

绝缘交界面气隙缺陷及其受潮状态对 T 型电缆接头电热场的影响研究

刘 刚, 徐 庆, 石聪聪, 张圆明, 黄华峰

(国网江苏省电力有限公司宿迁供电公司, 江苏 宿迁 223800)

摘 要: 本文建立了实际 10 kV T 型电缆终端接头多物理场有限元模型, 研究了 T 型电缆终端接头在绝缘交界面存在气隙缺陷下的电场及温度场分布特性, 分析了缺陷条件下的电场、温度场幅值变化规律, 提出可有效反映 T 型电缆终端接头气隙缺陷的特征量及监测位置。结果表明: T 型电缆终端接头不同程度气隙缺陷对其交界面处的电场分布特性有一定的影响, 但是其他典型位置处的电场、温度场幅值变化不明显; 在气隙受潮的情况下气隙缺陷处会达到临界击穿, 此时法兰底座、箱体上表面的电场幅值增量可达 20%, 而且温升可达约 15°C。在实际工程中, 可通过监测法兰底座、箱体上表面的电场幅值增量以及温升, 来反映 T 型电缆终端接头局部击穿放电的潜在临界隐患。

关键词: 环网柜; T 型电缆终端; 绝缘交界面气隙; 电热耦合; 有限元

中图分类号: TM247 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-9239(2022)09-0107-09

DOI: 10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2022.09.018

Effect of Air Gap Defect at Insulation Interface and Its Damping State on Electrothermal Field of T-type Cable Joint

LIU Gang, XU Qing, SHI Congcong, ZHANG Yuanming, HUANG Huafeng

(Suqian Power Supply Company, State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Suqian 223800, China)

Abstract: In this paper, a multi-physics finite element model of actual 10 kV T-type cable terminal joint was established. The electric field and temperature field distribution characteristics of the T-type cable terminal joint with air gap defect at insulation interface were studied, and the change laws of electric field and temperature field amplitudes were analyzed, then the characteristic quantities reflecting the air gap defect of T-type cable terminal joints effectively and the monitored position were proposed. The results show that different degrees of air gap defects in T-type cable terminal joints have a certain impact on the electric field distribution characteristics at the interface, but the electric field and temperature field amplitudes at other typical positions do not change significantly. The air gap defect position would near breakdown under air gap damping condition, at this time, the increase of electric field amplitude on flange base and upper surface of box can reach 20%, and the temperature rise can reach 15°C. In actual engineering, the potential critical hazard of partial breakdown discharge in T-type cable terminal joint can be reflected by monitoring the increase of electric field amplitude and temperature rise of the flange base and the upper surface of box.

Key words: ring network cabinet; T-type cable terminal; air gap at insulation interface; electrothermal coupling; finite element

收稿日期: 2021-09-03 修回日期: 2021-10-28

基金项目: 国网江苏省电力有限公司科技项目(J2020143)

作者简介: 刘刚(1988-), 男(汉族), 江苏宿迁人, 工程师, 研究方向为智能配网运维检修技术; 黄华峰(1978-), 男(汉族), 江苏宿迁人, 高级工程师, 研究方向为配电网运维与检修。

0 引言

目前我国大部分城区新建配电线路多采用配电全电缆网络, 已有配电架空线路也在逐步改造过渡为架空电缆混合网^[1]。其中, 环网柜因具有维护工作量小、安装方式灵活、尺寸小等优点, 在市辖区

配电网中得到了广泛的应用^[2]。然而环网柜运行时仓盖封闭,加上其数量大、安装位置繁多,不便于巡视检查,给运维检修工作带来了很大的难度^[3]。

近年来,由于巡检不及时且无科学有效的在线监测手段,我国电网辖区发生了多起由环网柜 T 型电缆终端接头温度过热、后堵盖脱落、爬电而导致的严重劣化烧蚀故障,从而造成相间短路、单相接地等电网故障^[4],严重时甚至引发环网柜灼烧、局部区域停电,给电力系统的安全稳定运行造成不利影响。究其原因,大部分是由绝缘交界面气隙缺陷导致^[4-5]。

环网柜空间狭小、不利于散热,T 型终端接头施工工艺复杂且质量难以保证,造成了以下问题:①长期运行在强电场、弱对流的环境下,接头内部热胀冷缩、表面结垢、氧化或腐蚀,导致绝缘交界面松动接触不良、出现气隙,引起发热、漏电,加剧电缆终端绝缘层的劣化速度^[5-6];②由于生产和安装的问题,部分环网柜电缆接头处本身就存在一定缺陷,导致接触电阻、弯曲应力过大,在长期的热老化和机械老化作用下,接头根部松动开裂,产生气隙,最终导致内外屏蔽层击穿^[7-8]。

研究电缆绝缘及其接头附件在复杂环境下的电场、温度场分布特性,可以揭示其故障缺陷的形成机理和发展过程,为电缆接头故障预防及抑制提供依据,为优化绝缘材料配方、设计安装结构、开展故障检测及诊断提供重要的理论支撑。为此,学者们开展了一定的研究^[9-15],文献[12]利用有限元仿真研究了无应力管、有空气隙、有金属微粒附着及钢针扎入 4 种缺陷下的电缆头电场分布,结果发现电缆终端电场分布受应力管影响较大,金属微粒会导致明显的局部电场畸变,针尖缺陷的尖端处会因电场急剧增大而导致绝缘放电。文献[13]考虑了空间电荷积累及直流配网拓扑结构,仿真分析了 10 kV 三芯绝缘电缆截面的温度场和电场分布,发现电缆绝缘层上的电场强度沿半径方向逐渐降低,电场强度的最大值出现在导体表面,而当电缆绝缘温差大于 10℃ 时,电场分布发生反转,电场强度最大值出现在绝缘外表面。文献[14]考虑了直流电压、直流叠加冲击电压的作用,仿真分析了不同温度梯度作用下高压直流电缆接头的电场分布,得到其最大场强随着温度的升高而增大,而高温、高电场时电缆接头会出现局部电场畸变。文献[15]仿真分析了不同导电性硅橡胶下的 XLPE 电缆中间接头电场分布

特性,提出利用电导率较大的非线性硅橡胶基复合材料作为中间接头绝缘材料,可以改善电缆中间接头的电场分布。

上述研究对掌握高压电缆运行特性及故障机制有参考意义。但是目前针对 T 型电缆终端接头绝缘交界面缺陷特性的研究较少。为获得 T 型电缆终端劣化的电场和温度场特性,进而提出合理有效的监测识别手段,本研究建立环网柜用 10 kV T 型电缆终端接头有限元模型,研究绝缘交界面典型气隙缺陷下,T 型终端接头的电场、温度场幅值变化规律及其在电缆室不同位置处的分布特性,并基于此提出可有效反映 T 型电缆终端接头劣化的特征量及监测位置。

1 T 型电缆终端接头多物理场仿真模型

1.1 有限元计算原理

研究 T 型电缆终端接头的电场与温度场分布时,运行工况为 50 Hz 工频电压,实际运行中,传导电流密度为位移电流密度的 10⁷ 倍,因此位移电流可以忽略不计。对于 T 型电缆终端接头,沿电缆终端接头劣化界面的电场和电位分布受位移电流的影响较大。因此,对于电场的计算,本研究选取准静电场计算模型。

由静电场原理,T 型电缆终端接头整体电位分布满足泊松方程,如式(1)所示。当电场中无自由移动的空间电荷时, ρ (静电场中任意一点的电荷密度)为 0,拉普拉斯方程成立,如式(2)所示。

$$\nabla^2 \varphi = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = -\frac{\rho}{\varepsilon} \quad (1)$$

$$\nabla^2 \varphi = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0 \quad (2)$$

式(1)~(2)中: ε 为介质的介电常数; φ 为电位; ∇^2 为拉普拉斯算子。

求解 T 型电缆终端接头的整体电场分布时,静电场变分公式和计算域单元顶点的电位($F^e(\varphi^e)$)表达式分别为式(3)和式(4)所示。

$$F(\varphi) = \int_V \frac{\varepsilon}{2} \left[\left(\frac{\partial \varphi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial z} \right)^2 \right] dV \quad (3)$$

$$F^e(\varphi^e) = \int_{J_e} \frac{\varepsilon}{2} \left[\left(\frac{\partial \varphi^e}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \varphi^e}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial \varphi^e}{\partial z} \right)^2 \right] dV_e \quad (4)$$

式(3)~(4)中: e 表示有限元计算单元; J 表示计算场域; V 表示计算曲面包围的空间体积。

$F^e(\varphi^e)$ 对 φ^e 导数为 0, 则可以得到式(5)。进一步表示为矩阵的形式, 如式(6)所示。

$$\frac{\partial F(\varphi)}{\partial \varphi} = \sum_{e=1}^n \frac{\partial F^e(\varphi^e)}{\partial \varphi^e} = 0 \quad (5)$$

$$[K][\varphi] = [0] \quad (6)$$

式(6)中, $[K]$ 为刚度矩阵, 通过求解器的迭代计算, 最终可以求得 T 型电缆终端接头的整体电场分布。

为研究 T 型电缆终端接头的电热耦合问题, 根据麦克斯韦方程, 引入矢量磁位 \dot{A} , 对于有激励源存在的电流区的磁矢量位控制方程为式(7), 对于无激励源的非电流区的磁矢量位控制方程为式(8)。

$$\left(\nabla \cdot \frac{1}{\mu} \nabla\right) \dot{A} = -\dot{J}_s + j\omega\sigma\dot{A} \quad (7)$$

$$\left(\nabla \cdot \frac{1}{\mu} \nabla\right) \dot{A} = 0 \quad (8)$$

式(7)~(8)中: ω 为角频率; μ 为磁导率; σ 为电导率; \dot{J}_s 为外加电流密度。

T 型电缆终端接头磁场问题, 可归纳为式(7)和式(8)的求解问题, 本研究中, 给出 4 类求解的边界条件, 其中, 第一类边界条件, 其磁力线垂直于边界面, 表达式可写为式(9), 其中 \mathbf{n} 为单位法向矢量; 第二类边界条件, 其磁力线平行于边界面, 表达式可写为式(10); 第三类边界条件, 具有面电流密度 $\dot{\delta}_s$, 如式(11)所示, 则表达式可写为式(12)。最后一类边界条件, 给定矢量磁位具体数量值, 如式(13)所示, 当此边界离电流源较远时, 则边界条件可以近似简化为式(14)。

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{n} \times \left(\frac{1}{u} \nabla \dot{A}\right) \Big|_{\Gamma_1} &= 0 \\ \mathbf{n} \cdot \dot{A} \Big|_{\Gamma_1} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{n} \cdot (\nabla \times \dot{A}) \Big|_{\Gamma_2} &= 0 \\ \mathbf{n} \times \dot{A} \Big|_{\Gamma_2} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

$$\mathbf{n} \times \dot{H} = \dot{\delta}_s \quad (11)$$

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{n} \times \left(\frac{1}{u} \nabla \times \dot{A}\right) \Big|_{\Gamma_3} &= -\dot{\delta}_s \\ \mathbf{n} \cdot \dot{A} \Big|_{\Gamma_3} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

$$\dot{A} \Big|_{\Gamma_4} = \dot{A}_0 \quad (13)$$

$$\dot{A} \Big|_{\Gamma_4} = 0 \quad (14)$$

式(9)~(14)中: $\Gamma_1, \Gamma_2, \Gamma_3, \Gamma_4$ 分别代表 4 类边界条件; \dot{H} 为磁场强度。

对于 T 型电缆终端接头的温度场计算, T 型电缆终端接头属于固体介质, 其温度场满足的导热微分方程在直角坐标系中可写为式(15)。

$$\rho'c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q_v \quad (15)$$

式(15)中: ρ' 表示微元体密度; c 是比热容; T 为温度; t 是时间; q_v 为体积产热率; λ 为导热系数。

本研究的 T 型电缆终端接头的温度场属于稳态温度场, 而稳态导热微分方程可以简化为式(16)。

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{q_v}{\lambda} = 0 \quad (16)$$

根据传热学理论, 通常传热条件有以下 3 种: ① 已知边界的温度分布情况, 一般采用恒温边界条件, 表示为式(17), T_0 为初始已知边界条件温度; ② 已知流体温度及对流传热情况的边界条件, 控制方程为式(18), T_f 为流体温度, h 为对流换热系数; ③ 已知周围环境, 且产热和散热达到平衡的情况下, 其控制方程可以写为式(19), 其中 T_h 为环境温度。

$$T \Big|_{\Gamma_4} = T_0 \quad (17)$$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial \mathbf{n}} \Big|_{\Gamma_2} = h(T - T_f) \quad (18)$$

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial \mathbf{n}} \Big|_{\Gamma_3} = h(T_f - T_h) \quad (19)$$

本文研究的是 T 型电缆终端接头在空气中的电场及热场分布, 属于以式(19)为控制方程的边界条件, 此外, 根据斯蒂芬-玻尔兹曼定律, T 型电缆终端接头表面的散热边界条件可以表示为式(20)。

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial \mathbf{n}} = \sigma_0 \varepsilon_1 (T_f^4 - T_h^4) \quad (20)$$

式(20)中, σ_0, ε_1 分别为斯蒂芬-玻尔兹曼常数及表面发射率。

此外, 电缆接头的电磁场计算和温度场计算是一个双向耦合过程。

1.2 多物理场仿真模型

仿真计算中, 以实际 10 kV T 型电缆终端接头为研究对象, 设计参数为 6/10 kV, 其结构剖面图如图 1 所示, 本研究综合考虑了以下工况: T 型电缆终端接头尾塞、套管与 T 型接头的绝缘交界面有气隙, 以及气隙严重程度对其电场和温度场的影响。

参考文献[12,16-17]的数据, 本研究有限元计算的材料物性参数设置如表 1 所示。

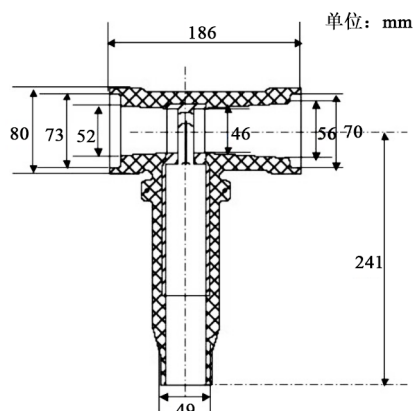


图1 T型电缆终端接头剖面图

Fig.1 Section of T-type cable joint

表1 有限元计算的材料物性参数

Tab.1 Material physical parameters for finite element calculation

结构部位	介质材料	导热系数 /(W/(m·K))	电阻率 /($\Omega\cdot\text{m}$)	相对介电 常数
导体	铜	401	1.75×10^{-8}	—
绝缘层	XLPE	0.29	1.36×10^{13}	2.25
应力锥	半导体	0.286	0.002	30
硅胶帽	硅橡胶	0.27	1.42×10^{13}	2.8
法兰、箱体	铁	80	9.78×10^{-8}	—
其余计算域	空气	0.26	0.58×10^8	1

1.3 气隙缺陷模拟方法

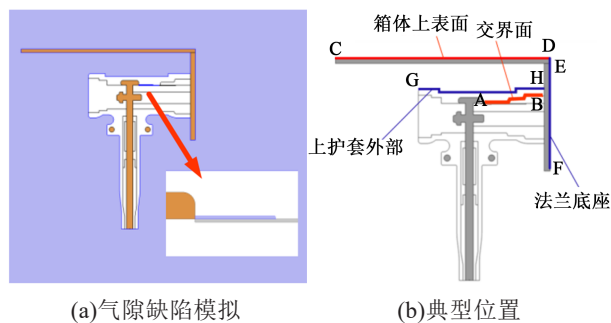
通过几何建模的方式,在交界面建立截面为 $1\text{ mm}\times 30\text{ mm}$ 和 $2\text{ mm}\times 50\text{ mm}$ 的空气气隙分别模拟轻度气隙和中度气隙,以轻度气隙为例,模拟结果如图2(a)所示。本研究计算过程中,施加电压为 $10/\sqrt{3}\text{ kV}$,根据有限元原理的计算方法,先对T型电缆终端接头的电场和温度场进行计算。其中,本研究设置空气计算域为环境温度,电缆头与空气接触面为对流传热边界。计算完成后,选取交界面、箱体上表面、法兰底座、上护套外部4处典型位置,分析T型电缆终端接头的电场与温度场分布特性,如图2(b)所示。

2 仿真结果及分析

2.1 电场分布特性仿真结果及分析

2.1.1 无缺陷整体电场分布

无缺陷T型电缆终端接头整体的电场分布如图



(a)气隙缺陷模拟

(b)典型位置

图2 T型电缆终端接头电场与温度场仿真设置

Fig.2 Simulation setting of electric field and temperature field of T-type cable joint

3所示。从图3可以看出,T型电缆终端接头在接地眼处电场强度偏大,交界面电场强度次之,但无缺陷的情况下,交界面电场强度没有明显的异常增大情况。

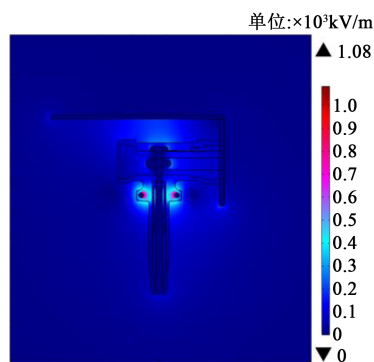


图3 无缺陷整体电场分布

Fig.3 Electric field distribution without defect

根据不同路径的电场分布结果,交界面电场、箱体上表面电场、法兰底面电场和上护套外部电场计算结果如图4所示。从图4可以看出,交界面电场范围为 $43.07\sim 162.23\text{ kV/m}$,箱体上表面电场范围为 $3.03\sim 30.37\text{ kV/m}$,法兰底面电场范围为 $7.00\sim 61.10\text{ kV/m}$,上护套外部电场范围为 $57.96\sim 218.65\text{ kV/m}$ 。其中,交界面电场和上护套外部电场最大值较大,上护套外部电场最大值可达 218.65 kV/m ,由此可得,交界面和上护套外部对绝缘要求更高。

2.1.2 轻度气隙缺陷整体电场分布

T型电缆终端接头在轻度气隙缺陷下的整体电场分布如图5所示。从图5可以看出,整体电场分布情况与无缺陷情况相似。

根据不同路径的电场分布结果,在轻度气隙缺陷下交界面电场、箱体上表面电场、法兰底面电场

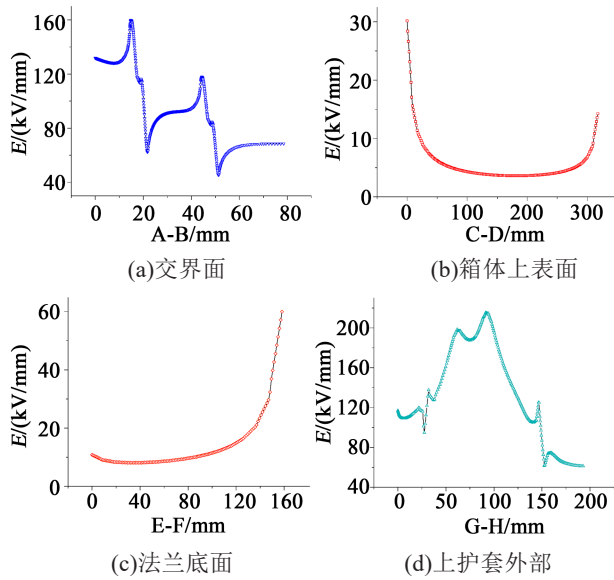


图4 无缺陷下不同位置的电场分布仿真结果

Fig.4 Simulation results of electric field distribution at different positions without defects

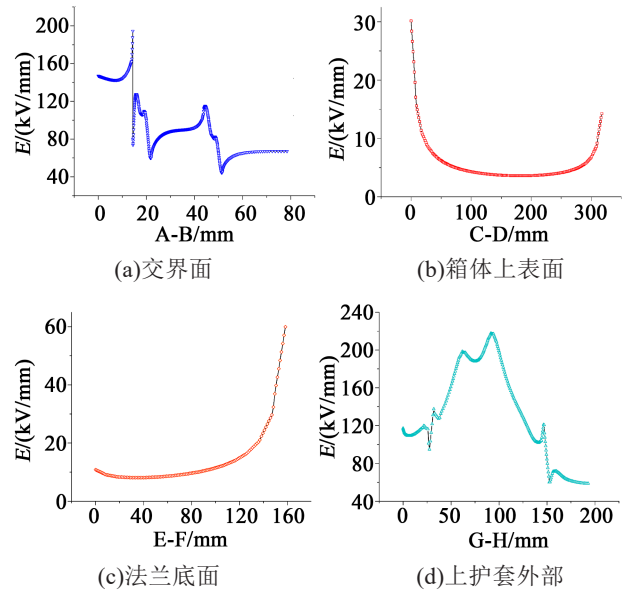


图6 轻度气隙缺陷不同路径电场分布结果

Fig.6 Simulation results of electric field distribution at different positions with slight air gap defect

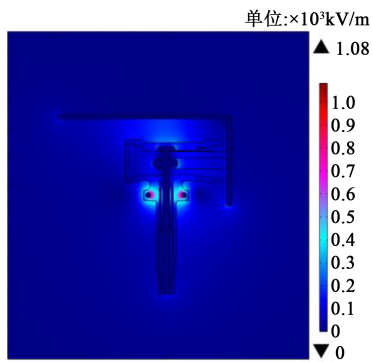


图5 轻度气隙缺陷下整体电场分布

Fig.5 Electric field distribution with slight air gap defect

和上护套外部电场计算结果如图6所示。从图6可以看出,交界面电场范围为41.21~197.77 kV/m,箱体上表面电场范围为3.03~30.72 kV/m,法兰底面电场范围为7.00~61.10 kV/m,上护套外部电场范围为56.56~221.09 kV/m。其中,交界面电场和上护套外部电场最大值仍然较大,上护套外部电场最大值可达221.09 kV/m。此外,电场沿仿真路径均不是均匀分布,与无缺陷情况下较为相似。

T型电缆终端接头在轻度气隙缺陷与无缺陷情况下电场分布的主要区别为:交界面电场最大值从162.23 kV/m增大至197.77 kV/m,增加了21.91%;上护套外部电场最大值从218.65 kV/m增大至221.09 kV/m。而箱体上表面电场和法兰底面电场变化较小。

2.1.3 中度气隙缺陷整体电场分布

T型电缆终端接头在中度气隙缺陷下的整体电场分布如图7所示。从图7可以看出,电场分布亦与无缺陷电场分布相似,T型电缆终端接头在接地点处电场强度仍偏大,交界面电场强度次之。

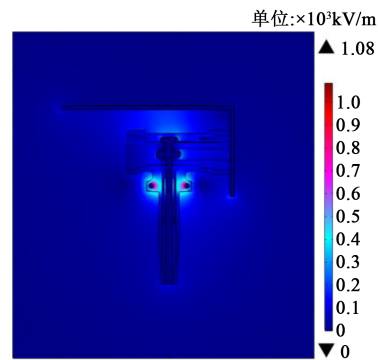


图7 中度气隙缺陷下整体电场分布

Fig.7 Electric field distribution with moderate air gap defect

根据不同路径的电场分布结果,在中度气隙缺陷下交界面电场、箱体上表面电场、法兰底面电场和上护套外部电场计算结果如图8所示。从图8可以看出,交界面电场范围为39.72~235.32 kV/m,箱体上表面电场范围为3.03~30.73 kV/m,法兰底面电场值范围为7.00~61.10 kV/m,上护套外部电场范围为55.42~220.10 kV/m。其中,交界面电场和上护套外部电场最大值仍然较大,交界面电场最大

值可达 235.32 kV/m。此外,电场沿几个仿真路径均不是均匀分布,与无缺陷和轻度缺陷情况下较为相似。

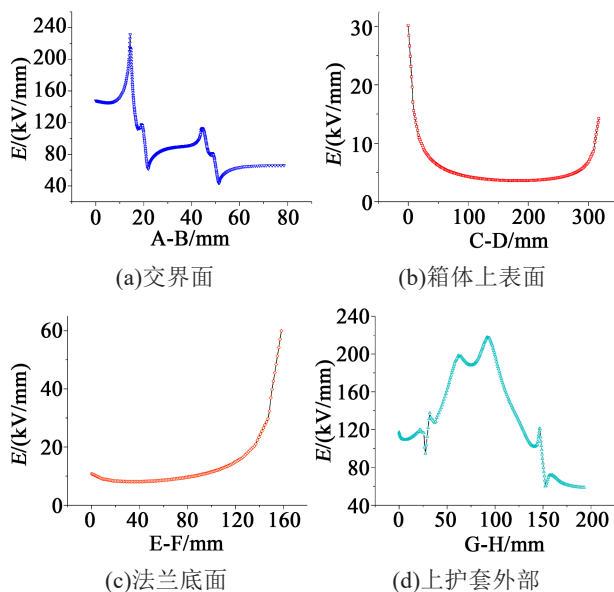


图8 中度气隙缺陷下不同路径电场分布结果

Fig.8 Simulation results of electric field distribution at different positions with moderate air gap defect

T型电缆终端接头在中度气隙缺陷与无缺陷情况下电场分布的主要区别为:交界面电场最大值从 162.23 kV/m 增大至 235.32 kV/m,增加了 45.05%;上护套外部电场最大值从 218.65 kV/m 增大至 220.10 kV/m。但箱体上表面电场和法兰底面电场变化仍然较小。

2.2 温度场分布特性仿真结果及分析

2.2.1 无缺陷整体温度场分布

无缺陷T型电缆终端接头整体的温度场分布如图9所示。从图9可以看出,T型电缆终端接头在接地眼处温度高,电缆头本体温度次之,环网柜箱体温度最低。无缺陷的情况下,交界面温度场强度没有明显的异常增大情况。

交界面温度场、箱体上表面温度场、法兰底面温度场和上护套外部温度场计算结果如图10所示。从图10可以看出,交界面温度范围为 30.75~31.12℃、箱体上表面温度范围为 25.17~29.60℃,法兰底面温度范围为 29.59~30.95℃,上护套外部温度范围为 30.61~31.20℃。其中,交界面温度场和上护套外部温度场最大值较大,上护套外部温度场最大值达 31.20℃。此外,温度场沿监测路径均不是均匀分布,交界面温度场沿法兰底座方向监测路径

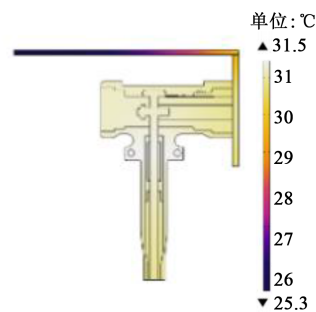


图9 无缺陷整体温度场分布

Fig.9 Temperature field distribution without defect

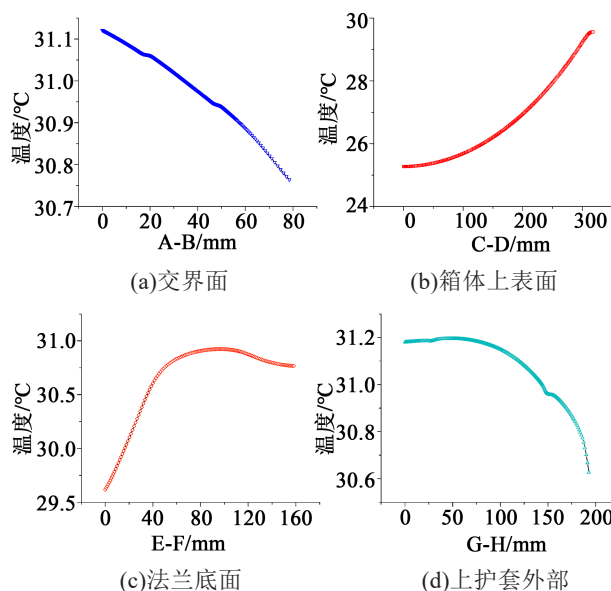


图10 无缺陷不同路径温度场分布结果

Fig.10 Simulation results of temperature field distribution at different positions without defects

温度降低,箱体上表面温度沿法兰底座方向监测路径温度升高,法兰底面温度沿监测路径先升高后降低,上护套外部温度场沿法兰底座方向监测路径温度降低。

2.2.2 轻度气隙缺陷整体温度场分布

T型电缆终端接头在轻度气隙缺陷下的整体温度场分布如图11所示。从图11可以看出,轻度气隙缺陷下温度场分布与无缺陷情况下温度场分布相似,T型电缆终端接头在接地眼处温度最高,电缆头本体温度次之,环网柜箱体温度最低。

根据不同路径的温度场分布结果,在轻度气隙缺陷下交界面温度场、箱体上表面温度场、法兰底面温度场和上护套外部温度场计算结果如图12所示。从图12可以看出,交界面温度范围为 31.16~31.53℃,箱体上表面温度范围为 25.23~30.01℃,法

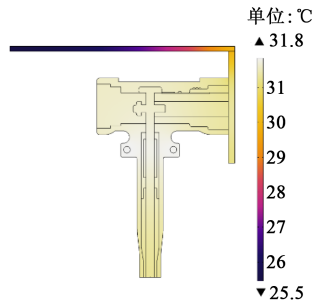


图11 轻度气隙缺陷下整体温度场分布
Fig.11 Temperature field distribution with slight air gap defect

兰底面温度值范围为29.95~31.16℃,上护套外部温度值范围为31.01~31.60℃。温度场沿监测路径均不是均匀分布,与无缺陷情况下较为相似。

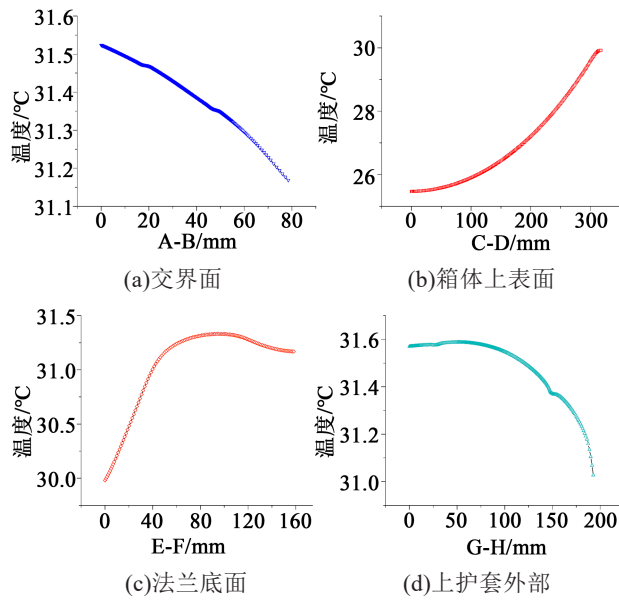


图12 轻度气隙缺陷不同路径温度场分布结果
Fig.12 Simulation results of temperature field distribution at different positions with slight air gap defect

T型电缆终端接头在轻度气隙缺陷下与无缺陷情况下电场分布的主要区别为:4个分布路径上,最高温度值均有所上升,但幅度较小,温度最大增加值仅为0.41℃。

2.2.3 中度气隙缺陷整体温度场分布

T型电缆终端接头在中度气隙缺陷下的整体温度场分布如图13所示。从图13可以看出,中度气隙缺陷下温度场分布亦与无缺陷情况下温度场分布相似,T电缆终端接头在接地眼处温度场强度仍偏大,交界面温度场强度次之。

根据不同路径的温度场分布结果,在中度气隙

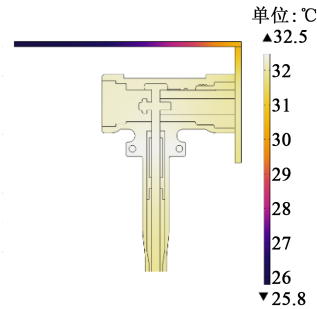


图13 中度气隙缺陷下整体温度场分布
Fig.13 Temperature field distribution with moderate air gap defect

缺陷下交界面温度场、箱体上表面温度场、法兰底面温度场和上护套外部温度场计算结果如图14所示。从图14可以看出,交界面温度范围为31.83~

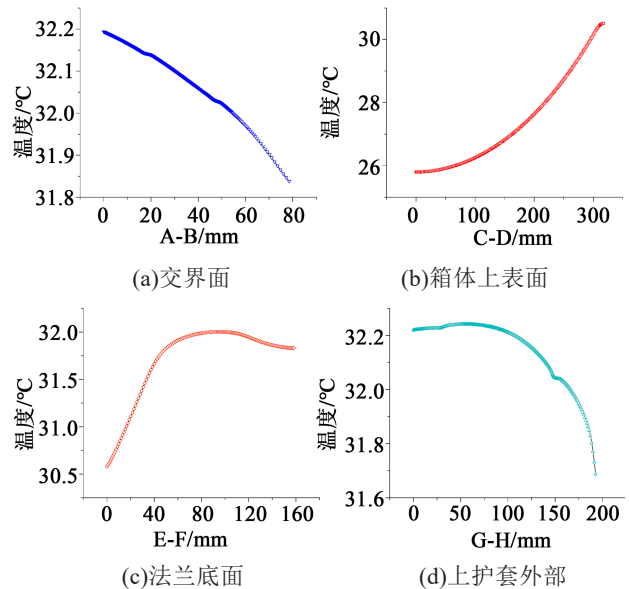


图14 中度气隙缺陷下不同路径温度场分布结果
Fig.14 Simulation results of temperature field distribution at different positions with moderate air gap defect

32.20℃,箱体上表面温度范围为25.69~30.61℃,法兰底面温度范围为30.54~32.03℃,上护套外部温度范围为31.67~32.25℃。温度场沿不同路径分布与轻度气隙缺陷和无缺陷情况下较为相似。

T型电缆终端接头在中度气隙缺陷下与无缺陷下温度场分布的主要区别为:4个路径上,最大温度值亦均有所升高,但幅度也较小,温度最大增加值为1.10℃。此外,统计上述数据得到温度的变化幅度在0.68%~3.49%。

3 气隙受潮状态下的电场和温度场分布

3.1 气隙受潮状态下的电场分布

上述研究表明气隙状态下的绝缘交界面处最大电场强度不到3 000 kV/m,远达不到空气击穿强度,这一方面是由于10 kV环网柜T型接头施加的电压较低、电场强度不够,另一方面是气隙缺陷未严重到使内部发生局部放电。结合文献调研及现场分析,考虑到长期气隙受潮的影响,分析气隙、水膜、水珠并存时T型电缆接头的多物理场分布特性^[18-19]。

模拟气隙受潮下的多物理场分布,针对轻度气隙受潮,设置了23.5 mm的水膜和4个接触角为90°的水滴,水滴为半圆形,直径为3.5~4.5 mm,如图15所示。其中,水的相对介电常数设置为81,导热系数取常温下的值(0.599 W/(m·K)),电导率设置为10 μS/cm。

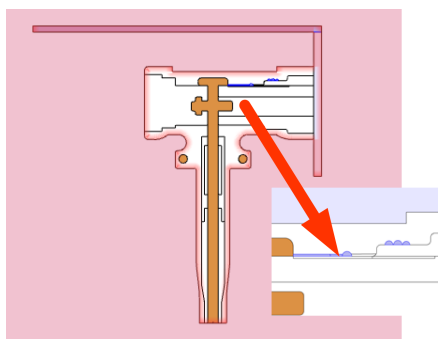


图15 T型电缆终端接头气隙受潮模拟

Fig.15 Simulation of T-type cable joint with air gap wetting

气隙受潮情况下,不同典型路径下的电场分布仿真结果如图16所示。从图16可以看出,气隙受潮情况下,在水滴边缘出现电场强度最大值,超过了3 000 kV/m,达到了空气的临界击穿强度,会造成局部放电、沿面爬电,从而引发电缆头的劣化烧蚀故障。

从图16还可以看到,交界面电场范围为45.31~3 431.98 kV/m,箱体上表面电场范围为5.81~38.12 kV/m,法兰底面电场范围为14.21~77.32 kV/m,上护套外部电场范围为99.39~261.75 kV/m。其中,交界面电场最大值较大,达到了3 431.98 kV/m。此外,电场沿监测路径分布与气隙缺陷情况下较为相似。

在气隙受潮、达到临界击穿的情况下,箱体、法兰、上护套处的最大电场强度增幅明显,其中箱体

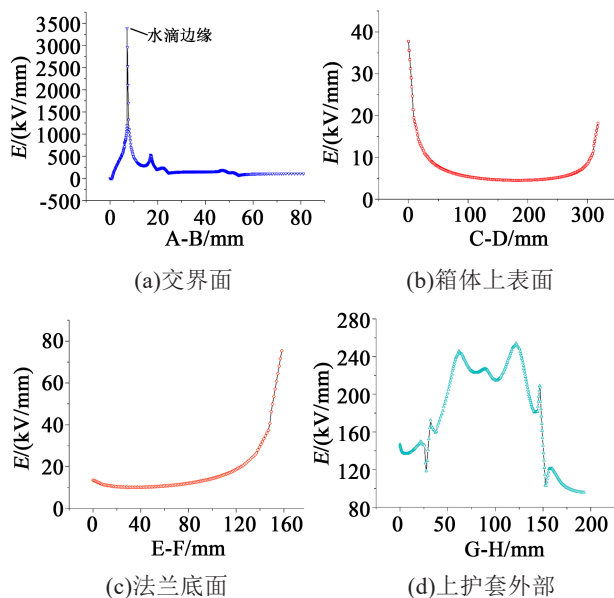


图16 气隙受潮缺陷下不同路径电场分布结果

Fig.16 Simulation results of electric field distribution at different positions with air gap wetting defect

上表面最大电场增大大约26%、法兰底座最大电场增大大约27%、上护套外部最大电场增大大约20%。由此可见,法兰底座、箱体上表面的电场幅值变化能够表征气隙受潮缺陷的临界情况,且变化幅度较大。

3.2 气隙受潮状态下的温度场分布

T型电缆终端接头在气隙受潮缺陷下的温度场分布如图17所示。从图17可以看出,气隙受潮缺

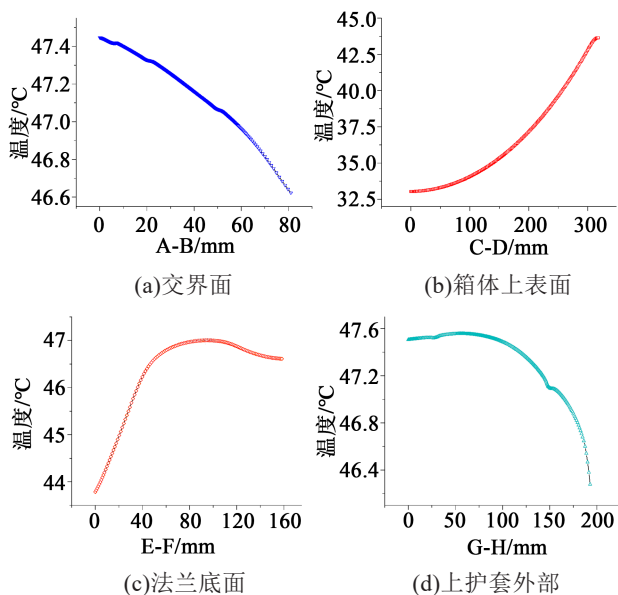


图17 气隙受潮缺陷下不同路径温度场分布结果

Fig.17 Simulation results of temperature field distribution at different positions with air gap wetting defect

陷下交界面温度范围为46.58~47.45℃,箱体上表面温度范围为33.12~43.74℃,法兰底面温度范围为43.21~47.06℃,上护套外部温度范围为46.28~47.52℃。温度场沿几个典型路径分布和无缺陷情况下较为相似。

从图17还可以看到,在气隙受潮、达到临界击穿的情况下,箱体、法兰、上护套处的最高温度有明显升高的趋势,其中箱体上表面最高温度值升高了约14.1℃、法兰座最高温度值升高了约16.1℃、上护套外部最高温度值升高了约16.3℃。综上,T型电缆终端接头在气隙受潮缺陷下与无缺陷情况下温度分布的主要区别为:4个典型路径上,最高温度值均有约15℃的温升。

4 结论

(1)绝缘交界面处电场分布受气隙缺陷的影响最为显著,随着缺陷加剧,电场最大值呈显著增大趋势,轻度缺陷和轻度缺陷较无缺陷时分别增大了21.91%和45.05%

(2)随着气隙增大,4处典型位置处的最高温度值也呈上升趋势,但是相较于电场分布,温度值的变化幅度较小,升高幅度为0.68%~3.49%。

(3)在气隙受潮的情况下,气隙缺陷处会达到临界击穿,此时箱体上表面最大电场值增大约26%,法兰座最大电场值增大约27%,上护套外部最大电场值增大约20%。

(4)在气隙受潮、达到临界击穿的情况下,箱体、法兰、上护套处的最高温度明显升高,其中箱体上表面最高温度升高约14.1℃,法兰座最高温度升高约16.1℃,上护套外部最高温度升高增大约16.3℃。

(5)考虑到传感器的安装和实施,在实际工程中,可通过监测法兰底座、箱体上表面的电场幅值增量(约20%)以及温升(约15℃),来反映T型电缆终端接头即将出现局部击穿放电的潜在临界隐患。

参考文献:

[1] 赵法强,刘颖,张智宏,等.配电网柜操作机器人设计与控制方

法研究[J].广东电力,2020,33(11):26-33.

- [2] 朱彦卿,蒋成博,娄源通,等.基于一体式极柱的12kV环保气体绝缘环网柜的研制[J].高压电器,2020,56(11):46-50.
- [3] 宋仕杰.环网柜电缆头温度在线监测方法的研究与工程应用[D].济南:山东大学,2015.
- [4] 罗翔,卞志文,林一泓.12kV环网柜T型电缆终端绝缘界面爬电的原因分析[J].高压电器,2020,56(5):249-254.
- [5] 刘倩,曹雯,申巍,等.电缆接头复合界面处材料老化对其闪络特性的影响[J].广东电力,2020,33(10):118-126.
- [6] 徐明忠,梁正波,翟浩琪,等.色泽改变对超高压电缆接头绝缘性能的影响[J].高电压技术,2019,45(11):3445-3451.
- [7] 刘昌,惠宝军,傅明利,等.机械应力对硅橡胶高压电缆附件运行可靠性的影响[J].高电压技术,2018,44(2):1-9.
- [8] 唐正森,李景禄,李志娟.10kV交联电缆接头施工工艺分析及改进措施[J].绝缘材料,2009,42(2):71-74.
- [9] FABIANI D, MONTANARI G C, CAVALLINI A, et al. Relation between space charge accumulation and partial discharge activity in enameled wires under PWM-like voltage waveforms[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2004, 11(3): 393-405.
- [10] HE Jiahong, HE Kang, CUI Longfei. Charge-simulation-based electric field analysis and electrical tree propagation model with defects in 10 kV XLPE cable joint[J]. Energies, 2019, 12(23): 1-22.
- [11] ROGTI F, MEKHALDI A, LAURENT C. Space charge behavior at physical interfaces in cross-linked polyethylene under DC field[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2008, 15(5):1478-1485.
- [12] 张龙,张伟,李锐鹏,等.10kV电缆终端缺陷仿真与电场分析[J].绝缘材料,2014,47(4):83-88.
- [13] 于宪哲,苏宜靖,周浩,等.10 kV交流XLPE电缆改为直流运行的温度场和电场仿真分析[J].高电压技术,2017,43(11):53-60.
- [14] 陈庆国,秦艳军,尚南强,等.温度对高压直流电缆中间接头内电场分布的影响分析[J].高电压技术,2014,40(9):2619-2626.
- [15] 李长明,孙钦佩,李春阳,等.硅橡胶电导特性对XLPE绝缘高压直流电缆中间接头内电场分布的影响[J].南方电网技术,2015, 9(10):47-51.
- [16] 程鹏.电缆接头内部缺陷下的电磁-热-力特性及表征方法研究[D].重庆:重庆大学,2016.
- [17] 焦阳.电力电缆温度场仿真及在线监测系统研究[D].重庆:重庆大学,2016.
- [18] 袁野,陈剑,贾志东,等.10kV XLPE电缆受潮绝缘特性研究[J].电网技术,2014,38(10):2875-2880.
- [19] 万利,周凯,李旭涛,等.以电场特征理解电缆终端气隙的局部放电发展机理[J].高电压技术,2014,40(12):3709-3716.