

±535 kV 直流电缆绝缘厚度理论设计与验证

李栋, 朱智恩, 杨黎明, 陈龙啸, 曾浩, 高凯

(南瑞集团(国网电力科学研究院)有限公司, 江苏 南京 211106)

摘要:为确定张北柔性直流工程直流电缆的绝缘厚度,文中提出了一种直流电缆绝缘厚度设计方法,分析了寿命指数、击穿场强换算系数和 Bahder 系数 3 个关键因素对绝缘厚度的影响;通过建立方程组计算了±535 kV 直流电缆绝缘厚度;采用有限元仿真方法计算了不同电导率温度系数、电导率电场系数和绝缘温差下的电场分布和电场畸变率。研究表明,不同电导率温度系数、电导率电场系数和绝缘温差下,±535 kV 直流电缆绝缘电场畸变率均符合国家标准的要求,设计方法的合理性得到验证。研究结果为直流电缆绝缘厚度设计和验证提供了理论指导,为张北工程的建设提供技术支持。

关键词:±535 kV 直流电缆;绝缘厚度;理论设计;电场分布;电场畸变率

中图分类号:TM726

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2020)01-0151-06

0 引言

柔性直流输电技术具有长距离、大容量、低损耗的优势^[1-4],可解决新能源规模化利用与区域电网互联中电能传输难题,广泛应用于岛屿供电、独立电网互联和海上风电场进网^[5]。

高压直流电缆是柔性直流输电技术的关键装备^[6-11],近年来伴随直流电缆绝缘材料和屏蔽材料取得技术突破^[12-13],日本电缆公司研制了±500 kV 直流电缆,通过了长期验证试验;德国 NKT 公司与北欧化工合作开发了±525 kV、±640 kV 直流电缆,通过了型式试验和预鉴定试验^[14];意大利 Prysmian 公司开发出基于非交联绝缘技术的±600 kV 直流电缆。国内,2017 年中天科技成功研制了中国第一根±525 kV 直流电缆^[15],标志着我国高压直流电缆的制造技术进入世界先进行列。然而,不同国家设计的直流电缆绝缘厚度有较大差异,日本住友、古河、藤仓等电缆公司研制±500 kV 直流电缆绝缘厚度为 23 mm^[16];NKT 公司研制的±525 kV 直流电缆平均工作电场为 20 kV/mm,可推算出绝缘厚度为 27 mm^[17],中国科研机构和电缆公司设计±525 kV 直流电缆绝缘厚度在 27~30 mm 之间。

高压直流电缆绝缘厚度通常是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、绝缘材料的电阻率特性、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材料所允许的长期工作电场强度,并迭代出最终的

绝缘厚度。但是制造商为了保证电缆的安全可靠性,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重量增加,不利于电缆的运输和敷设安装。

目前,国内外已经规划多条电压等级±500 kV 及以上的直流电缆输电工程,其中包括国网公司在建的张北柔性直流工程,该工程计划挂网试运行额定电压为±535 kV 高压直流电缆,以验证其长期运行安全性,但工程没有对电缆的绝缘厚度提出明确要求。文中提出了±535 kV 高压直流电缆绝缘厚度设计方法,分析了绝缘厚度的关键影响因素,计算了绝缘厚度,对直流电缆的电场分布进行热电耦合仿真,计算了电缆绝缘电场分布和电场畸变率,验证了设计方法的合理性。

1 直流电缆绝缘厚度设计方法

直流电缆的运行需要耐受直流电压和冲击电压,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。

1.1 直流电压下绝缘厚度设计

直流耐受电压可描述为^[18]:

$$V_{dc} = V_0 k_1 k_2 k_3 k_4 \quad (1)$$

式中: V_{dc} 为直流设计电压; V_0 为系统的额定电压; k_1 为老化系数; k_2 为温度系数; k_3 为安全系数; k_4 为击穿场强换算系数。

老化系数 k_1 的计算,可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^[19]:

$$k_1 = \sqrt[n]{t_1/t_2} \quad (2)$$

式中: 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。

现有的直流电缆绝缘厚度设计方法未考虑绝缘强度与样品厚度的关系,文中引入击穿场强换算系数 k_4 ,对于不同厚度的试样, k_4 与绝缘厚度存在如下关系^[20]:

$$k_4 = (d/d_1)^{0.18} \quad (3)$$

式中: d 为电缆的厚度; d_1 为试样的厚度。

直流电压下绝缘设计厚度^[21]为:

$$d_{dc} = V_{dc}/E_{dc,bd} \quad (4)$$

式中: d_{dc} 为直流电压下绝缘设计厚度; $E_{dc,bd}$ 为冲击电压击穿电场强度。

1.2 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^[18]:

$$V_{imp} = (V_p M + KV_0) K_1 K_2 K_3 \quad (5)$$

式中: V_{imp} 为冲击设计电压; V_p 为避雷器的残压; M 为避雷器的安全水平; K 为Bahder系数; K_1 为老化系数; K_2 为温度系数; K_3 为安全裕度。

冲击电压下绝缘设计厚度^[21]为:

$$d_{imp} = V_{imp}/E_{imp,bd} \quad (6)$$

式中: d_{imp} 为冲击电压下绝缘设计厚度; $E_{imp,bd}$ 为冲击电压击穿电场强度。选取 d_{dc} 和 d_{imp} 二者之中的最大值作为绝缘设计厚度,即:

$$d = \text{Max}\{d_{dc}, d_{imp}\} \quad (7)$$

2 直流电缆绝缘厚度分析与计算

2.1 影响直流电缆绝缘厚度的关键因素

由上节可知与直流电缆绝缘厚度相关的变量和参数有21个,其中寿命指数、击穿场强换算系数和Bahder系数这3个因素变化范围广,对绝缘厚度有较大影响。

2.1.1 寿命指数 n 对绝缘厚度的影响

寿命指数 n 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寿命指数在13~20之间^[19]。图1为寿命指数 n 在10~25范围内,电缆的绝缘厚度,当 n 小于16时,电缆的绝缘厚度取决于直流耐受电压;当寿命指数 n 大于16时,电缆的绝缘厚度取决于冲击耐受电压。

2.1.2 击穿场强换算系数 k_4 对绝缘厚度的影响

弱点击穿理论认为,在均匀或不均匀电场中,介质的击穿实际上是由材料的弱点击穿造成的,例如电缆绝缘中的微孔、杂质等,这些点上的电场强度较强,最早达到发生击穿的条件。绝缘厚度越大,单位长度的弱点个数越多,同等条件下绝缘击穿概率增大,最低的击穿电压降低。击穿场强换算系数 k_4 反映了试样绝缘厚度与击穿场强的关系,其值越大表明击穿场强对绝缘厚度的依赖越明显。

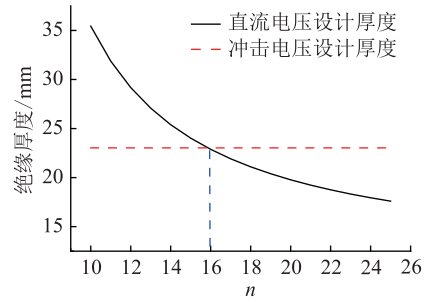


图1 n 与绝缘厚度的关系

Fig.1 The relationship between n and thickness of the insulation

图2是击穿场强换算系数 k_4 与绝缘设计厚度的关系,由图可知,当 k_4 小于1.15时,电缆的绝缘厚度取决于冲击耐受电压;当 k_4 大于1.15时,绝缘厚度取决于直流耐受电压,且随着 k_4 的提高,所需的绝缘厚度增大。

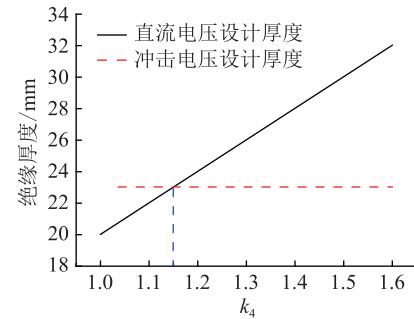


图2 k_4 与绝缘厚度的关系

Fig.2 The relationship between k_4 and thickness of the insulation

2.1.3 Bahder系数 K 对绝缘厚度的影响

Bahder系数为直流预压引起绝缘反极性雷电冲击击穿电压下降值与直流电压值之比。直流电压预压后,空间电荷积聚引起电场畸变,导致绝缘反极性的雷电冲击击穿电压下降。Bahder系数 K 越大,表明绝缘击穿场强受空间电荷影响越明显。图3是 K 与绝缘厚度的关系,当 K 小于0.62时,绝缘厚度取决于直流耐受电压; K 大于0.62时,绝缘厚度取决于冲击耐受电压。

2.2 直流电缆绝缘厚度计算

由式(1)、式(2)、式(4)一式(7)建立方程组,6个方程中包含6个未知变量(V_{dc} , V_{imp} , k_1 , d_{dc} , d_{imp} , d)和16个已知参数(V_0 , V_p , k_2 , k_3 , k_4 , t_1 , t_2 , n , d_1 , K , K_1 , K_2 , K_3 , M , $E_{dc,bd}$, $E_{imp,bd}$),方程组有唯一解。

根据上节分析,取 $n = 16$, $k_4 = 1.16$, $K = 0.62$,此时能充分利用电缆的绝缘强度。已知直流电缆额定电压 $V_0 = 535$ kV,张北工程雷电冲击过电压峰值 $V_p = 1020$ kV; $k_2 = 1$, $k_3 = 1.1$ ^[18]; $t_1 = 40$ a, $t_2 = 3$ h; 冲击电压下 $K_1 = 1$, $K_2 = 1$, $K_3 = 1.1$; 避雷器的安全水

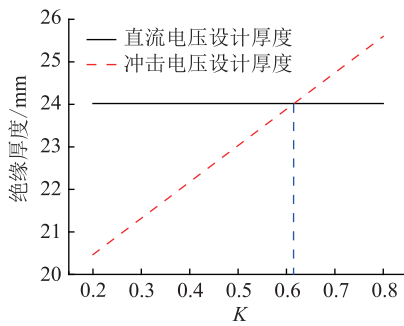


图3 K与绝缘厚度的关系

Fig.3 The relationship between K and thickness of the insulation

平 $M=1.15$;文献[18]中,模型电缆试样在 363.15 K 时最低直流击穿场强为 80 kV/mm,最低冲击击穿场强为 86 kV/mm,文中取最低击穿电场的 80% 作为设计依据,则 $E_{dc,bd} = 64.0$ kV/mm, $E_{imp,bd} = 68.8$ kV/mm。

求得 $V_{dc} = 1\ 416$ kV, $V_{imp} = 1\ 655$ kV, $k_1 = 2.07$, $d_{dc} = 22.12$ mm, $d_{imp} = 24.06$ mm, $d = 24.06$ mm。电缆绝缘厚度采用进一法取整,即 ± 535 kV 高压直流电缆绝缘设计厚度 $d = 25$ mm。

3 直流电缆绝缘厚度的验证

为验证直流电缆的绝缘设计方法和绝缘厚度是否合理,要求电缆在不同工况下的电场畸变率不超过规定值。文中采用有限元仿真方法对 ± 535 kV 电缆的电场分布和电场畸变率进行计算。

3.1 电缆结构和材料属性

± 535 kV 直流电缆导体截面 3 000 mm²,绝缘内径 70 mm,绝缘厚度 25 mm。商用直流电缆绝缘材料电导率符合如下公式^[22-23]:

$$\sigma(T, E) = \sigma_0 e^{\alpha(T-273.15)} E^\beta \quad (8)$$

式中: σ_0 为参考温度和电场下的电导率,S/m; α 为电导率温度系数,1/K; β 为电导率电场系数; T 为温度,K。文中实测了材料的电导率,采用最小二乘法拟合试验数据,求出电导率 $\sigma_0 = 3.51 \times 10^{-17}$ S/m,温度系数 $\alpha = 0.05$ K⁻¹,电场系数 $\beta = 2.3$ 。

3.2 电场分布仿真结果

假设电缆空载时,绝缘层内外温度均为 313.15 K,满负载时,导体绝缘内侧温度为 363.15 K,绝缘外侧温度为 343.15 K。绝缘径向电场分布曲线如图 4 所示,空载时电场最大值出现在绝缘内侧,为 23.3 kV/mm;满负载时,电场最大值出现在绝缘外侧,为 22.8 kV/mm;绝缘平均电场为 21.4 kV/mm。

3.2.1 不同电导率温度系数下的电场畸变率

直流电缆额定电压 $U_0 = 535$ kV,设定 $\sigma_0 = 3.51 \times$

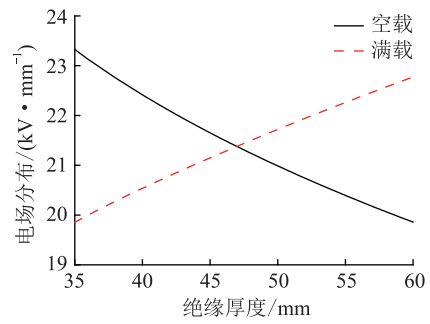


图4 绝缘电场分布

Fig.4 Electric field distribution in the insulation

10^{-17} S/m,电场系数 $\beta = 2.3$,绝缘温差 $\Delta T = 20$ K。仿真计算不同温度系数对应的电场分布,得出了电场分布随温度系数的变化规律,如图 5 所示。

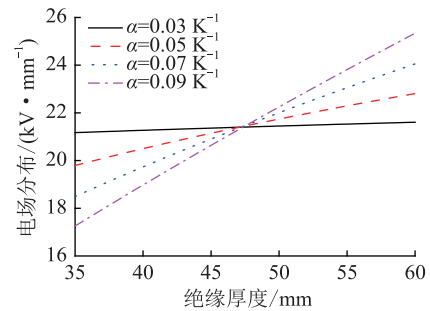


图5 温度系数与电场分布的关系

Fig.5 The relationship between temperature coefficient and electric field distribution

从图 5 中可以看出,温度系数对电场分布的影响十分显著。随着温度系数的增加,绝缘内屏场强逐渐降低,绝缘外屏场强逐渐升高。

为了更清晰反映各种因素对电场分布的影响,在此定义场强畸变率 η ,其定义式为:

$$\eta = \frac{E_{\max} - E_{\text{mean}}}{E_{\text{mean}}} \times 100\% \quad (9)$$

式中: E_{\max} 为绝缘层中最大场强值; E_{mean} 为绝缘层平均场强值, $E_{\text{mean}} = V_0/d = 21.4$ kV/mm。

不同温度系数时,电场强度和电场畸变率的统计结果如表 1 所示,随温度系数的增加,电场畸变率逐渐增大,绝缘表面电场过高,会给电缆附件的配套带来困难,不利于电缆系统长期运行的安全可靠。

3.2.2 不同电导率电场系数下的电场畸变率

设定 $\sigma_0 = 3.51 \times 10^{-17}$ S/m, $\alpha = 0.05$ K⁻¹,绝缘温差 $\Delta T = 20$ K。仿真计算了不同电场系数时的电场分布,如图 6 所示。电场分布对电场系数有很大的依赖关系,随着电场系数的增大,绝缘内屏电场增大,绝缘外屏电场减小。图 6 对应的电场畸变率见表 2,电场系数 β 实际上起到了电导率与电场强度

表 1 不同温度系数下的电场畸变率

Table 1 The electric field distortion rate at different temperature coefficients

温度系数 α/K^{-1}	绝缘内屏电场 $/(kV \cdot mm^{-1})$	绝缘外屏电场 $/(kV \cdot mm^{-1})$	电场畸变率 $\eta/\%$
0.03	21.2	21.6	0.1
0.05	19.8	22.8	6.5
0.07	18.5	24.1	12.6
0.09	17.3	25.3	18.2

之间的自适应调节作用, β 越大调节作用越强, 电场分布越均匀。

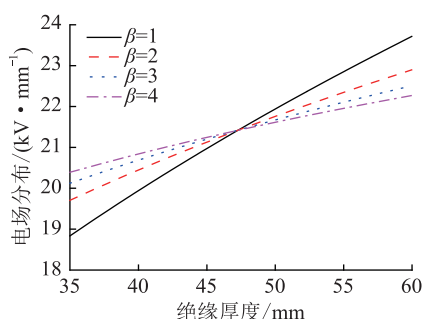


图 6 电场系数与电场分布的关系

Fig.6 The relationship between electric field coefficient and electric field distribution

表 2 不同电场系数下的电场畸变率

Table 2 The electric field distortion rate at different electric field coefficients

电场系数 β	绝缘内屏电场 $/(kV \cdot mm^{-1})$	绝缘外屏电场 $/(kV \cdot mm^{-1})$	电场畸变率 $\eta/\%$
1	18.8	23.7	10.7
2	19.7	22.9	7.0
3	20.1	22.5	5.1
4	20.4	22.3	4.2

3.2.3 不同绝缘温差下的电场畸变率

设定 $\sigma_0 = 3.51 \times 10^{-17} S/m$, $\alpha = 0.05 K^{-1}$, 电场系数 $\beta = 2.3$, 导体温度为 363.15 K, 计算了绝缘温差在 0~30 K 时的电场分布, 如图 7 所示。绝缘温差较低时, 随着温差的增大绝缘内屏电场降低, 绝缘外屏电场升高, 电场分布趋于均匀; 绝缘温差达到 10 K 附近时, 电场出现反转。表 3 为不同绝缘温差下的电场畸变率, 可知随着温差增加, 电场畸变率先减小后增大, 当绝缘温差达到 30 K 时, 电场畸变率达到了 14%。

通过电场分布和电场畸变率的计算结果, 可知电导率温度系数在 0.03~0.09 K^{-1} 、电场系数 1~4、绝缘温差小于 30 K 时, 对应的电场畸变率小于 20%, 符合 GB/T 31489.1 中 6.4.10 节对电场畸变率的要求^[24], 计算结果验证了设计方法的合理性。

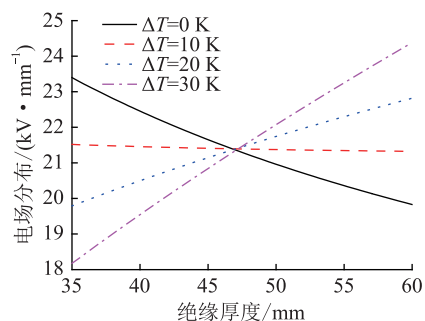


图 7 绝缘温差与电场分布的关系

Fig.7 The relationship between insulation temperature difference and electric field distribution

表 3 不同绝缘温差下的电场畸变率

Table 3 The electric field distortion rate at different insulation temperature differences

绝缘温差 $/K$	绝缘内屏电场 $/(kV \cdot mm^{-1})$	绝缘外屏电场 $/(kV \cdot mm^{-1})$	电场畸变率 $\eta/\%$
0	23.4	19.8	9.3
10	21.5	21.3	0.5
20	19.8	22.8	6.5
30	18.2	24.4	14.0

4 结论

文中提出了直流电缆绝缘厚度设计方法; 计算了±535 kV 直流电缆的绝缘厚度; 仿真分析了不同条件下的绝缘电场分布和电场畸变率, 验证设计方法的合理性。得出结论如下:

(1) 基于该方法设计的±535 kV 直流电缆绝缘厚度为 25 mm, 平均电场强度为 21.4 kV/mm;

(2) 不同电导率温度系数、电场系数和绝缘温差下对应的电场畸变率小于 20%, 符合国家标准要求;

(3) 研究结果完善了直流电缆设计理论, 能够为电缆厂商直流电缆绝缘设计和验证提供理论指导。

参考文献:

- [1] 徐政, 张哲任, 刘高任. 柔性直流输电电网的电压控制原理研究[J]. 电力工程技术, 2017, 36(1): 54-59.
XU Zheng, ZHANG Zheren, LIU Gaoren. Research on voltage control principle of flexible DC transmission power grid[J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(1): 54-59.
- [2] 汪涛, 李汉杰, 张茂强, 等. 柔性直流输电换流器子模块程序远程升级研究与应用[J]. 电力工程技术, 2018, 37(6): 103-108.
WANG Tao, LI Hanjie, ZHANG Maoqiang, et al. Research and application of program remote upgrade for sub-modules in VSC-HVDC converter [J]. Electric Power Engineering Technology, 2018, 37(6): 103-108.

- [3] 萧展辉,蔡微,黄剑文,等. MMC型多端柔性直流配电系统协同控制与故障电流抑制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2019,47(11):103-110.
XIAO Zhanhui, CAI Wei, HUANG Jianwen, et al. Coordinate control scheme for modular multilevel converter based multi-terminal DC distribution power systems and circuit suppression during faults[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(11):103-110.
- [4] 李大虎,张志杰,张伟晨,等. 背靠背柔性直流入网后的影响评估[J]. 电力系统保护与控制, 2019,47(3):71-80.
LI Dahu, ZHANG Zhijie, ZHANG Weichen, et al. Influence evaluation of provincial power grid integrated with back-to-back VSC-HVDC[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(3):71-80.
- [5] 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.
ZHONG Lisheng, REN Haiyang, CAO Liang, et al. Development of high voltage direct current extruded cables[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(11):7-23.
- [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] CHEN George, HAO Miao, XU Zhiqiang, et al. Review of high voltage direct current cables[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2015, 1(2):9-21.
- [8] 刘震宇,刘振英,范贺明. 基于EMD-ICA的高压电缆局部放电信号去噪研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018,46(24):83-87.
LIU Zhenyu, LIU Zhenying, FAN Heming. Study on signal denoising of high voltage cable partial discharge based on EMD-ICA[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(24):83-87.
- [9] 杨帆,朱宁西,刘晓东,等. 基于阻抗评估电缆缓冲层间隙状况的实验与分析[J]. 广东电力, 2018,31(12):93-98.
YANG Fan, ZHU Ningxi, LIU Xiaodong, et al. Experiment and analysis of evaluating buffer layer gap condition of cable based on impedance[J]. Guangdong Electric Power, 2018, 31(12):93-98.
- [10] 刘震宇,刘振英,范贺明. 基于EMD-ICA的高压电缆局部放电信号去噪研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018,46(24):83-87.
LIU Zhenyu, LIU Zhenying, FAN Heming. Study on signal denoising of high voltage cable partial discharge based on EMD-ICA[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(24):83-87.
- [11] 郑建康,赵艾萱,林涛,等. 高频冲击电压对XLPE电缆介电响应特性的影响[J]. 智慧电力, 2018,46(5):46-52.
ZHENG Jiankang, ZHAO Aixuan, LIN Tao, et al. Effect of high frequency impulse voltage upon dielectric response of XLPE cables[J]. Smart Power, 2018, 46(5):46-52.
- [12] 李玉栋,张建华,徐海霞,等. 热老化条件下LDPE/TiO₂纳米复合材料介电特性研究[J]. 电力工程技术, 2019,38(3):146-150.
LI Yudong, ZHANG Jianhua, XU Haixia, et al. Dielectric properties of LDPE/TiO₂ nanocomposites under heat aging [J]. Electric Power Engineering Technology, 2019, 38(3):146-150.
- [13] ZHOU Yao, PENG Siming, HU Jun, et al. Polymeric insulation materials for HVDC cables: Development, challenges and future perspective [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, 24(3):1308-1318.
- [14] 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.
- [15] 张洪亮,张建民,于洪森,等. 中国首根±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 ±525 kV XLPE insulated DC cable[J]. Southern Power System Technology, 2018, 12(1):1-6.
- [16] YAMANAKA T, MARUYAMA S, TANAKA T. The development of DC+/-500 kV XLPE cable in consideration of the space charge accumulation [C]//7th International Conference on Properties & Applications of Dielectric Materials. Nagoya, Japan:2003.
- [17] PIERRE M, CHRISTIAN F, VEGAR S L, Review of HVDC insulated transmission cables technologies [C]//9th International Conference on Insulated Power Cables. Versailles, France:2015.
- [18] MAEKAWA Y, WATANABE K, MARUYAMA S, et al. Research and development of DC ±500 kV extruded cables[R]. CIGRE Session Papers & Proceedings, 21-203, 2002:1-8.
- [19] 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.
- [20] KUBOTA T, TAKAHASHI Y, SAKUMA S, et al. Development of 500 kV XLPE cables and accessories for long distance underground transmission line-Part I: insulation design of cables [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1994, 9(4):1741-1749.
- [21] 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.
- [22] HAMPTON R N. Some of the considerations for materials operating under high-voltage, direct-current stresses[J]. Electrical Insulation Magazine IEEE, 2008, 24(1):5-13.
- [23] BOGGS S, DAMON D H, HJERRILD J, et al. Effect of insulat-

ion properties on the field grading of solid dielectric DC cable [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2001, 16(4): 456-461.

- [24] 额定电压 500 kV 及以下直流输电用挤包绝缘电力电缆系统 第 1 部分:试验方法和要求:GB/T 31489.1—2015[S]. 北京:中国标准出版社,2015.

DC extruded cable systems for power transmission at a rated voltage up to and including 500 kV—part 1: Test methods and requirements; GB/T 31489.1—2015[S]. Beijing: China Standard Press, 2015.

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;

杨黎明(1955),男,学士,教授级高级工程师,从事电线电缆技术相关工作。

Theoretical design and verification of ±535 kV DC cable insulation thickness

LI Dong, ZHU Zhien, YANG Liming, CHEN Longxiao, ZENG Hao, GAO Kai

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

Abstract: In order to determine insulation thickness of DC cable in Zhangbei HVDC flexible project, a design method of insulation thickness of the DC cable is presented. The influences of life index, breakdown field intensity conversion coefficient and Bahder coefficient on insulation thickness are analyzed. The insulation thickness of ±535 kV DC cable is calculated by establishing equations. The electric field distribution and electric field distortion rate under different conductivity temperature coefficient electric conductivity electric field coefficient and insulation temperature difference are calculated by finite element simulation. The results show that the insulation electric field distortion rate of ± 535 kV DC cable meets the requirements of national standards under different conductivity temperature coefficient, conductivity electric field coefficient and insulation temperature difference, and the rationality of the design method is verified. The research results provide theoretical guidance for the insulation thickness design and validation of DC cable and provide technical support for the construction of Zhangbei project.

Keywords: ±535 kV DC cable; insulation thickness; theoretical design; electric field distribution; electric field distortion rate

(编辑 方晶)