

电力系统的韧性提升与灾害恢复策略研究

朱 超 王 群

国网恩施市供电公司 湖北 恩施 445000

摘 要：随着全球气候变化的加剧，极端自然灾害对电力系统的稳定运行构成了严峻挑战。本文旨在深入分析电力系统韧性的内涵，明确其面临的挑战，并提出具体的韧性提升与灾害恢复策略。通过加强顶层规划、智慧化升级、发掘灵活性资源、推进多元主体协同共治以及实施具体的灾前准备、灾中应急响应和灾后快速恢复措施，旨在提高电力系统的韧性和可靠性，保障电力供应的连续性和安全性。

关键词：电力系统；韧性提升；灾害恢复

引言

电力系统作为城市基础设施的核心，其稳定运行对于居民生活、工业生产和其他关键基础设施的正常运行至关重要。然而，极端自然灾害如暴雨、台风、冰灾等频繁发生，对电力设施造成严重破坏，导致供电中断，给社会带来巨大损失。因此，提升电力系统的韧性，确保在灾害发生后能够迅速恢复电力供应，成为当前亟待解决的问题。

1 电力系统韧性的内涵

电力系统韧性的内涵丰富而深刻，其根源可追溯至生态学家C.S.Holling提出的韧性概念，用以衡量生态系统的可持续性以及在变化和扰动中维持种群关系的能力。在电力系统这一复杂而关键的领域，韧性被赋予了新的内涵。电力系统韧性，简而言之，是系统面对极端事件时展现出的抵御、吸收、适应及快速恢复的综合能力。这种韧性并非一蹴而就，而是贯穿于从理论探索到实践应用的全过程。在感知层面，电力系统需具备对内外环境变化的高度敏感性，能够实时监测并预警潜在风险。应变层面则要求系统在遭遇突发情况时，能迅速调整运行策略，确保供电稳定。防御层面强调通过技术和管理手段，增强系统对外部扰动的抵御能力。恢复层面则关注系统在受损后的快速修复能力，以最小化对经济社会的影响。协同层面强调系统各组成部分间的紧密配合，共同应对挑战。而学习力则是系统不断进化、提升韧性的关键。

2 电力系统面临的挑战

首先，自然灾害的破坏不容忽视。近年来，极端天气事件频发，台风以其强大的风力和带来的暴雨，常常导致电力线路被吹断、杆塔倒塌，变压器等关键设备也易受损毁。这些破坏不仅直接影响电力传输，还可能引发连锁反应，导致大面积停电，对人民生活和经济发展

造成严重影响。暴雨则可能引发洪水，淹没电力设施，造成设备短路、损坏，进一步加剧电力供应的困难。其次，电力基础设施老化问题日益凸显。部分地区的电力设施由于年久失修，设备老化严重，其性能和可靠性大打折扣。这些老化的设备在面对自然灾害的冲击时，往往难以承受，容易发生故障，进一步加剧了电力供应的不稳定性。再者，恢复机制的不完善也是电力系统面临的一大挑战。灾后恢复过程往往缺乏统一的指挥和协调，导致人员和物资的调配不灵活，恢复效率低下^[1]。在紧急情况下，这种低效的恢复机制会延长停电时间，增加损失，对社会的正常秩序造成较大冲击。此外，信息监控能力的不足也制约了电力系统的稳定运行。目前，电力系统的信息监控手段相对有限，难以及时、准确地掌握设备的状态和故障情况。这使得故障排查和恢复决策变得困难重重，影响了电力系统的快速恢复和稳定运行。因此，提升电力系统的信息监控能力，实现设备的智能化、远程化监控，是当前亟待解决的问题。

3 电力系统韧性提升策略

3.1 加强顶层规划和统筹设计

电力系统韧性的提升需要政府和企业共同努力，制定长期的发展规划。这一规划应明确电力系统韧性提升的目标、路径和具体措施，确保各项工作的有序进行。政府应发挥主导作用，制定相关法律法规，为电力系统韧性提升提供法律保障和政策支持。同时，企业也应积极参与，加大技术研发投入，推动电力系统韧性提升技术的创新和应用。在电力系统设计和建设中，应充分考虑自然灾害的影响，采用抗震、抗风等设计标准，提高系统的抵御能力。对于地震多发地区，应采用抗震设计和建筑材料，确保电力设施在地震中能够保持稳定运行。对于风灾频发地区，应加强电力线路的抗风设计，采用高强度杆塔和导线，减少风灾对电力设施的破坏。

此外,还应考虑极端天气事件对电力系统的影响,如暴雨、洪水等,采取相应的防水、排水措施,确保电力设施的安全运行。

3.2 智慧化升级电力基础设施

随着信息技术的飞速发展,智慧化已成为电力系统升级的重要方向。通过引入智能设备,如传感器、智能开关等,可以实时监测设备状态,提前预警潜在风险。这些智能设备能够实时采集电力设备的运行数据,通过数据分析处理,及时发现设备的异常状态,为运维人员提供准确的故障信息和定位,提高运维效率和准确性。建立电力系统监测和预警系统是智慧化升级的重要组成部分。利用物联网技术,可以将电力设备与互联网相连接,实现对设备状态的实时监测和预警。这一系统能够实时收集、处理和分析电力设备的运行数据,通过数据挖掘和机器学习等技术,预测设备的故障趋势,为应急响应提供决策支持。在灾害发生时,监测和预警系统能够迅速发出警报,提醒运维人员及时采取措施,防止故障的扩大和蔓延。推广智能化运维手段是智慧化升级的另一重要方面。采用无人机巡检、机器人检修等智能化运维手段,可以大大提高运维效率和准确性。无人机具有飞行速度快、巡检范围广、不受地形限制等优点,能够迅速发现并定位电力线路的故障点。机器人则可以在复杂环境中进行精细化的检修工作,减少人工操作的风险和误差。这些智能化运维手段的应用,将极大地提高电力系统的运维水平和韧性。

3.3 发掘灵活性资源

电力系统韧性的提升还需要发掘和利用灵活性资源。通过优化资源调配,可以充分发挥系统源网荷储各环节的各类可用资源的作用,提高系统的灵活性和适应性。需求侧响应是一种有效的资源调配手段,通过激励用户改变用电行为,调整用电负荷,可以平衡电力系统的供需关系,减少系统峰谷差,提高系统的稳定性。虚拟电厂则是一种将分布式能源、储能系统、可控负荷等资源整合在一起,通过先进的信息通信技术和控制系统,实现资源的优化配置和协同运行的技术。虚拟电厂的应用,可以进一步提高电力系统的灵活性和韧性^[2]。储备应急物资也是发掘灵活性资源的重要方面。建立应急物资储备库,储备必要的抢修物资和设备,可以确保在灾害发生后能够迅速调配到位,缩短抢修时间,减少损失。应急物资储备库应合理布局,覆盖电力系统的各个关键节点和区域,确保在灾害发生时能够及时响应和支援。同时,还应加强对应急物资的管理和维护,确保物资的质量和性能满足抢修需求。

3.4 多主体协同,拓展多种能源系统间的互补互济空间

电力系统韧性的提升还需要多主体的协同合作。政府、企业、科研机构等各方应加强沟通与协作,共同推动电力系统韧性提升工作的开展。政府应发挥主导作用,制定相关法律法规和标准规范,为各方提供指导和支持。企业应积极参与技术创新和应用实践,推动电力系统韧性提升技术的产业化和商业化。科研机构则应加强基础研究和技术研发,为电力系统韧性提升提供理论支撑和技术支持。拓展多种能源系统间的互补互济空间也是提高电力系统韧性的重要途径。电、气、热等能源系统之间存在着紧密的耦合关系,通过协同防御机制的设计和实施,可以避免故障在系统间的耦联传播,提高系统的整体稳定性。在事件发生发展阶段,协同机制可以迅速响应和处置故障,防止故障的扩大和蔓延。在事后恢复阶段,协同机制可以制定多能源系统的协调恢复策略,优化资源配置和调度,提高恢复效率和准确性。为了实现多种能源系统间的协同运行和互补互济,需要加强能源系统的信息化和智能化建设。通过引入先进的信息通信技术和控制系统,实现能源系统的实时监测、预警和调度控制。同时,还需要加强能源系统的标准化和规范化建设,确保各系统之间的接口兼容和数据共享。此外,还应加强能源市场的建设和监管,推动能源系统的市场竞争和优化配置,提高能源系统的经济性和可持续性。

4 电力系统灾害恢复策略

4.1 灾前准备

灾前准备是电力系统灾害恢复工作的基础,其关键在于完善应急预案、加强培训与演练以及储备抢修队伍。首先,应根据不同类型的自然灾害,制定详细的应急预案。这些预案应明确灾害发生时的响应流程,包括信息报告、指挥协调、资源调配、现场抢修等各个环节。同时,还应建立信息发布机制,确保在灾害发生后,能够及时、准确地向公众发布电力供应情况和抢修进度,稳定社会情绪。其次,要加强对员工的应急培训和演练。通过定期的培训,使员工熟悉应急预案的内容,掌握应对自然灾害的基本技能和知识^[3]。演练则是检验应急预案有效性和员工应急能力的重要手段,通过模拟真实的灾害场景,提高员工的应急响应速度和协同作战能力。最后,要储备专业的抢修队伍和必要的抢修设备、物资。这些队伍应具备丰富的抢修经验和专业技能,能够在灾害发生后迅速投入抢修工作。同时,还应确保抢修设备和物资的充足和完好,为抢修工作提供有力的物质保障。

4.2 灾中应急响应

灾中应急响应是电力系统灾害恢复工作的关键阶段，其目标是迅速启动应急预案，实时监测与评估电力设施的受损情况，并快速调配资源进行抢修。自然灾害发生后，应立即启动应急预案，成立灾后恢复指挥部，统一指挥和协调抢修工作。指挥部应迅速集结抢修队伍和设备，明确抢修任务和责任分工，确保抢修工作的有序进行。同时，要通过监测设备和现场勘查，实时监测电力设施的受损情况。这包括对输电线路、变电站、配电设施等进行全面检查，评估灾害对电力系统的影响程度和恢复难度。根据评估结果，可以制定更有针对性的抢修方案，提高抢修效率和准确性。在资源调配方面，要根据抢修方案的需求，迅速调配必要的抢修物资和技术人员。这包括从储备库中调取抢修设备、材料，以及从其他地区调配专业技术人员支援抢修工作。通过快速的资源调配，可以确保在最短时间内开展维修和恢复工作，减少停电时间和损失。

4.3 灾后快速恢复

灾后快速恢复是电力系统灾害恢复工作的最后阶段，也是最为关键的阶段。其目标是优先修复关键设施，分阶段恢复供电，并进行全面评估与总结，完善制度与流程。在灾后快速恢复阶段，应按照“先重后轻、先急后缓”的原则，优先修复受损严重的关键设施。这些设施通常包括主干输电线路、重要变电站等，它们的恢复对于整个电力系统的稳定运行具有至关重要的作用。通过优先修复这些关键设施，可以确保电力供应的基本保障，减少对社会经济的影响。同时，要根据灾害情况和抢修进度，分阶段恢复供电。在抢修初期，应重点恢复重要用户和关键区域的电力供应，如医院、学校、政府机关等^[4]。随着抢修工作的深入，再逐步扩大供电范围，确保在最短时间内恢复最大范围的电力供应。在恢复供电后，要对电力系统进行全面评估。这包括对受损设施的原因分析、抢修过程中的问题梳理以及恢复

效果的评估等。通过全面评估，可以总结经验教训，为后续应急预案的修订提供依据。同时，还应形成书面报告，详细记录灾害发生、抢修过程以及恢复效果等情况，为今后的灾害恢复工作提供参考。最后，要根据灾后恢复过程中的实际情况和经验教训，修订和完善电力系统自然灾害恢复的相关制度和流程。这包括建立灾后恢复工作标准、明确各部门职责和协作机制、优化资源调配流程等。通过完善制度和流程，可以提高恢复效率和规范性，确保在未来的灾害恢复工作中能够更加有序、高效地进行。

结语

电力系统的韧性提升与灾害恢复策略研究对于保障电力供应的连续性和安全性具有重要意义。通过加强顶层规划和统筹设计、智慧化升级电力基础设施、发掘灵活性资源、推进多元主体协同共治以及实施具体的灾前准备、灾中应急响应和灾后快速恢复措施，可以有效提升电力系统的韧性和可靠性。未来，随着科技的发展和气候变化的影响，电力系统的韧性提升与灾害恢复策略研究将面临更多挑战和机遇。我们需要持续关注新技术、新方法在电力系统韧性提升与灾害恢复中的应用，不断提高电力系统的韧性和可靠性，为社会的稳定和发展提供有力保障。

参考文献

- [1]张焕青.提升极端事件下电力系统韧性的主动防御策略研究[D].华北电力大学(北京),2024.
- [2]张涵帅.冰灾影响下电力系统多阶段韧性提升策略研究[D].东北电力大学,2024.
- [3]陈晓红,张高南,张乘,等.数字技术赋能新型电力系统安全韧性提升的策略研究[J/OL].中国工程科学,1-12[2025-01-15].
- [4]荣俊杰.极端天气下新能源电力系统韧性评估及提升方法研究[D].华北电力大学(北京),2024.