

智能配电系统的故障诊断与自愈技术研究

伍佩瑜

广东华方工程设计有限公司 510220

DOI: 10.32629/ems.v8i4.19758

[摘要] 随着分布式电源的大规模应用, 配电网的故障特点日益复杂, 传统方法难以准确、快速地诊断故障。为此, 提出了结合多源信息、云边协同的智能诊断自愈方案。该方法通过将改进算法与暂态行波及稳态工频量相结合, 提升了高阻接地等复杂故障的定位精度。方案采用分层控制策略, 由终端就地快速隔离故障, 主站优化恢复供电。仿真结果表明, 该方法可以减小误报率, 降低平均停电时间, 兼容现有设备, 具有较大的工程实用价值和推广应用价值。

[关键词] 智能配电; 故障诊断; 多源信息融合; 云边协同; 自愈控制

引言

近年来, 配电网的自动化水平大幅提高, 分布式光伏等电源的大量接入使得电网运行更为复杂, 而原有的过流保护手段在处理双向潮流或者高阻接地故障时, 常会出现动作缓慢甚至漏判的现象。目前主流技术虽然普及, 但仍然存在很多缺点: 故障定位容易受到噪声干扰且误差大, 自愈控制需要集中在主站进行计算, 通信延迟会降低复电速度, 一旦通信中断则无法实现本地应急。本文从智能终端出发, 通过优化算法与逻辑实现有效的自愈, 重点突出对暂态特征和稳态特征的结合, 以及“主站与终端”的协同, 以成熟的技术组合解决高阻接地识别难、恢复慢等实际问题, 为配电网提供一种经济高效的智能化升级方案。

1 基于多源信息融合的配电网故障精准诊断

配电网故障诊断的关键在于从大量的运行数据中提取故障特征。由于故障电流的幅值和相位不再是单向的, 仅靠工频电气量很难在微弱故障下正确判断故障。而暂态行波法虽然精度极高, 但采样率要求较高且易受到现场噪声的影响, 单独使用时稳定性不强^[1]。因此, 本章设计了基于暂态行波和稳态工频量的多源信息诊断方法, 利用现有配电终端硬件条件实现高精度的故障选线与定位。

1.1 暂态行波与稳态工频量的融合特征提取

在实际工程应用中, 故障信号并非是纯净的单一波形, 它还掺杂了大量的背景噪声、电磁干扰以及分布式电源并网所产生的高频谐波。如果单纯采用传统的工频分量来判断, 当发生高阻接地等隐蔽性较强的故障时, 较小的故障电流会淹没在正常的负荷电流中, 导致保护装置因检测不到增量而拒动; 反之, 如果仅仅采用行波首波头这一特征, 虽然可以快速发现故障, 但很容易受到雷击过电压、电容器投切或开关操作产生的暂态过程干扰, 这些非故障因素引起的突变常

会被误认为故障行波而造成误判或跳闸^[2]。为了解决这一矛盾, 兼顾检测灵敏性和可靠性, 我们采用精细的分层提取策略。首先, 利用小波变换强大的时频局部化特性, 将所采集的原始电压和电流行波信号进行多尺度分解, 通过选择适当的小波基函数和分解层数, 在剔除高频随机噪声的同时, 保留故障信号的奇异点特征, 精确判断故障发生的时刻以及行波到达各监测点的时间差。这一步主要解决“何时发生”和“大致在哪”的问题。

接着, 通过系统同步读取故障前几个周波内的稳态工频量, 包括基波幅值、相位及零序电流。这部分数据虽然响应较慢, 但是可以直观地代表故障性质(是金属性短路还是高阻接地)。通过将行波测距得到的初步区间与工频量分析得到的故障选线结果进行逻辑校验, 可以有效去除单信号源带来的虚假特征。例如, 当行波指示一条分支线路故障, 但是该分支线路的工频零序电流方向与故障特征不符时, 则会自动降低该行波结果的置信度, 并选择其他证据更充分的区段。这种融合充分利用了暂态信号的快速性和稳态信号的可靠性, 让诊断系统对复杂工况更加稳健。

1.2 基于改进证据理论的故障类型识别与定位

得到多维特征后, 如何将来自不同传感器、不同时刻的信息结合为确定的结果是诊断技术的难点。配电网现场环境复杂, 通信干扰导致部分数据丢失或畸变, 使“少数服从多数”的投票机制难以发挥作用。本文引入改进的D-S证据理论作为信息融合算法, 不对数据直接进行判决, 而是为每一个故障假设分配一个置信度, 将行波测距结果、工频选线结果和历史运行状态分别作为证据源^[3]。针对传统的证据理论对高冲突证据容易失效的问题, 修改了置信度分配规则, 引入冲突系数加权机制。如果不同证据源指向不同故障点, 算法将会自动识别并削弱与其他证据严重冲突、并且自身支持

度较低的数据权重,防止错误信息主导最终结论。特别是在处理高阻接地故障时,由于故障特征微弱,每一个判据的置信度较低,但是通过证据理论的融合,多个弱证据可合成一个强证据,实现对故障的准确判定。同时,该算法还设置了动态阈值,只有综合置信度超过门限时才输出跳闸指令,否则发出预警信号由人工复核,防止误动。

表1 不同故障诊断方法在不同故障条件下的性能对比

诊断方法	故障类型	过渡电阻范围 (Ω)	定位误差 (m)	误判率 (%)	平均计算时间 (ms)
传统过流保护法	金属性短路	0 - 10	850	12.5	45
传统过流保护法	高阻接地	> 200	失效	68.3	52
单一行波法	金属性短路	0 - 10	45	8.2	38
单一行波法	高阻接地	> 200	320	24.6	41
单一工频量法	金属性短路	0 - 10	620	15.1	55
单一工频量法	高阻接地	> 200	950	42.7	58
本文融合诊断法	金属性短路	0 - 10	28	1.2	85
本文融合诊断法	高阻接地	10 - 1000	46	2.8	92

从表1中可以看出,过流保护法在高阻接地情况下几乎完全失效,误判率达到68%以上;单一行波法虽然在低阻故障条件下表现尚可,但在过渡电阻增加时定位精度迅速下降,定位误差也大幅增加。本文提出的融合诊断法在所有测试场景中表现良好,在过渡电阻为1000欧姆的情况下定位误差仍在50米范围内,误判率在3%以内。虽然上述方法加入了数据融合和逻辑运算的步骤,平均计算时间会有所增长,约90毫秒,但是完全不影响智能配电终端的处理能力,不会对保护的速动性产生影响。通过暂态特征和稳态特征的有机融合以及改进证据理论的逻辑推理,本章节建立的诊断体系克服了高阻接地识别困难和多源信息冲突的问题。该方法不需要昂贵的新型传感器,只需升级现有的终端软件,即可实现快速自愈控制,为后续的快速自愈控制提供了数据依据。

2 云边协同的分层分布式自愈控制策略

故障诊断只是第一步,隔离故障并恢复非故障区域供电才是衡量配电网智能化程度的重要标准。原有的自愈控制一般为“全集中式”,即所有终端将数据发送给主站,由主站统一计算并发布指令。虽然可以实现全局最优,但往往依赖于通信网络,如果通信中断或延时过长,复电时间将大大延长。纯粹的“就地式”控制速度快,但缺乏全局视野,极易导致负荷转供不平衡甚至出现过载^[4]。本章提出云边协同分层分布式自愈策略,将快速响应交给边缘,而把全局优化交给云端主站,实现速度与质量的平衡。

2.1 基于智能终端的就地快速隔离与级联保护配合

1.3 仿真验证

为了直观地体现本文所提融合诊断方法的效果,我们在包含分布式光伏的IEEE 33节点系统中进行了大量仿真测试,并和传统方法进行对比。实验涵盖不同故障类型和不同过渡电阻范围,同时叠加了不同强度的随机噪声。测试结果如表1所示。

在“边”侧,即部署于开关柜处的智能终端(如FTU或DTU),承担着毫秒级快速响应的重任。一旦第二章的诊断算法确定故障在某一线段,在此线段两端的终端不需要等待云端主站的远程通信,而是立刻进入就地自治模式,进行就地互通或通过自己的逻辑来判断并独立跳闸。就地隔离最重要的就是速动性,为了使得该线段的隔离速度尽可能快,我们为此设计了双向交流的信息交互机制:即相邻的两个终端都会在同一时间内交互故障电流的方向,当两端终端均检测到故障电流方向指向线段内部时,就会同时触发切断线路的动作^[5];并且严格的“与”逻辑可以使该动作在十几毫秒内完成,所以在第一时间可以将故障点从电网中切除,避免了故障范围进一步扩大并影响非故障区域的供电。

另外,就地终端还支撑了配电网中不断增多的分布式光伏电源。在传统模式下,检测到电压异常后,分布式电源会脱网,导致原有供电区域会因为这种异常电压而停电。而这时就地终端会向附近的分布式电源发送支撑指令,使其进入低压穿越模式或者孤岛运行,暂时用作局部微网的电压源,为重要负荷提供电力。同时,在终端中预设有多级防误动逻辑,以分辨瞬时干扰(如雷击)和永久故障,避免由于短时的波动而造成不必要的停电。这种分布式的自治能力使得在主站通信完全中断的情况下,系统仍然具备基本的故障隔离能力和局部生存能力。

2.2 主站全局优化的网络重构与非停电区域恢复

在故障被就地隔离后,“云”侧的配电主站开始介入,负

责更大范围的供电恢复。主站收集全网实时的拓扑结构、负荷分布以及各线路的剩余容量信息,利用改进的启发式算法进行全局网络重构计算^[6]。我们的目标是在满足电压约束、线路热稳定极限以及辐射状运行要求的前提下,寻找一条最优的转供路径,以恢复尽可能多的失电负荷,同时使网损最小化。

不同于穷举法,本文采用的算法是粒子群优化算法,其中包含动态惯性权重,能够在搜索前期快速地进行大范围解空间搜索而不会陷入局部最优,在搜索后期能够调整步长,收敛至全局最优。计算结果得到的重构方案包含开关操作序列,由主站发送给终端进行操作。该方案考虑了通信延时的

影响,因此设置了超时模式:如果主站在规定的时间内未能收到终端的就地隔离确认信号或者通信链路发生堵塞,则自动降级为“预设规则模式”。在这种方法中,主站不再进行全局的优化,而是直接调用已经存储在数据库中的常见故障处理预案,虽然不是绝对最优,但是可以在几秒钟内完成基本的负荷转供。

2.3 仿真验证

我们在仿真环境中模拟了多种典型故障场景,并将本文提出的自愈技术与纯集中式和纯就地式两种传统方法进行了对比。测试指标包括负荷恢复率、平均复电时间、开关动作次数和对通信故障的容忍度。具体数据见表2。

表2 不同自愈控制模式在典型故障场景下的恢复性能对比

控制模式	故障场景	通信依赖度	负荷恢复率 (%)	平均恢复时间 (s)	开关动作次数	是否支持孤岛运行
纯集中式控制	单点永久故障	高	98.5	45.2	4	否
纯集中式控制	通信中断场景	高	0.0	>300	0	否
纯就地式控制	单点永久故障	低	72.4	1.5	2	部分支持
纯就地式控制	复杂多点故障	低	65.8	2.1	3	部分支持
云边协同分层控制	单点永久故障	中	97.8	3.8	4	是
云边协同分层控制	通信中断场景	中	85.5	5.2	3	是

从表2中可以看出,纯集中式控制在通信正常时的负荷恢复率最高,但恢复时间长达45s以上,且通信中断后系统几乎瘫痪,恢复率为零;纯就地式控制虽然速度快(约1.5s),但由于缺乏全局协调,仅能恢复部分负荷,且在复杂故障下容易发生转供路径不合理的问题。而本文的云边协同策略结合了两者的优点,在通信正常时的负荷恢复率接近集中式,达到97.8%,恢复时间缩短至3.8s,这主要是由于就地隔离的快速性。更为重要的是,即使在模拟通信中断的工况下,该策略也能在降级模式下恢复85.5%的负荷,并且支持孤岛运行,具有很强的适应性。

云边协同的分层分布式自愈方式通过划分主站与终端的功能边界,既能实现故障的快速隔离,又能实现供电恢复的整体最优,减少了对通信网络的依赖,增加了配电网面对突发情况时的韧性,是建立高可靠智能配电网的可行方案。

3 结束语

针对分布式电源接入后配电网故障特征复杂、保护适应性较差的问题,本文提出了一种综合考虑多源信息诊断与云边协同自愈的故障诊断方法。在故障诊断中融合了暂态行波高精的度与稳态工频量的可靠性,利用改进证据理论解决了高阻接地识别难与多源信息冲突问题,提升了定位精度;在自愈控制上采用“终端就地快速隔离、主站全局优化恢复”的分层模式,这种模式充分发挥了边缘侧毫秒响应的优势,

同时保留云端所具备的全局寻优能力,在通信正常时实现最优复电,在通信中断时依靠本地逻辑实现基本供电。两项仿真实验均测试了两个环节的效果。诊断实验表明,所提方法在复杂噪声环境中能够保持很高的定位精度和很低的误判率;自愈控制实验结果表明,云边协同模式可以使复电时间大幅度降低,并更能够应对通信中断等极端条件下的负荷恢复,摆脱了单一模式的局限。后续可探索人工智能算法在动态阈值整定中的应用,以适应更加复杂的电网运行条件,推动配电网向更高的自治韧性发展。

[参考文献]

- [1]王晨旭.基于小波和贝叶斯网络的智能建筑供配电系统故障诊断研究[D].2020.
- [2]王虎.智能配电系统故障自诊断技术应用研究[J].行车指南,2023(9):85-86.
- [3]王学冬,肖白.智能配电网的故障自愈技术研究[J].东北电力大学学报,2018,38(05):80-84.
- [4]高翔.智能配电网自愈控制的理论与技术研究[D].华北电力大学(北京),2011.
- [5]苏川涛.智能配电网中设备故障检测与自愈技术的应用[J].能源新观察,2025,(12):77-78.
- [6]刘康先.提升供电可靠性的智能配电网全域自愈技术研究[J].电工技术,2022,(09):63-65+69.