

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2020.05.037

12 kV 环网柜 T 型电缆终端绝缘界面爬电的原因分析

罗 翔^{1,2}, 卞志文¹, 林一泓¹

(1. 国网福建省电力有限公司电力科学研究院, 福州 350000; 2. 福建省高供电可靠性配电技术企业重点实验室, 福州 350000)

摘要: T型电缆终端绝缘界面的沿面爬电是12 kV环网柜的常见缺陷,在运行过程中会导致电缆绝缘性能逐渐降低,给电缆的可靠运行带来严重的安全隐患。笔者通过多起12 kV环网柜T型电缆终端在运行维护过程中,同批同规格的产品的爬电情况,进行了检查、试验及原因分析,同时利用有限元方法仿真了T型电缆终端各绝缘界面的电场强度。研究表明,T型电缆终端爬电缺陷的主要原因是由于涂覆的绝缘润滑脂失效后造成绝缘界面出现微小气隙,进而引起的局部放电。该分析过程可为T型电缆终端的结构选型优化、试验检测、绝缘润滑脂的选择及现场施工质量管控等方面提供借鉴。

关键词: 环网柜; T型电缆终端; 有限元; 绝缘界面; 绝缘润滑脂

Analysis and Research of Creepage on the Insulation Interface of “T” Type Cable Termination in 12 kV Ring Main Unit

LUO Xiang^{1,2}, BIAN Zhiwen¹, LIN Yihong¹

(1. State Grid Fujian Electric Power Research Institute, Fuzhou 350000, China; 2. Enterprise Key Laboratory of Electric Distribution Technology for High Reliable Power Supply of Fujian Province, Fuzhou 350000, China)

Abstract: The creepage on insulation interface of “T” type cable termination is the common defect of 12 kV ring main unit. It will cause insulation resistance degradation of cable in the operational process and the potential safety hazard. Several failure of “T” type cable termination occurred on the same batch and specification 12 kV ring main unit during the process of operation and maintenance. The inspection, testing and cause analysis are conducted in this paper. The electric field strength contour of insulation interface of 12 kV ring main unit “T” type cable termination is simulated with FEM in the condition of the failure of insulation grease. The study shows the reason of creepage is that the failure of insulation grease causes the small air gap defect on the insulation interface which results in the partial discharge. The analysis process provides reference on type-selection optimization, test detection of “T” type cable termination, selection of insulation grease, quality control of construction.

Key words: ring main unit; “T” type cable termination; FEM; insulation interface; insulation grease

0 引言

随着城市配电网中环网柜的普及,预制式T型电缆终端作为环网柜与电缆之间的连接设备,在电力系统中大量使用,其运行情况直接决定了电网的整体运行质量^[1-5]。在现场安装时,T型电缆终端外护套与套管、电缆绝缘层、后堵塞等组成的绝缘界

面虽已形成一定程度的过盈配合,但仍不可避免地存在微小气隙,导致T型电缆终端的故障概率远高于电缆本体。为方便现场施工及解决密封防潮问题,在安装T型电缆终端时一般会在绝缘界面均匀涂覆绝缘润滑脂以填充界面上的微小气孔并减少安装时的摩擦力。在正常运行情况下,两种介质的绝缘薄弱点多出现在两种介质的分界面处,经过长

期运行中的逐步劣化,最终可能导致沿面爬闪^[6-16]。环网柜T型电缆终端的安全运行已逐渐成为环网柜中主要的风险点和行业的重点关注问题之一。硅橡胶作为T型电缆终端的主要绝缘材料之一,在中低压电缆附件中得到了广泛的应用,但发生故障后,环网柜需停电更换,T型电缆终端需重新安装制作,严重影响供电的可靠性,也会带来较大的经济损失。目前绝缘润滑脂对绝缘界面绝缘性能影响的研究较少,故障引发机理尚未完全掌握,同时,在安装时对绝缘润滑脂的选用也没有统一标准。因此,研究绝缘润滑脂对T型电缆终端界面绝缘性能的影响,具有一定的理论和实际应用意义。

文中结合某省电网企业多起具有共性特征的环网柜缺陷故障案例,通过理论分析及仿真的方法,深度剖析了绝缘润滑脂对12 kV环网柜T型电缆终端长期运行可靠性的关键影响作用,研究成果可为T型电缆终端的结构选型、试验检测、绝缘润滑脂的选择及现场施工安装质量管控等方面提供借鉴。

1 典型案例

2017年,某省同一批次12 kV环网柜T型电缆终端连续发生15起故障,在正常运行及送电合闸等状态中均有发生。在全省范围内全面排查该厂家的1 187面在运环网柜,发现143面环网柜存在T型电缆终端温度过热、后堵盖脱落、爬电等隐患,见图1。

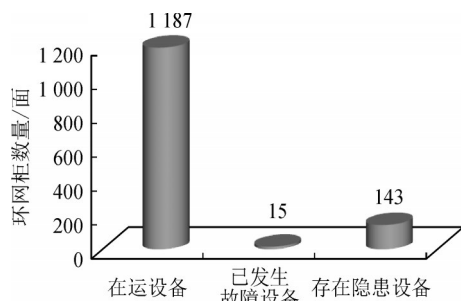


图1 2017年某省环网柜T型电缆终端隐患排查情况

Fig. 1 The hidden risk investigation of the "T" type cable termination of 12 kV ring main unit in a certain province in 2017

2 现场检查情况

在现场检查过程中,发现该厂家12 kV环网柜均采用T型电缆终端,见图2。柜体内部并未出现凝露、积水痕迹;电缆室及PT室内部已熏黑,内部气体受热膨胀使T型电缆终端后堵盖弹出变形,见图3,对T型电缆终端进行解体,发现套管表面除爬电痕迹外,并未发现裂纹;硅橡胶绝缘套内表面也有明显爬电痕迹;将后堵塞拆下检查,发现金属导体周

围出现铜绿。爬电部位主要集中位于电缆绝缘层、后堵塞、套管等部件与硅橡胶的绝缘界面。

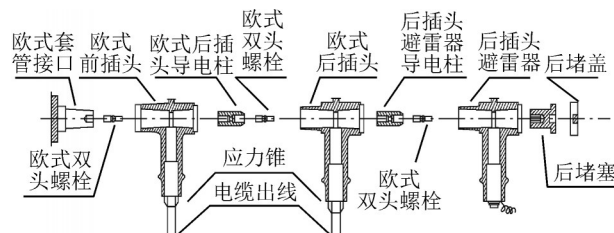


图2 T型电缆终端安装图

Fig. 2 Installation drawing of "T" type cable termination

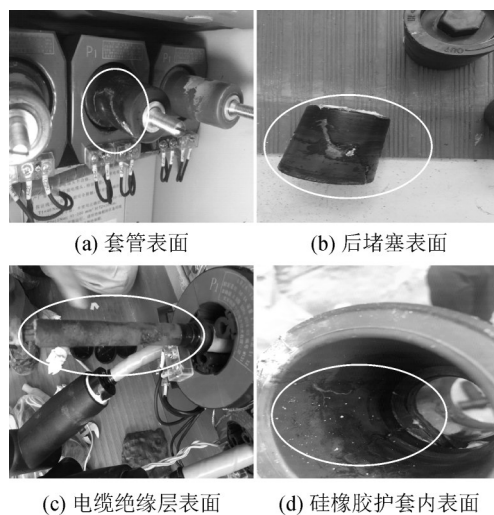


图3 T型电缆终端现场爬电痕迹

Fig. 3 Discharge traces of "T" type cable termination

3 故障形成机理及原因分析

3.1 过盈配合方面

由故障T型电缆终端爬电痕迹及路径可知,爬电起始点分别位于套管、后堵塞、电缆绝缘层与硅橡胶的交界面处。通过检查相关安装情况核实安装记录,T型电缆终端安装尺寸均符合厂家内控标准的要求。一般情况下,绝缘界面击穿场强与界面压力有关,界面压力越大、介质表面越光滑,则界面击穿电场强度越大;界面压力越小,介质表面越粗糙,则界面击穿电场强度越小。电缆附件沿面放电大部分是由于界面压力不足所致,即使两种材料接触得再紧密,绝缘界面也会不可避免地存在一些微小空隙、突起等缺陷,虽然不会立即引发击穿,但其仍会降低安全裕度,增加发生爬电的概率。按照文[17]的要求,电缆附件的绝缘界面压强应在0.1~0.3 MPa范围内,才能满足现场安装及密封的要求。

由于使用内置传感器测量电缆附件界面压力的方法需要将传感器植入电缆附件界面中,在一定程度上破坏了电缆本体与电缆附件紧贴的结构,因此文中采用了界面结构的理论计算模型,为两层绝

缘介质圆筒套装而成,见图4,内筒的内半径为 a 、外半径为 $b+\delta_1$,外筒的内半径为 $b-\delta_2$ 、外半径为 c 。组合套装后在界面上将产生均匀的压应力。压应力的大小与过盈量有关,两层绝缘筒体的过盈量就是它们的径向位移。根据弹性力学理论,其外半径处的径向位移为

$$u|_{r=b}=\delta_1=-\frac{pb}{E}\left(\frac{b^2+a^2}{b^2-a^2}-v\right) \quad (1)$$

式(1)中, v 为材料泊松比。

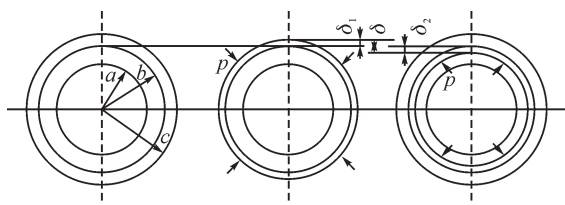


图4 过盈配合示意图

Fig. 4 The diagram of interference fit

对于外筒,界面的压力为内压,其内半径处的径向位移为

$$u|_{r=b}=\delta_2=\frac{pb}{E}\left(\frac{c^2+b^2}{c^2-b^2}+v\right) \quad (2)$$

由于 δ_1 为半径的减小量,其方向与 r 方向相反,而复合绝缘界面满足条件

$$\delta=-\delta_1+\delta_2 \quad (3)$$

将 δ_1 与 δ_2 的表达式代入式(3),则可求得绝缘界面的压力为

$$p=\frac{E\delta}{b}\frac{(b^2-a^2)(c^2-b^2)}{2b^2(c^2-a^2)} \quad (4)$$

从式(4)可知,对于内半径为 a 、外半径为 c 的复合绝缘套筒模型,若给定过盈量 δ 及分层半径 b ,则可确定套装后的压力。

根据以上计算方法,随机抽取了该批次备品库中5套T型电缆终端并对其各部位界面的压强进行了检测。检测结果均在0.1~0.3 MPa范围内,满足现场安装要求,基本可以判断T型电缆终端局部过盈配合量并不是引发爬电的主要原因。

3.2 绝缘润滑脂质量方面

在T型电缆终端现场安装过程中,一般把绝缘润滑脂涂覆在电缆、套管、后堵塞与硅橡胶外绝缘套的结合面上,见图5。涂覆绝缘润滑脂的作用主要有两个方面:①润滑接触面,方便安装;②填充接触面的空隙,排除空气,提高绝缘性能及防水密封性能,提高界面的击穿强度^[18-19]。但有时在设备运行过程中,质量不良的润滑脂会逐渐干涸或失效,界面就出现了微小气隙,导致界面的绝缘强度降低。另外据运行单位反映,在设备安装阶段,现场

安装施工单位使用了A、B两种润滑脂,见图6。此次出现爬电的环网柜大部分使用的是A润滑脂(图6中左边的那种),因此可初步推断此次引发爬电的原因主要是界面所涂覆的润滑脂失效或质量不良造成界面密封不严,出现了微小气隙,不仅导致内部受潮,同时引发了爬电。

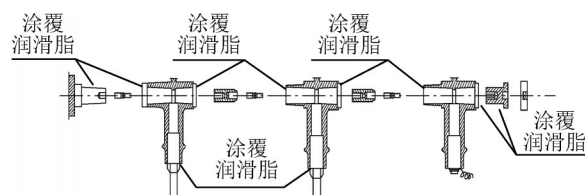


图5 润滑脂涂覆部位示意图

Fig. 5 The diagram of coated positions of insulation grease



图6 现场使用的两种润滑脂

Fig. 6 Two insulation grease used on the worksite

4 绝缘界面的电场仿真

根据Maxwell方程组的微分形式可得:

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (5)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (6)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (7)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (8)$$

式(5)-(8)中: $\mathbf{E}$ 是电场强度,V/m; $\mathbf{B}$ 是磁感应强度,T; $\mathbf{D}$ 是电通量密度,C/m²; $\mathbf{H}$ 是磁场强度,A/m;这4个场量之间的关系由媒介特性决定。对于线性介质,其关系如下:

$$\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E} \quad (9)$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (10)$$

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (11)$$

式(9)-(10)中: ϵ 是介质介电常数,F/m; μ 是介质磁导率,H/m; σ 是介质电导率,S/m; $\mathbf{J}$ 是电流密度,A/m²; ρ 是电荷体密度,C/m³。

为了验证上文理论分析的合理性,文中利用有限元分析法分别进行了套管、后堵塞、电缆绝缘层与硅橡胶外护套内表面的绝缘界面在绝缘润滑脂失效的情况下电场强度的仿真,绝缘界面的电场云图及等位线图,见图7-9。

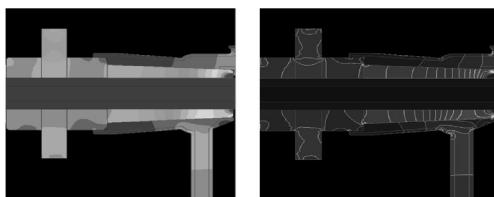


图7 套管处局部电场云图及电场等位线图

Fig. 7 Electric field cloud picture and isoelectric linepicture of bushing surface

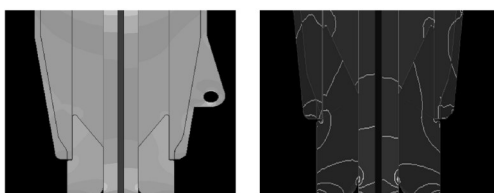


图8 电缆绝缘层处局部电场云图及电场等位线图

Fig. 8 Electric field cloud picture and isoelectric linepicture of cable insulation layer

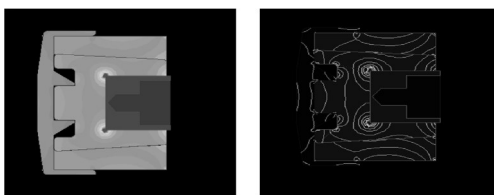


图9 后堵塞处局部电场云图及电场等位线图

Fig. 9 Electric field cloud picture and isoelectric linepicture of blocking

绝缘界面局部电场仿真结果曲线见图10–12,得到的结果见表1。从图10–12和表1可以看出,绝缘界面电场的畸变较为明显,尽管界面上存在的微小气隙尚不会立即引发击穿,但会使安全裕度急剧下降,大大增加了放电的概率。同时经过长时间运行后随着潮气的进入,也可能使爬电程度加剧,最终形成贯穿性的导电通道,造成绝缘击穿。

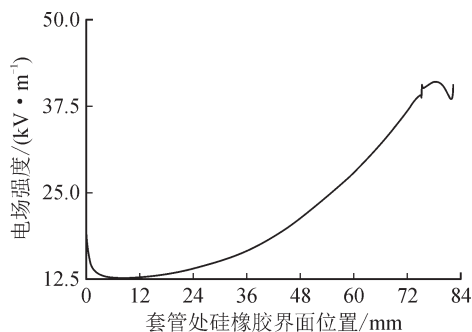


图10 套管处绝缘界面电场分布曲线

Fig. 10 Electric field distribution curve of bushing surface

5 讨论

目前在电力行业中无明确针对绝缘润滑脂的检测标准,同时厂家提供的电缆附件配套的润滑脂检测报告中,也并未包括防水憎水性能、固体颗粒

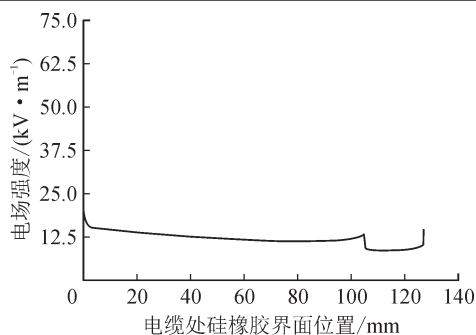


图11 电缆绝缘层处绝缘界面电场分布曲线

Fig. 11 Electric field distribution curve of cable insulation layer

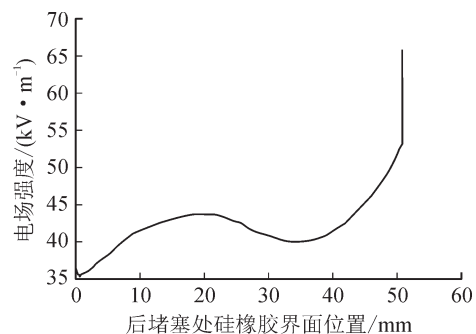


图12 后堵塞处绝缘界面电场分布曲线

Fig. 12 Electric field distribution curve of blocking

表1 绝缘润滑脂失效的情况下,T型电缆终端不同部位绝缘界面的电场强度最大值

Table 1 Electric field strength contour in different insulation interface of “T” type cable termination

位置	电场强度最大值/(kV·mm ⁻¹)
套管表面	48.1
电缆绝缘层表面	25.7
后堵塞表面	65.9

析出等检测内容。绝缘润滑脂自身在使用过程中,不应产生影响绝缘强度的物质,其自身不易氧化变质,并且应具有稳定的电气绝缘和密封性能。从现场检测情况可以看出,绝缘件上的爬电趋势比较明显,均为从高电位电极向地电极发展,但也出现了爬电通道或放电痕迹不连续的情况,见图13。

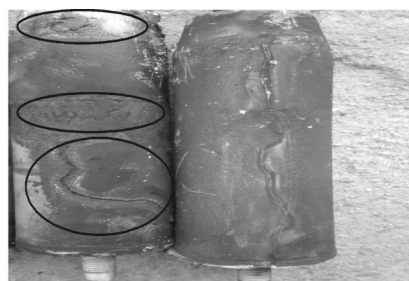


图13 现场部分绝缘件上不连续的爬电通道

Fig. 13 Discontinuity discharge traces on partial insulation

绝缘界面上的绝缘润滑脂分子等带电粒子在电场的作用下发生定向移动。此时若界面存在气

隙,带电粒子可能在碰撞前就积累了较大的动能,就容易引起局部放电。设备投入运行初期,虽然绝缘润滑脂分子密度大,粒子撞击几率大,但粒子的自由行程却很短,动能积累小,不易在界面上引起放电。但随着放电的发展,绝缘界面上的润滑脂、硅橡胶等有机聚合物的分子断链后会析出碳颗粒,并在碳颗粒周围区域形成气隙,降低了界面的绝缘性能,也改变了界面上电场强度的分布,同时缩短了两电极间的距离,加速了电痕破坏,而绝缘润滑脂中碳颗粒的析出相对比较困难,放电又比较容易发生在碳颗粒周围区域,因此界面上有润滑脂的区域放电通道相对比较固定。因此润滑脂不仅会引发爬电,也可能会引导爬电形态和表面闪络的具体线路。

硅橡胶材料自身具有一定的松弛特性,在长期扩张的状态下,其内部分子运动将导致界面压力进一步降低。绝缘界面涂覆的润滑脂与硅橡胶材料具有溶胀特性,随着时间的推移,润滑脂会发生迁移,并被绝缘材料吸收,从而会在界面上产生更多的气隙或空腔,相应的界面击穿电场强度将会进一步降低,在长时间运行后会引发爬电。在爬电沿绝缘界面发展一段距离后,随着界面压力逐渐增大,相应的沿面击穿电场也有所增大,爬电的路径在沿面进一步发展受到了限制,这就导致了绝缘界面的爬电通道或放电痕迹不连续。

目前市面上采用的润滑脂主要有两种:一是普通润滑脂;二是氟化润滑脂。文[20]研究了分别涂覆两种润滑脂后硅橡胶的电气性能及机械性能,得出如下结论:①两种试验样品受潮后,在工频交流电压下的界面击穿电压均呈现下降趋势,但涂覆氟化润滑脂试样的界面击穿电压下降程度较为缓慢,即:氟化润滑脂在对界面作用的长期性能稳定性方面相比与普通润滑脂具有一定的优势。②涂覆氟化润滑脂的硅橡胶力学性能的下降程度方面相较于涂覆普通润滑脂的硅橡胶也更低。

6 结论

文中对 12 kV 环网柜T型电缆终端内部绝缘界面爬电缺陷的分析为进一步深入理解环网柜出线电缆事故的起因提供了新认识。所得结论如下:

1)T型电缆终端爬电缺陷的主要原因是涂覆的绝缘润滑脂失效后造成绝缘界面出现微小气隙,进而引起的局部放电。利用有限元方法仿真了在润滑脂失效的情况下,T型电缆终端各绝缘界面的电场强度,进一步验证了故障起因的理论分析。

2)由于润滑脂密封在T型电缆终端中,在设备运行时无法正常取样分析,而针对润滑脂质量的检测在电力行业中并未作具体要求,也未明确相应参照标准,因此建议对新中标的润滑脂及T型电缆终端开展电气性能试验及湿热电老化试验等。同时涂覆氟化润滑脂后的硅橡胶具有更好的电气性能及力学性能,因此在现场安装电缆T型头时宜选用氟化润滑脂。

3)虽然此次T型电缆终端绝缘界面爬电的主要原因为润滑脂质量问题,但不排除个别T型电缆终端过盈配合量(或界面压强 0.1 ~ 0.3 MPa)未达到要求,造成绝缘界面“握紧力”不足的可能性。若硅橡胶电缆附件承受的机械应力减小时,会导致界面存在微小气隙等缺陷,进而引发沿面爬电。现有电缆附件技术标准出厂试验多关注于电气性能方面,目前的检测手段短期内尚无法发现由于材料机械性能与附件过盈配合不当而引起的缺陷问题,有待后续进一步研究。

参考文献:

- [1] 电气装置安装工程电缆线路施工及验收规范:GB 50168—2006[S]. 北京:中国计划出版社,2006.
Code for construction and acceptance of cable system electric equipment installation engineering: GB 50168—2006[S]. Beijing: China Planning Press, 2006.
- [2] 周远翔,侯非,聂琼,等. 温度对硅橡胶电树枝老化特性的影响[J]. 高电压技术, 2012, 38(10): 2640-2646.
ZHOU Yuanxiang, HOU Fei, NIE Qiong, et al. Temperature effects on electrical tree aging characteristics of silicone rubber[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(10): 2640-2646.
- [3] 史传卿. 电力电缆安装运行技术问答[M]. 北京:中国电力出版社,2002.
SHI Chuanqing. Power cable installation and operation technology questions and answers[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2002.
- [4] 巫松楨,谢大荣,陈寿田,等. 电气绝缘材料科学与工程[M]. 西安:西安交通大学出版社,1996.
WU Songzhen, XIE Darong, CHEN Shoutian, et al. Electrical insulating materials science and engineering[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1996.
- [5] 电线电缆手册编委会. 电线电缆手册[M]. 北京:机械工业出版社,2001.
Editorial Board Committee of Wire & Cable Engineering Manual. Wire & cable engineering manual[M]. Beijing: China Machine Press, 2001.
- [6] SUH K S, NAM J H, KIM J H, et al. Interfacial properties

- of XLPE/EPDM laminates[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2000, 7(2): 216-221.
- [7] TANAKA T, ITO T, TANAKA Y, et al. Carrier jumping over a patenting barrier at the interface of LDPE laminated dielectrics[C]//2000 IEEE International Symposium on Electrical Insulation. Anaheim, CA, USA: IEEE, 2000: 40-43.
- [8] 吕亮, 王霞, 何华琴, 等. 硅橡胶/三元乙丙橡胶界面上空间电荷的形成[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(15): 106-109.
- LYU Liang, WANG Xia, HE Huaqin, et al. Formation of space charges at interface between ethylene propylene diene terpolymer and silicone rubber[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(15): 106-109.
- [9] 周远翔, 黄猛, 陈维江, 等. 直流电场下油纸绝缘介质界面处的空间电荷特性[J]. 高电压技术, 2011, 37(10): 2417-2423.
- ZHOU Yuanxiang, HUANG Meng, CHEN Weijiang, et al. Space charge characteristics of the interface in oil-paper insulation under DC voltage[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(10): 2417-2423.
- [10] 吴锴, 朱庆东, 王浩森, 等. 温度梯度下双层油纸绝缘系统的空间电荷分布特性[J]. 高电压技术, 2012, 38(9): 2366-2372.
- WU Kai, ZHU Qingdong, WANG Haosen, et al. Space charge distribution characteristics in double-layer oil impregnated papers under temperature gradient[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(9): 2366-2372.
- [11] 马永其, 郑平, 韩轩, 等. 安装运行中电缆终端绝缘界面压力的测试分析[J]. 高电压技术, 2011, 37(2): 347-353.
- MA Yongqi, ZHENG Ping, HAN Xuan, et al. Measurement and analysis of insulated interfacial pressure of cable termination in installation & operation[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(2): 347-353.
- [12] 王金锋, 李彦雄, 刘志民, 等. 温度对聚乙烯水树枝老化特性的影响[J]. 高电压技术, 2012, 38(1): 181-187.
- WANG Jinfeng, LI Yanxiong, LIU Zhimin, et al. Influence of temperature on water treeing in polyethylene[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(1): 181-187.
- [13] 柳松, 彭嘉康, 陈守直, 等. 高压电缆接头过盈量与面压关系的仿真研究[J]. 电线电缆, 2013(1): 38-40.
- LIU Song, PENG Jiakang, CHEN Shouzhi, et al. Simulation on the relationship between shrink range and interfacial pressure in the HV cable joint[J]. Electric Wire & Cable, 2013(1): 38-40.
- [14] FOUMIER D, DANG C, PAQUIN L. Interfacial breakdown in cable joints[C]//Conference Record of IEEE International Symposium on Electrical Insulation. Pittsburgh, USA: IEEE, 1994: 450-452.
- [15] 穆茂武. 高压XLPE电缆预制式附件的设计、制造和安装[J]. 电线电缆, 2007(3): 34-36.
- MU Maowu. Design, manufacture and installation of prefabricated XLPE cable accessories[J]. Electric Wire & Cable, 2007(3): 34-36.
- [16] 常文治, 阎春雨, 李成榕, 等. 硅橡胶/交联聚乙烯界面金属颗粒沿面放电严重程度的评估[J]. 电工技术学报, 2015, 30(24): 245-261.
- CHANG Wenzhi, YAN Chunyu, LI Chengrong, et al. Assessment of creeping discharge initiated by metal particles on the silicone rubber/XLPE interface in cable joints[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(24): 245-261.
- [17] 王佩龙. 高压电缆附件的电场及界面压力设计[J]. 电线电缆, 2011(5): 1-4.
- WANG Peilong. Electrical field and interface pressure control in HV cable accessories design[J]. Electric Wire & Cable, 2011(5): 1-4.
- [18] NORMAND A, DANIEL F. Influence of thermal cycling on the cable joint interfacial pressure[C]//7th International Conference on Solid Dielectrics. Eindhoven, Netherlands: IEEE, 2001: 35-38.
- [19] 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.
- LIU Chang, XI Baojun, FU Mingli, et al. Influence of mechanical stress on the operation reliability of silicone rubber high voltage cable accessories[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(2): 1-9.
- [20] 柳松, 彭嘉康, 王霞, 等. 不同涂覆条件对XLPE/硅橡胶界面击穿强度的影响[J]. 绝缘材料, 2013, 46(5): 66-69.
- LIU Song, PENG Jiakang, WANG Xia, et al. Effects of different coating conditions on the breakdown strength of XLPE/silicone rubber interface[J]. Insulating Materials, 2013, 46(5): 66-69.

罗翔(1988—),男,工程师,硕士,研究方向为电气试验及设备故障诊断分析。