

激光对架空输电导线的温度影响研究

黄清¹, 魏旭¹, 周志成²

(1. 国网江苏省电力公司, 江苏南京 210024; 2. 国网江苏省电力公司电力科学研究院, 江苏南京 211103)

摘要:一种基于定向能激光的异物激光清除器是一种高效、安全、方便实用的新型异物清除工具,可以带电远程清除架空输电线路异物。激光装置在异物清除时,可能引起导线局部温度升高,局部损伤导线或影响导线正常运行。文中通过理论分析和多物理场有限元仿真,分析研究了激光作用下的导线局部温度变化和温度场分布,结果表明激光作用于导线时,激光吸收率和导线直径对导线温度影响较大;从激光辐照钢芯铝绞线 LGJ-300/50 仿真分析结果看,激光辐照造成局部温度升高,最高温度不超过 170℃,载流导线局部电导率呈现与温度相关的不均匀分布。

关键词:异物清除;激光;架空线路;导线;温度

中图分类号: O532.25

文献标志码: A

文章编号: 1009-0665(2016)06-0045-05

输电线路分布点多面广,地形复杂,环境恶劣,在运行维护过程中经常发生风筝、广告条幅、遮阳网等异物缠绕导、地线,严重的会引发相间短路,造成停电事故,同时垂落的异物和烧断损毁的导线还有可能造成人畜伤亡。目前,清除架空路线异物的方法主要基于绝缘杆、异物清除杆、登高车、斗臂车、吊篮等传统工具^[1,2],普遍具有耗时长、作业难度大、风险高、需停电作业等缺点。且也有利用无人机喷火装置进行异物清除的研究^[3,4],利用遥控无人机携带喷火装置飞到异物附近,喷出燃料并点燃,通过高温火焰将异物烧毁,喷火装置一般采用汽油、丁烷等燃料,火焰温度为 500~1500℃,对于镀锌钢芯铝绞线,锌的熔点为 420℃,若火焰喷射导线,可能造成镀锌层破坏。

激光清除异物是一种新型方法^[5,6],其利用定向能激光,采取地对空的方式快速清除架空输电线路上的异物,实现带电清除异物,具有快速、安全、便捷等优点,尤其在交通不便、高杆塔、远距离等情况下具有明显技术优势。但激光远程清除异物作业过程中,激光难免辐照到导线上,很多情况下还需控制光束沿导线灼烧切割异物缠绕处,导线吸收激光能量必然引起局部温度升高,温度升高程度和温度场分布是决定导线是否损伤,是否影响机械性能和电学性能的主要条件。文献[7]中采用输出功率为 300 W,重复频率为 60 Hz,脉冲宽度为 1 ms,光斑直径为 4 mm 的激光对敷冰的钢芯铝绞线进行辐照实验,实验结果显示导线表面未见损伤;文献[8]中采用 500 W 连续光纤激光对铝绞线单股线缆进行辐照实验,得出架空线路异物清除激光所使用的能量密度对导线表面无损伤。上述文献仅定性研究激光对导线表面的肉眼可见损伤,缺乏对激光辐照导线温升规律和温度场分布研究,难以有效评估特定条件下激光辐照对架空导线损伤。

1 理论基础

激光照射在导线上,满足能量守恒定律:

$$R_L + T_L + \alpha = 1 \quad (1)$$

式(1)中: R_L 为导线表面对激光的反射率; T_L 为透射率; α 为吸收率。

架空线路异物激光清除器采用某一波段的红外激光,导线在受到总功率为 P 的红外激光辐照时,吸收的光能转化成热能 Q_R ,经热传导沿金属导线扩散,导线表面通过自然对流、强制对流和热辐射散热将部分能量释放到空气中,最终达到热平衡,吸收热能公式为:

$$Q_R = \alpha P \quad (2)$$

运行导线中存在交流电流,会因焦耳热导致载流温升,热量公式为:

$$Q_j = I^2 R_w(T_c) \quad (3)$$

式(3)中: Q_j 为载流产热; I 为导线中电流。

由于集肤、涡流、磁滞、临近效应等因素影响,输电导线的交流电阻 R_w 大于直流电阻值,且是一个与导线温度相关的函数,当激光辐照导致导线温度 T_c 升高并呈一定规律的分布时,也会使得导线本体上各部分的电阻率升高并呈不均匀分布,原有的电流分布规律也将改变,而导线总电流基本是一个恒定的值,因此会进一步加剧导线被激光辐照部位的载流温升。

架空线路载流温升计算通常采用 IEEE Std 738—2006 标准^[9],或者采用 IEC 提供的 IEC 61597—1995 标准^[10]中推荐的摩尔根公式,综合参考 2 个标准,采用有限元仿真方法计算导线温度。架空输电导线运行时温度主要受导线载流产热、日照吸热、对流换热、辐射散热的影响,稳态热平衡方程为:

$$Q_j + Q_s = Q_c + Q_r \quad (4)$$

式(4)中: Q_s 为日照吸热; Q_c 为对流换热,对流换热包括

自然对流散热和强制对流散热; Q_r 为辐射散热。

带电运行的钢芯铝绞线在激光辐照下的热传导方程、初始条件、边界条件为^[11]:

$$\begin{cases} \lambda(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}) + \varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \\ T|_{t=0} = T_0 \\ q = -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_s = a_{\text{con}}(T_w - T_f) + q_r \end{cases} \quad (5)$$

式(5)中: T 为钢芯铝绞线温度; λ 为材料热导率; x, y, z 为空间直角坐标; φ_1 为钢芯单位体积发热率; φ_2 为铝线单位体积发热率; φ_3 为铝线单位体积受激光辐照发热率; ρ 为物质密度; c 为物质比热容; t 为时间; T_0 为初始温度; q 为外表面某一点的热流密度矢量; n 为该点的等温线上的法向单位矢量; a_{con} 为对流散热系数; T_w 为发热体表面温度; T_f 为环境温度,此处取 20°C ; q_r 为线缆表面的净辐射换热热流密度; S 为导线的外表面。

本文不计强制对流散热,只考虑自然对流散热,自然对流散热可采用外部自然对流散热长水平圆柱模型,圆柱直径为 $2R$,流体为空气,绝对压力为1个大气压,外部温度为 20°C 。有限元分析中假设辐射传热方程为:

$$-n \cdot q = \varepsilon \sigma (T_{\text{env}}^4 - T^4) \quad (6)$$

式(6)中: ε 为表面发射率,取与吸热系数一致的0.5; σ 为 Stefan-Boltzmann 常数,其值为 $5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。 T_{env} 为环境温度; T 为导线表面温度。

2 激光辐照导线的温度场数值仿真

2.1 仿真建模

架空导线类型较多,如硬铝线、钢芯铝绞线、铝合金线、铝包钢绞线等,本文以钢芯铝绞线为研究对象。如图1所示。不计芯线之间的空隙,且材料各向同性,建立几何模型,其中长度 $L=1000 \text{ mm}$,内部圆柱为钢芯线,计算半径 R_{steel} ,外层圆柱为铝线,计算半径 R_{Al} 。对于铝绞线, $R_{\text{steel}}=0$ 。



图1 钢芯铝绞线仿真几何模型

激光光束采用高斯光束模型,实际清异过程中,激光清异设备位于地面,导线位于高空,因此激光只能以角度 θ 辐射到导线下部, θ 为激光光束与垂直方向的夹角, θ 越大,激光光束需传输的距离越远,能量衰减越严重,因此实际工作中, θ 角度不超过 $\pm 30^\circ$,在此范

围内激光辐照点中心位置的变化并不会太影响导线的温升,为简化计算模型,本文假设激光辐照位置在导线正下部。导线的吸收率为 α ,由此可得钢芯铝绞线模型侧面受激光辐照的产生的边界热源 Q_L 为:

$$Q_L = \frac{\alpha P}{2\pi R} e^{-\frac{2(x^2+y^2)}{\omega_0^2}} \quad (7)$$

式(7)中: α 为导线对激光的吸收率; P 为激光功率; R 为导线半径; ω_0 为辐照在导线上的清异激光束半径。

仿真模型中钢芯的电导率采用线性电阻率计算:

$$\sigma = \frac{1}{\rho_0 [1 + \alpha_R (T - T_{\text{ref}})]} \quad (8)$$

式(8)中: ρ_0 为来材料的参考电阻率,钢芯线取 $20 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$; T 为当前温度; T_{ref} 为参考温度,取 20°C ; α_R 为电阻温度系数,钢芯线取 $0.00651 (1/\text{K})$,外层铝线采用1350铝材料。

2.2 导线直径和吸收率对辐照点温度的影响

同样材料、同等环境条件下的导线,在不带电、不考虑日照的情况下,对圆柱铝导线模型进行参数化扫描仿真,研究导线直径和吸收率对辐照点温升的影响。激光功率 $P=100 \text{ W}$,激光波长为 10640 nm ,激光束半径值约为 7 mm ,假设吸收率为0.9,激光的吸收率为0.019,导线半径从 2 mm 到 20 mm ,步长为 1 mm ,仿真结果如图2所示。

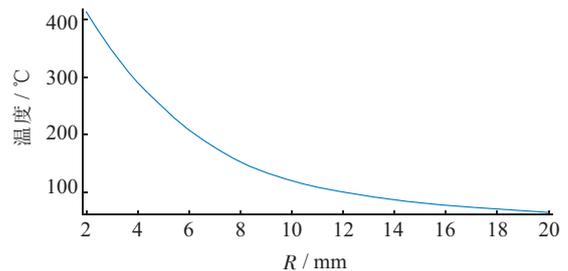


图2 激光辐照导线最高温度随导线半径的变化

由图2可以看见,导线直径越小,散热能力越差,在激光辐照时,辐照点温升越大。假设铝导线外径 9.6 mm (110 kV 及以上高压线路导线半径不小于 9.6 mm)^[12],吸收率从 $0 \sim 1$,步长为 0.05 ,其他条件不变,仿真结果如图3所示。

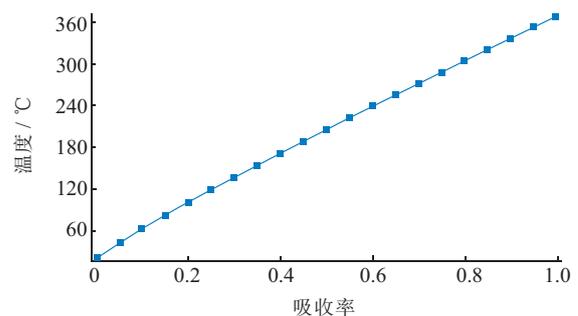


图3 辐照点温度随吸收率变化曲线

金属铝对红外激光的吸收率很低,室温下表面光洁铝对 10 640 nm 激光的吸收率为 0.019,对 1064 nm 激光的吸收率为 0.08^[13],由图 3 可见,相对应的导线最高温度不超过 40 °C。实际的吸收率与导线表面粗糙度、污秽程度、电阻率等因素有关系。

2.3 激光辐照下导线的温度场仿真

采用常用典型的钢芯铝绞线 LGJ-300/50 作为仿真对象,研究导线温升和温度场分布。

2.3.1 导线载流温度场分布

采用频域稳态仿真,在线缆上施加 50 Hz 的电流,电流值采用该型号导线最大载流 725 A。日照强度取 $I_s=1000 \text{ W/m}^2$,吸热系数,发亮新线取 0.23~0.46,发黑旧导线取 0.9~0.95,工程计算一般取 0.5^[14],本文取 0.5;激光功率 100 W,光束半径 7 mm,激光吸收率取一个较大的值 0.9。

仿真结果显示,运行导线在载流升温、垂直日照升温、自然对流散热、辐射散热的作用下,内部温度最大值为 83.040 1 °C,最小值为 83.005 6 °C,最大温差仅为 0.034 5 °C,温差极小,温度分布均匀。如图 4 所示。

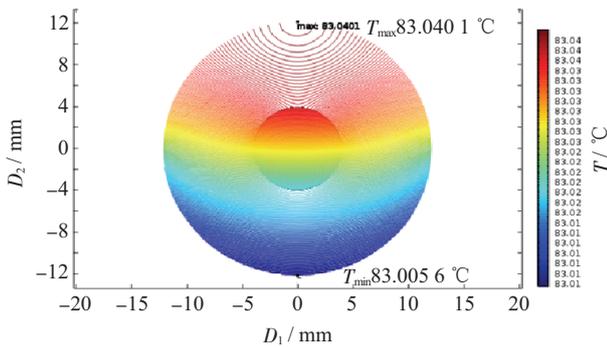


图 4 载流、日照导致的导线界面温度分布

2.3.2 激光辐照下导线的温度场

当导线中没有电流,不考虑日照吸热,导线初始温度设定为 20 °C,激光辐照导线仿真结果如图 5、图 6 所示。

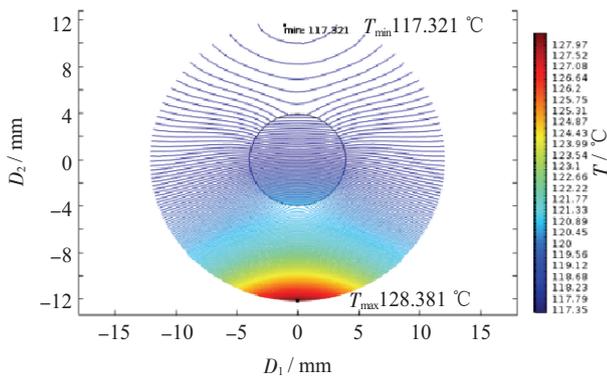


图 5 激光单独作用下的导线截面温度分布

当导线中没有电流,不考虑日照吸热,但给定导线初始温度设定为上文中日照载流平衡温度 83 °C,激光辐照导线仿真结果如图 7、图 8 所示。

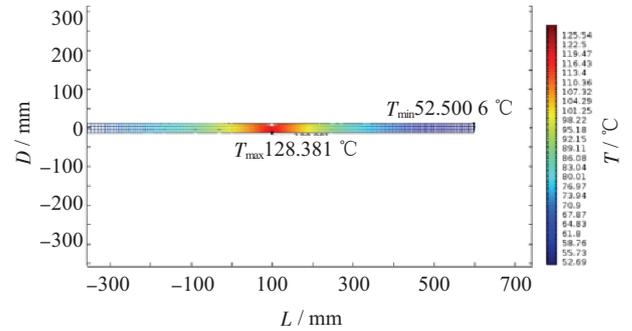


图 6 激光单独作用下的导线轴向截面温度分布

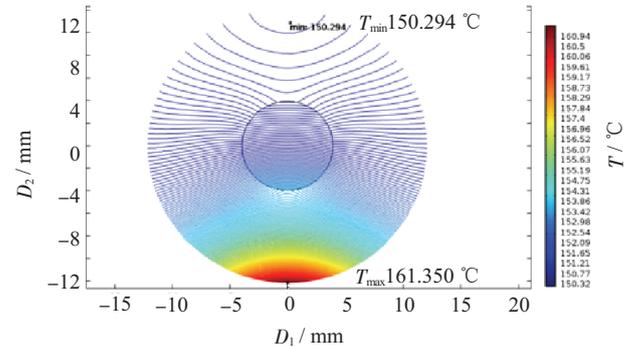


图 7 初始温度 83 °C 时激光辐照截面温度分布

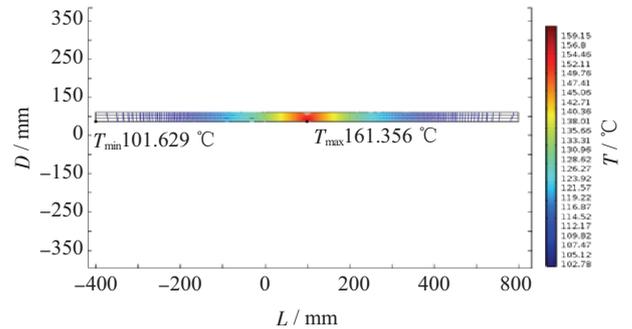


图 8 初始温度 83 °C 时激光辐照截面温度分布

2.3.3 激光辐照载流导线的温度场

导线满负荷运行时,受激光辐照时的温度仿真结果如图 9、图 10 所示。

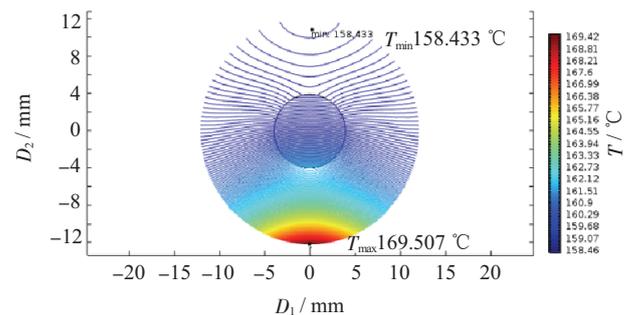


图 9 带电导线在激光和阳光作用下的截面温度分布

2.3.4 温度场仿真结果分析

由温度场仿真结果图可见,激光辐照导线时,热量沿导线各方向扩散,并通过自然对流和表面辐射的方式传到空气中,因此导线上的温度由辐照点向四周呈逐渐降低的趋势。温度场仿真数据结果如表 1 所示。 T_{\max} 为仿真导线模型上的最高温度, $T_{j\min}$ 为辐照点截面最低温度, T_{\min} 为导线最低温度。

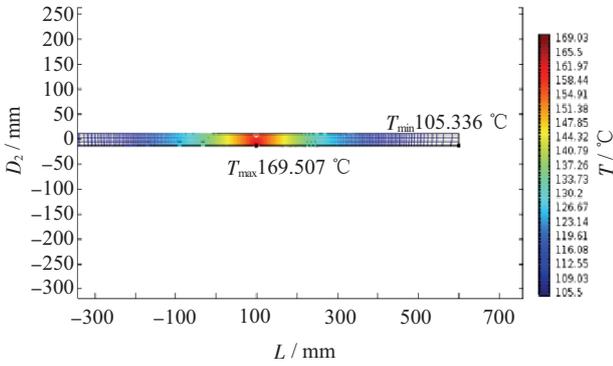


图 10 带电导线在激光和阳光作用下的轴向截面温度分布

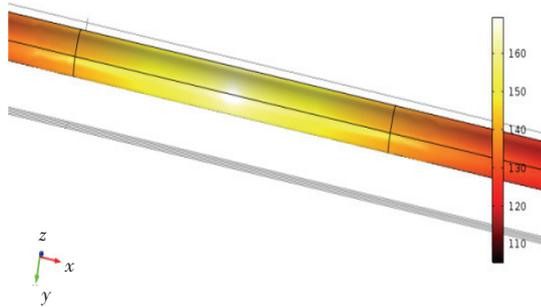


图 11 带电导线在激光和阳光作用下的三维表面温度分布

表 1 温度仿真数值 $^{\circ}\text{C}$

温度	载流温升	激光辐照 (20 $^{\circ}\text{C}$)	激光辐照 (83 $^{\circ}\text{C}$)	载流温升+激光辐照
T_{\max}	83.040 1	128.381	161.35	169.507
T_{\min}	83.005 6	117.321	150.294	158.433
T_{\min}	83.040 1	52.5	102.629	105.336

仅受激光辐照,导线初始温度为 20 $^{\circ}\text{C}$ 时,辐照点最高温度为 128.381 $^{\circ}\text{C}$,而导线初始温度为 83 $^{\circ}\text{C}$ 时,辐照点最高温度为 161.35 $^{\circ}\text{C}$,2 种情况下初始温度差为 63 $^{\circ}\text{C}$,激光辐照热平衡后最高温度之差为 32.969 $^{\circ}\text{C}$,原因是导线初始温度的升高,导致导线表面温度升高,与空气环境温度温差变大,对流散热和辐射散热加强,因而热平衡后的温差小于 63 $^{\circ}\text{C}$;

载流导线无激光辐照时,导线温度较均匀,约为 83 $^{\circ}\text{C}$;载流导线在受激光辐照后,辐照点温度为 169.507 $^{\circ}\text{C}$,温度升高了约 86 $^{\circ}\text{C}$,此温度的升高来源于激光辐照产生的热能,和局部电阻率变化而额外产生的焦耳热;初始温度为 83 $^{\circ}\text{C}$ 的导线在受激光辐照后,辐照点温度为 161.35 $^{\circ}\text{C}$,与载流受激光辐照导线的最高温度 169.507 $^{\circ}\text{C}$ 相差 8.157 $^{\circ}\text{C}$,这个温度差值主要来源于导线局部电阻率变化额外产生的焦耳热。

由激光辐照载流导线后电导率分布的仿真结果如图 12 所示。导线存在电导率及分布不均,且与温度的分布密切相关,电导率随温度的增加而降低。由于局部温度升高不剧烈,导线辐照位置未因电导率变化产生额外焦耳热导致剧烈升温。

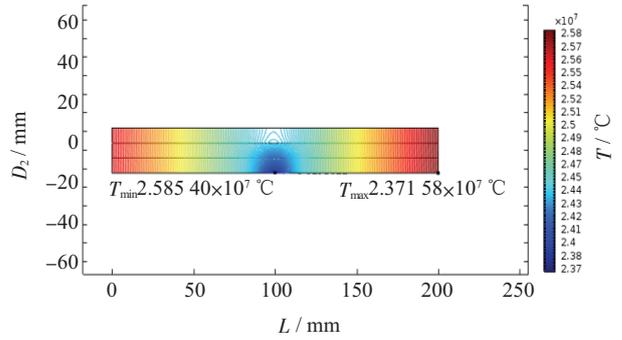


图 12 轴向截面电导率分布

3 结束语

清异激光辐照导线时,不考虑风速、环境温度变化等因素,架空导线的温升受吸收率、导线直径影响较大,与吸收率正相关,与导线直径负相关。温度在辐照点位置最高,从辐照点位置向四周逐渐降低,由于金属良好的导热性,热量快速向左右方向传导,并在导线表面与空气进行自然对流散热和辐射散热,导线温度快速降低;温度的不均匀分布导致载流导线存在局部电导率不均匀分布现象,其分布趋势与温度分布相关。本文有限元仿真模型采用极端原则,未考虑强制对流散热和不同表面入射角吸收率的差异,实际情况下,有风情况下的强制对流散热会引起温度的进一步快速降低,考虑入射角吸收率后的总吸收率比本文中的设定的吸收率低,因此,本文采用的温度分析方法和仿真模型可提供极端条件下的温度分布,对于激光辐照导线的安全性分析和研究具有重要意义。

参考文献:

- [1] 刘明亮, 杨厚峰. 导线易漂浮物清除工具的研制与应用[J]. 自动化博览, 2011(2): 185-187.
- [2] 金立军, 姚春羽, 闫书佳, 等. 基于航拍图像的输电线路异物识别[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2013, 41(2): 277-281.
- [3] 周辉, 杨颖锐, 杨生兰. 输电线路异物清除装置研究[J]. 科技创新与应用, 2016(7): 174-175.
- [4] 朱德中, 刘俊伟, 梁宏杰, 等. 遥控喷火飞行器带电处理异物装置的研发[J]. 中国科技纵横, 2016(10): 49-50.
- [5] 陈光, 刘洋, 马勇, 等. 一种输电线路异物的激光远程清除装置及方法: CN104064989A [P]. 2014.
- [6] 梁伟, 陈杰, 刘洋, 等. 清除架空线路异物的新型装置及其试验研究[J]. 中国电机(技术版), 2015(9): 57-59.
- [7] 齐丽君. 输电线路激光除冰的理论及实验研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.
- [8] 李鸿泽, 陈光, 刘洋, 等. 架空线路典型导线与异物激光烧蚀特性试验研究[J]. 高压技术, 2015(S41): 107-111.
- [9] IEEE Standard for Calculating the Current-Temperature of Bare Overhead Conductors[S]. IEEE Standard 738—2006, 2006.
- [10] IEC 61596 Overhead Electrical Conductors—Calculation Methods for Stranded Bare Conductors[S]. International Electrotechnical Commission, 1995.

- [11] 何整杰,李震彪,梁盼望. 输电线温度及载流量的 ANSYS 计算方法[J]. 浙江电力,2010,29(8):1-5.
- [12] Q/GDW 179—2008,110~750 kV 架空输电线路设计规范[S].
- [13] 张国顺. 现代激光制造技术[M]. 北京:化学工业出版社,2006:23-29.
- [14] 柳亚芳. 基于参数辨识的架空导线载流温升热路模型研究[D]. 南京:南京理工大学,2015.

作者简介:

黄清(1968),男,江苏常州人,高级工程师,从事电网设备状态分析及技术管理工作;

魏旭(1974),男,江苏连云港人,教授级高级工程师,从事高电压及变电设备技术研究与管理工;

周志成(1977),男,湖南株洲人,高级工程师,从事高电压技术研究工作。

Research on Temperature Effect of Laser on Overhead Transmission Line

HUANG Qing¹, WEI Xu¹, ZHOU Zhicheng²

(1. State Grid Jiangsu Electric Power Company, Nanjing 210024, China;

2. State Grid Jiangsu Electric Power Company Electric Power Research Institute, Nanjing 211103, China)

Abstract: The foreign body cleaner based on directed energy laser is a new type of foreign body removal tool which is effective, safe, convenient, and practical. It can remove foreign bodies of overhead transmission line remotely under live working condition. When the laser device cleans foreign bodies, the local temperature rise of wire may happen, followed with local damage of wire or abnormal operation of power transmission line. Theoretical analysis and multi-physics finite element simulation are carried out to study the local temperature variation and temperature field distribution of wire under laser action. The simulation results show that the laser absorption rate and the wire diameter have great effect on wire temperature during the laser action on wire. The simulation results of laser irradiating aluminum cable steel reinforced (ACSR) LGJ-300/50 show that the laser irradiation can result in local temperature rise with the upper limit of 170°C, and the local conductivity of current carrying conductor has an uneven distribution related with temperature.

Key words: foreign body removal; laser; overhead line; wire; temperature

(上接第 31 页)

Application of Infrared Temperature Measurement Technology in Start-up and Commissioning of UHV

WANG Chen, TAO Jiagui, MA Yong, XIAO Lei, SHI Jinglei

(State Grid Jiangsu Electric Power Company Electric Power Research Institute, Nanjing 211103, China)

Abstract: The infrared temperature measurement technology is widely used in detecting and repairing electrical equipment, but hasn't been used in substation start-up and commissioning. In this paper, the infrared temperature measurement technology applied into the start-up and commissioning of ultra-high voltage project in two engineering cases are introduced. Finally, the problems of and corresponding suggestions to infrared temperature measurement technology for start-up and commissioning are proposed.

Key words: ultra-high voltage; infrared temperature; start-up and commissioning; eliminate defects

(上接第 44 页)

Directional Component Based on Sequence Component for Parallel Lines with Magnetically Strong and Electrically Weak Connection

ZHANG Qibing¹, SU Dawei¹, XU Chunlei¹, PENG Zhiqiang²

(1.State Grid Jiangsu Electrical Power Company, Nanjing 210024, China;

2. State Grid Jiangsu Electric Power Company Electric Power Research Institute, Nanjing 211103, China)

Abstract: The zero sequence directional component gives the wrong judgment when ground faults occur on the other line of the parallel transmission lines with magnetically strong and electrically weak connection. Focused on the problem, the characteristics of voltage sequence components under different faults are analyzed. Based on different voltage sequence components, a new zero sequence directional component is proposed in this article. Considering the different types of faults, the new zero sequence directional component takes the synthetic value of zero sequence voltage and positive sequence voltage as the reference voltage of phase comparison. The new proposed zero sequence directional component can distinguish the fault direction correctly for parallel transmission lines with magnetically strong and electrically weak connection, preventing the unwanted operation of the pilot zero sequence directional protection. The simulation by PSCAD verifies the effectiveness of the new directional component.

Key words: weak electrical and strong magnetic; parallel lines; directional component