

高压输电线覆冰连续激光清除系统设计与实验研究

周艺环¹,冯思朦¹,蔡 勇²,王文森³

(1. 国网陕西省电力公司,陕西 西安 710054;2. 中国科学院西安光学精密机械研究所,陕西 西安 710119;

3. 国网陕西省电力公司电力科学研究院,陕西 西安 710054)

摘 要:高压输电线覆冰是影响电网正常运行的一个重要因素,激光除冰以其优异的性能在高压输电线除冰中具有广阔应用前景。为安全、快捷的清除高压输电线上的覆冰,本文在分析研究激光除冰原理的基础上,设计了基于连续激光的高压输电线覆冰清除系统,搭建实验装置,实验研究了不同距离和不同功率下的融冰效果。结果表明,激光除冰效果在很大程度上取决于激光参数。激光功率和距离相同时,融冰孔深随功率增大而增大。激光功率相同时,融冰孔深随距离增加而降低。激光光斑直径较小而功率较大时,融冰孔径略小于光斑直径。激光光斑直径较大而功率较小时,融冰孔径则大于光斑直径。该系统结构简单,易于操作,能有效用于高压输电线覆冰清除。

关键词:电网;高压输电线;连续激光;覆冰;激光除冰

中图分类号:TN249 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2021.01.007

Design and experimental study of CW laser cleaning system for high voltage transmission lines ice-covered

ZHOU Yi-huan¹, FENG Si-meng¹, CAI Yong², WANG Wen-sen³

(1. State Grid Shaanxi Power Company, Xi'an 710054, China; 2. Xi'an Institute of Optics and

Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China;

3. State Grid Shaanxi Electric Power Research Institute, Xi'an 710054, China)

Abstract: Icing of high voltage transmission lines is an important factor affecting the normal operation of power grid. Laser deicing has a broad application prospect in high voltage transmission line deicing because of its excellent performance. In order to cleaning the high voltage transmission lines ice safety and quickly, the theory of laser cleaning ice is analyzed and studied. The system of laser cleaning ice for high voltage transmission lines is designed based on CW laser. The experiment device is established. The effects of melting ice at different distances and at different power were studied experimentally. The results show that the effect of laser deicing depends largely on laser parameters. When the laser power and distance are the same, the depth of ice melting hole increases with the power. With the same laser power, the melting hole depth decreases with increasing distance. When the laser spot diameter is small and the power is large, the melting ice aperture is slightly smaller than the spot diameter. When the laser spot diameter is larger and the power is smaller, the melting ice aperture is larger than the spot diameter. The system is simple in structure and easy to operate. It can be effectively used to remove icing from high voltage transmission lines.

Keywords: power grid; high voltage transmission lines; continuous wave laser; icing; laser de-ice

基金项目:国家电网陕西省电力科学院科研项目(No. 5226KY18002R)资助。

作者简介:周艺环(1970-),男,硕士,高工,研究方向为激光应用技术。E-mail:254604676@qq.com

收稿日期:2020-02-29; **修订日期:**2020-03-24

1 引言

随着西部大开发、西电东送电力发展的不断实施,我国有越来越多的高压电网分布在高海拔、峡谷、河流等多水易结冰区域,这些将会使输电线路不可避免的出现覆冰现象。高压输电线覆冰会导致线路垂度过大,过重则引起线路坠断或者线杆倒塌,绝缘子覆冰发生桥接闪络炸裂等事故,是威胁电网正常运行的一个重要因素。据不完全统计,我国自 20 世纪 50 年代以来,仅由于输电线路覆冰造成的事故就高达 5000 余次,出现了多区域、大面积的电网故障,对我国的经济发展造成了不可估量的损失。因此,高压输电线覆冰清除研究对我国电力系统的安全可靠运行至关重要^[1-4]。

高压输电线距离地面较高,环境复杂,覆冰清除较为困难,处理不当会产生安全问题。传统的输电线路覆冰清除方法主要有热力融冰、机械除冰和被动除冰三种^[5-7]。热力融冰是通过在导线上附加热源或导线基于焦耳效应自身发热除冰,磁滞损耗大,发热慢,效率低。机械除冰是采用施加外力清除导线覆冰的方法,通常需要操作者现场执行,需耗费大量人力,操作繁琐,存在很大的安全隐患,效率也不高。被动除冰则主要依靠外界自然力量如风力、温度变化、地球引力等清除覆冰,具有不确定性,可靠性也不高,无法应用于紧急情况的输电线路除冰。激光作为一种新型光源,具有方向性强、能量高、远距离非接触等优点,广泛应用于军事、工业制造、激光打标、工程结构异物清除等领域^[8-9]。采用激光清除输电线路覆冰可以达到高效、安全等目的,在高压及特高压电网线路覆冰清除中具有较好的应用前景^[10-13]。为安全、快捷的清除高压输电线上的覆冰,本文分析研究了激光除冰的原理,设计了基于连续激光的高压输电线覆冰清除系统,搭建实验装置,并对不同距离和不同功率下的覆冰清除进行了实验研究,取得了较好效果。

2 激光除冰原理

激光除冰主要原理是利用高能激光产生的热能使覆冰融化,即激光入射到冰层,光能被冰吸收会转化热能,从而融冰的过程。当一束激光照射在冰上,在冰中进行传播时,激光能量被吸收的规律有:

$$I_{\text{out}} = I_{\text{in}} \exp(-\alpha L) \quad (1)$$

式中, I_{in} 为激光的输入光强; I_{out} 为激光在冰中传输一段距离后的输出光强; α 为冰的吸收系数,主要取

决于激光波长; L 为激光在冰中的传输距离。

激光在冰中传输一段距离后,冰层吸收的激光光强为:

$$\Delta I = I_{\text{in}} - I_{\text{out}} \quad (2)$$

冰层吸收激光能量后产生的温度场 T 为:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + (1 - R) \alpha \Delta I e^{-\alpha L} + Q \quad (L > 0) \quad (3)$$

式中, ρ 为冰的密度; c 为冰的比热容; k 为冰的热导率; ∇ 为梯度算子; Q 为其他体热源项; R 为冰对激光的反射率。

若激光光斑半径为 r , 根据能量守恒定律,则单位时间内冰吸收激光能量后在冰内部产生的热量 J 与温升 ΔT 之间的关系为:

$$J = c \rho \pi r^2 L \Delta T \quad (4)$$

由式(4)可知,激光照射覆冰后为达到清除目的,则冰内部由于温升原因产生的热量应积累到一定程度,即大于促使冰融化的临界热量。

3 激光除冰系统设计

激光清除高压输电线覆冰关键时确定激光器的参数,主要时激光的功率选择和光斑直径的确定。根据物质吸收激光产生热量与激光功率之间的关系即可确定融冰所需的激光功率 W 为:

$$W = \frac{J}{\tau \cdot \eta \cdot t} \quad (5)$$

式中, τ 为激光在冰中的透过率; η 为激光能量耦合效率; t 为激光照射时间。

本文中,已知纯水冻成的冰密度为 0.9 g/cm^3 , 比热容为 $2.1 \times 10^3 \text{ J/(kg} \cdot ^\circ\text{C)}$, 假设融冰孔深 20 mm, 激光光斑直径为 40 mm, 将 -5°C 的冰加热到 5°C 左右, 由式(4)可得激光融冰时冰吸收的热能为 474.768 J。由文献[14]可知, 波长为 1060 nm 的激光在冰中透过率约为 0.3 左右, 激光能量耦合率为 0.97, 若照射时间为 30 s, 则根据式(5)可得所需激光功率约为 54.38 W, 即选用的激光器能量 $W_{\text{选}} \geq 54.38 \text{ W}$ 时, 则该激光器即可用于清除高压输电线上的覆冰。

当激光器选定后, 激光除冰的效果在很大程度上与激光的光斑大小有关。由于激光能量多呈高斯分布, 当激光传输到一定距离后, 激光的光斑会发生变化, 有:

$$\omega(s) = \omega_0 \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda s}{\pi \omega_0^2} \right)^2} \quad (6)$$

式中, ω_0 为激光初始光斑半径; s 为传输距离; λ 为激光波长。

通常激光清除高压输电线覆冰时距离较近, 多为 10 ~ 180 m 范围。若选择激光器的波长为 1060 nm, 通过分析可知, 当激光光束发散角为 $8'' \sim 10''$, 对应的 $\omega_0 = 8.8636$ mm 和 $\omega_0 = 7.0909$ mm 时, 工作距离为 10 ~ 180 m 处, 激光光斑直径在 30 mm 以内即可达到较好的除冰效果。

本文设计的高压输电线覆冰激光清除系统如图 1 所示, 主要包括激光器、控制器、激光准直器、光纤转换头和方向调整架五部分。激光器发出连续激光经光纤转换头传输到激光准直器中, 将激光形成一条光束定向发射出去。控制器主要用于控制激光器的发射功率。方向调整架可用来带动激光器在空中扫描和定位, 从而实现激光在空中任意位置的精确定位和融冰操作。根据上述分析, 系统中选用连续激光器为 YLR-500-WC-Y14 水冷型光纤激光器, 波长为 1060 nm, 激光器最大输出功率 500 W, 由上述分析可知能满足融冰效果。激光准直器口径 38 mm, 焦距为 140 mm。

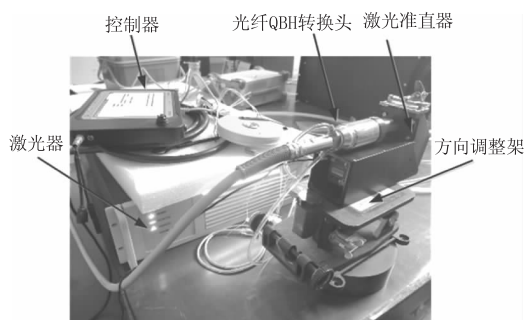


图 1 激光除冰系统

Fig.1 Laser cleans ice system

4 实验研究

实验前需准备好 150 mm 卡尺用于测量融冰孔直径和深度, 30 m 直尺用于测量融冰距离, 0.1 s 分辨率秒表用于激光融冰计时。将普通自来水冻成尺寸为 400 mm × 200 mm × 300 mm 的冰块, 如图 2 所示, 冰内部会含有少量气孔。将冰块固定在设定距离的平台上, 通过控制器调制好激光功率, 设置融冰的计时时间为 30 s, 每次融冰后测量融冰孔径和深度, 记录数据。

调制激光功率, 将激光束对准实验台放置冰块, 照射 30 s, 如图 3 所示, 可看到冰上出现锥形孔洞。当光斑直径为 15 mm 时, 不同功率、不同距离下融

冰孔深如图 4 所示。光斑直径为 10 mm 时, 不同功率、不同距离下融冰孔径如图 5 所示。光斑直径为 20 mm 时, 不同功率、不同距离下融冰孔径如图 6 所示。光斑直径为 30 mm 时, 不同功率、不同距离下融冰孔径如图 7 所示。光斑直径为 38 mm 时, 不同功率、不同距离下融冰孔径如图 8 所示。



图 2 实验用冰块

Fig.2 Experimental ice



图 3 激光照射 30 s 后冰上的孔洞

Fig.3 Holes in the ice after 30 seconds of laser light

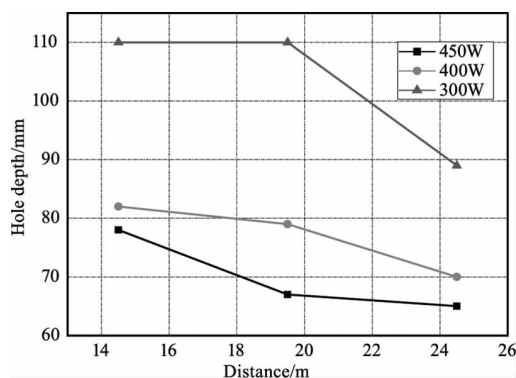


图 4 光斑直径为 15 mm 时不同距离不同功率下的融冰孔深

Fig.4 The ice melt hole depth under different distances and powers when the diameter of the spot is 15 mm

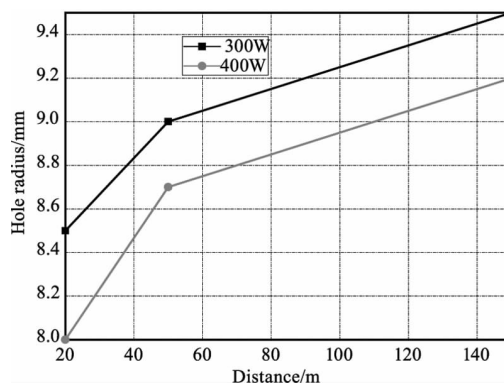


图 5 光斑直径为 10 mm 时不同距离不同功率下的融冰孔径

Fig.5 The aperture of melting ice at different distances and different powers when the spot diameter is 10 mm

由图 3 可以看出,本文设计的激光融冰系统能有效用于高压输电线的除冰。图 4 中,功率和距离相同时,功率越大,融冰孔深就越大,符合实际情况;相同功率下,距离越远融冰孔深降低,主要是因为激光传输距离增加会导致激光衰减和光斑发散,能量有所发散。

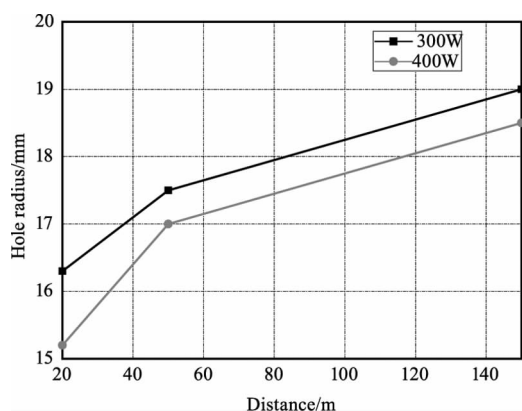


图 6 光斑直径为 20 mm 时不同距离不同功率下的融冰孔径

Fig. 6 The aperture of melting ice at different distances and different powers when the spot diameter is 20 mm

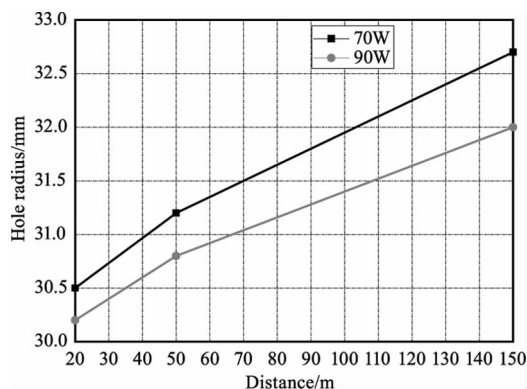


图 7 光斑直径为 30 mm 时不同距离不同功率下的融冰孔径

Fig. 7 The aperture of melting ice at different distances and different powers when the spot diameter is 30 mm

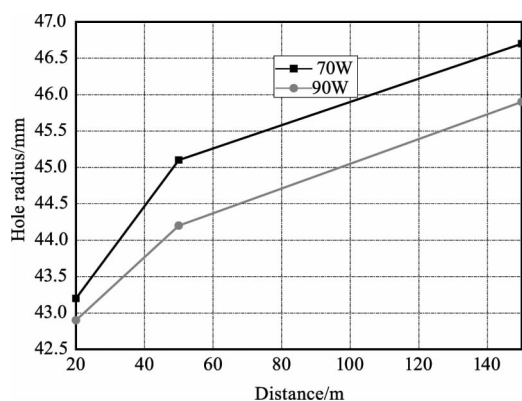


图 8 光斑直径为 38 mm 时不同距离不同功率下的融冰孔径

Fig. 8 The aperture of melting ice at different distances and different powers when the spot diameter is 38 mm

由图 5、图 6、图 7 和图 8 可知,激光光斑直径较小而功率较大时,融冰孔径比光斑直径略小,激光光斑直径较大而功率较小时,融冰孔径则大于光斑直径。产生该现象的主要原因是,激光能量呈高斯分布,光斑直径越大,能量越不聚焦,则光斑直径小而功率大时,融冰时间短,融冰孔径主要由激光光斑有效作用面积决定,导致融冰孔径略小于光斑直径;光斑直径大而功率小时,融冰时间相对增加,则激光融冰时冰孔直径会慢慢扩张,导致融冰孔径略大于光斑直径。

5 结 论

高压输电线覆冰会造成线路坠断或者线杆倒塌等重大事故,是威胁电网正常运行的一个重要因素,须对其进行清除。传统高压输电线除冰方法安全性低、可靠性差、效率不高且需耗费大量人力和财力,采用激光清除输电线路覆冰可以达到高效、安全等目的,在高压及特高压电网线路覆冰清除中具有较好的应用前景。为安全、快捷地清除高压输电线上的覆冰,本文分析研究了激光除冰的原理,设计了基于连续激光的高压输电线覆冰清除系统,搭建实验装置,并对不同距离和不同功率下的覆冰清除进行了实验研究,取得了较好效果。实验结果表明,该系统能有效用于高压输电线覆冰清除,结构简单,安装调试方便,成本低,易于操作,可以满足工程实践需求。本文研究成果可为高压输电线激光清除系统的设计提供理论和实验数据。

参考文献:

- [1] Han Junke, Yang Jingbo, Yang Fengli, et al. Analysis on tower collapsing for ice coating on typical transmission line in power grid Ice disaster area[J]. Power System and Clean Engery, 2010, 26(3): 31-35. (in Chinese)
韩军科, 杨靖波, 杨风利, 等. 电网冰灾典型线路覆冰倒塔分析[J]. 电网与清洁能源, 2010, 26(3): 31-35.
- [2] Chao Yafeng, Yue Yishi, Wang Cheng, et al. De-icing techniques for Ice-covered transmission lines; a review [J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(11): 1-9, 24. (in Chinese)
巢亚锋, 岳一石, 王成, 等. 输电线路融冰、除冰技术研究综述[J]. 高压电器, 2016, 52(11): 1-9, 24.
- [3] Xu Wenjun. Deicing and oil removal technology based on laser induced chemical reaction[D]. Wenzhou: Wenzhou

- University, 2019. (in Chinese)
- 徐文俊. 基于激光诱导化学反应的除冰除油技术研究[D]. 温州:温州大学, 2019.
- [4] Li Guidong, Yang Zhaohui. Analysis of transmission line icing[J]. Applied Energy Technology, 2013, (5): 25 – 28. (in Chinese)
- 李桂冬, 杨照辉. 输电线路的覆冰研究与分析[J]. 应用能源技术, 2013, (5): 25 – 28.
- [5] Chao Yafeng, Huang Fuyong, Jiang Xingliang, et al. Analysis and countermeasures of ice-melting flashover for Ice-covered insulator string of 500 kV transmission line[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(7): 60 – 65. (in Chinese)
- 巢亚锋, 黄福勇, 蒋兴良, 等. 500 kV 输电线路绝缘子融冰闪络事故分析及应对措施研究[J]. 高压电器, 2013, 49(7): 60 – 65.
- [6] Liu Gang, Zhao Xuezheng, Chen Yonghui. A de-icing method of electric transmission line by adjusting load based on controllable inductor and capacitor compensation[C]// 2009 IEEE Bucharest Power Tech Conference, Bucharest, Romania, 2009: 1 – 5.
- [7] Qi Lijun. Laser deicing theoretical and experimental research for transmission lines[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2012. (in Chinese)
- 齐丽君. 输电线路激光除冰的理论实验研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.
- [8] Li Zhongsheng, Wang Jiaxiao, Wang Hongpei, The test of deferent engerny of laser irradiation and indication thermodynamics[J]. Laser & Infrared, 2019, 49(10): 1185 – 1189. (in Chinese)
- 李忠升, 王佳笑, 王红培. 温度应力下激光照射指示器输出能量试验研究[J]. 激光与红外, 2019, 49(10): 1185 – 1189.
- [9] Song Jiafei, Li Liangchun, Xia Fujun, et al. Application study on laser washing technology in ammunition repair [J]. Laser & Infrared, 2017, 47(1): 29 – 31. (in Chinese)
- 宋佳飞, 李良春, 夏福君, 等. 激光清洗技术在弹药修理中的应用探索试验研究[J]. 激光与红外, 2017, 47(1): 29 – 31.
- [10] Liu Zhiying, Mu Zhu, Wang Jiake, et al. Design and parameter analysis of laser deicing optical system[J]. Acta Photonica Sinica, 2018, 47(8): 0822001. 1 – 0822001. 7. (in Chinese)
- 刘智颖, 穆竺, 王加科, 等. 激光除冰光学系统的设计与参数分析[J]. 光子学报, 2018, 47(8): 0822001. 1 – 0822001. 7.
- [11] Zhang Bingliang, Zhang Duqing, Han Liang. Experiment and analysis of laser remote Ice-melting for transmission line[J]. Shandong Electric Power, 2019, 46(1): 78 – 80. (in Chinese)
- 张秉良, 张都清, 韩梁. 架空输电线路激光远程融冰试验及分析[J]. 山东电力技术, 2019, 46(1): 78 – 80.
- [12] Xue Liang, Huang Qian. Applications of laser technology in electric power[J]. Journal of Shanghai University of Electric Power, 2014, 30(4): 383 – 387. (in Chinese)
- 薛亮, 黄茜. 激光技术在电力工程中的应用[J]. 上海电力学院学报, 2014, 30(4): 383 – 387.
- [13] Chen Sheng, Zhang Guixin, Xu Shuguang, et al. Analyses of laser de-icing methods for power system[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2011, 51(1): 47 – 52. (in Chinese)
- 陈胜, 张贵新, 徐曙光, 等. 电网中激光除冰技术分析[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2011, 51(1): 47 – 52.
- [14] Zhang Zhi. Study on transmission line Icing-thickness detection device based on laser ranging[D]. Chongqing: Chongqing University, 2017. (in Chinese)
- 张智. 基于激光测距的输电线路覆冰厚度检测装置研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2017.