

DOI: 10.14044/j.1674-1757.pcrpc.2024.06.011

基于 FTU 的新型配电网单相接地故障研究

刘红政^{1,2}, 左毅¹, 王伦¹, 熊平²

(1. 国网大悟县供电公司, 湖北 孝感 432800; 2. 国网湖北省电力公司电力科学研究院, 武汉 430015)

摘要: 新型配电网的 10 kV 线路装有大量的智能开关(FTU), 当线路发生单相接地故障后, FTU 可以快速监测零序电压电流电气量。分析故障线路、故障区段的零序电压电流的相位关系, 与非故障线路和区段零序电压电流相位进行比较, 可以快速选线和区段定位。本文针对两侧均含有 FTU 的故障区段进行零序网络分析, 列写节点电压方程, 可得出故障距离与两端零序电压电流的解析公式, 该公式求出来的故障距离不受接地电阻影响, 计算的故障距离较为准确。通过仿真分析, 验证了新型配电网下利用零序电压电流进行单相接地故障选线、定位、测距的有效性, 最后给出新型配电网单相接地故障处置流程图, 可为实际单相接地故障提供参考。

关键词: 新型配电网; FTU; 单相接地故障; 零序网络; 故障定位测距; 零序电压电流

Research on Single Phase Ground Fault of New Distribution Network Based on FTU

LIU Hongzheng^{1,2}, ZUO Yi¹, WANG Lun¹, XIONG Ping¹

(1. State Grid Dawu County Power Supply Company, Hubei Xiaogan 432800, China;

2. State Grid Hubei Electric Power Research Institute, Wuhan 430015, China)

Abstract: The 10 kV line of new distribution network is equipped with a large number of intelligent switches (FTU). The FTU, in case of a single-phase ground fault on the line, can quickly monitor the zero-sequence voltage and current electrical volume. The phase relationship of zero sequence voltage and current of faulty line and section is analyzed and compared with that of non fault line and section, which can quickly select line and section positioning. In this paper, zero-sequence network analysis for faulty sections containing FTUs on both sides is made, the node voltage equation is written so that the analytical formula of the fault distance and the zero-sequence voltage current on both ends can be obtained. The fault distance obtained by the formula is free from the influence of ground resistance and the calculated fault distance is more accurate. Through simulation and analysis, the effectiveness of single-phase grounding fault line selection, location and distance measurement by using zero - sequence voltage current under the new type of distribution network is verified. Finally, the handling flow chart of single phase ground fault of new type of distribution network is given, which can provide reference for actual single-phase grounding faults.

Keywords: new distribution network; FTU; single-phase ground fault; zero-sequence network; fault location and ranging; zero-sequence voltage and current

0 引言

县域配电网电压等级低, 35 kV/10 kV 变压器一般采用中性点不接地的 Y/Δ 接线方式, 10 kV/0.4 kV 变压器一般采用 Δ/Y11 接线方式^[1-3]。发生单相接地故障时, 10 kV 母线能够检测到零序电压, 但无法检测到零序电流, 导致故障后的选线困难。传统选线方式是

依次试拉线路, 当 10 kV 母线零序电压消失, 证明是该故障线路^[4-6]。理论的选线方式一般采用 5 次谐波法、零序功率法、暂态电流法等, 这些方法均能选出故障线路, 但需要投入新设备, 与简单明了试拉方式相比, 流程复杂, 选线计算时间较长, 无法应用到实际现场。

县域配电网的单相接地故障占比较高, 一般会有 70%, 部分地区甚至会达到 80%^[7-8]。单相接地故

收稿日期: 2024-05-13

基金项目: 国家电网公司科技项目 (5400-202122573A-0-5-SF)。

障的发生形式一般是耐张杆跳线与金属横担或是水泥杆短接接触、避雷器引下线短接、耐张线夹接触不良等高阻接地,不同接地点接地电阻不同,故障较为隐蔽、不易寻找^[9]。传统配电网对单相接地故障定位测距的研究,文献[10–13]是从零序阻抗入手,利用复杂的算法分析高频故障信息,分析高频故障特征,寻找故障位置与电气量之间的线性关系,进行故障区段定位。该方法要考虑接地电阻的影响,接地电阻的不同,可能会影响故障定位测距的准确性。文献[14]是采用行波法进行故障测距,行波法测距需要高精度测量设备和精准的时钟对时,投资较大,无法投入实际应用。

随着配电网的发展,新型配电网离我们越来越近。为了实现新型配电网的可测可遥可控可调,配电网将会安装大量的智能开关(FTU),智能开关可实现电气量的实时观测和录波。某县域电网,110条线路,智能开关将达到650台,平均一条线路有6台智能开关。当发生单相接地故障时,可以利用FTU检测到的零序电压电流相位信息进行选线和区段定位。传统配电网单相接地故障所面临的故障选线和区段定位测距难题将迎刃而解^[15–17]。本文充分利用新型配电网的特点,利用两端FTU检测的零序电压电流信息进行单相接地故障选线定位和故障距离计算,此方法不依赖复杂的算法和精准的设备,不计接地电阻的影响,可快速准确测量故障位置,可以减小故障查找时间,能推广到实际应用。

1 新型配电网单相接地故障选线研究

1.1 新型配电网单相接地故障选线机理分析

中性点不接地系统发生单相接地故障时,故障相电压降为0,非故障相电压升高为相电压的 $\sqrt{3}$ 倍,三相相电压关系见图1。

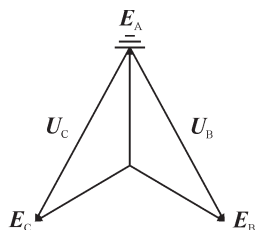


图1 单相接地故障相电压变化示意图
Fig. 1 Schematic diagram of phase voltage variation of single phase ground fault

三相相电压和零序电压的关系为

$$\begin{aligned} U_A &= 0 \\ U_B &= E_B - E_A = \sqrt{3} E_A e^{-j150^\circ} \\ U_C &= E_C - E_A = \sqrt{3} E_A e^{j150^\circ} \\ 3U_0 &= U_A + U_B + U_C \end{aligned} \quad (1)$$

单相接地故障后,零序电流通过线路对地电容形成回路,零序电流流向见图2^[16–17]。

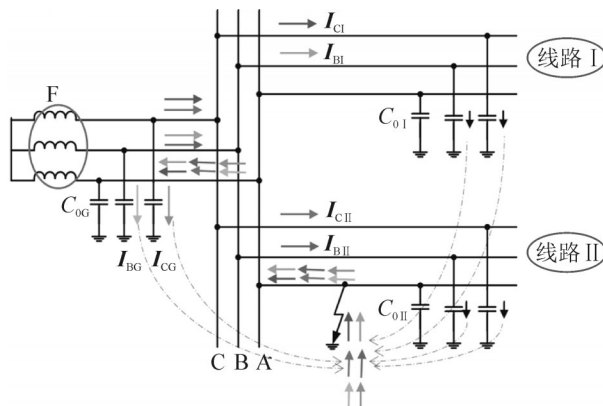


图2 单相接地故障零序电流流向示意图
Fig. 2 Flow schematic diagram of zero sequence current of single phase ground fault

故障线路和非故障线路零序电压电流的关系为

$$\begin{aligned} 3I_{0i} &= I_{Ai} + I_{Bi} + I_{Ci} = j(U_A + U_B + U_C)\omega C_{0i} = j3U_0\omega C_{0i} \\ 3I_{0G} &= I_{AG} + I_{BG} + I_{CG} = j(U_A + U_B + U_C)\omega C_{0G} = j3U_0\omega C_{0G} \\ 3I_{0ii} &= I_{Aii} + I_{Bii} + I_{Cii} = -(3I_{0i} + 3I_{0G}) = -j3U_0\omega(C_{0\Sigma} - C_{0ii}) \end{aligned} \quad (2)$$

由公式(2)可知,当发生单相接地故障时,非故障线路首端零序电流超前零序电压 90° ,故障线路首端零序电流滞后零序电压 90° 。通过此特征,借助线路首端智能开关FTU检测零序电压电流相位关系,可迅速选出故障线路。

1.2 仿真分析

在Matlab/Simulink里搭建的简单配电网模型见图3,母线电压等级为10.5 kV,有3条相同的出线,长度为12 km,线路单位零序参数为零序电阻 $r_0=0.413 \Omega/\text{km}$,零序电感 $l_0=4.14\times 10^{-3} \Omega/\text{km}$,零序电容 $c_0=5.01\times 10^{-9} \Omega/\text{km}$ ^[18],35 kV/10 kV变压器采用Y/ Δ 接线,设置仿真时间为2 s,线路2距离6 km处发生故障,故障时间为1.2 s,故障相为A相。

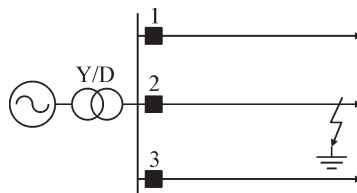


图3 简单配电网模型
Fig. 3 Simple distribution network model

通过仿真分析,当发生单相接地故障后,故障相、非故障相零序电压电流相位见图4。

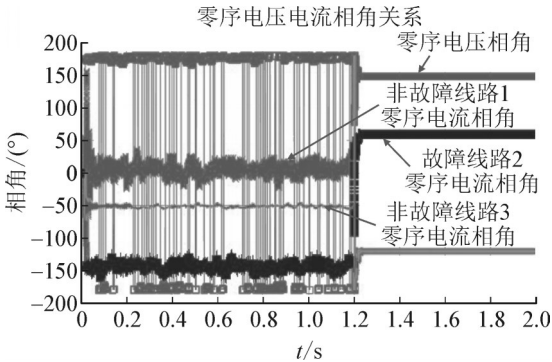


图4 故障相、非故障相零序电压电流相位
Fig. 4 Zero sequence voltage and current phase of fault and non-fault phase

线路2发生故障,线路首端FTU检测的零序电压相角为 150° ,线路2零序电流相角为 60° ,线路1、3零序电流相角相同,为 -120° 。相角关系在坐标系中表示见图5。

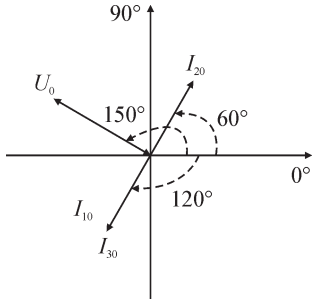


图5 零序电压电流相角关系示意图
Fig. 5 Schematic diagram of zero-sequence voltage-current phase angle relationship

由仿真可知,故障线路首端零序电压超前零序电流 90° ,非故障线路首端零序电流超前零序电压 90° ,据此,提出故障选线判据公式为

$$\sin(\angle\alpha_{u0}-\angle\alpha_{Fi0})=1\pm\varepsilon \tag{3}$$

式中: ε 为误差,取 $0.01^{[19-20]}$; $\angle\alpha_{u0}$ 为零序电压相角; $\angle\alpha_{Fi0}$ 为故障相零序电流相角。

当实际配电网检测到有零序电压后,通过线路首端FTU测量零序电流相位,当零序电压电流相角满足式(3),即可判别为故障线路,根据故障判据,很容易选出故障线路^[21-22]。

2 新型配电网单相接地故障定位研究

2.1 新型配电网单相接地故障定位机理分析

通过线路首端智能开关FTU检测零序电压电流相位关系,正确选择故障线路后,若可对故障区段进行定位,这样就可以进一步减小寻找故障时间。由上节零序电压电流相位关系可知,故障线路零序电流由故障点流向母线,非故障线路由母线流向线路。当配电线路发生单相接地故障,零序电流

流向示意图见图6。

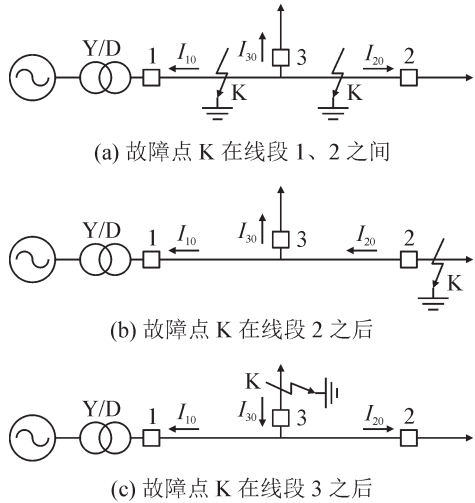


图6 线路故障后零序电流向示意图
Fig. 6 Flow schematic diagram of zero sequence current after line fault

当故障点K在线段1、2之间,流过1的零序电流滞后零序电压 90° ,流过2、3的零序电流超前零序电压 90° ;当故障点K在2之后,流过1、2的零序电流滞后零序电压 90° ,流过3的零序电流超前零序电压 90° ;当故障点K在3之后,流过1、3的零序电流滞后零序电压 90° ,流过2的零序电流超前零序电压 90° 。据此,提出故障区段判据公式为

$$\sin(\angle\alpha_{u0}-\angle\alpha_{Fi0})=1\pm\varepsilon \tag{4}$$

式中: ε 为误差,取 0.01 ; α_{u0} 为零序电压相角; $\angle\alpha_{Fi0}$ 为故障相零序电流相角。

2.2 仿真分析

在Matlab/Simulink里搭建图6所示的单条配电线路模型,母线电压等级为10.5 kV,线路单位零序参数参考上一节仿真数据,变压器采用Y/Δ接线,设置仿真时间为2 s,故障时间为1.2 s,故障相为A相。根据仿真结果,可得判据结果见表1。

表1 配电线路单相接地仿真结果
Table 1 Simulation result of single-phase grounding of distribution line

故障区段	$\sin(\angle\alpha_{u0}-\angle\alpha_{i10})$	$\sin(\angle\alpha_{u0}-\angle\alpha_{i20})$	$\sin(\angle\alpha_{u0}-\angle\alpha_{i30})$
1-2之间	1	-1	-1
2之后	-1	1	-1
3之后	-1	-1	1

由仿真结果可知,当零序电压电流相位差的正弦三角函数为1时,故障在此FTU之后,通过比较不同位置的FTU零序电压电流相位差的正弦三角函数值,可准确定位故障区段。

3 新型配电网单相接地故障测距研究

新型配电网10 kV线路一般由两种典型线段组成,见图7(方框代表FTU)。

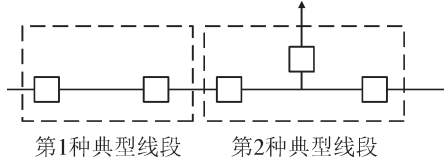


图7 新型配电网10kV线路典型线段
Fig. 7 Typical line segment of 10kV line for new distribution networks

第1种典型线段两端有智能开关(含FTU),第2种典型线段有分支线路,分支线路上有一个智能开关,两端也有智能开关。分支馈线线路较短,发生单相接地故障查找故障较为容易,时间也会相对较短,分支馈线线路所带用户较少,故障时智能开关可直接跳开,对10kV线路其他线段影响较小。发生单相接地故障时,主要是主干线的故障不易查找,主干线路较长,单相接地故障较为隐秘,若可以对较长的主干线进行故障测距,将可大大缩减查找故障时间。

3.1 新型配电网单相接地故障测距机理分析

由前两节分析可知,利用FTU测得的零序电压电流相角关系可快速进行故障选线和故障区段定位,也可以利用零序电压电流幅值相角进行故障测距。

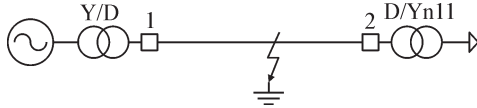


图8 典型线段1单相接地故障示意图
Fig. 8 Schematic diagram of single phase ground fault of typical line segment 1

$$x = \frac{(U_{Q0} - U_{P0})}{j\omega c_0(j\omega l_0 + r_0)} \left((I_{Q0} - I_{P0} - U_{P0}j\omega c_0 L)(j\omega l_0 + r_0) \pm \sqrt{(j\omega l_0 + r_0) \left((-I_{Q0} + I_{P0} + U_{P0}j\omega c_0 L)^2 (j\omega l_0 + r_0) - 2(U_{Q0} - U_{P0})j\omega c_0 \left(U_{Q0} - I_{P0}L(j\omega l_0 + r_0) - \frac{1}{2}U_{P0}(2 + j\omega c_0 L^2(j\omega l_0 + r_0)) \right) \right)} \right) \right) \quad (11)$$

式中: r_0 、 l_0 、 c_0 为线路零序电阻、电感和电容; L 为线段长度; x 为故障距离; U_{Q0} 、 I_{Q0} 为线段首端零序电压电流; U_{P0} 、 I_{P0} 为线段末端零序电压电流; Z 为零序阻抗。当故障在区段里时,所解出来的 x 必然有一解满足: $0 < x < L$, 另外一解可舍弃。由式(11)可知,利用故障区段两段的零序电流电压即可求出故障区段距离。

对于典型线段2在1-2发生故障时示意图见图10。典型线段2零序网络见图11。

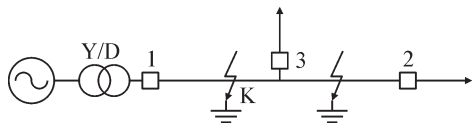


图10 典型线段2单相接地故障零序网络示意图
Fig. 10 Zero sequence network schematic diagram of single phase ground fault of typical line segment 2

当线段1-2发生故障时,简单10kV线路单相接地故障零序网络见图9。

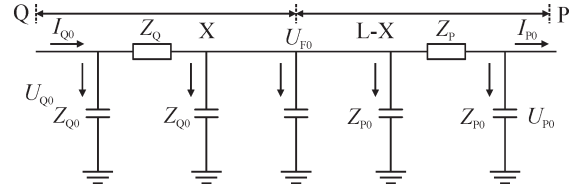


图9 典型线段1单相接地故障零序网络示意图
Fig. 9 Zero sequence network schematic diagram of single phase ground fault of typical line segment 1

根据零序网络,列写节点电压方程为

$$\left(\frac{1}{Z_Q} + \frac{1}{Z_{Q0}} \right) U_{Q0} - \frac{U_{F0}}{Z_Q} = I_{Q0} \quad (5)$$

$$\frac{U_{F0}}{Z_P} - \left(\frac{1}{Z_P} + \frac{1}{Z_{P0}} \right) U_{P0} = I_{P0} \quad (6)$$

其中:

$$Z_{Q0} = \frac{1}{j\omega c_0 \frac{x}{2}} \quad (7)$$

$$Z_{P0} = \frac{1}{j\omega c_0 \left(\frac{L-x}{2} \right)} \quad (8)$$

$$Z_Q = (r_0 + j\omega l_0)x \quad (9)$$

$$Z_P = (r_0 + j\omega l_0)(L-x) \quad (10)$$

将公式(7)-(10)代入公式(5)-(6)中,将公式(5)-(6)联立求解,可得:

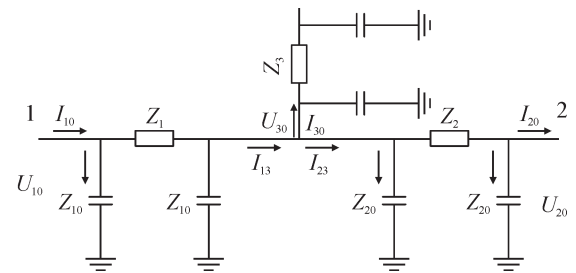


图11 新型配电网单相接地故障处置流程图
Fig. 11 Flowchart of single phase ground fault handling of new distribution network

当故障发生在线段1-3之间,对于3点的零序电压是FTU₃检测到的零序电压,零序电流 I_{13} 公式为

$$I_{13} = \frac{U_{30}}{Z_{20}} + \frac{U_{20}}{Z_{20}} + I_{20} + I_{30} \quad (12)$$

当故障发生在线段 2-3 之间,对于 3 点的零序电压是 FTU3 检测到的零序电压,零序电流 I_{23} 公式为

$$I_{23}=I_{10}-I_{30}-\frac{U_{10}}{Z_{10}}-\frac{U_{30}}{Z_{10}} \tag{13}$$

将公式(12)-(13)代入公式(5)-(6)中,即可求解故障距离。

3.2 新型配电网单相接地故障测距仿真分析

1)在 Matlab/Simulink 里搭建如图 8 所示的简单配电线路模型,母线电压等级为 10.5 kV,长度为 12 km,线路单位零序参数为零序电阻 $r_0=0.413 \Omega/\text{km}$,零序电感 $l_0=4.14\times10^{-3} \Omega/\text{km}$,零序电容 $c_0=5.01\times10^{-9} \Omega/\text{km}$,35 kV/10 kV 变压器采用 Y/Δ接线,设置仿真时间为 2 s,故障时间为 1.2 s,故障相为 A 相。考虑不同接地电阻的影响,通过仿真测得故障距离

结果见表 2。接地电阻 R_f 单位为 Ω ,线路长度单位为 km,相角单位为度($^\circ$)。

2)在 Matlab/Simulink 里搭建如图 9 所示的简单配电线路模型,线路参数和上述仿真一致。设置故障区段为 1-2,(在 1-3 之间,距 1 有 2 km),其中 1-3 之间有 5 km,2-3 之间有 3 km,接地电阻为 1 000 Ω ,仿真结果如表 3 所示,根据公式计算 $I_{13}=0.205\ 15\angle145.18^\circ$ 。

设置故障区段为 1-2,(在 2-3 之间,距 3 有 2 km),其中 1-3 之间有 5 km,2-3 之间有 3 km,接地电阻为 1 000 Ω ,仿真数据如表 4 所示,根据公式计算 $I_{23}=0.192\ 467\angle-34.975\ 7^\circ$ 。

由以上仿真可知,所求得的故障测距公式不受接地电阻影响,测距精度均达到 99% 以上,验证了公式(11)的准确性。

表 2 典型线段 1 单相接地仿真结果
Table 2 Simulation result of single phase ground of typical line segment 1

R_f	1	U_{Q0}	I_{Q0}	U_{P0}	I_{P0}	x
100	3	8 680.41	0.001 366	8 681.53	0.041 0	2.98
		$\angle59.843\ 1$	$\angle-30.156\ 9$	$\angle59.840\ 8^\circ$	$\angle149.841^\circ$	
1 000	3	8 658.6	0.001 136	8 659.72	0.041 0	2.97
		$\angle56.172\ 5$	$\angle-33.827\ 5$	$\angle56.170\ 2^\circ$	$\angle146.17^\circ$	
1 000	8	8 595.97	0.001 353	8 595.74	0.041 06	8.03
		$\angle55.816\ 4$	$\angle-34.183\ 6$	$\angle55.816\ 9^\circ$	$\angle145.817^\circ$	
5 000	8	8 116.88	0.001 278	8 116.67	0.038 33	7.99
		$\angle40.270\ 2$	$\angle-49.729\ 8$	$\angle40.270\ 7^\circ$	$\angle130.271^\circ$	

表 3 典型线段 2 单相接地仿真结果(区段 1-3)
Table 3 Simulation result of single phase ground of typical line segment 2(zones1-3)

U_{10}	I_{10}	U_{20}	I_{20}	U_{30}	I_{30}
8 690.76	0.001 367 9	8 691.84	0.041 0	8 691.6	0.123 13
$\angle55.183\ 9$	$\angle-34.816$	$\angle55.182$	$\angle145.182$	$\angle55.182$	$\angle145.181$
U_{Q0}	I_{Q0}	U_{P0}	I_{P0}	x	—
U_{10}	I_{10}	U_{30}	I_{13}	2.01	—

表 4 典型线段 2 单相接地仿真结果(区段 2-3)
Table 4 Simulation result of single phase ground of typical line segment 2 (zones 2-3)

U_{10}	I_{10}	U_{20}	I_{20}	U_{30}	I_{30}
8 673.93	0.001 37	8 673.22	0.041 0	8 673.7	0.122 876
$\angle55.025$	$\angle-34.974$	$\angle55.026$	$\angle145.026$	$\angle55.025$	$\angle145.024$
U_{Q0}	I_{Q0}	U_{P0}	I_{P0}	x	—
U_{30}	I_{23}	U_{20}	I_{20}	2.004	—

4 新型配电网单相接地故障处置流程图

通过上文分析可知,新型配电网利用 FTU 检测

到的零序电压电流信息可完成单相接地故障的选线、定区段和故障测距,可大大缩短故障处置时间。单相接地故障处置流程见图 12。

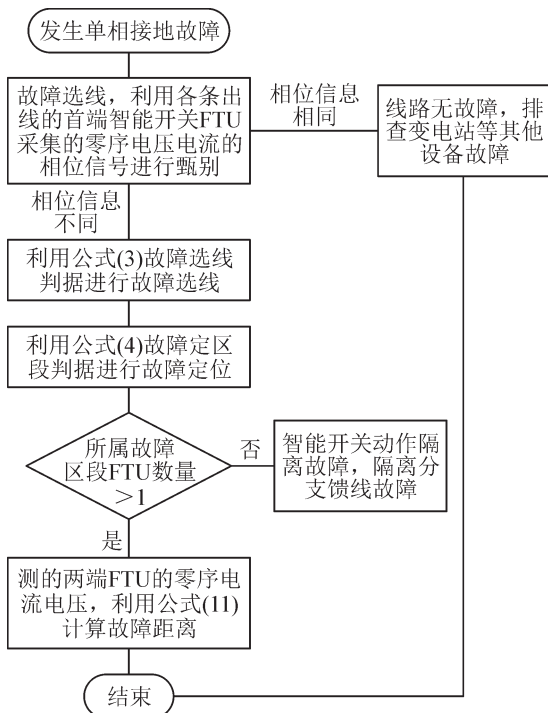


图12 新型配电网单相接地故障处置流程图

Fig. 11 New distribution network single-phase ground fault disposal flowchart

5 结语

传统配电网单相接地故障后的选线、定区段和故障测距较为困难,考虑新型配电网的网架特点,利用智能开关检测的零序电压电流电气量信息可较为简单快速得进行选线、定区段和故障测距。以零序电压电流为切入口,分析故障选线、定区段机理,利用两端零序电压电流推导出故障测距公式。通过 Matlab/Simulink 仿真分析,得出故障选线判据、定区段判据的正确性;在考虑接地电阻的影响下,故障测距精度均在 99%以上,验证所推导公式的准确性。最后,提出新型配电网单相接地故障处置流程图,可为实际单相接地故障提供参考。

参考文献

- [1] 陈燕擎,刘涛,韩文建,等. 考虑配电网分布式零序电流关系的单相接地故障定位[J]. 电力系统保护与控制, 2020,48(22):118-126.
CHEN Yanqing, LIU Tao, HAN Wenjian, et al. Single-phase-to-earth fault location in distribution networks considering the distributed relations of the zero-sequence currents[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48 (22):118-126.
- [2] 欧阳剑,白浩,杨海军,等. 基于功率因数角双端测量的配电网单相接地故障检测新方法[J/OL]. 南方电网技术, 1-9[2024-05-06].
- [3] 王瑞梅,丛伟,王泽乾,等. 基于工作电压相位比较的智

能配电网故障判断方法[J]. 供用电, 2023,40(6):26-33.

WANG Ruimei, CONG Wei, WANG Zeqian, et al. Fault judgment method of smart distribution network based on phase comparison of working voltage[J]. Distribution & Utilization, 2023,40(6):26-33.

- [4] 张明泽,栾文鹏,艾欣,等. 基于低压侧负序量特征的小电流系统单相接地故障检测方法[J]. 电网技术, 2024,48 (4):1654-1662.

ZHANG Mingze, LUAN Wenpeng, AI Xin, et al. Single-phase grounding fault detection in non-solidly earthed network based on negative sequence characteristics of Low-voltage Side[J]. Power System Technology, 2024, 48 (4): 1654-1662.

- [5] 黄亚峰,贾宝华,王浩天,等. 构建基于零序电流差异化指标的灵活接地系统单相接地故障选线方法[J]. 电气应用, 2023,42(9):91-100.

HUANG Yafeng, JIA Baohua, WANG Haotian, et al. Single-phase to ground fault line selection method based on zero sequence current differentiation index in flexible grounding system[J]. Electrotechnical Application, 2023, 42 (9): 91-100.

- [6] 许守东,潘馨钰,李世伟,等. 基于光伏自适应注入量的配电网单相接地故障保护方法[J]. 电网与清洁能源, 2023,39(9):140-150.

XU Shoudong, PAN Xinyu, LI Shiwei, et al. A single phase grounding fault protection method for distribution networks based on photovoltaic adaptive injection amount[J]. Advances of Power System & Hydroelectric Engineering, 2023,39(9):140-150.

- [7] 李卫彬,童欣,黄超,等. 基于分层定位模型的含DG配电网故障定位方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022,50 (24):160-166.

LI Weibin, TONG Xin, HUANG Chao, et al. A fault location method for a distribution network with DG based on a hierarchical location model[J]. Power System Protection and Control, 2022,50(24):160-166.

- [8] 李政洋,曹一家,陈春,等. 配电网相电压不对称动态变化下的高阻接地故障辨识[J/OL]. 中国电机工程学报, 1-13[2024-05-06].

LI Zhengyang, CAO Yijia, CHEN Chun, et al. Identification of high-impedance ground faults under dynamic variations of voltage unbalance in distribution networks[J/OL]. Proceedings of the CSEE, 1-13[2024-05-06].

- [9] 尹一卓,王军,宁鑫,等. 植被含水率对导线触树单相接地故障特性的影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(9):119-127.

YIN Yizhuo, WANG Jun, NING Xin, et al. Effect analysis of vegetation moisture content on a tree-contact single-phase-to-ground fault[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(9):119-127.

- trol, 2023, 51(9): 119-127.
- [10] 黄飞, 陈纪宇, 戴健, 等. 基于特征暂态零模电流偏态系数的有源配电网单相故障定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(20): 12-21.
- HUANG Fei, CHEN Jiyu, DAI Jian, et al. Single-phase fault location method for an active distribution network based on the skewness coefficient of characteristic transient zero-mode current[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(20): 12-21.
- [11] 李党, 白浩, 霍建彬, 等. 基于零序导纳的小电阻接地系统馈线高阻接地故障保护方法[J]. 南方电网技术, 2023, 17(7): 95-102.
- LI Dang, BAI Hao, HUO Jianbin, et al. High-resistance ground fault protection method based on zero-sequence admittance in low-resistance ground systems[J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(7): 95-102.
- [12] 张明泽, 梁文鹏, 艾欣, 等. 基于低压量测的小电流系统单相接地故障检测方法[J]. 电网技术, 2023, 47(8): 3457-3466.
- ZHANG Mingze, LUAN Wenpeng, AI Xin, et al. Single-phase grounding fault detection in non-solidly earthed network based on low-voltage measurements[J]. Power System Technology, 2023, 47(8): 3457-3466.
- [13] 齐郑, 黄朝晖, 陈艳波. 基于零序分量的阻抗法配电网故障定位技术[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(6): 54-62.
- QI Zheng, HUANG Chaohui, CHEN Yanbo. Impedance fault location technology for a distribution network based on a zero-sequence component[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(6): 54-62.
- [14] 王晨清, 陈实, 齐贝贝, 等. 基于波形相关性的直流配电网主动式接地故障选线[J]. 电力工程技术, 2023, 42(3): 1-10.
- WANG Chenqing, CHEN Shi, QI Beibei, et al. An active grounding fault line selection method for DC distribution network based on waveform correlation[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2023, 42(3): 1-10.
- [15] 唐海国, 张帝, 刘成英, 等. 计及拓扑变换的主动配电网故障风险智能预警[J]. 电力工程技术, 2022, 41(5): 193-201.
- TANG Haiguo, ZHANG Di, LIU Chengying, et al. Intelligent forecast of fault risk in active distribution networks considering network reconfiguration[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2022, 41(5): 193-201.
- [16] 贾清泉, 郑旭然, 刘楚, 等. 基于故障方向测度的配电网故障区段定位方法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(20): 5933-5941.
- JIA Qingquan, ZHENG Xuran, LIU Chu, et al. A method of fault section location in distribution networks based on fault direction measures[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(20): 5933-5941.
- [17] 刘健, 常小强, 张志华, 等. 基于零序电压的小电流接地系统高阻单相接地检测启动性能分析及其应用[J]. 供用电, 2023, 40(9): 27-35.
- LIU Jian, CHANG Xiaoqiang, ZHANG Zhihua, et al. Analysis and applications of startup performance based on zero-sequence-voltage for single phase grounding fault detection of small current grounding systems[J]. Distribution & Utilization, 2023, 40(9): 27-35.
- [18] 李君, 何敏, 黄守道, 等. 基于相暂态功率方向的有源配电网接地故障区段定位算法[J]. 高电压技术, 2023, 49(8): 3205-3214.
- LI Jun, HE Min, HUANG Shoudao, et al. Ground fault section positioning algorithm of active distribution network based on phase transient power direction[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(8): 3205-3214.
- [19] 王晓卫, 岳阳, 郭亮, 等. 注入电流分布特性辨识的配电网故障选线方法[J]. 中国电力, 1-12[2024-05-06].
- [20] 刘丰, 曾祥君, 谢李为, 等. 基于相电压差值极性的配电网单相接地故障检测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(15): 155-165.
- LIU Feng, ZENG Xiangjun, XIE Liwei, et al. Single-phase grounding fault detection method for a distribution network based on phase voltage difference polarity value[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(15): 155-165.
- [21] 周放歌, 肖仕武. 基于零序电流分布的有源配电网接地故障定位[J]. 电网技术, 2022, 46(5): 1820-1829.
- ZHOU Fangge, XIAO Shiwu. Grounding fault location of active distribution network based on zero sequence current distribution[J]. Power System Technology, 2022, 46(5): 1820-1829.
- [22] 洪翠, 吴奕炜, 高伟, 等. 基于GrapSAGE算法的配电网故障定位方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(11): 236-245.
- HONG Cui, WU Yiwei, GAO Wei, et al. Fault location method in distribution network based on GrapSAGE algorithm[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37(11): 236-245.

作者简介:

刘红政(1993—)男, 工程师, 主要从事新型电力系统运行控制工作。

左毅(1984—)男, 高级工程师, 主要从事配电网运行与协调控制工作。

王伦(1988—), 男, 高级工程师, 主要从事配电网精益化生产与运行工作。

熊平(1984—), 男, 高级工程师, 主要从事新型电力系统运行与柔性直流输电协调控制工作。