

受潮对油浸式套管电热场的影响

李 昊¹, 郭晨鋆¹, 马显龙¹, 林 林²

(1. 云南电网有限责任公司电力科学研究院, 昆明 6502172; 2. 哈尔滨理工大学 电气与电子工程学院, 哈尔滨 150080)

摘要:套管受潮后水分在重力作用下积聚于套管尾部, 为研究受潮对油浸式套管电场及温度场分布的影响, 建立了110kV油纸绝缘套管的仿真模型, 仿真了套管在不同受潮程度下套管内电场及温度场分布。结果表明: 套管受潮后导致套管内电场强度和温度升高。受潮条件下套管内最大电场强度与套管尾部油浸纸受潮高度呈线性变化, 且含水率越高, 最大电场强度随油浸纸受潮高度的增大其增幅越大, 但整体上受潮后套管内最大电场强度提升幅度并不显著; 油浸纸中含水率质量分数低于4%时, 套管内最高温度与套管尾端受潮高度呈线性变化, 油浸纸中含水率为5%时, 套管内最高温度与套管尾端受潮高度呈指数变化。受潮后套管内温升严重, 是引发套管尾部放电致使套管损坏的主要原因。

关键词:油浸式套管; 油纸绝缘; 水分; 电场; 热场

DOI:10.15938/j.jhust.2023.04.012

中图分类号: TM411 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2683(2023)04-0103-07

Influence of Moisture on Electric and Thermal Field Distribution of Oil-immersed Bushing

LI Hao¹, GUO Chenjun¹, MA Xianlong¹, LIN Lin²

(1. Electric Power Research Institute, Yunnan Power Grid Co., Ltd, Kunming 650217, China;

2. School of Electrical and electronic Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China)

Abstract: With the action of gravity, moisture accumulates in the tail of the bushing when the bushing is damp. In order to study the influence of moisture on electric field and thermal field distribution of oil-immersed bushing, a simulation model of 110kV oil-immersed bushing was established, and the electric field and temperature field distribution of bushing under different damp conditions were obtained. The results show that the electric field intensity and temperature in the bushing increase when the bushing is damp. The maximum electric field strength increases linearly with wetting height of oil-impregnated paper, and the higher the moisture content is, the greater the increase of the maximum electric field intensity with the wetting height of oil-impregnated paper. On the whole, the maximum electric field strength isn't significantly increased after bushing wetted. When the moisture content in oil-immersed paper is less than 4%, the maximum temperature in the bushing changes linearly with wetting height of insulating paper; when the moisture content is 5%, the maximum temperature in the bushing increases exponentially with wetting height of oil-impregnated paper. The temperature rises seriously under damp conditions, which is the main reason for the discharge and damage of bushing.

Keywords: oil-immersed bushing; oil-paper insulation; moisture; electric field; thermal field

收稿日期: 2022-04-01

基金项目: 国家重点研发计划(2020YFB2009300).

作者简介: 李 昊(1990—)男, 工程师;

郭晨鋆(1988—)男, 高级工程师.

通信作者: 林 林(1988—)女, 博士, 讲师, E-mail: linlin_hrbust.edu.cn.

0 引 言

高压套管是一种特殊结构的绝缘子,当高压导体穿过电位不同的物体时需要用到高压套管,高压套管起到绝缘和机械支撑作用^[1]。作为电力系统中的关键结构部件,其安全可靠运行直接影响电力系统的稳定性。

据统计,油浸电容式套管的使用比例在全世界变压器套管中高达 69%^[2],而在油浸电容式套管使用中,由于地震造成密封件移位、密封结构不合理、密封材料失效、现场取油操作不规范造成油枕密封螺栓紧固不到位等原因,会导致水气进入套管内部使其受潮,进而降低套管的绝缘性引发绝缘故障^[3-6]。如 2005 年灵宝换流站 033B 换流变压器 C 相网侧套管因密封圈失效致使积水渗入套管内腔,重力作用下水分积聚于套管尾部,主绝缘能力下降,引发电弧放电最终导致套管外部瓷屏爆裂^[7]。由于绝缘纸的亲水性远高于绝缘油,解体受潮后的套管发现,套管内绝缘纸下端因受潮而变色,经检测只有少量水气进入绝缘油,大部分水气被绝缘纸吸收,这是由于绝缘纸中的纤维素分子包含极性基团可通过氢键作用吸附水分,使绝缘纸的亲水性远高于绝缘油^[8]。

绝缘纸受潮后,其电性能参数将发生变化,进一步畸变套管内部电场和热场分布,引发放电事故。因此,本文对受潮后套管的电场和温度场分布进行了仿真分析,探究了不同受潮下套管内电场与热场分布。

1 电场有限元计算原理

电场的计算基于麦克斯韦方程组,准静态场的问题可用如下方程描述^[9]:

$$\nabla \times E \approx 0 \quad (1)$$

$$\nabla \times H = J_c + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (2)$$

$$\nabla \cdot D = \rho \quad (3)$$

式中: E 为电场强度,单位 V/m; H 为磁场强度,单位 A/m; D 为电位移矢量,单位 C/m²; J_c 为传导电流密度,单位 A/m²; ρ 为自由电荷密度,单位 C/m³; ∇ 为哈密顿算子。

对于各向同性的电介质,电参量间存在以下关系:

$$D = \varepsilon E \quad (4)$$

$$J_c = \gamma E \quad (5)$$

式中: ε 为电介质的介电常数,单位 F/m; γ 为电导率,单位 S/m。

外界激励下介质中产生传导电流和位移电流,由式(2)和式(4)可知,位移电流可表示为

$$J_d = \partial(\varepsilon E)/\partial t = j\omega\varepsilon E \quad (6)$$

结合式(5)和(6)可得到:

$$J_c/J_d = \gamma/j\omega\varepsilon \quad (7)$$

由于绝缘的电导率 γ 远小于相对介电常数 ε ,则在交流电压下可忽略传导电流影响。电场的分布仅由绝缘材料的相对介电常数决定。

2 套管内热源计算原理

套管上施加稳定的交流电压和通入交流电流,在电压和电流的共同作用下,套管内部会产生两种热源。

第 1 种热源为套管内部金属区域产生的焦耳损耗,取金属微元的长度为 dl ,截面面积为 S_1 ,则对应产生焦耳热为

$$\Delta p = I^2 R = (JS_1)^2 \rho \frac{dl}{S_1} = J^2 \rho dV \quad (8)$$

式中, ρ 为材料电阻率; J 为单元电流密度。

则套管中各金属部位对应的焦耳损耗可由下式计算得出:

$$P_1 = \int_V \rho J^2 dV \quad (9)$$

第 2 种热源为套管内部绝缘区域产生的介质发热,在套管上施加交流电压后,套管及套管外部区域会产生交变电场,在交变电场的作用下产生极化损耗。交变电场的作用下介质的等值电路如图 1 所示^[10]。

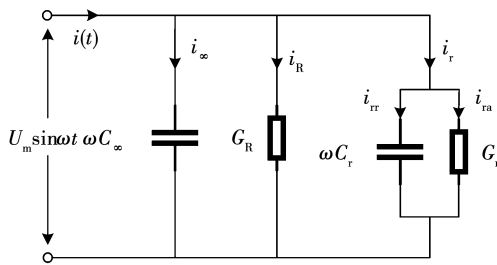


图 1 交流电压下电介质的等效电路

Fig. 1 Equivalent circuit of dielectric under AC voltage

图 1 中电介质中的电导和电容满足以下关系式:

$$\left. \begin{aligned} G_R &= \gamma \frac{S}{d} \\ C_\infty &= \varepsilon_0 \frac{\varepsilon_\infty S}{d} \\ G_r &= \varepsilon_0 \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + (\omega\tau)^2} \omega^2 \tau \frac{S}{d} \\ C_r &= \varepsilon_0 \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + (\omega\tau)^2} \frac{S}{d} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

式中, ε_∞ 为光频介电常数; ε_s 为静态介电常数; ε_0 为真空介电常数; τ 为松弛时间; ω 为电源角频率; S 为电介质材料面积; d 为电介质材料厚度。

则交变电压下介质的单位体积介质损耗为

$$p = \frac{(G_R + G_r) U^2}{V} = \left[\gamma + \varepsilon_0 \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + (\omega\tau)^2} \omega^2 \tau \right] E^2 \quad (11)$$

介质损耗角正切表示为

$$\begin{aligned} \tan \delta &= \frac{I_a}{I_r} = \frac{(G_R + G_r) U}{(\omega C_\infty + \omega C_r) U} = \\ &= \frac{\left[\gamma + \varepsilon_0 \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + (\omega\tau)^2} \omega^2 \tau \right]}{\omega \varepsilon_0 \left[\varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + (\omega\tau)^2} \right]} \end{aligned} \quad (12)$$

交流电场下忽略电导的影响, 低频下 $\omega\tau \ll 1$, 则式(11)和(12)可化简:

$$p = \left(\gamma + \varepsilon_0 \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{\tau} \right) E^2 \approx \varepsilon_0 \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{\tau} E^2 \quad (13)$$

$$\tan \delta \approx \frac{\gamma + \varepsilon_0 \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{\tau}}{\omega \varepsilon_0 \varepsilon} \approx \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{\omega \varepsilon \tau} \quad (14)$$

结合式(13)和(14)可得到:

$$p = \omega \varepsilon_0 \varepsilon \tan \delta E^2 \quad (15)$$

根据下式可求出各绝缘介质中损耗的发热量^[11]:

$$P_2 = \int_V 2\pi f \varepsilon_0 \varepsilon_r E^2 \tan \delta dV \quad (16)$$

式中 f 为电源频率。

3 仿真模型建立

油浸式套管为全密封结构, 由导杆、电容芯子、上瓷套、下瓷套, 油枕等结构连接组成, 连接处均采用优质耐油密封圈及合理的密封结构。油浸式套管主绝缘为绝缘纸和铝箔均压极板组成的油纸电容芯子。

本文采用 COMSOL 软件建立了 110kV 油浸式

套管的仿真模型, 由于套管是以导电杆为中心严格对称的, 为计算方便, 选取 1/2 套管结构建立二维轴对称仿真模型, 为还原套管实际运行状态并使计算结果准确, 将空气域与油箱计算区域设置为矩形, 油纸绝缘套管中实际的极板数为 26 层, 本次建模中电极板简化为 13 层。模型中套管总长为 2 627 mm, 上、下瓷套长度 1 140 mm、330 mm, 大伞裙直径为 270 mm; 导杆长为 2 363 mm、外径为 23 mm。空气域和油箱的长度分别为 1 690 mm、1 080 mm, 宽度均为 230 mm; 油浸套管结构及所建立套管仿真模型如图 2 所示。为分析受潮高度对套管电场及温度场分布的影响, 本文设置油浸纸受潮高度分别为 10 cm、20 cm、30 cm 和 40 cm。

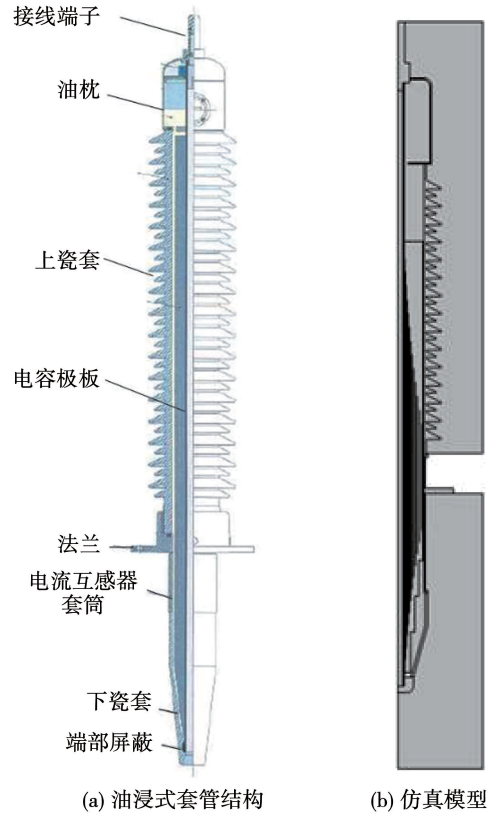


图2 油浸式套管结构及仿真模型

Fig. 2 Schematic diagram of oil-immersed bushing and Simulation model

4 电场仿真分析

交流电压下电场分布取决于材料的相对介电常数, 研究表明不同含水率下油浸纸的相对介电常数随温度变化较小。因此, 油浸纸的相对介电常数仅与含水率有关, 其对应关系如图 3 所示^[12-13], 油浸

纸干燥时对应的含水率质量分数为 0.5%,且由文[14]可知,温度为 100℃ 以下时,绝缘纸的饱和含水率超过 4%,因此,本文选定最大含水率时对应的水分质量分数为 5%。而变压器油的含水率对其介电常数的影响作用较小,取变压器油的相对介电常数值为恒定值^[15]。

在进行电场分布求解时,套管模型中绝缘材料的相对介电常数如表 1 所示。电场计算过程中由于第 2 类边界条件自动满足,故本文仅设定第 1 类边界条件,其中,导电杆、接线端子及端部屏蔽施加 63 kV 的相电压;油箱、法兰、最外层极板施加为零电位;电容芯子内部的极板设为悬浮电位。

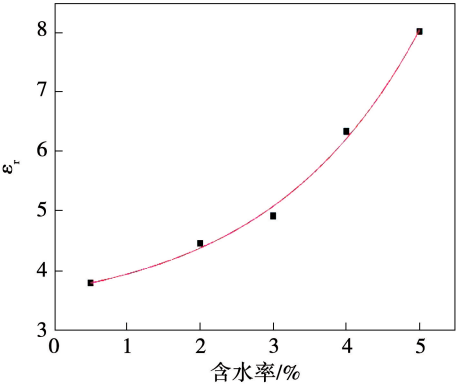


图 3 油浸纸的相对介电常数与含水率的关系
ig. 3 Relation between relative permittivity and moisture content of oil-impregnated paper

表 1 套管中材料的相对介电常数

Tab. 1 Relative permittivity of bushing materials			
材料	空气	瓷套	变压器油
相对介电常数	1	6	2.2

通过仿真得到套管的电场分布如图 4 所示。由图可知,在电容芯子中铝箔的作用下,电容芯子和法兰部位的电位分布比较均匀,最大电场出现在最外层极板顶端处,油浸纸未受潮条件下,套管内最大电场强度为 10.5 kV/mm,随着油浸纸受潮程度的增大,套管内最大电场强度增大,但提升幅度并不显著。油浸纸含水率为 5%、受潮高度为 40 cm 时,套管内最大电场强度为未受潮条件下套管内最大电场强度的 1.05 倍。

不同受潮条件下套管内最大电场强度变化如图 5 所示。从图 4 中套管内最大电场的变化趋势可知,不同含水率下,套管内最大电场强度与套管尾部

绝缘纸受潮高度呈线性变化,且含水率越高,最大电场强度随油浸纸受潮高度的增大其增幅越大。

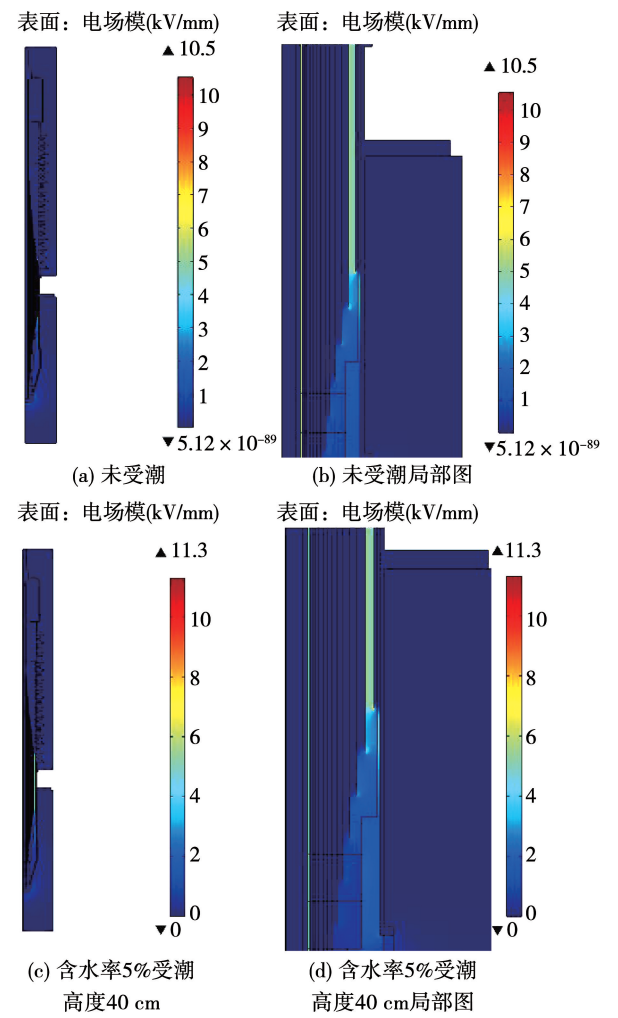


图 4 不同受潮条件下套管内电场分布图
Fig. 4 Electric field distribution of bushing under different damp conditions

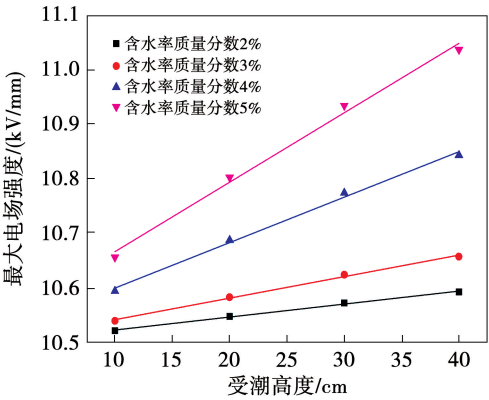


图 5 不同受潮条件下的套管内最大电场强度
Fig. 5 Maximum electric field strength of bushing under different damp condition

5 温度场仿真分析

根据热源形式油浸式套管的热场计算流程如图 6 所示。

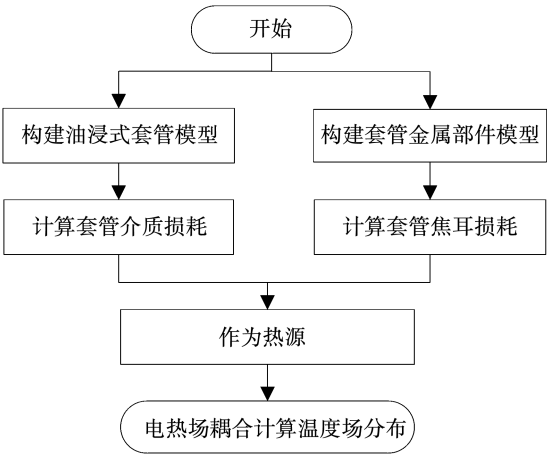


图 6 热场计算流程
Fig. 6 Calculation process of thermal field

计算各区域焦耳损耗时,建立金属区域的仿真模型,在三维涡流场中,首先设置通入套管中的工频电流为 630 A,套管中材料的电磁参数如表 2 所示^[16-18]。

表 2 套管材料电磁参数

Tab. 2 Electromagnetic parameters of bushing materials			
材料	位置	相对磁导率	电阻率 ρ / ($\mu\Omega\cdot\text{m}$)
黄铜	导杆	1	0.010 5
碳钢	油枕、法兰出线装置	1	0.044 6

仿真得到套管中电流密度如图 7 所示。图 7 导杆中的电流密度最高。

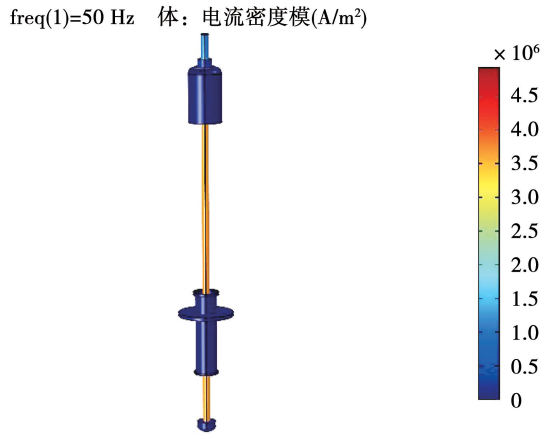


图 7 套管电流密度分布图
Fig. 7 Current density distribution of bushing

基于式(9),经仿真计算可知,导体区域的总损耗为 117.92 W,其中导电杆的焦耳损耗最大为 110.49 W,上、下出线装置和油枕部位的焦耳损耗分别为 6.99 W 和 0.41 W,油枕损耗为 0.03 W。

绝缘材料的介质损耗基于式(16),计算中变压器油的介质损耗因数为 0.005,瓷套的介质损耗因数为 0.003 8,油浸纸的介质损耗因数与含水量有关,不同温度下油浸纸的介质损耗因数与含水量的对应关系如图 8 所示。由于运行条件下电容芯子的温度较高,故本模型中选取温度为 70℃ 下油浸纸的介质损耗因数进行计算^[14]。

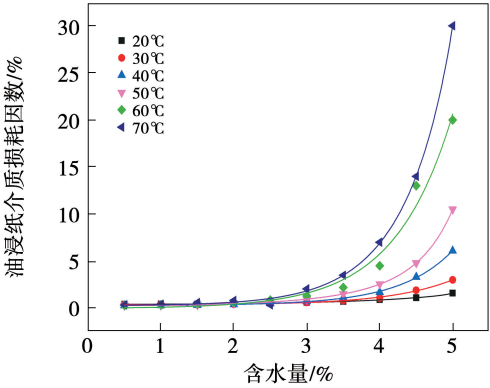


图 8 油浸纸的介质损耗因数与含水率的关系
Fig. 8 Relationship between the dielectric loss factor and moisture content of oil-impregnated paper

将计算得到的介质损耗和涡流场中计算的焦耳损耗作为热源加入到二维轴对称温度场模型中,选择空气与变压器油域为等温域,设置空气温度和变压器油温分别为 20℃ 和 70℃。传热方式主要为热传递和热对流,忽略热辐射的影响。

套管内空气、绝缘油、铝、铜及碳钢的热性能参数为 COMSOL 材料库中提供数据,油浸纸和瓷套的热性能参数如表 3 所示^[19-21]。

表 3 油浸纸和瓷套的热性能参数

Tab. 3 Thermal performance parameters of oil impregnated paper and porcelain sleeve			
材料	常压热容/ (J/(kg·m))	导热系数/ (W/(m·K))	密度/ (kg/m³)
油浸纸	1 300	0.26	900
瓷套	1 085	1.5	2 700

通过仿真得到套管未受潮和受潮最严重条件下的温度场分布如图 9 所示。由图 9 可知,套管内温度最高温度出现在电容芯子中下部,受潮条件下套管内温度升高,含水率为 5%、受潮高度为 40 cm 时,

套管内最高温度为 108.13°C , 比于未受潮情况下套管内的最高温度提高了 16.57°C , 温度的大幅提升将缩短绝缘的使用寿命, 在此受潮条件下管内温度已超过油纸绝缘的耐受温度 (105°C), 将会引发套管故障。

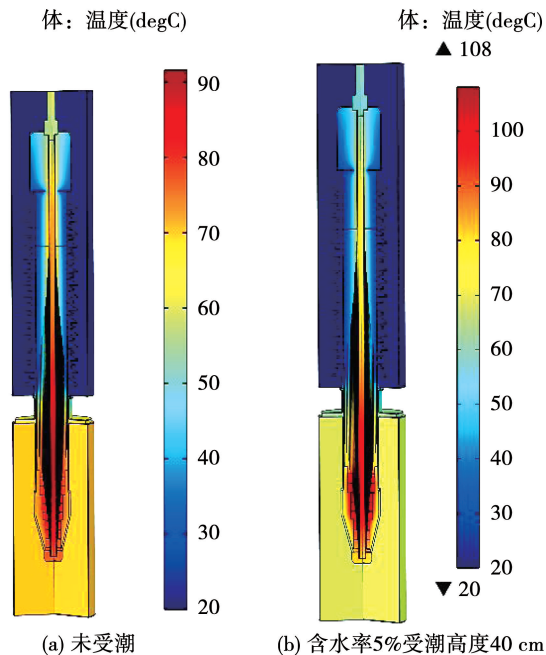


图9 套管内温度场分布图

Fig. 9 Thermal field distribution of bushing

不同受潮条件下套管内的最高温度变化如图10所示。

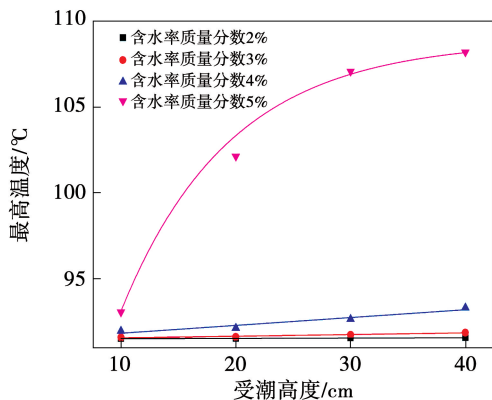


图10 不同受潮条件下套管内最高温度

Fig. 10 Maximum temperature of bushing under different damp conditions

由图10可知, 油浸纸含水率质量分数为 $2\% \sim 4\%$ 时, 套管内最高温度与套管尾端受潮高度呈线性变化, 油浸纸含水率在 $2\% \sim 4\%$ 时, 套管内最高温度相比于未受潮时温升不超过 3°C ; 油浸纸含水率质量分数为 5% 时, 套管内最高温度与套管尾端受潮高度呈指数变化。且从油浸纸受潮程度来看, 油

浸纸内部含水率为 5% 时, 随着套管尾端受潮高度的增大, 套管内温升增幅显著, 受潮高度为 20 cm 时套管内最高温度已达 102.12°C , 高温会使绝缘纸内水分气化, 绝缘进一步下降产生局部放电, 放电产生更多气体, 最终导致套管尾端瓷套爆裂, 套管损坏。

6 结 论

本文对不同受潮条件下的套管内部电场与温度场分布开展了研究, 得到以下结论:

1) 受潮条件下套管内最大电场强度与套管尾部绝缘纸受潮高度呈线性变化, 且含水率越高, 最大电场强度随受潮高度的增大其增幅越大。

2) 套管内最高温度位于电容芯子中下部, 油浸纸含水率质量分数为 $2\% \sim 4\%$ 时, 套管内最高温度与套管尾端受潮高度呈线性变化; 油浸纸含水率质量分数为 5% 时, 套管内最高温度与套管尾端受潮高度呈指数变化。

3) 套管受潮后, 套管内温度变化更为显著, 高温引起的水分气化及绝缘失效为套管放电导致瓷套爆裂损坏的重要诱因。

参 考 文 献:

- [1] 张沛红, 单涛, 时亚娟, 等. 变压器高压套管均压球区域电场分析及其结构优化[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2012, 17(6): 47.
ZHANG Peihong, SHAN Tao, SHI Yajuan, et al. The Electric Field Analysis and Structural Optimization of High Voltage Bushing Stress Distributor of Transformer[J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2012, 17(6): 47.
- [2] 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.
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.
- [3] 齐波, 戴佳民, 卓然, 等. 潮气侵入对油浸纸套管电气特性的影响[J]. 高电压技术, 2017, 43(8): 2592.
QI Bo, DAI Quanmin, ZHUO Ran, et al. Influence of The Ingress of Moisture on Electric Characteristic of Oil-immigrated Paper Bushings[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(8): 2592.
- [4] 张大宁, 白帆, 牛朝滨, 等. 不同受潮类型下油纸绝缘套管的频域介电谱特性[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(16): 4942.
ZHANG Daning, BAI Fan, NIU Chaobin, et al. Frequency Domain Spectroscopy Characteristics of Oil-paper

- Insulated Bushings Under Different Damp Types[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(16): 4942.
- [5] 杨峰. 基于介电等值模型的套管受潮状态分析及热电耦合仿真研究[D]. 重庆:重庆大学, 2019.
- [6] 戴佳民, 齐波, 李成榕, 等. 三种工况对变压器套管潮气入侵绝缘特性的影响[J]. 高电压技术, 2018, 44(2): 554.
- DAI Quanmin, Qi Bo, Li Chengrong, et al. Influence of Moisture Ingress on the Insulation Characteristic in Oil-immigrated Paper Bushings under Three Test Condition [J]. High Voltage Engineering, 2017, 44(2): 554.
- [7] 李应文, 徐兵, 吴力娜. 换流变压器套管受潮分析及预防措施[J]. 变压器, 2008, 45(4): 71.
- LI Yingwen, XU Bing, WU Lina. Wetted Analysis and Preventive Measures of Bushing in Converter Transformer [J]. Transformer, 2008, 45(4): 71.
- [8] 戴佳民, 齐波, 李成榕, 等. 油浸纸套管尾部受潮故障模拟及早期特征[J]. 电工技术学报, 2018, 33(11): 2613.
- DAI Quanmin, QI Bo, LI Chengrong, et al. Fault Simulation and Early Characteristics of Tail Moisture in Oil-Immigrated Paper Bushing [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(11): 2613.
- [9] 杨继业, 杨晓峥, 马强, 等. ± 800 kV 换流变压器套管电场分布三维仿真研究[J]. 水电能源科学, 2018, 36(9): 188.
- YANG Jiye, YANG Xiaozheng, MA Qiang, et al. The 3DSimulation of Electric Field Distribution for ± 800 kV Converter Transformer Bushing[J]. Water Resources and Power, 2018, 36(9): 188.
- [10] 陈季丹, 刘子玉. 电介质物理学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1982:149.
- [11] 张施令, 彭宗仁, 吴昊. ± 800 kV 换流变压器阀侧干式套管的损耗分析[J]. 电网技术, 2014, 38(7): 1758.
- ZHANG Shiling, PENG Zongren, WU Hao. Analysis on Power Loss of Valve-side RIP Bushing for ± 800 kV Converter Transformer[J]. Power System Technology, 2014, 38(7): 1758.
- [12] 潘刚. 受潮状态下油浸式套管的电热场研究[D]. 成都:西南交通大学, 2018.
- [13] 池明赫. 运行条件对复合电场下油纸绝缘击穿特性的影响[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学, 2015.
- [14] 吴晓东, 李传才. 以纸含水量变化判断大型变压器受潮的探讨[J]. 浙江电力, 2007(2): 66.
- WU Xiaodong, LI Chuancui. Discussion on Judging Dampness of Large-scale Transformer by Diversification of Paper Water Content[J]. Zhejiang Electric Power, 2007(2): 66.
- [15] 贾海峰, 刘骥, 张明泽, 等. 微水含量对老化后变压器油介电性能影响分析[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2020, 25(6): 70.
- JIA Haifeng, LIU Ji, ZHANG Mingze, et al. Analysis of Influence of Moisture Content On Dielectric Properties of Transformer Oil after Aging[J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2020, 25(6): 70.
- [16] 冀田. 油纸电容式套管电场及温度场分析[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2015.
- [17] 许佐明, 胡伟, 张施令, 等. 550 kV 环氧浸渍干式油-SF₆ 电容套管温度场分析[J]. 高电压技术, 2012, 38(11): 3087.
- XU Zuoming, HU Wei, ZHANG Shiling, et al. Thermal Field Analysis for 550 kV Epoxy Resin-impregnated Paper Oil-SF₆ Capacitor Bushing[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(11): 3087.
- [18] 赵轩宇, 陈庆国, 杨洪达. 纳米氮化硼改性绝缘纸板在 ± 800 kV 干式套管中的电场仿真分析[J]. 高电压技术, 2021, 47(9): 3163.
- ZHAO Xuanyu, CHEN Qingguo, YANG Hongda. Simulation Analysis of Electric Field of Nanometer Boron Nitride Modified Insulating Paper-board in ± 800 kV Dry-type Bushing[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(9): 3163.
- [19] 傅明利, 梁虎成, 杜伯学, 等. 非线性电导环氧树脂复合材料在 ± 600 kV 换流变压器套管中的应用仿真研究[J]. 高电压技术, 2019, 45(5): 1476.
- FU Mingli, LIANG Hucheng, DU Boxue, et al. Simulation Research on the Application of Epoxy Resinwith Non-linear Conductivity in the ± 600 kV Converter Transformer Bushing[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(5): 1476.
- [20] 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.
- 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.
- [21] 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.
- WANG Qingyu, YANG Xi, PENG Zongren, et al. 3DCoupled Electromagnetic-thermal-fluid Method for Computation of Temperature Field of Converter Transformer RIP Bushings[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(22): 6269.