

关于电力系统极端外部灾害主动防御技术的评述

郁琛^{1,2}, 常康^{1,2}, 刘韶峰^{1,2}, 黄燕^{1,2}, 王辉^{1,2}, 薛峰^{1,2}

(1. 南瑞集团(国网电力科学研究院)有限公司, 江苏南京 211106;

2. 智能电网保护和运行控制国家重点实验室, 江苏南京 211106)

摘要:近年来台风、山火、覆冰、暴雨等极端外部灾害频发,对电力系统安全稳定运行构成了重大威胁。亟需实现对全网的态势感知、在线决策和一体化协同防控。文中基于“双碳”能源转型与新型电力系统建设的新形势,论述了电力系统极端外部灾害及其对电网影响的新特征;构建了基于决策信息流的电力系统极端外部灾害防御全过程体系;提出了将停电防线拓展至系统级与设备级的资源统筹;最后,对电力系统极端外部灾害主动防御技术的发展方向进行了展望。

关键词:电力系统; 极端外部灾害; 主动防御; 风险评估

中图分类号: TM 711 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2023)02-0008-07

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20230202

A Review on Active Defense Technology of Extreme External Disasters in Power System

YU Chen^{1,2}, CHANG Kang^{1,2}, LIU Shaofeng^{1,2}, HUANG Yan^{1,2}, WANG Hui^{1,2}, XUE Feng^{1,2}

(1. NARI Group Corporation/State Grid Electric Power Research Institute, Nanjing 211106, Jiangsu, China;

2. State Key Laboratory of Smart Grid Protection and Control, Nanjing 211106, Jiangsu, China)

Abstract: In recent years, the frequent occurrence of extreme external disasters such as typhoons, mountain fires, ice cover and rainstorms has become a major threat to the safe and stable operation of power system. Network-wide situation awareness, online decision-making and integrated collaborative prevention and control are urgently needed. Based on the "double carbon" energy transformation and the new situation of power system construction, the new features of extreme external disasters and their impacts on power grid are described, the extreme external disaster prevention system based on information flow in decision-making process is constructed, and the resources planning is put forward to expand power line to the system level and equipment level. Finally, the development direction of active defense technology for extreme external disasters in power system is prospected.

Key words: power system; extreme external disasters; active defense; risk assessment

0 引言

台风、覆冰、山火、暴雨、高温、寒潮等极端外部灾害的频频肆虐给电力系统安全稳定运行带来了空前挑战^[1]。例如:2013年,国家电网有限公司运营范围内110 kV及以上的输电线路因山火跳闸次数达97条次,其中500 kV及以上线路跳闸37条次,

基金项目: 国家电网有限公司科技项目“融合 SG-ECS 全局信息的电网极端外部灾害应急决策支持技术研究与应用”(5108-202218280A-2-93-XG)

锦苏、复奉等多条特高压直流线路因山火发生闭锁或异常;2016年9月15日,受台风“莫兰迪”影响,福建电网电力基础设施损失严重,“莫兰迪”对厦门电网造成了毁灭性重创^[2],6座220 kV变电站、21条220 kV线路、45座110 kV变电站、52条110 kV线路、10 743台配电变压器、713条10 kV线路停运,造成福建全省165万用户停电;2018年1月25日至31日,中国南方地区发生了一轮大范围电网冰灾,覆冰线路超过2500条次,华中、华东电网33条500 kV线路停运,220 kV以下线路跳闸2394条次,损失负

荷 1039 MW;2020 年 12 月,湖南电网 90% 以上的风机因覆冰退出运行,装机容量达 5500 MW 的风电场出力陡降至 169 MW,极大影响了电网安全和电力供应,加剧了中国南方冬季供电缺口;2022 年 7 月至 8 月,四川省面临历史同期最高极端气温、历史同期最少降雨量、历史同期最高电力负荷“三最”叠加的严峻局面,极端高温灾害与干旱灾害并行,电力供需矛盾极为突出,为让电于民,工业、商业用电分别从 463 GWh、225 GWh 降至 156 GWh、192 GWh^[3]。以上案例充分反映了将电力系统停电防御框架向外部灾害预警及应急处置延伸的必要性。

文献[4]提出了将传统安全稳定防御系统拓展到自然灾害防御系统的具体改进要求,包括广域的信息采集、自然灾害引发电力系统故障的量化分析、通过调度系统动态生成的预防控制、灾害发生过程中的应急控制以及灾后的恢复控制等。文献[1]针对安全稳定防御系统的改进要求,提出了针对不同灾害的自适应外部环境的预警防御方法。文献[5-10]分别针对雷电、山火、覆冰、台风、暴雨等单一外部灾害,基于致灾分析的机理模型或数据驱动的人工智能算法,建立了输变电设备故障概率评估模型。文献[11-13]设计并构建了应对若干外部灾害的电网监测预警及安全稳定防御系统。文献[14]从外部灾害防御所需的信息采集、外部灾害下电力系统风险评估以及应对外部灾害的电力系统安全稳定控制方法等方面总结了相关研究现状。文献[15]分析了电网安全稳定各道防线的风险控制代价特征,提出了适应灾害下概率及损失变化特征的风险控制策略。

下面进一步基于“双碳”能源转型与新型电力系统建设的新背景、新形势,论述电力系统极端外部灾害及其对电网影响的新特征,构建电力系统极端外部灾害防御的全过程体系,并提出相应的防御方法。

1 电力系统极端外部灾害及其对电网影响的新特征

1.1 极端外部灾害耦合关系趋于复杂多变

从气候系统的综合观测和多项关键指标表明,全球变暖趋势仍在持续并进一步加剧全球水循环,极端事件将变得更为严重,呈现出种类多、分布地域广、发生频率高、造成损失重、灾害风险高等特点^[16]。中国高温、强降水等极端天气气候事件趋

多、趋强,登陆中国的台风平均强度波动增强。气候复杂多样、时空变化大,使得电力系统面临的极端外部灾害从单一灾种向多灾种耦合发展,各灾害之间可能并发施加破坏影响,也可能相互诱发、推波助澜。

2021 年夏季,台风“烟花”在浙江登陆并直接影响上海、江苏、安徽等多个省份,造成浙江省 318 万余户停电^[17]。而台风“烟花”其外围和副高南侧的偏东气流引导大量水汽向中国内陆地区输送,加之其他天气系统以及地形等因素的共同作用,导致河南省出现历史罕见的极端强降雨^[18],河南省各地电网不同程度受损,其中仅郑州因灾停电的用户就达到 126 万户^[19]。

2022 年夏季,川渝地区极端高温干旱天气持续,极易引发山火险情。8 月 21 日,重庆市巴南区界石镇突发山火,让电力线路面临持续高温、山火双重“烤”验,导致 500 kV 珞南一、二线故障,严重危害电网安全稳定运行,给重庆迎峰度夏电力保供带来巨大调整挑战^[20]。

1.2 电网更易受灾且后果更严重

在“双碳”及能源转型目标下,随着新型电力系统的建设,新能源发电比例增大和电力电子广泛应用,使系统频率、电压、惯量、备用等安全稳定支撑能力不足,电网抗扰性下降,更易受极端外部灾害影响。与此同时,大电网联系紧密,承担远距离输电任务的特高压线路以及重要跨区输电线路,经常跨越茂密林区和植被丰富区,使局部故障影响全局化、电网稳定形态复杂、极端恶劣天气等对电网的影响加大。由此引发输变电设备群发性故障,并有可能进一步催生连锁反应,引发更严重后果。

在 2021 年 7 月至 8 月河南持续强降雨应急处置中,500 kV 官渡变电站存在设备停运的重大风险。而该站作为郑州东北区域最重要的电源枢纽,担负着重要用户供电任务,同时也是特高压天中直流的重要配套工程,一旦有失,引发的连锁反应后果不堪设想。国网河南省电力公司紧急调派 200 余人的应急队伍赶赴现场,奋战 6 个昼夜解除了该变电站险情^[19]。

2021 年 2 月,美国得克萨斯州遭遇冬季风暴。在低温与冰雪风暴的双重夹击下,缺少防寒装备的风力发电机组因大规模结冻而无法正常运转。由于加压输气、供应火力发电的柴油机组系统在低温状态中凝固结冻,输气系统陆续低温停摆,让火力发电

厂瘫痪。最终引发该州历史上最为严重的电力供能危机,造成 400 万用户停电,供水、供气中断,死亡至少 40 人,电价上升百倍,能源市场陷入混乱,引发巨大社会灾难和能源安全舆论^[21]。

1.3 电网风险评估维度增多且难度增大

极端外部灾害下电网风险评估指标应涵盖输变电设备受灾程度、电网安全稳定运行、重要负荷失电、保电场景等多个层面,指标体系维度大大增加。并且由于电网应急场景演化的复杂机理、多级电网设备的电气和物理关联导致了不同维度之间关联特征难以识别。同时,电网内部海量设备类型和数量,也极大地增加了基于不同设备的评估指标复杂性。此外,上述多维风险指标还要考虑到不同时序变化、不同设备耦合、保电场景中保供任务的等级和时长等因素。因此,构建满足风险评估和不同应急决策需求的综合风险评估指标,是电力系统外部灾害主动防御的关键和难点。

1.4 电网应对手段愈发多样但协调难度大

从一次系统角度提高设计标准以避免故障,是较为直接的外部灾害防御方法。但一次系统的投资将随设计标准的提高而急剧增加,而且总有一些比设计依据更严重的灾难场景仍然不能单纯依靠一次系统来抵御。因此,属于二次系统的停电防御系统不可或缺^[22]。

在外部灾害发生前、发生过程中和发生后,需要

通过不同的安全稳定控制方法减小故障损失。预防控制,是在故障前调整系统运行方式,使高风险故障发生后系统依然保持稳定运行。应急控制,是在故障发生后,一方面通过紧急控制措施保证电网的稳定;另一方面对自然灾害造成的电网设备故障进行修复。恢复控制,是对因自然灾害造成的停电区域恢复供电,减小因停电造成的损失。

此外,随着电网形态的发展,包括可控负荷、储能、直流功率调制技术等电网调控新手段,在评估其有效性和灵敏性后,亦可作为有效应对措施。

然而上述应对手段,或处于电网状态演变的不同阶段,或分属于电网公司不同业务部门,在技术和管理上都存在着协调优化的难度。需要以全过程防控风险最小为目标,研究各应对措施之间的协调优化方法,打破信息与管理壁垒。

2 电力系统极端外部灾害防御全过程体系

2.1 极端外部灾害防御全过程体系

下面从电力系统可靠供电风险、碳平衡风险两个方面,以及广域信息采集、数据挖掘分析、评估决策支持 3 个维度建立极端外部灾害防御全过程体系,如图 1 所示。其主要内涵包括:1)电力系统内、

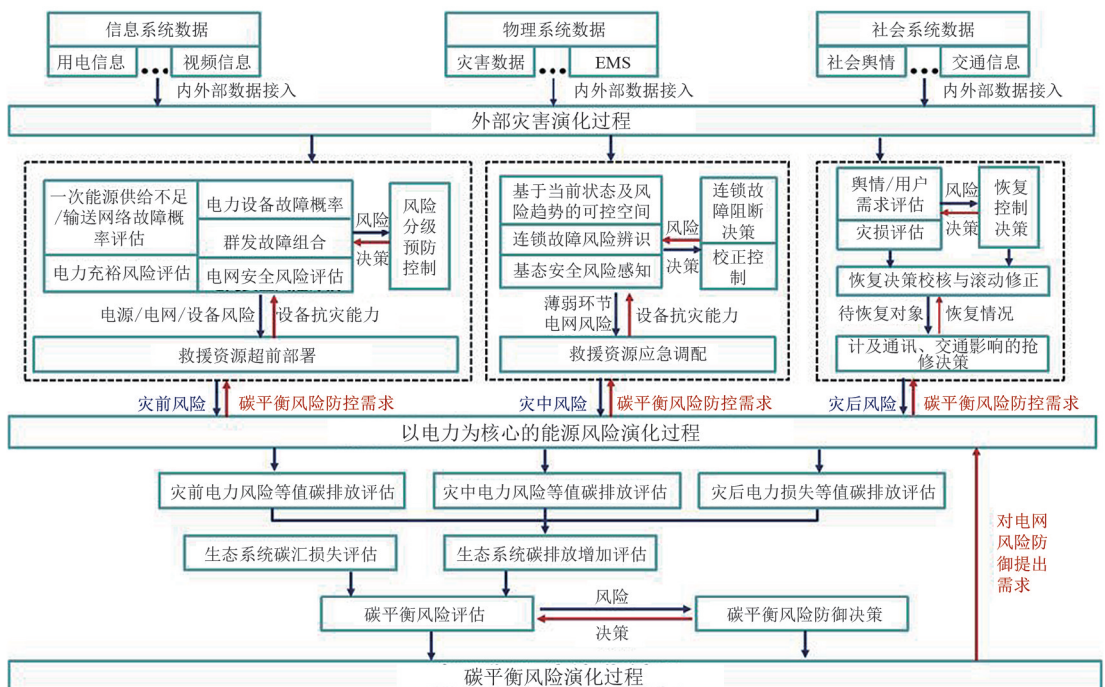


图 1 极端外部灾害防御全过程体系框架

外部数据的整合;2)在外部灾害发生发展的不同阶段实现全过程防御,包括灾前预警预控阶段(人、设备、物资的超前部署)、灾中快速分析与阻断(应急调配)、灾后有序恢复(应急抢修),实现电力可靠供电中电网调控与应急抢修之间的协调;3)以电力为核心,整合灾害风险、电力可靠供电风险以及碳平衡风险的演化过程,实现碳平衡风险与电力可靠供电风险间的协调;4)基于外部环境综合分析的输变电设备故障概率评估与发电能力不足概率评估。

2.2 极端外部灾害防御决策过程

电力系统极端外部灾害防御决策过程可分为灾前预案制定和灾后应急抢修决策,如图2所示。

灾前的预案制定过程:首先,基于气象要素及自然灾害监测预报系统(例如雷电定位分析系统^[23]、山火雷达实时监测系统^[24]、输电线路覆冰监测系统^[25]、台风预警系统等),在外部环境综合分析系统(平台)上进行自然灾害的智能匹配;其次,根据外部灾害种类的特征,对其演化轨迹进行预测,如山火蔓延预测、覆冰厚度增长预测、雷电区域外推预测等;然后,结合电网模型数据及相关地理地形信息,对自然灾害下电力系统设备的故障概率进行评估;接着,进一步结合电网实时运行信息,对电网进行风险评估或事故等级评估;最后,根据电网风险评估结果,提前进行救灾抢修预案推演及人员物资的部署。对于灾前的预案制定方法,有不少文献进行了研究。文献[26]提出了一种基于时间序列迭代的输电线路覆冰厚度估计方法。文献[27]则将覆冰状态预测拓展到了风机叶片,将发电侧受灾影响纳入风险评估范围。文献[28]结合应用统计学原理建立了一种优化的电网山火风险预警模型。文献[29]

将台风灾害下的输电线路故障概率评估模型提升为输电通道故障概率评估模型。文献[30]提出灾前电网预防分区方法,在预测防护阶段依据故障概率和拓扑连通度进行电网分区,并通过支路有功调整降低灾害抵御阶段系统失稳的风险。文献[31]综合考虑电网韧性与经济性,提出了台风灾害下灵活性资源提前布点优化算法。

灾后的抢修决策过程:首先,基于信息技术,实时采集移动载体上的各类信息,如抢修车辆信息、物资装备信息、抢修队伍及其携带的抢修APP信息、无人机勘灾反馈信息等,并在智能调度指挥系统(平台)进行数据整合;然后,进一步结合灾损统计与道路交通信息等,形成救灾抢修智能调度方案,并实时更新修正、支撑决策制定。其中,智能调度指挥系统(平台)进行数据整合时可通过缓冲网^[32]的架构,付出一定的响应时滞,实现信息安全校核、过滤及边缘计算任务分配,为广义环境下的电网控制决策提供安全、有效、精炼的数据支撑。为及时掌握极端灾害情况下对电网的影响或破坏等信息,有效地协助灾后指挥及修复工作,文献[33]提出了一种基于时空地理网格的电网多源数据融合方法。文献[34]提出了一种极端灾害下考虑动态重构的微网形成策略,以充分发挥燃气轮机、燃料电池等可控分布式电源在极端灾害下的支撑作用。文献[35]将道路交通实时状态(受损)等外部系统信息应用于灾后的应急抢修策略。文献[36]将移动储能及其优化配置策略纳入台风灾害后的电网恢复方案中。文献[37]提出了电动汽车参与供电恢复的台风灾害下电网恢复策略,并验证了其经济性及恢复效果优于应急发电车。文献[38]进一步提出了电力

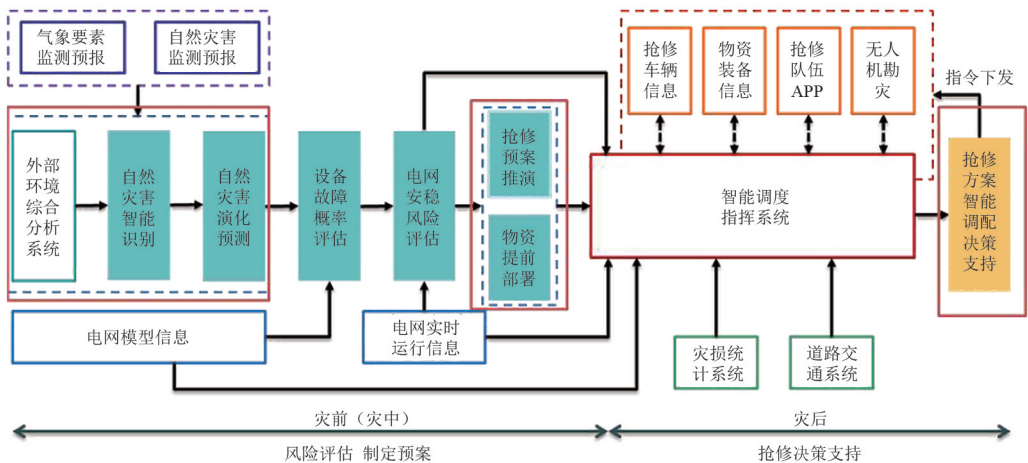


图2 电网灾害防御决策过程

与通信动态交互影响的电网灾害故障协调恢复方法,以提升极端灾害下电网故障恢复能力。

2.3 极端外部灾害防御信息流

电力系统极端外部灾害防御,涉及到电力系统内部信息与外部信息的融合,如图 3 所示:内部信息包括电网模型、电网实时运行数据等;外部信息中,既有静态的地形、地貌信息,又有灾损统计等各类动态信息,还有抢修车辆、队伍等移动载体信息。这些信息不但数量庞大、大量冗余,还有安全风险隐患。例如,通过无人机等信息终端所采集的数据极易被黑客劫持并注入恶意代码或指令。这些信息终端若能够直接进入电力内网,则电网将暴露在遭受黑客攻击的极端风险之下。为此,可以利用缓冲网^[32]架构对上述信息进行安全性分析后再进入电力系统内网。

缓冲网利用电力内网与公用网对响应速度要求上的差别,付出额外的时滞来换取信息安全防御的可行性,使其成为电力内网与公用网之间信息安全的枢纽。此外,部分计算功能可在信息缓冲区通过边缘计算实现,使得只需要向内网传递知识提取后的少量信息,缩短了响应时滞,减少了内网的信息处理量,提高了信息可靠性。

3 电力系统极端外部灾害防线拓展

3.1 统筹系统级与设备级的需求和资源

电力系统极端外部灾害防御中,如何快速识别

出对电网安全稳定运行、重要用户保电风险影响较大的关键设备,并对其进行应急资源超前布控及优化调配,成为阻断故障演化及连锁反应的关键。为此,需要将风险防御延拓,通过保设备安全来保电网安全和供电安全。

2018 年 1 月下旬的雨雪冰冻灾害期间,湖南电网结构破坏较大:1 月 27 日 9:21 时,祁韶直流线路双极由于 4491 塔(湖南湘潭)线路绝缘子因覆冰影响出现间歇性拉弧,进一步降压至 400 kV 运行(双极低端停运);1 月 27 日 20:22 时,宾金直流线路双极因 1508 塔(湖南益阳)覆冰严重,降压 70% 运行。至此,复奉、锦苏、宾金、祁韶、灵绍、江城、林枫直流线路降压运行,龙政、葛南、宜华直流线路双极停运,天中、德宝直流线路因受端安控系统直流调制量约束,功率分别调减至 4800 MW、2200 MW,安全形势异常严峻。国网湖南公司紧急核算临时方式,利用娄底市 500 kV 民丰变电站直流融冰装置连续对 500 kV 五民线、220 kV 民沅线等多条重要线路提前实施融冰,保障了湖南电网主网架安全稳定运行。

由此可见,需要基于电网安全稳定运行在线量化评估技术,对关键风险设备进行快速识别、优化应急处置的对象和时序,以此适应外部灾害演变与电网运行方式变化,提升极端外部灾害防御决策的智能化与精细化。为此,需要统筹全网系统级与设备级的全局资源进行应对。

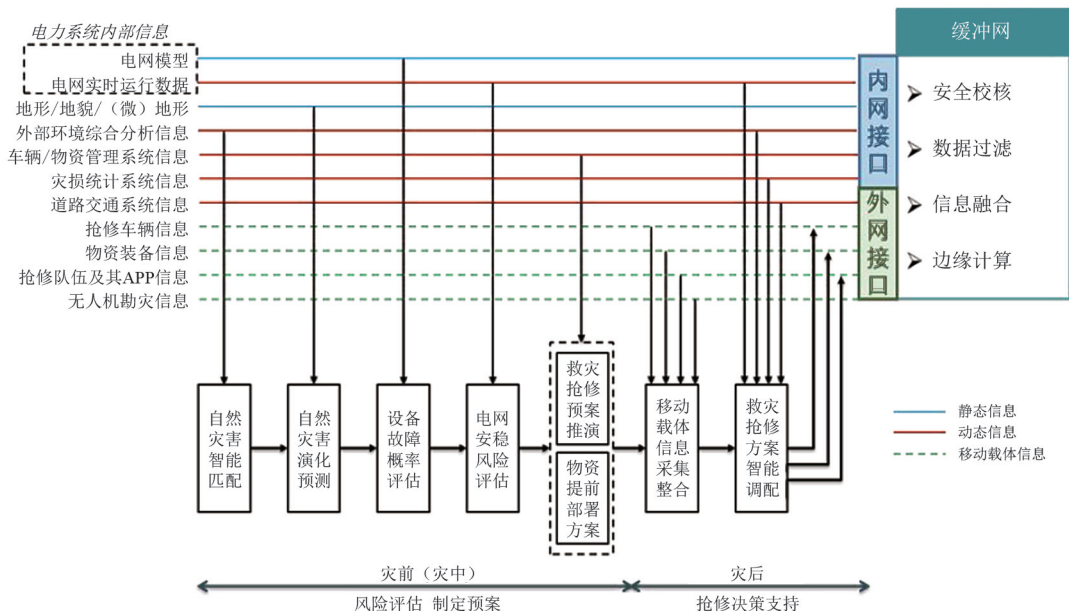


图 3 极端外部灾害防御信息流

3.2 实现防线拓展的平台基础

2020年,国家电力调度通信中心牵头研发的新一代调度技术支持系统,在传统自动化系统运行控制平台和模型驱动型应用的基础上,运用云计算、大数据、人工智能等IT新兴技术,构建云计算平台和数据驱动型应用的新一代调度技术支持系统。在体系架构上,基于生产控制子平台和调控云子平台两种平台,构建实时监控、自动控制、分析校核、培训仿真、计划市场、运行评估、调度管理和数据服务八大类业务应用,利用调度数据网、综合数据网和互联网3种网络,广泛采集发电厂、变电站、外部气象环境、用电采集、电动汽车以及柔性负荷等数据,并基于人机云终端,实现对两种平台、八大类业务应用的统一浏览查看。目前系统处于试点应用阶段。

2021年,国家电网公司安监部牵头建设了新一代应急指挥系统(SG-ECS),通过数据中台接入用电信息采集系统、调控云系统等业务系统,统一车辆平台、应急队伍管理系统等相关数据,能够实现电网运行、设备状态、物资调配、电网GIS等信息的互联互通和资源共享,力争涵盖结构化预案、灾情监测、灾损恢复、资源调配、重要保电等多方面业务需求。SG-ECS目前正在山东、上海等网省公司进行试点,尚处于应用场景探索与研发期。

综上所述,基于开放式的架构融合更广域的信息来保障电网安全和供电安全是统一的发展趋势。上述新一代系统为统筹系统级与设备级的需求和资源提供了全局信息与平台基础。但仍需进一步通过服务化接口向应急指挥人员、调度人员、抢修人员提供电网综合风险量化服务、应急处置服务等。并通过不同业务服务化的互调互用,实现调度、运检等不同业务部门的协同。

4 电力系统极端外部灾害防御的研究展望

对于极端外部灾害,需要统筹全网系统级与设备级的全局资源进行应对,目前主要面临以下6方面的问题:

1) 极端外部灾害下的电力系统输变电设备故障概率及风险评估大多局限于单一灾种场景,鲜少计及各灾种之间的耦合关联关系,缺少复合灾害下的综合评估^[39];

2) 缺少综合考虑设备故障及连锁反应对全网安全稳定运行与重要负荷保电风险的量化评估指标;

3) 仅通过电网运行方式的预调来减轻外部灾害对电网的扰动以及降低灾害一旦发生后的停电损失,存在代价高、难以阻断故障演化的问题;

4) 输变电设备外部灾害应急处置基本依赖离线预案和人工经验,难以应对灾害演变与电网运行方式变化;

5) 在应急资源有限的情况下,缺少根据综合风险排序进行资源优化调度的决策支撑;

6) 需要加强各内、外部系统的信息互通、协调优化电力系统各道防线的控制措施、协同处理各业务部门的应对流程。

为此,建议的研究方向包括:

1) 在细化电力系统外部灾害防御数据需求的基础上,研究建立基于缓冲网架构的内、外部数据整合平台。统筹各专业资源,打破数据壁垒,加强资源整合,实现电网运行、设备状态、物资调配、电网GIS等信息的互联互通和资源共享,确保突发事件情况下应急管理实时化、可视化、智能化、数字化,有效提升突发事件应对能力。

2) 跟踪灾害演变趋势与电网方式动态变化,基于电网安全稳定运行在线量化评估技术,研究快速识别影响电网安全稳定运行与重要负荷保电的关键设备集,提升防御决策的精细化水平。

3) 基于时序风险提前对关键输变电设备进行应急资源优化部署,研究人员、车辆、物资、装备等应急资源的超前布控与紧急调整方法。

4) 进一步拓展电力系统极端外部灾害防御所关注的受灾设备。例如,风机叶片覆冰的机理分析、预测、故障模型建立及风机叶片融冰技术的研究。

5) 在信息物理社会系统(cyber-physical-social system, CPSS)框架下,研究计及相关外部系统的信息,提升防御决策的可行性与精确性。例如,将道路交通实时状态(受损)等外部系统信息应用于灾后的应急抢修策略^[40]。

6) 协调优化外部灾害防御措施与电网恢复控制方案^[26],有效减少电网受灾停电事故后的负荷停电损失和再次停电的风险,为应急指挥中心和运检部门合理调配应急人力、物力提供建议,综合提升电网停电防御及防灾减灾能力。

5 结 论

电力系统极端外部灾害防御在“双碳”及能源转型目标下,需要基于电网全局信息的融合以及电力系统内、外部信息的融合,实现系统级与设备级安全的统筹、协调、优化,自适应极端外部灾害及电网运行趋势变化,并提升其应急决策的智能化、精细化水平,更加精准、高效地通过保设备安全来保电网安全和供电安全。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 澎湃新闻.台风“莫兰蒂”深夜登陆重创厦门电网,致全市大面积停电[EB/OL].(2016-09-15)[2022-08-28].https://www.thepaper.cn/newsDetail_forward_1529153.
- [3] 国网四川省电力公司.四川启动突发事件能源供应保障一级应急响应[EB/OL].(2022-08-21)[2022-08-28].http://www.sc.sgcc.com.cn/html/main/col8/2022-08/21/20220821132642844109393_1.html.
- [4] 薛禹胜,费胜英,卜凡强.极端外部灾害中的停电防御系统的构思(一)新的挑战与反思[J].电力系统自动化,2009,32(9):1-6.
- [5] 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.
- [6] XIE Yunyun, LI Chaojie, LV Youjie, et al. Predicting lightning outages of transmission lines using Generalized Regression Neural Network [J]. Applied Soft Computing Journal, 2019, 78:438-446.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] YU Chen, HUANG Yan, CHANG Kang, et al. The early warning of icing flashover fault of transmission line based on partial mutual information method and support vector machine [C]. 4th IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration, Wuhan, IEEE: 2020.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] CHANG Kang, YU Chen, LIU Shaofeng, et al. Design and application of power grid security risk assessment and hierarchical control system in natural disasters [C]. International Conference on Power System Technology, Haikou, China, 2021.
- [14] 罗剑波,郁琛,谢云云,等.关于自然灾害下电力系统安全稳定防御方法的评述[J].电力系统保护与控制,2018,46(6):158-170.
- [15] 常康,徐泰山,郁琛,等.自然灾害下电网运行风险控制策略探讨[J].电力系统保护与控制,2019,47(10):73-81.
- [16] 中国气象局.中国气候变化蓝皮书(2022)[M].北京:科学出版社,2022.
- [17] 中国电力报.“烟花”来袭!能源电力员工全力保供应[EB/OL].(2021-07-29)[2022-08-28].<https://baijiahao.baidu.com/sid=1706314194642910362&wfr=spider&for=pc>.
- [18] 中国天气网.官方解读河南极端强降雨成因[EB/OL].(2021-07-21)[2022-08-28].<https://baijiahao.baidu.com/sid=1705866914999242948&wfr=spider&for=pc>.
- [19] 国网河南省电力公司.众志成城,捍卫光明[EB/OL].(2021-08-11)[2022-08-28].http://www.ha.sgcc.com.cn/html/main/col8/2021-08/11/20210811165700815420304_1.html.
- [20] 国网重庆市电力公司.国网重庆电力苦战 24 小时恢复输电“大动脉”正常运行[EB/OL].(2022-08-24)[2022-08-28].http://www.cq.sgcc.com.cn/html/main/col8/2022-08/24/20220824151136717557524_1.html.
- [21] 钟海旺,钟海旺,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.
- [22] 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.
- [23] 张启明,周自强,谷山强,等.海量雷电监测数据云计算应用技术[J].电力系统自动化,2012,36(24):58-63.
- [24] 李江,曹永兴,朱军,等.输电线路山火雷达实时监测技术及应用研究[J].四川电力技术,2021,44(1):53-57.
- [25] 徐志钮,李先锋,郭一帆,等.基于温度滞后相位的输电线路覆冰监测方法[J].电力工程技术,2022,41(6):91-100.

- [16] 王成山,董博,于浩,等.智慧城市综合能源系统数字孪生技术及应用[J].中国电机工程学报,2021,41(5):1597-1608.
- [17] SHI J, DING Z H, LEE W J, et al. Hybrid forecasting model for very-short term wind power forecasting based on grey relational analysis and wind speed distribution features [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(1):521-526.
- [18] WANG Yanliang, XIANG Yue. Photovoltaic-storage energy system management considering wireless data communication [J].Energy Reports, 2022,8:267-273.
- [19] WEI Xiangyu, XIANG Yue, LI Junlong. Wind power bidding coordinated with energy storage system operation in real-time electricity market: A maximum entropy deep reinforcement learning approach [J]. Energy Reports, 2022,8:770-775.
- [20] 陈振宇,刘金波,李晨,等.基于 LSTM 与 XGBoost 组合模型的超短期电力负荷预测[J].电网技术,2020,44(2):614-620.
- [21] YAO Xiaotong, FU Xiaoli, ZONG Chaofei. Short-term load forecasting method based on feature preference strategy and light GBM-XGboost [J]. IEEE Access, 2022,10:75257-75268.
- [22] 吴春华,董阿龙,李智华,等.基于图相似日和 PSO-XGBoost 的光伏功率预测[J].高电压技术,2022,48(8):3250-3259.

作者简介:

代佳琨(1999),男,硕士研究生,研究方向为新能源出力预测;

向月(1987),男,博士,副教授,研究方向为新型电力系统规划与运行;

刘俊勇(1962),男,博士,教授,研究方向为电力系统分析、调度与市场等;

张新(1983),男,博士,教授,研究方向为新能源电力系统规划与运行。

(收稿日期:2022-08-26)

(上接第 14 页)

- [26] 吴天宝,马小敏,唐军,等.基于时间序列迭代的输电线路覆冰厚度估计方法[J].四川电力技术,2022,45(5):20-25.
- [27] 熊昌全,何泽其,张宇宁,等.基于 Bi-LSTM 和支持向量机的风机叶片短期覆冰状态预测模型[J].四川电力技术,2021,44(3):88-94.
- [28] 周恩泽,胡思雨,张录军,等.电网山火灾害特征及风险预警技术[J].电力工程技术,2020,39(3):58-64.
- [29] 陈莹,王松岩,陈彬,等.台风环境下考虑地理高程信息的输电通道结构失效故障概率评估方法[J].电网技术,2018,42(7):2295-2302.
- [30] 刘天浩,朱元振,孙润稼,等.极端自然灾害下电力信息物理系统韧性增强策略[J].电力系统自动化,2021,45(3):40-48.
- [31] 马丽叶,王海锋,卢志刚,等.计及相关性影响的台风灾害下灵活性资源韧性规划[J].电力系统自动化,2022,46(7):60-68.
- [32] 薛禹胜.两网融合支撑下的停电防御框架(电力系统自动化公众号)[EB/OL].(2019-07-21)[2022-08-28].
<https://mp.weixin.qq.com/s/LWbyLwLWsltyXxGXIpFcQ>.
- [33] 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.
- [34] 张瑞曦,徐青山,程煜,等.极端灾害下考虑动态重构的微网形成策略[J].电力工程技术,2022,41(1):56-63.
- [35] 郁琛,李尚轩,谢云云,等.考虑交通网与配电网信息融合的台风后配电网抢修策略优化[J].电力系统自动化,2022,46(4):15-24.
- [36] 张璐,黄睿,王照琪,等.考虑恢复力与经济性均衡的配电网移动储能优化配置策略[J].电力系统自动化,2020,44(21):23-31.
- [37] 杨祺铭,李更丰,别朝红,等.台风灾害下基于 V2G 的城市配电网弹性提升策略[J].电力系统自动化,2022,46(12):130-139.
- [38] 姚卓磊,黄文焘,余墨多,等.智能配电网电力-通信灾害故障动态协调恢复方法[J].电力系统自动化,2022,46(19):87-94.
- [39] 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.
- [40] LI Z, XUE Y, WANG 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.

作者简介:

郁琛(1985),男,博士,高级工程师,研究方向为电力系统外部灾害防御;

常康(1983),男,博士研究生,高级工程师,研究方向为电力系统外部灾害防御;

刘韶峰(1977),男,硕士,高级工程师,研究方向为新能源并网控制及电力系统安全稳定控制。

(收稿日期:2022-08-30)