

电力系统可靠性分析

万 民

浙江浙天通信工程有限公司 浙江 宁波 315000

摘 要: 本文围绕电力系统可靠性展开。先阐述其基础理论, 包括概念界定与基本原理。接着介绍确定性、概率性分析方法, 分析影响可靠性的设备、运行管理及环境等因素。最后提出设备优化、运行管理优化、系统结构强化等提升策略, 为电力系统可靠运行提供理论参考。

关键词: 电力系统; 可靠性分析; 影响因素; 提升策略

引言: 电力系统是现代社会运转的关键支撑, 其可靠性关乎经济、生活的方方面面。从日常照明到工业生产, 稳定的电力供应不可或缺。然而, 设备故障、自然灾害等众多因素威胁着系统可靠性。深入研究电力系统可靠性, 探索有效分析方法与提升策略, 对保障电力持续稳定供应、推动社会发展意义重大。

1 电力系统可靠性基础理论

1.1 可靠性概念界定

电力系统可靠性指系统持续、稳定提供符合质量要求电力的能力, 包含充裕度和安全性两个核心维度。充裕度衡量系统在正常运行条件下, 满足各类用电负荷需求的能力, 涉及发电容量、输电配电能力等方面, 确保电力供应在数量上满足社会生产与居民生活需求。安全性聚焦系统抵御故障和突发扰动的能力, 当线路故障、设备损坏或遭受自然灾害时, 系统仍能维持稳定运行, 避免大面积停电事故, 保障电力供应不中断^[1]。可靠性指标体系是量化评估系统性能的重要工具。平均停电时间反映用户年均停电时长, 数值越低表明系统为用户提供持续供电的能力越强。平均停电频率统计用户年均停电次数, 体现系统运行稳定性, 次数越少说明系统出现故障导致停电的概率越低。系统可用率表示系统在一定时期内正常运行时间占总时间的比例, 直观展现系统可投入使用的程度, 比例越高意味着系统可靠性越高。这些指标从不同角度衡量系统可靠性, 为分析和改进提供依据。

1.2 可靠性分析的基本原理

概率统计是可靠性分析的重要基础。在电力系统中, 设备故障具有随机性, 概率理论用于计算故障发生概率。通过历史故障数据和设备性能参数, 建立故障概率模型, 预测设备在未来一段时间内出现故障的可能性。对于输电线路, 依据其运行年限、环境条件等因素, 估算因雷击、老化等原因导致故障的概率, 为设备维护和检修提供参考。同时利用概率理论评估多个事件

同时发生的可能性, 分析复杂故障场景对系统可靠性的影响。系统状态评估逻辑基于对系统不同运行状态的分解。正常状态下, 系统发电、输电、配电各环节稳定运行, 电力供需平衡。当设备故障或外部扰动发生, 系统进入故障状态, 可能出现部分区域停电、电压异常等问题。故障发生后, 通过维修、切换备用设备等操作, 系统进入修复状态, 逐步恢复到正常运行。通过分析系统在这三种状态下的转换过程和持续时间, 评估系统整体可靠性。建立状态转移模型, 计算系统从正常状态转变为故障状态的概率, 以及从故障状态恢复到正常状态所需时间, 综合判断系统可靠性水平, 为优化系统运行和规划建设提供支持。

2 电力系统可靠性分析方法

2.1 确定性分析方法

预想事故分析通过预设一系列可能的故障场景, 评估系统承受故障能力。分析前需全面梳理系统元件, 涵盖发电设备、输电线路、配电装置等。在此基础上, 针对各元件设定故障类型, 如线路短路、发电机停运等。构建故障场景后, 运用潮流计算、稳定分析等技术手段, 模拟故障发生时系统运行状态。观察故障引发的电压波动、功率失衡等现象, 判断系统是否仍能维持稳定运行, 能否满足关键负荷供电需求。通过对多个预设故障场景的分析, 识别系统薄弱环节, 为电网规划和运行调度提供依据。N-1准则是确定性分析的重要应用。其含义为系统中任一元件故障时, 系统仍能保持稳定运行, 并具备一定供电能力。在实际应用中, 电力规划阶段, 依据N-1准则对候选电网结构和设备配置方案进行筛选^[2]。确保规划的电网在单元件故障情况下, 不会出现电压崩溃、频率失稳等严重问题, 保障基本供电需求。运行调度时, 基于N-1准则评估系统实时运行状态。当发现系统存在违反N-1准则的风险, 如某条线路负载过重, 一旦故障将导致区域停电, 调度人员及时调整运行方式, 转移

负荷,降低故障影响,维持系统可靠性。

2.2 概率性分析方法

蒙特卡洛模拟通过随机抽样模拟系统元件的故障与修复过程,进而计算系统可靠性指标。该方法首先建立系统元件的故障概率模型和修复时间模型,确定元件故障概率分布和修复时间分布。模拟过程中,依据概率分布随机生成元件的故障时刻和修复时刻,模拟系统在不同时刻的运行状态。每一次模拟相当于系统的一次随机运行过程,重复大量模拟次数。统计每次模拟中系统停电时间、停电频率等指标,通过计算这些指标的平均值、方差等统计量,得到系统可靠性评估结果。蒙特卡洛模拟能有效处理元件故障的随机性和不确定性,适用于复杂电力系统可靠性评估。状态空间法将系统状态进行分类,通过状态转移概率矩阵分析系统可靠性。系统状态包含正常运行、元件故障、部分修复等多种情况。分析时,确定系统所有可能状态,并计算相邻状态之间的转移概率。如从正常状态因某元件故障转移到故障状态的概率,或从故障状态经修复转移到部分修复状态的概率。构建状态转移概率矩阵后,基于矩阵理论和数学模型,分析系统在不同时刻处于各状态的概率。通过对这些概率的计算和分析,评估系统长期运行的可靠性指标,预测系统未来运行状态变化趋势,为电力系统规划、运行和维护提供决策支持。

3 影响电力系统可靠性的关键因素

3.1 设备因素

元件老化与故障对电力系统可靠性影响显著。发电机长期运行过程中,绕组绝缘材料逐渐老化,机械部件磨损加剧,导致发电效率下降,甚至出现短路、停机等故障。变压器的铁芯、绕组在长期电磁作用下,性能逐渐衰退,绝缘老化引发的局部放电,可能造成变压器损坏,影响区域供电。输电线路长期暴露于自然环境,导线受风吹日晒、雨淋腐蚀,金属材质出现氧化、断裂,绝缘子表面污秽积累,降低绝缘性能,增加线路短路和跳闸风险。这些设备故障一旦发生,会打破系统功率平衡,引发连锁反应,降低系统整体可靠性。设备制造与安装质量是系统运行的潜在风险。设备制造环节存在的质量缺陷,如变压器内部焊接不牢、发电机转子动平衡未达标,会使设备在运行中出现异常振动、过热等问题,缩短使用寿命,增加故障概率。安装过程中,若线路连接不规范、设备调试不到位,会导致接触电阻过大、设备参数不匹配等情况。输电线路杆塔基础埋设深度不足,在大风等外力作用下易倾斜倒塌;电缆接头安装工艺不良,运行时产生局部过热,最终引发电缆故

障,威胁电力系统稳定运行。

3.2 运行管理因素

调度运行策略直接关系系统可靠性。不合理的调度计划,如过度集中安排某些线路或设备的负荷,会使这些元件长期处于高负载状态,加速老化损坏。负荷分配不均衡,导致部分区域供电紧张,电压质量下降,而其他区域设备闲置,降低系统整体运行效率^[3]。科学的调度策略需综合考虑发电能力、电网结构和负荷分布,动态调整电力输送路径和设备运行状态。在用电高峰时段,合理安排发电机组出力,优化输电线路潮流分布,避免因局部过载引发连锁故障,保障系统稳定供电。维护检修水平对系统可靠性至关重要。定期维护能及时发现设备潜在问题,如对变压器进行油色谱分析,可检测内部是否存在过热、放电等故障隐患;对输电线路开展巡检,能排查杆塔倾斜、导线断股等情况。及时检修可消除设备缺陷,更换老化部件,恢复设备性能。若维护检修不足,设备隐患得不到及时处理,小问题逐渐演变成大故障。长期不清理变电站绝缘子表面污秽,会降低绝缘性能,最终导致闪络事故;忽视对继电保护装置的定期校验,故障发生时可能出现误动或拒动,扩大停电范围,严重影响系统可靠性。

3.3 环境与外部因素

自然灾害对电力设施破坏力巨大。地震引发地面剧烈震动,造成杆塔倾倒、变电站设备移位损坏,输电线路断裂,直接中断电力传输。台风带来的强风会吹断导线、刮倒杆塔,暴雨引发的洪水可能淹没变电站和配电设施,导致设备短路失效。冰雪灾害中,输电线路覆冰使导线重量增加,引发杆塔倒塌、断线事故,同时覆冰导致的绝缘子闪络,也会造成线路跳闸。这些灾害对电力系统的破坏往往具有突发性和大面积性,严重威胁系统可靠性。人为因素干扰同样不容忽视。施工过程中,因施工人员对地下电缆位置不明确,机械作业导致电缆挖断;在电力设施附近进行高空作业,未采取安全防护措施,施工设备触碰输电线路,引发短路故障。恶意破坏行为,如盗窃电力设备部件、蓄意破坏杆塔和线路,直接损害电力设施,造成局部甚至大面积停电。这些人为因素引发的故障,不仅扰乱系统正常运行秩序,还增加了故障排查和修复难度,对电力系统可靠性构成严重威胁。

4 提升电力系统可靠性的策略

4.1 设备优化策略

新型设备与技术应用为提升设备可靠性提供有力支撑。高可靠性设备采用新材料与新工艺制造,发电机使

用耐老化绝缘材料,可延长绕组使用寿命,降低短路风险;变压器采用低损耗铁芯材质,减少运行中因发热导致的部件损坏。智能化设备集成传感器与通信模块,能实时感知自身运行状态,断路器配备智能脱扣装置,可根据电流变化精准动作,避免误跳闸。先进传感技术通过光纤传感器监测输电线路温度与应力,及时发现导线过载与断股隐患;在线监测技术利用局部放电检测仪,捕捉变压器内部绝缘缺陷,提前预警潜在故障,防患于未然。设备状态检修改变传统定期检修模式。基于设备状态监测数据,采用振动分析、油液检测等手段,准确判断设备健康状况。对变压器开展油色谱分析,根据气体成分与浓度变化,评估内部过热或放电程度;通过红外测温检测输电线路接头温度,判断接触是否良好。依据分析结果制定检修计划,仅对存在缺陷或性能下降的设备进行针对性维修,避免不必要的停机检修,减少设备损耗,提高检修效率。

4.2 运行管理优化

智能调度系统构建增强系统运行掌控力。利用智能技术实现电力系统实时监控,通过分布于全网的智能电表、监测终端,采集电压、电流、功率等数据,构建系统运行全景模型。借助大数据分析 with 人工智能算法,对电网运行状态进行预测与评估,提前发现潜在风险。在用电高峰时段,智能调度系统自动优化发电机组出力分配,调整输电线路潮流,避免局部过载。面对新能源大规模接入带来的功率波动,系统快速响应,协调各类电源出力,确保系统稳定运行,提升应对复杂工况能力^[4]。应急预案完善提升系统故障恢复效率。制定科学合理的应急预案,针对不同故障类型与突发事件,明确各部门职责与处置流程。对大面积停电事故,规划应急电源启动顺序与负荷恢复路径;针对自然灾害,确定抢修队伍集结方案与物资调配计划。定期对应急预案进行演练与修订,检验其可行性与有效性。模拟台风过境导致多条线路跳闸场景,演练应急发电车接入、重要用户保供电等环节,发现问题及时优化。完善的应急预案确保系统在故障或突发事件发生时,能迅速隔离故障、恢复供电,减少停电时间与范围,保障电力供应可靠性。

4.3 系统结构强化

网架结构优化夯实电力系统运行基础。合理规划电网结构,增加输电线路互联节点,增强网络连通性。构建环网结构,使电力在多个路径间灵活传输,当某条线路故障时,可快速通过其他路径转移负荷,避免区域停电。提高电网冗余度,建设备用线路与变电站,在主设备故障时迅速投入运行。优化变电站布局,缩短供电半径,降低线路损耗,提高电压稳定性。完善的网架结构减少单一元件故障对系统的影响,提升整体抗风险能力,保障电力可靠输送。分布式电源与储能配置赋予系统更高灵活性。分布式电源如光伏发电、风力发电接入配电网,实现就近供电,减少长距离输电损耗与故障风险。在偏远地区或重要用户侧部署分布式电源,可作为独立电源在主网故障时持续供电。储能系统发挥“电力蓄水池”作用,在电力富余时储存电能,用电高峰或系统故障时释放。锂电池储能系统快速响应功率变化,稳定电网频率;抽水蓄能电站实现大规模电能存储与释放,平衡新能源间歇性波动。分布式电源与储能系统协同运行,增强系统调节能力,提高供电可靠性,推动电力系统向灵活高效方向发展。

结束语

电力系统可靠性分析意义重大。通过明确可靠性概念、原理,掌握分析方法,剖析影响因素,并采取设备优化、运行管理优化及系统结构强化等策略,可有效提升电力系统可靠性。未来,需持续探索新技术、新方法,应对新能源接入等新挑战,保障电力系统安全稳定运行,为经济社会发展提供坚实电力支撑。

参考文献

- [1]翟蓓蓓.面向电力系统的继电保护与监控系统可靠性分析[J].通信电源技术,2024,41(12):236-238.
- [2]刘利娜.建筑电力配电系统可靠性分析与优化研究[J].现代装饰,2024,588(19):130-132.
- [3]张郁,施锦月,孙昊,等.基于大数据分析的电力系统可靠性实时监控与优化提升[J].中华传奇,2023(16):280-282.
- [4]程晨.电力企业继电保护可靠性分析与评估[J].中小企业管理与科技,2024(18):126-128.