

接地不良缺陷对高压 XLPE 电缆终端的影响

叶冠豪, 吕立翔, 洪 露

(国网南京供电公司, 江苏 南京 210019)

摘要:为了研究接地不良对高压交联聚乙烯(XLPE)电缆终端的影响,通过 ANSYS 有限元分析软件建立电缆终端仿真模型以及在实验室环境下进行实物模拟实验,从高压 XLPE 电缆终端的电参数计算、温度场分析以及化学产物三方面,对接地不良缺陷给高压 XLPE 电缆终端造成的影响进行了研究,仿真及实物模拟实验结果均表明接地不良会导致高压 XLPE 电缆终端严重发热。研究结论说明终端接地不良将导致电压悬浮、流经绝缘屏蔽电流过大、温度异常升高,并会相伴产生金属氧化物、羧酸盐等多种化合物,对电缆安全运行造成严重影响。

关键词:高压 XLPE 电缆终端;接地不良;ANSYS;电参数;温度场分布;金属氧化物

中图分类号:TM247.1

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2018)04-0137-06

0 引言

伴随我国经济社会的不断发展及城市美化的客观需要,高压电力电缆在城市电网中得到了日益广泛的应用。以南京为例,2013—2016年,35 kV及以上电压等级电缆线路总长度平均年增速为9.2%,总里程已经突破了1300 km。其中,高压交联聚乙烯(XLPE)电缆以其电气性能优越、耐热性和机械性能好、最高允许连续运行工作温度高、载流负荷能力强、敷设安装方便等技术特点,已在国内的城市电网和大型水电站、变电站出线等领域得到广泛应用,成为目前使用比例最高的高压电力电缆^[1-5]。与此同时,已投入运行电缆线路的统计资料显示,国内电缆运行可靠性与欧美日等发达国家的运行可靠性相比仍有较大差距。2009—2011年,国家电网公司运营范围内高压XLPE电缆故障统计结果显示,终端故障占比约为20%。其中,接地不良导致的故障在终端故障中约占35%。接地不良缺陷给高压电力电缆的安全运行埋下了安全隐患,严重时将导致线路停运,造成巨大的经济损失^[6-10]。

电力电缆工作者在高压XLPE电缆终端故障上作了大量的研究工作。然而,以往在故障原因的研究中大多只给出定性的研究结论,较少进行定量的仿真计算。在接地不良后果分析中,绝大部分也仅进行了电学分析,而对于温度场以及相应化学产物的研究相当匮乏^[11-17]。

因此,为了全面、定量地研究接地不良对高压XLPE电缆终端的影响,文中在ANSYS有限元分析软件中建立了高压XLPE电缆终端的仿真模型,并模拟了接地不良缺陷,通过有限元软件定量仿真计

算接地不良带来的影响。与此同时,在实验室中构建了接地不良工况下的实物模拟实验,通过红外成像仪进行了温度场检测,并通过傅氏转换红外线光谱分析仪(Fourier transform infrared spectroscopy, FTIR)、扫描式电子显微镜X光微区分析(scanning electron microscope-energy dispersive spectrometer, SEM-EDS)等先进的材料学测试方法,分析了阻水带中产物成分,较为全面地研究了高压XLPE电缆终端接地不良带来的影响。

1 仿真软件与实验模型

1.1 仿真软件

文中采用了ANSYS有限元分析软件进行仿真计算。ANSYS软件是美国ANSYS公司研制的大型通用有限元分析软件。该软件功能强大,操作简单方便,可以方便地进行电学、热学,以及材料学的建模仿真计算,已成为有限元分析的标准软件。文中通过在ANSYS软件中建立高压XLPE电缆终端模型,并设置接地不良故障,实现对故障终端的电参数与温度场的分析计算。

1.2 实验模型

在实验室环境下,文中通过搭建电缆实物模型,进行了模拟实验分析。通过红外成像仪与钳形电流表、电压表进行测量,并与ANSYS软件中的仿真分析结果进行对比。为充分反映电缆终端接地不良故障,实物仿真中,未将终端尾管接地。

2 电缆终端接地不良的电学分析

2.1 电缆终端电参数理论计算

针对电缆终端接地不良故障,首先对电缆终端建立参数分析模型与电压等值计算模型。考虑到

缓冲层容抗值远小于电缆主绝缘的容抗值,在建立等值计算模型时将缓冲层忽略,建立的模型分别如图1、图2所示。

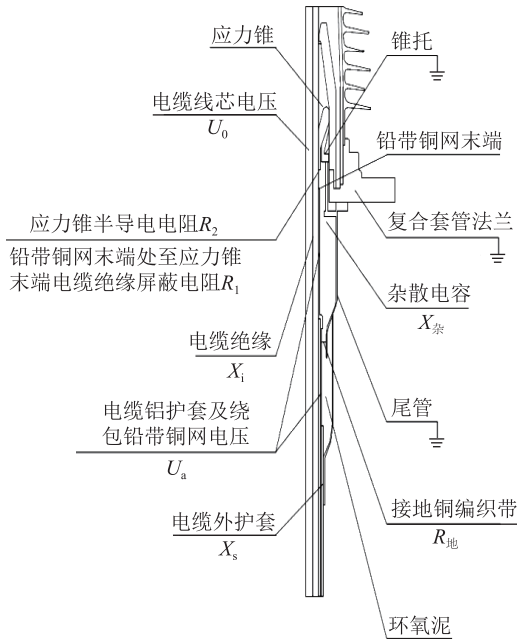


图1 高压XLPE电缆终端参数分析模型
Fig.1 Parameter analysis model of high voltage XLPE cable terminal

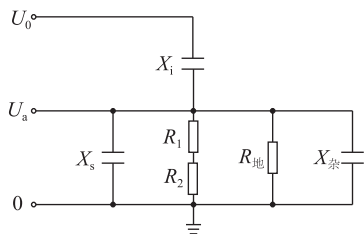


图2 高压XLPE电缆终端电压等值计算模型
Fig.2 Voltage equivalent calculation model of high voltage XLPE cable terminal

首先通过等值计算模型进行初步计算。查阅普通物理学教材,得到XLPE介电常数为2.5,护套材料PE的介电常数为2.3^[18]。使用游标卡尺测量,实验电缆各部件的尺寸如表1所示。

表1 实验电缆各部件尺寸
Tab.1 Dimensions of experimental cable mm

电缆部位	尺寸	电缆部位	尺寸
导体外径	34.7	绝缘外径	70.5
导体屏蔽厚度	1.9	绝缘屏蔽厚度	1.0
导体屏蔽外径	38.5	绝缘屏蔽外径	72.5
绝缘厚度	16.0		

空气相对介电常数 $\epsilon_{空} = 1$,真空绝对介电常数 $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$,应力锥半导电体电阻率取 $\rho_1 = 0.5 \Omega \cdot \text{m}$ 。电阻计算公式为:

$$R = \rho L/S \quad (1)$$

式中: ρ 为材料电阻率; L 为材料长度; S 为材料截面积。

圆柱形电容计算公式为:

$$C = 2\pi\epsilon_0\epsilon/\ln(D_b/D_a) \quad (2)$$

式中: D_b 为外层圆柱直径; D_a 为内层圆柱直径。

容抗计算公式为:

$$X = 1/2\pi fC \quad (3)$$

结合各温度下高压XLPE电缆绝缘屏蔽的体积电阻率,如表2所示,计算得出实验电缆各电学参数值: R_1 为41.5 Ω ; R_2 为21.1 Ω ; X_i 为 $6 \times 10^4 \Omega$; X_s 为 $1.5 \times 10^3 \Omega$; $X_{杂}$ 为 $1 \times 10^8 \Omega$ 。

表2 高压XLPE电缆绝缘屏蔽体积电阻率
Tab.2 Volume resistivity of insulation shield of high voltage XLPE cable

温度/°C	体积电阻率/($\Omega \cdot \text{m}$)	温度/°C	体积电阻率/($\Omega \cdot \text{m}$)
0	0.08	80	0.28
10	0.08	90	0.3
20	0.12	100	0.3
30	0.12	110	0.4
40	0.12	120	0.48
50	0.16	130	0.56
60	0.2	140	0.56
70	0.2	150	0.6

接地铜编织线与电缆铝护套及终端尾管连接正常情况下, $R_{地} = 0 \Omega$, $U_a = 0 \text{ V}$ 。一旦接地铜编织线存在虚焊或环氧泥混合不均匀致未完全固化时,会导致电缆终端进潮,造成铜编织线与铝护套和尾管处的焊接点发生氧化腐蚀,导致 $R_{地}$ 逐渐增加,致使 U_a 值上升,加速铜编织线焊接点的腐蚀。随着 $R_{地}$ 不断增加, U_a 值受到 R_1 与 R_2 的钳制,逐渐趋向稳定。在将接地线完全去除后,实际测量 U_a 为89.6 V,根据欧姆定律,计算可得流经 R_1 与 R_2 的电流值约为1.12 A,远高于正常运行时通过 R_1 与 R_2 的电流值。使用钳形电流表测量,证实流经绝缘屏蔽的电流值约为1.1 A。

2.2 电缆终端电参数有限元软件分析

电缆导体上施加电压,在导体周围将产生电场。由于工频电压下电场随时间变化缓慢,计算时可按电准静态场来处理。电准静态场的基本方程组为:

$$\nabla \times E = 0 \quad (4)$$

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (5)$$

$$\nabla \cdot D = \rho \quad (6)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (7)$$

式(6)中 ρ 为体电荷密度。将式(6)代入电流连续性方程:

$$\nabla \cdot J + \frac{\partial D}{\partial t} = 0 \quad (8)$$

得到:

$$\nabla \cdot J + \nabla \cdot \frac{\partial D}{\partial t} = \nabla \cdot J + j\omega \nabla \cdot D \quad (9)$$

对于各向同性介质有特性关系式:

$$J = \gamma E \quad (10)$$

$$D = \varepsilon E \quad (11)$$

式中: γ 和 ε 分别为介质电导率和介电常数。引入标量位函数:

$$\nabla \varphi = -E \quad (12)$$

则从(9)即可推出下列方程:

$$\nabla \cdot [(\gamma + j\omega\varepsilon) \nabla \varphi] = 0 \quad (13)$$

使用 ANSYS 软件建立电缆终端模型进行电参数仿真计算,结果如图 3 所示。接地铜编织线完全腐蚀脱离后,电缆铝护套电压约为 79 V,与理论计算结果较接近。

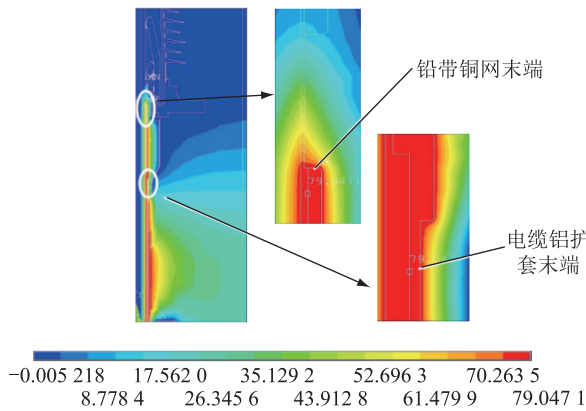


图3 终端接地不良时电压分布
Fig.3 Voltage distribution under terminal imperfect grounding

对终端接地不良时的绝缘屏蔽进行电流密度分析,结果如图 4 所示。分析结果显示,接地铜编织线焊接点完全腐蚀脱离后,故障点绝缘外屏电流密度高达 4400 A/m²。根据表 1 尺寸进行计算,得出通过绝缘屏蔽的电流约为 0.988 A,与理论计算的结果相近。说明电缆终端接地不良时,绝缘屏蔽承载了悬浮电压,导致流经绝缘屏蔽的电流相应增加。

3 电缆终端接地不良的温度场分析

实验电缆各材料的导热参数值如表 3 所示。当终端接地不良时,绝缘屏蔽会因为流经的电流而发热。为全面地反映问题,环境温度选取南京地区夏季均温 29 ℃ 与冬季平均气温 3 ℃ 两种进行建模分

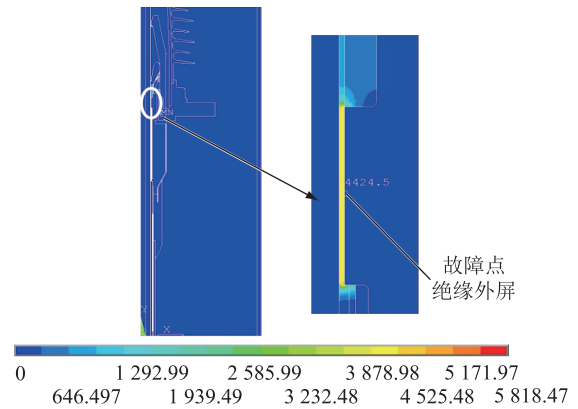


图4 终端接地不良时电流分布
Fig.4 Current distribution under terminal imperfect grounding

析。夏季时,接地不良情况下绝缘屏蔽处温度分布如图 5 所示。电容电流从绝缘屏蔽流过,导致发热。其中,温度最高的位置在应力锥下端口 7 cm 处,约为 106 ℃,温度从外向内递减,温度最高点附近主绝缘温度在 97 ℃ 以上。

表 3 实验电缆各材料导热系数值

Tab.3 Thermal conductivity of experimental cable materials W·(m·k)⁻¹

材料	导丝系数值	材料	导丝系数值
铜	390	半导体带	0.08
屏蔽层	0.5	铝	230
XLPE	0.3	外护套	0.3

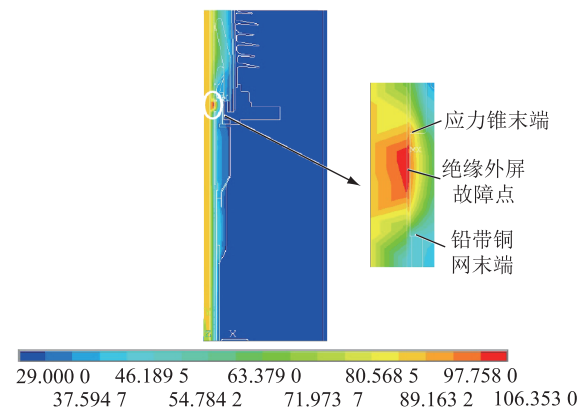


图5 夏季终端接地不良时温度分布

Fig.5 Temperature distribution under terminal imperfect grounding in summer

应用热-结构分析方法,构造由电缆结构(线芯、绝缘、屏蔽层,缓冲层、铝护套、外护套)与复合套管终端末端结构(尾管、环氧泥、防水带、热缩管)、空气组成的模型,如图 6 所示。

使用有限元软件对 29 ℃ 时,环氧泥、电缆外护套、尾管、热缩管等部件位移进行形变分析,如图 7 所示。仿真表明位移量最大约为 0.7 mm。

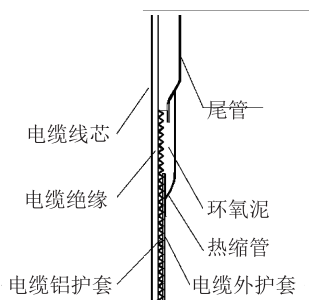


图6 电缆终端热结构模型

Fig.6 Cable terminal thermal structure model

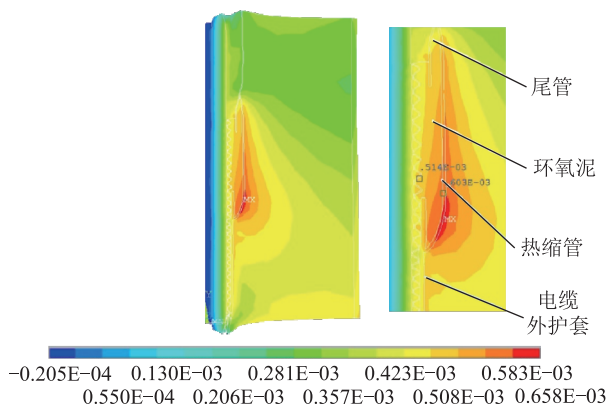


图7 夏季电缆终端各部位形变

Fig.7 Deformation of each part in cable terminal in summer

同样方法,冬季时,故障点绝缘外屏处温度如图8所示。ANSYS 软件仿真表明,在冬季,低负荷运行时,故障点绝缘外屏温度约为 69℃,温度从外向内递减,温度最高点附近主绝缘温度在 62℃以上。对电缆终端形变量进行分析,仿真结果显示最大位移量为 0.6 mm。

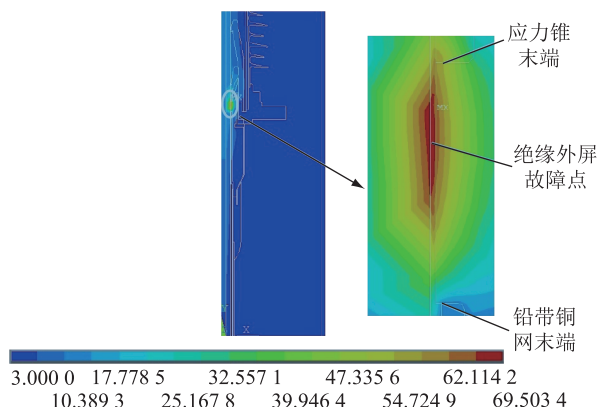


图8 冬季终端接地不良时温度分布

Fig.8 Temperature distribution under terminal imperfect grounding in winter

可以推论,系统运行时,故障点温度将在 69~106℃范围内浮动,附近主绝缘温度也达到了 62~97℃的变化范围。考虑到我国炎夏大部地区最高

气温将达到 39℃以上,最高温度也将相应升高。交联聚乙烯的长时间运行温度应低于 90℃^[19-20]。若主绝缘温度较长时间超过规定值,将很可能导致绝缘劣化,进而引起绝缘失效。并可能产生热膨胀,形成气隙,引起发热和灼烧,最终导致击穿故障。

为了进一步确认仿真结果,在实验室环境下进行了模拟实验分析。在环境温度为 29℃时,将终端接地去除,待温度稳定后,使用红外成像仪进行检测,图9为得到的红外图谱,测得最高温为 103.8℃,最低温为 39.3℃和平均温度为 61.5℃。

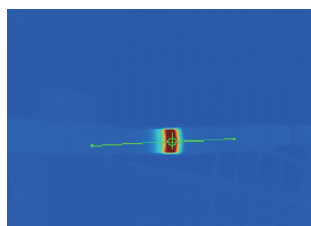


图9 终端接地不良时红外图谱

Fig.9 Infrared spectrum under terminal imperfect grounding

其中,电缆外半导体层最高温度为 103.8℃,与仿真实验结果相近。证实了仿真实验的有效性,说明电缆终端接地不良将一定程度上导致绝缘屏蔽发热,影响绝缘性能。

4 电缆终端接地不良的产物分析

对实验电缆终端中绝缘屏蔽与铝护套之间的半导体缓冲带进行 FTIR、SEM-EDS 测试,结果如图 10、图 11 所示。

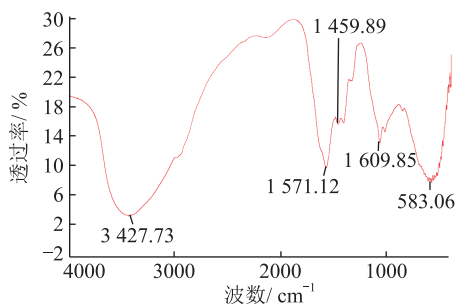


图10 样品原样红外谱

Fig.10 Original sample infrared spectrum

图 10 中,FTIR 测试结果显示峰值出现在波数为 2000 处,与羧酸谱图高度吻合,表明样品含有羧酸盐。对分析样品进行灰化并对其灰分进行 FTIR 测试,测试结果如图 11 所示。与图 10 相比,图谱发生了 50 cm⁻¹的红移,与金属氧化物图谱相吻合。根据上述测试结果,推测该白色物质为氧化铝、氧化锌混合物。具体形成原因很可能为电位差引起异常热效应所致。

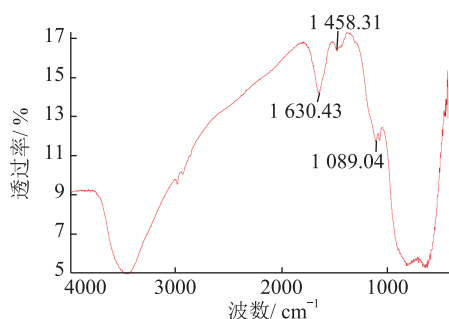


图11 样品灰分红外谱

Fig.11 Sample ash infrared spectrum

SEM-EDS 测试结果显示样品中主要含有 C、O、Na、Al 等元素,其中 C、O、Na 元素可能归属于羧酸钠,Al 元素可能归属于三氧化二铝。

综合 FTIR、SEM-EDS 测试结果,推测样品中羧酸盐的含量约 25%,三氧化二铝的含量约为 40%。

分析结果表明,接地不良时会产生羧酸盐以及金属氧化物等物质。这些物质一定程度上会增强绝缘屏蔽的导电性能,提高通过绝缘屏蔽的电流值,加速电缆绝缘的发热及老化。

5 结语

高压 XLPE 电缆终端接地不良会导致绝缘屏蔽处产生悬浮电压,产生流经绝缘屏蔽的表面电流;绝缘屏蔽表面电流会导致电缆绝缘温度上升,引起热膨胀,产生结构位移,形成气隙,并可能引起电缆灼烧,最终造成击穿故障;终端接地不良时会产生羧酸盐以及金属氧化物等物质,导致绝缘屏蔽电阻进一步降低,流经绝缘屏蔽电流值进一步加大,加速电缆终端发热老化。

参考文献:

- [1] 杜伯学,马宗乐,霍振星,等. 电力电缆技术的发展与研究动向[J]. 高压电器,2010,46(7):100-104.
DU Boxue, MA Zongle, HUO Zhenxing, et al. Recent research status of techniques for power cables [J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(7): 100-104.
- [2] 黄涛,文珊,王庭华. 不同材质电缆支架对电缆运行适用性研究[J]. 电力工程技术,2017,36(2):104-109.
HUANG Tao, WEN Shan, WANG Tinghua. Research on the cable support with different materials to the operation applicability [J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(2): 104-109.
- [3] ZHANG Xiang. Estimation of the lifetime of the electrical components in distribution networks [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(1): 515-522.
- [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,2015,40(9):2593-2612.
ZHOU Yuanxiang, ZHAO Jiankang, LIU Rui, et al. Keytechni-

cal analysis and prospect of high voltage and extra-high voltage power cable [J]. High Voltage Engineering, 2015, 40(9): 2593-2612.

- [5] 叶冠豪,郭湘奇,王一磊,等. XLPE 电缆交叉互联系统接地直流电流在线监测[J]. 江苏电机工程,2016,35(3):39-45.
YE Guanhao, GUO Xiangqi, WANG Yilei, et al. On-line monitoring of ground DC current for cross-linking XLPE cable system [J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2016, 35(3): 39-45.
- [6] 吴明祥,欧阳本红,李文杰. 交联电缆常见故障及原因分析[J]. 中国电力,2013,46(05):66-70.
WU Mingxiang, OUYANG Benhong, LI Wenjie. Common faults and cause analysis of XLPE cables [J]. Electric Power, 2013, 46(5): 66-70.
- [7] YANG J J, ZHANG D M. Partial discharge phenomena due to electrical treeing in XLPE [C]//Conference on Industrial Electronics and Applications: IEEE, 2006:1-6.
- [8] 谢安生,郑晓泉. XLPE 电缆绝缘中的电树枝结构及其生长特性[J]. 高电压技术, 2007, 33(6):168-173.
XIE Ansheng, ZHENG Xiaoquan. Structures and propagation characteristics of electrical trees in XLPE cable insulation [J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(6): 168-173.
- [9] 张振鹏,蒙绍新,夏荣,等. 振动在和条件下的交联聚乙烯绝缘老化特性试验研究[J]. 高电压技术,2016,42(8):2399-2405.
ZHANG Zhenpeng, MENG Shaoxin, XIA Rong, et al. Experimental study on aging characteristics of XLPE insulation under vibration loads [J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(8): 2399-2405.
- [10] 孟辉,王元韶. 交联电缆热缩接头常见故障及对策[J]. 高压电器,2005,41(3):234-236.
MENG Hui, WANG Yuanshao. Common troubles and countermeasures to the pyrocondensation joint of cross linked cable [J]. High Voltage Apparatus, 2005, 41(3): 234-236.
- [11] 刘钦伟,钟韶,黄文星. 交联电缆常见接地故障的原因和查找方法[J]. 自动化应用,2014(7):121-122.
LIU Qinwei, ZHONG Shao, HUANG Wenxing. Common causes and troubleshooting of XLPE cable grounding fault [J]. Automation application, 2014(7): 121-122.
- [12] 张春旭,李明,刘民,等. 外护套环流及接地不良对电力电缆的影响分析[J]. 山东电力技术,2009(2):6-9.
ZHANG Chunxu, LI Ming, LIU Min, et al. Analysis on cable sheath circulating current and imperfect grounding [J]. Shandong Electric Power, 2009(2): 6-9.
- [13] 马宏忠,倪欣荣,黎腊红,等. 高压电力电缆护层感应电压的补偿研究[J]. 高电压技术,2007,33(3):148-151.
MA Hongzhong, NI Xinrong, LI Lahong, et al. Research on compensation of induced voltage in the metal shield of the high-voltage power cable [J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(3): 148-151.
- [14] IEEE recommended practice for grounding of industrial and commercial power systems: IEEE Std 142—1991. [S]. 1992: 11-28.

- [15] 贺智涛. 单芯高压电力电缆外护套故障分析及预防[J]. 湖北水力发电, 2006(2):77-79.
HE Zhitao. Reason analysis and protection of the metal sheath fault of high voltage cable[J]. Hubei Water Power, 2006(2):77-79.
- [16] 付永长, 张文斌. 不规则排列电缆温度场及载流量计算[J]. 电网技术, 2010, 34(4):173-176.
FU Yongchang, ZHANG Wenbin. Calculation on temperature field and current-carrying capacity of irregularly arranged cables[J]. Power System Technology, 2010, 34(4):173-176.
- [17] 姚金霞. 从一起电缆故障谈超高压电缆金属护套的接地方式[J]. 高电压技术, 2004, 30(S1):48-49.
YAO Jinxia. Discussion on the grounding mode of cable sheath based on a power cable fault[J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(S1):48-49.
- [18] 程守洙, 江之永. 普通物理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
CHENG Shouzhuzhu, JIANG Zhiyong. General physics[M]. Beijing: Higher education press, 2006.
- [19] 费益军, 张云霄, 周远翔. 硅橡胶热老化特性及其对电缆附件运行可靠性的影响[J]. 电工电能新技术, 2014(12):30

-34.

FEI Yijun, ZHANG Yunxiao, ZHOU Yuanxiang. Thermo characteristics of Silicone rubber and its effects on operational reliability of extra-high voltage cable accessories[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2014(12):30-34.

- [20] 胡珍, 任双赞, 毛辰. 温度对交联聚乙烯电缆运行可靠性的影响[J]. 陕西电力, 2015(9):80-82, 87.
HU Zhen, REN Shuangzan, MAO Chen. Influence of temperature on operation reliability of XLPE Cable [J]. Shaanxi Electric Power, 2015(9):80-82, 87.

作者简介:



叶冠豪

叶冠豪(1990—),男,硕士,从事高压电力电缆运维、检修试验工作(E-mail:928337760@qq.com);

吕立翔(1983—),男,本科,从事高压电力电缆运维、检修试验工作;

洪露(1988—),男,硕士,从事高压输电线路运维、检修试验工作。

Effect of Grounding Defect on High-voltage XLPE Cable Terminal

YE Guanhao, LYU Lixiang, HONG Lu

(State Grid Nanjing Power Supply Company, Nanjing 210019, China)

Abstract: In order to study the effect of grounding defect on XLPE cable terminal, ANSYS finite element analysis software is used to establish the cable terminal simulation model and the physical simulation experiment is carried out in the laboratory. Study on the effect of grounding defects on XLPE cable terminal was conducted in 3 aspects: XLPE cable terminal electric parameter calculation, temperature distribution as well as product analysis. The results of simulation and physical simulation show that the grounding defect will lead to serious heating of high voltage XLPE cable terminal. Research conclusion shows that terminal grounding fault will cause voltage suspension, large current through insulation shield, abnormal temperature rise of XLPE cable terminal, with metal oxides, carboxylic acids and other compounds produced, which will cause serious impact on the safe operation of XLPE cable.

Key words: high voltage XLPE cable terminal; earth fault; ANSYS; electrical parameters; temperature distribution; metal oxides

(编辑 方晶)