

基于温度计算的肘型电缆接头压接状态评估方法

马海涛¹, 牛海清¹, 黄世杰¹, 范 华², 翁利国²

(1. 华南理工大学 电力学院, 广东 广州 510641;

2. 浙江中新电力工程建设有限公司, 浙江 杭州 311201)

摘要:附件是电缆线路的薄弱环节, 温度是反映电缆运行状态的重要参数, 研究环网柜中肘型电缆接头运行温度具有重要意义。建立柜内肘型接头三维暂态磁热流耦合场数学模型, 基于阶跃电流温升试验验证了模型的正确性; 仿真研究了夏季严酷场景肘型接头多物理场及其温度时空分布, 研究了肘型接头外皮温度和温差的影响因素。结果表明, 肘型接头外皮温差受环境温度和负荷曲线形状的影响较小, 与负荷电流峰值近似呈二次关系, 与压接电阻比率基本呈线性单增关系, 因而可以作为识别肘型接头压接状况的参数。最后提出基于接头外皮温差的肘型接头压接状态评估方法, 对接头温度监测和故障预警有重要的参考价值。

关键词:肘型电缆接头; 压接状态评估; 多物理场仿真; 暂态温度; 温升试验

中图分类号: TM726.4

文章编号: 1000-0682(2024)04-0075-06

文献标识码: A

DOI: 10.19950/j.cnki.CN61-1121/TH.2024.04.015

Assessment method of crimp status of elbow cable joint based on temperature calculation

MA Haitao¹, NIU Haiqing¹, HUANG Shijie¹, FAN Hua², WENG Ligu²

(1. School of Electric Powers, South China University of Technology, Guangdong Guangzhou 510641, China;

2. Zhejiang Zhongxin Power Engineering Construction Co., Ltd., Zhejiang Hangzhou 311201, China)

Abstract: Accessories are the weak link in the cable line. Temperature is an important parameter to reflect the running state of the cable. It is of great significance to research the operating temperature of elbow joint in the ring net cabinet. A mathematical model of the three-dimensional transient magnetic-heat-flow coupling field of elbow joint in cabinet is established, and its calculation correctness is verified based on the step current temperature rise test. The multi-physical field distribution and temperature temporal and spatial distribution of elbow joints in harsh summer is simulated, and different factors on the temperature and temperature difference of elbow joints are studied. The results show that the skin temperature difference of elbow joint is less affected by the ambient temperature and the shape of load curve, and has a quadratic relationship with the peak load current, and increased linearly with the resistance ratio, which can be used as the parameter to identify the crimping condition of elbow joint. Crimp status assessment of elbow joint was proposed based on skin temperature difference, which has important reference value for the joint temperature monitoring and fault warning.

Keywords: elbow cable joint; crimp status assessment; multi-physical field simulation; transient temperature; temperature-rise test

收稿日期: 2024-03-07

基金项目: 国家高技术研究发展项目(2015AA050201); 浙江中新电力工程建设有限公司科技项目(HDXS3-2110037)

第一作者: 马海涛(1999—), 男, 山东济南人, 硕士研究生, 研究方向为电气设备多物理场仿真。

通信作者: 牛海清(1969—), 女, 陕西富平人, 博士, 副教授, 研究方向为电气设备在线监测与多物理场仿真。

0 引言

附件是电缆线路运行的薄弱环节, 据统计, 超过一半以上电缆线路故障是由其附件造成的^[1-3]。环网柜内肘型电缆接头作为电缆接头的一种, 其安全性关乎整个配电网的稳定运行。然而, 近年来环网柜烧毁事故频发, 大多与肘型接头烧毁、爆炸有

关^[4-5]。肘型接头长期运行在密闭环网柜内,分布密集、发热量大,且空间小、难以散热,容易因温升高使绝缘热老化甚至热击穿,造成停电故障^[6]。因此,研究柜内肘型接头的温升,对提高电力系统安全性、稳定性具有重要意义。

大量文献开展了电缆接头温升的研究。唐科等人建立三芯电缆中间接头的三维有限元模型,基于解析法仿真接头温度场^[7]。夏川等人建立考虑接触电阻的中间接头磁热耦合模型,计算持续负荷下接头温升^[8]。赵莉华等人建立中间接头的三维电热耦合仿真模型并仿真稳态温度场^[9]。张宏光基于解析法建立单芯电缆肘型接头的电热稳态仿真模型^[10]。周文文、仝子靖利用 IEC 标准及改进热路模型对肘型接头进行了稳态温度场仿真计算^[11-12]。以上研究大多集中在中间接头温升的研究,对肘型接头研究较少。而柜内肘型接头的研究多为基于 IEC 标准的单相接头稳态计算,没有考虑实际负荷电流变化,且只考虑单相的温度场而忽略了柜内空气流场的影响,计算准确性大打折扣。实际柜内三相肘型接头运行是一个复杂的过程,涉及磁场、热场和流场的相互作用、相互制约。

该文首先建立含环网柜和单芯电缆本体的三相肘型接头暂态磁热流耦合仿真模型,考虑接头压接电阻的不同;开展阶跃电流温升及温降试验,验证仿真模型的正确性;分析了严酷场景下各物理场和温

度的时空分布特性;研究了不同压接电阻比率、环境温度、负荷曲线形状对接头温度的影响,提出用外皮温差作为识别压接状态的特征参数;并且研究不同负荷电流对不良压接接头外皮温差的影响,提出了基于接头外皮温差的压接状态评估方法,对接头温度监测和故障预警有重要的参考价值。

1 肘型电缆接头仿真模型

肘型接头主要由电缆本体、压接管和接头、导电螺栓及肘型绝缘护套组成。以某电缆附件公司 36 kV/630 A,300 mm²的肘型电缆接头为例,在商业软件中建立的几何模型如图 1 所示。在实际模型中,肘型接头封闭在尺寸为 600 mm × 320 mm × 190 mm、壁厚为 3 mm、材料为钢的环网柜内。

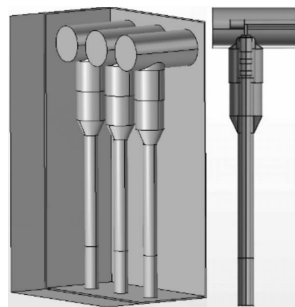


图 1 肘型电缆接头仿真几何模型图

肘型接头仿真模型的主要材料包括接头各部分、电缆本体和空气等,如表 1 所示。

表 1 模型材料参数

结构	材料	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)	电导率 S/m
导体	铜	385	1	8960	400	5.998e7
导体绝缘	交联聚乙烯	2526	2.5	1200	0.4	1e-15
主绝缘	硅橡胶	1700	3	800	0.25	0
主绝缘与内屏蔽间隙	硅脂	1700	3.2	980	0.25	0
空气	空气	1006.43	1	1.189	0.024 2	0

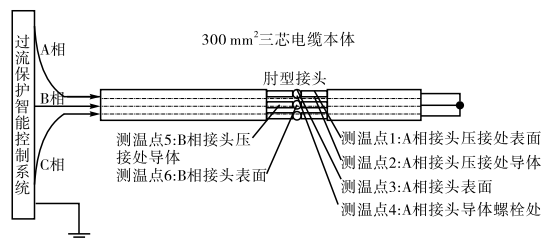
2 仿真模型的试验验证

2.1 阶跃电流温升试验

肘型接头温升试验于某电缆附件公司高压大厅进行,该试验大厅尺寸大约为 60 m × 30 m × 15 m,无风,试验期间室温为 30 ℃。现场制作 10 kV/300 mm²的肘型接头,埋入测温传感器,具体测温点如图 2(a)所示。

将过流保护智能控制系统、肘型接头和电缆本体依次串联起来,并在末端将三相导体短接,共同组成三相星接回路,实际布置如图 2(b)所示。

给试验回路加载 590 A 阶跃电流 6.5 小时,之后断开电源,在封闭试验大厅的自然条件下降到室温 30 ℃。



(a) 温升试验回路电路测温点布置示意图



(b) 试验回路及测温传感器实际布置图

图 2 肘型接头温升试验电路及测温点布置图

2.2 仿真模型验证

将 590 A 阶跃电流加载到仿真模型上 6.5 小时,之后电流突然降为 0,开展温升试验的仿真。图 3 和表 2 给出了仿真试验结果对比。可见,导体及外皮温度仿真与试验结果基本吻合,两者变化趋势一致,验证了肘型接头仿真数学模型的正确性。

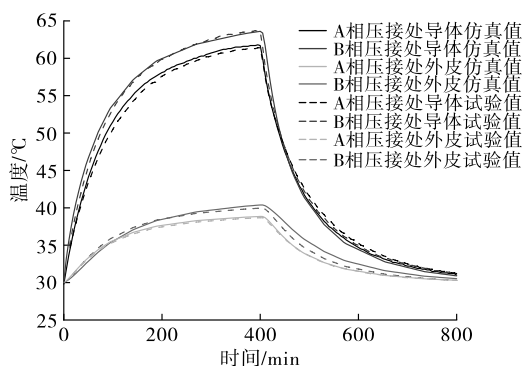


图 3 肘型接头温度仿真值与试验值的对比

表 2 峰值温度仿真值与试验值的对比

峰值温度/℃	试验结果	仿真结果	相对误差
A 相压接处导体	61.4	61.7	0.49%
B 相压接处导体	63.6	63.7	0.16%
A 相压接处外皮	38.6	38.8	0.52%
B 相压接处外皮	40.1	40.4	0.75%

3 多物理场分布及温度影响因素

夏季气温高,开关站和环网柜内温度较高,同时夏季负荷电流较大,更容易使肘型接头温度较高而引发故障,因此研究夏季严酷场景下肘型接头运行情况更具有代表意义。

分析某 10 kV 电缆线路 2022 年负荷数据可知,其最大负荷峰值出现在 8 月 15 日,当日负荷曲线如图 6 实线所示。当日环境温度取 40 ℃。

3.1 严酷场景下多物理场及温度时空分布

加载最大负荷日的负荷电流,不同时刻仿真域的温度场分布不同,图 4 给出了负荷最大的 22 h 时刻三维流场和温度场分布。

仿真中肘型接头为标准压接,设置其压接电阻比率(接头直流电阻与同长度电缆导体电阻之比)为 0.8。这是因为压接管尺寸大于电缆导体但两者材料及其电阻率相同,压接改变了通流截面,压接端子的直流电阻约为同长度电缆导体电阻的 0.8 倍,即标准压接情况下接头压接电阻比率为 0.8,该文称之为标准肘型接头。

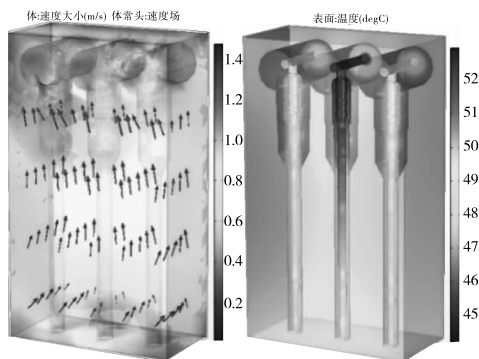
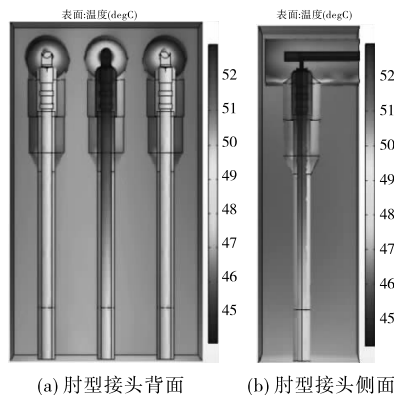


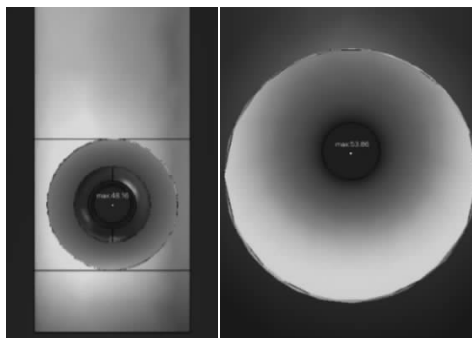
图 4 肘型接头的三维流场和温度场分布图

基于 22 h 不同断面的温度场分布来分析肘型接头温度空间分布。其中,背面、侧面、压接处、螺栓处断面温度场分布如图 5 所示。



(a) 肘型接头背面

(b) 肘型接头侧面



(c) 压接处断面

(d) 螺栓处断面

图 5 肘型接头不同断面的温度分布图

从径向来看,最高温度出现在最内部的导体上,越往外部温度越低,整个空气域温度最低;从轴向来看,接头轴向温度呈上高下底的分布,螺栓连接处温度最高,正常压接处温度较上部螺栓温度低;随着电缆本体往下延伸,线芯温度逐渐减小。

接头压接处是该文研究的重点,该断面的导体外皮温度随时间的变化如图 6 所示。可看出,压接处导体温度随时间变化与其电流变化趋势基本一致,但外皮温度比其导体温度变化平缓。

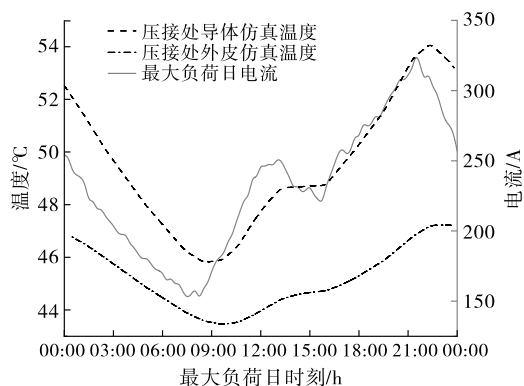


图6 压接处导体和外皮温度随时间的变化

下面研究压接电阻比率、环境温度、负荷曲线形状对接头运行温度及外皮温差的影响。试图从接头外皮温度或温差来判断电缆接头的压接状态。

3.2 压接电阻比率对温度的影响

GB/T 14315—1993 标准中规定接头电阻比率不超过 1.2^[13],因此将接头电阻比率不超过 1.2 作为其合格的判断标准。定义压接电阻比率为 1.2、1.5 的肘型接头为临界、1.5 倍不良肘型接头。

仅改变压接电阻比率研究其对运行温度的影响。鉴于肘型接头是分相结构且表面温度可测,三相同时压接不良的概率较小,表 3 还给出了外皮温差,即压接处外皮温度与标准压接处外皮温度之差。

表3 不同压接电阻比率下压接处外皮温度及温差

压接电阻比率	导体温度峰值/℃	外皮温度峰值/℃	外皮温差/℃
0.7	53.34	46.84	-0.17
0.8	53.37	47.01	0
1.0	53.92	47.15	0.14
1.2	54.95	47.68	0.67
1.5	55.23	47.84	0.83
2.0	56.04	48.17	1.16
2.5	56.98	48.71	1.70
3.0	58.31	49.28	2.27
4.0	60.20	50.18	3.17

表 3 和图 7 表明,随着压接电阻比率的增大,接头压接处导体、外皮温度以及外皮温差均逐渐升高。

压接处电阻比率从 0.8 增加到 4.0 时,接头外皮温差升高了 3.17 ℃。由于已投运线路的导体温度不能直接测量,因此直接测量的接头外皮温度和间接测量的外皮温差可以作为反映压接合格的参数。

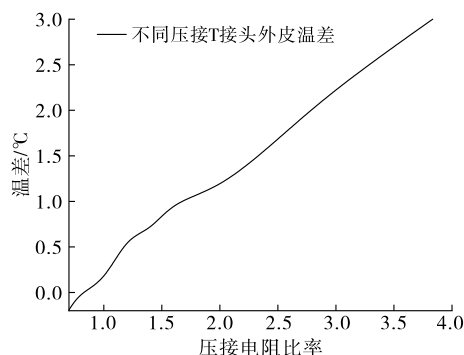


图7 外皮温差与压接电阻比率关系

3.3 周围环境温度对温度的影响

仅改变开闭所环境温度为 20 ~ 50 ℃,研究其对肘型接头外皮温度及温差的影响,如表 4 所示。

表4 不同环境温度下压接处外皮温度及其温差

环境温度/℃	1.5 倍不良肘型接头压接处外皮温度峰值/℃	标准肘型接头压接处外皮温度峰值/℃	不良肘型接头外皮温差/℃
20	27.30	26.63	0.67
25	32.39	31.76	0.63
30	37.40	36.74	0.66
32	39.59	38.82	0.77
34	41.78	41.00	0.78
36	43.54	42.89	0.65
38	45.64	44.90	0.74
40	47.84	47.01	0.83
45	52.75	52.03	0.72
50	57.73	57.12	0.61

随着开闭所环境温度的升高,外皮温度有明显的升高,不适合作为识别压接状态的参数。但 1.5 倍不良肘型接头外皮温差基本保持不变,维持在 0.6 ~ 0.8 ℃,说明环境温度对外皮温差的影响不大。

3.4 负荷曲线形状对温度的影响

同一线路的最小负荷日为 1 月 14 日,电流峰值为 250.31 A。为剔除负荷电流大小的影响,将该负荷电流同时扩大 1.306 倍,使其峰值达到 326 A 而负荷曲线形状不变,如图 8 所示,研究其对外皮温度及温差的影响。表 5 中数据表明,负荷曲线形状的改变会引起不良压接肘型接头外皮温差的变化,但变化不大。这说明负荷曲线形状变化,使得不良压接接头外皮温差变化了不到 0.1 ℃,可以忽略。

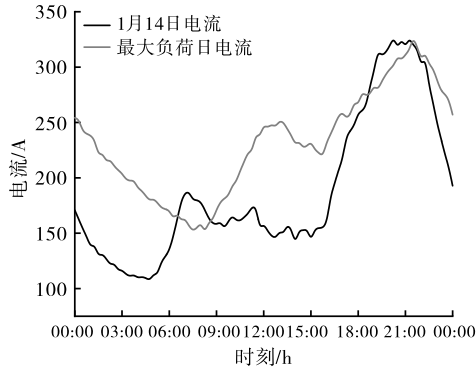


图8 夏季和冬季典型负荷曲线形状

表5 不同负荷曲线形状下压接处外皮温差

负荷曲线	1.5 倍不良接头 压接处外皮 温度峰值/℃	标准接头压接 处外皮温 度峰值/℃	不良接头外 皮温差/℃
8 月 15 日	47.84	47.01	0.83
1 月 14 日	47.46	46.64	0.82

上述研究表明,肘型接头外皮温差与压接电阻比率有单调递增的关系,且不受环境温度和负荷曲线形状的影响,可以作为识别压接是否合格的参数。

4 基于外皮温差的压接状态评估方法

在温度仿真研究的基础上,发现外皮温差可以作为识别接头压接状态的参数,下面研究通过外皮温差评估接头压接状态的方法。

4.1 负荷电流峰值对外皮温差的影响

显然负荷电流大小对接头外皮温度及温差有较大的影响。针对夏季酷热环境,在图6负荷电流乘以一定倍数使负荷曲线形状不变、仅改变负荷电流,研究其对外皮温度及温差的影响。

表6 不同负荷电流下压接处外皮温度及温差

负荷电 流倍数	压接处外皮温度峰值/℃			1.5 倍不良 肘型接头外 皮温差/℃
	1.5 倍不良	临界	标准	
0.7	44.22	44.17	43.58	0.64
0.8	45.32	45.22	44.61	0.71
0.9	46.61	46.49	45.85	0.76
1.0	47.84	47.68	47.01	0.83
1.1	49.45	49.17	48.43	1.02
1.2	50.94	50.67	49.75	1.19
1.3	53.19	52.89	51.84	1.35
1.4	55.10	54.90	53.64	1.46
1.5	56.82	56.49	55.15	1.67
1.6	59.43	58.87	57.34	2.09
1.7	61.58	60.80	58.76	2.82
1.8	63.96	63.49	60.97	2.99
1.9	66.83	66.31	63.10	3.73

由表6可以看出,随着负荷电流增大,压接处外皮温度都明显升高。从图9可以看出,随着负荷电流增大,不良肘型接头外皮温差不断升高,两者近似呈二次关系,最大温差为3.73℃,负荷电流对不良肘型接头外皮温差的影响不可忽略。

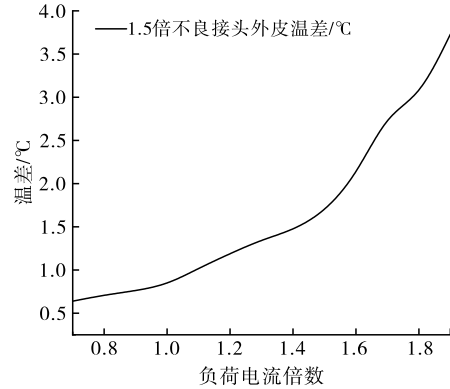


图9 外皮温差与负荷电流倍数关系图

4.2 外皮温差与压接电阻比率、电流关系

通过温度仿真模型研究不同影响因素发现,肘型接头外皮温差与环境温度、负荷曲线形状无关,与压接电阻比率呈线性关系、与负荷电流倍数呈二次关系,由此可以将接头外皮温差 $\Delta T(^{\circ}\text{C})$ 设置为式(1):

$$\Delta T = f(k, I^2) \quad (1)$$

式中: k 为接头压接电阻比率; I 为电缆实际日负荷电流峰值(A)。

基于3.2节与4.1节的温度仿真数据,通过MATLAB使用麦夸特法(Levenberg - Marquardt)来拟合温度数据,对上述函数表达式进行参数拟合,得到函数表达式的具体系数,如式(2)所示:

$$\Delta T = 6.451 \times 10^{-6} \times k \times I^2 - 0.217 \quad (2)$$

表7 2.0 倍不良压接肘型接头误差分析

负荷电流/A	计算温差/℃	实际温差/℃	误差百分比
326.0	1.15	1.16	0.86%
358.6	1.44	1.39	-3.75%
391.2	1.76	1.77	0.71%
423.8	2.10	2.15	2.31%
456.4	2.47	2.52	1.96%
489.0	2.87	2.88	0.41%
521.6	3.29	3.26	-1.02%
554.2	3.75	3.71	-0.96%
586.8	4.23	4.25	0.57%
619.4	4.73	4.79	1.19%

基于2.0倍不良压接肘型接头温度仿真数据,对所得表达式进行误差分析,如表7所示。可见,该

拟合表达式误差在 5% 以内,在一定误差范围内,拟合效果良好。

4.3 基于外皮温差的压接状态评估方法研究

式(2)说明接头压接电阻比率与外皮温差、负荷电流存在一定的函数关系。整理式(2)可以得到式(3):

$$k = 1.550 \times 10^5 \times \Delta T \times I^{-2} + 3.364 \times 10^4 \times I^{-2} \quad (3)$$

在已知接头负荷电流的情况下,根据接头外皮温差可以通过式(3)评估压接电阻比率 k 。若 k 大于 1.2,说明接头压接不合格。

如表 8 所示,以电流峰值 326 A 为例,当接头外皮温差超过 0.6 °C 时,此时压接电阻比率为 1.19,已达到临界水平;当接头外皮温差超过 1.2 °C 时,已达到 2.0 倍不良压接水平。而随着负荷电流的增大,当负荷电流增大至 400 A 时,需外皮温差超过 1 °C,才可达到临界水平,当外皮温差超过 2 °C 时,达到 2.0 倍不良压接水平。

表 8 外皮温差、负荷电流与压接电阻比率对应关系

ΔT I	0.5	0.6	0.8	1.0	1.2	1.5	2
326	1.05	1.19	1.48	1.78	2.07	2.50	3.23
400	0.70	0.79	0.99	1.18	1.37	1.66	2.15
500	0.45	0.51	0.63	0.76	0.88	1.07	1.38

因此,肘型电缆接头温度仿真表明,通过监测实际接头的外皮温差和负荷电流情况,可以近似评估当前肘型接头的压接状态。

5 结论

该文建立环网柜内肘型接头的三维暂态磁热流仿真模型,基于温升试验验证了模型的正确性。分析了严酷场景下肘型接头温度的时空分布,研究了肘型接头压接处外皮温度及温差的影响因素。结论如下:

(1)空间上,肘型接头温度最高点出现在螺栓连接处,由内到外、由上到下温度逐渐降低;时间上,肘型接头温度变化与日负荷电流趋势一致。

(2)肘型接头压接处外皮温差受环境温度、负荷曲线形状影响较小,与负荷电流峰值近似呈二次关系,与压接电阻比率基本呈线性单增关系,可以作为判断压接是否合格的参数。

(3)10 kV/300 mm² 肘型接头压接电阻比率与压接处外皮温差、日负荷电流峰值呈一定的函数关系,可以通过监测外皮温差和负荷电流评估接头压接状态。

参考文献:

- [1] 卢斌先,薛涛,王宜静,等. 极端高温下 10 kV 电缆中间接头载流量分析[J]. 电力工程技术,2023,42(04): 215-222.
- [2] 唐国锋,曹丽娟. 电缆接头温度远程在线监测系统的设计[J]. 工业仪表与自动化装置,2018(02):100-104.
- [3] 杜清,杨绍才,胡晓. XLPE 电缆中间接头内部放电射频信号的时频分析[J]. 电网技术,2023,47(12): 5266-5273.
- [4] 王国忠,黄海磊. 电缆 T 型接头击穿原因分析和处置[J]. 电线电缆,2022(05):55-58.
- [5] 罗翔,朱志豪,翟婷婷,等. 用于 12 kV 环网柜的新型空气绝缘电缆接头研究[J]. 高压电器,2023,59(09): 161-168.
- [6] 赵腾飞,聂永杰,孙宸. 10 kV 环网柜电缆肘型头故障分析[J]. 山西电力,2022(03):26-29.
- [7] 唐科,阮江军,唐烈峥,等. 三芯电缆接头温度场计算[J]. 高电压技术,2019,45(11):3571-3578.
- [8] 夏川,刘会家,吴刚梁,等. 含防爆盒的三芯电缆中间接头散热性能及载流量研究[J]. 电测与仪表,2022,59(09):47-52.
- [9] 赵莉华,周冬冬,闫志强,等. 10 kV 交流三芯电缆中间接头直流化改造热-电耦合仿真研究[J]. 南方电网技术,2021,15(03):105-112.
- [10] 张宏光. 10 kV 开关柜中单芯电缆接头状态评估及监测系统的研究[D]. 西安:西安理工大学,2016.
- [11] 周文文. 10 kV 固体绝缘开关柜温度监测技术研究[D]. 广州:广东工业大学,2018.
- [12] 仝子靖. 环网柜 T 型连接头温度实时测量方法研究[D]. 北京:华北电力大学(北京),2018.
- [13] 国家技术总局. 电力电缆导体用压接型铜、铝接线端子和连接管:GB/T 14315-1993[S]. 1993.