

整体还原论视角下的输电线路复合灾害故障率评估

——(一) 框架设计

薛禹胜^{1,2}, 常康^{2,1}, 郁琛¹, 薛峰¹

(1. 国网电力科学研究院有限公司(南瑞集团有限公司), 江苏省南京市 211106;

2. 哈尔滨工业大学电气工程及自动化学院, 黑龙江省哈尔滨市 150001)

摘要: 全球变暖趋势增加了复合灾害发生的可能性。复合灾害下输电线路故障率的准确评估是电网风险预警和应急决策的量化基础。按灾种独立事件累积故障率的方法,既不能反映灾害演化的时变性,又不能反映灾种间相互影响的耦合特征,在复合灾害场景下难以客观反映输电线路面临的故障风险。整体还原论(WRT)融合了整体论的全局观与还原论的机理观,是研究复杂性问题的新范式。文中从复合灾害的时变特征与耦合特征出发分析其复杂性根源,从灾种孤立分析和复合灾害分析的角度回顾了自然灾害下输电线路故障率评估技术现状及面临的问题,提出了基于WRT的灾害综合分析法的研究思路,建立了“离线按分类特征优化、在线按实际灾情执行”的评估框架,探讨了灾害综合分析法的若干关键技术。

关键词: 复合灾害; 故障率; 整体还原论; 输电线路; 自适应决策优化

0 引言

自20世纪50年代以来,人类活动增加了复合灾害事件的发生概率,高温-干旱-山火、台风-暴雨-洪涝、寒潮-大风-覆冰等复合灾害的危险不断增加^[1]。从单一灾害风险防范向复合灾害风险防范转变,已成为世界防灾减灾的总趋势^[2]。复合灾害再叠加上新型电力系统新能源和电力电子化装置占比高、频率/电压/惯量/备用等安全充裕支撑能力不足的特点,极易导致发输变电设备群发性故障,引发电力系统安全充裕风险。

2019年8月9日,英格兰和威尔士局部地区遭遇大风-暴雨-雷电强对流天气,因雷击线路跳闸,诱发分布式电源、霍恩海上风电场、小巴福德电站相继脱网,导致系统频率快速下降,引发大面积停电,约100万人受到影响^[3]。2021年2月,美国得州遭遇低温与冰雪风暴天气,大规模风电机组冻结脱网、输电系统低温停摆、火电厂瘫痪,引发该州历史上最为严重的电力危机,造成400万用户停电^[4]。2021年夏,受台风“烟花”、大陆高压、太平洋副热带高压共同影

响,加之特殊地形对偏东气流起到辐合抬升效应,导致河南省中北部出现历史罕见的暴雨及其次生灾害,仅郑州市因灾停电用户就达126万户。2023年12月13日,中央气象台同时发布暴雪、寒潮、冰冻黄色预警和大风蓝色预警^[5],寒潮-大风-覆冰灾害严重影响华北、华中电网,造成山西垣曲县停电3日^[6]。

2024年1月,美国普林斯顿大学学者指出:气候变化下复合极端天气(例如飓风-热浪、飓风-洪涝,甚至是连续飓风)的可能性会增加,将进一步挑战能源系统韧性;“极端天气-可再生能源”耦合影响将进一步加剧电力系统的气候危机^[7]。针对严重自然灾害、极端天气等复合灾害的非常规事件评估预警已然是新型电力系统安全防御^[8]与韧性提升^[9]的重要组成部分。

可见,复合灾害下输电线路故障率评估既是电力防灾减灾的基础问题,又是典型的复杂系统问题。将各灾种割裂分析的思路不能正确反映多灾种之间的交互放大,也可能重复计算风险。如何提升复杂灾害场景下输电线路故障率评估的自适应性,需要探索一种融合整体论的全局观与还原论的机理观的新研究范式。文献[10]提出能源领域的信息物理社会系统(cyber-physical-social system in energy, CPSSE),为跨领域的复杂性研究提供了优化理论框架。文献[11]提出系统模型与其仿真轨迹深度融

收稿日期: 2024-05-20; 修回日期: 2024-10-12。

上网日期: 2024-10-30。

江苏省自然科学基金资助项目(BK20232026); 国网电力科学研究院有限公司科技项目(极端自然灾害下融合电网安全信息与输变电设备状态的应急决策关键技术研究)。

合的整体还原论(whole reductionism thinking, WRT),在此基础上,文献[12]进一步将因果分析与人工智能技术融合,提出了由确定性模型的整体还原(WRT for determination, WRT4D)和基于语言模型的预训练(WRT for uncertainty, WRT4U)构成的两层架构,共同实现不确定性复杂系统的整体还原,这为复杂系统量化分析提供了风险型方法论。

为此,由两篇文章组成的系列论文,基于WRT视角将灾害源端和受端看作一个整体,并对其时间和空间信息进行剖析,确定了层级与粒度相协调的基元系统,设计了输电线路复合灾害故障率评估框架与算法,并以实际电网数据进行了验证。

作为系列论文的首篇,本文首先从复合灾害的非线性、扩散效应与时间累积效应分析其时变特征,从灾种耦合、时空耦合、致灾机理耦合3个方面分析复合灾害的耦合特征;其次,分别从灾种孤立分析和复合灾害分析的角度回顾自然灾害下输电线路故障率评估技术现状及面临的问题;然后,基于整体还原研究范式,从时间-空间-领域的综合视角对外部综合气象特征(致灾因子)、线路地理特征(孕灾环境)、线路本体特征(承灾体)进行分析,设计基于WRT的灾害综合分析法的研究思路;最后,提出“离线按分类特征优化、在线按实际灾情执行”的输电线路复合灾害故障率评估框架,并探讨相关关键技术。

1 复合灾害的复杂性分析

复合灾害的复杂性不仅体现在全球变暖趋势导致的灾害规模大、种类多,更体现在复合灾害演化过程中的时变特征与耦合特征。

1.1 复合灾害的全球化趋势

世界气象组织(WMO)发布的《2023年全球气候状况报告》^[13]正式确认2023年全球平均气温比工业化前升高 $(1.45 \pm 0.12)^\circ\text{C}$,是有记录以来最热的一年,突破了《巴黎协定》 1.5°C 的限制。更糟糕的是,预计2024年平均气温会更高^[14]。全球变暖趋势使得复合灾害呈现出种类多、地域广、频率高、风险大等特点^[15]。

澳大利亚2019年9月至2020年2月历时5个多月的高温-干旱-山火是典型的复合灾害事件。在厄尔尼诺、印度洋偶极子的共同作用下,澳大利亚出现持续高温、干旱、大风天气,为森林火灾的发生创造了“有利”的气象条件^[16],最终爆发澳大利亚近40年来最严重的全国性森林大火,过火面积超过1120万公顷,烧毁大约3000户房屋、烧死超过10亿只动物,部分电网遭受严重破坏,经济损失约44亿美元^[17]。火灾后又引发沙尘暴、冰雹、雷暴等次生灾

害,2020年2月的“及时雨”浇灭了24处大火,但山火烧毁了90%以上的植被,导致引发泥石流和滑坡的风险剧增。

1.2 复合灾害的时变特征

复合灾害演化过程具有明显的非线性。雷电、暴雨、覆冰、山火、大风(或台风)、污秽(或沙尘暴)等影响电网的主要自然灾害^[18]均属于气象灾害或者气象次生、衍生灾害范畴。而大气系统的非线性和混沌特性,使得基于数值积分模式的天气预报能力存在一定的极限,且具有初值敏感性。

复合灾害演化过程还具有扩散效应和累积效应。气象灾害引发输电线路故障的作用过程,表现出致灾因子影响范围随时间扩散,以及对承灾体影响程度随时间累积的现象。文献[19]采用移动(moving)、穿越(traversing)、扩散(spreading)、停滞(standstill)等不同的状态来描述气象灾害影响区域的变化类型。文献[20]在覆冰增长预测模型中计及时间累积效应,得到覆冰厚度的平方随时间近似线性增长的结论。文献[21]通过模拟蠕滑应力变形的过程,揭示了典型的滑坡断裂垮塌随时间变化的蠕变三阶段形变特征曲线:减速蠕变阶段、等速蠕变阶段、加速蠕变阶段,以此预测垮塌发生的时间。

1.3 复合灾害的耦合特征

复合灾害的耦合特征是灾种耦合、时空耦合、致灾机理耦合的总和。灾种耦合强调致灾因子间的相互作用,是复合灾害的起因;时空耦合侧重于致灾因子与孕灾环境间的相互作用,是复合灾害的演化过程;致灾机理耦合关注承灾体在复合灾害下致灾途径间的相互作用,是复合灾害演化的结果。灾害系统由致灾因子、孕灾环境和承灾体共同组成。因此,不同的耦合特征是一个整体,往往以组合的形式呈现。

灾种耦合与时空耦合需要在灾害演化过程中作为整体一起研究。由于灾害间的相互关联类型复杂多样^[22],国内外关于灾种耦合与时空耦合的研究方法也不尽相同。文献[23]基于特定地方内所有相关灾害的总和(all hazards at a place),提出多灾种概念。文献[24]将多灾种研究归纳为同时发生的多灾害(multi-hazard)以及灾害作用相互叠加的复合灾害(compound hazard)。文献[25]把多灾种现象划分为灾害链、灾害群和灾害遭遇。以灾害链为例,其又可被划分为因果链、同源链、互斥链、偶排链等^[26]。文献[27]进一步指出灾害链与灾害群之间往往交叉耦合,形成小概率高风险的复合灾害。文献[28]认为复合灾害是引发社会或环境风险的致

灾因子组合,存在时间复合(temporally compounding)、空间复合(spatially compounding)等多种类型。随着对复合灾害的概念内涵、类型特征的细化,复合灾害时空关联关系的复杂性愈发凸显^[29]。

致灾机理耦合需要结合承灾体特点,按领域进行具体研究。架空输电线路的孕灾环境包括输电走廊附近的地形、地貌、地质、坡度、植被、土壤、海拔等背景地理特征,承灾体由架空输电线路的基础、杆塔、导地线、绝缘子、金具、接地装置、附属设施、通道环境等8类部件的自体特征组成。雷电、暴雨、覆冰、山火、大风(或台风)、污秽(或沙尘暴)等独立致灾因子结合架空输电线路背景地理特征和本体特征的致灾机理和途径已有大量研究,其致灾途径大致可以分为电气类(如雷击、山火击穿)、机械类(如覆冰断线、倒塔)、绝缘类(如污闪、冰闪)等。输电线路故障往往是多致灾因子影响输电线路背景地理特征和本体特征,多个致灾途径同时作用导致的。以寒潮-大风-覆冰灾害为例,该复合灾害过程中的舞动、闪络、断线和倒塔等故障之间不但具有物理耦合关系,不同线路段还受到不同气象耦合程度的影响^[30]。

2 输电线路故障率评估技术现状分析

自然灾害下输电线路的故障率评估技术,按照考虑的灾种类型可以划分为灾种孤立分析法和复合灾害分析法;按照评估模型的可解释性可以划分为因果驱动、数据驱动以及两者融合的评估方法。

2.1 灾种孤立分析

2.1.1 基于因果驱动的评估方法

基于物理试验和数值仿真的方法探索了各灾种引发输电线路故障的机理。文献[31-32]分别在人工气候实验室和自然灾害试验场分析了覆冰厚度增加与电流和气象参数的变化规律。文献[33-34]建立了输电塔线体系结构三维模型,对线路段在均匀和不均匀覆冰荷载作用下的导地线张力进行计算。文献[35-36]采用先数值仿真后物理试验的方法,分别量化了不同垭口地形因子与线路最大应力比之间的关系。文献[37-38]以导线-板间隙击穿试验的方式分析了不同植被燃烧特征量对火焰条件下间隙击穿特性的影响机制。文献[39]以二维仿真模型与试验验证结合的方式研究了暴雨条件下空气间隙雨柱的断裂特性。文献[40]在野外科学观测研究站进行了不均匀积污绝缘子在预加交流电压后的雷电冲击闪络试验,并对其闪络特性进行分析。

在分析故障机理的基础上,综合气象、环境、地

形、地貌以及电力设备信息,分别在线推演雷电分区^[41]、覆冰厚度^[30]、台风暴雨演变趋势^[42]、山火蔓延行为^[43]、污秽预警等级^[44]等,实现了不同灾种下基于灾害演化时空推演的输电线路故障率在线评估。

2.1.2 基于数据驱动的评估方法

自然灾害导致输电线路故障的机理复杂,且其机理模型参数辨识与整定困难。因此,除了上述致灾机理模型研究,基于数据驱动的各类自然灾害下输电线路故障率评估也有大量研究。

文献[45]采用时间和环境相依的电网故障统计分析方法,按不同月份、天气条件、线路类型,计算电网故障率在历史同期的时间分布特征。文献[46]通过挖掘美国国家海洋和大气管理局(NOAA)飓风数据库(HURDAT)中记录的160年的风暴事件,建立了6类风暴下输电元件失效比例和年预期持续时间的参数化模型。结合实际电网的雷电定位数据^[47-48]、数字高程数据^[49]、山火广域监测数据^[50]、滑坡与降雨数据^[51]、绝缘子逐月等值盐密数据^[52]等,基于数理统计方法进行了故障相关性分析。文献[53-54]在对历史数据统计分析基础上构建了输电线路的脆弱性函数,并以此预测跳闸概率。

相比于数理统计方法,人工智能模型在数据驱动中更为常见。文献[55]构建了以风速、风向与线路夹角、湿度以及温度为输入特征量的反向传播(BP)神经网络舞动预警方法。文献[56]构建了山火事件样本库,并提出利用XGBoost技术的输电线路山火风险评估模型。文献[57]基于天气雷达对强对流的监测数据,采用支持向量机构建了强对流大风预测模型。文献[58]结合覆冰厚度观测数据较少的现状,采用灰色系统理论预测了输电线路的短期覆冰厚度。文献[59]基于机器学习建立了台风灾害下配电网杆塔受损空间分布预测模型。

2.1.3 因果驱动与数据驱动融合的评估方法

上述数据驱动方法都面临样本集合小、机理可解释性不足等问题。因此,因果驱动与数据驱动融合的故障率评估成为主要研究方向。文献[60]以架空输电线路覆冰灾害预测为例,对数据驱动与模型驱动效果进行对比分析。文献[61-62]结合风荷载受力模型以及数据挖掘技术,将台风灾害下输电线路失效预测分为基于模型驱动和基于数据驱动两个部分,通过数据驱动求取修正系数对模型驱动结果加以修正。因果驱动与数据驱动的融合在一定程度上实现了优势互补,在对自然灾害致灾机理和途径进行详细分析和建模的同时,进一步通过数据挖掘提炼相关规律或特征参数以提升机理模型及参数的适配性。

2.1.4 输电线路故障率评估预警系统

目前,电力部门建设了专业的雷电定位系统^[63]、山火/覆冰监测预警系统^[64-65],并大量装设了架空输电线路在线监测装置^[66],实时采集线路本体状态、气象环境、通道状态等信息。在此基础上,应用气象部门发布的气象要素实况和预警信息,通过多源数据融合^[67-68],具备了在自动化系统中综合应用自然灾害信息进行线路故障预警的基础。

自然灾害下输电线路故障率评估预警在电力系统风险评估、预防控制、应急指挥、韧性提升与恢复控制中均有应用。文献[69-70]指出有效应对极端外部环境引发的巨型停电灾难,需要将气象和地质等非电气信息引入防御系统,分析相应风险并及时预警。在此基础上,文献[71]提出将停电防御框架向自然灾害预警拓展,基于该框架研发的自适应自然环境的电网安全稳定协调防御系统于2011年在江西电网应用^[72]。进一步统筹故障率与控制代价,研发了基于风险的自然灾害预警与分级决策系统,并在湖南^[73]和云南^[74]电网应用。文献[75]在考虑自然灾害对电力设备停运影响的基础上,设计了预防与应急相结合的应急指挥系统架构。文献[76]提出了计及自然灾害对恢复路径影响的输配协同自适应恢复控制框架。中国南方电网有限责任公司提出城市保底电网规划^[77],并建设了弹性电力系统灾害防御及快速恢复智能调度平台来指导事前预防、事中响应、事后恢复^[78]。

上述方法研究及系统研发应用均属于灾种孤立分析,通过独立事件组合的方式实现多灾种情况下输电线路故障率时空分布计算。但灾种孤立分析法均基于灾种间线性、独立的假设,未充分考虑灾种耦合、时空耦合、致灾机理耦合的复杂特征,不符合灾害系统复杂性的基本特征^[79]。

2.2 复合灾害分析

2.2.1 基于因果驱动的复合灾害分析

基于恶劣天气类型划分的输电线路状态评估是复合灾害分析的一种简化思路。文献[80]采用多态模型来模拟天气情况,为基于马尔可夫链的故障推演提供了依据。文献[19]考虑恶劣天气事件的移动和穿越特性(moving and traversing nature of weather events)建立通用天气模型(generalized weather model)。在此基础上,文献[81]根据电压等级和气象特征、地理特征划分不同天气区域,并假设区域内所有线路段关联的天气要素相同,为评估不同天气条件的影响提供了一种简单有效的方法。

天气类型划分的做法无法体现灾种间的耦合关系,故有研究以量化灾种耦合或权重系数为手段探

索复合灾害评估方法。文献[30]以共因系数、截尾系数描述不同致灾要素的耦合关系,实现冰风灾害下不同致灾途径的综合故障率计算。文献[82]通过不同微气象要素之间的因果关系系数、重叠效应系数、传递程度系数来描述相互之间的耦合系数。文献[83]建立了多种自然灾害下输电线路风险评估体系,并采用改进层次分析法计算不同灾害的风险权重。文献[84]提出一种考虑多重自然灾害综合效应的输电线路风险可靠性评估方法,结合层次分析和熵加权方法,计算不同灾害的风险权重。文献[85]根据专家经验对气象因素的重要性进行两两比较以形成判断矩阵,根据模糊理论确定各因素的权重,实现多气象因素组合的输电线路故障风险预警。

2.2.2 基于数据驱动的复合灾害分析

目前,因果驱动的复合灾害分析方法中,或将天气类型划分为较为粗略的若干状态,但难以适应灾种耦合类型的多样性;或仅用线性的耦合系数或权重系数描述灾害相互关系,但不能适应多灾种演化的非线性和时变性。因此,数据挖掘和人工智能技术再一次被引入,使得复合灾害故障率评估整体上表现出考虑因素越来越全面的趋势。

文献[86]考虑原始数据的获取性,构建了基于多灾种的电网重要基础设施自然灾害脆弱性评价指标体系,实现电网脆弱性等级评价。文献[87-88]考虑大数据的关键因素筛选和参数估计,基于比例风险模型(proportional hazard model, PHM)提出多天气因素驱动的架空线路故障率评估方法。文献[89]以气象历史数据和电网运维检修数据为基础,基于大数据思维和深度学习的方法,根据电网故障与气象因素间的映射关系,预判给定的气象条件是否会导致电网灾害事故发生。文献[90]将带权重的气象、设备和环境因子作为深度稀疏自编码网络的输入,利用支持向量机构建多因素耦合的电网气象灾害故障预警模型。文献[91]融合故障树分析和贝叶斯网络,搭建了山火、雷电、大风、覆冰等多灾种场景的故障风险分析模型。

上述研究中,基于天气类型划分或数据驱动的复合灾害分析方法,虽然保留了复合灾害的整体性,但无法还原复合灾害的耦合特征,缺乏揭示故障机理的潜力;耦合或权重系数分析方法,看似量化了灾种间关系,实际上割裂了复合灾害的整体性,无法同时计及和量化所有耦合关系,失去了复合灾害分析的本质特征。目前,还缺少既能融合因果驱动与数据驱动的优势,又能融合整体论的全局观与还原论的机理观的复合灾害研究框架。

3 基于WRT的灾害综合分析思路

3.1 复合灾害的WRT视角

3.1.1 复杂系统的整体还原研究范式

整体论关注非线性系统中特有的涌现现象,但无具体量化方法;还原论强调基于机理的量化分析,但只能处理线性的保守系统。文献[11]提出的WRT将线性的局部还原提升为非线性的整体还原,是研究复杂系统涌现机制的新范式。

WRT首先针对具体问题定义整体系统的不同行为模式,并根据行为模式将待研究对象划分为可处理时变非线性的“可还原的基元系统”(下文简称“基元系统”)阵列,将复杂系统的受扰轨迹映射为一系列正交的2维相平面,同时在每步映射的始点重新线性化,最终在保持信息熵不变的前提下,将时间-空间-领域多视角的复杂系统转化为众多时变的基元系统组成的时空阵列,并通过对基元系统相变时序聚合来揭示整体机制。

若某个基元系统中的序参数使该基元系统超越该模式的阈值(或能量裕度),则出现涌现。若整体行为中存在涌现现象,则至少能在WRT的一个基元系统中发现涌现。若整体不存在涌现,则在WRT的任何一个基元系统的行为中都不可能发现涌现。若在WRT的多个基元系统中发现涌现现象,则其中最临界的基元系统反映了整体行为在所设定的参数摄动方向上,出现涌现的临界条件。可见,涌现的机理是WRT基元系统的行为模式裕度在序参数的影响下超过了阈值。

如何定义基元系统是WRT研究复杂系统的关键问题。基元系统既可以从待研究对象中分解出来,作为整体的基本单元进行单独研究,又能完整计及基元系统之间的相互影响;基元系统的行为模式既能表征研究对象的整体行为,又能支持对整体行为的机理解释。可见,根据所关注问题的层级不同,所选择基元系统的粒度也不同。

3.1.2 基于WRT分析复合灾害的必要性

选择不同的层级或者粒度看待问题,问题就呈现出不同的复杂度。输电线路复合灾害故障率评估的研究对象由两部分构成:一部分是自然灾害源端,即人不可掌控的外部自然环境,但人们可以不断改进对它的了解程度和预测精度;另一部分是自然灾害受端,即可人为控制的电力系统。自然灾害预测的时空分布在地形图上投影为灾害等强度线,架空输电线路组成的网架也映射到地形图上,两者的耦合信息在地形图上得到整体保留。地形图作为自然灾害源端与受端之间的桥梁,将两者融合为整体。

在此基础上,可以根据输电线路与不同灾害强度区域的耦合关系对其故障率等级进行量化,从而把气象灾害等级转化为输电线路故障率等级。

自然灾害源端是由复合灾害构成的一个整体。台风、冻雨、山火等不同灾种的致灾途径机理研究属于还原论范畴。但是,客观的外部自然环境只有一个,不同灾种影响电网的途径并不是孤立的,WRT从源头上把多灾种作为一个整体来研究,解决了灾种孤立分析结果如何综合的问题。

自然灾害受端可将输电线路作为一个整体处理。复合灾害下,输电线路的不同部件、不同线路档往往有不同的致灾机理和故障率等级。从输电线路整体的层级去看,一条输电线路是由许多经过不同灾害区域的耐张段组成,且一定灾害强度下灾害影响不会扩张到其他耐张段。这就可以把具有相同灾害特征的耐张段集合作为基本单元去研究,解决了如何综合不同线路档间故障率结果的问题。

基于WRT对灾害源端、受端的时间和空间信息进行层层剖析,将输电线路复合灾害故障率评估拆分为不同层级和粒度,并提供其中一种可能的评估方案。对于暂时还没有考虑到的影响因素,未来可以基于WRT对复合灾害评估框架进行扩展。

3.2 复合灾害分析的基元系统

3.2.1 层级与粒度相协调的基元系统选择

输电线路可以根据关注问题的粒度不同而划分为部件、线路档、耐张段、线路区段等不同的层级,如图1所示。相邻两基杆塔之间的线路部分称为线路档,每一线路档由杆塔、导地线、绝缘子等8类部件构成。两个耐张塔之间的若干线路档组成的线路部分称为耐张段,耐张段具有隔离倒塔断线等机械故障的作用。线路区段是具有某种共同特征的线路档集合,往往由若干相邻的耐张段组成。

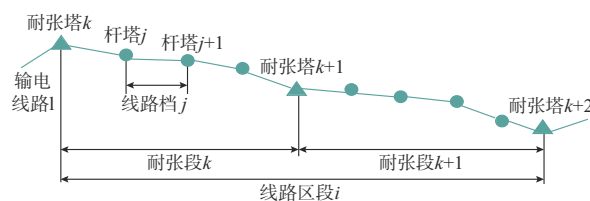


图1 灾害综合分析的基元系统模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of metasegment model for comprehensive disaster analysis

自然灾害下输电线路的故障模式由其灾害特征和背景特征共同决定,大致可以分为电气击穿(如雷击、山火击穿)、机械损坏(如覆冰断线、倒塔)、绝缘破坏(如污闪、冰闪)等3类^[92]。电气击穿与绝缘破坏的故障模式可逐线路档分析,机械损坏的故障模

式则需按耐张段分析。复合灾害下,如果选择线路档作为基元系统,则既不易计及线路档之间机械损坏的相互影响,又无法考虑不同线路档复合灾害间的耦合作用,不满足基元系统整体性的要求;如果选择整条线路作为基元系统进行整体分析,则虽然解决了整体性的问题,但不能根据输电线路不同受灾区段的特点解析故障机理,不满足基元系统还原性的要求。

文献[71]指出如果在评估每种自然灾害下电网设备故障率时,能正确计及所有相关的气象因素及物理连接关系,则在整合复合灾害作用下线路故障率时,可将各种灾害类型、故障线路段之间视为相互独立事件,这为探索 WRT 视角下复合灾害分析的基元系统选择提供了依据。文献[93-96]的研究结论表明,自然灾害下输电线路的故障模式表现出线路区段聚合特征。按照具有某一特征的线路区段进行差异化的整体设计和运维,已成为目前工程上的通用做法^[97-98]。因此,具有相同或相近灾害特征和背景特征的相邻耐张段集合组成的线路区段,在复合灾害下往往表现出相同的故障模式,可以选作复合灾害分析的基元系统。

3.2.2 复合灾害分析的基元系统时空阵列

如果输电线路 l 的耐张段 k 和相邻耐张段 $k+1$ 的灾害特征和背景特征相同或相近,则可将其合并为一个线路区段 i (见图1),作为复合灾害分析的基元系统(下文简称“线路段”)。线路段的属性特征向量包括时变的复合灾害态势特征,以及非时变的线路段背景特征。任一时刻 t 线路段 i 的特征模型 $M_{i,t}$ 如式(1)所示,所有线路段的特征模型时间序列构成复合灾害分析的基元系统时空阵列,由集合 $\{M_{i,t}\}$ 表示。

$$M_{i,t} = [M_{i,t}^d, M_i^b] \quad (1)$$

式中: $M_{i,t}^d$ 为 t 时刻线路段 i 的复合灾害态势特征向量,且 $M_{i,t}^d = [D_{\alpha,i,t}, D_{\beta,i,t}, D_{\gamma,i,t}]$, 其中, $D_{\alpha,i,t}$ 、 $D_{\beta,i,t}$ 、 $D_{\gamma,i,t}$ 分别为 t 时刻线路段 i 的复合灾害类型、复合灾害严重度和复合灾害趋势向量; M_i^b 为线路段 i 的背景特征向量(在研究时窗内可忽略其时变性),且 $M_i^b = [B_{\theta,i}, B_{\mu,i}, B_{\omega,i}]$, 其中, $B_{\theta,i}$ 、 $B_{\mu,i}$ 、 $B_{\omega,i}$ 分别为线路段 i 的地理特征、本体特征和通道特征向量。

各特征向量的具体取值既可以逐线路档分析,又可以根据监测数据获取情况按照地理网格统一分析。

3.3 灾害综合分析的新思路

将复合灾害下输电线路的致灾过程看作一个整体,从时间-空间-领域的综合视角对外部综合气象特征(致灾因子)、线路地理特征(孕灾环境)、线路本

体特征(承灾体)进行综合分析,形成输电线路故障率评估的灾害综合分析思路:

1)从空间维度看,若任一输电线路预测出现故障,则必定存在某一线路段(即基元系统)预测出现故障,用来分析复合灾害导致输电线路故障的机理。

2)从领域维度看,分析不同时间、不同线路段所处的复合灾害类型,并结合背景特征选用与复合灾害特征更加适配的故障率评估模型,经仿真获得所有线路段的故障率曲线,进而按照一定规则聚合得到复合灾害下输电线路故障率时间序列。

3)从时间维度看,提取复合灾害下输电线路故障率时间序列的状态值和趋势值特征,结合预警门槛值对故障率时间序列的检出率和虚警率进行综合评价,通过不断的证实和证伪提升不同模型的适应性。

4 基于 WRT 的灾害综合分析法

4.1 基于灾害综合分析的输电线路故障率评估框架

不同的复合灾害态势与不同的线路段划分组合,往往有不同的致灾特性,可以结合历史数据不断优化相应的评估模型和参数,在线评估时可以根据时效窗口内复合灾害特征实现自适应的决策优化。基于灾害综合分析的输电线路故障率评估框架如图2所示。该框架采用“离线按分类特征优化、在线按实际灾情执行”的方法^[99]:离线阶段,对外部气象数据进行特征提取和粗粒化(coarse-grained),基于符号化编码划分不同复合灾害态势,结合输电线路背景特征建立故障率评估模型并优化参数;在线阶段,辨识时效窗口内的复合灾害态势,结合输电线路背景特征进行线路段自适应划分,调用各线路段相应的评估模型,整合得到输电线路故障率。

可见,灾害综合分析法通过线路段自适应划分,将复合灾害故障率评估的复杂系统问题转化为基元系统时空阵列,实现待研究问题从整体到局部的解耦;通过离线阶段的粗粒化特征提取与复合灾害态势划分,应对复合灾害耦合特征;在线获取灾害演化时变特征,并针对不同时段、不同线路段调用优选模型进行评估以获取完整故障率时间序列,应对复合灾害时变特征,最终实现输电线路复合灾害故障率评估的整体还原。

4.2 灾害综合分析法的关键技术

4.2.1 复合灾害态势粗粒化编码

直接用复合灾害的监测或预测值描述复合灾害状态,不仅会面临维数灾的问题,而且难以区分不同复合灾害状态的本质区别。时间序列中的大尺度特

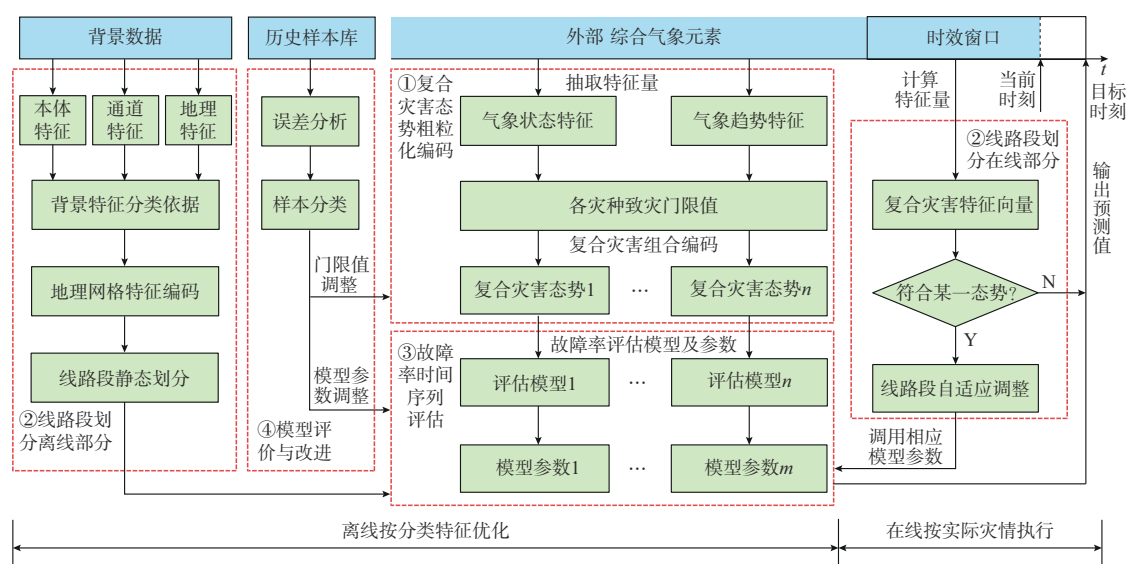


图2 基于灾害综合分析的输电线路故障率评估框架

Fig. 2 Evaluation framework of failure rate for transmission lines based on comprehensive disaster analysis

征往往携带被监测对象运行时的关键信息^[100]。对原始数据进行粗粒化处理,去除无关紧要的非本质特征,留下表达系统关键特征的信息,建立实数时间序列的符号时间序列模型;进一步,通过符号时间序列分析(symbolic time series analysis, STSA)方法,将数据空间划分为少量的离散元^[101]。这种粗粒化编码过程既不会丢失WRT中全局观要求的系统本质特征,又有利于揭示WRT中机理观要求的关键致灾模式。因此,需要通过复合灾害态势粗粒化编码,对输电线路所处的综合外部环境进行分类。

4.2.2 线路段粒度自适应划分

由于时效窗口内复合灾害态势具有时变性,其对应的线路段基元系统也具有时变性。不同线路段的背景特征与不同的复合灾害态势具有不同的致灾影响程度,故其对应线路段基元系统的空间粒度也是时变的。同时,输电线路的大跨越区、多雷区、重冰区、重污区、微地形、微气象等特殊区段在巡视、运行时均有特殊要求^[97]。可见,线路的在线分段等效模型能够更加准确、合理地反映气象和地理状态对线路故障率的影响^[93,102]。因此,需要根据输电线路所处的背景特征、灾害特征的不同时变特性,实现线路段粒度自适应划分,提升故障率评估模型的匹配度。

4.2.3 故障率时间序列评估

尽管复合灾害下输电线路故障机理十分复杂,但在确定的某一复合灾害态势下,任一基元系统都存在较为适配的故障率评估模型。该模型可以是独立事件模型^[27]、耦合系数模型^[30]、比例风险模型^[87]、人工智能模型^[89]中的任意一种,同时灾害综合分析

框架不排斥任何其他更优的选择。通过对不同模型(包括机理模型和数据驱动模型)的兼容,能够在缺少历史数据的初期阶段,一定程度上提升评估结果的可信性。图2所示的灾害综合分析框架,通过在线调用与实际灾情特征相适应(即误差较小)的模型评估线路段故障率,并按一定规则(基元系统间近似满足独立事件规则)进行线路段故障率聚合,来纾解复合灾害的时空复杂度。各类复合灾害的模型确定后,可以结合历史数据和线路背景特征参数对模型参数进行拟合。

4.2.4 模型评价与改进

WRT通过模型仿真对故障率时间序列不断证实或证伪的迭代来提高模型的准确性。不同类型的误差对电力系统运行风险的影响往往不同^[103]。输电线路故障率评估未发出告警而实际跳闸(漏警)产生的“负”误差,易因预防控制不足而产生失负荷风险;输电线路故障率评估发出告警而实际未跳闸(虚警)产生的“正”误差,易因预防控制过度而产生额外的控制代价。因此,需要对复合灾害下输电线路故障率评估模型的“正”“负”误差指标进行区别对待,并根据误差分析对样本进行分类标注,进而可基于监督学习对致灾门限值、模型参数和预警阈值进行同步整定和改进。

5 结语

本文结合复合灾害的时变、耦合等复杂特征,针对灾种孤立分析和复合灾害分析现状及面临的问题,同时融合因果驱动与数据驱动,建立了“离线按分类特征优化、在线按实际灾情执行”的输电线路复

合灾害故障率评估框架。从复合灾害态势粗粒化编码、线路段粒度自适应划分、故障率时间序列评估、模型评价与改进4个方面提出了基于WRT的灾害综合分析法。本文提出的灾害综合分析框架,既适用于确定性模型的整体还原,也适用于基于语言模型预训练的风险分析。

WRT融合了整体论的全局观与还原论的机理观,是研究复杂性问题新范式。本文以气象灾害对输电线路故障率影响为例,建立了基于WRT的灾害综合分析框架,这是对WRT综合应用的一次尝试。虽然灾害类型、设备类型没有穷尽,但是灾害综合分析框架本身对所有灾害类型以及设备缺陷类型均有兼容性。未来可在故障率评估的基础上,进一步探索WRT在复合灾害下电网运行风险评估、应急决策等方面的应用。

参考文献

- [1] 余荣, 翟盘茂. 关于复合型极端事件的新认识和启示[J]. 大气科学学报, 2021, 44(5): 645-649.
YU Rong, ZHAI Panmao. Advances in scientific understanding on compound extreme events [J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2021, 44(5): 645-649.
- [2] 史培军. 灾害系统复杂性与综合防灾减灾[J]. 中国减灾, 2014(21): 20-21.
SHI Peijun. Complexity of disaster systems and comprehensive disaster prevention and reduction [J]. Disaster Reduction in China, 2014(21): 20-21.
- [3] 孙华东, 许涛, 郭强, 等. 英国“8·9”大停电事故分析及对中国电网的启示[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(21): 6183-6192.
SUN Huadong, XU Tao, GUO Qiang, et al. Analysis on blackout in Great Britain power grid on August 9th, 2019 and its enlightenment to power grid in China [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(21): 6183-6192.
- [4] 钟海旺, 张广伦, 程通, 等. 美国得州2021年极寒天气停电事故分析及启示[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(6): 1-9.
ZHONG Haiwang, ZHANG Guanglun, CHENG Tong, et al. Analysis and enlightenment of extremely cold weather power outage in Texas, U.S. in 2021 [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(6): 1-9.
- [5] 中央气象台暴雪寒潮冰冻大风四预警齐发[EB/OL]. [2024-03-20]. <https://news.cctv.com/2023/12/13/ARTIQXSvrRqY5Zi2BF8qtCBz231213.shtml>.
The Central Meteorological Observatory has issued four warnings for blizzards, cold waves, freezing winds, and strong winds [EB/OL]. [2024-03-20]. <https://news.cctv.com/2023/12/13/ARTIQXSvrRqY5Zi2BF8qtCBz231213.shtml>.
- [6] 接力抢修保用电[EB/OL]. [2024-03-20]. <https://news.cctv.com/2023/12/18/ARTIXeFBUlyU5jZ0AiK7fHkB231218.shtml>.
Relay repair to ensure electricity supply [EB/OL]. [2024-03-20]. <https://news.cctv.com/2023/12/18/ARTIXeFBUlyU5jZ0AiK7fHkB231218.shtml>.
- [7] XU L, FENG K R, LIN N, et al. Resilience of renewable power systems under climate risks [J]. Nature Reviews Electrical Engineering, 2024, 1: 53-66.
- [8] 王国春, 许洪强, 冯长有, 等. 新一代在线安全分析技术架构及未来展望[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(24): 110-120.
WANG Guochun, XU Hongqiang, FENG Changyou, et al. Technical architecture and future prospect for new generation of online security analysis [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(24): 110-120.
- [9] BIE Z H, LIN Y L, LI G F, et al. Battling the extreme: a study on the power system resilience [J]. Proceedings of the IEEE, 2017, 105(7): 1253-1266.
- [10] XUE Y S, YU X H. Beyond smart grid—cyber-physical-social system in energy future [J]. Proceedings of the IEEE, 2017, 105(12): 2290-2292.
- [11] 薛禹胜. 涌现机制的研究框架——系统模型与其仿真轨迹深度融合的整体还原论[C]//第八届紫金论电学术研讨会, 2023年8月11日, 中国南京.
XUE Yusheng. A research framework for mechanisms of emergence phenomena—whole reductionism thinking (WRT) based on integrating models with trajectories [C]// The 8th Purple Mountain Forum, August 11, 2023, Nanjing, China.
- [12] 薛禹胜. 整体还原思维与语言模型技术在复杂性研究中的携手[C]//第15届中国智能电网学术研讨会, 2024年4月27日, 中国上海.
XUE Yusheng. Combination of whole reductionism thinking and language modeling techniques in complexity research [C]// The 15th China Smart Grid Academic Symposium, April 27, 2024, Shanghai, China.
- [13] WMO. State of the global climate 2023 [R/OL]. [2024-03-20]. <https://wmo.int/publication-series/state-of-global-climate-2023>.
- [14] WMO. WMO confirms that 2023 smashes global temperature record [EB/OL]. [2024-03-20]. <https://wmo.int/news/media-centre/wmo-confirms-2023-smashes-global-temperature-record>.
- [15] IPCC. Climate change 2023: contribution of Working Groups I, II and III to the sixth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [EB/OL]. [2024-03-20]. <http://10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>.
- [16] 白夜, 武英达, 贾宜松, 等. 2019—2020年澳大利亚气候异常与山火爆发的关系分析及应对策略[J]. 中国应急救援, 2020(2): 23-27.
BAI Ye, WU Yingda, JIA Yisong, et al. Link between climate anomaly and Australia bushfires in 2019—2020 [J]. China Emergency Rescue, 2020(2): 23-27.
- [17] ZHANG W J, MAO W, JIANG F, et al. Tropical Indo-Pacific compounding thermal conditions drive the 2019 Australian extreme drought [J]. Geophysical Research Letters, 2021, 48(2): e90323.
- [18] 王昊昊, 罗建裕, 徐泰山, 等. 中国电网自然灾害防御技术现状调查与分析[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(23): 5-10.
WANG Haohao, LUO Jianyu, XU Taishan, et al. Questionnaire survey and analysis of natural disaster defense techniques of power grids in China [J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(23): 5-10.
- [19] BHUIYAN M R. Inclusion of weather effects in composite

- system reliability evaluation using sequential simulation[J]. IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, 1994, 141(6): 575.
- [20] 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.
- [21] 李梦华. 基于车载雷达遥感的大梯度滑坡形变监测与失稳致灾时间预测[D]. 武汉: 武汉大学, 2019.
LI Menghua. Measuring large-gradient landslide displacements and predicting the time-of-failure with spaceborne SAR remote sensing[D]. Wuhan: Wuhan University, 2019.
- [22] CATTO J L, DOWDY A. Understanding compound hazards from a weather system perspective [J]. Weather and Climate Extremes, 2021, 32: 100313.
- [23] KENNETH H, IAN B. The hazardousness of a place: a regional ecology of damaging events[M]. Toronto, Canada: Toronto Press, 1971.
- [24] TILLOY A, MALAMUD B D, WINTER H, et al. A review of quantification methodologies for multi-hazard interrelationships [J]. Earth Science Reviews, 2019, 196: 102881.
- [25] 史培军, 吕丽莉, 汪明, 等. 灾害系统: 灾害群、灾害链、灾害遭遇[J]. 自然灾害学报, 2014, 23(6): 1-12.
SHI Peijun, LV Lili, WANG Ming, et al. Disaster system: disaster cluster, disaster chain and disaster compound [J]. Journal of Natural Disasters, 2014, 23(6): 1-12.
- [26] 郭增建, 秦保燕. 灾害物理学简论[J]. 灾害学, 1987, 2(2): 25-33.
GUO Zengjian, QIN Baoyan. Brief discussion on disaster physics[J]. Journal of Catastrophology, 1987, 2(2): 25-33.
- [27] 薛禹胜, 吴勇军, 谢云云, 等. 复合自然灾害下的电力系统稳定性分析[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(4): 10-18.
XUE Yusheng, WU Yongjun, XIE Yunyun, et al. Power system stability analysis for intercurrent natural disasters [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(4): 10-18.
- [28] ZSCHEISCHLER J, MARTIUS O, WESTRA S, et al. A topology of compound weather and climate events [J]. Nature Reviews Earth & Environment, 2020, 1: 333-347.
- [29] 方建, 陶凯, 牟莎, 等. 复合极端事件及其危险性评估研究进展[J]. 地理科学进展, 2023, 42(3): 587-601.
FANG Jian, TAO Kai, MU Sha, et al. Progress of research on compound extreme event and hazard assessment [J]. Progress in Geography, 2023, 42(3): 587-601.
- [30] 谢云云, 薛禹胜, 文福拴, 等. 冰灾对输电线故障率影响的时空评估[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(18): 32-41.
XIE Yunyun, XUE Yusheng, WEN Fushuan, et al. Space-time evaluation for impact of ice disaster on transmission line fault probability [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(18): 32-41.
- [31] 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.
- [32] 陆佳政, 胡建平, 方针, 等. 雪峰山脉小沙江自然灾害试验场覆冰与融冰试验[J]. 高电压技术, 2014, 40(2): 388-394.
LU Jiazheng, HU Jianping, FANG Zhen, et al. Icing accretion and ice-melting test at Xiaoshajiang natural disasters test site in Xuefeng Mountain [J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(2): 388-394.
- [33] 陆佳政, 刘纯, 陈红冬, 等. 500 kV 输电塔线覆冰有限元计算[J]. 高电压技术, 2007, 33(10): 167-169.
LU Jiazheng, LIU Chun, CHEN Hongdong, et al. Finite element calculation of 500 kV iced power transmission system [J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(10): 167-169.
- [34] 韩军科, 杨靖波, 杨风利, 等. 电网冰灾典型线路段覆冰倒塔分析[J]. 电网与清洁能源, 2010, 26(3): 31-35.
HAN Junke, YANG Jingbo, YANG Fengli, et al. Analysis on tower collapsing for ice coating on typical transmission line in power grid ice disaster area [J]. Power System and Clean Energy, 2010, 26(3): 31-35.
- [35] 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]. 中国电机工程学报, 2024, 44(6): 2462-2475.
JIANG Xingliang, WU Jianguo, DENG Ying, et al. Research on uneven icing of lines in adjacent towers under pass micro-topography [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(6): 2462-2475.
- [36] 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.
- [37] 黎鹏, 黄道春, 阮江军, 等. 全火焰条件下植被燃烧特征量对导线-板间隙击穿特性的影响[J]. 电网技术, 2016, 40(10): 3250-3257.
LI Peng, HUANG Daochun, RUAN Jiangjun, et al. Influence of vegetation combustion features on breakdown characteristics of conductor-plane gap under full flame condition [J]. Power System Technology, 2016, 40(10): 3250-3257.
- [38] 黄道春, 卢威, 姚涛, 等. 植被火条件下导线-板短空气间隙泄漏电流特性研究[J]. 电工技术学报, 2019, 34(16): 3487-3493.
HUANG Daochun, LU Wei, YAO Tao, et al. Study on leakage current characteristics of conductor-plane short air gap under vegetation fire condition [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(16): 3487-3493.
- [39] 董冰冰, 宋家乐, 李特, 等. 强暴雨条件下棒-板间隙雨柱断裂特征仿真与试验研究[J]. 电工技术学报, 2023, 38(22): 6230-6240.
DONG Bingbing, SONG Jiale, LI Te, et al. Simulation and experimental study of break-up characteristics of water streams in rod-plate air gap under heavy rain conditions [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(22): 6230-6240.
- [40] 蒋兴良, 王茂政, 袁一钧, 等. 不均匀积污绝缘子雷电冲击闪络特性[J]. 电工技术学报, 2023, 38(23): 6461-6470.

- JIANG Xingliang, WANG Maozheng, YUAN Yijun, et al. Lightning impulse flashover performance of non-uniform pollution insulators [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(23): 6461-6470.
- [41] 谢云云, 薛禹胜, 王昊昊, 等. 电网雷击故障概率的时空在线预警[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(17): 44-51.
XIE Yunyun, XUE Yusheng, WANG Haohao, et al. Space-time early-warning of power grid fault probability by lightning [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(17): 44-51.
- [42] 吴勇军, 薛禹胜, 谢云云, 等. 台风及暴雨对电网故障率的时空影响[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(2): 20-29.
WU Yongjun, XUE Yusheng, XIE Yunyun, et al. Space-time impact of typhoon and rainstorm on power grid fault probability [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(2): 20-29.
- [43] 吴勇军, 薛禹胜, 陆佳政, 等. 山火灾害对电网故障率的时空影响[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(3): 14-20.
WU Yongjun, XUE Yusheng, LU Jiazheng, et al. Space-time impact of forest fire on power grid fault probability [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(3): 14-20.
- [44] LIU Q L, XUE Y S, XIE Y Y. Probability assessment of power system accident caused by pollution flashover[C]// 2nd IET Renewable Power Generation Conference (RPG 2013), September 9-11, 2013, Beijing, China: 1-5.
- [45] 王建, 姚江宁, 刘泽青, 等. 恶劣天气下配电网故障统计分析及其概率分布拟合[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(17): 143-153.
WANG Jian, YAO Jiangning, LIU Zeqing, et al. Fault statistical analysis and probability distribution fitting for a power distribution network in adverse weather conditions [J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(17): 143-153.
- [46] LI G F, ZHANG P, LUH P B, et al. Risk analysis for distribution systems in the northeast U. S. under wind storms [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(2): 889-898.
- [47] 王学良, 成勤, 谷山强, 等. 基于LLS的多回击闪电回击时间和回击间距的统计特征[J]. 高电压技术, 2020, 46(11): 3914-3924.
WANG Xueliang, CHENG Qin, GU Shanqiang, et al. Statistical characteristics for return stroke time and distance of multi-return stroke about cloud-to-ground lightning based on LLS[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(11): 3914-3924.
- [48] 赵芝, 石季英, 袁启海, 等. 输电线路的雷击跳闸概率预测计算新方法[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(3): 51-58.
ZHAO Zhi, SHI Jiying, YUAN Qihai, et al. A new prediction calculation method of transmission lines lightning trip probability [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(3): 51-58.
- [49] 吴建蓉, 文屹, 张敬黎, 等. 基于GIS的易覆冰微地形分类提取算法与三维应用[J]. 高电压技术, 2023, 49(增刊1): 1-5.
WU Jianrong, WEN Yi, ZHANG Qili, et al. GIS based algorithm for classifying and extracting easily icing micro-terrain and its 3D application [J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(S1): 1-5.
- [50] 周特军, 陆佳政, 吴传平, 等. 湖南电网山火告警风险及故障时
间间隔分布规律[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(10): 135-142.
ZHOU Tejun, LU Jiazheng, WU Chuanning, et al. Distribution characteristics of wildfire warning risk and fault interval for Hunan power grid [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(10): 135-142.
- [51] 刘书豪. 降雨条件下的输电线路滑坡风险评估与预警技术研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2021.
LIU Shuhao. Research on risk assessment and early warning of landslides triggered by rainfall along electrical power transmission line [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2021.
- [52] 蒋子丹, 蒋兴良, 蒋晏如, 等. 湖南地区输电线路悬式绝缘子自然积污规律[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2018, 49(7): 1683-1690.
JIANG Zidan, JIANG Xingliang, JIANG Yanru, et al. Natural contamination characteristics of suspension insulator in Hunan Province [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2018, 49(7): 1683-1690.
- [53] PANTELI M, PICKERING C, WILKINSON S, et al. Power system resilience to extreme weather: fragility modeling, probabilistic impact assessment, and adaptation measures [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(5): 3747-3757.
- [54] BAO J, WANG X, ZHENG Y H, et al. Resilience-oriented transmission line fragility modeling and real-time risk assessment of thunderstorms [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(4): 2363-2373.
- [55] 廖峥, 熊小伏, 李新, 等. 基于BP神经网络的输电线路舞动预警方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(19): 154-161.
LIAO Zheng, XIONG Xiaofu, LI Xin, et al. An early warning method of transmission line galloping based on BP neural network [J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(19): 154-161.
- [56] 罗昊, 杨琪, 王炜宇, 等. 基于XGBoost的输电线路火灾风险等级评估方法[J]. 电力科学与技术学报, 2023, 38(6): 132-141.
LUO Hao, YANG Qi, WANG Weiyu, et al. XGBoost-based assessment method for fire risk levels of transmission lines [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023, 38(6): 132-141.
- [57] 熊小伏, 王伟, 王建, 等. 基于天气雷达数据的强对流天气下输电线路风偏放电预警方法[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(4): 36-43.
XIONG Xiaofu, WANG Wei, WANG Jian, et al. Early warning method for wind swing discharging of transmission lines under severe convective weather based on weather radar data [J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(4): 36-43.
- [58] 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.
- [59] 侯慧, 俞菊芳, 谢宇风, 等. 数据驱动的台风灾害下配网10 kV杆塔受损空间分布预测[J]. 电网技术, 2021, 45(9): 3681-3689.
HOU Hui, YU Jufang, XIE Yufeng, et al. Data-driven

- prediction of spatial distribution of damage to 10 kV towers in distribution network under typhoon disaster[J]. Power System Technology, 2021, 45(9): 3681-3689.
- [60] 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: 1-6.
- [61] 马丽叶,王海锋,卢志刚,等.计及相关性影响的增强台风灾害下配电网韧性灵活性资源规划[J].电力系统自动化,2022,46(7):60-68.
MA Liye, WANG Haifeng, LU Zhigang, et al. Flexible resource planning for improving distribution network resilience under typhoon disasters considering relevance impact [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(7): 60-68.
- [62] 侯慧,耿浩,黄勇,等.基于多因素修正的台风灾害下输电线路失效预测方法[J].电力系统自动化,2019,43(23):193-201.
HOU Hui, GENG Hao, HUANG Yong, et al. Multi-factor correction based failure prediction method of transmission line with typhoon disaster [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(23): 193-201.
- [63] 陈家宏,张勤,冯万兴,等.中国电网雷电定位系统与雷电监测网[J].高电压技术,2008,34(3):425-431.
CHEN Jiahong, ZHANG Qin, FENG Wanxing, et al. Lightning location system and lightning detection network of China power grid[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(3): 425-431.
- [64] 陆佳政,吴传平,杨莉,等.输电线路山火监测预警系统的研究及应用[J].电力系统保护与控制,2014,42(16):89-95.
LU Jiazheng, WU Chuanping, YANG Li, et al. Research and application of forest fire monitor and early-warning system for transmission line [J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(16): 89-95.
- [65] 陆佳政.电网覆冰灾害及防治技术[M].北京:中国电力出版社,2016.
LU Jiazheng. Power grid icing disaster and prevention technology[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2016.
- [66] 国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.架空输电线路在线监测装置通用技术规范:GB/T 35697—2017[S].北京:中国标准出版社,2017.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. General technical specification for on-line monitoring device on overhead transmission lines: GB/T 35697—2017[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.
- [67] 王逸飞,张行,何迪,等.基于大数据平台的电网防灾调度系统功能设计与系统架构[J].电网技术,2016,40(10):3213-3219.
WANG Yifei, ZHANG Hang, HE Di, et al. Function design and system architecture of disaster prevention and dispatch system in power system based on big data platform [J]. Power System Technology, 2016, 40(10): 3213-3219.
- [68] 陈彬,倪明,周霞,等.极端灾害下基于时空网格的配电网多源数据融合方法[J].中国电力,2019,52(11):77-84.
CHEN Bin, NI Ming, ZHOU Xia, et al. Multi-source data fusion method for distribution network based on spatiotemporal grid under extreme disasters [J]. Electric Power, 2019, 52(11): 77-84.
- [69] 薛禹胜,费圣英,卜凡强.极端外部灾害中的停电防御系统构思:(一)新的挑战与反思[J].电力系统自动化,2008,32(9):1-6.
XUE Yusheng, FEI Shengying, BU Fanqiang. Upgrading the blackout defense scheme against extreme disasters: Part I new challenges and reflection [J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(9): 1-6.
- [70] 薛禹胜,费圣英,卜凡强.极端外部灾害中的停电防御系统构思:(二)任务与展望[J].电力系统自动化,2008,32(10):1-5.
XUE Yusheng, FEI Shengying, BU Fanqiang. Upgrading the blackout defense scheme against extreme disasters: Part II tasks and prospects [J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(10): 1-5.
- [71] 薛禹胜,吴勇军,谢云云,等.停电防御框架向自然灾害预警的拓展[J].电力系统自动化,2013,37(16):18-26.
XUE Yusheng, WU Yongjun, XIE Yunyun, et al. Extension of blackout defense scheme to natural disasters early-warning [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(16): 18-26.
- [72] 王昊,徐泰山,李碧君,等.自适应自然环境的电网安全稳定协调防御系统的应用设计[J].电力系统自动化,2014,38(9):143-151.
WANG Haohao, XU Taishan, LI Bijun, et al. Design of coordinated prevention system in self-adapting natural environment for safety and stability of power grid [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(9): 143-151.
- [73] 崔建磊,文云峰,郭创新,等.面向调度运行的电网安全风险管控系统:(二)风险指标体系、评估方法与应用策略[J].电力系统自动化,2013,37(10):92-97.
CUI Jianlei, WEN Yunfeng, GUO Chuangxin, et al. Design of a security risk management system for power system dispatching and operation: Part two risk index, assessment methodologies and application strategies [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(10): 92-97.
- [74] CHANG K, YU C, LIU S F, et al. Design and application of power grid security risk assessment and hierarchical control system in natural disasters [C]// 2021 International Conference on Power System Technology (PowerCon), December 8-9, 2021, Haikou, China: 2080-2086.
- [75] 吴文传,张伯明,曹福成,等.电网应急指挥技术支持系统设计与关键技术[J].电力系统自动化,2008,32(15):1-6.
WU Wenchuan, ZHANG Boming, CAO Fucheng, et al. Electric power networks emergency management support system and its key technologies [J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(15): 1-6.
- [76] LI Z, XUE Y S, WANG H H, et al. Decision support system for adaptive restoration control of transmission system [J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2021, 9(4): 870-885.
- [77] 程鑫,樊扬,龚贤夫,等.城市抗冰保底电网防灾综合评价指标体系研究[J].电网技术,2019,43(10):3808-3815.
CHENG Xin, FAN Yang, GONG Xianfu, et al. Study on comprehensive evaluation index system for disaster prevention of urban ice-resistant secure power grid [J]. Power System

- Technology, 2019, 43(10): 3808-3815.
- [78] 陈玥, 李力, 孙少华, 等. 弹性电力系统灾害防御及快速恢复智能调度平台设计与实现[J]. 智慧电力, 2023, 51(8): 38-45.
CHEN Yue, LI Li, SUN Shaohua, et al. Design and implementation of intelligent dispatching platform for disaster prevention and rapid recovery in resilient power system [J]. Smart Power, 2023, 51(8): 38-45.
- [79] SELVA J. Long-term multi-risk assessment: statistical treatment of interaction among risks [J]. Natural Hazards, 2013, 67(2): 701-722.
- [80] Terms for reporting and analyzing outages of electrical transmission and distribution facilities and interruption to customer service: IEEE Standard 346—1973[S]. 1973.
- [81] PANTELI M, MANCARELLA P. Influence of extreme weather and climate change on the resilience of power systems: impacts and possible mitigation strategies [J]. Electric Power Systems Research, 2015, 127: 259-270.
- [82] 欧阳森, 陈义森, 杨墨缘, 等. 输电线路微气象跳闸预警及成因量化分析[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2022, 50(2): 102-110.
OUYANG Sen, CHEN Yisen, YANG Moyuan, et al. Microclimate-based tripping warning of transmission line and quantitative analysis of causes [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2022, 50(2): 102-110.
- [83] 宋耐超, 王瑞琦, 李明明, 等. 多自然灾害下的架空输电线路运行风险评估[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(19): 65-71.
SONG Naichao, WANG Ruiqi, LI Mingming, et al. Risk assessment of overhead transmission lines under multiple natural disasters [J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(19): 65-71.
- [84] FAN R Q, ZENG W H, MING Z Q, et al. Risk reliability assessment of transmission lines under multiple natural disasters in modern power systems [J]. Energies, 2023, 16(18): 6548.
- [85] 熊小伏, 王尉军, 于洋, 等. 多气象因素组合的输电线路风险分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2011, 23(6): 11-15.
XIONG Xiaofu, WANG Weijun, YU Yang, et al. Risk analysis method for transmission line combining of various meteorological factors [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2011, 23(6): 11-15.
- [86] 门永生, 朱朝阳, 于振, 等. 电网重要基础设施自然灾害脆弱性评价研究[J]. 灾害学, 2014, 29(4): 16-19.
MEN Yongsheng, ZHU Chaoyang, YU Zhen, et al. Natural disaster vulnerability assessment of important grid infrastructure [J]. Journal of Catastrophology, 2014, 29(4): 16-19.
- [87] 何迪, 章禹, 郭创新, 等. 一种面向风险评估的输电线路故障概率模型[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(7): 69-76.
HE Di, ZHANG Yu, GUO Chuangxin, et al. Failure probability model of transmission lines for risk assessment [J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(7): 69-76.
- [88] 杨才明, 项中明, 谢栋, 等. 多因素驱动架空线路故障率模型[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(12): 9-15.
YANG Caiming, XIANG Zhongming, XIE Dong, et al. Multi-drive overhead-line failure rate model [J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(12): 9-15.
- [89] 丛伟, 胡亮亮, 孙世军, 等. 基于改进深度降噪自编码网络的电网气象防灾方法[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(2): 42-49.
CONG Wei, HU Liangliang, SUN Shijun, et al. Meteorological disaster prevention method for power grid based on improved stacked denoising auto-encoder network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(2): 42-49.
- [90] 胡谅平, 丛伟, 徐安馨, 等. 基于深度稀疏自编码网络和场景分类器的电网气象故障预警方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(20): 68-78.
HU Liangping, CONG Wei, XU Anxin, et al. Early warning method for a power grid fault caused by meteorology based on a deep sparse auto-encoder network and scene classifier [J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(20): 68-78.
- [91] BIAN H F, ZHANG J, LI R X, et al. Risk analysis of tripping accidents of power grid caused by typical natural hazards based on FTA-BN model [J]. Natural Hazards, 2021, 106(3): 1771-1795.
- [92] 国家电网公司. 输变电一次设备缺陷分类标准: Q/GDW1906—2013[S]. 2014.
State Grid Corporation of China. Classification standard for defects of primary power transmission and transformation equipment: Q/GDW1906—2013[S]. 2014.
- [93] 邓红雷, 李述文, 戴栋. 基于层次化、差异化的架空输电线路雷击风险评估[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(4): 69-75.
DENG Honglei, LI Shuwen, DAI Dong. Lightning risk assessment of overhead transmission line based on hierarchical and differentiation [J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(4): 69-75.
- [94] 刘鑫蕊, 李欣, 孙秋野, 等. 考虑冰灾环境的配电网态势感知和薄弱环节辨识方法[J]. 电网技术, 2019, 43(7): 2243-2252.
LIU Xinrui, LI Xin, SUN Qiuye, et al. A new method for situation awareness and weakness identification of distribution network considering ice disaster [J]. Power System Technology, 2019, 43(7): 2243-2252.
- [95] 陆佳政, 周特军, 吴传平, 等. 输电线路差异化防火技术与策略[J]. 高电压技术, 2017, 43(8): 2524-2532.
LU Jiazheng, ZHOU Tejun, WU Chuanping, et al. Differentiation technology and strategy of wildfire protection for transmission lines [J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(8): 2524-2532.
- [96] 王建, 熊小伏, 梁允, 等. 地理气象相关的输电线路风险差异评价方法及指标[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(5): 1252-1259.
WANG Jian, XIONG Xiaofu, LIANG Yun, et al. Geographical and meteorological factor related transmission line risk difference assessment: method and indexes [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(5): 1252-1259.
- [97] 国家能源局. 架空输电线路运行规程: DL/T 741—2010[S]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
National Energy Administration. Operating code for overhead transmission line: DL/T 741—2010 [S]. Beijing: China Electric Power Press, 2010.
- [98] 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.
- [99] 郁琛,薛禹胜,文福拴,等.按时序特征优化模型后在线选配的超短期风电预测[J].电力系统自动化,2015,39(8):5-11.
YU Chen, XUE Yusheng, WEN Fushuan, et al. An ultra-short-term wind power prediction method using “offline classification and optimization, online model matching” based on time series features [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(8): 5-11.
- [100] 张雨,任国峰,王爱国.基于符号序列 Shannon 熵提取机器的运行特征[J].中国机械工程,2006,17(15):1595-1599.
ZHANG Yu, REN Guofeng, WANG Aiguo. Operational feature extraction of machine based on Shannon entropy of symbolic series [J]. China Mechanical Engineering, 2006, 17(15): 1595-1599.
- [101] 陈宁,薛禹胜,丁杰,等.风速时间序列的符号化描述[J].电力系统自动化,2017,41(11):33-38.
CHEN Ning, XUE Yusheng, DING Jie, et al. Symbolizing for wind speed time series [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(11): 33-38.
- [102] 段杰,王秀丽,侯雨伸.基于模糊专家系统的输电线路分段冰风荷载等效停运率模型[J].电工技术学报,2016,31(8):220-228.
- DUAN Jie, WANG Xiuli, HOU Yushen. Piecewise equivalent model of ice disaster impact on outage rate of transmission lines using fuzzy expert system [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(8): 220-228.
- [103] 郁琛,薛禹胜,文福拴,等.风电功率预测误差的风险评估[J].电力系统自动化,2015,39(7):52-58.
YU Chen, XUE Yusheng, WEN Fushuan, et al. Risk assessment of wind power prediction errors [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(7): 52-58.

薛禹胜(1941—),男,通信作者,中国工程院院士,博士生导师,主要研究方向:电力系统自动化。E-mail: xueyusheng@sgepri.sgcc.com.cn

常康(1983—),男,博士研究生,正高级工程师,主要研究方向:电力系统外部灾害防御、新能源发电并网控制。E-mail: changkang@sgepri.sgcc.com.cn

郁琛(1985—),男,博士,高级工程师,主要研究方向:电力系统外部灾害防御、新能源发电预测。E-mail: yuchen@sgepri.sgcc.com.cn

(编辑 章黎)

Evaluation of Compound-disaster Failure Rate for Transmission Lines from Perspective of Whole Reductionism Thinking —Part One Framework Design

XUE Yusheng^{1,2}, CHANG Kang^{2,1}, YU Chen¹, XUE Feng¹

(1. State Grid Electric Power Research Institute (NARI Group Corporation), Nanjing 211106, China;
2. School of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: The global warming trend has increased the occurring probability of compound disasters. Accurate evaluation of the failure rate for transmission lines under compound disasters is the quantitative basis for the power grid risk warning and emergency decision-making. The method of cumulative failure rate based on independent events of disaster types cannot reflect the time-varying nature of disaster evolution or the coupling characteristics of mutual influence between disaster types. It is difficult to objectively reflect the fault risk faced by transmission lines in the compound disaster scenarios. Whole reductionism thinking (WRT) integrates the global view of holism with the mechanistic view of reductionism, and it is a new paradigm for studying complexity problems. The complexity root of compound disasters is analyzed from the perspective of time-varying and coupling characteristics. From the perspective of disaster-type independent analysis and compound-disaster analysis, the current status and problems faced by evaluation technologies of the failure rate for transmission lines under natural disasters are reviewed. A research approach for the WRT-based comprehensive disaster analysis method is then proposed, and an evaluation framework of “offline optimization based on classification features, and online execution based on actual disaster situations” is established. Several key technologies of comprehensive disaster analysis method are finally discussed.

This work is supported by Jiangsu Provincial Natural Science Foundation of China (No. BK20232026) and the Science and Technology Project of State Grid Electric Power Research Institute (Research on Key Technologies for Emergency Decision Making Integrating Power Grid Security and Electrical Equipment Status Under Extreme Natural Disasters).

Key words: compound disaster; failure rate; whole reductionism thinking (WRT); transmission line; adaptive decision optimization

