

温度梯度和电树枝缺陷对高压直流电缆接头电场分布特性的影响

王卓¹, 李欢¹, 石迎新², 高剑伟¹, 陈格格¹

(1. 陕西理工大学电气工程学院, 陕西 汉中 723001; 2. 陕西省电力设计院, 西安 710054)

摘要: 电缆中间接头结构复杂易出现故障, 一旦出现气隙、杂质等微观缺陷, 就可能引发电场畸变进而生成电树枝甚至增加击穿风险。并且电缆接头由于空间电荷积聚及温度梯度引发的场强翻转等问题可能引起绝缘击穿。将 ± 200 kV 高压直流电缆中间接头设为研究对象, 通过有限元仿真软件研究不同温度梯度(ΔT)下生长及滞长阶段电树枝缺陷对电缆接头稳态、暂态电场分布特性的影响。结果表明, 当 ΔT 达到一定值时, SIR 和 XLPE 绝缘内会发生场强翻转; 稳态电场下, 生长期电树枝引发的局部电场最大值远高于无缺陷时场强; 滞长期电树枝引发的局部电场最大值略高于无缺陷时场强。暂态电场下, 当 $\Delta T \geq 20$ °C 时, 生长阶段电树枝的最大电场强度随极性反转时间的增加而逐渐减小, 当 $\Delta T < 20$ °C 时最大场强则会先减小后增大; 滞长期电树枝的最大电场强度随极性反转时间的增加出现先减小后增大现象, 且在 120 s 时出现最大电场强度。

关键词: HVDC 电缆接头; 温度梯度; 场强翻转; 有限元仿真; 电树枝; 电场分布

Effects of Temperature Gradient and Electrical Tree Defects on the Electric Field Distribution Characteristics of HVDC Cable Joints

WANG Zhuo¹, LI Huan¹, SHI Yingxin², GAO Jianwei¹, CHEN Gege¹

(1. School of Electrical Engineering, Shaanxi University of Technology, Shaanxi Hanzhong 723001, China; 2. Shaanxi

Electric Power Designing Institute, Xi'an 710054, China)

Abstract: The structure of the cable intermediate joint is complex and prone to failure. Once micro-defects such as air gap and impurities occur, it may cause electric field distortion and generate electrical trees or even increase the risk of breakdown. And cable joints may cause insulation breakdown due to problems such as space charge accumulation and field strength reversal caused by temperature gradient. Taking the ± 200 kV HVDC cable intermediate joint as the research object, the influence of electrical tree defects in the growth and stagnation stages under different temperature gradients (ΔT) on the steady-state and transient electric field distribution characteristics of cable joints was studied by finite element simulation software. The results show that when ΔT reaches a certain value, field strength reversal occurs in SIR and XLPE insulation. Under the steady-state electric field, the maximum value of the local electric field caused by the electrical tree during the growth period is much higher than that without defects. The maximum value of the local electric field caused by the electrical tree in the hysteresis period is slightly higher than the field strength when there is no defect. Under the transient electric field, when $\Delta T \geq 20$ °C, the maximum electric field intensity of the electrical tree in the growth stage gradually decreases with the increase of the polarity reversal time. When $\Delta T < 20$ °C, the maximum electric field intensity decreases first and then increases. With the increase of polarity reversal time, the maximum electric field intensity of the electrical tree in the stagnation stage decreases first and then increases, and the maximum electric field intensity appears at 120 s.

Key words: HVDC cable joints; temperature gradient; field strength reversal; finite element simulation; electric tree branches; electric field distribution

0 引言

直流输电相较于交流输电具有输送距离远、输电容量大、经济性好、可控性高等优点, 是“西电东送”的主要形式, 因此在远距离大容量输电方面占据重要地位^[1-4]。高压直流(high voltage DC, HVDC)电缆接头是电缆之间连接的关键部分, 同时也是电缆系统中的最薄弱环节, 容易发生故障, 其可靠性直接影响整个线路运行的稳定性。电缆接头

结构复杂, 接头内部电场分布不均匀, 而电缆绝缘的短时耐压性能和其长期稳定性都受到电场分布的影响, 因此电场分布不均匀可能导致电介质的击穿和接头的损坏^[5-9]。故研究 HVDC 电缆接头的电场分布特性至关重要。

直流电压下的电缆接头电场分布复杂, 电缆运行过程中线芯发热会使电缆绝缘的温度从内向外呈现出由高到低的梯度分布, 温度梯度(ΔT)引发的电导梯度分布会导致场强出现梯度分布。此外, 电

基金项目: 陕西省科技厅自然科学重点项目(2023-JC-ZD-34); 陕西省教育厅专项科研计划项目(22JK0322); 陕西理工大学研究生创新基金项目(SLGYCX2403)。

Project Supported by Shaanxi Provincial Department of Science and Technology Natural Science Key Projects(2023-JC-ZD-34), Special Research Program of Shaanxi Provincial Department of Education (22JK0322), The Shaanxi University of Technology Graduate Innovation Fund(SLGYCX2403).

极上的电荷迁移和注入也因 ΔT 的影响愈发强烈,进一步加速了绝缘层表面场强的畸变,这种现象会提高绝缘击穿的风险,从而大大降低直流电缆的运行年限。因此在直流电缆运行的过程中,温度梯度效应和相伴之的空间电荷现象是制约其向更高电压等级发展的关键因素^[10]。针对以上关键因素,国内外学者做了大量研究工作。宋淑伟等人研究了不同 ΔT 下的 HVDC 电缆接头电场分布特性,并对施加电压和极性反转时间等因素进行研究。结果发现应力锥后端与高压屏蔽端部间最大场强的位置呈现出随 ΔT 和施加电压变化而动态转移的趋势,硅橡胶(Silicon rubber, SIR)与高压屏蔽端部场强最大值与极性反转时间近似呈现出指数关系^[11]。吴洋等人的研究表明,在电缆接头中,空间电荷积聚主要在应力锥的根部与高压屏蔽的顶端,其导致这两处电场发生畸变,成为电缆接头中的薄弱环节,而温度梯度会进一步加剧电场畸变的程度,进而影响电缆接头的稳定运行^[12]。

在生产和安装过程中,电缆接头内易引入不同类型的缺陷,如气隙、刀痕、金属杂质、半导体杂质等^[13]。缺陷引发的电场畸变会导致接头内绝缘材料产生电树枝,增加击穿风险^[14]。针对于此,部分学者对直流场中电缆接头存在的电树枝缺陷进行了研究。常文治等人将 SIR 切片处理并作为试样,以外置针尖产生 SIR 介质中的电应力集中,通过逐级升压激发并加速 SIR 绝缘劣化直至绝缘击穿,此方法清晰地界定了从初始劣化到绝缘击穿整个过程中的两个关键阶段:局部放电发展期与电树枝生长期。分析了局部放电发展和电树枝生长的关联特性,详细描述了这两个过程的演变及特征^[15]。祝曦研究了不同温度下,通过对交联聚乙烯(crosslinked polyethylene, XLPE)针-板电极试样开展恒定直流电压下的电树枝实验,发现温度是限制直流电树枝局部放电检测的关键,高温会提高电树枝放电强度。接着通过电树枝放电的气-固两相电荷仿真模型,得出电树枝沿电场方向上的生长使放电幅值增大,而沿垂直电场方向即水平方向上的生长会使放电保持稳定^[16]。林国海的研究通过对 XLPE 针-板绝缘试样加直流电压,使绝缘内部发生局部放电产生电树枝,发现电树枝在直流电压下降阶段将产生局部放电,并且随着电压下降,局部放电幅值逐渐增大,而降压前后电树枝尺寸不会发生变化^[17]。对含电树枝缺陷的电缆接头的研究大多通过实验室搭建的试验系统来进行,且利用有限元法^[18-23]对含电树枝缺陷的电缆接头在温度梯度效应影响下的

电场分布规律鲜有研究。

文中以 Comsol 有限元仿真软件建立的 ± 200 kV HVDC 电缆中接头为研究对象,将外屏蔽和应力锥处进行接地设置,稳态情况下对导体施加 ± 200 kV 直流电压激励,暂态情况下对导体施加随时间变化的电压波形,研究温度梯度与电树枝缺陷对 HVDC 电缆接头电场分布特性的影响。

1 仿真模型建立

1.1 物理场控制方程

为研究不同温度梯度下 HVDC 电缆接头电场分布特性,需要在接头上加载电压和电流,电流流过导体产生热量,因此整个模型要进行电场、热场耦合仿真计算^[24]。电场的物理场控制方程可用式(1)、(2)来进行描述:

$$V_0 = 0 \quad (1)$$

$$V_C = U \quad (2)$$

式(1)、(2)中: V_0 表示施加在应力锥以及电缆屏蔽层上的电压; V_C 表示电缆导体上施加的电压; U 为电压幅值。SIR 界面与 XLPE 界面须满足式(3)、(4)^[25]:

$$\varphi_1 = \varphi_2 \quad (3)$$

$$\gamma_1 \frac{\partial \varphi_1}{\partial n} = \gamma_2 \frac{\partial \varphi_2}{\partial n} \quad (4)$$

式(3)、(4)中: φ_1 和 φ_2 分别表示 XLPE 层和 SIR 层的电位; n 表示界面法向矢量; γ_1 和 γ_2 分别表示 XLPE 层和 SIR 层的电导率。

由于电流守恒,附件又必须满足式(5)-(7)^[26]:

$$\nabla \cdot J = Q_i \quad (5)$$

$$J = \sigma E + J_e \quad (6)$$

$$E = -\nabla V \quad (7)$$

式(5)-(7)中: ∇ 为矢量微分算符; J 为电流密度矢量, A/m²; Q_i 为电流源, A/m²; σ 为电导率, S/m; E 为电场强度矢量, V/m; V 为电势, V; J_e 为外部注入电流密度, A/m²。 V 为求解出的基本参数,其他参数以 V 为基础求出。

热场的控制方程见式(8)^[27]:

$$\rho_2 C_2 v \cdot \nabla T = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + Q_2 \quad (8)$$

式(8)中: ρ_2 为固体材料的密度; C_2 为固体材料

常压下的比热容； λ 为固体材料的导热系数， $W/(m \cdot K)$ ； Q_2 为固体材料中的热源， W/m^3 。

1.2 几何模型建立

文中采用 Comsol 仿真软件对整体预制式 ± 200 kV 直流电缆接头进行三维几何建模，其剖面示意图见图 1。

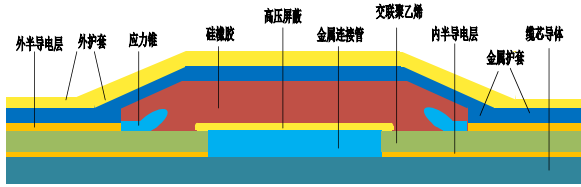


图 1 ± 200 kV 电缆接头剖面示意图

Fig. 1 Schematic diagram of ± 200 kV cable joint profile

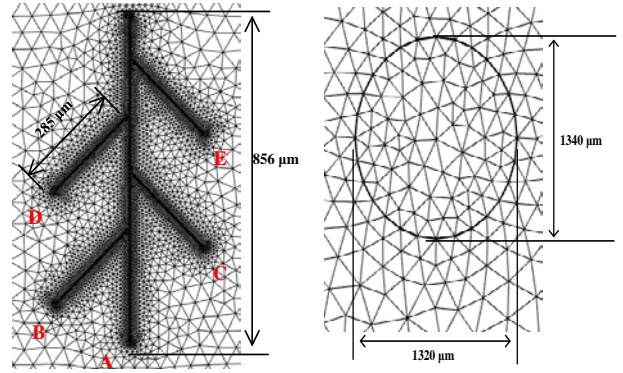
接头几何模型的主要结构为长 260 mm 的高压屏蔽管，其端部设计为圆角；内爬距距离为 240 mm，应力锥端部到接头端部距离为 70 mm；应力锥采用半导电硅橡胶^[28]。电缆接头各部分几何参数见表 1。

表 1 电缆接头几何参数

Table 1 Geometric parameters of cable joints

参数	数值/mm
导体半径	19.0
内半导电层厚度	1.0
绝缘层	16.5
外半导电层厚度	1.0
金属护套厚度	3.0
外护套厚度	4.0
高压屏蔽管厚度	2.0

在生长阶段，电树枝首先以清晰的单一主枝干向前延伸，随后主枝干不断分支，形成明显的树枝状劣化结构。在滞长阶段，电树枝的尺寸几乎未见增长，其形态呈现出稳定的球状结构^[29]。为了研究不同阶段电树枝对电缆接头电场分布特性的影响，分别建立了生长阶段和滞长阶段电树枝的仿真模型，见图 2。生长阶段，电树枝设有一个主通道，其长度为 856 μm ，直径为 2 μm ；设有 4 个侧通道，侧通道长度为 285 μm ，直径为 2 μm ，其中字母为各电树枝尖端名称。滞长阶段，电树枝尺寸为长轴长 1 340 μm 、短轴长 1 320 μm 的模型。



(a) 电树枝生长阶段模型 (b) 电树枝滞长阶段模型

图 2 电树枝仿真模型

Fig. 2 Electric Tree Electric Field Simulation Model

采用 Comsol 软件中的用户控制网格来对三维的电缆中间接头进行网格剖分，四面体网格作为基本单元选择。对与电缆中间接头复杂性的特点，采用对各层结构分区域划分进行处理。由于电树枝为重点研究对象且尺寸非常小，将最小单元大小设置为 0.000 1 mm，最大单元设置为 0.000 2 mm。设置 XLPE 材料的最小单元大小为 0.000 2 mm，最大单元设置为 10 mm。在其他部分网格划分中，较细部分如半导电层及高压屏蔽管最小单元大小设置为 0.5 mm；尺寸比较大和绝缘比较均匀的部分最小单元大小设置为 4 mm。

1.3 材料属性

在负载运行状态下，聚合物材料的电导率在很大程度上受到温度和电场影响，因此绝缘内受电导率分布影响的场强会一同变化^[30]。温度与电场强度对电导率的影响可以用式(9)表示^[27]

$$\gamma(E, T) = A \exp[-\phi q / (k_b T)] \sinh(B |E|) / |E| \quad (9)$$

式(9)中： γ 为电导率，S/m；A 为与材料有关的常数， $V/(\Omega \cdot m^2)$ ； ϕ 为热活化能，eV； q 为电子荷电量，C； k_b 为玻尔兹曼常数，J/K； T 为材料绝对温度，K； B 为非线性相关系数，m/V； E 为电场强度，V/m。sinh 是双曲正弦函数。XLPE 和 SIR 的相应数据见表 2。电缆接头内部材料特性基本参数^[31]见表 3。

表 2 XLPE 和 SIR 材料的电导率相关函数

Table 2 Conductivity correlation functions of XLPE and SIR materials

材料	$A/[V \cdot (\Omega \cdot m^2)^{-1}]$	ϕ/eV	$B/(m \cdot V^{-1})$
XLPE	754.00	0.58	9.19×10^{-8}
SIR	2.03×10^5	0.76	1.48×10^{-7}

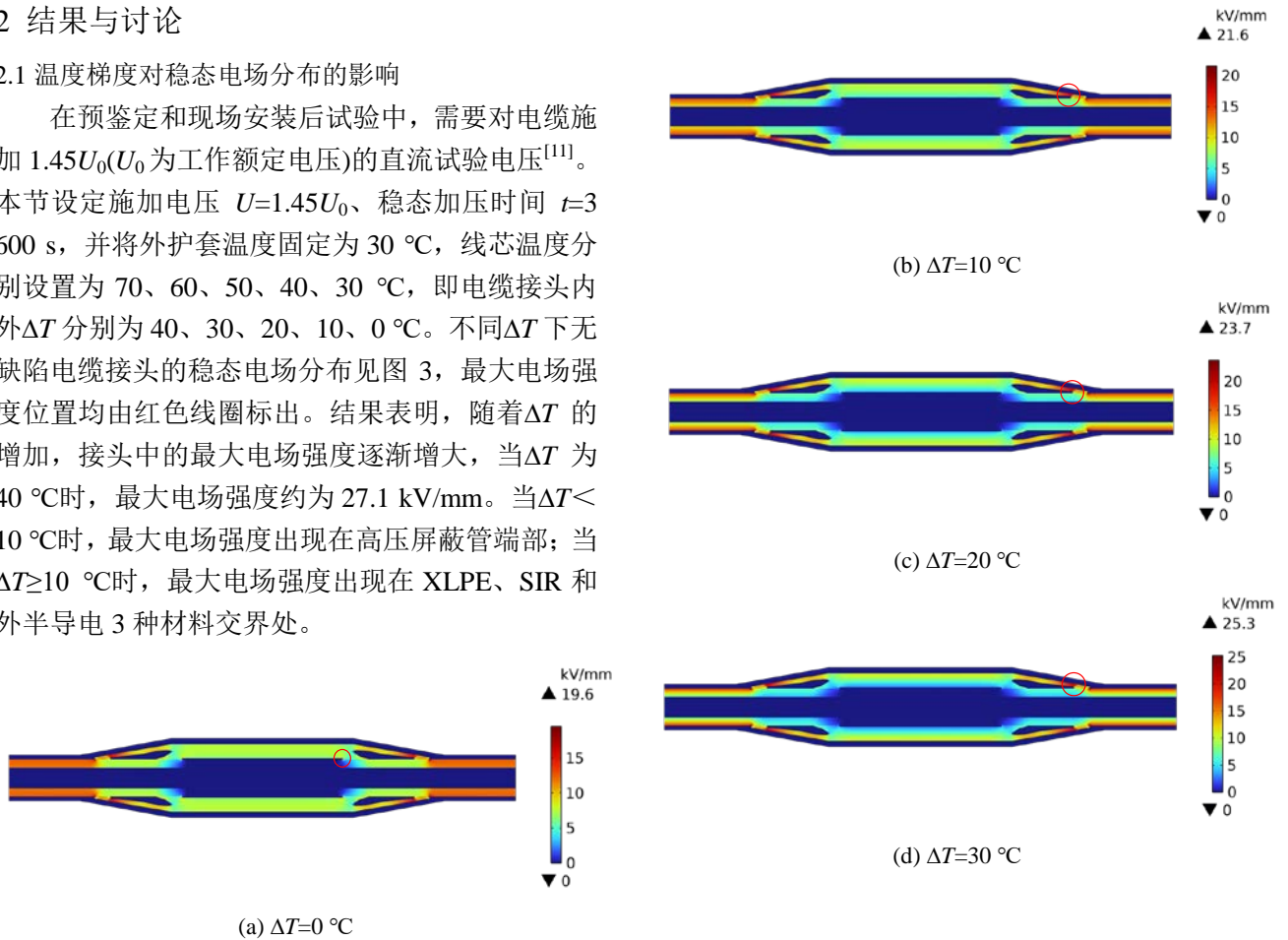
表 3 电缆接头相关特性参数
Table 3 Characteristic parameters related to cable joints

材料	导热系数/[W·(m·K) ⁻¹]	密度/(kg·m ⁻³)	恒压热容/[J·(kg·K) ⁻¹]	电导率/(S·m ⁻¹)	相对介电常数
铜芯	384.620 0	8 900.00	6.090	5.998 0×10 ⁷	1.00×10 ⁴
内半导体层	1.000 0	600.00	1 700.000	10.000 0	100.00
XLPE	0.290 0	910.00	1 630.000	公式拟合	2.30
外半导体层	1.000 0	600.00	1 700.000	10.000 0	100.00
金属护套	212.760 0	2 700.00	880.000	3.774 1×10 ⁷	1.00×10 ⁴
外护套	0.170 0	1 390.00	800.000	1.000 0×10 ⁻¹⁵	2.36
压接钳	384.620 0	8 900.00	6.090	5.998 0×10 ⁷	1.00×10 ⁴
应力锥	0.142 9	800.00	1 300.000	6.000 0	100.00
硅橡胶	0.270 0	1 275.00	1 950.000	公式拟合	3.20
高压屏蔽	0.250 0	1 150.00	1 900.000	10.000 0	100.00
生长阶段电树枝	0.026 7	1.29	1.003	1.000 0×10 ⁻⁶	1.00
滞长阶段电树枝	0.026 7	1.29	1.003	80.000 0	20.00

2 结果与讨论

2.1 温度梯度对稳态电场分布的影响

在预鉴定和现场安装后试验中,需要对电缆施加 $1.45U_0$ (U_0 为工作额定电压) 的直流试验电压^[11]。本节设定施加电压 $U=1.45U_0$ 、稳态加压时间 $t=3\ 600\text{ s}$,并将外护套温度固定为 $30\text{ }^\circ\text{C}$,线芯温度分别设置为 $70、60、50、40、30\text{ }^\circ\text{C}$,即电缆接头内外 ΔT 分别为 $40、30、20、10、0\text{ }^\circ\text{C}$ 。不同 ΔT 下无缺陷电缆接头的稳态电场分布见图 3,最大电场强度位置均由红色线圈标出。结果表明,随着 ΔT 的增加,接头中的最大电场强度逐渐增大,当 ΔT 为 $40\text{ }^\circ\text{C}$ 时,最大电场强度约为 27.1 kV/mm 。当 $\Delta T < 10\text{ }^\circ\text{C}$ 时,最大电场强度出现在高压屏蔽管端部;当 $\Delta T \geq 10\text{ }^\circ\text{C}$ 时,最大电场强度出现在 XLPE、SIR 和外半导体 3 种材料交界处。



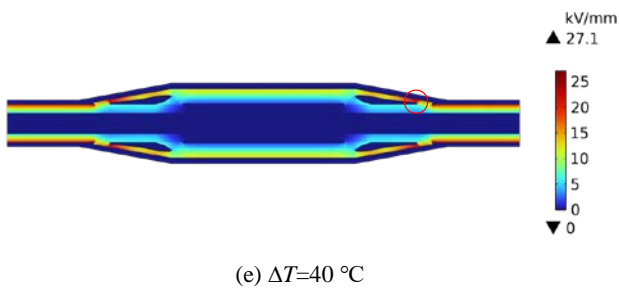


图 3 不同 ΔT 下电缆接头的稳态电场分布

Fig.3 The steady-state electric field distribution of cable joint under different ΔT

为了进一步研究 ΔT 对于高压直流电缆接头内部的电场分布的影响，在 XLPE 和 SIR 绝缘中分别取一条径向的红色截线，见图 4。



图 4 电缆接头截线位置示意图

Fig. 4 Schematic diagram of cable joint cutting position

不同 ΔT 下载线上的电场强度分布情况见图 5。从图 5 可以看出， ΔT 对 XLPE 和 SIR 两种材料的电场分布均有非常明显的影响。当 $\Delta T \geq 10^\circ\text{C}$ 时，随着 ΔT 的增大绝缘层外侧场强开始大于内侧场强，即出现场强分布翻转现象，且内外侧场强差值随之增加。当 $\Delta T = 10^\circ\text{C}$ 时，XLPE 内侧的电场强度略大于外侧的电场强度，即还未出现电场翻转现象；此时，SIR 内侧的电场强度小于外侧的电场强度，即已经出现电场翻转。由此可知，SIR 受 ΔT 的影响要大于 XLPE，达到场强翻转所需的 ΔT 也要小于 XLPE。

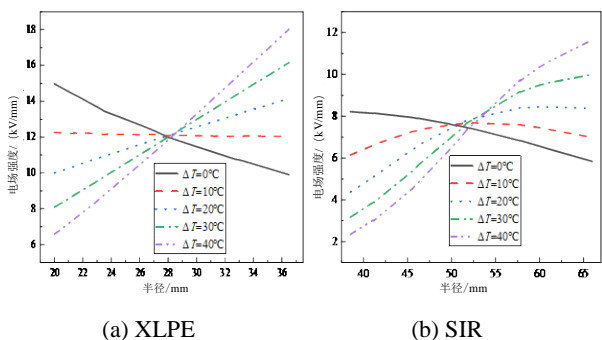


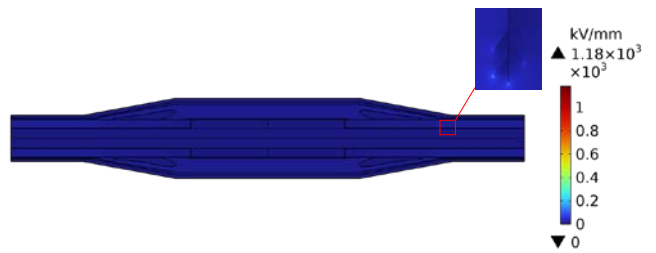
图 5 不同 ΔT 下 XLPE 和 SIR 绝缘电场分布图

Fig. 5 Distribution of electric field in XLPE and SIR insulation under different ΔT

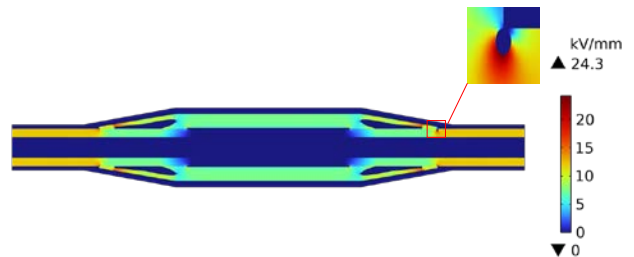
2.2 电树枝缺陷对稳态电场分布的影响

当 $\Delta T \geq 10^\circ\text{C}$ 时，电缆接头内电场强度最大值均出现在 XLPE、SIR 和外半导体层 3 种材料交界处，即此处更易发生局部放电，进而形成电树枝，因此

文中不同阶段的电树枝模型均设置在此处。 $\Delta T = 0^\circ\text{C}$ 时含生长阶段电树枝和滞长阶段电树枝的 HVDC 电缆接头稳态电场分布见图 6。从图 6 可以看出，在生长阶段，电树枝端部 A 点处电场强度最大，约为 1 180 kV/mm，远高于无缺陷时该处的电场强度；在滞长阶段，电树枝端部处电场强度最大，约为 24.3 kV/mm，略大于无缺陷时该处的电场强度。



(a) 电树枝生长阶段电场分布图



(b) 电树枝滞长阶段电场分布图

图 6 含电树枝缺陷电场分布图

Fig. 6 Steady state electric field distribution diagram map of electric tree branches

生长阶段电树枝各位置处电场强度随 ΔT 的变化规律见图 7。从图 7 可以看出任一 ΔT 下最大电场强度始终出现在电树枝端部 A 点处，且随着 ΔT 的增大逐渐增大，当 ΔT 为 40°C 时，最大电场强度约为 2 530 kV/mm。

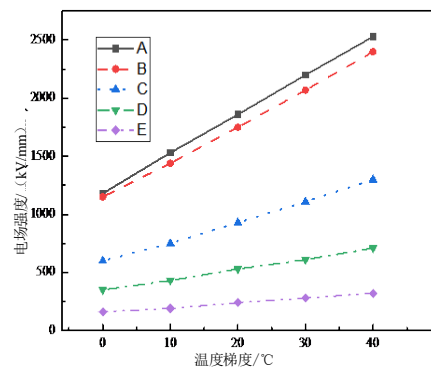


图 7 生长阶段电树枝各位置处电场强度随 ΔT 的变化规律

Fig. 7 The variation of electric field intensity at each position of electrical tree with ΔT in the growth stage

为研究不同 ΔT 下含滞长阶段电树枝的电缆中间接头稳态电场的分布规律，在电树枝缺陷上取一

条轴向截线见图 8，沿该截线提取电场强度值，见图 9。

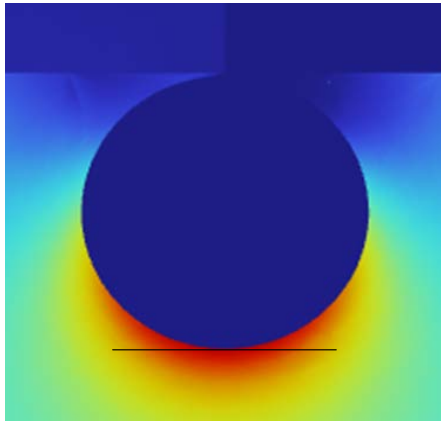


图 8 电树枝滞长期截线示意图
Fig. 8 Schematic diagram of electrical tree branch hysteresis long-term cutoff

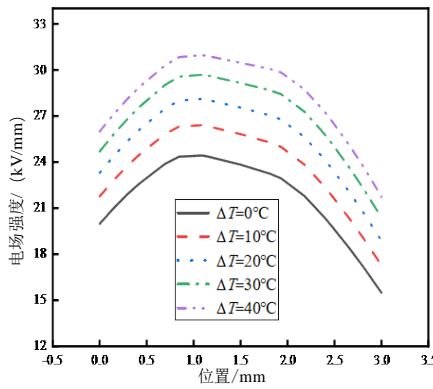


图 9 滞长阶段电树枝最大处电场强度随 ΔT 的变化规律
Fig. 9 The variation of the electric field intensity at the maximum of the electrical tree with ΔT in the hysteresis stage

图 9 表明，随着 ΔT 的增大滞长阶段电树枝处最大电场强度逐渐增大，当 $\Delta T=40^\circ\text{C}$ 时，最大电场强度约为 30.7 kV/mm，相较于无缺陷时 HVDC 电缆中间接头稳态最大电场强度有所升高。

随着 ΔT 的增大，生长阶段和滞长阶段的电树枝缺陷处都出现了最大电场强度逐渐增大的现象。该现象的产生是因为电树枝缺陷处于接头内 XLPE 绝缘的外侧，随着 ΔT 的增大，XLPE 外侧的电场强度逐渐增大。

2.3 温度梯度对暂态电场分布的影响

在直流输电过程中，极性反转可能会导致电缆损坏，从而缩短其使用寿命并增加维护成本^[11]。采用如图 10 所示的加压波形以模拟电缆接头运行初始阶段和极性反转的情况。图 10 中电压幅值 U 为 $1.45U_0$ ，初始升压时间为 60 s，极性反转时间 Δt 为 120 s ^[32]。

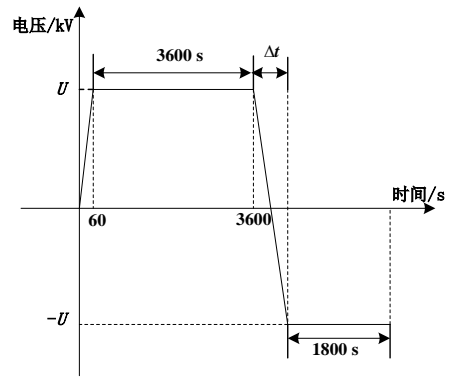


图 10 极性反转电压波形
Fig. 10 Polarity reversal voltage waveform

$\Delta T=0^\circ\text{C}$ 和 $\Delta T=40^\circ\text{C}$ 时电压极性反转前、反转过程中和反转后 XLPE 绝缘和 SIR 绝缘在图 4 截线位置上的电场强度分布见图 11、12。图 11 中时间以对数形式给出，图 12 中以时间与 3 600 s 差值的对数形式给出。

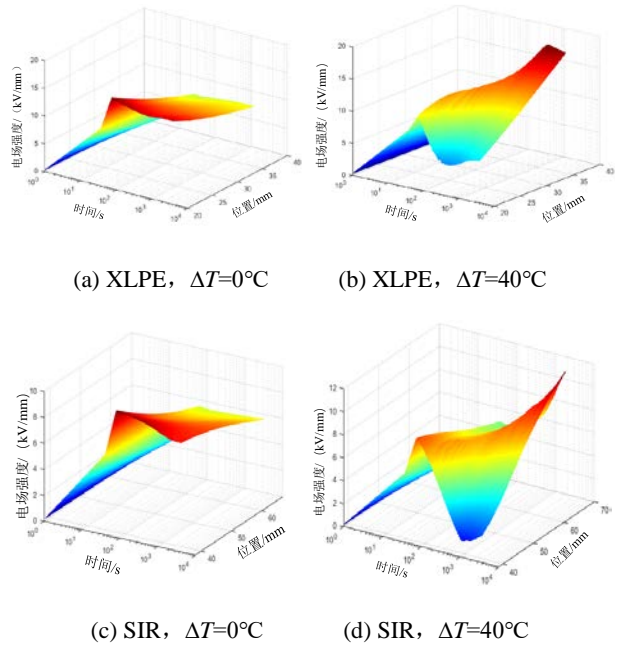
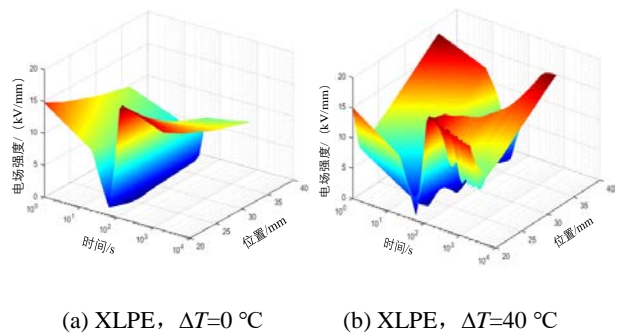
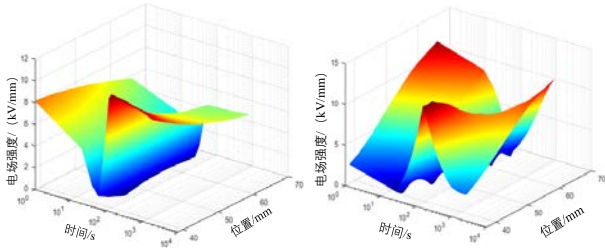


图 11 极性反转前绝缘内电场分布
Fig. 11 Distribution of electric field inside insulation before polarity reversal



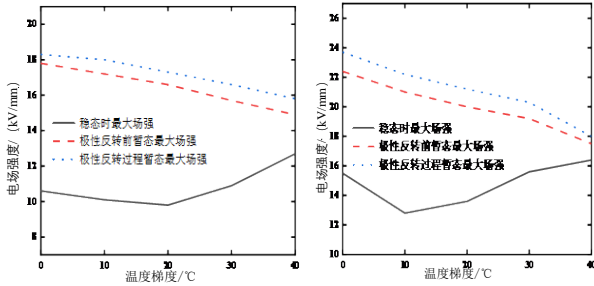


(c) SIR, $\Delta T=0^\circ\text{C}$ (d) SIR, $\Delta T=40^\circ\text{C}$

图 12 极性反转过程和反转后绝缘内电场分布

Fig. 12 Polarity reversal process and distribution of electric field inside insulation after reversal

仿真结果表明, 无论电压极性反转前还是反转过程中, 随着 ΔT 的增加, 从暂态到稳态电场分布所需的时间在逐渐缩短。从仿真计算结果得到的不同 ΔT 下电压极性反转前后稳态和暂态最大电场值与 ΔT 的关系见图 13。



(a) XLPE (b) SIR

图 13 场强最大值与 ΔT 的关系

Fig. 13 The relationship between the maximum field strength and ΔT

由图 13 可知, 任一 ΔT 下, 电缆中间接头的暂态最大电场强度均大于稳态时。导致这种现象的原因是导体在施加稳态电压时, 绝缘中的稳态电场分布取决于材料的电导率, 且电导率与温度和电场强度呈正相关, 所以稳态电场强度会有所减小。而另一方面暂态电场分布主要受介电常数与电导率共同影响, 由于介电常数基本不受温度影响, 故材料的属性为文中暂态电场分布的主要影响因素。

由图 13 还能看出, 无论电压极性反转前还是极性反转过程中对应的暂态最大电场均呈现随 ΔT 增大而减小。这是因为 ΔT 增加对应绝缘层内绝对温度的上升, 从而进一步增大了材料电导率和慢极化电荷的迁移率^[33]。另外, 随 ΔT 的增大, 两种材料稳态最大电场强度先减小后增大, 这一现象与稳态电场分布发生的“翻转”现象有关。

2.4 电树枝缺陷对暂态电场分布的影响

由图 7 可知, 生长阶段电树枝最大电场强度始终出现在 A 点, 因此只针对 A 点进行极性反转

过程中的暂态仿真。极性反转过程中不同 ΔT 下生长阶段和滞长阶段电树枝电场强度最大值随时间的变化规律见图 14、15。

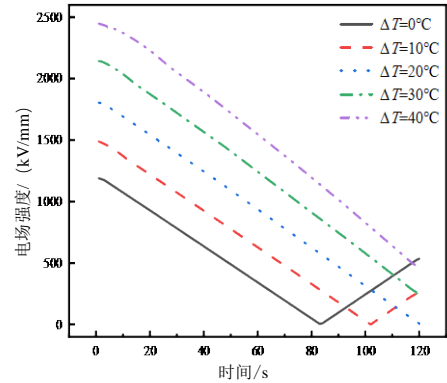


图 14 生长阶段电树枝电场强度最大值随时间的变化规律
Fig. 14 The variation of the maximum electric field strength of electric tree branches during the growth stage over time

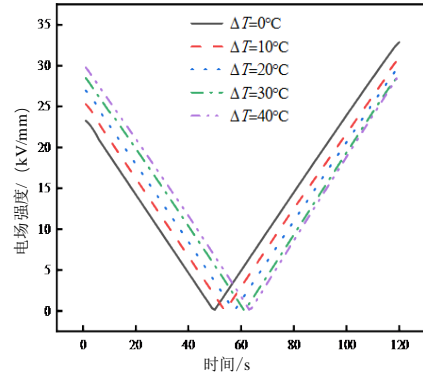


图 15 滞长阶段电树枝电场强度最大值随时间的变化规律
Fig. 15 The variation of the maximum electric field strength of electric tree branches over time during the hysteresis stage

由图 14 可知, 含生长阶段电树枝的电缆接头, 当 $\Delta T \geq 20^\circ\text{C}$ 时, 其绝缘内电树枝的最大电场强度随极性反转时间的增加而逐渐减小。这是因为在极性反转过程中, 生长阶段电树枝缺陷处的空间电荷逐渐中和; 而当 $\Delta T < 20^\circ\text{C}$ 时, 生长阶段电树枝的最大电场强度随着极性反转时间的增加出现先减小后增大的规律。这是由于当 ΔT 较小时, 电缆中间接头绝缘内的空间电荷相对较少, 随着异性电荷的注入, 异电荷会先中和绝缘内的空间电荷, 最后异性电荷会占据主导地位, 其中拐点出现的时间对应绝缘内空间电荷中和结束的时刻。

由图 15 可知, 含滞长阶段电树枝的电缆接头, 其绝缘内电树枝的最大电场强度随极性反转时间的增加出现先减小后增大的规律。当极性反转时间在 0~60 s 时, 随着 ΔT 的增大最大电场强度是逐渐增大的; 当极性反转时间在 60~120 s 时, 随着 ΔT

的增大最大电场强度是逐渐减小的。当极性反转时间为 120 s 时, 最大电场强度达到最大值, 约为 32.9 kV/mm, 略大于稳态最大电场强度。这是由于在极性反转过程中前 60 s 内, 随着极性反转时间的增加, 导体施加的正极性电压逐渐减小, 这就导致绝缘内的绝对电场强度逐渐减小。当 ΔT 较高时绝缘内的电导率也较大, 当导体施加的电压下降时, 对其空间电荷的分布影响更为严重。在极性反转过程中的

60~120 s 内, 随着极性反转时间的增加, 导体施加的电压从 0 逐渐上升, 这就导致绝缘内的绝对电场强度逐渐增大。当 ΔT 较低时绝缘内的电导率也相对较小, 当导体施加的电压上升时, 电极注入的空间电荷不易扩散, 导致电场强度相对较大。

根据文中研究, 电缆接头最大电场强度规律见表 4。

表 4 电缆接头最大场强变化规律

Table 4 Variation law of maximum field strength of cable joint

电场类型	缺陷类型	电树枝种类	最大场强变化规律	最大场强出现位置
稳态电场	无缺陷	—	随 ΔT 增加而增大	当 $\Delta T < 10^\circ\text{C}$, 在高压屏蔽管端部; 当 $\Delta T \geq 10^\circ\text{C}$, 在 XLPE、SIR 和外半导体三种材料交界处
	电树枝缺陷	生长阶段	随 ΔT 增加而增大	电树枝端部 A 点
		滞长阶段	随 ΔT 增加而增大	电树枝头部
暂态电场	无缺陷	—	随 ΔT 增加而增大	当 $\Delta T < 10^\circ\text{C}$, 在高压屏蔽管端部; 当 $\Delta T \geq 10^\circ\text{C}$, 在 XLPE、SIR 和外半导体三种材料交界处
	电树枝缺陷	生长阶段	当 $\Delta T \geq 20^\circ\text{C}$, 随极性反转时间增加而增大; 当 $\Delta T < 20^\circ\text{C}$, 随极性反转时间增加先减后增	电树枝端部 A 点
		滞长阶段	随极性反转时间增加先减后增	电树枝头部

3 结论

文中建立了含电树枝缺陷的 ± 200 kV 直流电缆中间接头模型, 对其在不同 ΔT 下进行稳态和暂态电场仿真。主要研究结论如下:

1) 稳态电场分布与 ΔT 关系非常密切, 当 ΔT 达到一定值时 XLPE 和 SIR 绝缘中开始出现场强翻转, ΔT 越大场强翻转现象越严重。稳态时最大电场强度随 ΔT 的增大而增大, 当 ΔT 为 40°C 时, 无缺陷的电缆接头的稳态最大电场强度约为 27.1 kV/mm。

2) 含生长阶段电树枝的电缆接头的稳态最大电场强度约为 2 530 kV/mm, 远高于无缺陷时。含滞长阶段电树枝的电缆接头的稳态最大电场强度约为 30.7 kV/mm, 略高于无缺陷时。即电树枝在生长阶段对电缆接头内电场分布的影响较滞长阶段更为严重, 随着 ΔT 的增加, 这种现象越明显。

3) 无论在极性反转前还是极性反转过程中对应的暂态最大电场强度都出现随 ΔT 增加而减小的趋势。当 ΔT 为 0°C 时, 无缺陷电缆接头中的暂态最大电场强度约为 23.7 kV/mm。

4) 含生长阶段电树枝的电缆接头中暂态最大

电场强度约为 2448 kV/mm; 含滞长阶段电树枝的电缆接头中暂态最大电场强度约为 32.9 kV/mm。

参考文献:

- [1] 刘卓锟, 李健栋, 张国华, 等. 国内外直流输电系统可靠性综合评价及提升建议[J]. 电网技术, 2025, 49(1): 316-322.
LIU Zhuokun, LI Jiandong, ZHANG Guohua, et al. Comprehensive evaluation and improvement suggestion for the reliability of HVDC system domestic and foreign[J]. Power System Technology, 2025, 49(1): 316-322.
- [2] 吕鹏飞. 交直流混联电网下直流输电系统运行面临的挑战及对策[J]. 电网技术, 2022, 46(2): 503-510.
LYU Pengfei. Research on HVDC operation characteristics under influence of hybrid AC/DC power grids[J]. Power System Technology, 2022, 46(2): 503-510.
- [3] 饶宏, 周月宾, 李巍巍, 等. 柔性直流输电技术的工程应用和发展展望[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(1): 1-11.
RAO Hong, ZHOU Yuebin, LI Weiwei, et al.

- Engineering application and development prospect of VSC-HVDC transmission technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(1): 1-11.
- [4] 李捍平, 丛 贇, 李小炳, 等. 基于非线性电导绝缘的随桥敷设高压直流电缆接头电—热场分布及优化设计[J]. 电气工程学报, 2022, 17(2): 226-234.
LI Hanping, CONG Yun, LI Xiaobing, et al. Electrical-thermal field distributions and optimal design of bridge-along HVDC cable joints based on nonlinear conductive insulation[J]. Journal of Electrical Engineering, 2022, 17(2): 226-234.
- [5] 郝艳捧, 黄吉超, 阳 林, 等. 高压直流电缆稳态载流量解析计算方法[J]. 电网技术, 2016, 40(4): 1283-1288.
HAO Yanpeng, HUANG Jichao, YANG Lin, et al. Analytical calculation method of steady-state current capacity of HVDC cables[J]. Power System Technology, 2016, 40(4): 1283-1288.
- [6] 彭小圣, 陈玉竹, 贾诗媛, 等. 多物理场下的高压直流电缆局部放电研究展望[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(3): 1210-1221.
PENG Xiaosheng, CHEN Yuzhu, JIA Shiyuan, et al. Research prospects for partial discharge of high voltage DC cables under multi-physics[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(3): 1210-1221.
- [7] 王雅妮, 孙远远, 张 帅, 等. 基于分子链位移的 HVDC 电缆接头界面区域空间电荷分布研究[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(10): 3854-3863.
WANG Yani, SUN Yuanyuan, ZHANG Shuai, et al. Study on interface region space charge distribution of HVDC cable joints based on molecular chain dynamics[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(10): 3854-3863.
- [8] 王子健, 周 凯, 朱光亚, 等. 基于时频域转换法的配网电缆冷缩中间接头受潮诊断[J]. 高电压技术, 2022, 48(6): 2178-2186.
WANG Zijian, ZHOU Kai, ZHU Guangya, et al. Moisture diagnosis method for cold-shrinkable intermediate joints of distribution cables based on time-frequency domain conversion[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(6): 2178-2186.
- [9] 胡丽斌, 张传升, 谭 笑, 等. 退役电缆附件微观结构与电荷特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(2): 770-780.
HU Libin, ZHANG Chuansheng, TAN Xiao, et al. Research on microstructure and charge characteristics of cable accessories out of service[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(2): 770-780.
- [10] 陈 曦, 王 霞, 吴 锴, 等. 温度梯度场对高直流电压下聚乙烯中空间电荷及场强畸变的影响[J]. 电工技术学报, 2011, 26(3): 13-19.
CHEN Xi, WANG Xia, WU Kai, et al. Space charge accumulation and stress distortion in polyethylene under high DC voltage and temperature gradient[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(3): 13-19.
- [11] 宋淑伟, 赵 洪, 李中原, 等. 高压直流电缆接头稳态与暂态电场分布特征[J]. 电工技术学报, 2017, 43(11): 3607-3616.
SONG Shuwei, ZHAO Hong, LI Zhongyuan, et al. Stationary and transient electric field distribution characteristics inside HVDC cable joint[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 43(11): 3607-3616.
- [12] 吴 洋, 朱庆东, 高 路, 等. 高压直流系统电缆接头中空间电荷与电场分布的仿真计算[J]. 山东电力, 2021, 48(5): 23-28.
WU Yang, ZHU Qingdong, GAO Lu, et al. Calculation of space charge and electric field distribution in cable joint of HVDC system[J]. Shandong Electric Power, 2021, 48(5): 23-28.
- [13] 李 蓉, 周 凯, 万 航, 等. 基于频域反射法的 10 kV 配电网中间接头受潮定位[J]. 电网技术, 2021, 45(2): 825-832.
LI Rong, ZHOU Kai, WAN Hang, et al. Moisture location of 10 kV cable joints in medium voltage distribution grid based on frequency domain reflection[J]. Power System Technology, 2021, 45(2): 825-832.
- [14] 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. Electric field characteristics investigation and electrical tree propagation of distributed network cable joint with defects[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2023, 42(1): 154-161.
- [15] 常文治, 阎春雨, 毕建刚, 等. 硅橡胶中局部放电发展与电树枝生长的关系研究[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(15): 2493-2501.
CHANG Wenzhi, YAN Chunyu, BI Jiangang, et al.

- Study on the relationship between partial discharge development and electrical tree growth in silicone rubber[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(15): 2493-2501.
- [16]祝 曦, 林国海, 张洪亮, 等. 直流电压下 XLPE 电树枝化过程中的局部放电特性[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(6): 2416-2426.
- ZHU Xi, LIN Guohai, ZHANG Hongliang, et al. Characteristics of partial discharge during electrical treeing in XLPE under DC voltage[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(6): 2416-2426.
- [17]林国海, 张洪亮, 郑 喆, 等. 交联聚乙烯直流电树枝降压阶段的局部放电特性[J]. 高电压技术, 2024, 50(1): 348-358.
- LIN Guohai, ZHANG Hongliang, ZHENG Zhe, et al. Partial discharge characteristics of DC electrical tree in XLPE during voltage drop[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(1): 348-358.
- [18]吴晶晶, 陈丽安, 严有祥, 等. ± 500 kV 高压直流 XLPE 电缆温度分布及其影响因素研究[J]. 高压电器, 2023, 59(2): 113-119.
- WU Jingjing, CHEN Lian, YAN Youxiang, et al. Study on temperature distribution of ± 500 kV HVDC XLPE cable and its influencing factors[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(2): 113-119.
- [19]王昱力, 黄凯文, 王 格, 等. 基于 Comsol 仿真的高压直流电缆附件材料电导率特性研究[J]. 高压电器, 2023, 59(9): 258-267.
- WANG Yuli, HUANG Kaiwen, WANG Ge, et al. Research on conductivity characteristics of HVDC cable accessory material based on comsol simulation[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(9): 258-267.
- [20]赵学风, 郝一帆, 黄国强, 等. 基于有限元仿真的土壤直埋电缆中间接头稳态载流量计算[J]. 高压电器, 2022, 58(3): 64-70.
- ZHAO Xuefeng, HAO Yifan, HUANG Guoqiang, et al. Calculation on steady-state current carrying capacity of intermediate joint of direct buried cable based on the finite element simulation[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(3): 64-70.
- [21]YOU L, WANG J, LIU G, et al. Thermal rating of offshore wind farm cables installed in ventilated J-tubes[J]. Energies, 2018, 11(3): 545.
- [22]鞠 晨. 高压电缆中间接头处测温装置的电场仿真[J]. 自动化与仪器仪表, 2023(4): 338-342.
- JU Chen. Electric field simulation of temperature measuring device at middle junction of high voltage cable[J]. Automation & Instrumentation, 2023(4): 338-342.
- [23]YONETSU D, HARA T, SHIMADA S, et al. Electric field optimization of the power cable joint by using evolutionary calculation method[J]. Electrical Engineering in Japan, 2005, 150(4): 44-53.
- [24]夏 源, 赵学童, 冯 勇, 等. ± 500 kV 直流海缆在 J 型管敷设环境下的稳态载流量仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(12): 4851-4860.
- XIA Yuan, ZHAO Xuetong, FENG Yong, et al. Simulation study on steady-state ampacity of ± 500 kV DC submarine cable under j-tube laying environment[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(12): 4851-4860.
- [25]TIAN F, ZHANG S, HOU C. Effects of trapping characteristics on space charge and electric field distributions in HVDC cable under electrothermal stress[J]. Energies, 2021, 14(5): 1313.
- [26]郝艳捧, 陈 云, 阳 林, 等. 高压直流海底电缆电-热-流多物理场耦合仿真[J]. 高电压技术, 2017, 43(11): 3534-3542.
- HAO Yanpeng, CHEN Yun, YANG Lin, et al. Coupled simulation on electro-thermal-fluid multiple physical fields of HVDC submarine cable[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(11): 3534-3542.
- [27]BOGGS S, DAMON D, HJERRILD J, et al. Effect of insulation properties on the field grading of solid dielectric DC cable[J]. IEEE Power Engineering Review, 2001, 21(8): 56-56.
- [28]郝云倩. 含缺陷的 XLPE 电缆接头电磁-热特性研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2023.
- HAO Yunjian. Study of electromagnetic-thermal characteristics of XLPE cable joints containing defects[D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2023.
- [29]陶文彪, 朱光亚, 宋述勇, 等. 交联聚乙烯中丛状电树枝的生长机制[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(13): 4004-4012.
- TAO Wenbiao, ZHU Guangya, SONG Shuyong, et al. The growth mechanism of brush-type electrical tree in XLPE[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(13): 4004-4012.
- [30]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 design optimization of
320

□ kV HVDC cable joint[J]. Proceedings of the

CSEE, 2016, 36(7): 2018-2024.

[31]李长明, 伍国方, 李春阳, 等. XLPE 绝缘高压直流
电缆终端内缺陷对电场分布的影响[J]. 电机与控制学
报, 2018, 22(12): 62-67.

LI Changming, WU Guofang, LI Chunyang, et al. Effect
of the defects inside XLPE insulated HVDC cable
termination on the electric field distribution[J]. Electric
Machines and Control, 2018, 22(12): 62-67.

[32]李忠华, 刘乐乐, 郑欢, 等. HVDC 电缆电场分布
影响因素的仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2016,
36(9): 2563-2571.

LI Zhonghua, LIU Lele, ZHENG Huan, et al. Simulation
on the influence factors of electric field distribution in
HVDC cable[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(9):
2563-2571.

[33]刘乐乐. HVDC 电缆在温度梯度效应下电场分布特性
研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2016.

LIU Lele. Study on electric field distribution
characteristics of HVDC cable under temperature
gradient effect[D]. Harbin University of Science and
Technology, 2016.

王卓(2001—), 男, 硕士研究生, 研究方向为研究
方向为绝缘介质的电场仿真分析 (E-mail :
920066735@qq.com)。

李欢(1988—), 男, 工学博士, 教授, 主要从事电
介质物理、固体介质的劣化及失效机制、绝缘结构设计等
方面的研究(E-mail: lihuan@snut.edu.cn)。