

DOI:10.12158/j.2096-3203.2021.06.026

# 高压直流电缆系统安全裕度试验研究

李栋, 陈龙啸, 朱智恩, 邓天宇, 王宇, 王蓉荣

(南瑞集团(国网电力科学研究院)有限公司, 江苏 南京 211106)

**摘要:**掌握高压直流电缆系统的安全裕度是保证电缆线路长期安全运行的前提条件。为获取高压直流电缆系统的最高使用电压,文中测试了电缆绝缘和附件绝缘的电导率,得出了电导率对温度和电场强度的依赖关系,并求出了电导率表达式。以±80 kV 高压直流电缆系统为研究对象,提出了电缆系统安全裕度试验方法,采用逐级加压的方式测试了电缆系统在最高运行温度 90 ℃ 下的击穿电压。根据电缆绝缘和附件绝缘的电导率计算了电缆系统击穿时的电场分布,通过对比电缆系统击穿时的电场强度与长期运行所需承受的电场强度,获得了电缆系统的安全裕度。研究表明,文中提出的试验方法能够获得高压直流电缆系统安全裕度,研究结果可为高压直流电缆工程的安全运行提供理论和试验依据。

**关键词:**高压直流电缆; 电缆附件; 电导率; 电场分布; 安全裕度

**中图分类号:** TM726

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2096-3203(2021)06-0199-06

## 0 引言

高压直流电缆系统是实现大电网互联、远距离输电和新能源并网的关键电力装备<sup>[1-2]</sup>,具有输电线路损耗小、可控性好、环境影响小、投资成本低等优势,适用于长距离输电、可再生能源并网、非同步系统互联<sup>[3-5]</sup>。近年来我国高压直流输电技术快速发展,先后建成了南澳岛±160 kV、舟山±200 kV 和厦门±320 kV 柔性直流电缆输电工程<sup>[6-8]</sup>,正在建设江苏如东±400 kV 柔性直流输电海上风电项目。目前国内制造商已经可以生产电压等级最高为±525 kV的高压直流电缆,标志着我国的制造技术已进入世界先进行列<sup>[9-10]</sup>。

掌握高压直流电缆系统的安全裕度是保证电缆线路长期安全运行的前提条件。然而在直流电缆系统通过型式试验和预鉴定试验后,无法评判产品本身的最高使用电压,也无法确定产品的可靠性<sup>[11-12]</sup>。一方面,直流电缆系统的主要技术规范只提供了试验方法,缺少高压直流电缆及附件产品的技术规范;另一方面,直流电缆系统的安全裕度评价标准和分析方法欠缺。有学者以绝缘试片来评估直流电缆系统的安全水平,钱恺羽等测试了不同温度和不同厚度下高压直流电缆绝缘击穿强度,揭示温度对交联聚乙烯(cross-linked polyethylene, XLPE)击穿场强厚度效应的影响机理<sup>[13]</sup>;刘云鹏等研究了冲击电压下绝缘试片击穿强度,阐述了

XLPE 的击穿原理<sup>[14]</sup>。但是以绝缘试片来评估直流电缆系统的安全水平,其评估方法的合理性和评估结果的准确性值得商榷。其一,两者结构上有差异,试片为平板结构,成品电缆及附件绝缘为环形结构;其二,两者厚度不同,绝缘厚度越大弱点个数越多,同等条件下绝缘击穿概率越大。

文中以±80 kV 高压直流电缆系统为研究对象,提出电缆系统安全裕度试验方法,开展热态下的安全裕度试验,计算电缆绝缘和附件绝缘界面电场强度,获得了直流电缆系统的安全裕度,为直流电缆工程的安全运行提供了理论和试验依据。

## 1 高压直流电缆和附件绝缘材料的电导率

高压直流电缆系统由直流电缆本体和电缆附件组成,直流电缆本体采用 XLPE 绝缘<sup>[15-18]</sup>,电缆附件采用硅橡胶(SiR)绝缘。XLPE 和 SiR 的电导率是直流电缆系统电场解析和安全裕度计算的必要参数,根据直流电缆系统实际运行温度和电场强度,文中分别测试了温度为 30 ℃, 50 ℃, 70 ℃, 90 ℃, 电场强度为 5 kV/mm, 10 kV/mm, 15 kV/mm, 20 kV/mm 时 2 种材料的电导率,测试结果如图 1 和图 2 所示。图 1 为材料电导率随温度的变化曲线,温度升高两者电导率增大,且 XLPE 的增大趋势高于 SiR。图 2 为电导率随电场强度的变化曲线,电场强度增加, XLPE 电导率明显增大,但 SiR 电导率相对稳定。

为了准确描述材料的电导率特性,采用式(1)对实验数据进行拟合<sup>[19-20]</sup>:

$$\sigma = Ae^{aT}E^b \quad (1)$$

收稿日期:2021-06-31;修回日期:2021-09-07

基金项目:国家电网有限公司科技项目“90 ℃ 直流电缆绝缘材料及海底电缆系统关键技术研究”

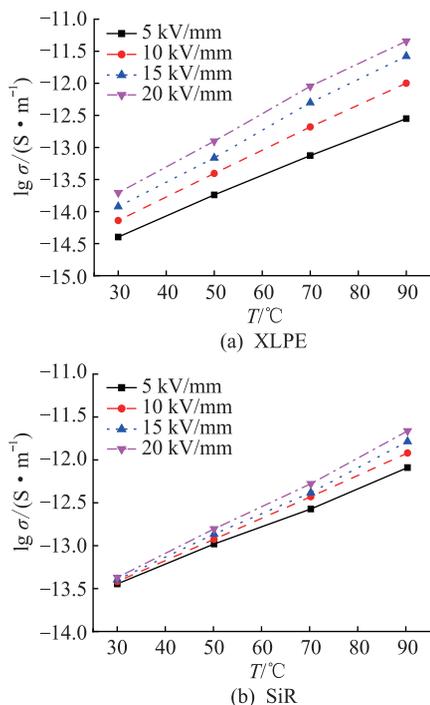


图1 电导率温度特性

Fig.1 Conductivity temperature characteristic

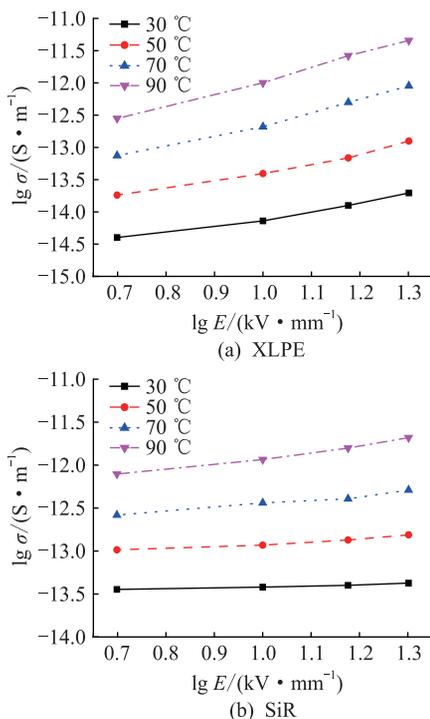


图2 电导率电场特性

Fig.2 Conductivity electric field characteristics

式中： $\sigma$  为电导率； $A$  为常数； $\alpha$  为电导率温度系数； $T$  为温度； $E$  为外加电场强度； $\gamma$  为电导率电场系数。

根据拟合结果求出电导率温度系数和电场系数，对不同条件下的电导率温度系数和电场系数进行平均处理，即得到直流电缆绝缘材料和附件绝缘材料的电导率：

$$\sigma_{XLPE} = 4.52 \times 10^{-16} e^{0.036 5T} E^{1.645} \quad (2)$$

$$\sigma_{SiR} = 2.42 \times 10^{-14} e^{0.025 3T} E^{0.388} \quad (3)$$

## 2 高压直流电缆系统安全裕度试验

### 2.1 试验样品

高压直流电缆本体结构如图3所示，导体截面  $150 \text{ mm}^2$ ，绝缘厚度  $5.5 \text{ mm}$ ，额定电压  $U_0$  为  $80 \text{ kV}$ 。

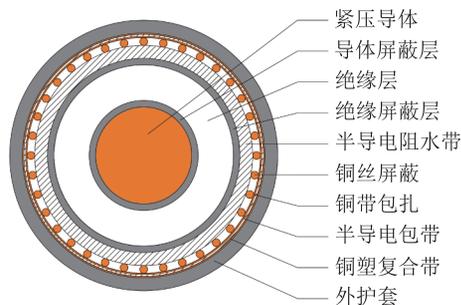


图3 高压直流电缆结构示意图

Fig.3 Schematic diagram of HVDC cable structure

高压直流电缆附件采用整体预制式终端，其结构如图4所示，安装后的终端部分由电缆导体、导体屏蔽、电缆绝缘、绝缘屏蔽、终端绝缘、应力锥组成。

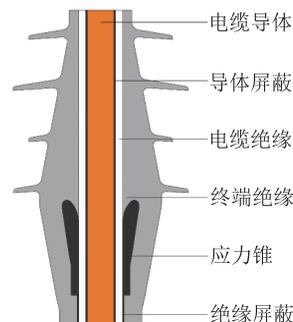


图4 高压直流电缆终端结构示意图

Fig.4 Schematic diagram of HVDC cable termination

### 2.2 试验回路布置

试验回路布置如图5所示，直流电缆终端安装于电缆末端，由铜排连接组成试验回路，电缆长度  $20 \text{ m}$ 。采用2台穿心变压器对电缆导体加热，采用电流互感器测量导体电流。

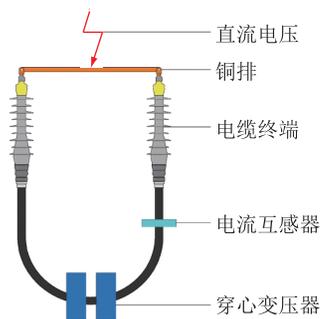


图5 试验回路布置

Fig.5 Test loop layout

利用模拟回路测量导体电流与导体温度之间的关系,测得的导体电流和导体温度随时间变化的曲线如图6所示。在施加电流120 min后,电缆导体温度稳定在90℃,对应的导体电流为620 A。试验过程中试验回路与模拟回路同步施加电流,确保试验回路与模拟回路温度一致。

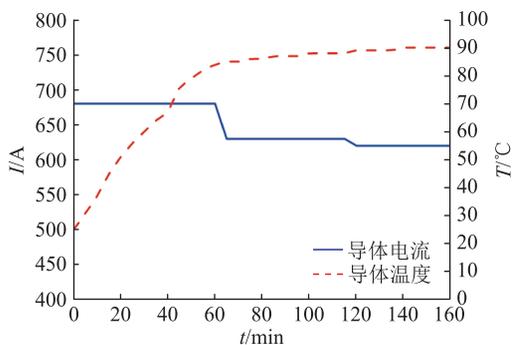


图6 导体电流和导体温度随时间的变化曲线

Fig.6 Curves of conductor current and conductor temperature over time

### 2.3 试验过程

高压直流电缆系统安全裕度试验在高压屏蔽大厅中进行,直流高压发生器最大输出电压 $\pm 2\ 400$  kV,最大输出电流30 mA。试验采取逐级加压的方式,从 $U_0$ 开始每级耐压3 h,如果样品未击穿,则电压升高10 kV,依此类推直到电缆系统击穿为止。取3组试验样品进行平行试验,采用最小值法评估试验结果。试验得出样品的击穿电压分别为200 kV,210 kV,210 kV,击穿位置均在电缆终端内部,解剖后的样品如图7所示,击穿点位于绝缘屏蔽断口以上20 mm处,距离应力锥根部5 mm。

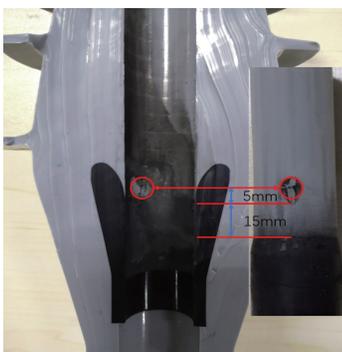


图7 击穿样品解剖图

Fig.7 Breakdown sample anatomy

## 3 高压直流电缆系统安全裕度试验

高压直流电缆终端的几何结构和材料属性的差异会导致电场分布不均匀,局部电场强度超出材料的绝缘强度,造成电缆终端的击穿破坏。为了判定电缆终端击穿的原因,需要进一步计算出电缆终

端在击穿电压下的电场分布。

### 3.1 电缆系统短期耐受电压和等效击穿电压

直流电缆系统的设计寿命为40 a,而试验中每级电压的耐受时间为3 h,因此需要将直流电缆系统额定电压换算成短时耐受电压。

电缆系统运行电压与寿命存在如下关系<sup>[21]</sup>:

$$U^n t = c \quad (4)$$

式中: $U$ 为运行电压; $t$ 为电缆寿命; $n$ 为寿命指数; $c$ 为常数。那么短期耐受电压为:

$$U_{dc} = \sqrt[n]{t_0/\Delta t} U_0 \quad (5)$$

式中: $U_0$ 为额定电压; $t_0$ 为电缆设计寿命; $\Delta t$ 为短期试验时间。

已知直流电缆设计寿命 $t_0$ 为40 a,试验中每级电压耐受时间 $\Delta t$ 为3 h,取寿命指数 $n$ 为15,可计算得电缆系统短期耐受电压 $U_{dc}$ 为174 kV。

考虑到逐级加压对电缆系统绝缘产生的累计影响,为了消除该影响,根据式(6)将累计电压换算成等效击穿电压:

$$\sum (U_i^n t_i) = U_d^n \Delta t \quad (6)$$

式中: $U_i$ 为第 $i$ 级电压; $t_i$ 为第 $i$ 级耐受时间; $U_d$ 为等效击穿电压。

从 $U_0$ 开始到电缆系统击穿,样品经受了13级电压,其中1~12级耐压通过,即 $t_1 \sim t_{12}$ 为3 h,第13级耐压1 h后电缆系统击穿,则对应 $t_{13}$ 为1 h,求得等效击穿电压 $U_d$ 为202 kV。

### 3.2 直流电缆终端的电场分布

由于绝缘材料的电导率受温度和电场强度的双重影响,电场分布与电压不是简单的线性关系,以电压为依据来评估电缆终端的安全裕度不能直接反映击穿点附近的电场分布情况,故文中以电场强度为依据来评估直流电缆系统的安全裕度。

根据电流连续性原理,即电缆绝缘和附件绝缘界面上的电流密度相等:

$$j = \sigma_1 E_1 = \sigma_2 E_2 \quad (7)$$

式中: $j$ 为电流密度; $\sigma_1$ 为电缆绝缘电导率; $\sigma_2$ 为附件绝缘电导率; $E_1$ 为电缆绝缘电场; $E_2$ 为附件绝缘电场。

电缆绝缘和附件绝缘双层介质的电压为:

$$\begin{cases} U_1 = E_1 d_1 \\ U_2 = E_2 d_2 \end{cases} \quad (8)$$

$$U = U_1 + U_2 \quad (9)$$

式中: $U_1$ 为电缆绝缘电压; $U_2$ 为附件绝缘电压; $d_1$ 为电缆绝缘厚度; $d_2$ 为附件绝缘厚度。

由式(7)一式(9)可得电缆绝缘和附件绝缘双层介质的电场强度为:

$$\begin{cases} E_1 = \frac{\sigma_2 U}{\sigma_1 d_2 + \sigma_2 d_1} \\ E_2 = \frac{\sigma_1 U}{\sigma_1 d_2 + \sigma_2 d_1} \end{cases} \quad (10)$$

根据热路方程,可知:

$$T = T_c - \frac{W_c}{2\pi} \rho_T \ln \frac{r}{r_c} \quad (11)$$

式中: $T_c$ 为导体温度; $W_c$ 为导体损耗; $\rho_T$ 为材料热阻系数; $r$ 为半径; $r_c$ 为导体外径。其中:

$$W_c = I^2 R \quad (12)$$

式中: $I$ 为导体电流; $R$ 为导体电阻。

将式(2)、式(3)、式(11)和式(12)代入式(10),求出电缆终端在  $U_d = 202$  kV,  $U_{dc} = 174$  kV,  $U_0 = 80$  kV 时的电场分布,如图 8 和图 9 所示,图中横坐标  $s$  为应力锥曲线(或 XLPE/SiR 界面)到应力锥起点的长度,纵坐标  $E$  为电场强度。

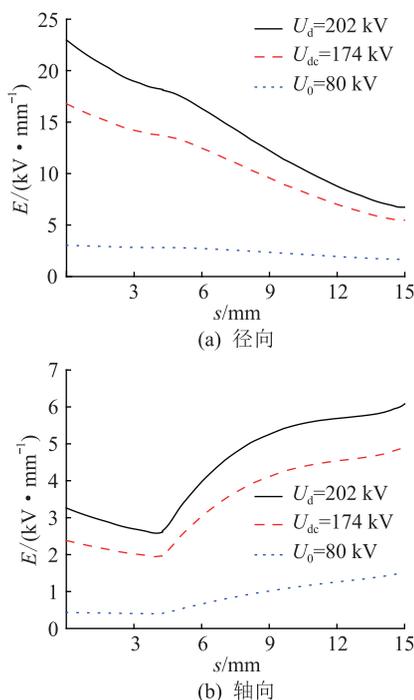


图 8 应力锥曲线电场强度

Fig.8 Stress cone curve electric field intensity

图 8(a)为应力锥曲线径向电场强度,等效击穿电压、短期耐受电压和额定运行电压下,最大电场强度出现在应力锥根部,分别为 23.0 kV/mm, 16.8 kV/mm, 3.0 kV/mm,随着距离的增加,电场强度逐渐降低。图 8(b)为应力锥曲线轴向电场强度,3 种电压下最大电场出现在应力锥顶部,分别为 6.1 kV/mm, 4.9 kV/mm, 1.5 kV/mm。随着距离的增加,电场强度呈上升趋势,由于应力锥曲线斜率不连续,导致在距离应力锥根部 4.1 mm 处应力锥曲线轴向电场强度出现拐点。

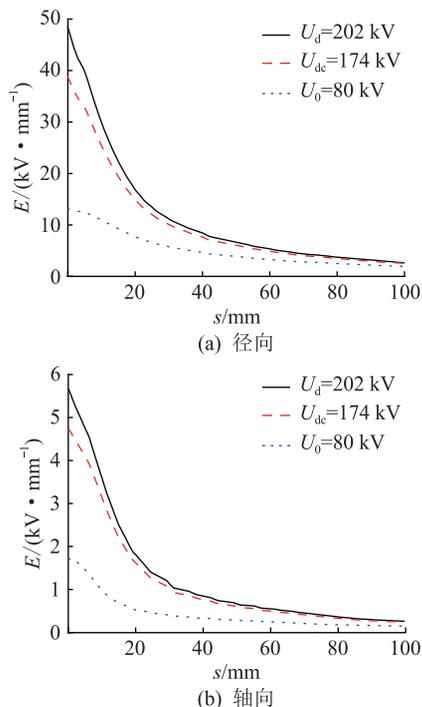


图 9 XLPE/SiR 界面电场强度

Fig.9 XLPE/SiR interface electric field intensity

图 9(a)为等效击穿电压、短期耐受电压和额定运行电压下 XLPE/SiR 界面径向电场分布,最大值分别为 48.5 kV/mm, 38.8 kV/mm, 13.1 kV/mm。图 9(b)为 XLPE/SiR 界面轴向电场强度,最大值为 5.7 kV/mm, 4.7 kV/mm, 1.7 kV/mm。在距离应力锥根部 30 mm 内,界面径向和轴向电场强度快速下降,超出 30 mm 后电场强度趋于平稳。由图 7 可知击穿点位于应力锥根部 5 mm 处,对应的径向和轴向电场强度分别为 39.6 kV/mm 和 4.7 kV/mm。

### 3.3 直流电缆系统安全裕度计算

直流电缆绝缘和附件绝缘存在界面,界面的绝缘强度与电缆绝缘表面清洁程度、光滑程度、界面压力等因素有关,多种因素的作用下易引发附件局部放电,加速绝缘材料老化,甚至击穿破坏,使电缆附件成为直流电缆系统的薄弱环节。文献[22]指出,界面的绝缘强度约为 3~5 kV/mm,而试验中样品击穿点处的轴向电场为 4.7 kV/mm,超出了界面绝缘强度,因此认为界面轴向电场过高是造成终端击穿的原因。高压直流电缆系统的安全裕度为击穿电场强度与长期运行所需承受的电场强度之比,试验得出击穿点处的轴向电场强度为 4.7 kV/mm,而电缆系统需承受的轴向电场强度为 4.0 kV/mm,因此对应的安全裕度为 1.18。

## 4 结论

文中以±80 kV 高压直流电缆系统为研究对象,

在最高运行温度 90 °C 下,开展了高压直流电缆系统的安全裕度试验,分析了直流电缆系统击穿时电缆绝缘和附件绝缘界面电场分布,得到以下结论:

(1)  $\pm 80$  kV 高压直流电缆系统的安全裕度为 1.18,满足系统 40 a 寿命的使用要求。

(2) 高压直流电缆附件是电缆系统中的薄弱环节,若要进一步提高系统的运行电压,必须解决电缆绝缘与附件绝缘之间的匹配问题,均化电场分布。

(3) 文中完善了高压直流电缆系统安全裕度评估方法,能够为  $\pm 200$  kV,  $\pm 320$  kV 以及  $\pm 400$  kV 及以上电压等级的高压直流系统的安全裕度研究提供指导。

#### 参考文献:

- [1] 夏澍,王乃盾,史媛,等. 电缆配电网的线-变-表拓扑异常辨识方法[J]. 电力系统保护与控制,2019,47(11):44-50.  
XIA Shu, WANG Naidun, SHI Yuan, et al. Line-transformer-meter topology anomaly identification method for cable distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(11):44-50.
- [2] 林桂辉,朱鹏宇,王灿,等. 基于 Carson 理论和 EMTP 的 220 kV 多回电缆线路电气参数及不平衡度分析[J]. 电力系统保护与控制,2019,47(20):142-148.  
LIN Guihui, ZHU Pengyu, WANG Can, et al. Analysis of electrical parameters and unbalance factors of 220 kV multi-circuit transmission cable based on Carson theory and EMTP simulation [J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(20):142-148.
- [3] 李盛涛,王诗航,李建英. 高压直流电缆料的研发进展与路径分析[J]. 高电压技术,2018,44(5):1399-1411.  
LI Shengtao, WANG Shihang, LI Jianying. Research progress and path analysis of insulating materials used in HVDC cable [J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(5):1399-1411.
- [4] GHORBANI H, JEROENSE M, OLSSON C O, et al. HVDC cable systems: high lighting extruded technology [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(1):414-421.
- [5] 崔嘉奇. 海外柔性直流输电工程项目质量管理体系及成熟度评价[J]. 发电技术,2020,41(4):361-368.  
CUI Jiaqi. Quality management system and maturity evaluation of overseas flexible HVDC transmission project[J]. Power Generation Technology, 2020, 41(4):361-368.
- [6] 谢书鸿,傅明利,尹毅,等. 中国交联聚乙烯绝缘高压直流电缆发展的三级跳:从 160 kV 到 200 kV 再到 320 kV[J]. 南方电网技术,2015,9(10):5-12.  
XIE Shuhong, FU Mingli, YIN Yi, et al. Triple jumps of XLPE insulated HVDC cable development in China: from 160 kV to 200 kV and then to 320 kV[J]. Southern Power System Technology, 2015, 9(10):5-12.
- [7] 杜伯学,李忠磊,杨卓然,等. 高压直流交联聚乙烯电缆应用与研究进展[J]. 高电压技术,2017,43(2):344-354.  
DU Boxue, LI Zhonglei, YANG Zhuoran, et al. Application and research progress of HVDC XLPE cables[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(2):344-354.
- [8] 刘黎,俞兴伟,乔敏. 直流断路器及阻尼快速恢复系统在舟山多端柔性直流输电工程中的应用[J]. 浙江电力,2018,37(9):8-13.  
LIU Li, YU Xingwei, QIAO Min. Application of DC circuit breaker and damping fast recovery system in multi terminal flexible DC transmission project in Zhoushan [J]. Zhejiang Electric Power, 2018, 37(9):8-13.
- [9] 张洪亮,张建民,于洪森,等. 中国首根  $\pm 525$  kV XLPE 绝缘直流电缆的设计与试验验证[J]. 南方电网技术,2018,12(1):1-6.  
ZHANG Hongliang, ZHANG Jianmin, YU Hongmiao, et al. Design and test verification of China's first  $\pm 525$  kV XLPE insulated DC cable[J]. Southern Power System Technology, 2018, 12(1):1-6.
- [10] 潘文林,任海洋,梅文杰,等. 525 kV 挤包绝缘柔性直流海缆脱气时间研究[J]. 绝缘材料,2018,51(12):47-52.  
PAN Wenlin, REN Haiyang, MEI Wenjie, et al. Study on degassing time of 525 kV flexible DC submarine cable with extruded insulation[J]. Insulating Materials, 2018, 51(12):47-52.
- [11] 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 high voltage direct current extruded cables[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(11):3473-3489.
- [12] 吴夕科,李栋,邓天宇,等. 直流电缆雷电冲击电压安全裕度研究[J]. 电力工程技术,2020,39(2):135-139.  
WU Xike, LI Dong, DENG Tianyu, et al. Safety margin of DC cable under lightning impulse voltage[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(2):135-139.
- [13] 钱恺羽,苏鹏飞,吴建东,等. 不同温度下高压直流电缆绝缘击穿场强的厚度效应[J]. 中国电机工程学报,2018,38(24):7121-7130,7438.  
QIAN Kaiyu, SU Pengfei, WU Jiandong, et al. The effect of thickness on breakdown strength in high voltage direct current cable insulation at different temperatures[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(24):7121-7130, 7438.
- [14] 刘云鹏,郁利超,刘贺晨,等. 冲击电压下 160 kV 高压直流电缆绝缘材料击穿特性研究[J]. 绝缘材料,2017,50(7):49-54.  
LIU Yunpeng, YU Lichao, LIU Hechen, et al. Study on breakdown characteristic of 160 kV HVDC insulating materials under impulse voltage[J]. Insulating Materials, 2017, 50(7):49-54.
- [15] 兰莉,仇成,杜习周,等. 配电网高温超导电缆的工频参数分析[J]. 电力系统保护与控制,2020,48(18):95-101.  
LAN Li, QIU Cheng, DU Xizhou, et al. Analysis of power frequency parameters of HTS cables in a distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(18):95-101.
- [16] 杨亮,周恺,倪周,等. 考虑负荷特性的 XLPE 电缆绝缘老化程度研究[J]. 智慧电力,2020,48(10):113-119.

- YANG Liang, ZHOU Kai, NI Zhou, et al. Analysis of XLPE cable insulation aging considering load characteristics[J]. Smart Power, 2020, 48(10): 113-119.
- [17] 李珊珊, 严有祥, 陈丽安, 等. 高压 XLPE 电缆缓冲层结构对载流量的影响研究[J]. 供用电, 2018, 36(1): 87-92.
- LI Shanshan, YAN Youxiang, CHEN Li'an, et al. Influence of high-voltage cable buffer layer structure on current carrying capacity[J]. Distribution & Utilization, 2018, 36(1): 87-92.
- [18] 张龙, 黄亭, 李洪杰, 等. 振荡波电压下 XLPE 电缆局部放电定位和智能识别的研究[J]. 供用电, 2020, 37(12): 81-86.
- ZHANG Long, HUANG Ting, LI Hongjie, et al. Study on intelligent recognition and location of partial discharges in XLPE cable under damped AC voltage[J]. Distribution & Utilization, 2020, 37(12): 81-86.
- [19] HAMPTON R N. Feature article-some of the considerations for materials operating under high-voltage, direct-current stresses [J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2008, 24(1): 5-13.
- [20] BOGGS S, DAMON D H, HJERRILD J, et al. Effect of insulation properties on the field grading of solid dielectric DC cable [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2001, 16(4): 456-461.
- [21] 刘霞, 于钦学, 钟力生, 等. 高压 XLPE 电缆绝缘 V-t 特性研究综述[J]. 南方电网技术, 2015, 9(10): 57-63.
- LIU Xia, YU Qinxue, ZHONG Lisheng, et al. Review on research of V-t characteristics of HV XLPE cables[J]. Southern Power System Technology, 2015, 9(10): 57-63.
- [22] 应启良. 高压及超高压 XLPE 电缆附件的技术进展[J]. 电线电缆, 2000(1): 3-12.
- YING Qiliang. Technical progress of the accessories for high and extra high voltage XLPE cables[J]. Electric Wire & Cable, 2000(1): 3-12.

作者简介:



李栋

李栋(1988),男,硕士,工程师,从事电缆绝缘设计工作(E-mail:753015323@qq.com);  
朱智恩(1983),男,博士,高级工程师,从事空间电荷测试工作;  
陈龙啸(1992),男,硕士,工程师,从事电线电缆相关工作。

### Thickness experimental on safety margin of HVDC cable system

LI Dong, CHEN Longxiao, ZHU Zhien, DENG Tianyu, WANG Yu, WANG Rongrong

(NARI Group (State Grid Electric Power Research Institute) Co., Ltd., Nanjing 211106, China)

**Abstract:** The safety margin of high voltage direct current (HVDC) cable system is the precondition to ensure the long-term safe operation of cable lines. To obtain the highest service voltage of the HVDC cable system, the conductivity characteristics of insulation of cables and accessories are tested in this paper, and the dependence of conductivity on temperature and electric field intensity and the expression of conductivity are obtained. A safety margin test method is proposed based on  $\pm 80$  kV HVDC cable system, the breakdown voltage of the HVDC cable system at the maximum operating temperature of  $90\text{ }^{\circ}\text{C}$  is tested by applying voltage step by step. The electric field distribution of cable system breakdown is calculated according to the conductivity of cable insulation and accessory insulation, and the safety margin of the cable system is obtained by comparing the electric field intensity during the breakdown of the cable system with the electric field intensity required for long-term operation. The research shows that the safety margin test method proposed in this paper can obtain the safety margin of HVDC cable system, and the research results provide theoretical and experimental basis for the safe operation of HVDC cable engineering.

**Keywords:** high voltage direct current cable; cable accessories; electrical conductivity; electric field distribution; safety margin

(编辑 方晶)