

# 高压 XLPE 电缆击穿的生产因素分析及有效控制

鲁 宁

(山东宝世达电缆有限公司, 山东 济南 250101)

**摘要:** 高压电缆尤其是超高压交联聚乙烯(XLPE)电缆在输电运行中一旦被击穿,将对电网造成巨大损害,给国家造成重大损失。同时,企业在生产制造过程中,一旦发生电缆局放值(PC值)超标,甚至耐压测试击穿,给企业造成的经济损失也非常巨大。该文从电击穿理论入手,对高压XLPE电缆的生产制造过程进行了分析研究,找出导致高压击穿及局放值超标的关键要点,如导体毛刺;导体半导体屏蔽带的电导率;模具及流道的磕碰、划伤;材料的洁净和储存;绝缘层中微孔的数量、大小、内应力等。通过对这些容易被忽视,而且又极其重要的生产制造环节进行剖析,并给出控制方法,以达到降低局放值和击穿频率,提高高压XLPE电缆整体品质的目的。

**关键词:** 电树枝;尖端;凸刺;击穿;局放值;微孔;晕环;焦烧

中图分类号: TM247

文献标志码: B

文章编号: 2096-3203(2017)03-0043-06

## 0 引言

随着我国大规模西电东送及“一带一路”建设的推进,高压及超高压电缆的应用更加广泛,其抗击穿能力的提升更加迫切。由于导致高压交联聚乙烯(XLPE)电缆击穿的原因很多,当电缆击穿时,击穿点类似于“爆炸”,现场崩裂并被破坏,很难收集完整、准确的资料,来证明是哪一因素所致。因此,给生产企业的改进带来许多困扰。目前我国的高压及超高压XLPE电缆生产线都是进口,生产操作人员常常忽略一些看似无关紧要的细节,从而导致出现大问题。现将理论与实际相结合,对这些因素逐一进行剖析,找出关键要点及其改进措施,以期对我国高压电缆制造质量的提升有所帮助。

## 1 树枝化放电对高压XLPE电缆的危害

树枝化放电会造成绝缘提前老化,严重影响XLPE电缆的使用寿命和运行可靠性。应根据其生成机理,找出抑制树枝化放电老化的方法。树枝化放电主要有电树枝、水树枝和电化学树枝3种类型,其中,前2种对电缆的影响最大。

### 1.1 电树枝

电树枝是由于绝缘层中的放电现象而导致的绝缘细微开裂,在开裂的缝隙中有放电产生的焦烧碳黑,形状类似于树枝或树根状<sup>[1,2]</sup>,如图1所示。电树枝产生的机理主要如下:

(1) 机械应力的破坏使得XLPE绝缘产生应变造成气隙和裂纹,进而产生电树。这些机械应力,一方面是在生产制造中因电缆迅速冷却产生的;另

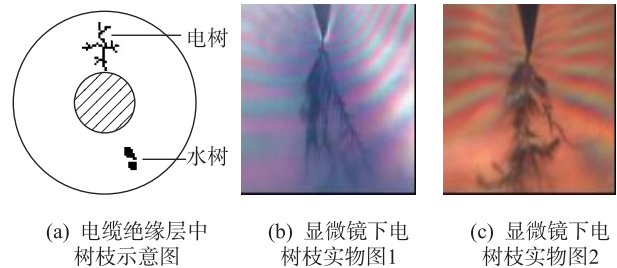


图1 绝缘层中的树枝

Fig.1 Tree of insulation layer

一方面是在敷设过程中因拖拽等外力所产生。

(2) 气隙放电造成电树枝的生长。尽管我国目前的高压及超高压XLPE电缆生产线全部为全干式交联生产线,消除了因水气导致绝缘产生气隙的影响,但仍会有一些 $1\sim 10\ \mu\text{m}$ 及少量 $20\sim 30\ \mu\text{m}$ 的气隙存在。这些众多细小的微孔会构成电晕放电<sup>[3]</sup>。

(3) 电场致发射效应造成电树的引发。在高压电场的作用下,电子会因为隧道效应注入绝缘中,在注入过程中会释放足够的动能,使其不断地与绝缘碰撞而引起绝缘的损坏,导致树枝的产生<sup>[4-6]</sup>。

(4) 瑕疵导致的电树枝。瑕疵主要是导体屏蔽上的疤痕和绝缘屏蔽中的突刺,以及绝缘中的杂质和气隙。瑕疵会导致电场集中,使疤痕、突刺、杂质和气隙等附近的场强升高。

### 1.2 水树枝

一般是由于线芯进水,或者XLPE绝缘与水接触,在电场作用下使绝缘层中产生的树枝状物,如图1(a)所示。水树枝有反复出现的特征。例如在受热的情况会消失,而与水接触后又会产生。水树枝会使绝缘电阻大幅度下降,击穿电压也会大大降低,严重缩短了电缆的使用寿命<sup>[7,8]</sup>。

### 1.3 减少和抑制树枝化放电的方法

各类树枝引发和生长的机理及条件不同,因而抑制的方法也不相同,简单归纳如下:

(1) 改进电极的光滑度,使电极与绝缘的接触面不产生电场局部集中的缺陷,如绕包导电带、挤制导电屏蔽层等;

(2) 严格加工工艺生产条件;

(3) 减少绝缘层中的微孔数量,缩小微孔尺寸,防止局部放电;

(4) 减少绝缘层中的内应力。

## 2 制造过程中产生尖凸的主要环节及控制

### 2.1 尖端凸刺的危害

将电缆沿纵向切开一半并拉开、拉平,就近似于一个平板电容器,导体屏蔽和绝缘屏蔽分别为2个极板。图2分别给出了平板电容有凸出物 and 没有凸出物3种状态的最大电场强度。

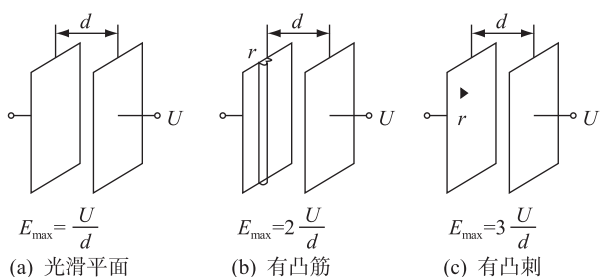


图2 平板电容中的电场强度

Fig.2 Electric field strength of flat plate capacitor

从图2中可以看出,有尖端凸刺的最大电场强度是光滑平面的3倍。这是在平板电容中的电场强度变化情况<sup>[9]</sup>。而在电缆中这一现象会更加突出。电缆导体基本上都是圆柱体,即便是导体表面非常光滑,但其横截面的外边沿是弧形,其电场分布要比平面的差。

图3分别给出了同心圆柱体电容有凸出物和没有凸出物2种状态的最大电场强度<sup>[10-12]</sup>。

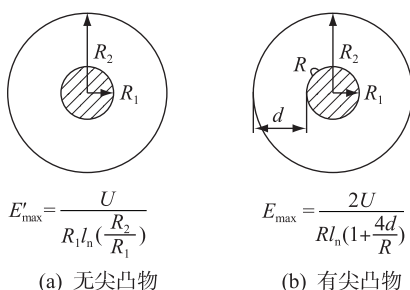


图3 同心圆柱体中的电场强度

Fig.3 Electric field strength of concentric cylinder

可得出有尖凸物时电场强度增加的倍数为:

$$k = \frac{E_{\max}}{E'_{\max}} = \frac{2R_1 l_n \frac{R_2}{R_1}}{R l_n (1 + \frac{4d}{R})} \quad (1)$$

式中: $k$ 为场强增大倍数; $R_1$ 为导体半径; $R_2$ 为电缆半径; $R$ 为尖凸物半径。

以YJV 26/35kV 1×185 电缆为例, $R_1=8.1$  mm,  $R_2=18.6$  mm,设  $R=5 \times 10^{-1}$  mm,  $d=10.5$  mm,则  $k=6.06$ ,最大场强增大6倍,即圆柱体(导体)表面有尖端凸物的最大电场强度是没有尖端凸出物的6倍。如果在制造高压交联电缆的过程中,任何导致导体屏蔽与绝缘界面、绝缘屏蔽与绝缘界面有凸起的情况,都将是致命的缺陷。

### 2.2 制造过程中容易产生尖端凸刺的主要环节

#### 2.2.1 导体制作中产生毛刺的控制

导体毛刺是造成尖端凸刺的重要因素。毛刺较小者会造成导体屏蔽凸起,局放值偏大,使用寿命缩短。较大者会刺破导体屏蔽进入到绝缘层中,在对电缆进行耐压试验时直接造成绝缘被击穿。

(1) 导体毛刺的产生。除了导体材质本身的因素外,还可能在单线拉制和单线绞制过程中产生。

在单线拉制过程中,重点检查润滑油是否合格、拉线模内孔是否光滑、有无缺陷。定期更换润滑油。

在单线绞制过程中,重点检查分线板、线嘴、导轮有无磨损。如有及时更换。

(2) 导体毛刺的消除。导体出现毛刺后,主要的消除措施有:①在导体绞合后安排专人反复擦拭。②在挤制绝缘前安装专用毛刺清理设备。③如果实在处理不掉或难以处理彻底,则可在导体表面绕包一层导电尼龙带。

#### 2.2.2 导体屏蔽绕包导电带的质量控制

对于截面积为  $500 \text{ mm}^2$  及以上的导体,可采用先绕包一层导电带,再挤包导电屏蔽料的组合方式<sup>[13]</sup>。

导体屏蔽绕包导电带的电阻率应不大于  $1000 \Omega \cdot \text{m}$ 。要对采购回来的导电带进行电阻率的检测,如果电阻率过大,使导体与挤包导电层隔离,起不到等电位均化电场的作用,极易造成电缆被击穿。

#### 2.2.3 导体屏蔽和绝缘屏蔽及其挤出加工控制

导体导电屏蔽层的主要作用是为了均匀线芯外表面电场,避免因导体表面不光滑以及线芯绞合产生的气隙而造成导体和绝缘发生局部放电。外导电屏蔽层的作用主要是起到与绝缘层外表

面的光滑接触,并与其外面的金属护套相连,形成等电位,避免因电缆绝缘表面裂纹等缺陷而与金属护套发生局部放电。同时,半导电层还可使绝缘与导体、绝缘与金属外护套紧密地结合在一起,减少之间的气隙,也就减少了因气隙放电的可能。

对于每批购进的半导电屏蔽料,生产后进行电阻率测试。导体屏蔽电阻率不超过  $1000 \Omega \cdot \text{m}$ ,绝缘屏蔽电阻率不超过  $500 \Omega \cdot \text{m}$ 。杜绝使用电阻率超过标准值的半导电屏蔽料。很多类似案例证明了半导电屏蔽料的电阻率过高,将导致局放值偏大<sup>[13]</sup>。

电缆生产过程中,要确保导体屏蔽层与绝缘层、绝缘层与绝缘屏蔽层之间的界面平整光滑。导体屏蔽层挤出时不能有碰伤、凸起、焦烧和屏蔽不连续等现象。现在大都采用三层共挤设备,避免了人为造成的碰伤、卡尺测量直径后留下的棱角等现象。因此,需要重点防护的是挤出模具的内外表面以及材料流道的表面。在清理和装配流道、模具的过程中,避免疲劳野蛮操作,严防产生磕碰、划痕。否则会造成存料、焦烧、界面有凸起,从而导致电缆击穿。要控制好屏蔽层厚度、圆整度,因为屏蔽层较薄,稍有偏心就会导致局部脱节,露出带股棱的导体,直接与绝缘相接,同样会造成电力线集中,电缆被击穿。

#### 2.2.4 半导电电阻水带质量的控制

半导电电阻水带也叫缓冲层,是在交联电缆进行金属套铠装之前,绕包在绝缘屏蔽层上的一层缓冲保护带,既起到阻水、缓冲的作用,又起到连接绝缘屏蔽与金属套以达到等电位的作用。如果电阻率过高,隔离了两者之间的等电位,使得带波纹的铝护套同样产生电力线集中,局放值偏大,甚至击穿。半导电电阻水带大多是国内生产,采购时既要考虑阻水效果,又要重视半导电性能,其电阻率应不超过  $500 \Omega \cdot \text{m}$ <sup>[14]</sup>。

#### 2.2.5 高压 XLPE 电缆金属套的加工控制

金属屏蔽层的作用是,在电缆正常运行时通过电容电流;当电缆破损发生短路时,可作为短路电流的卸载通道流入接地网;屏蔽电场。高压电缆的金属套有铅套、皱纹铝套。该环节生产的重点是计算好轧纹的深度,如果轧纹深度超过了缓冲层厚度,则会伤及绝缘屏蔽层,使其向绝缘内凸起,同样会导致电力线的高度集中,局放值偏大,甚至击穿。这在实际生产中经常会发生。

### 3 工艺条件的影响及其控制

#### 3.1 绝缘材料的洁净度

绝缘材料的洁净度直接关系到材料的绝缘性

能,即材料的抗击穿能力,因此,在发生电缆击穿事故时,往往把原因都归结为绝缘材料的问题。但根据多年来对所发生事故的原因分析,以及北欧化工、美国陶氏公司对其事故材料的调查,属于材料中含有杂质的事件概率非常小。目前我国高压交联电缆制造商所使用的绝缘料、内外屏蔽料全部都是进口,从材料的洁净度到包装密封都是严格按照国际标准来执行。一些超净料的杂质指标已达到  $50 \mu\text{m}$  以下,许多供应商的料箱都配备了整套密封输送和下料装置<sup>[15]</sup>。因此,防范措施应重点放在生产制造过程中。

#### 3.2 建立合格的绝缘料和屏蔽料存放洁净间

洁净间的洁净度要达到 100 级的净化房标准,即:每立方英尺空气中所含  $\geq 0.5 \mu\text{m}$  粒径的粒子数量不超过 100 个。

#### 3.3 制定严格的洁净间管理制度

(1) 洁净间的风淋门及各料室门必须保持关闭,风淋间要保持可随时工作的状态;

(2) 料箱在进入风淋间之前,应先拆掉外面的一切包装物,清理干净后再进入风淋间;

(3) 在生产过程中,要将料袋口与吸管扎紧,避免落进杂物;

(4) 操作人员应穿带专用工作服及手套,经过风淋间风淋后方可进入。

#### 3.4 材料的储存管理

交联料在  $\pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$  时极易析出,但温度低于  $-18 \text{ }^\circ\text{C}$  或高于  $+10 \text{ }^\circ\text{C}$  时,DCP 和抗氧剂的析出比较平稳。一般情况下,交联电缆料在新购 2 个月内,交联剂不会析出。所以电缆料购进后 3 个月内要及时安排生产,储存期如果超过 6 个月,应进行重新检验,指标不合格者不能继续使用<sup>[16]</sup>。

#### 3.5 冷却介质温度的变化

在每种型号规格的电缆生产之前,需要进行 Recipe 的计算,输入该电缆的结构尺寸、材料、环境参数、工艺要求值等参数,最终计算出符合所有这些参数和工艺要求的最佳生产线速度、交联管道温度分布值。严格按照这些计算值去生产,可以生产出合格的产品。需要注意的是,在连续生产若干天后,最初计算 Recipe 时输入的参数值是否已经发生了变化。如果发生变化,依然按照最初计算值进行生产,则会造成废品。例如,管道冷却介质温度,最初计算 Recipe 时输入的是  $35 \text{ }^\circ\text{C}$ ,但经过一段时间后,尤其是夏天,冷却循环水的温度很快会上升到  $45 \text{ }^\circ\text{C}$  以上,而由其交换冷却的氮气温度也随之升高,这时电缆在经过冷却段时内部冷却的温度值肯

定达不到计算值。当电缆经过地面转向轮时,如果导体的温度降不到 110 ℃ 以下, XLPE 还达不到结晶温度,绝缘最内层部分材料还处在半熔融状态,此时转向弯曲,会对电缆造成致命伤害。因为立塔的高度受限,其线速度的约束值大多在冷却段而非加热段,冷却温度的余量值很小。

#### 4 减少微孔数量缩小微孔尺寸的方法

微孔对绝缘的危害极大,正如前面所述。它是产生电树、水树的重要条件。

硫化管道内氮气压力的变化常常被忽视。由于氮气压力补充控制系统及供氮源的储备容量等因素,管道内氮气的压力并不总是恒定在设定值,而是随着泄漏—补充—再泄漏,上下波动。尤其是长时间生产后氮气源压力下降,交联管道内氮气压力经常会短时间内出现低于设定值的现象。操作人员对此没有足够的重视,会严重影响高压电缆的品质和性能。

对于超高压交联电缆的生产,其管道内氮气压力要求不低于 1.2 MPa。维持这么高的压力,主要是缩小绝缘层中的微孔数量和微孔直径,降低局放值。试验证明,在常压下 XLPE 中的微孔直径可达 100 μm;在 1 MPa 压力下微孔直径达 10~20 μm;在 10 MPa 压力下微孔直径达 1~5 μm。微孔直径小到 1 μm 以下时,根据巴申定律可知:由于放电路径太小已达不到使电缆绝缘产生局部放电的条件,因此,绝缘品质会有极大的提高<sup>[17,18]</sup>。

由此可以看出,在生产线交联管道所能承受压力的范围内,氮气压力越高越恒定,产品质量越好。在高压交联电缆的实际生产过程中,如确保其他因素正常,但仍然局放值超标,则不妨提高一下管道内氮气的压力。

#### 5 控制绝缘层中的内应力

##### 5.1 绝缘热应力产生的原因

绝缘层存在应力的最直观表现是,电缆切断后导体会凸出横截面一小段。也就是说导体与内屏蔽连同绝缘层之间有松动、分离,不是紧密的粘贴在一起。当非常厚的绝缘层从高温区(加热段)进入低温区(冷却段)后,外表层先降温冷却,然后再向内(导体方向)逐渐降温。当最外层温度率先降低到材料结晶温度时,电缆最外层轮廓固化,当内部靠近导体的绝缘层继续冷却收缩时,由于外轮廓已固化变硬,无法向内收缩,绝缘和导体屏蔽层只好向外收缩,从而导致内屏蔽连同绝缘层和导体的

“离骨”,即松动。

##### 5.2 热应力未消除的危害

导体与内屏蔽层间“离骨”,有气隙,则直接导致电缆局放值增大,甚至被击穿。即使出厂耐压试验时没有被击穿,在运行一段时间后,由于电力线的集中,长期对绝缘某部位冲击,很快就会产生电树,直至最终被击穿。更严重者,热应力会造成 XLPE 结晶结构的应力开裂,不但影响绝缘层的机械性能,还会直接导致局放值也不合格。

##### 5.3 消除热应力的措施

(1) 应用好 Relaxation 装置。由于绝缘热膨胀系数是铜导体的 20 倍,将冷却后的电缆绝缘层在冷却段重新加热到 105~110 ℃ 左右,使绝缘最外层软化再进一步向内(导体方向)收缩,可有效消除应力。

(2) 增加预冷却段的长度。交联管由加热段、预冷却段、冷却段组成,加热段和冷却段越长,则生产速度越快,一般对预冷却段重视不够。预冷却段是加热段与冷却段之间的过渡段,可避免电缆急冷,造成应力增大。预冷却段长度可选择 9~11 m。

(3) 对于电压等级越高、绝缘越厚的电缆生产,交联管道的加热温度应适当降低,生产线速度放慢,可有效降低绝缘的急速冷却。

(4) 延长脱气时间。正常情况下,110 kV 交联电缆需要烘 3~4 d,220 kV 烘 7~8 d,500 kV 烘 14~15 d,烘房温度为 70~75 ℃。如果绝缘内的应力较大,可适当延长绝缘线芯的脱气时间,同样会取得较好的效果。

#### 6 结语

通过以上对高压 XLPE 电缆击穿原理的分析及各生产工序特点的分析,在生产制造过程中,有很多不起眼的小环节都会造成电缆的击穿和使用寿命的缩短。因此,生产中需要着重强调:(1) 导体在挤出绝缘之前必须消除毛刺。对于特别严重消除不彻底的,则要在导体表面绕包一层导电尼龙带。(2) 对于购买的导电带及半导电电阻水带,进厂时必需进行绝缘电阻的测量,不达标者退货,坚决杜绝使用。(3) 挤出模具、流道,在清理和装配时要制定严格管理制度,严防疲劳野蛮操作。(4) 加强操作工的巡察,严防管道内氮气压力低于 1.2 MPa 及上下剧烈波动,设定值可尽可能的高一些。(5) 随着 Recipe 中各输入值与现场实际值差异的变化,开车速度与管道加热温度需要适时调整,确保生产出合格的产品。

## 参考文献:

- [1] 王以田,郑晓泉,CHEN G,等. 聚合物聚集态和残存应力对交联聚乙烯中电树枝的影响[J]. 电工技术学报,2004,19(7):44-48.  
WANG Yitian, ZHENG Xiaoquan, CHEN G, et al. The effect of polymer aggregation and residual stress on the electrical tree in cross-linked polyethylene[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2004, 19(7): 44-48.
- [2] 郑晓泉, CHEN G, DAVIES A E. 交联聚乙烯电缆绝缘中的导电和非导电型电树枝[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(3): 140-144.  
ZHENG Xiaoquan, CHEN G, DAVIES A E. Conducting and non conducting electrical trees in XLPE[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(3): 140-144.
- [3] MAMMERI M, LAURENT C, SALON J. Influence of space charge build up on the transition to electrical treeing in PE under AC voltage[J]. IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation, 1995, 2(1): 27-35.
- [4] EI-ZEIN A, TALAAT M, BAHY M M E. A numerical model of electrical tree growth in solid insulation[J]. IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation, 2009, 16(6): 1724-1734.
- [5] CHEN X, XU Y, CAO X, et al. Effect of tree channel conductivity on electrical tree shape and breakdown in XLPE cable insulation samples[J]. IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation, 2011, 18(3): 847-860.
- [6] KUDO K. Fractal analysis of electrical trees[J]. IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation, 1998, 5(5): 713-727.
- [7] LI J, TONG X, YIN G, et al. The effect of accelerated water tree ageing on the properties of XLPE cable insulation [J]. IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation, 2011, 18(5): 1562-1569.
- [8] 王志钧,吴炯. 500 kV XLPE 电缆绝缘中树枝化现象的述评[J]. 电线电缆,2001(2):16-20.  
WANG Zhijun, WU Jiong. Review on the phenomenon of branch in 500 kV XLPE cable insulation[J]. Electric Wire & Cable, 2001, (2): 16-20.
- [9] 刘吉来,黄瑞梅. 高电压技术[M]. 北京:中国水利水电出版社,2004.  
LIU Jilai, HUANG Ruimei. High voltage engineering[M]. Beijing: China Water Conservancy and Hydropower Publishing House, 2004.
- [10] 贾欣,刘英,曹晓珑. XLPE 电缆缺陷尺寸分布对电树枝起始的影响[J]. 高电压技术, 2003,29(10):7-8,43.  
JIA Xin, LIU Ying, CAO Xiaolong. Effect of defect size distribution of XLPE cable on the initiation of electrical trees[J]. High Voltage Engineering, 2003,29(10):7-8,43.
- [11] 贾欣,刘英,曹晓珑,等. 高压交联聚乙烯电缆绝缘结构的可靠性设计方法[J]. 西安交通大学学报,2002,36(8):793-797.  
JIA Xin, LIU Ying, CAO Xiaolong, et al. Reliability design method of high voltage XLPE cable insulation structure[J]. Journal of Xian Jiaotong University. 2002,36(8):793-797.
- [12] 杨景刚,贾勇勇,赵科. GIS 内典型绝缘缺陷的局部放电信号超声特性分析[J]. 江苏电机工程,2015,34(2):10-14.  
YANG Jinggang, JIA Yongyong, ZHAO Ke. Analysis of partial discharge ultrasonic wave characteristic of typical defects in GIS[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2015,34(2):10-14.
- [13] 上海电缆研究所. GB/T 18890—2015 额定电压 220 kV ( $U_m = 252$  kV) 交联聚乙烯绝缘电力电缆及其附件[S]. 北京:中国标准出版社,2015.  
Shanghai Electric Cable Research Institute. GB/T 18890—2015 Power cables with cross-linked polyethylene insulation and their accessories for rated voltage of 220 kV ( $U_m = 252$  kV) [S]. Beijing: China Standard Press, 2015.
- [14] 上海电缆研究所. GB/T 3048—2007 电线电缆电性能试验方法[S]. 北京:中国标准出版社,2008.  
Shanghai Electric Cable Research Institute. GB/T 3048—2007 Test methods for electrical properties of electric cable and wires[S]. Beijing: China Standard Press, 2008.
- [15] 蒋佩南. 国产交联电缆的生产和运行经验[C]//中国电工技术学会电线电缆专委会、中国电机工程学会电力电缆专委会 2002 年会论文集. 2002:122-137.  
JIANG Peinan. Production and operation experience of domestic cross linked cable [C]// China Electrotechnical Society, Wire and Cable Professional Committee, CSEE Power Cable Professional Committee, Proceedings of the 2002 Annual Conference. 2002:122-137.
- [16] 金金元. 交联电缆的交联洁净工艺控制[J]. 电线电缆, 2014,(2):41-43.  
JIN Jinyuan. XLPE cable crosslinked clean process control [J]. Electric Wire & Cable, 2014,(2):41-43.
- [17] 高嵩,刘洋,路永玲. 交流特高压输电线路运行维护现状综述[J]. 江苏电机工程,2014,33(2):81-84.  
GAO Son, LIU Yang, LU Yongling. A review on operation and maintenance of UHV AC transmission Line[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2014,33(2):81-84.
- [18] ISHIHARA H. Improvement in reliability of extrusion type molded joint for 275 kV XLPE cable[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1992,7(4):15-19.

## 作者简介:



鲁宁

鲁宁(1963—),男,山东新泰人,高级工程师,从事高压电缆及特种电缆的研发与制造工作。

(下转第 58 页)

- [15] 赵娟, 谭忠富, 李强. 我国峰谷分时电价的状况分析[J]. 现代电力, 2005, 22(2): 82-85.  
ZHAO Juan, TAN Zhongfu, LI Qiang. Analysis of TOU electricity price in China[J]. Modern Electric Power, 2005, 22(2): 82-85.
- [16] 吴桥, 卢树峰, 杨世海, 等. 需求侧响应条件下的家庭用电管理研究[J]. 江苏电机工程, 2016, 35(5): 28-31.  
WU Qiao, LU Shufeng, YANG Shihai, et al. Household electric power management under demand side response [J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2016, 35(5): 28-31.
- [17] 倪汝冰. 换流阀冷却系统温度控制策略分析[J]. 工业, 2014(12): 80-81.  
NI Rubing. Analysis of temperature control strategy of converter valve cooling system [J]. Industry, 2014(12): 80-81.

作者简介:



刘重强

刘重强(1982—),男,湖北枣阳人,工程师,研究方向为电力电子行业水冷系统新产品的研发(E-mail: liucq@goaland.com.cn);

张恩龙(1979—),男,山东单县人,高级工程师,研究方向为电力电子行业水冷系统新产品的研发(E-mail: zhangel@goaland.com.cn);

陈绪胜(1974—),男,湖北天门人,工程师,研究方向为电力电子行业水冷系统新产品的研发(E-mail: chenxs@goaland.com.cn);

文玉良(1972—),男,湖南邵阳人,高级工程师,研究方向为电力电子行业水冷系统新产品的研发(E-mail: wenyyl@goaland.com.cn)。

文玉良(1972—),男,湖南邵阳人,高级工程师,研究方向为电力电子行业水冷系统新产品的研发(E-mail: wenyyl@goaland.com.cn)。

## Converter Valve Cooling System for High Temperature Water Shortage Area

LIU Chongqiang, ZHANG Enlong, CHEN Xusheng, WEN Yuliang

(Guangzhou Goaland Energy Conservation Technology Limited Company, Guangzhou 510663, China)

**Abstract:** The conventional HVDC converter valve closed cycle cooling system based on the combination of environmental conditions of high temperature and drought area, using composite cooling chillers, cold storage and air cooler combination, and according to the ambient temperature are given different cooling strategies accordingly, were used in the analysis of the different environmental conditions composite cooling method, the analysis result is validated through experiment, achieved the corresponding air cooler, refrigeration and cold storage tank cold loading and reverse unloading function according to the valve inlet temperature, make the system more reasonable and logical control is more direct, higher degree of automation, reliability, improve the cold exchange equipment valve of environmental temperature adaptability, to ensure the normal work of HVDC converter valve.

**Key words:** high temperature water shortage; cooling system; thyristor valve; water chiller

(编辑 徐林菊)

(上接第 47 页)

## Manufacture Factor Analysis and Effective Control of High Voltage XLPE Cable Breakdown

LU Ning

(Shandong Baoshida Cable Co. Ltd., Jinan 250101, China)

**Abstract:** The high voltage cable, especially the extra high voltage XLPE cable in the transmission operation once the breakdown, will cause great damage to the power grid, causing great losses to the country. At the same time, enterprises in the manufacturing process, once the cable partial discharge standard value (PC value) exceeded, or even withstand voltage test breakdown, the economic losses caused to the enterprise is also very great. Based on the theory of electric breakdown, this paper analyzes and studies the manufacturing process of high voltage XLPE cable in theory and practice, and finds out the key points that lead to high voltage breakdown and partial discharge standard value exceeds. Such as: Conductor burr; Electrical conductivity of conductor semi conductive shielding tape; Bump and scratch of extruder die; Bump and scratch of extruder runner; Cleaning and storage of material; Number and size of micro pore in insulation layer, and internal stress in insulation layer and so on. Through the analysis of these easily overlooked, but also extremely important part of the manufacturing process, the control method is given, in order to achieve the purpose of reducing partial discharge and breakdown frequency, improve the overall quality of high voltage XLPE cable.

**Key words:** electrical tree; pointed end; convex; breakdown; partial discharge value; micropore; aureole; scorch

(编辑 刘晓燕)