

# 输电线路覆冰机理、预测及融冰技术研究综述

赵威<sup>1</sup>, 彭巍屹<sup>2</sup>, 周非凡<sup>1</sup>, 周正威<sup>1</sup>, 杨涛<sup>1</sup>, 王媛媛<sup>2</sup>

(1. 国网湖南省电力有限公司株洲供电分公司, 湖南 株洲 412000;

2. 长沙理工大学电网防灾减灾全国重点实验室, 长沙 410114)

**摘要:** 随着极端天气频发, 输电线路覆冰灾害对电网安全运行的威胁日益加剧, 输电线路融冰技术已成为当前的研究热点。在此背景下, 系统综述了输电线路覆冰机理、预测及融冰技术的研究现状。首先, 介绍了输电线路的覆冰机理, 揭示了过冷却水滴碰撞冻结、积冰形态变化及微地形-微气象动态作用对覆冰形态演化的影响规律; 其次, 为提早预知覆冰程度并给融冰预留充足时间, 对覆冰预测方法进行了深入分析, 对现有方法的原理及差异进行了针对性评述; 然后, 对三种热力融冰方法的能效特性及其优缺点进行了分析; 最后, 指出未来研究可聚焦于预测模型与融冰算法的组合以及输电线路不停电融冰, 以构建适应新型电力系统的融冰减灾体系。

**关键词:** 输电线路; 覆冰机理; 覆冰预测; 热力融冰

**DOI:** 10.19585/j.zjdl.202602012

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## A review of research on transmission line icing mechanisms, prediction, and deicing technology

ZHAO Wei<sup>1</sup>, PENG WeiYi<sup>2</sup>, ZHOU FeiFan<sup>1</sup>, ZHOU Zhengwei<sup>1</sup>, YANG Tao<sup>1</sup>, WANG Yuanyuan<sup>2</sup>

(1. State Grid Zhuzhou Power Supply Company, Zhuzhou, Hunan 412000, China;

2. State Key Laboratory of Disaster Prevention & Reduction for Power Grid, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

**Abstract:** With the increasing frequency of extreme weather events, transmission line icing disasters pose a growing threat to the safe operation of power grids, making de-icing technology a current research focus. In this context, this paper systematically reviews the state of research on transmission line icing mechanisms, prediction, and de-icing technology. Firstly, the icing mechanisms are introduced, revealing the influence of supercooled water droplet collision and freezing, ice accretion morphology changes, and micro-terrain/micro-meteorological dynamic effects on the evolution of ice shapes. Secondly, to enable early prediction of icing severity and allow sufficient time for de-icing operations, icing prediction methods are analyzed in depth, with targeted commentary on the principles and differences of existing methods. Thirdly, the energy efficiency characteristics, advantages, and disadvantages of three thermal de-icing methods are analyzed. Finally, it is suggested that future research should focus on the integration of prediction models and de-icing algorithms, as well as live-line de-icing techniques for transmission lines, to build a de-icing and disaster mitigation framework adapted to modern power systems.

**Keywords:** transmission line; icing mechanism; icing prediction; thermal de-icing

## 0 引言

自20世纪50年代以来, 我国输电线路覆冰事故逾5 000起, 已然成为威胁电网安全运行的重大自然灾害之一<sup>[1]</sup>。近年来, 受地理环境与气候变化的双重影响, 极端天气的发生频率较过去更高,

影响更大, 输电线路覆冰灾害愈发严重。俄罗斯、美国和冰岛等国家都遭受过严重的覆冰灾害事故<sup>[2]</sup>, 而我国是世界上输电线路覆冰最严重的国家之一。2020年11月, 吉林省遭遇雨雪冰冻大风灾害, 长春地区325条供电线路频繁跳闸, 造成33.5万用户停电<sup>[3]</sup>。2021年12月, 云南电网公司输配电线路覆冰共计21条, 最大覆冰比值达0.71<sup>[4]</sup>。2022年12月, 贵州达棒山风电送出线路覆冰断线36处, 停运54天, 直接经济损失5 300万

**基金项目:** 国家自然科学基金(52177069); 株洲电力勘测设计科研有限责任公司创新项目(2024ZKHX614)

元。2023年,湖南先后遭遇三轮低温雨雪冰冻天气,其雨雪强度之大、覆盖范围之广、持续时间之长,均为2009年以来之最,电网面临迎峰度冬和春节保电等多重挑战<sup>[5]</sup>。

自2008年湖南遭受百年不遇的特大雨雪冰冻灾害以来,国内外专家学者围绕输电线路覆冰难题,借助试验测试、数值模拟、现场观测等多种手段开展了大量深入研究,进而提出了各种除冰方法<sup>[6]</sup>,具体可分为4类:

1)自然被动法:无需人工输入外部能量,依靠自然因素实现脱冰,包括导线及覆冰的重力、环境风力的冲击拖拽,以及环境升温导致的冰层融化、酥化,促使覆冰自然脱落<sup>[7]</sup>。

2)机械除冰法:向覆冰导线施加机械力,借助线路振动破坏冰层应力,实现冰层脱落。传统的机械除冰法主要有滑轮铲刮法、外力敲打法和电磁脉冲法等,随着技术的发展,机器人、无人机除冰作为新兴的除冰技术得到了广泛研究<sup>[8-11]</sup>。

3)热力融冰法:通过提高输电线路运行电流,利用导线自身电阻产生焦耳热,当热量达到冰层熔点时,覆冰融化脱落,从而达到除冰目的。

4)其他法:指仅在文献中提及,尚未在实际工程中大规模应用的除冰方式。

然而,鉴于输电线路覆冰具有随机性和复杂性的特点,目前尚无较为成熟和广泛应用的除冰手段。由于篇幅限制,后文主要对热力融冰法进行综述。

基于上述情况,本文在总结国内外已有研究成果的基础上,阐述了输电线路覆冰机理及特性,对现有覆冰预测模型的原理及其差异进行了全面评述,并对比分析了各热力融冰方法的能效特性与优缺点,结合目前存在的技术难点和问题,提出了未来的研究趋势。

## 1 线路覆冰机理分析

深入研究输电线路的覆冰及增长机理,可以全面了解其本质,扩展认知边界,并为后续覆冰预测模型的搭建及融冰策略的优化提供理论指导。在正确揭示覆冰机理的基础上,可进一步构建线路覆冰及增长模型,精准模拟覆冰积累及其动态演变过程。这不仅有助于量化覆冰灾害的影响,

还可为制定科学合理的融冰策略提供理论和技术支持。

### 1.1 导线覆冰内在机理

覆冰是一种受环境温度、空气湿度以及风速风向等因素影响的综合物理现象,同时覆冰过程还是热量传递与流体冲击运动相互作用的过程,此过程交叉多个影响因素,因此覆冰的非线性增长机理十分复杂<sup>[12]</sup>。现有研究主要基于热力学平衡机理与多相流气-液理论<sup>[13]</sup>,从积冰过程的冰棱形态、导线表面的电压电流特性及其产生的热效应和电场强度入手,研究导线覆冰增长过程。

从热力学平衡机理出发,覆冰是液态过冷却水滴撞击导线表面释放潜热固化的物理过程,与热量交换和传递密切相关。文献[14]通过推导线路覆冰表面的热平衡状态,计算出导线覆冰质量、冰层厚度和冰的密度,并定性分析了不同覆冰形态对覆冰表面热量的影响。针对积冰形态变化对覆冰增长过程的影响,文献[15]通过研究覆冰冰棱生长过程的热平衡关系,计算和推导与冰棱长度、冰棱直径相关的物理量,并用于冰棱覆冰生长物理过程的数值计算,得出其生长规律。在此基础上,文献[16]依据不同冰形特点,采用偏心椭圆方程建立了对冰形的自动化识别系统,定性分析了冰棱不同形状对积冰不同厚度的影响程度。雨淞覆冰通常是水滴与导线碰撞后在导线上冻结形成的,文献[17]研究发现,导线股数对碰撞效率的影响极小,建议碰撞效率模型采用所有可能线路方向的平均值。上述研究主要分析了覆冰本身形态对覆冰过程的影响,忽略了导线表面电压、电流等电气量对冰形生长的影响。针对这一问题,文献[18]建立了输电线路电磁-温度场二维有限元分析模型,确定耦合场的边界条件,求得了内部磁场分布情况以及高频激励融冰时间规律;文献[19]建立了基于坡印廷矢量的覆冰输电线路的能量传输模型,从场的角度对输电线路长距离空间的电磁场进行求解,但未考虑能流方向空间电磁场分布的畸变特性。

线路覆冰仿真以及数值建模方法逐渐呈现多因素融合趋势。部分研究引入结构参数,如文献[20]基于弧垂和温度测量建立了输电线路等值覆冰厚度计算模型,并提出了大高差非均匀覆冰线

路况下状态方程参数计算及覆冰厚度监测方法。另有研究则利用图像特征,如文献[21]提出了一种复杂背景中输电线路不均匀覆冰厚度测量方法,采用垂线逼近的方法获取覆冰输电线路图像的像素宽度,以提高输电线路覆冰厚度计算精度。然而,上述方法均未论证计算模型在特殊地形下的有效性,难以适用于处于复杂微地形中的电力线路的实际情况。

## 1.2 环境因素对覆冰机理的影响

覆冰输电线路多位于山顶、山脊等复杂地形,其覆冰灾害的微地形-微气象耦合机制已成为学术界和工程界的研究重点。国内外学者在微地形和微气象耦合作用下的覆冰过程建模方面取得了一定进展<sup>[22-23]</sup>。

在微地形分类体系构建方面,已形成了以高山分水岭型、垭口型、地形抬升型和峡谷风道型为主的4类典型覆冰微地形框架。文献[24]结合线路过谷、翻山及连续上下山等地形因素,提出了等效长度变化的直线塔输电线路等值覆冰厚度计算模型,提高了预测准确度。文献[25]基于数字高程模型提取地形特征线,结合覆冰灾害统计数据,量化了地形坡度、坡向、海拔突变率等关键参数,并通过计算流体动力学验证了不同微地形对风速加速效应的影响规律。文献[26]通过垭口模型风洞试验验证了峡谷风道型地形的涡流生成特性,其迎风面风速增幅超过常规设计标准的20%,导致覆冰厚度呈非线性增长。文献[27]结合数字高程模型与江西覆冰故障数据,提出垭口微地形识别指标,实现了走廊垭口地形的有效识别。

在微气象表征方面,文献[28]建立了4项基本环境参数与导线覆冰速率之间的映射关系模型。文献[29]考虑了温度、湿度、风速、风向等6个微气象影响因素,开展覆冰厚度短期预测,为相关研究提供了理论参考。但上述研究仅着眼于固定覆冰的气象条件,未考虑实时变化的微气象条件对导线覆冰的影响,因此仅对短期覆冰具有较好的刻画效果,难以适用于工程实际中冰冻微气象动态变化的复杂情况。为此,文献[30]基于覆冰机理和欧拉气液两相流模型,分析了时变气象参数(温度、风速、液态水含量等)与导线直径对覆

冰质量及形状的影响,提升了实时覆冰预测精度,但其忽略了微气象间的联合作用。文献[16]进一步提出考虑冰风联合作用的动张力风载放大系数,并分析了参数敏感性;文献[31]利用气温、风速、水汽等多个气象参数预测结冰厚度,通过数值建模获取气象参数并构建统计预测模型,提高了覆冰数据的利用率、分析效率与泛化能力;文献[32]扩展至9个微气象参数,统计分析了4种覆冰类型的微气象及地理分布特征,并基于连续3天的微气象数据实现了覆冰类型识别与预测,准确率达80%以上。

综上,上述研究较好地描述了线路覆冰的内在机理,并在一定程度上考虑了微地形或微气象对线路覆冰情况的影响。然而,在机理分析中多采用孤立研究或线性叠加的简单模式,未深入考虑多因素间的深度耦合与动态交互作用,从而丢失了多因素间的有机联系。因此,考虑输电线路所处复杂微地形和微气象的因果关系、重叠效应或传递关系,构建多致灾因子耦合作用下的线路覆冰精准数值模型,尚待开展深入研究。

## 2 线路覆冰预测模型

在输电线路覆冰灾害防治研究中,实时监测覆冰状态并评估其威胁对保障电网安全至关重要。近年来,学者们开展了复杂环境下线路覆冰预测模型研究,并取得了一系列成果<sup>[33]</sup>。

### 2.1 线路覆冰生长和厚度预测模型

在冰冻天气条件下,电力部门及时掌握输电线路覆冰增长、脱落情况,提前开展线路除冰决策分析,为融冰除冰预留足够的时间,可避免因覆冰过厚导致的电力故障。在研究线路覆冰增长的早期模型中,有Imai模型(以环境温度和气流速度为关键参数)<sup>[34]</sup>、Lenhard模型(基于降水与温度变化构建预测体系)<sup>[35]</sup>以及Makkonen模型(引入表面粗糙度与局部传热系数对结冰的影响机制)<sup>[36]</sup>。这些开创性研究为电力系统的安全运行提供了有力支撑,但受限于选择的覆冰影响要素有限,导致理论预测与实际观测存在偏差。对于输电线路覆冰预测模型,需要考虑更复杂的关联因素,对线路所处微地形、微气候以及本身的状态进行特征分析。

随着对覆冰生长预测模型研究的不断深入,学者们将覆冰形成机制细化为多物理场耦合过程。文献[37]分析了不同直径圆导体的水滴碰撞和冻结特性,推导了覆冰速率与风速、水滴直径的变化规律及预测方法。文献[38]通过CRCM5(加拿大区域气候模型第5版),发现加拿大地区输电线路设计冰载的潜在变化,能够为设计更具气候适应性的输电线路标准提供依据。文献[39]利用智能算法处理结冰数据,构建了输电线路覆冰预测模型,通过对覆冰定量预测,有助于进一步开展线路风险评估,提高防控措施的精准确定能力。但上述覆冰预测模型仍存在不足,未考虑微气候及线路电流的时变特性,且大部分模型未对覆冰预测精度进行评估。

在自然环境中,线路覆冰是一个动态过程,冰层增厚会改变导线形貌,进而影响后续的覆冰生长。对于覆冰厚度预测的研究,文献[40]基于扭矩平衡理论建立了考虑风力影响和绝缘子串不均匀加载的等效厚度预测模型,并提出了新的冰厚测量方法。文献[41]采用多变量灰色模型预测输电线路短期覆冰厚度,与传统增冰模型相比,预测效果更佳。但上述研究未充分考虑随时间变化的覆冰厚度增长程度与不同气象因素的对应关系。为此,文献[42]在已有预测模型的基础上,考虑了气象因素的时间累积效应,建立了气象因素下的覆冰厚度增长模型,并分析了覆冰厚度随时间增长的关系。但该方法仅以气象因素作为模型的输入,尚未考虑线路所处地形差异对覆冰厚度预测模型精度的影响。基于此,文献[24]针对特殊地形下的输电线路等值覆冰厚度计算模型进行改进,研究发现,同一线路在不同位置或覆冰阶段,其单位长度导线上覆冰的结构与形状亦存在差异。

尽管已有多种覆冰预测模型,但这些模型仍有改进空间。一些学者在研究导线覆冰过程和覆冰机理的基础上,进一步提出了导线覆冰冻结系数的计算理论和方法<sup>[43]</sup>。但随着输电线路覆冰灾害的日益严重,对预测精度的要求也越来越高。现有的覆冰预测模型大多没有将线路覆冰生长与融冰算法相结合,致使预测结果精度不高,进而导致热力融冰保护的介入时机不够准确,难以更

好地保障融冰的时效性。

## 2.2 线路覆冰分段预测模型

输电线路覆冰与线路所处地形条件密切相关,覆冰严重区段仅占线路全长的10%~20%<sup>[44]</sup>。传统全线融冰模式无法区分覆冰轻重区段,需配置超大容量系统,且易导致无冰区段过电流,造成资源浪费与导线损伤。分段预测可定量定位高风险微地形区域,为决策提供依据,既能保障电网安全,又能降低系统容量,避免电流过载。研究表明,线路覆冰引发的断线、杆塔倒塌等事故多由覆冰不均匀导致,且多数不均匀覆冰源于微地形<sup>[45]</sup>。输电线路多位于山区,受环境因子分布不均的影响,覆冰厚度沿档距分布不均且随海拔递增。文献[41]通过分析温湿度、风速对覆冰的影响规律,依据覆冰厚度对输电线路覆冰危害程度进行等级划分,并引入了覆冰分段预测。但这些预测方法在复杂环境下对覆冰区域的精细划分仍存在局限性,特别是在时变特性和多源数据融合建模方面存在不足。

为解决分段预测中的数据稀疏与质量问题,学者们对特征参数进行了优化。例如,文献[46]利用ERA-Interim(输电线路结冰数值预报系统)数据、仪表观测数据及历史结冰数据,构建了新的输电线路覆冰数据集,从而缓解了数据不足的难题。文献[47]通过结合Makkonen模型和Jones模型,研究了雨淞结冰的增长过程,并指导了覆冰阶段、时长和厚度的数据构建。然而,原始数据中噪声干扰和不确定性仍较大,可能会影响预测模型的准确性,需进一步优化以减少运算干扰。

深度学习模型的引入为高精度覆冰预测提供了新思路。文献[48]通过优化变分模态分解方法将真实覆冰线路信号与噪声分离,完成了覆冰信号的降噪预处理。文献[49]提出了EDUNet++模型,用于处理线路覆冰数据,有效提升了数据质量。CDMs(条件扩散模型)是一种新兴的深度学习模型,其在数据去噪和特征提取方面,凭借能够在限制条件下进行模型训练,在各个任务中展现出了优势。例如,文献[50]通过分数采样法优化网络参数以逼近真实分数函数,进而实现有效的数据降噪,为覆冰区段精准预测提供了新方法。然而,现有文献在结合具体物理情形实现覆冰数

据降噪方面,仍有待进一步研究。

近年来, Mamba神经网络凭借其高级位置编码机制以及SSM(状态空间模型)与HiPPO矩阵的结合,可以持续学习和记忆深层信息,在图像分析、时序预测领域展现出强大性能<sup>[51-53]</sup>。该方法能够有效捕捉线路历史环境与气象特征间的复杂依赖关系,并动态建模线路时变焦耳热对覆冰分布的影响,有望进一步提升预测分辨率与精度。文献[54]使用元启发式算法优化神经网络,以预测输电线结冰的ILR(冰水比),并确定了影响ILR的关键环境参数,但其数据集仅来自美国ASOS系统,具有一定的地域局限性。此外,针对电力系统的关联性和完整性,文献[55]通过开展不同风速、含水量、环境温度等影响因素下绝缘子与导线关联的覆冰试验,得出导线与绝缘子覆冰程度的等效性关系,可为输电线路绝缘子覆冰状态评估与冰灾预警系统的实现提供参考。

面对线路覆冰不均以及在外界环境影响下覆冰形状的差异性和随机性,大部分学者仅开展了基础的数据聚类分析和分段预测,未考虑邻近线路之间的相互影响,也未针对动态覆冰特性建立完整的数学模型,在捕捉复杂时空依赖关系方面仍显不足。现有研究大多集中在整段线路的覆冰预测上,而在进行分段覆冰预测分析时,现有的等值覆冰模型需根据微环境进行细化和修正。

### 3 线路热力融冰技术

热力融冰法作为一种主动式输电线路除冰技术,其核心机理是通过调控导线载流参数提升电流密度,利用焦耳热效应使导线表层温度超过冰层相变临界点,从而使覆冰融化并脱落。该技术凭借其可控性强、除冰效率高的特性,已成为电力系统高效除冰的主要方法<sup>[56]</sup>。根据电流调控模式和能量注入方式的不同,当前主流的热力融冰技术可分为3大类:交流短路融冰法(构建工频短路回路激发焦耳热)、直流融冰法(利用直流电源形成大电流热效应)以及高频激励融冰法(通过高频趋肤效应实现能量靶向释放)。这3种方法在能量转换效率、设备配置需求及适用场景方面存在显著的技术差异。

#### 3.1 交流融冰技术

交流短路电流融冰技术是一种基于电力系统固有特性的主动除冰方法,其技术原理是通过将输电线路的两相或三相进行短路连接,并施加工频交流电压,形成可控短路电流,利用导体焦耳效应产生的热能实现覆冰融化。该技术主要包括三相短路、两相短路和单相短路3种典型拓扑结构。其中,三相短路融冰可实现多相导线的同步热力平衡,显著降低因非同步脱冰引发的机械失衡事故<sup>[57]</sup>。与下文提到的直流融冰技术相比,交流短路电流融冰技术具有系统结构简单、附加设备投资成本低的显著优势。

利用交流电源融冰无需专用装置,还能借助站内设备,比如变电站的主变压器,便于把握融冰时机,节省时间。该方法在湖南、四川以及粤北等地区220 kV及以下输配电网中得到广泛应用<sup>[58-60]</sup>。然而,该技术的工程实施存在若干关键性制约因素。首先,融冰涉及电网多级调度协同、继电保护定值整定及网络拓扑重构等复杂流程,对运行人员技术水平和多部门协同效率要求高,导致操作耗时增加。其次,由于交流融冰需要建立持续短路回路,因此对系统电源容量要求较高,特别是在多分裂导线系统中,难以通过常规参数匹配获得理想的融冰电流。对于500 kV及以上电压等级的超高压输电线路,受系统短路容量限制及过电压风险制约,该技术的实际工程适用性极为有限<sup>[61]</sup>。

基于上述情况,国内外学者针对输电线路交流短路电流融冰开展了进一步研究。文献[62]提出一种交流融冰方式,直接将变电站交流电源加到覆冰线路上。这种方法虽可实现输电线路三相同步融冰,但需停运相关线路,操作复杂,且可控性差。为此,有学者针对不停运交流融冰技术开展了研究,文献[63-65]分别提出了负荷交流融冰方法和基于移相变压器的带负荷融冰方法。虽然这些方法解决了融冰时的线路停运问题,但前者会破坏系统的功率分布,不利于系统维持稳定,而后者需要在线路中增加移相变压器,会增加系统对无功的需求,对系统安全造成影响。为寻求一种不改变负荷电流的交流融冰方法,文献[64-65]提出了基于潮流控制器的融冰方法,将被融冰

段内几根子导线的潮流(电流)挪移到某一根或某几根上逐次进行融冰。尽管该方法不影响正常电力输送,但需要对融冰区段内的间隔棒进行大规模绝缘改造,并且交流电流集中到某一根子导线上时,易引发电网中电流的波动和谐波问题,影响电网的稳定性。这也是交流融冰存在的关键性问题。

### 3.2 直流融冰技术

与交流融冰技术相比,直流融冰技术所需的电网融冰电源容量小,无需考虑线路阻抗匹配和进行复杂的倒闸操作<sup>[67-68]</sup>。因此,为进一步分析输电线路融冰,学者们对直流电流融冰开展了深入研究。直流融冰技术可分为两大类。一类是增设额外融冰装置,如文献[69]所提及的固定式融冰装置,但由于体积大、造价高,为提高其经济性,通常设计成一体两用,即在融冰时提供所需电源,在非融冰时作为动态无功补偿装置。而另一类则是不增设融冰设备,仅适用于高压直流输电系统。文献[70]通过改变系统中换流站的运行方式来使线路电流达到融冰要求,但这种方式受限于不同高压直流输电线路的状况,并且会对原系统造成较大改变。文献[71]则是利用直流输电系统过载能力融冰。由于直流输电系统都有一定的过载能力,可在过载范围内增大线路电流以达到融冰要求,但这种方式易受直流线路过载能力和线路覆冰环境的限制,融冰能力有限。文献[72]通过多功能融冰设备实现三相同时脉冲直流融冰,可显著提高融冰效率、减少停电时间。

直流融冰技术依旧存在一些不足,主要体现在以下方面:

1)不可控整流型融冰装置存在输出电压调节离散化缺陷,而全控型整流装置虽可实现连续调压,但其控制系统复杂度显著提升,导致运行维护成本较高。此外,在调压过程中,功率器件的高频切换易引发谐波畸变率超标问题,同时伴随大量无功功率注入电网,导致系统电能质量恶化。

2)现有融冰技术需对线路实施停运操作方可执行融冰作业,在冬季负荷高峰期易加剧电网供需矛盾,显著降低重要输电通道的供电可靠性。

### 3.3 高频激励融冰技术

高频激励融冰技术是一种基于电介质损耗与

集肤效应协同作用的输电线路在线融冰方法<sup>[73]</sup>。其工作原理是通过向覆冰导线施加高频交流电源,利用冰层作为有损耗电介质,在导线表层形成双重热源机制:一方面,高频电流的集肤效应导致导线浅层电阻性发热;另一方面,交变电场引发冰介质分子反复极化,产生介电损耗热<sup>[74]</sup>。实验研究表明,当激励频率达到特定值时,上述两种热源在空间分布上呈现周期性叠加特征,从而在导线表面形成均匀分布的热场,有效克服了传统融冰方法热场不均匀的问题。

相较于常规交/直流融冰技术,高频激励融冰具有更高的热效率。这主要归功于集肤效应使能量集中作用于导线表层,同时介质极化损耗直接作用于冰层内部。此外,动态热场分布特性使融冰速率更快,尤其适用于不均匀覆冰工况。然而,该技术的工程应用仍受环境因素制约,风速增强会导致临界融冰电流呈指数关系上升,而环境温度降低会显著延长融冰时间<sup>[75]</sup>。尽管该技术具备移动灵活、能耗较低等优势,但高频EMI(电磁干扰)导致的信号畸变问题尚未完全解决。目前,该技术仍处于工程验证阶段,尚未实现规模化应用。

综上所述,学者们在输电线路热力融冰技术的研究中取得了突破性进展。然而,如何精细化调控融冰电流,以及如何在综合考虑多因素耦合作用的情况下,准确把握融冰电流大小与融冰时间之间的关系联系,尚待开展深入研究。

## 4 存在的技术难点和问题

国内外研究学者针对110~500 kV电网输变电设备防冰灾问题已提出了较好的解决办法<sup>[76-77]</sup>,但目前仍缺乏安全性好、操作简便且高效的融冰技术。研发低风险、易操作、高效率且低能耗的新型技术,依旧是未来输电线路防除冰工作的核心方向。随着新型电力系统建设进程的不断推进<sup>[78]</sup>,冰灾给电网造成的危害愈发严重,因此仍需在以下方面开展深入研究。

1)若对输电线路进行全线融冰,将面临诸多问题:所需融冰设备容量大、造价高、占地面积大,且无覆冰区段也会流过较大电流,从而加剧导线老化;此外,重覆冰区段的精准预测及分段融冰难度较大。因此,亟需扩展认知边界,揭示

线路覆冰机理, 预知临界融冰时间, 以增强电网抵御极端冰灾的能力。

2) 传统静态监测策略难以捕捉相变温度、液滴碰撞率等参数的瞬态突变特征, 易因模型误差导致过早融冰或延迟除冰。亟需优化覆冰预测模型与融冰算法的匹配, 以实现覆冰过程的实时检测。

3) 目前, 国内外大多数融冰及除冰技术在清除输电线路覆冰时, 都需以切断线路供电为前提。这不仅对缓解电网覆冰灾害的作用较为有限, 还会加剧冬季用电高峰时段的电力供应紧张问题。如何在确保覆冰输电线路正常供电的同时, 安全有效地完成融冰作业, 是今后研究需要重点攻克的方向。

4) 架空地线位于导线上方, 线径较小且无载流焦耳热效应, 因此其覆冰问题更为显著。目前, 输电线路地线多采用OPGW(光纤复合架空地线)。在融冰过程中, OPGW产生的焦耳热效应可能导致光纤温度迅速升高, 进而引发光纤涂层热老化失效及传输性能衰减, OPGW通流融冰问题亟需解决。电网防灾减灾全国重点实验室已将地线融冰作为重点攻关方向。

## 5 结语

本文系统综述了输电线路冰灾防御领域的覆冰机理、覆冰预测模型及热力融冰技术的国内外研究进展与核心成果: 覆冰机理研究已明确过冷却水滴冻结、积冰形态演化规律及微地形-微气象的调控作用, 但缺乏多致灾因子深度交互的定量模型; 覆冰预测方法虽提升了精度与区域针对性, 但仍存在物理机理与数据驱动融合不足、复杂地形泛化能力有限等问题; 热力融冰的交流短路、直流及高频激励三类技术各有优势, 却均面临“融冰效率-供电可靠性-设备成本”的三角矛盾, 不停电融冰的工程化应用受拓扑重构与谐波控制制约。

未来研究可聚焦四大方向: 一是构建多致灾因子耦合的热力-电磁-流场耦合数值模型, 实现覆冰演化精准仿真; 二是融合Mamba神经网络等先进方法, 提升重覆冰区段分段预测精度; 三是攻关不停电融冰与OPGW专用融冰技术, 解决核心技术难题; 四是结合源网荷储协同调度理念,

构建适配新型电力系统的融冰减灾体系。这些研究将完善冰灾防御理论与技术框架, 为新型电力系统安全稳定运行提供关键支撑, 兼具重要工程价值与学术意义。

## 参考文献

- [1] 陆佳政, 皮新宇, 朱思国, 等. 新型电力系统源网设备典型外部灾害防治挑战与展望[J]. 新型电力系统, 2024(1): 36-51.  
LU Jiazheng, PI Xinyu, ZHU Siguo, et al. Challenges and prospects in prevention and control of typical external disasters power generation and network equipments in the new type power systems[J]. New Type Power Systems, 2024(1): 36-51.
- [2] FARZANEH M. Atmospheric Icing of Power Networks[M]. Dordrecht: Springer Netherlands, 2008.
- [3] 国际电网网. 警惕极端天气成为电力“灰犀牛”[EB/OL]. (2023-06-09) [2025-05-19]. <https://power.in-en.com/html/power-2430651.shtml>.
- [4] 中国南方电网. 抗冰保电暖人心[EB/OL]. (2021-12-18) [2025-05-19]. [https://www.csg.cn/xwzx/2021/yxcz/202112/t20211228\\_324568.html](https://www.csg.cn/xwzx/2021/yxcz/202112/t20211228_324568.html).
- [5] 湖南省人民政府门户网站. 低温冰冻天气持续, 毛伟明紧急调度电力保供工作[EB/OL]. (2024-02-07) [2025-05-19]. [https://www.hunan.gov.cn/hnszf/hnyw/tt/202402/t20240207\\_32844057.html](https://www.hunan.gov.cn/hnszf/hnyw/tt/202402/t20240207_32844057.html).
- [6] REKUVIENE R, SAEIDIHARZAND S, MAŽEIKA L, et al. A review on passive and active anti-icing and de-icing technologies[J]. Applied Thermal Engineering, 2024, 250: 123474.
- [7] ZHANG Z J, ZHANG H, YUE S, et al. A review of icing and anti-icing technology for transmission lines[J]. Energies, 2023, 16(2): 601.
- [8] PAUL S, LEE D, KIM K, et al. Nonlinear modeling and performance testing of high-power electromagnetic energy harvesting system for self-powering transmission line vibration deicing robot[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2021, 151: 107369.
- [9] 王耀南, 魏书宁, 印峰, 等. 输电线路除冰机器人关键技术综述[J]. 机械工程学报, 2011, 47(23): 30-38.  
WANG Yaonan, WEI Shuning, YIN Feng, et al. Review on key technology of de-icing robot running on overhead transmission line[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(23): 30-38.
- [10] FAN W, ZHANG S H, ZHU W D, et al. An efficient dynamic formulation for the vibration analysis of a multi-span power transmission line excited by a moving deicing robot[J]. Applied Mathematical Modelling, 2022, 103: 619-635.

- [11] 张辉,杜瑞,钟杭,等. 电力设施多模态精细化机器人巡检关键技术及应用[J]. 自动化学报, 2025, 51(1): 20-42.  
ZHANG Hui, DU Rui, ZHONG Hang, et al. The key technology and application of multi-modal fine robot inspection for power facilities [J]. Acta Automatica Sinica, 2025, 51(1): 20-42.
- [12] 潘浩,周仿荣,马仪,等. 输电线路覆冰情势与气象要素关联模型研究[J]. 高压电器, 2023, 59(12): 75-82.  
PAN Hao, ZHOU Fangrong, MA Yi, et al. Association model for icing situation with meteorological factors for transmission line [J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(12): 75-82.
- [13] 陈吉,蒋兴良,陈成瑞,等. 基于多相流理论的导线覆冰碰撞特性研究[J]. 高压电器, 2020, 56(10): 176-182.  
CHEN Ji, JIANG Xingliang, CHEN Chengrui, et al. Research on the collision characteristics of icing conductor based on the theory of multi-phase flow [J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(10): 176-182.
- [14] 胡玉耀,刘宗源,李欣,等. 正极性直流电场对绝缘子雾凇覆冰的影响机理及覆冰试验验证[J]. 高电压技术, 2024, 50(2): 793-804.  
HU Yuyao, LIU Zongyuan, LI Xin, et al. Influence mechanism of positive DC electric field on rime ice accretion on the insulators and its experimental verification [J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(2): 793-804.
- [15] BAI X L, LV J S, CAI D C, et al. Comparative differences of physical mechanism model and data-driven model on overhead transmission line icing thickness prediction [C]// 2023 IEEE Sustainable Power and Energy Conference (iSPEC). November 28-30, 2023, Chongqing, China: IEEE, 2024: 1-6.
- [16] 楼文娟,张跃龙,徐海巍. 考虑冰风耦合作用的输电导线脱冰动张力及参数影响分析[J]. 高电压技术, 2022, 48(3): 1052-1059.  
LOU Wenjuan, ZHANG Yuelong, XU Haiwei. Dynamic tension following ice shedding and parameters' influence analysis of transmission conductor considering the coupling effect of ice and wind [J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(3): 1052-1059.
- [17] ZHANG J, MAKKONEN L, HE Q. A 2D numerical study on the effect of conductor shape on icing collision efficiency [J]. Cold Regions Science and Technology, 2017, 143: 52-58.
- [18] 黄亚飞,蒋兴良,任晓东,等. 采用涡流自热环防止输电线路冰雪灾害的方法研究[J]. 电工技术学报, 2021, 36(10): 2169-2177.  
HUANG Yafei, JIANG Xingliang, REN Xiaodong, et al. Study on preventing icing disasters of transmission lines by use of eddy self-heating ring [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(10): 2169-2177.
- [19] 何高辉,胡琴,喻建波,等. 导线雨淞覆冰及其直流电晕损失影响因素研究[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(24): 8610-8619.  
HE Gaohui, HU Qin, YU Jianbo, et al. Research on the influence factors of conductor glaze icing and corresponding DC corona loss [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(24): 8610-8619.
- [20] 胡建林,刘杰,蒋兴良,等. 基于弧垂测量的综合荷载下导线等值覆冰厚度监测方法[J]. 高电压技术, 2022, 48(2): 584-593.  
HU Jianlin, LIU Jie, JIANG Xingliang, et al. Monitoring method for equivalent icing thickness of conductor under complex load based on sag measurement [J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(2): 584-593.
- [21] 贺晓倩,吴先用,魏业文. 复杂背景中输电线路不均匀覆冰厚度测量方法[J]. 电力科学与技术学报, 2023, 38(3): 224-229.  
HE Xiaqian, WU Xianyong, WEI Yewen. Measurement method for thickness of uneven icing on transmission line in complex background [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023, 38(3): 224-229.
- [22] LEI Z F, HU Q, WU H T, et al. Method for monitoring the icing thickness of ground wire using sag measurement technology (iSPEC 2023) [C]// 2023 IEEE Sustainable Power and Energy Conference (iSPEC). November 28-30, 2023, Chongqing, China: IEEE, 2023: 1-6.
- [23] DING J Y, HU S L, LI J, et al. Study on the growth model of ice-covered conductors with eight-split under light icing of freezing fog [C]// 2023 IEEE Sustainable Power and Energy Conference (iSPEC). November 28-30, 2023, Chongqing, China: IEEE, 2024: 1-7.
- [24] 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.
- [25] 邓颖,蒋兴良,张志劲,等. 基于DEM分析的输电线路覆冰微地形分类识别及验证方法[J]. 高电压技术, 2024, 50(11): 4971-4980.  
DENG Ying, JIANG Xingliang, ZHANG Zhijin, et al. Icing micro-terrain identification and verification method of transmission line based on DEM analysis [J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(11): 4971-4980.
- [26] 姚剑锋,沈国辉,姚旦,等. 峡谷和垭口地形风场特征的CFD数值模拟[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2016, 48(12): 165-171.  
YAO Jianfeng, SHEN Guohui, YAO Dan, et al. CFD-

- Based numerical simulation of wind field characteristics on valley and col terrain [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2016, 48(12):165-171.
- [27] 胡京, 邓颖, 蒋兴良, 等. 输电线路覆冰垭口微地形的特征提取与识别方法[J]. *中国电力*, 2022, 55(8):135-142.  
HU Jing, DENG Ying, JIANG Xingliang, et al. Feature extraction and identification method of ice-covered saddle microtopography for transmission lines[J]. *Electric Power*, 2022, 55(8):135-142.
- [28] 韩兴波, 陈孜铭, 邢镛, 等. 采用基本环境参数的导线覆冰预测方法[J]. *重庆大学学报*, 2023, 46(11):69-77.  
HAN Xingbo, CHEN Ziming, XING Bin, et al. Prediction model of conductor icing based on basic environmental parameters [J]. *Journal of Chongqing University*, 2023, 46(11):69-77.
- [29] 高亭. 基于微气象的输电线路覆冰预测技术研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2019.  
GAO Ting. Research on prediction technology of transmission line icing based on micro-meteorology [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2019.
- [30] 王强, 楼文娟, 徐海巍, 等. 考虑时变气象参数的输电导线覆冰数值仿真[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2022, 54(11):11-21.  
WANG Qiang, LOU Wenjuan, XU Haiwei, et al. Numerical simulation of icing on transmission conductors considering time-varying meteorological parameters [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2022, 54(11):11-21.
- [31] HUAI X W, LI B, HUANG L W, et al. Forecast overhead transmission lines icing based on weighted regression of multiple meteorological factors [C]//2023 International Conference on Smart Electrical Grid and Renewable Energy (SEGRE). June 16-19, 2023, Changsha, China. IEEE, 2023:329-334.
- [32] 郝艳捧, 王信媛, 梁苇, 等. 连续3天覆冰微气象数据驱动的架空输电线路覆冰类型识别与预测[J]. *南方电网技术*, 2023, 17(6):107-116.  
HAO Yanpeng, WANG Xinyuan, LIANG Wei, et al. Ice types identification and prediction of overhead transmission lines driven by micro-meteorological data of three consecutive days icing [J]. *Southern Power System Technology*, 2023, 17(6):107-116.
- [33] 王传琦, 伍历文, 邓志斌, 等. 时间累积架空输电线路覆冰预测模型与算法综述[J]. *中国电力*, 2024, 57(6):153-164.  
WANG Chuanqi, WU Liwen, DENG Zhibin, et al. Review of icing prediction model and algorithm for overhead transmission lines considering time cumulative effects [J]. *Electric Power*, 2024, 57(6):153-164.
- [34] IMAI I. Studies on ice accretion [J]. *Researches on Snow and Ice*, 1953, 3(1):35-44.
- [35] LENHARD R W Jr. An indirect method for estimating the weight of glaze on wires [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1955, 36(1):1-5.
- [36] MAKKONEN L. Heat transfer and icing of a rough cylinder [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 1985, 10(2):105-116.
- [37] 韩兴波, 蒋兴良, 毕聪来, 等. 基于分散型旋转圆导体的覆冰参数预测[J]. *电工技术学报*, 2019, 34(5):1096-1105.  
HAN Xingbo, JIANG Xingliang, BI Conglai, et al. Prediction of icing environment parameters based on decentralized rotating conductors [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2019, 34(5):1096-1105.
- [38] JEONG D I, SUSHAMA L, VIEIRA M J F, et al. Projected changes to extreme ice loads for overhead transmission lines across Canada [J]. *Sustainable Cities and Society*, 2018, 39:639-649.
- [39] LI L X, LUO D, YAO W H. Analysis of transmission line icing prediction based on CNN and data mining technology [J]. *Soft Computing*, 2022, 26(16):7865-7870.
- [40] 蒋兴良, 常恒, 胡琴, 等. 输电线路综合荷载等值覆冰厚度预测与试验研究[J]. *中国电机工程学报*, 2013, 33(10):177-183  
JIANG Xingliang, CHANG Heng, HU Qin, et al. Prediction and experimental study on combined load equivalent ice thickness of overhead transmission line [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2013, 33(10):177-183.
- [41] 刘宏伟, 陆佳政, 赖旬阳, 等. 输电线路覆冰厚度短期多变量灰色预测模型研究[J]. *高电压技术*, 2015, 41(10):3372-3377.  
LIU Hongwei, LU Jiazheng, LAI Xunyang, et al. Short-term multi-variable grey model in predicting icing thickness on transmission lines [J]. *High Voltage Engineering*, 2015, 41(10):3372-3377.
- [42] 庄文兵, 祁创, 熊小伏, 等. 计及气象因素时间累积效应的输电线路覆冰预测[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(17):6-13.  
ZHUANG Wenbing, QI Chuang, XIONG Xiaofu, et al. Transmission line icing forecast considering the time cumulative effect of meteorological factors [J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(17):6-13.
- [43] 何青, 李军辉, 邓梦妍, 等. 架空输电导线覆冰冻结系数计算及其影响因素分析[J]. *电工技术学报*, 2019, 34(19):4162-4169.  
HE Qing, LI Junhui, DENG Mengyan, et al. Calculation and influencing factors of icing freezing coefficient of overhead transmission line [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2019, 34(19):4162-4169.
- [44] 刘国特, 郝艳捧, 阳林, 等. 基于改进 Messinger 覆冰模型导线防冰临界电流计算及其影响因素分析[J]. *电工技术学报*, 2016, 31(18):176-183.

- LIU Guote, HAO Yanpeng, YANG Lin, et al. Calculation and influencing factors analysis of conductor anti-icing critical current based on improved messenger icing model [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(18):176-183.
- [45] 马富齐,王波,董旭柱,等.面向输电线路覆冰厚度辨识的多感受野视觉边缘智能识别方法研究[J].电网技术,2021,45(6):2161-2169.  
MA Fuqi, WANG Bo, DONG Xuzhu, et al. Receptive field vision edge intelligent recognition for ice thickness identification of transmission line [J]. Power System Technology, 2021, 45(6):2161-2169.
- [46] LU J Z, LI L, XU X J, et al. An analysis of the reliability of a new dataset of transmission line icing thickness in Southern China [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2019, 58(2):413-426.
- [47] LUO J S, LIU D C, WU J, et al. A novel differentiation sectionalized strengthen planning method for transmission line based on support vector regression [J]. Neural Computing and Applications, 2019, 31(8):4319-4329.
- [48] 陶慧,贺国帅,杨金显,等.覆冰导线振动数据降噪及状态识别[J].传感技术学报,2023,36(12):1935-1942.  
TAO Hui, HE Guoshuai, YANG Jinxian, et al. Noise reduction and state identification of icing conductor vibration data [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2023, 36(12):1935-1942.
- [49] WANG B, MA F Q, GE L J, et al. Icing-EdgeNet: a pruning lightweight edge intelligent method of discriminative driving channel for ice thickness of transmission lines [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70:2501412.
- [50] SONG Y, ERMON S. Generative modeling by estimating gradients of the data distribution [J]. In Advances in Neural Information Processing Systems, 2019, 32:1-12.
- [51] AHAMED M A, CHENG Q. TimeMachine: A Time Series is Worth 4 Mambas for Long-term Forecasting [EB/OL] [2025-05-12]. <https://arxiv.org/pdf/2403.09898>.
- [52] MA H Y, CHEN Y S, ZHAO W L, et al. A mamba foundation model for time series forecasting [EB/OL] [2025-05-12]. <https://arxiv.org/abs/2411.02941>.
- [53] 管敏渊,姚瑛,吴圳宾,等.基于RBF神经网络的储能VSG控制策略优化[J].浙江电力,2024,43(3):55-64.  
GUAN Minyuan, YAO Ying, WU Zhenbin, et al. Optimization of energy storage VSG Control strategy based on RBF neural networks [J]. Zhejiang Electric Power, 2024, 43(3):55-64.
- [54] SNAIKI R, JAMALI A, RAHEM A, et al. A metaheuristic-optimization-based neural network for icing prediction on transmission lines [J]. Cold Regions Science and Technology, 2024, 224:104249.
- [55] 马晓红,穆青青,曾华荣,等.不同影响因素下的导线与绝缘子覆冰特性[J].高电压技术,2019,45(9):2904-2910.  
MA Xiaohong, MU Qingqing, ZENG Huarong, et al. Ice-covered characteristics of conductor and insulator under different influence factors [J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(9):2904-2910.
- [56] 沈锋,艾永俊,周朝荣,等.输电线路防冰及除冰技术研究现状[J].云南电力技术,2023,51(1):18-22.  
SHEN Feng, AI Yongjun, ZHOU Chaorong, et al. Research status of transmission line anti-icing and de-icing technology [J]. Yunnan Electric Power, 2023, 51(1):18-22.
- [57] 张璐,李晨语,蔡永翔,等.考虑潮流越限风险的柔性交流配电网融冰优化策略[J].电力系统自动化,2022,46(16):160-169.  
ZHANG Lu, LI Chenyu, CAI Yongxiang, et al. Optimal de-icing strategy for flexible AC distribution network considering risk of power flow over limit [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(16):160-169.
- [58] 陆佳政,李波,张红先,等.新型交直流融冰装置在湖南电网的应用[J].南方电网技术,2009,3(4):77-79.  
LU Jiazheng, LI Bo, ZHANG Hongxian, et al. Application of new-type AC and DC de-icers in Hunan power grid [J]. Southern Power System Technology, 2009, 3(4):77-79.
- [59] 曹军,邓元实.四川电网配电网交流融冰方法应用研究[J].四川电力技术,2017,40(4):59-60.  
CAO Jun, DENG Yuanshi. Application research on AC ice-melting method to distribution network in Sichuan power grid [J]. Sichuan Electric Power Technology, 2017, 40(4):59-60.
- [60] 杨芳,侯宇凝.交流融冰方法在粤北山区的应用研究[J].通信电源技术,2020,37(1):13-17.  
YANG Fang, HOU Yuning. Application research of AC ice melting method in mountainous area of northern Guangdong [J]. Telecom Power Technology, 2020, 37(1):13-17.
- [61] 李再华,白晓民,周子冠,等.电网覆冰防治方法和研究进展[J].电网技术,2008,32(4):7-13.  
LI Zaihua, BAI Xiaomin, ZHOU Ziguan, et al. Prevention and treatment methods of ice coating in power networks and its recent study [J]. Power System Technology, 2008, 32(4):7-13.
- [62] 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.
- [63] 焦震,杜鹏,汪晓,等.500 kV超高压输电线路负荷交流融冰研究[J].电力系统及其自动化学报,2021,33(2):97-101.  
JIAO Zhen, DU Peng, WANG Xiao, et al. Study on AC

- ice melting of 500 kV EHV transmission lines[J].Proceedings of the CSU-EPSA, 2021, 33(2):97-101.
- [64] YAN M Y, SHAHIDEHPUR M, PAASO A, et al. Distribution system resilience in ice storms by optimal routing of mobile devices on congested roads[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(2):1314-1328.
- [65] 杨旗, 班国邦, 谢百明, 等. 移相变压器应用于输电线路在线融冰方法与仿真研究[J]. 电网技术, 2021, 45(8):3349-3355.  
YANG Qi, BAN Guobang, XIE Baiming, et al. De-icing method and simulation of phase-shifting transformer for on-load transmission lines[J]. Power System Technology, 2021, 45(8):3349-3355.
- [66] 唐爱红, 杨熠, 杨惠源, 等. 基于非接触耦合式潮流控制器的不停电融冰装置拓扑及控制方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(22):8666-8674.  
TANG Aihong, YANG Yi, YANG Huiyuan, et al. Research on topology and control method of uninterrupted ice melting device based on non-contact coupling power flow controller [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(22):8666-8674.
- [67] 王勇, 苗虹, 莫思特, 等. 高压架空输电线路防冰、融冰、除冰技术研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(18):178-187.  
WANG Yong, MIAO Hong, MO Site, et al. Summary of research on anti-ice, ice melting and de-icing of high voltage overhead transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(18):178-187.
- [68] 张璐, 李新民, 李伟, 等. 特高压直流线路带电融冰系统研制及工程应用[J]. 高压电器, 2024, 60(3):214-222.  
ZHANG Lu, LI Xinmin, LI Wei, et al. Development and project application of live ice-melting system for UHVDC transmission lines [J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(3):214-222.
- [69] 杨红江, 周建庭, 吴生炎, 等. 风电送出线路固定式直流融冰方法研究[J]. 光源与照明, 2025(1):168-170.
- [70] 付广旭, 卢东斌, 张靖, 等. 特高压直流在线融冰技术及其工程应用[J]. 电气技术, 2024, 25(4):77-84.  
FU Guangxu, LU Dongbin, ZHANG Jing, et al. Online ice melting technology for ultra high voltage direct current system and its engineering application[J]. Electrical Engineering, 2024, 25(4):77-84.
- [71] 李红坤, 陈芳芳, 刘韦好, 等. 高压直流输电系统融冰能力的分析与研究[J]. 电工技术, 2019(5):13-14.  
LI Hongkun, CHEN Fangfang, LIU Weiyu, et al. Analysis and research of ice-melting capability of HVDC transmission system[J]. Electric Engineering, 2019(5):13-14.
- [72] LEVCHENKO I I, SATSUK E I, SHOVKOPLYAS S S. Intellectual ice melting system on wires of overhead transmission lines of distribution electric networks [C]// 2019 International Russian Automation Conference (Rus-AutoCon). September 8-14, 2019. Sochi, Russia: IEEE, 2019:1-7.
- [73] 彭志勇, 周羽生, 何洋, 等. 输电导线高频激励融冰的临界电流分析[J]. 高压电器, 2021, 57(5):108-114.  
PENG Zhiyong, ZHOU Yusheng, HE Yang, et al. Analysis of critical current for high-frequency excitation de-icing transmission line [J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(5):108-114.
- [74] 周羽生, 陈佩瑶, 高小刚, 等. 基于高频高压激励法的输电线路融冰方法研究[J]. 电瓷避雷器, 2011(6):1-4.  
ZHOU Yusheng, CHEN Peiyao, GAO Xiaogang, et al. Research on transmission line de-icing method based on high-frequency and high-voltage excitation [J]. Insulators and Surge Arresters, 2011(6):1-4.
- [75] 马晓红, 代洲, 周羽生, 等. 基于集肤效应和介质损耗的输电线路高频融冰研究[J]. 电瓷避雷器, 2019(2):175-180.  
MA Xiaohong, DAI Zhou, ZHOU Yusheng, et al. Research on transmission line high frequency de-icing based on skin effect and dielectric loss [J]. Insulators and Surge Arresters, 2019(2):175-180.
- [76] 陆佳政, 蒋兴良, 鲁先龙, 等. 电网大范围冰冻灾害预防与治理关键技术及成套装备[R]. [2025-05-19], 2013.
- [77] 王爽, 马天缘, 唐波, 等. 非均匀覆冰下输电导线的非均匀脱冰动力特性[J/OL]. 高压电器, 2024: 1-18 [2026-02-09]. <https://link.cnki.net/urlid/61.1127.TM.20241216.1512.002>.
- [78] 王爽, 马天缘, 唐波, 等. 非均匀覆冰下输电导线的非均匀脱冰动力特性[J/OL]. High Voltage Apparatus, 2024:1-18 [2026-02-09]. <https://link.cnki.net/urlid/61.1127.TM.20241216.1512.002>.
- [78] 江桂芬, 徐加银, 刘浩, 等. 考虑风机惯量支撑及有功备用的新能源电力系统优化调度模型[J]. 浙江电力, 2024, 43(5):53-62.  
JIANG Guifen, XU Jiayin, LIU Hao, et al. An optimal scheduling model for new energy power systems considering wind turbine inertia support and active power reserve [J]. Zhejiang Electric Power, 2024, 43(5):53-62.

收稿日期: 2025-06-08; 修回日期: 2025-08-28

作者简介:

赵 威(1986), 男, 工学硕士, 高级工程师, 主要从事电力工程勘测、设计、咨询业务方面的研究工作。

(本文编辑: 方明霞)