

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2025.09.009

## 特高压换流变压器阀侧套管温度场分布特性仿真研究

高雨婷, 陈欢, 余嘉文, 崔杰, 李军浩

(西安交通大学电气学院, 西安 710049)

**摘要:** 换流变压器是高压直流输电的关键设备,在其长期运行过程中,换流变压器阀侧套管在涡流损耗的影响下会引起套管温升,发热问题是导致套管性能下降的重要原因。换流变压器阀侧套管在生产、安装及运行过程中不可避免的存在有金属颗粒等缺陷,在热应力的作用下会引起纹裂的产生,研究缺陷条件下套管内部温度场的变化对于改善换流变压器阀侧套管设计工艺、提升其运行可靠性具有重要意义。文中依据换流变压器套管实际结构构建了套管温度场分布仿真计算模型,对不同谐波含量及谐波频率下的套管温升情况进行仿真研究,并通过构建套管缺陷模型对金属颗粒缺陷与纹裂缺陷下的温度场变化进行分析。仿真结果表明,正常运行时换流变压器阀侧套管环氧树脂电容心子温度沿径向逐渐降低;谐波电流有效值越大,谐波电流频率越高,套管内部温度最大值越大;谐波电流占比增大时,其对于温升的影响增大。套管内部存在金属颗粒时,缺陷处温度梯度增大;套管内部存在纹裂时,缺陷处温度梯度减小。

**关键词:** 阀侧套管; 温度场; 谐波; 金属颗粒; 纹裂

### Simulation Study on Temperature Field Distribution Characteristics of Valve Side Bushing for UHV Converter Transformer

GAO Yuting, CHEN Huan, YU Jiawen, CUI Jie, LI Junhao

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

**Abstract:** Converter transformer is the key equipment of HVDC transmission. During its long-term operation process, the valve side bushing of converter transformer will cause temperature rise of the bushing under the influence of eddy current loss, and the heating is an important reason for the deterioration of performance of bushing. The valve side bushing of converter transformer has inevitably such defects as metal particles in the process of production, installation and operation, which will cause cracks under the action of thermal stress. Studying the change in the temperature field inside the bushing under defect the conditions is of great significance for improving the design process of valve side bushing of converter transformer and enhancing its operation reliability. Based on the actual structure of bushing of converter transformer, in this paper the simulation calculation model of temperature field distribution of the bushing is constructed, the temperature rise of the bushing under different harmonic contents and harmonic frequencies is simulated and studied, and the change of temperature field under metal particle defects and crack defects is analyzed by constructing a defect model of the bushing. The simulation results show that, in case of normal operation, the temperature of the epoxy resin capacitor core of the valve side bushing of the converter transformer decreases gradually along the radial direction. The higher the RMS value of harmonic current, the higher the harmonic current frequency, and the greater the maximum temperature inside the bushing. In case of increase of proportion of harmonic current, its influence on temperature rise increases. In case of metal particles in the bushing, the temperature gradient at the defect increases; and in case of cracks in the bushing, the temperature gradient at the defect decreases.

**Key words:** valve side bushing; temperature field; harmonics; metal particles; cracks

收稿日期:2025-03-20; 修回日期:2025-06-03

基金项目:陕西省杰出青年科学基金(2024JC-JCQN-42)。

Project Supported by Shaanxi Provincial Outstanding Youth Science Fund(2024JC-JCQN-42).

## 0 引言

阀侧套管作为换流变压器的重要组成部分,其可靠性对于电力系统的稳定运行至关重要<sup>[1-7]</sup>。长期的高负荷运行中阀侧套管受到复杂的电、热和机械作用,其中中心导杆上的涡流损耗是套管内部热量的主要来源,套管的温升会引起绝缘介质的老化使套管性能下降,容易引发设备故障<sup>[8-16]</sup>。换流变压器阀侧套管承受交直流复合电压和含高次谐波的电流<sup>[17-20]</sup>,谐波电流分量的存在对套管热量的生成和温度场的分布造成影响,使其温度远高于常规变压器套管。

套管温度场的计算一直以来受到国内外学者的广泛关注。印度学者 N.S.Jyothi 研究了套管胶浸纸材料内部的温度分布情况,依据材料的交流电阻率,建立了计算模型<sup>[21-22]</sup>。Shibao Zhang 建立了套管等效模型,研究了不同电流下套管的热稳定性<sup>[23]</sup>。西南交通大学的邓江对 500 kV 套管温度分布进行计算,并分析了温度、变压器油温、电容器铁心导热系数和护套导热系数对温度分布的影响<sup>[24]</sup>。西安交通大学王青于基于电磁场、热场和流场对换流变压器干式套管的温度场分布进行耦合计算,对比分析了不同测量点处的仿真与实验结果<sup>[25]</sup>。汪书莘通过有限元仿真研究了额定载荷下老化变压器油对套管温度场的影响,发现电学参数的改变会引起发热量的增加<sup>[26-27]</sup>。

正常运行中套管的温度场分布仿真研究已较为深入,然而对于换流变压器阀侧套管中谐波分量的影响研究存在不足。此外,在阀侧套管的生产制造、运输安装和长期运行等过程中不可避免的混入金属颗粒,从而对绝缘介质中的局部温度存在影响;高负荷引起的套管温升使电容心子受热膨胀,在长期热应力的作用下产生形变进而引发介质层开裂。套管内部缺陷容易导致局部热点的出现,目前在套管缺陷对温度场分布的影响方面的研究还较少,有必要进行进一步的深入研究。

文中以环氧树脂浸纸电容式套管为研究对象,在保持温度场变化趋势的基础上简化构建了换流变压器阀侧套管温度场分布仿真计算模型。以载流的中心导杆为主要热源对温度场进行计算,仿真研究叠加电流中谐波含量和谐波频率对套管温升的影响。通过构建金属颗粒缺陷与纹裂缺陷仿真模型,研究了套管内部缺陷对局部温度的影响。文中研究对于设备的绝缘故障诊断具有重要的意义,有助于提高套管长期运行的稳定性。

## 1 换流变压器阀侧套管的模型建立

文中的研究重点在于获得套管内部温度场的分布特性,文中结合±800 kV 环氧树脂浸纸电容式套管实际结构并对其进行合理简化,构建了72.5 kV 换流变压器阀侧套管缩比模型,研究结果可为后续实际72.5 kV 套管的试验研究提供基础支撑。

### 1.1 换流变压器阀侧套管模型

研究无缺陷的换流变压器阀侧套管内部温度场时,需建立套管的温度场仿真模型。考虑到建模难度与仿真运行时间等因素,在不影响温度场分析结果的情况下,通常将套管的结构简化为轴对称结构,因此可采用二维轴对称模型对其进行仿真分析,温度场仿真模型主要包含3部分:套管、空气与变压器油。根据套管外部几何尺寸及内部电容心子、中心导杆结构参数等,采用有限元分析软件建立阀侧套管二维轴对称模型见图1(a)。其中,上下两矩形结构分别为空气与变压器油,空气与变压器油的几何尺寸需要足够大以模拟现实中套管向空气与变压器油的导热过程;套管部分主要包含中心导杆、环氧树脂浸纸电容心子、绝缘外壳以及SF<sub>6</sub>绝缘介质。

由于加工工艺、绝缘劣化等因素,环氧树脂浸纸电容心子中容易掺杂金属颗粒或产生纹裂。由于金属颗粒及纹裂产生位置随机,不具有对称性,在考虑其对于温度场的影响时应采用三维模型进行分析。为保证二维轴对称模型与三维模型具有一致性,采用相同结构参数及材料参数,建立换流变压器阀侧套管三维仿真模型见图1(b)。

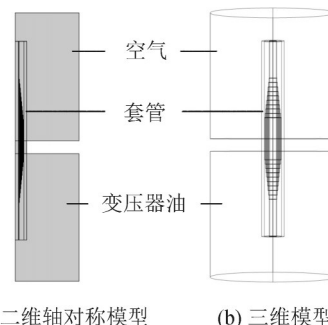


图1 换流变压器阀侧套管仿真模型

Fig. 1 Simulation model of valve side bushing of converter transformer

### 1.2 金属颗粒缺陷与纹裂缺陷模型

现实中金属颗粒与纹裂的形状与位置具有随机性,文中采用简化几何模型对其进行处理。在电容心子内部设置圆柱状缺陷,以缺陷中轴线及套管中轴线所在面为截面,模型缺陷设置示意图见图2。

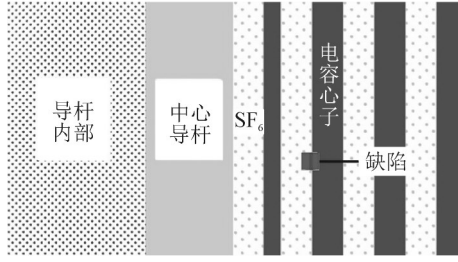


图2 三维仿真模型缺陷示意图

Fig. 2 Defect diagram of three-dimensional simulation model

模拟金属颗粒缺陷时在缺陷处填充金属介质, 模拟纹裂缺陷时在缺陷处填充SF<sub>6</sub>气体介质。

### 1.3 中心导杆热源计算模型

实际运行中由于介质的不同, 换流变压器阀侧套管不同部位产生的热量有所不同, 不同区域的温升随产生热量变化而产生差异。套管的中心导杆承担阀侧电流时产生的焦耳热为换流变压器套管的主要热源之一。仿真研究套管内部温度场分布需要将中心导杆设置为广义热源, 导杆中流过电流转化为热生成率进行设置。

中心导杆处生成焦耳热的计算式为

$$P_1 = I^2 R = \frac{I^2 \rho' l}{[\pi(r_1^2 - r_2^2)]} \quad (1)$$

式(1)中:  $I$  为流过中心导杆电流有效值;  $R$  为中心导杆电阻;  $\rho'$  为中心导杆电阻率;  $l$  为中心导杆长度;  $r_1$ 、 $r_2$  分别为中心导杆的外径及内径。将套管中心导杆的焦耳热转换成热生成率

$$q_v = \frac{P}{[\pi(r_2^2 - r_1^2)L]} \quad (2)$$

$$p = \frac{P}{V} = \frac{I^2 R}{Sl} = \frac{I^2 \rho'}{[\pi(r_1^2 - r_2^2)]^2} \quad (3)$$

式(2)、(3)中:  $q_v$  为单位体积热生成速率;  $p$  为热生成率;  $P$  为热功率;  $V$  为套管中心导杆体积;  $S$  为中心导杆表面积。

在分析含谐波分量的电流对于套管温度场的影响时, 需要将谐波电流对温度场作用效果等效为基波电流, 并将其施加在金属中心导杆上, 中心导杆截面图见图3。

图3中,  $D_1$ 、 $D_2$  分别为中心导杆的外径及内径,  $d_h$  表示第  $h$  次谐波流过中心导杆时, 第  $h$  次谐波电流在集肤效应下渗入导体的深度, 则第  $h$  次谐波电流的等效基波电流为

$$I = \sqrt{\sum_h (I_h^2 \frac{R_h}{R_1})} \quad (4)$$

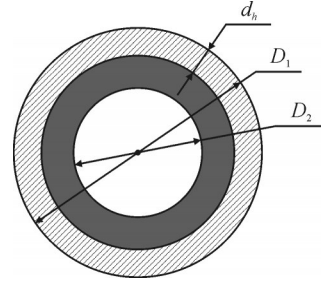


图3 换流变压器阀侧套管截面

Fig. 3 Valve side bushing section of converter transformer

式(4)中:  $I_h$  为第  $h$  次谐波电流有效值;  $R_h$  为第  $h$  次谐波中心导杆的交流电阻值。  $R_h$  的计算式为

$$R_h = \rho' \frac{L}{S_{eh}} \quad (5)$$

式(5)中:  $L$  为套管长度;  $S_{eh}$  为考虑集肤效应时, 第  $h$  次谐波电流流过中心导杆时的横截面积。  $S_{eh}$  的计算式为

$$S_{eh} = \pi \times d_h \times (D_1 - d_h) \quad (6)$$

$d_h$  的计算公式为

$$d_h = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho' \times 1000}{h \times f_0}} \quad (7)$$

式(7)中,  $f_0$  为基频频率 50 Hz。联立式(1)-(7), 可以得出: 考虑集肤效应时, 谐波电流等效的基波电流有效值  $I$  为

$$I = \sqrt{I_1^2 \times \sum_h \left[ \frac{I_h^2}{I_1^2} \times \frac{\sqrt{h} \times (D_1 - d_h)}{D_1 - d_h} \right]} \quad (8)$$

至此, 给定基波电流与谐波电流时, 可通过式(8)计算其等效基波电流有效值, 并根据式(3)将等效基波电流有效值转化为热生成率, 将中心导杆设置为广义热源并施加求得的热生成率进行仿真分析。

### 1.4 参数设置

为方便对仿真计算结果进行后期处理并提高计算求解速度, 文中在不会对温度场的分布趋势产生影响的前提下将绝缘纸的层数减少到10层, 套管的结构参数见表1。

套管与空气直接接触的固体介质外表面会进行热对流传热, 设置换流系数为 28 W/(m<sup>2</sup>·K)。套管外表面与空气接触会向环境进行辐射传热, 定义辐射率为1。正常工作时变压器油顶层油温应不高于 85 ℃, 设置环境温度为 30 ℃, 与变压器阀侧套管底部相接触的部位表面温度设为 65 ℃。设置不同次数、不同有效值的谐波电流进行组合, 计算其热生成率并施加于套管的中心导杆上。金属颗粒(或纹裂)缺陷为半径 0.5 mm、高 1 mm 的圆柱体, 其中轴线距离套管中心线 34.5 mm, 位于第 2 层电容心子表面, 缺陷位置示意图见图4。中心导杆与金属颗粒

表1 换流变压器阀侧套管模型的结构参数

Table 1 Structural parameters of the valve-side bushing model of converter transformer

层数/N	极板长/mm	直径/mm	周长/mm	层厚/mm
中心导杆	1 555	60.0	188.4	5.0
1	965	62.0	194.7	1.0
2	894	65.6	206.0	1.8
3	823	69.2	217.3	1.8
4	752	72.8	228.6	1.8
5	682	76.4	239.9	1.8
6	612	80.0	251.2	1.8
7	542	83.6	262.5	1.8
8	473	87.2	273.8	1.8
9	404	90.8	285.1	1.8
10	335	94.4	296.4	1.8

缺陷材料为铜,比热容为  $390 \text{ J}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$ ;电容心子材料为环氧树脂浸纸,比热容为  $550 \text{ J}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$ ;套管内绝缘介质为  $\text{SF}_6$ ,比热率为0.876。

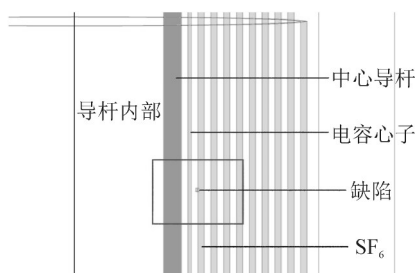


图4 缺陷位置示意图

Fig. 4 Schematic diagram of defect location

## 2 换流变压器阀侧套管的温度场分布特性

### 2.1 无缺陷时套管的温度场分布特性

#### 2.1.1 基波电流下套管的温度分布

换流变压器阀侧套管在  $500 \text{ A}$  电流作用下的温度场分布情况见图5。图5中换流变压器阀侧套管在基波电流单独作用时中心导杆处温度最高,为  $77.389^\circ\text{C}$ ,温度分布呈中间最高,沿径向逐渐降低。中心导杆的散热相对较慢,而套管表面则会与空气或变压器油进行热传导,使中心导杆的温度相较套管表面的温度高。

为进一步研究阀侧套管电容心子由内向外的温度分布特征,得到电容心子的径向温度分布见图6。接近中心导杆处电容心子受热多、散热慢从而导致温度较高,而外侧的电容心子由于热量向变压器油、外部空气以及  $\text{SF}_6$  气体耗散使得其温度较低,故电容心子从套管内侧到外侧的温度逐渐降低。

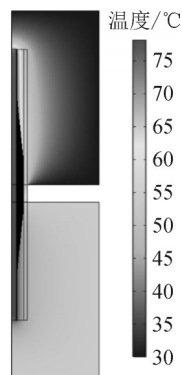


图5 换流变压器阀侧套管温度分布图

Fig. 5 Temperature profile of valve side bushing of converter transformer

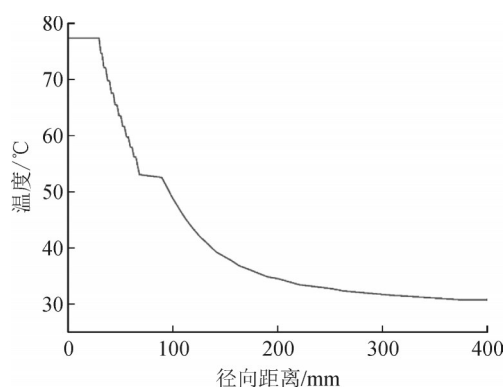


图6 套管径向温度变化曲线

Fig. 6 Radial temperature change curve of bushing

为进一步探究换流变压器阀侧套管内温度最大值与中心导杆上基波电流有效值的关系,改变基波电流有效值进行仿真计算,得到基波电流有效值与套管温度最大值关系见图7。图7中,套管内部温度最大值随基波电流有效值增大而增大,且斜率逐渐上升。

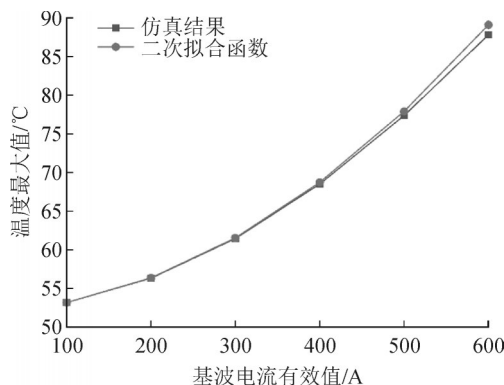


图7 基波电流有效值与套管温度最大值关系图

Fig. 7 Relationship between the effective value of fundamental current and the maximum value of bushing temperature

分别取  $I=100, 200, 300 \text{ A}$ ,并将基波电流有效值与温度最大值的二次拟合结果与仿真结果进行对比,图7中两条曲线具有相似的变化趋势。结合式(3)

可知单独施加基波电流时热生成率与基波电流的平方成正比,因此热生成率与温度最大值呈正相关。

随电流有效值升高,套管内温度最大值略低于二次函数,这是由于在热传导过程中一部分热量耗散入周围环境。基波电流有效越大,导杆中心温度与环境温度差值越大,达到稳态时则需要更多热量耗散入空气与变压器油。但实际运行时电流有效值跨度较小,在实际测量区间内温度最大值与基波电流有效值的关系将更接近二次关系。

### 2.1.2 基波电流叠加谐波电流下套管的温度分布

通过将中心金属中心导杆作为广义热源,计算不同谐波电流时的等效基波电流并计算其热生成率,分别仿真计算不同谐波电流幅值、不同谐波次数情况下套管内部的温度分布。谐波电流幅值与温度关系图见图8。相同谐波频率时,谐波电流有效值越大,套管内部温度最大值越大,且斜率逐渐上升。谐波电流有效值相同时,高次谐波作用下套管内部温度最大值大于低次谐波。

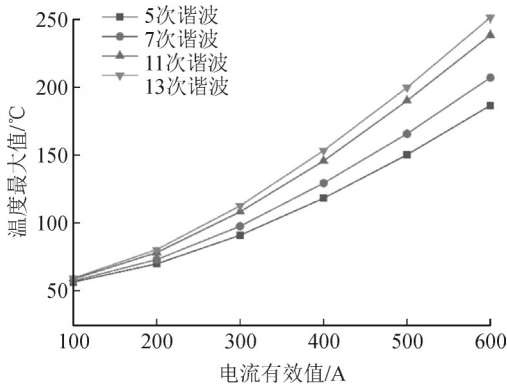


图8 波电流有效值与温度最大值关系图

Fig. 8 Relationship between effective value of harmonic current and maximum temperature

在计算谐波等效基波电流时,由式(7)可知,谐波次数相同时,集肤效应下谐波的渗入导体的深度 $d_h$ 相同;由式(8)可知, $d_h$ 相同时,谐波电流有效值越大,其等效基波电流有效值越大。由于热生成率与等效基波电流平方成正比而套管内部温度最大值与热生成率近似一次关系,则套管内温度最大值与谐波电流有效值近似二次关系。

谐波次数与温度最大值关系图见图9。相同谐波幅值时,谐波频率越大套管内部温度最大值越大,且斜率逐渐下降。

由式(8)可知,谐波次数 $h$ 通过影响 $d_h$ 与 $\sqrt{h}$ 两方面来影响等效基波电流。由式(7)可知, $d_h$ 随谐波次数 $h$ 增大而减小,由于 $D_1 < d_h$ ,则 $D_1 - d_h$ 绝对值的倒数随 $d_h$ 减小而增大。 $\sqrt{h}$ 随 $h$ 增大而增大,两方面均与 $h$ 呈正相关,则谐波电流有效值一定时,等效基波

电流随谐波频率增大而增大。

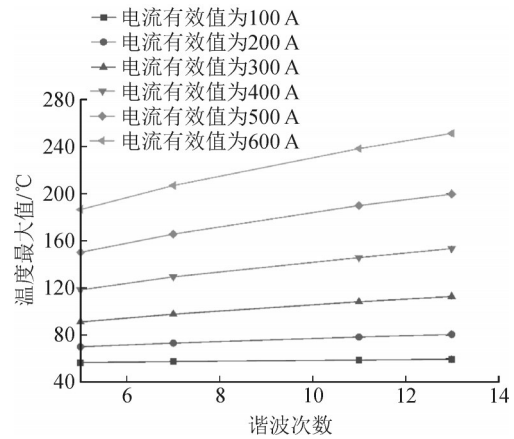


图9 谐波频率与温度最大值关系图

Fig. 9 Relationship between harmonic frequency and maximum temperature

为探究基波电流与谐波电流的关系,分两组进行仿真,使基波单独作用与基波谐波共同作用时的电流有效值之和相等,两组电流设置见表2。分别仿真计算A、B组两种情况下套管内部的温度分布,其温度最大值与电流有效值关系见图10。当基波电流单独作用有效值等于基波加谐波的电流有效值时,基波与谐波共同作用的套管整体温升大于基波单独作用;谐波占比越大,套管内部温度最大值越大。

表2 电流参数设置

Table 2 Current parameter setting

基波电流有效值/A	5次谐波电流有效值/A	基波电流有效值/A
A组		B组
500	130	630
500	100	600
500	70	570
500	40	540
500	10	510

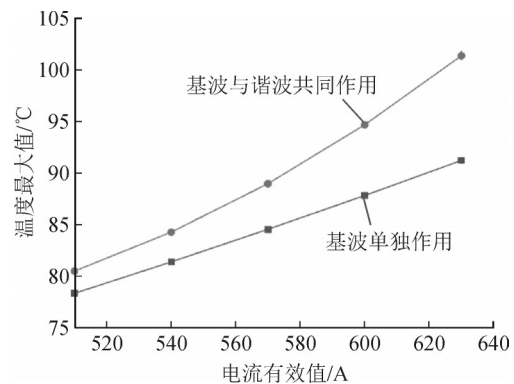


图10 基波单独作用与基波谐波共同作用对比图

Fig. 10 Comparison diagram of single action of fundamental wave and combined action of fundamental-harmonic wave

当基波电流单独作用时,等效基波电流有效值与基波电流有效值相等。由式(4)可得,有效值相同时,谐波的等效基波电流大于基波单独作用。谐波占比增大时,谐波对于温升的影响增大。

综上所述,按照文中所述方式搭建模型,进行套管温度场仿真,温度在套管中心导杆处达到最大,并延套管径向递减。中心导杆温度最大值大多处于70~90℃范围内,随给定基波与谐波电流有效值增大而增大。谐波电流有效值越大,谐波频率越高,套管温升越明显。在实际运行时,应注意中心导杆周围材料由于温升导致的绝缘老化,还应注意由高次谐波电流引起的套管整体温升。

## 2.2 存在缺陷时套管的温度场分布特性

### 2.2.1 金属颗粒对套管温度分布的影响

将金属颗粒放置在换流变阀侧套管模型中,设置基波电流有效值为500 A,5次谐波电流有效值为130 A,沿径向选取一条穿过金属颗粒的截线,截线处绝缘介质中温度分布特征见图11,金属颗粒处温度分布特征见图12。

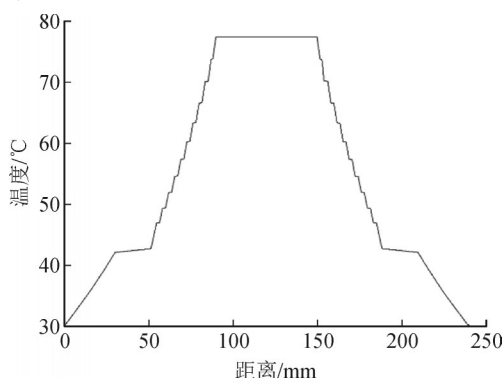


图11 套管截线上温度分布

Fig. 11 Temperature distribution on bushing section

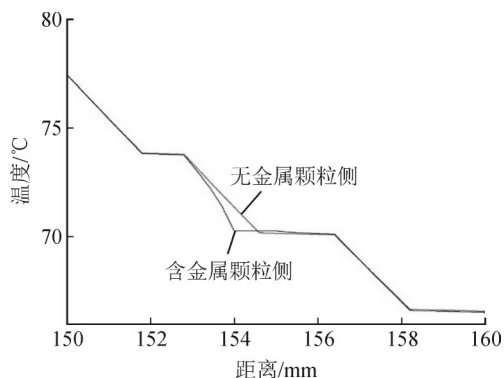


图12 金属颗粒周围温度分布

Fig. 12 Temperature distribution around metal particle

图11、12结果表明,金属颗粒缺陷使绝缘介质中的温度场产生小幅畸变,使金属颗粒周围温度梯度变陡。

金属颗粒附近温度场产生畸变,是由于稳态时

套管内部的温度场分布与材料的恒压热容有关。金属颗粒的材质通常为铜或者铁,铜的比热容为390 J/(kg·℃),而环氧树脂浸纸电容心子的比热容为550 J/(kg·℃),吸收相同热量时金属颗粒温升将低于电容心子。达到稳态时,由于介质温度具有连续性,金属颗粒与电容心子分界面温度不会发生突变且该部分温度较无故障时更低,故金属颗粒处温度梯度将变陡。

### 2.2.2 纹裂对套管温度分布的影响

将纹裂设置在换流变阀侧套管模型中,设置基波电流有效值为500 A,5次谐波电流有效值为130 A,沿径向选取一条穿过纹裂的截线,截线处绝缘介质中的温度分布特征见图13,纹裂处温度分布特征见图14。

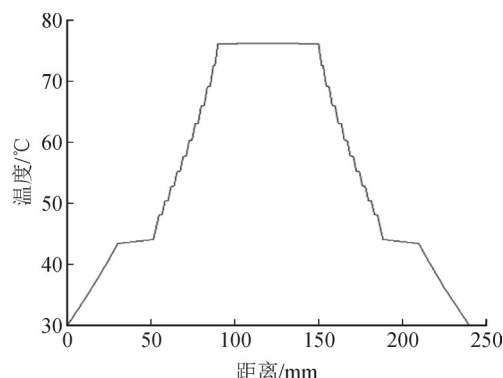


图13 套管截线上温度分布

Fig. 13 Temperature distribution on bushing section

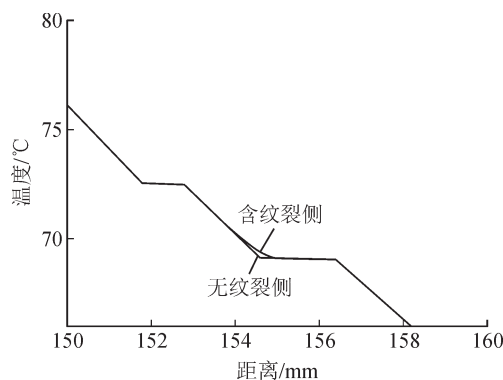


图14 纹裂周围温度分布

Fig. 14 Temperature distribution around crack

图13、14表明,纹裂缺陷使绝缘介质中的温度场产生小幅畸变,使纹裂周围温度梯度缓和。

纹裂附近温度场将产生畸变,这是由于稳态时,套管内部的温度场分布与材料的恒压热容有关。环氧树脂电容心子产生纹裂时,套管内绝缘介质SF<sub>6</sub>将进入纹裂处,该处材料将变为SF<sub>6</sub>。SF<sub>6</sub>的恒压热容为665 J/(kg·℃),而环氧树脂电容心子的比热容为550 J/(kg·℃),吸收相同热量时金属颗粒温升将高于电容心子。达到稳态时,由于介质温度的连续

性,纹裂与电容心子分界面温度不会发生突变且该部分温度较无故障时更高,故金属颗粒处温度梯度将变缓和。

对比两种缺陷下套管内部温度场分布,可以发现二者达到稳态时较正常运行套管有不同的温度变化趋势,金属颗粒处温度将会下降而纹裂处温度会有所上升。

### 3 结论

文中通过有限元仿真,以 $\pm 800$  kV 环氧树脂浸纸电容式套管为研究对象,构建套管内部温度场分布的缩比计算模型。对基波电流与谐波电流作用下套管内部温度场分布进行了研究,同时探讨了两种典型缺陷下套管内温度场的变化,结论如下:

1)正常运行时,换流变压器阀侧套管环氧树脂电容心子温度沿径向逐渐降低。基波电流单独作用时,套管内部温度最大值与基波电流有效值基本呈二次关系,热生成率与温度最大值近似成正比。

2)基波、谐波电流共同作用时,谐波电流有效值越大,谐波电流频率越高,套管内部温度最大值越大;谐波电流占比增大时,其对于温升的影响增大,谐波电流对于套管温升具有显著影响。

3)套管内部存在金属颗粒时,金属颗粒周围温度梯度轻微变陡;套管内部存在纹裂时,纹裂周围温度梯度略有缓和,二者达到稳态时较正常运行套管温度变化有所不同。

综上所述,换流变压器阀侧套管实际运行时,应注意中心导杆周围材料由于温升导致的绝缘老化,还应注意由高次谐波电流引起的套管整体温升,套管内部缺陷的存在对局部温度场存在影响。

### 参考文献:

[1] 肖 淦. 换流变压器出线装置两种设计方案的比较[J]. 高压电器, 2015, 51(7): 195-199.  
XIAO Gan. Comparison between two design schemes of converter transformer's barrier system[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(7): 195-199.

[2] 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.

[3] 张国治, 王 堃, 闫伟阳. 换流变压器液体绝缘中纤维杂质颗粒研究[J]. 高电压技术, 2022, 48(11): 4297-4305.  
ZHANG Guozhi, WANG Kun, YAN Weiyang. Study on fiber impurity particles in liquid insulation of converter transformer[J].

High Voltage Engineering, 2022, 48(11): 4297-4305.

[4] 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 UHVDC bushings[D]. Jinan: Shandong University, 2011.

[5] 杨伟光. 复合电场作用下换流变压器阀侧绕组绝缘特性研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2017.  
YANG Weiguang. Research on insulation characteristics of converter transformer valve side winding under compound electric field[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2017.

[6] 杨在葆, 梁红胜, 刘 永, 等. 换流变压器阀侧交流外施耐压试验故障的分析与判断[J]. 变压器, 2023, 60(5): 42-47.  
YANG Zaibao, LIANG Hongsheng, LIU Yong, et al. Analysis and judgment of failure of AC external pressure test on valve side of converter transformer[J]. Transformer, 2023, 60(5): 42-47.

[7] 赵欣洋, 王玄之, 李启航, 等. 换流变压器内部传热特性和强化传热研究[J]. 变压器, 2023, 60(8): 48-53.  
ZHAO Xinyang, WANG Xuanchi, LI Qihang, et al. Research on internal heat transfer characteristics and heat transfer enhancement of converter transformers[J]. Transformer, 2023, 60(8): 48-53.

[8] 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.

[9] 张施令, 彭宗仁, 刘 鹏, 等. 电热耦合模型应用于高压干式直流套管径向温度和电场分布计算[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(22): 191-200.  
ZHANG Shiling, PENG Zongren, LIU Peng, et al. Electro-thermal coupling model for computation of radial temperature and electric field of resin impregnated paper high voltage direct current bushing[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(22): 191-200.

[10] 于群英, 赵天成, 何秋月, 等. 油浸电容式套管典型故障分析及仿真研究[J]. 变压器, 2020, 57(9): 80-84.  
YU Qunying, ZHAO Tiancheng, HE Qiuyue, et al. Analysis and simulation of typical faults of oil-immersed capacitor bushing[J]. Transformer, 2020, 57(9): 80-84.

[11] 许佐明, 胡 伟, 张施令, 等. 550 kV 环氧浸渍干式油 SF<sub>6</sub> 电容套管温度场分析[J]. 高电压技术, 2012, 38(11): 3087-3092.  
XU Zuoming, HU Wei, ZHANG Shiling, et al. Thermal field analysis for 550 kV epoxy resin-impregnated paper oil SF<sub>6</sub> capacitor bushing[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(11): 3087-3092.

[12] 温 苗, 林 莘, 仲思蒙. 变压器套管传热性能数值模拟和试验验证[J]. 高电压技术, 2016, 42(9): 2956-2961.  
WEN Miao, LIN Xin, ZHONG Simeng. Numerical simulation and experimental study of heat transfer characteristics in transformer bushing[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(9): 2956-2961.

[13] 张冠军, 田 丰, 刘力强, 等. 换流变压器夹件接地电流偏大计算与分析[J]. 变压器, 2023, 60(12): 12-17.  
ZHANG Guanjun, TIAN Feng, LIU Liqiang, et al. Calculation and analysis of converter transformer grounding current mechanism[J].

- Transformer, 2023, 60(12):12-17.
- [14] 谭又博,余小玲,臧英,等.谐波电流对换流变压器绕组损耗及温度分布特性的影响[J].电工技术学报,2023,38(2):542-553.  
TAN Youbo, YU Xiaoling, ZANG Ying, et al. The influence of harmonic current on the loss and temperature distribution characteristics of a converter transformer winding[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(2):542-553.
- [15] 潘志城,刘秀珍,欧松松,等.换流变压器空载合闸过程中气体继电器误动原因分析和抗振性能研究[J].变压器,2023,60(4):55-60.  
PAN Zhicheng, LIU Xiuzhen, OU Songsong, et al. Cause analysis and anti-vibration performance study of gas relay in process of no-load closing of converter transformer[J]. Transformer, 2023, 60(4):55-60.
- [16] 段昊,程林,罗传仙,等.特高压换流变压器局放传输特性仿真研究[J].变压器,2023,60(7):45-50.  
DUAN Hao, CHENG Lin, LUO Chuanxian, et al. Simulation study on partial discharge transmission characteristics of UHV converter transformer[J]. Transformer, 2023, 60(7):45-50.
- [17] 姚雨杭,潘成,唐炬,等.交直流复合电压下流动变压器油中金属微粒运动规律和局部放电特性研究[J].电工技术学报,2021,36(15):3101-3112.  
YAO Yuhang, PAN Cheng, TANG Ju, et al. Motion behaviors and partial discharge characteristics of metallic particles in moving transformer oil under AC/DC composite voltage[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(15):3101-3112.
- [18] 王有元,李熙,李原龙,等.交直流复合电压下铜颗粒在油中的分布及对绝缘油击穿特性的影响[J].电工技术学报,2018,33(23):5581-5590.  
WANG Youyuan, LI Xi, LI Yuanlong, et al. Distribution of copper particle in insulating oil and its influence on breakdown strength of insulating oil under combined AC and DC voltage[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(23):5581-5590.
- [19] 王仲奕,童军心,赵彦珍.高压交直流电容式套管内部电场的分析比较及改进[J].高压电器,2003,39(3):9-11.  
WANG Zhongyi, TONG Junxin, ZHAO Yanzhen. Comparison, analysis and improvement of the electric field distribution in high voltage AC and DC capacitive bushings[J]. High Voltage Apparatus, 2003, 39(3):9-11.
- [20] 钟建英,柴影辉,王赛豪,等.±1100 kV直流纯SF<sub>6</sub>气体绝缘穿墙套管关键技术研究[J].电力建设,2017,38(10):129-137.  
ZHONG Jianying, CHAI Yinghui, WANG Saihao, et al. Key technology of ±1100 kV DC pure SF<sub>6</sub> insulated wall bushing[J]. Electric Power Construction, 2017, 38(10):129-137.
- [21] JYOTHI N S, RAMU T S. Statistical methods for accelerated life testing with particular reference to resin impregnated paper bushings[C]//2012 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference. Shanghai: IEEE, 2012:1-4.
- [22] JYOTHI N S, RAMU T S. A model for the temperature distribution in resin impregnated paper bushings[C]//2012 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference. Shanghai: IEEE, 2012:10-15.
- [23] 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.
- [24] 邓江.干式SF<sub>6</sub>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 SF<sub>6</sub> gas insulated UHVDC bushing[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2020.
- [25] 王青于,杨熙,彭宗仁,等.应用三维电磁-热-流耦合场分析法计算换流变压器干式套管的温度场分布[J].中国电机工程学报,2016,36(22):6269-6275.  
WANG Qingyu, YANG Xi, PENG Zongren, et al. 3D coupled electromagnetic-thermal-fluid method for computation of temperature field of converter transformer RIP bushings[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(22):6269-6275.
- [26] 汪书苹,从伟,周勇,等.变压器油老化对变压器套管温度场的影响[J].变压器,2022,59(3):18-22.  
WANG Shuping, CONG Wei, ZHOU Yong, et al. Effect of aging of transformer oil on temperature field of transformer bushing[J]. Transformer, 2022, 59(3):18-22.
- [27] 纪宏德,吴显德,王海鑫.基于C-prophet的变压器油温预测方法[J].电网与清洁能源,2023,39(3):48-55.  
JI Hongde, WU Xiande, WANG Haixin. New prediction method of transformer oil temperature based on C-prophet[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(3):48-55.
- 高雨婷(1998—),女,硕士研究生,从事电力设备多物理场计算研究(E-mail: cupandtea@yeah.net)。  
李军浩(1980—),男,教授,博士生导师,从事高电压电场试验、智能感知与先进测量技术研究(通信作者)(E-mail: junhaoli@mail.xjtu.edu.cn)。