

整体还原论视角下的输电线路复合灾害故障率评估

——(二)算法及应用

常康^{1,2}, 薛禹胜^{2,1}, 郁琛², 薛峰²

(1. 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;

2. 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)

摘要: 针对灾种孤立分析难以适应电网复杂外部环境时变性与耦合性的问题,系列论文的首篇建立了基于整体还原论(WRT)的灾害综合分析框架。作为续篇,文中提出了一种基于灾害综合分析的输电线路故障率在线评估算法。首先,根据气象灾害态势时间序列的粗粒化特征,对复合灾害状态和趋势进行分类编码。其次,通过划分复合灾害区、复合地理特征区、复合灾害与地理特征重叠区,提出线路段粒度自适应划分方法。然后,根据“离线按分类特征优化、在线按实际灾情执行”的机制,评估每类复合灾害态势下每个线路段的故障率,再将复合灾害的致灾过程看作一个整体,聚合线路段故障率得到每条线路的故障率时间序列。最后,以中国某省实际电网运行数据为例,验证了所提方法的有效性。

关键词: 复合灾害; 故障率; 整体还原论; 输电线路; 在线评估; 自适应决策优化

0 引言

国际能源署(IEA)报告指出,气候变化、自然灾害是影响电网安全性、弹性和可持续性的重要因素,电网可能成为清洁能源转型的瓶颈^[1]。美国能源局(DOE)发起电网弹性和创新合作伙伴关系计划(GRIP),以缓解气候变化引发的极端天气事件给美国老旧输电系统造成的压力^[2]。中国政府将建立健全应对极端天气、自然灾害的电力预警和应急响应机制作为新形势下电力系统稳定工作的重要内容^[3]。国家电网有限公司将气候弹性强、安全韧性强作为数智化坚强电网的主要特征^[4]。因此,自然灾害下输电线路故障率评估作为新型电力系统风险评估、韧性提升与安全防御的重要基础,提升其评估算法对复合灾害场景的适应性具有重要的理论意义和工程应用价值^[5-6]。

文献[7]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[8]提出系统模型与其仿真轨迹深度融合的整体还

原论(whole reductionism thinking, WRT)。文献[9]进一步将因果分析与人工智能技术相融合,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,为复杂系统量化分析提供了风险型方法论。在此基础上,系列论文的首篇从复合灾害的时变特征与耦合特征角度分析其复杂性根源,指出灾种孤立分析法难以适应电网复杂外部环境时变性与耦合性,进而提出了基于WRT的灾害综合分析法的研究思路,设计了“离线按分类特征优化、在线按实际灾情执行”的评估框架^[10]。这为输电线路复合灾害故障率评估奠定了理论基础,但仍需要进一步探讨支撑工程在线应用的量化算法。

“十三五”期间,中国综合气象观测能力达到世界先进水平,建成了由近7万个地面自动气象站、224部雷达、6颗在轨业务运行风云气象卫星等组成的综合气象观测系统,全国卫星遥感综合应用体系基本建成^[11]。“十四五”期间,中国将促进陆海空天一体化,发展精密气象监测和精准气象预报,同时强化多灾种预警系统的推广应用,实现从自然事件监测为主到灾害全过程监测的转变^[12]。电力部门建设了专业的雷电定位系统^[13]和山火/覆冰监测预警系统^[14-15],并在电网中装设了大量架空输电线路在

收稿日期: 2024-05-20; 修回日期: 2024-10-12。

上网日期: 2024-11-21。

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)。

线监测装置^[16],对输电线路本体状态、气象环境、通道状态等信息进行实时采集。随着地理信息系统(GIS)技术和卫星遥感技术的进步,利用各类地理特征数据,如数字高程模型(DEM)数据、归一化植被指数(NDVI)、植被覆盖度(FVC)、中分辨率成像光谱仪(MODIS)数据等^[17],可以对输电走廊的地形、地貌、坡度、坡向、植被等地理特征进行建模。同时,考虑外部环境因素的设备故障概率评估功能已经成为新一代调度技术支持系统和新一代应急指挥系统的基础模块^[18-19],自适应自然环境的电网安全稳定协调防御系统已有实际运行经验^[20]。这为输电线路复合灾害故障率在线评估提供了工程应用基础。

作为续篇,本文基于系列论文首篇建立的WRT视角下的灾害综合分析法研究框架,提出复合灾害下输电线路故障率在线评估算法。首先,基于粗粒化(coarse-grained)技术对输电线路所处的复合灾害态势和背景特征进行分类分级编码;其次,根据复合灾害和背景特征编码的重合度,提出线路段

粒度自适应划分方法;然后,提出基于线路段故障率的输电线路故障率时间序列聚合方法,并设计了评估模型证实/证伪的评价指标;最后,以中国某省实际电网运行数据为例,验证了所提方法的有效性。

1 复合灾害态势粗粒化编码

1.1 复合灾害状态编码

根据雷电、降水、冰冻、山火、大风(或台风)、污秽(或沙尘暴)等灾种引发输电线路故障的机理,将外部综合气象要素划分为主状态分量和辅助状态分量,并对每个状态变量按照(特征 α ,强度 β)的二元表编码。其中,强度等级的划分采用符号时间序列分析(symbolic time series analysis, STSA)方法,将数据空间划分为少量的离散元,并用粗粒化方法来描述复杂系统,在该过程中不会丢失系统的本质特征^[21]。符号化的关键在于区间划分^[22],气象灾害强度等级一般按照红、橙、黄、蓝4级预警^[23],再叠加1级正常状态,分别取0~4共5个状态进行编码;气象灾害特征也可用0~4划分至多5种类型,如表1所示。

表1 综合气象要素状态粗粒化编码
Table 1 Coarse-grained coding of comprehensive meteorological element states

要素	二元表(α, β)	符号	编码规则	
气温	特征 α	T_α	0-低温;1-正常;2-高温	
	强度 β	T_β	0-无影响;1-弱;2-中;3-强;4-极强	
大风	特征 α	W_α	0-正常;1-大风;2-台风;3-龙卷;4-飑/下击暴流	
	强度 β	W_β	风力:0-无影响;1-弱;2-中;3-强;4-极强 风向与线路夹角:0-[0°, 25°);1-[25°, 45°);2-[45°, 65°);3-[65°, 80°);4-[80°, 90°]	
降水	特征 α	R_α	0-无;1-雨;2-雪;3-雨夹雪	
	强度 β	R_β	有效降水量:0-无影响;1-弱;2-中;3-强;4-极强	
雷电	特征 α	L_α	0-无;1-正极性;2-负极性无回击;3-负极性少回击;4-负极性多回击	
	强度 β	L_β	落雷密度:0-无影响;1-弱;2-中;3-强;4-极强	
山火	特征 α	F_α	0-无;1-热点;2-火点	
	强度 β	F_β	0-无影响;1-弱;2-中;3-强;4-极强	
覆冰	特征 α	I_α	0-无;1-湿雪;2-雾凇;3-混合凇;4-雨凇	
	强度 β	I_β	覆冰厚度:0-无影响;1-弱;2-中;3-强;4-极强	
污染	特征 α	Q_α	0-无;1-雾;2-霾;3-扬沙;4-沙尘暴	
	强度 β	Q_β	有效能见度:0-无影响;1-弱;2-中;3-强;4-极强 PM10浓度:0-无影响;1-弱;2-中;3-强;4-极强	
辅助状态分量	湿度	强度 β	H_β	0-<20%;1-[20%, 40%);2-[40%, 60%);3-[60%, 80%);4- \geq 80%
	气压	强度 β	A_β	0- \geq 90 kPa;1-[80, 90)kPa;2-[70, 80)kPa;3-[60, 70)kPa;4-(0, 60)kPa
	辐照	强度 β	J_β	0-[0, 200]W/m ² ;1-(200, 400]W/m ² ;2-(400, 600]W/m ² ;3-(600, 800]W/m ² ;4->800 W/m ²

注:当编码规则中部分要素的强度变量不止一种时,可对 β 进行扩展。

表1中具体分级门限值可按两阶段进行设置。第1阶段,在还缺少具体电网的历史样本数据时,可用具有普遍指导意义的国标、行标等规范中建议的灾害严重度划分依据,作为分级门限值的初值。第

2阶段,在具体电网的历史样本数据有一定积累后,可根据历史样本的证实/证伪,来持续完善分级门限值。这样门限值的含义就从量度灾害本身严重度,逐渐转化到量度灾害对电网影响的严重度。下文的

灾害趋势编码和背景特征编码门限值设置原理与此相同。

根据上述综合气象要素状态的二元表(特征 α , 强度 β)编码,任一时刻 t 地理网格或线路段 i 的灾害特征向量 $D_{\alpha,i,t}$ 和强度特征向量 $D_{\beta,i,t}$ 分别如式(1)、式(2)所示。

$$D_{\alpha,i,t}=[T_{\alpha} \ W_{\alpha} \ R_{\alpha} \ L_{\alpha} \ F_{\alpha} \ I_{\alpha} \ Q_{\alpha}] \quad (1)$$

$$D_{\beta,i,t}=[T_{\beta} \ W_{\beta} \ R_{\beta} \ L_{\beta} \ F_{\beta} \ I_{\beta} \ Q_{\beta} \ H_{\beta} \ A_{\beta} \ J_{\beta}] \quad (2)$$

进一步,根据输电线路致灾机理,优先取 $D_{\beta,i,t}$ 中强度等级较高的若干主状态分量进行组合,确定复合灾害状态,复合灾害强度等级可取关联特征的强度等级最大值。

1.2 复合灾害趋势编码

选择复合灾害状态时序当前时刻及其前后若干时刻的状态编码,根据强度特征向量 $D_{\beta,i,t}$ 的差分信息进行分级,划分复合灾害趋势为“突减、减少、保持、增加、突增”5档,分别取值为-2~2,编码记为 $D_{\gamma,i,t}$,表示任一时刻 t 地理网格或线路段 i 的灾害趋势。以选择当前时刻 t 及其前后2个时刻 $t-1$ 、 $t+1$ 为例,复合灾害状态等级变化的差分信息计算如式(3)、式(4)所示,则时刻 t 的趋势编码规则如表2所示。

$$\Delta D_{\beta,i,t-1}=D_{\beta,i,t}-D_{\beta,i,t-1} \quad (3)$$

$$\Delta D_{\beta,i,t}=D_{\beta,i,t+1}-D_{\beta,i,t} \quad (4)$$

式中: $\Delta D_{\beta,i,t-1}$ 、 $\Delta D_{\beta,i,t}$ 分别为 t 和 $t-1$ 时刻地理网格或线路段 i 的灾害强度差分向量; $D_{\beta,i,t-1}$ 、 $D_{\beta,i,t+1}$ 分别为 $t-1$ 和 $t+1$ 时刻地理网格或线路段 i 的灾害强度特征向量。

表2 复合灾害趋势粗粒化编码
Table 2 Coarse-grained coding of compound-disaster trend

趋势	$D_{\gamma,i,t,j}$	编码规则
突增	2	$(\Delta d_{\beta,i,t} > 2)$ 或者 $(0 < \Delta d_{\beta,i,t} \leq 2$ 且 $\Delta d_{\beta,i,t} - \Delta d_{\beta,i,t-1} > 3)$
增加	1	$0 < \Delta d_{\beta,i,t} \leq 2$ 且 $\Delta d_{\beta,i,t} - \Delta d_{\beta,i,t-1} \leq 3$
保持	0	$\Delta d_{\beta,i,t} = 0$
减少	-1	$-2 \leq \Delta d_{\beta,i,t} < 0$ 且 $\Delta d_{\beta,i,t} - \Delta d_{\beta,i,t-1} \geq -3$
突减	-2	$(\Delta d_{\beta,i,t} < -2)$ 或者 $(-2 \leq \Delta d_{\beta,i,t} < 0$ 且 $\Delta d_{\beta,i,t} - \Delta d_{\beta,i,t-1} < -3)$

注: $\Delta d_{\beta,i,t}$ 为灾害强度差分向量 $\Delta D_{\beta,i,t}$ 对应元素值。

当在线评估缺少未来时段复合灾害状态时,可根据综合气象状态进行趋势编码。以冰风复合灾害为例,覆冰增长(灾害趋势向量对应第 j 档元素 $D_{\gamma,i,t,j}$ 为1或2)的气象环境条件如下:1)合适的气温,一般介于-10~0℃;2)较大的湿度,相对湿度一般大于

80%;3)可使空气中水滴运动的合适风速,一般为0~6 m/s;4)相对固定的风向,风向与线路夹角介于45°~135°。覆冰消融($D_{\gamma,i,t,j}=-1$)同样需要一定的气象条件,通常需要:1)经历了一定时长的覆冰增长过程;2)气温回升,湿度减小,通常气温大于0℃,相对湿度小于80%;3)风的激励,且风向与线路夹角介于45°~135°。覆冰快速消融($D_{\gamma,i,t,j}=-2$)容易引发脱冰跳跃:1)覆冰增长以及覆冰消融均持续一定时间;2)气温回升,湿度减小,通常气温大于0℃,相对湿度小于80%;3)风的激励,风速持续大于6 m/s,且风向与线路夹角介于45°~135°。其他情况, $D_{\gamma,i,t,j}=0$ 。

至此,任一时刻 t 任一地理网格或线路段 i 的复合灾害态势特征向量 $M_{i,t}^d$ 如式(5)所示。

$$M_{i,t}^d=[D_{\alpha,i,t} \ D_{\beta,i,t} \ D_{\gamma,i,t}] \quad (5)$$

2 自适应粒度的线路段划分

2.1 线路段划分流程

根据输电线路所处的背景特征、灾害特征的不同时变特性,离线阶段根据地理特征进行地理网格划分,在线阶段根据灾害时空分布的重合度进行地理网格合并,实现线路段自适应划分,提升故障率评估模型的匹配度。自适应粒度的线路段划分流程如图1所示。

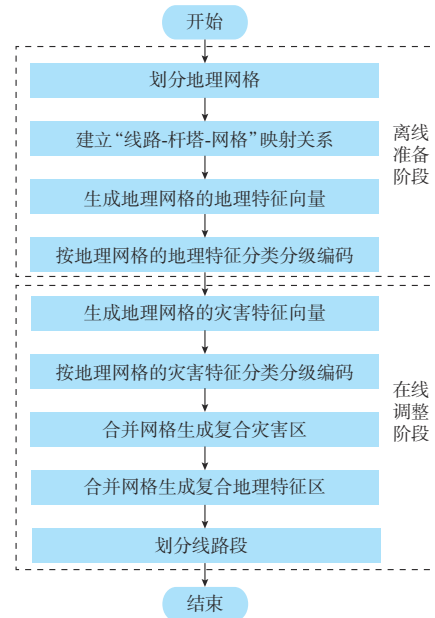


图1 自适应粒度的线路段划分流程图
Fig. 1 Flow chart of line segment division with adaptive granularity

离线准备阶段,首先,根据最小误差要求,将研究区域划分为等面积的地理网格^[24](如3 km×3 km);然后,根据地理网格及其范围内的线路及杆塔

所属关系,建立杆塔-线路、杆塔-地理网格映射;最后,根据地形、地貌、地质、植被、坡度、海拔、土壤等生成各地理网格的地理特征向量,并按各地理特征的均匀度进行分类分级编码,编码过程详见2.2节。

在线调整阶段,首先,在线计算每个时点、每个地理网格的灾害特征向量,并根据1.1节方法实现灾害特征的分类分级编码;其次,按多灾种的重合度(即复合灾害编码相同)合并同灾种同等级地理网格,形成 X 类复合灾害区 $G_x^d(x=1,2,\dots,X)$;然后,选择与灾害特征强相关的地理特征因素(如冰灾选择地形/地貌/坡向、火灾选择地貌/植被等),并根据其重合度合并同类地理特征网格,形成 Y 类复合地理特征区 $G_y^s(y=1,2,\dots,Y)$;最后,根据复合灾害区 G_x^d 与复合地理特征区 G_y^s 的重叠情况,生成 Z 类复合灾害与地理特征重叠区 $G_z^m(z=1,2,\dots,Z)$,并进一步根据输电线路经过 G_z^m 的情况进行分段,即连续通过同一区域的线路档集合划分为同一线路段,且该线路段及其包含的各线路档所对应的地理特征及灾害特征,采用该区域的地理特征向量及灾害特征向量。

2.2 背景特征离线编码

每一线路档或线路段所处的地形、地貌、地质、坡度、植被、土壤电阻率、海拔等特征组成地理特征向量,其粗粒化编码如表3所示。每一线路档或线路段所处的输电通道需要区分三跨、交叉跨越、密集通道等特殊通道形式,输电通道特征粗粒化编码如表4所示。本体特征可以根据架空输电线路设计规范进行划分^[25]。

表3 地理特征粗粒化编码
Table 3 Coarse-grained coding of geographical features

要素	类别	符号	编码规则
地形	特征 α	O_α	0-平地;1-山坡;2-山谷;3-山顶;4-微地形区
地貌	特征 α	N_α	0-居民区;1-农田草甸;2-林区;3-河湖湿地;4-荒漠戈壁
海拔	特征 α	U_α	0- ≤ 1 km;1-(1,2]km;2-(2,3]km;3-(3,4]km;4- > 4 km
土壤	特征 α	E_α	土壤电阻率:0- ≤ 0.1 k Ω ·m;1-(0.1,0.5]k Ω ·m;2-(0.5,1]k Ω ·m;3-(1,2]k Ω ·m;4- > 2 k Ω ·m
地质	强度 β	K_β	地质灾害发生规模/频次:0-不易发;1-低发;2-中发;3-较高发;4-高发
坡度	强度 β	S_β	0-无;1- $\leq 15^\circ$ 缓坡;2-($15^\circ, 35^\circ$]陡坡;3-($35^\circ, 45^\circ$]急坡;4- $> 45^\circ$ 险坡
植被	强度 β	V_β	0-无;1-杂草/秸秆/芦苇;2-以灌木为主的混合植被;3-乔木林;4-以乔木为主的混合植被

表4 输电通道特征粗粒化编码
Table 4 Coarse-grained coding of transmission channel features

要素	类别	符号	编码规则
输电通道	主类型 α	C_α	0-普通通道;1-三跨;2-交叉跨越;3-密集通道
	子类型 β	C_β	三跨子类型:0-无;1-跨公路;2-跨铁路;3-跨河流 交叉跨越子类型:0-无;1-下跨越;2-上跨越;3-上下跨越 密集通道子类型:0-无;1-弱耦合;2-中耦合;3-强耦合

除特殊输电通道以外,输电线路还存在大跨越区、微地形、微气象等特殊区段。线路的特殊通道和区段需要单独建模,并与输电线路模型建立双向索引关系。在粒度自适应的线路段划分时,需要对特殊通道和区段单独处理,不宜与其他线路段合并。

3 故障率时间序列评估

3.1 故障率时间序列仿真

文献[10]提出的灾害综合分析框架指出,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段,在复合灾害下往往表现出相同的故障模式,可以选作基于WRT复合灾害分析的基元系统。因此,复合灾害作用下线路段故障之间可视为相互独立事件,则任一时刻 t 含有 S 个线路段的输电线路 l 的故障率 $P_{l,t}$ 如式(6)所示。

$$P_{l,t} = 1 - \prod_{s=1}^S (1 - P_{l,s,t}) \quad (6)$$

式中: $P_{l,s,t}$ 为时刻 t 输电线路 l 中线路段 s 的故障率。

不同线路段在不同灾害特征和背景特征下调用不同模型来应对复合灾害的耦合特征,根据不同时刻复合灾害态势编码选择模型参数来适应复合灾害的时变特征,如式(7)所示。

$$P_{l,s,t} = f(M_{l,s,t}) \quad (7)$$

式中: $M_{l,s,t}$ 为时刻 t 输电线路 l 中线路段 s 在复合灾害下的故障率评估模型; $f(M_{l,s,t})$ 为复合灾害模型 $M_{l,s,t}$ 对应的故障率评估函数。

故障率评估模型 $M_{l,s,t}$ 可以是独立事件模型^[26]、耦合系数模型^[27-28]、比例风险模型^[29-30]、人工智能模型^[31]中的任意一种。同时,灾害综合分析框架不排除任何其他更优的选择。故障率评估函数 $f(M_{l,s,t})$ 的参数可以结合历史数据和线路背景特征参数进行拟合。

3.2 时间序列特征评价指标

对故障率时间序列按表5所示分档门限值粗粒化处理,当故障率达到蓝色及以上等级时发布“预警”。

表5 故障率等级划分
Table 5 Classification of failure rate levels

预警等级	白色	蓝色	黄色	橙色	红色
故障率区间	[0,0.2)	[0.2,0.4)	[0.4,0.6)	[0.6,0.8)	[0.8,1.0]

定义检出率(probability of detection, POD)、虚警率(false alarm rate, FAR)两个指标^[32]评价整体评估效果,如式(8)、式(9)所示。同时,可在检出率大于门限值的约束下以虚警率最小为目标来对故障率评估模型的参数进行优选。

$$\eta_{\text{POD}} = \frac{\sum_{t \in T} N_t^{\text{cor}}}{\sum_{t \in T} N_t^{\text{trip}}} \geq \eta_{\text{POD}}^{\text{th}} \quad (8)$$

$$\eta_{\text{FAR}} = \frac{\sum_{t \in T} N_t^{\text{fal}}}{\sum_{t \in T} N_t^{\text{tot}}} \leq \eta_{\text{FAR}}^{\text{th}} \quad (9)$$

式中: η_{POD} 、 η_{FAR} 分别为检出率和虚警率值; N_t^{cor} 、 N_t^{trip} 、 N_t^{fal} 、 N_t^{tot} 分别为评估时段 T 内时刻 t 的预警正确线路数、实际发生跳闸线路数、预警错误线路数、预警线路总数; $\eta_{\text{POD}}^{\text{th}}$ 、 $\eta_{\text{FAR}}^{\text{th}}$ 分别为评估结果可接受的检出率门限值和虚警率门限值。

当检出率不小于门限值且虚警率不大于门限值时,故障率评估模型得到证实;否则,评估模型被证伪。通过对模型仿真时间序列证实或证伪的迭代,可不断提高模型的准确性和适应性。

4 算例分析

4.1 算例描述

以中国某省实际寒潮-小雨-覆冰-大风复合灾害及跳闸过程为例,分别使用灾害综合分析法(下文称为本文方法)、灾种孤立分析法(下文称为传统方法)^[27]进行评估,对比输电线路故障率仿真时间序列与实际跳闸轨迹,验证所提方法的有效性。

2018年1月31日—2月9日期间,受寒潮及雨雪天气影响,该省500 kV QD站供电片区(下文称为片区1)与500 kV NZ站供电片区(下文称为片区2)由北向南遭受重大冰风灾害。其中,片区1在2月4—5日覆冰逐渐增长达到最大值(20 mm左右),2月6日起雨雪渐止、覆冰停止增长、气温逐步升高并出现覆冰消融及自然脱冰,该过程中的天气参数如附录A表A1所示;片区2从2月3日起,风向转为南风,雨雪渐止、气温回升,2月4日覆冰达到最大值后进入消融及脱冰阶段,天气参数如表A2所示。片区1的20条220 kV线路、片区2的10条220 kV线路、500 kV QD-NZ双回线及其对应的6个覆冰测点的空间分布如图A1所示。

4.2 灾害综合分析过程

4.2.1 冰风复合灾害态势粗粒化编码

根据冰风灾害分级门限值及趋势判断依据(详见附录A表A3),对1月31日—2月9日灾害过程的覆冰强度 I_β 、大风强度 W_β 和复合灾害趋势 D_γ 进行粗粒化编码,如表6所示。

表6 片区1和片区2的气象灾害粗粒化编码
Table 6 Coarse-grained coding of meteorological disasters in area 1 and area 2

日期	片区1			片区2		
	I_β	W_β	D_γ	I_β	W_β	D_γ
1月31日	0	0	1	0	0	1
2月1日	0	1	1	0	1	0
2月2日	2	0	0	1	1	1
2月3日	2	1	1	2	1	1
2月4日	3	1	0	3	1	-1
2月5日	3	1	1	2	1	0
2月6日	4	1	-2	2	1	-2
2月7日	2	0	0	0	0	0
2月8日	2	0	-2	0	0	0
2月9日	0	0	0	0	0	0

4.2.2 基于复合灾害态势及地理特征的线路段划分

结合冰风复合灾害对线路的影响机理,对两个片区的地理特征进行粗粒化处理。按照受冰风灾害影响由弱到强的顺序划分为5类:Ⅰ区(对冰风激励的减弱作用最强,例如高大建筑物、植被覆盖区)、Ⅱ区(对冰风激励的减弱作用较强,例如山区背风坡)、Ⅲ区(基准区域,例如平原)、Ⅳ区(对冰风激励的提升作用较强,例如山区迎风坡、顺风坡)、Ⅴ区(对冰风激励的提升作用最强,例如水系旁的开阔地区、顺风山谷)。根据地理特征的划分,可以将输电线路划分为若干线路段,如图2所示。图中:地理网格为3 km×3 km。

4.2.3 评估模型及参数优化

为了便于对比验证,本文方法与传统方法均选择文献[27]提供的冰、风致灾机理模型。传统方法以覆冰倒塔、断线系数以及冰风舞动激励系数的形式量化冰风灾害对输电线路故障率的影响。本文方法会根据不同复合灾害态势下线路段致灾机理调整模型中的3个系数,并引入表征冰风趋势特征的时变参数,相关参数的调整过程如下。

两个片区地理特征划分为5类,分别对应冰风复合灾害模型 $M_1 \sim M_5$ 。以220 kV QD-DJ线为例(如图2所示),AB段处于覆冰微气象区选用模型 M_5 ,BC段处于迎风坡区选用模型 M_4 ,CD段处于背

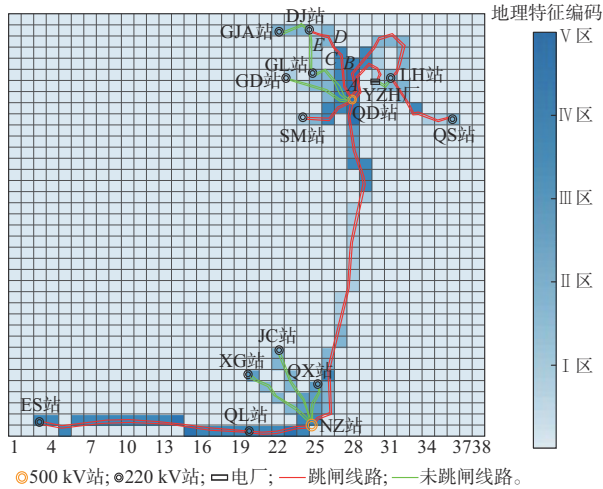


图2 算例电网拓扑图及地理特征图
Fig. 2 Topology map and geographical feature diagram of power grid in case

风坡区选用模型 M_2 , DE 段处于居民区选用模型 M_1 。

以 100% 检出率前提下虚警率最小为目标,优选 5 个模型中的断线比例系数 K_1 、倒塔比例系数 K_2 、与地形相关的冰风激励舞动系数 K_3 等参数,如表 7 所示。为了体现由于冰风累积效应和脱冰跳跃等冰风复合灾害时变性对故障率的影响,引入时变参数 $\lambda(t)$ 与各参数作积进行修正。其中, $\lambda(t)$ 的取值与冰风复合灾害趋势特征有关,如表 8 所示。本案例中传统方法采用 M_3 的参数,且不计及时变参数。

表 7 评估模型参数
Table 7 Evaluation model parameters

模型名称	$K_1/10^{-4}$	$K_2/10^{-4}$	K_3
M_1	7.0	1.5	0.8
M_2	7.0	1.5	0.9
M_3	7.0	1.5	1.0
M_4	10.0	7.0	1.3
M_5	10.0	7.0	1.5

表 8 考虑冰风趋势的时变参数
Table 8 Time-varying parameters considering ice-wind trends

时变参数	$D_y=2$	$D_y=1$	$D_y=0$	$D_y=-1$	$D_y=-2$
$\lambda(t)$	1.0	1.0	1.0	1.1	1.6

4.3 评估效果对比分析

4.3.1 片区 1 对比分析

鉴于冰灾具有渐进性且成灾过程长等特点,结合外部气象数据获取频次等客观因素,采用“日”作为评估时间断面的最小分辨率,基于复合灾害预报特征逐日评估每条线路的故障率,既可为在线安全

稳定分析提供预想故障场景,又可为电力设备应急抢修提供决策依据。

将片区 1 从 1 月 31 日—2 月 9 日共 10 日覆冰过程作为整体来看,其评估结果统计如附录 B 表 B1 所示。两种方法均可以对受覆冰影响大的线路进行正确预警,检出率为 100%。但与传统方法相比,本文方法的虚警率由 50% 下降为 36%。两种方法的逐日评估结果时空分布如表 B2 所示。逐日统计检出率、虚警率指标,两种方法的指标变化趋势如图 3 所示。可见,时间粒度缩小后,传统方法出现漏警情况(2 月 4 日与 2 月 8 日检出率小于 100%),而本文方法可以更好地适应灾害逐日演化的时变特征,保持 100% 检出率。

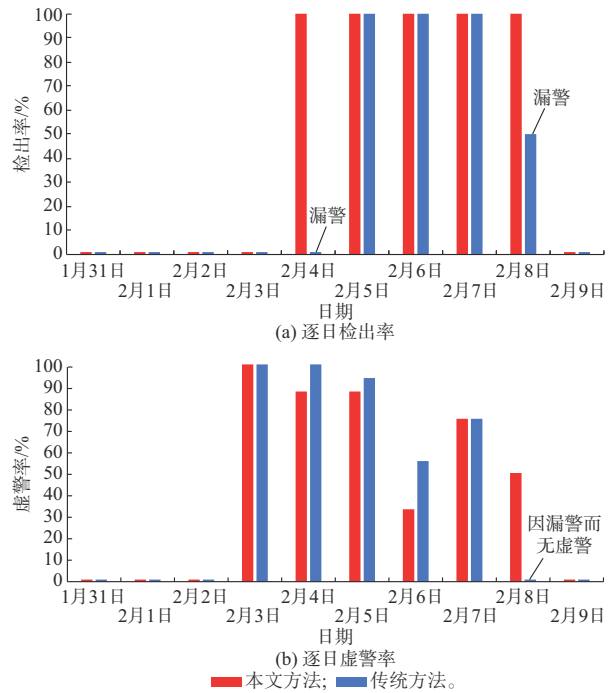


图 3 片区 1 评价指标逐日对比
Fig. 3 Day-by-day comparison of evaluation indicators in area 1

选择 QD-SM 甲线(覆冰增长阶段漏警线路)、LH-QS 甲线(覆冰消融阶段漏警线路)、DJ-GL 乙线(虚警线路)作为典型线路进行对比分析,如图 4 所示。QD-SM 甲线分别于 2 月 4 日 21:15 以及 2 月 6 日 10:31、11:23、11:39 发生了 4 次覆冰导致的相间故障跳闸,基于传统方法的故障率时间序列在 2 月 4 日出现漏警。LH-QS 甲线分别于 2 月 8 日 11:36、14:11 发生了 2 次脱冰跳跃导致的单相故障跳闸,基于传统方法的故障率时间序列在 2 月 8 日出现漏警。DJ-GL 乙线在此次覆冰过程中未发生跳闸事件,基于传统方法的故障率时间序列在 2 月 4—6 日达到蓝色及以上告警等级出现“虚警”。由于本文方

法可以根据复合灾害耦合情况以及灾害与地理特征耦合情况选配更适合的评估模型,其计算得到的故障率时间序列与实际跳闸轨迹吻合,未出现漏警,在

提升检出率的同时降低了虚警率。结合线路特征对比分析了两种方法出现不同检出率和虚警率的原因,具体如表9所示。

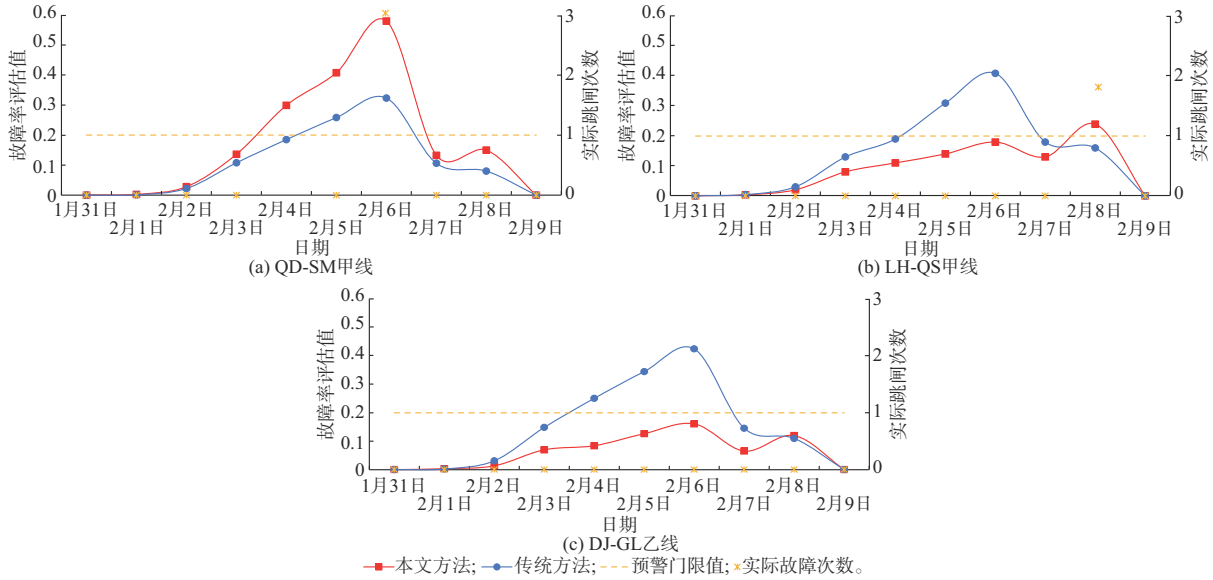


图4 典型线路故障率时间序列及实际跳闸次数
Fig. 4 Failure rate time series and actual tripping times of typical lines

表9 片区1典型线路分析方法对比

Table 9 Comparison of analysis methods for typical lines in area 1

线路名称	线路特征	本文方法	传统方法	结论
QD-SM甲线	经过多类地理特征区	分别调用 M_2 、 M_3 、 M_4 ,在微地形区增大冰风激励参数,提升预警等级	按照同样的模型	提升检出率
DJ-GL乙线	仅经过居民区	调用 M_1 ,减小冰风激励参数,降低预警等级	参数进行独立事	降低虚警率
LH-QS甲线	经过山谷易舞动区	计及复合灾害趋势编码,可以有效辨识脱冰舞动故障	件叠加计算	提升检出率

检出率、虚警率等统计指标与统计的时间窗口、时间-空间-领域的粗粒化尺度、故障率预警门限值选择等均有关系,后续可进一步结合历史案例样本进行优化。

4.3.2 片区2对比分析

将片区2从1月31日—2月9日共10日覆冰过程作为整体来看,两种方法的逐日评估结果时空分布如附录B表B3所示,逐日计算的检出率、虚警率指标如图5所示。传统方法出现漏警情况(2月3日、6日、7日检出率小于100%),本文方法依然能在控制一定虚警率水平的基础上保证检出率100%。

4.3.3 模型证实与证伪

此次覆冰过程由北向南逐步蔓延,但自2月4日开始,片区2提前两日进入消融阶段,表现为由南向北的消融脱冰过程。两个地区的故障率时间序列完整地反映了由北向南覆冰、由南向北脱冰的整个过程。如果按照红、橙、黄、蓝、白5个预警等级分别对应预警跳闸次数4、3、2、1、0的假设进行统计,则输电线路预警跳闸时间序列与实际跳闸次数统计轨迹对比如图6所示。

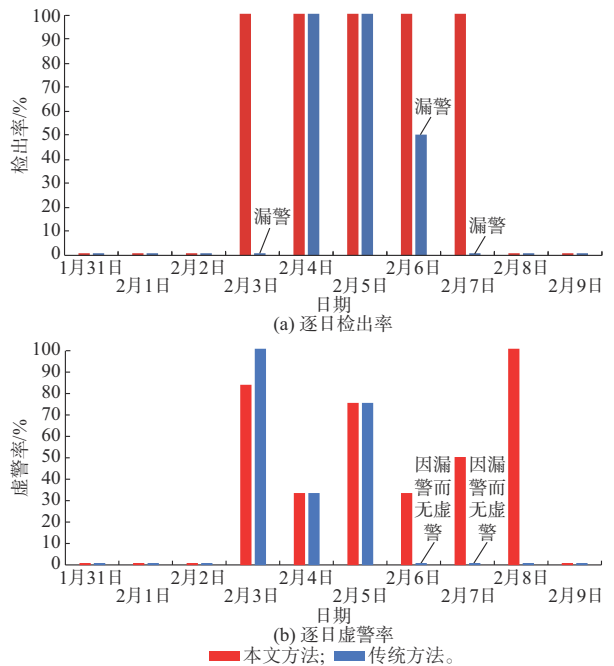


图5 片区2评价指标逐日对比
Fig. 5 Day-by-day comparison of evaluation indicators in area 2

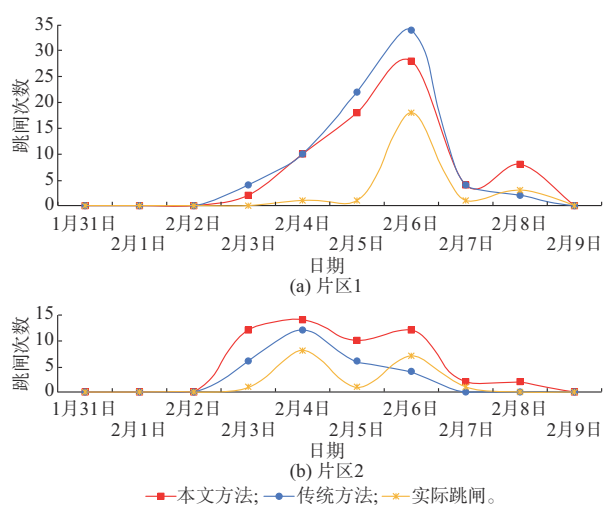


图6 故障率时间序列与实际跳闸轨迹对比
Fig. 6 Comparison between failure rate time series and actual trip curve

从图6可以看出,本文方法预警跳闸时间序列更接近于实际跳闸轨迹的“双峰”模式,尤其是准确预警了2月6日片区2和2月8日片区1由脱冰跳跃引发的“翘尾效应”,更好地揭示了跳闸的时空演化过程。本文方法计及了覆冰演化趋势的时变性,且对复合灾害与地理特征的耦合性分为5类模型分别考虑,其预警跳闸时间序列不仅在覆冰增长期与实际跳闸轨迹特征吻合,而且在覆冰消融期也适用。因此,传统方法的评估模型被证伪,本文方法不仅评估模型得到证实,其仿真时间序列为进一步分析复合灾害的演化机理提供了量化基础。

本文算例以冰、风两种灾害综合分析为例,验证了所提方法的有效性。本文方法能通过离线阶段对模型不断证实或证伪的迭代,提升在线决策优化的自适应性。可以预见,当外部环境更复杂、复合灾害种类更多时,本文方法所展现出的优势会更显著。

5 结语

灾种孤立分析难以适应电网复杂外部环境的时变性与耦合特征。本文按照“离线按分类特征优化、在线按实际灾情执行”的思路,提出一种基于灾害综合分析的输电线路故障率在线评估方法。“离线按分类特征优化”是指,从输电线路的历史外部自然环境中提取特征量并粗粒化编码,以此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,以应对复合灾害耦合特征。“在线按实际灾情执行”是指,基于当前时效窗口的复合灾害态势及输电线路背景特征,自适应划分线路段并调用相应的模型来评估输电线路故障率,以适应复杂外部环境的时变性。通过实际电网案例分析可知,所提算法在提升检出率的同时,一定程度上降低了

虚警率,增强了评估方法对复杂外部环境的适应性。

复合灾害态势门限值及其集合、离线优化的模型及其参数的适应性、故障率预警门限值选择等均受到统计数据充足程度的限制。若能结合具体电网积累更加丰富的有监督样本数据,并融合人工智能与语言模型技术,则有望进一步提高评估的自适应能力。但本文提出的基于灾害综合分析的输电线路故障率在线评估算法的有效性不会受到根本性影响。未来,还可在故障率评估的基础上,进一步探索复合灾害下设备故障造成电网损失的评估方法,将概率分析提升为电网运行风险分析。

本文在撰写过程中得到南京理工大学谢云云副教授的帮助,特此感谢!

附录见本刊网络版(<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>),扫英文摘要后二维码可以阅读网络全文。

参考文献

- [1] International Energy Agency. Electricity grids and secure energy transition[R/OL]. [2023-10-30]. <https://www.iea.org/reports/electricity-grids-and-secure-energy-transitions>.
- [2] Department of Energy. Grid resilience and innovation partnerships (GRIP) program projects[EB/OL]. [2023-10-30]. <https://www.energy.gov/gdo/grid-resilience-and-innovation-partnerships-grip-program-projects>.
- [3] 国家发展改革委 国家能源局关于加强新形势下电力系统稳定工作的指导意见[EB/OL]. [2023-10-30]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/202310/t20231025_1361514.html. Guiding opinions of National Development and Reform Commission and National Energy Administration on strengthening stability of power system under the new situation [EB/OL]. [2023-10-30]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/202310/t20231025_1361514.html.
- [4] 国家电网有限公司. 国家电网公司第四届职工代表大会第四次会议暨2024年工作会议召开[EB/OL]. [2024-02-25]. http://www.sgcc.com.cn/html/sgcc/col2023020901/2024-01/12/20240112212904874900585_1.shtml. State Grid Corporation of China. The Fourth Session of the Fourth Workers' Congress and the 2024 Work Conference of State Grid Corporation of China were held[EB/OL]. [2024-02-25]. http://www.sgcc.com.cn/html/sgcc/col2023020901/2024-01/12/20240112212904874900585_1.shtml.
- [5] XU L, FENG K R, LIN N, et al. Resilience of renewable power systems under climate risks [J]. Nature Reviews Electrical Engineering, 2024, 1(1): 53-66.
- [6] 胡博, 谢开贵, 邵常政, 等. 双碳目标下新型电力系统风险评估: 特征、指标及评估方法[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(5): 1-15. HU Bo, XIE Kaigui, SHAO Changzheng, et al. Commentary on risk of new power system under goals of carbon emission peak and carbon neutrality: characteristics, indices and assessment methods[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(5): 1-15.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 薛禹胜, 常康, 郁琛, 等. 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[J]. 电力系统自动化, 2025, 49(1): 19-31.
XUE Yusheng, CHANG Kang, YU Chen, et al. Evaluation of compound-disaster failure rate for transmission lines from perspective of whole reductionism thinking—Part one framework design [J]. Automation of Electric Power Systems, 2025, 49(1): 19-31.
- [11] 中国气象局. 全国气象发展“十四五”规划[EB/OL]. [2023-10-30]. https://www.cma.gov.cn/zfxgk/gknr/gjh/202112/t20211208_4295610.html.
China Meteorological Administration. The “14th Five Year Plan” for national meteorological development [EB/OL]. [2023-10-30]. https://www.cma.gov.cn/zfxgk/gknr/gjh/202112/t20211208_4295610.html.
- [12] “十四五”公共安全与防灾减灾科技创新专项规划[EB/OL]. [2023-10-30]. https://www.most.gov.cn/xxgk/xinxifenlei/fdzd/gknr/fgzc/gfxwj/gfxwj2022/202211/t20221110_183375.html.
Special plan for technological innovation in public safety and disaster prevention and reduction during the “14th Five Year Plan” period [EB/OL]. [2023-10-30]. https://www.most.gov.cn/xxgk/xinxifenlei/fdzd/gknr/fgzc/gfxwj/gfxwj2022/202211/t20221110_183375.html.
- [13] 国家市场监督管理总局, 中国国家标准化管理委员会. 基于雷电定位系统的雷电临近预警技术规范: GB/T 40619—2021 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People’s Republic of China. Technical specification for lightning nowcasting and warning based on lightning location system: GB/T 40619—2021 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2021.
- [14] 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, 2(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, 2(1): 36-51.
- [15] 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. Icing disaster in power grid and its prevention technology [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2016.
- [16] 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.
- [17] 张康聪. 地理信息系统导论[M]. 9版. 北京: 科学出版社, 2019.
CHANG K T. Introduction to geographic information systems [M]. 9th ed. Beijing: Science Press, 2019.
- [18] 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.
- [19] 郁琛, 常康, 刘韶峰, 等. 关于电力系统极端外部灾害主动防御技术的评述[J]. 四川电力技术, 2023, 46(2): 8-14.
YU Chen, CHANG Kang, LIU Shaofeng, et al. A review on active defense technology of extreme external disasters in power system [J]. Sichuan Electric Power Technology, 2023, 46(2): 8-14.
- [20] 王昊昊, 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.
- [21] 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.
- [22] 向旭, 蒋静坪. 时间序列的符号化方法研究[J]. 模式识别与人工智能, 2007, 20(2): 154-161.
XIANG Kui, JIANG Jingping. Study on symbolization analysis of time series [J]. Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2007, 20(2): 154-161.
- [23] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 气象灾害预警信号图标: GB/T 27962—2011 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People’s Republic of China, Standardization Administration of the People’s Republic of China. Graphical symbols for meteorological disaster warning signal icon: GB/T 27962—2011 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2012.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] 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.
- [30] 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.
- [31] 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.
- [32] 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 Hao, et al. Space-time early-warning of power grid fault probability by lightning [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(17): 44-51.

常康(1983—),男,通信作者,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

薛禹胜(1941—),男,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

郝琛(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 Two Algorithm and Application

CHANG Kang^{1,2}, XUE Yusheng^{2,1}, YU Chen², XUE Feng²

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2. State Grid Electric Power Research Institute (NARI Group Corporation), Nanjing 211106, China)

Abstract: In response to the problem that the disaster-type independent analysis is difficult to adapt to the time-varying and coupling characteristics of the complex external environment of the power grid, the first paper in the series established a comprehensive disaster analysis framework based on whole reductionism thinking (WRT). As a sequel, an online evaluation algorithm of failure rate for transmission lines based on comprehensive disaster analysis is proposed. Firstly, according to the coarse-grained characteristics of the time series of the meteorological disaster status and trends, the compound-disaster status and trends are classified and encoded. Secondly, by dividing compound disaster areas, compound geographic feature areas, and overlapping areas of compound disasters and geographic features, a granularity adaptive division method for line segments is proposed. Then, according to the mechanism of “offline optimization based on classification features, and online execution based on actual disaster situations”, the failure rate of each line segment under each type of compound-disaster status and trends is evaluated. Taking the disaster causing process of compound disasters as a whole, the time series of failure rate of each transmission line is obtained by aggregating the failure rates of line segments. Finally, the effectiveness of the proposed method is verified by taking the actual power grid operation data of a certain province in China as a case.

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; online evaluation; adaptive decision optimization

