

基于三相电流幅值分析的小电流单相 接地故障区段定位方法

万信书,方连航,梁 钰,吴 强,刘红岩

(海南电网有限责任公司电力科学研究院,海南 海口 570203)

摘 要:小电流接地系统单相接地故障定位一般由主站综合计算多个不同的电气量来实现。该方法计算量大且复杂,易产生较大误差,难以适用于结构复杂的配电网。对此,提出一种基于三相电流幅值分析的小电流单相接地故障定位方法。通过分析单相接地故障电流得出,故障路径上 2 个非故障相的相电流变化量近似相等,且小于故障相的相电流变化量;非故障路径上 2 个非故障相的相电流变化量近似相等,且与故障相的相电流变化量近似相等。根据三相故障电流故障前后幅值变化量设置判据以判断故障相并实现故障区段定位。ATP 仿真结果验证该定位方法在不接地系统和经消弧线圈接地系统的可行性。该方法可实现就地定位,定位判据简单,降低了主站的计算复杂度。

关 键 词:小电流接地系统;单相接地故障;故障定位;相电流幅值

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2020.04.007 中图分类号:TM771 文章编号:1673-9140(2020)04-0049-09

Method of fault section location for the small current single-phase-to-ground fault based on the amplitude analysis of three-phase current

WAN Xinshu, FANG Lianhang, LIANG Yu, WU Qiang, LIU Hongyan

(Electric Power Research Institute of Hainan Power Grid Co., Ltd., Haikou 570203, China)

Abstract: Single-phase-to-ground fault section location in small current grounded system is generally realized by a master station comprehensively calculating several different electrical quantities. This method is unsuitable for distribution networks with complex structures since its large workload and complicated calculations easily brings large errors. Under the background, a fault location method of distribution network based on three-phase current amplitude analysis is proposed. In views of the analysis on the three-phase current of single-phase-to-ground fault in small current grounded system, the current changes of the two non-fault phases on the fault path are approximately equal and less than the current change of fault phase. The phase current change of the two non-fault phases on the non-fault path are approximately equal and also equal to the current change of fault phase. By calculating the amplitude change of three-phase current before and after fault and setting the criterion, the fault phase can be selected and the fault section can be located. ATP simulation results verify the applicability in neutral ungrounded system and neutral point grounding system via arc suppression coil. The local location of fault is realized successfully. The proposed method is simple in location criterion and reduces the computational complexity of the master station.

Key words: small current grounding system; single-phase earth fault; fault location; amplitude of phase current

配电网在电力网中起着重要的分配电能的作用,随着配电网规模的不断扩大,电力电子装置的大面积使用及分布式电源的接入,使得配电网的结构日益复杂,对经常发生在配电网中的单相接地故障定位的准确性产生一定影响^[1]。目前,中国 6~35 kV 中压配电网一般采用中性点不接地或中性点经消弧线圈接地的方式,其单相接地故障定位问题长期以来均未得到很好地解决^[2-3]。

目前,应用到工程中的大多数方法为利用暂态分量的前半波^[4-5]、行波法^[6-8]等,需要综合多个不同的电气量。在实际应用过程中需要将所有信息上传至主站进行判定,在电气量的采集过程中对采样频率要求较高,在信息传输过程中对主站的网络通讯构成很大的压力,在综合判定过程中计算逻辑相对复杂,定位全过程易受外界干扰而影响结果的准确性及实时性。

近年来,有学者提出了基于线路三相暂态电流方向的分析方法^[9-11],即通过比较三相暂态电流的方向是否相同来确定该检测点是否位于故障点,通过比较线路电流的方向来判断线路是否为故障线路。该方法在多种实际工程线路的仿真模拟下存在误判情形,因此准确性无法保证。

该文提出一种基于三相电流幅值分析的配电网故障定位方法,适用于三相线路上仅安装电流互感器的线路,可实现就地定位。通过对故障前、后各相的相电流进行相量差计算,滤出负荷电流和相间电容电流的影响,以各相相电流的变化量作为判据进行故障定位,极大地缓解了通讯压力,减少了分析计算量。该方法既适用于中性点不接地系统又适用于中性点经消弧线圈接地系统。

1 小电流接地系统单相接地故障相电流分析

1.1 基于相电流突变方向故障定位的有效性分析

当小电流接地系统发生单相接地故障时,系统的暂态电容电流分量可以分为两部分:①因故障相电压降低而引起的电容放电暂态过程;②因非故障相电压升高而引起的电容充电暂态过程。

中性点经消弧线圈接地的小电流系统发生单相

接地故障示意如图 1 所示,故障发生在线路 K 上的任意一点 f 处,故障相为 A 相。其他出线依次标注为 1, 2, ..., N, 故障线路远离母线一侧记为 K' , 故障前 $i_f = 0$ 。

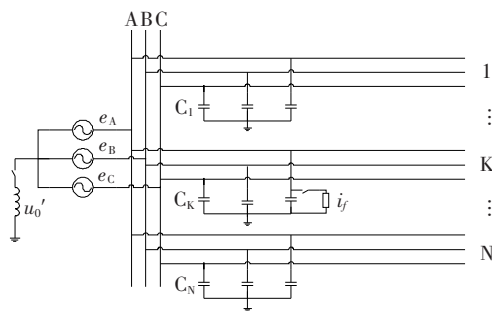


图 1 小电流接地系统单相接地故障

Figure 1 Single-phase-to-ground fault in small current grounded system

以 A 相为例,相电流表达式为

$$i_{KA} = i_{KAC} + i_{KAL} = C_M \frac{d(u_0 + e_A)}{dt} + i_{KAL} \quad (1)$$

式中 i_{KA} 为相电流; i_{KAC} 为 A 相对地电容电流; i_{KAL} 为 A 相负荷电流; u_0 为中性点对地电压; e_A 为 A 相相电压; C_M 为线路对地电容。

故障前 $i_f = 0$; 故障后 $i_f \neq 0$, 故障线路 K 在 f 点之前的故障相电流表达式为

$$i'_{KA} = i'_{KAC} + i'_{KAL} + i_f = C_K \frac{d(u'_0 + e_A)}{dt} + i'_{KAL} + i_f \quad (2)$$

故障线路非故障相电流表达式及非故障线路各相电流表达式以故障线路 B 相为例, 表示为

$$i'_{KB} = i'_{KBC} + i'_{KBL} = C_M \frac{d(u'_0 + e_B)}{dt} + i'_{KBL} \quad (3)$$

考虑到故障发生后各相电流的分布情况, 将图 1 简化, 仅保留 1、K、N 这 3 条出线, 等值为如图 2 所示的暂态等值电路。

以线路 K 发生 A 相单相接地故障为例, 易知线路 K 上的 A 相暂态电流瞬时增加, B、C 两相电流突变方向同 A 相反; 对于 1、N 等未发生故障的线路, i_A 、 i_B 、 i_C 的电流大小可表示为

$$i_{1A} = \frac{U_m}{|Z_{1A}|} \sin(\omega t + \varphi_{1A}) \quad (4)$$

$$i_{1B} = i_{1C} = \frac{U_m}{|Z_{1B}|} \sin(\omega t + \varphi_{1B}) \quad (5)$$

其中

$$\varphi_{1A}(j\omega) = \arctan\left(-\frac{1}{\omega C_{1A} R_0}\right) \quad (6)$$

$$\varphi_{1B}(j\omega) = \arctan\left[\frac{\omega(L_A + L_B) - \frac{1}{\omega C_{1B}}}{R_0}\right] \quad (7)$$

由式(6)、(7)可知 A、B、C 三相的电流方向与系统实际运行时电感、电容的参数有关。

经消弧线圈接地的小电流接地系统如图 3 所示,其现场数据及仿真实验的数据与理论模型计算情况相同。当系统发生单相接地故障时,对于故障区段故障相的电流突变方向与非故障相相反。但是对于非故障区段,故障相的电流突变方向与非故障相既存在如图 4 所示突变方向同向(故障相与非故障相的电流突变方向相同)的情况,也存在如图 5 所示突变方向相反(故障相与非故障相的电流突变方向相反)的情况。因此,通过相电流突变方向的判断方法不能灵活地适用于小电流接地系统单相接地故障的定位。

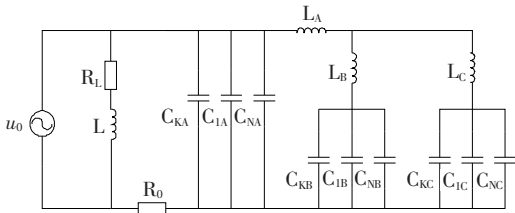


图 2 小电流接地系统接地故障暂态等值电路

Figure 2 Transient equivalent circuit of grounded fault in small current grounded system

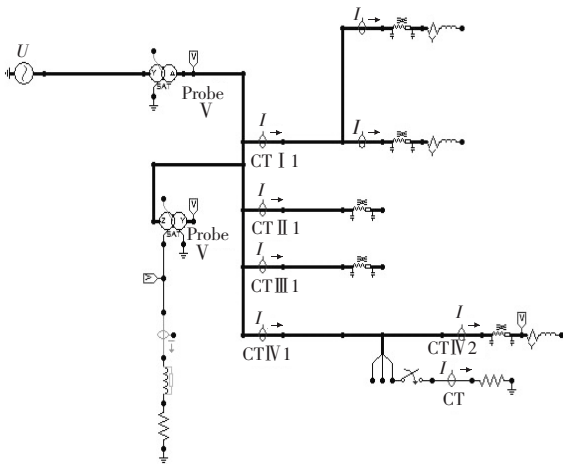


图 3 中性点经消弧线圈接地系统模型

Figure 3 Model of neutral point grounding system via arc suppression coil

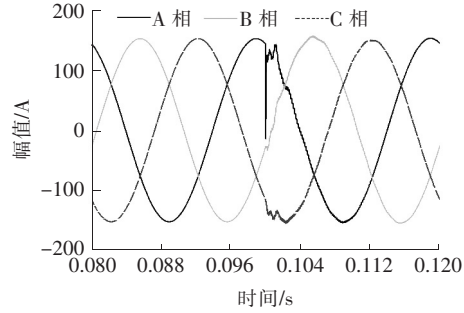


图 4 同向突变的三相故障电流波形

Figure 4 Three-phase fault current waveform in the same mutation direction

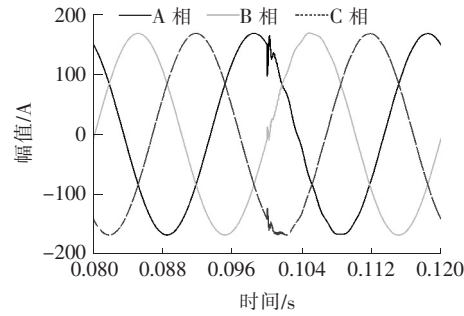


图 5 非同向突变的三相故障电流波形

Figure 5 Three-phase fault current waveform in the opposite mutation direction

1.2 单相接地故障稳态相电流分析

应用对称分量法,对线路 K 上 A 相单相接地故障进行稳态分析。仅保留故障线路 K 和非故障线路 1,可得到如图 6 所示序网等值电路。故障线路 A、B、C 三相电流变化量分别为 ΔI_{KA} 、 ΔI_{KB} 、 ΔI_{KC} ;非故障线路 A、B、C 三相电流变化量分别为 ΔI_{1A} 、 ΔI_{1B} 、 ΔI_{1C} ;馈线 K 正序、负序、零序电流分别为 I_{KA1} 、 I_{KA2} 、 I_{KA0} ;馈线 1 正序、负序、零序电压分别为 I_{1A1} 、 I_{1A2} 、 I_{1A0} ;故障点处故障分量的正、负、零序电流分别为 I_{A1} 、 I_{A2} 、 I_{A0} ;以故障点两侧作为端口,其正、负、零序等效阻抗分别为 $Z_{1\Sigma}$ 、 $Z_{2\Sigma}$ 、 $Z_{0\Sigma}$;故障点接地电阻为 R_f 。

对于故障线路,有

$$\Delta I_{KA} = -\Delta I_{1A} - \frac{2Z_{eq} I_{A1}}{-Z} = -(\Delta I_{1A} + \Delta I_{KB} + \Delta I_{1B} + \Delta I_{KC} + \Delta I_{1C}) \quad (8)$$

$$\Delta I_{KB} = -\Delta I_{1B} + \frac{Z_{eq} I_{A1}}{-Z} \quad (9)$$

$$\Delta I_{KC} = -\Delta I_{1C} + \frac{Z_{eq} I_{A1}}{-Z} \quad (10)$$

其中

$$Z_{eq} = Z_K - Z_{1\Sigma} \left[1 + Z_K \left(\frac{1}{Z_{fK}} + j\omega C_K \right) \right]$$

可知 $\Delta I_{KB} = \Delta I_{KC}$, $\Delta I_{KA} > \Delta I_{KB}$ 。

对于非故障线路,有

$$\Delta I_{1A} = \left(\frac{2Z_{eq}}{Z_{eq1}} + \frac{Z'_{eq}}{Z'_{eq1}} \right) I_{A1} \quad (11)$$

$$\Delta I_{1B} = \left(-\frac{Z_{eq}}{Z_{eq1}} + \frac{Z'_{eq}}{Z'_{eq1}} \right) I_{A1} \quad (12)$$

$$\Delta I_{1C} = \left(-\frac{Z_{eq}}{Z_{eq1}} + \frac{Z'_{eq}}{Z'_{eq1}} \right) I_{A1} \quad (13)$$

其中

$$Z'_{eq} = Z_{K0} - Z_{0\Sigma} (1 + Z_{K0} j\omega C_{K0})$$

$$Z_{eq1} = \left[Z_1 + \left(-j \frac{1}{\omega C_1} \right) // Z_{f1} \right] // \left(-j \frac{1}{\omega C_1} \right)$$

$$Z'_{eq1} = \left(Z_{10} - j \frac{1}{\omega C_{10}} \right) // \left(-j \frac{1}{\omega C_{10}} \right)$$

$$\frac{Z_{eq}}{Z_{eq1}} \approx \frac{-Z}{Z_K + Z_{f1}}$$

$$\frac{Z'_{eq}}{Z'_{eq1}} \approx \frac{C_{10}}{C_{K0} + C_{10}}; \frac{Z_{eq}}{Z_{eq1}} \approx \frac{-Z}{Z_K + Z_{f1}}$$

可知 $\Delta I_{1B} = \Delta I_{1C}$, $\Delta I_{1A} \approx \Delta I_{1B}$ 。

分析可知故障路径上相电流变化量特征:2个非故障相的相电流变化量近似相等,同时小于故障

相的相电流变化量;非故障路径上相电流变化量特征:2个非故障相的相电流变化量近似相等,同时也与故障相的相电流变化量近似相等。因此,可以根据上述相电流变化量的2种不同特征进行故障定位。

2 基于三相电流幅值分析的小电流单相接地故障定位实现

根据故障发生后故障和非故障路径上各相相电流变化量的差异原理设计而成的用于小电流接地系统单相接地故障定位方法,其具体实现流程如图7所示。

在时域中,对重要电气量的判定、选取及计算定义如下:

1)相电流突变判定 ($\Delta t = 1 \text{ ms}$)。

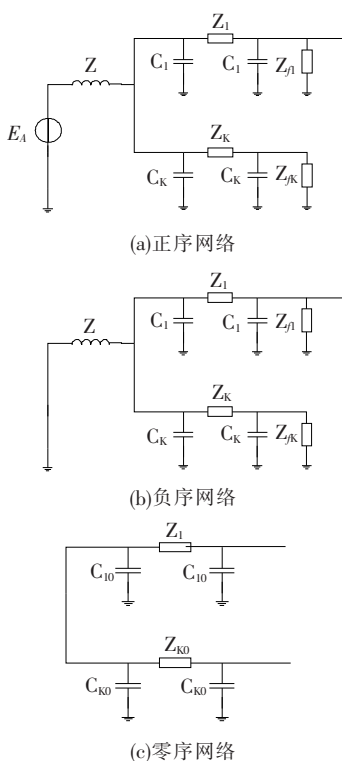


图6 序网等值电路
Figure 6 Equivalent circuit diagram of sequence network

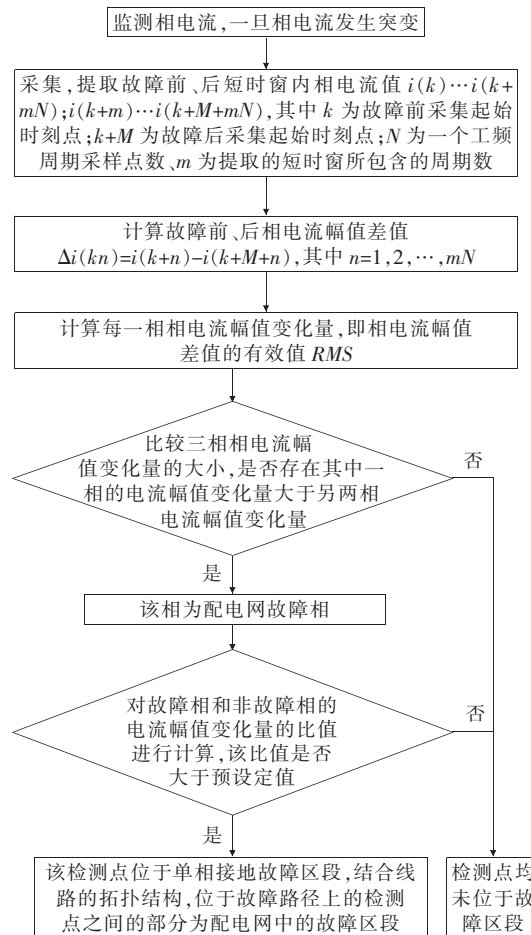


图7 单相接地故障区段定位流程
Figure 7 Flow chart of the single-phase-to-ground fault section location

当 $\frac{\Delta i}{\Delta t} > 1$ 时,判定为相电流发生突变;当 $\frac{\Delta i}{\Delta t} < 1$ 时,判定为相电流未发生突变,返回步骤 1 继续监测相电流的状态。

2) 相电流采集。

当判定某检测点处相电流发生突变时,则提取该检测点处故障发生时刻前、后设定短时窗内的每一相的电流,故障前的相电流表示为 $i(k+n)$,故障后的相电流表示为 $i(k+M+n)$,其中, k 表示故障发生前电流采集的起始时刻点, $k+M$ 表示故障发生后电流采集的起始时刻点, M/N 为整数,使采样点对应的电流相位同步,其中 N 表示一个工频周期的采样点数, $n=1,2,\dots,mN$ 表示自起始时刻点 k 之后的各采样时刻点, m 表示为设定短时窗所包含的周期数,一般情况下 $m=2$ 即可满足实验数据采集的要求。

3) 相电流变化量计算分析。

对提取到的故障发生前、后短时窗内的每一相电流进行幅值差值计算,故障前、后相电流幅值差值计算表达式为

$$\Delta i(k_n) = i(k+n) - i(k+M+n) \quad (14)$$

进一步计算故障前、后每一相电流幅值变化量,即相电流幅值差值 $\Delta i(k_n)$ 的有效值 RMS ,故障前、后相电流幅值变化量计算表达式为

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^{mN} \Delta i(k_n)^2}{mN}} \quad (15)$$

在实际实现过程中,通过电流互感器实时监测配电网各检测点处三相电流,当配电网发生单相接地故障后,提取故障发生时刻前、后设定短时窗内的三相电流,对故障前、后各相的相电流进行幅值分析。通过故障前、后采集起始时刻相位相同的相电流,实现电流相量幅值的差值运算,然后计算各相相电流的幅值变化量。在某检测点若存在其中一相的电流幅值变化量大于另外两相的电流幅值变化量,则判定该相为配电网中的接地故障相;若存在故障相的电流幅值变化量与非故障相的电流幅值变化量之比大于一个预设值时,则判定该检测点位于故障路径上。根据对配电网各检测点的判定结果,结合线路的拓扑结构,位于故障路径上的检测点之间的部分为配电网中的故障区段,即实现配电网中单相接地故障的定位。

3 仿真实验验证

根据故障发生后故障和非故障路径各相相电流变化量差异设计的故障定位设计方案,利用电力电路仿真模拟软件 ATPDraw,同时结合数学分析软件 MATLAB 进行仿真实验验证。选取小电流接地系统中性点常见的接地形式,即不接地和经消弧线圈接地方式,将故障时刻设定在 0.1 s 处,故障前采集的起始时刻为 0,故障后的采集起始时刻为 0.2 s,每个周期采样点数为 2 000,共采集 2 个周波,故 $k=0, k+M=20\ 000, N=2\ 000, m=2$ 。

3.1 中性点不接地的小电流单相故障接地系统

中性点不接地的小电流单相接地故障系统模型如图 8 所示,通过设定相应的参数值,利用电力电路仿真模拟软件 ATPDraw,可得到故障时刻的故障和非故障区段三相电流瞬时的变化曲线,如图 9 所示。由仿真结果可知,无论是位于故障还是非故障区段的检测点,其故障相的电流方向瞬时均与非故障相反相,使基于线路三相的暂态电流方向的分析方法无法对故障进行正确的定位。

故障时刻的故障及非故障区段三相电流变化曲线如图 10 所示,以 CT IV1、CT I1 检测点为例,利用 MATLAB 绘制出故障前、后相电流幅值差值曲线,如图 11 所示,可以发现故障相的电流幅值差值明显大于非故障相的电流幅值差值。

进一步计算故障前、后相电流幅值变化量,即相电流幅值差值 $\Delta i(k_n)$ 的有效值 RMS ,将 2 个检测

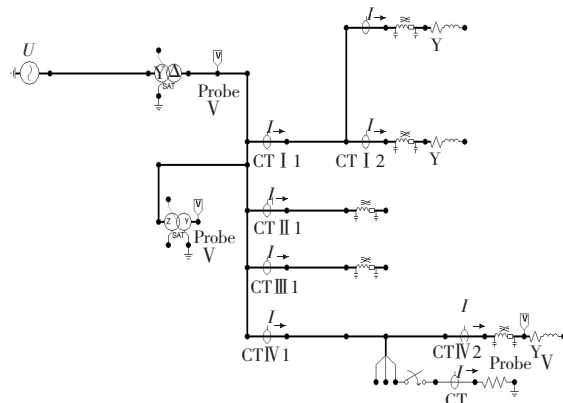


图 8 中性点不接地的系统模型

Figure 8 Neutral point ungrounded system model

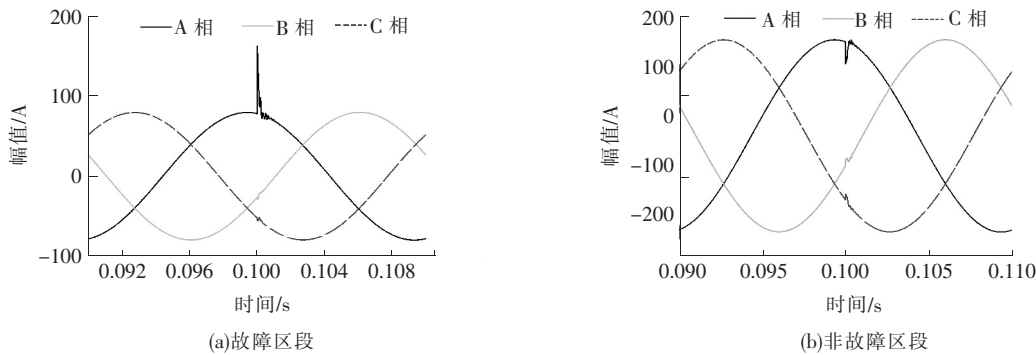


图9 中性点不接地系统故障前、后三相电流瞬时变化曲线

Figure 9 Three-phase fault current transient change curve before and after fault in neutral point ungrounded system

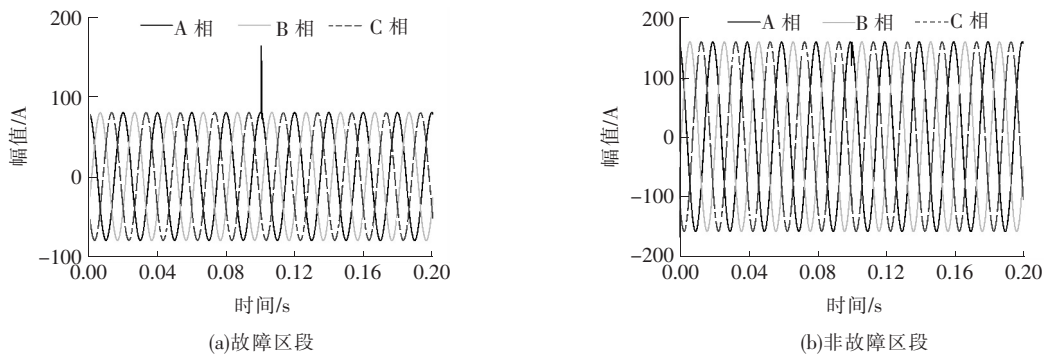


图10 中性点不接地系统故障前、后三相电流变化曲线

Figure 10 Three-phase fault current change curve before and after fault in neutral point ungrounded system

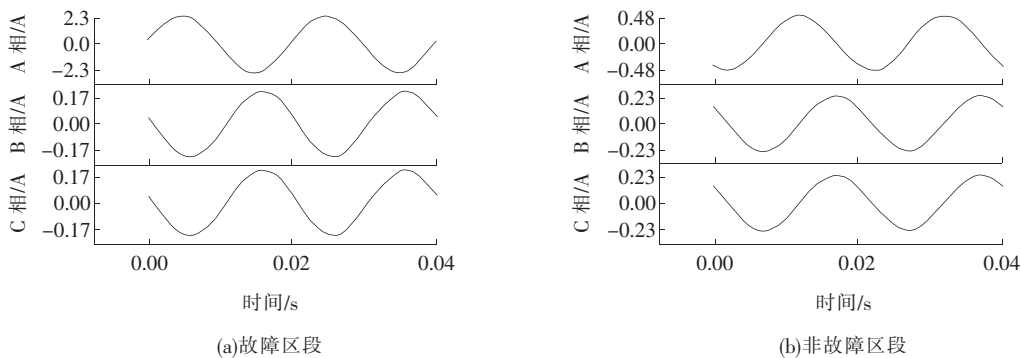


图11 中性点不接地系统故障前、后三相电流幅值差值曲线

Figure 11 Three-phase current amplitude difference curve before and after fault in neutral point ungrounded system

点故障前、后的相电流幅值变化量计算结果列于表1中,可知2个检测点的A相电流幅值变化量大于B、C两相电流幅值变化量,故A相为此配电网的单相接地故障相。

根据线路的拓扑结构,约定故障与非故障相电流幅值变化量之比的设定值为5。在其他优选实例中,预设值可以取6、7、8、9或10等这些取值范围内的数值。该实例的计算结果见表1,观察表中数据,可知CT IV1的三相电流故障前、后的相电流幅

值变化量之比大于设定值,该检测点位于故障路径上;CT I1的三相电流故障前、后的相电流幅值变化量之比小于设定值,该检测点不位于故障路径上。对其他检测点进行同样的计算,可以判断出检测点CT IV2位于故障路径上,而其他检测点均未位于故障路径上。结合线路的拓扑结构,可知该中性点不接地的小电流接地系统的故障区段位于CT IV1、CT IV2之间,证明了基于三相电流幅值分析的配电网故障定位方法的准确性。

表 1 中性点不接地系统相电流幅值变化量及变比

Table 1 Phase current amplitude variation and ratio in ungrounded neutral system

相位	相电流的幅值变化量及变比	
	CT IV1	CT II
A	5.202 263	0.651 202
B	0.272 914	0.427 369
C	0.272 914	0.427 794
A/B	19.06	1.52
A/C	19.06	1.52

3.2 中性点经消弧线圈接地的小电流单相故障接地系统

中性点经消弧线圈接地的小电流单相接地故障系统模型见图 3。设定相应的参数值,通过电力电路仿真模拟软件 ATPDraw,可得到故障时刻的故障与非故障区段三相电流瞬时变化曲线,如图 12 所示。由仿真结果可知,对于非故障区段,其故障相的电流方向瞬时变化并不是很明显,使基于线路三相暂态电

流方向的分析方法无法对故障区段进行准确定位。

以 CT IV1、CT II 为例,利用 MATLAB 绘制出故障前、后相电流幅值差值曲线,如图 13 所示;故障和非故障区段故障前、后三相电流幅值差值变化曲线如图 14 所示,可以发现故障相的电流幅值差值明显大于非故障相的电流幅值差值。

进一步计算故障前、后相电流幅值变化量,即相电流幅值差值 $\Delta i(k_n)$ 的有效值 RMS。故障前、后的相电流幅值变化量计算结果列于表 2 中,可知 CT IV1 的 A 相电流幅值变化量大于 B、C 两相电流幅值变化量,故 A 相可能为此配电网的单相接地故障相,对于 CT II 不存在唯一的相电流幅值变化量最大值,因此,判断该检测点未位于故障区段。

根据线路的拓扑结构,约定故障和非故障相电流幅值变化量之比的设定值为 2.5。该实例的计算结果见表 2,观察表中数据,可知 CT IV1 的三相电流故障前、后的相电流幅值变化量之比大于设定值,

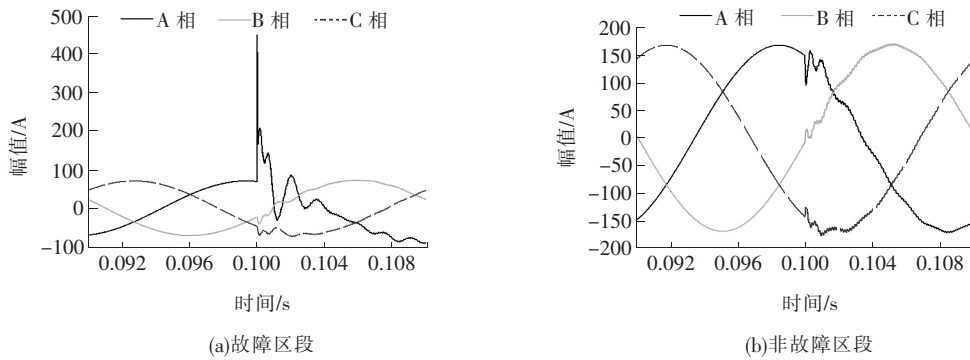


图 12 中性点经消弧线圈接地系统故障前、后三相电流瞬时变化曲线

Figure 12 Three-phase current transient change curve before and after fault in neutral point grounding system via arc suppression coil

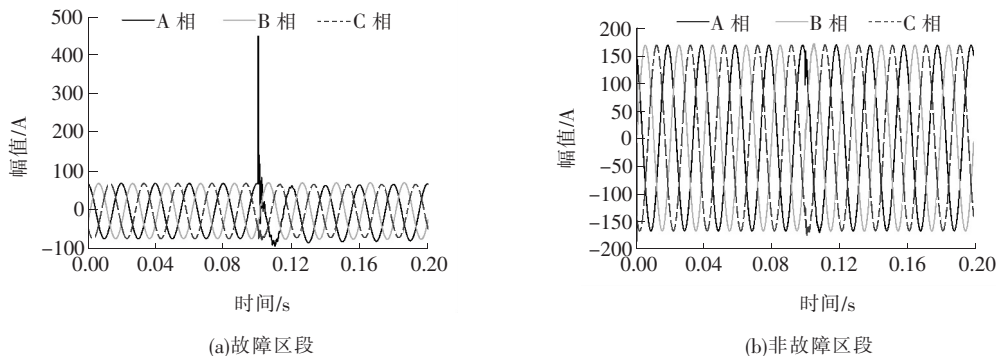


图 13 中性点经消弧线圈接地系统故障前、后三相电流变化曲线

Figure 13 Three-phase current change curve before and after fault in neutral point grounding system via arc suppression coil

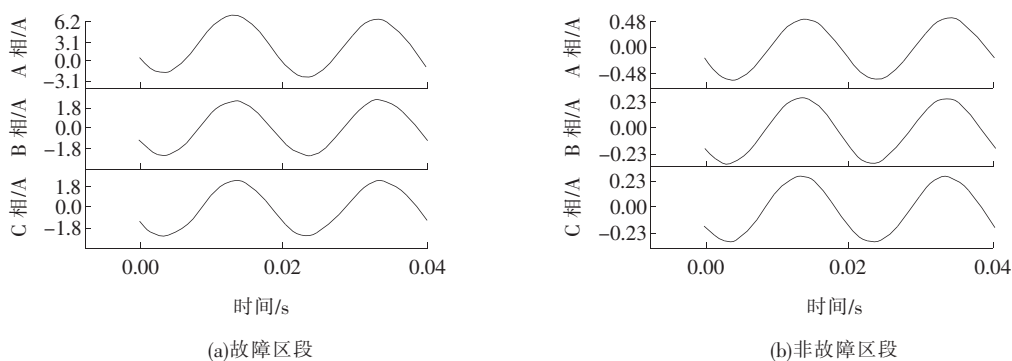


图 14 中性点经消弧线圈接地系统故障前、后三相电流幅值差值变化曲线

Figure 14 Three-phase current amplitude difference curve before and after fault in neutral point grounding system via arc suppression coil

表 2 经消弧线圈接地系统相电流幅值变化量及变比

Table 2 Phase current amplitude variation and ratio in neutral point grounding system via arc suppression coil

相位	相电流的幅值变化量及变比	
	CT IV1	CT II
A	4.922	1.519
B	1.627	1.648
C	1.627	1.648
A/B	2.990	0.920
A/C	2.990	0.920

该检测点位于故障路径上。对其他检测点进行同样的计算,可以判断出 CT IV2 位于故障路径上,而其他检测点均未位于故障路径上。结合线路的拓扑结构可知,该经消弧线圈接地的小电流接地系统的故障区段位于 CT IV1、CT IV2 之间,证明了基于三相电流幅值分析的配电网故障定位方法的准确性。

4 结语

1) 适合安装故障指示器的小电流接地系统进行故障定位。只需要通过安装在三相线路上的故障指示器实时采集相电流,不需要掌握计算零序电流等信号的特征。

2) 就地定位。不需要将采集到的数据传送到数据主站,可以很好地避免传统信号定位因对时等问题带来的误差。只需要通过对就地采集的电流量进行计算,从而实现配电网单相接地故障的定位。

3) 可以更好地适用于中性点不接地及中性点经消弧线圈接地的小电流接地系统,能够实现故障的可靠区段定位,在工程上具有很高的推广价值。

参考文献:

- [1] 彭涛,郭贤朝,吴江一,等. MMC-HVDC 系统阀区单相接地故障定位研究[J]. 电力系统保护与控制,2020,48(9):143-149.
PENG Tao, GUO Xianchao, WU Jiangyi, et al. Research on location of single-phase grounding fault in valve side of MMC-HVDC system[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(9): 143-149.
- [2] 张豪,詹红霞,张曦,等. 基于多端故障电流匹配的配电网故障定位方法[J]. 智慧电力,2020,48(4):97-103.
ZHANG Hao, ZHAN Hongxia, ZHANG Xi, et al. Distribution network fault location method based on multi-terminal fault current matching[J]. Smart Power, 2020, 48(4): 97-103.
- [3] 郭壮志,陈涛,徐其兴,等. 配电网故障区段定位的互补松弛约束新模型与算法[J]. 电力自动化设备,2020,40(5):129-137.
GUO Zhuangzhi, CHEN Tao, XU Qixing, et al. Novel fault section location model for distribution network with complementary relaxation constraints and its algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(5): 129-137.
- [4] 余斌,尹项根,朱维钧,等. 复合接地消弧方式接地故障分析及保护对策[J]. 中国电力,2018,51(12):72-79.

- YU Bin, YIN Xianggen, ZHU Weijun, et al. Grounding fault analysis and protection scheme study for composite grounding arc-suppression mode[J]. *Electric Power*, 2018, 51(12): 72-79.
- [5] 李振兴, 吴李群, 谭洪, 等. 基于简单通信的双端行波测距新方法[J]. *中国电力*, 2018, 51(3): 74-79.
- LI Zhenxing, WU Liqun, TAN Hong, et al. A novel method for double terminal traveling wave fault location based on simple communication[J]. *Electric Power*, 2018, 51(12): 72-79.
- [6] 张媛媛, 朱永利. 基于行波固有频率的多分支输电线路故障定位[J]. *电力科学与技术学报*, 2016, 31(3): 65-72.
- ZHANG Yuanyuan, ZHU Yongli. A fault location method for multi-terminal transmission lines based on traveling wave natural frequencies[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2016, 31(3): 65-72.
- [7] 郑楚韬, 孔祥轩, 关家华, 等. 小波多尺度信息综合的行波波头检测算法研究[J]. *智慧电力*, 2019, 47(5): 97-102.
- ZHENG Chutao, KONG Xiangxuan, GUAN Jiahua, et al. Traveling wave head detection algorithm based on wavelet multi-scale information fusion[J]. *Smart Power*, 2019, 47(5): 97-102.
- [8] 张卫明, 黄智达, 孟祥红, 等. 分布式配电网故障行波定位方法[J]. *电力科学与技术学报*, 2016, 31(1): 25-33.
- ZHANG Weiming, HUANG Zhida, MENG Xianghong, et al. A fault location method for distributed power distribution networks based on traveling wave[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2016, 31(1): 25-33.
- [9] 宗伟林, 邹运, 戴经纬, 等. 基于相电流增量的故障区间定位新方法[J]. *电力科学与技术学报*, 2020, 35(2): 128-134.
- ZONG Weilin, ZOU Yun, DAI Jingwei, et al. Novel method of fault section location based on phase current increment[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2020, 35(2): 128-134.
- [10] 吕哲, 王增平. 基于暂态波形特征的输电线路雷击干扰与故障识别方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(6): 18-26.
- LV Zhe, WANG Zengping. Identification of lightning strike disturbance and faults for transmission line based on transient waveform characteristics[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(6): 18-26.
- [11] 彭道刚, 宋磊, 赵斌斌, 等. 智能配电网故障定位系统设计与研究[J]. *自动化仪表*, 2016, 37(8): 16-20.
- PENG Daogang, SONG Lei, ZHAO Binbin, et al. Design and research of intelligent fault location system for distribution network[J]. *Process Automation Instrumentation*, 2016, 37(8): 16-20.