

基于配电自动化系统的分布式小电流接地故障定位方法

宋伊宁¹, 李天友², 薛永端¹, 黄建业³, 陈恒⁴, 徐丙垠⁴(1. 中国石油大学(华东) 信控学院, 山东 青岛 266580; 2. 国网福建省电力有限公司, 福建 福州 350003;
3. 国网福建省电力科学研究院, 福建 福州 350007; 4. 山东科汇电力自动化股份有限公司, 山东 淄博 255087)

摘要:现有依赖主站的集中式小电流接地故障定位方法参与环节多,不同厂家的产品之间不易配合。从系统结构、动态拓扑识别、通信配置以及基本工作模式等方面,验证了分布式故障处理方法可实现小电流接地故障定位。现有的故障定位算法不能适用于分布式控制系统,需提出适用于分布式故障定位的新算法。给出了适用于分布式故障定位的小电流接地故障暂态等值电路,重点分析了故障区段、故障点上游与下游健全区段两侧暂态零序电流相关系数、暂态零序电流有效值系数以及暂态零序电流峰值与工频零序电流幅值之比,提出综合利用上述故障零序电流特征、满足分布式故障处理要求的故障定位算法,可提高小电流接地故障暂态定位技术的适用性,解决不同厂家产品配合的难题。仿真和现场数据验证了所提方法的有效性。

关键词:小电流接地系统;单相接地故障;故障定位;分布式故障处理;配电;配电自动化;暂态

中图分类号:TM 726

文献标识码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2018.04.015

0 引言

现有配电自动化 DA (Distribution Automation) 系统多数不具备小电流接地故障定位功能,已成为制约 DA 技术发展的瓶颈之一^[1]。部分 DA 系统采用电压-时间型自动化开关实现小电流接地故障处理^[2-5],其操作繁杂、处理时间长、所有用户均需停电且不能适应线路结构的动态变化,主要适用于对供电可靠性要求不高的农网线路。利用相邻终端之间采集的故障暂态零序电流的波形相似性实现接地故障定位是一个较好的解决思路,但现有方案均采用集中式故障定位方法^[6-14],需要依赖配电终端 FTU (Feeder Terminal Unit)、通信系统、子站或主站的可靠协调配合,在掌握全局信息的基础上才能做出正确判断和生成处理策略,故障处理时间较长、参与环节多、可靠性低,发生并发故障时主站处理能力不足,特别是小电流接地故障暂态定位方法算法复杂,主站需要开发专用的处理模块,存在软件产权、系统管理等限制,且不同厂家的终端与主站之间配合困难。

短路故障的分布式故障处理技术^[15-16]是近年来的另一个研究热点。短路故障的分布式故障处理技术在互为联络的若干条馈线构成的一个控制域内建立 FTU 之间的对等通信网络^[17-18],发生故障时同一个控制域内的 FTU 相互交换故障与决策信息,实现故障定位、隔离与恢复供电。由于控制域覆盖范围

小,涉及站点少且不依赖于主站,短路故障的分布式故障处理技术可在 100 ms 内发出隔离或其他控制命令,实现了配电网的快速保护与控制操作,也满足了主动配电网的发展要求^[19]。分布式故障处理技术为小电流接地故障处理提供了新思路。

本文提出了分布式小电流接地故障定位技术,从系统结构、动态拓扑识别^[20]、通信配置和基本工作模式等方面,分析了已有的分布式故障处理技术对小电流接地故障的适应性,建立了适用于分布式故障定位的小电流接地故障暂态等值电路,对小电流接地故障暂态电流的幅值、极性以及相似性特征进行了理论分析和计算,给出了适应分布式故障处理的小电流接地故障暂态原理定位算法。利用仿真及现场数据对本文算法的有效性进行了验证。

1 适应分布式小电流接地故障处理的 DA 系统

1.1 系统结构

图 1 为典型的配电网结构。图中, $QF_1 \sim QF_m$ 为变电站出线开关, $S_{ij} (1 \leq i \leq m, 1 \leq j \leq n-1)$ 为线路分段开关,各开关空心表示断开状态,实心表示闭合状态;变电站出线开关及各分段开关处 FTU 通过对等

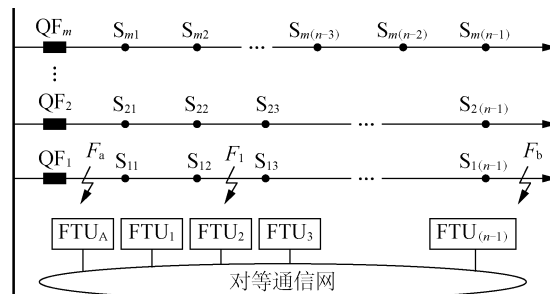


图1 分布式馈线自动化系统结构

Fig.1 Structure of distributed feeder automation system

收稿日期:2016-12-20;修回日期:2018-01-08

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51477184);国家电网公司科技项目(52130416000D)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51477184) and the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China(52130416000D)

通信网络交换信息,FTU_A、FTU₁—FTU_{n-1}组成1个控制域。

1.2 系统配置

1.2.1 通信配置

相较于短路故障只需要传输故障电流幅值、相位或过流状态等少量信息的情况,小电流接地故障定位还需要传输故障电流波形。按照国家电网拟定的《配电自动化终端技术规范》,每次故障需要传输的数据量至少为2 KByte。由于数据传输量较大,应优先使用光纤通信,但接地故障对处理速度要求不高,在仅进行故障定位、不需要传输跳闸等遥控命令以隔离故障时,也可使用无线通信技术。

1.2.2 FTU 配置

目前市场上大部分FTU产品只具备常规DA功能^[21]。欲实现分布式小电流接地故障定位,FTU需要具备以下功能。

a. 检测并记录小电流接地故障的暂态电流、电压信号。由于暂态信号频率较高(一般在150 Hz~2 kHz范围内),要求FTU具有较高的采样频率(大于5 kHz)和相应的实时信号处理能力。

b. 支持FTU之间的对等数据交换,实现分布式控制应用。

c. 为适应配电线路高异动率,FTU应动态识别线路拓扑结构。

1.2.3 信号配置

现有小电流接地故障检测方法大多利用故障零序电流信号,也有部分算法还需要零序电压信号。

对于分段开关,可以配置两相电流互感器+零序电流互感器以直接获取零序电流,或者配置三相电流互感器以合成零序电流信号。但现有开关一般不能获得零序电压信号。国家电网正在制定相关标准,要求未来分段开关都配置能获取三相电压和零序电压的传感器,这将为小电流接地故障检测提供良好契机。

1.3 拓扑识别

分布式小电流接地故障定位需要获取控制域内所有FTU或者相邻FTU的故障信息。而在平衡负荷或者故障处理时,联络开关的位置可能发生变化,即该控制域内的线路动态拓扑将改变,因此FTU需要及时更新动态拓扑结构。

FTU可以采用4种方式更新动态拓扑:

- a. 主站产生动态拓扑,并随时下发给相应FTU;
- b. FTU从主站获取控制域内的全局静态拓扑结构,根据控制域内开关的实时状态信息产生动态拓扑;
- c. 人工为FTU配置控制域内的全局静态拓扑结构,FTU根据开关的实时状态信息更新动态拓扑;
- d. 为FTU配置以其相邻FTU为边界的局部馈

线拓扑信息以及相邻FTU的通信地址,通过依次查询其他FTU存储的局部拓扑信息和开关状态,生成动态拓扑^[20]。

方式a符合常用习惯,实施便利,但当系统规模大、开关变位频繁时,效率低、实时性差,且控制域内的FTU缺乏自具性;方式b可在一定程度上克服方式a的缺陷;方式c配置工作量大,易出错;方式d只需为FTU配置相邻FTU的局部拓扑信息,相较于方式c而言配置工作量小,FTU可根据具体的控制应用建立所需的拓扑信息,灵活性好。

1.4 FTU 的故障启动

分布式控制应用有循环、事件触发与远方命令3种启动方式^[20]。事件触发启动方式通过FTU检测到本地事件或相关站点的FTU发出的事件信息后,发起控制应用操作,响应速度快,能够合理地使用FTU数据处理与通信资源。小电流接地故障分布式处理技术中的FTU应采用事件触发启动方式,其包括3个触发源:

a. 对于能获取零序电压或三相电压的FTU,可采用零序电压越限启动;

b. 对于能获取零序电流的FTU,可采用零序电流暂态量越限启动;

c. 收到相邻开关的故障查询信息,返回故障信息并启动。

1.5 工作模式

在分布式控制系统中,1个控制应用可以由1个FTU来决策,也可由多个FTU协调决策。根据可参与决策的主控FTU的数量,可将控制方法分为代理模式与协同模式。

1.5.1 代理模式

代理模式下,1个控制域内由1个FTU作为主控FTU(一般由出线首个FTU承担)。发生小电流接地故障后,主控FTU收集、处理控制域内所有站点的故障信息,确定故障区段。其他FTU作为辅助终端,向主控FTU传送当地故障信息与配电设备运行信息。

代理模式与集中控制方式类似,对主控FTU要求较高,当主控FTU出现异常时,将影响整个故障定位过程。

1.5.2 协同模式

协同模式下,每个FTU都具备作为主控FTU的配置。发生小电流接地故障后,检测到零序电压或者零序电流越限的FTU启动并作为主控FTU,向相邻FTU查询故障信息;比较本地与相邻FTU中的故障信息,确定该区段是否为故障区段。

相比代理模式,协同模式的容错能力较强,只要故障区段两端开关的监控FTU正常运行,就能实现精确的故障定位。但由于只能获取局部故障

信息,协同模式下的小电流接地故障定位算法将更为困难。

2 现有暂态定位算法对分布式处理系统的适应性分析

文献[7]给出了仅能区分故障点上游与下游特征差异的暂态等值电路,并据此提出了基于暂态电流波形相似度的小电流接地故障定位算法。以图1中点 F_1 发生单相接地故障为例,本文给出一种能反映故障区段、故障点上游健全区段以及故障点下游健全区段特征差异的等值电路,如图2所示。图中, $U_f(t)$ 为故障点虚拟电源; R_f 为故障点过渡电阻; i_b 和 i_l 分别为故障区段两侧检测点暂态零序电流; R_{11} 、 L_{11} 、 C_{11} 和 i_{11} 分别为检测点 S_{11} 上游线路和所有健全线路的等值电阻、等值电感、等值电容和电容电流; R_{14} 、 L_{14} 、 C_{14} 和 i_{14} 分别为检测点 S_{14} 下游线路的等值电阻、等值电感、等值电容和电容电流; R_{m12} 、 L_{m12} 、 C_{m12} 和 i_{m12} 分别为检测点 S_{11} 、 S_{12} 之间线路的等值电阻、等值电感、等值电容和电容电流; R_{m34} 、 L_{m34} 、 C_{m34} 和 i_{m34} 分别为检测点 S_{13} 、 S_{14} 之间线路的等值电阻、等值电感、等值电容和电容电流; R_{f1} 、 L_{f1} 、 C_{f1} 、 i_{f1} 和 R_{f2} 、 L_{f2} 、 C_{f2} 、 i_{f2} 分别为故障点到检测点 S_{12} 和 S_{13} 之间线路的等值电阻、等值电感、等值电容和电容电流。

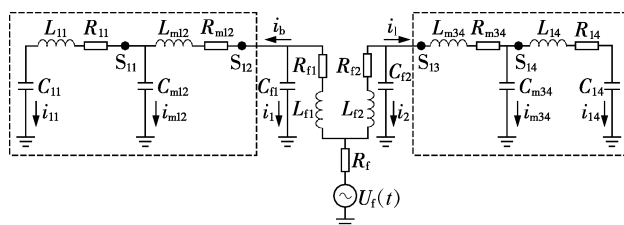


图2 小电流接地故障暂态等值电路

Fig.2 Equivalent circuit of small-current grounding fault

暂态电流 i_b 和 i_l 的波形相似度可用相关系数 ρ_{bl} 表征:

$$\rho_{bl} = \frac{\int_0^T i_b(t) i_l(t) dt}{\sqrt{\int_0^T i_b^2(t) dt \int_0^T i_l^2(t) dt}} \quad (1)$$

可知 $0 \leq |\rho_{bl}| \leq 1$,且 $|\rho_{bl}|$ 越大,表明 i_b 和 i_l 之间的波形相似度越高。当 $|\rho_{bl}| \leq \rho_T$ ($\rho_T \in [0.4, 0.6]$ 表示相似度门槛值)时,表示 i_b 和 i_l 波形不相似;当 $-1 \leq \rho_{bl} \leq -\rho_T$ 时,表示 i_b 和 i_l 波形相似但是极性相反;当 $\rho_T \leq \rho_{bl} \leq 1$ 时,表示 i_b 和 i_l 波形相似且极性相同。

用 I_k 表示暂态电流 i_k 的有效值,则有:

$$I_k = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i_k^2(t) dt} \quad (2)$$

其中, k 对应各暂态电流下标,如 I_{11} 表示暂态电流 i_{11} 的有效值。

发生小电流接地故障时,对于故障点上游健全

区段的两相邻检测点(如 S_{11} 和 S_{12}),暂态电流关系有:

$$i_b = i_{11} + i_{m12} \quad (3)$$

由于相邻检测点间线路长度远小于检测点 S_{11} 上游线路与所有健全线路长度之和,则有 $I_{m12} \ll I_{11}$ 。由式(3)可得:

$$i_b \approx i_{11} \quad (4)$$

即开关 S_{11} 与开关 S_{12} 处暂态零序电流有效值接近、波形相似。

对于故障点下游健全区段两相邻检测点(如 S_{13} 和 S_{14}),暂态电流特征如下:

$$i_l = i_{14} + i_{m34} \quad (5)$$

一般情况下,同故障点上游健全区段,有 $I_{14} \gg I_{m34}$,由式(5)可得:

$$i_l \approx i_{14} \quad (6)$$

此时,检测点 S_{13} 与 S_{14} 处暂态零序电流有效值接近、波形相似。但当相邻检测点间线路长度大于其下游线路的1倍以上、不可忽略时,式(6)不再成立。另外,由于故障暂态电流是电流行波的多次反射叠加而成,考虑到故障点下游线路较短,2个检测点处行波反射过程差异较大,其暂态电流波形可能不再相似。

当故障点过渡电阻较小时,故障点上游网络和下游网络的谐振过程相对独立,主谐振频率有较大差异,对应地,检测点 S_{12} 与 S_{13} 的暂态零序电流波形不相似^[7]。当故障点位于特殊位置(故障点上游与下游暂态主频率相近)或者过渡电阻较大(故障点上游与下游耦合强烈)时,将出现检测点 S_{12} 与 S_{13} 的暂态零序电流波形相似但极性相反的情况。

综上所述,各区段两侧暂态电流波形相似性特征为:

- a. 故障区段两侧暂态电流波形不相似或者波形相似但极性相反;
- b. 故障点上游健全区段两侧暂态电流波形相似且极性相同;
- c. 故障点下游健全区段两侧暂态电流波形相似且极性相同或者波形不相似。

以图1中点 F_1 发生故障为例,故障线路各区段两侧暂态电流的相关系数分布范围如图3所示。由图可见,故障区段和故障点下游健全区段的相关系数存在重叠现象。

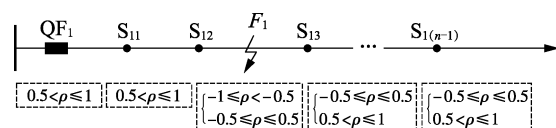


图3 故障线路各区段两侧暂态电流的相关系数分布范围

Fig.3 Distribution range of correlation coefficients of transient current on both sides of sections of fault feeder

集中处理模式下,主站可以利用整条线路上各个FTU的信息,首先判断两侧暂态电流波形相似但极性相反的区段为故障区段^[7];若没有,则从线路出口依次向下比较,确定首个两侧暂态电流波形不相似区段即为故障区段。该方法可避免将故障点下游健全区段误判为故障区段。

协同模式下,各检测点只能采集相邻检测点的故障信息,根据相邻检测点暂态电流间的相关系数判断故障区段,由于故障区段和故障点下游健全区段相关系数分布范围存在重叠现象,将无法可靠区分故障区段和下游健全区段。若以两侧暂态电流不相似作为故障区段的判据,则故障点下游健全区段出现不相似情况时,将被误判为故障区段。因此,需要进一步利用暂态电流的其他信息,如暂态电流有效值等,设计新算法。

3 分布式小电流接地故障定位算法

3.1 各区段两侧暂态电流有效值特征分析

定义各区段暂态电流有效值系数 M 为:

$$M = \frac{\text{区段上游监测点暂态电流有效值}}{\text{区段下游监测点暂态电流有效值}} \quad (7)$$

M_{sb} 、 M_{sl} 、 M_f 分别为故障点上游健全区段、故障点下游健全区段与故障区段的两侧暂态电流有效值系数。一般地,配电网中整个系统对地电容电流大于故障线路对地电容电流 2 倍以上,每条馈线上装设 3 或 4 个 FTU。考虑到各区段线路对地电容电流不会相差很大,则有:

$$\begin{cases} M_{sb} < 1 \\ M_f \geq 1.3 \\ M_{sl} > 1.5 \end{cases} \quad (8)$$

定义 $M_T \in [1, 1.3]$ 为有效值系数门槛值。利用各区段两侧暂态零序电流有效值系数可以区分故障点上游健全区段与故障区段或故障点下游健全区段:当 $M < M_T$ 时为故障点上游健全区段;当 $M \geq M_T$ 时为故障区段或者故障点下游健全区段。

3.2 各检测点暂态零序电流峰值与工频零序电流幅值特征分析

进一步利用各检测点的暂态零序电流峰值与工频零序电流幅值之比 h 区分故障区段和故障点下游健全区段。

无论是不接地系统还是经消弧线圈接地系统,发生单相接地故障时,故障点下游检测点暂态零序电流峰值和工频零序电流幅值分别为^[22]:

$$I_{lzan} = U_m \omega C_2 \sqrt{\left(\frac{\omega_1}{\omega} \sin \varphi\right)^2 + \cos^2 \varphi} \quad (9)$$

$$I_{lwen} = U_m \omega C_2 \quad (10)$$

对于故障点下游任意检测点,由式(9)、(10)可知,暂态零序电流峰值与工频零序电流幅值的比值均相等,可表示为:

$$h_1 = \sqrt{\left(\frac{\omega_1}{\omega} \sin \varphi\right)^2 + \cos^2 \varphi} \quad (11)$$

同理可得,在不接地系统中,单相接地时故障点上游各监测点暂态零序电流峰值与工频零序电流幅值的比值均相等,与故障点下游计算公式类似,可表示为:

$$h_b = \sqrt{\left(\frac{\omega_b}{\omega} \sin \varphi\right)^2 + \cos^2 \varphi} \quad (12)$$

其中, U_m 为虚拟电压幅值; ω 为工频频率; ω_b 、 ω_1 分别为故障点上、下游主谐振频率; φ 为故障初相角; h_b 、 h_1 分别为故障点上、下游健全区段暂态零序电流峰值与工频零序电流幅值的比值。

在消弧线圈接地系统中,故障点上游工频电流将受到消弧线圈补偿电流的影响。假设消弧线圈补偿电流为 I_L ,则故障点上游检测点工频零序电流幅值表达式如下:

$$I_{lwen} = I_L - U_m \omega C_1 \quad (13)$$

故障点上游检测点暂态零序电流主谐振分量的最大幅值表达式如下:

$$I_{lzan} = U_m \omega C_1 \sqrt{\left(\frac{\omega_b}{\omega} \sin \varphi\right)^2 + \cos^2 \varphi} \quad (14)$$

故障点上游各监测点暂态零序电流峰值与工频零序电流幅值的比值可表示为:

$$h_b = \frac{U_m \omega C_1 \sqrt{\left(\frac{\omega_b}{\omega} \sin \varphi\right)^2 + \cos^2 \varphi}}{I_L - U_m \omega C_1} \quad (15)$$

设该检测点与其上游相邻检测点间等效电容(即该区段等效电容)为 C_0 ,则相邻检测点暂态零序电流峰值与工频电流幅值之比为:

$$h_{b'} = \frac{U_m \omega (C_1 - C_0) \sqrt{\left(\frac{\omega_b}{\omega} \sin \varphi\right)^2 + \cos^2 \varphi}}{I_L - U_m \omega (C_1 - C_0)} \quad (16)$$

显然, $h_{b'} \neq h_b$,即上游各监测点暂态零序电流峰值与工频零序电流幅值的比值不等,且与 h_1 不相等。综上所述,故障区段两侧的 h 不等,故障点下游健全区段两侧 h 相等,故可利用该特征区分故障区段和故障点下游健全区段。

特别地,对于任意配电网中的任一条出线,总存在 1 个位置(称为分界点)发生单相接地故障时两侧的暂态主谐振频率相等^[7],即 $\omega_b = \omega_1$ 的情况,则 $h_b = h_1$,整个系统所有检测点的暂态零序电流峰值与

工频零序电流幅值之比相等,利用本节所述特征无法判别区段属性。此时,故障区段两侧暂态电流波形相似但极性相反,对于任一个待定区段,可首先利用该相似性特征判断是否为故障区段。

3.3 分布式故障定位方法

3.3.1 分布式故障定位思路

对于两侧均设有检测点的区段,同时利用两侧检测点故障特征,可直接判断其属性(故障区段、故障点上游健全区段或故障点下游健全区段)。对于只有 1 个检测点的末端区段,无法直接判断区段属性,可借助其上游区段属性进行判断,即:当其上游区段属性为故障点上游健全区段时,则其为故障区段,否则为故障点下游健全区段。

3.3.2 分布式故障定位算法

根据上述分析,各区段两侧暂态电流相关系数、暂态电流有效值系数以及暂态零序电流峰值与工频零序电流幅值比特征如表 1 所示,综合利用这些特征判断区段属性。其中, S_b 、 S_l 、 S_f 分别为故障点上游健全区段、故障点下游健全区段、故障区段。

表 1 各区段零序电流特征

Table 1 Characteristics of zero-sequence current of sections

区段	ρ	M	h
S_b	$\rho_T \leq \rho < 1$	$M < M_T$	—
S_f	$-\rho_T \leq \rho < \rho_T$ 或 $-1 \leq \rho < -\rho_T$	$M \geq M_T$	不等
S_l	$-\rho_T \leq \rho < \rho_T$ 或 $\rho_T \leq \rho < 1$	$M \geq M_T$	相等

对于两侧均设有检测点的区段,适应分布式小电流接地故障定位的判断如下:

a. 若该区段有 $M < M_T$,则该区段为故障点上游健全区段;

b. 若该区段有 $-1 \leq \rho < -\rho_T$ 或 $M \geq M_T$,且区段两侧暂态零序电流峰值与工频零序电流幅值之比不相等,则该区段为故障区段;

c. 若该区段有 $M \geq M_T$ 且区段两侧暂态零序电流峰值与工频零序电流幅值之比相等,则该区段为故障点下游健全区段。

对于最末检测点下游区段,若最末检测点与其上游相邻检测点有 $M < M_T$,则判定其下游区段为故障区段,否则为故障点下游健全区段。

3.3.3 分布式故障定位流程

正常运行时,通过逐级查询方法识别系统拓扑结构,确定各个相邻节点间的电气连接关系。以某个主控 FTU 为例,说明故障发生后的处理流程。

a. 发生故障时,FTU 根据暂态零序电流越限/暂态零序电压越限启动并作为主控 FTU,并将其所监测的节点作为根节点。若该节点不是最末检测点,则将其下游相邻检测点作为子节点;若该节点为最末检测点,则将其上游相邻检测点作为子节点。

b. 主控 FTU 向其子节点 FTU 请求故障信息,子节点 FTU 返回故障零序电流录波数据。

c. 计算两检测点暂态零序电流波形相关系数、暂态电流有效值系数以及区段两侧暂态零序电流峰值与工频零序电流幅值之比。

d. 判断该区段两侧检测点暂态电流波形是否相似但极性相反。若是,则该区段为故障区段,执行步骤 g,否则执行步骤 e。

e. 判断该区段 $M < M_T$ 是否成立。若成立,则该区段为故障点上游健全区段,该 FTU 停止运行;否则执行步骤 f。

f. 判断该区段两侧检测点 h 之差的绝对值是否小于预设门限值 h_T (h_T 可取为 1)。若是,则该区段为故障点下游健全区段,该 FTU 停止运行;否则该区段为故障区段,执行步骤 g。

g. 参照短路故障协同模式处理方式进行处理隔离及恢复健全区段供电^[15]。

h. 将定位和处理结果上报主站。

4 仿真验证

利用 MATLAB 仿真平台搭建 10 kV 小电流接地系统仿真模型,如图 4 所示。图中,线路正、负序电阻 $R_1 = R_2 = 0.27 \Omega/\text{km}$;零序电阻 $R_0 = 2.7 \Omega/\text{km}$;正、负序电感 $L_1 = L_2 = 2.55 \times 10^{-3} \text{ H/km}$,零序电感 $L_0 = 1.019 \times 10^{-3} \text{ H/km}$;正、负序电容 $C_1 = C_2 = 3.39 \times 10^{-7} \text{ F/km}$,零序电容 $C_0 = 280 \times 10^{-3} \text{ F/km}$;主变压器变比为 110 kV:10 kV;线路 l_1 — l_4 的长度分别为 16 km、8 km、19.5 km、18 km; Q_1 — Q_8 为检测点; E 为联络开关;FTU₁—FTU₈ 为馈线终端;单相接地故障点 A 距母线 2 km,开关 K 断开;单相接地故障点 B 距母线 6 km,开关 K 断开;单相接地故障点 C 距母线 7 km,开关 K 闭合; ρ_T 设定为 0.5, M_T 设定为 1, h_T 设定为 1。

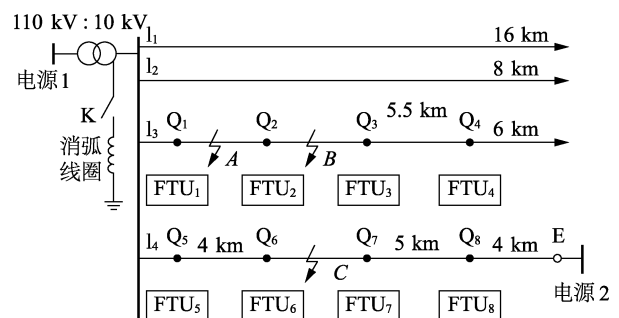


图 4 仿真系统模型

Fig.4 Simulation system model

系统上电正常运行时,主控 FTU (如 FTU₂) 根据配置信息,首先向其一侧相邻开关 Q_3 处的 FTU₃ 发送拓扑查询请求,FTU₃ 接收到拓扑查询请求后,根据配置信息查询到 Q_3 不是电源开关且有相邻开关存在,因此,将 Q_3 的属性、状态及其另一侧相邻开关

Q_4 的名称和 FTU₄ 的通信地址信息一并返回给 FTU₂, FTU₂ 收到 FTU₃ 返回的信息后,再向 FTU₄ 发出拓扑查询请求, FTU₂ 收到 FTU₄ 返回 Q_4 为末端开关的信息后,该侧查询结束。同理查询获得 Q_2 另一侧的拓扑关系。最后, FTU₂ 根据接收到的所有查询结果,得到馈线拓扑如图 5(a) 所示。同理可得 l_4 的馈线拓扑,如图 5(b) 所示。

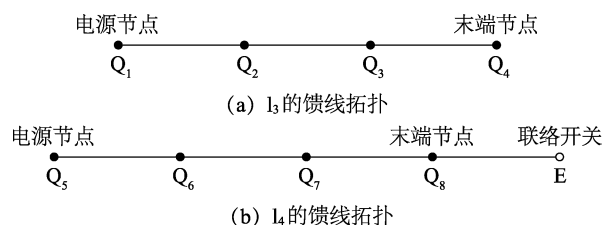


图5 馈线拓扑识别结果

Fig.5 Identification results of feeder topology

点 A 发生接地故障时,故障数据及判定结果如表 2 所示,各检测点零序电流波形如图 6 所示。图中,由上至下依次为 Q_1 、 Q_2 、 Q_3 、 Q_4 处零序电流。

表2 点 A 接地时零序电流特征和定位结果

Table 2 Characteristics of zero sequence currents and locating results with grounding fault at point A

区段	ρ	M	h	区段属性
Q_1-Q_2	-0.34	2.77	4.33/17.88	S_f
Q_2-Q_3	0.70	1.43	17.88/18.04	S_1
Q_3-Q_4	0.52	1.93	18.04/18.05	S_1
Q_4 下游	—	—	18.05/—	S_1

注:“/”前后数据分别对应区段两侧检测点的 h ,后同。

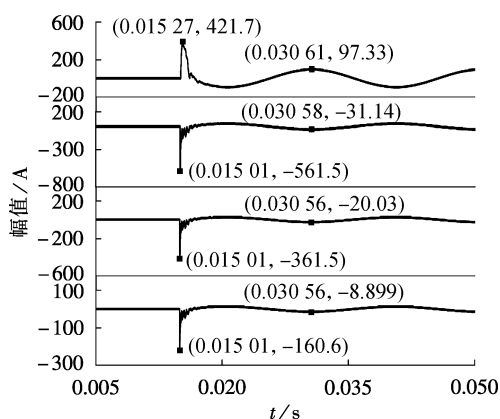


图6 点 A 发生单相接地故障时各检测点零序电流波形

Fig.6 Zero-sequence currents when single-phase grounding fault occurs at point A

对于区段 Q_1-Q_2 , FTU₁ 作为主控 FTU, 因 Q_1 非最末节点, 因此其下游节点 Q_2 为子节点, FTU₁ 向 FTU₂ 请求故障数据, FTU₂ 返回 Q_2 零序电流录波数据, FTU₁ 计算两检测点暂态零序电流相关系数、有效值系数以及暂态零序电流峰值与工频零序电流幅值之比。其中 ρ 为 -0.34, 不满足 $-1 < \rho < -\rho_T$ 的特征, 执行 3.3.3 节中的步骤 e; M 为 2.77, 不满足 $M < 1$ 的

特征, 执行 3.3.3 节中的步骤 f; 两检测点的 h 分别为 4.42 和 16.83, 二者之差大于 h_T , 则判定区段 Q_1-Q_2 为故障区段, 执行 3.3.3 节中的步骤 h。

对于区段 Q_2-Q_3 , FTU₂ 作为主控 FTU, 因 Q_2 非最末节点, 选择其下游节点 Q_3 为其子节点, FTU₂ 向 FTU₃ 请求故障数据并处理。流程同上, 判定为故障点下游健全区段, FTU₂ 停止运行。

同理, 区段 Q_3-Q_4 判定为故障点下游健全区段, FTU₃ 停止运行。

对于 Q_4 下游区段, FTU₄ 作为主控 FTU, 因 Q_4 为最末节点, 选择其上游节点 Q_3 为子节点, FTU₄ 向 FTU₃ 请求故障数据并处理。上游区段 Q_3-Q_4 不满足 $M < 1$ 的特征, 则该区段为故障点下游健全区段, FTU₄ 停止运行。

点 B 发生接地故障时, 故障数据及判定结果如表 3 所示。

表3 点 B 发生单相接地故障时零序电流特征和定位结果

Table 3 Characteristics of zero-sequence currents and fault locating results when single-phase grounding fault occurs at point B

区段	ρ	M	h	区段属性
Q_1-Q_2	0.93	0.94	4.98/5.21	S_b
Q_2-Q_3	-0.23	4.37	5.21/21.38	S_f
Q_3-Q_4	0.52	1.91	21.38/21.38	S_1
Q_4 下游	—	—	21.38/—	S_1

点 C 发生接地故障时, 故障数据及判定结果如表 4 所示。此时, 故障点下游健全区段两侧暂态电流相关系数小于门槛值 ρ_T , 采用文献[7]的算法将发生误判, 而本文方法仍能准确判定故障区段。

表4 点 C 发生接地故障时零序电流特征和定位结果

Table 4 Characteristics of zero-sequence currents and fault locating results when single-phase grounding fault occurs at point C

区段	ρ	M	h	区段属性
Q_5-Q_6	0.88	0.94	87.77/33.75	S_b
Q_6-Q_7	-0.18	12.93	33.75/17.91	S_f
Q_7-Q_8	0.44	2.22	17.91/17.91	S_1
Q_8 下游	—	—	17.91/—	S_1

在不同系统与故障条件(包括不同故障位置、故障初相角等)下进行了大量仿真实验, 实验结果表明本文方法均能准确进行故障定位。

5 结论

本文从系统结构、动态拓扑识别、通信配置以及基本工作模式等方面, 验证了分布式故障处理方式可应用于小电流接地故障定位, 但原有集中式定位算法不再适用, 需提出适用于分布式故障定位的新算法。

本文经过理论分析计算, 根据故障区段、故障点

上游健全区段与下游健全区段两侧暂态电流波形相关系数、暂态电流有效值系数以及区段两侧暂态零序电流峰值与工频零序电流幅值之比的特征,实现了分布式小电流接地故障定位。

a. 对于两侧均有检测点的区段,适应分布式小电流接地故障定位判据如下:若该区段有 $M < M_T$,则该区段为故障点上游健全区段;若该区段有 $-1 \leq \rho < -\rho_T$ 或 $M \geq M_T$,且区段两侧暂态零序电流峰值与工频零序电流幅值之比不相等,则该区段为故障区段;若该区段有 $M \geq M_T$ 且区段两侧暂态零序电流峰值与工频零序电流幅值之比相等,则该区段为故障点下游健全区段。

b. 对于最末检测点下游区段,若最末检测点与其上游相邻检测点 $M < M_T$,则判定其下游区段为故障区段,否则为故障点下游健全区段。

本文提出的分布式故障定位算法提高了小电流接地故障暂态定位技术的适用性,也符合智能配电网的发展趋势。

参考文献:

- [1] 李景禄. 实用配电网技术[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2006:381-383.
- [2] 刘健,张小庆,陈星莺,等. 集中智能与分布智能协调配合的配电网故障处理模式[J]. 电网技术,2013,37(9):2608-2614.
LIU Jian, ZHANG Xiaoqing, CHEN Xingying, et al. Fault location and service restoration for distribution networks based on coordination of centralized intelligence and distributed intelligence[J]. Power System Technology, 2013, 37(9):2608-2614.
- [3] 齐郑,高玉华,孙海新,等. 基于电压-时间型重合器的配电网单相接地故障自动隔离技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(1):32-36.
QI Zheng, GAO Yuhua, SUN Haixin, et al. Technology research of fault automatic isolation in distributed single-phase-to-ground based on voltage-time type recloser[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(1):32-36.
- [4] 张保会,尹向根. 电力系统继电保护[M]. 北京:中国电力出版社, 2005:57-58.
- [5] 刘健,张伟,程红丽. 重合器和电压-时间型分段器配合的馈线自动化系统的参数整定[J]. 电网技术,2006,30(16):45-49.
LIU Jian, ZHANG Wei, CHENG Hongli. The parameter setting of feeder automation system based on mutual coordination of recloser with voltage-time type of sectionalizers[J]. Power System Technology, 2006, 30(16):45-49.
- [6] 薛永端,徐丙垠,李天友,等. 配网自动化系统小电流接地故障暂态定位技术[J]. 电力自动化设备,2013,33(12):27-32.
XUE Yongduan, XU Bingyin, LI Tianyou, et al. The fault location technology using transient signals for single phase earth fault in non-solidly earthed network based on the distribution automation system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(12):27-32.
- [7] 薛永端,李天友,李伟新,等. 小电流接地故障暂态分析及区段定位新方法[J]. 电力系统自动化,2014,38(23):101-107.
XUE Yongduan, LI Tianyou, LI Weixin, et al. A novel method of transient analysis and faulty section location for single-phase earth fault in non-effectively earthed network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(23):101-107.
- [8] 马士聪,徐丙垠,高厚磊,等. 检测暂态零模电流相关性的小电流接地故障定位方法[J]. 电力系统自动化,2008,32(7):48-52.
MA Shicong, XU Bingyin, GAO Houlei, et al. An earth fault locating method in feeder automation system by examining correlation of transient zero mode currents[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(7):48-52.
- [9] WU Guifeng, CHEN Hong, WANG Xuan. Research of small current grounding fault location algorithm in distribution grid based on RBF[C]//2014 International Conference on Information Science, Electronics and Electrical Engineering(ISEEE). Sapporo, Japan: IEEE, 2014:154-158.
- [10] 郑顾平. 配网自动化系统小电流接地故障定位方法[D]. 保定:华北电力大学,2012.
ZHENG Guping. Small current grounding fault location method for distribution network automation system[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2012.
- [11] 孙国强,卫志农,唐利锋,等. 多目标配电网故障定位的 Pareto 进化算法[J]. 电力自动化设备,2012,32(5):57-61,73.
SUN Guoqiang, WEI Zhinong, TANG Lifeng, et al. Pareto evolutionary algorithm for multi-objective fault location of distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(5):57-61, 73.
- [12] 徐青山,唐国庆,张欣. 计及容错的配电网故障定位新算法[J]. 电力自动化设备,2005,25(6):31-33.
XU Qingshan, TANG Guoqing, ZHANG Xin. Error-tolerated fault locating algorithm of power distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25(6):31-33.
- [13] 张钊. 配电网故障定位的通用矩阵算法[J]. 电力自动化设备, 2005, 25(5):40-43.
ZHANG Zhao. General matrix algorithm for distribution system fault locating[J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25(5):40-43.
- [14] 张钊,陈昊,牛桂东. 基于配电网故障区域辨识的定位算法[J]. 电力自动化设备,2005,25(3):83-84.
ZHANG Zhao, CHEN Hao, NIU Guidong. Distribution network fault locating based on faulty section identification[J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25(3):83-84.
- [15] 高孟友,徐丙垠,范开俊,等. 基于实时拓扑识别的分布式馈线自动化控制方法[J]. 电力系统自动化,2015,39(9):127-131.
GAO Mengyou, XU Bingyin, FAN Kaijun, et al. Distributed feeder automation based on automatic recognition of real-time feeder topology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(9):127-131.
- [16] 李培亮. 基于 IEC61850 的配电网故障分布式处理技术[D]. 淄博:山东理工大学,2015.
LI Peiliang. Distributed fault distributed processing technology for distribution network based on IEC61850[D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2015.
- [17] 韩国政. 基于 IEC61850 的配网自动化开放式通信体系[D]. 济南:山东大学,2011.
HAN Guozheng. IEC61850-based communication architecture for distribution automation[D]. Ji'nan: Shandong University, 2011.
- [18] 许诚. 分布式智能馈线自动化系统通信网络实时性研究[D]. 淄博:山东理工大学,2012.
XU Cheng. Research on the real-time performance of distributed intelligent feeder automation system communication network[D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2012.

- [19] 陶顺,肖湘宁,彭驰. 有源智能配电网[M]. 北京:中国电力出版社,2012:16-18.
- [20] 范开俊,徐丙垠,董俊,等. 基于智能终端逐级查询的馈线拓扑识别方法[J]. 电力系统自动化,2015,39(11):180-186.
FAN Kaijun, XU Bingyin, DONG Jun, et al. Identification method for feeder topology based on successive polling of smart terminal unit[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(11): 180-186.
- [21] 韩国政,徐丙垠. 基于 IEC61850 标准的智能配电终端建模[J]. 电力自动化设备,2011,31(2):104-107.
HAN Guozheng, XU Bingyin. Modeling of intelligent distribution terminal according to IEC61850[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(2): 104-107.
- [22] 要焕年,曹梅月. 电力系统谐振接地[M]. 北京:中国电力出版社,2009:66-70.

作者简介:



宋伊宁

宋伊宁(1993—),女,河南驻马店人,硕士研究生,主要研究方向为配电网小电流接地故障自愈技术(E-mail: Songyn_upc@126.com);

李天友(1963—),男,福建泉州人,高级工程师,博士,主要研究方向为配电技术(E-mail: ltyxm@163.net);

薛永端(1970—),男,山西芮城人,教授,博士,通信作者,主要研究方向为配电网接地方式及接地故障自愈技术、配网自动化技术(E-mail: xueyd70@126.com)。

Distributed small-current grounding fault locating method based on power distribution network automation system

SONG Yining¹, LI Tianyou², XUE Yongduan¹, HUANG Jianye³, CHEN Heng⁴, XU Bingyin⁴

(1. College of Information and Control Engineering, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China;

2. State Grid Fujian Electric Power Company, Fuzhou 350003, China;

3. State Grid Fujian Electric Power Research Institute, Fuzhou 350007, China;

4. Shandong Kehui Power Automation Co., Ltd., Zibo 255087, China)

Abstract: The existing centralized locating methods based on the master station have many links and are difficult for cooperation among the products from different manufacturers. From the aspects of system structure, dynamic topology identification, communication configuration and basic work mode, it is verified that the distributed fault processing method could adapt to the small-current grounding fault locating. However, the existing centralized locating methods no longer adapt to distributed control systems, so novel methods satisfying the demand of distributed fault locating must be proposed. The transient equivalent circuit of small-current grounding fault adapting to distributed fault locating is given. The transient zero-sequence current similarity coefficients, transient zero-sequence current RMS coefficients and the ratios of transient zero-sequence current peak value to power frequency current magnitude at both sides of the fault section, upstream/downstream healthy sections are analyzed, based on which, a novel fault locating method based on the zero-sequence current characteristics is proposed, which meets the requirement of distributed fault processing. The proposed method could improve the adaptability of the transient locating technology of small-current grounding fault, and solve the difficulties of cooperation among products from different manufacturers. The effectiveness of the proposed method is verified by simulative and field data.

Key words: small-current grounding network; single-phase grounding fault; electric fault location; distributed fault processing; electric power distribution; electric power distribution automation; transients