

± 400 kV 高压直流电缆绝缘厚度设计与验证

李 栋, 王 宇, 朱智恩, 王传博, 王蓉荣, 吴夕科
(南瑞集团有限公司(国网电力科学研究院有限公司), 江苏 南京 211106)

摘 要:本研究以 ± 400 kV 高压直流模型电缆为研究对象,开展了直流耐压试验和冲击耐压试验,获取模型电缆在最高运行温度下的直流击穿电压和冲击击穿电压,求解其在直流击穿电压和冲击击穿电压下的电场分布;基于平均场强法和最大场强法分别设计 ± 400 kV 高压直流电缆绝缘厚度,并计算了直流电压和冲击电压下绝缘层电场分布;通过对比 ± 400 kV 高压直流电缆和模型电缆的电场分布,最终得出了 ± 400 kV 直流电缆绝缘厚度。结果表明:采用平均场强法进行高压直流电缆绝缘厚度设计时,绝缘厚度取决于冲击电压;而采用最大场强法进行绝缘厚度设计时,绝缘厚度取决于直流电压。

关键词: ± 400 kV 直流电缆;模型电缆;绝缘厚度;平均场强法;最大场强法

中图分类号: TM247 文献标志码: A 文章编号: 1009-9239(2021)06-0091-05

DOI: 10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2021.06.015

Thickness Design and Verification for ± 400 kV HVDC Cable Insulation

LI Dong, WANG Yu, ZHU Zhien, WANG Chuanbo, WANG Rongrong, WU Xike
(NARI Group Corporation (State Grid Electric Power Research Institute), Nanjing 211106, China)

Abstract: A ± 400 kV HVDC model cable was conducted DC withstand voltage test and impulse withstand voltage test, and the DC breakdown voltage and impulse breakdown voltage of the model cable under the highest operating temperature were obtained. The electric field distribution under DC breakdown voltage and impulse breakdown voltage were calculated. On the basis of average field intensity method and maximum field intensity method, the insulation thickness of ± 400 kV HVDC cable was designed, and the electric field distribution of insulation layer was calculated under DC voltage and impulse voltage. At last, the insulation thickness of ± 400 kV DC cable was obtained by comparing the electric field distribution of ± 400 kV HVDC cable and model cable. The results show that when the insulation thickness of HVDC cables is designed by the average field strength method, the insulation thickness depends on the impulse voltage. When the insulation thickness is designed by the maximum field strength method, the insulation thickness depends on the DC voltage. By comparing the electric field distribution of ± 400 kV DC cable and the electric field strength of the model cable when breakdown, it is obtained that the insulation thickness of 400 kV DC cable is 26 mm.

Key words: ± 400 kV DC cable; model cable; insulation thickness; average field strength method; maximum field strength method

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,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^[1-2]。相比传统油纸绝缘电缆,交联聚乙烯(XLPE)绝缘电缆具有制造工艺简单、传输容量大、维护方便、成本低等优点,克服了充油电缆因需配备供油设备而在电缆长度上受到较大限制的缺点,得到了广泛的应用与发展^[3-4]。近年来,我国在XLPE绝缘高压直流电缆制造和应用方面取得突破,先后开发了 ± 160 、 ± 200 、 ± 320 kV 的高压直流电

收稿日期:2020-07-08 修回日期:2020-08-28

基金项目:国家电网公司重大科技专项(90℃柔性直流电缆绝缘料及海底电缆系统关键技术研究);中国三峡新能源有限公司科技项目(国产化 ± 400 kV 直流海底电缆系统可靠性验证和关键参数计算研究)。

作者简介:李栋(1988-),男(汉族),江苏徐州人,高级工程师,主要从事高压直流电缆材料研发、结构设计和试验的研究。

缆并实现工程应用^[5]。随着电力输送需求的不断增长,目前三峡新能源正在建设江苏如东海上风电项目,带动国内多家电缆生产商积极开发 ± 400 kV及以上电压等级的高压直流电缆^[6]。

高压直流电缆绝缘厚度设计是电缆开发的核心技术之一,通常由电缆制造商根据电缆绝缘材料、半导体屏蔽材料以及不同的制造工艺自行设计,然后根据导体的运行温度、绝缘料的电阻率特性、空间电荷分布和电缆实际运行条件等因素,校验绝缘最大电场强度是否超过绝缘料所允许的长期工作电场强度,求出最终的绝缘厚度。然而这种设计方式主要依赖于研发人员的经验,缺少必要的理论和试验依据。制造商为了追求电缆的安全可靠性,设计出的电缆绝缘厚度往往偏大,导致材料消耗、电缆外径和单位长度质量增加,不利于电缆的运输和敷设安装^[7]。

随着高压直流电缆绝缘设计方法研究的不断深入,有学者以绝缘试片来评估直流电缆系统的绝缘水平,从而指导绝缘厚度设计。钱恺羽等^[8]测试了不同温度和厚度下高压直流电缆绝缘的电气强度,揭示了温度对于交联聚乙烯击穿场强厚度效应的影响机理;刘云鹏等^[9]研究了冲击电压下绝缘试片的电气强度,阐述了XLPE的击穿原理。但是用绝缘试片来评估直流电缆系统的安全水平,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,绝缘厚度越大薄弱点越多,同等条件下绝缘击穿的概率越大。

本研究使用 ± 400 kV 高压直流模型电缆评估直流电缆料的绝缘性能,开展直流耐压试验和冲击耐压试验,获取最低直流击穿电压和冲击击穿电压这两个关键的设计参数。提出基于平均场强法和最大场强法设计高压直流电缆绝缘厚度的方法,获得 ± 400 kV 直流电缆的绝缘厚度。通过对比 ± 400 kV 直流电缆电场分布与模型电缆击穿时的电场强度,验证设计方法的合理性,最终得出 ± 400 kV 直流电缆绝缘的厚度。

1 模型电缆耐压试验

1.1 试验回路布置

模型电缆由紧压导体、导体屏蔽、绝缘层、绝缘屏蔽、半导体阻水带、铜丝屏蔽、铜带包扎层、半导

电包带、铝塑复合带和外护套组成。导体截面积为 150 mm^2 ,绝缘厚度为 55 mm ,额定电压 U_0 为 80 kV 。模型电缆附件采用整体预制式终端,由终端绝缘、应力锥、金属件等组成。

试验回路布置如图1所示,电缆终端安装于模型电缆末端,由铜排连接组成试验回路,电缆长度为 20 m 。采用两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。

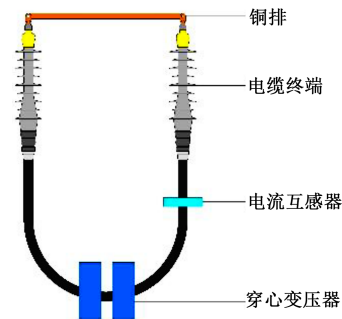


图1 试验回路布置图

Fig.1 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,测得导体电流和导体温度随时间的变化曲线如图2所示。从图2可以看出,在施加电流 120 min 后,电缆导体温度稳定在 90°C ,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。

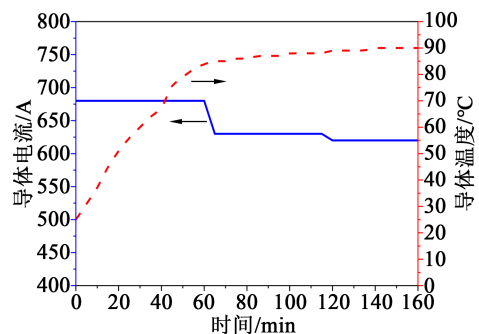


图2 导体电流和导体温度随时间的变化曲线

Fig.2 Change curves of conductor current and conductor temperature with time

1.2 直流耐压试验和冲击耐压试验

直流耐压试验:采用直流高压发生器向模型电缆试验回路施加正极性直流电压,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,负极性直流耐压试验采用相同的步骤。

冲击耐压试验:同样采取逐级加压的方式,从 U_0 开始对试验回路施加雷电冲击电压 3 次,如果电缆样品未击穿,则电压升高 10 kV,依此类推直到击穿为止。

直流耐压试验和冲击耐压试验均在高压屏蔽大厅中进行。采用最小值法评估模型电缆的绝缘水平,为了确保试验结果的准确性,直流耐压试验和冲击耐压试验各取 3 段电缆样品开展平行试验,试验结果取击穿电压的最低值。

2 模型电缆绝缘电场分布计算

2.1 XLPE 的电导率

XLPE 的电导率是直流电缆电场解析的必要参数,根据直流电缆实际运行温度和电场强度,本研究分别测试了温度为 30、50、70、90℃,电场强度为 5、10、15、20 kV/mm 时 XLPE 的电导率,测试结果表明,XLPE 的电导率随温度和电场的升高而增大。为了准确描述材料的电导率特性,采用电导率公式对实验数据进行拟合,如式(1)所示^[10]。

$$\sigma = A \exp(\alpha T) E^\gamma \quad (1)$$

式(1)中: σ 为电导率; A 为常数; α 为电导率温度系数; T 为温度; E 为外加电场强度; γ 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,即可得到直流电缆绝缘材料电导率的表达式,如式(2)所示。

$$\sigma_{XLPE} = 4.52 \times 10^{-16} \exp(0.0365T) E^{1.645} \quad (2)$$

2.2 模型电缆绝缘电场分布

直流电缆在稳态下绝缘层的电场强度如式(3)所示^[11]。

$$E_{dc}(r) = U_0 \cdot \frac{\delta \cdot r^{\delta-1}}{b^\delta - a^\delta} \quad (3)$$

其中

$$\delta = \frac{\gamma}{\gamma + 1} + \frac{\alpha}{\gamma + 1} \cdot \frac{\Delta T}{\ln(b/a)} \quad (4)$$

式(3)~(4)中: U_0 为电缆系统额定电压; $E_{dc}(r)$ 为绝缘半径 r 处的电场强度; ΔT 为绝缘层温差; a 为绝缘内径; b 为绝缘外径。

直流电缆在冲击电压下的电场强度如式(5)所示。

$$E(r) = \frac{U_{imp}}{r \cdot \ln(b/a)} \quad (5)$$

式(5)中: $E_{imp}(r)$ 为 r 处的冲击电场强度; U_{imp} 冲击电压峰值。

根据式(3)~(5),求解出模型电缆直流电压和冲击电压击穿时的电场分布如图3所示。从图3可以看出,直流电压击穿时,绝缘层电场分布为内低外高,最大场强出现在绝缘屏蔽处;冲击电压击穿时,绝缘层电场分布为内高外低,最大场强出现在导体屏蔽处。模型电缆击穿时平均场强和最大场强计算结果如表1所示。

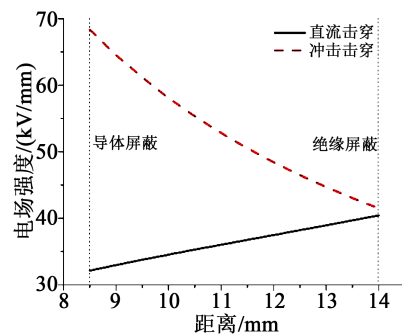


图3 模型电缆直流电压和冲击电压击穿时的电场分布

Fig.3 Electric field distribution of model cable when breakdown under DC voltage and impulse voltage

表1 模型电缆击穿时平均场强和最大场强

Tab.1 Average and maximum field strength of the model cable when breakdown

电压形式	击穿电压 /kV	平均击穿场强 /(kV/mm)	绝缘内侧场强 /(kV/mm)	绝缘外侧场强 /(kV/mm)
直流电压	200	36.4	32.1	40.3
冲击电压	290	52.7	68.4	41.5

从表1可以看出,直流电压击穿时的平均场强和最大场强分别为 36.4 kV/mm 和 40.3 kV/mm;冲击电压击穿时的平均场强和最大场强分别为 52.7 kV/mm 和 68.4 kV/mm。

3 ±400 kV 高压直流电缆绝缘厚度设计

3.1 直流电压下绝缘厚度设计

直流电缆绝缘厚度根据直流电压和冲击电压分别设计,并取二者之中的最大值。

直流电压下的设计电场强度如式(6)所示^[12]。

$$E_{dc} = \frac{E_{dc,bd}}{K_1 \cdot K_2 \cdot K_3} \quad (6)$$

式(6)中: E_{dc} 为直流设计场强; $E_{dc,bd}$ 为模型电缆击穿

场强; K_1 为老化系数; K_2 为温度系数; K_3 为安全系数。其中老化系数 K_1 按电缆设计寿命与试验施加电压时间之比,并引入寿命指数 n 求得,如式(7)所示^[13]

$$K_1 = \sqrt[n]{t_1/t_2} \quad (7)$$

式(7)中: t_1 为电缆的设计寿命; t_2 为直流击穿试验阶梯升压时间间隔。

直流电压下绝缘的设计厚度 d_{dc} 如式(8)所示。

$$d_{dc} = U_0/E_{dc} \quad (8)$$

3.2 冲击电压下绝缘厚度设计

直流电缆的冲击耐受电压可描述为式(9)^[14]。

$$E_{imp} = \frac{E_{imp,bd}}{k_1 \cdot k_2 \cdot k_3} \quad (9)$$

式(9)中: E_{imp} 为冲击设计场强; $E_{imp,bd}$ 为冲击电压击穿场强; k_1 为老化系数; k_2 为温度系数; k_3 为安全系数。

冲击电压下绝缘设计厚度 d_{imp} 如式(10)所示。

$$d_{imp} = U_p/E_{imp} \quad (10)$$

式(10)中: U_p 为冲击过电压峰值。

选取 d_{dc} 和 d_{imp} 二者之中的最大值作为绝缘设计厚度,即式(11)。

$$d = \text{Max}\{d_{dc}, d_{imp}\} \quad (11)$$

3.3 直流电缆绝缘厚度计算

直流电缆设计电压为400 kV,模型电缆绝缘厚度 $d_0=5.5$ mm,最低直流击穿电压 $U_{dc,bd}=200$ kV;直流电缆的设计寿命 $t_1=40$ 年,模型电缆击穿试验阶梯升压时间间隔 $t_2=3$ h,寿命指数与绝缘材料、制造工艺和试验方法有关,研究认为直流电压下电缆 n 为13~20^[13],本研究取中值即 $n=16.5$ 进行计算,求出老化系数 $K_1=2.03$;模型电缆直流击穿试验是在最高运行温度下测试的,则 $K_2=1$;取安全系数 $K_3=1.1$ 。工程要求的操作过电压峰值为1 235 kV,模型电缆的最低冲击击穿电压 $U_{imp,bd}=290$ kV;取冲击电压下的老化系数 $k_1=1$;模型电缆的冲击击穿试验是在最高运行温度下测试的,温度系数 $k_2=1$;取安全系数 $k_3=1.1$ 。

3.3.1 平均场强法

假设模型电缆的击穿发生在绝缘层中任意位置,当外加场强超过平均场强时电缆即发生击穿,此时 $E_{dc,bd}$ 和 $E_{imp,bd}$ 取平均场强进行计算,绝缘厚度计算结果如表2所示。从表2可以看出,直流电压下的设计场强为16.1 kV/mm,所需绝缘厚度为24.8 mm;冲击电压下的设计场强为47.9 kV/mm,所需绝缘厚度为25.8 mm;计算结果采用进一法取整,则采

用平均场强法设计的±400 kV 直流电缆的绝缘厚度为26 mm。

表2 基于平均场强法绝缘厚度的计算结果

Tab.2 Calculation results of insulation thickness by average field strength method

电压形式	设计电压 /kV	平均击穿场强 /(kV/mm)	设计场强 /(kV/mm)	所需绝缘厚度/mm
直流电压	400	36.4	16.1	24.8
冲击电压	1 235	52.7	47.9	25.8

3.3.2 最大场强法

假设模型电缆的击穿发生在最大场强处,即直流电压击穿发生在绝缘外侧,冲击电压的击穿发生在绝缘内侧。 $E_{dc,bd}$ 和 $E_{imp,bd}$ 取最大场强进行计算,则直流电缆绝缘的厚度计算结果如表3所示。从表3可以看出,直流电压下的设计场强为17.8 kV/mm,所需绝缘厚度为22.5 mm;冲击电压下的设计场强为62.2 kV/mm,所需绝缘厚度为19.9 mm;则采用最大场强法设计的±400 kV 直流电缆的绝缘厚度为23 mm。

表3 基于最大场强法绝缘厚度计算结果

Tab.3 Calculation results of insulation thickness by maximum field strength method

电压形式	设计电压 /kV	最大击穿场强 /(kV/mm)	设计场强 /(kV/mm)	所需绝缘厚度/mm
直流电压	400	40.3	17.8	22.5
冲击电压	1235	68.4	62.2	19.9

4 ±400 kV 高压直流电缆绝缘厚度的验证

±400 kV 直流电缆导体截面积为1 600 mm²,绝缘内径为52 mm,采用平均场强法设计的绝缘厚度为26 mm,绝缘外径为104 mm;采用最大场强法设计的绝缘厚度为23 mm,绝缘外径为98 mm。

直流电缆运行温度、绝缘温差、材料参数等因素对直流电缆的电场分布有较大影响,为验证绝缘厚度设计的合理性,要求±400 kV 电缆在最严苛工况下的电场强度小于模型电缆击穿时的电场强度。因此本研究计算了电缆在最高运行温度下,绝缘温差为30℃时的电场分布,结果如图4所示。从图4可以看出,采用平均场强法和最大场强法设计的直流电缆绝缘电场分布与模型电缆击穿时的电场分布趋势一致,通过比较绝缘层内外两侧的场强值来验证绝缘厚度设计是否合理。

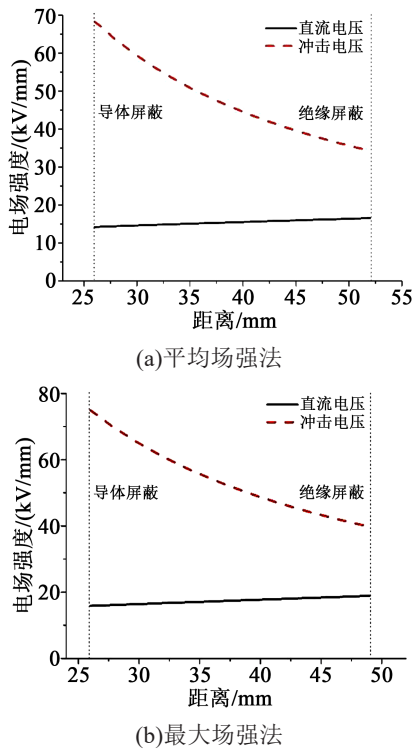


图4 ±400 kV 直流电缆绝缘电场分布

Fig.4 Electric field distribution of ±400 kV DC cable insulation

表4为±400 kV 直流电缆绝缘电场分布的计算结果。

表4 ±400 kV 直流电缆绝缘电场分布计算结果

Tab.4 Calculation results of electric field distribution of ±400 kV DC cable insulation

电压形式	平均场强法		最大场强法	
	绝缘内侧场强/(kV/mm)	绝缘外侧场强/(kV/mm)	绝缘内侧场强/(kV/mm)	绝缘外侧场强/(kV/mm)
直流电压	14.2	16.5	15.9	18.9
冲击电压	68.3	34.3	74.9	39.8

比较表1和表4可知,采用平均场强法设计的绝缘厚度,直流电压和冲击电压下的绝缘内外侧场强均小于模型电缆击穿时绝缘内外侧场强;采用最大场强法设计的绝缘厚度,直流电压下的绝缘内外侧场强小于模型电缆击穿时绝缘内外侧场强,但是冲击电压下的绝缘内侧场强超出模型电缆的击穿场强,电缆运行时有击穿的风险。因此采用平均场

强法在冲击电压下设计直流电缆绝缘厚度更加合理,即±400 kV 直流电缆的绝缘厚度应为26 mm。

5 结 论

(1)平均场强法设计的±400 kV 直流电缆绝缘厚度取决于冲击电压,最大场强法设计的绝缘厚度取决于直流电压。

(2)通过对比±400 kV 直流电缆电场分布与模型电缆击穿时的电场强度,得出了±400 kV 直流电缆的绝缘厚度为26 mm。

参考文献:

- [1] 何金良,党斌,周焱,等. 挤压型高压直流电缆研究进展及关键技术述评[J]. 高电压技术,2015,41(5):1417-1429.
- [2] GHORBANI H, JEROENSE M, OLSSON C O, et al. HVDC cable systems-highlighting extruded technology[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2014,29(1):414-421.
- [3] 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):7-23.
- [4] 周远翔,赵健康,刘睿,等. 高压/超高压电力电缆关键技术分析及展望[J]. 高电压技术,2014,40(9):2593-2612.
- [5] 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.
- [6] 潘文林,任海洋,梅文杰,等. 525kV 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.
- [7] 李栋,朱智恩,杨黎明,等. ±535kV 直流电缆绝缘厚度理论设计与验证[J]. 电力工程技术,2020,39(1):151-156.
- [8] 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.
- [9] 刘云鹏,郁利超,刘贺晨,等. 冲击电压下160kV 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.
- [10] HAMPTON R N. Some of the considerations for materials operating under high-voltage, direct current stresses[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine,2008,24(1):5-13.
- [11] 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.
- [12] MAEKAWA Y, WATANABE K, MARUYAMA S, et al. Research and development of DC ±500kV extruded cables[C]//Set of papers presented to the Cigre 2002 session. Paris, France: CIGRE,2002.
- [13] 刘霞,于钦学,钟力生,等. 高压XLPE 电缆绝缘 I-t 特性研究综述[J]. 南方电网技术,2015,9(10):57-63.
- [14] TERASHIMA K, MURATA Y, MUTO H, et al. Study of design method of XLPE cable for DC voltage[J]. Transactions Institute of Electrical Engineers of Japan B,1999,119(2):212-222.