

320 kV 交联聚乙烯绝缘直流电缆电气特性研究

梅文杰¹, 狄 健¹, 李文鹏², 孙达威¹, 潘 文¹, 梁克云¹

(1. 江苏亨通高压海缆有限公司, 江苏 苏州 215537;

2. 先进输电技术国家重点实验室(全球能源互联网研究院有限公司), 北京 102211)

摘 要:在进行直流电缆的绝缘结构设计和优化时,其电场分布特性是重要的参考依据。通过 COMSOL 仿真软件建立了 320 kV 直流电缆的简化模型,并研究其稳态和暂态电气特性规律,然后通过试验对仿真模型的可靠性进行验证。结果表明:以导体最高温度和绝缘层内外表面最大温差为约束条件,当环境温度低于 12℃ 时,直流电缆载流量的决定性因素为绝缘层的内外温差(20℃),当环境温度高于 12℃ 时,直流电缆载流量的决定性因素为导体最高工作温度(70℃);在仿真操作冲击试验、雷电冲击试验及绝缘温差 30℃ 下负荷循环试验过程中,分别得出暂态和稳态最大击穿场强为 58 kV/mm、25 kV/mm,对比直流绝缘材料性能参数可知直流电缆结构满足设计要求。试验表明 COMSOL 多物理场仿真模拟对于直流电缆的结构设计具有重要的指导意义。

关键词:直流电缆;稳态载流量;冲击电压;暂态电场

中图分类号:TM246 文献标志码:A 文章编号:1009-9239(2021)06-0056-07

DOI:10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2021.06.009

Electrical Properties of 320 kV XLPE Insulation DC Cable

MEI Wenjie¹, DI Jian¹, LI Wenpeng², SUN Dawei¹, PAN Wen¹, LIANG Keyun¹

(1. Hengtong Submarine Power Cable Co., Ltd., Suzhou 215537, China; 2. State Key Laboratory of Advanced Power Transmission Technology (Global Energy Interconnection Research Institute Co., Ltd.), Beijing 102209, China)

Abstract: When we design and optimize the insulation structure of a DC cable, its electric field distribution characteristics is an important reference basis. A simplified model of 320 kV DC cable was established by COMSOL simulation software, and its steady-state and transient electrical characteristics were studied. Then the reliability of the simulation model was verified by experiments. The result shows that the maximum temperature of conductor and the maximum temperature difference between inner and outer surfaces of insulating layer were used as the constraint conditions, when the ambient temperature is lower than 12℃, the decisive factor of DC cable ampacity is the temperature difference between inner and outer surface of the insulating layer (20℃). When the ambient temperature is higher than 12℃, the decisive factor of DC cable ampacity is the maximum operating temperature of conductor (70℃). In the process of simulated switching impulse test, lightning impulse test, and load cycle test under 30℃ of insulation temperature difference, the maximum transient and steady-state breakdown field strength are 58 kV/mm and 25 kV/mm, respectively. According to the performance parameters of DC insulating material, the DC cable structure can meet the design requirements. The test results indicate that the COMSOL multi-physical field simulation has important guiding significance for the structure design of DC cable.

Key words: DC cable; steady-state ampacity; impulse voltage; transient electric field

收稿日期:2020-07-23 修回日期:2020-12-25

基金项目:国家电网公司基金资助项目(SGRIDGKJ[2016]1079)

作者简介:梅文杰(1986-),男(汉族),湖北黄冈人,工程师,主要从事高压海缆及陆缆系统的制造和检测技术研究工作;李文鹏(1984-),男(汉族),安徽阜阳人,高级工程师,主要从事高压电缆材料的研究工作;通信作者:狄健(1990-),男(汉族),江苏张家港人,工程师,主要从事高压电压绝缘技术研究工作。

0 引言

随着海上风电由近海向远海发展以及全球能源互联网发展的需要,高压直流输电由于具有可控性好、线路损耗小、系统灵活性好、适合可再生能源并网及远距离输电等优点得到了日益广泛的应用^[1-2]。国内研究机构及大型海缆厂家纷纷开展了高压直流电缆结构设计研究,高压直流电缆电场分布与高压交流电缆不同,在结构设计过程中既需要考虑拉普拉斯场强分布,又需要考虑温度梯度和电场分布对绝缘材料直流电导率的影响进而造成的电场反转现象,此外叠加冲击绝缘水平也是绝缘厚度设计的重要因素^[3-4]。近年来,通过有限元仿真软件实现多物理场耦合分析,模拟高压直流电缆在工作状况下受到的复杂物理环境影响,检验高压直流电缆的设计可靠性,得到国内高校及海缆厂家的普遍重视^[5-6]。

本研究以 320 kV 交联聚乙烯绝缘直流电缆作为研究对象,主要参考 TICW 7.2—2012《额定电压 500 kV 及以下直流输电用挤包绝缘电力电缆系统技术规范 第 2 部分:直流陆地电缆》中要求的型式试验项目,采用 COMSOL 有限元仿真软件,重点研究在进行 VSC 负荷循环试验时温度对直流电缆稳态电场分布的影响,并确认直流电缆安全运行的范围。此外,对电缆绝缘在叠加冲击电压试验过程中的暂态电场分布特性进行研究。

1 控制方程

在 COMSOL 中建模之前先分析涉及的控制方程,加载的电压电流基于电场控制方程,温度分布基于传热控制方程,导体通电产生的焦耳热基于电热耦合控制方程,控制方程应包括电场模块、传热模块和电热耦合模块。

1.1 电场模块控制方程

稳态研究方程组为式(1)~(3),暂态研究方程组为式(1)、(4)。

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = Q_{j,v} \quad (1)$$

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} + \mathbf{J}_e \quad (2)$$

$$\mathbf{E} = -\nabla V \quad (3)$$

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} + \mathbf{J}_e \quad (4)$$

式(1)~(4)中: ∇ 为矢量微分算符; \mathbf{J} 为电流密度矢量, A/m^3 ;经 $Q_{j,v}$ 为电流源, A/m^3 ; σ 为电导率, S/m ; \mathbf{E} 为电场强度, V/m ; V 为电位, V ; \mathbf{J}_e 为外部注入电流

密度, A/m^3 ; \mathbf{D} 为位移矢量; t 为时间。

1.2 传热模块控制方程

稳态研究方程组为式(5)~(6),暂态研究方程组为式(6)、(7)。

$$d_z \rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T + \nabla \cdot \mathbf{q} = d_z Q + q_0 + d_z Q_{ted} \quad (5)$$

$$\mathbf{q} = -d_z k \nabla T \quad (6)$$

$$d_z \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + d_z \rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T + \nabla \cdot \mathbf{q} = d_z Q + q_0 + d_z Q_{ted} \quad (7)$$

式(5)~(7)中: ρ 为密度, kg/m^3 ; C_p 为恒压热容, $J/(kg \cdot K)$; \mathbf{u} 为固体传热的速度矢量, m/s ; T 为温度, K ; \mathbf{q} 为传导热通量, W/m^2 ; Q 为热源发热功率, W/m^3 ; q_0 为传导热通量初值, W/m^2 ; Q_{ted} 为热弹性阻尼热源, W/m^3 ; k 为导热系数, $W/(m \cdot K)$; d_z 是平面外方向上的区域厚度, m 。

1.3 电热耦合模块控制方程

稳态研究方程组为式(8)~(9),暂态研究方程组为式(10)。

$$\rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q_e \quad (8)$$

$$Q_e = \mathbf{J} \cdot \mathbf{E} \quad (9)$$

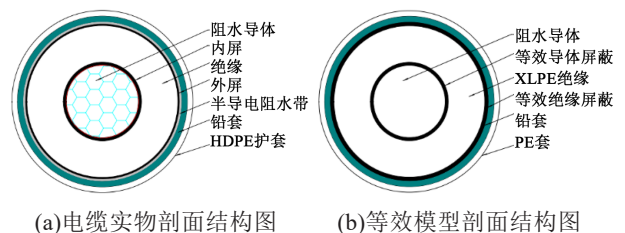
$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q_e \quad (10)$$

式(8)~(10)中: Q_e 为电磁热源, W/m^3 ; \mathbf{J} 为电流密度矢量, A/m^3 。

2 有限元模型建立

2.1 几何模型及简化

以 320 kV 1 800 mm²交联聚乙烯绝缘电缆为研究对象,采用 COMSOL Multiphysics 建立等效模型,电缆实物及其等效模型剖面结构如图 1 所示,模型中各层结构的尺寸如表 1 所示。为了提高计算效率,建立二维平面模型,在进行有限元剖分时,在相邻两层材料的交界处进行较细网格剖分,电缆的其他结构进行一般网格剖分,电缆本体以外的区域进行较粗网格剖分。



(a) 电缆实物剖面结构图 (b) 等效模型剖面结构图

图 1 电缆实物及其等效模型剖面结构

Fig.1 The section structure of cable and its equivalent model

表1 等效模型结构参数

结构名称	标称厚度/mm	标称外径/mm
阻水导体	—	51.5
等效导体屏蔽	2.2	55.9
XLPE 绝缘	26.0	107.9
等效绝缘屏蔽	2.7	113.3
铅套	4.0	121.3
PE 套	4.0	129.3

2.2 边界条件及物性参数

假设电缆外部环境为空气,空气的温度恒定为40℃,电缆外部为空气自然对流,电缆内部各个方向导热性能相同,确定热力学边界条件如表2所示。

表2 模型简化等效后各层材料物性参数

材料名称	电导率/(S/m)	恒压热容/(J/(kg·K))	相对介电常数	密度/(kg/m ³)	导热系数/(W/(m·K))
铜导体	5.998×10 ⁷	385	1.00	8 960	400
等效导体屏蔽	2	2 405	2.25	1 055	10
XLPE 绝缘	—	2 302	2.30	930	0.46
等效绝缘屏蔽	2	2 405	2.25	1 055	10
铅套	4.55×10 ⁶	127	1.00	11 340	35.3
PE 套	1×10 ⁻¹⁸	2 302	2.25	935	0.46

直流绝缘材料的电导率 σ 与电场强度 E 和温度 T 的关系如式(11)所示。

$$\sigma(E, T) = A \times \exp\left(\frac{-\varphi q}{k_b T}\right) \times \frac{\sinh(B|E|)}{E} \quad (11)$$

式(11)中: A 和 B 反映绝缘材料的特性, A 取值为3.278 1 A/m², B 取值为2.775 6×10⁻⁷ m/V; φ 为热活化能,取值为0.56 eV; q 为元电荷所带电量,取值为1.6×10⁻¹⁹ C; k_b 为玻尔兹曼常数,取值为1.380 65×10⁻²³ J/K。

基于以上取值,得到直流绝缘材料电导率与电场强度和温度的关系如图2所示。

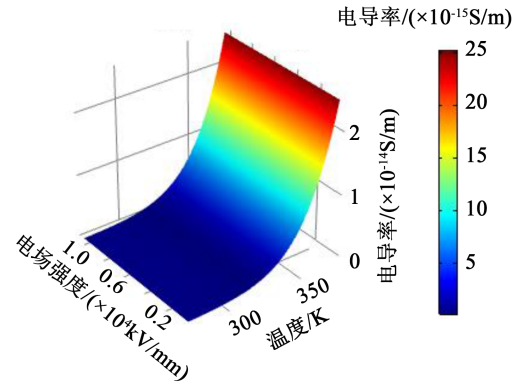


图2 直流绝缘材料的电导率特性

Fig.2 Conductivity characteristics of DC insulating materials

3 稳态特性分析

3.1 温度梯度对稳态电场分布的影响

按照 TICW 7.2—2012 中的 VSC 负荷循环试验要求,设置导体温度 $\geq 70^\circ\text{C}$,施加电压 $U_T=592$ kV,仿真研究在不同温度梯度(ΔT)时的稳态电场分布云图,结果如图3所示。由图3可知,当温度梯度为 0°C 时,直流电缆的电场分布与交流电缆类似,绝缘层中电场强度由内向外递减,属于类拉普拉斯场^[7],最高场强为24.3 kV/mm。当温度梯度为 10°C 时,电场分布较为均匀。当温度梯度为 20°C 时,电场分布明显翻转,即绝缘层中电场强度由内向外递增。当温度梯度达到 30°C 时,绝缘层中的最大场强为25 kV/mm,已经大于类拉普拉斯场的最高场强。整理仿真结果数据可得稳态时不同温度梯度下的电场分布如图4所示,其中 R 表示距离电缆中心点的距离。从图4可以看出,直流电缆的电场分布曲线与温度梯度有着密切的联系。当温度梯度 $\leq 10^\circ\text{C}$ 时,随着温度梯度的增加,电场分布曲线趋于平缓。当温度梯度在 $10\sim 20^\circ\text{C}$ 时,电场分布曲线出现翻转现象。当温度梯度 $\geq 20^\circ\text{C}$ 时,随着温度梯度的增加,电场分布曲线越来越陡峭,温度梯度为 50°C 时,最高场强达27.2 kV/mm。

3.2 环境温度对稳态载流量的影响

直流电缆绝缘层中的电场分布与绝缘材料的电导特性相关,而直流绝缘料的电导率又受到温度的影响,因此稳态载流量、温度分布和稳态电场分布三者相互制约。当温度高于 70°C 时,直流绝缘料空间电荷的累积阈值很低,因此普遍认为商业化应用的直流电缆绝缘料长期最高工作温度为 70°C ^[8-9],有研究表明直流电缆绝缘层内外表面最大允许温

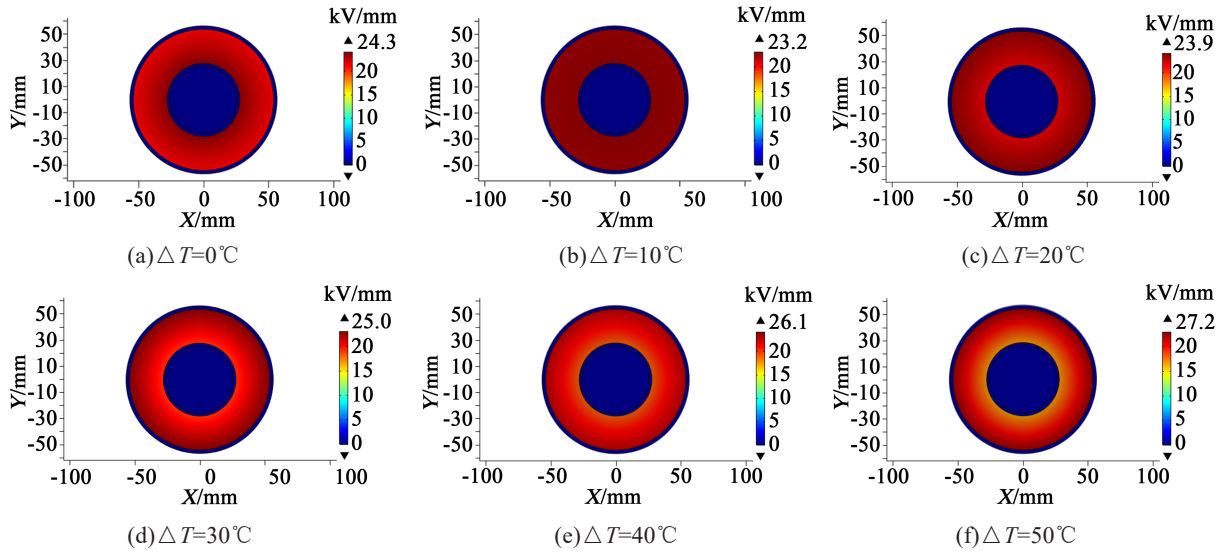


图3 不同温度梯度下稳态电场分布云图

Fig.3 Cloud diagram of electric field distribution under different temperature gradients at steady state

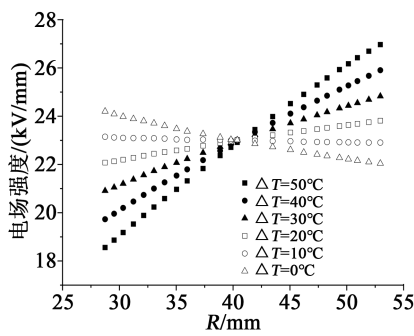


图4 稳态时不同温度梯度下电场分布
Fig.4 Electric field distribution under different temperature gradients at steady state

差为 20°C^[10]。

通过 COMSOL 电热耦合场仿真计算得出直流电缆热场分布,在不同环境温度下,提取约束条件所需的导体温度和绝缘层温差等数据,分别计算以导体最高允许工作温度(70°C)和绝缘层内外表面最大允许温差(20°C)时直流电缆的载流量 I_1 和 I_2 ,再比较得出载流量 $I_0 = \min(I_1, I_2)$,结果如图 5 所示。由图 5 可知,以导体最高温度为约束条件确定的额定载流量随着环境温度的升高而降低,近似呈线性关系。以绝缘层最大温差为约束条件确定的载流量受环境温度变化影响较小。以导体最高温度为 70°C 和绝缘层内外表面最大温差为 20°C 为约束条件得到的载流量曲线交点对应的环境温度为 12°C,说明当环境温度低于 12°C 时,直流电缆载流量的决定性约束条件为绝缘层内外表面最大允许温差,此时载流量 $I_0 = I_2$;当环境温度高于 12°C 时,直流电缆

载流量的决定性约束条件为导体最高允许工作温度,此时载流量 $I_0 = I_1$ 。由此,可确定直流电缆的安全运行区域为两条线交汇的左下角区域。

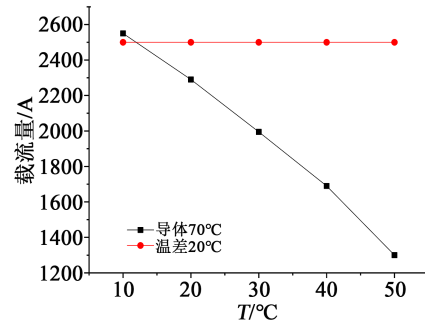


图5 环境温度对稳态载流量的影响

Fig.5 Effect of ambient temperature on the steady-state ampacity

4 暂态特性分析

对模型施加直流电压+320 kV,电流 1 800 A,达到稳态后导体温度为 73.8°C,绝缘内外表面温差 ΔT 为 10.2°C,此时电缆的温度分布如图 6 所示,满足 TICW 7.2—2012 中直流叠加雷电冲击试验时导体温度 $\geq 70^\circ\text{C}$ 的要求。

仿真研究直流叠加雷电冲击电压和操作冲击电压过程中的暂态特性,其中,1.2/50 μs 标准雷电冲击波和 250/2 500 μs 标准操作冲击波均为双指数波,可通过公式(12)来表示。

$$U(t) = \frac{U_p}{\epsilon_0} \times (-e^{at} + e^{bt}) \quad (12)$$

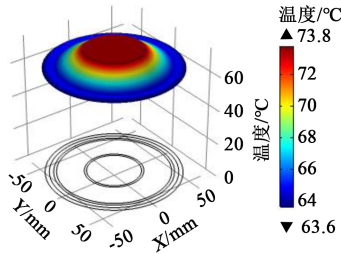


图6 加载1 800 A条件下达到稳态时温度分布
Fig.6 Temperature distribution at steady state loading 1 800 A of current

式(13)中: $U(t)$ 为冲击电压实际值,单位为kV; U_p 为冲击电压最大值,单位为kV; α 和 β 反映冲击波的上升和下降时间,单位为 μs^{-1} ; ϵ_0 为波形系数。

本研究仿真时设置的特性参数如表3所示。

表3 标准雷电冲击波及标准操作冲击波特性参数

Tab.3 Characteristic parameters of standard lightning shock wave and standard operation shock wave

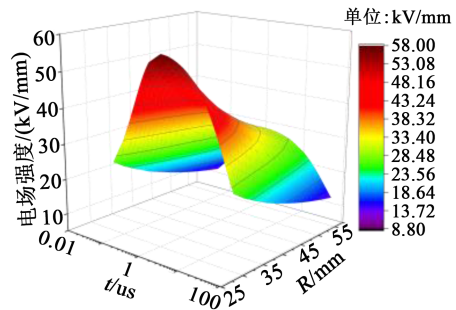
波形	U_p/kV	$A/(\mu s^{-1})$	$\beta/(\mu s^{-1})$	$T_m/(\mu s^{-1})$	ϵ_0
1.2/50 μs	800	-0.014 659	-2.4689	2.089	0.964 1
250/2 500 μs	700	$-3.169 6 \times 10^{-4}$	-0.0160	250.0	0.905 5

图7为直流叠加雷电冲击过程中电场分布和最大场强随时间的变化。由图7可知,在雷电冲击过程中,无论是同极性还是反极性暂态的最大场强始终出现在导体屏蔽层与绝缘层交界面处,最大值可达58 kV/mm。同极性雷电冲击过程,暂态场强随时间先迅速上升,达到峰值后缓慢下降。反极性雷电冲击过程,暂态场强先迅速下降至零点,然后又迅速上升,紧接着缓慢下降,触底后又缓慢上升。

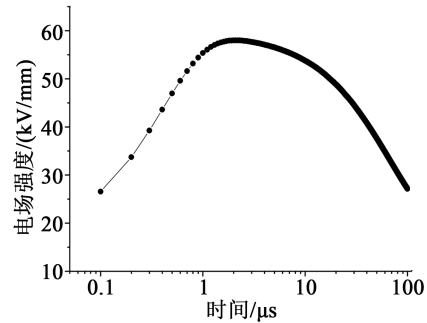
此外,同极性雷电冲击过程的暂态最大场强始终大于反极性雷电冲击过程的暂态最大场强。这是因为同极性雷电冲击过程中绝缘体内存在的同极性电荷增加,使得电场增强,而反极性雷电冲击过程中先是同极性电荷的减少,当冲击电压过零点后才表现出异性电荷,从而使其电场减弱。

图8为直流叠加操作冲击电压的电场分布以及最大场强随时间的变化。由图8可知,无论是同极性还是反极性冲击过程中,暂态最大场强也是始终在导体屏蔽处,最大值为55.4 kV/mm,比雷电冲击过程的暂态最大场强要小。

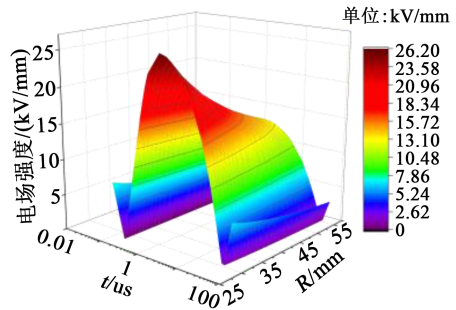
操作冲击过程中,暂态场强随时间的变化趋势与雷电冲击过程类似。同样地,同极性操作冲击过



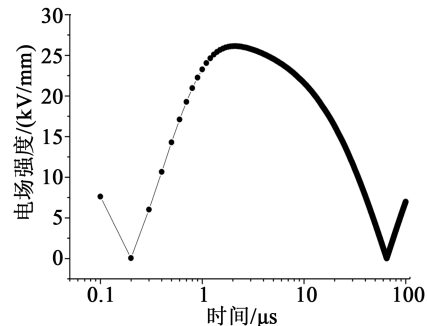
(a)同极性雷电冲击过程电场分布



(b)同极性雷电冲击过程暂态最大场强



(c)反极性雷电冲击过程电场分布

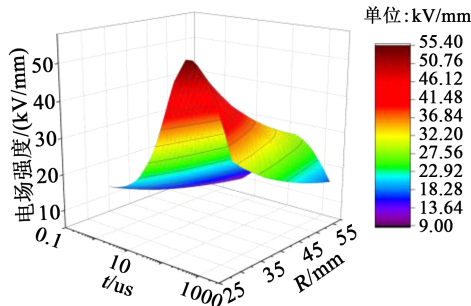


(d)反极性雷电冲击过程暂态最大场强

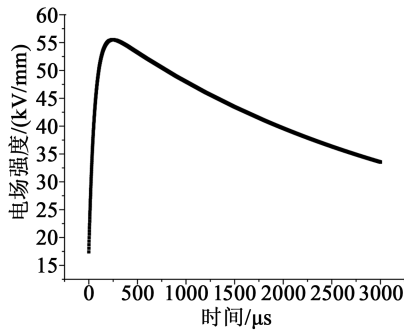
图7 直流叠加雷电冲击过程中电场分布和最大场强随时间的变化

Fig.7 Variation of electric field distribution and maximum field strength with time in the process of DC superimposed lightning impulse

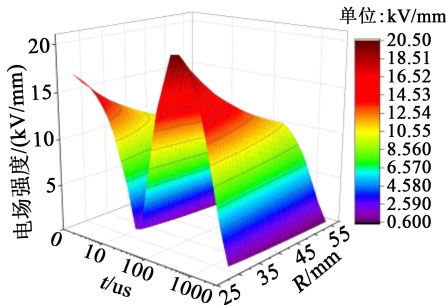
程的暂态最大场强始终大于反极性操作冲击过程的暂态最大场强。320 kV 直流绝缘材料在工作运行温度为70°C时,交联聚乙烯的电气强度为60~



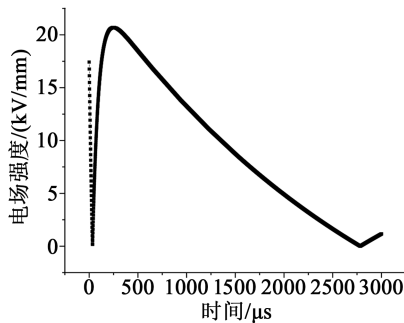
(a)同极性操作冲击过程电场分布



(b)同极性操作冲击过程暂态最大场强



(c)反极性操作冲击过程电场分布



(d)反极性操作冲击过程暂态最大场强

图8 直流叠加操作冲击电压的电场分布以及最大场强随时间的变化

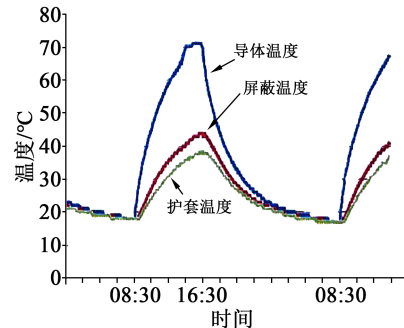
Fig.8 The electric field distribution of DC superimposed switching impulse voltage and the change of maximum field strength with time

80 kV^[11],综上所述,仿真模型在叠加冲击电压试验条件下,其绝缘层满足最大设计场强的要求。

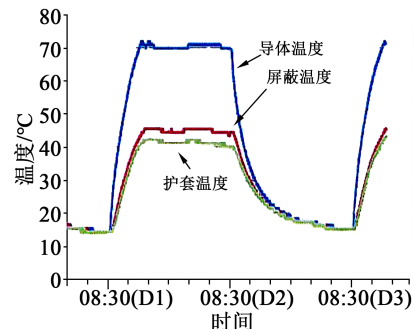
5 型式试验验证及分析

按照 TICW 7.2—2012 要求进行全部型式试验项目,用于电气型式试验的直流交联电缆系统由型号为 DC-YJQ03 320 kV 1×1 800 mm² 的直流电缆、两套瓷套户外终端和一套组合预制式绝缘接头组成。

VSC 负荷循环试验条件:在直流-592 kV 电压下,8 h 加热,16 h 冷却,共进行 12 个 24 h 负荷循环;休息周期,不施加电压,24 h 负荷循环 1 次;在直流+592 kV 电压下,8 h 加热,16 h 冷却,共进行 12 个 24 h 负荷循环。在直流+592 kV 电压下,24 h 加热,24 h 冷却,共进行 3 个 48 h 负荷循环。负荷循环试验过程中的典型温度曲线如图 9 所示。



(a)24 h 负荷循环



(b)48 h 负荷循环

图9 负荷循环试验的典型温度曲线

Fig.9 Typical temperature curves of load cycles

由图 9 可知,在负荷循环试验过程中,绝缘最大温差接近 30℃,按照本研究仿真特性研究结果,可以估计在此状态下的最高场强出现在绝缘屏蔽处,电场强度达 25 kV/mm,而 320 kV 直流电缆采用北欧化工绝缘材料,材料允许长期的最高工作场强 ≥25 kV,在设计允许范围内。

在叠加雷电冲击及操作过电压冲击电压试验时,环境温度为 15℃,相对湿度为 65%,大气压力为

101.0 kPa, 直流电缆实际耐受电压值如表 4 所示。表 4 从左至右分别是同极性操作正冲击、同极性操作负冲击、负极性操作负冲击、负极性操作正冲击、雷电负冲击和雷电正冲击, 由表中数值可知试验电压有波动, 但满足试验规范波动值 $<3\%$ 的要求。

表 4 叠加冲击电压实际耐受电压值

Tab. 4 Actual withstand voltage under superimposed impulse voltage (单位:kV)

直流电压	+320 kV	+320 kV	-320 kV	-320 kV	+320 kV	-320 kV
	+	-	-	+	-	+
1	380	1 008	380	1 021	800	823
2	379	1 013	383	1 027	796	793
3	370	1 043	383	1 032	798	796
4	371	1 040	384	1 017	794	800
5	377	1 019	382	1 021	793	795
6	374	1 022	383	1 022	791	797
7	370	1 020	381	1 027	793	797
8	381	1 033	382	1 022	788	799
9	379	1 026	382	1 021	795	799
10	374	1 021	382	1 026	791	796

综上所述, 直流电缆样品经过了全部的型式试验项目, 未发生击穿或闪络现象, 解剖检查亦表明电缆样品不存在可能影响系统正常运行的劣化迹象。型式试验证明了根据仿真模拟结果进行优化设计的电缆样品电气绝缘性能水平满足 TICW 7.2—2012 的要求, 采用 COMSOL 进行直流电缆电气特性的仿真模拟是有效和符合实际的。

6 结论

(1) 通过对 320 kV 1×1 800 mm² 直流电缆进行稳态温度场仿真模拟, 以导体最高温度(70℃)和绝

缘层内外表面最大温差(20℃)为约束条件, 当环境温度低于 12℃ 时, 直流电缆载流量的决定性约束条件是绝缘层内外温差, 当环境温度高于 12℃ 时, 直流电缆载流量的决定性约束条件为导体的最高工作温度。

(2) 通过对 320 kV 1×1 800 mm² 直流电缆进行稳态、暂态电场分布仿真分析, 得到负荷循环仿真试验过程中绝缘温差为 30℃ 下, 绝缘材料经受最大场强为 25 kV/mm, 冲击电压仿真试验过程中, 最大击穿场强为 58 kV/mm, 对比直流绝缘材料性能参数可知直流电缆结构均满足设计要求。

(3) 通过试验对仿真模型的可靠性进行了验证, 试验表明 COMSOL 多物理场仿真模拟对于直流电缆的结构设计具有重要的指导意义。

参考文献:

- [1] 郝艳捧, 陈云, 阳林, 等. 高压直流海底电缆-热-流多物理场耦合仿真[J]. 高电压技术, 2017, 43(11): 3534-3542.
- [2] 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.
- [3] 梅文杰, 潘文林, 陈涛, 等. 500 kV 直流海底光电复合缆的结构设计[J]. 光纤与电缆及其应用技术, 2017(6): 13-18.
- [4] 杨黎明, 朱智恩, 杨荣凯, 等. 柔性直流电缆绝缘材料及电缆结构设计[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(15): 117-124.
- [5] 王雅妮, 张洪亮, 吴建东, 等. 不同敷设方式下高压直流电缆温度场与电场仿真计算研究[J]. 绝缘材料, 2017, 50(7): 71-78.
- [6] 阳林, 李昭红, 郝艳捧, 等. 工作温度和绝缘温差约束下的高压直流电缆接头载流量计算[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(18): 129-134.
- [7] MAZZANTI G, MARZINOTTO M. Extruded cables for high-voltage direct-current transmission: Advances in research and development[M]. New York: John Wiley & Sons, 2013.
- [8] HANLEY T L, BURFORD R P, FLEMING R J, et al. A general review of polymeric insulation for use in HVDC cables[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2003, 19(1): 13-24.
- [9] 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.
- [10] 郝艳捧, 黄吉超, 阳林, 等. 高压直流电缆稳态载流量解析计算方法[J]. 电网技术, 2016, 40(4): 1283-1288.
- [11] 高寒. 320kV XLPE 高压直流电缆及终端仿真分析和优化设计[D]. 北京: 华北电力大学, 2017: 11.