

DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2016.02.016

# 架空线路 OPGW 融冰技术研究

陈璨

(广东天联电力设计有限公司, 广州 510663)

**摘要:** 介绍了我国 OPGW 的发展现状以及 OPGW 融冰技术原理, 分析了 OPGW 的温度特性, 通过实验分析融冰通流温升对 OPGW 性能及寿命的影响, 结合地线融冰的实际应用情况, 给出今后实际地线融冰过程中合理的温度限制范围和应用建议。

**关键词:** 光纤复合架空地线; 融冰技术; 通流温升

中图分类号: TM75

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2016)02-0082-06

## Research on Overhead Line OPGW Ice-melting Technology

CHEN Can

(Guangdong Tianlian Electric Power Design Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

**Abstract:** The development situation and theory of ice-melting technology of OPGW is introduced, then temperature character of OPGW is analysed. Besides, Ice-melting through-flow temperature influence on performance and lifetime of OPGW is analysed. With ground wire ice-melting applications, rational temperature limit in actual ground wire ice-melting is proposed.

**Key words:** OPGW; ice-melting technology; through-flow temperature

在架空线路中, OPGW (Optical Fiber Composite Ground Wire) 光纤复合架空地线是把光缆和地线有机地结合在一起, 同时保持架空地线原有的电气和机械性能。如短路电流、雷击电流、抗拉强度等性能。它由光纤单元与绞线层(包括铝包钢 AS 线、镀锌钢线、铝合金 AA 线、硬铝线等)组成。OPGW 一方面可作为输电线路的避雷线和屏蔽线, 对输电导线抗雷闪放电提供保护, 在输电线路发生短路时承载短路电流; 另一方面可作为传送光信号的介质, 传送音频、视频、数据等各种信息, 进行多路宽带通信。

目前我国采用直流对导线进行融冰的技术已相对成熟, 但对地线和 OPGW 的直流融冰技术的研究尚处于初始阶段<sup>[1]</sup>。目前在冰灾多发区对地线 OPGW 已开始有融冰的需求和应用, 相对较高的温

度下对光缆光纤的使用寿命影响有待论证, 需对 OPGW 耐高温性能、高温下衰减老化程度进行研究。

## 1 地线融冰技术原理

### 1.1 地线融冰电流计算

融冰主要是增大地线的传输电流或采用短路电流, 将电能转化为热能, 达到融冰热平衡而实现融冰, 融冰电流和融冰时与各参数之间热平衡关系式如下<sup>[2]</sup>:

$$I^2 R_0 t = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 \quad (1)$$

式中:  $I$  为融冰电流;  $R_0$  为电阻;  $Q_1$  为被融化部分的冰的温度从  $T_c$  (结冰时外界温度) 升温到  $T_0$  (导线融冰温度) 吸收的热量;  $Q_2$  为融化冰所需吸收的热量;  $Q_3$  为未被融化的冰温度变化吸收的热量;  $Q_4$  为导线温度从  $T_c$  升温到  $T_0$  所吸收的热量;  $Q_5$  为冰表面散失的热量。当导线上通过的电流  $I$ , 大于上式计算的临界融冰电流  $I_c$ 。经过时间  $t$ , 导线上冰层融化并脱落, 达到融冰的目的。

目前有电流融冰、交流短路融冰、直流电流加

收稿日期: 2015-10-23

作者简介: 陈璨(1982), 男, 湖北荆州人, 高级工程师, 硕士, 主要从事火电厂、核电厂和新能源的电气一次设计工作(e-mail) chen-can@gedi.com.cn。

热融冰、高频高压激励融冰及阻线性融冰等方法。近年贵州出现罕见低温冷冻冰凌天气, 在 110 ~ 500 kV 交流线路上, 投入了直流融冰装置, 确保了线路安全。地线融冰考虑利用变电站现有直流融冰装置, 兼容导线和地线融冰, 南方电网推广直流融冰<sup>[3]</sup>。

融冰电流为使导线上覆冰融化的电流。融冰电流在导线电阻中产生的热量一部分使冰柱的温度上升至熔点, 一部分使冰柱融化, 一部分损失在从导线表面到冰柱表面的传递途中, 还有一部分通过冰柱表面散失, 其计算公式如下:

$$I_r^2 R_0 T_r = \frac{\Delta t}{R_{T_0} + R_{T_1}} T_r + 10 g_0 db + \frac{0.045 g_0 D^2}{R_{T_0} + R_{T_1}} \left( R_{T_1} + 0.22 \frac{R_{T_0}}{\ln \frac{D}{d}} \right) \Delta t \quad (2)$$

式中:  $I_r$  为融冰电流, A;  $R_0$  为 0 °C 时的导线电阻,  $\Omega/\text{m}$ ;  $T_r$  为融冰时间, h;  $\Delta t$  为导体温度与外界气温之差, °C;  $g_0$  为冰的比重, 一般按雨淞取 0.9;  $b$  为冰层厚度, 即覆冰每边冰厚, cm;  $D$  为导体覆冰后的外径, cm;  $R_{T_0}$  为等效冰层传导热阻, ( $^\circ$ ) · cm/W。

$$R_{T_0} = \frac{\ln \frac{D}{d}}{273 \lambda} \quad (3)$$

式中:  $d$  为导线直径, cm;  $\lambda$  为导热系数,  $W \cdot (^\circ)^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ , 对雨淞  $\lambda = 2.27 \times 10^{-2}$ , 对雾淞  $\lambda = 0.12 \times 10^{-2}$ 。

$R_{T_1}$  为对流及辐射等效热阻, ( $^\circ$ ) · cm/W, 雨淞和雾淞下计算公式分别见式(4)和式(5)。

$$R_{T_1} = \frac{1}{0.09D + 0.22 + 0.73(VD)^{2/3}} \quad (4)$$

$$R_{T_1} = \frac{1}{0.04D + 0.84(VD)^{3/4}} \quad (5)$$

式中:  $V$  为风速, m/s。

地线最大允许电流是在融冰的短时间内(最长几小时)允许导线达到最高温度所通过的电流, 除考虑辐射散热和对流散热外, 由于白天有日照, 会增加导线的表面温度, 故还得考虑架空地线的日照吸热, 其计算公式如下:

$$I_{\max}^2 R_{i_{\max}} = W_R + W_F + W_S \\ = \pi E S d [ (t_{\max} + 273)^4 - (t_\alpha + 273)^4 ] + \lambda \pi E_\alpha (t_{\max} - t_\alpha) - \gamma d S_1 \quad (6)$$

式中:  $I_{\max}$  为架空地线最大允许电流, A;  $R_{i_{\max}}$  为架

空电线达到最大允许电流时架空地线的单位电阻值,  $\Omega/\text{m}$ ;  $W_s$  为架空地线的日照吸热,  $W/\text{m}$ ;  $t_{\max}$  为架空地线融冰时允许达到的最高温度, 一般取  $t_{\max} = 70^\circ\text{C}$ ;  $\gamma$  为架空地线吸热系数, 新线为 0.23 ~ 0.46, 旧线为 0.9 ~ 0.95;  $S_1$  为日照强度,  $W/\text{m}^2$ 。

《110 kV ~ 750 kV 架空输电线路设计规范》(GB 50545—2010)规定验算导线允许载流量时, 导线的允许温度宜按下列规定取值<sup>[4]</sup>:

1) 钢芯铝绞线和钢芯铝合金绞线宜采用 70 °C, 必要时可采用 80 °C, 大跨越宜采用 90 °C。

2) 钢芯铝包钢绞线和铝包钢绞线可采取 80 °C, 大跨越可采用 100 °C, 和或经试验确定。

3) 镀锌钢绞线可采用 125 °C。

对比可见, 融冰时间短(一般取 1 h), 南方电网公司导线允许的温度取的大跨越的允许温度, 因此地线融冰允许温度铝包钢绞线地线取 100 °C, 镀锌钢绞线地线取 125 °C<sup>[5]</sup>。

地线最大融冰长度即地线融冰过程中, 受地线电阻的影响, 随着融冰线路的长度增加, 其电阻会增大, 相应的融冰电压也会增大, 而最大融冰电压受融冰装置最大输出功率和地线融冰绝缘子融冰电压控制。

地线融冰主要通过传输电流或采用短路电流等方式, 将电能转化成热能达到融冰的目的。由于地线融冰电流受地线长度及地线热稳定性限制, 即不能超过其最大允许电流, 同时不能低于实现其融冰的最小融冰电流。

## 1.2 地线融冰方式

地线融冰主要通过传输电流或采用短路电流型, 将电能转换成热能达到融冰的目的, 按照其接线方式不同, 目前主要有以下几种融冰接线方式:

单极大地回路方式——融冰装置正极与地线相连, 地线另一端与大地接地, 融冰装置通过地线与大地形成回路实现融冰, 如图 1 所示。

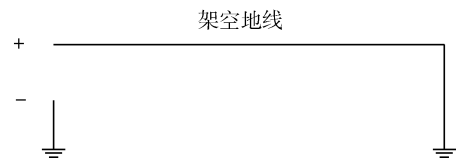


图 1 单极大地回路方式

Fig. 1 Circuit Mode of Single-pole Ground

地线回路方式——线路两侧地线在首段分别连接到融冰装置正负极两端, 尾端短接形成回路, 如

图2所示。

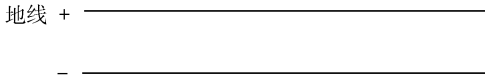


图2 地线回路方式

Fig. 2 Circuit Mode of Ground Wire

导线回路方式即融冰装置正负极分别连接到融冰地线和一根导线上，尾端将地线与到导线短接形成回路进行融冰，如图3所示。

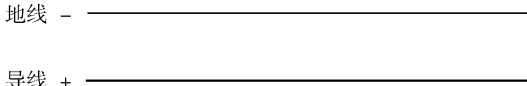


图3 导线回路方式

Fig. 3 Circuit Mode of Conduct and Grounding Line

分段导线回路方式——融冰装置正负极两端分别连接到线路两根导线中，将需要融冰的地线段首尾两端分别连接到两根导线上，形成融冰回路，如图4所示。

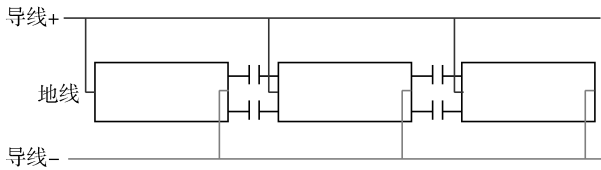


图4 分段导线回路方式

Fig. 4 Circuit Mode of Subsection-Grounding Line

## 2 地线融冰的实现

在目前光纤复合架空地线(OPGW)施工中，普遍采用逐塔接地方式。而地线融冰需要在地线上进行通流，因此，地线需要融冰，首先应进行绝缘化，必须在地线和光缆悬垂串中加入绝缘子串，同时在地线和光缆耐张串中加入绝缘子串，使得地线和光缆与大地绝缘，如图5所示。

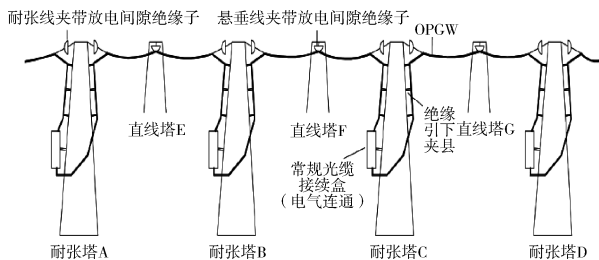


图5 OPGW 光缆绝缘示意图

Fig. 5 Schematic Diagram Isolation of OPGW

放电间隙是保证绝缘地线投入融冰运行电压时能可靠绝缘，且绝缘地线遭受雷击时能有效及时的放电泄流。地线绝缘间隙的选取应遵循以下原则：

- 1) 绝缘地线在污秽或覆冰时，在融冰电压的作用下不击穿。
- 2) 绝缘地线在线路工频感应电压和作用下不被击穿。
- 3) 无论绝缘地线在污秽或覆冰时，间隙均先于绝缘子放电。
- 4) 地线全绝缘时还应保证地线绝缘间隙在雷电梯级先导发展阶段，可靠击穿。

地线实际融冰中，按照一线一策原则，每条线路地线融冰电流事先计算好，融冰时按照规定的融冰电流和融冰方式进行接线和升流<sup>[6]</sup>。

在雷雨季节来临前，应每隔 15~30 km 公里选择一基杆塔接地或恢复地线逐塔直接接地方式，地线在变电站终端塔处及站内接地，覆冰季节来临前，站外接地点全部打开。

## 3 计算分析

架空线路的融冰电流与众多因素相关，如覆冰厚度、环境温度、风速、融冰所需时间等。每次电力系统面对凝冻天气时的外界条件都有所不同，为了研究各种因素对融冰电流大小影响规律，以云南省昭通电网为例，计算了几种典型的地线外部因素与融冰电流的关系，详见图6~图9。

从图6可知，覆冰厚度对于融冰电流影响很大，针对昭通电网常用的几种架空地线型号的计算表明，覆冰每增加 5 mm，则融冰电流需要增加 10~16 A。由于融冰需要一定的时间而覆冰增加速度常常很快，因此在观察到架空线路覆冰厚度大于 5 mm 时就应该紧急启动融冰预案。

图中的温度差是指融冰时的导线温度与环境温度之差。从图7可知，环境温度对于融冰电流影响也很大，针对昭通电网常用的几种架空地线型号的计算表明，环境温度每下降 2℃，则线路融冰电流需要增加 15~25 A。

从图8可知，风速对融冰电流的影响程度与风速大小有关，其中风速在 0~4 m/s 间，对融冰电流影响较大，风速为 2 m/s 时，融冰电流较无风时(风速为 0 m/s)增加 35~40 A；但是当风速大于 4 m/s 后，风速对于融冰电流的影响趋缓，大约风速

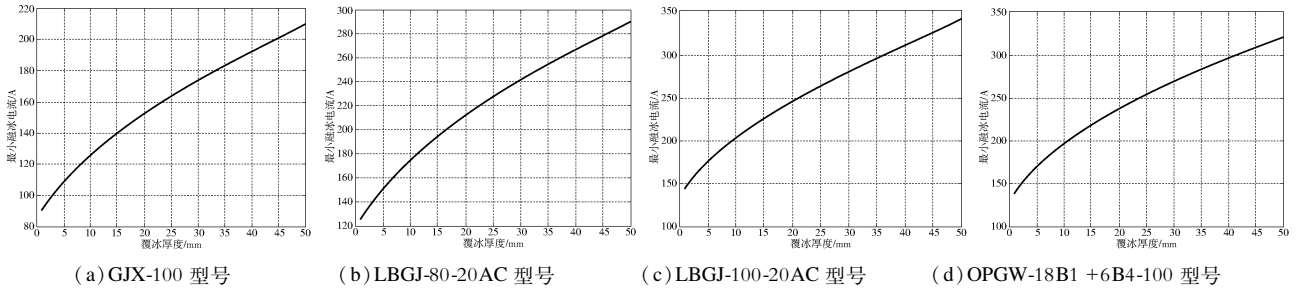


图6 融冰电流与覆冰厚度的关系(环境温度  $-5^{\circ}\text{C}$ , 风速  $5\text{ m/s}$ ,  $1\text{ h}$  融冰)

Fig. 6 The Relationship Between Ice-melting Current and Icing Thickness( Environmental Temperature is  $-5$  Degree Celsius, The Wind Speed is  $5\text{ m/s}$ , Ice - Melting Time is  $1\text{ h}$  . )

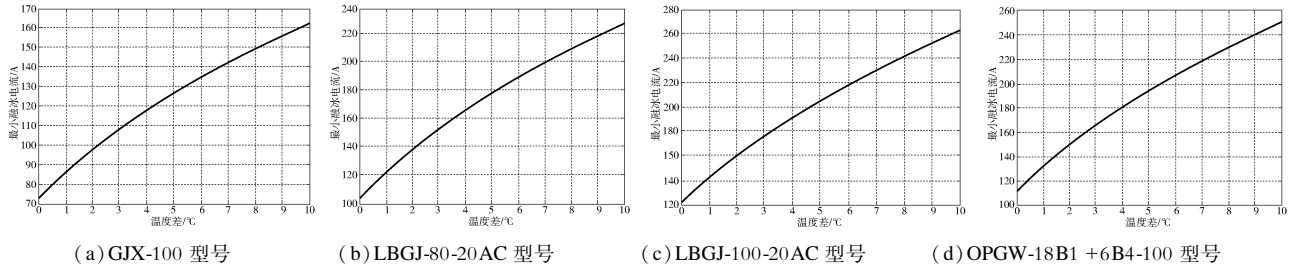


图7 融冰电流与环境温度的关系(覆冰厚度  $10\text{ mm}$ , 风速  $5\text{ m/s}$ ,  $1\text{ h}$  融冰)

Fig. 7 The Relationship Between Ice-melting Current and Environmental Temperature (Icing Thickness is  $10\text{ mm}$ , The Wind Speed is  $5\text{ m/s}$ , Ice-melting Time is  $1\text{ h}$  )

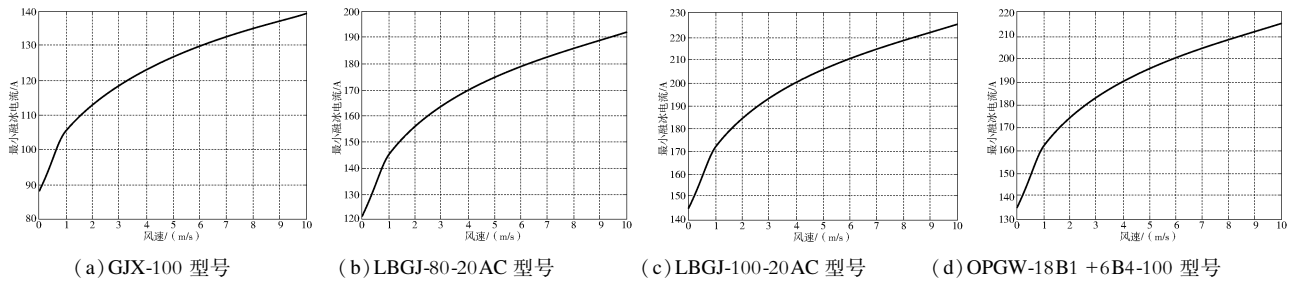


图8 融冰电流与风速的关系(覆冰厚度  $10\text{ mm}$ , 环境温度  $-5^{\circ}\text{C}$ ,  $1\text{ h}$  融冰)

Fig. 8 The Relationship Between Ice-melting Current and Winds(Icing Thickness is  $10\text{ Millimetre}$ , Environmental Temperature is  $-5$  Degree, Ice-melting Time is  $1\text{ h}$  )

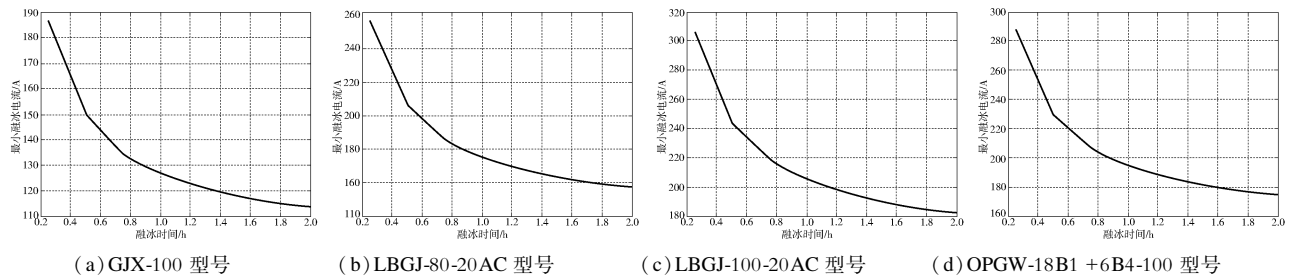


图9 融冰电流与融冰时间的关系(覆冰厚度  $10\text{ mm}$ , 环境温度  $-5^{\circ}\text{C}$ , 风速  $5\text{ m/s}$ )

Fig. 9 The Relationship Between Ice-melting Current and Time(Icing Thickness is  $10\text{ Millimetre}$ , Environmental Temperature is  $-5^{\circ}\text{C}$ , The Wind Speed is  $5\text{ m/s}$  . )

每增大  $2\text{ m/s}$  则融冰电流增大  $5\sim 10\text{ A}$ 。

最小融冰电流值变化比较快, 变化范围在  $35\sim 65\text{ A}$

从图9可知, 融冰时间在  $0.2$  到  $0.5$  小时内,

之间, 融冰时间从  $0.5\sim 2\text{ h}$  之间, 递减比较平缓,

若以 0.5 h 融冰时间对应的融冰电流为基准, 则融冰时间增加到 1 h, 融冰电流减少了 20 ~ 40 A; 融冰时间增加到 1.5 小时时, 融冰电流减少了 8 ~ 15 A; 融冰时间增加到 2 h, 融冰电流减少了 5 ~ 8 A。

#### 4 融冰时温度对光单元的影响

分析融冰通流温升对 OPGW 的影响, 主要应研究对光单元的影响, 需对光单元承受超过 +80 °C 时的温度性能进行分析。

我国的涂覆材料大多是丙烯酸树脂, 使用的温度一般在 -60 °C ~ +85 °C, 指的是长期工作温度, 当光纤应用在电力通信方面, 这个温度范围能够满足要求<sup>[7]</sup>。

依据《光纤用紫外光固化涂料规范》(GJB 2148—1994)3.2.2.4 软化度要求, 光纤被覆层的软化点应不低于 +85 °C; 因此, 光纤长期耐高温性能达到 +85 °C。

为检测 OPGW 的融冰温度达到及超过 85 °C 时是否对光纤传输质量及光纤机械强度造成损坏, 深圳市特发信息股份有限公司东莞分公司对光纤、纤膏、光单元进行了温度性能试验和温度循环试验, 详见附录 D, 并得出以下分析结果。

##### 4.1 光纤温度影响分析

在对光纤做 +50 ~ +150 °C 温度性能试验、常温 ~ +150 °C 温度循环试验后, 测试的光纤衰减范围满足行标及南网企标的要求; 光纤熔接的接头损耗满足南网企标的要求; 所测光纤未见涂覆层软化脱落及开裂等现象, 与光纤芯能紧密结合。本试验证明光纤在超过相关标准要求 +85 °C 后, 在达到 +150 °C 仍能正常工作。

但在 +150 °C 时试验光纤损减相对 +140 °C 增加较大, 在 5 次常温至 +150 °C 温度循环回到常温后, 衰减值与常温初测值有微小增加。这可能与试验用测试仪器精度有关; 也可能是光纤涂层在高温下发生了轻微变化, 影响了传输质量。

根据试验情况, 融冰时光缆内部温度宜控制在低于 +140 °C 范围内, 以防止更高温度对光纤带来的不确定损坏因素。受试验仪器的温度范围影响, +150 °C 以上的高温未做试验, 建议到权威机构做后续的试验分析。

##### 4.2 纤膏温度影响分析

在对纤膏做 +50 ~ +150 °C 温度性能试验、温

度循环试验后, 其主要性能指标仍可满足相关行业标准的要求值。本试验证明纤膏油分离(%)、蒸发量(%)等参数在超过相关标准要求 +80 °C, 在达到 +150 °C 仍能满足要求。其主要原因是, 通信行标针是对 -40 °C ~ +80 °C 的使用环境做相关要求, 而没有规定对特定高温再做试验。实际上而改变纤膏物理特性的滴点、闪点至少需要 +200 °C 以上的温度。

通过试验证明, 融冰时纤膏温度在控制在 +150 °C 范围内, 仍符合应用要求。受试验仪器的温度范围影响, +150 °C 以上的高温未做试验, 建议到权威机构做后续的试验分析。

##### 4.3 光单元整体温度影响分析

通过对光单元、光纤、纤膏的试验, 可认为对光单元的耐高温性能的范围有较大的余量, 可耐受达 +150 °C 高温。

在单根光纤温度性能试验中, +150 °C 时试验光纤损减相对 +140 °C 增加较大, 在 5 次常温至 +150 °C 温度循环回到常温后, 衰减值与常温初测值有微小增加的现象; 但在光单元的整体试验中, 24 根光纤到达 +150 °C 后损减没有出现以上情况, 衰减值均不超过 0.03 dB/km; 从 +150 °C 恢复到常温后, 衰减值可恢复到常温初测值。这可能是光纤在光单元中受油膏保护, 避免了涂覆层高温下与空气接触产生不良反应; 鉴于目前所有试验均只做到 +150 °C, 但已满足融冰温度的需要<sup>[8]</sup>。

目前 OPGW 外层绞线材质基本采用铝包钢绞线, 融冰电流计算时一般不超过 +80 °C。因此, 光单元在融冰时的短暂升温过程中也是安全的。

#### 5 结论

通过实验分析融冰通流温升对 OPGW 性能及寿命的影响, 结合地线融冰的实际应用情况, 针对今后实际地线融冰应用提出中合理的温度限制范围和应用建议:

1) OPGW 融冰在实践中证明是可行, 为确保融冰过程 OPGW 内部光纤不受损伤, 光学性能和参数保持正常, OPGW 融冰应遵循《南方电网输电线路地线覆冰防治工作导则》, 且融冰温度必须受控。

2) 为更有效地跟进 OPGW 光缆受融冰影响的情况, 应及时记录 OPGW 融冰电流值; 测试记录 OPGW 融冰前、通流过程、融冰通流结束时及

OPGW 恢复常温后的光衰减, 融冰通流过程, 应至少每隔 15 min 测 1 次; 有条件的应记录融冰线路监测点 OPGW 的温度。

3) 融冰通流过程全铝包钢 OPGW 表面温度应控制在 +80 ℃ 以下, 特殊情况下不超过 +90 ℃; 中心束管式 OPGW 表面温度必须控制在 +80 ℃ 以下; 铝合金 OPGW 表面温度必须控制在 +70 ℃ 以下。

4) 融冰过程中电流突增、温度突增、光衰减发生明显的变化, 应立即停止融冰。

5) OPGW 融冰可采用直流融冰方式, 在线路条件允许的情况下, OPGW 应单独融冰。

#### 参考文献:

[1] 李春晖. 架空地线的绝缘化改造及融冰思路研究 [J]. 电力信息化, 2013, 11(6): 106-110.

[2] 刘浩梁. 架空线路防冰技术研究 [D]. 长沙: 长沙理工大学, 2011.

[3] 张建明. OPGW 热力融冰技术方案 [J]. 电力信息与通信技术, 2013, 11(12): 135-138.

[4] DL/T 832—2003. 光纤复合架空地线 [S]. 2003.

[5] 马晓红, 赵立进, 李巍, 等. 直流融冰技术在贵州电网中的应用 [J]. 南方电网技术, 2009, 3(5): 107-110.

[6] 李刚, 欧书方, 徐剑. 石英光纤涂层材料 [J]. 涂料技术与文摘, 2008, 29(6): 2-5.

[7] SONG Haifan, XING Liangjiang, LI Chunshu, et al. DC Ice-melting Model for Wet-growth Icing Conductor and Its Experimental Investigation [J]. Science in China Series E: Technological Sciences, 2010, 53(12): 3248-3257.

[8] 伍智华. 电力线路冰厚测量及融冰方法研究 [D]. 长沙: 长沙理工大学, 2010.

(责任编辑 高春萌)

(上接第 81 页 Continued from Page 81)

出相应的措施, 这些措施的效果将在今后的新建工程和防风改造工程中得到检验。我们需要关注今后几年新建线路风偏跳闸率是否显著低于已有线路的水平。

4) 需要进一步改进现有导线风荷载计算方法, 建立一个完全基于风工程理论的计算体系, 完整地反映风的脉动特性对线路的影响, 如此才能更进一步地提高线路防风水平, 推动规范向更完善更科学的方向发展。

#### 参考文献:

[1] GB 50009—2012, 建筑结构荷载规范 [S].

GB 50545—2010, Load Code for the Design of Building Structures [S].

[2] 中国南方电网公司生产设备管理部[2013]36 号, 输电线路防风设计技术规范(试行) [S].

[3] CEI/IEC 60826, Design Criteria of Overhead Transmission Lines [S].

[4] JEC-127-1979, JEC 送电用杆塔设计标准 [S].

[5] ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 74, Guidelines for Electrical Transmission Line Structural Loading (Third Edition) [S].

[6] BS EN 50341-1: 2012, Overhead Electrical Lines Exceeding AC 45 kV [S].

[7] 张殿生. 电力工程高压送电线路设计手册(第二版) [M]. 北京: 中国电力出版社, 2003.

[8] Code of Practice on Wind Effects in Hongkong 2004 [S].

[9] GB 50545—2010, 110 kV ~ 750 kV 架空输电线路设计规范 [S].

GB 50545—2010, Code for Design of 110 kV ~ 750 kV Overhead Transmission Line [S].

[10] 王声学, 吴广宁, 范建斌, 等. 500 kV 输电线路悬垂绝缘子串风偏闪络的研究 [J]. 电网技术, 2008, 32(9): 65-69.

WANG Shengxue, WU Guangning, FAN Jianbin, et al. Study on Flashover of Suspension Insulator String Caused by Windage Yaw in 500 kV Transmission Lines [J]. Power System Technology, 2008, 32(9): 65-69.

[11] 楼文娟, 杨悦, 卢明, 等. 连续多跨输电线路动态风偏特征及计算模型 [J]. 电力建设, 2015, 36(2): 1-8.

LOU Wenjuan, YANG Yue, LU Ming, et al. Conductor Swinging Dynamic Characteristic and Calculation Model of Continuous Multi-Span Transmission Line [J]. Electric Power Construction, 2015, 36(2): 1-8.

[12] 孙保强, 侯锺, 孟晓波, 等. 不同风速下导线风偏动力响应分析 [J]. 高电压技术, 2010, 36(11): 2808-2813.

SUN Baoqiang, HOU Lei, MENG Xiaobo, et al. Characteristics Analysis of Conductors Displacement Under Different Wind Speeds [J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(11): 2808-2813.

(责任编辑 高春萌)