

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2024.03.027

特高压直流线路带电融冰系统研制及工程应用

张璐¹, 李新民¹, 李伟¹, 朱明曦¹, 韩彦华¹, 陈松博², 孔志战²,
闫可为³, 于义亮³

(1. 国网陕西省电力有限公司电力科学研究院, 西安 710100; 2. 国网陕西省电力有限公司, 西安 710048;
3. 国网陕西省电力有限公司超高压公司, 西安 710075)

摘要: 为避免覆冰引起线路跳闸事故,且在融冰时不影响线路运行,论文研发了特高压线路地线和光纤复合架空地线(OPGW)的带电融冰系统,包含融冰电源、融冰装置、过电压保护系统、OPGW与地线回路。开展了OPGW/地线融冰参数校核、融冰装置参数校核、换流变压器、平波电抗器、桥臂过电压保护器选型,融冰线路绝缘化改造和绝缘配合设计,研发了特高压线路OPGW带电融冰系统。现场实测表明,融冰回路双端开路时,OPGW/地线感应电压可达13.7 kV,融冰回路单端接地时,感应电压降低至0.6 kV。计算表明,带电融冰装置选定额定参数10 kV/10 MW,可满足现场融冰要求。OPGW/地线表面覆冰为非规则形态,冰凌长度、直径、厚度的增长为非线性变化过程。现场实测表明,融冰装置输出260 A直流电流75 min后,OPGW最高温度升至20.7℃,安全地完成了特高压线路带电融冰。论文研制的特高压线路OPGW的带电融冰系统,为特高压直流线路在雨雪冰冻天气间安全运行提供了保障。

关键词: 特高压线路; 光纤复合架空地线; 带电融冰; 感应电压; 绝缘配合; 光纤温度

Development and Project Application of Live Ice-melting System for UHVDC Transmission Lines

ZHANG Lu¹, LI Xinmin¹, LI Wei¹, ZHU Mingxi¹, HAN Yanhua¹, CHEN Songbo²,
KONG Zhizhan², YAN Kewei³, YU Yiliang³

(1. Electric Power Research Institute of State Grid Shaanxi Electric Power Co., Ltd., Xi'an 710100, China; 2. State Grid Shaanxi Electric Power Co., Ltd., Xi'an 710048, China; 3. Ultra High Voltage Company of State Grid Shaanxi Electric Power Co., Ltd., Xi'an 710075, China)

Abstract: In order to avoid tripping of line due to ice coating and not affect operation of line in the ice melting, the live ice melting system for ultra-high voltage line ground wire and optical fiber composite overhead ground wire (OPGW), including ice melting power supply, ice melting device, over-voltage protection system, OPGW and ground wire circuit, is developed. The check of OPGW/ground wire melting parameter and melting device parameter, type selection of transformers, smoothing reactors, bridge arm over-voltage protectors and design of the insulation transformation and insulation coordination of melting ice lines are performed, and an OPGW live melting ice system for ultra-high voltage lines is developed. The actual measurement at site shows that, in case the both ends of the ice melting circuit are open, the induced voltage of OPGW/ground wire can reach 13.7 kV. When the single end of the ice melting circuit is grounded, the induced voltage decreases to 0.6 kV. The calculation shows that the selected rated parameters of 10 kV/10 MW for the live ice melting device can meet the ice melting requirements at site. The surface icing of OPGW/ground wire is irregular, and the growth of ice length, diameter, and thickness is a non-linear process. The actual measurement at site shows that after the ice melting device outputs a 260 A DC current for 75 minutes, the maximum temperature of OPGW rises to 20.7℃, completing safely the live ice melting of ultra-

收稿日期:2023-10-01; 修回日期:2023-12-30

基金项目:国网陕西省电力有限公司科技项目(5226KY23000W);国家电网公司科技项目(5226SX22000V)。

Project Supported by State Grid Shaanxi Electric Power Co., Ltd. Technology Project(5226KY23000W), State Grid Corporation of China Technology Project(5226SX22000V).

high voltage lines. The live ice melting system for OPGW of ultra-high voltage transmission lines developed in the paper provides a guarantee for safe operation of ultra-high voltage DC lines in rainy, snowy, and freezing weather.

Key words: ultra high voltage transmission line; optical fiber composite overhead ground wire; live ice-melting; induced voltage; insulation coordination; fiber optic temperature

0 引言

近年来,全球气候的变化加剧^[1],中国覆冰区域从南方向西北地区偏移,覆冰跳闸呈上升趋势。某 ± 800 kV线路分别于2021年2月28日、2022年1月25日两次发生因导线不均匀覆冰导致的地线/光缆断线,引起线路停运。某750 kV线路于2023年2月11日发生导线不均匀覆冰导致相间放电,引起线路停运。雨雪冰冻等极端气候发生时,电力系统经常遭受巨大损失,其中,输电线路受损区段主要集中在“两大两微”(大档距、大高差,微地形、微气象)地区。因此,开展特高压线路地线和光纤复合架空地线(optical fiber composite overhead ground wire, OPGW)的带电融冰系统研制及工程应用,对于保障特高压线路,尤其是“两大两微”地区特高压线路的安全运行具有重要意义。

目前,学者们在覆冰理论^[1-3]、覆冰监测^[4-7]、覆冰预警^[8-13]、融除冰技术^[14-16]、冰害机理^[17-22]及工程应用^[14, 23-29]等方面取得了一系列成果。一般情况,采用停电的方式开展导线的融冰,在安全性和融冰的速度上更具有优势。然而,停电会引起负荷的损失,经济性差。此外,地线覆冰一般更严重,地线融冰较导线融冰更加迫切。

在超特高压线路运行工况下开展地线及 OPGW 直流带电融冰还存在以下技术问题待攻克:

1) OPGW 稳态及暂态感应电压抑制技术。一是待融冰的 OPGW 上会因运行直流线路产生静电感应电压;二是 OPGW 上会因交流线路产生电磁感应电压;三是直流单级停运会导致暂态过电压出现在 OPGW 上。上述稳态及暂态感应电压会引起融冰装置损坏,需要准确掌握感应电压的大小,并采取相关技术方法有效抑制感应电压,确保不停电融冰时装置安全运行^[30]。

2) 地线/OPGW 带电融冰绝缘配合技术。输电线路地线/OPGW 带电融冰绝缘配合需要同步考虑融冰和防雷效果,开展绝缘子和保护间隙选型。覆冰季节来临前,融冰开关接入融冰装置,形成融冰回路,绝缘子及间隙击穿电压应大于融冰装置输出电压;雷雨季节来临前,融冰开关接地,出现雷击时保护间隙击穿,有效防雷。

3) 大容量移动式直流带电融冰装置研制与工程应用技术。目前,固定式停电融冰装置技术已相当成熟,但大容量移动式直流带电融冰装置研制与工程应用尚未见相关报道。移动式直流带电融冰装置研制需考虑小型化、设备过电压抑制与保护等问题,需开展融冰装置参数校核,换流变压器、平波电抗器、桥臂过电压保护器选型等。同时,需攻克光缆精确监测与温控、融冰功率精细调控等关键技术。

针对上述存在问题,文中提出了特高压线路 OPGW/地线的带电融冰技术方案,开展了带电融冰系统研制工作,并在某 ± 800 kV 特高压线路开展了 OPGW/地线的带电融冰现场工程应用,验证了带电融冰效果,有效保障了特高压线路在雨雪冰冻天气下的安全稳定运行。

1 带电融冰系统结构

特高压线路 OPGW 与地线带电融冰系统示意图见图 1。系统包含 4 个部分:融冰电源、融冰装置、过电压保护系统、OPGW 与地线回路。

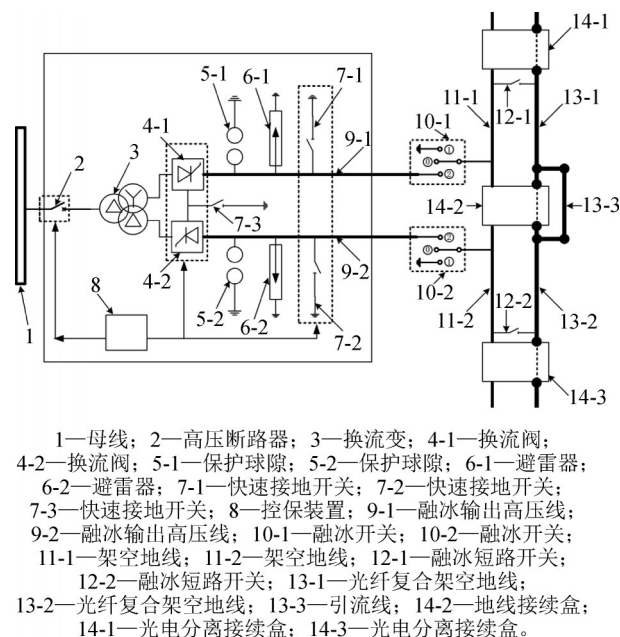


图 1 超特高压线路 OPGW 与地线带电融冰系统示意图
Fig. 1 Schematic diagram of ultra-high voltage OPGW and ground wire live ice melting system

融冰电源为高可靠双电源系统,一路由 35 kV 高压母线提供,另一路由柴油发电机提供。融冰装置包括换流变、高压断路器、换流阀、控制保护装置

置,将35 kV交流输入电压整流输出为 ± 5 kV直流输出电压^[30]。过电压保护系统包含保护球隙、保护避雷器、快速接地开关。保护球隙和快速接地开关动作,用于抑制电磁感应或静电感应电压;避雷器动作,用于抑制暂态过电压,可保障装置的运行安全。OPGW与地线回路包含融冰输出高压线、融冰开关、架空地线、融冰短路开关、OPGW、引流线、地线接续盒、光电分离接续盒,形成待融冰回路。

2 特高压线路OPGW融冰系统设计校核

2.1 OPGW、地线融冰参数校核

某 ± 800 kV线路2484号-2509号长度14.446 km,地线型号JLB20A-150-19,OPGW型号OPGW-24B1(ULL)-155,根据温度折算公式计算得到0℃时,地线直流电阻为0.539 Ω/km ,OPGW直流电阻为0.518 Ω/km 。

按照《直流融冰系统设计技术规程》(DL/T 5511—2016)^[31],计算可得该段线路最小融冰电流为:

$$I_{\min} = \sqrt{\Delta t [R_0(R_{T0} + R_{T1})]} \quad (1)$$

$$R_{T0} = \lg(D/d)/(273\lambda_b) \quad (2)$$

对于雨淞

$$R_{T1} = 1/[0.09D + 0.22 + 0.73(vD)^{2/3}] \quad (3)$$

对于雾淞

$$R_{T1} = 1/[0.04D + 0.84(vD)^{3/4}] \quad (4)$$

式(1)~(4)中: $I_{\min}$ 为最小融冰电流,A; Δt 为地线温度与环境温度差,℃; R_0 为冰层的等效传热阻,℃·cm/W; R_{T0} 为辐射对流等效热阻,℃·cm/W; D 为覆冰后导地线外径,cm; d 为地线或导线外径,cm; λ_b 为覆冰导热系数,W/(℃·cm),雨淞取0.022 7,雾淞取0.001 2; v 为融冰时同期风速,m/s,一般取3~5 m/s。

考虑现场实际应用融冰与故障工况的不一致,不同环境温度、风速、地线覆冰厚度下地线最小融冰电流值见图2。从图2可见,环境温度越低、风速越大、覆冰厚度越小,需要的最小融冰电流越大。结合现场实际观测,该线路故障时覆冰类型为混合淞,介于雾淞与雨淞之间,其覆冰导热系数、对流及辐射等效热阻等按照线性插值进行折算。线路覆冰时温度约为-5℃、环境风速5 m/s、覆冰厚度21.5 mm,计算得到最小融冰电流约为215.1 A。

当融冰电流过大时,一是会出现快速脱冰跳跃,危及线路安全运行;二是导地线会出现不可恢复的变形。因此,按照相关经验理论,可得到地线的最大融冰电流为:

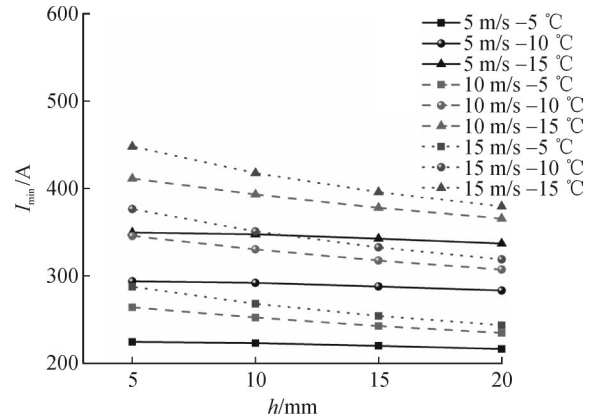


图2 不同温度、风速、覆冰厚度下最小融冰电流

Fig. 2 The minimum ice melting current under different temperature, wind speed and ice thickness

$$I_{\max} = \sqrt{(W_R + W_F - W_S)/R_m} \quad (5)$$

$$W_R = \pi D_1 E_1 S_1 [(t_m + 273)^4 - (t + 273)^4] \quad (6)$$

$$W_F = 0.57 \pi \lambda_f (t_m - t) R_e^{0.485} \quad (7)$$

$$W_S = \alpha_s J_s D_1 \quad (8)$$

$$\lambda_f = 2.42 \times 10^{-2} + 3.5(t + t_m) \times 10^{-5} \quad (9)$$

$$R_e = \frac{v D_1}{1.32 \times 10^{-5} + 4.8(t + t_m) \times 10^{-8}} \quad (10)$$

式(5)~(10)中: $I_{\max}$ 为最大融冰电流,A; W_R 为辐射散热功率,W/m; W_F 为对流散热功率,W/m; W_S 为日照吸热功率,W/m; R_m 为导地线电阻, Ω/m ; E_1 为辐射散热系数,0.9; S_1 为常数, 5.67×10^{-8} (W/m²); D_1 为导线或地线的外径,m; t_m 为导地线允许温度,℃; t 为环境温度,℃; λ_f 为导地线表面空气传热系数,W/(m·℃); R_e 为雷诺数; α_s 为导地线表面吸热系数,0.9; J_s 为日光对导线或地线日照强度,通常取900 W/m²^[30]。

依据式(5)~(10)得到了不同环境温度、风速下地线最大融冰电流值,结果见图3。由图3可见,环境温度越低、风速越大,允许的最大融冰电流越大。线路覆冰时环境温度约为-5℃、风速5 m/s,则允许最大融冰电流为611.84 A。

2.2 融冰装置额定电压及容量校核

融冰时,将图1中待融冰区段架空地线整体对地绝缘改造,将第一架空地线、第二架空地线与融冰输出正、负极相连,借助移动式融冰装置,将融冰电流输送至架空地线,并经OPGW返回融冰装置,形成融冰回路,融冰回路示意图见图4。

待融冰区段长度14.446 km,计算得到地线光缆回路总电阻为16.45 Ω 。融冰装置的35 kV电源点距离待融冰线路较近,融冰输出高压线长度小于1 km,其电阻值较小,计算时可忽略。按照图3中典型气象条件下的最大融冰电流为611.84 A计算,融冰电压为10.06 kV,此时融冰容量为6 115.11 kW。考

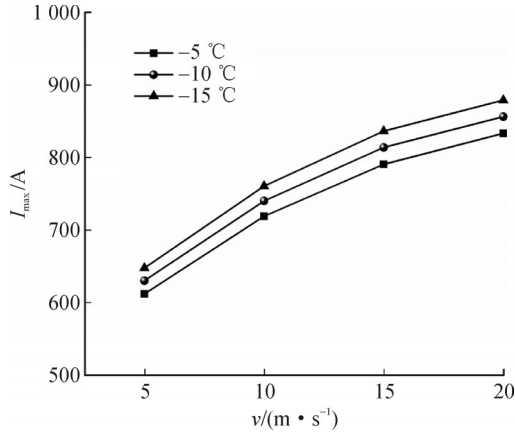


图3 不同温度、风速下最大融冰电流

Fig. 3 The maximum ice melting current under different temperature and wind speed

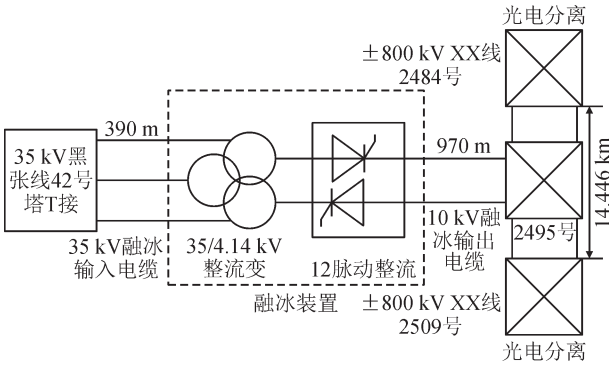


图4 融冰回路示意图

Fig. 4 Schematic diagram of ice melting circuit

考虑到融冰装置的内阻、融冰输出高压线电阻等回路压降,推荐额定融冰电压10 kV,额定容量为10 MW。

2.3 OPGW、地线感应电压测试校核

在设计带电融冰系统时,考虑到OPGW和地线上存在感应电压,会影响带电融冰装置的安全运行,在±800 kV线路运行工况下,对OPGW和地线上的感应电压进行了仿真计算和现场实测。

图1中第一融冰开关、第二融冰开关双端开路、单端接地、双端接地3种工况下OPGW和地线回路上的感应电压计算值和实测值,见表1。

表1 融冰回路接地开关不同工况下的感应电压和电流
Table 1 Induced voltage and current of ice melting circuit under different working conditions for grounding switch

工况	实测值(有效值)	计算值(有效值)
双端开路	13.7 kV (DC)+1.4 kV (AC)	16.13 kV (DC)
单端接地	0.6 kV (AC)	< 0.1 kV (DC)
双端接地	0.2 A (DC)+0.8 A (AC)	< 0.17 A (DC)

由表1可见,融冰回路双端开路时,感应电压可达13.7 kV,会严重影响带电融冰装置的安全运行。带电融冰时,建议将图1中快速接地开关接地。当

一端接地时,OPGW和地线回路上的感应电压交流分量已减小至0.6 kV,已不会对融冰装置产生威胁。

该±800 kV线路融冰区段无并行的交流输电线路,理论上不会出现交流感应电压。但是,实测表明,感应电压中存在交流分量,见图5。感应电压频谱主要成分是1 500 Hz,同时包含300、900、1 200 Hz等成分。分析表明,该交流分量与直流运行线路中的直流电压的纹波有关,由静电感应耦合至OPGW和地线回路。

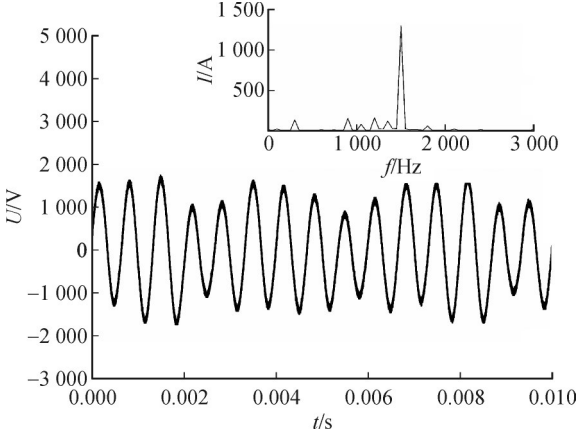


图5 感应电压交流分量波形及频谱分布图

Fig. 5 Induced voltage AC component waveform and spectrum distribution diagram

实际中,由于安装差异、运行中OPGW和地线弧垂差异等,无法做到其平均对地高度完全相等,导致存在较大感应电压。为了掌握OPGW和地线平均高差 Δh 改变对感应电压的影响,仿真计算了平均高差 $\Delta h=1、2、3$ m时感应电压值,并将实测值拟合于计算曲线上,结果见图6。

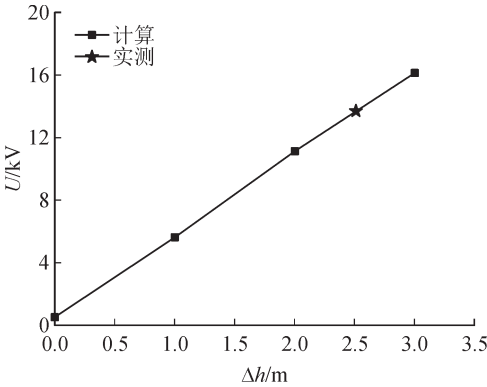


图6 不同高差下感应电压计算及实测值

Fig. 6 Calculation and measured values of induced voltage under different height differences

由图6可见,随着OPGW和地线平均高差 Δh 的增大,感应电压基本线性增大。由感应电压实测值反推得到实际中OPGW和地线平均高差 Δh 约为2.51 m。

3 特高压线路OPGW带电融冰系统开发

3.1 融冰装置主回路

融冰装置主回路结构见图7,装置采用12脉动阀组+换流变接线方案,整流部分由换流变及两个串联的6脉动阀组组成,相比于单组6脉动换流桥,仅在交流侧存在 $12k\pm 1$ 次谐波,电流谐波含量大大减少。装置换流桥采用晶闸管,通过调节晶闸管触发角可完成输出电压电流连续可调,适用于不同长度和型号的线路融冰需求。

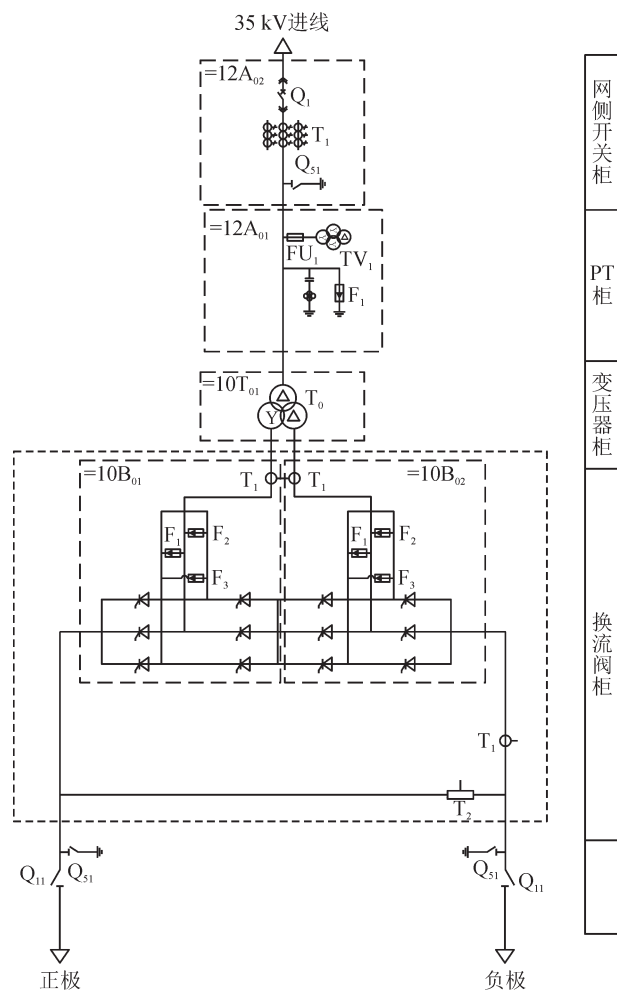


图7 融冰装置主回路结构

Fig. 7 Main circuit structure of ice melting device

按照上述分析,融冰装置设计参数应满足以下要求:

- 1)融冰装置额定直流电压为10 kV(± 5 kV),额定直流电流1 kA,额定容量10 MW。
- 2)融冰装置可实现功率的连续长期稳定输出,最小持续运行直流电流需达额定电流的10%,可实现从10%到100%电流连续可调。
- 3)融冰装置可在交流电压在0.9 p.u.至1.1 p.u.情况下持续运行,可在系统频率特性范围内长期运

行,融冰装置出口端短路电流不大于20倍额定直流电流。

4)融冰装置应配置有12次交流滤波器,保证在正常系统条件下,融冰装置系统接入点的电压电流谐波畸变率满足GB/T 14549—1993要求。

5)融冰装置应配置避雷器和采取其他过电压防护措施,绝缘水平(雷电/工频/直流耐受水平)应满足标准对于直流10 kV电压等级设备的绝缘水平要求。

3.2 换流变压器

换流变压器可为两组6脉动换流桥提供 30° 相位差,同时实现隔离交直流系统、抑制直流侧过电流等作用。换流变压器采用三绕组方式,原边接入35 kV电源,换流桥额定触发角设计为 15° ,考虑限制阀短路电流选定短路阻抗为10%,可计算出换流变低压侧额定电压 $U_d=4.14$ kV。

根据融冰装置额定输出电流值($I_d=1\ 000$ A),可以计算出原边电流值 I_2 为

$$I_2 = \sqrt{2/3} \times I_d = 0.816 \times 1\ 000 = 816\text{ A} \quad (11)$$

计算换流变压器容量 W 为

$$W = 2\sqrt{3}U_dI_d = 2\sqrt{3} \times 4.14 \times 816 = 11.7\text{ MVA} \quad (12)$$

W 值取为12 MVA。换流变具体参数见表2。

表2 换流变压器参数

Table 2 Converter transformer parameter

项目	线路侧绕组	阀侧绕组	阀侧绕组
绕组接法	D	y0	d11
额定相电压/kV	10.00	4.14/ $\sqrt{3}$	4.14
额定容量/MVA	12	6	6
额定电流/A	693/ $\sqrt{3}$	816	816/ $\sqrt{3}$

3.3 平波电抗器

平波电抗器的设计应考虑避免直流电流出现断流。连续直流电流临界值与平波电感值、换流器触发角及换流器脉动数有关。

12脉动换流器的连续直流电流临界值按式(13)估算

$$I_{dj} = 0.023 \sin \alpha \frac{U_{d0}}{2\pi/L_d} \quad (13)$$

式(13)中: L_d 为平波电抗器电感值; I_{dj} 为6脉动换流器连续直流电流临界值(融冰装置最小直流电流为 $10\%I_n$,即0.1 kA); U_{d0} 为直流空载电压; α 为轻载时换流器所允许的触发角。则有

$$L_d = 0.023 \sin \alpha \times \frac{11.2}{2\pi \times 50 \times 0.1} \approx 8\text{ mH} \quad (14)$$

即在额定直流电流1 kA,融冰装置最小直流电流为0.1 kA时,平波电抗器电感值为8 mH。

3.4 桥臂过电压保护器

设置桥臂过压保护的目的在于确保给定工况下不会出现超出晶闸管元件耐受能力之外的高电压,损坏桥臂元器件。过压保护分为交流进线过压保护、直流输出过压保护和晶闸管RC阻尼保护3部分。

1)交流过压保护。采用避雷器的伏安特性对交流电压出现的瞬态过电压进行抑制,正常情况下避雷器保持高阻抗不会产生明显功耗。避雷器选用额定电压10 kV,冲击电压30 kV的氧化锌避雷器Y5HW-10/30Q,在正负极桥臂上分别使用3只避雷器抑制输入线电压,吸收桥臂两端的过电压。

2)晶闸管RC阻尼保护。为了吸收换相过电压,在晶闸管两端并联RC阻尼电路,同时兼顾给高位电子单元的取能回路,电容值可采用式(15)计算

C = \frac{SQ_r}{x^2U_{2M}} (15)

式(15)中:S为安全系数,依据经验一般取3;Q_r

为晶闸管两端反向恢复电荷,1 450 μC;x为常数系数,取0.9;U_{2M}为元件承受反向电压峰值,6 500 V。代入式(15)计算得到阻尼电容值为0.83 μF,实际取值1 μF。

晶闸管RC阻尼保护回路的动态响应时间要远快于晶闸管两端过电压上升时间,其值约在100 μs量级,确保能充分吸收换向过电压能量。参考以往实际工程阻尼电阻阻值选取为40 Ω,为提高可靠性和功率值,阻尼电阻选型为两个80 Ω/500 W RS型无感电阻并联。

3.5 融冰绝缘配合

通过绝缘线路将融冰区段地线首末端引至塔下,安装融冰开关,融冰电源接至塔下融冰开关。雷雨季节来临前,融冰开关接地,确保地线防雷效果。覆冰季节来临前,融冰开关接入融冰装置,形成融冰回路。地线和OPGW绝缘化改造结构见图8。

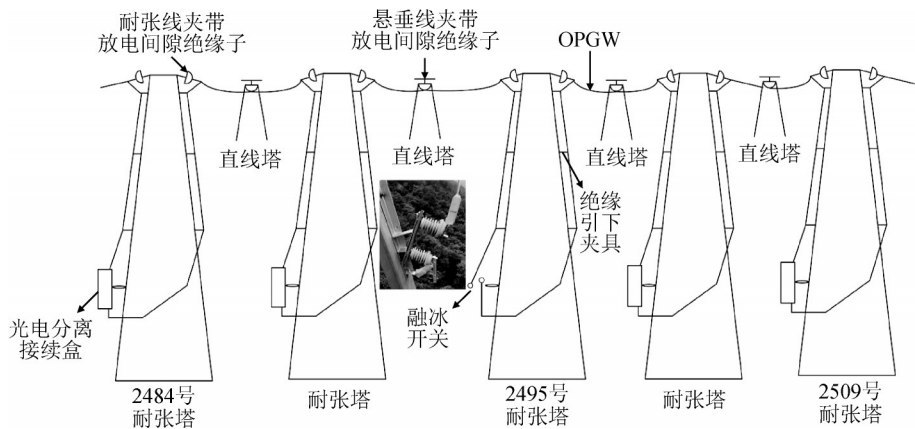


图8 地线和OPGW绝缘化改造结构图

Fig. 8 Structure diagram for insulation reconstruction of ground wire and OPGW

融冰时保护间隙和绝缘子的选择还应满足:

- 1)线路运行的常况下,绝缘子及保护间隙应能耐受地线上的最大感应电压;
- 2)施加融冰电压时,地线应可靠绝缘,间隙、绝缘子不能击穿;
- 3)保护间隙应能保证在雷击时可靠击穿,保证全绝缘地线防雷效果;
- 4)保护间隙应能保证在线路短路时可靠击穿接地;
- 5)绝缘子的耐压高于保护间隙耐压;
- 6)保护间隙应方便可调,以适应不同线路防雷及融冰电压要求。

研究表明,融冰电压不超过10 kV时,放电间隙可选择25 mm,经海拔高度校核后增大至27 mm。从防雷方面考虑,在满足上述设计原则的前提下,间隙应较小。

由于光缆设计的特殊性,还必须在光缆接续塔上,用支柱绝缘子对光缆引下,接续盒及余缆架进行绝缘,融冰区段首末端还应安装光电分离的光缆接线盒。OPGW绝缘示意图图9。

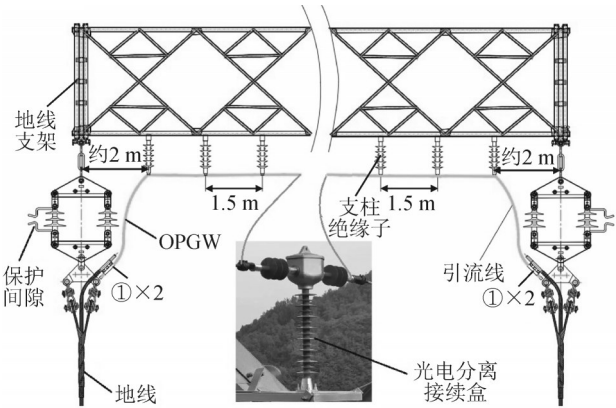


图9 OPGW光缆绝缘示意图

Fig. 9 Diagram of OPGW optical cable insulation

4 带电融冰测试效果分析

采用架空线路图像监测装置、无人机飞巡拍摄、线路弧垂变化观测等手段,对某 ± 800 kV 特高压线路覆冰厚度进行实时监控,当观测计算到的等值覆冰厚度至5~10 mm时,启动带电融冰装置开展现场融冰。

4.1 覆冰增长趋势分析

覆冰外形影响覆冰导线的气动特性和液滴碰撞特性,进一步影响覆冰的动态发展过程。文中建立了考虑风速、温度、湿度、地线直径及表面粗糙度的气液固耦合模型,计算了不同条件下地线表面覆冰厚度、密度、形态的变化规律,见图10。

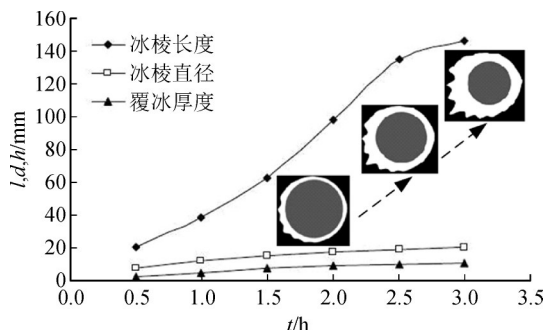


图10 地线覆冰参数随覆冰时间变化曲线

Fig. 10 Variation curve of ground wire icing parameters with icing time

由图10可见,地线覆冰过程中,其表面覆冰状况并非规则形态。不同风速和风向,其冰凌长度、直径、厚度的增长过程为非线性变化过程。随着覆冰时间的增加,冰凌直径、覆冰厚度、冰凌长度均增大,其中冰凌长度出现明显的饱和趋势。因此,在地线出现5~10 mm覆冰时,若现场气象条件满足持续覆冰增长条件,应在3 h内尽快启动带电融冰装置,同步开展线路融冰,避免短期内覆冰增长过快导致冰害事故。

4.2 OPGW 融冰效果分析

融冰过程中OPGW的温升控制至关重要,需确保融冰过程中的光缆温升不超标。标准给出的陆用光缆的经受温度范围为 $-40\sim 65$ $^{\circ}\text{C}$,为了保证通信系统的安全稳定运行,在绝缘化改造过程中增加了温度监测装置,可以实现光缆运行温度的实时监测。

为了掌握OPGW沿线温度分布情况,在沿线安装了多个分布式测温传感器,同步测量融冰回路中每个点的温升状态,并反馈给控制系统。通过控制系统连续可调输出融冰电流,实现对待融冰地线/OPGW温度的精确控制,确保光纤温度在整个融冰过程中不超过安全值。某次融冰过程中分布式温

升监测特性曲线见图11。由图11可知,地线、OPGW沿线温度变化规律和趋势基本一致,融冰过程中最高温度远低于光纤安全运行温度。

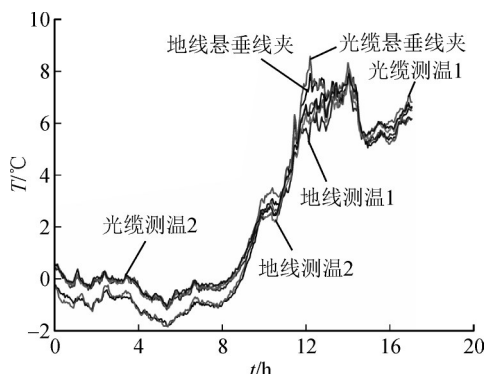


图11 地线、OPGW分布式温升特性曲线

Fig. 11 Distributed temperature rise curve of ground wire and OPGW

雨雪冰冻天气期间,对 ± 800 kV 线路地线覆冰情况进行了监测,拉力传感器监测到的覆冰厚度变化情况见图12。由图可见,2912、3161、3171、3183号杆塔地线最大覆冰为28 mm,且覆冰厚度随时间变化呈现相似趋势。该区段线路穿越秦岭微地形、微气象地区,地线覆冰变化规律随昼夜交替气温变化而变化,呈现明显的相关性。图中,标注出了3173号杆塔线路起始覆冰和覆冰融化的时刻。可见,一般在晚上6~8点,地线开始覆冰,早晨9点地线覆冰完全消融,地线覆冰变化规律与气温变化呈现强相关性,融冰开展应充分考虑环境变化。

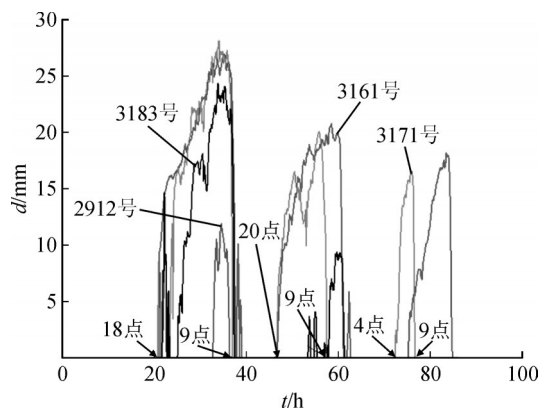


图12 地线覆冰厚度随时间变化曲线

Fig. 12 Curve of ice cover thickness of ground wire over time

线路覆冰后,采用带电融冰装置进行了现场融冰工程应用。第一次融冰操作于12:35开始,直流融冰电流于12:40升至252 A,30 min后停止。第二次融冰操作于16:36开始,直流融冰电流升至260 A,75 min后停止。在此期间,OPGW的温度测试结果见图13。由图13可见,融冰期间OPGW最高温度升至20.7 $^{\circ}\text{C}$ 。拉力传感器监测结果表明,融冰前等值

覆冰厚度为 10~15 mm, 融冰结束后线路覆冰厚度减小为 0, 安全地完成了特高压线路带电融冰。

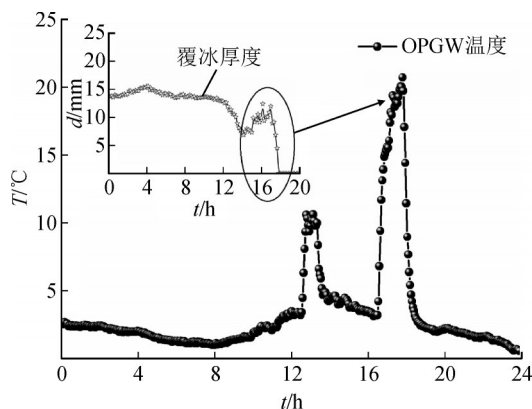


图 13 OPGW 单点温升特性曲线

Fig. 13 Single point temperature rise curve of OPGW

5 结论

1) 论文开展了 OPGW/地线融冰回路参数计算, 提出了融冰装置、换流变压器、平波电抗器、桥臂过电压保护器选型依据, 提出了融冰线路绝缘化改造和绝缘配合方案, 研发了特高压线路 OPGW/地线的带电融冰系统。

2) 融冰回路双端开路时, OPGW/地线感应电压可达 13.7 kV, 融冰回路单端接地时, 感应电压降低至 0.6 kV, 开展特高压线路带电融冰时需将融冰装置单级输出接地, 确保融冰装置安全运行。

3) OPGW/地线表面覆冰为非规则形态, 冰凌长度、直径、厚度的增长为非线性变化过程, 应结合气象条件对覆冰增长趋势进行提前预判, 确保及时开展带电融冰。

4) 带电融冰装置选定额定参数 10 kV/10 MW, 可满足现场融冰要求, 带电融冰系统在某 ± 800 kV 线路工程现场输出 260 A 直流电流 75 min 后, OPGW 最高温度升至 20.7 °C, 线路等值覆冰厚度从 15 mm 降至 0, 安全有效实现了线路带电融冰。

参考文献:

- [1] 黄新波, 欧阳丽莎, 王娅娜, 等. 输电线路覆冰关键影响因素分析[J]. 高电压技术, 2011, 37(7): 1677-1682.
HUANG Xinbo, OUYANG Lisha, WANG Yana, et al. Analysis on key influence factor of transmission line icing [J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(7): 1677-1682.
- [2] 胡玉耀, 孙建亮, 蒋兴良, 等. 覆冰绝缘子直流闪络双电弧动态电路模型[J]. 高电压技术, 2023, 49(2): 515-524.
HU Yuyao, SUN Jianliang, JIANG Xingliang, et al. Double-arc dynamic circuit model of DC flashover of ice-covered insulator[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(2): 515-524.
- [3] 郭裕钧, 闫向龙, 黄桂灶, 等. 非均匀覆冰下输电导线的脱冰跳跃动力特性[J]. 高电压技术, 2023, 49(10): 4411-4420.
GUO Yujun, YAN Xianglong, HUANG Guizao, et al. Dynamic characteristics of transmission line conductors with non-uniform accreted ice after ice-shedding[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(10): 4411-4420.
- [4] HUANG X, ZHANG F, LI H, et al. An online technology for measuring icing shape on conductor based on vision and force sensors[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2017, 66(12): 3180-3189.
- [5] 王黎明, 李海东, 梅红伟, 等. 输电线路覆冰在线监测系统国内外研究综述[J]. 高压电器, 2013, 49(6): 48-56.
WANG Liming, LI Haidong, MEI Hongwei, et al. Review of on-line monitoring system of ice coating on transmission lines[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(6): 48-56.
- [6] 谢景海, 袁敬中, 郭嘉, 等. 一种输电线路多参数可视化物联监测系统[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(12): 4975-4981.
XIE Jinghai, YUAN Jingzhong, GUO Jia, et al. A multi-parameter visual Internet of things monitoring system for transmission lines[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(12): 4975-4981.
- [7] 韩兴波, 吴海涛, 郭思华, 等. 用于覆冰环境测量的旋转多导体直径选择方法研究[J]. 电工技术学报, 2022, 37(15): 3973-3980.
HAN Xingbo, WU Haitao, GUO Sihua, et al. Research on diameter selection method of rotating multi-conductor for measurement of icing environmental parameters[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(15): 3973-3980.
- [8] 朱晔, 王海涛, 吴念, 等. 输电线路覆冰在线监测动态预警模型[J]. 高电压技术, 2014, 40(5): 1374-1381.
ZHU Ye, WANG Haitao, WU Nian, et al. Icing on-line monitoring dynamic prediction model[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(5): 1374-1381.
- [9] 曹永兴, 张昌华, 黄琦, 等. 输电线路覆冰在线监测及预警技术的国内外研究现状[J]. 华东电力, 2011, 39(1): 96-99.
CAO Yongxing, ZHANG Changhua, HUANG Qi, et al. Research status of on-line ice coating monitoring & forewarning technology of overhead transmission lines in China and abroad[J]. East China Electric Power, 2011, 39(1): 96-99.
- [10] 李嘉祥, 李宏男, 付兴. 输电线路覆冰脱落参数影响研究[J]. 电力建设, 2016, 37(4): 76-83.
LI Jiaxiang, LI Hongnan, FU Xing. Ice-shedding factors of transmission line[J]. Electric Power Construction, 2016, 37(4): 76-83.
- [11] JIANG Xingliang, FAN Songhai, ZHANG Zhijin, et al. Simu-

- lation and experimental investigation of DC ice-melting process on an iced conductor[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(2): 919-929.
- [12] 吴建蓉, 姜 苏, 黄 欢, 等. 不同电压等级直线塔线路覆冰拉力值预警模型及核密度概率估计研究[J]. 电瓷避雷器, 2022(5): 199-204.
- WU Jianrong, JIANG Su, HUANG Huan, et al. Early warning model and kernel density probability estimation of icing tension value of tangent tower lines with different voltage levels[J]. Insulators and Surge Arresters, 2022(1): 199-204.
- [13] 杨 知, 赵 彬, 李 闯, 等. 基于星地融合的输电线路覆冰预警优化方法研究[J]. 电测与仪表, 2022, 59(11): 54-62.
- YANG Zhi, ZHAO Bin, LI Chuang, et al. Study on optimization method of transmission line icing prediction based on satellite-ground fusion[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(11): 54-62.
- [14] HE Zhu, WENPENG Tang, RENQI Zhang, et al. Dynamic response analysis of asynchronous deicing of quad bundle conductor spacer system during DC ice melting[J]. IEEE Access, 2022(10): 118072-118081.
- [15] 尹 晖, 王晶晶. 输电线路覆冰与微气象参数和覆冰时间的研究[J]. 高压电器, 2017, 53(12): 145-150.
- YIN Hui, WANG Jingjing. Effects of micrometeorological parameters and icing time on icing of transmission line[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(12): 145-150.
- [16] 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.
- CHAO Yafeng, YUE Yishi, WANG Cheng, et al. Deicing techniques for ice-covered transmission lines: a review[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(11): 1-9.
- [17] 李新民, 朱宽军, 李军辉. 输电线路舞动分析及防治方法研究进展[J]. 高电压技术, 2011, 37(2): 484-490.
- LI Xinmin, ZHU Kuanjun, LI Junhui. Review on analysis and prevention measures of galloping for transmission line [J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(2): 484-490.
- [18] 张 弦. 输电线路中微地形和微气象的覆冰机制及相应措施[J]. 电网技术, 2007, 31(s2): 87-89.
- ZHANG Xian. Mechanism and countermeasures for ice-coated transmission line in micro-terrain and microclimate region[J]. Power System Technology, 2007, 31(s2): 87-89.
- [19] 侯 镭, 王黎明, 朱普轩, 等. 特高压线路覆冰脱落跳跃的动力计算[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(6): 1-6.
- HOU Lei, WANG Liming, ZHU Puxuan, et al. Dynamic behavior computation of ice shedding of UHV overhead transmission lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(6): 1-6.
- [20] 郝艳捧, 魏发生, 王 斌, 等. 特殊地形下输电线路等值覆冰厚度计算模型有效性分析和改进研究[J]. 电网技术, 2022, 46(7): 2786-2793.
- HAO Yanpeng, WEI Fasheng, WANG Bin, et al. Research on validity analysis and improvement of calculation model of equivalent icing thickness of transmission lines under special terrain[J]. Power System Technology, 2022, 46(7): 2786-2793.
- [21] HU Qin, YUAN Wei, SHU Lichun, et al. Effects of electric field distribution on icing and flashover performance of 220 kV composite insulators[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2014, 21(5): 2181-2189.
- [22] FARZANEH M. Insulator flashover under icing conditions [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2014, 21(5): 1997-2011.
- [23] 康基伟. 微地形和小气候区线路覆冰影响因素分析及工程实例[J]. 郑州大学学报(工学版), 2013, 34(1): 103-107.
- KANG Jiwei. Analysis of ice-covering transmission line in micro-terrain and micro-climate region[J]. Journal of Zhengzhou University(Engineering Science), 2013, 34(1): 103-107.
- [24] 王运达, 张 钢, 邱瑞昌, 等. 城市轨道交通接触网在线融冰方法[J]. 高电压技术, 2022, 48(5): 1970-1978.
- WANG Yunda, ZHANG Gang, QIU Ruichang, et al. Online ice melting method for catenary of urban rail Transit[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(5): 1970-1978.
- [25] 阳 林, 郝艳捧, 黎卫国, 等. 输电线路覆冰与导线温度和微气象参数关联分析[J]. 高电压技术, 2010, 36(3): 775-781.
- YANG Lin, HAO Yanpeng, LI Weiguo, et al. Relationships among transmission line icing, conductor temperature and local meteorology using grey relational analysis[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(3): 775-781.
- [26] 陆佳政, 胡建平, 方 针. 特高压直流输电大截面导线带电覆冰与融冰特性试验研究[J]. 电网技术, 2013, 37(5): 1258-1264.
- LU Jiazheng, HU Jianping, FANG Zhen. Experimental investigation on ice-coating and ice-melting of large-section current carrying conductors for UHVDC transmission project[J]. Power System Technology, 2013, 37(5): 1258-1264.
- [27] 胡建平, 陆佳政, 方 针, 等. 自然环境下输电导线同时带电压和电流覆冰试验研究[J]. 高电压技术, 2019, 45(3): 760-767.
- HU Jianping, LU Jiazheng, FANG Zhen, et al. Experimental study on icing accretion of transmission conductor with simultaneous voltage and current under natural environment [J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(3): 760-767.
- [28] 蒋兴良, 吴建国, 邓 颖, 等. 垭口微地形下档内线路不均匀覆冰研究[J/OL]. 中国电机工程学报: 1-13[2023-10-01]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013>.
- JIANG Xingliang, WU Jianguo, DENG Ying, et al. Research

- 2021(3):1-4.
- [14] GE Z, LIU S, WANG F, et al. YOLOX: Exceeding YOLO Series in 2021[C]//Online meeting: 2021 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). [S.l.]: IEEE, 2021: 1-7.
- [15] 陈 硕, 钟汇才, 李勇周, 等. 基于多尺度特征多对抗网络的雾天图像识别[J]. 中国图象图形学报, 2021, 26(11): 2680-2690.
- CHEN Shuo, ZHONG Huicai, LI Yongzhou, et al. Haze image recognition based on multi-scale feature and multi-adversarial networks[J]. Journal of Image and Graphics, 2021, 26(11): 2680-2690.
- [16] 马 政. 盐雾条件下接触网染污绝缘子电场分布研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2020.
- MA Zheng. Research on electric field distribution of catenary polluted insulators under salt fog[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2020.
- [17] PRATES R M, CRUZ R, MAROTTA A P, et al. Insulator visual non - conformity detection in overhead power distribution lines using deep learning[J]. Computers & Electrical Engineering, 2019(78): 343-355.
- [18] WANG C, DING M, ZHANG Y, et al. A single image enhancement technique using dark Channel prior[J]. Applied Sciences, 2021, 11(6): 2712-2726.
- [19] 许德刚, 王 露, 李 凡. 深度学习的典型目标检测算法研究综述[J]. 计算机工程与应用, 2021, 57(8): 10-25.
- XU Degang, WANG Lu, LI Fan. Review of typical object detection algorithms for deep learning[J]. Computer Engineering and Applications, 2021, 57(8): 10-25.
- [20] QING Y, LIU W, FENG L, et al. Improved YOLO network for free - angle remote sensing target detection[J]. Remote Sensing, 2021, 13(11): 2171-2190.
- [21] 李一波, 郭培宜, 张森悦. 深度卷积神经网络中激活函数的研究[J]. 计算机技术与发展, 2021, 31(9): 61-66.
- LI Yibo, GUO Peiyi, ZHANG Senyue. Research on activation function in deep convolutional neural network[J]. Computer Technology and Development, 2021, 31(9): 61-66.
- [22] 刘恒勇, 史帅彬, 徐旭辉, 等. 一种关联RNN模型的非侵入式负荷辨识方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(13): 162-170.
- LIU Hengyong, SHI Shuaibin, XU Xuhui, et al. A non - intrusive load identification method based on RNN model[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(13): 162-170.
- [23] ZHOU Dingfu, FANG Jin, SONG Xibin, et al. IoU loss for 2D/3D object detection[C]//2019 International Conference on 3D Vision (3DV). Canada: IEEE, 2019: 85-94.
- [24] LOHALA S, ALSADOON A, PRASAD P W C, et al. A novel deep learning neural network for fast-food image classification and prediction using modified loss function[J]. Multimedia Tools and Applications, 2021, 80(17): 25453-25476.
- [25] LIN T Y, GOYAL P, GIRSHICK R, et al. Focal loss for dense object detection[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2020, 42(2): 318-327.

汤 璐(1999—), 女, 硕士研究生, 研究方向为智能电网 (E-mail: 1103157350@qq.com)。

王淑青(1969—), 女, 教授, 研究生导师, 研究方向为智能控制 (E-mail: 254831618@qq.com)。

(上接第222页)

- on uneven icing of lines in adjacent towers under pass micro-topography[J/OL]. Proceedings of the CSEE: 1-13[2023-10-01]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013>.
- [29] 吴建蓉, 姜 苏, 黄 欢, 等. 不同电压等级直线塔线路覆冰拉力值预警模型及核密度概率估计研究[J]. 电瓷避雷器, 2022(5): 199-204.
- WU Jianrong, JIANG Su, HUANG Huan, et al. Early warning model and kernel density probability estimation of icing tension value of tangent Tower lines with different voltage levels[J]. Insulators and Surge Arresters, 2022(5): 199-204.
- [30] 张 璐, 韩彦华, 蒲 路, 等. 超特高压地线及光纤复合架空地线的带电融冰装置及方法: CN202211477579.1 [P]. 2023-03-28.
- ZHANG Lu, HAN Yanhua, PU Lu, et al. The device and method for energized de - icing of ultra - high voltage overhead power lines and fiber optic composite overhead power lines: CN202211477579.1 [P]. 2023-03-28.
- [31] 直流融冰系统设计技术规程: DL/T 5511—2016[S]. 2016.
- Technical code for design of DC de - icing system: DL/T 5511—2016[S]. 2016.
- 张 璐(1987—), 男, 博士, 教授级高级工程师, 从事输电设备智能运检技术、状态检测与评估技术研究 (E-mail: zhang.lu.hv@stu.xjtu.edu.cn)。