

电力系统安全防御脆弱性评估应用研究

杨越 黎杰

国网冀北电力有限公司秦皇岛供电公司，河北省秦皇岛市，066000；

摘要：本文围绕电力系统安全防御脆弱性评估应用展开研究。随着电力系统规模扩张、结构复杂化及新能源大量接入，安全风险加剧，脆弱性评估成为保障系统安全的核心手段。文章剖析确定性、概率性及综合评估法，其中确定性评估基于物理模型快速定位脆弱点，概率性评估量化不确定性精准测险，综合评估融合两者优势。同时，结合电网规划优化结构、运行阶段实时预警、应急管理辅助决策等场景案例，展现评估方法的实际价值。针对当前数据获取受限、模型适应性差、多因素耦合分析困难等问题，提出未来通过与人工智能、大数据等新技术融合，拓展社会经济环境多维度评估，强化能源与基础设施系统协同评估，为电力系统安全防御能力提升提供理论与实践参考。

关键词：电力系统；安全防御；脆弱性评估；应用

DOI：10.69979/3041-0673.25.09.016

引言

电力系统作为国家重要基础设施，其安全稳定运行关乎国计民生。随着电力系统规模的不断扩大、结构日益复杂，以及新能源的大规模接入，系统面临的安全挑战愈发严峻。安全防御脆弱性评估作为保障电力系统安全的关键手段，能够识别系统中的薄弱环节，为采取针对性的防范措施提供依据。深入研究电力系统安全防御脆弱性评估应用，对于提高电力系统的可靠性和安全性具有重要的现实意义。以 2021 年美国得克萨斯州冬季风暴导致的大规模停电事件为例，暴露了电力系统在极端天气下安全防御的脆弱性，凸显了开展脆弱性评估工作的紧迫性。

1 电力系统安全防御脆弱性评估概述

1.1 基本概念

电力系统安全防御脆弱性指的是系统在面临内外部干扰时，其安全防御机制可能出现失效或不足的特性。这些干扰包括自然灾害、设备故障、人为破坏等。脆弱性评估则是通过一系列的方法和技术，对电力系统安全防御体系中存在的薄弱环节进行识别、分析和量化的过程^[1]。在实际评估中，可将电力系统抽象为包含电源、输电线路、变电站、负荷等元件的复杂网络，脆弱性评估就是分析这些元件及其相互连接关系在各种干扰下的脆弱情况。通过评估，可以明确系统在不同场景下的脆弱程度，为后续的改进和优化提供方向。

1.2 评估的重要性

准确的脆弱性评估有助于电力企业合理配置资源。

在资金和人力有限的情况下，将资源优先投入到脆弱性较高的环节，提高资源利用效率。例如，某省级电网通过脆弱性评估，发现部分老旧输电线路故障率高且对系统稳定性影响大，于是将有限的资金优先用于这些线路的改造升级，使电网整体可靠性提升显著。同时，评估结果能够为系统规划和改造提供依据，使新建或改造后的电力系统更加健壮。此外，在应对突发事件时，基于脆弱性评估结果可以制定更有效的应急预案，减少停电时间和损失，保障电力供应的连续性和稳定性。如在台风季节来临前，根据评估结果提前对沿海地区脆弱性高的变电站和线路采取加固措施，有效降低了台风对电力系统的破坏程度。

2 电力系统安全防御脆弱性评估方法

2.1 确定性评估方法

确定性评估方法基于明确的物理模型和假设条件，通过对系统的静态或动态特性进行分析，来判断系统的脆弱性。例如，潮流计算是一种常见的确定性评估方法，它通过求解电力系统的潮流方程，分析系统在正常运行或故障情况下的功率分布和电压水平^[2]。如果某些节点的电压超出允许范围，或者某些线路的潮流超过其额定容量，则认为这些节点或线路是系统的脆弱点。在实际应用中，潮流计算可用于评估电网在不同负荷水平下的运行状态，为调度运行提供参考。这种方法的优点是计算简单、结果直观，但它忽略了系统运行中的不确定性因素，如设备随机故障、负荷预测偏差等，可能导致评估结果与实际情况存在偏差。

2.2 概率性评估方法

概率性评估方法考虑了系统中各种不确定因素的影响,如设备故障概率、负荷预测误差等。通过建立概率模型,计算系统在不同运行状态下的风险指标,如停电概率、停电损失等。蒙特卡罗模拟是一种常用的概率性评估方法,它通过随机抽样的方式模拟系统的各种可能状态,然后统计分析这些状态下的风险指标^[3]。例如,在评估含分布式电源的配电网时,利用蒙特卡罗模拟可以考虑分布式电源出力的随机性、负荷的不确定性以及设备故障概率等因素,更准确地评估系统的可靠性。概率性评估方法能够更全面地反映系统的实际情况,但计算量较大,需要大量的历史数据支持。若数据不足,将影响概率模型的准确性,进而导致评估结果偏差。

2.3 综合评估方法

综合评估方法结合了确定性评估和概率性评估的优点,既考虑了系统的物理特性,又考虑了不确定性因素的影响。例如,可以先使用确定性评估方法初步筛选出系统的脆弱点,然后再用概率性评估方法对这些脆弱点进行详细的风险分析。以大型互联电网为例,首先通过潮流计算等确定性方法找出电压稳定性差、潮流过载风险高的区域和元件,然后运用蒙特卡罗模拟等概率方法对这些区域和元件在各种不确定因素下的风险进行量化评估。综合评估方法能够提高评估结果的准确性和可靠性,但需要更复杂的模型和算法,对评估人员的专业知识和技能要求也更高。

3 电力系统安全防御脆弱性评估在不同阶段的应用

3.1 在电力系统规划阶段的应用

在电力系统规划阶段,脆弱性评估可以帮助规划人员优化电网结构。通过对不同规划方案进行脆弱性评估,比较各个方案在应对各种故障和干扰时的表现,选择最优的规划方案。例如,在某城市新区电网规划中,对多个变电站选址和输电线路走向方案进行脆弱性评估,考虑了地震、洪水等自然灾害对电网的影响,最终选择了一个既满足负荷需求,又能有效抵御自然灾害的方案,避免将重要设备设置在易受自然灾害影响的地区,或者避免形成过于薄弱的输电通道。此外,脆弱性评估还可以为规划中的新能源接入提供参考,确保新能源的接入不会对系统的安全稳定运行造成过大影响。在风电和光伏大规模接入电网时,通过评估可以确定合理的接入容量和接入点,避免因新能源出力波动导致系统电压和频率不稳定。

3.2 在电力系统运行阶段的应用

在电力系统运行阶段,实时的脆弱性评估能够帮助运行人员及时发现系统中的潜在风险。通过在线监测系统的运行参数,利用评估模型实时计算系统的脆弱性指标。当指标超过设定的阈值时,及时发出预警信号,运行人员可以采取相应的措施,如调整运行方式、增加备用容量等,以降低系统的脆弱性。例如,某省级电网调度中心采用实时脆弱性评估系统,对电网运行状态进行实时监测。当监测到某条重要输电线路的潮流接近其额定容量且系统电压稳定性下降时,系统立即发出预警,调度人员及时调整运行方式,将部分负荷转移至其他线路,避免了线路过载和电压崩溃事故的发生。此外,脆弱性评估还可以为设备的维护和检修计划提供依据,优先对脆弱性较高的设备进行维护,提高设备的可靠性^[4]。通过分析设备的运行数据和脆弱性评估结果,确定设备的维护周期和维护内容,实现设备的状态检修。

3.3 在电力系统应急管理阶段的应用

在电力系统发生突发事件时,脆弱性评估可以为应急决策提供支持。通过快速评估系统在故障后的脆弱性状态,确定故障对系统的影响范围和严重程度。根据评估结果,制定合理的应急恢复策略,优先恢复重要负荷和关键设备的供电。例如,在某地区发生地震导致部分变电站和输电线路损坏后,利用脆弱性评估模型快速评估系统的受损情况,确定了优先恢复的变电站和线路,以及重要用户(如医院、交通枢纽等)的供电顺序,缩短了停电时间,减少了灾害损失。同时,脆弱性评估还可以帮助评估应急资源的需求,合理调配应急物资和人员,提高应急响应的效率和效果。通过评估确定抢修所需的设备、材料和人员数量,确保应急资源能够及时、合理地调配到关键部位。

4 电力系统安全防御脆弱性评估面临的挑战

4.1 数据获取与处理难题

电力系统安全防御脆弱性评估需要大量准确的数据支持,包括设备参数、运行数据、气象数据等。然而,这些数据的获取往往存在困难。一方面,部分数据可能受到保密限制,无法完全获取,如一些涉及电网核心技术和服务的参数。另一方面,数据的质量参差不齐,存在缺失值、错误值等问题。例如,由于传感器故障或通信问题,部分设备的运行数据可能存在缺失或错误。此外,随着电力系统的发展,数据量不断增大,如何高效地处理和分析这些数据也是一个挑战。传统的数据处理方法难以满足海量数据的实时分析需求,需要采用大数据处理技术和算法来提高数据处理效率和准确性。

4.2 模型精度与适应性问题

现有的评估模型往往是基于一定的假设和简化条件建立的,与实际电力系统存在一定的差距。在复杂的运行环境下,模型的精度可能会受到影响,导致评估结果不准确。同时,电力系统的结构和运行方式不断变化,新的设备和技术不断应用,现有的模型可能无法适应这些变化,需要不断进行更新和改进。

4.3 多因素耦合分析困难

电力系统的脆弱性受到多种因素的影响,如设备故障、自然灾害、人为因素等,这些因素之间相互耦合、相互作用。目前,对多因素耦合作用下的脆弱性评估还存在困难,缺乏有效的分析方法和模型。如何准确地考虑多因素的耦合效应,是提高脆弱性评估准确性的关键。

5 电力系统安全防御脆弱性评估的发展趋势。

5.1 与新技术的融合

随着人工智能、大数据、物联网等新技术的发展,将这些技术应用于电力系统安全防御脆弱性评估具有广阔前景。例如,利用人工智能算法可以对大量的运行数据进行深度挖掘和分析,提高评估模型的精度和适应性。深度学习算法可以自动学习电力系统运行数据中的复杂模式和规律,建立更准确的脆弱性评估模型。物联网技术可以实现对电力设备的实时监测和数据采集,为评估提供更丰富的数据支持。通过在电力设备上安装传感器,实时采集设备的温度、振动、电压、电流等数据,实现对设备状态的全面感知,为脆弱性评估提供更准确的数据基础。

5.2 拓展评估维度

未来的脆弱性评估将不仅仅局限于对系统的电气性能进行评估,还将考虑社会、经济、环境等多个维度的因素。例如,评估停电对社会经济的影响,包括工业生产停滞造成的经济损失、居民生活不便带来的社会影响等。同时,考虑电力系统对环境保护的适应性,如评估新能源接入对碳排放的影响、电网建设对生态环境的破坏等。通过拓展评估维度,可以更全面地反映电力系统的安全防御状况,为决策提供更综合的依据。在电力系统规划和运行决策中,综合考虑社会、经济、环境等因素,实现电力系统的可持续发展。

5.3 强化多系统协同评估

电力系统与其他能源系统(如天然气系统、供热系统等)以及交通、通信等基础设施系统之间存在着密切的耦合关系。未来的评估将更加注重多系统之间的协同评估,考虑不同系统之间的相互影响和相互作用。例如,

分析电力系统故障对天然气供应的影响,以及天然气供应中断对电力系统的反馈作用等。在城市能源互联网建设中,通过协同评估电力、天然气、供热等能源系统,可以优化能源配置^[5]。同时,考虑电力系统与交通、通信系统的协同,如电动汽车充电对电网的影响,以及通信中断对电力系统自动化控制的影响等,实现多系统的协调发展。

6 结论与展望

本文对电力系统安全防御脆弱性评估应用进行了全面的研究。通过对评估方法的分析和应用场景的探讨,明确了脆弱性评估在电力系统不同阶段的重要作用。同时,也指出了当前评估工作面临的数据获取、模型精度和多因素耦合分析等挑战。未来,随着新技术的不断发展和应用,电力系统安全防御脆弱性评估将朝着与新技术融合、拓展评估维度和强化多系统协同评估的方向发展。这将为电力系统的安全稳定运行提供更有力的保障,推动电力行业向更加智能化、可靠化的方向迈进。然而,在实际发展过程中,还需要进一步加强相关理论研究和技术创新,解决面临的各种问题,以实现电力系统安全防御脆弱性评估技术的不断完善和提升。

参考文献

- [1] 门永生,朱朝阳,于振,等.电网基础设施物理脆弱性评估方法研究综述[J].供用电,2014,(09):60-62.
- [2] 宋宇.考虑配电网脆弱性的分布式储能配置研究[D].华北水利水电大学,2024.
- [3] 陶莎,俞俊英,陈世伟,等.面向复杂海上环境的风电工程多级供应集成优化研究[J].中国管理科学,2024,32(12):323-334.
- [4] 田晟.面向业务质量的电力通信业务路由优化方法设计与实现[D].北京邮电大学,2024.
- [5] 魏新迟,何馥彤,宋平,等.韧性城市电网信息物理融合系统风险解释模型研究[J/OL].华北电力大学学报(自然科学版),1-13[2025-04-26].

作者简介:杨越,出生年月:1992年09月,性别:男,民族:汉,籍贯:河北蔚县,学历:硕士研究生,职称:电力工程技术工程师,研究方向:电力系统安全防御与恢复控制。

黎杰,出生年月:1992.12.23,性别:男,民族:汉,籍贯:湖北省咸宁市,学历:硕士研究生,职称:电力工程技术工程师,研究方向:继电保护。