

DOI: 10.7667/PSPC180227

基于设备信息交互的小电流接地故障定位

骆玮¹, 王恒², 王磊³, 朱仲贤¹, 高红强¹

(1. 国网安徽省电力有限公司检修分公司, 安徽 合肥 230000; 2. 国网安徽省有限公司阜阳分公司, 安徽 阜阳 236000; 3. 安徽省新能源利用与节能重点实验室(合肥工业大学), 安徽 合肥 230009)

摘要: 为解决小电流接地系统故障定位问题, 提出一种利用 IEC61850 规约进行设备信息交互、比对故障特征波形的配电网故障定位方法。相对传统基于上下游低频波形的差异判别, 通过对小电流接地故障暂态特征分析, 提取了配电系统特征频带。利用该频带提出基于 EMD 的改进算法, 获得了有效滤除高频干扰的线路特征零模电流, 对比线路各区段特征零模电流波形相似度与幅值差度最终确定故障位置。针对上述方法, 结合 IEC61850 规约, 所提出的故障定位实现仅需要设备间信息交互, 减少主站通信压力, 定位效率显著提高。基于 Matlab/Simulink 的配网小电流接地故障仿真验证了所提定位方法可应对多分布式电源接入、多点故障的复杂情况。设计的配电装置动模仿真也进一步说明了本方法具有更高的准确性、更强的实用性。

关键词: 小电流接地故障; 故障定位; 特征零模电流; 改进 EMD 算法; IEC61850

Faulted line location method for distribution systems based on the equipment's information exchange

LUO Wei¹, WANG Heng², WANG Lei³, ZHU Zhongxian¹, GAO Hongqiang¹

(1. Maintenance Branch, State Grid Anhui Electric Power Co. Ltd., Hefei 230000, China; 2. Fuyang Branch, State Grid Anhui Electric Power Co. Ltd., Fuyang 236000, China; 3. Anhui New Energy Utilization and Energy Saving Laboratory (Hefei University of Technology), Hefei 230009, China)

Abstract: In order to solve the fault location problem in the small-current grounding system, a distribution network fault location method that utilizes the IEC61850 to exchange device information and compare the fault characteristic waveforms is proposed. Different from the traditional method based on the difference discrimination between the upstream and downstream low frequency waveforms, this paper extracts the characteristic frequency range of the distribution network by analyzing the transient characteristics of small-current grounding fault. On this basis, the improved EMD algorithm is put forward and the characteristic zero-module currents which can effectively filter the high frequency interference are achieved. Thus the faults are able to be located by comparing the similarity and amplitude difference degree of the characteristic zero-module currents of different sections. With the application of the method above and the IEC61850, the realization of fault location proposed merely needs to exchange device information, which significantly reduces the communication pressure of master station and improves the location efficiency. The simulation of the small-current grounding fault in distribution network based on Matlab/Simulink proves that the location method in this paper is capable of dealing with the multiple access of distribution power and multiple faults. Moreover, the dynamic simulation of designed power distribution device further indicates that the method is more accurate and practical.

This work is supported by Key Fund of Smart Grid Technique and Equipment of National Key Basic Research and Development Program of China (No. 2016YFB0900600).

Key words: small-current grounding fault; fault location; characteristic zero-module current; improved EMD algorithm; IEC61850

0 引言

小电流接地系统故障定位是智能配电网建设的一个重要难题。虽然目前大部分配电网自动化设备如配电终端(Distribution Terminal Unit, DTU)支持允许设备互操作的 IEC61850 规约,但其仅起监控作用,如何更加自由、智能地将配电设备用以解决故障定位等问题具有现实意义。

获取准确的小电流接地系统故障特征是相关研究的先决条件^[1-3]。然而,配电网结构复杂,故障信号伴随的大量杂乱振荡噪声,对定频的滤波算法或仅依靠定值作为判据的传统故障定位带来挑战。除此之外,基于上下游波形对比方法作为新的考虑思路,原理简单可靠,大量论文均对其可行性进行了验证^[4-6],由于该方法数据传输压力大,上述论文通常选取特征单量或低频波形作为对比量,但低于故障特征振荡频率的故障波形其特征并不明显,此外,由于通常选取电压、电流突变作为故障发生判断取电压、电流突变作为故障发生判断^[7],较低的采样率必然会带来采样同步问题,这一系列的因素限制了上下游波形对比方法的可靠应用。因此,结合配电网单相接地故障特征,利用自适应的信号处理手段,获得具有故障特征的暂态分量,并通过设备间的独立交互获得故障位置,这是解决上述问题的有效方法之一。

本文采用自适应滤除系统高频干扰的经验模态分解(Empirical Mode Decomposition, EMD)改进算法代替传统暂态分量分析的小波算法获得故障特征零模电流,通过相邻设备之间的故障特征对比确定故障位置,结合 IEC61850 规约允许设备互操作的优势^[8],基于相邻配电设备的信息交互实现了故障定位,本文据此理论进行相关仿真及动模实验,验证了所提配电网故障定位方法的实用性和有效性。

1 小电流接地故障暂态分析

受各种因素影响,小电流接地故障暂态波形的传统信号分析方法的实现效果并不理想。因此,有必要详细分析故障传输的暂态过程,获得排除高频干扰,特征明显的分量。

鉴于多出线之间暂态过程的相互干扰,可首先分析单条线路在母线接地故障时的暂态过程。配电系统故障暂态模型选用凯伦贝尔变换后的单条线路零模网络^[9-10],如图 1 所示。

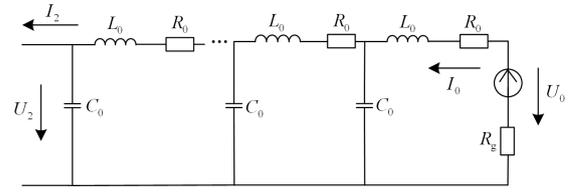


图 1 配电网零模参数模型

Fig. 1 Zero mode parameter model of distribution line

图 1 中 C_0 、 L_0 、 R_0 分别为线路对地电容、电感、电阻分布参数,忽略线路漏电导影响。 U_0 为故障点接入电压,近似为工频, I_0 为故障点零序电流,而 U_2 、 I_2 分别为线路始端电压与电流。

针对该均匀传输线路回路电压电流方程为

$$\begin{aligned} -\frac{\partial u}{\partial x} &= R_0 i + L_0 \frac{\partial i}{\partial t} \\ -\frac{\partial i}{\partial x} &= G_0 u + C_0 \frac{\partial u}{\partial t} \end{aligned} \quad (1)$$

通过单相接地故障分析,因线路末端线路阻抗较小, U_2 与 U_0 近似相同。配电变压器和负荷零模阻抗较大,可视为开路,末端零模电流 I_0 近似为 0。设线路长度为 l ,鉴于振荡频率较高, $\omega l \gg R_0$,得到故障点零模电流为

$$I_0 \approx \frac{j \tan(\omega l \sqrt{L_0 C_0})}{\sqrt{L_0 / C_0}} U_0 \quad (2)$$

式中, U_0 的主频为工频,故障暂态频率主要由 $\tan(\omega l \sqrt{L_0 C_0})$ 确定。

当 $\omega = \frac{k\pi}{2l\sqrt{L_0 C_0}}$ ($k=1, 2, \dots, n$) 时故障零模电流发生谐振,首次振荡频率 f 为

$$f = \frac{1}{4l\sqrt{L_0 C_0}} \quad (3)$$

因线路损耗、过渡电阻对高频幅值影响较大,所以首振频率为故障暂态特征分量主要组成部分。由式(3)可知线路首振频率与线路长度及分布参数密切相关,线路越短则振荡频率越高。当母线发生单相接地故障时,各出线分别以不同的振荡频率传递故障零模电流。

基于各线路首振频率不变的原则,采用 τ 型模型对线路进行简化^[11]。由于线路电容提供故障电流,电阻对振荡频率影响较小,故在简化模型中将两者均保留为原值。因此可得到小电流接地系统线路故障等效模型如图 2 所示。线路中各分布式参数作如下等效。

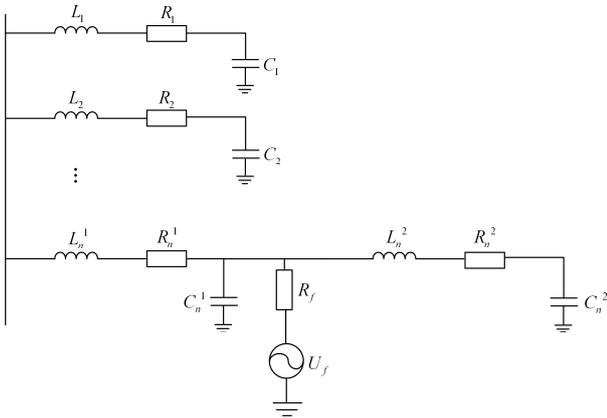


图 2 配电网线路故障等效模型

Fig. 2 Line fault equivalent circuit of distribution network

$$\begin{cases} C'_x = C_0 l_x \\ L'_x = \frac{4L_0 l_x}{\pi^2} \\ R'_x = R_0 l_x \end{cases} \quad (4)$$

式中: l_x 为第 x 条线路长度; C'_x , L'_x , R'_x 分别为该线路 τ 型模型等效参数。特别地, 故障线路 n 被故障点分为参数为 L_n^1 , C_n^1 , R_n^1 与 L_n^2 , C_n^2 , R_n^2 的两段线路。

忽略线路电阻对振荡频率的影响, 建立线路 1 的简化暂态等值模型如图 3 所示。图中: L'_1 , C'_1 为线路 1 的等效参数, L_n , C_n 为故障点距母线区段等效参数。针对线路测量点可得零模电流的相应振荡角频率 ω_{n1} 。

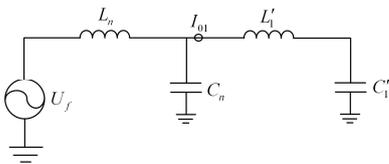


图 3 配电网小电流接地故障线路简化等值模型

Fig. 3 Simplified equivalent circuit of small current grounding fault of distribution network

$$\omega_{n1} = \sqrt{\frac{L_1^2 C_1'^2 + L_n^2 C_n^2 + L_n^2 C_1'^2 + L_1 L_n C_1'^2 + 2L_n^2 C_1' C_n - L_1 L_n C_1' C_n}{4L_1 L_n C_1' C_n}} \quad (5)$$

由 $L'_1, L_n, C_1', C_n \ll 1$ 可得 $\omega_{n1} < 1/\sqrt{L_1 C_1'}$ 。由式(5)可知, 故障发生在线路时, 线路首振频率小于母线故障时最短线路的首振频率, 即

$$f_{n1} < \frac{1}{4l\sqrt{L_0 C_0}} \quad (6)$$

实际上配电网中的故障零模电压并非工频, 而

含有与零模电流相同的高频振荡分量, 从而影响各线路零模电流。所以为了保留各线路的故障特征, 全系统的暂态电流高频部分选用式(3)所示的配网中最短线路的首振频率, 并取一定的可靠系数。在故障角较小的情况下, 故障电流中工频等低频分量含量较大, 低频可直接选取 0 Hz。

根据分析, 上述系统特征频带是综合配电网在不同单相接地故障情况下的线路暂态过程推算而得。根据论述, 与故障电阻、故障类型较多影响特征暂态分量幅值不同, 系统特征频带与故障点位置关系密切, 故准确提取故障特征频带内的波形, 是保证波形对比有效的重要步骤之一。

2 改进 EMD 算法及故障定位

2.1 EMD 算法自适应性简介

EMD 是 1998 年由美国的 N.E.Huang 提出并发展的一种新型自适应信号时频分析方法^[12], 依据信号自身特点, 自主地抽取信号内在的固有模态函数 (Intrinsic Mode Function, IMF)。其诞生时间虽晚, 但大量的工程实例已证实 EMD 算法具有类似二滤波器的特性, 是一种分析非线性故障波形的有效工具。

EMD 算法的特点在于局部尺度自适应, 抛弃了传统的基底分解而采用多分量信号分解。建立信号 $x(t)$ 的多分量数学模型如下

$$x(t) = \sum_{i=1}^N c_i(t) + r(t) \quad (7)$$

式中: $c_i(t)$ 是单分量信号, 其每一时刻只包含唯一瞬时频率; $r(t)$ 是残余信号。单分量信号可有效获得具有物理意义的信号。与采用三角或小波函数作为基底的全域波分析不同, EMD 算法中的时间尺度代表了信号内在隐含的局部振荡尺度^[13], 与上述模型对应, EMD 算法将原信号分解成多个窄带分量(即 IMF)。鉴于 EMD 分解并不需要预先定义基函数, 也无需采用信号的先验知识, 因此, 该算法具有良好的自适应性^[14]。

EMD 可将原信号分解为若干 IMF 和一个残余信号。

$$s(t) = \sum_{i=1}^n IMF_i(t) + r(t) \quad (8)$$

由于 IMF 的局部特性, 根据实际波形特征分解为多个中心频带, EMD 算法得到的 IMF 相比基于谐波的信号分析方法更有实际的物理意义。可以把 EMD 算法看作是一组具有自适应特性的智能带通滤波器, 其截止频率和带宽随被分解信号物理意义

的不同而不同。此外，不同于小波等全域波分析方法需要分解与重构，EMD 算法在获取故障电流特征波形时，不会造成波形失真。

2.2 基于系统特征频带的改进 EMD 算法

EMD 算法由于其局部自适应优势，在针对小电流接地故障选线、定位等领域均已有一定的研究，但 EMD 算法的自适应性也带来了频带混叠。现场设备采样数据通常包含大量高频环境噪声，直接采用 EMD 算法，高频干扰常混叠于高层 IMF 中，造成故障特征不明显，可能造成误判。

将系统特征频带内的零模电流称为特征零模电流。该特征电流在具备故障特征的同时，排除了高频的干扰。结合 EMD 算法，可采用叠加特定信号方式扩大某一高频分量在原信号中的占比，使其与高频被独立分解的方法获得特征零模电流。文献[15]介绍了运用掩膜信号进行信息提取的方法及效果验证，但是掩膜的选取仍然是获得特征零模电流的关键，基于系统特征频带的改进 EMD 算法具体步骤如下。

(1) 在含高频干扰的零模电流 $s(t)$ 中分别叠加和减去一个正弦波掩膜信号。

$$\begin{aligned} x_+(t) &= s(t) + A\sin(2\pi ft) \\ x_-(t) &= s(t) - A\sin(2\pi ft) \end{aligned} \quad (9)$$

式中： A 为 $s(t)$ 中最大值； f 为系统特征频带高频。

(2) 将得到的 $x_+(t)$ ， $x_-(t)$ 再次分别通过 EMD 算法后，获得 $IMF_+^{n1}(t)$ 、 $IMF_-^{n2}(t)$ ($n1$ 、 $n2$ 为各自分解层数) 对其求取平均获得 $IMF_z^n(t)$ (n 为分解层数)。

$$IMF_z^n(t) = \sum_{n=\min(n1,n2)} \frac{IMF_+^{n1}(t) + IMF_-^{n2}(t)}{2} \quad (10)$$

式中若 $x_+(t)$ ， $x_-(t)$ 分解得到不同层数 IMF，则选择较小层叠加。通过上文分析可知高频干扰电流已被独立分解至 $IMF_z^n(t)$ 较高的层数。

(3) 对 $IMF_z^n(t)$ 各层进行频谱分析，选择系统特征内的 IMF 叠加最终获得滤除高频干扰的特征零模电流 $z(t)$ 。

$$z(t) = \sum IMF_z^{\{z1, z2, \dots, zn\}} \quad (11)$$

式中： $z1, z2, \dots, zn$ 为主频在系统特征频带内的层数。

改进 EMD 算法较其他的信号分析方法可更有效地获得系统特征频带内的波形。相对小波变换，改进 EMD 算法不需要确定分解层数、小波函数等参数。与数字滤波算法相比，改进 EMD 算法对低频部分信号幅值和相位影响小，这是后续故障定位

方法可行的前提条件。因此，采用改进 EMD 算法是获得特征零模电流的最优选择。

2.3 基于改进 EMD 算法的小电流接地故障定位

通过改进 EMD 算法可获得小电流接地故障各区段特征零模电流。但不同故障时刻、位置、状态都对应着不同的故障特征^[16]，目前大量的故障定位研究局限于过电流检测判断位置，其定值的选取易受故障影响^[17]。采用计算各区段故障波形相似度方法^[13]确定故障位置^[18]，易受现场干扰影响而造成误判。因此，本文旨在根据各区段设备间的特征零模电流对比获得故障位置。

线路区段内发生故障，该线路两端配电终端所采集到的特征零模电流来自不同线路，高频谐波电流组成均不相同，相似度低。

线路区段内无故障，各线路的暂态电流由故障点提供，该区段线路等值于 CLC 滤波电路，由电路替代定理，可将图 1 中的故障线路两端电压、电流替换为故障区段两端电压、电流，因此由式(3)及其结论可知区段越短、截止频率高，一般来说，测量的区段远小于配网最长线路总长，因此截止频率远大于线路特征频率，由滤波特性可知其对特征零模电流影响小，非故障区段两端测量特征零模电流相似度高。

此外，线路中的小负荷分支或者分布式电源通常采用 Y- Δ 型变压器，发生单相接地故障流过的零模电流较小，对该区段两端波形相似度影响小。

配电线路末端等暂态零模电流较小，为了减小相互配合误差，可对零模电流进行幅值补偿，同时也有利于减少非故障区段因线路衰减造成的幅值误差。设 $\hat{I}_p'(t)$ 和 $\hat{I}_q'(t)$ 为通过改进 EMD 算法获得的线路两端特征零模电流，而 μ 表示所述离散值的个数。 $\hat{I}_q'(t)$ 经过幅值补偿获得 $\hat{I}_q(t)$ 再与 $\hat{I}_p'(t)$ 进行比对。

$$\hat{I}_q(t) = \hat{I}_q'(t) \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^{\mu} \hat{I}_p'^2(t)}{\sum_{t=1}^{\mu} \hat{I}_q'^2(t)}} \quad (12)$$

为确定故障区段，需要以下两个判据。

(1) 波形相似度 ρ

$$\rho = \frac{\sum_{t=1}^{\mu} \hat{I}_p'(t) \cdot \hat{I}_q(t)}{\sqrt{\sum_{t=1}^{\mu} (\hat{I}_p'(t))^2 \cdot \sum_{t=1}^{\mu} (\hat{I}_q(t))^2}} \quad (13)$$

(2) 幅值差度 η

$$\eta = \frac{\sum_{t=1}^{\mu} (\hat{I}'_p(t) - \hat{I}'_q(t))^2}{\sum_{t=1}^{\mu} (\hat{I}'_p(t))^2} \quad (14)$$

上述两个判据分别从波形相似程度与幅值差异两方面判断某一区段是否发生了单相接地故障, 若计算得到某区段 $\rho < \varepsilon_1$ 、 $\eta > \varepsilon_2$, 则表示该区段发生故障, 考虑一定裕度, 本文 ε_1 取 0.7, ε_2 取 0.5。

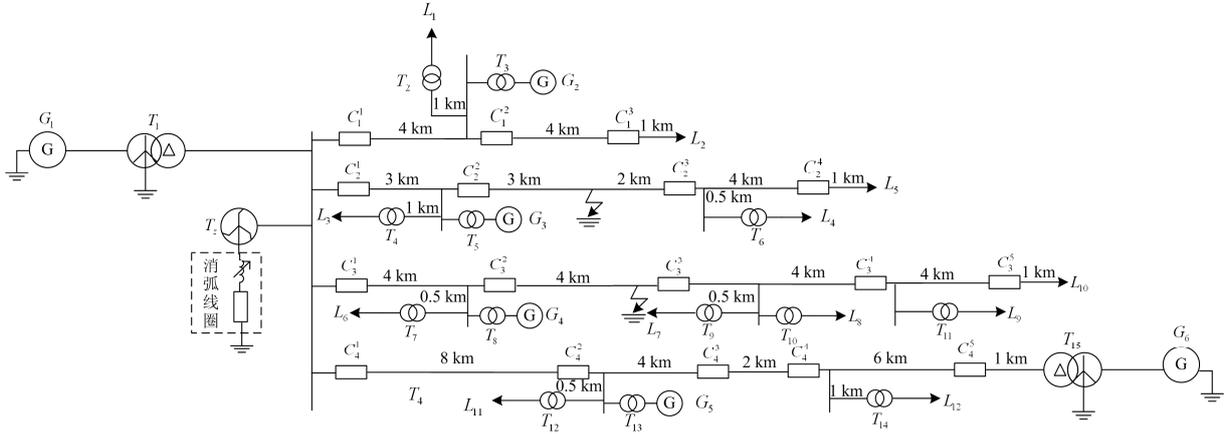


图 4 经消弧线圈接地配电网拓扑结构图

Fig. 4 Topology of distribution network by arc-suppression coil grounding

采用仿真软件搭建了图 4 的模型, 消弧线圈脱谐度取 8%, 电缆线路的分布式电感 L_0 为 0.398 mH/km, 分布式电容 C_0 为 0.203 μ F/km, 各线路长度如图所示。模拟线路 3 距母线 8 km (C_3^2 、 C_3^3 之间) 首次发生接地电阻为 5 Ω 的接地故障, 0.01 s 后线路 2 距母线 6 km (C_2^2 、 C_2^3 之间) 处再次发生接地电阻为 5 Ω 的接地故障。

2.4.2 验证

将系统中最短线路(线路 1)的参数代入式(3)可得系统特征高频为 3 477 Hz, 计及裕度, 取 4 000 Hz 为系统特征频带高频, 大于该频率的信号视为高频干扰。故障发生后, 采用本文所提出的故障定位判据确定故障区段。首先各测量点获得 0°、30°、60°、90° 故障角下的零模电流, 并分别通过改进 EMD 算法得到特征零模电流。

图 5 为 90° 故障时刻 C_3^1 测量得到的零模电流与特征零模电流, 通过分别对其频谱进行分析。本文为验证叠加波形影响, 对特征零模电流中叠加系统特征频带高频含量及系统特征频带外高频含量进行分析。

叠加系统特征频带高频含量为

2.4 故障定位仿真与验证

2.4.1 仿真建模

图 4 为验证本文定位方法的经消弧线圈接地 10 kV 配电网结构示意图, 其中 G_1 、 G_6 为配电网输入电源, G_2 — G_5 为线路中的分布式电源; T_1 — T_{15} 为变压器, 消弧线圈通过 T_z (接地变压器) 接入母线; C_n^m 为采集故障参数的配电网智能设备, 其中 n 为馈线编号, m 为该馈线设备编号; L_1 — L_{15} 为用户负荷。

$$\alpha_1 = \frac{I_{f=4000}^2}{\sum_{n=1}^{500} (I_n)^2} = 0.001 \quad (15)$$

系统特征频带外高频含量为

$$\alpha_2 = \frac{\sum_{n=80}^{500} (I_n)^2}{\sum_{n=1}^{500} (I_n)^2} = 0.002 \quad (16)$$

式中: n 为谐波次数; I 为特征零模电流各次谐波幅值。

同样对滤除特征零模分量进行频谱分析, 获得特征频带内电流含量为

$$\alpha_3 = \frac{\sum_{n=1}^{80} (I'_n)^2}{\sum_{n=1}^{500} (I'_n)^2} = 0.012 \quad (17)$$

式中: n 为谐波次数; I' 为零模特征电流与特征零模电流差值各次谐波幅值。

由上述分析可得, 改进 EMD 算法将滤波损耗控制约在 1% 内, 对本文后续判断影响较小, 在保证系统特征频带内的电流不失真的条件下, 有效地滤除了高频干扰电流。

为验证改进 EMD 算法的高识别度, 本文将不同故障角下各配电网智能设备采集的原始故障电流与其经改进 EMD 算法得到的特征零模电流, 分别通过式(13)波形相似度计算结果进行对比, 如表 1 所示。

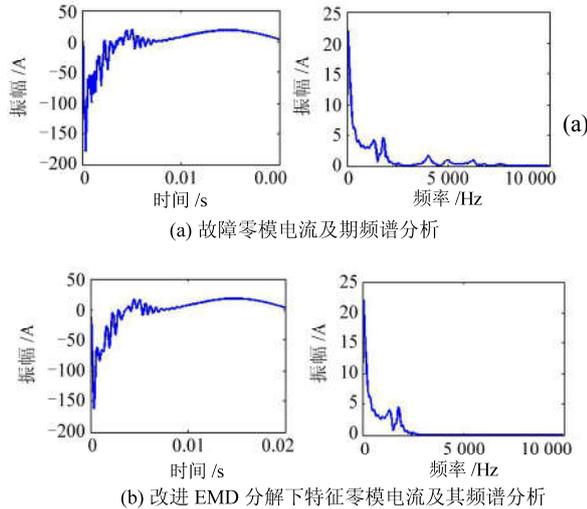


图 5 90°故障角下故障线路特征波形及 FFT 分析

Fig. 5 Characteristic waveform and FFT analysis of fault line at 90° fault angle

表 1 数据对比明显可知改进 EMD 算法获得的特征零模电流相对原始零模电流, 非故障区段波形相似度更高, 而较难定位的二次故障(C_2^2 、 C_2^3 之间), 其故障区段相似度更低, 波形差异更大。

表 1 各区段零模电流与特征零模电流波形相似度

Table 1 Waveform similarity of zero-module currents and characteristic zero-module currents of all sections

区段	0°		30°		60°		90°	
	零模电流	特征零模电流	零模电流	特征零模电流	零模电流	特征零模电流	零模电流	特征零模电流
$C_1^1-C_1^2$	0.92	1.00	0.95	1.00	0.93	0.99	0.90	1.00
$C_1^2-C_1^3$	0.73	0.97	0.93	0.98	0.97	0.97	0.93	0.94
$C_2^1-C_2^2$	0.99	0.98	0.98	0.83	0.96	0.96	0.95	0.94
$C_2^2-C_2^3$	0.44	0.49	0.74	0.56	0.65	0.51	0.31	0.29
$C_3^3-C_3^4$	0.67	0.88	0.89	0.93	0.95	1.00	0.91	0.96
$C_3^1-C_3^2$	1.00	0.98	0.99	0.98	0.99	0.97	0.98	0.98
$C_3^2-C_3^3$	-0.34	0.00	-0.21	-0.10	-0.20	-0.14	-0.27	-0.11
$C_3^3-C_3^4$	0.98	1.00	0.92	0.99	0.89	0.99	0.88	0.99
$C_3^4-C_3^5$	0.96	0.97	0.89	0.94	0.87	0.88	0.87	0.85
$C_4^1-C_4^2$	0.99	1.00	0.99	0.99	0.98	0.98	0.98	0.98
$C_4^2-C_4^3$	1.00	1.00	0.99	1.00	0.99	0.99	0.99	0.99
$C_4^3-C_4^4$	1.00	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
$C_4^4-C_4^5$	0.97	1.00	0.95	1.00	0.93	1.00	0.92	0.99

此外, 首次故障位置(C_3^2 、 C_3^3 之间)无论零模电流与特征零模电流相对其他非故障区段均有较高的识别度, 而故障发生较迟的第二个故障点两端波形在两次故障之间相似, 并存在高频干扰, 判断较为困难。因此通过数据对比可以发现: 采用零模电流, 0° 故障角下的 C_2^3 、 C_2^4 以及 30° 故障角下的 C_2^2 、 C_2^3 均出现一定程度的误判, 而采用特征零模电流可以获得准确的故障区段, 并具有一定的裕度。

单一波形相似度在判断多故障时可能会误判, 为提高准确度, 本文定位方法增加了幅值差度判据。

表 2 为各区段在不同故障角度下的幅值差度。由表 2 可知在故障区段幅值差度远大于非故障区段, 满足裕度要求, 可判定该区段发生故障, 验证了判据幅值差度的可靠性。

表 2 各区段特征零模电流幅值差度

Table 2 Amplitude difference degree of characteristic zero-module currents of all sections

区段	0°	30°	60°	90°
$C_1^1-C_1^2$	0.01	0.01	0.00	0.01
$C_1^2-C_1^3$	0.06	0.03	0.05	0.12
$C_2^1-C_2^2$	0.03	0.34	0.08	0.12
$C_2^2-C_2^3$	0.92	0.78	0.93	1.41
$C_2^3-C_2^4$	0.23	0.14	0.00	0.07
$C_3^1-C_3^2$	0.02	0.04	0.06	0.03
$C_3^2-C_3^3$	2.00	2.19	2.27	2.21
$C_3^3-C_3^4$	0.00	0.01	0.02	0.03
$C_3^4-C_3^5$	0.06	0.11	0.24	0.30
$C_4^1-C_4^2$	0.00	0.01	0.04	0.03
$C_4^2-C_4^3$	0.00	0.00	0.03	0.01
$C_4^3-C_4^4$	0.01	0.00	0.00	0.00
$C_4^4-C_4^5$	0.01	0.00	0.00	0.01

需要说明的是本定位方法选取故障后一周波的故障电流进行对比, 若二次故障发生较晚或有多次故障, 可能故障发生首周波无法区分, 需延迟至下一周波方可确定故障位置。因此, 可采取连续判断直到故障电流稳定以综合确定多故障位置^[19]。

上述故障定位方法其本质是基于设备间的信息对比, 传统实现方式都是设备将少量的故障相关数据传递至主站, 主站根据故障矩阵或系列改进算法获得故障位置^[20-21]。随着自动化设备能力的不断提高, 故障电流的采样率不断提高, 高采样率获得的故障电流不仅提高了容错性, 更进一步减少了故障启动的时间误差。但传统将全网自动化设备采集数据同时传递至主站的方式, 必定会引起主站通信堵塞、服务器瘫痪、丢包等系列问题。IEC61850

规约由于允许设备间信息直接交互, 结合本定位方法可有效地解决上述问题。

3 基于 IEC61850 的小电流接地故障定位

3.1 故障定位信息模型

IEC61850 规约是智能配电网的实现基础。目前城市配网中大部分自动化设备均支持 IEC61850 规约, 不仅增强了变电站与设备的监控功能, 更使得设备间的互操作与信息交互成为可能。本文故障定位方法正是基于 IEC61850 规约上述优势而实现的。

IEC61850 规约的逻辑节点表示数据存储地址, 主站与其他智能电子设备(Intelligent Electronic Device, IED)均通过逻辑节点获得设备信息, 而设备本身也只需更新或读取逻辑节点内的数据, 但该规约中并没有符合本文所提出的定位方法相关逻辑节点。因此若要通过 IEC61850 规约实现本文所提出的功能, 需要采用定义通用逻辑节点 GGIO 来实现^[22-23]。

定位功能实例化的逻辑节点 GGIO1 具体内容如表 3 所示, 定位功能的实现需主站预先分配两组数据。首先, 主站将本定位设备配合对象 IP 及线路信息存储至 ADR 的数据属性 ipName 中; 其次, 获得改进 EMD 算法所需要的系统高频分量 OSHigh 信息。故障发生后, 故障零模电流及特征零模电流由设备采样并存储至 ZeroModle、TransAclc 中供主站或配合设备调取, 它们类型相同, 数据属性为浮点型数组, 数组大小由采样率决定。而设备通过获取对端特征零模电流, 经判据计算将定位所需的波形相似度与幅值差度分别存储至 WavSim、AmpDif 中。最后, 将 SecID 内的 secname 存储本设备相关

表 3 定位功能实例化逻辑节点 GGIO1

Table 3 Instantiation logical node of fault location GGIO1			
属性名	类型	说明	
Adr	-ipName(string255)	DPL	定位配合端 IP
		OSHigh	INS
ZeroModle	-mag(float32 array)	MV	零模电流
		TransAclc	MV
WavSim	-mag(float32)	MV	波形相似度
		AmpDif	MV
SecID	-stval(boolean)	SPS	区段信息及故障情况
		-q	
			-secname(string255)

信息包括 IP 与支路号, stval 存储故障信息。通常一个 IED 若与多个设备配合, 需要实例化多个 GGIO 节点。

3.2 基于 IEC61850 规约故障定位实现方式

3.1 节中 IEC61850 规约通过 GGIO 逻辑节点建立了定位方法的信息模型, 而其功能则依托于抽象通信服务接口(Abstract Communication Service Interface, ACS)实现。

针对本文所述故障定位方法, 根据配电网结构确定全网馈线终端配合对象与系统特征频带, 各馈线终端需通过 GetDataValues 读取 ADR 中的配合对象 IP 及 OSHigh, 以客户端的方式连接至相配合的服务端, 通过抽象服务接口 GetDataValues 读取 TransAclc 的内容。计算获得波形相似度和幅值差度, 并采用 UpdataDataValues 服务存储在相应对象属性类。最后确定故障区段, 同时更新至 SecID, 若判定为故障区段, 可采用 GOOSE 报文的形式上传至主站。

4 定位装置及实例验证

为进一步验证本文所提定位方法的可行性, 设计开发了相关硬件设备, 在分布式发电实验平台上开展实验研究。

配电设备 CPU 采用了 DSP+ARM 的设计思路, DSP 配合双 AD7606 可获得多通道、高采样率、高精度的故障电流, 为确保故障信息的保留, 设备采样率定为 25.6 kHz, 大大降低了配电网故障采样时间的同步误差。而 IEC61850 规约则依托于嵌入式技术以及开源软件 LIB-IEC 61850 实现。

动模实验设备可等效为图 6 所示电路, 其线路参数于表 4 给出。

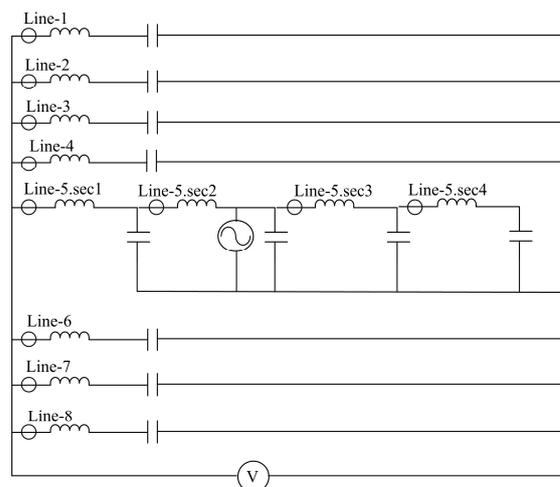


图 6 动模实验等效电路

Fig. 6 Equivalent circuit of dynamic simulation test

表 4 动模试验各线路等效参数

Table 4 Equivalent parameters of dynamic simulation test of each line

线路	1	2	3	4	5	6	7	8
L/mH	15	10	3.0	3.0	1*4	1.8	1.8	1.8
C/μF	20	10	2.2	2.2	0.47*4	1	1	1
l/km	100	50	11	11	9.4	5	5	5

通过所设计线路 5 上不同故障角下数据采集, 获得 4 个测量点的故障电流。其中故障点两端采样经校正的零模电流及特征零模电流波形如图 7 和图 8 所示。

配电设备通过 IEC61850 获得各自配合对象的特征零模电流, 由式(13)计算故障线路各区段波形相似度得到表 5。

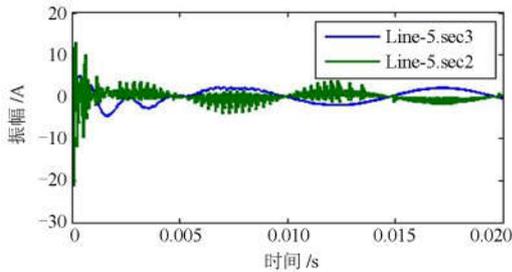


图 7 90° 故障角下故障点两端零模电流

Fig. 7 Zero-mode currents of two ends of fault points at 90° fault angle

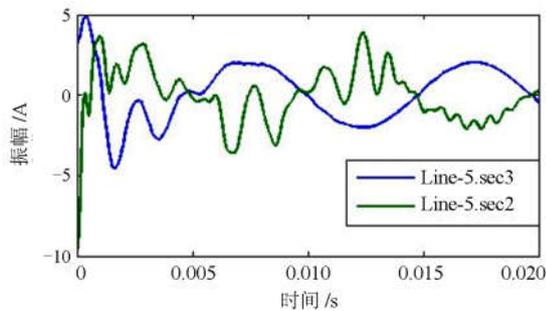


图 8 90° 故障角下故障点两端特征零模电流

Fig. 8 Characteristic zero-mode currents of two ends of fault points at 90° fault angle

表 5 故障线路零模电流与特征零模电流波形相似度

Table 5 Waveform similarity of zero-mode currents and characteristic zero-mode currents of fault line

区段	0°		30°		60°		90°	
	零模电流	特征零模电流	零模电流	特征零模电流	零模电流	特征零模电流	零模电流	特征零模电流
C1—C2	1.00	1.00	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
C2—C3	-0.68	-0.97	-0.56	-0.90	0.37	-0.76	-0.36	-0.60
C3—C4	0.47	0.96	0.41	0.92	-0.50	0.91	0.03	0.81

从表中可知, 线路末端暂态分量较小, 高频干扰使得 C3—C4 区段的零模电流相似度较低, 易引起误判; 而特征零模电流由于排除了干扰, 能够可靠地对故障区段进行判定。

此外, 考虑设备采样率对区段定位结果的影响, 本文获得不同的采样率下的故障数据及波形相似度。图 9 与图 10 分别为不同采样率下两区段波形相似度, 通过图表可以分析得到随着采样率的提高, 故障段(C2—C3)更趋向于反向即-1, 而线路无故障端更趋向于 1, 可见采样率的提高会使得结果更精确。然而, 仿真发现 25.6 kHz 的采样率获得的零模电流已经可以满足对特征零模电流的提取要求, 大于 25.6 kHz 的采样频率并没有显著提高区分度。与故障实时测量不同, 故障录波设备的采样率要求大于 10 kHz, 而 25.6 kHz 采样率也是完全可以满足设备要求, 本文使用的主流配置也可证明该点。由于分辨率对幅值差度影响较小, 现通过 25.6 kHz 采样率获得数据, 计算不同故障角下幅值差度如表 6 所示。由表 6 可知故障区段幅值差度明显远大于非故障区段, 表明该判据具有较高的灵敏度。

最后针对采样同步问题, 本论文采用零序量突变作为启动录波判据, 而选择最优采样率 25.6 kHz, 则表示理论同步误差在 78 μs, 而通过动模仿真实

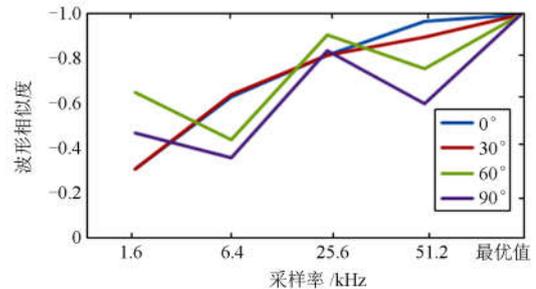


图 9 不同采样率下 C2—C3 区段波形相似度

Fig. 9 Waveform similarity of different sampling rates between C2 and C3

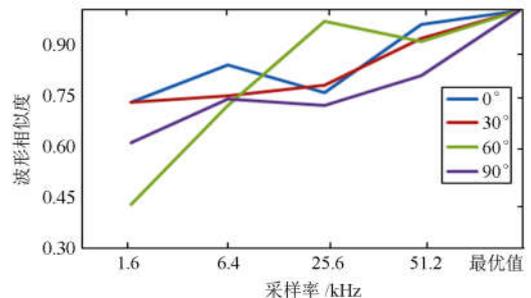


图 10 不同采样率下 C3—C4 区段波形相似度

Fig. 10 Waveform similarity of different sampling rates between C3 and C4

表 6 故障线路特征零模电流幅值差度

Table 6 Amplitude difference degree of characteristic

zero-module currents of fault line

区段	0°	30°	60°	90°
C1—C2	0.00	0.01	0.00	0.00
C2—C3	3.94	3.80	3.52	3.21
C3—C4	0.09	0.15	0.27	0.31

际验证, 通常误差率在 3 个采样点之内, 同步误差完全满足判据裕量。

5 结论

我国配电网快速、智能化的发展促使大量 IED 设备的相互配合成为可能。本文采用具有自适应的改进 EMD 算法可有效滤除高频干扰电流, 提出了基于 IEC 61850 规约、利用设备间波形信息交互对比的故障定位方法。系统仿真与动模实验均验证了本文所述定位方法能够有效应对环境干扰, 具有较高的定位准确度, 适应当前多分布式电源、多点故障等复杂情况, 为配电网自动化功能的完善及小电流接地系统的故障定位提供了一种实际可行的方案。

参考文献

[1] POURAHMADI-NAKHLI M, SAFAVI A K. Path characteristic frequency-based fault locating in radial distribution systems using wavelets and neural networks[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(2): 772-781.

[2] 刘柱揆, 曹敏, 董涛. 基于波形相似度的小电流接地故障选线[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(21): 89-95.
LIU Zhukui, CAO Min, DONG Tao. Fault line selection of neutral indirectly grounding system based on waveform similarity[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(21): 89-95.

[3] NOURI H, ALAMUTI M M. Comprehensive distribution network fault location using the distributed parameter model[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(4): 2154-2162.

[4] CHAARI O, MEUNIER M, BROUAYE F. Wavelets: a new tool for the resonant grounded power distribution systems relaying[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1996, 11(3): 1301-1308.

[5] 牛耕, 周龙, 裴玮, 等. 基于克拉克电流相角差值的低压有源配电网故障定位方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(增刊 1): 15-24.
NIU Geng, ZHOU Long, PEI Wei, et al. Fault location

method for low voltage active distribution network based on phase-angle differences of the Klark currents[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(S1): 15-24.

[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. Small current grounding fault location based on transient signals of distribution automation system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(12): 27-32.

[7] SONG G, MA Z, LI G, et al. Phase current fault component based single-phase earth fault segment location in non-solidly earthed distribution networks[J]. International Transactions on Electrical Energy Systems, 2016, 25(11): 2713-2730.

[8] 查丛梅, 王长江, 魏云冰, 等. 一种基于 EMD 的谐振接地系统选线新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(14): 100-104.
ZHA Congmei, WANG Changjiang, WEI Yunbing, et al. A new method of the resonant grounding system fault line detection based on EMD[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(14): 100-104.

[9] 薛永端, 李娟, 徐丙垠. 中性点不接地系统小电流接地故障暂态等值电路的建立[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(34): 223-232.
XUE Yongduan, LI Juan, XU Bingyin. Construction of transient equivalent circuits of single-phase earth fault for isolated neutral systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(34): 223-232.

[10] 薛永端, 李娟, 徐丙垠. 中性点经消弧线圈接地系统小电流接地故障暂态等值电路及暂态分析[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(22): 5703-5714.
XUE Yongduan, LI Juan, XU Bingyin. Transient equivalent circuit and transient analysis of single-phase earth fault in arc suppression coil grounded system[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(22): 5703-5714.

[11] NOURI H, ALAMUTI M M. Comprehensive distribution network fault location using the distributed parameter model[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(4): 2154-2162.

[12] HUANG N E, ZHENG S, STEVEN R, et al. The empirical mode decomposition and Hilbert spectrum for nonlinear and nonstationary time series analysis[J]. Proceedings of the Royal Society of London: 1998, 454(1971): 903-995.

[13] 张淑清, 翟欣沛, 董璇, 等. EMD 及 Duffing 振子在小电流系统故障选线方法中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(10): 161-167.

- ZHANG Shuqing, ZHAI Xinpei, DONG Xuan, et al. Application of EMD and Duffing oscillator to fault line detection in un-effectively grounded system[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(10): 161-167.
- [14] 刘志刚, 李文帆, 孙婉璐. Hilbert-Huang 变换及其在电力系统中的应用[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(4): 109-116.
- LIU Zhigang, LI Wenfan, SUN Wanlu. Hilbert-Huang transform and its applications in power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(4): 109-116.
- [15] 赵玲, 秦树人, 李宁, 等. 运用改进掩膜信号法的经验模态分解[J]. 振动、测试与诊断, 2010, 30(4): 434-439.
- ZHAO Ling, QIN Shuren, LI Ning, et al. Use of an improved masking signal to improve empirical mode decomposition[J]. Journal of Vibration, Measure & Diagnosis, 2010, 30(4): 434-439.
- [16] 郑志宇, 蔡翀, 张昭丞, 等. 基于小波域相子的电压暂降特征提取与成因辨识[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(1): 16-22.
- ZHENG Zhiyu, CAI Chong, ZHANG Zhaocheng, et al. Wavelet-based phasor to detect and identify the voltage sag characteristics[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(1): 16-22.
- [17] 孙桂花, 王敬华, 张璇, 等. 分布式智能的小电流接地故障定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(16): 72-78.
- SUN Guihua, WANG Jinghua, ZHANG Xuan, et al. Small current grounding fault location method of distributed intelligence[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(16): 72-78.
- [18] 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.
- [19] DHARMAPANDIT O, PATNAIK R K, DASH P K. A fast time-frequency response based differential spectral energy protection of AC microgrids including fault location[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 331-358. DOI: 10.1186/s41601-017-0062-0.
- [20] TENG Jenhao, HUANG Weihao, LUAN Shangwen. Automatic and fast faulted line-section location method for distribution systems based on fault indicators[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(4): 1653-1662.
- [21] 郑顾平, 姜超, 李刚, 等. 配网自动化系统中小电流接地故障区段定位方法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(13): 103-109.
- ZHENG Guping, JIANG Chao, LI Gang, et al. Method of fault area & section location for non-solidly earthed distribution system[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(13): 103-109.
- [22] 王德文, 邸剑, 张长明. 变电站状态监测 IED 的 IEC61850 信息建模与实现[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(3): 81-86.
- WANG Dewen, DI Jian, ZHANG Changming. Information modeling and implementation for status monitoring IED in substation based on IEC61850[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(3): 81-86.
- [23] IEC. Communication networks and systems for power utility automation – part 7-3: basic communication structure – common data classes[S]. 2010.

收稿日期: 2018-03-05; 修回日期: 2017-08-27

作者简介:

骆 玮(1991—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为配电网自动化设备; E-mail: luowei@mail.hfut.edu.cn

王 恒(1985—), 男, 高级工程师, 研究方向为配电网规划与运行; E-mail: wangheng208@qq.com

王 磊(1978—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为分布式发电技术、电力系统自动化。E-mail: Lwang_hf@126.com

(编辑 姜新丽)