

高压电网故障诊断与快速恢复控制技术探析

李 升

中海石油(中国)有限公司天津分公司 天津 滨海新区 300450

摘要: 高压电网作为电力系统核心骨干,其故障易引发供电中断,制约电力供应可靠性并影响社会经济运行。传统故障诊断与恢复控制技术存在适配性不足、协同性欠缺等局限,现代智能诊断技术虽有发展但仍面临复杂场景适配难题。本文分析高压电网故障基础理论与诊断技术特性,探究快速恢复控制核心技术,构建诊断与恢复的协同机制,提出闭环协同优化思路,为提升高压电网故障处置能力与供电可靠性提供参考。

关键词: 高压电网;故障诊断;快速恢复;控制技术

引言: 随着社会经济快速发展,各行业对电力供应的可靠性与稳定性提出更高要求。高压电网作为电能传输与分配的核心载体,其安全运行直接关乎电力系统整体效能。然而,受自然环境、设备状态等多因素影响,高压电网故障频发,易引发大面积停电,造成严重经济损失与社会影响。当前故障诊断与恢复控制技术存在碎片化应用、协同衔接不畅等问题,难以满足复杂电网的故障处置需求。因此,系统研究高压电网故障诊断与快速恢复控制技术及协同机制,对提升电网韧性、保障电力安全供应具有重要现实意义。

1 高压电网故障基础理论

1.1 高压电网故障类型与特征

高压电网故障类型具有多样性,主要可分为短路故障、断路故障及异常运行状态三类。短路故障是最常见且危害最大的类型,包括三相短路、两相短路、单相接地短路等,其核心特征是故障点电压骤降、电流急剧增大,伴随强烈的电磁暂态过程,易引发设备损坏;断路故障多由线路断裂、开关误动等导致,特征为故障线路电流中断,供电区域停电,故障点两端电压差值较大;异常运行状态如过电压、过负荷等,虽未直接造成供电中断,但会加剧设备老化,增加故障发生概率,其特征表现为电网参数偏离正常运行范围且持续时间较长^[1]。

1.2 故障产生的影响因素

高压电网故障的产生受多种因素综合作用,主要包括自然环境因素、设备自身因素及运行维护因素。自然环境因素中,雷电、大风、暴雨、冰雪等极端天气易破坏线路绝缘、导致线路舞动或覆冰断裂,是引发故障的重要外部诱因;设备自身因素涉及设备制造工艺缺陷、材料老化、绝缘性能下降等,随着设备运行年限增长,故障发生概率会逐步提升;运行维护因素包括操作不当、维护周期过长、设备状态监测不及时等,不当操作易引发瞬时故

障,而维护缺失则会使潜在缺陷逐步发展为显性故障。

2 高压电网故障诊断技术

2.1 传统故障诊断技术

传统高压电网故障诊断技术以基于电路原理和信号分析的方法为核心,主要包括阻抗法、故障录波分析法、行波法等。(1)阻抗法通过计算故障点到测量点的阻抗值来定位故障,其原理是利用故障发生时电网线路阻抗与距离的线性关系,借助保护装置采集的电压、电流信号完成计算,具有原理简单、实现成本低的特点,适用于简单结构的电网线路故障初步判断。(2)故障录波分析法依靠故障录波装置记录故障前后的电气量数据,通过人工或简单软件对数据进行分析,提取故障特征如电压骤降、电流突变等,进而判断故障类型和大致范围,该方法对数据完整性要求较高,诊断精度依赖于分析人员的经验水平。(3)行波法利用故障产生的暂态行波在线路中的传播特性,通过检测行波的到达时间和幅值来定位故障,相较于阻抗法,其定位精度更高,受线路参数和负荷变化的影响较小,但对暂态信号的采集速度和处理能力要求严格,在复杂电网拓扑中易受行波反射、折射的干扰。

2.2 现代智能故障诊断技术

现代智能故障诊断技术依托人工智能、大数据、机器学习等先进技术,突破了传统方法对经验和线性模型的依赖,主要包括神经网络法、支持向量机法、模糊逻辑法以及融合诊断方法等。(1)神经网络法通过模拟人脑神经元的连接结构,构建多层网络模型,利用大量故障样本数据进行训练,使模型具备自动学习故障特征的能力,能够实现对复杂故障模式的精准识别,尤其适用于非线性、多因素影响下的电网故障诊断,具有较强的自适应能力和容错性。(2)支持向量机法基于统计学习理论,通过寻找最优分类超平面实现对故障数据的分类,在样本数据较少的

情况下仍能保持较高的诊断精度,有效解决了传统机器学习方法的过拟合问题,适用于小样本、高维度的电网故障诊断场景。(3)模糊逻辑法针对电网故障诊断中存在的模糊性问题如故障特征不明确、信号干扰等,通过定义模糊规则和隶属度函数,将模糊信息转化为可量化的诊断依据,实现对不确定故障的有效判断。(4)融合诊断方法则结合多种智能算法的优势,如将神经网络与模糊逻辑结合,兼顾模型的学习能力和模糊推理能力,进一步提升了复杂电网故障诊断的准确性和可靠性^[2]。

2.3 不同诊断技术的性能对比与适用场景

从性能对比来看,传统故障诊断技术的优势在于原理简单、成本低廉、运行稳定,技术成熟度高,但存在诊断精度有限、对复杂电网适应性差、依赖人工经验、诊断效率低等不足。(1)现代智能故障诊断技术则具备诊断精度高、自适应能力强、能够处理复杂非线性问题、诊断效率高的显著优势,但其对数据质量和计算资源要求较高,前期模型训练成本高,技术实现难度较大,在简单电网场景中难以体现性价比优势。(2)从适用场景来看,传统故障诊断技术更适用于结构简单、线路较短的配电网或农网,以及对诊断精度要求不高的故障初步筛查,可作为电网故障诊断的基础手段。(3)现代智能故障诊断技术更适用于结构复杂、电压等级高的超高压、特高压输电网,以及新能源并网、微电网接入等多元复杂场景下的故障诊断,能够满足高精度、快速响应的故障处理需求。(4)在实际应用中,常采用传统技术与智能技术相结合的方式,通过传统技术完成初步故障定位和数据采集,借助智能技术实现精准诊断和故障类型识别,兼顾诊断的经济性和可靠性。

3 高压电网快速恢复控制技术

3.1 快速恢复控制的核心目标与原则

快速恢复控制的核心目标是在保障安全的前提下,以最快速度恢复电网供电能力,最大限度降低停电造成的经济损失和社会影响。具体包括三个层面:(1)快速恢复关键电源节点供电,构建稳定的电网支撑骨架。(2)逐步扩大供电范围,提升电网负荷承载能力。(3)恢复电网正常运行参数,保障电能质量达标。

为实现上述目标,恢复控制需遵循四项核心原则:

(1)安全性原则,确保恢复过程中不发生二次故障,关键设备运行参数不超过耐受极限。(2)优先级原则,优先恢复医院、交通枢纽等重要负荷及骨干网架供电。(3)协调性原则,统筹电源、网络、负荷的恢复节奏,实现三者动态匹配。(4)经济性原则,在满足安全要求的前提下,优化恢复路径和操作流程,降低恢复成本。实践表明,

遵循科学的恢复原则可使电网恢复时间缩短3至5小时。

3.2 网络重构技术

网络重构是高压电网快速恢复的基础环节,其核心任务是在故障隔离后,通过调整电网拓扑结构,构建稳定的供电骨干网络。该技术主要依托智能决策系统与远程控制设备,实现对断路器、隔离开关等设备的精准操作,快速形成合理的电网分区与供电路径。(1)在重构过程中,需综合考虑电网潮流分布、节点电压水平、线路传输容量等关键因素,通过拓扑优化算法筛选最优重构方案,避免出现线路过载、电压越限等问题。(2)先进的网络重构技术可实现故障区域电网拓扑的智能分析与方案生成,单次重构操作响应时间不超过2分钟,能够快速搭建起支撑后续电源和负荷恢复的网络框架^[3]。(3)重构过程中需重点保障骨干网架的N-1安全准则,确保重构后的网络具备基本的抗扰动能力。

3.3 电源恢复控制技术

电源恢复是电网恢复的核心动力来源,其核心任务是有序恢复发电机组供电,逐步提升电网供电能力。该技术需根据电源类型(火电、水电、新能源等)的特性,制定差异化的恢复策略:(1)对于火电机组,需严格遵循启动流程,控制锅炉升温升压速度,确保汽轮机、发电机等关键设备平稳启动,避免因热应力过大造成设备损坏,单台百万千瓦级火电机组的冷态启动恢复时间约为4至6小时。(2)对于水电机组,可利用水能资源的快速响应特性,优先启动具备条件的机组,快速提供有功支撑,其启动恢复时间可缩短至30分钟以内。(3)对于新能源电站,需协调其出力特性与电网电压、频率的稳定性,通过储能装置平抑出力波动,保障新能源电源平稳并入重构后的电网。电源恢复过程中,需严格控制机组并列顺序和出力提升速度,确保电网频率稳定在 $50\text{Hz}\pm 0.2\text{Hz}$ 的正常范围内。

3.4 负荷恢复控制技术

负荷恢复控制技术的核心是根据电网恢复进程,分阶段、分优先级恢复用户供电,实现负荷与电源出力的动态平衡。该技术通过负荷分类管控、增量控制等手段,避免因负荷突增导致电网频率、电压大幅波动。(1)依据负荷重要程度将其划分为重要负荷、一般负荷和可中断负荷三类,优先恢复重要负荷供电。(2)是采用“小步增量”的恢复策略,每次恢复负荷容量不超过当前电网可承载能力的10%,逐步提升电网负荷水平;利用智能负荷控制终端,实现对负荷的远程监测与精准调控,当电网出现不稳定迹象时,可快速切除部分可中断负荷,保障电网稳定运行。(3)通过科学的负荷恢复控制,能

够有效降低负荷冲击对电网恢复进程的影响,提升恢复过程的平稳性。

3.5 恢复控制中的安全约束条件

恢复控制过程中,必须严格遵守各项安全约束条件,确保电网和设备安全。核心安全约束主要包括以下几类:

(1) 频率约束,电网频率需维持在49.5Hz至50.5Hz的允许范围内,当频率低于49.5Hz时,需立即切除部分负荷或提升机组出力,避免发生频率崩溃。(2) 电压约束,关键节点电压需控制在额定电压的90%至110%之间,通过调整发电机励磁、投切无功补偿装置等手段,保障电压稳定。(3) 设备容量约束,线路、变压器等关键设备的传输功率不得超过额定容量,避免因过载导致设备损坏,如500kV输电线路的单回最大传输容量通常不超过1500MW。(4) 暂态稳定约束,恢复过程中的操作(如机组并列、线路合闸)需通过暂态稳定计算验证,避免产生过大的冲击电流和过电压,保障电网暂态稳定。这些安全约束条件贯穿于恢复控制的全过程,是保障恢复工作顺利推进的前提^[4]。

4 高压电网故障诊断与快速恢复控制的协同机制

4.1 协同控制的必要性与核心逻辑

协同控制的必要性源于高压电网故障的复杂性与影响的广泛性。单一的故障诊断仅能确定故障位置与类型,难以直接适配恢复控制需求;而脱离诊断支撑的恢复控制易出现策略偏差,甚至扩大故障影响。其核心逻辑在于构建“诊断-决策-执行-反馈”的闭环协同体系,以故障诊断为基础,为恢复控制提供精准依据;以恢复控制需求为导向,倒逼诊断过程优化,确保两者在时间维度同步衔接、在功能维度互补适配,最大化降低故障造成的供电中断损失。

4.2 故障诊断结果对恢复控制策略的指导作用

故障诊断结果为恢复控制策略的制定提供核心依据,直接决定策略的针对性与可行性。诊断得出的故障位置、故障类型、故障范围及故障严重程度等信息,可明确恢复控制的重点区域与关键节点。基于此,恢复控制可精

准选择负荷转移路径、确定停电区域恢复顺序、优化电网重构方案,避免盲目操作导致的二次故障。同时,诊断结果中的故障发展趋势预判,能为恢复控制预留缓冲空间,提升策略执行的安全性与稳定性^[5]。

4.3 恢复控制过程中的故障再诊断与调整机制

恢复控制过程中,电网运行状态处于动态变化中,可能出现故障残留、新故障诱发等情况,因此需建立故障再诊断与调整机制。该机制通过实时采集恢复控制过程中的电网运行数据,对比诊断基准值,对电网状态进行持续监测与再诊断。当发现诊断结果与实际运行状态偏差超出阈值时,立即触发恢复控制策略调整流程,基于新的诊断结果优化控制方案,确保恢复控制始终贴合电网实际故障情况,实现故障的彻底处置与电网的平稳恢复。

结束语:高压电网故障诊断与快速恢复控制是保障电力系统安全稳定运行的关键环节。本文系统梳理了故障基础理论,对比分析了传统与现代诊断技术,深入探讨了快速恢复控制核心技术及两者的协同机制。构建的“诊断-决策-执行-反馈”闭环体系,为解决技术协同不足问题提供了有效思路。未来,需进一步强化智能技术融合应用,提升复杂场景下的诊断与控制精度。本文研究成果可为电力系统相关技术优化与工程实践提供有益借鉴,助力提升高压电网故障处置的科学性与高效性。

参考文献:

- [1]毛忻聆,侯逸隽.超高压电网故障波形智能识别与分析技术运用[J].中国新技术新产品,2025(6):32-34.
- [2]高森.大气环境下高压电网输电线路故障识别方法[J].环境技术,2021,39(5):227-231.
- [3]丁义轩,王文涛.智能预警系统在超高压电网设备故障预测中的应用研究[J].电工技术,2025(16):74-77.
- [4]陈行.基于保护启动信息的电网故障诊断解析模型[J].电子元器件与信息技术,2025,9(01):138-140.
- [5]邹昊凯,董秋军,吴布托.基于大数据分析的特高压电网运行优化与故障预警研究[J].电脑编程技巧与维护,2024(12):111-113,125.