

引用格式: 曹辰, 王增平. 极端天气对新型电力系统的影响及应对措施思考 [J]. 南方能源建设, 2025, 12(1): 43-57. CAO Chen, WANG Zengping. Reflections on the impact of extreme weather on new power systems and countermeasures [J]. Southern energy construction, 2025, 12(1): 43-57. DOI: 10.16516/j.ceec.2024-367.

极端天气对新型电力系统的影响及应对措施思考

曹辰, 王增平[✉]

(华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206)

摘要: [目的] 近年来, 受气候变暖等因素影响, 全球范围内极端天气事件呈现出频发特征。与此同时, 在“碳达峰, 碳中和”目标下, 风光等波动性新能源高比例并网、电力电子设备大量应用以及交直流特高压远距离输电技术的应用都在不断重塑传统电网的本来特征, 更多的电力一次设备裸露在恶劣环境中运行, 电力系统受外部极端天气的影响更加严重。[方法] 文章首先梳理了近年来典型台风、暴雨和冰雪等极端天气事件对电力系统设备及运行的影响。同时结合典型案例深入探讨了新型电力系统范式下的系统性风险表现。在此基础上, 提出针对不同灾害场景的精细化建模、系统风险评估及跨领域协作的应对策略的一些思考与展望。[结果] 研究表明, 极端天气的冲击加剧了设备故障和系统不稳定的风险, 新型电力系统的高比例新能源接入进一步放大了故障传播的影响。[结论] 在新型电力系统深入建设和极端天气加剧冲击的双重压力下, 电力系统的安全稳定运行依赖于设备风险建模、系统性风险防控及跨领域协作机制的提升。因此, 未来研究应聚焦于构建电力系统的多维度联合风险评估。同时, 指出强化电力系统与气象系统的深度耦合的必要性, 以提高系统的风险预测与动态应对能力, 为系统的韧性提升提供科学依据与技术支持。

关键词: 极端天气事件; 新型电力系统; 系统安全; 风险与挑战; 风险管理; 思考与建议

DOI: 10.16516/j.ceec.2024-367

文章编号: 2095-8676(2025)01-0043-15

CSTR: 32391.14.j.ceec.2024-367

中图分类号: TM7; P429



论文二维码

Reflections on the Impact of Extreme Weather on New Power Systems and Countermeasures

CAO Chen, WANG Zengping[✉]

(State Key Laboratory for Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: [Objective] In recent years, climate warming and other factors have led to a rise in extreme weather events globally. Simultaneously, under the "carbon peak - carbon neutral" goal, the integration of fluctuating renewable energy including wind and solar energy, extensive use of power electronics and long-distance ultra-high-voltage transmission have reshaped traditional power grids. These changes have increased the exposure of primary equipment to harsh environments, intensifying the vulnerability of power systems to extreme weather impacts. [Method] This paper reviewed the impact of recent extreme weather events, such as typhoons, heavy rainfall and ice storms, on power system equipment and operations. It explored systemic risk performance in depth in new power systems through case studies and proposed strategies for refined modeling, systemic risk assessment and cross-disciplinary collaboration across disaster scenarios. [Result] The research shows that extreme weather significantly increases the risks of equipment failures and system instability, with high renewable energy penetration amplifying the impact of failure propagation. [Conclusion] The safe operation of power systems under the dual pressure of in-depth construction of new power systems and intensified impact of extreme weather relies on improvement of equipment risk modeling, systemic risk control and cross-disciplinary collaboration mechanisms. Therefore, future research should focus on building multi-dimensional joint risk assessment of power systems. In addition, the paper points out the significance of

收稿日期: 2024-10-29 修回日期: 2024-12-09 网络首发日期: 2025-01-02

基金项目: 国家自然科学基金集成项目“新型电力系统大电网保护基础理论与方法”(U22B6006)

strengthening in-depth integration of power systems and meteorological systems for enhancing risk prediction and dynamic response capabilities of the system, thus providing scientific basis and technical support for improving the system resilience.

Key words: extreme weather events; new power systems; system security; risks and challenges; risk management; reflections and recommendations

2095-8676 © 2025 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI. This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

0 引言

随着“碳达峰、碳中和”深入推进^[1],电力系统在能源转型的背景下其结构和运行方式正经历深刻的变革:新能源的高比例接入、电力电子设备的大量应用以及交直流特高压远距离输电技术的普及,正不断重塑电力系统的本来特征。这种变革在显著提升系统运行效率和清洁能源利用率的同时,伴随着更多的一次设备暴露在外环境当中,导致电力系统在面对极端天气事件时,其风险源更加多样化、故障表现形式更加复杂化、事故危害程度更具破坏性。如此内外交织的双重压力下,电力系统的安全面临着前所未有的风险与挑战^[2-3]。

近年来,全球气候变化加剧导致极端天气事件愈演愈烈,如台风、暴雨、冰雪灾害等。这些事件对于电力系统的影响不仅体现在输电线路的倒塌^[4]、风电与光伏机组的损毁停运^[5]等设备层面的直接破坏,更体现在新型电力系统空间强耦合的运行范式下,进一步引发区域性乃至全网范围的连锁故障^[6-7]。例如,2024年台风“摩羯”登陆我国海南省,超强风力造成全省范围内电网设备严重损毁,超160万用户停电,重建恢复耗时数周。2021年7月,受副热带高压控制,东北地区多地气温屡破历史极值,电网用电负荷峰值高达70.58 GW,而风电机组受制于低风速条件,实际出力不足装机容量的0.1%,导致电力缺额超8 GW,区域电力供应一度陷入严重危机。

此外,电力系统结构的显著变化也增加了其在极端天气下的自身脆弱性:新能源的高比例接入增加了电源侧的波动性和间歇性,导致系统功率平衡的难度显著加大;电力电子设备的大规模应用削弱了系统整体的惯性水平,放大了极端天气扰动下系统的不稳定风险;交直流特高压远距离输电技术的普及使得电力系统的空间耦合性显著增强,任何单一故障都可能通过诱发大规模的连锁故障,导致系统承受故障和异常工况的能力显著降低。

在这种内外交困的背景下,如何有效应对极端天气对电力系统带来的多重威胁成为当前电力工程领域亟需解决的重要问题。文章首先回顾了近年来典型极端天气对电力系统的影响及其引发的安全问题;然后分析了新型电力系统在应对这些挑战时的涵盖保护、运行和控制等多个方面的安全风险表现;最后,提出了针对新型电力系统应对极端天气的风险管理建议,以期为未来研究和工程实践提供参考。

1 极端天气对电力系统安全的影响

全球现已进入极端天气的高发时期,台风、暴雨、冰灾等极端气象灾害频发,未来10~30 a将进入气候变化的“新常态”^[8]。2019—2021年,国家电网公司运营的110 kV及以上线路总跳闸次数分别为2242起、2439起、2388起,其中受极端天气影响的跳闸次数占比分别为55.39%、54.90%、59.76%,总体呈现增长的趋势。随着新型电力系统的发展,气象因素除影响输变电设备外,还会对裸露在自然中的风电、光伏机组造成直接影响。极端天气极易导致电力系统设备损坏,造成系统短时不可修复的 $N-k$ 事故,系统安全风险剧增。

我国沿海地区电力设施安全常受台风灾害破坏。2005年9月26日,台风“达维”登陆我国海南省,中心风速高达16级,损坏输电线路337 km,并造成主力电厂相继解列^[9]。随后海南省电网全网崩溃,部分地区停电恢复时间超过10 d。2024年9月6日,超强台风“摩羯”登陆海南省文昌市,登陆时中心风速级别达17级以上,造成海南电网10 kV及以上线路停运836条,35 kV及以上变电站停运79座,168.1万户用户停电,影响台区2.8万个,整体灾损集中在配网侧^[10]。与2014年重创我国南方区域电网的超强台风“威马逊”相比,杆塔受损数量超36%,线路受损长度超151%^[11]。截至9月27日,全省电网恢复正常运行。

1.1 暴雨灾害

相较于沿海地区的台风灾害,内陆地区电网设备可靠性主要受暴雨内涝灾害影响。2021年7月20日,河南省郑州市突发特大暴雨,短时降雨量达201.9 mm,突破我国内陆历史降雨极值,造成1854条10 kV及以上线路停运、374万用户停电,直至7月30日恢复全面供电^[12]。2023年7月29日,北京市突发特大暴雨,平均降雨量达744.8 mm,突破北京140 a历史最大降雨量^[13],累计造成1812个台区共9600余处电力设备受损,超6万用户停电。灾后恢复重建工作直至10月底完成。

1.2 冰雪灾害

输电线路和新能源机组的覆冰、积雪事件严重影响系统组件结构的可靠性以及新能源机组的出力水平。2008年1月,我国南方地区遭受罕见冰灾,灾区线路覆冰最大厚度达110 mm,累计造成36740条10 kV及以上线路、2016座35 kV及以上变电站停运,杆塔倒塌及损坏310321基。冰灾期间电力缺额最高达14.82 GW,导致约1亿用户停电^[14]。2021年2月,美国得州突发冬季雪灾,低温和冰雪风暴导致大面积风电机组叶桨覆冰以及光伏面板积雪,造成14 GW风电光伏机组被迫停运,电力缺额达20 GW^[15]。得州电力可靠性委员会被迫采用轮流停电避免系统连锁故障,据统计450万居民受到停电影响^[16]。

1.3 沙尘暴灾害

沙尘暴作为我国西北地区常见的极端天气灾害,最强局部风力可达12级以上,相当于台风登陆时的风速,且风沙荷载的耦合激励响应随着沙尘暴等级的提升而增大,严重威胁着电网输电线路的可靠性。例如,2006年4月,受西西伯利亚强冷空气入侵的影响,新疆地区出现强沙尘暴灾害,局部地区风力达12级以上,最高风速达51 m/s,造成多条220 kV线路因断线停运,引发塔城——阿勒泰电网以及哈密地区电网均与新疆电网解列^[17]。

近年来,我国加快推进了西北“沙戈荒”地区大型风光发电大基地的建设^[18]。这些地区富饶的风光资源为新能源产业的提供了良好的发展空间,但其独特的沙尘环境也对新能源设备的结构可靠性提出了严峻的考验。沙尘暴中的高风速和高密度沙粒的叠加冲击对风力机组的结构可靠性构成了显著威胁,导致风机涡轮叶片和塔筒的表面冲蚀和性能退化、

严重时甚至发生疲劳失稳甚至断裂破坏等^[19-20]。同时,光伏组件在沙尘暴期间也会因沙尘覆盖大幅削弱出力水平,增加组件热负荷并加速老化^[5]。

1.4 强对流天气

强对流天气是指由于大气中垂直方向的强对流运动引发的一系列剧烈天气现象,其核心特征表现为雷暴灾害,对电力系统设备的损坏不容小觑。

首先,雷电释放的高压可能直接击穿输电线路的绝缘子,造成整条线路的跳闸,进而引发一系列连锁故障^[21],对电网的整体运行安全构成严重威胁。例如,2019年英国英格兰与威尔士地区的“8·9”大停电事故的直接原因便是雷击跳闸引起的线路停运^[22],造成两座大型发电厂几乎同时脱网并触发低频负荷减载系统,导致100万用户停电。

其次,风机叶片和光伏组件的雷击损伤也是迫切需要关注的问题^[23]。其中,1.5~5 MW的风力机组的整体高度均达百米级别。据文献^[24]统计的我国多省地区的风电场雷击事故,损坏率高达9.8次/(100台·a),相较20 a前的小型风电机的雷击损坏率增加了5倍以上。

此外,强对流天气往往还伴随着冰雹等极端天气现象。文献^[25]综述了冰雹对光伏模块性能的影响,指出冰雹会显著降低光伏机组的输出功率、损坏光伏面板并缩短服役寿命,同时强调了增强光伏机组抗冰雹能力的必要性。

1.5 高温事件

随着全球气候变化的加剧,副热带高压的北抬成为影响我国北方地区极端高温事件的重要气象背景。这一现象显著增强了区域的静稳天气特征,抑制了云层和对流活动,使得地表太阳辐射进一步增强,导致受影响地区长期处于“极热无风”的天气状态。

在极端高温事件期间,电力供需失衡是新型电力系统面临的主要挑战。一方面,“极热”天气使居民空调制冷需求激增,同时工业用电中的降温系统和高耗能设备的运行负荷显著上升^[26];另一方面,风电作为北方地区新能源电力供应的重要组成部分,由于“无风”天气出力水平大幅下降,甚至多处于待机状态,严重限制了风电在极端高温事件中的电力供应水平和调峰能力。例如,2021年7月,副热带高压北抬,东北地区迎来接连数日的“极热无风”天气,风机出力水平不及装机容量的0.1%,为电网的保供带来了严峻的挑战。此外,随着高温事件持续时间

的延长,区域性电网在供电保障方面承受着不断累积的双重压力,具有显著的时空分布特征。

1.6 寒潮事件

寒潮事件指大规模强冷空气侵袭引发的区域性剧烈降温天气现象,通常伴随着阴云、雨雪、大风以及冰冻等极端条件,对风光发电设施的危害显著。主要表现为风光机组功率预测偏差^[27],风机的低温、覆冰脱网^[28]、大风切机以及光伏面板的支撑体系过载失效^[29]等。以 2021 年 1 月我国出现的大范围寒潮天气事件为例,全国降温幅度 8℃ 以上区域的面积超过 250 万 km²,大面积的低温雨雪天气导致全网新能源实际出力与预测功率差值较大,偏差峰值达 5 GW^[30]。

2 电力系统自身因素导致的安全风险加剧

文章探讨了极端天气事件对电网设备层面造成的直接破坏,即电力系统所面临的“外患”。然而,在系统结构特征新范式下,系统结构的复杂性和运行特性使得极端天气的影响进一步蔓延并放大,形成系统的“内忧”。后文将从极端天气条件下的一次和二次系统角度出发,通过具体案例分别分析系统自身安全的潜在风险、表现形式以及事故的危害影响。

2.1 从一次系统看

$N-1$ 安全准则是电力系统的规划和安全运行分

析当中的 1 个基本设计原则,指任意单一元件(如输电线路或变压器等)因故障退出运行时,即出现 $N-1$ 事故时,系统仍能够通过调节运行状态维持整体的安全稳定。当同时或接连多个元件退出运行时,称为 $N-k(k \geq 2)$ 事故。

我国资源与符合需求的逆向分布特点,决定了“西电东送”大规模跨区输电形态将成为主要发展方向。特高压直流线路的输送距离远、地理跨度大、且沿线气候和地形复杂,极易受雷击、覆冰、风暴等自然天气灾害的影响发生 $N-1$ 线路故障。随着我国各大区域电网通过超特高压输电线路实现互联,23 回高压直流线路承担了 34% 的传输功率^[31],在实现输送容量、并网等级不断提升和突破的同时,特高压直流输电线路发生 $N-1$ 故障将对送、受端系统的有功和无功功率平衡造成严重冲击,甚至会导致电网稳定破坏。

此外,电力电子设备的并发性、继发性故障频发。截至 2019 年,国家电网公司所运营的直流输电共发生换相失败 1353 次,平均每条直流输电工程每年换相失败 9.1 次,个别直流输电系统甚至高达 24 次^[32]。目前,华东、华北、华中以及南方电网均已形成了多馈入直流的特点,多回直流同时换相失败将加剧系统的大扰动影响。如图 1 所示,2013 年华中-西南同步系统发生 2 起交流故障,分别导致 4 回直流、3 回

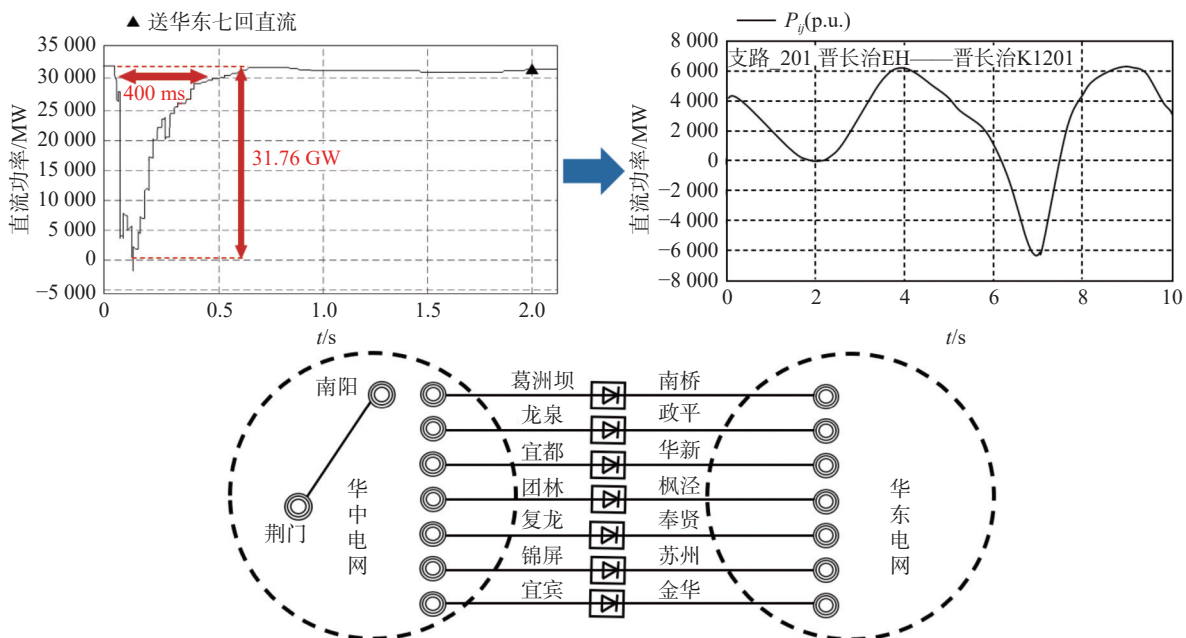


图 1 华中-西南同步系统换相失败仿真结果

Fig. 1 Simulation results of commutation failure in the central and southwest China synchronous system

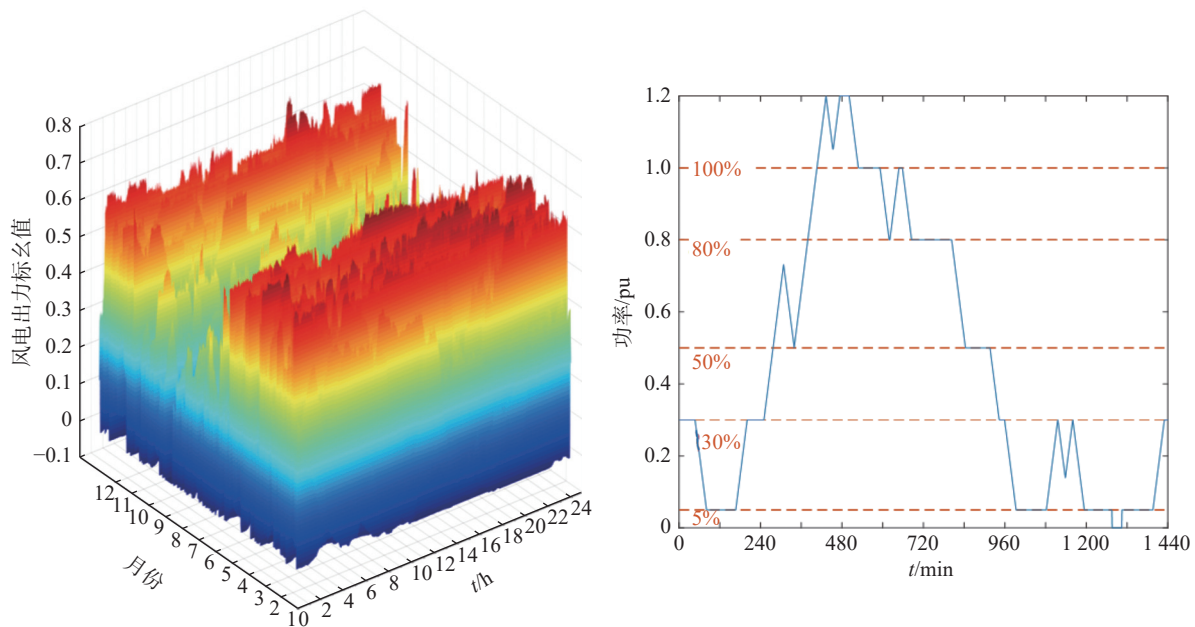
直流同时换相失败,对送端造成巨大冲击。

大规模新能源集群接入系统后,系统电压动态调节特性不断恶化,导致继发性故障频发^[33]。故障后由于无法及时降低无功功率,发电侧设备过电压将引发新能源集群脱网事故^[34]。

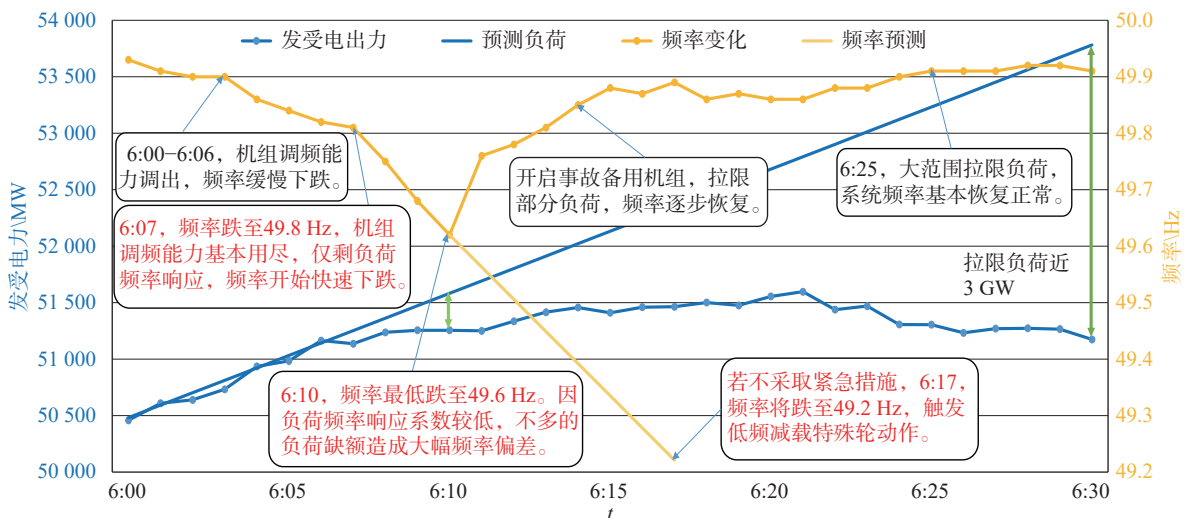
与此同时,高比例新能源波动和间歇特征导致系统稳定运行风险进一步放大。由于风光资源富集地区远离负荷中心,电力需要通过末端电网接入并经远距离传输。由于送出网络往往较为薄弱,易受新能源波动导致潮流阻塞和电能质量问题^[35],为确

保电力供需平衡,新能源并网地区对调峰调频灵活性资源需求大幅增加,本地电网灵活性资源不足时往往发生弃风弃光现象。

此外,新能源机组在电网发生扰动时难以提供惯量支撑,整体表现为无惯性或弱惯性的消极外特征,导致故障时频率快速变化和拉低系统最低频率水平,危机系统稳定^[36]。如图 2 所示,2021 年东北电网因新能源出力不足造成系统频率急剧下降并跌至 49.6 Hz,调度部门被迫紧急采取拉闸限电,导致负荷损失 3 GW。



(a) 新能源随机波动性显著



(b) 2021年东北电网限电事故分析

图 2 高比例新能源电网运行风险增大

Fig. 2 Increased operational risks in power grids with high proportions of renewable energy

如图 3 所示,系统宽频振荡的场景在世界范围内也在不断增多,主要原因是电力电子设备的波形变换及其非线性控制造成更加丰富的谐波源、柔性输电等技术使得谐振频率更加宽泛、机组的轴系及

动力调速系统可能导致机械-电气系统共振^[37]。2015 年 7 月 1 日,新疆哈密山北风电机组持续产生同步振荡,导致 310 km 外的花园电厂#1、#2、#3 机组轴系扭振保护相继动作跳闸,电厂全停。

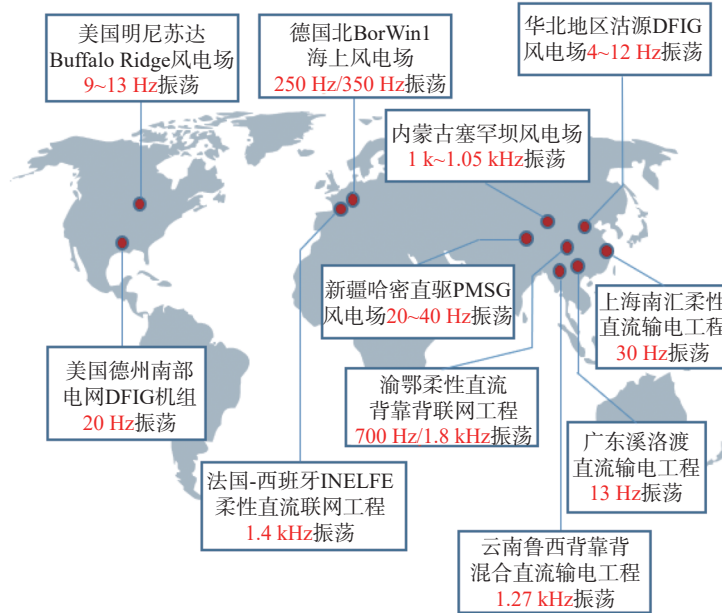


图 3 世界范围内振荡事件频发

Fig. 3 Frequent oscillatory events worldwide

2.2 从二次系统看

从反应工频量的继电保护原理来看,存在不正确动作的风险。对于差动保护,由于新能源与同步机提供的短路电流在幅值和相位上的差异,导致内

部故障时差动电流变小,制动电流增大,保护存在拒动风险。对于距离保护,新能源等效阻抗受到控制策略的影响,出口故障时保护存在拒动和误动的风险^[38],如图 4 所示。

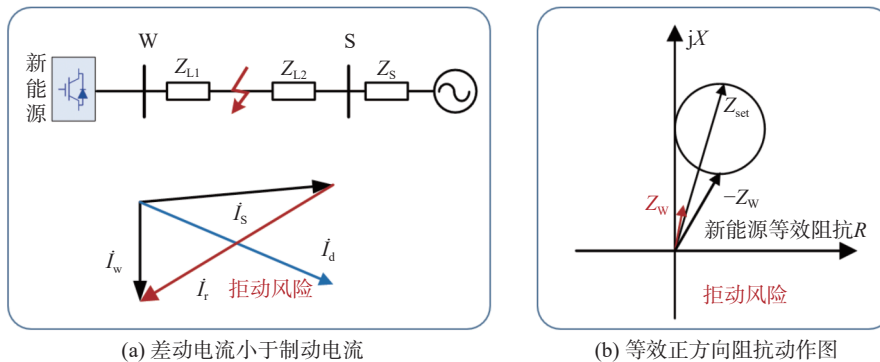


图 4 背后新能源时差动和距离保护不正确动作风险原理

Fig. 4 Principle of incorrect operation risks of differential and distance protection for backup renewable energy sources

定值配合式保护作为继电保护系统的重要组成部分,担负着近后备和远后备保护的职责。随着波动性、高比例的新能源接入电网,大电网的运行方式

变化更大更快,仅反应被保护设备的就地信息,某些情况下将无法正确识别区内外故障,定值配合式保护选择性和灵敏性无法同时满足。对于配电网,由

于分布式电源的接入, 分布式电源为保护测量电流带来助增和汲流的影响, 同时电网的自愈控制还会直接改变配电网的拓扑结构, 传统的定值配合式保护面临的问题将更加严重^[39], 如图 5 所示。

从安全稳定控制来看, 预案式控制的准确性和

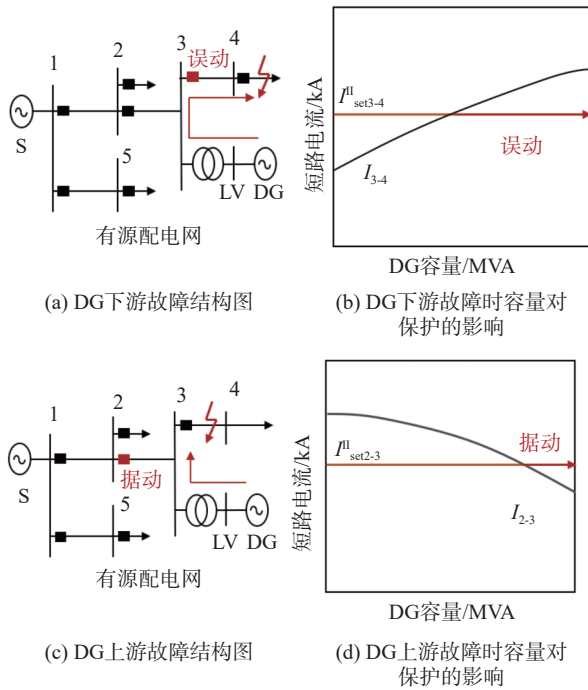


图 5 含分布式电源接入的配电网定值配合式保护不正确动作风险原理

Fig. 5 Principle of incorrect operation risks of setting coordination protection for distribution networks with distributed power

适用性降低并且存在多种安全稳定控制问题交织的风险。如图 6 所示, 一方面, 由于新能源的波动特征, 系统运行调节速度快、方式变化大, 造成预想场景和现实工况差异变大; 另一方面, 电力电子设备呈现非线性受控和时变特征, 系统呈现更强的连续-离散系统特性, 另外还存在控制模型参数不透明的“黑匣子”特征, 使得准确制定预案的难度增加^[40]。此外, 大量新能源经特高压直流跨区域输送, 当传输通道故障时, 会造成很大的有功和无功功率的波动和不平衡, 会同时引发系统的多种稳定控制问题^[41]。

3 应对风险的建议

风险意识贯穿我国古今, 早在《诗经》中就有“迨天之未阴雨, 彻彼桑土, 绸繆牖户”。此外, 2019 年 1 月, 习总书记在“坚持底线思维, 着力防范化解重大风险”专题研讨班上强调: 既要有防范风险的先手, 也要有应对和化解风险挑战的高招; 既要打好防范和抵御风险的有准备之战, 也要打好化险为夷、转危为机的战略主动战。这一未雨绸缪的智慧与新时代防范化解重大风险的治理理念高度一致, 强调主动防控是应对复杂局面和极端事件的核心策略。

2024 年 3 月, 中国电机工程学会以新质生产力对能源电力领域的发展影响为指引, 围绕能源安全增强、能源结构优化等重点话题发布的 20 个电力领域的重大问题难题, 其中有 6 个与极端天气以及电

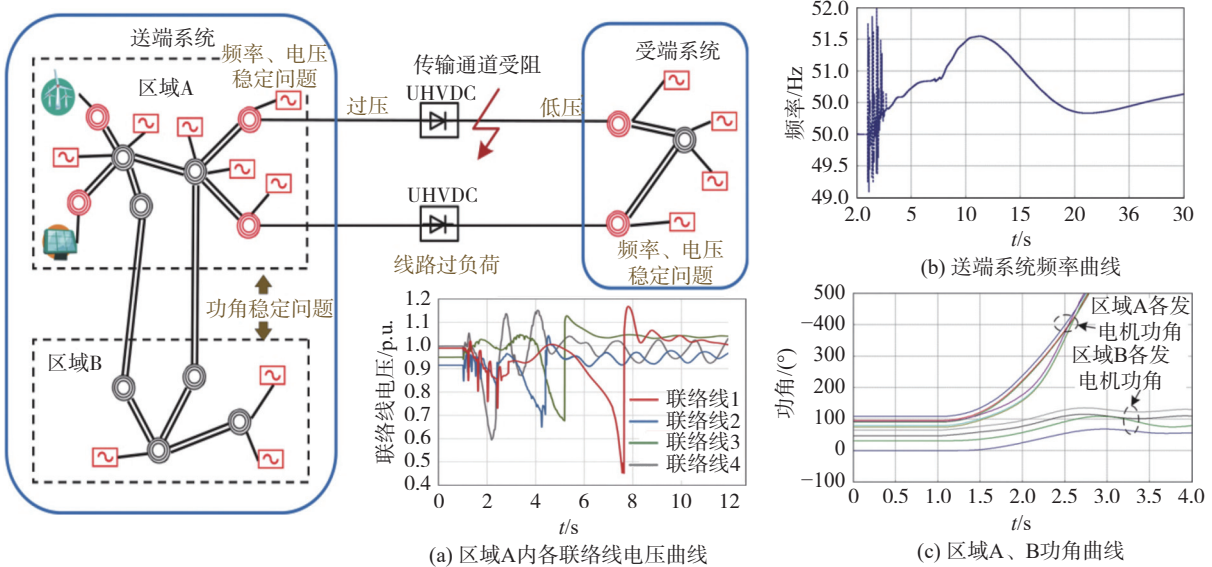


图 6 大电网系统多安全稳定控制问题交织

Fig. 6 Multiple security, stability and control problems in large grid system

力系统风险防控相关。因此,电力系统在加速转型发展的同时,应加强极端天气下预防性控制的研究及应用,以应对系统内外的双重挑战。下面,本文将分别从设备层面、系统层面和跨部门之间的联合攻关 3 个方面提出几点应对风险的思考与建议,旨在为新型电力系统在极端天气下的韧性提升提供更具前瞻性的思路与启发。

3.1 重视极端天气条件下电力系统设备层面的风险评估研究

当前极端天气呈现出的频发性、群发性、持续性和多灾种耦合特性,对电力设备的风险评估提出了更高的要求。例如,强对流天气下往往伴随着雷暴、冰雹、强风以及短时强降雨等多种气象现象,形成复合型灾害,对输电线路和新能源场站造成多重威胁;台风登陆时通常伴随着暴雨事件^[4],区域性的风雨耦合冲击加剧了输电塔线失效的风险,进一步导致连锁故障的发生;此外,在冰灾期间,风冰耦合激励的荷载放大效应^[42]显著增加了覆冰线路的动态应力,导致结构故障概率大幅提高。精准评估设备在多灾种混合条件下的故障风险,是制定科学有效风险防控策略的基础。在这种背景下,应积极推进多灾种作用耦合机理的研究,探索不同灾害条件下设备结构的非线性响应及其相互作用的规律,同时结合区域气象的统计特征,构建融合多灾种气象信息的联合故障概率模型,以应对复杂气象条件对电力系统的冲击。如图 7 所示,在双重荷载 IM1 和 IM2 耦合冲击作用下,结构的破坏概率可通过引入二维概率分布表征结构破坏概率的空间分布,从而更清晰地展示结构破坏行为与各类荷载之间的关联关系。

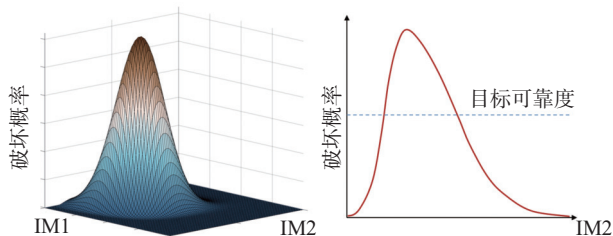


图 7 多灾种耦合结构破坏概率示意图

Fig. 7 Schematic diagram of the structural damage probability under multi-hazard

此外,精细化建模是实现设备风险精准评估的重要基础工作,应综合考虑设备结构的设计标准规范、服役年限和所处环境的地理地形特征等因素,以

确保风险评价的准确性和适用性。实行差异化原则的高弹性电网规划已成为各界的普遍共识,这将为建设高弹性电网的设计提供有力支撑。如图 8 所示,文献 [4] 建立了 110 kV 电压等级输电线路导线和铁塔结构的精细化有限元模型,从结构失效机理的角度推导了台风暴雨灾害下输电线路的停运模型。

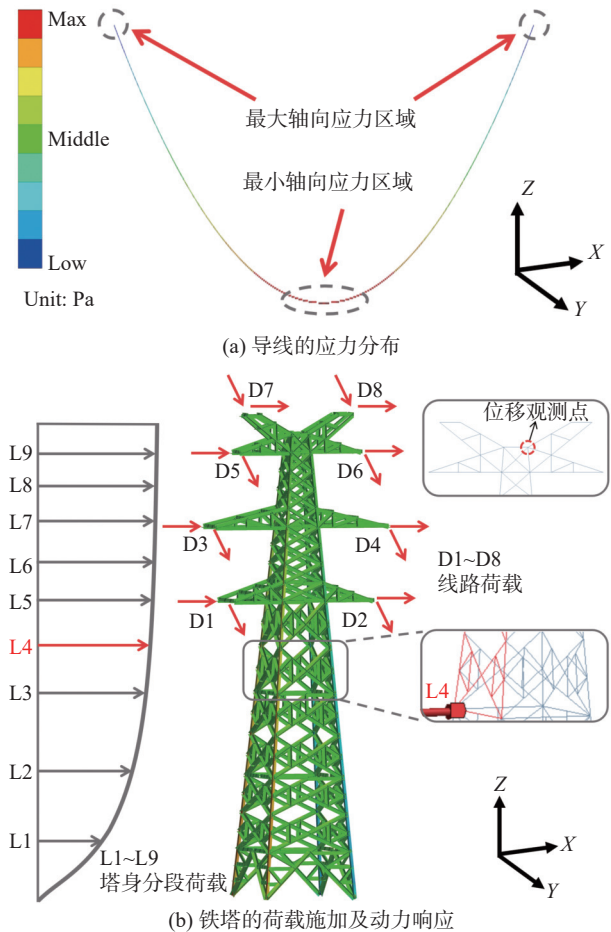


图 8 极端天气下电网设备结构的失效风险评估

Fig. 8 Failure risk assessment of grid equipment structures under extreme weather conditions

针对极端天气条件下新能源机组出力及失效风险评估的研究亟待深化,尤其是需加强对沙尘堆积、积雪覆盖对光伏支撑体系的影响,以及叶片积冰、风沙耦合冲击对风机整体失效概率影响的评估研究。文献 [43] 指出,风机在运行中所受的随机载荷复杂多变,呈现典型的疲劳特性。随着服役时间的推移,风机结构的疲劳程度不断加深,因此应着重开展塔筒、叶片、齿轮箱等高故障率关键部件的时变可靠性研究,以期更全面地反映风机全寿命周期内的故

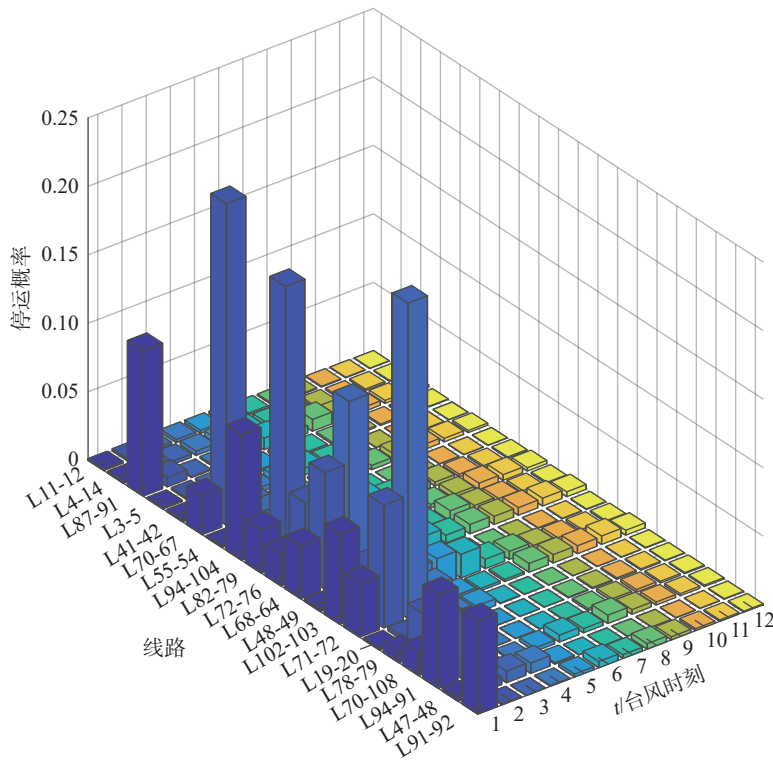
障风险特征。

3.2 优化极端天气条件下系统层面 $N-k$ 安全评估及风险防控策略

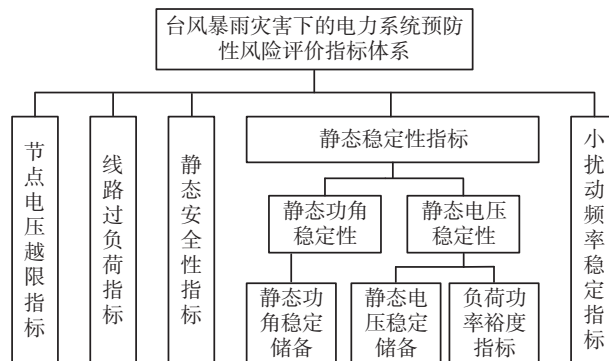
开展系统层面的 $N-k$ 安全评估与预防性控制措施,旨在从极端天气特性的角度出发,对电力系统的风险进行量化和评估,提高电力系统的韧性水平和适应能力。

1) 要积极建立更加科学的风险评估指标体系,综合考虑多种风险因素,从安全性和稳定性 2 个方

面对新型电力系统进行风险评估。文献 [44] 提出了 1 种台风灾害引发系统暂态失稳的风险评估方法。文献 [45] 利用负荷损失度指标评估了极端天气灾害下的系统风险,并以此为电网的预防性控制提供决策依据。文献 [46] 在负荷损失度风险指标的基础上增加了系统经济损失度风险指标,评估了多种极端灾害下电力系统的运行风险。如图 9 所示,文献 [47] 以台风暴雨灾害为例,结合气象预报信息,通过建立的线路停运概率模型将外部气象条件融入到 $N-k$ 安



(a) 线路停运概率预测



(b) 系统的风险指标评估体系

图 9 区域电网 $N-k$ 事故预防性风险评估体系

Fig. 9 Preventive risk assessment system for $N-k$ accidents in regional power grids

全评估当中,构建了基于静态安全分析的电力系统预防性风险评估指标体系框架,旨在极端天气冲击的条件下合理地评估系统的运行风险,为电力系统预防性控制提供决策依据。

2)加强第一道防线中的预防性控制方案的研究,制定完备的风险防控措施决策策略,积极发挥第一道防线中预防性控制策略在高风险场景下的作用,有效防止系统性事故。文献[7]应对台风灾害,通过将电力系统中的高危线路提前解列至多个不同孤岛,实现分散事故线路对全网的影响。文献[6]则将高危线路作为解列断面的子集断开,提前消除事故线路对系统的影响。如图10所示,以某地区实际电网和台风数据为例,对比了预防性控制与事后控制的效果。结果表明,当系统风险较高时,采取主动预防性的风险防控措施的效果优于事后控制。

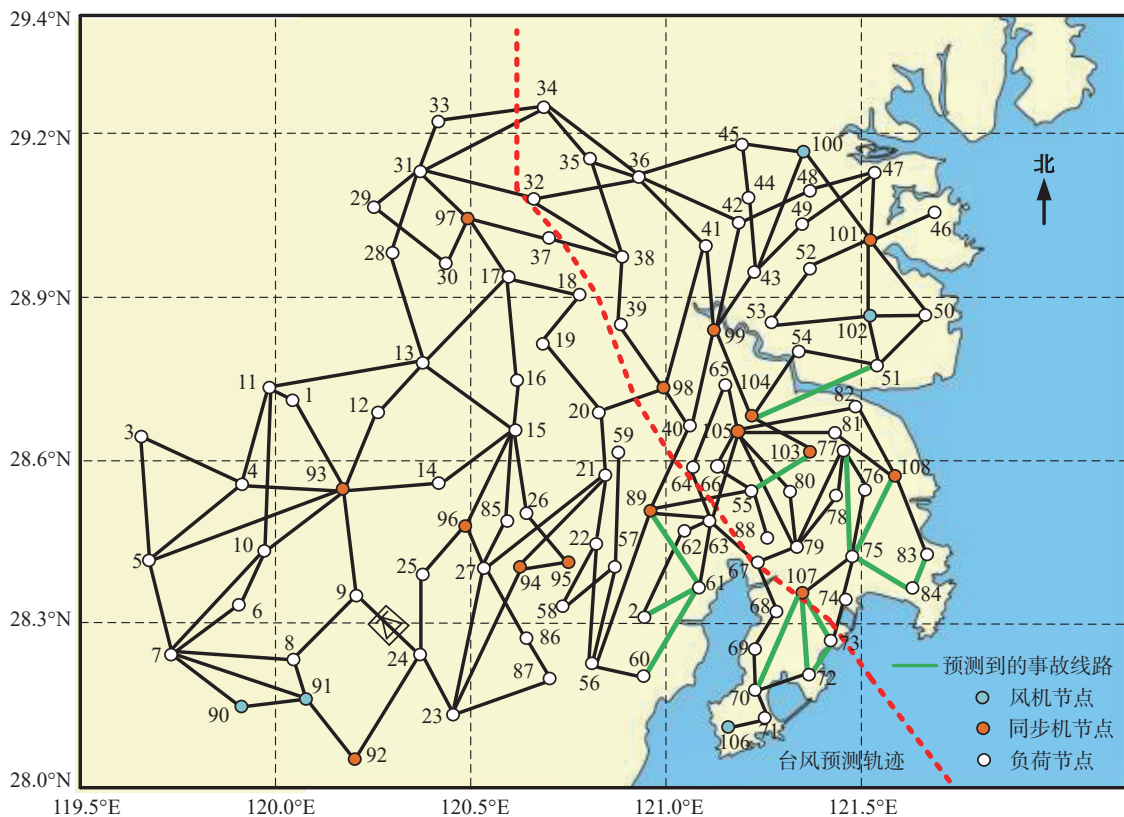
3.3 加强与气象部门的联合科技攻关

文献[48]指出,新型电力系统的建设与发展最为显著的变化便是系统各运行环节与气象要素的波动紧密相关,呈现出电力系统运行深度耦合气象系

统的演化趋势。未来,气象领域的技术发展将在电力领域产生丰富的应用场景。因此,电力系统与气象部门开展联合科技攻关对于提高风险防控策略的质量和成效至关重要。

目前,已有学者陆续开展了电力与气象领域的交叉融合研究。例如,文献[49]提出了一种基于时空特征的分布式光伏系统(DPVS)电气安全风险预测方法,文中使用协同克里金法对区域暴雨进行空间插值,然后采用二维水动力学偏微分模型模拟暴雨引发的区域积水深度的动态分布,并探讨了气象条件如何通过影响光伏组件的漏电流对电力系统造成威胁。

此外,未来的研究还应加强考虑地形因素的微气象/小气候的预测精度,提高对极端天气事件及其破坏性效应的把握度。积极推进电力安全治理体系的建设,加快内部预警机制的建立,加强极端天气事件及其关联影响的监视、评估与影响预测,打破数据壁垒并加强联合技术攻关,从而提高系统风险防控策略的质量和成效,如图11所示。



(a) 某地区实际系统与台风预测轨迹

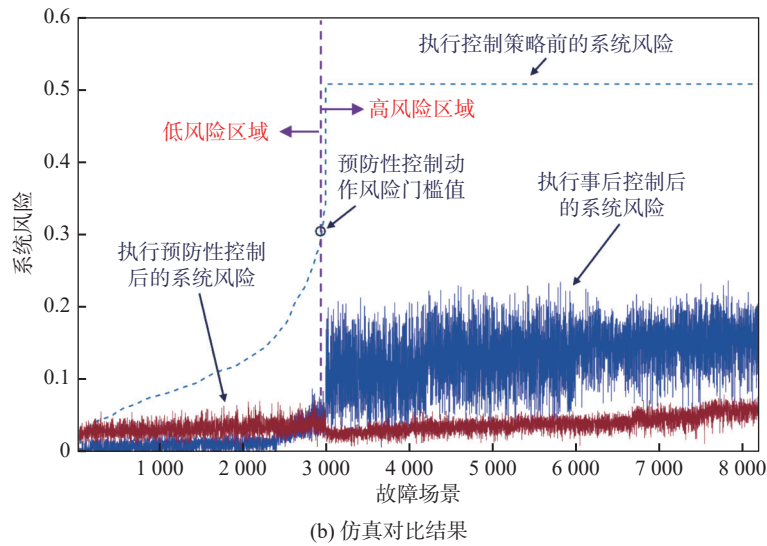


图 10 预防性控制与事后控制效果对比图

Fig. 10 Comparison chart of the effectiveness of preventive controls and post-action controls

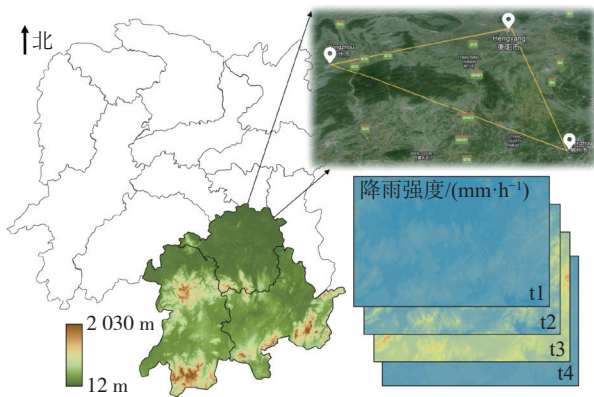


图 11 基于地理高程数据的气象资源高精度插值示意图

Fig. 11 Schematic diagram of high-precision interpolation of meteorological resources based on geographic elevation data

4 结论

近年来极端天气频频发生,已成为典型的“灰犀牛”事件,对新型电力系统的源、网、荷侧设备构成重大安全风险,严重威胁到系统的安全稳定运行。与此同时,新型电力系统自身抵御外部风险的能力下降,树立强烈的风险意识显得尤为重要。本文聚焦于从整体层面分析极端天气条件对新型电力系统的影响,并对应对措施及发展方向展开了探讨与思考。全文强调了以下几点共识与趋势:

1) 本文结合典型案例系统性梳理了多种极端天气灾害对电力系统设备和系统层面的多重影响,

揭示了新型电力系统在复杂天气条件下的关键脆弱环节。

2) 针对极端天气下电网设备的易损性,强调了推进对多灾耦合冲击下设备综合故障建模的重要性,同时指出结构的精细化建模是实现精准评估的重要基础,并建议深入研究风沙、覆冰等环境对新能源机组关键部件的长期性能影响,完善设备全寿命周期的风险评估方法。

3) 本文提出强化 $N-k$ 安全评估和预防性控制的重要性,基于系统安全分析和气象条件预测,构建面向极端天气情景的系统风险量化模型,实现优化风险的防控策略,并通过真实台风场景和区域电网验证了主动预防措施的显著效果。

4) 呼吁电力与气象部门之间协同机制的构建,建议加强电力系统与气象数据的深度耦合研究,提升极端天气事件的预测精度和动态应对能力,为新型电力系统的韧性提供内部理论依据和外部技术数据的保障和支撑。

参考文献:

[1] 舒印彪,张正陵,汤涌,等. 新型电力系统构建的若干基本问题 [J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(21): 8327-8340. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.242396.
SHU Y B, ZHANG Z L, TANG Y, et al. Fundamental issues of new-type power system construction [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(21): 8327-8340. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.242396.

- [2] 张恒旭, 刘玉田. 极端冰雪灾害对电力系统运行影响的综合评估 [J]. *中国电机工程学报*, 2011, 31(10): 52-58. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.2011.10.001.
ZHANG H X, LIU Y T. Comprehensive assessment of extreme ice disaster affecting power system operation [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2011, 31(10): 52-58. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.2011.10.001.
- [3] 颜子威, 朱映洁, 章东鸿, 等. 沿海强风区 500 kV 架空输电线路防风加强设计 [J]. *南方能源建设*, 2024, 11(1): 185-195. DOI: 10.16516/j.ceec.2024.1.19.
YAN Z W, ZHU Y J, ZHANG D H, et al. Enhanced design of wind protection for 500 kV overhead transmission lines in coastal strong wind areas [J]. *Southern energy construction*, 2024, 11(1): 185-195. DOI: 10.16516/j.ceec.2024.1.19.
- [4] 王增平, 相禹维, 王彤. 台风暴雨灾害下的 110 kV 线路倒塔与断线事故评估方法 [J]. *电力系统自动化*, 2022, 46(3): 59-66. DOI: 10.7500/AEPS20210428008.
WANG Z P, XIANG Y W, WANG T. Assessment method of tower falling and line disconnection accidents for 110 kV line in typhoon and torrential rain disaster [J]. *Automation of electric power systems*, 2022, 46(3): 59-66. DOI: 10.7500/AEPS20210428008.
- [5] XIANG Y W, WANG T, WANG Z P, et al. Risk assessment of cascading failures considering photovoltaic power uncertainty and frequency modulation under extreme weather events [C]// Anon. 2022 IEEE/IAS Industrial and Commercial Power System Asia (I&CPS Asia), Shanghai, China, July 8-11, 2022. Shanghai: IEEE, 2022: 1133-1137. DOI: 10.1109/ICPSAsia55496.2022.9949651.
- [6] XIANG Y W, WANG T, WANG Z P. Risk prediction based preventive islanding scheme for power system under typhoon involved with rainstorm events [J]. *IEEE transactions on power systems*, 2023, 38(5): 4177-4190. DOI: 10.1109/TPWRS.2022.3219519.
- [7] WANG Z C, WANG Z P. A novel preventive islanding scheme of power system under extreme typhoon events [J]. *International journal of electrical power & energy systems*, 2023, 147: 108857. DOI: 10.1016/j.ijepes.2022.108857.
- [8] 严中伟, 丁一汇, 翟盘茂, 等. 近百年中国气候变暖趋势之再评估 [J]. *气象学报*, 2020, 78(3): 370-378. DOI: 10.11676/qxxb2020.028.
YAN Z W, DING Y H, ZHAI P M, et al. Re-assessing climatic warming in China since the last century [J]. *Acta meteorologica sinica*, 2020, 78(3): 370-378. DOI: 10.11676/qxxb2020.028.
- [9] 安志国, 杨琨, 潘效文, 等. 城市大面积停电事件影响及特征分析 [J]. *电力安全技术*, 2021, 23(12): 1-3. DOI: 10.3969/j.issn.1008-6226.2021.12.001.
AN Z G, YANG K, PAN X W, et al. Analysis on the influence and characteristics of large urban blackouts [J]. *Electric safety technology*, 2021, 23(12): 1-3. DOI: 10.3969/j.issn.1008-6226.2021.12.001.
- [10] 海南省应急管理厅. 海南省防御台风“摩羯”应急指挥部新闻发布会 (第二场) [EB/OL]. (2024-09-08) [2024-09-30]. https://yjgl.hainan.gov.cn/jdhy/xwfbh/202409/t20240909_3728994.html.
Hainan Provincial Emergency Management Department. Press conference of Hainan Province's emergency command center for typhoon "Capricorn" defense (second session) [EB/OL]. (2024-09-08) [2024-09-30]. https://yjgl.hainan.gov.cn/jdhy/xwfbh/202409/t20240909_3728994.html.
- [11] 中国电力网. 海南受超强台风“摩羯”影响地区全面复电 [EB/OL]. (2024-09-30) [2024-10-13]. <http://www.chinapower.com.cn/dww/zxw/20240930/261886.html>.
China Power Grid. Hainan fully restored power in areas affected by super typhoon "Capricorn" [EB/OL]. (2024-09-30) [2024-10-13]. <http://www.chinapower.com.cn/dww/zxw/20240930/261886.html>.
- [12] 武星, 田雪乔, 霍鑫. 人民至上 [N]. *国家电网报*, 2021-08-25(1). DOI: 10.28266/n.cnki.ngjdw.2021.003087.
WU X, TIAN X Q, HUO X. People first [N]. *State grid news*, 2021-08-25(1). DOI: 10.28266/n.cnki.ngjdw.2021.003087.
- [13] 唐永兰, 徐桂荣, 唐国瑛, 等. “23.7”华北特大暴雨过程小时强降水时空分布特征 [J]. *大气科学学报*, 2024, 47(5): 778-788. DOI: 10.13878/j.cnki.dqkxxb.20231022003.
TANG Y L, XU G R, TANG G Y, et al. Temporal and spatial distribution characteristics of hourly heavy rainfall of the "23.7" heavy rainstorm event in North China [J]. *Transactions of atmospheric sciences*, 2024, 47(5): 778-788. DOI: 10.13878/j.cnki.dqkxxb.20231022003.
- [14] 陆佳政, 蒋正龙, 雷红才, 等. 湖南电网 2008 年冰灾事故分析 [J]. *电力系统自动化*, 2008, 32(11): 16-19. DOI: 10.3321/j.issn:1000-1026.2008.11.004.
LU J Z, JIANG Z L, LEI H C, et al. Analysis of Hunan power grid ice disaster accident in 2008 [J]. *Automation of electric power systems*, 2008, 32(11): 16-19. DOI: 10.3321/j.issn:1000-1026.2008.11.004.
- [15] 王伟胜, 林伟芳, 何国庆, 等. 美国得州 2021 年大停电事故对我国新能源发展的启示 [J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(12): 4033-4042. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.210749.
WANG W S, LIN W F, HE G Q, et al. Enlightenment of 2021 Texas blackout to the renewable energy development in China [J]. *Proceedings of the CSEE*, 41(12): 4033-4042. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.210749.
- [16] FERC-NERC-Regional Entities. The February 2021 cold weather outages in Texas and the South Central United States [R/OL]. (2011-11-16) [2021-11-16]. <https://www.ferc.gov/media/February-2021-cold-weather-outages-texas-and-south-central-united-states-ferc-nerc-and>.
- [17] 董玉平, 刘谨文. 新疆电网抗击沙尘暴袭击 [N]. *中国电力报*, 2006-04-14(2).

- DONG Y P, LIU J W. Xinjiang power grid fights against sandstorm attacks [N]. China electric power news, 2006-04-14(2).
- [18] 国家发展改革委, 国家能源局. 关于完善能源绿色低碳转型体制机制和政策措施的意见 [EB/OL]. (2022-01-30) [2024-09-08]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/202202/t20220210_1314511.html.
- National Development and Reform Commission, National Energy Administration. Opinions on improving the system, mechanism, and policy measures for energy green and low carbon transformation [EB/OL]. (2022-01-30) [2024-09-08]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/202202/t20220210_1314511.html.
- [19] 柯世堂, 董依帆. 考虑叶片停机位置大型风力机塔架风-沙致结构响应分析 [J]. 振动工程学报, 2021, 34(1): 60-71. DOI: 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2021.01.007.
- KE S T, DONG Y F. Analysis of wind-sand-induced structural response of large wind turbine considering the position of blades [J]. Journal of vibration engineering, 2021, 34(1): 60-71. DOI: 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2021.01.007.
- [20] 梁恩培, 马高生, 李晔, 等. 沙尘环境对风力机关键零部件力学特性影响综述 [J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2023, 53(3): 133-145. DOI: 10.1360/SSPMA-2022-0143.
- LIANG E P, MA G S, LI Y, et al. Summary of the impact of aeolian sand environment on key parts of wind turbine [J]. Scientia sinica physica, mechanica & astronomica, 2023, 53(3): 133-145. DOI: 10.1360/SSPMA-2022-0143.
- [21] 袁涛, 王肖田, 司马文霞, 等. 山区输电线路雷击跳闸预警的融合算法研究 [J]. 电工技术学报, 2023, 38(9): 2528-2540. DOI: 10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.212132.
- YUAN T, WANG X T, SIMA W X, et al. Research on fusion algorithm of lightning strike trip warning for mountain transmission line [J]. Transactions of China electrotechnical society, 2023, 38(9): 2528-2540. DOI: 10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.212132.
- [22] 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): 6183-6191. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.191632.
- SUN H D, XU T, GUO Q, 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): 6183-6191. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.191632.
- [23] 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. DOI: 10.20121/j.2097-2784.ntps.230044.
- LU J Z, PI X Y, ZHU S G, 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. DOI: 10.20121/j.2097-2784.ntps.230044.
- [24] 陈维江, 何天宇, 边凯, 等. 风机叶片雷击损伤及防护研究进展综述 [J]. 高电压技术, 2019, 45(9): 2782-2796. DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20190831012.
- CHEN W J, HE T Y, BIAN K, et al. Review of research progress in lightning damage and protection of wind turbine blades [J]. High voltage engineering, 2019, 45(9): 2782-2796. DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20190831012.
- [25] GUPTA V, SHARMA M, PACHAURI R, et al. Impact of hailstorm on the performance of PV module: a review [J]. Energy sources, part A: recovery, utilization, and environmental effects, 2022, 44(1): 1923-1944. DOI: 10.1080/15567036.2019.1648597.
- [26] 别芳玫, 方仍存, 万靖, 等. 2022年夏季高温干旱天气对区域电力系统影响分析研究 [J]. 湖南电力, 2023, 43(4): 108-113. DOI: 10.3969/j.issn.1008-0198.2023.04.016.
- BIE F M, FANG R C, WAN J, et al. Analysis and research on influence of high temperature and dry weather on regional power system in 2022 summer [J]. Hunan electric power, 2023, 43(4): 108-113. DOI: 10.3969/j.issn.1008-0198.2023.04.016.
- [27] 叶林, 李奕霖, 裴铭, 等. 寒潮天气小样本条件下的短期风电功率组合预测 [J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(2): 543-554. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.221814.
- YE L, LI Y L, PEI M, et al. Combined approach for short-term wind power forecasting under cold weather with small sample [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(2): 543-554. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.221814.
- [28] 阳薇, 秦川, 曾毓琳, 等. 桂北低温冰冻天气对高山风力发电的影响分析 [J/OL]. (2024-08-30) [2024-12-05]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1715.TK.20240828.1655.006.html>.
- YANG W, QIN C, ZENG Y L, et al. Analysis of the impact of low temperature and freezing weather in northern Guangxi on high-altitude wind power generation [J/OL]. (2024-08-30) [2024-12-05]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1715.TK.20240828.1655.006.html>.
- [29] 钟伟, 杨欢红, 马向东, 等. 考虑多重不确定性的光伏支撑体系动力可靠性分析 [J]. 机械强度, 2024, 46(4): 898-904. DOI: 10.16579/j.issn.1001.9669.2024.04.019.
- ZHONG W, YANG H H, MA X D, et al. Dynamic reliability analysis of photovoltaic support system considering multiple uncertainties [J]. Journal of mechanical strength, 2024, 46(4): 898-904. DOI: 10.16579/j.issn.1001.9669.2024.04.019.
- [30] 鞠冠章, 王靖然, 崔琛, 等. 极端天气事件对新能源发电和电网运行影响研究 [J]. 智慧电力, 2022, 50(11): 77-83. DOI: 10.3969/j.issn.1673-7598.2022.11.013.
- JU G Z, WANG J R, CUI C, et al. Impact of extreme weather events on new energy power generation and power grid operation [J]. New energy, 2022, 50(11): 77-83. DOI: 10.3969/j.issn.1673-7598.2022.11.013.
- [31] 郭贤珊, 厉璇, 王庆, 等. 特高压直流输电技术发展现状与思考 [J]. 新型电力系统, 2024, 2(3): 237-250. DOI: 10.20121/j.2097-

- 2784.ntps.240034.
GUO X S, LI X, WANG Q, et al. Status and thoughts on the development of ultra high voltage direct current (UHVDC) transmission technology [J]. *New type power systems*, 2024, 2(3): 237-250. DOI: [10.20121/j.2097-2784.ntps.240034](https://doi.org/10.20121/j.2097-2784.ntps.240034).
- [32] 郑博文. 交直流混联电网换相失败对继电保护影响研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2022. DOI: [10.27140/d.cnki.ghbbu.2022.000021](https://doi.org/10.27140/d.cnki.ghbbu.2022.000021).
ZHENG B W. Research on the influence of commutation failure of AC-DC hybrid grid on relay protection [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2022. DOI: [10.27140/d.cnki.ghbbu.2022.000021](https://doi.org/10.27140/d.cnki.ghbbu.2022.000021).
- [33] 张冬清, 张国华, 徐铃铃, 等. 调相机在电力系统中的应用与动态特性 [J]. *南方能源建设*, 2024, 11(4): 31-41. DOI: [10.16516/j.ceec.2024.4.04](https://doi.org/10.16516/j.ceec.2024.4.04).
ZHANG D Q, ZHANG G H, XU L L, et al. Development application and dynamic characteristics of synchronous condenser in electric power system [J]. *Southern energy construction*, 2024, 11(4): 31-41. DOI: [10.16516/j.ceec.2024.4.04](https://doi.org/10.16516/j.ceec.2024.4.04).
- [34] 高洁, 王彤, 赵伟, 等. 提升电力系统安全稳定水平的风电光伏场站主动支撑技术发展及展望综述 [J]. *新型电力系统*, 2024, 2(2): 201-222. DOI: [10.20121/j.2097-2784.ntps.240013](https://doi.org/10.20121/j.2097-2784.ntps.240013).
GAO J, WANG T, ZHAO W, et al. Review on the development and prospect of active support technologies for wind power and photovoltaic stations to improve the security and stability level of power system [J]. *New type power systems*, 2024, 2(2): 201-222. DOI: [10.20121/j.2097-2784.ntps.240013](https://doi.org/10.20121/j.2097-2784.ntps.240013).
- [35] 卓振宇, 张宁, 谢小荣, 等. 高比例可再生能源电力系统关键技术及发展挑战 [J]. *电力系统自动化*, 2021, 45(9): 171-191. DOI: [10.7500/AEPS20200922001](https://doi.org/10.7500/AEPS20200922001).
ZHUO Z Y, ZHANG N, XIE X R, et al. Key technologies and developing challenges of power system with high proportion of renewable energy [J]. *Automation of electric power systems*, 2021, 45(9): 171-191. DOI: [10.7500/AEPS20200922001](https://doi.org/10.7500/AEPS20200922001).
- [36] 曹子龙. 新能源高占比电网惯量在线评估与预警方法研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2023. DOI: [10.27140/d.cnki.ghbbu.2023.002130](https://doi.org/10.27140/d.cnki.ghbbu.2023.002130).
CAO Z L. Inertia online estimation and early warning of renewable energy generation dominated power system [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2023. DOI: [10.27140/d.cnki.ghbbu.2023.002130](https://doi.org/10.27140/d.cnki.ghbbu.2023.002130).
- [37] 王晖, 李莹, 李文锋, 等. 并网逆变器复合电流环引起次/超同步振荡机理研究 [J]. *电网技术*, 2017, 41(4): 1061-1067. DOI: [10.13335/j.1000-3673.pst.2016.3274](https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2016.3274).
WANG H, LI Y, LI W F, et al. Mechanism research of subsynchronous and supersynchronous oscillations caused by compound current loop of grid-connected inverter [J]. *Power system technology*, 2017, 41(4): 1061-1067. DOI: [10.13335/j.1000-3673.pst.2016.3274](https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2016.3274).
- [38] 侯俊杰, 宋国兵, 徐瑞东, 等. 交直流混合电网故障耦合特性分析与继电保护研究 [J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(14): 176-187. DOI: [10.19783/j.cnki.pspc.201222](https://doi.org/10.19783/j.cnki.pspc.201222).
HOU J J, SONG G B, XU R D, et al. Fault coupling characteristic analysis and relay protection research on an AC/DC hybrid power grid [J]. *Power system protection and control*, 2021, 49(14): 176-187. DOI: [10.19783/j.cnki.pspc.201222](https://doi.org/10.19783/j.cnki.pspc.201222).
- [39] 张烈, 王德林, 刘亚东, 等. 国家电网 220 kV 及以上交流保护十年运行分析 [J]. *电网技术*, 2017, 41(5): 1654-1659. DOI: [10.13335/j.1000-3673.pst.2016.2900](https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2016.2900).
ZHANG L, WANG D L, LIU Y D, et al. Analysis on protective relaying and its operation conditions in 220 kV and above AC system of SGCC in past ten years [J]. *Power system technology*, 2017, 41(5): 1654-1659. DOI: [10.13335/j.1000-3673.pst.2016.2900](https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2016.2900).
- [40] 付蓉, 蒋国平, 王保云. 计及系统连锁故障风险的电网预防控制 [J]. *电力系统保护与控制*, 2011, 39(3): 12-17. DOI: [10.3969/j.issn.1674-3415.2011.03.003](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-3415.2011.03.003).
FU R, JIANG G P, WANG B Y. A preventive control strategy for power grid considering system cascading failure risk [J]. *Power system protection and control*, 2011, 39(3): 12-17. DOI: [10.3969/j.issn.1674-3415.2011.03.003](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-3415.2011.03.003).
- [41] 王增平, 胡加伟, 王彤, 等. 大容量直流换相失败后功率恢复速率对送端系统暂态稳定的影响分析 [J]. *电网技术*, 2020, 44(5): 1815-1825. DOI: [10.13335/j.1000-3673.pst.2019.1107](https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2019.1107).
WANG Z P, HU J W, WANG T, et al. Analysis of impact of power recovery speed on transient stability of sending-side system after large capacity HVDC commutation failure [J]. *Power system technology*, 2020, 44(5): 1815-1825. DOI: [10.13335/j.1000-3673.pst.2019.1107](https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2019.1107).
- [42] 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. DOI: [10.19595/j.cnki.1000-6753.tecs.2016.08.026](https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tecs.2016.08.026).
DUAN J, WANG X L, HOU Y S. 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. DOI: [10.19595/j.cnki.1000-6753.tecs.2016.08.026](https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tecs.2016.08.026).
- [43] 李宏仲, 周玉龙. 考虑强度退化的海上风机齿轮结构可靠性评估方法 [J]. *中国电机工程学报*, 2023, 43(13): 5037-5048. DOI: [10.13334/j.0258-8013.pcsee.220638](https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.220638).
LI H Z, ZHOU Y L. Reliability assessment method for offshore wind turbine gear structures considering strength degradation [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, 43(13): 5037-5048. DOI: [10.13334/j.0258-8013.pcsee.220638](https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.220638).
- [44] 宋晓喆, 汪震, 甘德强, 等. 台风天气条件下的电网暂态稳定风险评估 [J]. *电力系统保护与控制*, 2012, 40(24): 1-8. DOI: [10.7667/j.issn.1674-3415.2012.24.001](https://doi.org/10.7667/j.issn.1674-3415.2012.24.001).
SONG X Z, WANG Z, GAN D Q, et al. Transient stability risk assessment of power grid under typhoon weather [J]. *Power*

system protection and control, 2012, 40(24): 1-8. DOI: [10.7667/j.issn.1674-3415.2012.24.001](https://doi.org/10.7667/j.issn.1674-3415.2012.24.001).

- [45] PANTELI M, TRAKAS D N, MANCARELLA P, et al. Boosting the power grid resilience to extreme weather events using defensive islanding [J]. *IEEE transactions on smart grid*, 2016, 7(6): 2913-2922. DOI: [10.1109/TSG.2016.2535228](https://doi.org/10.1109/TSG.2016.2535228).
- [46] 王玮, 赵家悦, 郭创新, 等. 考虑故障连锁的多灾害输电网弹性评估及关键弹性提升元件辨识 [J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(1): 127-139. DOI: [10.13334/j.0258-8013.pcsee.210026](https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.210026).
WANG W, ZHAO J Y, GUO C X, et al. Assessing resilience of transmission network and identifying key elements to enhance resilience considering failure chain under multiple disasters [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(1): 127-139. DOI: [10.13334/j.0258-8013.pcsee.210026](https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.210026).
- [47] XIANG Y W, WANG T, WANG Z P. Framework for preventive control of power systems to defend against extreme events [J]. *CSEE journal of power and energy systems*, 2024, 10(2): 856-870. DOI: [10.17775/CSEEJPES.2022.07290](https://doi.org/10.17775/CSEEJPES.2022.07290).
- [48] 杨明, 李梦林, 王勃, 等. 面向新型电力系统发展需求的数值天气预报技术及应用综述 [J/OL]. (2024-06-20) [2024-12-05]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20240619.1053.002.html>.
YANG M, LI M L, WANG B, et al. Review on technologies and applications of numerical weather prediction for development needs of new power system [J/OL]. (2024-06-20) [2024-12-05]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20240619.1053.002.html>.
- [49] WANG Y X, ZHOU B, ZHANG C, et al. A hybrid data and knowledge driven risk prediction method for distributed photovoltaic systems considering spatio-temporal characteristics of extreme rainfalls [J/OL]. (2024-07-18) [2024-09-23]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/10603431>. DOI: [10.1109/TIA.2024.3430247](https://doi.org/10.1109/TIA.2024.3430247).

作者简介:



曹辰

曹辰(第一作者)
2000-, 男, 博士, 研究方向为极端天气下电力系统风险评估与安全防护(e-mail) 915727338@qq.com。



王增平

王增平(通信作者)

BRID: 09655.00.76156,

1964-, 男, 教授, 博士, 研究方向为新能源电力系统安全防护、风险评估与稳定控制(e-mail) wangzp1103@sina.com。

项目简介:

项目名称 国家自然科学基金集成项目“新型电力系统大电网保护基础理论与方法”(U22B6006)

承担单位 华北电力大学、中国电力科学研究院有限公司、重庆大学、武汉大学

项目概述 高比例新能源和电力电子设备广泛接入, 导致新型电力系统故障特性和动态过程发生本质变化, 传统继电保护难以满足电网发展要求。同时, 连锁故障场景更多、几率更大, 系统安全风险加剧。项目面向新型电力系统安全运行的重大需求, 围绕电磁物理和非线性受控双重约束下故障演变传播特征、连锁故障多时空耦合及灾变机理、控制与保护混杂交互作用及协同机制等关键科学问题, 在新型电力系统故障演化及分布耦合特征、故障暂态全息的快速保护原理、继电保护与电力电子设备控制的协同配合机制、连锁故障路径辨识理论及阻断方法、强耦合连续-离散协同优化的新型保护系统等方面开展联合攻关。项目通过精细化表征源端集聚效应和控制策略切换破解故障特性认知难题, 融合故障时空全景信息变革保护工作模式及原理, 利用混杂系统协同优化突破保护控制配合瓶颈, 全面提升保护性能并有效阻抑连锁故障, 为新型电力系统继电保护提供理论和技术支撑。

主要创新点 (1) 针对新型电力系统呈现的非线性和时变受控的故障特征, 研究新能源故障特性并提出表征方法, 揭示源端故障电气量时空分布特征和演变规律; (2) 针对新型电力系统故障暂态演变规律和分布特征不清晰, 暂态信息传变特性分析方法缺乏等难题, 构建基于故障暂态全息的快速保护新原理; (3) 针对并发性故障机理不明、电网保护与电力电子设备控制独立分散配置的问题, 从故障响应特性、故障主动抑制、控保协同 3 方面提升抵御故障危害的能力; (4) 结合故障暂态演变过程及分布耦合特征, 提出新型电力系统连锁故障多时间尺度控保协同的阻抑策略; (5) 针对强耦合连续-离散系统保护控制混杂交互机理不清晰和协同机制不健全问题, 提出新型保护系统构成模式和可靠性保证措施。

(责任编辑 孙舒)