

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.200360

## 配电网单相接地故障快速选相方法研究

叶远波<sup>1</sup>, 蔡翔<sup>2</sup>, 谢民<sup>1</sup>, 徐波<sup>3</sup>, 魏立新<sup>4</sup>

(1. 安徽电力调度控制中心, 安徽 合肥 230022; 2. 上海蓝瑞电气有限公司, 上海 201613;  
3. 上海电力大学电气工程学院, 上海 200090; 4. 上海思源电气股份有限公司, 上海 201108)

**摘要:** 配电网单相接地故障传统判相方法需要考虑相序和电压大小来判别故障相, 但高阻接地故障时相角测量较为困难, 因此故障相判断难度很大。通过分析小电流接地系统发生单相接地故障时各相电压以及中性点电压随故障电阻变化的关系, 提出单相接地故障时仅根据中性点电压大小以及相电压大小直接判断故障相的简化方法。最后通过 PSCAD/EMTDC 搭建仿真模型, 仿真表明所提判相方法能在不同故障电阻的情况下准确判别出故障相。

**关键词:** 单相接地故障; 故障相电压; 中性点电压; 判断故障相

### Fault phase fast detection of the single-phase-to-ground fault in a power distribution network

YE Yuanbo<sup>1</sup>, CAI Xiang<sup>2</sup>, XIE Min<sup>1</sup>, XU Bo<sup>3</sup>, WEI Lixin<sup>4</sup>

(1. Anhui Electric Power Dispatch Center, Hefei 230022, China; 2. Shanghai Lanrui Electric Co., Ltd., Shanghai 201613, China;  
3. School of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China;  
4. Shanghai Sieyuan Electric Co., Ltd., Shanghai 201108, China)

**Abstract:** In a power distribution network, the traditional single-phase-to-ground fault phase detection method needs to consider the phase sequence and amplitude of voltage to determine the fault phase. However, it is difficult to measure the phase angle in a high impedance grounded fault. As a result, it is more difficult to determine the fault phase. The relationship between the phase voltage and the neutral displacement voltage are analyzed when a single-phase grounded fault occurs in a small current grounded system. This paper proposes a simplified method to detect the fault phase directly and quickly according to the neutral displacement voltage and phase voltages. Finally, a simulation model is built in PSCAD/EMTDC, and the results show that the proposed method can accurately identify the fault phase in the case of different fault resistances.

This work is supported by the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 52120018004L).

**Key words:** single-phase-to-ground fault; fault phase voltage; neutral voltage; fault phase detection

## 0 引言

我国中压配电网大多采用小电流接地方式, 即中性点不接地和经消弧线圈接地<sup>[1-3]</sup>。在小电流接地系统中, 当发生单相接地故障时, 故障相电压降低, 非故障相电压升高, 但线电压仍保持对称, 规程规定可以继续运行 1~2 h<sup>[4-5]</sup>。但如果不能及时发现故障、切除故障馈线, 则会引起绝缘薄弱处击穿, 引发更严重的安全事故。因此, 许多学者通过分析单相接地故障特征, 提出许多单相接地故障选线方法, 以避免人工拉线<sup>[6-9]</sup>。但是在中性点经消弧线圈接地

的系统中, 零序电流等故障选线特征量非常小, 导致故障选线的正确率较低<sup>[10-13]</sup>。为改善这种情况, 有学者提出一种快速开关型消除弧光接地故障的方法, 即采用快速开关将单相弧光接地故障转换成母线处单相金属性接地故障<sup>[14-15]</sup>。这种方法实质是把远方的单相接地故障转移至母线处, 把复杂的弧光接地故障转变成金属性接地故障并钳制故障相恢复电压, 使得故障相弧隙电压始终小于弧道介质的恢复强度, 电弧将不会重燃。显然, 这种方法能够实施的前提条件是要确定故障相。因此, 准确、快速地确定故障相尤为重要。

在输电线路中故障选相方法研究较多, 故障选相元件为自动重合闸及继保服务<sup>[16-19]</sup>。文献[20]对

基金项目: 国家电网公司科技项目资助(52120018004L)

故障分量选相方法进行了改进, 仅利用负序电流和正序电流的相位差判断。文献[21]通过故障分量定义故障相识别系数, 比较其不同变化特征实现快速选相。文献[22]提出一种同杆双回线单端电气量选相方法。文献[23]提出基于卷积神经网络的超高压输电线路故障选相新方法。由于输电网和配电网结构的不同, 这些方法在配电网中适应范围有限[24]。

在配电网中, 一般根据相电压的幅值和相角进行故障相判断。文献[25-29]分析了单相接地故障时相电压的变化, 利用故障相电压与其他两相电压之间的特征判断故障相。但该方法需要幅值与相序的信息。在实际应用中, 若遇到高阻接地故障则存在较大困难。文献[30-32]分析了在电网不对称情况下传统判据失效, 通过构造“相矢量”进行零序电压轨迹跟踪, 判定接地故障相, 但该方法计算较为复杂, 程序较繁琐, 在实际中难以直接应用。

当接地故障电阻较大(即高阻接地故障)时[33], 三相电压及中性点电压的变化都比较小, 难以获得准确的相位关系。此时, 若按照幅值和相角的关系判断故障相则比较困难。在实践中, 从快速判断故障相的角度看, 参与故障选相的特征量越少越好。因此, 本文在传统判据的基础上, 分析单相接地故障时相电压幅值变化与故障电阻的关系, 推导各相电压与中性点电压的表达式, 提出一种仅利用电压幅值快速判别故障相的实用方法。

## 1 中性不接地系统

如图 1 所示, 当开关 S 断开时为中性点不接地系统。以电源 A 相电压  $\dot{E}_A$  为参考相量, 当 A 相经故障电阻  $R_f$  接地时, 可以计算得到中性点电压为[1]

$$\dot{U}_0 = - \left[ \frac{\dot{U}_{00}}{1 - j(d_f + d_0)} + \frac{1}{1 + \frac{d_0 + j}{d_f}} \right] \dot{E}_A \quad (1)$$

$$\text{式中: } \dot{U}_{00} = \frac{\omega(C_1 + a^2 C_2 + a C_3)}{\omega(C_1 + C_2 + C_3)}; \quad d_f = \frac{1}{R_f \omega(C_1 + C_2 + C_3)}; \quad d_0 = \frac{1}{R \omega(C_1 + C_2 + C_3)}, \quad \frac{1}{R} = \frac{3}{r_0}。$$

如果  $C_1 = C_2 = C_3 = C$ , 那么有

$$d_f = \frac{1}{3\omega C R_f} \quad (2)$$

$$\dot{U}_0 = - \frac{1}{j3\omega C R_f + 1} \dot{E}_A = \frac{j d_f}{1 - j d_f} \dot{E}_A \quad (3)$$

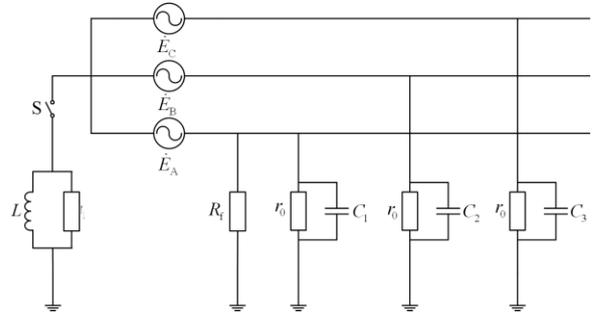


图 1 单相接地故障原理图

Fig. 1 Diagram of a single-phase-to-ground fault

可以证明,  $-\dot{U}_0$  相量的轨迹是以  $|\dot{E}_A| = E_A$  为直径的半圆, 圆心  $\left(\frac{1}{2} E_A, 0\right)$ , 如图 2 所示。

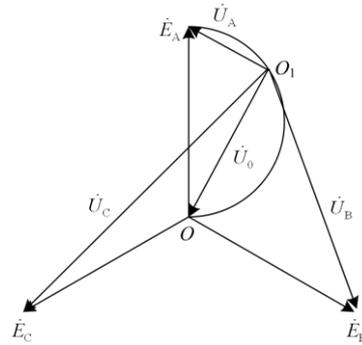


图 2 中性点不接地系统单相接地时电压相量图

Fig. 2 Neutral voltage phasor diagram of ungrounded system in a single-phase-to-ground fault

显然, 随着故障电阻  $R_f$  的增加,  $d_f = \frac{1}{3\omega C R_f}$  的值在减小, 而  $-\dot{U}_0$  的轨迹逐渐接近坐标原点。在这个过程中, C 相电压始终保持最大。但故障电阻的大小影响 A 相、B 相电压的变化, B 相电压会小于故障相 A 相电压。而这个变化的临界点是 A 相、B 相电压相等的点  $O_1$ , 如图 3 所示。当处在临界点时,  $d_f = \frac{\sqrt{3}}{3}$ , 中性点电压为相电压的 50%, 三相电压分别为

$$|\dot{U}_A| = |\dot{U}_B| = \frac{\sqrt{3}}{2} E_A \quad (4)$$

$$|\dot{U}_C| = \left| \frac{j \frac{\sqrt{3}}{3}}{1 - j \frac{\sqrt{3}}{3}} \right| E_A = 1.5 E_A \quad (5)$$

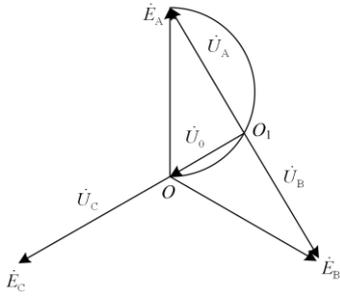


图3 故障相(A相)电压与非故障相(B相)电压相等时的相量图

Fig. 3 Phasor diagram in case of the voltage of the fault phase A is equal to the voltage of a non-fault phase B

综上所述,在中性点不接地系统发生单相接地故障时,可以仅通过相电压幅值大小判断故障相,即判据 I:

当中性点电压大于 50%相电压时,电压最小者为故障相。当中性点电压小于 50%相电压时,电压次小者为故障相。

## 2 中性点经消弧线圈接地系统

图 1 中开关 S 闭合时即为中性点经消弧线圈接地系统。当 A 相发生接地故障时,中性点位移电压为<sup>[1]</sup>

$$\dot{U}_0 = - \left[ \frac{\dot{U}_{00}}{\nu - j(d_f + d_0)} + \frac{1}{1 + \frac{d_0 + j\nu}{d_f}} \right] \dot{E}_A \quad (6)$$

式中:  $\nu = \frac{\omega(C_1 + C_2 + C_3) - \frac{1}{\omega L}}{\omega(C_1 + C_2 + C_3)}$ ;  $d_0 = \frac{1}{R\omega(C_1 + C_2 + C_3)}$ ,

$\frac{1}{R} = \frac{1}{r_l} + \frac{3}{r_0}$ ,  $L$ 、 $r_l$  分别表示消弧线圈的等效电感与电阻。假设各相对地电容相等,那么

$$\dot{U}_0 = - \frac{1}{1 + \frac{d_0 + j\nu}{d_f}} \dot{E}_A \quad (7)$$

同理,可以证明  $-\dot{U}_0$  的末端轨迹是一段圆弧,如图 4、图 5 所示。其圆心  $\left(\frac{1}{2}, \frac{d_0}{2\nu}\right)$ , 半径为  $\left|\frac{1}{2\sin\varphi}\right|$ ,

其中  $\tan\varphi = \frac{\nu}{d_0}$ 。

显然,由于  $d_0$  和  $\nu$  的存在,该轨迹不是半圆,而是圆弧(劣弧)。下面根据  $\nu$  的不同,分欠补偿和过补偿两种情况讨论。

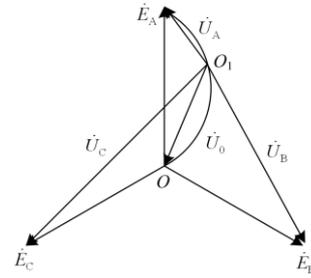


图4 欠补偿单相接地故障电压相量图

Fig. 4 Voltage phasor diagram of a single-phase-to-ground fault (under compensation)

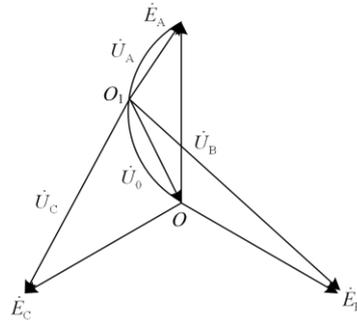


图5 过补偿单相接地故障电压相量图

Fig. 5 Voltage phasor diagram of a single-phase-to-ground fault (over compensation)

### 2.1 欠补偿

根据上述分析,在欠补偿工作状态下,无论  $d_f$  如何变化, C 相电压都是最高的。但是随着  $d_f$  的增加,故障相 A 相电压、B 相电压此消彼长。同样存在一个阻尼率的临界点  $d_{fc1}$ 。越过该临界点之后故障相电压不再最低。此时

$$d_{fc1} = \frac{\sqrt{3}\nu^2 - 2d_0\nu - \sqrt{3}d_0^2}{3\nu + \sqrt{3}d_0} = \frac{\nu - \sqrt{3}d_0}{\sqrt{3}} \quad (8)$$

代入  $\dot{U}_0$  的表达式(6),得

$$\dot{U}_0 = - \frac{\nu - \sqrt{3}d_0}{\nu + j\sqrt{3}\nu} \dot{E}_A \quad (9)$$

其大小为

$$|\dot{U}_0| = \left| - \frac{\nu - \sqrt{3}d_0}{\nu + j\sqrt{3}\nu} \dot{E}_A \right| = \frac{1}{2} \left| 1 - \sqrt{3} \frac{d_0}{\nu} \right| E_A \quad (10)$$

显然,在欠补偿时,  $\nu > 0$ , 临界点情况下中性点电压的大小随  $\frac{d_0}{\nu}$  变化,其最大值为  $0.5|\dot{E}_A|$  ( $d_0=0$  或  $\nu = +\infty$ )。

### 2.2 过补偿

当消弧线圈工作在过补偿时,同样可以求出故障相与非故障相电压大小变化的阻尼率临界点  $d_{fc2}$ 。

$$d_{\text{rc2}} = \frac{-\nu - \sqrt{3}d_0}{\sqrt{3}} \quad (11)$$

代入式(6), 得

$$\dot{U}_0 = -\frac{\nu + \sqrt{3}d_0}{\nu - j\sqrt{3}\nu} \dot{E}_A \quad (12)$$

其大小为

$$|\dot{U}_0| = \frac{|1 + \sqrt{3} \frac{d_0}{\nu}|}{2} E_A \quad (13)$$

显然, 在过补偿时,  $\nu < 0$ , 该临界点中性点电压的大小随  $\frac{d_0}{\nu}$  变化, 最大值为  $0.5|\dot{E}_A|$  ( $d_0 = 0$  或者  $\nu = -\infty$ )。

因此, 在中性点经消弧线圈接地系统中, 可以仅采用相电压幅值的大小判断故障相, 即判据 II:

(1) 欠补偿时, 当  $|\dot{U}_0| > \frac{1}{2} |1 - \sqrt{3} \frac{d_0}{\nu}| E_A$  时, 电压最小者为故障相。当  $|\dot{U}_0| < \frac{1}{2} |1 - \sqrt{3} \frac{d_0}{\nu}| E_A$  时, 电压次小者为故障相。

(2) 过补偿时, 当  $|\dot{U}_0| > \frac{1}{2} |1 + \sqrt{3} \frac{d_0}{\nu}| E_A$  时, 电压最小者为故障相。当  $|\dot{U}_0| < \frac{1}{2} |1 + \sqrt{3} \frac{d_0}{\nu}| E_A$  时, 电压次小者为故障相。

### 2.3 对判据 II 的说明

对配电网来说, 阻尼率  $d_0$  是可以测量的, 并且电网结构一定时, 其值变化很小, 可认为恒定<sup>[34-35]</sup>。例如, 中性点经消弧线圈接地系统中,  $d_0$  为 5%<sup>[30-32]</sup>。 $\nu$  是消弧线圈的失谐度, 是预先设定值。因此, 可以认为  $\sqrt{3} \frac{d_0}{\nu}$  是一个可以通过预先测量而确定的值。从而判据 II 中  $|1 - \sqrt{3} \frac{d_0}{\nu}|$ 、 $|1 + \sqrt{3} \frac{d_0}{\nu}|$  均为确定值。

判据 I 和 II 仅需要知道电压的幅值。对于高阻接地故障来说, 相电压及中性点电压虽然较小, 但幅值测量较相角测量更为准确、快速。因此, 无论是判据 I 还是判据 II, 都可以避免高阻接地的干扰。

## 3 仿真分析

### 3.1 系统参数

本文采用 PSCAD/EMTDC 进行仿真验证, 搭建如图 6 所示的配电网仿真模型。图中, G 表示理

想电源; T 表示变压器, 高压侧 110 kV 为星型联结, 低压侧 10 kV 为角型联结; Z 表示接地变压器, 用以构造中性点; L 表示消弧线圈。馈线由架空线和电缆组成, 均采用 Bergeron 模型, 线路参数详见文献[35-36]。系统对地容抗  $X_C = 115.47 \Omega$ 。

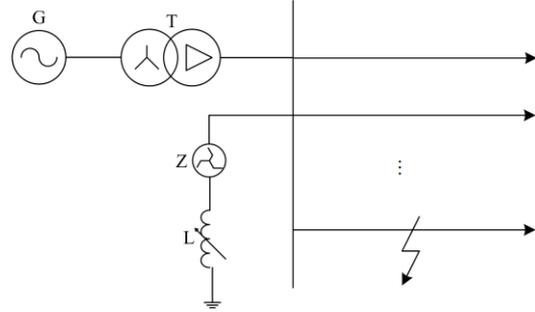


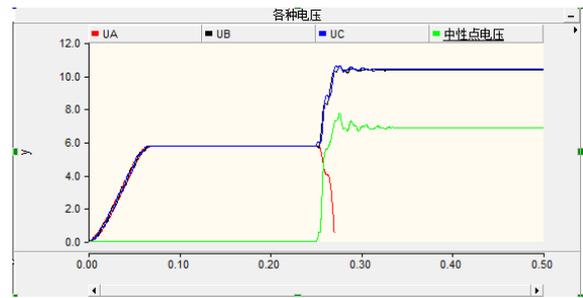
图 6 典型配电网仿真示意图

Fig. 6 Schematic diagram of the power distribution network

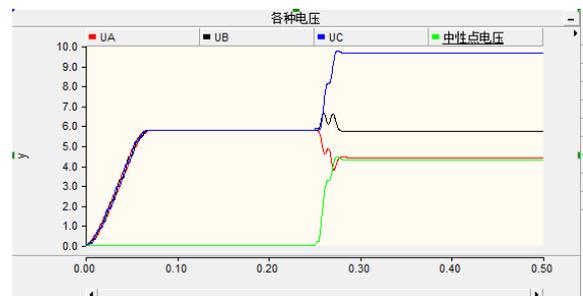
### 3.2 中性点不接地系统

若接地变 Z 构造的中性点不接消弧线圈, 则为中性点不接地系统。某线路发生单相接地故障, 故障开始时刻为 0.15 s, 持续时间为 0.85 s。设置故障电阻分别为  $0 \Omega$ 、 $90 \Omega$ 、 $800 \Omega$ 。仿真结果如图 7 所示。

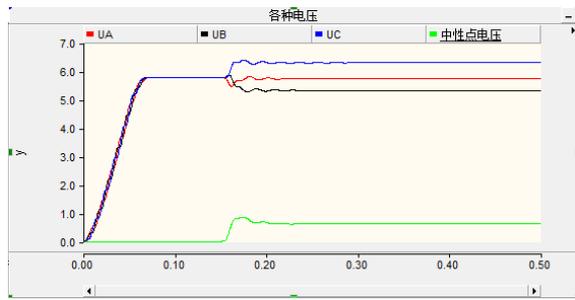
由图 7(a)可以看出, 在故障电阻为  $0 \Omega$  时, B、C 两相电压基本相等, 其值为线电压。A 相电压为 0, 中性点电压为相电压。根据判据 I, 故障相为电压最小者, 即 A 相。



(a)  $R_f = 0 \Omega$  时各相电压有效值



(b)  $R_f = 90 \Omega$  时各相电压有效值



(c)  $R_f=800\ \Omega$  时各相电压有效值

图 7 中性点不接地时故障判相

Fig. 7 Fault phase detection in the ungrounded system

如图 7(b)所示, 故障电阻为  $90\ \Omega$  时, A 相电压最低, B 相次之, C 相最高, 中性点电压大于 50% 相电压。根据判据 I, 故障相为电压最小者, 即 A 相。判据 I 成立。

图 7(c)表明在故障电阻为  $800\ \Omega$  时(高阻接地故障), A 相电压不再最低, C 相电压仍然最高, B 相电压最低, 中性点电压小于 50% 相电压。根据判据 I, 故障相为电压次小者, 即 A 相。判据 I 成立。

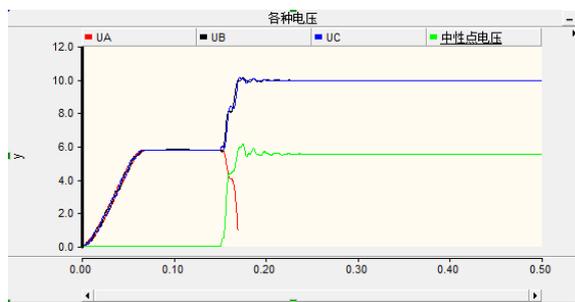
### 3.3 中性点经消弧线圈接地系统

#### 3.3.1 过补偿 8%

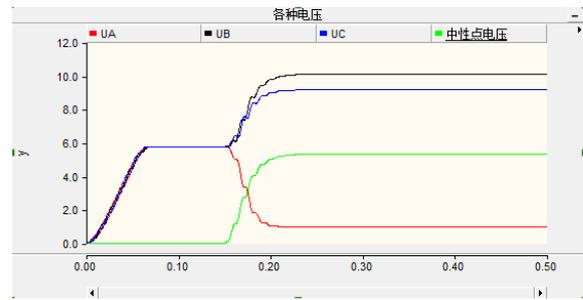
过补偿时  $\nu = -8\%$ ,  $d_0 = 2.54\%$ 。由系统对地容抗可计算消弧线圈的等效电感值为  $0.3987\ \text{H}$ 。设置故障电阻  $R_f$  分别为  $0\ \Omega$ 、 $300\ \Omega$ 、 $8500\ \Omega$ 。仿真结果如图 8 所示。

图 8(a)表明在故障电阻为  $0\ \Omega$  时, B、C 两相电压基本相等, 为线电压。A 相电压为 0。中性点电压为相电压。根据判据 II, 故障相为电压最小者, 即 A 相。判据 II 成立。

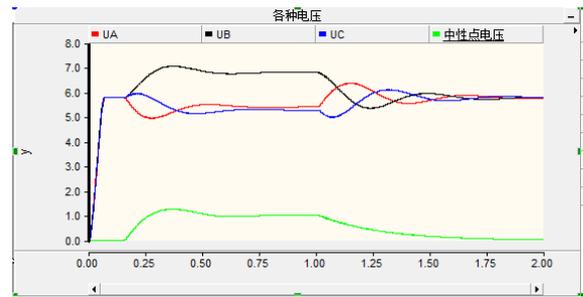
图 8(b)表明在故障电阻为  $300\ \Omega$  时, A 相电压最低, C 相次之, B 相最高。此时  $|\dot{U}_0| > \frac{1}{2} \left| 1 + \sqrt{3} \frac{d_0}{\nu} \right| E_A = 1.3\ \text{kV}$ 。根据判据 II, 故障相为电压最小者, 即 A 相。判据 II 成立。



(a)  $R_f=0\ \Omega$  时各相电压有效值



(b)  $R_f=300\ \Omega$  时各相电压有效值



(c)  $R_f=8500\ \Omega$  时各相电压有效值

图 8 中性点经消弧线圈接地时(过补偿)故障判相

Fig. 8 Fault phase detection in the arc suppression coil grounded system (over compensation)

图 8(c)表明在故障电阻为  $8500\ \Omega$  时(高阻接地故障), A 相电压不再最低, B 相电压仍然最高, C 相电压最低, 此时  $|\dot{U}_0| < \frac{1}{2} \left| 1 + \sqrt{3} \frac{d_0}{\nu} \right| E_A = 1.3\ \text{kV}$ 。

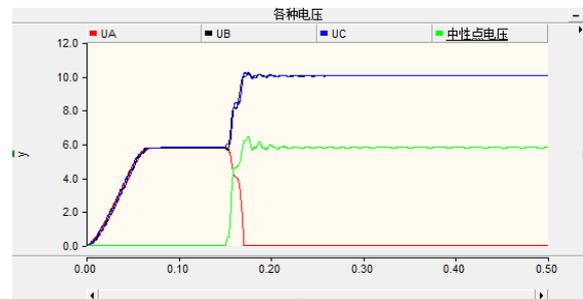
根据判据 II, 故障相为电压次小者, 即 A 相。判据 II 成立。

#### 3.3.2 欠补偿 8%

过补偿时  $\nu=8\%$ ,  $d_0=2.54\%$ 。由系统对地容抗可计算消弧线圈的等效电感值为  $0.468\ \text{H}$ 。

设置故障电阻分别为  $0\ \Omega$ 、 $1000\ \Omega$ 、 $7000\ \Omega$ 。仿真结果如图 9 所示。

图 9(a)表明在故障电阻为  $0\ \Omega$  时, BC 两相电压基本相等, 为线电压, A 相电压为 0, 中性点电压为相电压。根据判据 II, 故障相为电压最小者, 即 A 相。判据 II 成立。



(a)  $R_f=0\ \Omega$  时各相电压有效值

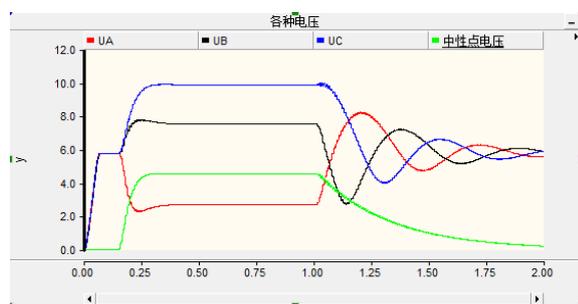
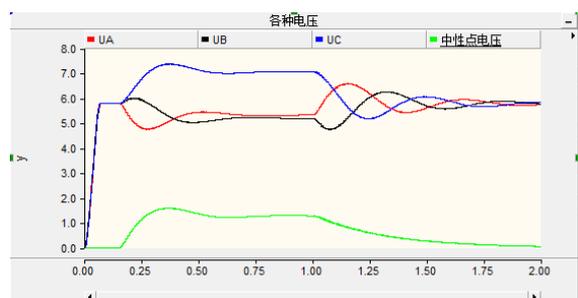
(b)  $R_f=1\ 000\ \Omega$  时各相电压有效值(c)  $R_f=7\ 000\ \Omega$  时各相电压有效值

图 9 中性点经消弧线圈接地时(欠补偿)故障判相

Fig. 9 Fault phase detection in the arc suppression coil grounded system (under compensation)

图 9(b)表明在故障电阻为  $1\ 000\ \Omega$  时, A 相电压最低, B 相次之, C 相最高, 此时  $|\dot{U}_0| > \frac{1}{2} \left| 1 - \sqrt{3} \frac{d_0}{\nu} \right| E_A = 1.54\ \text{kV}$ 。根据判据 II, 故障相为电压最小者, 即 A 相。判据 II 成立。

图 9(c)表明在故障电阻为  $7\ 000\ \Omega$  时(高阻接地故障), C 相电压仍然最高, A 相电压次之, B 相电压最低, 此时  $|\dot{U}_0| < \frac{1}{2} \left| 1 - \sqrt{3} \frac{d_0}{\nu} \right| E_A = 1.54\ \text{kV}$ , 根据判据 II, 故障相为电压次小者, 即 A 相。判据 II 成立。

#### 4 结论

本文通过小电流接地系统单相接地故障的基本原理分析故障后各相电压以及中性点电压的变化规律, 提出仅根据中性点电压与相电压大小确定接地故障相的方法。仿真验证表明该方法的有效性。应用该方法的判相装置可直接通过测量中性点电压及相电压幅值大小来直接判断故障相, 解决了传统判据需要通过相序判断故障相的不足。由于实际中三相电压并不平衡, 因此实际应用中应适当修正以提高准确性, 这也是本文进一步的研究方向。

#### 参考文献

[1] 要焕年, 曹月梅. 电力系统谐振接地[M]. 北京: 中国

电力出版社, 2009.

- [2] PANDAKOV K, HØIDALEN H K, TRÆTTEBERG S. An additional criterion for faulty feeder selection during ground faults in compensated distribution networks[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(6): 2930-2937.
- [3] HUANG Chun, TANG Tao, JIANG Yajun, et al. Faulty feeder detection by adjusting the compensation degree of arc-suppression coil for distribution network[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2018, 12(4): 807-814.
- [4] 王栋, 邱志斌, 魏巍, 等. 220 kV 某变电站 GIS 单相接地故障分析及处理措施[J]. 高压电器, 2020, 56(11): 259-265.
- WANG Dong, QIU Zhibin, WEI Wei, et al. Single-phase grounding fault analysis of a GIS in a 220 kV substation and treatment measures[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(11): 259-265.
- [5] 龙茹悦, 黄纯, 汤涛, 等. 一种谐振接地系统的配电网线路接地故障选线新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(21): 21-29.
- LONG Ruyue, HUANG Chun, TANG Tao, et al. Line selection method for grounding fault in resonant grounding distribution systems[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(21): 21-29.
- [6] WANG Xiaowei, GAO Jie, WEI Xiangxiang, et al. Single line to ground fault detection in a non-effectively grounded distribution network[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(6): 3173-3186.
- [7] FARUGHIAN A, KUMPULAINEN L, KAUHANIEMI K. Review of methodologies for earth fault indication and location in compensated and unearthened MV distribution networks[J]. Electric Power Systems Research, 2018, 154(1): 373-380.
- [8] WANG Yuanyuan, HUANG Yuhao, ZENG Xiangjun, et al. Faulty feeder detection of single phase-earth fault using grey relation degree in resonant grounding system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(1): 55-61.
- [9] WANG Wen, ZENG Xiangjun, YAN Lingjie, et al. Principle and control design of active ground-fault arc suppression device for full compensation of ground current[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(6): 4561-4570.
- [10] XU Yan, LIU Jingyan, FU Yuan. Fault-line selection and fault-type recognition in DC systems based on graph theory[J]. Protection and Control of Modern Power Systems,

- 2018, 3(3): 267-276. DOI: 10.1186/s41601-018-0098-9.
- [11] 邱进, 田野, 李冠华, 等. 基于现场实录波形的小电流接地故障暂态选线研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(6): 180-187.  
QIU Jin, TIAN Ye, LI Guanhua, et al. Study on transient line selection of small current grounding fault based on field recorded waveform[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(6): 180-187.
- [12] SAGASTABEITIA K J, ZAMORA I, MAZON A J, et al. Phase asymmetry: a new parameter for detecting single-phase earth faults in compensated MV networks[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(4): 2251-2258.
- [13] ELKALASHY N I, SABIHA N A, LEHTONEN M. Earth fault distance estimation using active traveling waves in energized-compensated MV networks[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(2): 836-843.
- [14] 赵军, 阮琦, 李景禄. 考虑线路压降的快速接地开关消弧性能及应用[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(20): 158-165.  
ZHAO Jun, RUAN Qi, LI Jinglu. Arc eliminating performance and application of fast grounding switch considering line voltage drop[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(20): 158-165.
- [15] 艾绍贵, 李秀广, 黎炜, 等. 配电网快速开关型消除弧光接地故障技术研究[J]. 高压电器, 2017, 53(3): 178-184.  
AI Shaogui, LI Xiuguang, LI Wei, et al. Arc suppression technology based on fast switch for distribution network[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(3): 178-184.
- [16] 陆金凤, 赵青春, 谢华, 等. 基于双端量的半波长交流输电线路故障选相方法[J]. 高压电器, 2018, 54(12): 251-256.  
LU Jinfeng, ZHAO Qingchun, XIE Hua, et al. Scheme of Fault phase selection in half-wavelength AC transmission line based on two-terminal electrical quantities[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(12): 251-256.
- [17] 方春恩, 李煜昊, 陈川江, 等. 基于 Prony 算法的串补空载线路选相最佳合闸时刻研究[J]. 高压电器, 2019, 55(12): 15-22.  
FANG Chun'en, LI Yuhao, CHEN Chuanjiang, et al. Optimal instant for controlled switching of the serially compensated transmission lines based on prony algorithm[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(12): 15-22.
- [18] KHAN W A, BI Tianshu, JIA Ke. A review of single phase adaptive auto reclosing schemes for EHV transmission lines[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2019, 4(3): 205-214. DOI: 10.1186/s41601-019-0133-5.
- [19] HUANG Shaofeng, LUO Lan, CAO Kai. A novel method of ground fault phase selection in weak-infeed side[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(5): 2215-2222.
- [20] 程志友, 李小静, 汤明金, 等. 一种故障分量选相元件接地短路判据的修正[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(16): 19-24.  
CHENG Zhiyou, LI Xiaojing, TANG Mingjin, et al. A correction of ground short-circuit criterion of phase selection element based on faulty components[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(16): 19-24.
- [21] 陈咏, 胡炎, 邵能灵, 等. 基于电压故障分量的超高压线路故障选相新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(7): 8-14.  
CHEN Yang, HU Yan, TAI Nengling, et al. A new method of fault phase identification for EHV lines based on the fault component of phase voltage[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(7): 8-14.
- [22] 张海, 黄少锋. 利用电压辅助电流选相的同杆双回线单端电气量选相原理[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(7): 139-148.  
ZHANG Hai, HUANG Shaofeng. A fault phase selection scheme of currents with assistant voltages for common-tower double-circuit transmission lines using one-terminal electrical quantities[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(7): 139-148.
- [23] 魏东, 龚庆武, 来文青, 等. 基于卷积神经网络的输电线路区内外故障判断及故障选相方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(增刊): 21-28.  
WEI Dong, GONG Qingwu, LAI Wenqing, et al. Research on internal and external fault diagnosis and fault-selection of transmission line based on convolutional neural network[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(S1): 21-28.
- [24] 郑涛, 吴琼, 于溯, 等. 混压同塔四回线路跨电压故障选相元件动作分析与对策研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(8): 44-51.  
ZHENG Tao, WU Qiong, YU Su, et al. Analysis of the performance of a phase selector for a cross-voltage fault in mixed-voltage four-circuit transmission lines and countermeasures[J]. Power System Protection and

- Control, 2020, 48(8): 44-51.
- [25] 牟龙华, 黄善成. 中性点不直接接地系统单相接地故障特点分析[J]. 煤炭科学技术, 1999, 27(2): 33-35.  
MU Longhua, HUANG Shancheng. Analysis of single phase-to-ground faults in neutral ungrounded systems[J]. Coal Science and Technology, 1999, 27(2): 33-35.
- [26] 宗剑, 牟龙华, 张鑫, 等. 配电网单相接地故障类型及程度的判据[J]. 电力系统及其自动化学报, 2004, 16(4): 27-29.  
ZONG Jian, MU Longhua, ZHANG Xin, et al. Criterion of single-phase ground fault type and its degree for distribution network[J]. Proceedings of the CSU-EPSSA, 2004, 16(4): 27-29.
- [27] 秦光培. 单相接地时电网各电压变化规律及其应用[J]. 昆明理工大学学报, 1998, 23(5): 11-16.  
QIN Guangpei. Earth voltage variable law and its application of the network when single phase-ground[J]. Journal of Kunming University of Science and Technology, 1998, 23(5): 11-16.
- [28] 李如琦, 黄欢, 张振兴, 等. 小电流系统单相不完全接地故障分析[J]. 广西大学学报: 自然科学版, 2007, 32(4): 367-370.  
LI Ruqi, HUANG Huan, ZHANG Zhenxing, et al. Analyzing of single-phase and indirectly grounding fault in small current system[J]. Journal of Guangxi University: Natural Science Edition, 2007, 32(4): 367-370.
- [29] 余水忠. 小电流接地系统经故障电阻接地的分析[J]. 继电器, 2001, 29(4): 21-22, 25.  
YU Shuizhong. Analysis of neutral grounded via a transition resistor[J]. Relay, 2001, 29(4): 21-22, 25.
- [30] 徐波, 张建文, 蔡旭, 等. 电网不对称条件下小电流接地系统接地相辨识[J]. 电工技术学报, 2011, 26(12): 175-182.  
XU Bo, ZHANG Jianwen, CAI Xu, et al. Grounding phase determination in non-effective grounding systems in case of unsymmetrical voltage[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(12): 175-182.
- [31] 李晓波, 刘宝稳, 王崇林. 谐振接地系统零序电压轨迹及精确控制方法[J]. 电网技术, 2013, 37(9): 2669-2674.  
LI Xiaobo, LIU Baowen, WANG Chonglin. Zero-sequence voltage locus of resonant grounded system and its accurate control[J]. Power System Technology, 2013, 37(9): 2669-2674.
- [32] 刘宝稳, 王崇林, 李晓波. 不对称电网不完全接地故障零序电压轨迹及应用[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(28): 4959-4967.  
LIU Baowen, WANG Chonglin, LI Xiaobo. Analysis and application of zero-sequence voltage of single-phase ground fault asymmetrical system[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(28): 4959-4967.
- [33] MITOLO M, MUSCA R, TARTAGLIA M, et al. Electrical safety analysis in the presence of resonant grounding neutral[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2019, 55(5): 4483-4489.
- [34] 吴俊, 诸军, 沈海平, 等. 配电网三相不平衡度近似计算方法简析[J]. 高压电器, 2019, 55(12): 211-214.  
WU Jun, ZHU Jun, SHEN Haiping, et al. Analysis of the three-phase voltage unbalance computing formula used for distribution network[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(12): 211-214.
- [35] 陈砚圃, 张介秋. 电力参数高精度测量的快速递推算法[J]. 高压电器, 2020, 56(8): 250-255.  
CHEN Yanpu, ZHANG Jieqiu. Fast recursive algorithm for accurate measurement of power parameters[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(8): 250-255.
- [36] 张健, 马伟, 朱亚奇, 等. 10 kV 配网中性点小电阻接地系统的研究与设计[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(14): 109-115.  
ZHANG Jian, MA Wei, ZHU Yaqi, et al. Research and design of neutral grounding resistance system for 10 kV distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(14): 109-115.

收稿日期: 2020-05-06; 修回日期: 2020-12-31

作者简介:

叶远波(1973—), 男, 硕士, 教授级高工, 研究方向为电力系统继电保护。E-mail: yeyb7079@ah.sgcc.com.cn

(编辑 姜新丽)