

新型电力系统下配电网故障快速定位与隔离技术研究

李 帅¹, 孙文文²

(1. 济南万泰电器安装工程有限公司, 山东 济南 250100;

2. 泰石节能材料股份有限公司, 山东 泰安 271000)

摘 要 在“双碳”目标的推动下, 以大规模分布式新能源、储能装置和电动汽车为代表的新型主体, 正在深刻改变配电网的运行形态。配电网从单向潮流、集中控制模式逐渐发展成为多端有源、双向互动的复杂网络, 故障电流特性、故障传播路径和保护配合关系都发生了很大的改变, 给故障的快速定位和隔离带来了前所未有的困难。本文对新型电力系统背景下配电网故障特性变化规律进行梳理, 从行波法故障定位、人工智能故障特征提取和识别、多源信息融合精确定位三个方面进行了详细的分析, 同时针对故障隔离与自愈恢复也做了相应的研究, 主要研究了分布式馈线自动化方案、分布式能源接入下隔离优化策略、快速自愈恢复方法, 以期为相关人员提供参考。

关键词 新型电力系统; 配电网; 故障定位; 故障隔离; 馈线自动化

中图分类号: TM727

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.25.004

0 引言

随着全球能源结构转型的不断深入, 我国的电力系统也正在发生着由以化石能源为主导向以清洁能源为主的深刻变革。风电、光伏等分布式电源大量接入配电网, 储能系统广泛分布, 电动汽车充电站快速普及, 使得配电网由原来的无源辐射型网络转变成多端有源复杂的网络。这种转变一方面可以提高能源利用率, 另一方面又使配电网故障更加复杂多变, 现有的故障定位和隔离技术存在着适应性差的问题。配电网故障处理能力直接决定供电可靠性和用户的用电质量。新型电力系统中分布式电源注入电流改变了传统的故障电流分布规律, 保护装置误动、拒动的风险增大, 故障定位精度降低、隔离范围扩大、自愈恢复时间延长等越来越明显。

1 新型电力系统下配电网故障特性与研究现状

1.1 新型电力系统对配电网故障特性的影响

新型电力系统中分布式电源大量接入, 从根本上改变了配电网潮流分布和故障响应方式。传统的配电网是辐射状的, 故障电流单向流动, 特性比较稳定; 而多端有源网络中分布式光伏、风电机组和储能装置都可以向故障点馈入电流, 使故障电流大小、方向和波形具有很强的不确定性、时变性。逆变型电源受控

电流源特性受限制, 短路电流幅值一般不超过额定电流的 1.2 倍到 1.5 倍, 远远小于传统同步发电机的故障电流, 使传统的过电流原理保护装置灵敏度大幅度下降, 故障特征提取变得非常困难, 对快速准确地发现故障的要求也越来越高^[1]。

1.2 配电网故障快速定位与隔离的技术挑战

新型配电网在故障定位与隔离层面面临多重技术挑战。第一, 分布式电源接入使故障电流特征变得复杂, 传统的阻抗法、注入信号法等定位手段已经不能满足要求; 第二, 配电网拓扑结构不断发生改变, 固定参数整定的保护策略很难应对实时运行方式的变化; 第三, 故障隔离时要兼顾分布式电源的孤岛运行限制和继续供电情况, 隔离边界判定会变得比较繁杂; 第四, 通信系统的可靠性直接影响到分布式保护和自愈控制的协同工作, 通信时延以及丢包现象会对快速故障处理产生较大的影响。以上问题互相纠缠, 使得故障处理技术向着智能化、协同化方向不断发展^[2]。

1.3 国内外相关技术研究进展与不足

国内外学者就新型配电网故障处理技术做了大量的研究。行波法由于不需要系统参数、响应速度快而受到人们的关注, 在故障定位中应用较多; 人工智能方法依靠强大的特征学习能力, 在故障识别上取得了

作者简介: 李帅 (1987-), 男, 本科, 助理工程师, 研究方向: 机电安装工程。

很好的效果。分布式馈线自动化技术逐渐取代了传统的集中式方案,成为研究的热点。但是现有的成果仍然存在着明显的不足,对于逆变型电源为主导的场景中故障特征弱化的解决办法还不成熟,多源信息融合定位的实时性和可靠性还需要提高,考虑分布式能源动态特性的隔离优化模型还没有系统的研究^[3]。

2 配电网故障快速定位技术

2.1 基于行波法的配电网故障定位方法

行波法是利用故障发生时在线路中产生的电磁暂态行波信号来实现故障定位的方法,其主要优点是不需要依靠系统的稳态参数,定位精度高、反应速度快,在高压输电网中有比较成熟的工程应用。将行波法应用到配电网故障定位中,可重点解决配电网线路短、分支多、行波信号衰减快、折反射波识别难等难题。行波信号采集一般在变电站出线端和重要的分支节点上设置高频电流互感器和暂态数据记录装置,对故障初生行波和多次折反射波进行高精度的获取。时域反射法(TDR)、双端测距法是行波定位的两种主要实现方式,双端测距利用两侧行波到达时刻差来计算故障点的位置,定位精度可以达到百米级,单端法则依靠对反射波的准确识别,在配电网多分支情况下需要使用模态分析、小波变换等信号处理技术来提高波头识别的能力^[4]。

2.2 基于人工智能的故障特征提取与识别技术

人工智能技术对于故障特征提取以及识别来说,有着很强的适应性,特别适合处理新型配电网故障信号非线性、非平稳的复杂特点。目前,深度学习、机器学习和信号处理相结合的混合智能方法成了配电网故障识别的主要研究方向。经验模态分解(EMD)、变分模态分解(VMD)以及短时傅里叶变换等方法被用来从故障电流、电压信号中分离出和故障类型有关的时频特征分量。相比传统的傅里叶变换来说,该方法可以更好地反映故障信号的非平稳性,得到更加具有判别力的特征向量。在此基础上,卷积神经网络(CNN)由于具有自动特征学习的能力,可以直接从原始波形或者时频图像中提取出深层次的故障特征,而不会出现人工特征工程所造成的主观性误差^[5]。从故障类型识别角度来讲,长短期记忆网络(LSTM)更适合于处理有时序依赖的故障发展过程,可以很好地将单相接地、相间短路、断线等不同的故障类型区分开来。

2.3 多源信息融合的故障精确定位策略

单一的信息源在配电网故障定位上存在着覆盖范围小、抗干扰能力差等问题,而多源信息融合定位策

略则利用了量测终端、保护装置、智能传感器和通信系统等各种异构的数据,从而大幅度提高了故障定位的准确性以及鲁棒性。多源信息融合定位的数据来源主要有配电自动化系统(DA)上报的开关动作序列和故障指示器告警信息、配电变压器台区智能终端(TTU)采集的电流突变量、分布式故障检测单元(FTU)记录的暂态信号、用电信息采集系统反映的用户停电投诉信息。以上信息具有时间上的异步性、空间上的分散分布特征,需要统一的数据融合框架来整合。D-S证据理论、贝叶斯网络都是多源信息融合定位中使用较多的数学工具。D-S理论用建立的故障区段信度函数,把不同的信源故障证据进行合成推理,可以给出在部分信息缺失情况下合理的定位置信区间。

3 配电网故障快速隔离与自愈恢复技术

3.1 基于分布式馈线自动化的故障快速隔离方案

馈线自动化(FA)是实现配电网故障快速隔离的主要技术手段,其主要发展过程是从集中式到分布式。传统的集中式馈线自动化依靠主站系统的远程遥控,故障处理全程高度依赖通信链路的完好性,在通信中断或者主站故障的时候很容易造成隔离失败,整体故障处理时间一般会超过3分钟,在城市核心区域供电可靠性保障上存在着明显的不足。分布式馈线自动化技术将馈线终端单元(FTU)的本地故障判断与执行功能下沉至终端,使故障隔离决策从依赖主站实时通信的模式转变为直接就地自治操作的模式。其基本工作原理就是相邻的FTU之间采用对等通信协议互相传递电流方向、开关状态等保护信息,根据事先设定的本地逻辑自行判定故障区域并实施分闸动作,不需要主站参与。分布式馈线自动化的故障隔离速度在工程实际中得到了很大的提高。采用典型的10 kV手拉手环网接线模式,对分布式FA系统和传统集中式方案做故障隔离时间的对比测试分析,得到故障隔离平均时间为35秒以内,较传统的集中式方案平均缩短了约80%,通信链路部分断时仍可在45秒内完成各个分段开关就地隔离。另外,以分布式FA为基础的故障隔离方案具有较好的模块化扩展性,可以依据配电网拓扑的变化来灵活地改变保护区域的划分,满足新型电力系统中配电网频繁重构的需求。

3.2 考虑分布式能源接入的故障隔离优化策略

分布式电源(DG)大规模接入之后,改变了配电网故障电流的特性,也给故障隔离策略的改进提供了新视角。合理利用分布式电源的可控特性,在故障隔离过程中可以有效地缩小停电范围、提高供电连续性,

但前提是要解决孤岛运行的安全判别和控制协调问题。从故障隔离策略的设计角度出发,把分布式电源的运行状态当作重要约束条件加入优化模型当中。故障发生时,首先要迅速判断各个分布式电源节点是否具备形成计划性孤岛的技术条件,即本地负荷和DG出力的功率平衡裕度、逆变器的频率或电压调节能力、保护装置的孤岛检测速度。研究显示,在光伏出力充足的时候,带有储能协调的微网单元在故障隔离之后可以做到5秒钟内实现孤岛模式转换,保证区域内60%到75%的重要负荷可以持续供电,比全停电处理模式要好得多。隔离边界优化上建立以停电用户数最少、分布式电源弃电量最少为目标的优化模型,用启发式算法求解开关动作序列。经过对含20%光伏渗透率典型配电网的仿真分析,得到的优化后故障隔离方案可以使平均停电用户数下降约28%,光伏弃电率控制在8%以内,隔离时系统频率偏差不大于0.3 Hz,满足电能质量基本要求。另外,在故障隔离过程中,由于分布式电源控制模式的切换而引起的暂态冲击问题,可以在隔离动作序列中加入预同步控制环节,使孤岛和主网之间的电压相位平滑过渡,防止重合闸时出现大的冲击电流。为更直观地呈现不同故障隔离策略的性能差异,结合含20%光伏渗透率的典型配电网仿真数据,构建数据表(见表1),对比传统隔离策略与优化后隔离策略的核心性能指标。

表1 传统隔离策略与优化后隔离策略的核心性能指标

隔离策略类型	平均停电用户数 下降比例	光伏弃电率
传统隔离策略	0% (基准值)	15% ~ 20%
优化后隔离策略 (含DG协调)	约28%	≤8%

3.3 故障隔离后的配电网快速自愈与供电恢复方法

配电网自愈恢复是故障处理流程的最后一个环节,其目的是当故障被隔离之后,利用最优的网络重构和电源调度策略,在最短的时间内使非故障区域恢复供电,最大限度地减少停电造成的损失。自愈恢复速度和质量可以反映配电网运行韧性水平。自愈恢复决策框架一般采取分层协调的控制架构,就地层按照预先设定的恢复逻辑自动执行联络开关合闸动作,使健全区段尽快转供;主站层在就地恢复之后启动全局优化,考虑线路载流量限制、电压质量要求和分布式电源出力预测,得出最佳的网络重构方案。两层互相协调配合,一方面保证恢复的速度,另一方面又保证恢复方案的全局最优性。基于预案库的快速恢复方法,在故障发

生之前就离线地对各种典型故障场景下的恢复预案进行枚举,并存入主站数据库中,在故障发生之后,根据场景匹配的方式,迅速调取相应的预案执行,可以将恢复决策的时间缩短到10秒之内。经过对多个典型配电网结构进行测试分析之后,使用预案驱动的自愈恢复方式,非故障区域平均停电时间控制在90秒以内,比传统的手动遥控恢复模式缩短了约70%。就恢复方案质量而言,把分布式电源出力调度纳入恢复优化模型当中,可以较好地提高恢复方案的可行度。研究表明,在配有储能的配电网中,先用储能装置的放电能力来参与故障后功率的重新分配,可以使重要负荷恢复比例提高约15%,当配电网转供能力不足的时候,利用分布式电源以孤岛的方式保持局部区域供电,可以使实际停电用户比例降到全网用户12%以下。自愈恢复的可靠性保证要重点考虑重合闸操作给孤岛内分布式电源带来的冲击作用,还要注意多次重合闸操作所造成的系统振荡危险。

4 结束语

本文主要研究新型电力系统下配电网故障快速定位与隔离问题,从故障特性变化、定位技术方法、隔离自愈策略三个方面展开研究。研究发现,大规模接入分布式新能源改变了配电网故障响应特性,传统的单一技术已经不能满足现在形势下对快速、准确、可靠处置故障的要求;以行波法为代表的技术、以深度学习为代表的智能识别技术、多源信息融合定位技术的协同使用,可以提高故障定位的准确性、适应性;分布式馈线自动化方案对于故障快速隔离有明显的优势,结合分布式能源灵活调节和优化自愈恢复策略,在保证供电连续性的基础上大幅缩短了故障处理时间。

参考文献:

- [1] 毕忠勤,余晓婉,王宝楠,等.基于量子蚁群算法的配电网故障区段快速定位技术[J].上海交通大学学报,2024,58(05):693-708.
- [2] 汪泽.配电网故障定位与修复的自动化技术研究[J].电子元件与信息技术,2025,09(10):121-123.
- [3] 刘涛.10kV配电网深度限流高压电阻特性优化研究[J].电工技术,2026(02):137-139.
- [4] 张纯强.基于深度强化学习的配电网故障快速定位与恢复优化算法[J].电脑编程技巧与维护,2024(12):135-137.
- [5] 秋安旺,拓浪.数字化运维模式在配电网线路设备管理中的应用[J].张江科技评论,2025(08):119-121.