

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2020.01.020

## 基于多物理场的预置式(插拔式)海底电缆终端电场优化研究

谢晨<sup>1</sup>, 潘文霞<sup>1</sup>, 孙凯<sup>1</sup>, 赵坤<sup>1</sup>, 朱正鼎<sup>1</sup>, 黄焯城<sup>2</sup>

(1. 河海大学能源与电气学院, 南京 211100; 2. 江苏方天电力技术有限公司, 南京 211102)

**摘要:** 电缆终端电场分布优化研究是海底电缆安全运行和试验迫切需要解决的问题,为提高其运行的安全性与可靠性,可对电缆终端电场分布进行优化。文中基于有限元法对海底电缆终端电场进行多物理场耦合研究分析,综合考虑终端实际运行环境及实际生产情况,采用电流—温度—电压仿真法对电缆主绝缘及应力锥绝缘部分材料进行优化分析,同时对应力锥金属部分曲率及应力锥金属与绝缘部分比例分配进行优化,寻求终端电场分布的最优化。结果表明:采用与电场、温度相关的非线性材料对终端电场分布很大改善,应力交界点电场强度降低幅度为25.83%,交界面上的最大电场强度降低幅度为12.91%;对金属应力的曲率和金属与绝缘部分比例分配分别优化和同时优化作对比,当金属应力的曲率半径为81 mm,增加金属应力20 mm时,电场改善程度最大,应力交界点电场强度降低幅度达到27.47%,交界面上的最大电场强度降低幅度也高达24.55%,提高了海底电缆终端的可靠性与安全性。

**关键词:** 海底电缆终端;非线性;电流—温度—电压法;电场优化

### Research on Optimization of the Electric Field of the Pre-set (Plug-and-pull) Submarine Cable Based on Multi-physical Field

XIE Chen<sup>1</sup>, PAN Wenxia<sup>1</sup>, SUN Kai<sup>1</sup>, ZHAO Kun<sup>1</sup>, ZHU Zhengding<sup>1</sup>, HUANG Xuancheng<sup>2</sup>

(1. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China;

2. Jiangsu Frontier Electric Technology Co., Ltd., Nanjing 211102, China)

**Abstract:** The optimization of electric field distribution in cable terminals is an urgent problem to be solved in the safe operation and test of submarine cable, which can optimize the electric field distribution of cable terminals in order to improve the safety and reliability of its operation. Safe operation and testing is an urgent problem to be solved. In this paper, based on the finite element method, the research and analysis on the electric field of submarine cable terminals is carried out, considering the actual operating environment of the terminal and the actual production conditions, the electric current-temperature-voltage simulation method is used to optimize the main insulation and stress cone insulation materials of the cable. At the same time, the partial curvature of the stress cone metal and the proportional distribution of the stress cone metal and the insulating part are optimized to find the optimal distribution of the electric field. The results show that the use of electric field and the temperature-related non linear materials have greatly improved the distribution of the electric field in the terminal, and the intensity of the stress junction point is reduced by 25.83%, the maximum electric field intensity on the interface is 12.91%; the curvature of the metal stress and the proportion distribution of the metal and the insulation are optimized and optimized respectively. When the radius of curvature of metal stress is 81mm and the metal stress is increased 20 mm, the electric field improves the most, the electric field intensity of stress junction point reaches 27.47%, the maximum electric field intensity on the interface is reduced by 24.55%, and the reliability and safety of the submarine cable terminal are improved.

**Key words:** submarine cable terminals; nonlinear; current-temperature-voltage method; electric field optimization

收稿日期:2019-05-25; 修回日期:2019-07-19

基金项目:国家自然科学基金项目(51377047);新能源发电与智能电网学科创新引智基地(B14022)资助。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (51377047);The 111 Project (B14022).

## 0 引言

随着中国高压工程建设的不断推进,电力输送成为高压工程的重要组成部分,其中,以电缆为载体的输电工程越来越受到人们的重视<sup>[1]</sup>。海底电缆<sup>[2-3]</sup>作为电缆线路的重要部分,其运行的安全稳定关系到整个电力系统的安全运行,就目前而言,海底电缆还存在很多问题且对其研究较少,尤其是海底电缆终端的安全性和可靠性还存在应力锥易被击穿等问题,所以对海底电缆终端还需进行深入的研究。

目前,对于电缆终端电场的研究还尚不完善,文[4-5]基于后退欧拉法和变分原理推导了非线性时域有限元电场计算方程,利用时域有限元方法分析了含不同应力控制管时的电缆终端电场分布,采用由电容性和非线性电阻性材料复合绝缘结构的应力控制管优化电场分布。文[6-8]介绍了高压电缆终端中预制橡胶应力锥的研究状况,探讨了应力锥的锥面和曲线设计方法,分析橡胶应力锥的电力、形变以及热力性能。但以上文献研究尚未考虑电缆终端实际工作环境和初始温度与电位差对非线性绝缘材料电导率的影响。

所以,文中以220 kV海底电缆为本体建立海底电缆终端模型,考虑终端实际工作环境及初始温度与电位差对非线性绝缘材料的影响,利用Comsol Multiphysics<sup>[9]</sup>对海底电缆终端进行基于有限元法的多物理场耦合仿真,并对预置式电缆终端的材料与结构进行仿真优选,以终端的材料、金属部分曲率和绝缘与金属比例为研究变量,以海底电缆终端电场为目标函数,采用电流—温度—电压仿真法寻求终端电场的最优化,从而提高海底电缆终端的可靠性与安全性。

## 1 多物理场的有限元原理分析

### 1.1 电场的有限元原理分析

有限元算法<sup>[10]</sup>是基于变分和剖分插值原理的常用计算方法,有限元法求解场的问题是利用变分原理把求解的边值问题转化为取极值的相应变分问题。对于电缆终端的电场而言,使用有限元法计算电缆终端电场需满足电流守恒,见式(1)。

$$\begin{cases} \nabla \cdot J = Q_{j,v} \\ J = \sigma E + \frac{\partial D}{\partial t} + J_e \\ E = -\nabla U \end{cases} \quad (1)$$

电缆绝缘表面与应力锥绝缘部分需满足式(2),即

$$\begin{cases} U_0 = 0 \\ U_c = U \\ \varphi_1 = \varphi_2 \\ \gamma_1 \frac{\partial \varphi_1}{\partial n} = \gamma_2 \frac{\partial \varphi_2}{\partial n} \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中: $U_0$ 表示电缆屏蔽层及应力锥上施加的电压; $U_c$ 表示电缆线芯上施加的电压; $\varphi_1$ 、 $\varphi_2$ 、 $\gamma_1$ 、 $\gamma_2$ 分别表示电缆绝缘层和应力锥绝缘部分的电位与电导率; $n$ 表示电缆绝缘层和应力锥绝缘部分的界面法向量。

### 1.2 温度场的有限元原理分析

由于电缆终端是安装在GIS桶内,与绝缘气体直接接触,因此主要以热对流与热辐射两种传热方式。考虑电缆终端的温度场分布时,对热源(即损耗)进行分析计算,线芯导体通过电流时会产生热量,由焦耳定理可知,单位长度线芯导体的发热损耗计算公式为

$$\begin{cases} P = I^2 R_{ac} \\ Q = \frac{P}{V} \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中: $I$ 表示线芯中通过的电流,A; $R_{ac}$ 为单位长度线芯导体交流电阻, $\Omega/m$ ; $V$ 为线芯导体的体积。

对于非线性的半导体材料,绝缘介质损耗主要取决于材料的电导率。绝缘介质的电场、热场之间通过材料电导率为枢纽,形成相互耦合的关系。由焦耳定理<sup>[9]</sup>的微分形式见式(4)。由电磁场相关理论可得绝缘介质生热率 $Q$ 见式(5)。

$$J = \sigma E \quad (4)$$

$$Q = J \cdot E = E^2 \sigma \quad (5)$$

式(4)、(5)中: $\sigma$ 为线芯外部各个绝缘材质的电导率。其温度场的边界条件设定分以下3类:第1类边界条件是给定外部边界上的温度值;第2类边界条件是已知外边界上热密流分布;第3类边界条件是已知边界与周围物质间的表面传热系数及周围环境的温度。具体表达式见式(6)。

$$\begin{cases} T = F(t, r, z) \\ -\lambda \left( \frac{\partial T}{\partial n} \right) = Q(t, r, z) \\ -\lambda \left( \frac{\partial T}{\partial n} \right) = \alpha(T - T_{amb}) \end{cases} \quad (6)$$

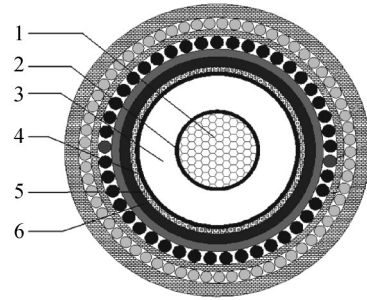
式(6)中: $F(t, r, z)$ 为电缆终端外部边界的温度函数; $Q(t, r, z)$ 为边界温度函数; $n$ 为外边界法线方向; $\alpha$ 为表面对流换热系数; $T_{amb}$ 为周围环境的温度。

## 2 海底电缆终端结构与参数设置

采用HYJQF41-F-127/220-1×1 600的海底电

缆作为终端的本身,其横截面见图1。由于预置式海底电缆终端只需使用至金属屏蔽层(即1-6层),所以外部层不再赘述。

以此电缆为终端本体,参照IEC 62271—2007标准<sup>[1]</sup>建立预置式(插拔式)电缆终端模型,在Comsol Multiphysics中建立电缆终端模型,具体参数见表1,由于应力锥托、弹簧支撑和螺丝等对终端电场影响不大,将模型进行对称简化,简化后的模型见图2。



1—铜阻水导体层; 2—半导体阻水带层; 3—XLPE绝缘层; 4—绝缘屏蔽层; 5—半导电阻水带; 6—金属屏蔽层。

图1 海底电缆截面结构图

Fig. 1 Cross-sectional structure diagram of submarine cable

表1 海底电缆各层参数及终端参数

Table 1 Parameters and terminal parameters of submarine cable

名称	直径/mm	相对介电常数	电导率/(S·m <sup>-1</sup> )	恒压热容/[J·(kg·K) <sup>-1</sup> ]	导热系数/[W·(m·K) <sup>-1</sup> ]	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )
铜导体层	48.4	1.0	5.99×10 <sup>7</sup>	385	400.00	8 960
半导体层	52.7	50.0	10.00	2 200	0.51	940
XLPE层	100.7	2.3	1.50×10 <sup>-14</sup> 或 <i>F<sub>1</sub>(T,E)</i>	1 650	0.32	930
绝缘屏蔽层	106.7	50.0	10.00	2 200	0.51	940
金属屏蔽层	114.3	1.0	4.50×10 <sup>7</sup>	470	380.00	7 890
应力绝缘	—	4.3	2.80×10 <sup>-14</sup> 或 <i>F<sub>2</sub>(T,E)</i>	1 800	0.37	1 250
应力金属	—	1.0	1.00×10 <sup>8</sup>	400	350.00	8 120
环氧套管	—	4.0	1.00×10 <sup>-13</sup>	600	0.35	1 900

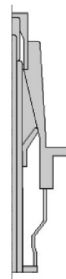


图2 海底电缆终端简化模型

Fig. 2 Simplified model of submarine cable terminal

表1中:*F<sub>1</sub>*和*F<sub>2</sub>*为绝缘层与应力绝缘部分采用非线性材料时的电导率<sup>[12-13]</sup>,电导率与电场、温度有关,表达式见式(6)。

$$F_n = a \times e^{\frac{-f}{K_b \times T}} \times \frac{\sin(b \times |E|)}{|E|} \quad (7)$$

式(6)中:*a*为材料特性参数;*K<sub>b</sub>*为玻尔兹曼常数,J/K;*T*为材料温度,K;*b*为电场系数,m/V;*E*为对应场强,kV/mm。具体参数取值见表2。

### 3 海底电缆终端电场分布与优化

海底电缆终端仿真施加频率29 Hz,幅值220 kV,电流为800 A的交流电,基于有限元原理对海底电

表2 特性材料参数

Table 2 characteristic material parameters

材料	<i>a</i>	<i>F</i>	<i>K<sub>b</sub></i>	<i>b</i>
XLPE	8.1×10 <sup>6</sup>	1.2×10 <sup>-19</sup>	1.3×10 <sup>-23</sup>	1.4×10 <sup>-7</sup>
SR	1.9×10 <sup>6</sup>	1.1×10 <sup>-19</sup>	1.3×10 <sup>-23</sup>	5.4×10 <sup>-8</sup>

缆终端进行电场—温度场的耦合的仿真,设置终端初始温度、环境温度均为20℃。对采用固定材料的绝缘层与应力锥绝缘部分的终端进行仿真,见图3。绝缘部分、应力锥绝缘部分与应力锥金属部分三者交界点电场为4.405 MV/m,交界处最大电场为5.205 MV/m,电场分布不均匀且交界附近的电场普遍较大,电场变化梯度较大,出现强电场集中于交界面处的现象。

#### 3.1 电缆终端应力锥绝缘与绝缘层材料优化

为了优化海底电缆终端的电场分布,可改变应力锥绝缘与绝缘层材料,当绝缘层与应力锥绝缘部分采用非线性材料时,即电导率采用式(7)表示,由于非线性材料取决于初始温度和电场,其初始温度和电场对仿真有较大影响,所以当使用非线性材料仿真时,可分为以下电流—温度、温度—电压法两步进行。

为验证此法的准确性,可通过对此海底电缆终

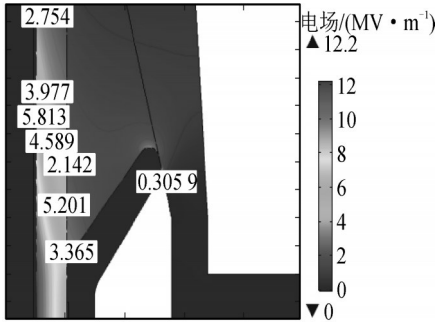


图3 采用固定材料时电场分布

**Fig. 3 The distribution of electric field with fixed material**  
 端的载流量仿真与计算对比,220 kV 电缆线芯运行允许的最高温度为 90 ℃,以本次海底电缆的模型通过热路法计算的终端载流量<sup>[14-15]</sup>为 2 523.7 A,使用温度迭代法进行载流量仿真,仿真的允许的最大电流为 2 538.6 A,对比标准计算值大 0.5%,由于 IEC-60287—2006 标准<sup>[16]</sup>中的交流电阻系数计算值偏大,从而使导体损耗的计算值偏大,允许的最大电流计算值偏小,此误差属于正常范围。所以,使用非线性材料时可将电热场耦合仿真分为两步:

1)在终端金具上施加 800 A 的交流电流,通过电热耦合来研究整个电缆终端的温度分布,见图 4。电缆线芯温升最大,最高温度达到 23.166 7 ℃,温升最小在环氧套管边界,温度为 20.001 9 ℃。

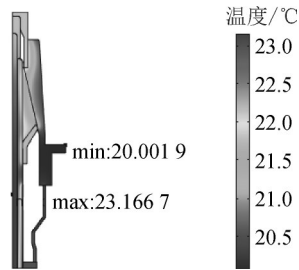


图4 海底电缆终端温度分布

**Fig. 4 Temperature distribution of submarine cable terminal**

使用施加电流后的温度作为电压仿真的温度初始值以及产生的电位差作为电压仿真的电压初始值,绝缘部分可按式(4)设置热源,再进行交流耦合仿真,此时交界点的电场为 3.267 MV/m,较固定材料交界点处电场值 4.405 MV/m 降低 25.83%,交界处最大电场为 4.533 MV/m,较固定材料的 5.205 MV/m 降低了 12.91%,且三者交界面的电场分布更加均匀,电场变化的梯度减小,应力锥表面切向场强大幅减小,所以采用非线性材料可较好的优化海底电缆终端场强分布。

### 3.2 电缆终端金属应力锥形状优化

改变应力锥形状也是优化电缆终端电场分布的有效途径之一,但由于预置式(插拔式)应力锥结构与形状相对固定,所以终端整体形状无法做很大的改变,只能改变应力锥绝缘部分和导电部分的分配比例和金属应力曲率来优化电场分布。

#### 3.2.1 应力锥金属部分的曲率优化

优化应力锥金属部分的曲率可优化电缆终端电场的分布,由于改变应力锥金属部分的曲率,交界点也发生改变,改为以交界面上的最大电场为判断电场优化的依据,取应力锥金属部分的曲率半径范围为 10~100 mm 进行仿真,交界面场强最大值见图 5。

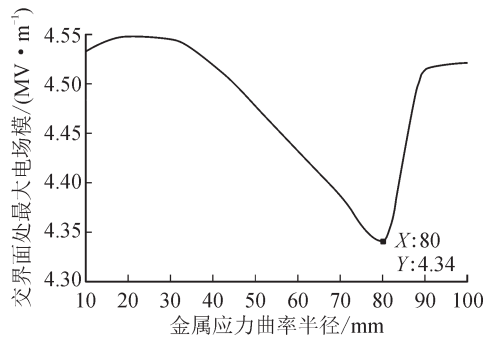


图5 交界处场强最大值

**Fig. 5 The maximum of junction field strength**

当金属应力半径为 80 mm 时,交界处场强最大值最小为 4.341 MV/m,对比未优化曲率的最大电场值 4.533 MV/m 降低 4.47%,三者交界面电场分布更加均匀,交界面处电场集中程度明显减缓,进一步优化电场分布。

#### 3.2.2 应力锥绝缘与金属部分比例的优化

文[17-21]及实际生产要求,对本次模型应力锥金属部分只做小幅度调整,在现有应力锥金属部分的长度增加 0~20 mm 进行仿真,见图 6。

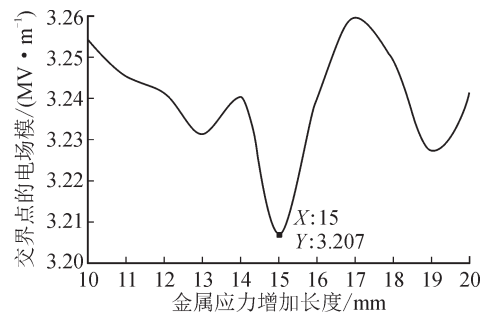


图6 不同长度交界点的场强值

**Fig. 6 The strength value of the junction of different lengths**

当金属应力长度增加 15 mm 时,交界点处场强最小且电场分布最优,交界点电场最小为 3.206 MV/m,

相较未增加应力锥金属部分的电场 3.266 MV/m 降低 1.87%, 交界处的最大电场为 3.951 MV/m, 相较未增加应力锥金属部分的电场 4.341 MV/m 降低 9.87%, 三者交界面的电场分布均匀, 交界面电场变化梯度减小, 交界点电场优化明显。

### 3.2.3 应力锥金属曲率与比例的优化

通过对以应力锥的曲率与分配比例分别变量, 寻求目标函数(电场)的最小化的仿真研究, 在其确定的变量范围内, 即曲率 75~85 mm, 增加金属长度 10~20 mm, 选取应力锥金属部分曲率与绝缘、金属分配比例同时为变量, 以交界点处的电场为目标函数, 寻求交点处电场及交界面电场最大场强的最小化, 结果见图 7。

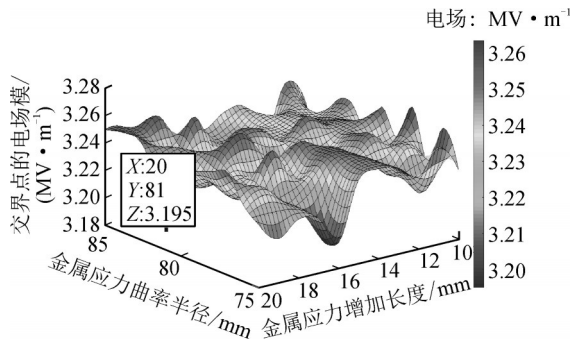


图 7 不同曲率与比例的交界点电场强度

Fig. 7 The electric field intensity of the junction point with different curvature and proportion

当金属应力锥半径取 81 mm, 金属部分增加 20 mm 时, 交界点电场最小为 3.195 MV/m, 交界处的最大电场为 3.927 MV/m, 相较于分别调整曲率与长度的场强分布均有所降低, 见图 8。

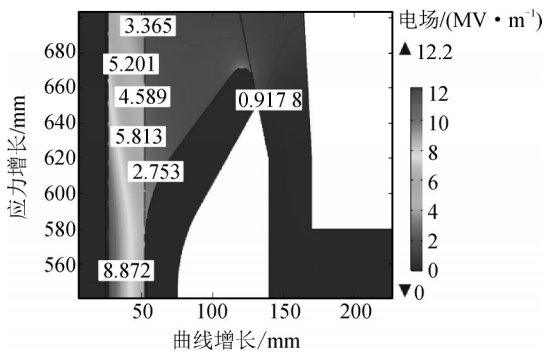


图 8 曲率 81 mm 金属应力增长 20 mm 时电场分布

Fig. 8 The distribution of electric field when 81 mm metal stress increases 20 mm

对比采用固定材料时未优化的终端电场分布情况, 如图(3)所示, 应力交界点的电场强度降幅达到 27.47%, 交界面上最大电场强度降幅也高达 24.55%, 降低幅度达到最大, 交界处电场分布更为均匀, 场强变化梯度很大程度减缓。

综合以上不同优化方式下电场优化情况, 其交

界点电场与交界面最大电场均得到改善, 见图 9。

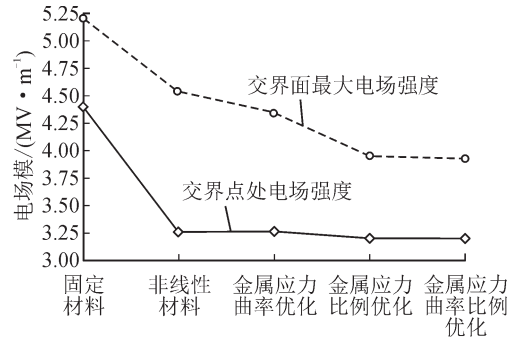


图 9 不同优化方式的电场强度

Fig. 9 electric field intensity of different optimization methods

## 4 结语

文中采用有限元法对海底电缆终端进行多物理场耦合仿真, 利用电流—温度—电压法对改变主绝缘与应力锥绝缘部分材料时的电场进行仿真分析, 发现采用由温度和电场共同控制的非线性材料对终端电场有很大改善作用, 并对金属应力曲率和金属与绝缘部分比例分配分别优化, 对比同时对曲率和比例分配优化的电场情况, 结果表明: 当金属应力的曲率半径为 81 mm, 增加金属应力 20 mm 时, 电场改善程度最大, 应力交界点的电场强度降幅达到 27.47%, 交界面上的最大电场强度降幅也高达 24.55%, 对电缆终端电场分布均匀度很大改善, 提高了海底电缆终端的可靠性与安全性。

## 参考文献:

- [1] 胡 军, 赵孝磊, 杨 霄, 等. 非线性导电材料应力锥改善电缆终端电场强度分布[J]. 高电压技术, 2017, 43(2): 398-404.  
HU Jun, ZHAO Xiaolei, YANG Xiao, et al. Improving the electric field strength distribution of cable terminals by stress cone of nonlinear conductivity material[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(2):398-404.
- [2] 段佳冰, 尹成群, 吕安强. 基于 IEC 60287 和有限元法的高压海底电缆温度场分析方法[J]. 高压电器, 2014, 50(1):1-6.  
DUAN Jiabing, YIN Chengqun, LYU Anqiang et al. Analysis method for temperature of high voltage submarine cable based on IEC 60287 and finite element[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(1):1-6.
- [3] 王洪波. 非线性防电晕结构的电—热场耦合仿真分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2010.  
WANG Hongbo. Electric thermal field simulation analysis on the coronasproof structure with nonlinear materials[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology,

- 2010.
- [4] 宫瑞磊,刘 博,肖风良,等.基于时域有限元法的电缆终端电场分析[J].高压电器,2010,46(8):48-51.  
GONG Ruilei, LIU Bo, XIAO Fengliang, et al. Analysis of cable terminations based on time-domain finite element method[J]. High Voltage Apparatus 2010, 46(8): 48-51.
- [5] 连甲强,解克佳,唐东升.非线性应力管电缆终端的电—热场分析[J].高压电器,2011,47(5):49-53.  
LIAN Jiaqiang, XIE Kejia, TANG Dongsheng. Electric-thermal field analysis for cable terminals equipped with nonlinear stress control tubes[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(5):49-53.
- [6] 韩 轩,马永其.高压交联电缆终端预制橡胶应力锥的研究进展[J].绝缘材料,2007,40(4):12-17.  
HAN Xuan, MA Yongqi. Research progress of prefabricated rubber stress cone used in high voltage cross-linking cable termination[J]. Insulating Materials, 2007, 40(4):12-17.
- [7] 曾 彤.±160 kV 高压直流 XLPE 绝缘电缆终端电场热场仿真研究[D].广州:华南理工大学,2016.  
ZENG Tong. Electric and thermal field simulation on ±160 kV HVDC XLPE insulation cable terminal[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2016.
- [8] 高 寒,李卫国,贾国滨,等.320 kV XLPE 高压直流电缆终端电场分析[J].绝缘材料,2017,50(6):48-53.  
GAO Han, LI Weiguang, JIA Guobin, et al. Electric field analysis of 320 kV XLPE HVDC cable terminal[J]. Insulating Materials, 2017, 50(6):48-53.
- [9] 王 刚,安 琳.COMSOL Multiphysics 工程实践与理论仿真:多物理场数值分析技术[M].北京:电子工业出版社,2013.  
WANG Gang, An Lin. Engineering practice and theoretical simulation of COMSOL multiphysics: Multi physical field numerical analysis technology[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2013.
- [10] 高德健.HVDC 电缆终端电场分布特性及试验终端的设计[D].哈尔滨:哈尔滨理工大学,2017.  
GAO Dejian. Research on the electric field distribution in HVDC cable terminal and the design of test terminal[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2017.
- [11] High-voltage switchgear and controlgear - Part 209: Cable connections for gas-insulated metal-enclosed switchgear for rated voltages above 52 kV Fluid filled and extruded insulation cables Fluid filled and dry type cable terminations IEC 62271-209:2007[S].2007.
- [12] 胡 军,赵孝磊,杨 霄,等.电导及介电自适应调控的复合绝缘材料及其应用[J].高电压技术,2016,42(9):2902-2908.  
HU Jun, ZHAO Xiaolei, YANG Xiao, et al. Composite insulating material with self adaptively adjusted conductivity/permittivity and its applications[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(9):2902-2908.
- [13] 陈庆国,尚南强,秦艳军,等.纳米碳化硅/液体硅橡胶复合材料非线性电导特性[J].高电压技术,2017,43(11):3521-3527.  
CHEN Qingguo, SHANG Nanqiang, QIN Yanjun, et al. Non-linear conductivity characteristic of SiC/LSR nano-composite [J]. High Voltage Apparatus. 2017, 43(11):3521-3527.
- [14] 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.  
HAO Yanpeng, HUANG Jichao, YANG Lin, et al. Analytical calculation method of steady-state current capacity of HVDC cables[J]. Power System Technology, 2016, 40(4): 1283-1288.
- [15] 梁永春.高压电力电缆载流量数值计算[M].北京:国防工业出版社,2012.  
LIANG Yongchun. Numerical calculation of current carrying capacity of high voltage power cable[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2012.
- [16] Calculation of the current rating-Part 1: current rating equations(100% load factor) and calculation of losses: IEC 60287-1:2006[S].2006.
- [17] 陈庆国,秦艳军,尚南强,等.温度对高压直流电缆中间接头内电场分布的影响分析[J].高电压技术,2014,40(9):2619-2626.  
CHEN Qingguo, QIN Yanjun, SHANG Nanqiang, et al. Influence analysis of temperature on electric-field distribution in HVDC cable joint[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 40(9):2619-2626.
- [18] 唐 科,文 武,丁俊杰,等.基于有限元法的电缆接头温度场仿真[J].电力建设,2016,37(2):145-150.  
TANG Ke, WEN Wu, DING Junjie, et al. Temperature field simulation of cable joints based on FEM[J]. Electric Power Construction, 2016, 37(2):145-150.
- [19] 孙 略.高压直流电缆附件硅橡胶基非线性复合材料研究[D].哈尔滨:哈尔滨理工大学,2017.  
SUN Lue. Study on silicone rubber nonlinear composites for HVDC cable accessories[D]. Harbin: Harbin University of science and technology, 2017.
- [20] DEIPINO S, FABIANI D, MONTANARI A. Feature article-polymeric HVDC cable design and space charge accumulation, Part 2: Insulation interfaces[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2008, 24(1):14-24.
- [21] LIU Y H, CHENG C, YU M H. Application and analysis on frequency conversion series resonance technology in 220 kV cable withstand voltage testing[C]//2016 International Conference on Electrical Engineering and Automation (ICEEA2016).[S.l.]: Science and Engineering Research Center, 2016:5.
- 谢 晨(1994—),男,硕士研究生,专业方向为高电压与绝缘技术。
- 潘文霞(1961—),女,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为可再生能源发电技术、高电压技术。