

配电站域式快速线路保护方案及其实现

廖峰, 陈锦荣, 区伟潮

(广东电网有限责任公司佛山供电局, 广东 佛山 528000)

摘要: 为解决现有配电线路保护越级跳闸、动作时限长以及分布式电源(distributed generation, DG)并网后保护不适用等问题, 提出了配电站域式快速线路保护及其实现方案。首先, 采用基于连接点路径搜索的拓扑模型解析方法, 并构建基于单向邻接矩阵的拓扑描述模型, 形成保护应用拓扑矩阵。然后, 分析随机投退的多类型 DG 并网系统相间和接地短路时的故障特征, 并提取故障定位有效信息, 形成故障信息矩阵。综合保护应用拓扑和故障信息生成故障定位矩阵, 提出故障定位判据。最后, 设计开发保护成套装置, 并利用已研制样机进行基于 RTplus 平台的试验。试验结果证明配电线路不同位置发生不同类型故障时保护出口时间不超过 60 ms, 目标终端接收到跳闸命令并控制相应断路器跳闸, 保护速动性和选择性要求均能得到满足。

关键词: 配电网; 站域式保护; 快速线路保护; 保护应用拓扑; 故障信息矩阵

Fast station-area protection of a distribution line and its implementation

LIAO Feng, CHEN Jinrong, OU Weichao

(Foshan Power Supply Bureau, Guangdong Power Grid Corporation Foshan 528000, China)

Abstract: To solve the problems of overstep tripping, long action time and inapplicability after the integration of distributed generators (DGs) of the existing distribution line protection, a fast station-area protection of a distribution line and its implementation scheme are proposed. First, a topological model analysis method based on connection point path search is adopted, and a topological description model based on a one-way adjacency matrix is constructed to form a protection application topology matrix. Then, the characteristics of phase to phase faults and phase to ground faults of a multi-type DGs grid-connected system with random switching are analyzed, and the effective information of fault location are extracted to form the fault information matrix. The fault location matrix is generated by synthesizing topology and fault information and the fault location criteria are put forward. Finally, the protection device is designed and a test is carried out based on the RTplus platform. The results show that the protection action time does not exceed 60 ms while different types of faults occur at different positions of the distribution line and the tripping command is received by the target terminal unit to make the corresponding circuit breaker trip. Both the speed and selectivity requirements of distribution line protection can be met.

This work is supported by the Key Project of National High-tech R&D Program of China (863 Program) (No. 2012AA050213).

Key words: distribution network; station-area protection; fast line protection; protection application topology; fault information matrix

0 引言

目前我国配电线路相间短路保护主要采用阶段

式电流保护, 而小电阻接地系统接地故障则采用零序电流保护, 依靠整定值和时限级差配合, 实现线路出口到用户侧两级或多级保护^[1-3]。配合级数少可能造成停电范围扩大, 级数多则不能保证速动性。当保护 I 段范围内的分支线路发生故障时, 可能引起越级跳闸, 保护定值配合固化, 系统运行方式变化使得继电保护实施更加困难; 分布式电源

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863计划)重点项目资助(2012AA050213); 南方电网公司科技项目资助(030600KK52200020(GDKJXM20200559))

(distributed generation, DG)大量接入, 配电网故障电流分布特点发生很大变化, 保护可靠性问题愈发严重^[4-8]。

随着配电网快速通信及保护与控制二次设备处理技术的发展, 在馈线拓扑动态识别的基础上, 利用故障区段上下游电气量信息的明显差异, 比较馈线局部或全域信息, 快速准确定位故障区段, 是解决配电网线路保护问题的一种有效手段^[9-10]。

基于通信的配电线路保护研究主要有广域保护、区域保护和分布式保护三个方向。其中, 将输电网广域保护引入配电网, 存在通信负担重、故障处理信息量大、算法复杂等问题, 保护四性难以保证。文献[11]中构建广域保护系统实现配电网区段定位、隔离和供电恢复, 将多点多类型信息纳入保护系统, 但实际上各功能分层分区完成, 线路保护在站域层实现, 拓扑识别和供电恢复在主站层实现。保护架构设计合理, 但着重于拓扑结构分析和自治型故障处理模式, 对保护算法与实现涉及较少。文献[12]建立了基于对等通信网络的广域测控平台, 支撑主站集中式和分布式保护的实现, 为避免信息处理复杂等问题, 最终采用分布式保护与控制技术。区域保护通常首先将馈线进行区域划分或直接定位故障区域, 之后在区域内分别进行故障判断, 锁定故障最小范围实现隔离。文献[13]首先进行智能电子装置关联域搜索, 在关联域内再采用电流差动保护原理实现故障隔离; 文献[14]直接根据断路器配置情况划分保护区域, 再结合本地保护信息实现区域保护; 文献[15]首先定义不同类型节点, 在母线节点和三分支及以上节点间利用故障电流正序分量完成故障一次定位, 之后利用锁定区域内电流突变量完成二次精确定位。以上保护涉及测点不会太多, 保护系统实现相对容易, 但区域划分直接影响保护选择性, 在运行方式变化频繁的配电网中适用性差^[16]。分布式保护通过对等通信网络获取本地关联区域的测控及拓扑信息进行自主决策, 文献[12,17-18]对分布式智能控制体系结构、配置更新、拓扑生成和保护控制算法等方面进行了较全面的分析和研究, 结果表明配电网分布式保护控制架构能缩小故障处理的运算规模, 减少故障处理的时间, 无需上下级配合, 原理上能适应网络拓扑结构变化, 但实际应用中终端故障的处理能力要求高, 静态拓扑变化时需人工干预, 现场实用性较弱。另外, 将基于相邻信息的纵联保护应用于配电网也是目前的研究热点之一, 可解决配电网保护的部分问题, 但多受限于配电网分支数量多、运行方式灵活多变、DG 控制策略、数据同步等问题^[19-23], 可靠性和适用性还有

待进一步提高。

因此, 本文提出一种配电站域式快速线路保护方案。首先将主站下发站内转换的基于 IEC61850 模型的拓扑文件进行解析并描述, 获取保护应用拓扑信息; 结合保护域内故障特征分析和故障信息提取结果进行集中比较, 形成站域式快速线路主保护; 构建保护系统架构, 提出实现方案, 并开发站域式快速保护装置和馈线终端样机; 最后利用 RTplus 平台研发进行试验, 验证保护方案的有效性。

1 保护应用拓扑识别与描述

配电站域式快速线路保护以变电站引出的多条馈线作为保护对象, 利用站内采集装置和站外馈线终端获取线路电气量、开关量和故障信息, 结合主站下发站内解析与识别的保护应用拓扑信息, 根据故障点上下游故障信息的明显差异集中决策, 无需上下级配合, 且利用信息冗余提升容错能力, 满足可靠性要求。为进一步提升保护速动性和可靠性, 满足现场应用要求, 保护系统基于 IEC61850 快速通信平台, 实现毫秒级内快速切除故障。其中, 保护应用拓扑识别和描述是确保站域式快速保护正确动作的关键和前提。

获取保护域内静态拓扑信息有主站下发和站内配置两种方式。其中, 站内配置方式必将增加各站人工工作量, 重复主站部分工作; 当采用主站下发方式时, 主站的配网全局静态拓扑信息采用公共信息模型(common information model, CIM)^[24], 而站域式快速保护系统基于 IEC61850 标准, 因此, 根据模型映射关系形成全站系统配置文件(substation configuration description, SCD)模型, 进一步解析得到馈线实时拓扑和保护应用拓扑信息, 实现网络动态拓扑自我感知。

1.1 保护域静态拓扑生成

主站下发 CIM 文件到站域式保护装置, 每条馈线一个 cim xml 文件, 模型转换后形成采用层次结构描述的 SCD 文件, 其结构形式为: Substation/变电站 → VoltageLevel/电压等级 → Bay/间隔 → ConductingEquipment/导电设备。其中, 导电设备类型包括断路器、线路等, 包含 LNode/逻辑节点、Terminal/端子和 connectivityNode/连接点等属性, LNode 用于表达与二次设备的关联, 拓扑关系通过端子和连接点表达。相互连接的设备其连接点引用路径相同, 定义线路起始位置和结束位置, 通过连接点从导电设备信息中依次查找, 构建设备连接关系树形结构数据, 即可获取拓扑结构。

配电网结构示意图如图 1 所示, 变电站 3 条

保护域内各出线相电流或零序电流,即可初步判定故障线路,具体逻辑在 2.1 节和 2.2 节中详述。因此,在保护域实时拓扑中去除非故障线路信息,即可形成保护应用拓扑,其拓扑描述矩阵得到降阶。

假设图 1 中线路 L_2 发生故障,则保护应用拓扑仅包含开关 CB_2 、 K_{21} 、 K_{22} 、 K_{26} 和 K_{27} 这 5 个节点,保护域实时拓扑矩阵进一步降阶,形成保护应用拓扑矩阵 T ,可表示为

$$T = \begin{matrix} & CB_2 & K_{21} & K_{22} & K_{26} & K_{27} \\ \begin{matrix} CB_2 \\ K_{21} \\ K_{22} \\ K_{26} \\ K_{27} \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ & 1 & 1 & 1 & 0 \\ & & 1 & 0 & 1 \\ & & & 1 & 0 \\ & & & & 1 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (4)$$

以上分析中,无论开关下游是负荷或分布式电源,拓扑描述矩阵均不变。

1.4 拓扑实时更新

若馈线静态拓扑发生变化,如新增开关,则主站 CIM 模型会实时更新,并主动下发至站域式保护装置,同时新增终端的 ICD 文件也将通过注册机制上传给站域式保护装置,最终形成新的 SCD 文件,保护域静态拓扑更新,进一步获取保护域实时拓扑和保护应用拓扑。

若只是开关变位,则将变位信息上传至主站和站域式保护装置,保护域静态拓扑不变,更新保护域实时拓扑。在图 1 所示的网络中,若断开开关 K_{24} 、闭合 K_{23} ,则对应的开关变位信息将立即上传,站域式保护装置接收到信息后,去掉矩阵 M 中 K_{24} 和 K_{25} 对应的行列,即为更新后的保护域实时拓扑矩阵。

2 站域式快速线路保护算法

2.1 相间短路保护

2.1.1 无 DG 并网

当配电线路发生相间短路时,如果没有 DG 并网,则故障点上游到电源侧的短路回路路径中故障相电流显著上升,采用过电流故障检测机制获取故障信息,过电流定值大于线路冷起动电流。当出线处检测到的电流大于整定值时,对应开关 x 处故障信息 g_x 置为“1”,否则为“0”;当馈线终端检测到的电流大于整定值时,对应开关 x 处故障信息 g_x 置为“1”,并上传至站域式保护装置,否则不上报故障信息。站域式保护装置收不到故障信息,则将该开关处故障信息置为“0”。另外,由于非故障线路中负荷阻抗远大于故障回路等值阻抗,因此,当任一出线电流大于整定值时,保护启动,该线路判断为故障线路。站域式快速保护装置确定保护应用拓扑,并利用故障线路中上下级断路器处馈线终端

(FTU)检测的过电流故障报文,即可判断故障区段。

图 1 中 DG 支路去除,各出线口利用电流互感器检测电流并送入站域式快速保护装置,站外各开关处均配置 FTU 监测运行状态。当 K_{27} 下游线路发生相间短路时,站内采集到的线路 L_2 出线电流大于整定值,确定 L_2 为故障线路。这种情况下,保护应用拓扑矩阵 T_1 为

$$T_1 = \begin{matrix} & CB_2 & K_{21} & K_{22} & K_{27} \\ \begin{matrix} CB_2 \\ K_{21} \\ K_{22} \\ K_{27} \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ & 1 & 1 & 0 \\ & & 1 & 1 \\ & & & 1 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (5)$$

FTU₂₁、FTU₂₂ 和 FTU₂₇ 均将检测到过电流,之后上传故障报文至站域式快速保护装置。保护装置根据出线处故障信息和收到的馈线终端上传故障报文,按照保护应用拓扑矩阵中的开关列向顺序,形成故障信息矩阵 G_1 ,可表示为

$$G_1 = [1 \ 1 \ 1 \ 1]^T \quad (6)$$

保护应用拓扑矩阵 T_1 与列矩阵 G_1 相乘得到故障定位矩阵 D_1 ,可表示为

$$D_1 = [2 \ 2 \ 2 \ 1]^T \quad (7)$$

根据拓扑描述矩阵和故障信息矩阵的表示形式可知,当故障发生在该节点与其下游相连节点之间时,故障定位矩阵中该节点对应元素定为“1”;当故障发生在该节点下游其他位置时,矩阵中该节点对应元素定为“2”;当故障回路不经过该节点时,其对应元素为“0”。因此确定 D_1 中元素“1”对应节点的下游即为故障位置。上述场景下故障位置判断在 K_{27} 下游,站域式保护装置立即发送保护跳闸命令至 FTU₂₇,并控制 K_{27} 跳闸。

2.1.2 DG 多点接入

当线路中接入 DG 时,电机型 DG 输出的次暂态短路电流最大可达额定电流的 5~8 倍,逆变型 DG 由于采取了限流措施,其输出的最大短路电流不超过额定电流的 1.5 倍。以图 1 配电网为例, DG_1 和 DG_2 并入电网。当线路 L_2 中 CB_2 和 K_{21} 之间发生故障时, CB_2 处流过的短路电流由电源侧和 DG_1 共同提供,短路电流较大,方向从母线流向线路; K_{21} 和 K_{26} 处也将流过短路电流,由 DG_2 提供,方向分别为线路流向母线和 DG_2 流向并网点。非故障线路 L_1 中流过的短路电流由 DG_1 提供,幅值可能大于过电流整定值,方向为线路流向母线。非故障线路 L_3 中无 DG 提供短路电流,几乎为零。根据以上分析可知,当 DG 多点接入配电网时,故障点下游和非故障线路中均可能流过短路电流,幅值可能大于过

电流整定值。因此,必须同时利用各位置电流大小和方向信息进行故障判断。

规定 DG 支路中电流正方向为 DG 流向并网点,负荷支路中为流向负荷,其他支路中为母线指向线路。根据故障线路和非故障线路出口处电流特征,形成故障选线判据:(1) 电流大于整定值且方向为正,判断为故障线路;(2) 电流大于整定值且方向为负或电流小于整定值,判断为非故障线路。考虑本线路 DG 在本线路故障时对线路出口短路电流的外汲作用,出口短路电流可能减少,但其减少值不会超过 2 倍的线路额定电流^[1],因此,电流整定值仍按躲过线路冷起动电流整定,不会影响故障选线的正确性。故障线路确定后保护应用拓扑即可形成,需结合故障信息进行进一步故障区段定位。对于 DG 支路,开关处故障信息 g_x 定义为

$$g_x = \begin{cases} 1 & I_{DGx} > I_{DGN} \text{ 且方向为负} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (8)$$

式中: I_{DGx} 表示流过 DG 并网开关 x 的电流; I_{DGN} 表示并网 DG 额定电流。不论是电机型 DG 还是逆变型 DG,也不论采用何种并网控制策略,当其正常运行、电网扰动和电网侧故障时, DG 输出电流方向均为正,故障信息为“0”;当电网给 DG 反向充电时,电流方向为负,但充电电流不会超过 DG 额定电流,故障信息仍为“0”;仅当 DG 支路故障时,电网向故障点提供短路电流,幅值远大于 DG 额定电流且方向为负,并网开关处检测到的故障信息为“1”。

对于其他支路,开关处故障信息 g_x 定义为

$$g_x = \begin{cases} 1 & I_x > I_{set} \text{ 且方向为正} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (9)$$

式中: I_x 表示开关 x 处流过的电流; I_{set} 表示线路过电流整定值,大于线路冷起动电流。本线路故障时各支路中流过的短路电流受 DG 并网位置、类型、容量和控制策略影响,可能在外汲或助增影响。当有助增作用时,不会影响故障信息的正确性。当有外汲作用时,可能使支路电流幅值减小,但由于减小值不大,电流整定值又足够灵敏,因此也不会影响故障信息的判断。

在图 1 中,当 K_{27} 下游线路发生相间短路时,站内采集到的线路 L_2 的出线电流大于整定值且方向为正,确定 L_2 为故障线路;FTU₂₁、FTU₂₂ 和 FTU₂₇ 均检测到过电流且方向为正。DG₂ 并网运行,FTU₂₆ 检测到电流方向为正,故障信息为“0”。根据各开关处故障信息形成故障信息矩阵 G_2 ,可表示为

$$G_2 = [1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 1]^T \quad (10)$$

式(4)的保护应用拓扑矩阵 T 与 G_2 相乘得到故

障定位矩阵 D_2 ,可表示为

$$D_2 = [2 \ 2 \ 2 \ 0 \ 1]^T \quad (11)$$

确定 D_2 中元素“1”对应节点的下流即为故障位置,则上述场景下故障位置判断在 K_{27} 下游。

2.1.3 容错性能分析

实际应用中,基于通信的保护需考虑信息缺失或信息错误时的可靠性问题,提高线路保护的容错能力。在图 1 中,当 K_{27} 下游发生相间短路时,如果 FTU₂₂ 由于某种原因,其故障报文未发出或者故障报文内容有误,保护根据保护应用拓扑对全部故障信息进行辨识,可提高算法容错能力。此时故障信息矩阵为 G_3 ,可表示为

$$G_3 = [1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 1]^T \quad (12)$$

保护应用拓扑矩阵 T 不变,得到故障定位矩阵 D_3 为

$$D_3 = [2 \ 1 \ 1 \ 0 \ 1]^T \quad (13)$$

此时,矩阵中有多个“1”元素,确定最后一个“1”对应的节点下游发生故障,站域式保护装置立即发送保护跳闸命令至 FTU₂₇。

同一场景下,若 DG 支路 FTU₂₆ 判断错误,故障信息为“0”,则此时故障信息矩阵 G_4 为

$$G_4 = [1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1]^T \quad (14)$$

故障定位矩阵 D_4 为

$$D_4 = [2 \ 3 \ 2 \ 1 \ 1]^T \quad (15)$$

确定最后一个“1”对应的节点下游发生故障,站域式保护装置立即发送保护跳闸命令至 FTU₂₇,保护仍能正确动作。

但如果 FTU₂₇ 未发出故障报文,则会误判为 K_{22} 下游故障,FTU 接收到跳闸信号后可结合本地信息纠正部分误动。

综上,站域式快速相间短路保护流程如图 3 所示。

2.2 接地保护

针对小电阻接地配电网接地故障,当接地电阻较小时,零序电流突变特征明显,投入零序过流故障检测功能,其故障判断原理与相间短路时类似。根据出线零序电流相对大小判断故障线路,缩小保护应用拓扑范围,再进一步确定故障位置。参考文献[25]的研究成果,当小电阻接地系统发生单相接地故障时,故障线路零序电流是任一非故障线路零序电流的 11.5 倍及以上,即 n 条出线零序电流幅值满足式(16)。

$$\frac{I_{0i}}{I_{0j}} \geq 11.5 (i, j \in (1, 2, \dots, n) \cap j \neq i) \quad (16)$$

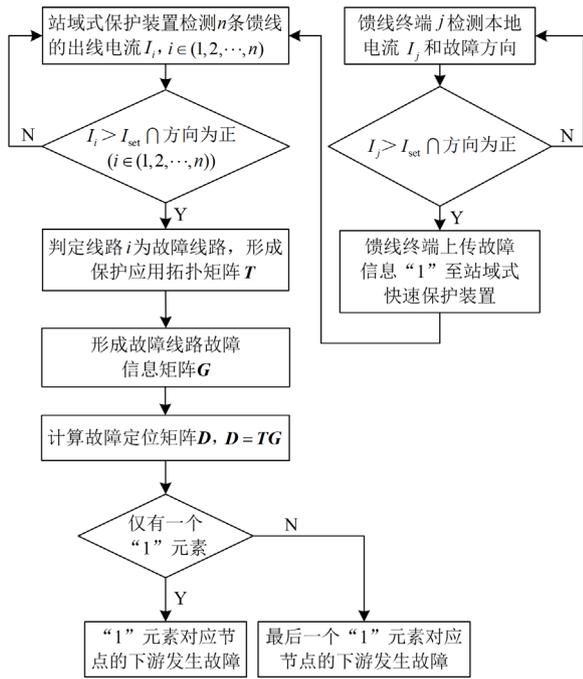


图3 站域式快速相间短路保护故障判断流程图

Fig. 3 Phase to phase fault location flow chart of fast station-area protection

该结论不受过渡电阻影响, 据此可初步判定故障线路为 i 或母线故障。若母线发生故障, 则线路 i 中各节点流过对地电容电流, 其幅值较小; 若线路 i 发生故障, 则故障点上游零序回路路径中将流过较大的零序电流, 故障点下游流过对地电容电流。因此零序过流检测按躲过非故障区段对地电容电流 50 A(极端情况下可能达到)整定, 当馈线终端检测到的零序电流大于 50 A 时, 立即发出故障报文并上传至站域式快速保护装置, 结合线路 i 的保护应用拓扑矩阵, 得到故障定位矩阵 D , 其中元素“1”对应节点的下游即为故障位置。由于整定值较大, 保护耐受过渡电阻能力为 100 Ω 左右。

实际中高阻故障比例占接地故障总数的 5%~10%^[26-27], 这种情况下实现故障判断必须设置另一套高灵敏定值, 按线路最大不平衡电流整定, 并计及零序电流互感器测量误差, 其值取 3.4 A。当线路各测点零序电流幅值大于 3.4 A 且小于 50 A 时, 上传幅值信息至站域式快速保护装置。根据故障点上游各测点零序电流是其下游的 11.5 倍以上, 比较相邻节点的零序电流幅值。故障选线后, 当线路 i 中任意相邻节点 p 和 q 处的零序电流 I_{0p} 和 I_{0q} 满足式 (17) 时, 确定线路 i 为故障线路, 故障位置位于 p 和 q 之间。如果相邻节点处零序电流均不满足式 (17), 判定为母线发生故障。该保护耐受过渡电阻可提高

至 1500 Ω 。

$$\frac{I_{0p}}{I_{0q}} \geq 11.5 \quad (17)$$

综上, 站域式快速线路接地保护故障判断流程图如图 4 所示。图中, $I_{0.set1}$ 表示零序过流一般定值, 取 50 A; $I_{0.set2}$ 表示零序过流高灵敏定值, 取 3.4 A。

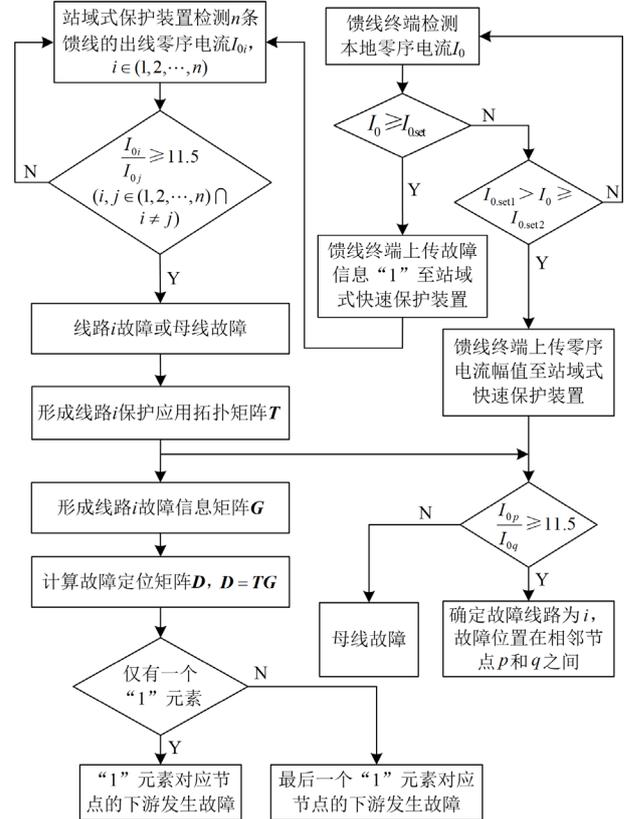


图4 站域式快速线路接地保护故障判断流程图

Fig. 4 Single phase to ground fault location flow chart of fast station-area protection

并网 DG 通常采用中性点不接地方式, 因此零序网络不包括 DG 支路, DG 支路检测不到零序电流, 故障信息均为“0”, 对保护结果不产生影响。

3 保护系统的设计与实现

配电网站域式快速保护的实现和应用除需算法支撑外, 还需要安全可靠的系统架构、信息交互、通信网络和装置的设计研发。图 5 所示为基于 IEC61850 的站域式快速线路保护系统结构图。

站域式快速保护装置是保护系统的核心, 可以满足与主站和馈线终端开展多种类型信息的交互, 支持多种通信规约, 可实现远程管理与控制, 具备模拟量和开关量采集、数据处理、拓扑识别和集中

式逻辑判断功能。馈线终端将站外馈线故障信息和开关量状态信息实时上传站域式保护装置, 并接收站域式保护装置下发信息, 执行开关跳闸命令。除此之外, 终端还具备本地测量与控制、常规继电保护和配电自动化等功能, 其中, 本地保护可作为通信中断时馈线后备保护。同时, 馈线终端自描述与自注册技术有利于实现即插即用, 大大减少调试和运维工作量。

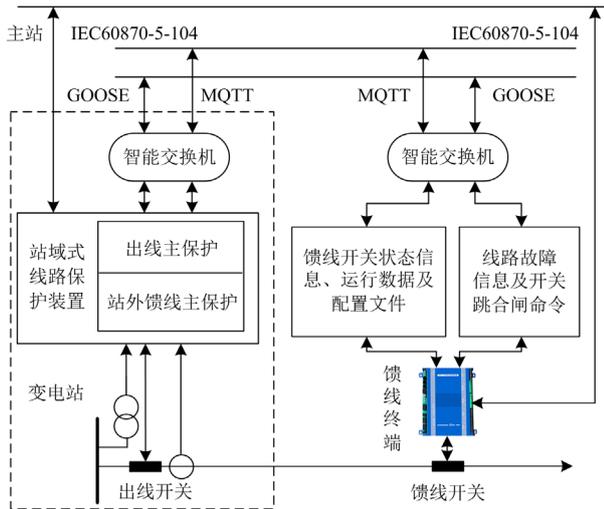


图5 配电网站域式快速线路保护系统结构图

Fig. 5 Structure diagram of fast station-area protection of distribution line

快速通信网络平台与技术是实现站域式快速保护的基础。线路故障信息和开关跳闸命令采用 IEC61850 快速报文 GOOSE 传输^[28], 利用抢占传输机制优先传输快速数据; 馈线开关状态、配置文件和配电线路运行数据采用容量较大的 MQTT 协议传输, 通过截断/重组机制确保数据完整性。站域式保护装置与主站之间下行和上行数据, 如拓扑文件、保护动作信息等, 以及馈线终端与主站之间交互的配电自动化相关数据, 则采用 IEC60870-5-104 协议传输。

为保证工程应用时主站系统网络安全, 站域式保护装置通信板设计 3 个板卡, 分别为 104 板、MQTT 板和 GOOSE 板, 硬件相互独立, 板卡间通过内部 PCIE 总线进行数据交互。馈线终端需兼顾站域式保护与配电自动化功能, 因此, 采用双 CPU 双端口硬件设计, 将站域式保护系统与配电自动化系统进行硬件隔离。

根据前述原理研制的站域式快速保护装置和馈线终端样机如图 6 所示, 采用 Linux2.6 操作系统、模块化设计和插件后插式结构。



(a) 站域式快速保护装置

(b) 馈线终端

图6 配电网站域式快速线路保护成套装置

Fig. 6 Integrated equipment of station-area protection of distribution line

4 基于 RTplus 平台的试验

为测试站域式快速线路保护功能, 按照图 1 所示配电线路结构图进行基于 RTplus 平台的试验, 试验现场如图 7 所示。

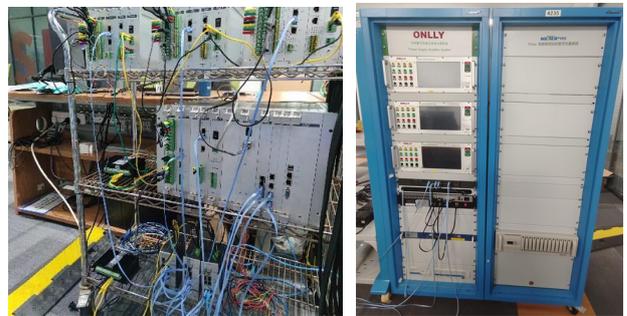


图7 基于 RTplus 平台的试验现场

Fig. 7 Test field based on RTplus

系统电压等级为 10 kV, 采用中性点经小电阻接地方式, 线路为电缆。变电站 1 内安装站域式保护装置和 1 台智能交换机, 站外各开关处安装馈线终端装置和智能交换机, 通信网络采用光纤组网。变电站 3 条出线 L₁、L₂ 和 L₃, L₁ 和 L₃ 线路长度分别为 3 km 和 4 km, 站外第一个开关与出线开关之间的距离为 1 km; L₂ 中主干线路上两开关之间的距离均为 2 km, 分支线路的分支点均位于所在区段中间。各负载有功功率为 0.9 MW, 无功功率为 0.3 Mvar。DG₁ 为同步发电机, 容量为 0.5 MW, DG₂ 为逆变型分布式电源, 容量为 0.25 MW。

测试指标包括主干线路、负荷分支、DG 支路和线路出口附近等不同位置发生不同类型故障时保护出口时间和开关跳闸情况。试验中故障位置 F₁—F₆ 分别设置在线路 L₂ 主干线路中距母线 2.5 km、线路 L₃ 中距母线 3 km、线路 L₁ 中距母线 0.3 km、线路 L₂ 第一条分支距分支点 0.5 km(即 K₂₆ 下游)、线路 L₂ 第二条分支(即 K₂₇ 下游)和线路 L₂ 第三条分支(即 K₂₈ 下游)。故障类型设为三相短路、任两相相间短路和任两相接地短路, 均为金属性短路, 每种排

列情形测试一次。对于任一相单相接地故障，故障初相角为 15° 和 75° ，过渡电阻为 $10\ \Omega$ 、 $100\ \Omega$ 和 $1500\ \Omega$ ，测试不同故障情况的组合场景。故障时间间隔设置为 $1\ \text{s}$ 。过电流整定值设为 $0.3\ \text{kA}$ ，零序电流一般定值设为 $50\ \text{A}$ ，零序电流高灵敏定值为 $3.4\ \text{A}$ 。

表 1 为不同场景下相间短路时的保护出口时间和开关跳闸情况。

表 1 相间短路时保护出口时间及开关跳闸情况

Table 1 Protection action time and switch tripping while interphase short circuit occurs

故障点	故障类型	保护出口时间/ms	结果
F ₁	三相短路	43.7	K ₂₁ 跳闸
	两相相间短路 (AB、BC、CA)	40.5~43.0	K ₂₁ 跳闸
F ₂	三相短路	45.1	K ₃₁ 跳闸
	两相相间短路 (AB、BC、CA)	41.2~45.2	K ₃₁ 跳闸
F ₃	三相短路	44.2	CB ₁ 跳闸
	两相相间短路 (AB、BC、CA)	42.7~43.7	CB ₁ 跳闸
F ₄	三相短路	44.8	K ₂₆ 跳闸
	两相相间短路 (AB、BC、CA)	42.1~46.2	K ₂₆ 跳闸
F ₅	三相短路	48.6	K ₂₇ 跳闸
	两相相间短路 (AB、BC、CA)	47.8~48.5	K ₂₇ 跳闸
F ₆	三相短路	无	不跳闸
	两相相间短路 (AB、BC、CA)	无	不跳闸

当 F₁ 处发生相间故障时，DG₂ 位于故障点下游，DG₁ 并入非故障线路，因此，故障点上下游和非故障线路中都将流过短路电流。但从表 1 中可以看出，保护不受影响，仍能正确动作，保护出口时间小于 $60\ \text{ms}$ ，离故障点最近的断路器 K₂₁ 跳闸；当无 DG 并网线路 L₃ 中 F₂ 处发生相间短路时，虽然其他两条线路出口处分别由 DG₁ 和 DG₂ 提供了短路电流，但保护仍能快速有选择性地切除故障；当 DG 并网线路 L₁ 出口附近发生故障时，最终出口断路器 CB₁ 可靠跳闸；当 DG 支路 F₄ 处发生故障时，DG 并网开关 K₂₆ 快速跳闸；当负荷分支 F₅ 处发生故障时，DG₂ 的存在可能对上游各开关处流过的短路电流有外汲或助增作用，但最终没对保护产生影响；当线路 L₂ 中联络开关 K₂₃ 处于断开状态时，K₂₈ 下游分支不在保护范围内，因此保护没有判断出故障，不发出跳闸命令。

表 2 为不同场景下接地短路时的保护出口时间和开关跳闸情况。从表 2 中可以看出，当不同位置

发生接地故障时，保护不受 DG 并网的影响，也不受非故障线路或非故障区段对地电容电流影响，单相接地过渡电阻高达 $1500\ \Omega$ 时仍能正确动作。当保护域内主干线路和分支线路发生故障时，保护出口时间均小于 $60\ \text{ms}$ ，目标终端接收到站域式保护装置下发的跳闸命令，控制相应断路器跳闸。保护的速动性和选择性要求均得到了满足。

表 2 接地短路时保护出口时间及开关跳闸情况

Table 2 Protection action time and switch tripping while grounding fault occurs

故障点	故障类型	保护出口时间/ms	结果
F ₁	单相接地短路 (A、B、C)	41.0~47.3	K ₂₁ 跳闸
	两相接地短路 (AB、BC、CA)	40.5~49.8	K ₂₁ 跳闸
F ₂	单相接地短路 (A、B、C)	40.3~45.3	K ₃₁ 跳闸
	两相接地短路 (AB、BC、CA)	41.2~44.0	K ₃₁ 跳闸
F ₃	单相接地短路 (A、B、C)	40.5~50.2	CB ₁ 跳闸
	两相接地短路 (AB、BC、CA)	42.5~49.7	CB ₁ 跳闸
F ₄	单相接地短路 (A、B、C)	41.3~46.5	K ₂₆ 跳闸
	两相接地短路 (AB、BC、CA)	42.2~47.0	K ₂₆ 跳闸
F ₅	单相接地短路 (A、B、C)	48.2~53.3	K ₂₇ 跳闸
	两相接地短路 (AB、BC、CA)	46.5~54.5	K ₂₇ 跳闸
F ₆	单相接地短路 (A、B、C)	无	不跳闸
	两相接地短路 (AB、BC、CA)	无	不跳闸

5 结论

为解决配电线路保护选择性与速动性难以兼顾以及 DG 多点接入后配电网保护等问题，本文提出配电网站域式快速线路保护及实现方案。通过理论分析和基于 RTplus 平台的试验得到以下结论。

1) 利用基于连接点路径搜索的拓扑模型解析方法和基于单向邻接矩阵的拓扑描述模型，可得到保护域内开关设备之间上下级连接的静态拓扑，拓扑描述矩阵稀疏，网络拓扑动态更新容易。

2) 集中比较各出线故障特征，将故障范围大大缩小，网络拓扑矩阵降阶形成保护应用拓扑，分析计算快速可靠。

3) 根据线路故障特征和故障有效信息提取结果形成的故障信息矩阵用于故障定位,该过程不受 DG 故障类型、并网容量、控制策略等影响,定位结果准确,容错性能好。

4) 利用已开发保护成套装置进行基于 RTplus 平台的试验,试验结果表明变电站出线和站外线路中不同位置发生不同类型故障时,保护出口时间均小于 60 ms,目标终端能接收到站域式保护装置下发的跳闸命令,并控制相应断路器跳闸,快速准确隔离故障。

参考文献

- [1] 徐丙垠. 配电网继电保护与自动化[M]. 北京: 中国电力出版社, 2017.
- [2] 刘健, 同向前. 配电网继电保护与故障处理[M]. 北京: 中国电力出版社, 2014.
- [3] 刘育权, 蔡燕春, 邓国豪, 等. 小电阻接地方式配电系统的运行保护[J]. 供用电, 2015(6): 30-35.
LIU Yuquan, CAI Yanchun, DENG Guohao, et al. Operation and protection in distribution system with small resistance grounding mode[J]. Distribution & Utilization, 2015(6): 30-35.
- [4] LIANG Cheng, TAO Wang, YI Wang. A novel fault location method for distribution networks with distributed generations based on the time matrix of traveling-waves[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2022, 7(4): 698-708.
- [5] 刘伟生. 配电网层次化保护技术及工程应用[D]. 济南: 山东大学, 2022.
LIU Weisheng. Techniques and applications of the staged protection in distribution systems[D]. Jinan: Shandong University, 2022.
- [6] 刘健, 刘超, 张小庆, 等. 配电网多级继电保护配合的关键技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(9): 35-41.
LIU Jian, LIU Chao, ZHANG Xiaoqing, et al. Coordination of relay protection for power distribution systems[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(9): 35-41.
- [7] 柴庆发, 丛伟, 魏振, 等. 配电网高可靠性继电保护配置与整定方案[J]. 电力系统及其自动化学报, 2021, 33(5): 47-54.
CHAI Qingfa, CONG Wei, WEI Zhen, et al. Highly-reliable relay protection configuration and setting scheme for distribution network[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2021, 33(5): 47-54.
- [8] 方榆冬, 徐峰, 李跃辉, 等. 基于改进粒子群算法的含 DG 配网反时限过流保护定值优化方法[J]. 电力科学与技术学报, 2022, 37(4): 13-19.
FANG Yudong, XU Feng, LI Yuehui. An optimization method for setting value of inverse-time overcurrent protection in distribution network with DG based on MPSO[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(4): 13-19.
- [9] CAI Yu, CAI Zexiang, LIU Ping, et al. Communication assisted protection and self-healing control scheme for distribution networks based on IEC 61850[J]. IEEE Access, 2020, 8: 72169-72178.
- [10] HABIB H F, FAWZY N, ESFAHANI M M, et al. An enhancement of protection strategy for distribution network using the communication protocols[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2020, 56(2): 1240-1249.
- [11] 赵乔. 智能配电网广域保护研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2017.
ZHAO Qiao. Research on wide area protection of smart distribution grid[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017.
- [12] 徐丙垠, 薛永端, 李天友, 等. 智能配电网广域测控系统及其保护控制应用技术[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(18): 2-9.
XU Bingyin, XUE Yongduan, LI Tianyou, et al. A wide area measurement and control system for smart distribution grids and its protection and control applications[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(18): 2-9.
- [13] 丛伟, 潘贞存, 赵建国, 等. 基于电流差动原理的广域继电保护系统[J]. 电网技术, 2006, 30(5): 91-95, 110.
CONG Wei, PAN Zhencun, ZHAO Jianguo, et al. A wide area protection relaying system based on current differential protection principle[J]. Power System Technology, 2006, 30(5): 91-95, 110.
- [14] 马静, 张涌新, 项晓强, 等. 基于保护动作信号的配电网区域保护方案[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(3): 34-41.
MA Jing, ZHANG Yongxin, XIANG Xiaoqiang, et al. Regional protection scheme of distribution network based on operating signal of protection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(3): 34-41.
- [15] 肖伟栋, 夏明超, 唐念. 考虑多 DG 接入的配电网区域保护新方案[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(9): 103-109.
XIAO Weidong, XIA Mingchao, TANG Nian. A new regional protection scheme for distribution network considering the introduction of multi-DGs[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(9): 103-109.
- [16] SHEN Shaofei, WANG Huifang, JIANG Kuan, et al. Regional area protection scheme for modern distribution system[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(5): 5416-5426.

- [17] 张青杰, 陆于平. 基于故障相关区域自适应划分的分布式保护新原理[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(7): 39-43. ZHANG Qingjie, LU Yuping. A new distribution protection principle based on adaptive division for relevant fault area[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(7): 39-43.
- [18] 林志超. 自适应配电网拓扑与开关配置的智能分布式保护方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(5): 149-156. LIN Zhichao. Intelligent-distributed distribution network protection strategy for self-adaptive topology and different switch configurations[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(5): 149-156.
- [19] 邹晓峰, 沈冰, 蒋献伟. 5G 通信条件下配网差动保护快速动作方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(16): 163-169. ZOU Xiaofeng, SHEN Bing, JIANG Xianwei. A quick action scheme of differential protection for a distribution network with 5G communication[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(16): 163-169.
- [20] 陈宏山, 徐舒, 李正红, 等. 计及 5G 通信异常工况的有源配电网快速综合保护方案[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(15): 159-168. CHEN Hongshan, XU Shu, LI Zhenghong, et al. A new fast comprehensive protection scheme of an active distribution network considering the abnormal operating conditions of 5G communication[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(15): 159-168.
- [21] 周成瀚, 邹贵彬, 杜肖功, 等. 基于正序电流故障分量的有源配电网纵联保护[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(7): 2102-2112, 2390. ZHOU Chenghan, ZOU Guibin, DU Xiaogong, et al. A pilot protection method based on positive sequence fault component current for active distribution networks[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(7): 2102-2112, 2390.
- [22] 王宁, 韩国栋, 高厚磊, 等. 有源配电网电流差动保护判据研究[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(7): 14-23. WANG Ning, HAN Guodong, GAO Houlei, et al. The current differential protection criterion of active distribution networks[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(7): 14-23.
- [23] 李文君, 段登伟, 朱雨, 等. 基于 5G 通信模式下的配电网自愈保护应用[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(24): 152-159. LI Wenjun, DUAN Dengwei, ZHU Yu, et al. Application of distribution network protection based on a 5G end-to-end communication mode[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(24): 152-159.
- [24] 谢婧. 配电网信息模型异构映射与即插即用机制研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2018. XIE Jing. Research on heterogeneous Information model mapping and plug and play mechanism of distribution network[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2018.
- [25] 吴海江, 陈锦荣, 廖峰, 等. 小电阻接地配电系统集中式接地保护研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(21): 141-149. WU Haijiang, CHEN Jinrong, LIAO Feng, et al. Centralized protection for grounding fault in low-resistance grounding system[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(21): 141-149.
- [26] 林志超, 刘鑫星, 王英民, 等. 基于零序电流比较的小电阻接地系统接地故障保护[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(22): 15-21. LIN Zhichao, LIU Xinxing, WANG Yingmin, et al. Grounding fault protection based on zero sequence current comparison in low resistance grounding system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 46(22): 15-21.
- [27] 薛永端, 刘珊, 王艳松, 等. 基于零序电压比率制动的小电阻接地系统接地保护[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(16): 112-117. XUE Yongduan, LIU Shan, WANG Yansong, et al. Grounding fault protection in low resistance grounding system based on zero-sequence voltage ratio restraint [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(16): 112-117.
- [28] 王宾, 董新洲, 许飞, 等. 智能配电变电站集成保护控制信息共享分析[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(增刊 1): 1-6. WANG Bin, DONG Xinzhou, XU Fei, et al. Analysis of data sharing for protection and control system in smart distribution substation[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(S1): 1-6.

收稿日期: 2023-03-18; 修回日期: 2023-06-12

作者简介:

廖峰(1985—), 男, 硕士研究生, 高级工程师, 研究方向为电力系统继电保护; E-mail: liaofeng137@126.com

陈锦荣(1972—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向为配网自动化与继电保护; E-mail: 857212494@qq.com

区伟潮(1972—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向为电力系统调度控制与系统运行、电力系统继电保护。E-mail: ouweichao@163.com

(编辑 许威)