

江西电网强对流灾害预警研究探讨

李 炜¹,朱 莎¹,胡 斐²

(1.国网江西省电力有限公司,江西 南昌 330077;2.国网江西省电力有限公司电力科学研究院,江西 南昌 330096)

摘 要:强对流天气是威胁电网安全的主要自然灾害之一。文中针对江西电网,分析了强对流灾害的时空分布与致灾特征;系统评估了中期、短期及短临三类气象预报的准确性,确认短临预警信号价值最高;在此基础上,构建了融合预警信息与实测数据的强对流影响指数,并验证其与停电用户数、倒杆断线等电网灾损指标间存在强相关性。研究表明,该指数可用于量化评估灾害强度与电网韧性,为构建精准高效的应急体系评价机制提供关键技术支撑。最后,针对当前不足提出了改进建议。

关键词:强对流;电网安全;短临预警;影响指数;灾损相关性;应急能力

中图分类号:TM 08 **文献标志码:**B **文章编号:**1006-348X(2026)02-0035-06

0 引言

强对流灾害发生频繁、影响范围广、致灾性强,是江西省最为严重的自然灾害之一,严重威胁电网安全稳定运行和电力可靠供应^[1-2]。近年来,极端天气事件频发,其引发的倒杆、断线、设备损坏等事故屡见不鲜,给电网企业带来了巨大的运行压力和社会影响^[3]。为提升电网防灾减灾与应急响应能力,对强对流灾害进行精准预测、科学评估其影响,并有效指导应对的研究变得至关重要。文中基于江西省近两年以来的八轮强对流天气过程,系统分析其灾害特征,检验气象预报准确性,重点探讨通过构建强对流影响指数以量化灾害强度、关联电网灾损、评价应急效能的方法,旨在为电网安全运行和应急管理决策提供科学依据和技术支持。

1 强对流灾害特征分析

江西强对流天气常表现为雷雨大风、短时强降水、雷暴、龙卷、冰雹、飏线等^[4-5],可总结为“风、雨、雷”三大方面,具有突发性强、生命史短、空间尺度小、

强度大等特点^[6-7]。本章将从时域、空间和风险三方面介绍强对流灾害的特征。

1.1 时域特征

江西省强对流天气主要出现在每年的春、夏季(3—8月),多以短时强降水、雷暴大风、冰雹等形式出现。从近十年大风、短时强降水的强对流分类频次来看,大风主要出现在3—4月,短时强降水主要出现在4—8月,如图1所示。

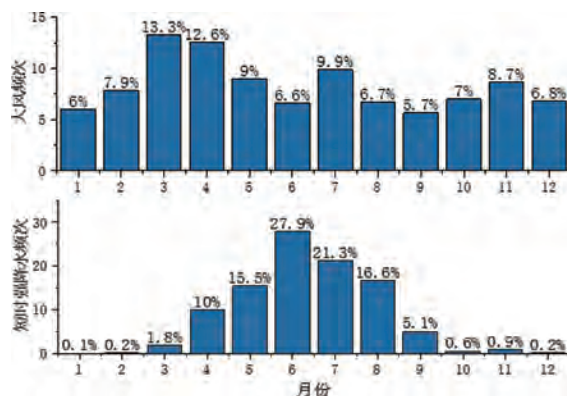


图1 近十年强对流天气月度发生频次分析

强对流在每天的各个时段均可能发生,但多在午后至夜间时段,特别是12—20时,这一区段内雷暴大风、短时强降水的发生频次占当日比例为46%左右,是灾害多发时段,如图2所示。

收稿日期:2025-11-28

作者简介:李炜(1985),男,硕士,高级工程师,长期从事电力数字化技术研究。

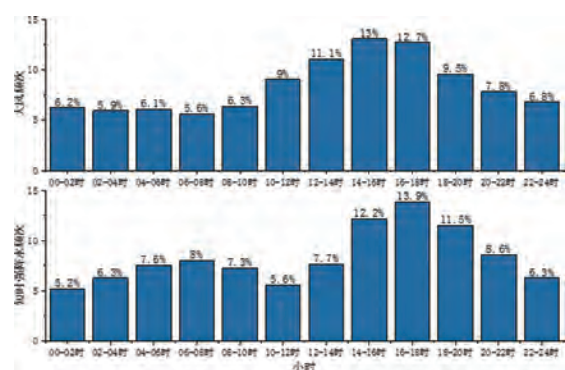


图2 近十年强对流日内发生频次分析

1.2 空间特征

在地理分布方面,江西大风的高发地区主要包括萍乡、九江、南昌、赣州;短时强降水的高发地区主要包括萍乡、南昌、景德镇。但从极大风发生规律看,环鄱阳湖地区最为突出,如图3所示。

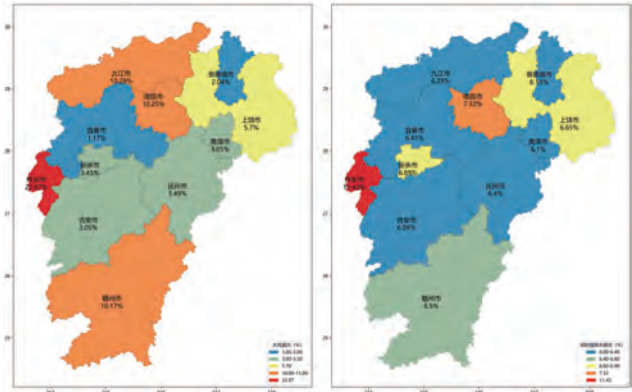


图3 近十年强对流影响区域频次分析

1.3 风险特征

我省平均每年强对流次数在5~15次左右,但由于近年来极端灾害天气频度烈度增加,对我省经济社会影响明显加强。如图4所示,强对流天气致灾性极强,已成为江西电网设备事件的首要致因(占比41.74%),其中风害(18.5%)和雷害(80.76%)最为突出。

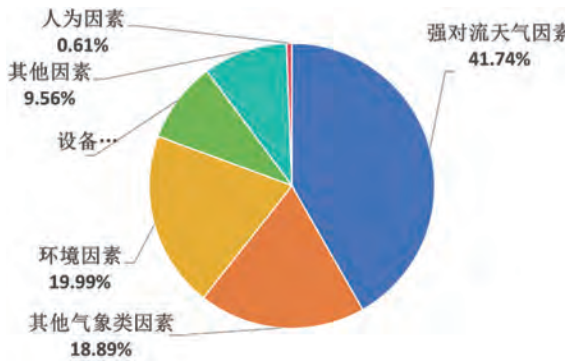


图4 2024年至今江西电网设备受灾事件分析

文中针对强对流“风、雨、雷”的形式,对近八轮强对流案例进行分析,结果如图5所示,85%以上的设备故障停运由强风导致,其中61%为树竹倒伏、异物漂浮等间接影响,39%为风偏、断线、倒杆等直接影响,后者对电网破坏更大,抢修周期更长。强对流期间,日均停电用户数较常态激增,极易引发较大社会影响,凸显了提升电网应对能力的紧迫性。

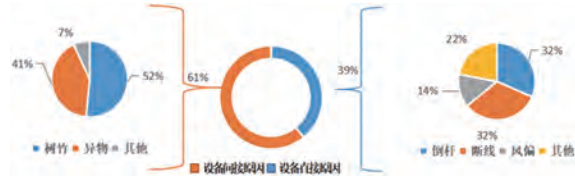


图5 强对流致灾方式分析

2 强对流气象预报准确性分析

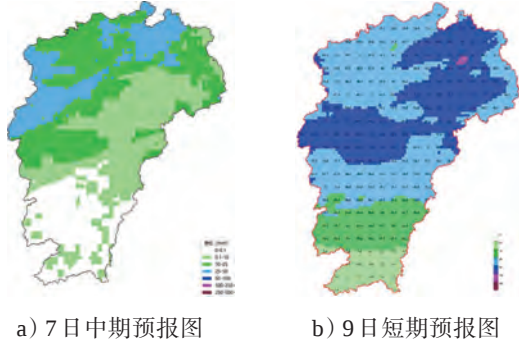
电网系统的安全稳定运行,高度依赖于精准、及时的气象预报信息。目前,电网防灾减灾工作所依据的气象预报产品,在时间尺度上已形成了一套完整的体系,主要包括展望性的趋势预报、规划级的中期预报、操作级的短期专报以及应急响应的短临预警信号。不同时间尺度的预报服务于电网不同的决策场景,其准确性的高低直接关系到防御措施的有效性与经济性。为科学、定量地评估当前强对流气象预报对于电网防灾的实际效用,本章首先对降雨、大风、落雷的预报与实况进行全过程比对,接着对短临预警信号准确性进行比对分析。

2.1 强对流全过程验证

以“4.11”强对流天气为例,将降雨、大风、落雷的“中期预报-短期预报-短临预警信号(预警信号)-气象实测”全过程信息绘图比对。

2.1.1 降雨全过程验证

图6的对比分析表明,在三类预警中,暴雨短临预警信号与气象实测的结果一致性最高。



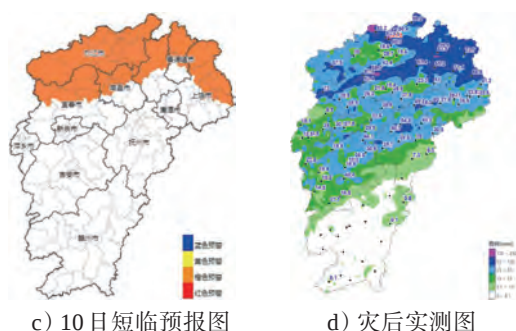


图6 “4.11”强对流降雨量全流程对应关系分析

2.1.2 大风全过程验证

由图7可以看出,大风短临预警信号与气象实测的结果一致性最高;但仍存在空报情况,主要原因是大风受地形影响较大且存在随机性,预警信号范围大于实际发生范围。

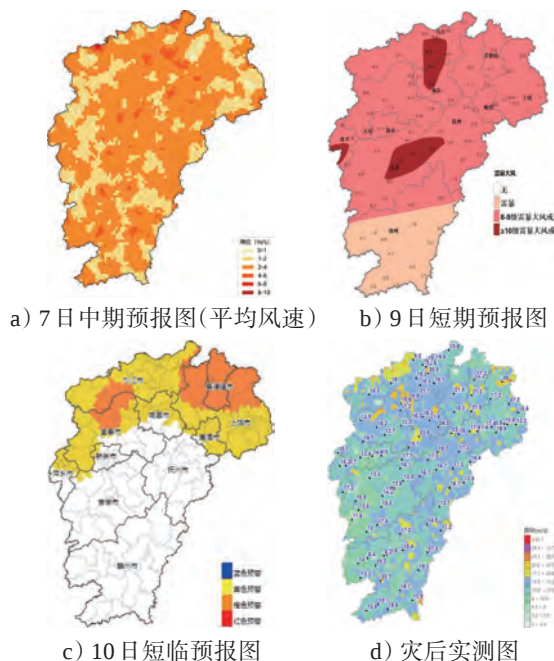


图7 “4.11”强对流风速全流程对应关系分析

2.1.3 落雷全过程验证

如图8所示,雷电短临预警信号与气象实测的结果一致性最高。

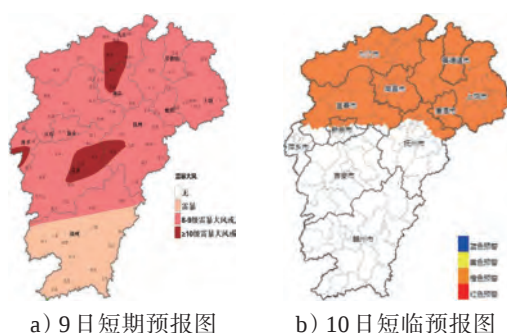


图8 “4.11”强对流落雷全流程对应关系分析

综合降雨、大风和落雷三个气象的全过程验证可以发现:中期预报可获取强对流的降水范围,短期预报可获取强对流的降水强度及分布、风力等级,短临预警信号与气象实测的结果一致性最高,应当将短临预警信号作为强对流的主要预报预测手段。

2.2 短临预警信号准确性比对分析

上一节的对比分析表明,短临预警在各类气象预警中具有最高的准确性。作为预防电网故障的关键技术手段之一^[8],电网短期临近气象预警对保障电力系统稳定运行具有重要意义^[9]。为进一步量化该预警信号的偏差水平,本节将其与相应时效内的气象实测数据进行空间叠加与比对分析。

2.2.1 暴雨预警信号比对结果

以“5.20”强对流天气为例,将暴雨橙色预警范围 and 对应时效内的累计降水量进行对比。

如图9所示,实际发生大雨(蓝色)、暴雨(深蓝色)区域都在暴雨预警范围内,暴雨预警预测效果优秀。

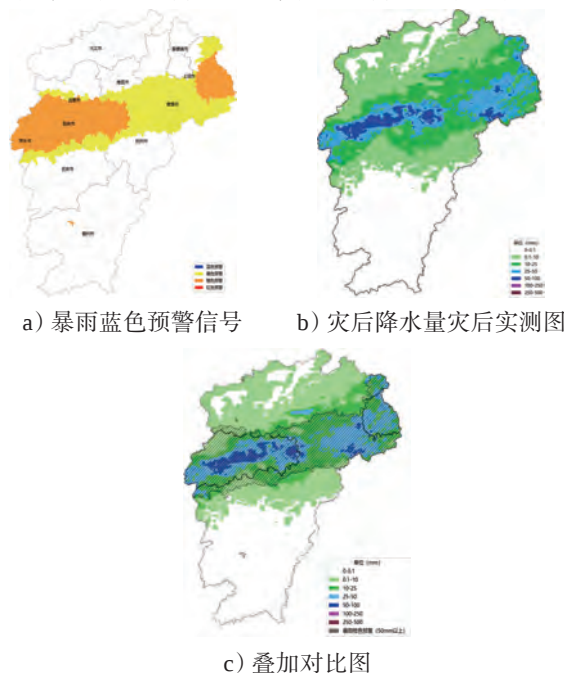


图9 “5.20”强对流暴雨橙色预警范围比对分析

2.2.2 大风预警信号比对结果

以“4.21”强对流天气为例,将大风橙色预警范围 and 对应时效内的平均风速、当天气象站观测的极大风数据三项数据进行对比。

如图 10 所示,实际 8 级以上大风(黑色圆点为 8~9 级,红色圆点为 10 级以上)大部分在大风预警范围内,少量 8 级以上大风出现在预警范围外,主要是受地形、极大风偶然性等影响,大风预警信号预测效果较好。

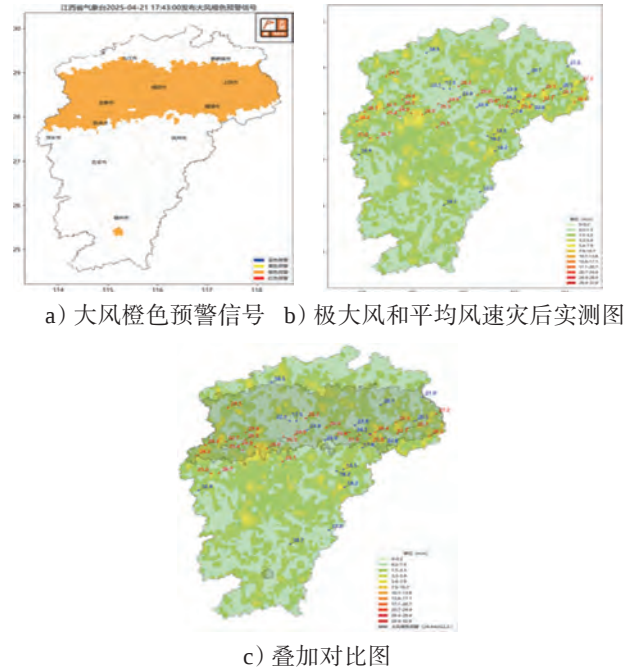


图 10 “4.21”强对流大风橙色预警范围比对分析

2.2.3 落雷预警信号比对结果

八轮强对流中,共四轮发布了省级雷电橙色预警,三轮发布了省级雷电黄色预警,下面选取“5.20”强对流天气为例,将雷电黄色预警范围 and 对应时效内的落雷分布情况进行对比。

如图 11 所示,实际雷电落点大部分在雷电预警范围内,且橙色预警区域内的实际落雷密度大于黄色预警区域,雷电预警信号预测效果较好。

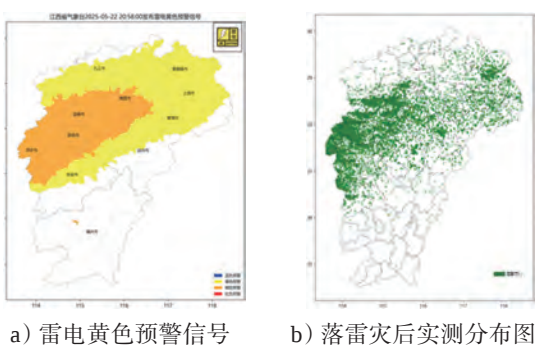


图 11 “5.20”强对流雷电黄色预警范围比对分析

经对比分析暴雨、大风及落雷的短临预警与实测数据,验证了短临预测模型在此三类天气现象中均具有良好的预测效果,这一发现可为后续构建高精度的强对流天气指数,提供关键依据和有力支持。

3 强对流影响指数构建及其与电网灾损相关性验证

强对流天气对电网的破坏是多重气象要素复杂作用的结果,单一的预报或实测指标均难以全面、量化地评估其综合致灾风险。为克服这一局限,文中旨在构建一个能够融合先验预警信息与实时观测数据、并充分反映致灾物理机制的复合评估指标——强对流影响指数(severe convection impact index, SCI),并将强对流影响指数用于分析江西各区县电网应对强对流灾害的能力。

3.1 指数构建方法

强对流影响指数需要综合考虑预警与实况的双重因素。气象部门的短临预警代表了基于现代探测和数值模式对灾害的先验预判,是启动应急响应、预置抢修力量的决策依据;而气象实况数据则记录了灾害的实际冲击强度,是灾后评估的直接依据。将二者结合,可使指数同时具备事前预警和事后评估的双重功能,贯穿于应急管理的全过程。因此,SCI由总预警指数(total warning index, TWX)和实测指数(observation index, OBS)相加构成,其基本框架如公式(1)所示。

$$W_{SCI}=W_{TWX}+W_{OBS}$$
 (1)

式中: W_{SCI} 表示强对流影响指数变量; W_{TWX} 表示总预警指数变量; W_{OBS} 表示实测指数变量。

3.1.1 TWX 构建

TWX旨在融合强对流“风、雨、雷”三大致灾因子

短临预警信号的发布情况。其构建首先对“风、雨、雷”三类预警分别计算指数,再进行加总,计算公式如(2)所示,其中 W_w 、 W_r 、 W_t 分别为大风、暴雨和雷电的预警指数。

$$W_{TWX}=W_w+W_r+W_t \quad (2)$$

各类预警指数的计算均采用分级线性赋权法,即预警等级越高,其代表的灾害预期风险越大,所赋权重值也越高。具体计算公式如(3)~(5)所示,其中 N_{orange}^w 、 N_{yellow}^w 和 N_{blue}^w 分别为评估时段内该区域发布的大风橙色、黄色和蓝色预警次数; N_{red}^r 、 N_{orange}^r 、 N_{yellow}^r 和 N_{blue}^r 分别为评估时段内该区域发布的暴雨红色、橙色、黄色和蓝色预警次数; N_{yellow}^t 和 N_{blue}^t 分别为评估时段内该区域发布的雷电黄色和蓝色预警次数。

$$W_w = 3N_{orange}^w + 2N_{yellow}^w + N_{blue}^w \quad (3)$$

$$W_r = 4N_{red}^r + 2N_{yellow}^r + N_{blue}^r \quad (4)$$

$$W_t = 2N_{orange}^t + N_{yellow}^t \quad (5)$$

3.1.2 OBS构建

OBS旨在量化强对流天气过程中关键致灾气象要素的实际观测强度。强对流天气中的“风、雨、雷”并非等效致灾,大风是导致电网倒杆、断线的最主要直接因素;短时强降水通过冲刷杆塔基础、引发地质滑坡间接构成威胁;雷电则主要导致电气设备绝缘击穿。因此,在构建指数时,需依据各要素的致灾能力差异,进行差异化赋权。

该部分采用阈值标准化方法,选取与电网损毁密切相关的关键气象要素——最大风速、最大小时雨强和累计降水量。针对各要素,根据其致灾物理机制设定参考阈值,进行归一化处理以消除量纲,并体现其相对破坏力,再赋予相应权重。OBS的计算公式如(6)所示,其中 V_{max} 为该时段内该区域最大风速, $R_{hourmax}$ 为该时段内该区域最大小时雨强, R_{total} 为时段内该区域累计降水量。

$$W_{OBS} = \frac{20V_{max}}{15} + \frac{15R_{hourmax}}{50} + \frac{10R_{total}}{100} \quad (6)$$

通过上述方法构建的SCI指数,不仅实现了多源信息的有效融合,更确保了其计算结果具有明确的物理意义和灾害指向性,为后续精准分析电网灾损与气象条件的相关性奠定了坚实基础。

3.2 指数与灾损相关性验证

为了验证强对流影响指数和实际灾损情况的相关性,本章开展了二者的相关性分析,分析结果反映

了不同市县区域电网应对强对流灾害的应急能力。

以“3.3”强对流天气为例,为区分强对流天气导致的停电情况,筛选停电用户数大于1.5万户的区县,将影响指数、倒杆数量、断线数量、停电用户数绘制得到图12。从图中可见,强对流影响指数和停电用户数趋势呈现出较强的一致性,强对流影响指数最强的区域和倒杆、断线最严重区域一致。

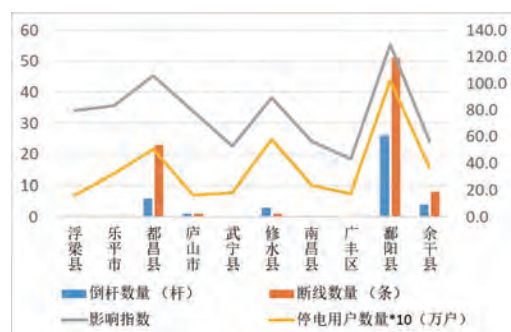


图12 3月2-3日灾损及强对流影响指数关联分析
(1.5万户以上)

对全部八轮次中停电用户数大于3万户的区县开展统计分析,共计区县30个。从图13中可见,停电用户数量和强对流影响指数趋势基本一致,93%的区县强对流影响指数在60以上,可以认为,如强对流影响指数在60以上,则极可能发生大范围用户停电事件。



图13 八轮灾损及影响指数关联分析 (3万户以上)

选取倒杆、断线大于1处的前五轮强对流,分别进行倒杆数量、断线数量与同期大风橙色/黄色预警累计次数、强对流影响指数的斯皮尔曼相关系数计算。

在八轮强对流事件中,前七轮引发倒杆断线灾害。鉴于“5.7”强对流灾害(仅1基倒杆+5处断线)及“5.20”强对流灾害(仅1处断线)样本量未达统计显著性阈值,仅对前五轮灾害数据开展气象相关性分析。

从表1中看出,倒杆、断线情况和强对流影响指数强相关(相关系数大于0.75)。其中第四轮次相关系数表现较差,主要是出现了3个区县无预警、极大

风处于六级,但发生倒杆、断线情况。

表1 倒杆相关系数计算表

强对流轮次	倒杆数量/杆	断线数量/条	倒杆和大风橙黄预警总次数(黄+橙)相关系数	倒杆和影响指数相关系数	断线和大风橙黄预警总次数(黄+橙)相关系数	断线和强对流影响指数相关系数
“3.3”强对流	40	85	0.9	0.93	0.78	0.91
“3.27”强对流	11	59	0.41	0.62	0.18	0.4
“4.11”强对流	13	47	0.71	0.8	0.59	0.71
“4.18”强对流	12	38	0.17	0.28	0.07	0.15
“4.21”强对流	107	143	0.82	0.91	0.69	0.83
整体	4	377	0.75	0.89	0.72	0.87

4 结语

文中通过分析江西八轮强对流过程,得出以下结论:首先,短临预警信号是当前准确性最高、对电网应急指挥最具指导价值的气象信息;其次,所构建的SCI指数能够有效量化强对流天气的综合致灾强度,且与电网实际灾损情况具有极强的统计学相关性,证实了其作为灾害评估工具的科学性和实用性。

基于上述结论,文中提出如下建议:一是强化短临预警的核心应用,将其作为应急响应启动和资源预置的刚性触发条件;二是深化SCI的实战应用,将其嵌入应急指挥系统(ECS),开发实时计算与可视化功能,实现灾害影响的动态感知与风险评估;三是构建基于SCI的应急后评价体系,通过横向(不同单位)纵向(不同过程)对比,精准查找电网韧性和应急流程中的薄弱环节,推动从“被动抢险”向

“精准预警-动态控制-持续进化”的现代化应急管理模式转变,最终全面提升江西电网应对极端天气的能力与韧性。

参考文献:

[1] 孙世军,朱坤双,韩洪.基于数据融合的电网强对流临近预警技术研究[J].电子设计工程,2023,31(12):53-57.

[2] 李存斌,计丽妍,赵德福,等.基于数据驱动的电力系统灾变演化及防控研究与展望[J].电力系统自化,2022,44(09):1-11.

[3] 何馥彤.电网灾变风险分析及应急能力评估模型研究[D].北京:华北电力大学,2024.

[4] 许海超.强对流灾害预警评估及对流系统寿命预测[D].天津:天津大学,2022.

[5] 刘英,柳崇健,周海光.突发性强灾害天气预警系统:理论与应用[J].地球科学进展,2008,11(23):1141-1149.

[6] 周之栩,尹浩,陶威.湖州“4·9”强对流天气特征分析[J].浙江气象,2021,42(01):7-10.

[7] 吴楠,喻迎春,刘玲,等.江西强对流天气预警信息发布质量评估和分析[J].科技传播,2021,13(19):39-42.

[8] 杜维柱,张晓华,卢毅,等.基于机器学习与数值预报技术的电网短期临近气象预警模型设计[J].电子设计工程,2023,31(19):99-103.

[9] 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风偏放电预警方法[J].电力自动化设备,2018,38(04):36-43.

(上接第10页)

[4] 尹太元,王跃,段国朝,等.基于零直流电压控制的混合型MMC-HVDC直流短路故障穿越策略[J].电工技术学报,2019,34(增刊1):343-351.

[5] 李红梅,行登江,高扬,等.子模块混联MMC-HVDC系统直流侧短路故障电流抑制方法[J].电力系统保护与控制,2016,44(20):57-64.

[6] 管敏渊,徐政,屠卿瑞,等.模块化多电平换流器型直流输电的调制策略[J].电力系统自动化,2010,34(02):48-52.

[7] 屠卿瑞,徐政,郑翔,等.模块化多电平换流器型直流输电内部环流机理分析[J].高电压技术,2010,36(02):547-552.

[8] 张建忠,陈桂,张雅倩,等.混合型MMC非闭锁型直流短路故障穿越策略分析和比较[J].电力自动化设备,2021,41(04):41-47,63.