

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2016.04.025

铜屏蔽层间隔缠绕引发电力电缆过热的故障分析与仿真计算

蒲丽娟, 刘 念, 刘航宇, 李 娟

(四川大学电气信息学院, 成都 610065)

摘要: 为了研究电力电缆因铜屏蔽层缠绕方式导致的过热故障甚至击穿问题, 文中以某 500 kV 变电站 35 kV 交流侧融冰管母线的着火故障为例, 通过分析交流耐压实验下的红外热图像和对地电流, 建立铜屏蔽层缠绕结构的电路模型分析热故障机理。进一步建立 35 kV 单芯电缆的三维有限元仿真模型探讨铜屏蔽层间隔缠绕对电缆温度分布的影响。结果表明: 外半导体层上流过的电流是导致电缆表面温度升高的主要原因, 铜屏蔽层间隔缠绕将使间隔边缘与外半导体层接触位置流过的电流增大而引起过热故障, 这种过热故障与外施电压的幅值、频率以及铜屏蔽层铜带缠绕间距之间的关系密切。

关键词: 电力电缆; 铜屏蔽层; 间隔缠绕; 过热故障; 温度场; 有限元

Analysis and Simulation Calculation of Power Cable Overheating Fault Caused by Copper Shield Interval Winding

PU Lijuan, LIU Nian, LIU Hangyu, LI Juan

(School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: For the purpose of finding out the relationship between the fault (overheating fault or even breakdown fault) and the copper shielding layer winding type, an ignition fault occurred at the 35 kV ice melting tube bus in a 500 kV substation AC side has been introduced as an example in this paper. By analyzing the infrared thermal images and grounding current under AC withstand voltage experiments, a copper shielding layer winding circuit model has been established, which is used to analyze the principle of the overheating fault. In the further step, a three dimensional finite element model of 35 kV single core cable is established to study the effect of the copper shielding layer space which may affect the distribution of the cable temperature. The result shows that current flowing through the outer semi-conductive layer is a major cause of cable surface temperature rising, furthermore the interval winding of the copper shielding layer will lead to the current rising at the contact position of the edge and outer semi-conductive layer and the current rising will cause the overheating fault. This type of overheating fault has a close relationship with amplitude and frequency of the applied voltage and the winding space of the copper shielding layer.

Key words: power cable; copper shield layer; interval winding; overheating fault; temperature field; finite element

0 引言

电力电缆中的金属屏蔽层对于电缆的安全运行有着重要的作用, 1 kV 及以上的电缆必须有金属屏蔽结构^[1-3]。金属屏蔽层中的铜屏蔽层通过接地实现对电缆本体的静电屏蔽, 同时流过电缆接地电流、短路电流等。然而由于实际制造或施工原因, 铜

屏蔽层常出现打折、断裂等问题, 导致电缆发生过热或击穿等故障。研究电缆铜屏蔽层结构及布置方式对于理解这些故障问题、解决实际电缆故障具有重要意义。

国内外研究者关于电力电缆铜屏蔽层故障引起的绝缘问题进行了大量研究, 认为电缆铜屏蔽层产生的感应电压和环流会导致电缆温度异常甚至击穿问题^[4-7], 发生短路故障时, 电缆铜屏蔽层可能

承受不了过大的短路电流冲击而发生烧蚀^[8-9],但就铜屏蔽层不同缠绕方式导致的过热故障却鲜有涉及。文[10]中通过实验测量,指出电缆铜屏蔽带间隔缠绕时,外半导体层与铜带之间形成的纵向电势增大到一定程度后,发生局部放电会导致电缆烧蚀故障。但对于通过外半导体层的容性电流对电缆温度分布的影响却没有进行探讨和分析,并且缺乏仿真与实验相结合的研究。关于外施电压幅值、电压频率以及铜屏蔽层铜带缠绕间距的改变将导致电缆温度场如何变化也没有提及。

文中针对某 500 kV 变电站 35 kV 交流侧融冰管母在耐压实验中出现的鼓包、冒烟、着火等过热问题^[10],通过交流耐压实验下的红外热成像观察研究不同结构形式的铜屏蔽层加压后的温度分布特征,基于伏安特性测试建立铜屏蔽层间隔缠绕的电路模型,并建立三维有限元电缆模型进行仿真验证并分析故障原因。这些工作有助于理解电缆铜屏蔽层过热故障的机理,为工业电力电缆接地铜屏蔽层的缠绕方式提供一定的理论依据。

1 实验现象

1.1 研究对象

文中讨论的实验对象为某 500 kV 变电站 35 kV 交流侧融冰管母线。管母线主要应用于输电导线与变电设备间的导体连接、输电导线间的跳线连接、电力设备中的导体连接以及大电流直流融冰装置^[11]中的过流导体连接,是输变电系统中关键的设备之一。管母线具备电缆的结构特征,是通流能力大且对流散热要求高的电缆,因此以管母线的过热故障为例来分析电缆的铜屏蔽层发热故障机理及物理特性具有代表意义。

1.2 过热故障

实验的一点接地实验装置包括串联谐振装置、样本和红外成像测量等部分。首先通过串联谐振装置对管母线施加 $1.7U_0$ 交流电压进行半小时的耐压实验。在加压过程中,未到半小时管母线表面便开始出现冒烟,近距离观察发现表面烧蚀产生气泡,将气泡出现位置进行解体后发现,管母线铜屏蔽层采用间隔缠绕的方式包绕,铜屏蔽层中间露出外半导体层,加压烧蚀后铜屏蔽层的边缘位置有明显的发热痕迹,烧蚀主要发生在铜带边缘的半导体层处,见图 1。

1.3 红外热成像实验

为了进一步观测铜屏蔽层间隔缠绕在加压后的温度特征,将剥去外护套层露出裸露铜屏蔽层的

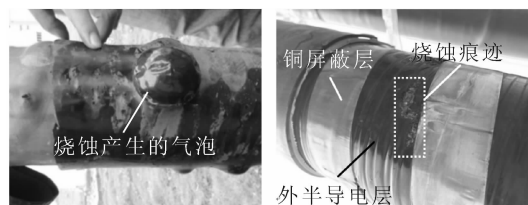


图 1 管母线加压实验中的烧蚀现象及其内部情况

Fig. 1 Ablation phenomenon and internal situation in the tube bus pressor test

管母线进行 $1.7U_0$ 的交流耐压实验,使用红外热像仪进行温度分布观测。随着实验进行至约 0.5 h 时,管母线表面温度从 $33.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 上升至 $149.7\text{ }^{\circ}\text{C}$,在铜屏蔽层边缘与半导体层相接处出现明显的环状分布的高温带,见图 2。



图 2 铜屏蔽层间隔缠绕加压后的表面温度分布

Fig. 2 Surface temperature distribution of the copper shield interval under pressure

为了验证环状温度带是由于铜屏蔽层间隔缠绕引起的,使用铜带紧密包裹这段裸露的半导体层后同样加压约半小时,实验中管母线表面温度仅由 $38\text{ }^{\circ}\text{C}$ 上升到 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$,且无明显的温度过高区域。

1.4 伏安特性测试

通过绝缘电阻实验及其他绝缘性能实验发现管母线绝缘性能良好^[10],这说明此类热故障并非由绝缘问题引起。为了找出间隔缠绕铜屏蔽带引发管母线过热的故障原因,进一步测试了铜屏蔽层接地电流的伏安特性,测试时电压取管母线线芯电压,电流取铜屏蔽层的接地电流,测试结果为随着外施电压的增大,接地电流也随之增大,近似呈线性增长。同时,对比线芯电压与铜屏蔽层上的接地电流两者相位发现,电流的相位角超前电压约 72° (即 3.2 ms),可见电流呈容性,见图 3。

2 分析讨论

2.1 铜屏蔽层不同缠绕方式下的电路模型

为了分析铜屏蔽间隔缠绕引发电力电缆过热故障的机理,该节将建立铜屏蔽层不同缠绕方式下的电路模型,更为直观地分析铜屏蔽层缠绕方式对运行电缆温度分布的影响。

当铜屏蔽层完全缠绕外半导体层时,电缆剖面

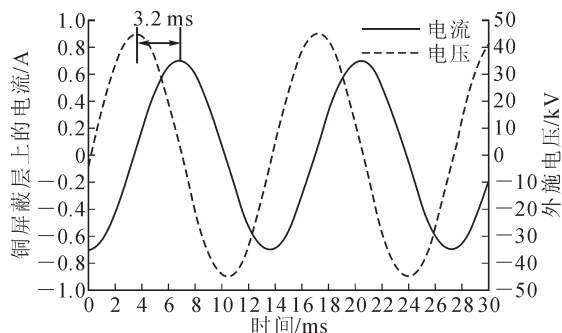


图3 铜屏蔽层接地电流与外施电压对比

Fig. 3 Copper shield grounding current compared with applied voltage

结构和等效电路见图4。单位长度的电缆等效为由缆芯与铜屏蔽层构成的平板电容器 C_A 和电缆绝缘电阻 R 组成的并联电路, 由于 R 极大而忽略泄漏电流, 电缆正常运行时铜屏蔽层上流过电容电流 I_C 。

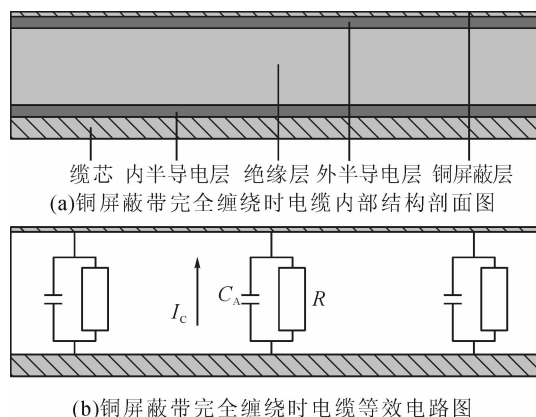


图4 铜屏蔽带完全缠绕时电缆的剖面结构及等效电路

Fig. 4 Cable section structure and equivalent circuit when copper shield completely winding

当铜屏蔽层间隔缠绕外半导体层时, 电缆剖面结构与等效电路见图5。相比于铜屏蔽层完全缠绕的情况, 裸露的外半导体层由于电导率较大而不能忽视其等效电阻, 假设某一点与相邻铜带之间单位长度的等效电阻为 R_x , 等效电容为 C_B , C_B 因面积小而值极小, 因此间隔缠绕铜屏蔽层时未缠绕铜带的位置主要表现电阻性。当电缆缆芯施加交变电压时, 结合图3中可以知道铜屏蔽层上流过容性电流。对于未缠绕铜带的外半导体层, C_A 上流过的电容电流将通过电阻性的外半导体层流向接地铜屏蔽层, 从而导致发热。

2.2 电热场理论分析

通过电路模型分析得出了铜屏蔽层间隔缠绕发热的原因, 这里继续结合电热场理论分析过热故障原因及特征。

电路模型中指出未搭接铜屏蔽层且呈电阻性的外半导体层上流过充电电流时导致外半导体层

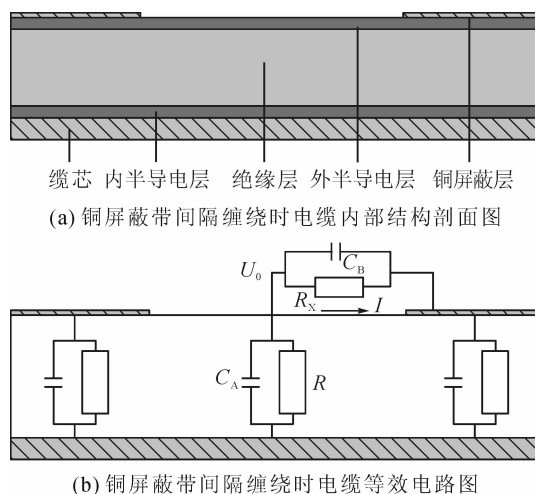


图5 铜屏蔽带间隔缠绕时电缆的剖面结构及等效电路

Fig. 5 Cable section structure and equivalent circuit when copper shield interval winding

发热, 其发热原理即电流热效应的焦耳定律: $P=I^2R$, 这与图1现象是吻合的。

进一步分析未搭接铜屏蔽层的外半导体层上的发热特征, 见图6, 在未搭接铜屏蔽层的外半导体层上, 从其中间位置(距离两侧铜带最远)向铜屏蔽层开始按单位长度编号 $0, 1 \dots N$, 点 X 在交变电场中将向地流过电流 I_x , 视外半导体层均匀分布表面电阻, 那么点 X 流过的总电流应为

$$I = \sum_{i=1}^x I_{x_i} \quad (1)$$

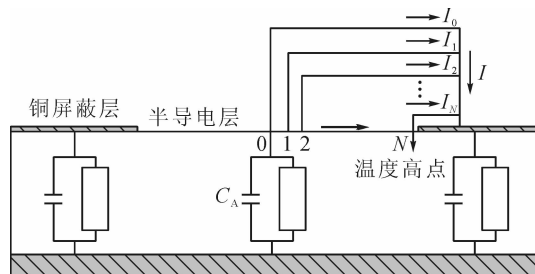


图6 电缆铜屏蔽层感应电压电流分布

Fig. 6 Copper cable shield induced voltage and current distribution

电流通过外半导体层流向接地端, 因此在外半导体层靠近铜屏蔽层的位置(如 N 所示位置), 电流因叠加其他位置的电流而最大, 发热也最严重, 形成如图1中更为靠近铜屏蔽层的过热烧蚀痕迹。

3 有限元仿真

3.1 电场与温度场仿真

为了对实验现象及理论分析结果进行仿真验证, 并推测其他条件下的过热情况, 建立电缆铜屏蔽层铜带全部缠绕及间隔缠绕两种不同结构下的三维

有限元模型,利用瞬态温度场仿真计算模型的温度分布情况。仿真中的电缆尺寸见表1,参数设置见表2。电缆金属缆芯施加正弦电压: $35 \times 10^3 \cdot \sin[100\pi t]$ (1/s) V。

表1 电缆结构尺寸

Table 1 Cable structure size mm				
导体半径	内半导厚度	外半导厚度	绝缘层厚度	铜屏蔽层厚度
4.15	1.00	1.00	10.50	0.12

表2 电缆材料参数设置

Table 2 Cable material parameter settings			
材料/参数	相对介电常数	电导率/(S·m ⁻¹)	导热系数/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)
铜芯	1.0	5.998×10^7	400.00
内半导体层	100.0	1.000×10^{-8}	1.30
XLPE绝缘	2.5	1.000×10^{-14}	0.32
内半导体层	100.0	1.000×10^{-8}	1.30
铜屏蔽层	1.0	5.998×10^7	400.00

任何传热问题的边界条件均可归结为3类边界条件^[12-14]。第1类边界条件为已知边界温度;第2类边界条件为已知边界法向热流密度;第3类边界条件为对流边界条件,即已知对流换热系数和流体温度。3类边界控制方程见式(2)~(4)。

$$T(x, y)_r = f(x, y)|_r; \quad (2)$$

$$k \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_r + q_2 = 0; \quad (3)$$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_r = h(T_r - T_f)。 \quad (4)$$

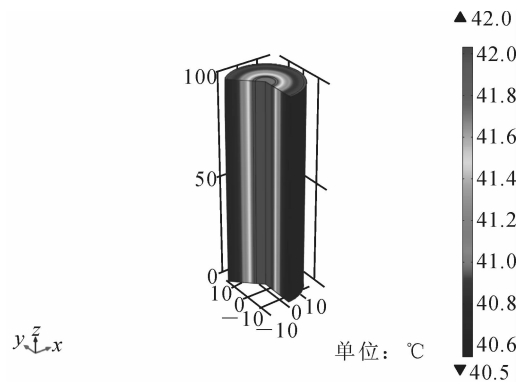
电力电缆在电流作用下产生的功率损耗致使电缆温度升高,由于外施交流电压呈周期变化,因此在电场中计算出半小时内电缆各部分所产生的平均功率损耗代入温度场作为热源,电缆初始温度设定为实验时的初始温度38℃,具有内热源的固体导热偏微分方程^[15]见式(5)。

$$\nabla \cdot (k \nabla T) = -Q + c \frac{\partial T}{\partial t}。 \quad (5)$$

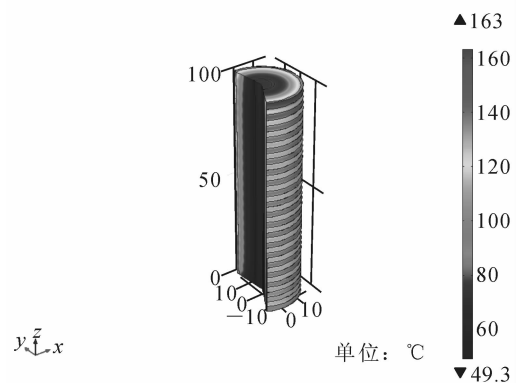
式(5)中: T 表示温度场内各点温度; k 、 c 、 Q 各为微元体的导热系数、比热容以及单位体积中内热源的生成热; t 表示时间。

当电缆铜屏蔽层铜带完全缠绕半导体层布置时,三维有限元模型见图7(a)。对比实验结果,取0.5 h的温度计算结果进行说明。0.5 h电缆整体温度上升幅度很小,温度由内而外降低,缆芯温度上升4℃,最外层温度上升2℃,并未观测到明显的温度高点。为了对比,在同样幅值和频率的正弦电压

下,铜屏蔽带间隔缠绕0.5 h时的电缆温度分布见图7(b)。缆芯至绝缘层温度逐渐降低,但在外半导体层温度明显升高,并且外半导体层与铜带相交处的温度甚至高于缆芯温度,最高达到163℃,发热严重。仿真结果与实验结果相符合,说明仿真模型能很好地模拟实验情况。



(a)铜屏蔽层完全缠绕0.5 h的温度分布



(b)铜屏蔽层间隔缠绕疏绕0.5 h的温度分布

图7 两种铜屏蔽层缠绕方式下的温度分布

Fig. 7 The temperature distribution under two kinds of copper strip layout

3.2 各参数对过热带的影响

基于仿真模型进一步探讨如外施电压幅值、电压频率以及间隔缠绕间距等物理参数对电力电缆铜屏蔽层间隔缠绕时过热带的影响,这些分析有助于找出间隔缠绕影响铜屏蔽层温度分布的规律,帮助优化电缆结构设计。

3.2.1 外施电压幅值对过热带的影响

电缆铜屏蔽带间隔缠绕时,呈电阻性的外半导体层流过容性充电电流导致其发热,外施电压幅值越大,所通过的容性电流也越大。因此保持间距不变,在工频50 Hz下,随着电压幅值的增加,电缆表面温度近似成比例增长,结果见图8。在铜带完全缠绕外半导体层时,电流直接通过铜屏蔽层到地,而没有经过外半导体层,焦耳热效应不明显,因此随着电压幅值的升高电缆温升并不明显。

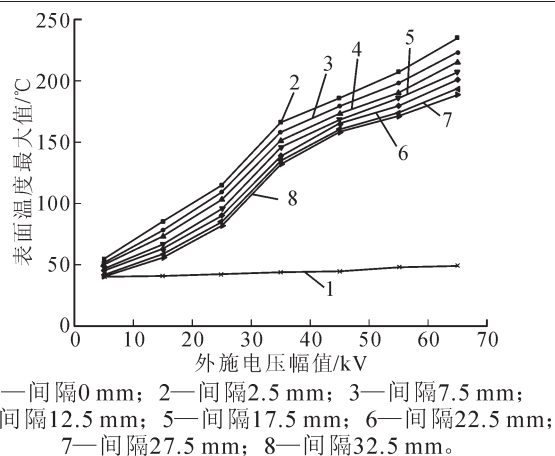


图8 铜屏蔽层不同间距时温度随电压幅值变化

Fig. 8 Temperature variation with voltage amplitude when copper with different spacing

3.2.2 外施电压频率对过热带的影响

由电缆电路模型可知,电缆内部等效为一个电容,电容通交流阻直流,通高频阻低频。因此在35 kV 直流电压下,无容性电流流过外半导体层,电缆表面最高温度无明显变化。施加交流电压时,频率越大,耦合至铜屏蔽层的电容电流越大,导致发热增大。为了分别表征施加直流、低频以及高频电压下频率对电缆温度场分布的影响,所取频率跨度较大,分别为0、50、250、500、1 000、2 000、10 000 Hz,见图9,电压幅值保持为35 kV,铜屏蔽带间距不变时,随着频率的增加,温度先升高很快,而后趋势逐渐变缓。

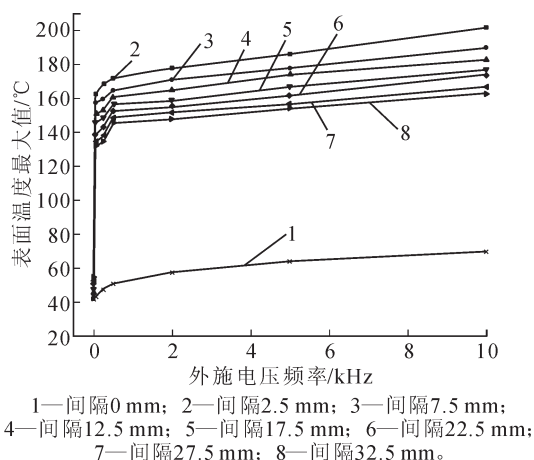


图9 铜屏蔽带不同间距时温度随电压频率变化

Fig. 9 Temperature variation with voltage frequency when copper with different spacing

3.2.3 铜屏蔽带不同间距对过热带的影响

为了探讨铜屏蔽层间隔缠绕时间距大小对铜屏蔽层过热带的影响,见图8、9。保持电压幅值为35 kV、工频50 Hz不变时,电缆表面温度随着铜屏蔽带间距增加而降低。这是因为在同一段电缆长度

上,随着间距增大,相当于减少了该段电缆的热源个数,则相应的边界热源也随之减小,并且间距增大会导致散热增加,因此电缆表面温度会随之降低。

4 结论

文中基于文[10]中提及的融冰管母铜屏蔽层的过热问题,建立了电缆电路模型对实验结果进行进一步分析,并通过三维有限元仿真计算,得出以下结论:

1) 电缆铜屏蔽层间隔缠绕时在交流电压下将发生过热烧蚀故障,其产生机理为交变电压耦合至铜屏蔽层的容性电流通过呈电阻性的外半导体层时的焦耳热效应。

2) 电缆铜屏蔽层完全缠绕外半导体层时电缆整体没有明显的温升。间隔缠绕时随着间距的增大表面最大温度逐渐降低,但间距过大无法实现静电屏蔽;间距不变时,表面最大温度会随着电压幅值和频率的增大而升高。因此电缆铜屏蔽层应采用铜带完全缠绕或铜丝紧密缠绕外半导体层的方式,在高压高频的工况下,尤其不能使用铜带间绕屏蔽方式,容易引发电力电缆过热烧蚀故障。

参考文献:

- [1] GB/T 12976.2—1991 额定电压35 kV及以下铜芯铝芯纸绝缘电力电缆[S].1991.
- [2] 王春江. 电线电缆手册[K]. 北京:机械工业出版社出版,2001.
- [3] 朱欣娣,武宇波,魏莹莹. 中压交联电缆金属屏蔽层的几个关键问题的讨论[J]. 电线电缆,2009,8(4):11-13.
ZHU Xindi, WU Yubo, WEI Yingying. Discussion on some key problems about the metallic shield in MV XLPE cables[J]. Electric Wire & Cable, 2009, 8(4): 11-13.
- [4] XIA Rong, LUO Junhua, LI Wenjie. Study on on-line detection and rejection of induced voltage and circulating current in metal sheath of 35 kV single-core XLPE cables with large length and section[C]//PEITS 2010. Guangzhou: Shenzhen, 2010:1-5.
- [5] 王敏. 10 kV单相电力电缆屏蔽层的感应电压和环流[J]. 高电压技术,2002,28(5):30-32.
WANG Min. The induced voltage and circulating current in the metal shield of 10 kV single phase electrical cables[J]. High Voltage Engineering, 2002, 28(5): 30-32.
- [6] 斯培灿. 单芯中压交联电缆金属屏蔽层的使用和选择[J]. 电线电缆,2004,3(3):22-24.
SI Peican. Use and selection of metal shield of single conductor MV XLPE cable[J]. Electric Wire & Cable, 2004, 3(3): 22-24.

- [7] 姜庆密, 亓富军, 田纪法. 复合屏蔽绝缘管母线局部发热成因及案例处理[J]. 电气技术, 2013(9):53-57.
JIANG Qingmi, QI Fujun, TIAN Jifa. The causes and case processing of composite shielding insulation tube bus local heat[J]. Electrical Engineering, 2013(9):53-57.
- [8] 李煜. 中压电缆铜屏蔽层熔断引起事故扩大的分析[J]. 华东电力, 2003, 31(12):78-79.
LI Yu. Analysis on accident expanding caused by fusing of copper shielded layer on medium-voltage cable[J]. East China Electric Power, 2003, 31(12):78-79.
- [9] 徐刚, 吴炯. 中高压电力电缆金属屏蔽结构特性分析[J]. 电线电缆, 2004, 5(5):19-26.
XU Gang, WU Jiong. Analysis of the constructional characteristics of the metal screen used in MV/HV power cables[J]. Electric Wire & Cable, 2004, 5(5):19-26.
- [10] 郭飞, 邓元实, 刘益岑, 等. 某500 kV变电站直流融冰装置35 kV管母故障分析[J]. 四川电力技术, 2014, 37(5):24-26.
GUO Fei, DENG Yuanshi, LIU Yicen, et al. Fault analysis of 35 kV tube of DC ice melting device in a 500 kV substation[J]. Sichuan Electric Power Technology, 2014, 37(5):24-26.
- [11] 傅闯, 许树楷, 饶宏, 等. 交流输电系统直流融冰装置设计及其应用[J]. 高电压技术, 2013, 39(3):705-711.
FU Chuang, XU Shujie, RAO Hong, et al. Design and application of DC deicer for AC transmission system[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(3):705-711.
- [12] 王有元, 陈仁刚, 陈伟根, 等. 有限元法计算地下电缆稳态温度场及其影响因素[J]. 高电压技术, 2009, 35(12):3086-3092.
WANG Youyuan, CHEN Rengang, CHEN Weigen, et al. Calculation of static temperature field of buried cable based on FEM and analysis of influential factors[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(12):3086-3092.
- [13] 罗涛, 陈民铀, 曾灿. 电力电缆安全监测中温度场和电场数值关系分析[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(5):20-24.
LUO Tao, CHEN Minyou, ZENG Can. Study of numerical relationship between temperature and electric field in power cables safety monitoring[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(5):20-24.
- [14] 梁永春, 李彦明, 李延沐, 等. 地下电缆群暂态温度场和短时载流量数值计算方法[J]. 电工技术学报, 2009, 24(8):34-38.
LIANG Yongchun, LI Yanming, LI Yanmu, et al. Numerical method to calculate the transient temperature field and short-term ampacity of underground cable system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(8):34-38.
- [15] 孔祥谦, 王传溥. 有限单元法在传热学中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 1981.
KONG Xiangqian, WANG Chuanpu. The application of finite element method in heat transfer [M]. Beijing: Science Press, 1981.
- 蒲丽娟(1991—), 女, 硕士研究生, 研究方向为高电压技术应用与电力设备故障诊断方面工作。
- 刘念(1956—), 男, 教授, 硕士研究生导师, 研究方向高电压技术与设备故障诊断。
- 刘航宇(1990—), 男, 硕士研究生, 主要从事高电压技术应用与电力设备故障诊断方面工作。
- 李娟(1991—), 女, 硕士研究生, 主要从事高电压技术应用与电力设备故障诊断方面工作。

(上接第156页)

- (10):81-83.
ZENG Xiangjun, WU Zhihua, FENG Kaihui, et al. A transmission line icing thickness measurement method based on the traveling wave transmission time differences[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(10):81-83.
- [20] 敬华兵, 年晓红, 范瑞祥, 等. 直流融冰覆冰线路全控直流融冰电源及其控制切换策略[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(13):86-91.
JING Huabing, NIAN Xiaohong, FAN Ruixiang, et al. Control and switchover strategy of full-controlled ice-melting DC power for ice-covered power lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(13):86-91.
- 崔勇(1978—), 男, 博士, 电力工程师, 研究方向为电力系统运行与运营、电网规划、能源经济等。
- 聂新华(1971—), 男, 高级技师, 研究方向为输电线路运行与检修技术。