

电力系统故障诊断与恢复策略研究

周琳爽, 戚亚晖, 皇甫敏亭, 曹程洋

陕西公众电气股份有限公司, 陕西 西安 710000

摘要：电力系统故障往往突发突然,如果不及时处理可能会引发一系列严重的系统、设备故障。为应对此类问题,电力行业不断探索和发展新的技术和方法来提高故障诊断的速度和准确性,以及优化故障后的快速恢复机制。本文主要探讨基于继电保护动作信息、故障录波器分析及人工智能与机器学习技术的电力系统故障诊断方法,并深入分析快速隔离与局部恢复策略的应用效果。通过结合实际案例和技术细节的分析来为电力系统的故障检测和恢复提供支持,促进电力系统的智能化管理和维护。

关键词：电力系统; 故障诊断; 继电保护动作信息; 故障录波器

Research on the Fault Diagnosis and Recovery Strategy of Electric Power System

Zhou Linshuang, Qi Yahui, Huangfu Minting, Cao Chengyang

Shaanxi Public Electric Co., Ltd. Xi'an, Shaanxi 710000

Abstract : Power system failures are often sudden, if not dealt with in time may cause a series of serious system and equipment failures. To cope with such problems, the power industry continues to explore and develop new technologies and methods to improve the speed and accuracy of fault diagnosis, as well as to optimize the rapid recovery mechanism after failure. This paper mainly discusses the fault diagnosis method of power system based on relay protection action information, fault recorder analysis and artificial intelligence and machine learning technology, and deeply analyzes the application effect of rapid isolation and local recovery strategy. By combining the analysis of actual cases and technical details to provide support for the fault detection and recovery of power system, and promote the intelligent management and maintenance of power system.

Keywords : power system; fault diagnosis; relay protection action information; fault recorder

引言

电力系统故障可能由设备老化、外力破坏、恶劣天气条件等多种因素引起,这些故障如果不及时处理,可能会导致电流急剧增大、电压骤降、系统稳定性受损等一系列问题,进而引发更广泛的连锁反应,造成巨大的经济损失和社会影响。因此探究电力系统故障诊断与恢复策略的研究对于提升电力系统的可靠性和安全性来说有着积极意义。

一、电力系统故障的危害性

电力系统故障的危害是多方面的,会对电流、电压、系统稳定性以及设备人身安全等带来风险。当电力系统发生短路故障时,电流会急剧增大并超出设备的正常工作电流范围,过大的电流会产生巨大冲击力,使电气设备受到机械应力影响,导致设备出现变形、损坏、烧毁^[1]。短路电流同时还会产生大量热能,使设备局部或整体过热,加速设备绝缘材料的老化,降低设备的使用寿命,如大型发电机出线端的三相短路电流可达几万甚至十几万安培,这样的电流足以直接烧坏设备。电力系统发生短路故障,还会导致电压大幅下降,在三相短路中,短路点的电压几乎为零,短路点附近的电压也会明显下降,这种电压的波动将直接影响用电设备的正常工作,像异步电动机在电压降低时,其转速会下降,甚至停转,会严重影响线路的稳定运行。

此外,电力系统故障还会导致发电机输出的电磁功率降低,

原动机输入的机械功率如果无法快速适应变化,就会出现不平衡功率,这种不平衡功率会导致发电机转子加速,但由于各发电机的加速速度不同,发电机相互间的角度差会越来越大,最终可能引起并列运行的发电机失去同步,破坏电力系统的稳定性,一旦系统稳定性被破坏,就可能引发大面积停电^[2]。在故障发生时,短路故障带来的电弧可能会烧毁电力设备,甚至引发火灾、触电事故。在电力运维工作中,由于故障设备、人员操作不当或者安全措施不到位而导致的设备损失、触电事故时有发生,给事故人员家庭,以及企业、社会都带来的不同程度的损失。

二、电力系统故障诊断方法分析

(一) 基于继电保护的动作信息

继电保护装置能在检测到异常情况时迅速作出反应,通过切断电源或隔离故障部分来防止故障扩大化,基于继电保护的动作

作者简介:周琳爽(1996.06-),女,汉族,陕西省西安市人,本科,初级工程师,研究方向:电力相关。

信息来进行故障诊断，是电力系统故障处理中较为直接有效的方法。继电保护的核心在于监测电力系统的运行参数（如电流、电压、频率等），并与预设的阈值进行比较^[3]。一旦这些参数偏离正常范围，超过设定的安全界限，继电保护装置就会根据内置逻辑快速判断是否存在故障，并决定是否需要采取行动。比如在检测到过电流或短路的情况下，断路器会被立即触发以中断电路，阻止故障进一步发展。当继电保护装置动作后，会产生一系列记录，如动作时间、动作类型（比如过流保护、差动保护等）、涉及元件及当时电网状态。这些信息可以作为后续故障的分析依据。技术人员可以利用这些数据来重建故障发生的场景，确定故障的具体位置和性质。此外，通过对不同保护装置之间动作顺序的研究，还可以了解故障传播路径，这对于复杂电网尤其有用。

基于继电保护动作信息的故障诊断与修复。河南某城市电网傍晚高峰时段（18:00–21:00），一个关键变电站内的110kV线路突然发生故障，故障发生后，变电站内安装的继电保护装置立即启动，检测到了异常高的电流值，远超正常运行范围，触发了过流保护机制。与此同时，差动保护也识别出了线路两侧电流不平衡的现象，这进一步证实了短路的存在。继电保护装置按照预设逻辑快速切断了故障线路，并记录下了详细的动作信息，具体如表1所示。

表1 继电保护装置动作记录

动作时间	动作类型	涉及元件	当时电网状态	电流峰值 (A)	预设阈值 (A)
20:15	过流保护 + 差动保护	110kV 线路 A 相断路器	负载高峰期	3500	2000

根据继电保护装置提供的信息，技术人员首先重建了故障发生的场景，结合历史负荷曲线和实时监控数据，确定了故障发生在负载高峰期，可能是由于设备老化或外力破坏（如树枝掉落）引起的。为了精确定位故障位置，技术人员调用了其他相关保护装置的动作记录，尤其是上下游站点的数据，通过对不同保护装置的动作顺序（如表2所示），发现故障沿着特定路径传播，最终锁定在一段靠近山区的线路上。随后技术人员利用SCADA系统获取的历史负荷曲线，以及实时监控数据进行比对，评估事故发生前后电网的状态变化，并派遣维修人员前往疑似故障区域进行实地勘查，确认故障是否存在。

表2 上下游保护装置动作顺序

站点名称	动作时间	动作类型	涉及元件	动作延迟 (ms)
上游站	20:14:59	差动保护	110kV 线路 B 相断路器	1
中间站	20:15:00	过流保护	110kV 线路 A 相断路器	0
下游站	20:15:01	过流保护	110kV 线路 C 相断路器	2

明确了故障原因和具体位置后，电力公司迅速制定了抢修方案。考虑到故障地点的特殊性，决定先采用无人机巡检的方式快速抵达现场，同时派遣地面维修队伍携带必要的工具和材料进行准备。经过无人机实时传输的画面，技术人员确实发现有断树倒在电线上导致此次短路故障。维修人员清理断树和杂物并对受损的绝缘子进行了更换，整个修复过程严格遵循安全操作规程，完成修复工作后，技术人员重新检查了所有受影响的设备，确认无

误后逐步恢复了供电。

（二）故障录波器分析

故障录波器是电力系统中用于捕捉和记录故障发生时电气参数变化的重要工具，能够在毫秒级的时间分辨率上记录电压、电流、频率等关键参数的变化。将故障录波器通过连接到变电站内的电压互感器（PTs）、电流互感器（CTs）等测量设备上，实时监测电网运行状态^[4]。当检测到异常情况时，录波器会自动启动并保存一段时间内的历史数据，一般为故障前几秒钟至故障后几十秒的数据。再借助故障录波器的远程通信能力，可以将收集到的信息传输到中央监控中心或云端平台进行集中管理和分析^[5]。

某城市电网中某条110kV输电线路就安装有故障录波器，该线路总长13.4km，共计设有26个故障录波器，分别标号gz201–gz226。在2022年2月–2024年3月期间，共辅助运维人员诊断线路故障共14起，提升了电力故障响应速度。表3是在2023年8月发生的一起电力线路故障，由gz-214故障录波器捕获的关键参数^[6]。

表3 故障录波器捕获的关键参数

参数	正常值范围	故障时刻读数	变化趋势
线路电压 (kV)	106–114	0	急剧下降至零
线路电流 (A)	< 200	3500	突然升高
频率 (Hz)	49.8–50.2	49.5	轻微下降

从表中可以看出，在故障发生的瞬间，线路电压骤降至零，而电流则急剧上升至3500安培，远超正常工作范围。同时电网频率也出现了轻微下降，表明线路发生故障。进一步分析后，故障发生在20:37（属于负载高峰期），持续时间非常短暂，仅约100毫秒，通过对不同位置录波器记录的数据进行对比后，技术人员成功锁定了gz-214故障的具体位置，并安排维修人员快速赶往现场勘查修复^[7]。

（三）人工智能与机器学习技术

利用人工智能与机器学习技术对电力系统的故障模式进行训练，建立预测模型来识别潜在的故障模式，这种方法通过处理大量来自传感器、继电保护装置、故障录波器等设备的非结构化数据，以及天气预报信息和历史维护记录等外部数据源，能够显著提高故障诊断的准确性和效率，对于复杂多变的电力系统具有极佳的适应性。具体来说，实施这一方法的过程涉及数据收集、预处理、特征提取、模型选择与训练、验证与优化等多个步骤，并最终实现智能化的故障预测和诊断^[8]。

第一，在数据收集阶段，需要从多个渠道获取数据集。数据具体涵盖电压、电流、功率因数等电力系统内部的各种运行参数，以及温度、湿度、风速等可能影响电力设施正常运作的环境因素信息。同时还应考虑纳入过往故障案例及其对应的维修记录，为模型提供更加丰富的训练素材。数据收集阶段还需进行严格的清洗工作，去除噪声点或异常值，填补缺失数据。

第二，特征提取环节，这是将原始数据转换成可用于建模的有效表示形式的关键步骤。通过对原始数据进行统计分析、时域频域变换、小波分解等操作，可以挖掘出隐藏在数据背后的模式和规律。比如某些特定频率下的谐波成分可能是设备老化或局部

放电的早期迹象；而不同时间段内的负荷曲线变化趋势则有助于判断电网是否存在过载风险。同时，还可以采用主成分分析（PCA）、独立成分分析（ICA）等降维技术，减少冗余信息，突出最具代表性的特征向量，从而简化后续计算任务并提升模型性能。

第三，根据问题性质和预期目标选取合适的机器学习算法构建预测模型。对于分类任务，如区分正常状态与故障类型，支持向量机（SVM）、随机森林（RF）、卷积神经网络（CNN）等监督式学习方法表现出色；对于回归分析，则可以使用线性回归、岭回归或者长短期记忆网络（LSTM）。深度学习框架因其强大的表达能力和自动特征学习能力，在处理复杂非线性关系方面展现出独特优势。特别是在面对大规模时空序列数据时，基于RNN或Transformer架构的时间序列预测模型能够捕捉到长期依赖关系，能一定程度上预测未来可能出现的问题^[9]。

三、故障快速隔离与局部恢复策略

快速隔离与局部恢复策略的核心在于在最短时间内定位并隔离故障区域，防止故障影响范围扩大，同时尽可能保持非故障区域的正常供电。因此该措施可配合上文提到的继电保护动作信息与故障录波器分析技术，案例所在的电力公司就结合此类技术搭建了一个具备高度灵敏性和响应速度的故障检测系统。该系统能够实时监测电力系统的各项参数，包括电流、电压、频率等，并与预设的安全阈值进行比较。一旦发现电流突然增大或电压骤降等异常情况，系统将立即触发警报并向相关控制中心发送通知^[10]。

通过继电保护和智能断路器，系统可以在检测到故障后迅速切断故障线路或设备，而不必关闭整个变电站或更大范围的电网^[11]。一旦故障被有效隔离，可以立即恢复对未受影响部分用户的供电。对于那些配备了分布式能源资源（DERs）的局部电网，还可以利用这些资源来支持临时供电，进一步提高恢复速度^[12]。当故障发生时，继电保护装置会根据内置逻辑算法自动作出反应，选择性地切断故障点附近的电路连接，避免故障蔓延至其他健康部分。现代智能断路器不仅能够实现毫秒级的动作响应，还支持远程操作和状态监控功能，使得运维人员可以在远离现场的情况下执行必要的控制指令。与此同时，借助地理信息系统（GIS）平台，技术人员可以通过可视化界面直观地查看电网拓扑结构及各节点的工作状况，快速确定最佳隔离方案，最大限度减少停电范围。

四、结语

本文展示了多种有效的故障诊断方法，并探讨了快速隔离与局部恢复策略的应用及其带来的显著效果。继电保护装置能够迅速响应异常情况，切断故障部分，防止故障扩大化；故障录波器则提供毫秒级时间分辨率的关键参数变化记录，为故障定位和原因分析提供数据支持^[13]。结合快速隔离与局部恢复策略，可以最大限度保障电力故障区域的系统稳定性。未来电力系统故障诊断与恢复领域仍有许多值得探索的方向，如开发更先进的算法模型，推动微电网和储能技术的发展等，能帮助电力企业构建一个更加智能、可靠的现代电力系统。

参考文献

- [1] 罗卿. 基于多源信息融合的电力系统快速故障诊断方法研究 [J]. 微型电脑应用, 2023, 39(10):161-163+180.
- [2] 徐婷婷. 电力系统继电保护隐藏故障诊断方法与系统重构研究 [J]. 电气技术与经济, 2023, (08):32-34.
- [3] 张友. 电力系统及其自动化中变压器故障诊断研究 [J]. 模具制造, 2023, 23(10):166-168.
- [4] 高陆军, 陈洁, 王新雷, 等. 基于多任务学习的新型电力系统故障诊断方法 [J]. 现代电子技术, 2023, 46(15):155-160.
- [5] 焦炜贤. 电力系统设备状态监测与故障诊断技术分析 [J]. 集成电路应用, 2023, 40(05):112-113.
- [6] 张平, 王鹏展, 龚宁, 等. 基于窥孔结构LSTM的电力系统跳闸故障诊断 [J]. 南京信息工程大学学报(自然科学版), 2023, 15(06):712-722.
- [7] 汪琳. 电力系统中6 kV变压器短路故障诊断与维修 [J]. 设备管理与维修, 2022, (20):149-150.
- [8] 白宇, 王云飞, 刘艳茹, 等. 基于容错机制的电力系统故障诊断方法研究 [J]. 电工技术, 2022, (20):204-207.
- [9] 秦译为, 张蓬鹤, 宋如楠, 等. 新型电力系统下电弧故障诊断技术及发展趋势 [J]. 电测与仪表, 2024, 61(02):1-9.
- [10] 帕力且·乌休尔. 电力系统电气设备的故障诊断与检修对策 [J]. 中国高新科技, 2022, (16):23-25.
- [11] 代家罗, 胡海浪. 超声波技术在电力系统故障诊断中的应用 [J]. 光源与照明, 2022, (07):186-188.
- [12] 朱赖红, 王娟. 基于神经网络的船舶电力系统故障诊断方法 [J]. 舰船科学技术, 2022, 44(11):132-135.
- [13] 杨湛鸿. 人工智能在电力系统故障诊断中的应用 [C] // 中国电力设备管理协会. 中国电力设备管理协会第二届第一次会员代表大会论文集(2). 广东电网有限责任公司湛江供电局, 2022:5.