
油路隔离型变压器用套管的设计与验证研究

罗 宇¹, 王 翰¹, 吴细秀¹, 冯 宇², 杜 砚², 孟培培¹

(1. 武汉理工大学自动化学院, 武汉 430070; 2. 中国电力科学研究院有限公司, 武汉 430074)

摘要: 针对变压器套管故障后检修周期长、成本高问题, 提出一种油路隔离型插拔式套管设计, 该套管通过底座结构将套管油中部分和变压器油箱分开, 使底座内腔与变压器油箱内腔形成两个独立的空腔, 从而使变压器套管实现可插拔, 大大简化了检修过程。电容心子的绝缘水平是套管重要性能指标, 为此论文专门讨论了如何进行插拔式套管胶浸纸电容心子的改进设计, 并制造了样机。为验证底座结构和电容心子设计的正确性, 文中开展了仿真和试验验证研究。其中, 仿真验证是建立套管整体的三维电—磁—热耦合模型分析工频条件下的温升和电场分布情况, 重点讨论了焦耳热、涡损和介损对温升影响。仿真结果表明: 配合升高座改进设计的电容心子最大场强约为 2.29 kV/mm, 具有足够的安全裕度和良好的改善电场分布能力; 工频条件下套管最高温度出现在底座插拔头附近, 为 97.215 °C, 符合套管设计要求。分别开展了工频耐压试验和温升试验, 工频耐压试验结果表明设计的样机绝缘水平足够, 温升试验结果表明与仿真结果误差小。仿真与试验均表明设计具有较好的绝缘性能和载流能力。

关键词: 变压器套管; 插拔式结构; 电容心子; 电—磁—热耦合; 型式试验

Study on the Designing of Transformer Bushing with Oil-separated Structure and Its Verifying

LUO Yu¹, WANG Han¹, WU Xixiu¹, FENG Yu², DU Yan², MENG Peipei¹

(1. College of Automation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 2. China Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, China)

Abstract: For the problem of long maintenance cycle and high cost after transformer bushing failure, an oil separated plug-in bushing design is proposed, which separates the bushing oil-in part from the transformer tank through the base structure, so that the inner cavity of the base and the inner cavity of the transformer tank form two independent cavities, thus making the transformer bushing pluggable and greatly simplifying the maintenance process. The insulation level of the capacitor core is an important performance indicator of the bushing. For this reason, the paper specifically discusses how to carry out the improved design of the pluggable bushing rubber-impregnated paper capacitor core, and manufactures a prototype. To verify the correctness of the base structure and capacitor core design, simulation and experimental validation studies were carried out. Among them, the simulation verification is to establish a three-dimensional electric-magnetic-thermal coupling model of the entire bushing to analyze the temperature rise and electric field distribution under the working frequency conditions, focusing on the effects of Joule heat, eddy loss and dielectric loss on the temperature rise. Simulation results show that: the maximum field strength of the capacitor core is about 2.29 kV/mm, which has enough safety margin and good ability to improve the electric field distribution; the highest temperature of the bushing under the working frequency condition appears near the plugging head of the base, which is 97.215 °C, which meets the bushing design requirements. The test results show that the insulation level of the prototype design is enough, and the temperature rise test results

show that the error is small compared with the simulation results. Both simulation and test show that the design has good insulation performance and current carrying capacity.

Key words: transformer bushing; plug-in structure; capacitor cores; electric-magnetic-thermal coupling; type test

0 引言

套管是变压器最重要的组部件之一，用于将电流引入或引出变压器的油箱。其在运行时同时承受电、热、力及其耦合作用^[1-4]影响，一旦发生故障，轻则引起套管本体损坏，重则导致套管爆炸，引发严重的电力事故，从而威胁到电网的安全可靠运行。2013~2018 年国网变压器套管故障数据统计图见图 1。

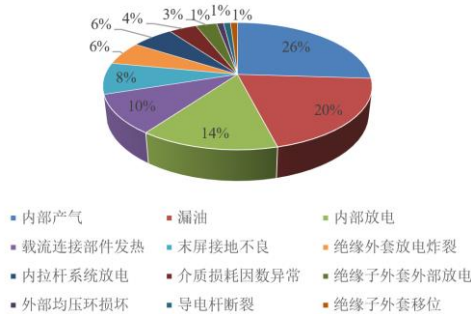


图 1 2013~2018 套管故障数据统计

Fig. 1 Bushing failure data statistics between 2013 and 2018

由图 1 可知，绝大部分的套管缺陷或故障均涉及到套管本体及内部，如异常放电、产气、受潮以及过热等缺陷^[5-7]，都会对油路连通的变压器油室产生影响，相应的处理措施(例如拆卸、复装或者更换套管等)都需涉及到对变压器本体的处理，一旦涉及套管本体故障，需停电检修，由此可见变压器套管运维成本高、工期长，与“双碳”背景下高效运维、减少停电时间的需求相悖。

因此，国内外学者都在积极创新，以期缩短 110 kV 及以上电压等级套管的更换时间。在中国，对于穿缆式套管，若套管故障对变压器本体尚未造成影响，则可采取仅排放变压器升高座内变压器油的方式以缩短变压器排油、抽真空、注油的时间，从而达到减少套管更换时间的目的。对于导杆式套管，受限于安装方法，无法采用以上方式，必须将变压器油排至人孔以下，以方便运检人员进入变压器内部进行套管的拆卸和复装^[8]。而在国外，Siemens 公司因应国家安全和反

恐需要研发了一种 220 kV 套管可插拔的电力变压器 Resilience，但由于技术封锁目前无法查阅到公开资料。

综上所述，目前 110 kV 以上电压等级的变压器套管更换主要依赖制造厂的经验 and 安装更换人员的操作水平，存在耗时长、成本高等问题，国内外涉及到插拔式结构的研究多见于配电变压器电缆进线和插拔式 GIS 终端^[9-11]，应用于 110 kV 及以上套管方面的研究很少。因此，论文提出一种插拔式结构的油路隔离型套管设计，它通过底座将套管油中部分和变压器油箱分开，使底座内腔与变压器油箱内腔形成两个独立的空腔，使其具有即插即拔、方便更换、缩小故障范围等优点。

为验证设计的正确性，根据套管的底座和本体结构，建立套管整体的三维电—磁—热耦合模型^[12-17]，分析了工频条件下插拔式套管电场和温度分布特征^[18]，同时还根据设计的样机开展了工频耐压以及温升试验，仿真和试验均验证了油路隔离型插拔式套管结构设计正确性。

1 油路隔离型套管的设计

1.1 套管油路结构

常规的油纸电容式套管其典型结构是用强力弹簧把电容心子、法兰、电流互感器套筒、上瓷套、下瓷套、油枕等连接在一起，见图 2。其与变压器绕组出线的连接部分处于变压器油室之中，因此在检修时需涉及到对变压器本体的处理，十分费时费力。



1—油枕；2—上瓷套；3—法兰；4—电流互感器套筒；
5—下瓷套。

图 2 常规油纸电容式套管

Fig. 2 Conventional oil paper capacitive bushing

油路隔离型套管是通过常规套管的底部出线方式进行改进，在本体和变压器升高座的连接结构中增设套管底座，物理上将套管本体和变压器油室相隔离，从而使套管本体构成了独立的密封空间，见图3。

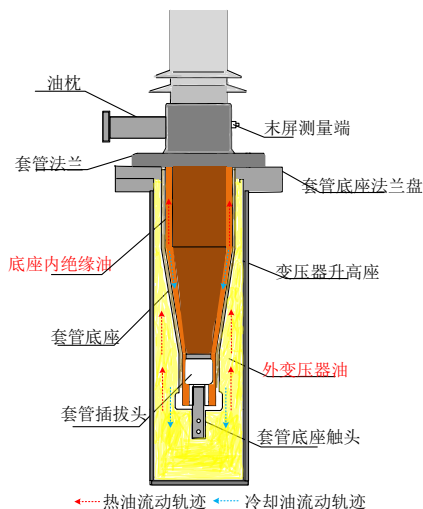


图3 插拔式套管油路结构

Fig. 3 Plug-in bushing oil circuit structure

图3中，红色箭头是热油流动轨迹，蓝色箭头是冷却油流动轨迹。由图中油路可知：底座内少量的绝缘油与升高座内的变压器油相互独立，即使内绝缘油发生劣化也不会影响变压器油的品质。套管底座与变压器升高座装配在一起，在更换时无需涉及对变压器本体的操作。

1.2 套管电容心子

1.2.1 电容心子结构

油路隔离型套管因其结构发生了改变，故电容心子的尺寸需要进行改进设计，使其绝缘水平达到要求。套管的主绝缘采用胶浸纸电容芯，其具有防爆阻燃、体积小、重量轻等特点^[19-21]。心子是在载流导体上按一定厚度交替缠绕电容极板和胶浸纸组成的同轴圆柱结构，利用串联电容的均压作用，使套管的径向和轴向电场分布均匀，缠制过程见图4。



图4 电容心子缠制过程

Fig. 4 Capacitor core winding process

1.2.2 电容心子绝缘设计

电容心子总体设计原则是等厚度、不等台阶，见图5。通过调节伞梯差与尾梯差来控制套管的径向场强与轴向场强，使径向场强尽量均匀，同时控制轴向场强在许用值以下，留出足够的绝缘裕度^[22-24]。

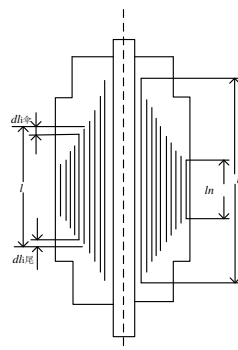


图5 电容心子设计原理

Fig. 5 Capacitor core design principle

图5中： l_1 为第一层电容极板的长度； l_n 为第 n 层极板的长度； $dl_{i伞}$ 和 $dl_{i尾}$ 分别为第 i 层极板与后一层之间的伞梯和尾梯差。

根据110 kV电压等级绝缘要求，按照上述原则插拔式套管的电容心子设计有30层电容屏，电容心子内径为45 mm，心子的外径为148 mm。具体结构见图6。

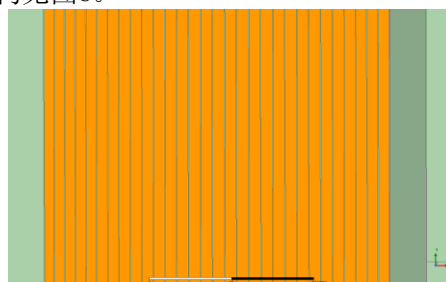


图6 电容心子结构

Fig. 6 Capacitor cores structure

1.3 套管底座

插拔式套管的油路结构是通过一层环氧树脂套筒(即套管底座)将升高座里的油与套管隔开，绝缘套安装在升高座上，套管底座位于变压器升高座与套管法兰之间，与套管底座触头一起将套管下部密闭起来，从而形成了在变压器升高座内的独立密封空间。同时，在套管本体法兰上增加一个油枕结构，可观察底座内油位。底座与套管本体之间通过油枕上的注油孔抽真空、注变压器油，整体装配后见图7。其主要电气参数见表1。



图7 插拔式套管结构

Fig. 7 Plug-in bushing structure

表1 110 kV 插拔式套管主要电气参数
Table 1 Main electrical parameters of 110 kV plug-in bushing

主要参数	参考值
标称电压/kV	110
60 s 工频耐受电压/kV	255
雷电冲击耐受电压/kV	550
额定电流/A	630
额定电压下局放/pC	1.050Um/√3 下 > 0.005

2 油路隔离型套管电—磁—热耦合模型的建立

为验证油路隔离型套管设计的正确性，论文采用仿真和试验验证两种方式进行验证。其中，仿真验证主要是通过建立三维电—磁—热耦合模型计算工况条件下的绝缘和温升水平。

2.1 数学模型

求解电场的控制方程可表示为：

$$\vec{E} = -\nabla\varphi \quad (1)$$

$$\nabla^2\varphi = -\frac{\rho}{\varepsilon} = 0 \quad (2)$$

求解电场时有两种边界条件：一是已知电位的边界条件，所求电位 φ 应满足方程

$$\varphi = \varphi_0 \quad (3)$$

二是未知电位的边界条件，电位 φ 应满足法向导数为 0，即

$$\frac{\partial\varphi}{\partial n} = 0 \quad (4)$$

在温度场计算时，考虑套管中存在热传导和热对流这两种主要传热方式^[25-27]，其统一的传热方程为

$$\rho C_p \vec{u} \cdot \nabla T + \nabla \cdot [-k \nabla T] = P(r) \quad (5)$$

式(5)中， C_p 表示比热容， J kg K^{-1} 。

插拔式套管采用细长的柱状结构，轴向长度

远大于径向长度，将热传导和热对流方程运用于套管以导电管为中心的圆柱坐标上，可以得到方程为

$$\nabla \cdot \vec{A} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r\vec{A}) + \frac{1}{r} \frac{\partial \vec{A}}{\partial \varphi} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial Z} \quad (6)$$

式(6)中： \vec{A} 为磁矢势， Wb/m ； r 为套管截面半径， m 。

套管的径向热通量必须满足 $\frac{\partial \vec{A}}{\partial \varphi} = \frac{\partial \vec{A}}{\partial Z} = 0$ ，于是

是传热控制方程为

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rk \frac{\partial T(r)}{\partial r}) - \rho C_p \vec{u} \frac{\partial T(r)}{\partial r} + \sigma (\frac{\partial T(r)}{\partial r})^2 = 0 \quad (7)$$

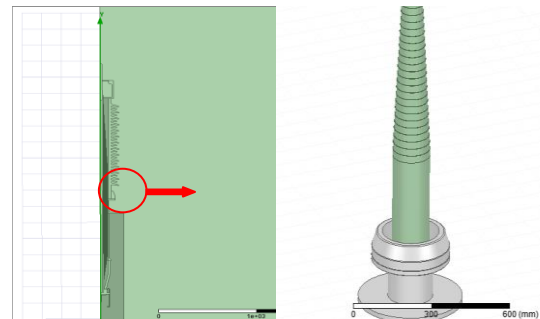
套管表面发生的对流传热属于第二类边界条件，见式(8)

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_r = \alpha (T - T_f) \Big|_r \quad (8)$$

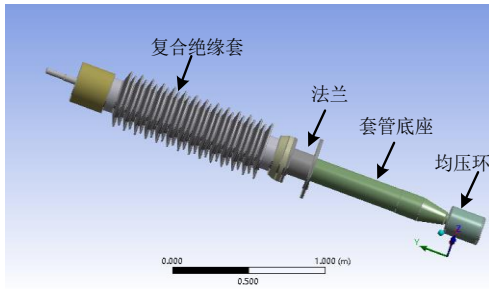
式(8)中： T_f 为环境温度， $^{\circ}\text{C}$ ； α 为换热系数， $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$ ，与传热过程两侧材料的导热系数、流体的流速等有关。采用经验公式计算得到底座绝缘筒的换热系数为 $30 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$ ，仿真计算时将环氧树脂套筒的表面换热系数设置为该值即考虑了底座绝缘筒对散热的影响。

2.2 物理模型

变压器用套管的部件多且不同部件之间的尺寸差异巨大，如电容心子内径为 45 mm ，但其一层电容极板的厚度仅为 0.1 mm ，这会导致网格与节点数多，计算费时，见图 8(a)。因此，对插拔式套管中的螺纹、螺孔、油枕及金属倒角等对计算结果影响不大的结构可简化以减少计算量，最终得到一个中心对称的整体计算模型，见图 8(b)。



(a) 多层电容屏建模



(b) 整体计算模型

图 8 计算模型

Fig. 8 Calculation model

2.3 求解计算

模型的求解计算包括参数设置，网格剖分以及激励施加。

1)物性参数设置。物性参数的设置见表 2。

表 2 电场计算材料参数

Table 2 Electric field calculation material parameters

计算区域	材料	相对介电常数	电导率/(S m ⁻¹)
导电管	铜	2 000.0	5.9×10 ⁷
法兰	铝合金	2 000.0	3.7×10 ⁷
外油箱	变压器油	2.3	2×10 ⁻¹³
复合外套	硅橡胶	4.7	5×10 ⁻¹⁴
电容心子	环氧浸渍纸	3.8	6×10 ⁻¹⁴
底座	环氧树脂	3.5	1×10 ⁻⁶

2)网格划分。采用局部加密的方法对电容心子部分进行网格划分，结果见图 9。

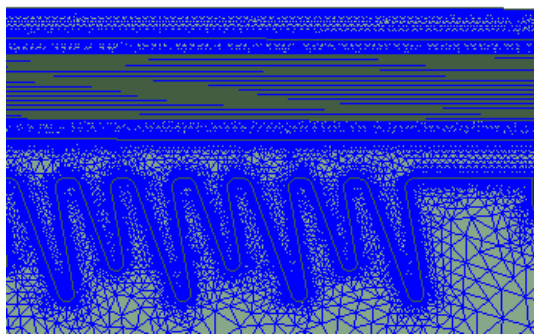


图 9 网格划分剖面示意图

Fig. 9 Schematic diagram of meshing

3)激励施加。激励施加包括电场、涡流场和温度场，其中电场激励为：套管的导电管、均压环以及下部出线设置为高电位，施加运行电压 110/√3 kV；套管的法兰以及底座外壁设置电位为 0。涡流场激励是对导电管施加从上至下的 630 A

电流，计算时可简化多层极板结构，考虑导电管中心周围金属部件的涡损分布情况。电容心子的介损可依据固体介质的损耗率(单位体积的功率损耗)公式得到

$$P_0 = \gamma E^2 = \frac{f \epsilon_r E^2 \tan \delta}{1.8 \times 10^{12}} \quad (9)$$

式(9)中： γ 为电介质的电导率； E 为电介质中的电场强度； f 为外加电场的频率。

温度场激励为：将初始总功率损耗作为温度场热源激励；套管与空气接触外表面向环境传递热量，定义环境温度为 30 °C，变压器油设为恒定温度 90 °C。

在设置好上述条件之后，设置仿真时间为 5 h，步长为 30 min，总体计算流程见如图 10。

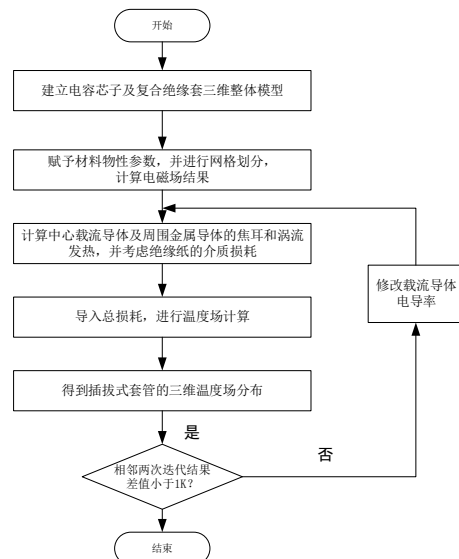


图 10 三维电—磁—热耦合场计算流程图

Fig. 10 Flowchart of calculation of three-dimensional electromagnetic thermal coupling field

3 计算结果分析

3.1 电场计算结果

插拔式套管电场计算结果见图 11、12。

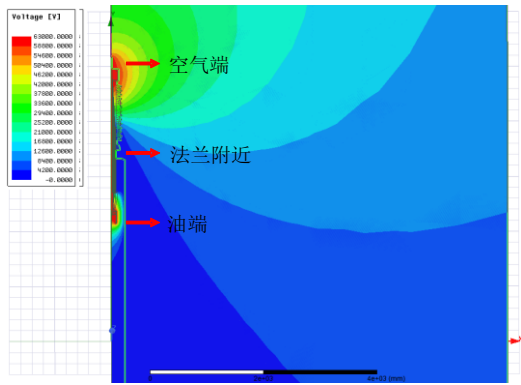
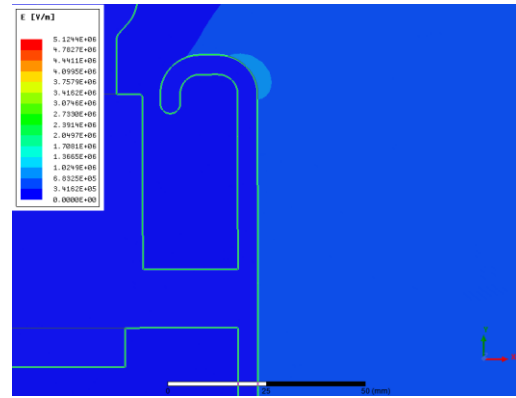


图 11 电势分布图

Fig. 11 Electric potential distribution



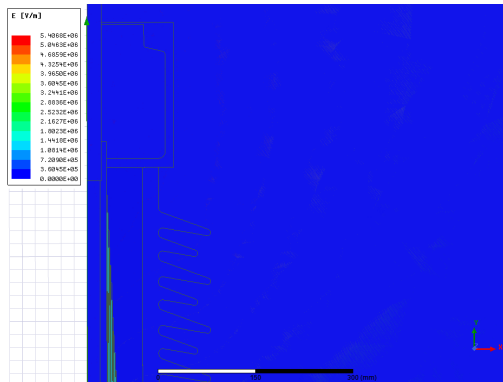
(d) 均压环电场

图 12 电场分布图

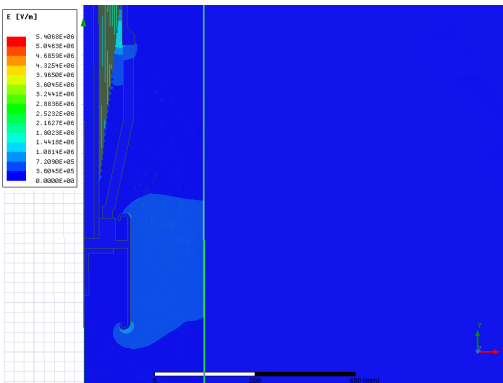
Fig. 12 Electric field distribution

由图 11 可知,插拔式套管的电势分布呈现两端高,中间低的特点,即油端和空气端在运行中处于高电位,其周围电势较高,法兰由于在运行时要严格接地,周围电势较低。由图 12(a)可知,空气端电场强度整体较小,而电容心子是套管空气端场强最大的位置;图 12(b)中除电容心子部位,底部均压环的弧弯处电场强度也较大,这说明均压环也是套管绝缘相对薄弱的地方。

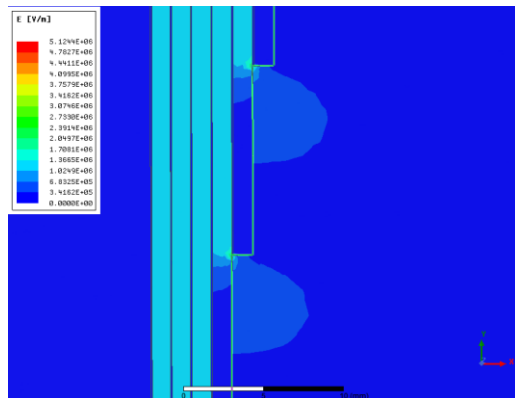
电容心子的作用是使套管内部的径向及轴向场强分布尽可能均匀,场强越均匀则电容心子内部发生有害局放的几率越小,心子设计越合理。故可在模型中第一层绝缘纸处取中线作为轴向直线,在法兰附近取一条直线横穿第零层极板至最外层作为径向直线,分析两条直线上的电势及场强的大小,插拔式套管电容心子的轴向电势电场曲线见图 13,径向电势电场曲线见图 14。



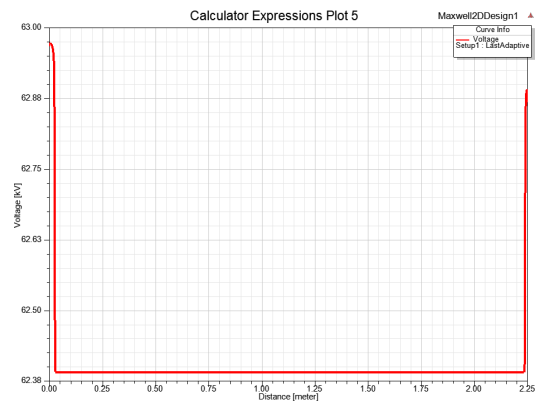
(a) 空气端电场



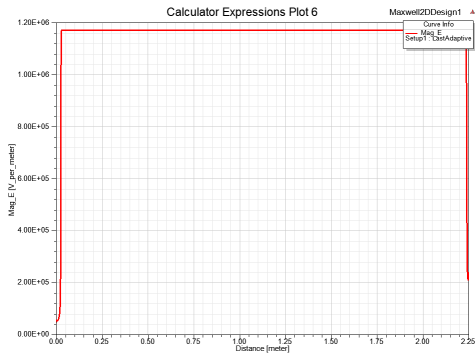
(b) 油端电场



(c) 极板电场



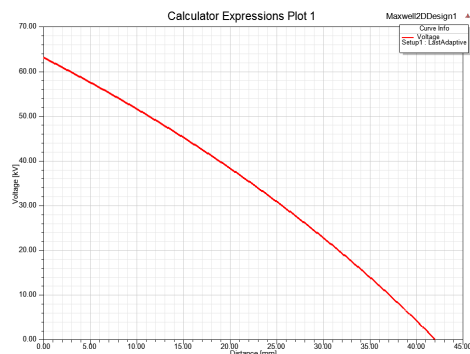
(a) 轴向电势



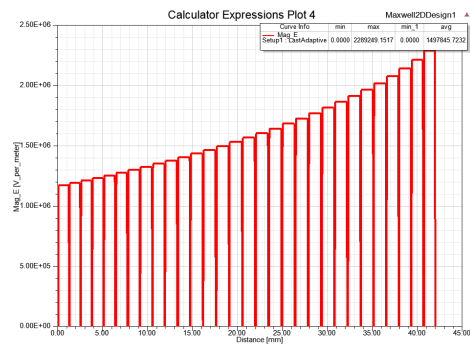
(b) 轴向场强

图 13 轴向电势电场曲线

Fig. 13 Axial potential electric field curve



(a) 径向电势



(b) 径向场强

图 14 径向电势电场曲线

Fig. 14 Radial potential electric field curve

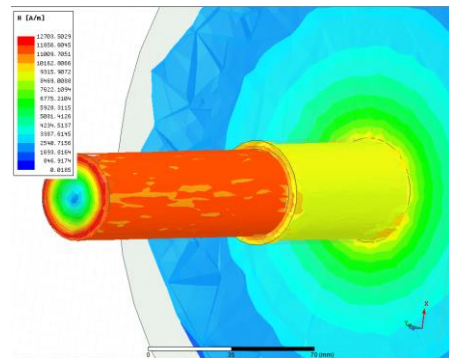
由图 13(a)可知，第一层绝缘纸由于靠近导电管，其整体电势较高，最高电压为 63 kV，最低为 62.4 kV。由图 13(b)可知，除两端场强较小，其余部分场强均在 1.17 kV/mm 左右，轴向上场强分布较为均匀。

从图 14(a)可以看出，从里到外，电势逐渐下降，第零层极板电势为 63 kV，最外层极板电势为 0；从图 14(b)可知，径向上场强是逐渐增大的，第一层绝缘纸处场强最小，约为 1.17 kV/mm，最外层的绝缘纸处场强最大，约为 2.29 kV/mm，最

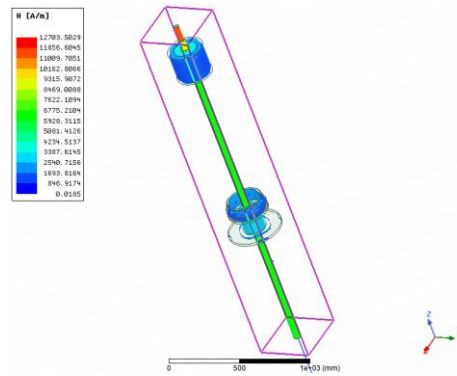
大与最小场强差值为 1.12 kV/mm，最大场强远低于环氧树脂的击穿场强 35 kV/mm，具有足够的安全裕度。相邻两层铝箔极板间的电场大小基本保持不变，体现了电容极板对轴向及径向场强的均匀作用。

3.2 热源功率计算结果

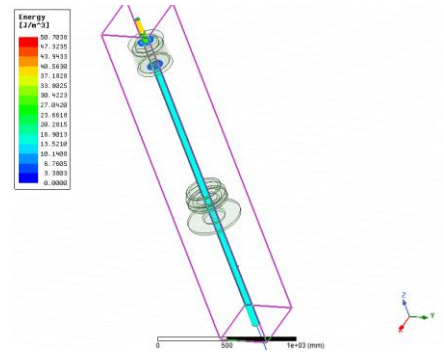
涡流场的计算结果见图 15。从图 15 可以看出，从上至下，套管金属部分的能量最大值出现在导电管处，最大值约为 50.7 W/m^3 。导电管上焦耳热分布比较均匀，且集中在表面，经计算得到总的焦耳热损耗与涡流损耗之和为 73.45 W。



(a) 导电管磁场强度



(b) 整体磁场强度



(c) 整体能量分布

图 15 三维涡流场计算结果

Fig. 15 Calculated results of 3D vortex field

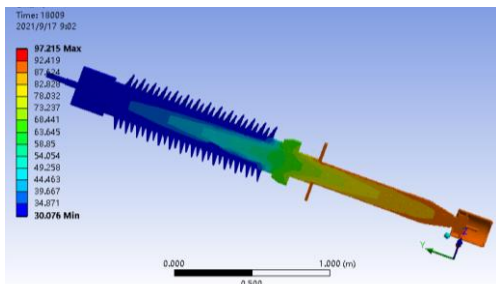
已知套管工作在工频电压下，所以频率 f 为 50 Hz；电容心子的相对介电常数 ϵ_r 以及介质损耗角正切 $\tan\delta$ 在特定工作条件下可视为定值。因此，只需要知道每一层绝缘纸所在处的电场强度就可以计算该绝缘层的介质损耗率，每一层绝缘纸的电场强度见图 14(b)。对每一层的功率损耗进行体积积分，最终求和得总的介质损耗约为 2.175 W。因此插拔式套管常温下的总发热功率为

$$P_{\text{总}} = P_{\text{焦耳}} + P_{\text{涡流}} + P_{\text{介损}} = 75.625 \quad (10)$$

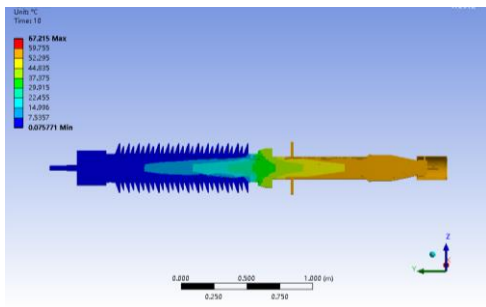
将常温下计算得到功率作为电—磁—热耦合场计算的初始条件进行迭代计算，直至达到稳态。

3.3 电—磁—热耦合场计算结果

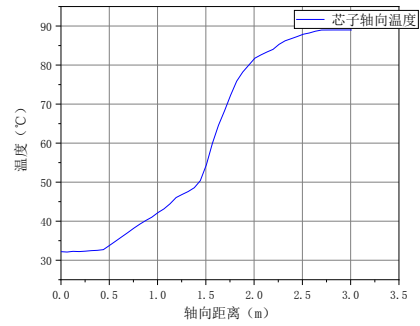
考虑到套筒隔离变压器油箱时，其散热能力会下降会给套管带来不利影响，论文考虑的是一种散热能力最不利的情况，即内腔绝缘油不具备流体散热能力，仿真时将其当作固体处理。在这种处理情况下，仿真计算得到套管底座部分的温度分布要比实际温度分布高，仿真得到的结果见图 16。



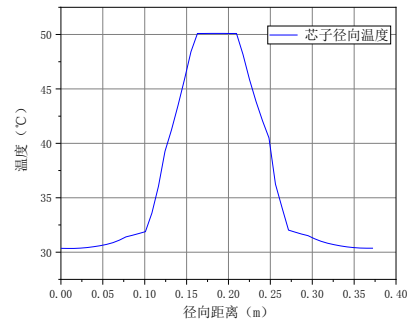
(a) 温度分布



(b) 温升分布



(c) 心子轴向温度



(d) 心子径向温度

图 16 温度场计算结果

Fig. 16 Temperature field calculation results

图 16(a)、(b)分别是仿真计算得到的温度分布和温升分布图，由图可知电容心子内导电管附近温度较高，电容心子外层，法兰及绝缘护套表面温度相对较低。套管的油端温度偏高，空气端温度偏低，由于导电管发热，接近导电管附近的空气温升较高。在径向上，最高温度出现在与导电管接触的电容心子部位，最低温度在电容心子最外层；轴向上，电容心子从下到上温度逐渐降低。这是由于套管上端所在的空气温度较低，导电管为金属部件，导热系数较大，热量沿套管轴向传递散热较快，而心子和环氧树脂绝缘套筒导热系数均较小。由于底座封闭的影响，油端温度较高部位集中在套管中下部，套管内部最高温度在套管插座附近，达到了 97.215 °C，最大温升为 67.215 °C，根据标准 GB/T 4109—2008 规定，110 kV 常规套管最高温升允许值为 75 °C，最高温度允许值为 105 °C，文中设计的插拔式结构最高温度和温升均符合运行要求。但跟常规套管相比，温升略高，后续研究中应进一步着手解决散热优化问题。

4 试验验证

论文主要开展工频耐压试验进行绝缘耐受水平的验证，温升试验进行载流能力的验证。

4.1 工频耐压试验

为验证插拔式套管的电气绝缘性能，依据标准 GB/T 4109—2008 第 9.3 条，进行工频耐压试验，试验条件为通以 1 min 的 255 kV 的交流电，试验结果显示合格，试验平台见图 17。



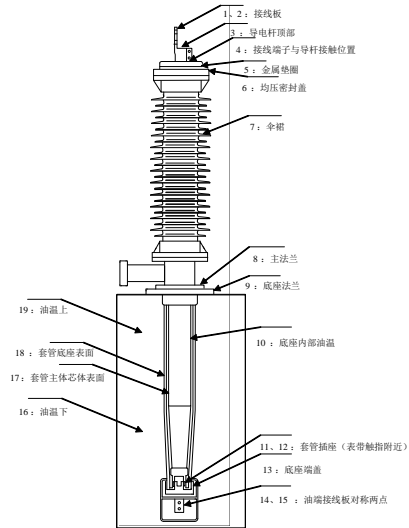
图 17 工频耐压试验平台

Fig. 17 Industrial frequency withstand voltage test platform

在进行试验之后，测量套管的电容、介质损耗角以及局部放电量，其中电容约为 380.9 pF，介质损耗角 $\tan\delta$ 约为 0.003 34，局放量约为 2 pC，均满足标准要求。

4.2 温升试验

温升试验是在某企业高压试验大厅进行，试验过程如下：试验时套管垂直安装于试验油箱上，油箱内注入变压器油，油面浸没套管底座至接近套管法兰处；变压器油加热至高于环境温度 $(60\pm 2)^\circ\text{C}$ ，热电偶布点、温升试验接线见图 18。



(a) 热电偶布点

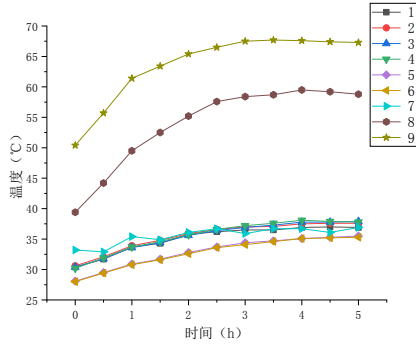


(b) 试验接线(空气端)

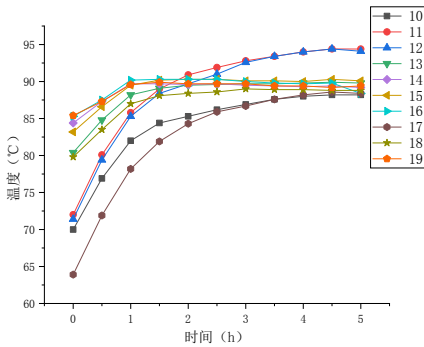
图 18 温升试验过程

Fig. 18 Temperature rise test process

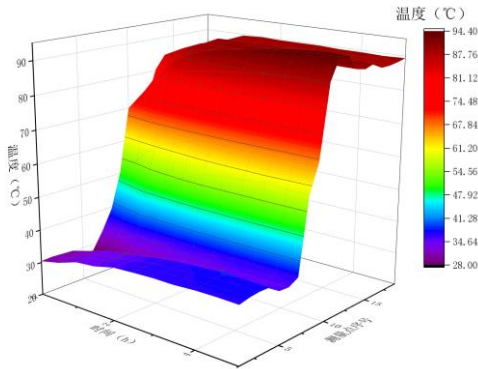
试验当天环境温度约为 30°C ，油温约为 90°C ，待油温稳定后，通过变压器在套管的顶部接线端子施加 630 A 交流试验电流。直至各测量点 1 h 内的温度变化不超过 1 K 时，记录此时温度。温度的测量是通过热电偶得到的，根据试验技术方案，热电偶的布点一共有 19 处，测量点 1 至 9 位于底座上方，测量位置与空气接触，测量点 10 至 19 位于升高座内部，见图 18(a)。试验时间总计 5 h，每隔 30 min 记录一次，由温升试验采集到的数据可知，仿真结果与试验相一致，试验测得的稳态最高温度在测量点 11 处得到，即插拔式套管的底座触指附近，最高温度达 94.40°C ，与设置油温 90°C 相比，温升为 4.40°C 。空气端以及油端的测点温度变化趋势见图 19。



(a) 空气端测点温度



(b) 油端测点温度

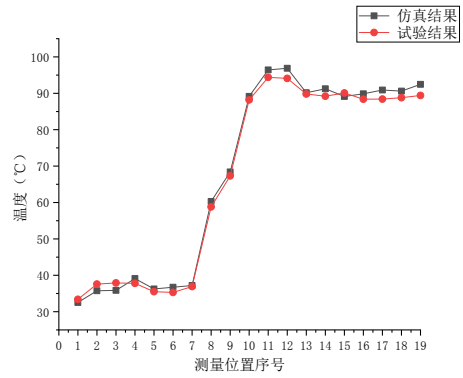


(c) 整体温度分布

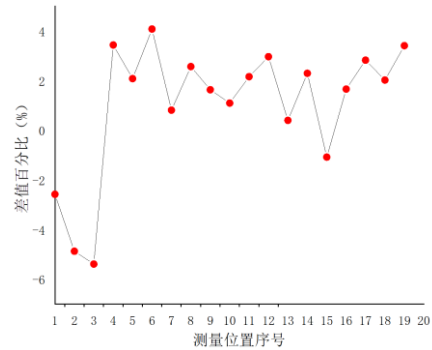
图 19 测点温度分布

Fig. 19 Temperature distribution of measurement points

由图 19 可知,空气端除法兰附近其余点温度较低,油端温度整体较高,但以底部插拔头附近为最。温升在试验开始 4 h 左右达到稳态,记录温升达到稳态时的这 19 个点数据并与相应位置的仿真计算结果对比,见图 20。



(a) 测点温度对比



(b) 误差百分比

图 20 仿真与试验结果对比

Fig. 20 Comparison of simulation and test results

由图 20(a)可知,基于电—磁—热耦合场的仿真结果趋势与试验所测相符,仿真结果与试验结果基本吻合。但仿真得到的测量点 12 温度最高,为 96.88 °C,温升试验中测量点 11 温度最高,为 94.40 °C。仿真得到的最高点温度比试验测得略高。由图 20(b)可知最大差值百分比为 5.4%,分析误差来源,原因一是在于仿真时设置的油温为 90 °C,但实际测得变压器油温略低,平均油温为 89.39 °C,且各处油温并不完全相等;二是在仿真时将底腔内绝缘油设置为固体,考虑的是一种散热能力下降到极端的情况,导致仿真的温度和温升比实际要高,而实际上插拔式套管底座内有绝缘油的循环流动能及时带走底座插头附近因通流产生的热量,使底座内部温度能够保持在安全的范围内,不致产生过热风险。

5 结论

文中提出一种油路隔离型插拔式套管设计,并通过建立套管整体的三维电—磁—热耦合模型

进行了仿真验证,开展了绝缘和温升试验进行了试验验证,结论如下:

1)设计的电容心子具有良好的改善电场分布的能力,心子最小场强约为 1.17 kV/mm,最大场强约为 2.29 kV/mm,具有足够的安全裕度。

2)焦耳热是套管温升的主要热源,涡损及介损相比焦耳热占比较小,其中涡损约占 2.3%,介损约占 2.9%。在考虑涡损、介损及焦耳热的条件下,常温下 110 kV/630 A 的插拔式套管的发热功率约为 75.625 W。

3)对油路而言,最高温升出现在底座插拔头附近,最高温度达 94.40 °C,底座法兰附近的油温较低。对电容心子而言,在径向上,高温区域出现在电容心子内层,低温则在电容心子最外层;轴向上,电容心子从下到上温度降低,温度下降的趋势接近于“s”型曲线,下部心子温度下降较慢,从法兰向上心子温度下降加快,接近空气端后下降趋缓。总体而言,油路温升高于电容心子温升。

4)温升试验测得的最高温度为 94.40 °C,仿真得到的最高点温度比试验测得略高,仿真与试验的最大百分比误差为 5.4%。

参考文献:

[1] 夏 军,张璧辉,杨知非,等. 电力谐波对变压器套管电容心子介质损耗的影响研究[J]. 电瓷避雷器, 2020(1): 222-227.
XIA Jun, ZHANG Bihui, YANG Zhifei, et al. Study on the influence of power harmonic on the dielectric loss of transformer capacitive bushings[J]. Insulators and Surge Arresters, 2020(1): 222-227.

[2] 周 秀,吴旭涛,刘威峰,等. 一起 220 kV 主变压器套管缺陷诊断分析[J]. 电瓷避雷器, 2021(2): 85-89.
ZHOU Xiu, WU Xutao, LIU Weifeng, et al. Diagnosis and analysis on a 220 kV main transformer bushing defect[J]. Insulators and Surge Arresters, 2021(2): 85-89.

[3] 黄哲恒,梅红伟,高 超,等. 变压器套管电场强垂直分量对操作冲击放电特性的影响[J]. 高电压技术, 2021, 47(8): 2838-2845.
HUANG Zheheng, MEI Hongwei, GAO Chao, et al. Effect of strong vertical components of electric field in transformer bushing on switching impulse discharge

characteristics[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(8): 2838-2845.

[4] 王振华,郑久江,陈 星,等. 10 kV 卷铁心配电变压器短路强度浅析[J]. 变压器, 2021, 58(11): 44-46.
WANG Zhenhua, ZHENG Jiujiang, CHEN Xing, et al. Analysis of Short-Circuit strength of 10 kV coiling core distribution transformer[J]. Transformer, 2021, 58(11): 44-46.

[5] 简 政,郝 建,刘清松,等. 典型缺陷油纸绝缘套管的高压频域介电和局部放电特性差异[J]. 高电压技术, 2022, 48(10): 4113-4123.
JIAN Zheng, HAO Jian, LIU Qingsong, et al. Differences in high voltage frequency domain dielectric and partial discharge characteristics of typical defective oil-paper insulated bushings[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(10): 4113-4123.

[6] 徐 鹏,曹雅榕,陈弘扬,等. 油纸电容型套管常见缺陷及对策[J]. 电瓷避雷器, 2021(4): 209-214.
XU Peng, CAO Yarong, CHEN Hongyang, et al. Common defects of oil-paper capacitive bushing and countermeasures[J]. Insulators and Surge Arresters, 2021(4): 209-214.

[7] 张 璐,孙 蕾,韩彦华,等. 不同缺陷下油纸绝缘套管中氢气生成特性研究[J]. 电网与清洁能源, 2021, 37(7): 44-50.
ZHANG Lu, SUN Lei, HAN Yanhua, et al. Hydrogen generation characteristics of the oil paper insulated bushing with different inside defects[J]. Advances of Power System & Hydroelectric Engineering, 2021, 37(7): 44-50.

[8] 赵 军,李文峰,邢 超,等. 变压器套管安装缺陷及防范措施[J]. 变压器, 2016, 53(4): 69-73.
ZHAO Jun, LI Wenfeng, XING Chao, et al. Transformer bushing installation defects and preventive measures[J]. Transformer, 2016, 53(4): 69-73.

[9] 谢 晨,潘文霞,孙 凯,等. 基于多物理场的预置式(插拔式)海底电缆终端电场优化研究[J]. 高压电器, 2020, 56(1): 135-140.
XIE Chen, PAN Wenxia, SUN Kai, et al. Research on optimization of the electric field of the pre-set(plug-and-pull) submarine cable based on mul-

- ti-physical field[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(1): 135-140.
- [10]樊友平, 武利会, 康李一, 等. 110 kV XLPE 电缆 GIS 内锥插拔式快速中间接头的设计[J]. 高电压技术, 2016, 42(2): 485-495.
- FAN Youping, WU Lihui, KANG Liyi, et al. Design of inner cone pluggable intermediate quick joint for 110 kV XLPE cables based on GIS[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(2): 485-495.
- [11]许鹏飞, 杨帆, 刘刚, 等. 110 kV 插拔式 GIS 电缆终端轴向传热分析[J]. 电力工程技术, 2020, 39(5): 30-35.
- XU Pengfei, YANG Fan, LIU Gang, et al. Assessment on axial heat transfer of 110 kV plug-in GIS cable terminal[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(5): 30-35.
- [12]王青于, 靳守锋, 袁书文, 等. 特高压环氧浸纸-SF₆ 气体复合绝缘穿墙套管界面电荷积累过程和直流电场分布特性仿真[J]. 高电压技术, 2022, 48(10): 4102-4112.
- WANG Qingyu, JIN Shoufeng, YUAN Shuwen, et al. Simulation of charge accumulation process and DC electric field distribution characteristics at the interface of EHV epoxy-impregnated paper-SF₆ gas composite insulated wall-piercing bushings[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(10): 4102-4112.
- [13]张施令, 彭宗仁. 换流变压器套管的电气绝缘结构研究与设计优化[J]. 绝缘材料, 2020, 53(12): 65-72.
- ZHANG Shiling, PENG Zongren. Study on electrical insulation structure of converter transformer bushing and design optimization[J]. Insulating Materials, 2020, 53(12): 65-72.
- [14]张施令, 彭宗仁. 有限元数值计算技术应用于特高压穿墙套管三维电场模拟分析[J]. 高电压技术, 2020, 46(3): 782-789.
- ZHANG Shiling, PENG Zongren. Application of finite element method in three-dimensional electric field simulation of UHVDC wall bushing[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(3): 782-789.
- [15]李乃一, 彭宗仁, 刘鹏. 1100 kV 直流 SF₆ 气体绝缘穿墙套管电场仿真分析[J]. 高电压技术, 2020, 46(1): 205-214.
- LI Naiyi, PENG Zongren, LIU Peng. Electric field simulation and analysis of 1100 kV DC SF₆ gas-insulated wall bushing[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(1): 205-214.
- [16]谭黎军, 俞英中, 曹燕明, 等. 基于有限元法的绝缘装置介电强度校核[J]. 变压器, 2019, 56(10): 15-19.
- TAN Lijun, YU Yingzhong, CAO Yanming, et al. Dielectric strength validation for insulation device based on FEM[J]. Transformer, 2019, 56(10): 15-19.
- [17]JYOTHI N S, RAMU T S, MANDLIK M. Temperature distribution in resin impregnated paper insulation for transformer bushings[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2010, 17(3): 931-938.
- [18]付启明, 易鹭, 曲德宇, 等. 穿墙套管固定法兰流损耗分析及优化研究[J]. 电瓷避雷器, 2020(1): 204-208.
- FU Qiming, YI Lu, QU Deyu, et al. Eddy current loss analysis and optimization research of wall casing flange[J]. Insulators and Surge Arresters, 2020(1): 204-208.
- [19]张寒, 万保权, 许佐明, 等. 环氧胶浸纸套管绝缘特性的温度敏感性研究[J]. 电瓷避雷器, 2021(2): 72-77.
- ZHANG Han, WAN Baoquan, XU Zuoming, et al. Temperature sensitivity of insulation characteristics of epoxy resin impregnated paper bushing[J]. Insulators and Surge Arresters, 2021(2): 72-77.
- [20]张寒, 万保权, 胡伟, 等. 热效应对胶浸纸套管绝缘性能的影响及温度反演方法[J]. 高电压技术, 2022, 48(10): 4124-4132.
- ZHANG Han, WAN Baoquan, HU Wei, et al. Effect of thermal effect on insulation performance of glued-in paper sleeves and temperature inversion method[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(10): 4124-4132.
- [21]谢志成, 许佐明, 刘泰蔚, 等. 典型缺陷条件下环氧胶浸纸套管绝缘特性分析[J]. 南方电网技术, 2021, 15(12): 66-71.
- XIE Zhicheng, XU Zuoming, LIU Taiwei, et al. Insulation characteristics analysis of epoxy resin impregnated paper bushing with typical defects[J]. Southern Power System Technology, 2021, 15(12): 66-71.

- [22]刘道生, 陈星蓉, 赵子明. 基于等裕度的 60 kV 油纸套管纵绝缘优化[J]. 绝缘材料, 2020, 53(10): 62-68.
LIU Daosheng, CHEN Xingrong, ZHAO Ziming. Longitudinal insulation optimization of 60 kV oil-paper bushing based on equal margin design method[J]. Insulating Materials, 2020, 53(10): 62-68.
- [23]邓 军, 王青于, 彭宗仁, 等. 基于不同心体设计方法的 ± 800 kV 对接式直流穿墙套管电场分布规律研究[J]. 高压电器, 2018, 54(10): 8-14.
DENG Jun, WANG Qingyu, PENG Zongren, et al. Study on electric field distribution of ± 800 kV butt joint type DC wall bushings based on different core design methods[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(10): 8-14.
- [24]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 distribution characteristics of electric and heat field and optimal design of inner insulation structure of dry SF₆ gas-insulated UHV DC bushing[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2020.
- [25]ZHANG Yujiao, RUAN Jiangjun, HUANG Tao, et al. Calculation of temperature rise in air-cooled induction motors through 3-D coupled electromagnetic fluid-dynamical and thermal finite-element analysis[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2012, 48(2): 1047-1050.
- [26]ETEIBA M B, AZIZ M M A, SHAZLY J H. Heat conduction problems in SF₆ gas cooled-insulated power transformers solved by the finite-element method[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23(3): 1457-1463.
- [27]ROSILLO M E, HERRERA C A, JARAMILLO G. Advanced thermal modeling and experimental performance of oil distribution transformers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(4): 1710-1717.
- 罗 宇(1998—), 男, 硕士研究生, 主要从事高电压电磁仿真方面的研究(E-mail: 1317793848@qq.com)。
- 吴细秀(1975—), 女, 副教授, 主要从事高电压绝缘技术及高电压电磁仿真方面的研究 (E-mail : wuxixiu@whut.edu.cn)。