第 50 卷 第 11 期：4933-4941 高电压技术 Vol.50, No.11: 4933-4941
2024 年 11 月 30 日 High Voltage Engineering November 30, 2024
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20231364

基于新型地线结构和运行方式的输电线路冰害防治技术

陈 原[1]，范硕超[2]，王 馨[1]，于竞哲[1]，宋 鹏[1]，卢 毅[1]
（1. 华北电力科学研究院有限责任公司，北京 100045；2. 国网冀北电力有限公司，北京 100052）

摘 要：针对雨雪冰冻气象条件下的线路薄弱点——架空地线(含光纤复合架空地线(OPGW)及地线支架)，首次提出“覆冰导致张力增大”与“放电温升导致局部机械强度下降”的双因素地线断线机理，相应提出基于新型地线结构和运行方式的线路冰害防治技术，包括：采用新型光纤搭载技术的分裂导线，大幅度提升架空地线覆冰载荷的承受能力，地线逐基开耐张且增设按线路操作过电压配置的地线耐张绝缘子，基于地线跳线拆装的防冰运行方式。该技术突破常规防冰理念，通过消除冰害期间的导-地线放电，以降低地线断线、倒塔和电网停运概率，具有投资增幅小、运维工作量小、提高光纤通信安全、可实施基于导线光纤的线路状态监测等优势。

关键词：雨雪冰冻气象；输电线路；架空地线；地线开耐张；地线耐张绝缘子；防冰运行方式；导线光纤

Anti-icing Technology for Transmission Lines Based on New Ground Wire Structures and Operation Modes

CHEN Yuan[1], FAN Shuochao[2], WANG Xin[1], YU Jingzhe[1], SONG Peng[1], LU Yi[1]
(1. North China Electric Power Research Institute Co., Ltd., Beijing 100045, China;
2. State Grid Jibei Electric Power Co., Ltd., Beijing 100052, China)

Abstract: The overhead ground wire (including optical fiber overhead ground wire(OPGW) and ground wire support) is the weak point of lines under rainy, snowy, and frozen weather conditions. A dual factor mechanism for ground wire breakage is proposed for the first time in this paper, including two factors: increased tension caused by icing and a decrease in local mechanical strength caused by discharge temperature rise. Furthermore, a transmission line ice disaster prevention technology based on a new ground wire structure and operation mode is proposed, for example, adopting the new fiber-optic-carrying technology, significantly improving the ice load affordability of overhead ground wire, increasing the ground wire tension transform tower by tower, and adding ground wire tension insulators configured according to operating over-voltage, and adopting the anti-icing operation mode based on disassembly and assembly of ground wire jumper, etc. The proposed technology breaks through conventional anti-icing concepts and effectively reduces the probability of ground wire breakage, tower collapses, and power outages by eliminating the discharge of ground wires during ice disaster. The technology also has significant advantages such as small increase in engineering costs, small operation and maintenance workload, improved fiber optic communication safety, and implementing line status monitoring based on wire optical fiber technology.

Key words: rain, snow and freezing weather; transmission line; overhead ground wire; ground wire tension transform; tension insulator for ground wire; anti-icing operation mode; wire optical fiber

0 引言

冰害是长期威胁架空输电线路安全运行的课题[1-3]。雨雪冰冻气象条件下，导线、地线易覆冰且引发放电、断线、倒塔、直至电网大面积停运[4-6]。虽然 2008 年华中、华东及南方电网特大冰害之后，国网湖南省电力公司防灾减灾中心取得了导线直流融冰技术的重大突破[7-9]，但地线防冰难题并未解决，至今架空地线、光纤复合架空地线(OPGW)及地线支架等仍是雨雪冰冻气象条件下的线路薄弱点，是频繁引发导-地线放电、地线断线、直至倒塔、电网停运的重要环节[10-11]，若能大幅度减少地线相关故障，则对于线路冰害治理将起到事半功倍的作用。近年来电网冰害事故仍然频发，2015 年底，华

北大面积雨雪冰冻天气造成冀北公司 500 kV 线路跳闸 25 次，其中 24 次为导-地线放电，3 处地线支架损伤，4 条架空地线(含 OPGW)断线，山西公司的同期状况与冀北相似；2021 年底东北电网发生严重冰害，其中众多故障与地线相关；2022 年多条特高压直流线路亦发生与地线相关冰害故障，国网公司同年立项研究地线防冰技术，以期解决架空地线冰害难题，形成完整的输电线路冰害防治技术。

1 冰害过程与机理

以下简述线路冰害过程与机理：

1）覆冰：雨雪冰冻气象条件下，导、地线表面易形成覆冰；尤其在温度−5~0 ℃、湿度>95%、风速 1~5 m/s 时易形成致密雨凇，使导、地线张力及铁塔承受的机械载荷大幅度增加。

2）导-地线放电：冰害期间的导-地线放电并无复杂的机理，只是因覆冰造成导、地线间距大幅度缩小，从而导致两者之间放电。间距缩小的形式和因素包括：①地线无顺线偏移的前提下，覆冰可使其张力和弧垂增大，这是应力-弧垂通用计算工具唯一适用的工况；②直线塔地线支架两侧地线的不平衡覆冰，可使地线向重覆冰侧偏移(图 1、2)，使该侧弧垂进一步增大(图 3)，这是运维与设计人员有时针对导地线覆冰量产生争议的原因之一；③支架两侧地线的不平衡覆冰可在悬垂线夹两侧形成张力差，当张力差超过线夹握力时，地线在悬垂线夹中向张力较大侧滑移，亦可使该侧弧垂增大；④重覆冰，尤其是支架两侧地线不平衡覆冰形成的纵向载荷超过支架强度时，支架损伤变形并向张力较大侧偏移，亦使该侧弧垂增大；⑤导线和地线脱冰跳跃、导线舞动 [12-13]亦是导-地线间距变化的重要因素(见图 4、5)。上述因素均可造成导-地线间距的大幅度缩小，且在不能承受运行电压时引发导-地线放电，如：2015 年冰害期间，冀北公司的导-地线放电占总跳闸数的 96%；2005 和 2008 年冰害中，剔除绝缘子冰闪[14-16]，导-地线放电亦占多数。

3）断线：2015 年冰害期间，冀北公司发生 4 起地线(含 OPGW)断线(见图 6)和 5 处地线断股，地线断线和断股处均有大电弧烧蚀痕迹(见图 7)且与故障测距相符，即断线、断股处也是导-地线放电处，类似现象亦广泛出现于其他电网冰害中。

地线设计安全系数的实际取值一般高于导线，但雨雪冰冻气象条件下地线仍然频繁断线，且计算

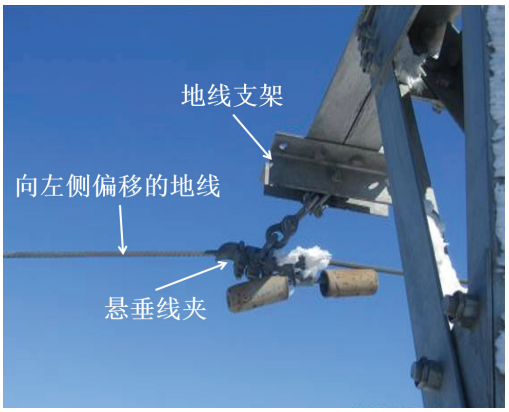


图 1 直接接地架空地线的纵向偏移

Fig.1 Longitudinal offset of directly grounded overhead ground wire

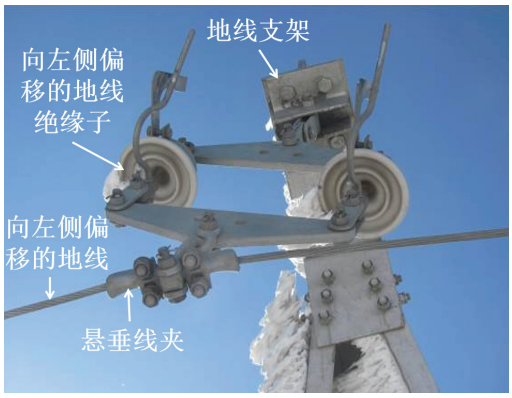


图 2 绝缘架空地线的纵向偏移

Fig.2 Longitudinal offset of insulated overhead ground wire

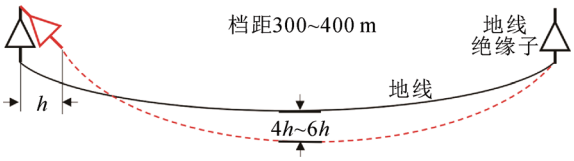


图 3 地线顺线偏移的弧垂变化示意图

Fig.3 Sag variation of ground wire offset along the line



图 4 地线脱冰跳跃

Fig.4 Ground wire deicing jump



图 5　导线脱冰跳跃

Fig.5　Wire deicing jump

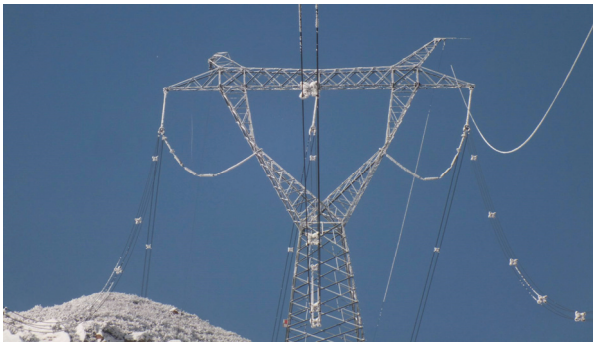


图 6　500 kV 某线地线断线

Fig.6　Ground wire breakage of 500 kV transmission line

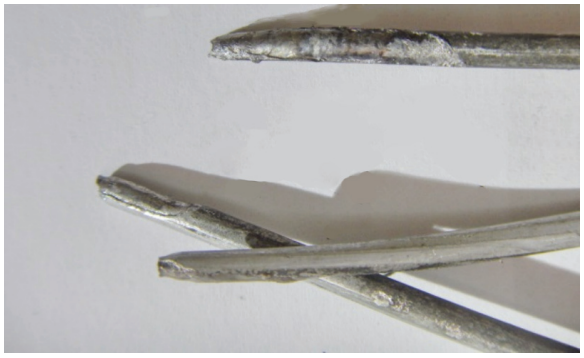


图 7　地线断口的电弧灼烧痕迹

Fig.7　Arc burning marks on the ground wire fracture

表明大多数覆冰工况下的机械载荷并不足以导致断线。该问题曾长期困扰电网，成为运维与设计人员针对导、地线覆冰量产生争议的又一原因，曾有专业人员根据地线断口的锈迹提出是地线的陈旧性损伤导致断线。而本文试验表明断线后失去镀锌层保护的断口暴露于潮湿环境下，仅数小时就会严重锈蚀，否定了陈旧性损伤的推测。经调研和试验，本文首次提出地线断线的双因素机理：一是覆冰导致地线张力增大，以某线为例，覆冰由 10 mm 提高至 20 mm 时，地线张力增大 70%；二是导-地线放电产生的高温电弧可使地线断口的局部强度大幅度下降，如：500 ℃时普通钢材的拉断力比常温时下降 50%，而电弧放电通道及电极温度一般高达 7 000～8 000 ℃，即放电的高温对于小截面地线放电点的机械强度影响不可忽略。上述两因素均难以独自导致地线断线，因此非覆冰状态下的地线放电较少形成断线；至于为何放电极少造成覆冰导线断线，这是由于导线截面远大于地线且其中承受较大张力的钢芯不直接接触电弧，因此电弧难以在短时内提高放电点的整体温度，即放电点的断面强度不会因放电而大幅度下降。

4）倒塔：当铁塔承受的垂直载荷或纵向不平衡张力超过设计阈值时，可能引发倒塔，其中纵向不平衡张力对于铁塔的威胁远大于垂直载荷。严重冰害期间，倒塔往往成串发生，起始塔一般是直线塔，该倒塔又经导、地线在相邻直线塔上形成纵向不平衡张力并倒塔，如此连锁反应，直至耐张塔为止，如：2008 年冰害期间，湖南公司 21 条 500 kV 线路倒塔 319 基，“因一基倒塔而牵引其他杆塔一起倒塔的现象非常多，占此次冰害事故 500 kV 倒塔的绝大多数”。

铁塔一侧的地线断线将产生纵向不平衡张力且对铁塔形成冲击，对于临近极限覆冰状态的线路，该地线断线引发第一基倒塔的概率相对较大。虽然不排除导、地线覆冰形成的垂直载荷压垮铁塔及导线断线的纵向不平衡张力拽倒铁塔的可能性，但因铁塔承受垂直载荷的能力远大于承受纵向不平衡张力的能力，且在雨雪冰冻气象条件下地线断线概率远大于导线，故合理推断：地线断线可能是严重冰害期间初始倒塔的直接原因之一。

即使未发生地线断线，冰害期间频繁的导-地线放电亦可导致众多线路停运，而停运后导线无电流产生阻性发热，可加速导线覆冰，增大导线张力，对铁塔形成更大的机械载荷并引发倒塔。2008 年湖南公司冰害报告指出：倒塔“基本发生在线路停运后”，而导致线路停运的原因包括“OPGW 光缆、架空地线覆冰弧垂下降”引发放电等，即地线放电是冰害期间初始倒塔的间接原因之一。

综上所述，架空地线(含 OPGW、地线支架)是雨雪冰冻气象条件下的线路薄弱点，是导致放电跳闸、地线断线、倒塔、电网停运的重要环节；其中导-地线放电占比高且一定程度可视为后续系列故障的源头——这是后文以“消除冰害期间的地线放

电”作为冰害防治焦点的重要依据。如：2005 和 2008 年特大冰害均出现高比例的导-地线放电及大量地线损伤，湖南公司冰害报告验证了地线的负面作用，“恢复重建期间带病运行线路共 21 条，共有缺陷杆塔变形 12 基，导线损伤 1 处，地线损伤 4 处，光缆损坏 21 处”，“对于地线受损而停运的线路，提出了剪断地线运行等一批临时应急送电措施，对维持主电网的运行起到十分积极的作用”。

2 基于新型地线结构和运行方式的输电线路冰害防治技术

2.1 现有线路冰害防治技术

2.1.1 提高线路本体的抗冰能力

1）根据实际情况，提高某区域的冰区分级(如：10 mm 覆冰提高至 15 mm)，并相应提高区域内线路的抗冰能力，确保铁塔可承受更大的导线和地线覆冰载荷。

2）鉴于纵向不平衡张力是众多冰害倒塔的主因，制订了相应的设计标准。以中重冰区架空输电线路设计技术规定 Q/GDW182—2008[17]为例：

(1) 新标准提高了两侧导、地线不均匀覆冰时铁塔承受纵向不平衡张力的要求，设计参数为一侧按 100%覆冰，另一侧按 75%覆冰；原标准则不考虑不均匀覆冰产生的纵向不平衡张力。

(2) 新标准提高了一侧导线或地线断线时铁塔承受纵向不平衡张力的要求，设计参数分 2 种，取其中高者。

①新标准的地线断线张力按 100%最大使用张力计算，原标准的地线断线张力则按 50%最大使用张力计算。

②新标准的导线或地线断线张力按未断线侧导线或地线 100%覆冰计算，原标准则按未断线侧导线或地线无覆冰计算。

3）导线因输送电能产生阻性发热，可延缓导线覆冰；而地线无阻性发热，覆冰相对较快——这是导、地线覆冰形成条件的主要差异，且早期设计标准未考虑该差异对两者覆冰的影响，因此新标准要求地线覆冰按导线覆冰加 5 mm 设计。

上述措施仍未充分考虑地线防冰的薄弱性，主要是未认识到地线放电与地线断线、后续可能的倒塔、电网停运的因果关系，因此虽然对地线的覆冰载荷有一定程度的额外加强，即一次性提高 5 mm 的覆冰量，但因运行中各种导、地线覆冰工况难以准确计算，“固定提高 5 mm 覆冰量”的严谨性显然有欠缺。总体上，上述措施对于导线覆冰载荷和地线覆冰载荷仍然采取了同步提升方式，因此易形成对于薄弱的地线投入不足，而对于相对安全的导线投入过量的不佳效果。

线路抗冰能力可视为铁塔承受导线覆冰载荷和地线覆冰载荷的能力，且因导线载荷远大于地线载荷，线路本体的造价很大程度上就取决于导线覆冰载荷，因此同步提升导、地线覆冰载荷的方式必然导致工程投资增幅巨大，难以承受。这是后文放弃导、地线同步防治，而单独以冰害薄弱点架空地线作为冰害防治重点的重要依据。

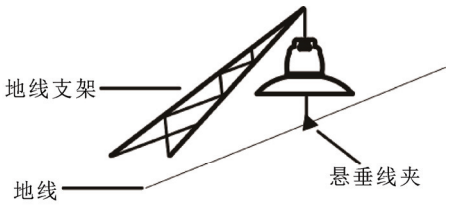
2.1.2 除(融)冰技术

采用除(融)冰技术去除导、地线上的覆冰，使线路免受较大的覆冰载荷。交、直流融冰在该类技术中最为成熟，其中直流融冰具有更大的灵活性和通用性，国网湖南省电力公司防灾减灾中心在国内直流融冰领域作出了开拓性贡献[7]。融冰技术主要适用于导线，基本原理是使导线中流过不小于 2 A/mm^2 的电流，产生阻性发热，使覆冰融化、脱落。

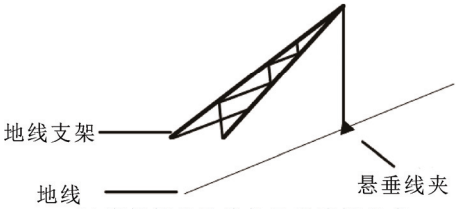
融冰技术用于架空地线(含 OPGW)时，对于分段绝缘型地线(图 8(a))，融冰前须将地线断点逐个连通；对于逐塔接地型地线(图 8(b))，融冰前须将接地点逐个断开，如此繁琐的操作使融冰技术对于架空地线几乎失去实用价值。这是本文放弃地线融冰，转而大幅度提升铁塔承受地线覆冰载荷能力的重要依据。

2.2 新型冰害防治技术

2.2.1 采用新型地线结构和运行方式，消除冰害期间的地线放电和地线断线



(a) 分段绝缘地线的悬垂连接方式



(b) 直接接地地线的悬垂连接方式

图 8 架空地线连接方式

Fig.8 Connection method of overhead ground wire

基于导-地线放电、地线(OPGW)断线、倒塔及电网大面积停运的因果关系，从线路冰害的薄弱点架空地线入手，本文提出一套基于新型地线结构和运行方式的线路冰害防治措施，以期杜绝冰害期间占比最高且可能引发众多后续故障的导-地线放电，获得事半功倍的冰害防治效果。

1）架空地线均采用非 OPGW 的常规地线，且大幅度提高铁塔承受地线覆冰载荷的能力，建议按百年一遇的覆冰等级(即最高级)设计地线(含地线支架和相关金具)的机械强度，确保冰害时不发生单一的机械载荷导致的地线损伤和故障，为实施新型地线结构和运行方式奠定基础。

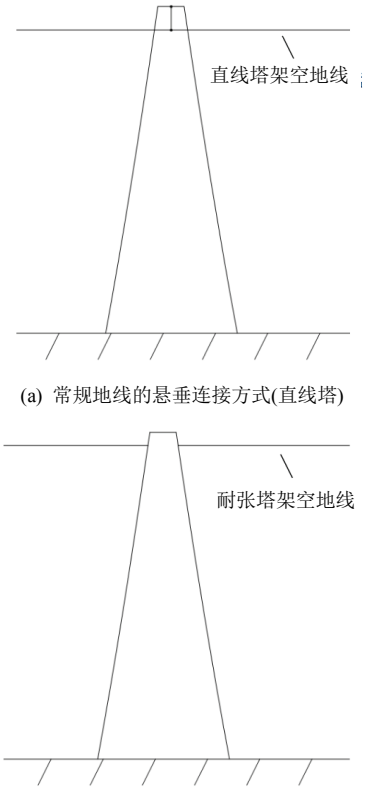
原则上，设计铁塔机械强度时，须同时、同步考虑导线和地线载荷，即铁塔既应能够承受运行中的导线覆冰载荷也能够承受地线覆冰载荷。但如前所述，导-地线放电造成地线局部强度短时下降等因素导致冰害期间地线的实际危险和危害远大于导线，而这些因素又难以在设计中精确计算，因此本文提出了单独按最高等级提高地线覆冰载荷的方案，以回避设计上难以精确计算的难题；且由于地线载荷对于线路投资的影响远小于导线载荷，即单独大幅度提高地线覆冰载荷不会导致线路投资的飙升，因此本方案在经济上具有可行性。

2）不同于常规地线连接方式(见图 9)，新型地线结构对于耐张塔和直线塔均采用耐张连接方式[18]，并增设地线耐张绝缘子(见图 10)。地线耐张绝缘子的电压等级与导线绝缘子相同，但绝缘长度按线路操作过电压而非大气过电压选择[19]，以 500 kV 线路为例：操作过电压绝缘间隙为 2.7 m[20]，因此地线耐张绝缘子结构高度可取 3.2~3.5 m；而按大气过电压配置的导线绝缘的实际结构高度约 4.5 m，即地线耐张绝缘子短于导线绝缘子[21]——如此设计既可在防冰运行方式下消除导-地线放电，又适当保留了地线的防雷功能，详见 3）中的②和 6）。

3）新型地线结构的 2 种运行方式

①接地运行方式：如图 10(a)所示，在非雨雪冰冻气象条件下，用跳线将架空地线与塔身短接，此时地线耐张绝缘子无绝缘作用，地线具有正常的防雷功能，因此也称防雷运行方式。该运行方式下，跳线与塔身之间及跳线与地线耐张绝缘子之间均无绝缘要求，因此该结构无需提高现有直线塔和耐张塔的尺寸。

②绝缘运行方式：如图 10(b)所示，在雨雪冰冻气象条件下，断开架空地线与塔身之间的跳线(可将拆下的跳线固定于塔身)，此时地线耐张绝缘子起绝缘作用，使架空地线与铁塔之间实现电气隔离；根据上文地线耐张绝缘子的设计参数可知，地线与铁塔之间的绝缘强度能够承受运行电压及操作过电压。该运行方式下，架空地线因与塔身绝缘而处于悬浮电位，因此也称绝缘运行方式。如图 11 所示，该状态下，导-地线间距缩小(包括零间距)不会引发导-地线放电，相应也就避免了源于放电的地线断线及后续可能引发的倒塔和大面积停运，此即新型地线结构的冰害防治效果。以 2015 年冀北冰害为例：若采用本方案，则跳闸率可降低 96%。



(a) 常规地线的悬垂连接方式(直线塔)

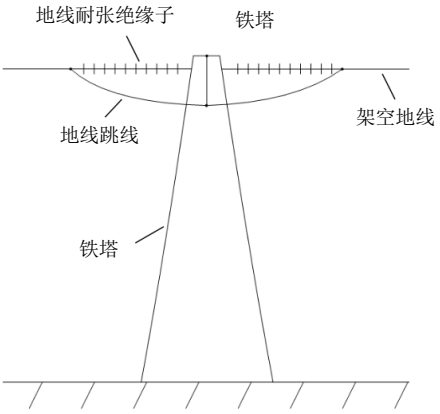
(b) 常规地线的耐张连接方式(耐张塔)

图 9　常规地线连接方式(均以直接接地的架空地线为例)

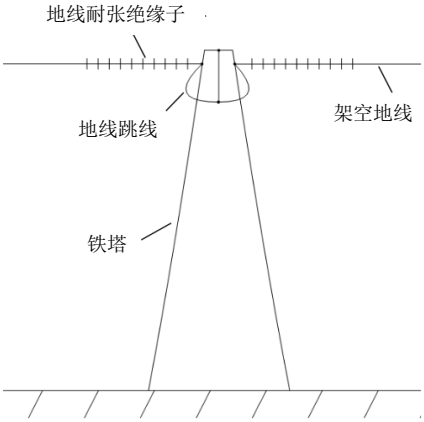
Fig.9　Conventional ground wire connection method (in the text, direct grounded overhead ground wire is used as an example)

4）新型地线结构的运行方式可按季节转换，如：春、夏、秋季采用防雷运行方式，冬季采用防冰运行方式；也可与电网冰害预警系统相结合，仅在接收到必要的雨雪冰冻气象预报时转换为防冰运行方式。

5）新型地线结构适用于中重冰区的架空输电线路。根据冰区分布图的划分，新型地线结构可应用于线路的全长，也可仅用于部分区段，尤其适合新建线路的整体设计。



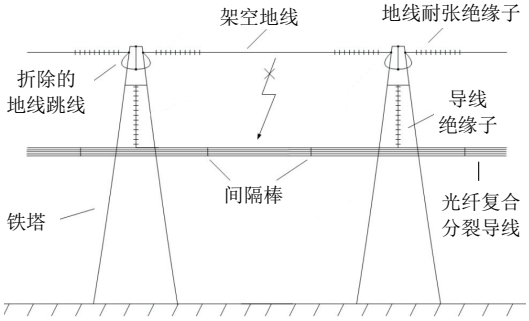
(a) 接地运行方式(防雷运行方式)



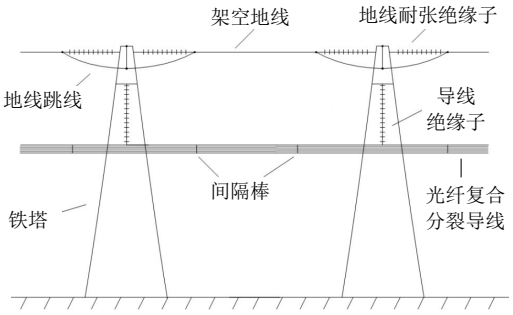
(b) 绝缘运行方式(防冰运行方式)

图 10 新型地线连接方式

Fig.10 New ground wire connection method



(a) 绝缘运行方式(防冰运行方式)



(b) 接地运行方式(防雷运行方式)

图 11 新型防冰地线结构与基于小截面光缆的光纤复合分裂导线示意图

Fig.11 New anti-icing ground wire structure and fiber optic composite bundled conductor based on small section optical cable

6）对于冬季雷电活动较频繁且地线已转换为防冰运行方式的线路，若地线落雷，由于按操作过电压配置的地线耐张绝缘子短于按大气过电压配置的导线绝缘子，而导线绝缘子一般又小于档内的导-地线间距，因此该落雷通过地线耐张绝缘子对铁塔和大地放电、泄流的概率大于直接对导线放电的概率，即防冰运行方式下的架空地线一定程度上仍可发挥防雷作用。

7）与目前有些单位在雨雪冰冻季节“直接落下地线运行”以防止导-地线放电的措施相比，新型地线结构的运行方式转换仅涉及跳线的拆装，工作量和难度大幅度减少，同时回避了现有融冰技术不适合架空地线的难题。

2.2.2 通信光纤由地线转入导线，提升通信安全性

1）新型地线结构均采用非 OPGW 的常规地线，因此通信光纤需由地线转入导线[21]，以实现通信功能。光纤在导线中的通信原理与 OPGW 相同，主要区别是在线路两端的变电站使用光纤复合绝缘子，将光纤由地电位引入/引出高压导线。

2）与常规导线具有相同应力-弧垂特性或可适应常规导线应力-弧垂特性的小截面光缆：导线光纤通信的实现一般是将光纤置入一根导线内，构成光纤复合相线 OPPC，它既具有光纤通信功能，又具有输电功能；既可单独作为一相导线，也可作为分裂导线的一根子导线。OPPC 截面远大于作为地线的 OPGW，这导致其设计、施工、运维的诸多难题，包括：①OPPC 和 OPGW 均须根据耐张段的长度定长制作，而 OPPC 截面远大于 OPGW，因此单轴 OPPC 的长度有限，难以满足较长耐张段的需求。②单轴 OPPC 长度较短，且不能多轴线接续后实施长距离张力放线，因此须频繁转场，施工难度大。③单轴 OPPC 长度较短，因此线路全长的光纤接头多，光纤熔接施工量大，且导致一定程度的信号衰减。④为便于光纤通信的维护，往往将多余的 OPGW 盘绕成卷收纳固定于地电位的塔身，称为余缆盘；OPPC 截面大，余缆盘径大，需占用较大绝缘空间，而其余缆盘的收纳位置并非地电位的塔身，

而是高压电位的耐张塔跳线处，设计难度大。上述问题导致多年来 OPPC 未能获得推广应用；针对上述难题，本文提出定制与常规导线具有相同应力-弧垂特性或可适应导线应力-弧垂特性的小截面光缆[22]——通过合理选择、匹配线股，可在运行中与常规导线同步伸缩起伏的小截面光缆是能够获得的。原则上该小截面光缆仅需具备光纤通信功能，而无需输电功能，因此在满足应力-弧垂特性的前提下，允许其截面与 OPGW 相近或更小，以避免 OPPC 的诸多设计、施工、运维难题。

3）上述小截面光缆并非作为分裂导线的一根子导线，而是布置于常规分裂导线的框架内侧，构成基于小截面光缆的光纤复合分裂导线，图 12 是光纤复合四分裂导线示意图——由于小截面光缆与导线具有相同应力-弧垂特性，因此可避免运行工况改变时二者长度、弧垂不同步变化导致的碰线、断线等不良后果。理论上分裂导线的中心线是小截面光缆的最佳位置，光缆位于分裂导线的内侧，不易受到施工车辆等外力的直接碰撞，放电时受到子导线的良好屏蔽而不易受到高温电弧的灼烧，尤其是冰害中不会因导-地线放电而频繁发生类似 OPGW 的损伤、断线，可有效提高光纤通信的安全性。

4）配套金具及配件：为了实现光纤复合分裂导线的应用，须设计一系列配套金具和配件，如：用于光纤复合分裂导线的子导线间隔棒、悬垂联板、小截面光缆的余缆盘收纳固定装置等。

5）将 2.2.1 节新型地线结构与 2.2.2 节基于小截面光缆的光纤复合分裂导线相结合，就构成了完整的“基于新型地线结构和运行方式的输电线路冰害防治技术”(见图 11)，其中图 11(a)为绝缘运行方式(防冰运行方式)，图 11(b)为接地运行方式(防雷运行方式)。

2.2.3　建立基于导线光纤的线路状态监测系统

光纤不仅可用于通信，且其光、热、机械应力特性使之成为极佳的多功能传感器；而光纤纵贯全线的分布使线路上无须额外添加复杂监测装置和电源等辅助设备，仅需站内安装信号发射、接收装置即可实现输电线路的状态监测，潜力巨大。但长期以来光纤的在线监测潜力并未充分挖掘，原因有二：一是目前的光纤监测范围较短，线路两侧合计可监测 140~150 km；二是目前光纤主要置于兼作架空地线的 OPGW，覆冰舞动、车辆碰线等众多故障则主要发生于导线，而通过地线光纤间接监测导线运行状态难度较大。本文借助新型地线结构的冰害防治技术使光纤由地线转入导线，突破了上述第 2 个应用瓶颈，为实施基于导线光纤的线路状态的直接、精准监测奠定了基础(见图 13)。以下以导线覆冰、舞动、脱冰跳跃为例，比较基于地线光纤监测和基于导线光纤监测的优劣。

1）覆冰监测：导、地线覆冰可使其张力和弧垂增大，通过光信号在光纤中的散射效应可感知这种张力和弧垂的变化，从而实现光纤所附的导、地线覆冰状态的直接、准确监测。如前所述，导线覆冰载荷往往是铁塔设计的决定因素，但目前基于 OPGW 的监测仅可根据地线覆冰状态间接估算导线覆冰状态，而导线和地线的温度差异、截面差异、高度差异等均难以确保这种间接估算的准确性。本文基于导线的覆冰监测使上述间接估算转变为直接测量，从而易于获取真实、准确的导线覆冰信息。

2）舞动监测：舞动往往发生于分裂导线，而极少发生于单根的地线，因此欲通过 OPGW 的光信号变化间接获取导线的舞动参数难度极大；而本文基于导线的舞动监测属于直接测量，易于获得舞动阶次、舞动幅值、舞动频率等全面、可信的状态参

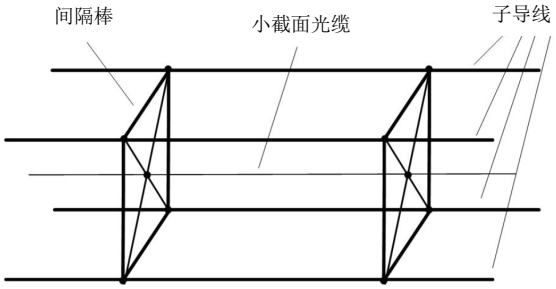


图 12　基于小截面光缆的光纤复合四分裂导线示意图

Fig.12　Quad bundle conductor based on small cross-section optical cable

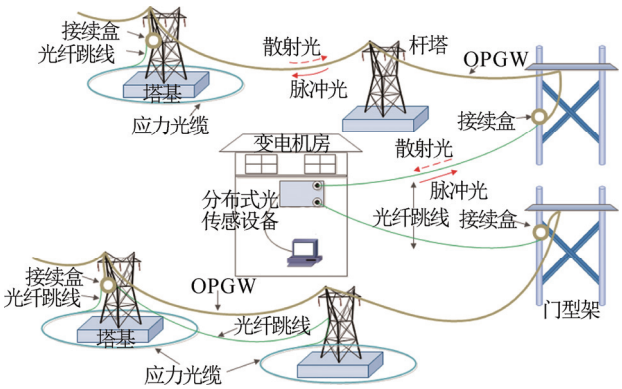


图 13　基于 OPGW 的线路状态监测系统

Fig.13　Line status monitoring system based on OPGW

数(见图 14)。

3）脱冰跳跃监测：脱冰跳跃可造成导线张力、弧垂的剧烈、动态变化，是冰害期间放电、倒塔等故障的重要原因之一，但截至目前极少获得运行线路的脱冰跳跃信息；而基于导线的状态监测使这种信息的获取变得容易，如：导线脱冰跳跃的张力-时间曲线(图 15)、幅值-时间曲线等，对于线路设计和运维具有重要意义。

3 结论

1）架空地线(含 OPGW、地线支架)是雨雪冰冻气象条件下的线路薄弱点，是造成导-地线放电、地线断线以及间接或直接造成倒塔和电网停运的重要环节；其中导-地线放电在冰害故障中占比高且一定程度可视为后续系列故障的“源头”。

2）现行架空地线(含 OPGW)的设计安全系数未考虑运行期间导-地线放电形成的的高温电弧因素，该因素可短时大幅度降低地线的局部机械强度，使地线在覆冰工况下“领先”导线达到设计安全阈值而断线，即“覆冰导致张力增大”与“放电温升导致局部机械强度下降”构成雨雪冰冻气象条件下地线频繁断线的双重因素。

3）现行防冰设计方法对于导线覆冰载荷和地线覆冰载荷采取同步调整方式，可能导致对于防冰薄弱点的地线投入不足，对于相对安全的导线投入过量且工程投资整体增幅较大的不良效果。另一重要防冰措施——直流融冰技术可在防止导线覆冰时发挥重要作用，但对于架空地线(含 OPGW)则暂无实用价值。

4）新型地线结构及运行方式的线路冰害防治技术，包括：采用新型光纤搭载技术的分裂导线，使用非 OPGW 的常规地线，大幅度提升地线覆冰载荷的承受能力，地线逐基开耐张且增设按线路操作过电压配置的地线耐张绝缘子，基于地线跳线拆装的防冰运行方式。该技术摒弃导、地线覆冰载荷同步调整的设计方式，重点针对冰害薄弱点——架空地线采取措施，投资增幅小；通过杜绝导-地线放电，降低地线断线、倒塔和电网停运概率，事半功倍；通过拆装短小的地线跳线实现防雷-防冰运行方式的转换，与复杂的地线融冰操作及地线整体落地的防冰措施相比，运维工作量大幅度缩减；且该技术不仅可用于在运线路重冰区段的局部改造，亦适合新建线路的整体设计。

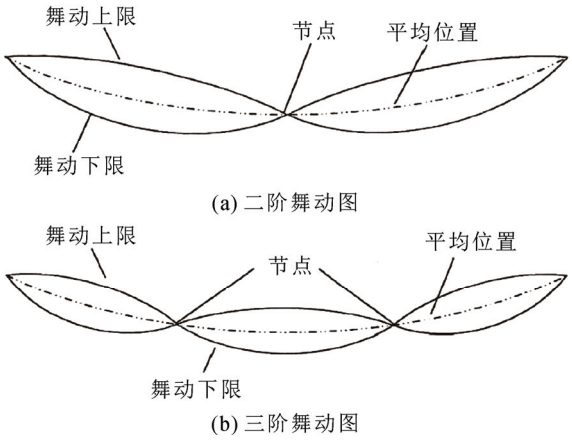


图 14 导线舞动图

Fig.14 Wire galloping diagram

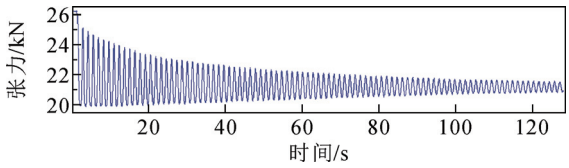


图 15 导线脱冰跳跃的张力-时间曲线

Fig.15 Tension-time curve of wire deicing jump

5）采用具有相同应力-弧垂特性的小截面光缆和常规分裂导线构成光纤分裂导线，将光纤置于分裂导线框架内侧，既可避免放电灼烧、异物碰线导致的损伤、断线，提高光纤安全运行水平，又为实施基于导线光纤的线路状态精准监测奠定基础，且避免了 OPPC 单轴线长度短，全程接头多，光信号衰减大，施工难度和施工量大等现有导线光纤的诸多难题。

6）对于众多轻、中级别冰害，新型地线结构通过杜绝导-地线放电这一冰害故障“源头”，可在较大程度上实现冰害防治；对于导线覆冰载荷接近设计安全阈值的严重冰害，则可将“导线直流融冰”与“新型地线结构”相结合构成完整的冰害防治技术，前者避免导线覆冰载荷超标，后者防止地线相关故障。

参考文献 References

[1] 蒋兴良，张志劲，胡 琴，等. 再次面临电网冰雪灾害的反思与思考[J]. 高电压技术，2018，44(2)：463-469.
JIANG Xingliang, ZHANG Zhijin, HU Qin, et al. Thinkings on the re-strike of ice and snow disaster to the power grid[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(2): 463-469.

[2] LU J Z, ZENG M, ZENG X J, et al. Analysis of ice-covering characteristics of China Hunan power grid[J]. IEEE Transactions on Industry

Applications, 2015, 51(3): 1997-2002.

[3] 何高辉，胡　琴，杜茗茗，等. 自然覆冰导线直流电晕损失及其可听噪声特性实验研究[J]. 中国电机工程学报，2022，42(12)：4633-4640.
HE Gaohui, HU Qin, DU Mingming, et al. Experimental research on the DC corona loss and audible noise characteristics of natural icing conductor[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(12): 4633-4640.

[4] 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.

[5] 王新宽，喻建波，刘振华，等. 等效扩径导线与分裂导线覆冰比较[J]. 高电压技术，2022，48(7)：2698-2705.
WANG Xinkuan, YU Jianbo, LIU Zhenhua, et al. Comparison of icing between equivalent expanded diameter conductor and bundle conductor[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(7): 2698-2705.

[6] 胡　琴，于洪杰，李　毅，等. 分裂导线覆冰增长模拟计算及试验验证[J]. 高电压技术，2017，43(3)：900-908.
HU Qin, YU Hongjie, LI Yi, et al. Numerical and experimental study of accreted ice on bundle conductor[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(3): 900-908.

[7] 陆佳政，朱思国，李　波，等. STATCOM 对直流融冰整流变压器直流偏磁的影响及抑制方法[J]. 高电压技术，2016，42(5)：1624-1629.
LU Jiazheng, ZHU Siguo, LI Bo, et al. Influence of STATCOM system on the DC-icing rectifier transformers' DC magnetization and suppression method[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(5): 1624-1629.

[8] LU J Z, ZHANG H X, FANG Z, et al. Research and engineering application of power grid large-scale ice-disaster prevention and treatment technology[C] // CIGRE. Paris, France: CIGRE, 2014: B2-204.

[9] 晏鸣宇，何宇斌，艾小猛，等. 融冰计划与机组组合的协同优化[J]. 中国电机工程学报，2018，38(5)：1467-1474.
YAN Mingyu, HE Yubin, AI Xiaomeng, et al. Coordinated strategy of de-icing outage scheduling and unit commitment[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(5): 1467-1474.

[10] 胡　琴，姜　涛，蒋兴良，等. 地线电磁脉冲除冰系统的振动加速度试验研究[J]. 电网技术，2022，46(11)：4541-4547.
HU Qin, JIANG Tao, JIANG Xingliang, et al. Vibration acceleration experiments of ground wire deicing system with electromagnetic pulses[J]. Power System Technology, 2022, 46(11): 4541-4547.

[11] 王　斌，李立涅，魏发生，等. 不均匀覆冰下的架空地线覆冰在线监测力学计算模型改进[J]. 高电压技术，2022，48(11)：4538-4545.
WANG Bin, LI Licheng, WEI Fasheng, et al. Research on improvements in the mechanical calculation model of on-line icing monitoring of overhead ground wires under uneven icing[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(11): 4538-4545.

[12] 严　旭. 输电线路舞动在线监测及防舞动技术研究[D]. 合肥：合肥工业大学，2018：21-22.
YAN Xu. Research on galloping online monitoring and anti-galloping technology of transmission line[D]. Hefei, China: Hefei University of Technology, 2018: 21-22.

[13] 王黎明，王　琼，陆佳政，等. 500 kV 覆冰四分裂导线舞动特性[J]. 高电压技术，2019，45(7)：2284-2291.
WANG Liming, WANG Qiong, LU Jiazheng, et al. Galloping characteristics of 500 kV iced quad bundle conductor[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(7): 2284-2291.

[14] 郝犇珂，陈俊武，谢　毅，等. 超疏水和 RTV 涂层表面覆冰剪切强度及其影响因素的对比分析[J]. 高电压技术，2020，46(12)：4227-4233.
HAO Benke, CHEN Junwu, XIE Yi, et al. Comparative analysis of the variation of icing shear strength of superhydrophobic and RTV coatings[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(12): 4227-4233.

[15] 王博闻，蒋正龙，陆佳政，等. 500 kV 防冰防雷复合绝缘子防雷特性仿真研究[J]. 电网技术，2017，41(7)：2393-2400.
WANG Bowen, JIANG Zhenglong, LU Jiazheng, et al. Simulation study of lightning protection performance of 500 KV anti-icing and anti-thunder composite insulator[J]. Power System Technology, 2017, 41(7): 2393-2400.

[16] 蒋正龙，吴　伟，尹小根，等. 具有防雷功能的 500 kV 线路绝缘子优化设计及防雷防冰闪试验分析[J]. 高电压技术，2017，43(12)：3843-3849.
JIANG Zhenglong, WU Wei, YIN Xiaogen, et al. Optimization design and lightning & icing protection test of 500 kV anti-icing flash insulator with lightning protection function[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(12): 3843-3849.

[17] 国家电网有限公司. 中重冰区架空输电线路设计技术规定：Q/GDW 182-2008[S]，2008.
State Grid Corporation of China. Technical code of design overhead transmission line in medium-heavy icing area: Q/GDW 182—2008[S], 2008.

[18] 陈　原，卢　毅，杨　静，等. 架空输电线路的直线塔的安装结构以及耐张段的安装结构：CN106207929A[P]. 2016-12-07.
CHEN Yuan, LU Yi, YANG Jing, et al. Installation structure of tangent tower of overhead power transmission line and installation structure of strain section: CN106207929A[P]. 2016-12-07.

[19] 陈　原. 一种基于地线开耐张方式及地线耐张绝缘子的架空地线：CN109390897B[P]. 2024-05-31.
CHEN Yuan. Overhead ground wire based on ground wire opening strain mode and ground wire strain insulator: CN109390897B[P]. 2024-05-31.

[20] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 110 kV~750 kV 架空输电线路设计规范：GB 50545—2010[S]. 北京：中国计划出版社，2010.
Ministry of Housing and Urban Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of 110 kV~750 kV overhead transmission line: GB 50545—2010[S]. Beijing: China Planning Press, 2010.

[21] 陈　原. 一种基于光纤复合相线的架空输电线路：CN209592931U[P]. 2019-11-05.
CHEN Yuan. Overhead power transmission line based on an optical fiber composite phase line: CN209592931U[P]. 2019-11-05.

[22] 陈　原，范硕超，王　馨. 一种基于小截面光纤复合子导线的分裂导线：CN110164608A[P]. 2019-08-23.
CHEN Yuan, FAN Shuochao, WANG Xin. Split conductor based on small cross-section fiber composite sub wire: CN110164608A[P]. 2019-08-23.



陈　原(通信作者)
1969—，男，博士，教授级高工
研究方向为电网防污闪及架空线路运行
E-mail: 490714891@qq.com

CHEN Yuan
Ph.D., Professor
Corresponding author

收稿日期　2023-08-16　修回日期　2024-06-07　　编辑　曹昭君