

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2026.01.014

接地线夹挂设处导线电弧烧蚀特性与影响因素

董冰冰, 李康, 郭志远, 陶磊

(合肥工业大学电气与自动化工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要:特高压线路年度检修过程中, 挂设接地线夹处的导线会出现电弧烧蚀痕迹, 严重时会导致导线断股、断线, 甚至接地线夹脱落, 易引发安全事故。然而, 在特高压线路检修过程中, 接地线夹处导线的电弧烧蚀特性及断股断线的作用过程尚不明晰。为此, 文中基于某特高压停电线路电弧烧蚀实际案例的感应电流计算结果, 采用电流作用积分等效法搭建接地线夹处导线电弧烧蚀特性规律研究平台。结果表明, 放电电弧伴随着大量热、光、冲击波效应, 电弧沿着导线下端与线夹之间的放电通道产生剧烈电弧烧蚀, 并存在多次燃弧过程。增大导线与接地线夹的接触面积, 局部电弧能量密度降低, 烧蚀程度明显减弱。减小导线与接地线夹间的间隙距离, 电弧放电烧蚀与冲击作用更为集中和剧烈, 导线烧蚀破坏程度更为显著。在累积电弧烧蚀的作用下, 试验导线出现断股现象, 熔断严重处断口高达5 mm, 进而加剧了临近股线的烧蚀。电弧电流作用积分相同时, 小幅值、低频率和长时间作用电流下的导线电弧烧蚀能量累积效应明显, 对导线烧蚀的破坏性更强。研究结果为保障检修人员的人身安全与延长输电设备的运行寿命提供参考。

关键词:特高压检修; 输电导线; 感应电流; 接地线夹; 电弧烧蚀; 过电压与接地

中图分类号: TM855

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2026)01-0144-10

0 引言

在运1 000 kV交流架空输电线路多采用同塔双回架设, 电网公司年度检修工作中常安排一回停电检修、一回正常运行, 停电线路会受到临近带电线路强电磁耦合作用, 产生较为严重的感应电^[1-5]。故输电线路接地线装置在输电线路检修工作过程中发挥着重要作用, 接地装置通过将线路残压导入接地网从而保障检修人员工作安全及线路可靠运行^[6-10]。我国特高压输电线路检修任务日益繁重且持续周期长, 为保障检修人员及输电线路设备的安全, 需要连续数周将导线经接地线夹夹持接地^[11-12]。但在接地线夹长时间挂接过程中, 导线与线夹连接处会出现明显的烧蚀痕迹, 严重时会发生导线断股, 甚至线夹挂接脱落, 导致接地不牢靠或未接地, 进而发生电弧放电、漏电等, 引发检修人员触电事故, 严重威胁特高压线路及检修人员的本质安全^[13-15]。因此, 研究特高压线路因检修挂设的接地线夹处导线电弧烧蚀特性与影响规律, 有助于保障运检人员的人身安全、提高输电线路的运行寿命, 对输电系统的运行可靠性提升具有重要意义^[16-17]。

目前, 学者们针对超特高压检修线路的电弧烧蚀研究, 主要集中在对临近线路的电磁耦合作用产

生的感应电引起检修线路接地处发生电弧烧蚀现象的计算分析^[18-21]。秦威南等计算了1 000 kV交流同塔双回线路单回停电时的感应电压和感应电流, 发现感应电压过大会导致接地线挂设过程中存在反复拉弧放电现象, 造成接地线烧伤^[22], 但未考虑接地线夹夹持导线过程中的电弧烧蚀特性。马爱清等对500 kV同塔双回输电线路下平行运行0.38 kV线路时的感应电压和感应电流进行了计算, 结果表明线路间电磁耦合产生较大感应电压和感应电流, 不仅造成导线烧蚀还会危及到线路上的检修人员^[23], 但其未涉及导线电弧烧蚀的作用过程及影响因素研究。胡丹晖等对500 kV同塔双回停运线路的4类感应电压和电流参数进行了理论分析和仿真计算, 认为在停运线路首末端接地及中间点挂接地线, 可明显降低感应电压、电流的大小^[24]。还有学术机构和科研单位的研究主要集中在实际检修过程中同塔双回线上的感应电压电流计算分析、线路接地位置以及检修作业安全等方面^[25-27], 缺乏检修接地线夹处导线电弧烧蚀模拟试验相关研究。

综上, 目前国内外学者对输电线路电磁效应带来的临近线路感应电压电流等问题开展了大量理论分析及仿真验证。然而针对特高压线路检修接地线夹处导线电弧烧蚀特性及断股断线作用过程的研究尚不明晰, 且对不同暂态电压电流参数下的导线烧蚀规律尚未研究。因此, 文中搭建特高压输

收稿日期: 2025-06-13; 修回日期: 2025-09-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52107142); 国家电网有限公司科技项目(W2024JSKF0523)

电线路检修用接地线夹处导线电弧烧蚀特性规律模拟研究平台, 分析不同影响因素下导线电弧烧蚀发展特性规律, 并通过电流作用积分等效方法模拟实际现场电磁感应电流参数, 研究接地线夹及导线烧蚀特性规律, 为保障特高压检修人员的人身安全与延长输电设备的运行寿命提供参考。

1 接地线夹处导线感应电仿真计算

文中核心内容是研究特高压线路检修挂设接地线夹处导线电弧烧蚀特性与影响因素, 因此有必要首先计算特高压线路挂设接地线夹处导线感应电, 为实验室搭建电弧烧蚀研究平台提供数据参考。因此, 根据某网省公司近期发生的一起 1 000 kV 线路检修接地线夹烧蚀案例, 参照现场接地线布置方式, 通过仿真软件 ATP-EMTP 构建某 1 000 kV 同塔双回输电线路模型, 模拟单回检修时, 停电线路受临近带电线路电磁耦合作用影响产生的感应电压电流的变化规律。

1.1 特高压线路仿真模型构建

发生事故的 1 000 kV 架空输电线路(简称 II 线)长 114.163 km, 共有铁塔 228 基, 与另一条 1 000 kV 输电线路(简称 I 线)同塔双回建设, 导线均采用 8×LGJ-630/45 钢芯铝绞线, I 线地线采用 JLB20A-240 铝包钢绞线, II 线侧光缆采用 OPGW-240 复合光缆, 导地线具体参数如表 1 所示, 导线和地线的平均弧垂均为 20 m。II 线停电检修期间, I 线为带电运行状态, 挂设接地线共计 5 组, 挂设塔位分别为 1 号、56 号、102 号、103 号、228 号, 接地形式为逐相接地。检修期间, 工作人员利用无人机辅助线路检修时, 发现 II 线 103 号塔中相导线、102 号塔下相导线以及 228 号塔中相导线接地线挂设位置处导线烧蚀。

表 1 线路具体参数
Table 1 Specific line parameters

线路型号	直径/mm	单位长度电阻值/ $\Omega \cdot \text{km}^{-1}$	分裂数	分裂间距/mm
LGJ-630/45	33.6	0.046	8	400
JLB20A-240	20.0	0.360		
OPGW-240	20.3	0.366		

依据输电线路实际工况以及表 1 中导地线具体参数, 利用电磁暂态仿真软件 ATP-EMTP 对线路进行仿真模型构建, 输电线路的相对位置如图 1 所示。I 线和 II 线分别采用 BCA-ABC-CAB 和 ACB-CBA-BAC 全换位的布线方式。输电线路等值电路模型采用架空线路、电缆常数模型元件(line/cable

constants, LCC), 由于该计算模型仍属于稳态, 故选用 π 模型。I 线和 II 线输电线路运行电压为 1 000 kV, 输送功率为 6 000 MV·A。根据现场挂设临时接地线杆塔位置进行接地线模型设置, 接地线挂设仿真模型如图 2 所示, 其中接地电阻设置为 10 Ω 。

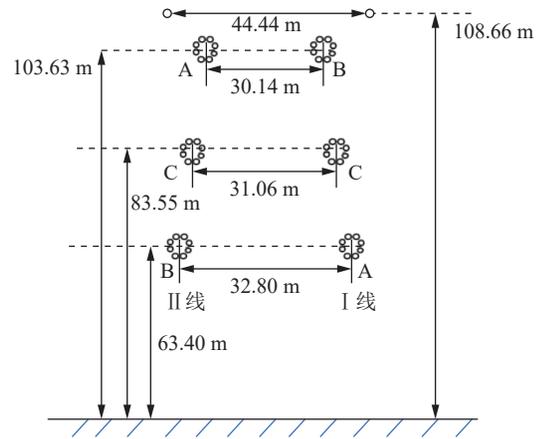


图 1 输电线路相对位置

Fig.1 Relative position of transmission line

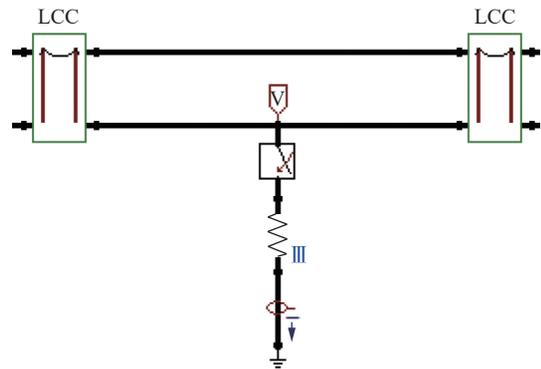


图 2 接地线挂设仿真模型

Fig.2 Simulation model of grounding wire hanging

1.2 接地线处感应电流计算

1.2.1 感应电流分析

针对同塔双回架空输电线路, 某一回输电线路停电检修时, 其与相邻的正常运行线路之间会产生静电感应与电磁感应, 停电线路上将产生感应电流。II 线停电检修时, 同塔双回输电线路感应电流如图 3 所示。

其中, I 回线路的三相为 A、B、C; II 回线路的三相为 a、b、c; M_{Aa} 、 M_{Ba} 、 M_{Ca} 和 C_{Aa} 、 C_{Ba} 、 C_{Ca} 分别为正常运行线路 A、B、C 三相和停电检修线路 a 相之间的单位长度互电感及互电容; L 、 C_0 分别为停电检修线路 a 相单位长度对地电感及电容。

当 I 回线路正常运行, II 回线路停电检修且线路两端接地时, 线路的容性感应电压为 0, 容性感应电流通过接地线流入大地。此时感应电流主要为感性感应电流, 感性感应电流 I 计算公式如下^[28-29]:

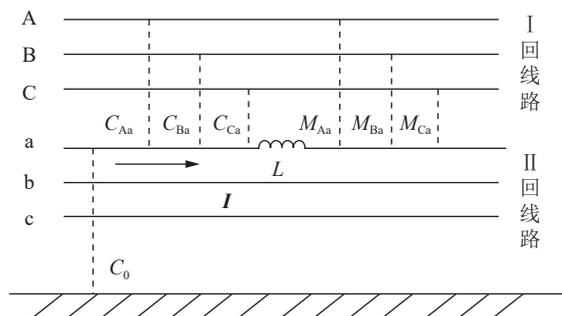


图3 同塔双回输电线路感应电流示意

Fig.3 Schematic diagram of induced current in double-circuit transmission lines on the same tower

$$I = (M_{Aa}I_A + M_{Ba}I_B + M_{Ca}I_C) / L \quad (1)$$

式中： I_A 、 I_B 、 I_C 为正常运行线路各相电流。

1.2.2 仿真计算结果

仿真计算同塔双回线路 I 线正常运行、II 线停电时, 挂设于 II 线的临时接地线处流经的感应电流的值, 其中故障杆塔挂设接地线处各相感应电流如表 2 所示。

表 2 流经接地线的感应电流

Table 2 Induced current flowing through ground wire

塔位	上相电流/A	中相电流/A	下相电流/A
102号	98.98	115.78	29.02
103号	97.57	113.46	28.18
228号	39.81	183.88	60.23

分析表 2 可得: (1) 流经故障塔位处挂设的接地线的感应电流的最大值均位于中相导线处, 与接地线挂设位置处导线发生烧蚀的相位基本吻合, 即发生电弧烧蚀的接地线夹与导线连接处均存在较大的感应电流; (2) 同塔双回输电线路的多端接地线处流经的感应电流分布呈“U”形, 即位于线路两端的接地线处流经的感应电流大于线路中间位置处的感应电流, 如 228 号杆塔挂设接地线处的感应电流为 183.88 A, 而 103 号杆塔处的感应电流为 113.46 A。

2 接地线夹处导线电弧烧蚀试验平台

受试验条件限制, 文中通过电流作用积分等效模拟实际感应电流作用下接地线夹处导线的电弧烧蚀情况, 如表 3 所示。选取 1.2 节感应电流计算结果, 感应电流峰值为 183.88 A, 频率为 50 Hz。试验回路在单次放电试验后的电流作用积分 $\int i^2 dt$ 为 $3.06 \times 10^4 \text{ A}^2 \cdot \text{s}$, 通过多次放电试验可获得与实际现场感应电流不同持续时间、作用积分相当的累积通流能量。例如, 模拟持续时间 1 min 感应电流的作用积分 $6.89 \times 10^5 \text{ A}^2 \cdot \text{s}$ 需要 22 次放电试验, 进而实现实际感应电流引起接地线夹处导线电弧烧蚀故障等效性的模拟。

表 3 感应电流作用积分等效

Table 3 Integral equivalence of induced current action

电流	电流峰值/A	电流频率/Hz	作用积分/($\text{A}^2 \cdot \text{s}$)	试验次数
试验电流	3 000	100	3.06×10^4	22
感应电流	183.88	50	6.89×10^5	

特高压输电线路接地线夹处导线电弧烧蚀特性规律模拟试验研究平台如图 4 所示, 主要装备为高压大电流多功能成套试验装置。

实验中电容器组 C_A 为 $1\ 050 \mu\text{F}$, 可调电感 L_{TA} 为 2.3 mH, 其高压端离地约 150 cm, 并引出 2 m 铜排与导线段试品的一端连接, 另一端经接地线夹夹持接地, 构成试验回路。试验时, 通过倍压整流电路经合闸开关 K_{BA} 给电容器组 C_A 充电至预设值。其中, T_1 为调压器, T_A 为变压器, 通过调压器 T_1 调节变压器 T_A 原边电压, 以实现电容器组 C_A 恒流充电, 电容 C_{1A} 起稳定电压作用, 整流硅堆 D_1 和 D_2 可将交流电压转换成直流电压, R_{BA} 为保护电阻。之后闭合触发开关 K_F , 经过可调电阻 R_{TA} 、可调电感

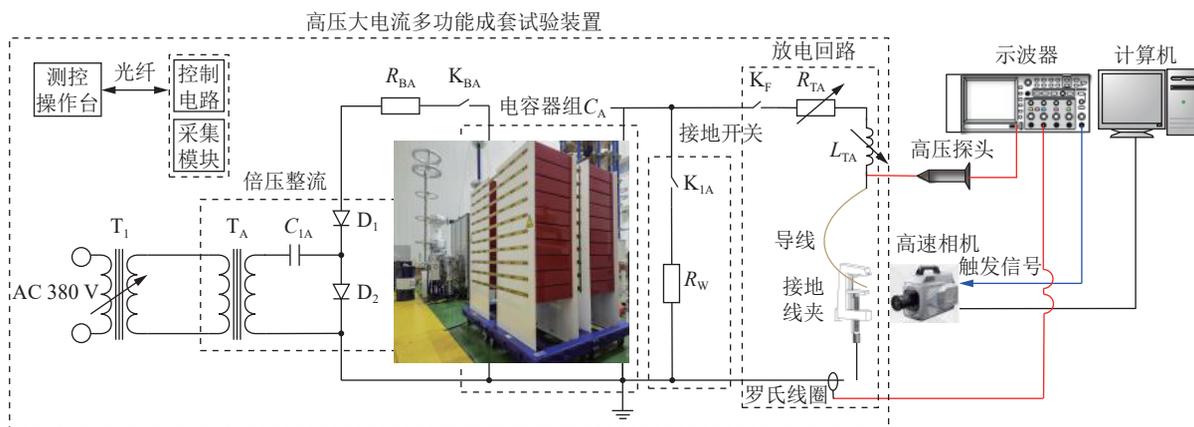


图 4 接地线夹处导线电弧烧蚀特性模拟试验平台拓扑

Fig.4 Topology of arc ablation simulation test platform for grounding clamps

L_{TA} 产生电弧烧蚀的大电流作用于试验件。试验结束或异常时, 闭合泄能开关 K_{IA} , 经过泄能电阻 R_W 释放电容器组残余电压, 从而保障回路设备安全。通过高压探头、罗氏线圈、示波器等, 监测放电电压、电流; 使用高速相机观测接地线夹与导线连接处放电电弧的发展过程, 并检测线夹和导线连接处的烧蚀情况。

文中通过调整线夹与导线间隙的接触面积大小来模拟接地线夹挂设处接触状态。接地线夹与导线夹持方式如图 5 所示, 接地线夹为压铸铝材质, 平头旋转式调节放电间隙距离及紧固力大小, 最大间隙距离为 4.5 cm。试验用导线段为 LGJ-630/45, 外圈 22 股, 单股铝线直径 4.2 mm, 导线段全长 2 m。采用抗电弧烧蚀与绝缘性能均较优的硅橡胶将线夹上端与导线的上端隔绝, 通过调整线夹下端旋钮来改变导线下端与线夹下端的间隙距离以及接触方式, 以模拟不同接触条件下线夹与导线之间的电弧烧蚀情况。

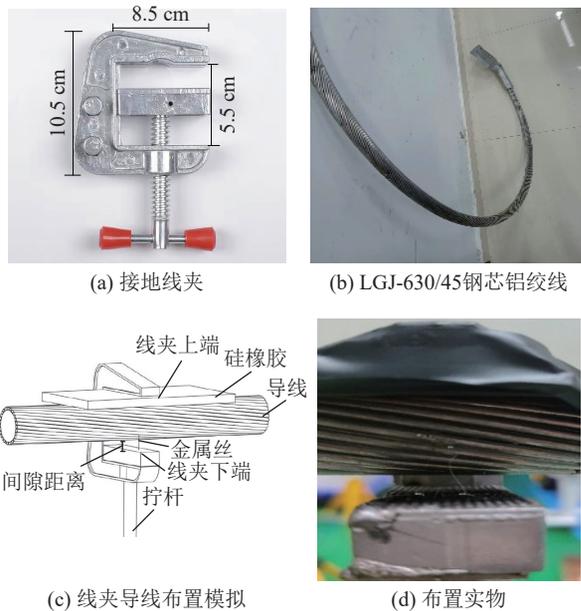
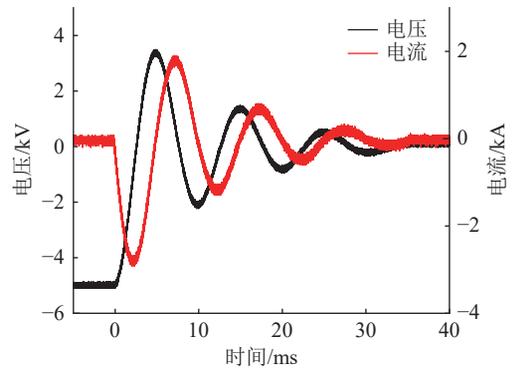


图 5 接地线夹挂接导线示意

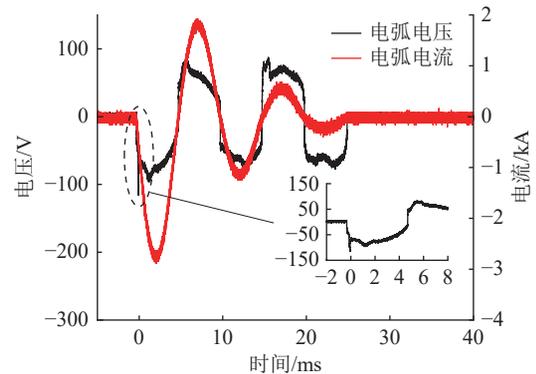
Fig.5 Schematic diagram of grounding clamps hooking up wires

电容器组充电电压 U_C 为 5 kV, 空载时电压和电流如图 6(a) 所示, 电流峰值 I_C 可达 3 kA, 单个周期约为 10 ms, 30 ms 后振荡为零。试验时将导线下端通过不同直径的铝丝与线夹下端相连, 模拟不同接触面积时的接地线夹与导线电弧烧蚀情况, 其试验弧道电压和电流如图 6(b) 所示, 电流波形与空载时较为一致, 电流峰值达到 2.87 kA, 单个周期为 10 ms。弧压尖峰为铝丝相变电压 114.6 V, 此时铝丝瞬间电爆炸从而形成电弧, 弧压峰值为 92.4 V。弧压、电

流同相位变化, 26 ms 后衰减振荡至零。其中, 铝丝电爆炸过程分为固态—熔化—液态—汽化—击穿阶段, 存在电阻瞬间增加的现象, 所以实验中存在极为短暂的燃弧尖峰(0.05 ms), 但该暂态过程对弧压、电流峰值的影响可以忽略。



(a) 空载电压和电流



(b) 试验弧道电压和电流

图 6 典型放电电压和电流波形
Fig.6 Typical voltage and current waveforms

3 试验结果与分析

3.1 接地线夹处导线电弧烧蚀过程

在图 5(d) 接地线夹布置方式下, 改变试验电流波形参数, 研究线夹处导线电弧烧蚀特性, 其电弧发展过程如图 7 所示。分析可知接地线夹处导线电弧烧蚀过程可分为:

(1) 第 1 次燃弧阶段(0—4.55 ms), 在大电流作用下金属丝迅速爆燃、湮灭, 放电间隙瞬间充满大量等离子体, 产生放电通道而形成电弧, 并伴随着大量热、光、冲击波效应, 电弧沿着导线下端与线夹之间的放电通道产生烧蚀。之后放电电弧在电磁力的作用下, 沿着导线在 1 ms 内迅速移动至线夹左侧, 维持稳定烧蚀, 自电流过零点后熄弧。

(2) 第 2 次燃弧阶段(4.76 ms—9.80 ms), 在电流负半周期内达到 0.26 kA 后电弧复燃, 沿着导线拧转方向向上移动, 并发展至导线上端而形成烧蚀, 在 6.5 ms 时烧蚀最为剧烈。

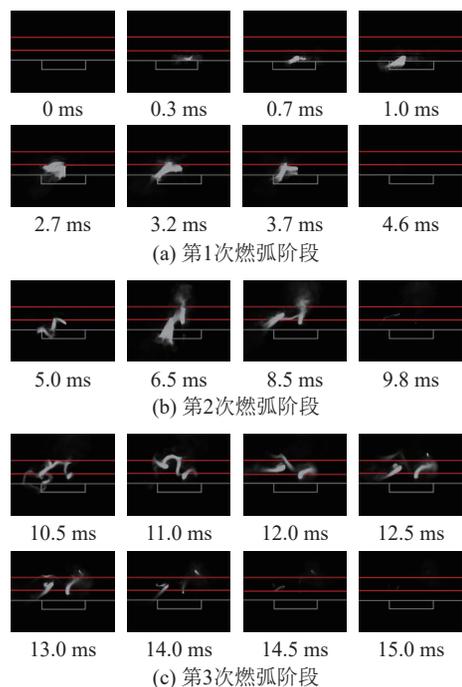


图7 接地线夹处导线电弧放电烧蚀发展过程
Fig.7 Development process of wire arc discharge ablation at grounding clamp

(3) 第3次燃弧阶段(10.24 ms—15.03 ms), 放电电流末期, 电弧沿着线夹与导线下端放电通道发展, 因后续能量不足, 放电烧蚀强度下降明显, 电弧光辐射、热辐射与持续时间等显著降低, 直至熄弧。整个放电烧蚀过程中, 电弧总持续时间约为14.38 ms。

试验后导线和线夹烧蚀情况如图8所示, 发生电弧烧蚀的部分集中在红圈处, 其烧蚀位置与电弧发展路径吻合, 共有6股导线烧蚀, 损伤占比达27.3%, 烧蚀面积为86.5 mm², 烧蚀长度为2~8 mm, 其中严重烧蚀面积(发生熔融态)约为36 mm²。同时, 燃爆过程中的金属丝形成大量高温熔融态的颗粒溅射至导线表面, 使其表面轻微融化、凹凸不平, 如图8中蓝圈所示。被溅射部位在下次放电电流作用下更易烧蚀。

3.2 接地线夹与导线接触条件参数的影响规律

基于上述试验平台, 模拟接地线夹与导线间接触面积减小以及出现微小间隙情况, 研究接地线夹处导线电弧烧蚀特性规律。

3.2.1 接触面积的影响特性

通过直径0.2~0.8 mm的铝丝, 改变接地线夹与导线的接触面积(0.031 ~ 0.503 mm²), 从而模拟接地线夹与导线连接处接触面积减小的不良接触状态。接地线夹处导线电弧烧蚀特征量见表4, 电弧形态见图9。表4中, D 为铝丝直径; V_c 为相变电



图8 接地线夹导线电弧烧蚀情况
Fig.8 Arc erosion of grounding clamp wire

压; V_{arc} 为电弧电压; I_{arc} 为电弧电流; t_{arc} 为燃弧时间; S_{arc} 为烧蚀面积; k 为导线烧蚀损伤占比。

表4 不同接触面积下的导线电弧烧蚀特征量
Table 4 Characteristics of wire arc erosion under different contact areas

D/mm	V_c/V	I_{arc}/kA	V_{arc}/V	t_{arc}/ms	S_{arc}/mm^2	$k/\%$
0.2	114.6	2.87	92.4	14.4	348.5	72.7
0.5	137.8	2.91	114.6	12.2	276.5	54.5
0.8	166.5	2.90	123.5	9.7	194.0	45.4

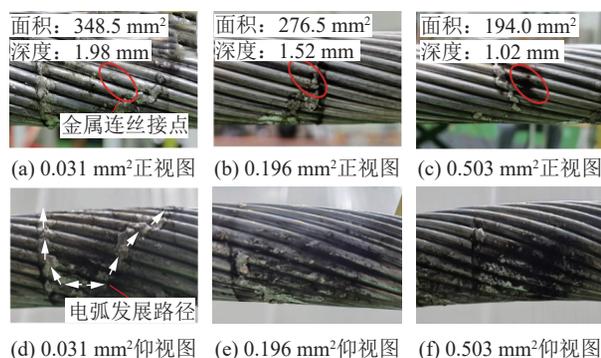


图9 不同接触面积下导线烧蚀形态
Fig.9 Wire ablation morphology under different contact areas

分析表4和图9可知:

(1) 随着接触面积的增大, 金属丝电爆炸相变电压值逐渐增大, 起爆时间逐渐滞后, 弧压峰值略微增大, 电弧电流峰值变化并不明显, 而燃弧时间发生明显下降。直径0.8 mm铝丝下燃弧时间约为9.7 ms, 较直径0.2 mm的铝丝减小了32.64%; 导线烧蚀面积降低了44.3%, 烧蚀程度明显减弱, 烧蚀损伤占比也减小了37.55%。

(2) 直径0.2 mm铝丝下导线烧蚀情况最为严重, 大量溅射物质残留在导线表面上, 导线烧蚀面积与损伤占比均为最高, 导线表面状态破坏也最为严重, 烧蚀痕迹周围的金属出现变色或氧化。同

时, 相邻 2 次试验的电弧发展路径存在较大差异, 但烧蚀最严重区域集中在导线下端与线夹临近位置处。分析原因主要为:

(1) 金属丝与导线接触点通过试验大电流时, 会产生较高的暂态电压, 周围空气介质迅速被激发并离子化, 形成等离子体向四周扩散, 进而将金属丝端部湮没, 形成电弧烧蚀。但随着金属丝直径的增加, 用于其相变消耗的能量同步增加, 电爆炸的时刻向后推迟, 即金属丝电爆炸所需能量增加, 引起后续电弧烧蚀能量减小。故燃弧时间明显降低, 制约金属丝电爆炸效应, 形成的电弧强度较低, 导线烧蚀情况较弱。

(2) 接触面积较小时, 金属丝沉积能量密度相应增大, 能量集中在较小区域内, 导致局部温度升高, 从而增加了金属表面的蒸发、溅射现象, 加重了其烧蚀程度。相反, 接触面积较大时, 局部区域内的能量密度降低, 使电弧产生的热量和机械冲击效应相对减小, 烧蚀程度对应降低。

3.2.2 间隙距离的影响特性

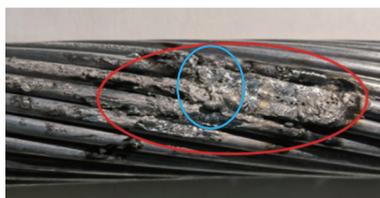
固定触发源条件参数, 调节导线下端与接地线夹之间的间隙距离 d 为 1~2 mm, 模拟接地线夹与导线的接触面出现微小间隙情况。电弧烧蚀特征量如表 5 所示, 烧蚀形态如图 10 所示。

表 5 不同间隙距离下的导线电弧烧蚀特征量
Table 5 Arc characteristic quantities under different gap distances

d/mm	I_{arc}/kA	V_{arc}/V	t_{arc}/ms	$S_{\text{arc}}/\text{mm}^2$
1	2.96	45.6	14.92	408.3
2	2.83	74.8	15.35	350.5



(a) 1 mm



(b) 2 mm

图 10 不同间隙距离下导线烧蚀形态

Fig. 10 The ablation morphology of conductor under different gap distances

分析表 5 和图 10 可知:

(1) 随着导线与接地线夹之间间隙距离的增大, 电弧电压峰值和燃弧时间均随之增大, 而烧蚀面积随之减小。2 mm 间隙下的烧蚀面积为 350.5 mm², 比 1 mm 间隙的烧蚀结果减小了 14.2%。

(2) 1 mm 间隙时, 导线烧蚀部位集中在导线下端, 且烧蚀较为严重, 多股导线呈熔融态, 其表面具有明显的烧蚀坑洞, 如图 10 蓝框所示, 并与电弧燃烧位置相吻合。此外, 共有 6 股子导线发生烧蚀, 烧蚀长度约 50 mm, 坑洞深度约 2~3 mm。2 mm 间隙下的导线烧蚀程度明显减弱, 但因烧蚀产物的溅射作用, 其表面出现了较多的轻微烧蚀痕迹, 见图 10(b)。

分析可知, 间隙内的电弧放电产生高温、高能量的等离子体, 引起导线表面出现烧蚀、熔化现象。间隙距离越小, 间隙弧压与弧阻越低, 但电弧电流增大, 电子被加速, 获得更大的动能, 使电子撞击至导线表面时, 导线表面电弧放电程度以及冲击效应更加明显。且较小的间隙距离下电弧稳定、集中, 引起更高的放电能量密度和较大的局部热量积累, 从而导致烧蚀情况更为严重。而增大间隙距离, 电子被电场加速的时间变长, 电荷密度降低, 即电弧电流减弱, 难以维持电弧持续燃烧。此外, 增大间隙距离会导致电弧电阻增大, 电弧能量分布不均, 出现电场强度减弱的局部区域, 电弧能量不足以维持电弧发展, 易导致电弧熄灭或失去稳定性。

3.2.3 电弧烧蚀累积效应的影响特性

在上述研究基础上固定间隙距离为 1 mm, 开展多次累积烧蚀作用效应试验。研究发现, 随着试验次数的增加, 导线烧蚀程度渐进增强, 当试验次数达到 40 次时, 3 股子导线烧蚀、断股, 且断股处呈焦黑状, 如图 11 所示。其中烧蚀破坏最严重的一股导线有明显的熔断现象, 并出现 5 mm 的断口。这会导致其断口处出现较为明显的电弧放电现象, 产生局部高温, 烧蚀相邻子导线, 使其熔化并断线。即在试验电流的叠加作用下, 导线会发生烧蚀、断股现象且不断加重。

3.3 作用电流的影响特性

接地线夹与导线之间产生电弧烧蚀的主要原因在于两个导体接触不良时, 在电压、电流的作用下形成电弧烧蚀。而电流峰值、作用时间和作用积分均会影响电弧烧蚀的剧烈程度。因此, 在 3.1 节和 3.2 节研究基础上, 改变试验回路参数, 不变试验电流作用积分 $\int i^2 dt$, 研究不同电流参数下接地线夹处导线烧蚀作用规律。试验电流参数如表 6 所



图 11 导线烧蚀断股形态

Fig.11 The wire ablation and broken strands

示。其中 f 为电流频率。

表 6 不同作用电流特征量

Table 6 Different action current characteristic quantities

组号	L_{TA}/mH	U_c/kV	I_c/kA	f/Hz	$\int i^2 dt/(\text{A}^2 \cdot \text{s})$
I	2.3	5	2.87	100	30 307
II	0	1.5	11.8	1 200	29 728

试验 I 回路可调电感为 2.3 mH, 电容器组充电电压为 5 kV, 试验电流峰值 2.87 kA, 单个周期为 10 ms, 电流频率为 100 Hz。试验 II 无回路可调电感, 电容组充电电压为 1.5 kV, 试验电流峰值为 11.8 kA, 电流频率为 1 200 Hz。两组试验回路下的单次电流作用积分近似等效。试验 II 电流下电弧发展过程如图 12 所示, 两组作用电流下的导线烧蚀情况如图 13 所示。

分析图 12、图 13 可知, 电弧发展仍可划分为 3 次燃弧过程: (1) 第 1 次燃弧阶段 (0—350 μs), 金属丝电爆炸后, 等离子体云向四周扩散而形成电弧, 并在电磁力作用下, 沿着导线在百微秒内迅速向左移动, 导线左端与线夹左端之间形成的放电通道产生烧蚀, 之后电弧逐渐消失。(2) 第 2 次燃弧阶段 (360 μs —680 μs), 电弧发生重燃, 此时放电强度达到最大, 电弧的能量与功率均达到峰值, 电弧烧蚀剧烈。(3) 第 3 次燃弧阶段 (710 μs —1 100 μs), 电弧持续、稳定烧蚀, 直至能量不足而发生熄弧。电弧持续烧蚀时间约为 1 ms。

导线左下侧的电弧存在时间最长, 3 次燃弧过程均在此处发生严重烧蚀, 已呈熔融状态, 见图 13 中黄圈。红圈标注为试验中金属丝连接处, 在金属丝电爆炸后, 产生的电弧向左移动, 蓝圈标注为电弧向左移动过程中造成的烧蚀痕迹。大峰值、高频

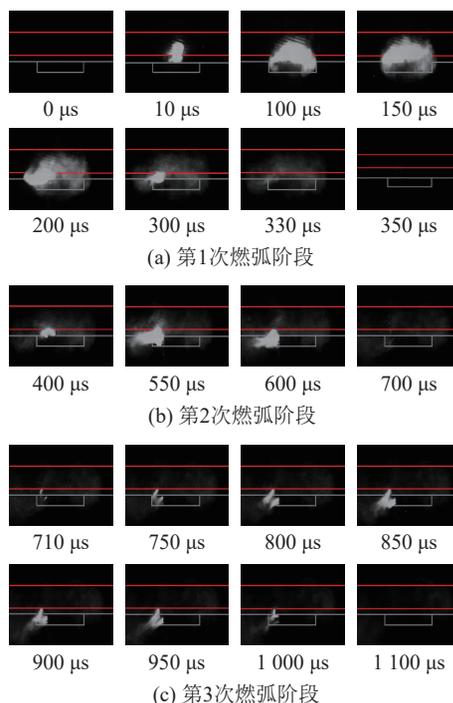


图 12 试验电流 II 的电弧烧蚀发展过程

Fig.12 The development process of arc ablation under experimental current II

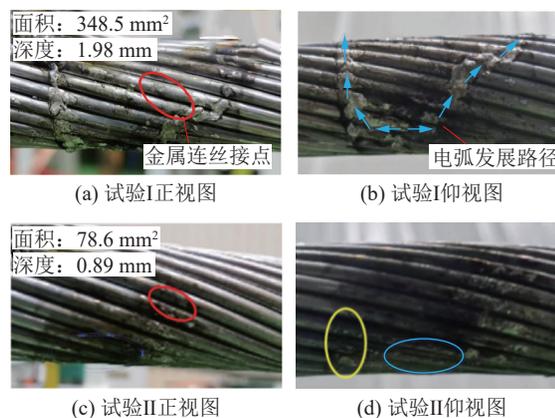


图 13 不同作用电流下导线电弧烧蚀

Fig.13 Wire arc ablation under different action currents

率、短时作用的试验 II 电流下, 金属丝焊接部位附近出现轻微烧蚀痕迹, 且大量黑色氧化物沉积在其表面, 并在导线左端与线夹左侧出现严重的烧蚀痕迹(呈熔融态), 烧蚀面积为 78.6 mm^2 , 仅为 I 组试验的 23%, 共有 6 根导线发生烧蚀, 烧蚀长度为 2~5 mm。

分析原因主要在于小幅值、低频率、长时间作用电流(如试验 I 电流)的电弧烧蚀过程所产生的电弧较为稳定, 在导线表面持续燃烧时间长, 故总电弧能量积累量较大, 从而达到甚至超过其铝制金属材料熔点的高温状态, 使得其表面发生烧蚀和熔化等现象。而大幅值、高频率、短时间作用电流(如试验 II 电流)的电弧烧蚀过程, 由于每次电弧的作用时间较短, 热能无法充分释放, 使得导线表面可

能会由于加热不充分而受到较轻的烧伤。

综合对比试验 I、II 电流下的导线烧蚀结果可知, 当试验电流作用积分相同时, 小幅值、低频率和长时间作用电流的电弧烧蚀过程对导线的破坏性更强。

分析上述特高压输电线路接地线夹处导线电弧烧蚀特性模拟试验结果可知, 接地线夹处导线发生电弧烧蚀的主要原因在于连接不紧密而导致的接触不良, 且主要体现在接触面积和间隙距离两个方面。此外, 导线表面电弧烧蚀后的拉伸强度下降, 更易发生塑性变形或断裂, 在频繁往复或振动的风荷载运行环境下, 可能引起导线疲劳寿命下降。在导电性能方面, 高温电弧会使导线表面形成氧化层或其他化合物, 导致导线电阻率增大、电导率降低。因此提出以下几种预防措施用于解决接地线夹处导线电弧烧蚀问题:

(1) 根据检修线路所采用的输电导线的型号针对性改善原有接地线夹的夹头弧度, 或设计新式接地线夹, 尽可能增大接地线夹与导线的接触面积。

(2) 适当增大扭转弹簧的线径、外径等参数以增大接地线夹对输电导线的夹持力。一方面使得线夹与导线紧密接触, 另一方面降低因导线微风振动导致线夹与导线接触面出现微小间隙的风险。

(3) 通过设计新式带自锁装置的接地线夹, 有效实现线夹挂设完毕后牢牢锁定在输电导线上, 降低线夹因导线微风振动而从导线上脱落的风险。

4 结论

文中建立 ATP-EMTP 特高压同塔双回线路感应电仿真模型, 搭建接地线夹处导线电弧烧蚀特性规律模拟试验平台, 以电流作用积分等效方法进行试验。通过调节接触面积、间隙距离及作用电流参数, 分析不同影响因素下导线电弧烧蚀发展特性规律, 揭示了接地线夹及导线烧蚀特性规律, 验证了该模拟平台及等效方法的有效性, 得到以下结论:

(1) 溯源某特高压线路检修接地线夹处电弧烧蚀故障特征, 得到感应电流幅值达 183.88 A。在实验室通过调整线夹与导线间隙及接触面积大小近似模拟接地线夹挂设处接触状态, 并采用电流作用积分等效方法, 通过多次电弧放电试验获得与实际现场感应电流的作用积分相当的累积通流电荷量, 模拟实际感应电流作用下接地线夹处导线的电弧烧蚀特性。

(2) 接地线夹处导线电弧烧蚀划分为: 第 1 次燃弧阶段(0—4.55 ms), 放电电弧在 1 ms 内迅速移

动至线夹左侧并烧蚀导线, 伴随着大量热、光、冲击波效应; 第 2 次燃弧阶段(4.76 ms—9.80 ms), 电弧放电电流峰值达到 0.26 kA 时, 电弧发生重燃并形成长时间、稳定的导线烧蚀特征, 且在 6.5 ms 时的电弧烧蚀形态最为显著; 第 3 次燃弧阶段(10.24 ms—15.03 ms), 随着放电强度的降低, 电弧烧蚀能量不足, 直至完全熄弧。

(3) 增大导线与接地线夹的接触面积, 局部电弧能量密度将降低, 导线烧蚀情况得到明显改善。随着间隙距离的增大, 导线烧蚀面积略微减小, 烧蚀破坏程度明显降低。在电流累积烧蚀效应作用下, 导线出现烧蚀、断股现象, 熔断处达 5 mm 断口, 进而引起相邻子导线的烧蚀、断股。

(4) 试验电流作用积分相同时, 小幅值、低频率、长时间作用电流下的总电弧能量积累更大, 电弧维持稳定烧蚀时间更长, 导线烧蚀面积和烧蚀长度均显著增大, 产生的放电电弧在电磁力作用下向左移动明显。

参考文献:

- [1] 唐伟华. 500 kV 同塔双回输电线路感应电压电流对运维的影响与防控策略[D]. 广州: 华南理工大学, 2020.
TANG Weihua. Influence of induced voltage and current on operation and maintenance of 500 kV double-circuit transmission lines on the same tower and its prevention and control strategies[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020.
- [2] 刘浩军, 阎国增, 王少华, 等. 1 000 kV 皖南—浙北特高压交流线路静电感应电压分析[J]. 高电压技术, 2015, 41(11): 3687-3693.
LIU Haojun, YAN Guozeng, WANG Shaohua, et al. Analysis of electrostatic induced voltage on 1 000 kV Wannan-Zhebei UHV AC transmission line[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(11): 3687-3693.
- [3] 徐党国, 李亚美, 黄诗洋, 等. 500 kV/220 kV 同塔混压四回输电线路感应电压及电流的计算与测量分析[J]. 高压电器, 2025, 61(4): 203-210.
XU Dangguo, LI Yamei, HUANG Shiyang, et al. Calculation and measurement analysis for induced voltage and current of 500 kV/220 kV mixed-voltage and four-circuit transmission lines on the same tower[J]. High Voltage Apparatus, 2025, 61(4): 203-210.
- [4] 刘正军. 500 kV 输电线路检修通用型闭式卡具的研制与运用[J]. 电工技术, 2019(19): 113-114, 117.
LIU Zhengjun. Development and application of universal closed fixture for 500 kV transmission line maintenance[J]. Electric Engineering, 2019(19): 113-114, 117.
- [5] 李祥超, 王贤超. 输电电缆耦合强电磁脉冲特性的分析[J]. 电瓷避雷器, 2024(5): 1-11.

- LI Xiangchao, WANG Xianchao. Characteristics of power transmission cable coupled strong electromagnetic pulse[J]. *Insulators and Surge Arresters*, 2024(5): 1-11.
- [6] 马洪峰, 徐中凯, 刘宗雨, 等. 输电线路杆塔接地技术研究[J]. *电工技术*, 2022(21): 211-212, 216.
- MA Hongfeng, XU Zhongkai, LIU Zongyu, et al. Research on grounding technology of transmission line towers[J]. *Electric Engineering*, 2022(21): 211-212, 216.
- [7] 马超, 袁昌斌, 杨治国, 等. 地线作业人员状态感知的可穿戴设备研究[J]. *电力电容器与无功补偿*, 2024, 45(6): 69-75.
- MA Chao, YUAN Changbin, YANG Zhiguo, et al. Research on wearable devices for state perception of ground wire operators[J]. *Power Capacitor & Reactive Power Compensation*, 2024, 45(6): 69-75.
- [8] 曾勇斌. 架空输电线路状态评估及检修优化策略研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2021.
- ZENG Yongbin. Research on state assessment and maintenance optimization strategy of transmission lines[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2021.
- [9] 董伟. 基于安全风险分析的输电线路状态检修方法研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2015.
- DONG Wei. Study on transmission line condition maintenance based on safety risk analysis[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2015.
- [10] 廖玉琴, 屈路, 杨跃光, 等. 面向环保接地施工的杆塔分支式外延接地网接地特性研究[J]. *高压电器*, 2024, 60(10): 1-11.
- LIAO Yuqin, QU Lu, YANG Yueguang, et al. Research on grounding characteristics of tower branch epitaxial grounding grid for environmental protection grounding construction[J]. *High Voltage Apparatus*, 2024, 60(10): 1-11.
- [11] 朱志坚, 梁加凯, 朱凯. 特高压输电线路新型接地线夹的研制与应用[J]. *电工材料*, 2023(3): 88-92.
- ZHU Zhijian, LIANG Jiakai, ZHU Kai. Development and application of a new type of grounding clamp for ultra high voltage transmission lines[J]. *Electrical Engineering Materials*, 2023(3): 88-92.
- [12] 孔晨华, 牛炜, 张建军, 等. 新型舌型压紧式接地线夹的研制及应用[J]. *电工技术*, 2022(8): 93-95.
- KONG Chenhua, NIU Wei, ZHANG Jianjun, et al. Development and application of novel tongue type pressing grounding wire clamp[J]. *Electric Engineering*, 2022(8): 93-95.
- [13] FAROOQ H, ALI W, IQBAL H, et al. Evaluation of the safety performance of a 500-kV AC substation grounding using IEEE standard 80-2013[J]. *Electrica*, 2021, 21(2): 225-234.
- [14] 朱迪锋, 许杨勇. 500 kV 线路工作接地线挂设处导线断裂原因分析[J]. *电力安全技术*, 2018, 20(5): 28-31.
- ZHU Difeng, XU Yangyong. Cause analysis of 500 kV transmission line fracture at grounding wire hanging point[J]. *Electric Safety Technology*, 2018, 20(5): 28-31.
- [15] CHEN G X, YANG H J, ZHANG W H, et al. Experimental study on arc ablation occurring in a contact strip rubbing against a contact wire with electrical current[J]. *Tribology International*, 2013, 61: 88-94.
- [16] LIU Z, ZHANG J, LIU J Q, et al. Development of mid-span tension joint and tension clamp for large section energy-saving conductor in 1 100 kV UHV DC transmission[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, 2033(1): 012118.
- [17] ZHANG Y, HUANG X B, JIA J Y, et al. A recognition technology of transmission lines conductor break and surface damage based on aerial image[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 59022-59036.
- [18] 姚金霞, 郭志红, 朱振华, 等. 500 kV 同塔双回线路感应电压、电流的研究[J]. *华北电力技术*, 2006(1): 23-25, 28.
- YAO Jinxia, GUO Zhihong, ZHU Zhenhua, et al. Research on inductive voltage and inductive current of 500 kV double-circuit transmission line[J]. *North China Electric Power*, 2006(1): 23-25, 28.
- [19] 傅中. 500 kV 同塔双回线路感应电压和电流的仿真与研究[J]. *安徽电力*, 2007, 24(4): 1-3.
- FU Zhong. Emulation and study of induced voltage and current for 500 kV double-circuit line on same tower[J]. *Anhui Electric Power*, 2007, 24(4): 1-3.
- [20] 吴高波, 李健, 陈媛, 等. ± 800 kV 与 ± 500 kV 同塔双回直流输电线路电磁环境研究[J]. *电网技术*, 2015, 39(9): 2532-2538.
- WU Gaobo, LI Jian, CHEN Yuan, et al. Research on electromagnetic environment of ± 800 kV and ± 500 kV double-circuit DC transmission lines on the same tower[J]. *Power System Technology*, 2015, 39(9): 2532-2538.
- [21] 闫可为, 李伟, 魏小龙, 等. 特高压输电线路检修工况下感应电压与电流计算分析[J]. *电工电气*, 2023(8): 30-34.
- YAN Kewei, LI Wei, WEI Xiaolong, et al. Calculation and analysis of induced voltage and current in maintenance condition of UHV transmission line[J]. *Electrotechnics Electric*, 2023(8): 30-34.
- [22] 秦威南, 方玉群, 潜力群, 等. 超/特高压架空输电线路短路接地线烧伤分析[J]. *中国电力*, 2019, 52(9): 110-117.
- QIN Weinan, FANG Yuqun, QIAN Liqun, et al. Research on electricity burn of shorting grounding wires in EHV and UHV transmission lines[J]. *Electric Power*, 2019, 52(9): 110-117.
- [23] 马爱清, 王洁, 毕永翔. 500 kV 交流线路对并行 ± 800 kV 直流线路带电作业人员安全防护的影响[J]. *中国电力*, 2022, 55(6): 128-136.
- MA Aiqing, WANG Jie, BI Yongxiang. Influence of 500 kV AC lines on safety protection of live working personnel in parallel ± 800 kV DC lines[J]. *Electric Power*, 2022, 55(6): 128-136.
- [24] 胡丹晖, 涂彩琪, 蒋伟, 等. 500 kV 同杆并架线路感应电压和电流的计算分析[J]. *高电压技术*, 2008, 34(9): 1927-1931.
- HU Danhui, TU Caiqi, JIANG Wei, et al. Calculation of inductive voltage and current for 500 kV double circuits transmission lines on single tower[J]. *High Voltage Engineering*, 2008, 34(9): 1927-1931.

- [25] NAZARČÍK T, BENEŠOVÁ Z. Analysis of the transients on the multi-circuit overhead transmission line[J]. *Journal of Electrical Engineering*, 2017, 68(6): 476-481.
- [26] 杨刚, 傅中, 程洋, 等. 同塔双回输电线路相参数新测量计算方法[J]. *电网技术*, 2023, 47(6): 2522-2530.
YANG Gang, FU Zhong, CHENG Yang, et al. A new measurement and calculation method for phase parameters of double circuit transmission lines on the same tower[J]. *Power System Technology*, 2023, 47(6): 2522-2530.
- [27] 刘夏清, 吴东, 李辉, 等. 500 kV 紧凑型同塔双回输电线路带电作业人体体表电场分布特性研究[J]. *高压电器*, 2017, 53(7): 87-94.
LIU Xiaqing, WU Dong, LI Hui, et al. Research on electric field distribution characteristics of body surface with live working in compact 500 kV same tower double circuit transmission lines[J]. *High Voltage Apparatus*, 2017, 53(7): 87-94.
- [28] 谢金泉, 李晓华, 戴美胜. 500 kV 同塔双回输电线路感应电流和感应电压研究[J]. *华东电力*, 2013, 41(3): 602-606.
XIE Jinquan, LI Xiaohua, DAI Meisheng. Induced Current and voltage of 500 kV double-circuit transmission lines on the same tower[J]. *East China Electric Power*, 2013, 41(3): 602-606.
- [29] 郑远笛. 1 000 kV 同塔双回线路检修作业的感应电及防护措施研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2021.
ZHENG Yuandi. Study on induced current and protective measures for maintenance of 1 000 kV double-circuit lines on the same tower[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2021.

作者简介:



董冰冰

董冰冰(1987),男,博士,副教授,研究方向为输电线路外绝缘放电(E-mail: bndong@126.com);

李康(2000),男,硕士在读,研究方向为输电线路外绝缘放电;

郭志远(1999),男,硕士在读,研究方向为输电线路外绝缘放电。

Arc erosion characteristics and influencing factors of conductor at grounding clamp

DONG Bingbing, LI Kang, GUO Zhiyuan, TAO Lei

(School of Electrical Engineering and Automation, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: During the annual maintenance of ultra-high voltage (UHV) lines, there are arc erosion marks on the wire at the grounding clamp. In severe cases, it can lead to strand breakage, wire breakage, and even grounding clamp shedding, which is easy to cause safety accidents. However, the arc ablation characteristics of the wire at the grounding clamp and the process of strand breakage during the maintenance of UHV lines remain unclear. Therefore, based on the induced current calculation result from an actual case of arc ablation on an UHV blackout line, this paper uses the current action integral equivalent method to build a research platform for the arc ablation characteristics of the wire at the grounding clamp. The results show that the discharge arc is accompanied by a large number of heat, light and shock wave effects. The arc generates severe arc ablation along the discharge channel between the lower end of the wire and the clamp, and there are multiple arcing processes. By increasing the contact area between the wire and the grounding clamp, the local arc energy density is reduced, and the ablation degree is obviously weakened. By reducing the gap distance between the wire and the grounding clamp, the arc discharge ablation and impact are more concentrated and severe, and the degree of wire ablation damage is more significant. Under the cumulative effect of arc ablation, the test wire exhibits broken strands, and the fracture is up to 5 mm at the severe melting point, which aggravates the ablation of the adjacent strands. When the arc current action integral is the same, the cumulative effect of wire arc ablation energy under small amplitude, low frequency and long time action current is more obvious, and the damage to wire ablation is stronger. The research results provide a reference for ensuring the personal safety of maintenance staff and prolonging the operating life of transmission equipment.

Keywords: ultra-high voltage maintenance; transmission line; induced current; grounding clamp; arc ablation; overvoltage and grounding

(编辑 陈雯嘉)