

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2024.12.010

特高压换流变压器阀侧套管缩比模型典型缺陷下 电场分布特性仿真研究

司文荣¹, 付晨钊¹, 苏磊¹, 贺林¹, 文豪²,
江毅², 高雨婷³, 李军浩³

(1. 国网上海市电力公司, 上海 200437; 2. 南瑞集团(国网电力科学研究院)有限公司, 南京 211000;
3. 西安交通大学电气学院, 西安 710049)

摘要: 换流变压器阀侧套管内部混入金属颗粒、电容芯体产生裂纹是目前常见的故障,研究套管在不同电压下的电场分布规律以及缺陷对电场分布的影响对于套管的优化设计及故障分析具有重要意义。文中以 ± 800 kV 特高压换流变压器套管为原型,建立了 ± 72.5 kV 环氧浸纸电容式套管仿真模型,计算套管在交流电压下的电位分布和电场分布,并研究了两种缺陷对于套管电场的影响。结果表明套管含金属颗粒或裂纹缺陷时,对于电场的畸变影响较大。研究结果为后续缩比套管模型不同缺陷局部放电试验的分析提供了基础,并为环氧浸纸电容式套管的优化设计提供参考。

关键词: 换流变压器阀侧套管; 电场; 有限元仿真; 缺陷分析

Research on Electric Field Distribution Characteristics Simulation Under Typical Defects in the Scaled Model of Valve Side Bushing of UHV Converter Transformer

SI Wenrong¹, FU Chenzhao¹, SU Lei¹, HE Lin¹, WEN Hao², JIANG Yi², GAO Yuting³, LI Junhao³

(1. State Grid Shanghai Municipal Electric Power Company, Shanghai 200437, China; 2. NARI Group Corporation/State Grid Electric Power Research Institute, Nanjing 211000, China; 3. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Metal particles mixed into the bushing on the valve side of the converter transformer and cracks in the capacitor core are common faults at present. The research on electric field distribution of the bushing under different voltages and the influence of defects on the electric field distribution are of great significance to the optimization design and failure analysis of the bushing. In this paper, the ± 800 kV UHV converter transformer bushing is taken as a prototype, a ± 72.5 kV epoxy-impregnated paper capacitive bushing simulation model is set up, the potential and electric field distribution of the bushing under AC and DC voltage is calculated, and the influence of two defects on the electric field is researched. The results show that the bushing, in case of containing metal particles or crack defects, has a greater influence on the distortion of the electric field. The research results not only provide a basis for the subsequent analysis of partial discharge tests of different defects in the scaled bushing model, but also provide a reference for the optimal design of epoxy-impregnated paper capacitive bushing.

Key words: valve side bushing of converter transformer; electric field; finite element simulation; defect analysis

收稿日期:2024-04-17; 修回日期:2024-06-20

基金项目:国家电网有限公司科技资助项目(特高压换流变压器阀侧套管特殊试验技术研究)。

Project Supported by State Grid Corporation of China Technology(Research on Special Test Technology of UHV Converter Transformer Valve Side Bushing).

0 引言

随着经济和制造业的发展,人们越来越依赖电能的供应,对供电的可靠性提出了更高的要求。而换流变压器阀侧套管是换流变压器的重要组成部分,其能否安全运行,直接影响到电网的供电可靠性^[1-3]。传统电力变压器套管在设计时仅需要考虑交流电压下的绝缘强度,而换流变压器阀侧套管除了要承受直流电压,还需要承受交流电压,因此在绝缘结构的设计和绝缘材料的选择上都更为严格^[4-5]。

张施令等人指出,高温会增加绝缘材料的电导率,但会降低绝缘材料的耐电场强度^[6-7]。杜清全等采用Ansys软件仿真分析了特高压换流变阀侧套管在极性反转下的电场分布情况^[8]。李乃一等通过Ansys软件仿真研究400 kV电容式油—SF₆套管电场分布,并在各种工况下对套管进行了电场仿真计算^[9-10]。何常新等人对1 100 kV直流套管进行研究,采用Infolytica有限元分析计算软件,确立套管周围电荷分布的计算模型,计算结果与测量结果基本一致^[11-12]。罗隆福等人研究了交流和直流下的电场分布情况,分析了套管的非线性电场^[13-14]。江汛等人采用Ansys分析软件对选用环氧树脂和高温硫化硅橡胶制造的复合套管进行了二维电场分析^[15]。

国内外学者对于正常运行时,套管内电场分布的计算已开展详尽的研究^[16-19]。然而换流变压器阀侧套管在生产制造过程中,由于加工工艺的限制,其环氧树脂浸纸有可能混入金属颗粒。而随着套管的使用,环氧树脂浸纸可能出现裂痕缺陷。金属颗粒与裂纹两种缺陷作用机理不同,对于套管电场的影响也有所不同。两种缺陷均可能造成电场的畸变,长期运行时将对套管稳定性产生威胁。两种缺陷对于套管电场影响的研究,现今国内外鲜有报道。因此文中在前人基础上,针对两种缺陷对于套管内部电场影响进行仿真与分析。

文中以 ± 800 kV及以上电压等级的特高压直流套管^[20-33]为原型,构建了 ± 72.5 kV的套管缩比仿真模型,确定了模型的几何缩尺比例及其他主要物理量的相似常数。针对后期缩比试验模型的实际加工制作可行性,同时考虑影响结构响应的主要因素,对结构体系中主次构件缩比进行了简化。选择合适的电场数值计算方法和仿真软件,分别进行两种缺陷下的电场仿真,研究其在直流、交流电压和叠加电压作用下的电场分布差异。文中仿真分析对后续缩比套管模型的局部放电研究起到了引导作用,并为其提供理论依据。

1 ± 72.5 kV 换流变压器阀侧套管的模型建立

1.1 换流变压器阀侧套管的二维轴对称模型

按照换流变压器阀侧套管结构设计和分析的惯用做法,若忽略由于空气净距要求带来的安装角度对其绝缘的影响,将套管的绝缘结构视为轴对称,因此仿真计算可采用二维轴对称模型进行分析。依据换流变压器阀侧套管外形结构尺寸及内部电容芯子、绝缘结构等参数,应用有限元分析软件建立阀侧套管二维轴对称模型,该模型包括导电杆、电容芯子、SF₆内绝缘等的换流变压器阀侧套管一体化电场仿真计算模型,见图1。

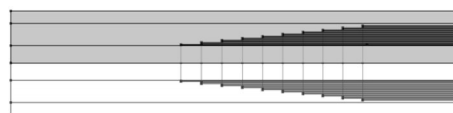


图1 二维轴对称模型

Fig. 1 Two-dimensional axisymmetric model

1.2 换流变压器阀侧套管的三维模型

换流变阀侧套管在分析不同电压下的电场规律时,稳态模型构建为二维轴对称模型。但是在分析缺陷造成影响时,由于金属颗粒与裂纹使模型不具有轴对称性,二维模型无法对其进行仿真,此时则应构建套管的三维模型。为保证二维模型与三维模型具有一致性,将图1二维轴对称模型沿中心轴旋转360°,得到三维套管模型见图2。



图2 三维模型

Fig. 2 Three-dimensional model

1.3 参数设置

文中采用的套管中各材料的电导率以及相对介电常数的参数设置见表1,套管的结构参数设置见表2。其不同峰值大小的直流电压、交流电压以及交直流复合电压施加于套管的中心导电杆上,电容芯子最外层的绝缘纸板设置为接地状态。

表1 换流变压器阀侧套管模型中各材质的物理参数

Table 1 Physical parameters of each material in the valve-side bushing model of converter transformer

材质	相对介电常数	电导率/(S·m ⁻¹)
铜	1.000×10 ⁵	6.0×10 ⁷
结构钢	1.000×10 ⁵	4.0×10 ⁶
环氧树脂浸纸	4.000	1.0×10 ⁻¹⁴
SF ₆	1.002	1.0×10 ⁻¹⁸
铝	1.000×10 ⁵	3.8×10 ⁷
硅橡胶	3.000	1.0×10 ⁻¹⁵

表2 换流变压器阀侧套管模型的结构参数

Table 2 Structural parameters of the valve-side bushing model of converter transformer

层数	极板长/mm	直径/mm	周长/mm	层厚/mm
10	335	94.4	296.4	1.8
9	404	90.8	285.1	1.8
8	473	87.2	273.8	1.8
7	542	83.6	262.5	1.8
6	612	80.0	251.2	1.8
5	682	76.4	239.9	1.8
4	752	72.8	228.6	1.8
3	823	69.2	217.3	1.8
2	894	65.6	206.0	1.8
1	965	62.0	194.7	1.0
导管	—	60.0	188.4	—

2 ±72.5 kV 换流变压器阀侧套管的电场分布特性

2.1 分界面处电荷的积聚

在介质的分界面上,由于两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,空间电荷在介质分界面容易积聚,对套管内部电场分布产生影响。当套管处于稳态的直流电场中时,内部电场方向不变,电场的极性也不会发生变化。在这种情况下电荷容易形成集聚,对电场产生影响。而套管在工频交流电场中时,内部电场有时变性,电场的极性随时变化,空间电荷随着电场极性的变化在电场内部做往复运动,无法形成集聚,所以不能对电场产生影响。故只研究空间电荷在直流电压与交直流电压下对电场分布的影响。

当对导电杆施加 10 kV 直流稳态电压时,套管内会聚集一定数量的空间电荷。将各介质表面电荷密度单独添加到模型中,不考虑外加电压的作用时,得到只考虑空间电荷时所产生的电场分布情况,见图3。

从图3中能够看到,空间电荷的存在能够在绝缘介质中产生很大的场强,在仿真研究中不可忽视。在计算直流及交直流情况下套管内部电场分布时,需分别计算各工况对应介质表面电荷密度及其产生电场分布,并将空间电荷产生电场与外施电压产生电场相叠加。从图3中还能够看到,空间电荷的存在能够在绝缘介质中产生很大的场强,在仿真研究中不可忽视。

在计算直流及交直流情况下套管内部电场分布时,需分别计算各工况对应介质表面电荷密度及

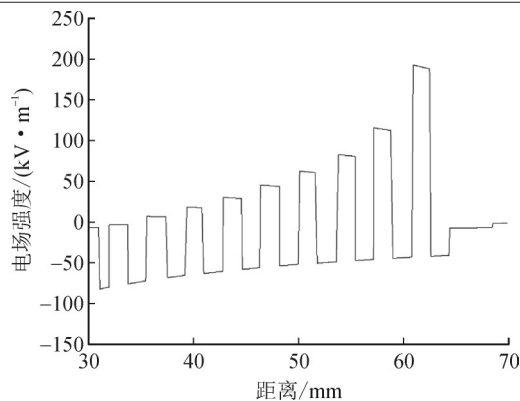


图3 介质表面空间电荷产生的电场分布

Fig. 3 Electric field distribution generated by space charge on the surface of the medium

其产生电场分布,并将空间电荷产生电场与外施电压产生电场相叠加。

2.2 套管无缺陷时不同类型电压下套管的电场分布

2.2.1 直流电压下换流变压器阀侧套管的电场分布

将 10 kV 直流电压施加于中心导电杆,经求解计算后,考虑分界面处电荷影响时,套管电位分布见图4,套管电场分布见图5。

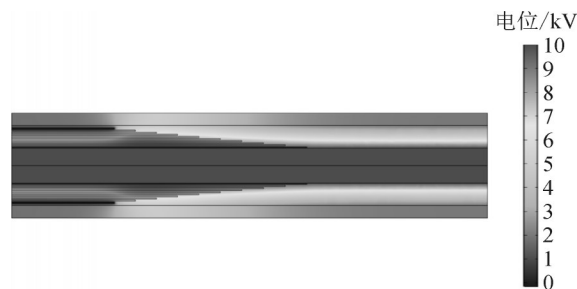


图4 直流电压下阀侧套管电位分布图

Fig. 4 Potential distribution diagram of valve side bushing under DC voltage



图5 直流电压下阀侧套管电场分布图

Fig. 5 Electric field distribution diagram of valve side bushing under DC voltage

从图4中可以看出,单独施加直流电压时,电位从中心导电杆至外壳沿径向减小,而同一绝缘层沿轴向电位基本相同。在阀侧套管径向方向上选取截线,单独施加直流电压时,截线上的电位分布及电场分布见图6。

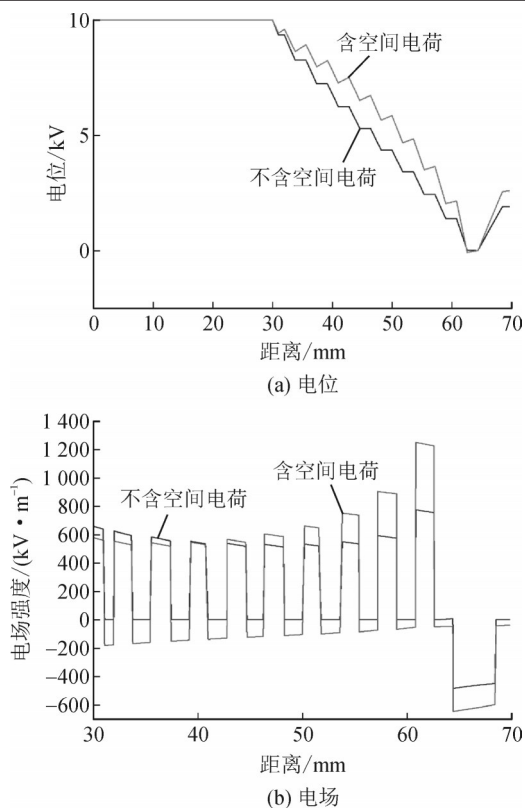


图6 直流电压下套管的径向电位及电场分布图

Fig. 6 Radial potential distribution and electric field distribution diagram of bushing under DC voltage

不考虑分界面处电荷影响时, SF_6 气体侧承受的电压远大于绝缘层所承受的电压, 在距中心轴 0.31 m 处, SF_6 气体侧场强为 638.85 kV/m, 而绝缘纸侧的场强为 0.108 kV/m。这是因为在高压直流电压下, 电场分布取决于绝缘介质的电阻率。该仿真研究中, SF_6 气体的电导率为 10^{-18} S/m, 而环氧树脂浸纸的电导率为 10^{-14} S/m, 相差 10^4 倍, 两种介质中场强之比与其电阻率之比数量级基本吻合。考虑分界面处电荷影响时, 在距中心轴 0.31 m 处, SF_6 气体侧场强为 559.87 kV/m, 而绝缘纸侧的场强为 -182.04 kV/m。两种介质中电场强度差值变化不大, 但空间电荷对电场具有明显的畸变效果。

2.2.2 交流电压下换流变压器阀侧套管的电场分布

将 10 kV 的基频交流电压施加于中心导电杆, 采用静电场进行求解, 无需施加分界面处电荷电场, 得出套管电位分布见图 7, 套管电场分布见图 8。

与在导电杆上施加直流电压类似, 阀侧套管电容心子和 SF_6 气体中电位从中心导电杆至外壳沿径向减小, 而同一绝缘层沿轴向电位基本相同。采用单独施加直流时设置的截线, 单独施加基频交流电压时, 截线上的电位分布及电场分布见图 9。

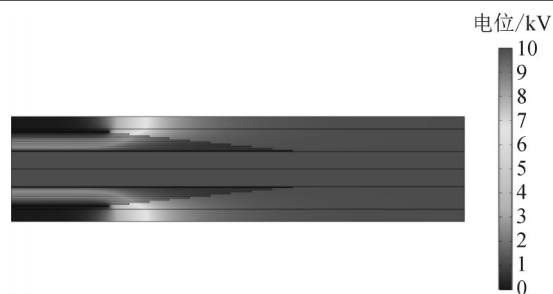


图7 交流电压下阀侧套管电位分布图

Fig. 7 Potential distribution diagram of the valve side bushing under AC voltage



图8 交流电压下阀侧套管电场分布图

Fig. 8 Electric field distribution diagram of valve side bushing under AC voltage

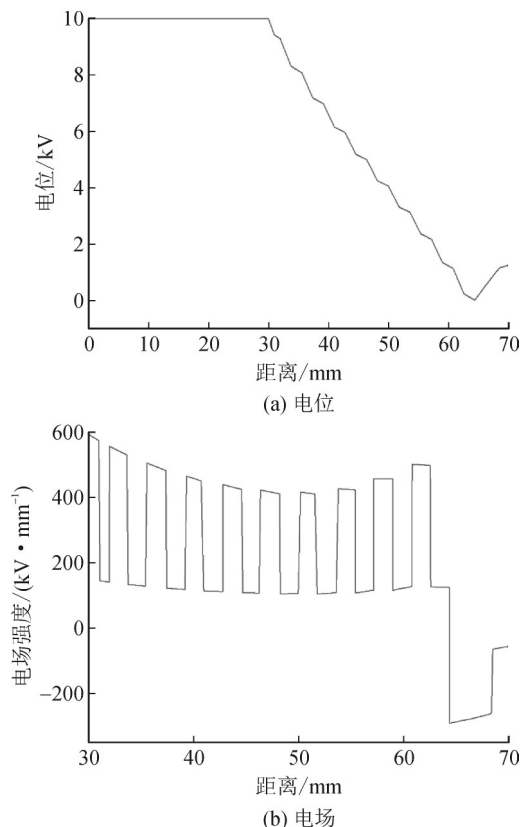


图9 交流电压下套管的径向电位及电场分布图

Fig. 9 Radial potential distribution and electric field distribution diagram of the bushing under AC voltage

在交流电压下套管的径向电场分布相比较对模型施加直流电压时的电场分布情况, 此时 SF_6 气体承受的电压较低, 而环氧树脂浸纸绝缘层所承受

的电压比较高。在距离中心轴0.31 m处, SF_6 气体侧的电场强度为 573.16 kV/m, 而环氧树脂浸纸侧的电场 143.05 kV/m。这是因为在工频交流电压下, 电场分布取决于绝缘介质的介电常数, 在该仿真研究中, SF_6 气体的相对介电常数设置为 1.002, 而环氧树脂浸纸的相对介电常数为 4, 相差 4 倍。由电场分布图可以看出两种介质中的电场强度之比与它们的相对介电常数之比较为吻合。

2.2.3 交直流复合电压下换流变压器阀侧套管的电场分布

在导电杆上施加 10 kV 直流电压和 10 kV 基频交流电压组成的复合电压, 经过计算求解后, 可以得到套管电位分布见图 10, 电场分布见图 11。

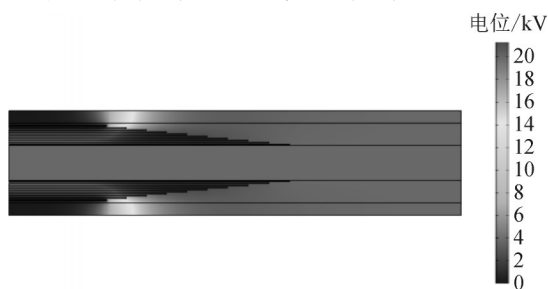


图 10 交直流电压下阀侧套管电位分布图

Fig. 10 Potential distribution diagram of the valve side bushing under AC and DC voltage



图 11 交直流电压下阀侧套管电场分布图

Fig. 11 Electric field distribution diagram of valve side bushing under AC and DC voltage

由图 10 可以看出阀侧套管电容心子和 SF_6 气体中的电位沿径向逐渐减小, 同一绝缘层沿轴向的电位基本相同, 套管两端的电位明显高于套管中间部分的电位。

施加交直流复合电压时, 得到所选取截线上电位径向分布的情况, 其电位和电场径向分布的情况见图 12。

不考虑分界面处电荷影响时, SF_6 气体侧承受的电压远大于绝缘层所承受的电压, 在距中心轴 0.31 m 处, SF_6 气体侧场强为 1 152.0 kV/m, 而绝缘纸侧的场强为 287.53 kV/m。考虑分界面处电荷影响时, 在距中心轴 0.31 m 处, SF_6 气体侧场强为 488.01 kV/m, 而绝缘纸侧的场强为 -39.022 kV/m。空间电荷对电

场具有明显的畸变效果。

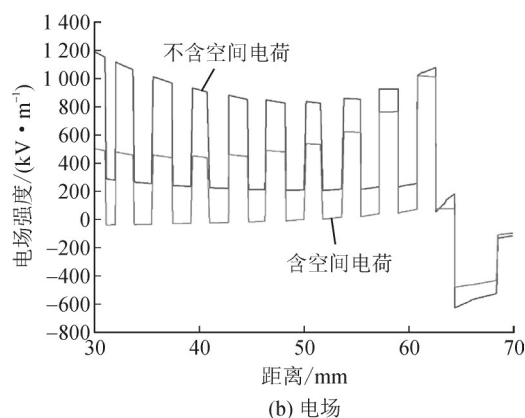
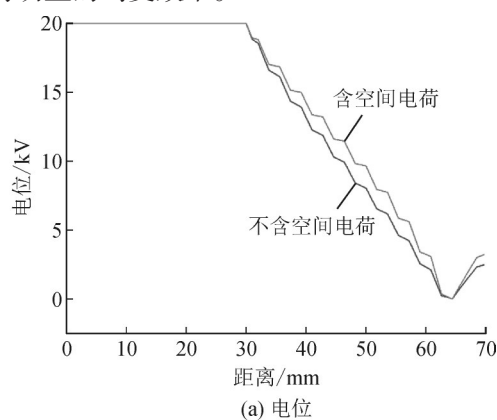


图 12 交直流电压下套管的径向电位及电场分布

Fig. 12 Radial potential distribution and electric field distribution of bushing under AC and DC voltage

2.3 存在金属颗粒时不同类型电压下套管的电场分布特性

2.3.1 金属颗粒模型

将金属颗粒添加到三维模型中, 研究存在于 SF_6 气体中的金属颗粒对套管电场强度的影响, 分析存在金属颗粒时不同类型电压下套管的电场分布特性, 因为金属颗粒较小, 将套管内部模型放大, 金属颗粒的放置位置以及放大后的模型见图 13。

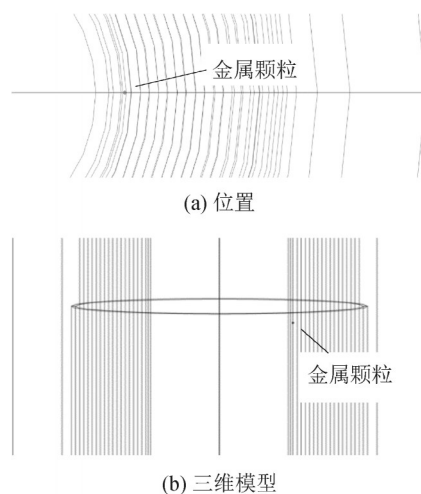


图 13 金属颗粒位置及三维模型

Fig. 13 Metal particle position and 3D model

2.3.2 直流电压下金属颗粒对套管电场分布的影响

对含金属颗粒套管的导电杆施加 10 kV 直流电压,可以看到金属颗粒所引起的附近电场畸变,见图 14,选取一条穿过金属颗粒并沿套管径向方向的截线,截线上绝缘介质中电场分布的情况见图 15。

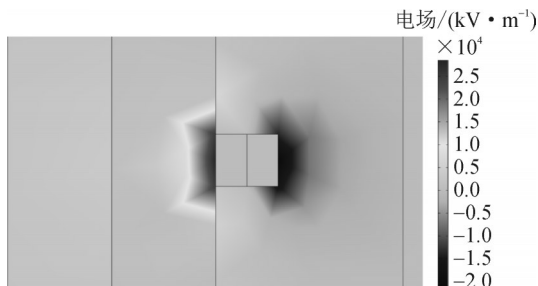


图 14 金属颗粒周围的电场强度

Fig. 14 Electric field strength around metal particles

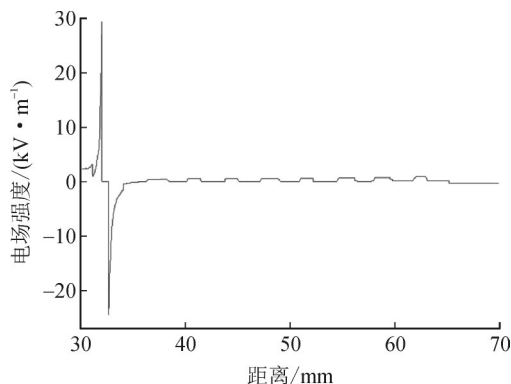


图 15 直流电压下加入金属颗粒后套管电场径向分布

Fig. 15 Radial distribution of electric field in casing after adding metal particles under DC voltage

从图 15 可以看出,金属颗粒的混入明显畸变了绝缘介质中的局部电场,金属颗粒的混入使绝缘介质周围出现了大小为 29 267.22 kV/m 的电场强度。

2.3.3 交流电压下金属颗粒对套管电场分布的影响

将金属颗粒放置在换流变阀侧套管模型中,并对导电杆施加 31.5 kV 基频交流电压,得到的交流电压下套管的径向电场分布见图 16。

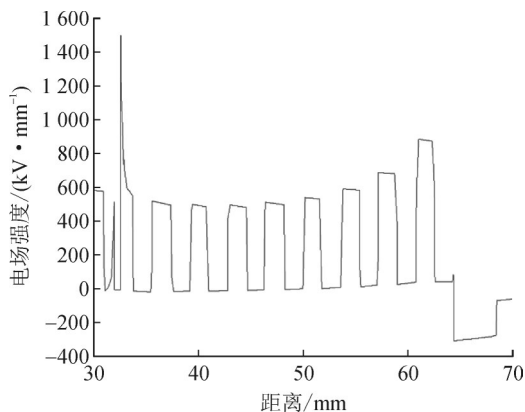


图 16 交流电压下加入金属颗粒后套管电场径向分布

Fig. 16 Radial distribution of electric field in casing after adding metal particles under AC voltage

对比混入金属颗粒在直流电压下的电场分布,看到在交流电压下较于直流电压,金属颗粒对电场分布的影响小,但也改变了绝缘介质中局部电场。金属颗粒的加入使其周围出现了 1 499.65 kV/m 的电场强度。

2.3.4 交直流电压下金属颗粒对套管电场分布的影响

将金属颗粒放置在换流变阀侧套管模型中,并对导电杆施加 31.5 kV 直流电压和 31.5 kV 基频交流电压组成的复合电压,得到的交直流电压下套管的径向电场分布见图 17。

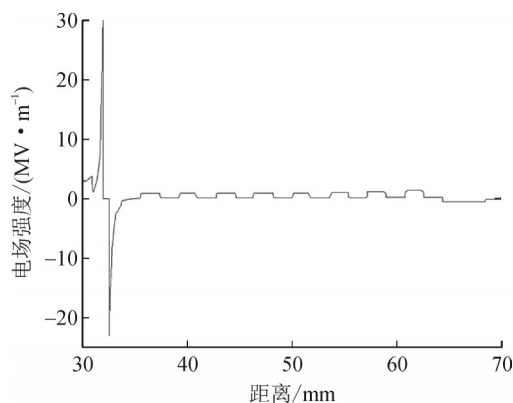


图 17 交直流电压下加含金属颗粒套管电场径向分布

Fig. 17 Radial distribution of electric field in a bushing containing metal particles under AC and DC voltage

从图 17 可以看出,在施加交直流电压的情况下,金属颗粒的混入使其周围出现了 29 939.12 kV/m 的电场强度。

2.4 存在裂纹时不同类型电压下套管的电场分布特性

2.4.1 裂纹模型

沿着电容芯体内部表面放置一个长方体,沿着电容芯体内壁回旋 365°,再在其内部充入 SF₆,以此来模拟套管的裂纹。裂纹模型放置位置以及模型内部见图 18。

2.4.2 直流电压下裂纹对套管电场分布的影响

将裂纹放置在换流变阀侧套管模型中,并对导电杆施加 10 kV 直流稳态电压,可看到由裂纹所引起的附近电场畸变,见图 19,因选取穿过所设置裂纹处且沿套管径向方向的截线方向处的电场强度变化不明显,故选取一条穿过所设置裂纹处且沿电容心子轴向方向的截线,得到的直流电压下电容心子的径向电场分布见图 20。

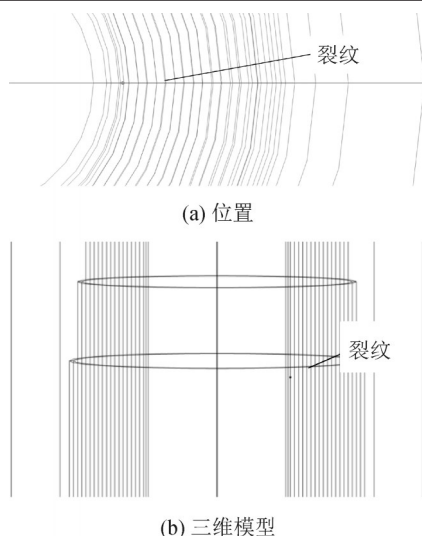


图 18 裂纹位置及三维模型

Fig. 18 The location of the cleavage and the three-dimensional model

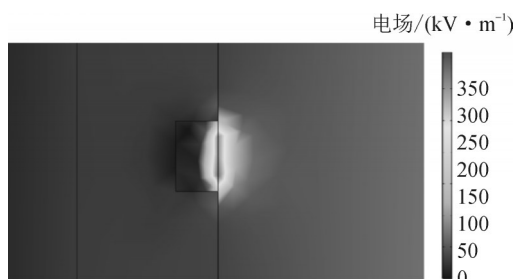


图 19 裂纹周围的电场强度

Fig. 19 Electric field strength around the rift

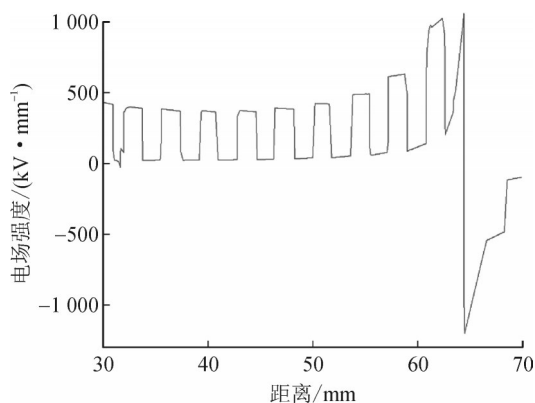


图 20 直流电压下加入裂纹后电容心子径向电场分布

Fig. 20 Radial electric field distribution of capacitor core after adding ripple under DC voltage

从图 20 可以看出,在直流电压下,裂纹的存在改变了绝缘介质中局部电场的分布,对电容心子轴向的电场产生影响,使径向电场产生畸变。加入裂纹后,该处电场强度改变了约 132.51 kV/m。

2.4.3 交流电压下裂纹对套管电场分布的影响

将裂纹放置在换流变阀侧套管模型中,并对导电杆施加 10 kV 基频交流电压,得到交流电压下电容心子的轴向电场分布见图 21。

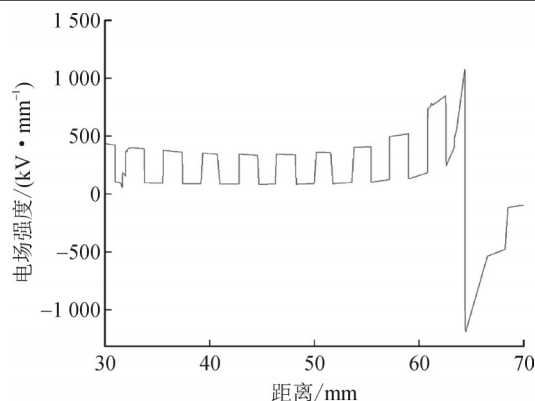


图 21 交流电压下加入裂纹后电容心子径向电场分布

Fig. 21 Radial electric field distribution of capacitor core after adding ripple under AC voltage

从图 21 可以看出,在交流电压下,裂纹的存在使该处电场强度改变了约 132.48 kV/m。

2.4.4 交直流电压下裂纹对套管电场分布的影响

将裂纹放置在换流变阀侧套管模型中,并对导电杆施加 10 kV 直流与 10 kV 工频交流电压,得到的交直流电压下电容心子的轴向电场分布见图 22。

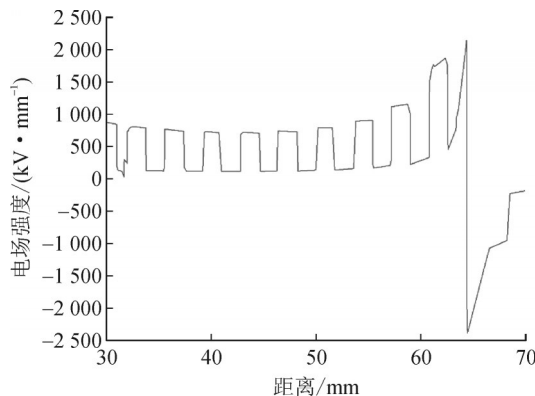


图 22 交直流电压下含裂纹电容心子径向电场分布

Fig. 22 Radial electric field distribution of cracked capacitor core under AC and DC voltage

从图 22 看出,在交直流电压下,裂纹的存在使该处电场强度改变了约 265.05 kV/m。

2.5 外施电压大小对电场分布的影响

通过在金属导电杆上施加交直流电压,对套管内部存在金属颗粒以及存在裂纹等缺陷条件下,套管内电场强度的分布及峰值进行研究。按照电压值,针对两种故障类型依次进行仿真结果见表 3。每组仿真应控制交直流电压叠加后峰值不变,分别选择 1:1、1:3、1:5 的交直比,计算单独施加直流、单独施加交流以及施加交直流电压时的电场分布。

按照表 3 电压配比进行仿真,得到如下结论。

套管内部含金属颗粒时,直流分量对于套管内电场强度影响显著。单独施加直流电压时,套管内电场在金属颗粒处畸变极其严重。单施加工频交

表3 电场计算电压值

Table 3 Electric field calculation voltage value

交直流叠加后的 电压幅值/kV	电场计算电压值/kV					
	交流1:1		交流1:3		交流1:5	
	直流	直流	直流	直流	直流	直流
0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10	5.0	5.0	2.5	7.5	—	—
20	10.0	10.0	5.0	15.0	—	—
30	15.0	15.0	7.5	22.5	5.0	25.0
44	22.0	22.0	11.0	33.0	7.3	36.7
50	25.0	25.0	12.5	37.5	8.3	41.7
62	31.0	31.0	15.5	46.5	10.3	51.7
70	35.0	35.0	—	—	—	—
80	40.0	40.0	—	—	—	—
90	45.0	45.0	—	—	—	—

流电压时,电场强度沿径向呈阶梯状波动上升,畸变小于单独施加直流。叠加交直流电压后,电场强度波形与单独施加直流电压时类似,场强畸变约为二者增量之和。

套管内部含裂纹时,交直流叠加后,套管内裂纹处径向电场强度较无缺陷时有明显畸变,裂纹处径向电场强度较无裂纹时有所降低。单独施加直流电压与工频交流电压对电场畸变影响程度基本相同,交直比对于电场强度影响不大。叠加交直流电压后,缺陷处电场强度变化量随交直流叠加峰值之和增大而增大。

将交直流叠加后套管内部电场强度峰值与施加交直流峰值进行分析,含金属颗粒时其关系图见图23,含裂纹时其关系图见图24。由图23可得,套管内部含金属颗粒时,交直流电压峰值与套管内部电场强度峰值呈线性关系,且直流分量越大,斜率越大。相同电压峰值下,直流分量占比越大,套管内部电场强度峰值越大。由图24可得,套管内部含金属颗粒时,交直流电压峰值与套管内部电场强度关系与金属颗粒缺陷相似。交直流电压峰值与套管内部电场强度峰值呈线性关系,斜率与交直比基本无关。含金属颗粒电场强度畸变程度大于含裂纹缺陷。

3 结论

文中使用有限元仿真软件,以 ± 72.5 kV 环氧浸纸电容式套管为研究对象,建立套管周围电场分布的计算模型,对换流变压器阀侧套管的电场分布情况进行了研究。其相关结论对于电力设备故障诊断可以提供一些参考,对于改善设备绝缘性能、保

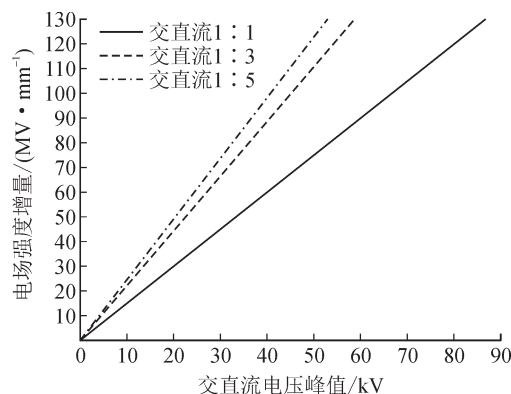


图23 含金属颗粒时交直流电压峰值与电场强度峰值关系图

Fig. 23 The relationship between the peak value of AC and DC voltage and the peak value of electric field intensity when metal particles are contained

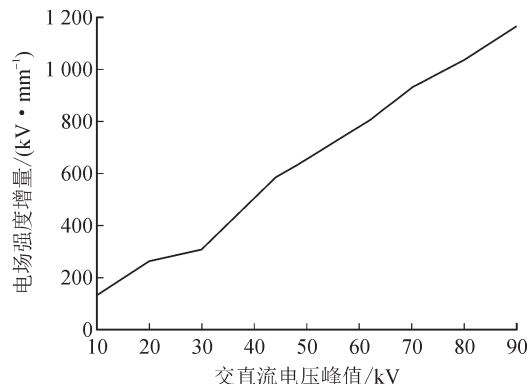


图24 含裂纹时交直流电压峰值与电场强度峰值关系图

Fig. 24 The relationship between the peak value of AC and DC voltage and the peak value of electric field strength with cracks

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或裂纹对电场分布的影响等方面能够起到指导性的作用。经仿真计算可以得到如下结论:

1)通过对比计算结果,可知高压直流电压下,电场分布取决于绝缘介质的电阻率。不考虑分界面处电荷时,单独施加直流,SF₆与环氧树脂浸纸绝缘层中场强之比与其电阻率之比数量级基本吻合。交流电压下,电场分布取决于绝缘介质的介电常数,两种介质中的电场强度之比与其相对介电常数之比较为吻合。

2)当施加直流与交直流电压时,需同时考虑外加电压和空间电荷的影响。分界面处空间电荷的积聚使SF₆气体侧的电场强度增加,而环氧树脂浸纸侧出现了一个反向的电场,且该反向电场场强较强,对电场具有明显的畸变效果。单独施加交流电压时,则无需考虑分界面处空间电荷的积聚。

3)管内部含金属颗粒时,直流分量对于套管内电场强度影响显著。套管内部含裂纹时,缺陷处电场强度有显著提升,并随交直流叠加峰值之和增大而增大。单独施加直流电压时与工频交流电压时对电场畸变影响程度基本相同,交直比对于电场强度影响不大。相同条件下裂纹缺陷电场强度峰值大于含金属颗粒缺陷。

综上所述, ± 72.5 kV 换流变压器阀侧套管含金属颗粒或裂纹缺陷时,对于电场的畸变影响较大。在套管实际运行过程中,应注意由金属颗粒或裂纹缺陷引起的电场畸变导致套管发生故障。

参考文献:

- [1] 丛玉岷. 特高压直流套管的电场分布研究[D]. 济南:山东大学, 2011.
CONG Yudi. Research on electric field distribution of UHV DC bushing[D]. Jinan: Shandong University, 2011.
- [2] 岳丽霖, 连美霞. ± 800 kV 奉贤换流站的结构与功能特点[J]. 电气技术, 2011(12): 113-115.
YUE Lilin, LIAN Meixia. Structural and functional characteristics of ± 800 kV Fengxian converter station[J]. Electrical Engineering, 2011(12): 113-115.
- [3] 吴田, 王兴宇, 何光华, 等. 带电作业人员侵入 110 kV 电缆终端塔间隙方式对套管及应力锥电场分布的影响研究[J]. 电瓷避雷器, 2022(2): 73-80.
WU Tian, WANG Xingyu, HE Guanghua, et al. Influence of live workers intrusion into gap of 110 kV cable terminal tower on the distribution of electric field of bushing and stress cone[J]. Insulators and Surge Arresters, 2022(2): 73-80.
- [4] 陈锡磊, 周浩, 王东举, 等. ± 1100 kV 特高压直流换流站绝缘配合关键问题研究[J]. 高电压技术, 2013, 39(12): 3015-3021.
CHEN Xilei, ZHOU Hao, WANG Dongju, et al. Research on key issues of insulation coordination for ± 1100 kV UHVDC converter station[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(12): 3015-3021.
- [5] 邹阳, 林锦茹, 李安娜, 等. 基于灰色关联分析和聚类云模型的变压器油纸绝缘状态评估[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(21): 35-43.
ZOU Yang, LIN Jinjia, LI Anna, et al. Evaluation of transformer oil - paper insulation status based on grey relational analysis and a cluster cloud model[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(21): 35-43.
- [6] 张施令, 彭宗仁, 刘鹏, 等. 电热耦合模型应用于干式油气管径向温度分布计算及其试验研究[J]. 电网技术, 2012, 36(12): 289-296.
ZHANG Shiling, PENG Zongren, LIU Peng, et al. Experimental study on electro-thermal coupling model applied in computation of radial temperature distribution of RIP oil-gas bushing condenser[J]. Power System Technology, 2012, 36(12): 289-296.
- [7] 黄梦辉, 蒋涛, 董建军, 等. 基于 LSTM 的箱式变压器高压套管温度预测[J]. 电测与仪表, 2023, 60(10): 171-176.
HUANG Menghui, JIANG Tao, DONG Jianjun, et al. Temperature prediction of box-type transformer high-voltage bushing based on LSTM[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(10): 171-176.
- [8] 杜清全, 蔡钢, 黄晓峰, 等. 极性反转下特高压换流变阀侧套管电场分析[J]. 电瓷避雷器, 2013(3): 14-19.
DU Qingquan, CAI Gang, HUANG Xiaofeng, et al. Electric field distribution of bushing on the HVDC converter transformer's valve side during polarity reversal test[J]. Insulators and Surge Arresters, 2013(3): 14-19.
- [9] 李乃一, 王明胜, 杨仁毅. 400 kV 换流变压器阀侧套管内绝缘计算[J]. 变压器, 2015, 52(1): 24-28.
LI Naiyi, WANG Mingsheng, YANG Renyi. Internal insulation calculation of 400 kV converter transformer valve side bushing[J]. Transformer, 2015, 52(1): 24-28.
- [10] 董明, 刘阳, 杨凯歌, 等. 基于故障树理论的电容型套管故障模拟与辨识[J]. 电网与清洁能源, 2022, 38(6): 1-9.
DONG Ming, LIU Yang, YANG Kaige, et al. Fault simulation and identification of the capacitive bushing based on fault tree theory[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(6): 1-9.
- [11] 何常新. 换流变压器阀侧套管的电场分布及绝缘特性研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2015.
HE Changxin. Electric field distribution and research on the insulation properties about valve side bushing of converter transformer[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015.
- [12] 刘庆珍, 张溢, 鄢仁武. 基于拉曼光谱数据处理和谱峰识别的变压器油绝缘老化研究[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(8): 158-166.
LIU Qingzhen, ZHANG Yi, YAN Renwu. Transformer oil insulation aging based on Raman spectral data processing and peak identification[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(8): 158-166.
- [13] 罗隆福, 李建州, 孙红梅. 高压直流穿墙套管非线性电场的求解[J]. 高电压技术, 2002, 28(5): 3-4.
LUO Longfu, LI Jianzhou, SUN Hongmei. Solution to nonlinear electric field of HVDC wall bushing[J]. High Voltage Engineering, 2002, 28(5): 3-4.
- [14] 柴影辉, 钟建英, 张进, 等. 柔性直流工程用气体绝缘穿墙套管设计[J]. 电瓷避雷器, 2023(3): 189-196.
CHAI Yinghui, ZHONG Jianying, ZHANG Jin, et al. Design of SF₆ gas insulated wall bushing for VSC-HVDC[J].

- Insulators and Surge Arresters, 2023(3): 189-198.
- [15] 江 汛,王仲奕. 复合高压套管的电场计算和分析[J]. 高压技术, 2004, 30(3): 17-18.
JIANG Xun, WANG Zhongyi. Calculation and analysis for the electric field of composite high voltage bushing[J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(3): 17-18.
- [16] 王 乾. 特高压换流变压器阀侧套管电热场分布特性与优化方法研究[D]. 天津: 天津大学, 2020.
WANG Qian. Electrothermal field distribution and optimization for a UHV converter transformer valve side bushing [D]. Tianjin: Tianjin University, 2020.
- [17] 邓 江. 干式SF₆气体绝缘特高压直流套管的电热场分布特性及内绝缘结构优化设计研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2020.
DENG Jiang. Study on electric temperature field distribution characteristics and optimal design of internal insulation structure in dry-type SF₆ gas insulated UHVDC bushing [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2020.
- [18] 彭 松. 特高压换流变压器阀侧套管电热场分布特性研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2017.
PENG Song. Study on electrical field and temperature distribution characteristics in valve side bushing of converter transformer[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017.
- [19] 李世泽, 张 云, 张 亮, 等. 500 kV 变压器中压套管故障分析[J]. 变压器, 2023, 60(11): 59-63.
LI Shize, ZHANG Yun, ZHANG Liang, et al. Fault analysis of medium pressure bushing of 500 kV transformer after moisture[J]. Transformer, 2023, 60(11): 59-63.
- [20] 邵先军, 陈孝信, 詹江杨, 等. 基于多源状态参量融合的油纸绝缘套管缺陷预警方法研究[J]. 电网与清洁能源, 2022, 38(12): 1-7.
SHAO Xianjun, CHEN Xiaoxin, ZHAN Jiangyang, et al. Research on the defects early warning method of oil-paper bushing based on multi-source state parameter fusion[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(12): 1-7.
- [21] 韩晓东, 翟亚东. 高压直流输电用换流变压器[J]. 高压电器, 2002, 38(3): 5-6.
HAN Xiaodong, ZHAI Yadong. Converter transformer used for HVDC transmission[J]. High Voltage Apparatus, 2002, 38(3): 5-6.
- [22] 王云峰, 陈 博, 李谭煜. 一起套管缺陷导致变压器突发故障浅析[J]. 变压器, 2023, 60(2): 72-73.
WANG Yunfeng, CHEN Bo, LI Tanyu. Analysis of a transformer sudden fault caused by bushing defect[J]. Transformer, 2023, 60(2): 72-73.
- [23] 曹燕明, 乐 波. 考虑温度和频率因素的换流变绝缘材料介损特性研究[J]. 变压器, 2023, 60(12): 58-62.
CAO Yanming, YUE Bo. Study on dielectric loss characteristics of insulation material of converter transformer considering temperature and frequency[J]. Transformer, 2023, 60(12): 58-62.
- [24] TAKAHASHI E, SHIRASAKA Y, OKUYAMA K. Analysis of anisotropic nonlinear electric field with a discussion of dielectric tests for converter transformers and smoothing reactors[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1994, 9(3): 1480-1486.
- [25] RADAKOVIC Z, CARDILLO E, SCHAEFER M, et al. Design of the winding-bushing interconnections in large power transformers[J]. Electrical Engineering, 2006, 88(3): 183-190.
- [26] 张施令, 彭宗仁, 宁 鑫, 等. ± 400 kV 换流变压器阀侧套管绝缘结构设计[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(6): 199-206.
ZHANG Shiling, PENG Zongren, NING Xin, et al. Insulation structure design of valve side bushing of ± 400 kV converter transformer[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(6): 199-206.
- [27] 郑含博, 敬佳兴, 罗晓庆, 等. 基于多源融合的油纸绝缘套管缺陷辨识及绝缘状态评估[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(20): 119-128.
ZHENG Hanbo, JING Jiaxing, LUO Xiaoqing, et al. Defect identification and insulation condition assessment of an oil-immersed paper insulation bushing based on multi-source fusion[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(20): 119-128.
- [28] 陕华平, 吴天博, 陈晓东. 换流变压器网侧 550 kV 环氧树脂浸纸套管绝缘结构与校核[J]. 电瓷避雷器, 2023(4): 165-172.
SHAN Huaping, WU Tianbo, CHEN Xiaodong. Insulation structure design and check of 550 kV epoxy resin impregnated paper bushing at grid side of converter transformer[J]. Insulators and Surge Arresters, 2023(4): 165-172.
- [29] JYOTHI N S, RAMU T S. A model for the temperature distribution in resin impregnated paper bushings[C]//Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference. Shanghai, China: IEEE, 2012: 1-4.
- [30] 孔晓晓. 特高压换流变阀侧套管复合绝缘改性及电场调控方法研究[D]. 天津: 天津大学, 2020.
KONG Xiaoxiao. Electric field distribution and regulation methods of valve-side bushing insulation for a converter transformer[D]. Tianjin: Tianjin University, 2020.
- [31] JYOTHI N S, RAMU T S. Statistical methods for accelerated life testing with particular reference to resin impregnated paper bushings[C]//Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference. Shanghai, China: IEEE, 2012: 1-4.
- [32] ZHANG Shibao. Evaluation of thermal transient and overload capability of high-voltage bushings with ATP[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24(3): 1295-1301.
- 司文荣(1981—), 男, 正高级工程师, 长期从事输变电设备运维支撑技术及科创工作(E-mail: siwenrong@126.edu.cn)。