电容芯子,次外层是SF₆气体,最外层是环氧筒和复合护套。阀侧套管是典型的同轴电容分压式结构,其内部的电容芯子为层状结构,通过同轴电容屏起到强制分压的效果,以达到使套管轴向和径向电场分布均匀的目的。套管电场的径向分量远大于轴向分量,因此在分析套管的电场分布时,以电场的径向分量为主要研究对象。图1为ABB公司制造的GGF型换流变压器阀侧套管示意图。文中以±500 kV换流变压器阀侧套管为研究对象,建立特高压直

收稿日期:2021-09-19;修回日期:2021-11-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51877169)

流套管简化仿真模型,包括导电杆、SF₆气体、环氧树脂浸纸电容芯子、绝缘外套、均压环及法兰等部分。

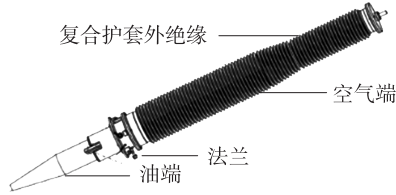


图1 GGF型换流变阀侧套管示意

Fig.1 Schematic diagram of valve-side bushing of GGF converter transformer

套管模型的总长度为 12 500 mm,其中空气端长度为 7 200 mm,油端长度为 3 200 mm,法兰长度为 2 100 mm。均压环纵截面的管径为 600 mm,横截面外径为 2 200 mm。仿真模型如图 2 所示。

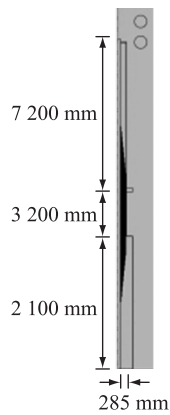


图2 换流变压器阀侧套管仿真模型

Fig.2 Simulation model of valve-side bushing of converter transformer

导电杆外电容芯子的绝缘纸层数在 200 层以上,为了方便模型的构建和仿真计算,在建模中简化了该部分模型,通过增加绝缘介质的厚度将绝缘介质减少为 10 层,在不影响电场分布趋势的情况下,提高仿真计算效率。电容芯子的每一层绝缘层外侧都包裹有铝箔,使电压尽可能地均匀分布在电容芯子绝缘层上。绝缘外套采用了被硫化的硅橡胶,由于外套的伞裙对于套管电场分布影响很小,因此简化了套管中该部分结构。法兰的材质为结构钢,套管两端金具材质为铝合金。另外,还在套管最上方布置了双大环结构的铝制均压环。各材质的物理参数如表 1 所示。

在考虑金属颗粒对换流变阀侧套管电场分布的影响时,由于金属颗粒并非呈轴对称分布,其位置有随机性。针对该部分研究,将 2D 轴对称模型沿对称轴旋转一周,建立换流变阀侧套管 3D 模型,以便在模型中引入金属颗粒。3D 仿真模型见图 3。

图 4 展现了在导电杆上施加交直流复合电压

表 1 仿真模型中各材质的物理参数

Table 1 Physical parameters of each material in the simulation model

材质	相对介电常数	电导率/(S·m ⁻¹)
铜	1.0×10 ⁵	6.0×10 ⁷
结构钢	1.0×10 ⁵	4.0×10 ⁶
环氧树脂浸纸	4.0	1.0×10 ⁻¹⁴
SF ₆	1.0	1.0×10 ⁻¹⁸
铝	1.0×10 ⁵	3.8×10 ⁷
硅橡胶	3.0	1.0×10 ⁻¹⁵



图3 换流变压器阀侧套管 3D 仿真模型

Fig.3 3D simulation model of valve-side bushing of converter transformer

时,两环氧树脂浸纸绝缘层间套管电场轴向分布情况。此时,电场的轴向分量幅值为 0.254 kV/m,远小于阀侧套管电场的径向分量。因此,在后续的研究中,不再对套管电场的轴向分量进行研究。

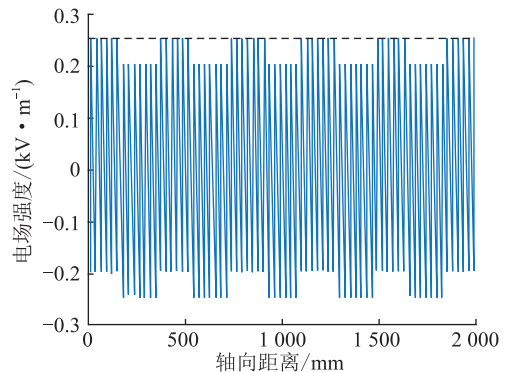


图4 套管轴向电场分布情况

Fig.4 Axial distribution of electric field of bushing

图 5 为换流变压器阀侧套管仿真模型的截面,内侧黑色环形部分为导电杆,灰色部分为环氧树脂浸纸绝缘层,导电杆至套管外壁的其余部分为 SF₆ 气体。选取中心点到套管外壁的一条截线(图中带箭头虚线),对套管径向电场数据进行采集与分析。

2 考虑空间电荷时不同类型电压下套管的电场分布特性

2.1 空间电荷的计算

空间电荷对绝缘介质的绝缘性能影响很大,其

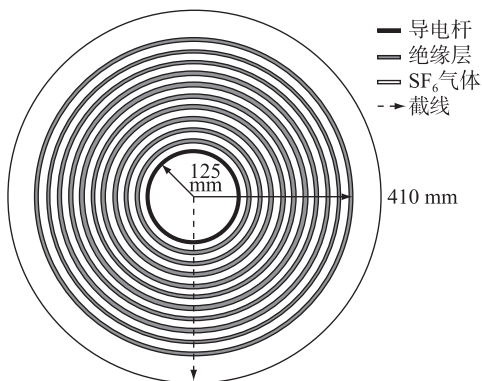


图5 换流变压器阀侧套管截面

Fig.5 Section view of valve side bushing of converter transformer

产生、转移和消散都会改变介质内部的局部电场分布。陷阱的存在和电荷注入是空间电荷能够稳定存在的重要因素。在陷阱强大的吸附力作用下,陷阱电荷能够稳定地存在,而电荷注入保证了载流子的产生和补充,促进电荷入陷阱过程和脱陷阱过程的发生。套管绝缘介质中存在大量的陷阱,在介质的分界面上,由于2种介质的相对介电常数和电阻率不同,在介质分界面上场强不连续,陷阱更容易产生,因此空间电荷在介质分界面容易积聚。

在2种介质的分界面处,满足的衔接条件如式(1)所示。

$$\begin{cases} E_{2t} - E_{1t} = 0 \\ D_{2n} - D_{1n} = \sigma \end{cases} \quad (1)$$

式中: E_{1t}, E_{2t} 分别为2种介质分界面切向的场强; D_{1n}, D_{2n} 分别为2种介质分界面法向的电感应强度; σ 为分界面处的空间电荷密度。

对于图6中的双层介质同轴圆柱结构,将中部和最外层接地,只考虑空间电荷产生的电场,不考虑外加电场,分析空间电荷对电场分布的影响,可以得到式(2)。

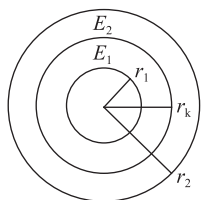


图6 双层介质同轴圆柱结构

Fig.6 Coaxial cylindrical structure of double-layer medium

$$\begin{cases} \int_{r_1}^{r_k} E_1(r) dr + \int_{r_k}^{r_2} E_2(r) dr = 0 \\ \varepsilon_2 E_2(r_k) - \varepsilon_1 E_1(r_k) = \sigma \end{cases} \quad (2)$$

式中: r_1, r_2 分别为最内层与最外层的半径; r_k 为介质分界面处的半径; E_1, E_2 分别为双层介质中的电场

强度; $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ 分别为2种介质的相对介电常数; σ 为分界面处的空间电荷密度。

通过求解式(2)的方程组,可得到2层介质中的电场强度。

当 $r_1 < r < r_k$ 时,有:

$$E_1(r) = -\frac{1}{r} \frac{\sigma r_k}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2 \frac{\ln(r_k/r_1)}{\ln(r_2/r_k)}} \quad (3)$$

当 $r_k < r < r_2$ 时,有:

$$E_2(r) = \frac{1}{r} \frac{\sigma r_k}{\varepsilon_1 \frac{\ln(r_2/r_k)}{\ln(r_k/r_1)} + \varepsilon_2} \quad (4)$$

多层介质的同轴圆柱结构中,每一层分界面处均有空间电荷分布。对于 n 层介质,可以通过式(5)得到第 i ($0 < i < n$) 层分界面上空间电荷产生的电场。

$$\begin{cases} \int_{r_0}^{r_1} E_1(r) dr + \int_{r_1}^{r_2} E_2(r) dr + \dots + \int_{r_{n-1}}^{r_n} E_n(r) dr = 0 \\ \varepsilon_{i+1} E_{i+1}(r_i) - \varepsilon_i E_i(r_i) = \sigma_i \quad 0 < i < n \\ \varepsilon_{j+1} E_{j+1}(r_j) - \varepsilon_j E_j(r_j) = 0 \quad 0 < j < n, j \neq i \end{cases} \quad (5)$$

式中: r_0, r_n 分别为最内层与最外层的半径, r_i ($0 < i < n$) 为由内到外各层介质分界面处的半径; E_i ($1 \leq i \leq n$) 为各层介质中的电场强度; ε_i ($1 \leq i \leq n$) 为各层介质的相对介电常数; σ_i 为第 i ($0 < i < n$) 层分界面处的空间电荷密度。

2.2 500 kV 直流电压下空间电荷的影响

图7为施加500 kV直流电压时,套管内部各层介质的分界面处的空间电荷分布。越靠近内层,空间电荷密度越大,且对于同一层绝缘介质,其内表面和外表面的界面空间电荷极性相反。直流电压下,各层界面空间电荷密度的数量级在 10^{-5} C/m^2 。

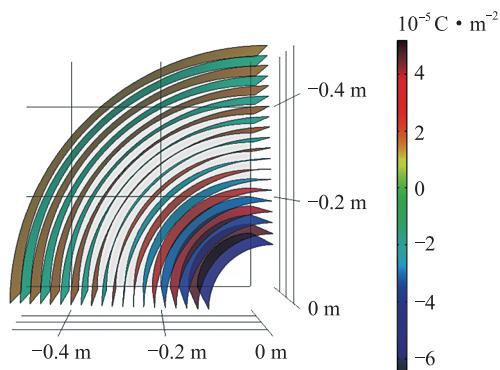


图7 500 kV 直流电压下介质界面空间电荷分布

Fig.7 Distribution of space charge at the interface of the medium under 500 kV DC voltage

将各分界面的空间电荷添加到原有模型中,不考虑外加电压,可以得到空间电荷产生的电场分布情况,如图 8 所示。在距离中心轴 0.145 m 处为 2 种介质的分界面,空间电荷在 SF₆ 气体侧产生的场强为 409 kV/m,在环氧树脂浸纸侧产生的电场为 -915 kV/m。在分界面两侧产生的电场极性相反,在环氧树脂浸纸绝缘层中的电场与外加电场反向。

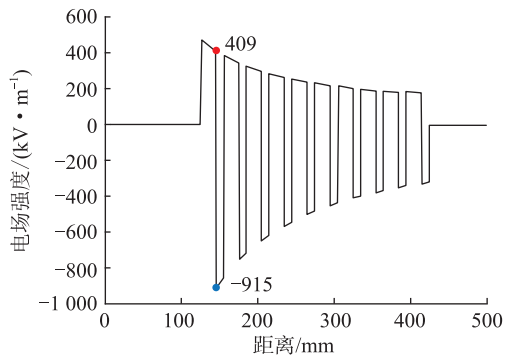


图 8 不考虑外加电压时空间电荷产生的电场
Fig.8 Electric field produced by space charge without considering the applied voltage

施加 500 kV 直流稳态电压时,电场的径向分布情况如图 9 所示。直流电压下,电场分布取决于绝缘介质的电阻率,SF₆ 气体的电导率为 10⁻¹⁸ S/m,环氧树脂浸纸的电导率为 10⁻¹⁴ S/m,相差 10⁴ 倍。图中距离中心轴 0.145 m 处,SF₆ 气体侧场强为 3 652 kV/m,而环氧树脂浸纸侧的电场为 0.364 kV/m,场强之比与其电阻率之比较为吻合。

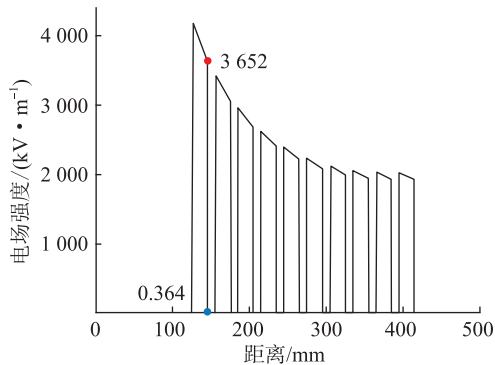


图 9 500 kV 直流电压下的电场径向分布
Fig.9 Radial distribution of electric field under 500 kV DC voltage

引入空间电荷的影响后,电场的径向分布情况如图 10 所示。SF₆ 气体侧的电场有小幅增长,而环氧树脂浸纸侧出现了一个反向的电场,该反向电场远大于外加电压在环氧树脂浸纸侧中产生的电场,在空间电荷的影响下电场强度增幅巨大。

2.3 166 kV 交流电压下空间负荷的影响

根据文献[11]提到的换流变压器阀侧绕组所

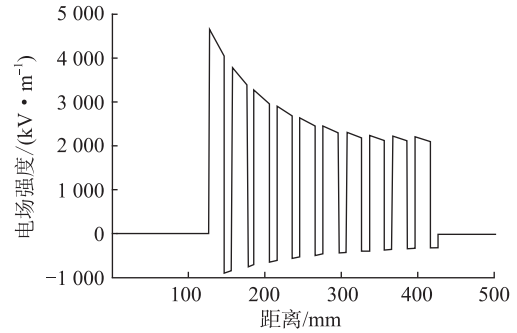


图 10 考虑空间电荷影响时 500 kV 直流电压下的电场径向分布

Fig.10 Radial distribution of electric field under 500 kV DC voltage considering influence of space charge

承受的 2 种电压比例,文中选取 1:3 作为交、直流复合电压的比例,其中交流电压取有效值,直流电压取平均值。图 11 为施加有效值 166.7 kV 工频交流电压时,套管内部各层介质分界面处的空间电荷密度分布。交流电压下的各层界面空间电荷密度的数量级在 10⁻⁸ C/m²,显著低于施加直流电压的情况。在交流电压下,电极注入的电荷会在电场作用下不断地进行往复运动,从而不容易被陷阱束缚,通过电荷中和或者消散,使空间电荷难以大量积聚。因此,工频交流电压下的空间电荷密度远小于直流电压下的空间电荷密度,后续研究也不再考虑交流电场下空间电荷对套管电场分布的影响。

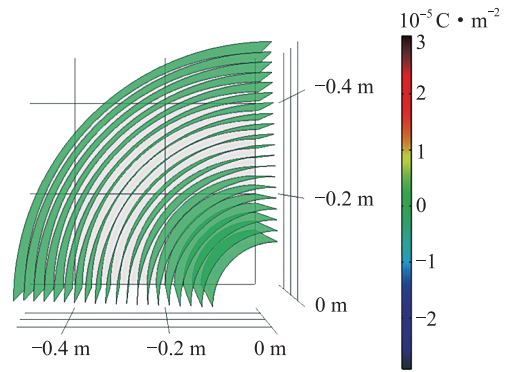


图 11 166.7 kV 交流电压下介质界面空间电荷分布

Fig.11 Distribution of space charge at the interface of the medium under 166.7 kV AC voltage

施加有效值 166.7 kV 工频交流电压时,电场的径向分布情况如图 12 所示。工频交流电压下,电场分布取决于绝缘介质的介电常数,SF₆ 气体的相对介电常数为 1.002,而环氧树脂浸纸的相对介电常数为 4,相差 4 倍。图中距离中心轴 0.145 m 处,SF₆ 气体侧的电场强度为 1 743 kV/m,而环氧树脂浸纸侧的电场为 434 kV/m,场强之比与其相对介电常数之比较为吻合。

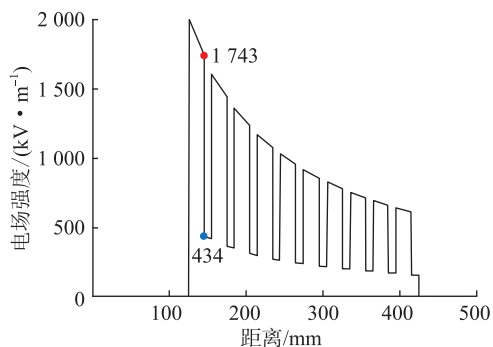


图 12 166.7 kV 交流电压下的电场径向分布

Fig.12 Radial distribution of electric field under 166.7 kV AC voltage

2.4 交直流电压下空间电荷对电场分布的影响

施加交直流复合电压时,电场的径向分布情况如图 13 所示。在距离中心轴 0.145 m 处, SF₆ 气体侧的电场强度为 5 447 kV/m, 而环氧树脂浸纸侧的电场为 1 357 kV/m。

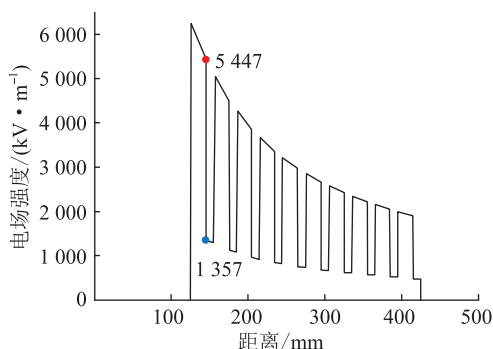


图 13 交直流复合电压下的电场径向分布

Fig.13 Radial distribution of electric field under AC-DC compound voltage

引入空间电荷的影响后,电场的径向分布情况如图 14 所示。在距离中心轴 0.145 m 处, SF₆ 气体侧的电场强度为 5 857 kV/m, 而环氧树脂浸纸侧的电场为 441 kV/m。

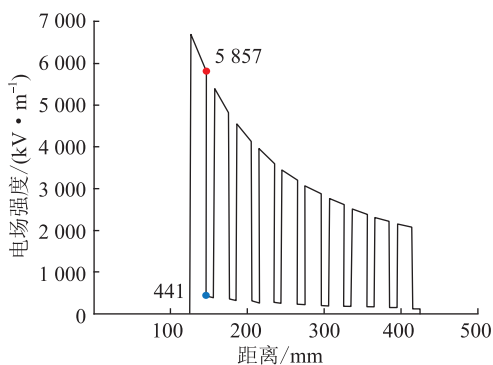


图 14 考虑空间电荷影响时交直流复合电压下的电场径向分布

Fig.14 Radial distribution of electric field under AC-DC compound voltage considering influence of space charge

考虑空间电荷对电场分布的影响后, SF₆ 气体侧的电场强度有所增加, 环氧树脂浸纸中的电场强度反而减小了。结合图 8, 空间电荷在环氧树脂浸纸绝缘层中会产生一个与外加电场反向的电场, 并且该电场与原外加电场没有数量级上的差距, 因此这里的空间电荷削弱了环氧树脂浸纸绝缘介质中的场强。

3 存在金属颗粒时不同类型电压下套管的电场分布特性

金属颗粒的产生原因有很多, 在设备的生产、安装、维护过程以及常年的运行中都会产生形状、大小不同的金属颗粒。金属颗粒的体积微小, 使得电场集中分布在其周围, 引发局部电场的严重畸变。基于金属颗粒的来源, 其大小和位置有很大的差异, 对于较大的金属颗粒试样, 尺寸在 10 mm 之内^[14,23]。研究中选用直径 2 mm, 高度 5 mm 的金属颗粒, 比较符合常见的金属颗粒尺寸。

直流电压下电场的方向不会改变, 金属颗粒在电场中更为活泼, 更容易被吸附、积聚于设备表面。此外, 在直流工况下设备的开关、电压的极性反转等过程均为暂态过程, 金属颗粒的运动、积聚和稳态时有很大的不同, 对设备的绝缘性能有很大影响。交流电压下电场的方向不断改变, 金属颗粒受到电场力的方向也在不断地变化, 在电极之间进行往复的运动, 几个周期之后才能够抵达另一电极。

将金属颗粒放置在换流变阀侧套管的 3D 模型中, 并对导电杆施加 500 kV 的直流电压。沿套管径向选取一条穿过金属颗粒的截线, 图 15 为该截线上的电场分布情况。

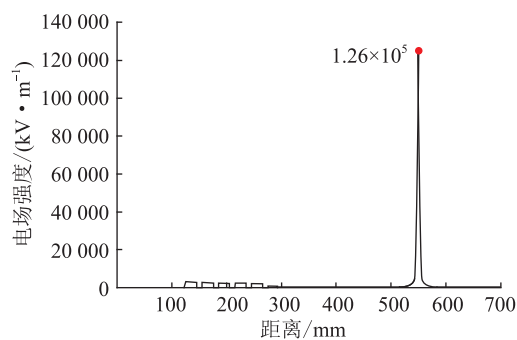


图 15 500 kV 直流电压下加入金属颗粒后电场径向分布

Fig.15 Radial distribution of electric field under 500 kV DC voltage after adding metal particle

金属颗粒的存在明显地改变了绝缘介质中局部电场的分布, 使其周围出现了 1.26×10^5 kV/m 的场强。

对导电杆施加有效值为 166.7 kV 的工频交流

电压,得到如图 16 所示的电场分布。对比直流电压下存在金属颗粒时的电场分布情况,由于交流与直流电压下电压分布的原理不同,交流电压下金属颗粒对电场分布的影响明显较小。

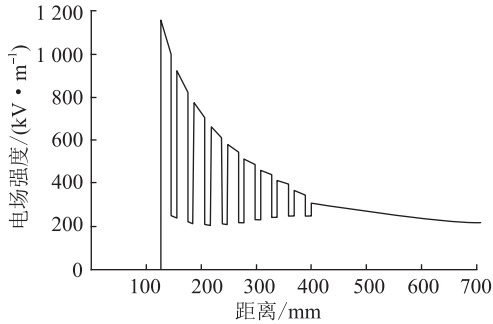


图 16 166.7 kV 工频交流电压下加入金属颗粒后套管电场径向分布

Fig.16 Radial distribution of electric field under 166.7 kV AC voltage after adding metal particle

对导电杆施加平均值为 500 kV 的直流电压和有效值为 166.7 kV 的工频交流电压组成的交直流复合电压,可以得到如图 17 所示的电场分布。

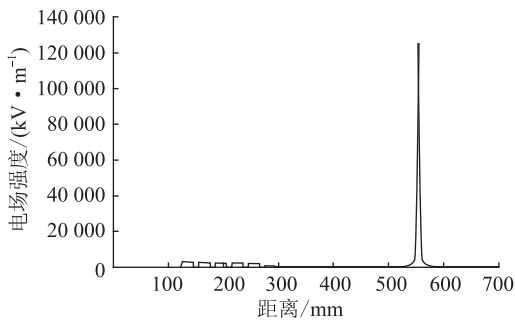


图 17 交直流复合电压下加入金属颗粒后套管电场径向分布

Fig.17 Radial distribution of electric field under AC-DC compound voltage after adding metal particle

相比于直流电压,交流电压下金属颗粒对电场分布的影响较小,因此在交直流复合电压下,存在金属颗粒时套管径向电场分布情况和直流电压下相比基本没有差别。

将金属颗粒由电容芯子的外侧移动至绝缘外套的内壁,统计金属颗粒所在位置与套管中电场强度最大值之间的关系,如图 18 所示。

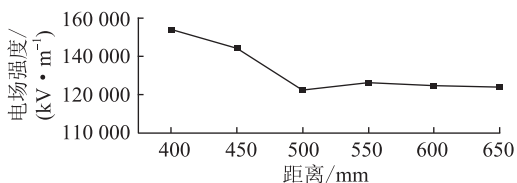


图 18 金属颗粒在不同位置时局部场强的最大值

Fig.18 The maximum value of local field strength of metal particles at different positions

金属颗粒悬浮在 SF₆ 气体中,气体中的电场强度基本没有变化,由于金属颗粒对局部电场的畸变程度取决于所在位置处电场强度的大小,此时金属颗粒周围电场强度的最大值与其位置关系不大。

在引入空间电荷之后,可以得到交直流复合电压下,金属颗粒悬浮在 SF₆ 气体中的套管内部电场分布情况。图 19 为截线上的电场分布情况。

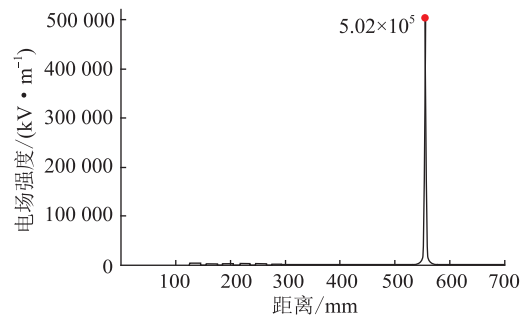


图 19 考虑空间电荷影响时交直流复合电压下的电场径向分布

Fig.19 Radial distribution of electric field under AC-DC compound voltage considering influence of space charge

和加入空间电荷前相比,径向电场幅值明显增加。在空间电荷的影响下,金属颗粒明显改变了绝缘介质中局部电场的分布,使其周围出现了 5.02×10^5 kV/m 的场强。因此,引入空间电荷会加剧金属颗粒对其周围电场畸变程度的影响。

4 结语

文中研究了考虑空间电荷影响时交直流复合电压下换流变压器阀侧套管的电场分布情况,并且分析了存在金属颗粒时套管的电场分布。文中对换流变阀侧套管建立有限元仿真模型,结果表明,交直流复合电压下空间电荷的积聚,能够引发套管内部局部电场的畸变。直流电压下金属颗粒的存在会使局部场强显著提高,而交流电压下其影响并不显著,此外,引入空间电荷会加剧金属颗粒对其周围电场畸变程度的影响。

文中对换流变压器阀侧套管的电场分布情况进行了研究,相关结论可以为电力设备故障诊断提供参考,对于改善设备绝缘性能、保障设备安全运行具有重要意义;同时,对进一步探究时域上空间电荷对换流变压器阀侧套管电场分布的动态影响,以及金属颗粒在电场作用下的迁移对电场分布的影响等方面能够起到指导性的作用。

参考文献:

- [1] 杜伯学,朱闻博,李进,等. 换流变压器阀侧套管油纸绝缘研究现状[J]. 电工技术学报,2019,34(6):1300-1309.

- DU Boxue, ZHU Wenbo, LI Jin, et al. Research status of oil-paper insulation for valve side bushing of converter transformer [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(6): 1300-1309.
- [2] 刘文里, 白仕光, 李祎春, 等. 高压直流换流变压器油纸绝缘线性与非线性电场分析[J]. 电机与控制学报, 2017, 21(9): 80-87.
- LIU Wenli, BAI Shiguang, LI Yichun, et al. Analysis of linear and nonlinear electric field of HVDC convert transformer oil-board insulation [J]. Electric Machines and Control, 2017, 21(9): 80-87.
- [3] 郑涛, 国兴超, 胡鑫, 等. 逆变侧换流变压器故障性涌流产生机理及其对差动保护的影响[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(9): 39-45.
- ZHENG Tao, GUO Xingchao, HU Xin, et al. Fault inrush current generation mechanism of inverter-side converter transformer and its influence on differential protection [J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(9): 39-45.
- [4] 廖瑞金, 邵山峰, 成立, 等. 特高压换流变压器油纸绝缘交直流击穿特性及选型[J]. 电网技术, 2018, 42(2): 387-392.
- LIAO Ruijin, SHAO Shanfeng, CHENG Li, et al. Breakdown characteristics of oil-paper insulation in UHVDC converter transformer under AC/DC voltage and its selection of oil and paper [J]. Power System Technology, 2018, 42(2): 387-392.
- [5] 程建伟, 赵林杰, 孙夏青, 等. 实际运行电压下特高压换流变压器阀侧套管电场分布研究[J]. 南方电网技术, 2017, 11(5): 1-8.
- CHENG Jianwei, ZHAO Linjie, SUN Xiaqing, et al. Research on electric field distribution of valve side bushing for UHV converter transformer under actual operating voltage [J]. Southern Power System Technology, 2017, 11(5): 1-8.
- [6] 林莘, 温苗, 沈文, 等. 复杂电场作用下换流变压器套管绝缘特性分析[J]. 高压电器, 2015, 51(4): 1-6.
- LIN Xin, WEN Miao, SHEN Wen, et al. Analysis on insulation property of converter transformer bushing under complex voltage [J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(4): 1-6.
- [7] 李琳, 纪锋, 李文平, 等. 换流变压器极性反转试验的数值模拟[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(18): 107-112.
- LI Lin, JI Feng, LI Wenping, et al. Numerical simulation of converter transformer's polarity reversal test [J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(18): 107-112.
- [8] 张书琦, 苑清, 齐波, 等. 交直流复合电压下油纸绝缘气隙放电模型油中溶解气体诊断[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2019, 46(3): 50-56, 65.
- ZHANG Shuqi, YUAN Qing, QI Bo, et al. Diagnosis of DGA for air-gap discharge model in oil paper insulation under AC-DC composite voltage [J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2019, 46(3): 50-56, 65.
- [9] 郝建, 黄博, George Chen, 等. 空间电荷在多层结构油纸绝缘混合体系的积聚规律及其对电场分布的影响[J]. 高电压技术, 2017, 43(6): 1973-1979.
- HAO Jian, HUANG Bo, CHEN G, et al. Space charge accumulation behavior of multilayer structure oil-paper insulation and its effect on electric field distribution [J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(6): 1973-1979.
- [10] 黄若栋, 邓云坤, 吴建东, 等. 交直流叠加电场下油浸绝缘纸的空间电荷特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(4): 1232-1238, 1300.
- HUANG Ruodong, DENG Yunkun, WU Jiandong, et al. Investigation of space charge behavior under AC-DC combined stress for oil-paper insulation [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(4): 1232-1238, 1300.
- [11] 齐波, 陈义龙, 李成榕, 等. 交直流复合非均匀电场下油纸绝缘界面电荷的特性[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(34): 241-249, 34.
- QI Bo, CHEN Yilong, LI Chengrong, et al. Characteristics of interface charge on oil-impregnated pressboard under non-uniform AC-DC combined electric field [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(34): 241-249, 34.
- [12] OKUBO H. HVDC electrical insulation performance in oil/pressboard composite insulation system based on Kerr electro-optic field measurement and electric field analysis [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2018, 25(5): 1785-1797.
- [13] 王旭, 王世强, 田杰, 等. 油老化状态对油纸绝缘直流电场下空间电荷特性的影响[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(22): 175-182, 26.
- WANG Da, WANG Shiqiang, TIAN Jie, et al. Effect of oil aging states on the space charge behavior in oil-paper insulation under DC electric field [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(22): 175-182, 26.
- [14] 王健, 李伯涛, 李庆民, 等. 直流 GIL 中线形金属微粒对柱式绝缘子表面电荷积聚的影响[J]. 电工技术学报, 2016, 31(15): 213-222.
- WANG Jian, LI Botao, LI Qingmin, et al. Impact of linear metal particle on surface charge accumulation of post insulator within DC GIL [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(15): 213-222.
- [15] 李庆民, 王健, 李伯涛, 等. GIS/GIL 中金属微粒污染问题研究进展[J]. 高电压技术, 2016, 42(3): 849-860.
- LI Qingmin, WANG Jian, LI Botao, et al. Review on metal particle contamination in GIS/GIL [J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(3): 849-860.
- [16] 王志远, 王健, 李庆民, 等. 直流 GIL 内金属微粒对表面电荷积聚影响的三维仿真及实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(24): 6718-6726, 6925.
- WANG Zhiyuan, WANG Jian, LI Qingmin, et al. 3D simulation and experimental study of metal particles' effect in DC GIL on surface charge accumulation [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(24): 6718-6726, 6925.
- [17] 许渊, 刘卫东, 陈维江, 等. 基于高灵敏测量的 GIS 绝缘子表面微金属颗粒局部放电特性[J]. 高电压技术, 2019, 45(9): 2707-2714.
- XU Yuan, LIU Weidong, CHEN Weijiang, et al. Partial dis-

- charge characteristics of metal particles on spacer surface in GIS based on high sensitivity measurement[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(9):2707-2714.
- [18] 季洪鑫,李成榕,庞志开,等. 电压波形对 GIS 自由金属颗粒放电特性的影响[J]. 电工技术学报, 2016, 31(13):218-226.
- Ji Hongxin, LI Chengrong, PANG Zhikai, et al. Influence of voltage waveforms on partial discharge characteristics of GIS mobilized metal particles[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(13):218-226.
- [19] 谭向宇,郭浩,张乔根,等. 直流下 GIS 内运动金属微粒的超声波特性及状态识别[J]. 高电压技术, 2010, 36(2):391-395.
- TAN Xiangyu, GUO Hao, ZHANG Qiaogen, et al. DC ultrasonic characteristics and states recognition of motion metallic particles in GIS[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(2):391-395.
- [20] IWABUCHI H, MATSUOKA S, KUMADA A, et al. Influence of tiny metal particles on charge accumulation phenomena of GIS model spacer in high-pressure SF₆ gas[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2013, 20(5):1895-1901.
- [21] 何宁辉,沙伟燕,李秀广,等. GIS 中自由金属颗粒缺陷局部放电严重程度评估[J]. 绝缘材料, 2019, 52(12):80-88.
- HE Ninghui, SHA Weiyang, LI Xiuguang, et al. Evaluation on partial discharge severity of free metal particles defects in GIS [J]. Insulating Materials, 2019, 52(12):80-88.
- [22] 李世琼,裴长生,王泽忠,等. 金属颗粒对 LW13-550 罐式断路器电场的影响分析[J]. 高压电器, 2011, 47(10):115-120.
- LI Shiqiong, PEI Changsheng, WANG Zezhong, et al. Influence of metallic particulates to 3D electric field of LW13-550 tank circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(10):115-120.
- [23] 史润军,王晓生,孙明道. 一种气体绝缘金属封闭开关设备放电异物分析数据库建立与应用[J]. 理化检验(物理分册), 2020, 56(3):14-16, 25.
- SHI Runjun, WANG Xiaosheng, SUN Mingdao. Establishment and application of a database for analysis of discharge foreign matters in gas insulated metal enclosed switchgear[J]. Physical Testing and Chemical Analysis (Part A:Physical Testing), 2020, 56(3):14-16, 25.

作者简介:



孟旋

孟旋(1995),男,博士在读,研究方向为电力设备故障检测与诊断(Email: mx123123@stu.xjtu.edu.cn);

郭若琛(1994),男,博士在读,研究方向为变压器油纸绝缘系统放电机理;

袁文泽(1996),男,硕士,研究方向为直流叠加冲击电压下的沿面放电。

Influence of space charge and metal particles on the electric field distribution of converter transformer is valve-side bushing

MENG Xuan, GUO Ruochen, YUAN Wenze, LI Junhao

(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The valve-side bushing of converter transformer bears AC-DC compound voltage, which has strict requirements on the performance and quality of the bushing. Under DC voltage, the accumulation of space charge at the interface of different medium causes the distortion of local electric field, and the existence of metal particles greatly increases the local electric field strength, both of which reduce the insulation performance of the bushing. In this paper, according to the structure of valve-side bushing of converter transformer, the simulation model of valve-side bushing is established by using finite element analysis software. The electric field distribution of the bushing under different types of voltage after adding space charge and the influence of metal particles on the local electric field are analyzed. The results show that the space charge at the dielectric interface is easier to accumulate under DC voltage, and the space charge is able to cause the distortion of the local electric field inside the bushing under AC-DC compound voltage. The degree of local electric field distortion of metal particles under DC voltage is greater than that under AC voltage, and the influence of metal particles on the degree of electric field distortion has little to do with its location in SF₆.

Keywords: AC-DC compound voltage; valve-side bushing; electric field distribution; space charge; metal particles; electric field distortion

(编辑 钱悦)