

不接地系统单相断线故障分析及区段定位

张林利¹, 曹丽丽², 李立生¹, 薛永端², 田野³, 冯光⁴

(1. 国网山东省电力公司电力科学研究院, 山东 济南 250003; 2. 中国石油大学(华东)信息与控制工程学院, 山东 青岛 266580; 3. 国网山东省电力公司东营供电公司, 山东 东营 257091; 4. 国网河南省电力公司电力科学研究院, 河南 郑州 450052)

摘要: 由于绝缘导线的应用, 配电线路断线故障发生概率增大, 现场缺乏有效的检测技术措施。针对不接地系统, 建立了单相断线不接地故障模型。在考虑断线位置、故障线路对地电容占系统总对地电容的比例和负载阻抗的大小及其分布等因素的影响下, 分析了中性点偏移电压、断口前后相电压以及线电压的变化规律。根据相电压和线电压的变化规律分别提出单相断线不接地故障区段定位的方法。所提方法可利用配电网自动化平台或者故障指示器系统实现, 提高了断线故障区段定位的可靠性和适应性。最后用 Matlab 仿真验证了方法的正确性。

关键词: 不接地系统; 单相断线; 电压分析; 区段定位

Analysis and fault section location of single-phase open fault for ungrounding system

ZHANG Linli¹, CAO Lili², LI Lisheng¹, XUE Yongduan², TIAN Ye³, FENG Guang⁴

(1. State Grid Shandong Electric Power Research Institute, Jinan 250003, China; 2. College of Information and Control Engineering, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China; 3. State Grid Dongying Power Supply Company, Dongying 257091, China; 4. Electric Power Research Institute of State Grid Henan Electric Power Company, Zhengzhou 450052, China)

Abstract: Due to the application of insulated wire, the occurrence probability of line break faults in distribution lines increases. There are no effective method to detect line break fault on site. In this paper, based on ungrounding system, a model of single-phase line break fault without grounding is established. Line break location, the ratio of the fault line grounding capacitance to system grounding capacitance, load impedance magnitude and distribution factors are taken into consideration. Variation characteristics of offset voltage at neutral point, line voltage and phase voltage of the line break point are analyzed. According to the variation characteristics of line voltage and phase voltage, this paper proposes fault section location methods respectively to detect single-phase line break fault without grounding. This proposed method can be realized through distribution automation platform or malfunction indicator system, which improves the reliability and applicability of line break fault section location. In the end, this method is verified by Matlab simulation.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51477184).

Key words: ungrounding system; single-phase open fault; voltage analysis; fault section location

0 引言

在配电网中, 断线故障已成为常见的故障之一。尤其是在绝缘导线应用之后, 由于电弧不能随意移动, 外皮不能及时散热, 导致线路温度过高而被烧断, 使断线故障发生的概率加大。如果断线后线路

下垂, 容易发生人畜触电事故。

目前配电网短路故障检测技术^[1-2]已相对成熟, 接地故障研究^[3-5]是近年的热点, 并且已取得较大进展。配电网断线类型可分为断口悬空, 断口前接地以及断口后接地三种情况^[6]。对于单相断线并接地故障已有较多分析^[7-13], 但对于单相断线不接地故障分析与区段定位的方法较少^[14-17]。文献[14]提出了基于负荷监测仪的单相断线故障区域判定方法, 通过划定发生单相断线故障的可能区域和不可能区域, 并将两个区域作差集运算, 从而得出最小断线

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51477184); 国网山东省电力公司科技项目资助(2016A-09); 国家电网公司科技项目资助(52170217000S)

区域。该方法依赖于负荷监测仪的广泛布局，且利用负序电压进行单相断线故障检测，需要采集三相电压，但考虑到安全性原则，PT 一次侧一般不允许接地，不易获取三相电压。文献[15]通过计算节点电流的不同，并根据节点电流为零的可能性来判断断线故障发生位置。该方法需要遍历拓扑结构，计算量大，运算时间长。文献[16]通过分析配电网单相断线故障时负序电流的一般变化规律，提出了基于能量测度的断线故障选线方法。该方法能够辨识断线不接地故障，但不能进行故障区段定位，且利用负序电流判断受负荷分布不平衡影响较大。文献[17]基于配用电信息系统数据和关联规则算法，提出一种诊断分支线断线的方法，该方法受网络结构的影响较大，一旦网络结构发生变化需要重新积累历史数据，挖掘新的规则，计算量大。

本文建立了不接地系统的单相断线不接地故障分析模型，主要考虑断线位置、故障线路对地电容占系统总对地电容的比例和负载阻抗的大小及其分布情况等因素，分析了不接地系统发生单相断线故障且断口悬空时，断口前后相电压、线电压等电气量的特征，并提出了分别利用各相电压和线电压的变化规律进行故障区段定位的方法，最后仿真验证了理论分析与定位方法的正确性。

1 不接地系统单相断线不接地故障分析模型

不接地系统单相断线不接地故障接线图(本文以 A 相断线为例)如图 1 所示。

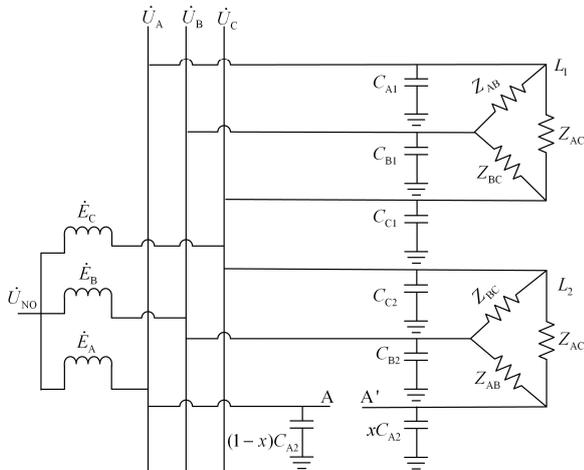


图 1 不接地系统单相断线不接地故障接线图

Fig. 1 Diagram of single-phase ungrounded open fault of ungrounded system

图中： \dot{U}_{NO} 表示中性点偏移电压； \dot{E}_A 、 \dot{E}_B 、 \dot{E}_C 为系统三相电动势； L_1 代表所有非故障线路的等效

电路， L_2 代表故障线路； C_{A1} 、 C_{B1} 、 C_{C1} 分别为所有非故障线路各相总对地电容； C_{A2} 、 C_{B2} 、 C_{C2} 分别为故障线路各相总对地电容； x 表示断口后故障相对地电容占故障线路故障相对地电容的比例，可以反映断线位置； A 、 A' 为断口两侧节点； Z_{AC} 、 Z_{BC} 、 Z_{AB} 分别为三相负载阻抗；线路阻抗与线路对地容抗相比小得多，可忽略。

2 不接地系统单相断线不接地故障分析

2.1 中性点偏移电压的分析

不接地系统发生单相断线不接地故障时，破坏了对称性，引起地电位 O 发生偏移。设故障线路 L_2 对地电容占系统总对地电容的 $\frac{1}{k}$ ；结合图 1，根据基尔霍夫电流定律，可推导出中性点偏移电压公式(本文以 \dot{U}_{AN} 的相位为基准相位，后面不再赘述)为

$$\dot{U}_{NO} = \frac{\sqrt{3}x|\dot{U}_{AN}|}{3k} \sqrt{1 - \frac{Z_{AB}Z_{AC}}{(Z_{AB} + Z_{AC})^2}} \angle \theta \quad (1)$$

$$\angle \theta = \arctan \left[\frac{\sqrt{3}(Z_{AC} - Z_{AB})}{3(Z_{AB} + Z_{AC})} \right] \quad (2)$$

由式(1)、式(2)可以看出，中性点偏移电压的幅值与 $\frac{x}{k}$ 、 $\frac{Z_{AB}Z_{AC}}{(Z_{AB} + Z_{AC})^2}$ 有关；相位与 $\frac{Z_{AB} + Z_{AC}}{Z_{AC} - Z_{AB}}$ 有关，即中性点偏移电压的变化与断线位置、故障线路对地电容占系统总对地电容的比例以及负载阻抗的大小与分布有关，几种特殊情况如下：

$$\dot{U}_{NO} = \begin{cases} \frac{\sqrt{3}x|\dot{U}_{AN}|}{3k} \angle 30^\circ, |Z_{AB}| \ll |Z_{AC}| \\ \frac{x|\dot{U}_{AN}|}{2k} \angle 0^\circ, |Z_{AB}| = |Z_{AC}| \\ \frac{\sqrt{3}x|\dot{U}_{AN}|}{3k} \angle -30^\circ, |Z_{AB}| \gg |Z_{AC}| \end{cases} \quad (3)$$

根据式(1)一式(3)绘出中性点偏移电压的相量图如图 2，其中 N 点为中性点，阴影部分为地电位的偏移范围。

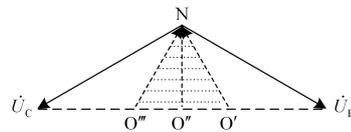


图 2 中性点偏移电压变化范围

Fig. 2 Scope of neutral point offset voltage

根据图 2 分析中性点偏移电压的变化规律如下所述。

1) 当 $|Z_{AB}|=|Z_{AC}|$ 时, 随着 $\frac{x}{k}$ 从0到1, 地电位O从N移动到O", 中性点偏移电压的幅值从0增大到 $\frac{1}{2}|\dot{U}_{AN}|$, 相位始终为 0° 。

2) 当 $|Z_{AB}| \neq |Z_{AC}|$ 时

$|Z_{AB}| < |Z_{AC}|$ 时, 地电位在 $\Delta NO''O'$ 移动, 阻抗值一定时, 中性点偏移电压的幅值大小与 $\frac{x}{k}$ 成正比; $\frac{x}{k}$ 的值一定时, 中性点偏移电压的幅值随 $|Z_{AB}|$ 的增大而减小, 相位随 $|Z_{AB}|$ 的增大而减小。此种情况下, 中性点偏移电压幅值变化范围为 $0 \sim \frac{\sqrt{3}}{3}|\dot{U}_{AN}|$, 相位变化范围为 $0^\circ \sim 30^\circ$ 。特殊情况下, 当 $|Z_{AB}| \ll |Z_{AC}|$ 时, 地电位沿NO'移动, 随着 $\frac{x}{k}$ 从0到1, 地电位O从N移动到O', 则中性点偏移电压的幅值从0增大到 $\frac{\sqrt{3}}{3}|\dot{U}_{AN}|$, 相位始终为 30° ;

$|Z_{AB}| > |Z_{AC}|$ 时, 地电位在 $\Delta NO''O'''$ 移动, 阻抗值一定时, 中性点偏移电压的幅值大小与 $\frac{x}{k}$ 成正比; $\frac{x}{k}$ 的值一定时, 中性点偏移电压的幅值随 $|Z_{AC}|$ 的增大而减小, 相位随 $|Z_{AC}|$ 的增大而增大。此种情况下, 幅值变化范围为 $0 \sim \frac{\sqrt{3}}{3}|\dot{U}_{AN}|$, 相位变化范围为 $-30^\circ \sim 0^\circ$ 。特殊情况下, 当 $|Z_{AB}| \gg |Z_{AC}|$ 时, 地电位沿NO'''移动, 随着 $\frac{x}{k}$ 从0到1, 地电位O从N移动到O''', 中性点偏移电压的幅值从0增大到 $\frac{\sqrt{3}}{3}|\dot{U}_{AN}|$, 相位始终为 -30° 。

2.2 断口前后各相电压的分析

不接地系统发生单相断线不接地故障时, 根据基尔霍夫电流定律, 可以推导出断口后方A'处相电压公式为

$$\dot{U}_{A'} = \frac{Z_{AB}\dot{U}_C + Z_{AC}\dot{U}_B}{Z_{AB} + Z_{AC} + j\omega Z_{AB}Z_{AC}x C_{A2}} \quad (4)$$

由于 $\omega Z_{AB}Z_{AC}x C_{A2} \ll (Z_{AB} + Z_{AC})$, $j\omega Z_{AB}Z_{AC}x C_{A2}$ 可忽略不计, 则

$$\dot{U}_{A'} = \frac{Z_{AB}\dot{U}_C + Z_{AC}\dot{U}_B}{Z_{AB} + Z_{AC}} \quad (5)$$

由式(5)推得断口后A'处相电压的变化范围与负载阻抗的大小和分布情况有关, 几种特殊情况如下:

$$\dot{U}_{A'} = \begin{cases} \dot{U}_B, & |Z_{AB}| \ll |Z_{AC}| \\ \frac{\dot{U}_C + \dot{U}_B}{2}, & |Z_{AB}| = |Z_{AC}| \\ \dot{U}_C, & |Z_{AB}| \gg |Z_{AC}| \end{cases} \quad (6)$$

令 $Z = Z_{AB} + Z_{AC}$, 代入式(5)可得

$$\dot{U}_{A'B} = \frac{Z_{AB}}{Z} \dot{U}_{CB} \quad (7)$$

由式(7)可知, 在电压相量图中, 断口后方A'点处相电压 $\dot{U}_{A'}$ 始终位于 \dot{U}_B 与 \dot{U}_C 之间的线段上, 根据负载阻抗的大小和分布情况移动; 继而绘出断口前后各相电压相量图, 如图3所示。

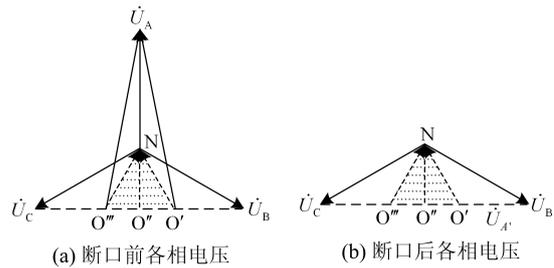


图3 断口两侧相电压相量图

Fig. 3 Voltage phasors of supply and load side

地电位的偏移引起各相对地电压发生偏移, 根据地电位的偏移范围, 结合图3分析各相对地电压的偏移范围。

1) 当 $|Z_{AB}|=|Z_{AC}|$ 时, 随着 $\frac{x}{k}$ 从0到1, 断口后方A'点处对地电压的幅值随中性点偏移电压的增大而减小, 幅值变化范围为 $\frac{1}{2}|\dot{U}_{AN}| \sim 0$, 相位始终为 -180° ; 断口前方A相对地电压幅值随中性点偏移电压的增大而增大, 幅值变化范围为 $|\dot{U}_{AN}| \sim \frac{3}{2}|\dot{U}_{AN}|$, 相位始终为 0° 。断口前后非故障相B相与C相对地电压幅值始终相等且变化范围均为 $|\dot{U}_{AN}| \sim \frac{\sqrt{3}}{2}|\dot{U}_{AN}|$, 相位变化范围分别为 $-120^\circ \sim -90^\circ$ 、 $-240^\circ \sim -270^\circ$ 。

2) 当 $|Z_{AB}| \neq |Z_{AC}|$ 时

$|Z_{AB}| < |Z_{AC}|$ 时, 断口后方A'点处对地电压幅值变化范围为 $0 \sim |\dot{U}_{AN}|$, 相位变化为 $-180^\circ \sim -90^\circ$; 断口前方A相对地电压幅值变化范围为

$|\dot{U}_{AN}| \sim \sqrt{\frac{7}{3}}|\dot{U}_{AN}|$ ，相位变化范围为 $0^\circ \sim 10.9^\circ$ 。断口前后非故障相 B 相对地电压幅值变化范围均为 $\frac{\sqrt{3}}{3}|\dot{U}_{AN}| \sim |\dot{U}_{AN}|$ ，相位变化范围为 $-120^\circ \sim -90^\circ$ 。断口前后非故障相 C 相对地电压幅值变化范围均为 $|\dot{U}_{AN}| \sim \frac{2\sqrt{3}}{3}|\dot{U}_{AN}|$ ，相位变化范围为 $-270^\circ \sim -240^\circ$ 。

特殊情况下，当 $|Z_{AB}| \ll |Z_{AC}|$ 时，随着 $\frac{x}{k}$ 从 0 到 1，断口后方 A' 点处对地电压的幅值随中性点偏移电压的增大而减小，幅值变化范围为 $|\dot{U}_{AN}| \sim \frac{\sqrt{3}}{3}|\dot{U}_{AN}|$ ，相位变化范围为 $-120^\circ \sim -90^\circ$ ；断口前 A 相对地电压幅值随中性点偏移电压的增大而增大，幅值变化范围为 $|\dot{U}_{AN}| \sim \sqrt{\frac{7}{3}}|\dot{U}_{AN}|$ ，相位变化范围为 $0^\circ \sim 10.9^\circ$ 。断口前后非故障相 B 相对地电压均与断口后方 A' 点处对地电压变化特征完全相同。断口前后非故障相 C 相对地电压的幅值随中性点偏移电压的增大而增大，幅值变化范围为 $|\dot{U}_{AN}| \sim \frac{2\sqrt{3}}{3}|\dot{U}_{AN}|$ ，相位变化范围为 $-240^\circ \sim -270^\circ$ 。

$|Z_{AB}| > |Z_{AC}|$ 时，断口后方 A' 点处对地电压幅值变化范围为 $0 \sim |\dot{U}_{AN}|$ ，相位变化为 $-270^\circ \sim -180^\circ$ ；断口前方 A 相对地电压幅值变化范围均为 $|\dot{U}_{AN}| \sim \sqrt{\frac{7}{3}}|\dot{U}_{AN}|$ ，相位变化范围为 $-10.9^\circ \sim 0^\circ$ 。断口前后非故障相 B 相对地电压幅值变化范围均为 $|\dot{U}_{AN}| \sim \frac{2\sqrt{3}}{3}|\dot{U}_{AN}|$ ，相位变化为 $-120^\circ \sim -90^\circ$ 。断口前后非故障相 C 相对地电压幅值变化范围均为 $\frac{\sqrt{3}}{3}|\dot{U}_{AN}| \sim |\dot{U}_{AN}|$ ，相位变化为 $-270^\circ \sim -240^\circ$ 。特殊情况下，当 $|Z_{AB}| \gg |Z_{AC}|$ 时，随着 $\frac{x}{k}$ 从 0 到 1，断口后方 A' 点处对地电压的幅值随中性点偏移电压的增大而减小，幅值变化范围为 $|\dot{U}_{AN}| \sim \frac{\sqrt{3}}{3}|\dot{U}_{AN}|$ ，相位变化范围为 $-240^\circ \sim -270^\circ$ ；断口前方 A 相对地电压幅值随中性点偏移电压的增大而增大，幅值变化范围为 $|\dot{U}_{AN}| \sim \sqrt{\frac{7}{3}}|\dot{U}_{AN}|$ ，相位变化范围为 $0^\circ \sim -10.9^\circ$ 。断口前后非故障相 C 相对地电压均与断口后方 A' 点处对地电压变化特征完全相同。断口

前后非故障相 B 相对地电压的幅值随中性点偏移电压的增大而增大，幅值变化范围为 $|\dot{U}_{AN}| \sim \frac{2\sqrt{3}}{3}|\dot{U}_{AN}|$ ，相位变化范围为 $-120^\circ \sim -90^\circ$ 。

综上所述，不接地系统发生断线不接地故障后，断口前方各相电压特点：故障相电压幅值大于等于两非故障相电压，相位变化范围为 $-10.9^\circ \sim 10.9^\circ$ ，且与其中一非故障相电压相位的夹角大于等于 90° 。断口后方各相电压特点：故障相电压幅值小于两非故障相电压或等于其中一非故障相电压，相位位于两非故障相电压相位之间，且与其中一非故障相电压相位的夹角小于等于 90° ；断口前后两非故障相电压幅值与相位几乎没有差别，可见断口前后故障相电压变化明显。

2.3 线电压的分析

不接地系统单相断线不接地故障发生后，断口下方线电压也将发生偏移，结合图 3(b)分析线电压的变化规律。

以中性点作为参考节点，则各相对地电压公式为

$$\begin{cases} \dot{U}_{AO} = \dot{U}_{AN} + \dot{U}_{NO} \\ \dot{U}_{BO} = \dot{U}_{BN} + \dot{U}_{NO} \\ \dot{U}_{CO} = \dot{U}_{CN} + \dot{U}_{NO} \end{cases} \quad (8)$$

继而推导出各线电压的公式为

$$\begin{cases} \dot{U}_{AB} = \sqrt{3}|\dot{U}_{AN}| \frac{Z_{AB}}{Z_{AB} + Z_{AC}} \angle 90^\circ \\ \dot{U}_{BC} = \sqrt{3}|\dot{U}_{AN}| \angle -90^\circ \\ \dot{U}_{CA'} = \sqrt{3}|\dot{U}_{AN}| \frac{Z_{AC}}{Z_{AB} + Z_{AC}} \angle 90^\circ \end{cases} \quad (9)$$

几种特殊情况：

- 1) 当 $|Z_{AB}| \ll |Z_{AC}|$ 时， $\dot{U}_{AB} = 0 \angle 90^\circ$ ， $\dot{U}_{BC} = \sqrt{3}|\dot{U}_{AN}| \angle -90^\circ$ ， $\dot{U}_{CA'} = \sqrt{3}|\dot{U}_{AN}| \angle 90^\circ$ ；
- 2) 当 $|Z_{AB}| \gg |Z_{AC}|$ 时， $\dot{U}_{CA'} = 0 \angle 90^\circ$ ， $\dot{U}_{BC} = \sqrt{3}|\dot{U}_{AN}| \angle -90^\circ$ ， $\dot{U}_{AB} = \sqrt{3}|\dot{U}_{AN}| \angle 90^\circ$ ；
- 3) 当 $|Z_{AB}| = |Z_{AC}|$ 时， $\dot{U}_{CA'} = \frac{\sqrt{3}}{2}|\dot{U}_{AN}| \angle 90^\circ$ ， $\dot{U}_{AB} = \frac{\sqrt{3}}{2}|\dot{U}_{AN}| \angle 90^\circ$ ， $\dot{U}_{BC} = \sqrt{3}|\dot{U}_{AN}| \angle -90^\circ$ 。

综上可得，不接地系统发生单相断线不接地故障，断口前方线电压的幅值和相位与故障前线电压相比几乎没有发生变化；断口后方故障相分别与两个非故障相间的线电压幅值之和总是等于两非故障相之间的线电压，且这两个线电压的相位与两非故障相之间的线电压相位相反(各线电压分别定义为

$$\dot{U}_{AB}、\dot{U}_{BC}、\dot{U}_{CA})。$$

3 单相断线不接地故障区段定位方法

3.1 单相断线不接地故障区段定位判据

故障区段定位判据如下所述。

1) 利用相电压: 从母线开始, 首个满足“存在某一相的相电压幅值小于等于其他两相相电压, 相位位于其他两相电压之间, 且与其中一相电压相位的夹角小于等于 90° ”的检测点与距离最近的不满足该条件的检测点之间的区段为故障区段。

2) 利用线电压: 从母线开始, 首个满足“两线电压幅值之和等于第三线电压且相位与第三线电压相位相反或相同”的检测点与距离最近的不满足该条件的检测点之间的区段为故障区段。

3.2 单相断线不接地故障区段定位的实现流程

按照本文算法实现不接地系统单相断线不接地故障区段定位的系统, 应由主站、通信系统和馈线终端组成。馈线终端可以是配电自动化(FTU)或故障指示器(FI), 记录所在检测点相/线电压的幅值与相位数据。

故障的定位流程如下:

1) 故障线路各馈线终端采集相电压/线电压的幅值与相位信息, 并将数据信息上报主站。

2) 主站接收终端数据, 综合分析各检测点电压信息。从上报相电压/线电压信息的检测点所在线路的母线处开始, 将满足判据(两个判据中的任意一个即可)的首个检测点的上游区段判定为故障区段。

3) 若所有检测点所测数据均不满足任意一个判据, 则最末检测点的下游区段为故障区段。

3.3 性能分析

利用负序电流判断断线故障发生位置的方法, 受负荷分布不平衡的影响较大; 利用负序电压进行故障定位的方法, 需要获取三相电压, 但考虑到安全性原则, PT 一次侧一般不允许接地, 不易获取三相电压。本文所提利用线/相电压的幅值与相位关系进行故障区段定位的算法, 利用配电自动化(FTU)或者故障指示器(FI)采集线/相电压信息由主站综合分析各检测点线/相电压信息, 上报主站后, 判断故障的发生并确定故障区段。

同时, 本文所提定位方法是利用已有的配电网自动化系统平台或者故障指示器系统, 不需要配置新设备, 仅在主站添加一个软件模块即可实现, 投资成本低, 具有很好的适用性。

不接地系统发生单相接地故障时, 故障点上下游故障特征完全相同: 故障相电压降低, 故障超前相电压增大, 而故障滞后相电压在低阻接地时升高,

高阻接地时降低; 线电压故障前后基本没有发生变化。而单相断线不接地故障发生时, 断口前后故障特征存在明显区别, 故本文所提故障区段定位方法可以区分单相断线故障与单相接地故障。

4 仿真实验验证

4.1 仿真模型

利用仿真软件 Matlab/Simulink 搭建 10 kV 不接地系统单相断线不接地故障仿真模型, 如图 4 所示。配电系统为 110 kV/10 kV 变电站, 变压器的额定容量为 40 000 kVA, 原边电压 110 kV, 副边电压 10.5 kV。本文仿真模型的线路参数采用文献[18]提供的架空线路标准参数: 线路正序阻抗为 $Z_1 = (0.17 + j0.38) \Omega/\text{km}$, 正序对地导纳为 $b_1 = (j3.045) \mu\text{s}/\text{km}$; 零序阻抗为 $Z_0 = (0.23 + j1.72) \Omega/\text{km}$, 零序对地导纳为 $b_0 = (j1.884) \mu\text{s}/\text{km}$ 。本文负荷采用三角形连接, 各条线路等效负荷阻抗统一采用 $Z_l = 400 \Omega$ 。为便于理解, 本文以线路上安置 4 个检测点为例, 进行仿真分析。故障线路通过 4 个检测点 $Q_1 \sim Q_4$ 被分为 4 个区段, Q_1 检测点距离母线 1 km, Q_2 检测点距离母线 3 km, Q_3 检测点距离母线 7 km, Q_4 检测点距离母线 9 km。设 F 点为故障点, 故障点分别位于故障线路的起始(距母线距离为本线路长度 15%)、中间(距母线距离为本线路长度的 50%)和末端(距母线距离为本线路长度的 85%)。

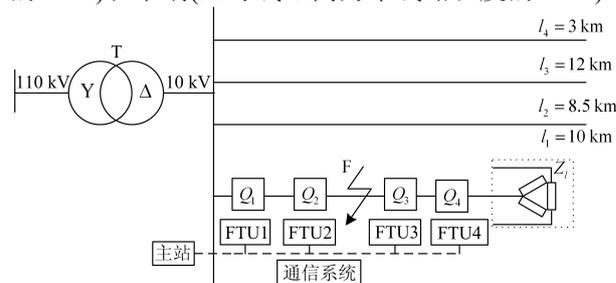


图 4 仿真系统模型

Fig. 4 Simulation system model

4.2 仿真试验及分析

按照上述模型及条件对中性点不接地系统单相断线不接地故障进行仿真, 限于篇幅, 本文只给出了单出线情况线路中间位置发生单相断线不接地故障的仿真数据, 仿真数据见表 1—表 3。

从表 1—表 3 可以看出, Q_3 与 Q_4 检测点所测各相电压的数据满足判据一, Q_1 与 Q_2 两检测点所测数据不满足该判据。从线路母线处开始搜索, Q_3 为首个满足该判据的检测点, 则 Q_3 检测点的上游区段即 Q_2 至 Q_3 区段为故障区段。

表 1 $|Z_{AB}| = |Z_{AC}|$ 时各检测点电压仿真数据Table 1 Phase voltages and line voltages simulation data of different break points when $|Z_{AB}| = |Z_{AC}|$

	Q_1	Q_2	Q_3	Q_4
\dot{U}_A	7 577.0 V $\angle 0.0^\circ$	7 577.0 V $\angle 0.0^\circ$	1 515.0 V $\angle 179.9^\circ$	1 515.0 V $\angle 179.9^\circ$
\dot{U}_B	5 463.0 V $\angle -106.4^\circ$	5 458.0 V $\angle -106.8^\circ$	5 448.0 V $\angle -107.4^\circ$	5 443.0 V $\angle -107.4^\circ$
\dot{U}_C	5 450.0 V $\angle 105.9^\circ$	5 429.0 V $\angle 105.6^\circ$	5 386.0 V $\angle 105.1^\circ$	5 365.0 V $\angle 104.8^\circ$
\dot{U}_{AB}	10 510.0 V $\angle 29.9^\circ$	10 530.0 V $\angle 29.7^\circ$	5 204.0 V $\angle 88.8^\circ$	5 190.0 V $\angle 88.4^\circ$
\dot{U}_{BC}	10 480.0 V $\angle -90.3^\circ$	10 460.0 V $\angle -90.6^\circ$	10 400.0 V $\angle -91.2^\circ$	10 370.0 V $\angle -91.6^\circ$
\dot{U}_{CA}	10 480.0 V $\angle 149.9^\circ$	10 440.0 V $\angle 149.9^\circ$	5 198.0 V $\angle 88.8^\circ$	5 185.0 V $\angle 88.4^\circ$

表 2 $|Z_{AB}| \ll |Z_{AC}|$ 时各检测点电压仿真数据Table 2 Phase voltages and line voltages simulation data of different break points when $|Z_{AB}| \ll |Z_{AC}|$

	Q_1	Q_2	Q_3	Q_4
\dot{U}_A	7 631.0 V $\angle 6.5^\circ$	7 631.0 V $\angle 6.5^\circ$	4 632.0 V $\angle -109.4^\circ$	4 632.0 V $\angle -109.4^\circ$
\dot{U}_B	4 629.0 V $\angle -109.1^\circ$	4 629.0 V $\angle -109.1^\circ$	4 629.0 V $\angle -109.1^\circ$	4 630.0 V $\angle -109.1^\circ$
\dot{U}_C	6 307.0 V $\angle 103.8^\circ$			
\dot{U}_{AB}	10 500.0 V $\angle 30.0^\circ$	10 500.0 V $\angle 30.0^\circ$	25.3 V —	25.3 V —
\dot{U}_{BC}	105 00.0 V $\angle -90.0^\circ$	10 500.0 V $\angle -90.0^\circ$	10 500.0 V $\angle -90.0^\circ$	10 500.0 V $\angle -90.0^\circ$
\dot{U}_{CA}	10 500.0 V $\angle 150.0^\circ$	10 500.0 V $\angle 150.0^\circ$	10 490.0 V $\angle 89.8^\circ$	10 490.0 V $\angle 89.8^\circ$

表 3 $|Z_{AB}| \gg |Z_{AC}|$ 时各检测点电压仿真数据Table 3 Phase voltages and line voltages simulation data of different break points when $|Z_{AB}| \gg |Z_{AC}|$

	Q_1	Q_2	Q_3	Q_4
\dot{U}_A	7 623.0 V $\angle -6.6^\circ$	7 623.0 V $\angle -6.6^\circ$	4 628.0 V $\angle 108.8^\circ$	4 628.0 V $\angle 108.8^\circ$
\dot{U}_B	6 311.0 V $\angle -104.0^\circ$			
\dot{U}_C	4 630.0 V $\angle 109.1^\circ$			
\dot{U}_{AB}	10 500.0 V $\angle 30.0^\circ$	10 500.0 V $\angle 30.0^\circ$	10 510.0 V $\angle 89.8^\circ$	10 510.0 V $\angle 89.8^\circ$
\dot{U}_{BC}	10 500.0 V $\angle -90.0^\circ$			
\dot{U}_{CA}	10 500.0 V $\angle 150.0^\circ$	10 500.0 V $\angle 150.0^\circ$	25.3 V —	25.3 V —

注：表 2、表 3 中“—”表示此种情况下幅值太小，相位无法正确仿真

从表 1—表 3 可以看出， Q_3 与 Q_4 检测点所测各线电压的数据满足判据二， Q_1 与 Q_2 两检测点所测数据不满足该判据。从线路母线处开始搜索， Q_3 为首个满足该条件的检测点，则 Q_3 检测点的上游区段即 Q_2 至 Q_3 区段为故障区段。

可见利用本文所提方法可以正确判定故障区段，分别改变断线位置、故障线路对地电容占系统总对地电容的比例、负荷阻抗大小等因素，进行了多次仿真实验，本文方法均可正确进行故障区段定位。

5 结论

本文在考虑断线位置、故障线路对地电容占系统总对地电容的比例和负载阻抗的大小及其分布等多方面影响因素的基础上，综合分析了断线不接地故障的断口两侧电气量特征，得到以下结论：

1) 断口前方线电压与故障前线电压相比变化不大，而断口后方线电压特征表现为两线电压幅值之和等于第三线电压且相位与第三线电压相位相反或相同；

2) 断口前故障相电压升高，而断口后故障相电压降低；两非故障相电压断口前后变化情况相同，根据负载阻抗的分布情况表现出一相升高而另一相降低，或者两相电压相等，但都比故障前相电压降低。

根据断口前后各线/相电压的不同变化特征所提故障区段定位方法，可借用已有配电自动化系统平台，无需配置新设备，只需增加相应的软件模块，提高了单相断线故障定位的技术的适用性。

参考文献

- [1] 翁蓝天, 刘开培, 刘晓莉, 等. 复杂配电网故障定位的链表法[J]. 电工技术学报, 2009, 24(5): 190-196.
WENG Lantian, LIU Kaipei, LIU Xiaoli, et al. Chain table algorithm for fault location of complicated distribution network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(5): 190-196.
- [2] 刘俊, 马志瀛, 闫静, 等. 基于改进梯度校正法的短路电流在线实时计算[J]. 电工技术学报, 2007, 22(10): 65-70.
LIU Jun, MA Zhiying, YAN Jing, et al. Online real-time calculation of short-circuit current based on improved gradient estimation algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(10): 65-70.
- [3] 潘本仁, 宋华茂, 张秋风, 等. 小电流接地故障无功功率分析及选线新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(14): 51-56.
PAN Benren, SONG Huamao, ZHANG Qiufeng, et al. Reactive power analysis and novel faulty selection method

- in resonant grounding system[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(14): 51-56.
- [4] 蔡颖倩, 王钢, 樊晨曦, 等. 利用故障全过程信息的消弧线圈接地系统间歇性接地故障选线方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(9): 9-17.
CAI Yingqian, WANG Gang, FAN Chenxi, et al. Faulty line selection based on information in the whole process of intermittent earth fault in resonant grounding distribution networks[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(9): 9-17.
- [5] 李建南, 张慧媛, 王鲜花, 等. 中压电缆网接地故障的电弧建模及仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(24): 105-109.
LI Jiannan, ZHANG Huiyuan, WANG Xianhua, et al. Arc modeling and simulation of the ground faults of the middle voltage cable network[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(24): 105-109.
- [6] 王辑祥, 梁志坚. 电气接线原理及运行[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.
- [7] 王庆华. 配电线路断线故障的分析[J]. 广西水利水电, 2011(6): 57-60.
WANG Qinghua. Analysis of distribution line break failure[J]. Guangxi Water Resources & Hydropower Engineering, 2011(6): 57-60.
- [8] 王琦, 杨梅. 小电流接地系统线路断线分析[J]. 电力学报, 2007, 22(1): 121-124.
WANG Qi, YANG Mei. An analysis of line breaking in under current earthed system[J]. Journal of Electric Power, 2007, 22(1): 121-124.
- [9] 张慧芬, 潘贞存, 桑在中. 小电流接地系统单相断线加接地故障的分析[J]. 继电器, 2004, 32(18): 6-9.
ZHANG Huifen, PAN Zhencun, SANG Zaizhong. Analysis of complex line breaking and grounding fault in the power system with neutral point indirectly grounded[J]. Relay, 2004, 32(18): 6-9.
- [10] 张慧芬, 桑在中. 架空线单相断线接地复故障分析[J]. 中国电力, 2013, 46(2): 65-71.
ZHANG Huifen, SANG Zaizhong. Analysis of single-phase grounding fault with line-broken on overhead transmission lines[J]. Electric Power, 2013, 46(2): 65-71.
- [11] 孙旭娜, 张慧芬, 田质广. 接地点在变电站侧断线接地复故障分析[J]. 济南大学学报(自然科学版), 2013, 27(1): 26-33.
SUN Xuna, ZHANG Huifen, TIAN Zhiguang. Analysis of single-phase line-broken with earth fault at substation side[J]. Journal of University of Jinan (Science and Technology), 2013, 27(1): 26-33.
- [12] 韩凤玲, 王毅, 许承斌, 等. 树形分支电网单相断线兼接地故障特征[J]. 哈尔滨工业大学学报, 1998, 30(2): 16-20.
HAN Fengling, WAN Yi, XU Chengbin, et al. Fault features of line break with short-circuit for tree-type distribution line[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 1998, 30(2): 16-20.
- [13] 马腾. 10 kV 配电线路断线检测与定位研究[D]. 济南: 山东大学, 2013.
- [14] 尤毅, 刘东, 李亮, 等. 基于负荷监测仪的 10 kV 架空线单相断线不接地故障区域判定[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(19): 144-149.
YOU Yi, LIU Dong, LI Liang, et al. Detection method based on load monitoring for 10 kV overhead line single-phase ungrounded open fault area[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(19): 144-149.
- [15] 屈刚, 李长凯. 配电网架空线路断线故障定位[J]. 电力自动化设备, 2005, 25(12): 35-38.
QU Gang, LI Changkai. Fault locating of non-grounding line break in distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25(12): 35-38.
- [16] 朱玲玲, 李长凯, 张华中, 等. 配电网单相断线故障负序电流分析及选线[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(9): 35-38.
ZHU Lingling, LI Changkai, ZHANG Huazhong, et al. Negative sequence current distributing and single-phase open-line fault protection in distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(9): 35-38.
- [17] 吴素我, 张焰, 苏运. 基于配用电数据关联的中压配电网断线故障诊断方法[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(7): 101-109.
WU Suwo, ZHANG Yan, SU Yun. Open-line fault diagnosis based on data association of MV distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(7): 101-109.
- [18] 李福寿. 中性点非有效接地电网的运行[M]. 北京: 水利电力出版社, 1993: 4-12.

收稿日期: 2017-08-05; 修回日期: 2017-10-16

作者简介:

张林利(1979—), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为配电网保护与故障处理技术; E-mail: zhang_linli@163.com

曹丽丽(1992—), 女, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为配电网自动化与故障定位; E-mail: 15689957268@126.com

李立生(1973—), 男, 硕士, 研究员, 主要研究方向为配电网智能控制技术。E-mail: lls@sina.com

(编辑 姜新丽)