

DOI:10.12158/j.2096-3203.2020.02.019

直流电缆雷电冲击电压安全裕度研究

吴夕科¹, 李栋¹, 邓天宇², 朱智恩¹, 陈龙啸¹

(1. 南瑞集团(国网电力科学研究院)有限公司, 江苏 南京 211106;

2. 国家电网公司(常州)电气设备检测中心, 江苏 常州 213001)

摘要: 高压直流电缆是柔性直流输电技术的关键装备, 直流电缆的绝缘厚度设计以雷电冲击电压安全裕度为重要依据。为了获得直流电缆的安全裕度, 文中提出了直流电缆雷电冲击电压安全裕度试验方法, 建立了相应的试验回路, 对冲击电压波形参数进行了计算、仿真和验证, 获得了波前时间为1~5 μs、半峰值时间为40~60 μs的冲击电压波形; 提出了直流电缆雷电冲击电压安全裕度的分析方法, 计算了电缆绝缘的电场分布。研究表明, 文中所提方法可以获得直流电缆的雷电冲击电压安全裕度, 为高压直流电缆绝缘厚度设计提供了依据。

关键词: 直流电缆; 雷电冲击电压; 波形参数; 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(2020)02-0135-05

0 引言

高压直流电缆是柔性直流输电技术的关键装备^[1-2], 近年来国内建成投运了南澳岛±160 kV、舟山±200 kV 和厦门±320 kV 柔性直流电缆输电工程^[3-4], 下一步计划建设张北±500 kV 柔直电缆输电工程^[5]。直流电缆在经受过电压时^[6-7], 有可能导致电缆绝缘击穿破坏, 危及电缆系统的长期运行安全可靠^[8], 因此在高压直流电缆绝缘厚度设计时, 需要以雷电冲击电压安全裕度为依据。

高压直流电缆的安全裕度试验, 要求试验设备具备非常高的输出电压, 而且试验费用高, 技术难度大, 试验难以实施。有学者以试片为研究对象, 开展直流电缆的安全裕度研究^[9-10]。刘云鹏等研究了直流电缆绝缘料切片在标准雷电冲击电压和标准操作冲击电压下的击穿场强随温度的变化特性^[11]; 钱恺羽等研究了不同温度下高压直流电缆绝缘击穿场强的厚度效应^[12]。但是, 由于绝缘试片与真实电缆在结构、制作工艺和后处理方式上存在不同, 造成试片的绝缘强度远高于真实电缆的绝缘强度^[13], 研究结果对于直流电缆的安全裕度的评估缺少实际指导意义。

为了解决上述问题, 文中以±80 kV 直流电缆作为高电压等级(包含±200 kV、±320 kV 和±500 kV)直流电缆的模型电缆, 开展了雷电冲击电压安全裕度试验研究, 提出了安全裕度试验方法和安全裕度

分析方法, 计算了电缆绝缘的电场分布, 获得了直流电缆雷电冲击电压安全裕度。

1 直流电缆雷电冲击试验平台的建立

1.1 试验回路

文中以瑞典 Gotland 工程中首次使用的柔性直流电缆为研究对象, 其额定电压 U_0 为 80 kV, 绝缘厚度为 5.5 mm。试验回路布置如图 1 所示, 试验由冲击电压发生器、分压器和直流电缆样品 3 部分组成。冲击发生器为电缆提供雷电冲击电压, 分压器用于采集冲击电压波形。试验要求冲击发生器输出电压高于电缆的冲击击穿电压。

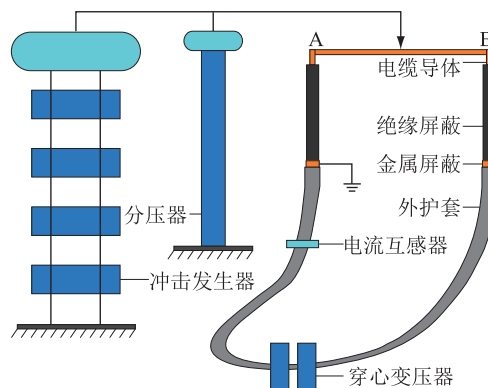


图1 冲击试验回路布置

Fig.1 Impact test circuit layout

试验中冲击电压发生器型号为 CJDY-400 kV/40 kJ, 其标称电压±400 kV; 级电压±100 kV, 共4级; 额定能量40 kJ; 冲击电容0.5 μF; 级电容2 μF。分压器额定电压400 kV, 电容0.3 nF。

试验前需对直流电缆进行处理: 首先电缆末端导体剥离70 mm, 用于导体连接; 然后, 绝缘屏蔽层剥离长度1.5 m, 防止电缆在击穿前, 导体与金属屏

收稿日期: 2019-10-14; 修回日期: 2019-11-07

基金项目: 国家电网有限公司科技项目“跨海高压直流海底电缆运维技术及探测机器人关键技术研究”

蔽层之间发生闪络;金属屏蔽外剥离 10 mm,用于连接接地线。

直流电缆试验回路长度 20 m,用铜排将电缆末端导体连接组成试验回路。采用 2 台穿心变压器对电缆导体加热,加热过程中,6 h 内使电缆导体温度达到 90 ℃,随后的 2 h 保持导体温度为 90 ℃。

1.2 雷电冲击电压波形调节

标准雷电波前时间 $1.2(1\pm 30\%) \mu\text{s}$,半峰值时间 $50(1\pm 20\%) \mu\text{s}$,电缆冲击试验要求雷电波前时间 T_f 为 $1\sim 5 \mu\text{s}$,半峰值时间 T_1 为 $40\sim 60 \mu\text{s}$ 。需要对电压波形进行调节。

冲击发生器等效放电回路如图 2 所示,其中 C_1 为冲击发生器电容; C_2 为试品等效电容; R_f 为波前电阻; R_1 为半峰值电阻。放电时在相对很短的时间内,电容经过波尾流失的电荷很少,等效电路内的 R_1 为无穷大;在电压经过峰值后,电容 C_1 和 C_2 经电阻放电。

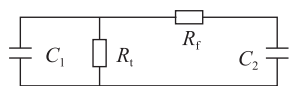


图 2 冲击发生器等效放电回路

Fig.2 Equivalent discharge circuit of impulse generator

根据标准雷电冲击电压波形的定义,近似认为 T_f 和 T_1 计算如下^[14]:

$$T_f = 3.24R_f \frac{C_1 C_2}{C_2 + C_2} \quad (1)$$

$$T_1 = 0.693R_1(C_2 + C_2) \quad (2)$$

C_2 由试品电容 C_{2a} 、杂散电容 C_{2b} 和分压器电容 C_{2c} 组成。其中试品电容计算如下:

$$C_{2a} = \frac{2\pi\epsilon\epsilon_0 L}{\ln(b/a)} \quad (3)$$

式中: ϵ 为电缆绝缘相对介电常数; ϵ_0 为真空介电常数,F/m; b 为电缆绝缘外径,mm; a 为电缆绝缘内径,mm; L 为试品长度,m。已知 $\epsilon = 2.3$, $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}$ F/m, $b = 28$ mm, $a = 17$ mm, $L = 20$ m,求得 $C_{2a} = 5.12$ nF。

发生器杂散电容,可将冲击电压发生器近似看成一个圆柱形导体,按照下式估算:

$$C_{2b} = 2\pi\epsilon\epsilon_0 l / \ln \left(\frac{2l}{d} \sqrt{\frac{4h+l}{4h+3l}} \right) \quad (4)$$

式中: l 为圆柱形导体的长度,m; d 为圆柱形等值直径,m; h 为底盘离地高度,m。已知 $l = 2$ m, $d = 1.2$ m, $h = 0.25$ m,求得 $C_{2b} = 0.12$ nF。已知分压器电容 $C_{2c} = 0.3$ nF,则 $C_2 = 5.54$ nF。

按照电缆冲击试验对雷电冲击电压波形的要

求,根据式(1)和式(2)求得 R_f 为 $58.1\sim 290.6 \Omega$, R_1 为 $114.2\sim 171.3 \Omega$ 。

1.2.1 雷电冲击电压波形的仿真

设备厂商共提供了 4 种调波电阻,阻值分别为 36Ω , 55Ω , 120Ω 和 260Ω 。根据波前电阻和半峰值电阻的计算结果,提出了 4 种调波电阻方案。

(1) 方案 I:每级波前电阻和半峰值电阻均选用 36Ω ,即 $R_f = 144 \Omega$, $R_1 = 144 \Omega$;

(2) 方案 II:每级波前电阻选用 36Ω ,前 2 级半峰值电阻选用 55Ω ,后 2 级半峰值电阻选用 2 个 55Ω 电阻并联,即 $R_f = 144 \Omega$, $R_1 = 165 \Omega$;

(3) 方案 III:每级波前电阻选用 55Ω ,每级半峰值电阻选用 36Ω ,即 $R_f = 220 \Omega$, $R_1 = 144 \Omega$;

(4) 方案 IV:每级波前电阻选用 55Ω ,前 2 级半峰值电阻选用 55Ω ,后 2 级半峰值电阻选用 2 个 55Ω 电阻并联,即 $R_f = 220 \Omega$, $R_1 = 165 \Omega$ 。

采用 Matlab/Simulink 软件对雷电冲击波形进行仿真,通过数值模拟的方式,对调波电阻进行选择。设定 C_1 的初始电压为 -400 kV; C_1 为 500 nF; C_2 为 5.54 nF; R_f 和 R_1 按照配置方案设定。雷电冲击波形如图 3 所示。

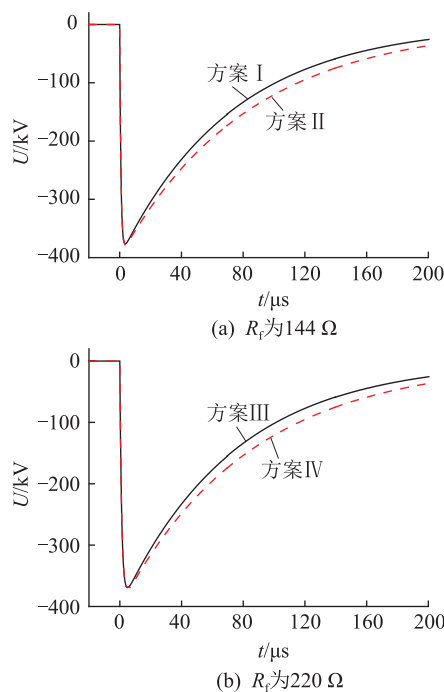


图 3 雷电冲击电压仿真波形

Fig.3 Simulation waveforms of lightning impulse voltage

仿真得出的波形参数见表 1,可知方案 I 和 III 的 T_f 在 $1\sim 5 \mu\text{s}$ 范围内, T_1 在 $40\sim 60 \mu\text{s}$ 范围内,符合电缆试验对雷电冲击电压的要求;方案 II 和 IV 的 T_f 在 $1\sim 5 \mu\text{s}$ 范围内, T_1 超出了 $60 \mu\text{s}$,不符合电缆试验要求。由于方案 I 的效率 η 高于方案 III,故调波电

阻选用方案 I, 即 $R_f = 144 \Omega, R_i = 144 \Omega$ 。

表 1 雷电冲击电压波形参数
Table 1 Parameters of lightning impulse voltage waveform

方案	R_f/Ω	R_i/Ω	$T_f/\mu s$	$T_i/\mu s$	U_p/kV	$\eta/\%$
I	144	144	2.01	54.0	376	94.0
II	144	165	2.08	62.0	378	94.5
III	220	144	2.76	55.5	369	92.3
IV	220	165	2.84	64.5	372	93.0

1.2.2 雷电冲击电压波形的试验验证

通过试验验证选用的调波电阻是否符合要求, 按照仿真结果, 选用 $R_f = 144 \Omega, R_i = 144 \Omega$ 。接入电缆样品, 现场试验的雷电冲击电压波形如图 4 所示, 其峰值电压 $U_p = -259.12 \text{ kV}$, $T_f = 2.53 \mu s$, $T_i = 57.72 \mu s$, $\eta = 92.54\%$ 。现场试验与仿真结果基本一致, 符合试验要求。但由于未考虑试验回路电感, 且杂散电容为估算值, 导致现场试验波形与仿真波形存在一定差异。

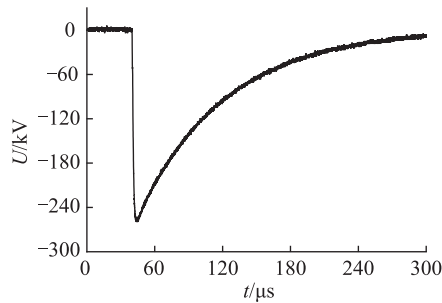


图 4 雷电冲击电压试验波形

Fig.4 Test waveform of lightning impulse voltage

1.3 试验过程

雷电冲击试验采取逐级加压的方式, 从 $-U_0$ 开始施加雷电冲击电压 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。考虑到试验结果需要一定的样本数量, 文中取 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。3 段电缆样品击穿电压分别为 -263.55 kV , -271.21 kV 和 -272.16 kV , 最低击穿电压波形如图 5 所示, 其中 U_p 为 -263.55 kV , T_f 为 $2.40 \mu s$, T_i 为 $3.84 \mu s$ 。

2 安全裕度试验结果

2.1 击穿原因的判定

分别对 3 段电缆样品进行解剖, 以判定击穿原因。如图 6 所示, 以击穿点为中心, 截取 3 段电缆样品, 长度均为 100 mm 。S₁ 和 S₃ 号样品用于结构检查, 分别测量导体外径、内外屏厚度、绝缘厚度以及偏心度, 并与出厂时实测结构尺寸检查进行比较,

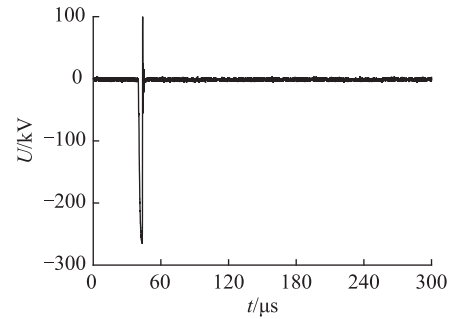


图 5 试品击穿时的电压波形

Fig.5 Voltage waveform of sample breakdown

分析外径偏差是否在合适的范围内。S₂ 号样品用于观察绝缘线芯表层有无刮擦及划痕。

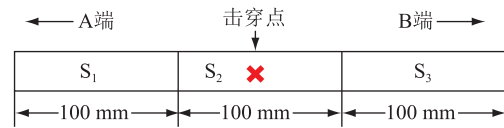


图 6 击穿点取样标记图

Fig.6 Diagram of breakdown point sampling mark

结构检查结果显示各项指标均符合要求, 试品无结构缺陷, 绝缘线芯表层无刮擦及划痕。因此判定电缆的击穿是由雷电冲击电压下电场强度超出绝缘强度所导致的。

2.2 雷电冲击电压安全裕度分析

文中通过比较直流电缆击穿电压下电场强度与直流电缆运行时经受雷电冲击需要承受电场强度, 来确定直流电缆雷电冲击电压安全裕度。

2.2.1 直流电缆绝缘的电场强度计算

(1) 直流电压下的电场强度。直流电压下的电场分布是由电阻率决定的, 直流电缆绝缘材料电阻率与温度 T 和电场 E 的关系为^[15-16]:

$$\rho = \rho_0 \frac{e^{-\alpha T}}{E^P} \quad (5)$$

式中: ρ 为体积电阻率, $\Omega \cdot m$; ρ_0 为参考体积电阻率, $\Omega \cdot m$; α 为温度系数, $1/^\circ C$; P 为电场系数, mm/kV 。

稳态电场分布为:

$$E_{dc} = \frac{U_0 \delta r^{\delta-1}}{b^\delta - a^\delta} \quad (6)$$

$$\delta = \frac{P}{P+1} + \frac{\alpha}{P+1} \frac{\Delta T}{\ln(b/a)} \quad (7)$$

式中: E_{dc} 为直流电压下的电场强度, kV/mm ; r 为径向距离, mm ; ΔT 为绝缘层温差, $^\circ C$ 。

(2) 雷电冲击电压下的电场强度。雷电冲击电压下, 绝缘内部电场由介电常数决定, 电场分布计算如下:

$$E_{imp} = \frac{U_{imp}}{r \ln(b/a)} \quad (8)$$

式中: E_{imp} 为雷电冲击电场强度,kV/mm; U_{imp} 为雷电冲击电压,kV, $U_{imp} = -2.1U_0$ 。

直流叠加雷电冲击电压下的电场分布^[17]为:

$$E_t = E_{dc} + E_{imp} \quad (9)$$

通过式(5)一式(9)计算了雷电冲击击穿电压下的电场分布,及直流电缆在正极性 U_0 叠加 $-2.1U_0$ 雷电冲击电压下的电场分布^[18],如图7所示。雷电冲击击穿电压下的电场均高于直流叠加雷电冲击电压下的电场分布。

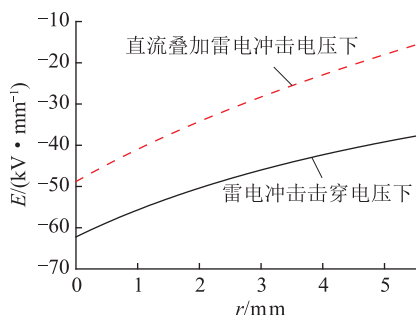


图7 直流电缆绝缘电场分布

Fig.7 Electric field distribution of DC cable insulation

2.2.2 直流电缆雷电冲击电压安全裕度

对直流电缆绝缘的电场分布进行归一化处理,得到了绝缘层安全裕度分布,即图8,绝缘层安全裕度为1.28~2.41,从内到外逐渐增大。假设电缆击穿发生在最大场强处,雷电冲击击穿电压下的最大电场为-62.2 kV/mm,直流叠加雷电冲击电压下绝缘最大电场为-48.8 kV/mm,则安全裕度为1.28。

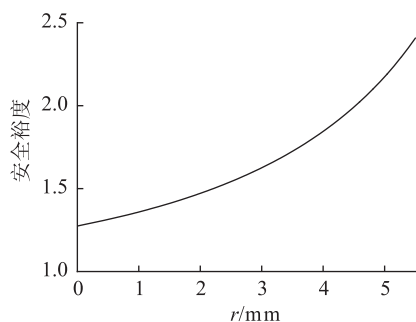


图8 雷电冲击电压下的安全裕度

Fig.8 Safety margin under lightning impulse voltage

3 结论

文中提出了雷电冲击电压下直流电缆安全裕度的试验方法,对冲击电压波形进行了计算、仿真和验证;建立了试验回路、开展了试验研究;提出了直流电缆在雷电冲击过电压下的安全裕度分析方法,获得了直流电缆的安全裕度。得到结论如下:

(1) 采用额定 ± 80 kV,绝缘厚度5.5 mm的电缆作为模型电缆,实现了对高压直流电缆雷电冲击电

压下的安全裕度等效分析,研究结果为高电压直流电缆绝缘厚度设计提供了依据。

(2) 该试验方法降低了安全裕度试验对场地和设备的要求,成本低、易于实施,不仅适用于直流电缆的安全裕度研究,同样适用于交流电缆。

(3) 若进一步提高被测电缆的电压等级,还需要解决2个技术难题:一是电缆击穿前,电缆导体与金属屏蔽层之间的闪络放电问题;二是高电压下雷电冲击电压波形的调节问题。

参考文献:

- [1] LI Zhonglei, DU Boxue. Polymeric insulation for high-voltage dc extruded cables: challenges and development directions [J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2018, 34(6): 30-43.
- [2] ZHOU Yao, PENG Simin, 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.
- [3] 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.
- [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.
ZHOU Yuanxiang, ZHAO Jiankang, LIU Rui, et al. Key technical analysis and prospect of high voltage and extra-high voltage power cable [J]. High Voltage Engineering, 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.
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.
- [6] 徐伟,路永玲,唐梦颖,等. 江苏电网近年雷电活动及输电线路雷击跳闸分析 [J]. 电力工程技术, 2017, 36(6): 112-116.
XU Wei, LU Yongling, TANG Mengying, et al. Analysis of lightning activities and transmission line lightning strike tripping in jiangsu power grid in recent years [J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(6): 112-116.
- [7] 张欣,雷震,许栋栋. 雷电波对电力系统行波故障测距法的影响分析 [J]. 江苏电机工程, 2012, 31(1): 24-27.
ZHANG Xin, LEI Zhen, XU Dongdong, et al. The influence analysis of lightning wave on traveling fault location method in power system [J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2012, 31(1): 24-27.
- [8] 曹京荣,查显光,陈杰,等. 220 kV 电缆线路终端故障及仿真分析 [J]. 电力工程技术, 2018, 37(6): 157-161.
CAO Jingying, ZHA Xianguang, CHEN Jie, et al. Terminal fault and simulation analysis of 220 kV cable line [J]. Electric Power

- Engineering Technology, 2018, 37(6):157-161.
- [9] 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.
- [10] 何金良,党斌,周焜,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.
HE Jinliang, DANG Bin, ZHOU Yao, et al. Reviews on research progress and key technology in extruded cables for HVDC transmission[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(5):1417-1429.
- [11] 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.
- [12] 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.
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.
- [13] 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.
- [14] 张仁豫,陈昌渔,王昌长. 高电压试验技术(第三版)[M]. 北京:清华大学出版社, 2009:95-102.
- ZHANG Renyu, CHENG Changyu, WANG Changchang. High-voltage testing technology (third edition) [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2009:95-102.
- [15] 刘子玉. 电气绝缘结构设计原理(上册)[M]. 北京:机械工业出版社, 1981:301-311.
LIU Ziyu. Design principles of electrical insulation structures (volume 1) [M]. Beijing: Machinery Industry Press, 1981:301-311.
- [16] 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.
- [17] 杨黎明,朱智恩,杨荣凯,等. 柔性直流电缆绝缘料及电缆结构设计[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(15):117-124
YANG Liming, ZHU Zhien, YANG Rongkai, et al. Insulation material and structure design of HVDC flexible cables[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(15):117-124.
- [18] 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.
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:



吴夕科

吴夕科(1966),男,硕士,高级工程师,从事电力系统、电力电子研究工作(wuxike@sgepri.sgcc.com.cn);

李栋(1988),男,硕士,工程师,从事电缆绝缘设计研究工作;

邓天宇(1991),男,学士,工程师,从事电缆测试技术研究工作。

Safety margin of DC cable under lightning impulse voltage

WU Xike¹, LI Dong¹, DENG Tianyu², ZHU Zhien¹, CHEN Longxiao¹

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

2. State Grid (Changzhou) Electric Power Equipment Quality Inspection and Testing Center, Changzhou 213001, China)

Abstract: HVDC cable is the key equipment of HVDC flexible transmission technology, and the insulation thickness design of HVDC cable is based on the safety margin of lightning impulse voltage. In order to obtain the safety margin, test method of safety margin under lightning impulse voltage is proposed in this paper, and impulse waveform is calculated, simulated and verified. Impulse voltage waveforms with wavefront time (1~5) μs and half peak time (40~60) μs is obtained. An analysis method of lightning impulse voltage safety margin of dc cable is presented, and the electric field distribution of cable insulation is calculated. The research shows that the safety margin of HVDC cable can be obtained by using the test method proposed in this paper, the research results provide a basis for the design of HVDC cable structure.

Keywords: DC cable; lightning impulse voltage; waveform parameters; electric field distribution; safety margin

(编辑 方晶)