

提高电力系统安全稳定性的技术与控制措施研究

鄢水强

国网苏州供电公司

摘要：在社会经济飞速发展，人民生活水平日益提高的今天，人们对电力的需求明显增加，电力系统也更加凸显其重要性。电力系统作为国家经济基础设施，它的安全与稳定直接影响着社会正常运行与人们日常生活。近年来，由于电力系统日益庞大且复杂性不断提高，其安全稳定问题受到了更大的挑战。因此，研究和发

关键词：电力系统；安全稳定性；提升技术；控制措施

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2024.24.069

引言：电力系统的安全稳定性就是指电力系统在正常工作和发生故障情况下能保持平稳工作状态。现代电力系统在不断发展的过程中，结构变得愈加复杂，运行环境变得愈加多变，尤其是大规模互联电网环境中，当出现故障时，可能导致大面积停电事故发生，带来严重经济损失与社会影响。近几年国内外几起电力系统事故给我们留下了深刻教训。如2003年北美停电和2012年印度停电就暴露出电力系统对大规模干扰与故障反应的脆弱性。对这几起事故进行分析研究为我们完善电力系统安全稳定技术及控制措施提供了一个重要的方向。

一、电力系统安全稳定性概述

（一）电力系统安全稳定性的定义和重要性

电力系统安全稳定性是指当电力系统处于正常工作状态以及出现故障时能保持系统频率、电压以及功率处于指定范围之内，保证电力供应持续可靠。它不仅与电力系统自身运行效率息息相关，而且也直接影响着社会正常运行与经济发展。电力系统是否安全、稳定，是一国能源安全，经济发展与否的重要标志。现代社会中，当电力系统出现大范围的故障时，就会造成大范围的停电现象，对居民的生活以及工业生产都会造成严重的影响。所以，确保电力系统安全稳定对维护社会秩序与经济稳定有着极为重要的作用。

（二）影响电力系统安全稳定性的主要因素

影响电力系统安全稳定运行的因素有很多，有自然灾害、人为操作失误、设备故障、系统运行方式以及新能源接入等。自然灾害，例如台风、地震，都可以给电力设施带来直接的损失；人为的操作失误会诱发系统的不稳定，甚至失效；设备故障，例如发电机、变压器和其他关键设备损坏，将影响电力供应；系统运行方式布

置不合理，会造成局部过载或者电压失稳。另外，在新能源飞速发展的背景下，新能源的大规模接入使电力系统动态特性变得更为复杂，加大了其运行过程中的不确定性及控制难度。这些因素叠加影响使电力系统安全稳定性受到越来越大的考验。

（三）电力系统安全稳定性的评估指标

评价电力系统安全稳定性要有一系列指标进行度量，其中主要有频率稳定性、电压稳定性、功率稳定性以及暂态稳定性。频率稳定性是系统频率受干扰后回复至额定值时所具有的性能；电压稳定性是指当系统发生负荷变化或者故障时，系统保持电压水平不变；功率稳定性是由有功、无功功率平衡及传输能力两部分组成；暂态稳定性是指受短时扰动之后，系统回复至稳定状态所具有的特性。通过对电力系统运行数据进行监测与分析，并与仿真及建模技术相结合，上述指标可对电力系统安全稳定性进行综合评价，从而为电力系统规划、运行及管理提供科学依据。

二、提高电力系统安全稳定性的技术

（一）电力系统保护技术

电力系统保护技术作为保障电力系统安全平稳运行的重点手段，核心是对故障进行快速准确的检测与隔离，避免因故障扩散而导致更大范围停电及设备损坏。保护技术有短路保护、过电流保护、差动保护。短路保护是以检测电流快速升高、电压剧烈下降等故障作为短路故障的判别依据，其常见装置包括断路器、继电保护装置等。过电流保护是依据电流大小及持续时间判断有无过载或者短路现象，常用的设置参数有短时延时过电流整定值及长时延时过电流整定，这几个参数一般是按系统额定电流及期望故障电流来整定。差动保护是以电力设备两端电流之差判别内部故障的一种保护方式，应用在变压器、发电机等关键设备上，一般用高灵敏度继电器与CT（电流互感器）配合使用实现精确测量。另外，由于电力系统的规模越来越大，复杂性越来越高，智能保护技术应用越来越广泛，它通过在线监测、智能分析等技术手段，能够对电力系统运行状态进行实时监测，对潜在故障进行提前预警，并进行预防性维护，增强系统可靠性与安全性。例如，广域测量系统（WAMS）采用同步相量测量技术来对电网进行全面的监控。结合大数据分析和人工智能算法，该系统能够有效地识别和定位故障，从而为电力系统的保护和控制提供了强有力的支持。利用这些先进保护技术，电力系统故障响应能力及稳定性显著提高，保证电力供应持续可靠。

（二）电力系统稳定控制技术

电力系统稳定控制技术对于确保电力系统在所有运行状态中都能保持稳定具有重要意义，其中涉及很多控制装置与方法。稳定控制装置如静止无功补偿器（SVC）和同步调相机（STATCOM）通过调节无功功率来维持电压稳定，确保电网的电压水平在合理范围内。无功功率补偿技术是利用并联电容器与电抗器来平衡无功功率供需需求、降低电压波动、改善电力系统功率因数与传输效率。电力系统稳定器（PSS）通过精确控制发电机的励磁系统，有效地抑制了电力系统中的低频振荡，从而增强了系统的动态稳定性。动态反应控制通过实时监测、快速响应等手段对电力系统运行状态进行调节，例如当电力系统受到干扰时对发电机出力或者负荷进行自动调节，使系统重新达到平衡。随着智能电网技术的进步，电力系统中引入了更多的智能控制设备和系统，这些设备和系统是通过广域测量系统（WAMS）和相量测量单元（PMU）来实现的，实现了对电力系统运行状态进行综合监测与分析，并提供了更加精确、及时的控制措施。自愈控制系统采用自动化技术与智能算法相结合的方式，可以在电力系统出现故障的情况下快速定位故障点、隔离故障区域、对电网结构进行重新布局、恢复电网的正常供电。通过这些高级稳定控制技术可以使电力系统面临各种干扰与故障时能快速回到稳定状态并保证电力供应可靠安全。

（三）电力系统的故障检测和诊断技术

电力系统故障检测与诊断技术对于保障电力系统的安全、稳定运行起着关键作用，通过准确、及时地识别、定位故障，将故障对系统运行造成的影响降到最低。在线监测系统是检测故障的基本手段，它通过传感器及数据采集装置对电力设备运行状态进行实时监测，其关键参数主要有电流、电压、温度及振动。利用高频局部放电监测，气体继电器监测以及红外热成像技术手段对设备可能发生的故障进行辨识，为设备提供早期预警信号。行波法、阻抗法等故障定位技术通过对故障电流、电压等波形变化情况进行分析来定位故障点。行波法是利用故障引起电磁波在电缆内传播的特点，精确测量到各个测量点之间的时间差来进行故障点定位，非常适合远距离输电线路故障检测。阻抗法计算故障点与测量点之间电气阻抗的变化来定位故障，非常适合复杂电网结构。广域测量系统（WAMS）与同步相量测量单元（PMU）在广泛的电网监测中扮演着关键角色，它们结合了相量测量的数据和实时模拟技术，能准确地诊断出复杂电网故障发生的原因及影响区域。另外，人工智能与大数据分析的提出使故障检测与诊断更趋于智能化，利用机器学习算法实现历史故障数据的分析与模式识别，增强了故障预测与诊断精度。自愈控制系统集故障检测与诊断技术于一体，实现了故障后故障点的迅速定

位、故障区域的自动隔离以及电网结构的重新布局，在最短的时间内复电，减少了故障给电网运行带来的冲击。

（四）智能电网技术的应用

将智能电网技术应用在电力系统中，是当代电力系统的一个重要发展方向，利用信息通信技术将其与电力系统进行深度结合，使电力系统能够高度自动化、智能化。智能电网采用先进的传感器，通信网络以及数据分析技术对电力系统运行状况进行实时监控与管理，以提高电网效率，可靠性以及安全性。该智能调度系统对电力供需实时数据进行分析及预测，实现发电计划及负荷分配优化，降低峰谷差，增强电力系统运行经济性及稳定性。关键参数为实时负荷数据，发电机组状态以及电价信息。自愈控制系统能在故障情况下快速地对故障点进行检测、定位和隔离，同时，通过对电网拓扑进行动态重构，实现了电网的快速复电，降低了故障给系统带来的冲击。广域测量系统（WAMS）利用相量测量单元（PMU）所提供的同步相量数据，达到了对电网进行全面的监控和实时分析的目的，同时也支持故障的预警和即时控制功能。分布式能源管理系统（DERMS）旨在通过对分布式能源发电和储能设备的协同控制，来优化能源的使用效率，并增强系统的适应性和灵活性，主要参数有分布式电源输出功率、储能状态、负荷需求等。将电动汽车充电网络和智能电网相结合，利用智能充电桩及充电管理系统来均衡电网负荷、支撑电动汽车有序充电及电力调度、优化电能使用效益。需求侧管理技术采用智能电表与用户端设备相结合，以价格信号与激励措施为手段，指导用户改善用电行为、削峰填谷、增强电力系统负荷调节能力。智能电网技术又包含了微电网与虚拟电厂等技术的运用，以分布式控制与协同优化来实现局部电网自主运行与自我调节，提高电网抗扰动与恢复能力。通过使用这些智能技术，电力系统可以更加有效地处理复杂多样的运行环境，从而提高了整个运行的安全性，可靠性以及经济性，为清洁能源大规模接入与可持续发展，提供了坚实技术保障。

三、电力系统安全稳定性的控制措施

（一）优化电网结构

电网结构优化对促进电力系统运行效率与可靠性具有重要意义，它通过合理调配电网资源，完善网络拓扑结构等方式来实现电力高效传输与配置。优化电网结构，其核心是降低功率损耗，改善电压稳定性，提高系统抗故障能力。优化过程主要考虑因素有电网节点负荷分布，输电线路路径选择，电力设备布置等。负荷分布均衡就是通过电力负荷的合理配置来避免某些线路或者节点超载，以减小局部电压的波动以及系统总体功率损耗。输电线路的路径选择优化涉及最短路径算法和最小损耗原则，以确保电力能够通过最经济的路径传输，从

而减少电能传输过程中的损耗。电力设备如变压器、开关站和配电室的合理配置,会直接决定电网的工作效率和稳定性。先进的电网优化技术,例如基于遗传算法、粒子群优化算法和蚁群优化算法的智能优化方法,可以在多目标和多约束条件下找到电网结构的最优配置。另外,在智能电网技术不断发展的背景下,电网结构优化也可采用实时监控数据与预测模型相结合的方式对电网运行模式进行动态调整,适应负荷变化及新能源接入增强了电网灵活性及适应性。优化电网结构的最终目的就是要建设高效、可靠、灵活的电力传输与分配网络以保证电力系统在多种运行工况下的稳定安全,通过对电网结构的不断优化与完善,从而为电力系统可持续发展奠定了坚实的保障。

(二) 优化运行方式

优化电力系统运行方式是促进系统高效可靠运行的重要途径,它通过对资源进行科学合理的调度与分配来达到电力供需动态平衡状态。其优化核心是充分利用发电资源、合理分配负荷,降低运行损耗。发电侧优化主要包括对每台发电机组出力进行调整,并通过经济调度模型找出最优发电组合使燃料成本最小、排放最小来满足电力需求。关键参数与每台机组发电成本、运行效率、排放系数有关。负荷侧优化以需求响应策略为手段指导用户削减电力高峰时段的用电量、平滑负荷曲线、缓解电网压力。实时负荷预测与发电计划调整在运行优化中发挥着重要作用,利用大数据分析人工智能算法实现对未来负荷变化的准确预测,适时调整发电计划及备用容量以增加系统响应速度及灵活性。输电网络优化运行是通过对电力潮流进行调节来降低输电损耗与瓶颈,保障电力高效传输。电压及无功优化控制采用无功补偿装置及变压器分接头进行调节以保持系统电压水平的稳定,降低电压波动及损耗。在可再生能源占比不断提高的情况下,其运行方式优化也需要考虑新能源不确定性与波动性等因素,采用分布式能源协调控制与储能系统调节相结合的方式均衡发电与负荷以提升系统运行稳定性。电力市场的推出推动了运行的优化,它通过市场机制与价格信号共同引导着发电、用电等行为,实现资源的优化配置,促进经济效益的提高。采用广域监控与自动化系统,使电网的运行状况实时可视,故障检测与恢复速度显著提高,系统可靠性与安全性进一步提高。在考虑上述因素的情况下,对电力系统运行方式进行优化,既可以提高运行效率与经济性,又可以增强其适应性与抗风险能力,从而为电力系统安全、稳定地运行提供强有力的保障。

(三) 定期检修与预防性维护

对电力系统进行定期检修及预防性维护,是保证电力系统能够长期平稳运行的重点举措,通过计划性维护及检修来预先发现和排除可能出现的故障,从而保证设

备一直处于最佳运行状态。定期检修的核心任务是根据预定的周期对电力设备进行检查和维护,这包括变压器、发电机、断路器和输电线路等关键设备。在大修期间,技术人员从设备外观检查,运行参数测试及内部结构检测等方面入手,确定可能出现的磨损,老化及损坏等问题,及时维修或替换以防止故障。常见测试参数有装置电气绝缘性能,温度,振动及油质分析。预防性的维护工作主要集中在运用先进的监测技术和数据分析工具,以对设备的运行状况进行实时跟踪,并预估其健康状况和预期的剩余使用寿命。在线监测系统利用传感器及数据采集装置连续记录装置运行参数并结合历史数据及故障模型对装置工作趋势进行分析,对可能出现故障点进行提前报警。常用的监测项目包括局部放电监测,红外热成像,超声波检测以及振动分析,这几种技术手段可以对可能存在的问题进行精确定位,从而为维修决策提供科学的依据。大数据分析人工智能技术在预防性维修中的地位日益显著,本文通过分析海量运行数据,构建设备故障预测模型来优化维修计划,增强维修针对性与有效性。这既避免了不必要的停机检修、减少了维护成本、又最大程度上延长了设备使用寿命、促进了电力系统可靠性提高、经济效益增加。通过将定期检修与预防性维护相结合,电力系统可以更加有效预防设备故障、降低突发停电事件发生率、保障电力供应持续稳定。这种综合性维护策略为电力系统安全运行与可持续发展奠定了扎实的基础。

结束语:

综上所述,提升电力系统安全稳定研究既有利于确保电力供应持续可靠,也有利于促进电力系统现代化与智能化进程。在今后的发展过程中,伴随着科技的进步与应用的不断深入,电力系统运行的安全性与稳定性也会进一步提高,从而为社会可持续发展奠定了较为稳固的根基。经过不断地研究与革新,相信未来电力系统会更安全、更稳定、更有效率。

参考文献

- [1] 李晨源. 高尚. 提高电力系统安全稳定性的技术与控制措施研究[J]. 模具制造, 2023, 23(10): 280-282.
- [2] 顾卓远. 基于响应的电力系统暂态稳定控制技术研究[D]. 中国电力科学研究院, 2014.
- [3] 肖仕武. 马素媛. 吴京涛, 等. 大型钢铁企业提高供电系统安全性措施的研究[C]//中国高等学校电力系统及其自动化专业第二十四届学术年会论文集(上册). 2008.
- [4] 邹斌. 提高电厂热控系统可靠性技术研究[J]. 电源技术应用, 2013, 000(012): 392-392.
- [5] 钱雪峰. 电力系统安全稳定控制的重要性研究[J]. 河南科技, 2014(8): 2.