

界面气隙缺陷及受潮对 ± 320 kV 直流电缆中直接头 电场分布的影响

奚锐¹, 张亚², 程明亮², 詹陶², 曹亮¹, 何高辉¹, 桂银刚¹, 唐超¹

(1. 西南大学 工程技术学院, 重庆 400715; 2. 重庆泰山电缆有限公司, 重庆 401125)

摘要:为分析直流电缆中直接头多层复合介质绝缘界面气隙缺陷及受潮对其电场分布的影响,本文在建立 ± 320 kV 直流电缆中直接头仿真模型的基础上,基于有限元法计算了电缆中直接头在多层复合介质界面区域存在气隙、水膜缺陷时的电场分布,分析了空载与负载两种运行条件下缺陷对中直接头电场分布的影响,并进一步讨论了缺陷在交/直流电场作用下电缆接头电场分布的差异。结果表明:在直流电场作用下,气隙、水膜缺陷均会导致直流电缆中直接头在复合介质界面处的电场发生显著的畸变,气隙在空载、负载时的场强畸变倍数分别为 9.6 倍、1.7 倍,水膜缺陷内场强在两种运行条件下均急剧缩减为原来的 99.9% 以上;电缆中直接头存在气隙缺陷空载时的场强畸变倍数要大于负载时的场强畸变倍数,接头内外存在的温度梯度起到了一定的均匀电场作用;界面受潮在负载运行时的温度场促进了接头内空间电荷积累,从而引起水膜缺陷处的场强畸变倍数较空载时的场强畸变倍数更大;相比于交流电缆,直流电缆中直接头存在缺陷导致的场强畸变倍数更大。

关键词: 电缆中直接头; 直流; 界面缺陷; 电场分布

Influence of interfacial air gap defects and moisture on electric field distribution in intermediate joint of ± 320 kV DC cables

XI Rui¹, ZHANG Ya², CHENG Mingliang², ZHAN Tao²,
CAO Liang¹, HE Gaohui¹, GUI Yingang¹, TANG Chao¹

(1. College of Engineering and Technology, Southwest University, Chongqing 400715, China;
2. Chongqing Taishan Cable Co., Ltd., Chongqing 401125, China)

Abstract: To investigate the impact of interface air gap and moisture defects on the multilayer composite dielectric insulation interface of ± 320 kV DC cable intermediate joints on their electric field distribution mechanism, a simulation model of ± 320 kV DC cable intermediate joint was built, and the electric field distribution of the cable joint with air gap and moisture defects on the multilayer composite dielectric interface region was calculated using the finite element method. The effect of these defects on the electric field distribution of the cable joint were analyzed at no load and load conditions, and their differences under AC/DC electric fields were discussed. The results show that there is significant electric field distortion at the composite dielectric interface of the DC cable joint due to air gap and moisture defects under the action of DC electric field. The multiple of electric field distortion of air gap defects is 9.6 times at no load and 1.7 times at load condition. The electric field strength in the water film defects decrease over 99.9% at both operating conditions. Interestingly, the electric field distortion induced by air gap defects in cable joints at no load is larger than that at load condition, and the temperature differentials across the joint play a role in field homogenization. However, the temperature differentials across the joint induced by moisture at load promote the accumulation of space charge in the joint, which leading to the multiple of electric field distortion at moisture defect bigger than than at no load. Notably, the multiple of electric field distortion resulting from defects in DC cable intermediate joint is bigger than that of AC cables.

Key words: cable intermediate joint; DC; interfacial defects; electric field distribution

0 引言

由于我国能源地区性分布不均匀,伴随着电力系统的发展,电力电缆在输配电系统中取得了广泛

的应用^[1-2]。电缆中间接头在输配电系统中起着衔接、过渡的作用,是保障输配电系统安全可靠运行的重要组成部分^[3-4]。电缆中间接头由于为多层电介质复合结构,在实际安装过程中,受安装环境、生产或安装工艺以及运行过程等影响,电缆中间接头极易混入气隙、杂质以及水分等缺陷,容易造成电场集中,在强电场下发生局部放电或电树枝放电,直至绝缘击穿,引起大范围的电气事故,严重影响电力系统安全稳定运行^[5-8]。同时由于存在应力集中和复合界面效应,电缆中间接头是输配电系统中绝缘性能最为薄弱的环节^[9-10]。因此,探究电缆中间接头缺陷对其电场分布的影响具有非常重要的工程意义。

长期以来,国内外学者对电缆中间接头存在的缺陷类型及缺陷对绝缘性能的影响高度关注,包括电缆中间接头在潮湿条件下的测试或修复、存在缺陷后电气性能的变化规律等,并取得了丰硕的研究成果。赵健军等^[4]通过建立 10 kV 电缆中间接头模型,仿真计算绝缘老化前后交联聚乙烯-硅橡胶(XLPE-SIR)复合界面处存在导电杂质、划痕以及水分 3 种缺陷时的电场分布。刘刚等^[11]通过建立 10 kV T 型电缆终端接头模型,研究 XLPE-SIR 绝缘层界面存在气隙缺陷时的电场及温度场特性。谢坤等^[12]通过对退役 110 kV 电缆附件绝缘的材料特性、热学性能、介电性能和陷阱分布特性进行了测试和分析,发现电缆附件的介电性能受材料理化性能的影响显著。洪浚轩等^[13]通过对 110 kV 电缆外半导体层断口与线芯压接口间的主绝缘表面受潮情况进行仿真,发现受潮位置电场发生畸变,场强增大 24 倍以上。但是目前大部分研究主要集中在交流电缆附件,国外关于直流电缆及其附件的研究主要包括电缆中间接头的设计和材料的选择^[14]、水分检测技术以及电缆中间接头内部水分对电缆性能的影响等方面^[15-16]。而国内关于直流电缆及其附件的研究起步较晚,缺乏相关理论研究及运行经验。因此,有必要针对高压直流电缆附件的运行条件,研究直流电缆中间接头界面缺陷对其电场分布的影响。

本文采用有限元仿真分析软件建立 ± 320 kV 直流电缆中间接头仿真模型,分别求解空载和负载运行条件下电缆中间接头的电场分布特性,对比分析复合介质绝缘界面区域存在水膜、气隙等缺陷对直

流电缆中间接头内部电场的影响规律,以期为 ± 320 kV 直流电缆中间接头缺陷故障诊断提供支撑,进而提高电力系统运行的可靠性和安全性。

1 ± 320 kV 直流电缆中间接头仿真模型

1.1 ± 320 kV 直流电缆中间接头物理模型

现阶段直流电缆主绝缘通常为交联聚乙烯(XLPE),中间接头的绝缘材料为硅橡胶(SIR)^[17]。本文以 ± 320 kV XLPE 绝缘电缆系统为研究对象,采用有限元仿真分析软件建立 ± 320 kV 直流电缆中间接头物理等效模型。采用的整体预制式电缆中间接头为单一预制橡胶绝缘件,其内径有较大的过盈配合,以保证橡胶绝缘件具有较大的断裂伸长率以及较低的应力松弛度,主要包括增强绝缘屏蔽、应力锥、增强绝缘以及高压屏蔽等结构^[18]。电缆与中间接头的具体尺寸如下:电缆铜导体线芯外径为 52.6 mm,内屏蔽层外径为 57.6 mm,厚度为 2.5 mm;XLPE 绝缘层外径为 105.6 mm,厚度为 24 mm;绝缘屏蔽外径为 108.6 mm,厚度为 1.5 mm;电缆中间接头的长度为 1 000 mm,高度为 300 mm,高压屏蔽层长度为 400 mm^[19-20]。依据上述数据建立电缆中间接头轴对称结构模型如图 1 所示,本文对其 1/4 模型进行仿真分析,即图 1 中红色方框框选部分。

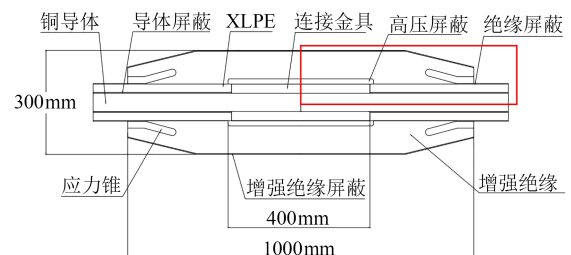


图1 电缆中间接头剖面模型图

Fig.1 Cross section model of cable intermediate joint

流电缆中间接头内部电场的影响规律,以期为 ± 320 kV 直流电缆中间接头缺陷故障诊断提供支撑,进而提高电力系统运行的可靠性和安全性。

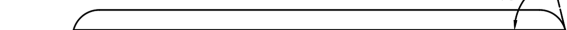


图2 水膜模拟模型

Fig.2 Water film simulation model

流电缆中间接头内部电场的影响规律,以期为 ± 320 kV 直流电缆中间接头缺陷故障诊断提供支撑,进而提高电力系统运行的可靠性和安全性。

为了方便进行对比分析,气隙物理模型参数设置与水膜保持一致,其位置在应力锥根部与连接金具界面的中线处,距离应力锥根部 125 mm。

1.2 ±320 kV 直流电缆中间接头数学模型

根据电磁场理论,恒定电流场方程的麦克斯韦方程的微分形式如式(1)所示^[22]。

$$\begin{cases} \nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}; \nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \\ \nabla \times \mathbf{E} = 0; \nabla \cdot \mathbf{J} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中: \mathbf{H} 为磁场强度,A/m; \mathbf{J} 为电流密度矢量,A/m²; \mathbf{B} 为磁感应强度,T; \mathbf{E} 为电场强度,V/m。

在直流电缆中间接头绝缘中, \mathbf{J} 与 \mathbf{E} 、 \mathbf{J}_e 的关系如式(2)所示。

$$\mathbf{J} = \gamma \mathbf{E} + \mathbf{J}_e \quad (2)$$

式(2)中: γ 为介质的电导率,S/m; \mathbf{J}_e 为外部注入电流密度,A/m²。

将式(2)代入(1),可得式(3)。

$$\nabla \times \mathbf{H} = \gamma \mathbf{E} + \mathbf{J}_e \quad (3)$$

矢量计算公式如式(4)所示。

$$\nabla \cdot \nabla \times \mathbf{H} = 0 \quad (4)$$

由式(3)、(4)可得到式(5)。

$$\nabla \cdot (\gamma \mathbf{E} + \mathbf{J}_e) = 0 \quad (5)$$

因此,在恒定电流场中,界面处的电场分布主要取决于绝缘材料 XLPE、SIR 的电导率。

为求解电缆中间接头在稳定运行过程中的电场分布情况,采用电-热耦合方法,物理场耦合计算公式如式(6)~(7)所示。

$$\rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q_e \quad (6)$$

$$Q_e = \mathbf{J} \cdot \mathbf{E} \quad (7)$$

式(6)~(7)中: Q_e 为电磁热源,W/m³; ρ 为密度,kg/m³; C_p 为恒压热容,J/(kg·K); \mathbf{u} 为固体传热的速度矢量,m/s; k 为导热系数,W/(m·K); T 为温度,K。

±320 kV 直流电缆中间接头的设计需考虑空间电荷对其场强分布的影响,在忽略注入电荷的影响下,其绝缘界面的空间电荷密度计算公式如式(8)所示^[23]。

$$\sigma = \frac{(\varepsilon_2 \gamma_1 - \varepsilon_1 \gamma_2) U}{(\gamma_1 \ln \frac{r_2}{r_1} + \gamma_2 \ln \frac{r_1}{r_1}) r_1} \quad (8)$$

式(8)中: σ 为介质界面空间电荷密度; r_1 为 XLPE 内半径; r_2 为硅脂层外半径; U 为电缆运行电压; ε_1 、 ε_2 分别表示 XLPE 和硅脂的相对介电常数; γ_1 、 γ_2 分别表示 XLPE 和硅脂的电导率; r_1 为绝缘界面处的半径。

1.3 物性参数及边界条件

高压直流电缆在运行过程中,铜导体的发热情况会间接导致电缆中间接头产生温度梯度的现象。

两种绝缘材料的电导率 γ 与温度和场强的关系符合式(9)^[24-25]。

$$\gamma = A \exp\left(\frac{-\varphi q}{k_B T}\right) \frac{\sinh(10^6 B |\mathbf{E}|)}{10^6 |\mathbf{E}|} \quad (9)$$

式(9)中: A 为与材料有关的常数,V/(Ω·m²); φ 为活化能,eV; q 为电子电荷量,C; k_B 为玻尔兹曼常数,J/K; T 为材料温度,K; B 为电场系数,m/V; \mathbf{E} 为场强,kV/mm。

两种绝缘材料的电导率相关参数见表1。

表1 XLPE 和 SIR 材料的电导率相关参数

Table 1 Conductivity related parameters of XLPE and SIR materials

材料	$A/(V(\Omega \cdot m^2))$	φ/eV	$B/(m/V)$
XLPE	8.15×10^6	0.78	1.40×10^{-7}
SIR	1.93×10^6	0.72	5.43×10^{-8}

根据公式(9)及表1参数^[26],可以得到直流绝缘材料电导率 γ (XLPE)、 γ (SIR)与温度和场强的关系。

电缆及中间接头材料的电、热性能参数如表2所示^[20,27-30]。

表2 ±320 kV 直流电缆中间接头材料参数

Table 2 Material parameters of ±320 kV DC cable joint

材料名称	相对介电常数	电导率/(S/m)	恒压热容/(J/(kg·K))	密度/(kg/m ³)	导热系数/(W/(m·K))
铜导体	10 000	5.998×10^7	385	8 960	400
连接管	10 000	5.998×10^7	385	8 960	400
连接金具	10 000	5.998×10^7	385	8 960	400
屏蔽层	1 000	0.01	2 700	1 100	0.27
XLPE 绝缘	2.25	γ (XLPE)	2 603	922	0.28
硅橡胶	3.60	γ (SIR)	1 700	1 150	0.27
应力锥	30	2×10^{-3}	2 182	1 100	0.40
硅脂	3.20	2.56×10^{-14}	1 750	2 550	4.50
空气	1	1×10^{-16}	1 017	1.29	0.03
水膜	81	5.5×10^{-6}	4 178	1 000	0.65

铜导体上温度取电缆负荷平均温度约为 338.15 K(65℃),环境温度设置为 298.15 K(25℃)^[19]。导体上施加的直流电压为±320 kV,增强绝缘屏蔽的电势设为0,由于应力锥与电缆绝缘半导体层紧密接触,可以认为它们的电势均为0。

为便于对仿真结果进行分析,图3标注了电缆中间接头轴向截线 L1 和径向截线 L2:轴向截线 L1 起始位置为应力锥根部,终末位置为金属连接管端面,以靠近导体中心连接处的方向为正向;径向截

线L2的位置在XLPE-SIR复合界面的中心点处,方向为电缆中间接头铜导体至增强绝缘屏蔽层。

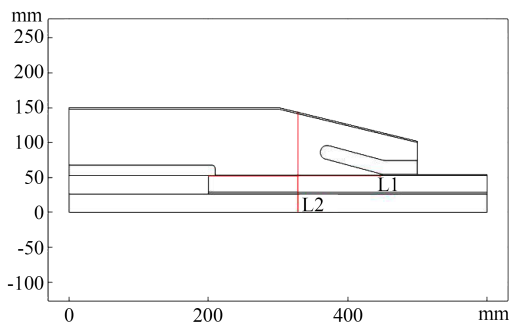


图3 二维截线位置

Fig.3 Location of 2D intercept line

2 仿真结果与分析

2.1 无缺陷电缆运行时电场分布

2.1.1 空载运行条件下电场分布

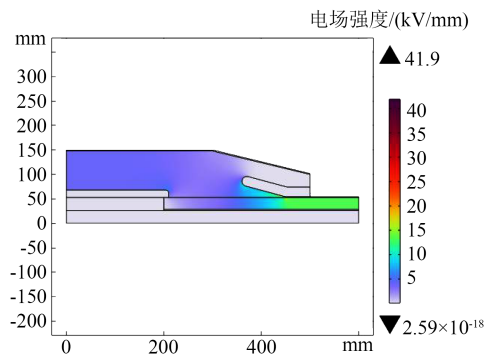
直流电缆中间接头在空载运行条件下电场与电荷分布如图4所示。从图4(a)、(b)可以看出,直流电缆中间接头在应力锥根部位置处的场强最大,达到了41.9 kV/mm。中间接头中XLPE层与SIR层的平均场强低于电缆本体XLPE层。在中间接头硅脂层内的场强明显高于硅脂附近XLPE与SIR承受的场强。产生该现象的原因主要是,在径向上电导率和场强的关系满足式(10)。

$$\gamma_1 E_{1n} = \gamma_2 E_{2n} \quad (10)$$

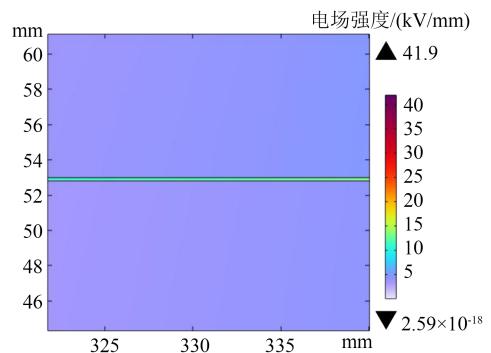
式(10)中, E_{1n} 、 E_{2n} 中n的方向为分界面的法向方向。

在空载运行条件下,硅脂的电导率低于硅脂附近XLPE、SIR的电导率,导致硅脂层承受的场强较大。

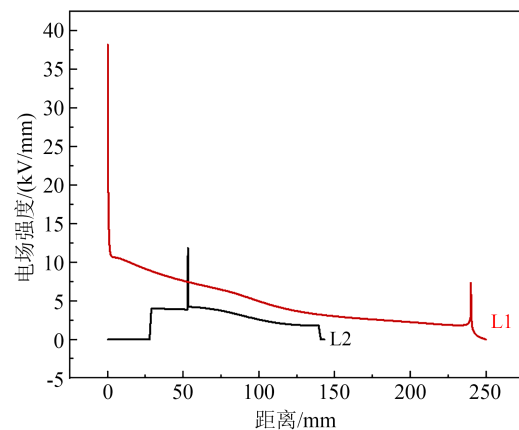
进一步分析电缆中间接头在绝缘界面轴向与径向上的场强分布,结果如图4(c)所示。在XLPE-硅脂分界面上即截线L1上的电场在应力锥根部处达到最大值,约为38.2 kV/mm,而场强最小处靠近高压屏蔽管,约为1.8 kV/mm。随着与应力锥根部距离的增加,截线L1上的电场呈现减小的趋势。在靠近高压屏蔽管周围,电场又出现了小幅度的增大,场强达到7.3 kV/mm。这是由于在高压屏蔽管的端部,屏蔽管的位置高出连接金具,电位随空间位置的变化速率加快,因此出现局部电场强度增大。从径向上来看,在空载运行条件下,截线L2上XLPE层内的场强数值变化较小,约从4.0 kV/mm减小到3.9 kV/mm。硅脂层的场强最大,达到11.9 kV/mm。SIR层的场强由内而外逐渐减小,约从4.2



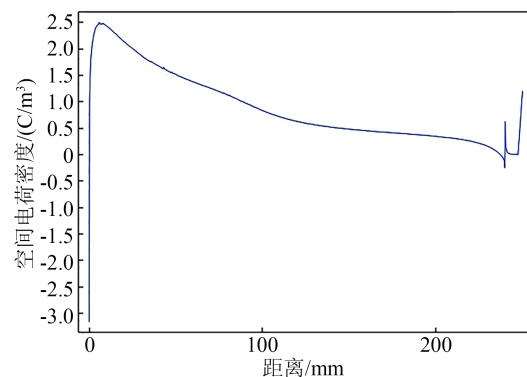
(a) 整体电场分布图



(b) 硅脂处电场分布图



(c) 截线处电场值



(d) 绝缘界面空间电荷密度

图4 电缆中间接头空载运行条件下电场与电荷分布

Fig.4 Electric field and charge distribution of cable intermediate joint at no load

kV/mm减小到1.8 kV/mm。

XLPE-硅脂分界面即截线L1上的空间电荷密度分布如图4(d)所示。应力锥根部位置空间电荷密度最大,以负电荷为主,空间电荷密度为 3.1 C/m^3 。其余位置以正电荷为主,且随着与应力锥根部距离的增加,截线L1上的空间电荷密度呈现减小的趋势。在靠近高压屏蔽管附近,电荷密度有小幅度的增大。这是由于绝缘界面电荷的极性与电导率及相对介电常数较高介质侧的电极极性相同^[24],外屏蔽层的电导率和相对介电常数高于XLPE层,因此在应力锥根部处其电荷极性与外屏蔽层侧极性相同,以负电荷为主;在XLPE-硅脂分界面其余位置,据式(8)知,空间电荷极性为正电荷,因此其余位置处电荷极性与XLPE层侧电极极性相同,以正电荷为主。

2.1.2 负载运行条件下电场分布

直流电缆中间接头在负载运行条件下的温度分布如图5所示。从图5可以看出,铜导体温度为 65°C ,XLPE层温度为 $54.29\sim 65^\circ\text{C}$,SIR层温度为 $38.80\sim 60.90^\circ\text{C}$,应力锥温度为 $44.18\sim 54.84^\circ\text{C}$,电缆外护层温度为整个电缆中间接头温度最小的位置,其值为 35.7°C 。这是由于在增强绝缘屏蔽层外表面存在外部自然对流,电缆的整体温度沿着电缆径向逐渐降低。

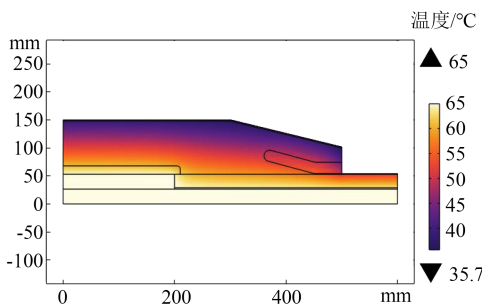
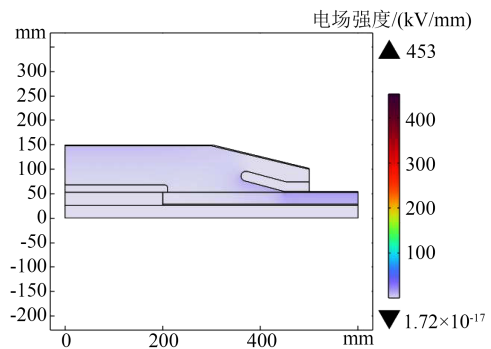


图5 整体温度分布云图

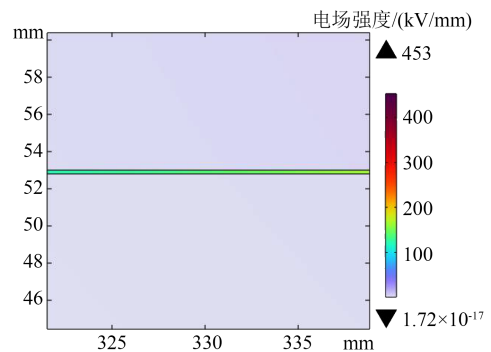
Fig. 5 Overall temperature distribution cloud map

直流电缆中间接头在负载运行条件下的电场与电荷分布如图6所示。由图6(a)和(b)可以看出,在负载运行条件下的电场分布趋势和空载下基本一致,接头内部电场集中于应力锥侧,场强最大值为 453 kV/mm ,约为空载运行条件下的10.8倍。硅脂层的场强远大于硅脂层附近XLPE层、SIR层内承受的场强。

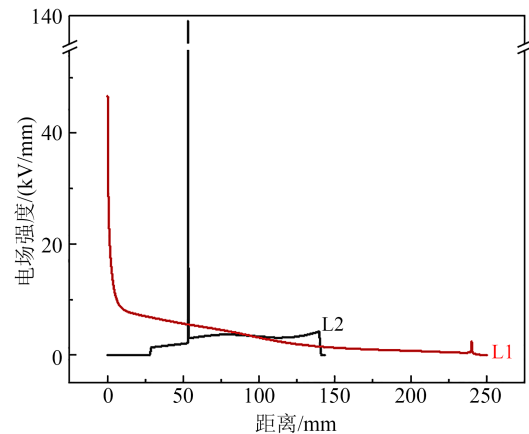
从图6(c)进一步可以看出,在XLPE-硅脂分界面即截线L1上,靠近应力锥根部位置的场强相较于于



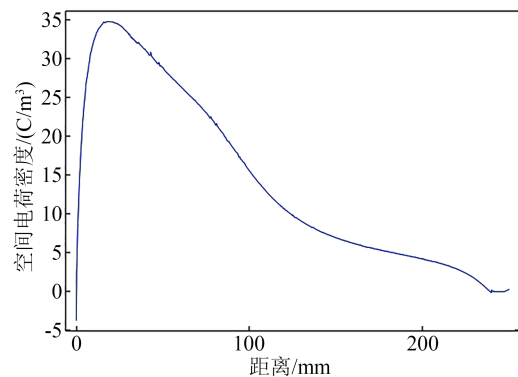
(a) 整体电场分布图



(b) 硅脂处电场分布图



(c) 截线处电场值



(d) 绝缘界面空间电荷密度

图6 电缆中间接头负载运行条件下电场与电荷分布

Fig.6 Electric field and charge distribution of cable intermediate joint at load

空载时变大,其值为46.7 kV/mm。其余位置场强相较于空载时均变小,在高压屏蔽管附近的场强减小至2.5 kV/mm,这是因为温度场会影响绝缘层材料的电导率。在截线L2上,XLPE、SIR层的场强值略大于空载时;XLPE层存在的温度梯度为6℃,其内外场强差为0.8 kV/mm,而SIR层存在的温度梯度为12℃,其内外场强差为1.2 kV/mm。研究表明,温度梯度的大小是影响直流电缆电场反转程度的主要因素。因此,XLPE层与SIR层存在的温度梯度引起了中间接头各层介质电场反转。硅脂内场强最大达到139.1 kV/mm。分析认为,在温度场和电场的共同作用下,XLPE和SIR的电导率比空载时显著提高。硅脂层附近XLPE和SIR承受的场强与空载时基本一致,由式(10)可知,在XLPE和SIR的电导率都增大了一个数量级、硅脂电导率基本不变的条件下,硅脂内部的场强较空载时增大了约10.7倍。

图6(d)为直流电缆中间接头负载运行条件下在截线L1上的空间电荷密度。从图6(d)可以看出,负载运行时的电荷极性、曲线变化趋势与空载时表现一致。在应力锥根部以负电荷为主,其余位置以正电荷为主。直流电缆中间接头在应力锥根部位置周围空间电荷密度最大,其值为34.8 C/m³,明显大于空载时相同位置处的空间电荷密度值。这一现象表明直流场下温度梯度对电缆中间接头界面处空间电荷的积累有促进作用。在高压屏蔽管周围的空间密度积累相较于空载时减小,这可能是由于XLPE电导率随温度的升高而增大,根据式(8)可知,XLPE电导率的增大直接影响了界面处空间电荷的积累量。

2.2 电缆中间接头气隙缺陷电场分布

2.2.1 空载运行条件下电场分布

直流电缆中间接头存在气隙缺陷情况下,其空载运行时的电场与电荷分布如图7所示。由图7(a)和(b)可以看出,除去硅脂涂抹不均匀造成的气隙缺陷处,电缆中间接头与无缺陷中间接头空载时内部电场分布规律大致相同。

从图7(c)可以看出,在XLPE-硅脂复合界面气隙缺陷处,由于其端面位置与XLPE界面接触位置曲率半径较小,场强随之增大。同时,气隙附近场强出现“中间低、两边高”的现象,其畸变倍数约为无缺陷电缆中间接头空载时相同位置处的3.5倍。气隙处的场强最大值达到114 kV/mm,畸变倍数约

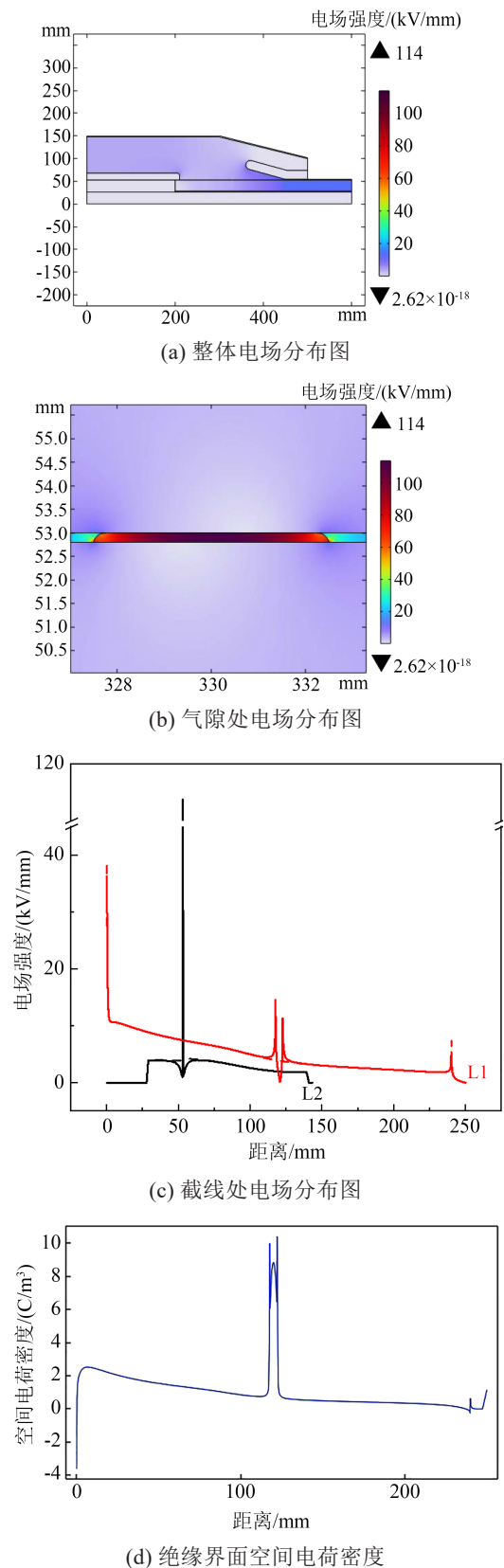


图7 电缆中间接头带气隙缺陷空载运行条件下电场与电荷分布

Fig.7 Electric field and charge distribution of cable intermediate joint with air gap defects at no load

为 9.6 倍,显著大于无缺陷电缆中间接头空载运行时相同位置处的场强。导致该现象的原因是气隙的电导率小于硅脂的电导率,根据式(10),气隙缺陷内承受的场强更大。

为了进一步分析气隙缺陷处场强出现的“中间低、两边高”这一现象,作出了截线 L1 上空间电荷密度分布,如图 7(d)所示。由于在气隙缺陷两侧界面处积累的空间电荷量较多,使得气隙缺陷两侧界面处场强发生严重畸变。

2.2.2 负载运行条件下电场分布

直流电缆中间接头存在气隙缺陷情况下,其负载运行时的电场与电荷分布如图 8 所示。对图 8(a)和(b)分析发现,除气隙处,其电场变化情况与无缺陷电缆中间接头负载运行条件下的电场分布规律总体一致。

从图 8(c)可以看出,在 XLPE-硅脂分界面即截线 L1 上,气隙附近场强最大值为 6.1 kV/mm,其畸变倍数为 2.8 倍,小于电缆中间接头存在气隙缺陷空载时的场强畸变倍数。引起这一现象的原因是在温度场的影响下,XLPE、SIR 的电导率增大。从径向上看,由于气隙的电导率受温度场影响较小,而 XLPE、SIR 电导率增大,根据式(10),气隙缺陷承受的场强较空载时进一步增大,最大值约为 234.2 kV/mm,分别是无缺陷电缆中间接头负载运行、电缆中间接头带气隙缺陷空载运行时相同位置处的 1.7 倍和 2.1 倍。负载时气隙缺陷处的畸变倍数减小,其原因为温度对 XLPE、SIR 绝缘材料电导率的影响较大,温度的升高导致绝缘材料的电导率增大,降低了分界面处绝缘材料承受的场强,从而在宏观上表现为电场分布相对更为均匀。

截线 L1 上的空间电荷密度与电缆中间接头带气隙缺陷在空载运行条件下的变化趋势基本一致,如图 8(d)所示,在气隙缺陷附近空间电荷密度分布也出现“中间低、两边高”的现象。

2.3 电缆中间接头受潮电场分布

2.3.1 空载运行条件下电场分布

直流电缆中间接头绝缘界面受潮时在空载运行条件下的电场与电荷分布如图 9 所示。从图 9(a)和(b)可以看出,与气隙缺陷形成的电场分布云图变化情况一致,除水膜位置外,其电场分布情况与直流电缆中间接头空载运行时的电场大小一致。在水膜缺陷内部,其场强数值接近于 0。

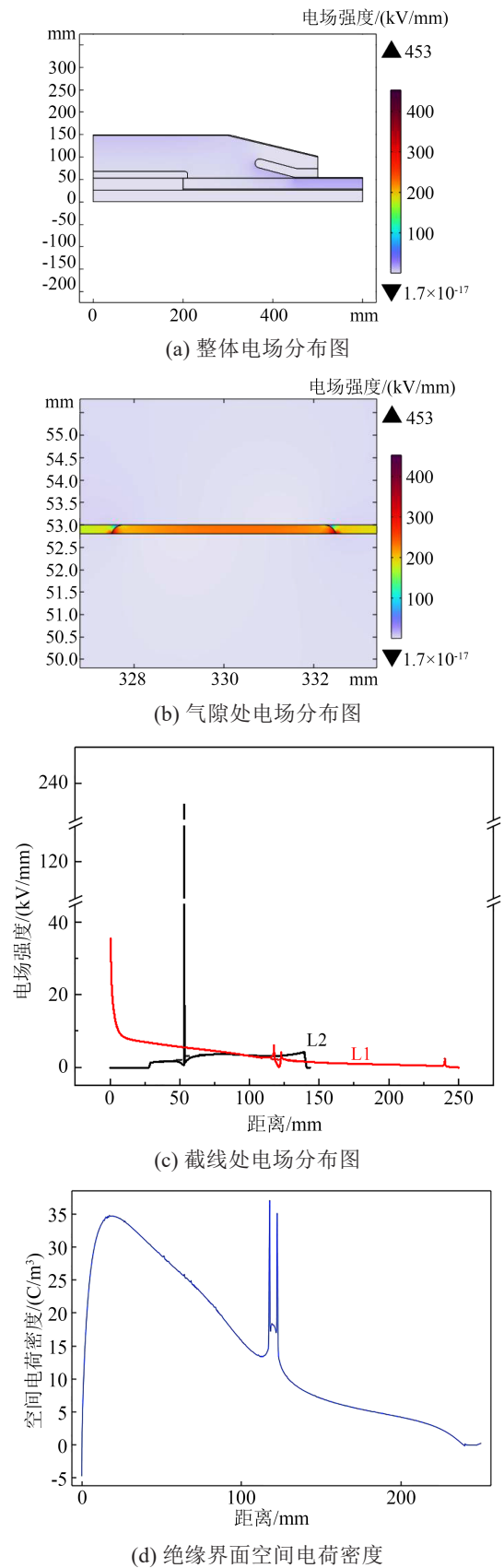


图 8 电缆中间接头带气隙缺陷负载运行条件下电场与电荷分布

Fig.8 Electric field and charge distribution of cable intermediate joint with air gap defects at load

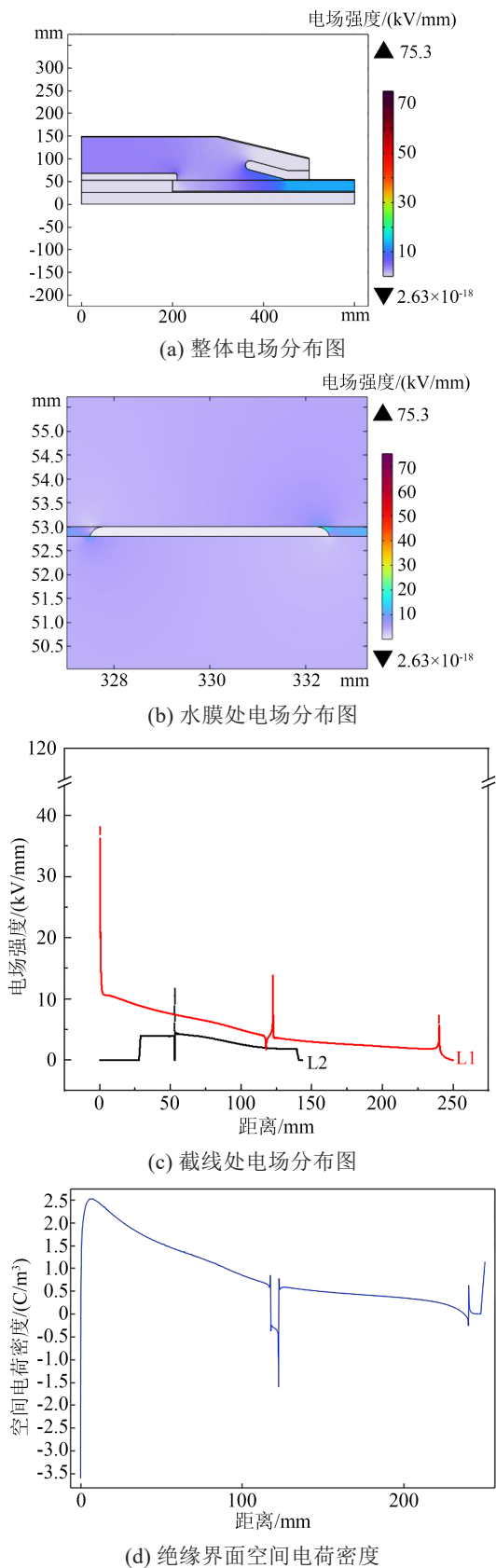


图9 电缆中间接头绝缘界面受潮空载运行条件下电场与电荷分布

Fig.9 Electric field and charge distribution of cable intermediate joint with interface moisture at no load

从图9(c)可以看出,在XLPE-硅脂分界面即截线L1上,如前文所述,由于水膜的存在导致物质结构发生改变,形成新的界面,造成电荷积聚,导致水膜缺陷处的场强增大至13.9 kV/mm,畸变倍数约为无缺陷电缆中间接头相同位置处的3.9倍。从径向上看即截线L2,由于水膜的电导率远大于XLPE、SIR的电导率,据式(10)可知,水膜内部承受的场强急剧减小99.9%以上,其值为 3.6×10^{-7} kV/mm。

分析截线L1上的空间电荷特性,结果如图9(d)所示。从图9(d)可以看出,除水膜位置外,空间电荷密度与直流电缆空载运行时大小一致。针对XLPE与水膜分界面空间电荷特性,由于水膜的电导率和相对介电常数较大,界面电荷极性与水膜侧的电极极性相同,以负电荷为主,空间电荷密度最大值为 1.5 C/m^3 ,水膜附近空间电荷积聚是其场强畸变的重要因素。

2.3.2 负载运行条件下电场分布

直流电缆中间接头绝缘界面受潮时在负载运行条件下的电场与电荷分布如图10所示。由图10(a)和(b)可以看出,绝缘界面受潮在两种运行条件下的电场畸变规律大致相同,相较于无缺陷直流电缆中间接头负载运行条件下的最大场强位置发生改变,最大场强位于水膜上弯曲表面与硅脂接触的尖端位置,其值为886 kV/mm,水膜内部的场强相对于硅脂的场强急剧减小。

如图10(c)所示,在XLPE-硅脂分界面即截线L1上,水膜缺陷附近场强最大值为20.5 kV/mm,相对于空载运行条件,水膜缺陷附近的电场畸变倍数达到9.3倍。从径向上看即截线L2,水膜内部的场强也急剧减小99.9%以上,最小值为 6.8×10^{-6} kV/mm。相较于空载运行条件下的水膜内场强 3.6×10^{-7} kV/mm,负载运行条件下由于温度升高,导致电缆中间接头各介质的电导率也随之增大,最终表现为水膜内部的场强增大。

电缆中间接头绝缘界面受潮后的空间电荷密度分布如图10(d)所示。从图10(d)可以看出,其空间电荷极性与电缆中间接头空载时水膜-XLPE界面极性相同,水膜与硅脂分界面上空间电荷最大值为 6.0 C/m^3 ,相较于空载时水膜与硅脂分界面上空间电荷密度最大值 1.5 C/m^3 更大,这可能是导致电缆中间接头绝缘界面受潮在负载运行条件下的场强畸变较空载时更大的原因。

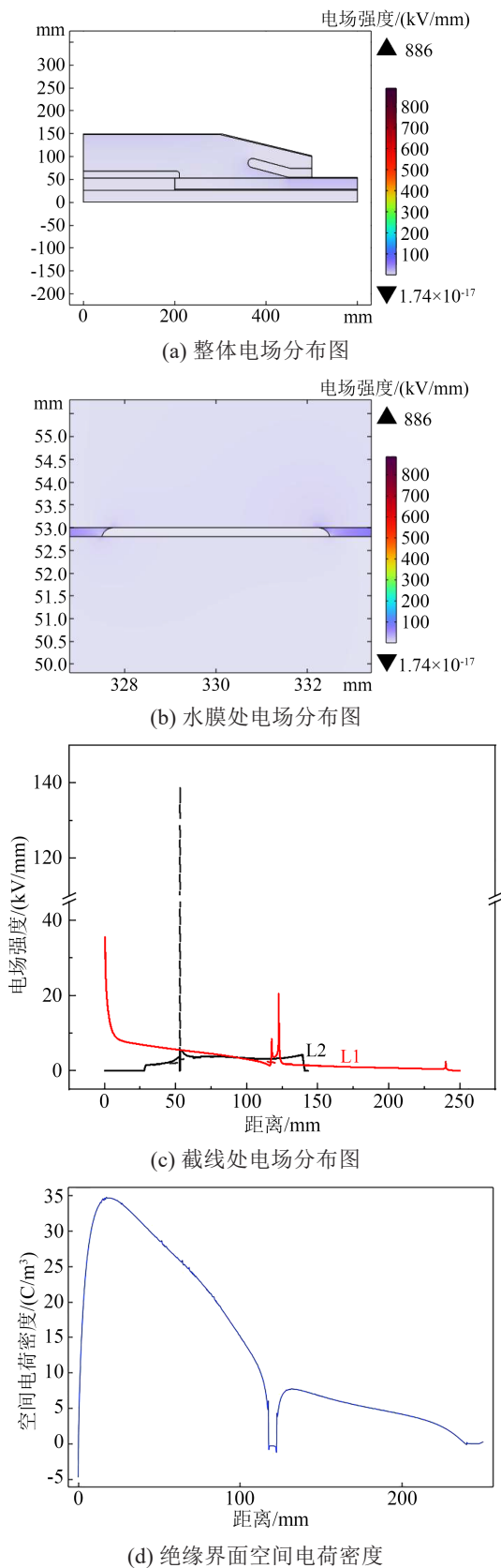


图10 电缆中间接头负载运行条件下绝缘界面受潮电场与电荷分布

Fig.10 Electric field and charge distribution of cable intermediate joint with interface moisture at load

3 讨论

交/直流 XLPE 电缆运行特性和绝缘特性的显著差异主要是由绝缘介质微观载流子在交流电场与直流电场下的响应不同造成的^[31]。目前由于直流电缆的大规模敷设,在倡导节约资源以及技术发展的影响下,越来越多的研究致力于对传统交流电缆进行直流化改造,并且通过总结交流电缆运行经验来丰富直流电缆缺陷检测的理论研究^[31-32]。因此,有必要对 XLPE 电缆在两种电场运行条件下,电缆中间接头存在缺陷时的电场畸变程度进行讨论。

目前已有学者针对交流电缆中间接头存在多种缺陷时的电场分布情况进行了探讨,将目前已有的研究成果与本文两种运行条件下电缆中间接头存在缺陷时的电场畸变倍数进行对比分析,结果如表3所示^[33-35]。

表3 电场变化情况与电缆交/直流运行特性关系

Table 3 Relationship between electric field variations and cable AC/DC operation characteristics

缺陷	kV/mm			
	交流		直流	
	10 kV	35 kV	110 kV	320 kV
正常	0.375	1.01	2.8	139.1
气隙	0.5	1.23	4.4	234.2
水	0.75	(未见报道)	(未见报道)	6.8×10^{-6}

由表3可知,由于交流 XLPE 电缆中间接头一般在工频电压下运行,其可视为准静态电场,缺陷周围的场强主要受缺陷相对介电常数的影响。直流电缆与交流电缆区别较大,电场分布主要受场强与电导率的影响。10、35、110 kV 的交流电缆由于其中间接头存在气隙引起的电场畸变倍数分别为1.33倍、1.22倍、1.57倍,直流电缆在负载运行条件下,气隙缺陷内部导致电缆中间接头引起的电场畸变倍数为1.68倍。交/直流电缆中间接头产生气隙缺陷均会导致局部场强增大,但气隙缺陷在直流电缆中间接头引起的电场畸变程度相较于交流电缆更大,这是由于气隙缺陷的电导率相较于相对介电常数变化程度更大。

交流电缆由于其中间接头存在水膜缺陷引起的电场畸变倍数为2倍,由前文所述,直流电缆中间接头在负载运行条件下水膜缺陷周围场强增大9.3倍,水膜缺陷内局部场强减小99.9%以上。在交流电场作用下,由于电介质的场强 E 与其 ϵ 成反比,而

水膜的相对介电常数较大,导致水膜缺陷内部场强为正常时的20%~60%。在直流电场作用下,由于电介质的场强 E 与其电导率 γ 成反比,且水膜的电导率较大,同样造成水膜缺陷内部场强急剧缩小99.9%以上。交/直流电缆中间接头产生水膜缺陷均会导致其缺陷周围的局部场强增大,而缺陷内部的局部场强减小。

由此可见,在直流电场作用下,由于电力电缆存在缺陷导致局部场强畸变程度相较于交流电场更大,这是由于电缆中间接头侵入缺陷的电导率相较于相对介电常数变化程度更大,缺陷周围空间电荷聚集更多,进而造成电缆加速老化、产生故障。因此,在直流电缆运维过程中需要更加关注中间接头中可能产生的缺陷。

4 结论

本文针对 ± 320 kV直流电缆中间接头在生产、制造、安装及运行过程中极易受到气隙、水分等物质侵入形成缺陷引起电场畸变的现象,基于空载与负载两种运行条件下分别对电缆中间接头的电场畸变程度进行仿真分析,得到如下结论:

(1)在两种运行条件下,气隙、水分等物质侵入均会对电缆中间接头电场分布引起畸变。气隙侵入电缆中间接头会使其局部场强增大,相较于电缆无缺陷运行时的相同位置处,空载时其内部畸变倍数为9.6倍,周围畸变倍数为3.5倍;负载时其内部畸变倍数为1.7倍,周围畸变倍数为2.8倍。水分侵入使其缺陷内局部场强减小,周围局部场强增大,在两种运行条件下,水膜缺陷内局部场强减小99.9%以上,场强大小接近于0;水膜缺陷周围局部场强在空载、负载运行条件下的畸变倍数分别为3.9倍、9.3倍。

(2)温度场对电缆中间接头绝缘界面存在气隙缺陷、受潮引起的畸变作用不一致。电缆中间接头绝缘界面存在气隙缺陷的情况下,温度场起到了均匀电场的作用,电缆中间接头气隙缺陷处在空载运行条件下的场强畸变程度比负载时更大。电缆中间接头绝缘界面存在受潮的情况下,温度场促进了空间电荷积累,导致水膜缺陷处的场强畸变程度较空载时更大。

(3)与交流电缆相比,直流电缆在受到外部缺陷侵入之后引起的电场畸变程度更大,危害程度也

相对更大,因此应更加关注中间接头的缺陷状态。

参考文献 References

- [1] TANG J, SONG W, PAN C, et al. Improvement of insulation defect identification for DC XLPE cable by considering PD aging [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2019,114,105409.
- [2] 钟力生,任海洋,曹亮,等.挤包绝缘高压直流电缆的发展[J].高电压技术,2017,43(11):3473-3489.
ZHONG Lisheng, REN Haiyang, CAO Liang, et al. Development of squeezed insulation high voltage DC cables[J]. High Voltage Engineering,2017,43(11):3473-3489.
- [3] 柳松,彭嘉康,王霞,等.高压电缆附件界面压力的影响因素分析[J].绝缘材料,2013,46(6):86-89.
LIU Song, PENG Jiakang, WANG Xia, et al. Analysis of factors influencing interface pressure of high voltage cable accessories [J]. Insulating Materials,2013,46(6):86-89.
- [4] 赵健军,许庆重,王文成,等.绝缘老化对电缆中间接头界面缺陷处电场分布的影响[J].绝缘材料,2021,54(7):67-74.
ZHAO Jianjun, XU Qingzhong, WANG Wencheng, et al. The effect of insulation ageing on the electric field distribution at interface defects in cable joints[J]. Insulating Materials,2021,54(7):67-74.
- [5] POMPILI M, CALCARA L, D'ORAZIO L, et al. Joints defectiveness of MV underground cable and the effects on the distribution system[J]. Electric Power Systems Research,2021,192(3):107004.
- [6] 曹雯,张敏,刘倩,等.电缆接头复合界面处水分对其闪络特性的影响[J].高电压技术,2018,44(11):3699-3706.
CAO W, ZHANG M, LIU Q, et al. Influence of moisture on flash-over performance of composite interface cable joint[J]. High Voltage Engineering,2018,44(11):3699-3706.
- [7] 杜清,杨绍才,胡晓.XLPE电缆中间接头内部放电射频信号的时频分析[J].电网技术,2023,47(12):1-10.
DU Qing, YANG Shaocai, HU Xiao. Time frequency analysis of internal discharge RF signals in XLPE cable intermediate joints [J]. Power System Technology,2023,47(12):1-10.
- [8] 何嘉弘,何康,董博文.配网电缆接头内部缺陷电场特征研究及电树发展分析[J].电力工程技术,2023,42(1):154-161.
HE Jiahong, HE Kang, DONG Bowen. Research on the electric field characteristics of internal defects in distribution network cable joints and analysis of electrical tree development[J]. Electric Power Engineering Technology,2023,42(1):154-161.
- [9] 王成江,郭鸣锐,张扬,等.微间隙持续放电下电缆接头温度-应力分布及界面开裂规律研究[J].绝缘材料,2022,55(4):94-102.
WANG Chengjiang, GUO Mingrui, ZHANG Yang, et al. Study on temperature stress distribution and interface cracking law of cable joints under continuous micro gap discharge[J]. Insulating Materials,2022,55(4):94-102.
- [10] 单秉亮,李舒宁,杨霄,等.XLPE配电网电缆缺陷诊断与定位技术面临的关键问题[J].电工技术学报,2021,36(22):4809-4819.
SHAN Bingliang, LI Shuning, YANG Xiao, et al. Key issues faced by XLPE distribution cable defect diagnosis and position-

- ing technology[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2021,36(22):4809-4819.
- [11] 刘刚,徐庆,石聪聪,等. 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[J]. 绝缘材料,2022,55(9): 107-115.
- LIU Gang, XU Qing, SHI Congcong, et al. Study on the influence of insulation interface air gap defects and their damping state on the electric heating field of T-shaped cable joint[J]. Insulating Materials,2022,55(9):107-115.
- [12] 谢坤,张伟,张杰,等. 高压电缆附件绝缘理化性能与电气特性研究[J]. 电工电能新技术,2022,41(1):8-16.
- XIE Kun, ZHANG Wei, ZHANG Jie, et al. Research on the physical and chemical properties and electrical characteristics of insulation for high voltage cable accessories[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy,2022,41(1):8-16.
- [13] 洪浚轩,何文,何浩辉,等. 电缆线路中间接头绝缘缺陷电场仿真与放电小室局放检测研究[J]. 电网与清洁能源,2019,35(8): 56-61.
- HONG Junxuan, HE Wen, HE Haohui, et al. Research on electric field simulation of insulation defects in cable line intermediate joints and partial discharge detection in discharge chambers [J]. Power System and Clean Energy,2019,35(8):56-61.
- [14] VASHCHUK S P, SLOBODYAN S M, DEEVA V S, et al. Material selection for cable gland to improved reliability of the high-hazard industries[C]/IOP Conference Series Materials Science and Engineering. Samara, Russian Federation: IOP Publishing, 2018,302:012048.
- [15] KRUIZINGA B, WOUTERS P A A F, STEENNIS E F. Fault development upon water ingress in damaged low voltage underground power cables with polymer insulation[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2017,24(2):808-816.
- [16] LI K, ZHOU K, ZHU G. Toward understanding the relationship between the microstructure and propagation behavior of water trees[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2019,26(4):1116-1124.
- [17] 尚康良,曹均正,赵志斌,等. 320 kV XLPE 高压直流电缆接头附件仿真分析和结构优化设计[J]. 中国电机工程学报,2016,36(7):2018-2024.
- SHANG Kangliang, CAO Junzheng, ZHAO Zhibin, et al. Simulation analysis and structural optimization design of accessories for 320 kV XLPE high-voltage DC cable joints[J]. Proceedings of the CSEE,2016,36(7):2018-2024.
- [18] 陈振新,俞恩科,汪洋,等. 整体预制式和绕包式 XLPE 高压直流电缆接头电场分布研究及接头结构优化[J]. 哈尔滨理工大学学报,2018,23(6):77-81.
- CHEN Zhenxin, YU Enke, WANG Yang, et al. Research on electric field distribution and joint structure optimization of integral prefabricated and wrapped XLPE high-voltage DC cable joints [J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2018,23(6):77-81.
- [19] 严有祥,朱婷,王蕾. 基于有限元法对±320 kV 直流 XLPE 电缆中间接头电场与空间电荷的仿真计算[J]. 高电压技术,2017,43(11):3591-3598.
- YAN Youxiang, ZHU Ting, WANG Lei. Simulation calculation of electric field and space charge in the intermediate joint of ±320 kV DC XLPE cable based on finite element method[J]. High Voltage Engineering,2017,43(11):3591-3598.
- [20] 刘泳斌,高景晖,钟力生,等. ±320 kV 直流电缆交联聚乙烯/三元乙丙橡胶附件击穿特性[J]. 电力工程技术,2023,42(3):72-80.
- LIU Yongbin, GAO Jinghui, ZHONG Lisheng, et al. Breakdown characteristics of cross-linked polyethylene/ethylene propylene diene rubber accessories for ±320 kV DC cables[J]. Electric Power Engineering Technology,2023,42(3):72-80.
- [21] LI G C, LIANG X J, ZHANG J H, et al. Insulation properties and interface defect simulation of distribution network cable accessories under moisture condition[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2022,29(2):403-411.
- [22] 冯慈璋,马西奎. 工程电磁场导论[M]. 北京:高等教育出版社, 2000.
- FENG Cizhang, MA Xikui. Introduction to engineering electromagnetic fields[M]. Beijing: Higher Education Press,2000.
- [23] DELPINO S, FABIANI D, MONTANARI G C, et al. Polymeric HVDC cable design and space charge accumulation, Part 2: insulation interfaces[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2008, 24(1):14-24.
- [24] 王霞,朱有玉,王陈诚,等. 空间电荷效应对直流电缆及附件绝缘界面电场分布的影响[J]. 高电压技术,2015,41(8):2681-2688.
- WANG Xia, ZHU Youyu, WANG Chencheng, et al. The influence of space charge effect on the electric field distribution at the insulation interface of DC cables and accessories[J]. High Voltage Engineering,2015,41(8):2681-2688.
- [25] REDDY C, RAMU T. On the computation of electric field and temperature distribution in HVDC cable insulation[J]. IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation,2006, 13(6): 1236-1244.
- [26] 朱婷. ±320kV 直流输电电缆附件关键技术研究[D]. 厦门:厦门理工学院,2016.
- ZHU Ting. Research on key technologies of ± 320kV DC transmission cable accessories [D]. Xiamen:Xiamen Institute of Technology,2016.
- [27] 方春华,叶小源,杨司齐,等. 水分对 XLPE 电缆中间接头电场和击穿电压的影响[J]. 华北电力大学学报(自然科学版),2021,48(2):64-72.
- FANG Chunhua, YE Xiaoyuan, YANG Siqi, et al. The effect of moisture on the electric field and breakdown voltage of XLPE cable intermediate joints[J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition),2021,48(2):64-72.
- [28] 赵鹏,赵健康,陈铮铮,等. 直流叠加雷电冲击电压下±320kV 直流电缆整体预制式接头典型故障机理分析[J]. 高电压技术, 2019,45(12):3964-3969.
- ZHAO Peng, ZHAO Jiankang, CHEN Zhengzheng, et al. Analysis of typical fault mechanisms of prefabricated joints in ±320kV DC cables under DC superimposed lightning impulse voltage [J]. High Voltage Engineering,2019,45(12):3964-3969.

- [29] 梅文杰,狄健,李文鹏,等. 320 kV 交联聚乙烯绝缘直流电缆电气特性研究[J]. 绝缘材料,2021,54(6):56-62.
MEI Wenjie, DI Jian, LI Wenpeng, et al. Research on electrical characteristics of 320 kV crosslinked polyethylene insulated DC cable[J]. Insulating Materials,2021,54(6):56-62.
- [30] 李根,王航,周文俊,等. 波纹护套高压 XLPE 电缆缓冲层空气间隙电场分布[J]. 高压电器,2021,57(10):167-175.
LI Gen, WANG Hang, ZHOU Wenjun, et al. Distribution of electric field in air gap of ripple sheath high voltage XLPE cable buffer layer[J]. High Voltage Engineering,2021,57(10):167-175.
- [31] 李天平,滕玉平,牛荣泽,等. 交/直流电缆电场对绝缘及运行特性的影响[J]. 电线电缆,2023(4):46-51.
LI Tianping, TENG Yuping, NIU Rongze, et al. The influence of electric field on insulation and operating characteristics of AC/DC cables[J]. Wire & Cable,2023(4):46-51.
- [32] 黄凯. 交/直流电缆接头电场仿真研究[D]. 青岛:青岛大学,2021.
HUANG Kai. Simulation study on electric field of AC/DC cable joints[D]. Qingdao: Qingdao University,2021.
- [33] 江天炎,成守花,毕茂强,等. 基于 ANSYS 的电缆接头典型绝缘缺陷电-热场仿真研究[J]. 重庆理工大学学报(自然科学),2019,33(9):151-158.
JIANG Tianyan, CHENG Shouhua, BI Maoqiang, et al. Simulation study of typical insulation defects in cable joints using ANSYS[J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science),2019,33(9):151-158.
- [34] 徐虹,黄丽秋,娄建勇. 35 kV XLPE 电缆中间接头典型缺陷三维电场仿真分析[J]. 浙江电力,2020,39(10):9-13.
XU Hong, HUANG Liqiu, LOU Jianyong. Three dimensional electric field simulation analysis of typical defects in intermediate joints of 35 kV XLPE cables[J]. Zhejiang Electric Power, 2020,39(10):9-13.
- [35] 周象贤,曹俊平,王少华,等. 110 kV 电缆中间接头典型缺陷电场三维仿真分析[J]. 绝缘材料,2018,51(7):49-53.
ZHOU Xiangxian, CAO Junping, WANG Shaohua, et al. Three dimensional simulation analysis of typical defects in the electric field of intermediate joints in 110 kV cables[J]. Insulating Materials,2018,51(7):49-53.

收稿日期:2024-02-29;修回日期:2024-04-24。

作者简介:

奚锐(1997-),男(汉族),重庆潼南人,硕士生,主要研究方向为电气设备及其绝缘;

通信作者:唐超(1981-),男(汉族),四川自贡人,教授,博士生导师,主要研究方向为智能电网(配电网)新技术。