一种结合新型 OPGW 的融冰技术及温度特性分析

对一种结合新型 OPGW 光缆的融冰方案及融冰监测实现原理进行分析，研究了 OPGW 融冰地线的结构及通流后的截面热量分布规律，根据这种特点提出一种利用直流电源、分布式光纤测温技术实现的应用于 OPGW 地线的融冰方案，分析了利用分布式测温技术实现的融冰过程的导线超温和脱冰状态的监测原理，并在试验线路上获取了 OPGW 光缆的覆冰与融冰温度变化数据。通过数据分析进一步验证了融冰过程监测的有效性。该融冰技术可以提高融冰效率，节省能耗，保护光缆的安全。

雷煜卿/中国电力科学研究院　侯宝素/国网河南省鹤壁市供电公司
雷炜卿/国网河南省焦作市供电公司

雷煜卿/高级工程师

关键词/Keywords
地线融冰·
融冰方案·
融冰型OPGW·
分布式光纤测温·
融冰监测·

华南地区输电线路沿线的环境复杂，低温、湿雪和冰冻等天气会造成输电导线严重覆冰。在风作用下，覆冰线路更易诱发舞动，引起覆冰闪络、断线和倒塔等电网灾害，严重威胁着电网的安全运行，给社会造成了巨大的经济损失[1]。

输电线路在线监测是实时了解输电线路在微气象、局部地形等因素下的现场状况的重要监测手段，是降低人工现场巡线查巡故障难度的重要方式。通过在线监测系统对线路覆冰状况进行评估和预警，进而采取措施指导相关部门采取抗冰减灾措施，有效防止输电线路因覆冰引起的地线（导线）、金具、绝缘子损坏和倒塔等事故的发生[2]。

交直流融冰是解决线路覆冰灾害的重要形式[3-4]。输电线路在线监测技术中，针对导线融冰过程中的线路融冰温度和线路温升过程的监测手段较为缺乏，更多强调按照理论的融冰电流和融冰时间进行融冰，无法实现融冰过程中根据现场覆冰情况、气象条件和地理环境等动态调整融冰方案，提高融冰效率，保证导线在融冰后电气、机械特性的完整性。本文针对光纤复合架空地线（OPGW），采用分布式光纤温度传感器对融冰过程中的实时温度监测技术、融冰过程中的控制原理和方案进行研究。

OPGW 地线融冰

架空输电线路中的地线位于输电线路走廊的最上层，相比输电导线的环境更为恶劣。地线只是作为输电线路的避雷线，本身没有电流通过，地线不像导线那样本身会发热，能一定程度上降低覆冰的严重程度，因此在达到覆冰环境气象条件后更容易发生覆冰现象。加之地线的杆塔支架设计强度稍弱，地线发生覆冰时也更容易发生事故。地线融冰显然成为输电线路抗冰减灾中需要重视的薄弱环节。结合地线特点设计的融冰型 OPGW 的截面结构如图 1 所示。

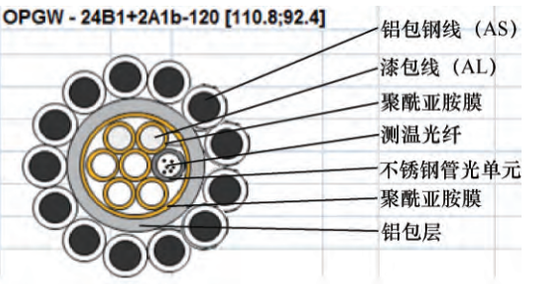


图 1　融冰型 OPGW 截面结构

融冰型 OPGW 利用内嵌的通流导线通电发热的原理进行融冰工作。在通电导线施加电流时，OPGW 上产生融冰的热量，热量从内向外层传递，不断地把导线上的覆冰融化成水，最终把导线上粘附的覆冰融化脱落，完成地线的脱冰。

中国知网　https://www.cnki.net

在环境温度为 25 ℃（常温）、风速为1 m/s 的条件下，仿真计算 OPGW 电流值为 400 A 的温度场分布，仿真结果如图 2 所示。

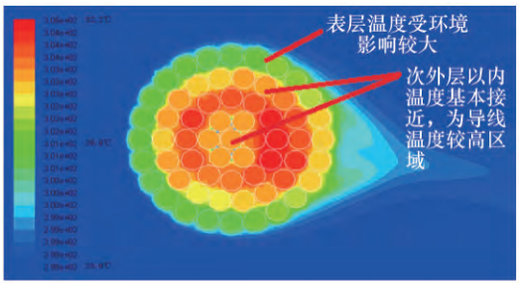


图 2　环境温度为 25 ℃、风速为 1 m/s 及电流值为 400 A 的温度场分布

上述的仿真结果表明，光纤测温系统测得的 OPGW 光单元的温度 T_{fib} 与 OPGW 的最高温度 T_{max} 是一致的，即光纤测温系统测得的温度数值可代表 OPGW 的导体温度。因而可以利用光纤温度传感器监测 OPGW 的实时线路温度，实现融冰超温监测和脱冰温度变化监测。

融冰型 OPGW 的融冰系统主要包括直流融冰装置、OPGW 测温光缆、覆冰监测系统和光纤测温系统等，连接关系如图 3 所示。按照示范线路工程建设要求，光纤测温主机和覆冰监测主机均安装在变电站站点，覆冰测量信号产生后从变电站发出传送到输电线路的各个覆冰监测点，经调制后传回到光栅解调主机解析出覆冰厚度数据；温度测量光信号同样发出后，携带着光缆分布的温度信息返回变电站的解调主机，解析后获取光缆的温度数据。经过数据分析，掌握光缆的覆冰厚度和光缆的温度状态，控制融冰装置的起动/停止、增加融冰电流和降低融冰电流值等。

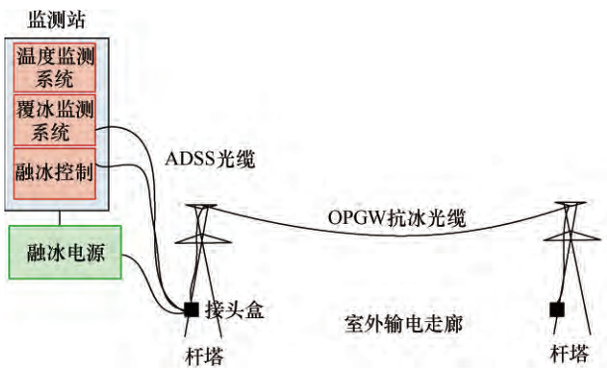


图 3　OPGW 光缆覆冰、融冰监测系统结构

以上方案的 OPGW 融冰监测系统能够实现融冰过程中温度在线监测，测算光缆温度及热点位置，实现合适的融冰温度和融冰效率，以及预判断长距离覆冰线路的脱冰进度，参与控制融冰电源输出合适的融冰电流，发出预警指导融冰人员调节融冰电源达到理想的融冰效果。

OPGW 地线融冰状态监控

基于分布式光纤测温系统的融冰控制策略主要包括融冰线路温度过高控制和线路脱冰进度控制两个功能。

（1）融冰过程超温监控

OPGW 光缆组成部分有铝线、铝包钢线、铝管、不锈钢单元、裸光纤和填充油膏等物质，每种材料都有一个正常的工作温度，才能确保光缆整体性能。因此 OPGW 光缆有一个要求的温度范围。

经研究[7-10]，光纤性能的短板是光纤涂覆材料和纤膏。目前，我国使用的涂覆材料多数是丙烯酸树脂，使用温度一般为 -60 ~ 80 ℃，纤膏采用全合成触变性化合物，这些物质短期内可承受 150 ℃的温度而未见性能显著下降。

不锈钢光单元在常温 150 ℃的温度范围内，内置光纤在 1 310/1 550 nm 处的损耗不超过 0.03 dB/km；熔接接头状态完好，损耗在0.03 dB；光单元内纤膏状态良好。

铝合金的熔点（550 ~ 630 ℃）远低于钢绞线的熔点（1 500 ℃），且铝合金股线在大于 200 ℃时就会发生永久变形。铝包钢线与钢绞线的耐高温性能接近，但其表面铝层较厚，电弧会使铝发生熔化，熔化部位的钢芯长期暴露在空气中，容易锈蚀而降低其整体的抗拉强度。铝包钢绞线的电导率优于钢绞线，在相同情况下其短路电流要大于钢绞线，其表面损伤相应比钢绞线严重。

通过以上分析可以看出，OPGW 融冰过程中的温度瓶颈点在光纤和光纤油膏，经过充分的论证确定 OPGW 地线可以在 -60 ~ 80 ℃范围内稳定工作，短时间可承受 150 ℃的温度。超温监控保障 OPGW 工作在该温度范围内。

（2）融冰过程脱冰进度控制

在交直流融冰抗灾操作上，一般针对特定导

中国知网　https://www.cnki.net

线做定量覆冰试验，确定出合适的融冰电流与融冰时间。在现场操作时，进行略微调整实现实际线路融冰。这种方式的缺点如下:

1) 由于线路环境比较复杂，温度和风因素是瞬息万变的，同时地点不同影响因素也会有很大变化，无法按照某一时刻某一地点的定论做单一的判断。

2) 导线上粘附的冰体厚薄不一，在融冰过程中有些线路已经脱冰了，有些线路还没有脱冰，按照统一融冰时间会存在融冰死角。

3) 环境条件变化后，预估融冰时间已发生变化。如果覆冰已经融完，继续施加电源将浪费电能，同时抬升线路温度。因此融冰过程中如果实时监测融冰进度，做到可视性融冰，则可以克服以上缺点。

下面分析 OPGW 融冰过程中导体温度在脱冰前后的变化特性。融冰期与脱冰期导体温度变化特性的理论基础在于地线 - 冰体结合体的热学特性与地线 - 空气结合体的热学特性的不同。

地线或导线覆冰后多形成以导线为载体，其上粘合多种冰质构成不确定特定形状的结合体，导线多位于结合体一侧或靠中间侧的结构。在融冰过程中，导线表面温度高于零度时，与导线表面接触的冰体内表面开始融化，在冰体和导线之间形成一层冰水混合物，再外层就是冰体的状态。这种状态一直持续到覆冰从导线脱落。该阶段状态的显著特点为: 主要传热介质是水，融冰过程导线温度相对较为稳定，受外界环境影响导致的温度波动小。当地线或导线脱冰之后，导线直接暴露在空气中，此时主要传热介质是空气，热交换方式为对流。相比流质介质的水，空气的热传导系数较小（水为 0.54，空气为 0.024）。因此在没有风作用的情况下，导线的温度会有一定的快速上升，在一个新的阶段达到热平衡。该阶段的第二个特点是在受到环境的风作用时，导线传热加快，导线温度会出现明显的波动。与融冰阶段相比，这两点是脱冰后导体温度出现的显著特征。

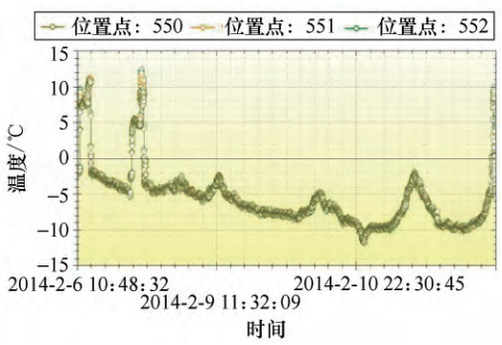
OPGW 融冰试验及分析

结合湖南雪峰山的自然覆冰试验场资源，开展线路覆冰的分布式温度数据采集工作，获取实际环境中输电线路覆冰条件下的融冰温度变化数据。试验 OPGW 光缆及监测系统如图 4 所示，试验用直流电源及线路覆冰如图 5 所示。

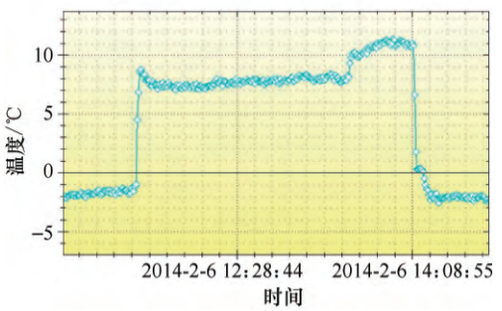
图 4 覆冰试验场试验 OPGW 光缆及分布式温度监测系统

图 5 试验用直流电源及线路覆冰

图 6 为从覆冰试验场获得的融冰过程光缆温度随时间变化的测量数据。从时间 - 温度变化曲线上可以看出，覆冰现象通常出现在环境温度为 -10 ~ -3 ℃的状况下; 地线的温度随环境温度的变化而变化，温度变化范围没有上下限; 融冰过



(a) 在 2014 年 2 月 6 ~ 12 日期间的温度变化数据



(b) 在 2014 年 2 月 6 日融冰期间的温度变化数据

图 6 融冰过程中光缆温度变化曲线

中国知网 https://www.cnki.net

程中在环境温度为 -5 ℃，风速小于8 m/s的条件下，内嵌式 OPGW 地线融冰过程导体温度在 5 ~ 8 ℃时即可实现地线的融冰，融冰时间约为 150 min；在 OPGW 地线的融冰期和脱冰期，地线的温度出现明显差异，即在其他状态不变的情况下，融冰过程完成后，OPGW 地线的温度出现明显上升，这种融冰温度变化特征在经过综合分析后可以作为融冰电源停止的参考控制指令。

图 7 为对采集到的融冰期间的温度数据进行分析的结果。获取的融冰温度数据是在采样周期为 40 s、通流时间为 165 min 期间的。在融冰通流时间为 120 min 时，OPGW 地线上的覆冰开始出现分段的脱落。在 OPGW 地线脱冰前后的30 min 内，导线所在环境气候没有出现显著的变化，仅出现间断性的小于 5 m/s 的风。对采样的时间 - 温度数据进行微分处理和平滑处理，并把处理后的数据叠加在原始温度数据坐标系上。从图 7 的温度曲线可以看出，在 OPGW 地线脱冰时刻前后，温度曲线出现了一个跳跃（大约为2 ℃）。将时间 - 温度曲线进行微分化处理，得到的微分曲线（下面黑色曲线）上对应位置有一个突起，而该时刻前后的其他时段，微分曲线数值均小于该数值，说明地线脱冰时刻前后出现了较大的覆冰状态变化，这与上面的脱冰前后温度变化理论分析基本一致。

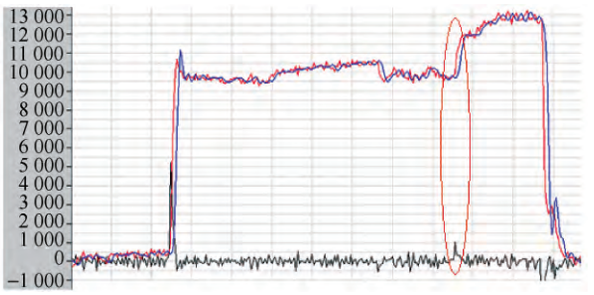


图 7　融冰过程温度数据分析

融冰过程进度监控就是基于以上特征实现地线融冰过程的实时监控，融冰结束即可断开电源，避免持续通电造成的温度异常升高和能源浪费。

结束语

对 OPGW 光缆融冰方案的构成方法和分布式光纤测温实现融冰过程中温度的在线监测方案进行分析，证明提出的 OPGW 电流融冰方案是合理的并且融冰过程是可控的，这为 OPGW 地线的融冰技术设计奠定了坚实的基础。

本文创新性地将 OPGW 电流融冰技术与分布式光纤传感技术结合，实现可视化、可控性融冰过程监测，具有很大的应用价值。除此之外，基于分布式光纤测温系统监测到的融冰过程温度数据，提出并介绍了 OPGW 地线融冰中比较特殊的温度特性，融冰过程中热交换介质的变化致使 OPGW 在通流过程中呈现出一些显著的特征，可以利用这些特性实现导线融冰过程的监控，提高融冰过程的可视性。

参考文献

[1] 冀晋川，高义斌. OPGW 覆冰断线原因分析 [J]. 华北电力技术，2008（7）：15-17.
[2] 胡毅. 电网大面积冰灾分析及对策探讨 [J]. 高电压技术，2008，34（2）：215-219.
[3] 赵国帅，李兴源，傅闯，等. 线路交直流融冰技术综述 [J]. 电力系统保护与控制，2011，39（14）：148-154.
[4] 刘文涛，和识之，陈亦平，等. 基于直流融冰的电网大面积冰灾防御策略 [J]. 电力系统自动化，2012，36（11）：102-107.
[5] 吴端华，何东. 输电线路直流融冰的临界电流和融冰时间分析 [J]. 电力系统及其自动化学报，2010，22（5）：86-91.
[6] 张建明，樊红军，周峰，等. OPGW 热力融冰技术方案 [J]. 电力信息与通信技术，2013，11（12）：135-138.
[7] 李春晖，邓伟锋，徐常志，等. 温升对于 OPGW 光单元影响的技术分析 [J]. 电气信息化，2013，11（6）：106-111.
[8] 栗鸣. OPGW 直流融冰过程对通信光纤的影响 [J]. 电力信息与通信技术，2013，11（7）：124-128.
[9] 栗鸣，谢书鸿. 高温环境对电力通信用光纤的影响 [J]. 电线电缆，2012（4）：3-7.
[10] Stolov A A. Thermal stability of specialty optical fibers [J]. Journal of Light wave Technology，2008，26（20）：3443-3451.

（收稿日期：2014-06-11） EA

中国知网 https://www.cnki.net