

DOI:10.12158/j.2096-3203.2022.01.030

# 基于故障分量原理的配电网高阻接地故障检测方法

张凡<sup>1</sup>, 牟龙华<sup>2</sup>, 陈浩敏<sup>1</sup>, 于力<sup>1</sup>, 姚森敬<sup>1</sup>

(1. 南方电网数字电网研究院有限公司, 广东 广州 510670;

2. 同济大学电气工程系, 上海 201804)

**摘要:**配电网中发生高阻接地故障时,短路电流小于传统过流保护的阈值,无法被常规保护装置检测和清除。若不及时消除短路电路,极易演化成严重故障。针对该问题,文中首先分析发生高阻接地故障时配电网的故障分量特征和基于母线处的正序电压故障分量与其相连接的各馈线正序电流故障分量的相位差特征,给出适用于配电网高阻接地故障检测的故障判据。然后,为解决配高阻接地故障检测过程中系统不平衡引起的一系列问题,制定了相应的故障检测启动判据。基于该故障检测判据和启动判据,制定基于故障分量原理的配电网高阻接地故障检测方法。最后,在PSCAD/EMTDC仿真软件中建立含架空线路的中压配电网模型,仿真结果验证了所提高阻接地故障检测方法的正确性。

**关键词:**配电网;高阻接地故障;短路电流;故障检测;故障分量;故障判据

**中图分类号:**TM77

**文献标志码:**A

**文章编号:**2096-3203(2022)01-0219-07

## 0 引言

配电网系统规模大、点多面广,靠近用户,运行环境复杂,很容易发生高阻接地故障<sup>[1-2]</sup>。发生高阻接地故障时,由于故障点有较高的故障电阻,例如树枝、干燥土壤等非导电介质<sup>[3-4]</sup>,将会限制接地故障电流增大,使其低于过流保护的阈值,无法被常规保护装置检测和清除<sup>[5-6]</sup>。因此,这种接地故障很有可能不被发现且持续存在,造成触电、火灾等严重后果<sup>[7]</sup>。

传统保护方法难以检测高阻接地故障,无法保证电网安全运行<sup>[8-9]</sup>。因此,研究高阻接地故障检测方法,对于保证我国新建、改建的配电系统乃至整个电力系统的安全都具有现实必要性。国内外研究学者开展了大量研究。文献[10]提出一种基于电流差动原理的稳态故障检测方案,该方案把双端零序电流、电压引入到启动判据的计算中,其计算结果易受到负荷电流大小的影响。当负荷电流较大时,零序电流变化较小,不满足启动判据的阈值,影响该故障检测的性能。文献[11]提出一种基于微分方程的高阻接地故障测距算法,以单侧电压、电流信号为依据,具有简单实用、不受电网频率波动与过渡电阻变化影响等优点。但该方法只适用于简单的输电线路,对含多分支馈线的配电网难以确保检测的灵敏性和可靠性。文献[12]据此提出一种高阻故障在线辨识判据。但配网拓扑结构变化及接地电弧暂态过程都会影响该特征谐波,导

致该方法的可靠性较差。结合零序电流波形的畸变凹凸性,文献[13]提出一种基于暂态电流的高阻故障检测方案,该方案仅利用零序电流信息,几乎不受谐波含量变化的影响。但零序电流很小且各种噪声很大时,故障电流波形凹凸性无法保持稳定,导致检测方法失效。文献[14]提出一种基于智能算法的高阻故障检测方案,利用非线性电阻识别的原理减小随机性噪声对故障特征提取的影响。但是该方案只适用于故障点电阻非线性特性明显的高阻接地情况,对于其他高阻接地类型具有一定的局限性。总体而言,高阻故障类型十分广泛,故障特征千差万别,已有的高阻故障检测方法的成功率较低,只对部分的高阻接地故障有效<sup>[15-16]</sup>。

配电网拓扑结构复杂,发生高阻接地故障时,稳态信号不明显,故障检测灵敏度较低。文中从配电网的实际故障状态出发寻找故障特征,提出基于故障分量原理的高阻接地故障检测新方法,并给出故障检测判据。仿真证明了该检测方法的准确性。

## 1 高阻接地故障特征分析

### 1.1 配电网结构模型

建立如图1所示的配电网结构,其采用双端电源进行供电,共含有2条母线,6条架空线路。其中,架空线路 $T_0, T_1, T_2, T_5$ 接到母线A,架空线路 $T_3, T_4$ 接到母线B。定义2条母线之间的线路为“双端馈线”,只与一条母线相连接的线路为“单端馈线”。

图1中 $T_2$ 为双端馈线,其余线路为单端馈线。为了探究该配电网发生高阻接地故障时的故障分

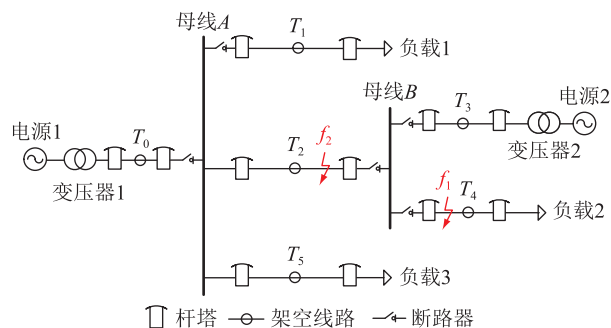


图1 双端电源配电网结构

Fig.1 Double-terminal power source system of distribution network

量特征,选取图1中 $f_1$ 和 $f_2$ 2个故障点进行分析。其中, $f_1$ 故障发生在单端馈线 $T_4$ 中, $f_2$ 故障发生在双端馈线 $T_2$ 中。

### 1.2 配电网高阻接地故障特征

配电网系统发生故障时,利用叠加原理可以把故障状态分解为故障前状态网络和故障附加状态网络<sup>[17]</sup>,其中,凡是故障附加状态网络中的量都是故障分量<sup>[18]</sup>。因此,当 $f_1$ 处发生高阻接地故障时,图1所示配电网的等效故障附加正序网络见图2。

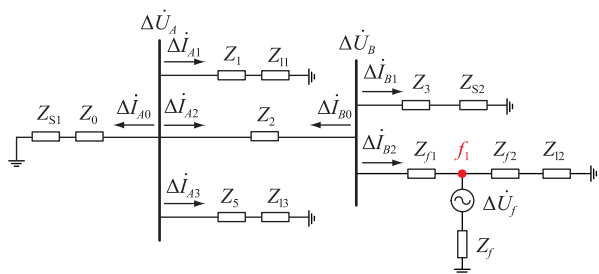


图2  $f_1$ 处故障时的等效故障附加正序网络

Fig.2 The additional positive sequence fault network when a fault occurs in  $f_1$

图2中, $Z_{s1}, Z_{s2}$ 分别为电源1和2的等效正序阻抗; $Z_0, Z_1, Z_2, Z_3, Z_5$ 分别为架空线路 $T_0, T_1, T_2, T_3, T_5$ 的等效正序阻抗; $Z_{11}, Z_{12}, Z_{13}$ 分别为负载1~3的等效正序阻抗; $Z_{f1}, Z_{f2}$ 分别为架空线路 $T_4$ 中故障点上游与下游等效正序阻抗; $Z_f$ 为故障点过渡阻抗; $\Delta \dot{U}_f$ 为故障点 $f_1$ 处的正序故障分量电压; $\Delta \dot{U}_A, \Delta \dot{U}_B$ 分别为母线A,B处的故障分量电压; $\Delta \dot{I}_{A0}, \Delta \dot{I}_{A1}, \Delta \dot{I}_{A2}, \Delta \dot{I}_{A3}$ 为母线A处各馈线的正序电流故障分量; $\Delta \dot{I}_{B0}, \Delta \dot{I}_{B1}, \Delta \dot{I}_{B2}$ 为母线B处各馈线的正序电流故障分量。母线A,B处的正序故障分量电压、电流相量关系分别如图3和图4所示, $\dot{U}_A, \dot{U}_{A,f}$ 以及 $\dot{U}_B, \dot{U}_{B,f}$ 分别为母线A,B故障前后的电压。

由图3可知, $f_1$ 处故障时母线A处的故障分量

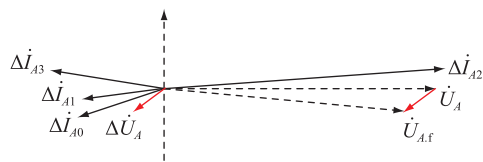


图3  $f_1$ 处故障时母线A处正序故障分量相量关系

Fig.3 The positive-sequence fault component phasors of bus A when a fault occurs in  $f_1$

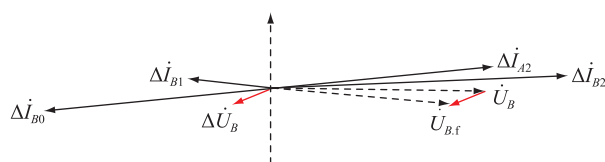


图4  $f_1$ 处故障时母线B处正序故障分量相量关系

Fig.4 The positive-sequence fault component phasors of bus B when a fault occurs in  $f_1$

电流为:

$$\begin{cases} \Delta \dot{I}_{A0} = \Delta \dot{U}_A / (Z_{s1} + Z_0) \\ \Delta \dot{I}_{A1} = \Delta \dot{U}_A / (Z_1 + Z_{11}) \\ \Delta \dot{I}_{A3} = \Delta \dot{U}_A / (Z_5 + Z_{13}) \\ \Delta \dot{I}_{A2} = -(\Delta \dot{I}_{A0} + \Delta \dot{I}_{A1} + \Delta \dot{I}_{A3}) \end{cases} \quad (1)$$

其中:

$$\Delta \dot{I}_{A2} = -\Delta \dot{U}_A \left( \frac{1}{Z_{s1} + Z_0} + \frac{1}{Z_1 + Z_{11}} + \frac{1}{Z_5 + Z_{13}} \right) \quad (2)$$

由此可得母线A处故障分量电压与电流的相位差为:

$$\begin{cases} \arg(\Delta \dot{U}_A / \Delta \dot{I}_{A0}) = \arg(Z_{s1} + Z_0) \\ \arg(\Delta \dot{U}_A / \Delta \dot{I}_{A1}) = \arg(Z_1 + Z_{11}) \\ \arg(\Delta \dot{U}_A / \Delta \dot{I}_{A3}) = \arg(Z_5 + Z_{13}) \\ \arg(\Delta \dot{U}_A / \Delta \dot{I}_{A2}) = \arg(-Z_T) \end{cases} \quad (3)$$

其中:

$$\begin{cases} Z_T = 1 / \left( \frac{1}{Z_{s1} + Z_0} + \frac{1}{Z_1 + Z_{11}} + \frac{1}{Z_5 + Z_{13}} \right) \\ \arg(-Z_T) = \arg Z_T + 180^\circ \end{cases} \quad (4)$$

在配电网中,馈线一般为架空线路或者电缆线路,其线路阻抗呈阻感性<sup>[19]</sup>,可知:

$$\begin{cases} 0^\circ < \arg(Z_{s1} + Z_0) < 90^\circ \\ 0^\circ < \arg(Z_1 + Z_{11}) < 90^\circ \\ 0^\circ < \arg(Z_5 + Z_{13}) < 90^\circ \\ 0^\circ < \arg Z_T < 90^\circ \end{cases} \quad (5)$$

由此可得母线A处的故障分量电压和电流相位差范围为:

$$\begin{cases} 0^\circ < \arg(\Delta \dot{U}_A / \Delta \dot{I}_{A0}) < 90^\circ \\ 0^\circ < \arg(\Delta \dot{U}_A / \Delta \dot{I}_{A1}) < 90^\circ \\ 180^\circ < \arg(\Delta \dot{U}_A / \Delta \dot{I}_{A2}) < 270^\circ \\ 0^\circ < \arg(\Delta \dot{U}_A / \Delta \dot{I}_{A3}) < 90^\circ \end{cases} \quad (6)$$

由图4可知,母线B处的故障分量电流为:

$$\begin{cases} \Delta \dot{I}_{B1} = \Delta \dot{U}_B / (Z_3 + Z_{S2}) \\ \Delta \dot{I}_{B2} = -\Delta \dot{U}_B \left( \frac{1}{Z_{B0}} + \frac{1}{Z_3 + Z_{S2}} \right) \\ \Delta \dot{I}_{B0} = \Delta \dot{U}_B / Z_{B0} \end{cases} \quad (7)$$

$$Z_{B0} = (Z_{S1} + Z_0) // (Z_1 + Z_{11}) // (Z_5 + Z_{13}) + Z_2 \quad (8)$$

由此可得母线B处故障分量电压与电流的相位差为:

$$\begin{cases} \arg(\Delta \dot{U}_B / \Delta \dot{I}_{B1}) = \arg(Z_3 + Z_{S2}) \\ \arg(\Delta \dot{U}_B / \Delta \dot{I}_{B2}) = \arg\left[1 / \left(\frac{1}{Z_{B0}} + \frac{1}{Z_3 + Z_{S2}}\right)\right] + 180^\circ \\ \arg(\Delta \dot{U}_B / \Delta \dot{I}_{B0}) = \arg Z_{B0} \end{cases} \quad (9)$$

同理可得,母线B处的故障分量电压和电流相位差范围为:

$$\begin{cases} 0^\circ < \arg(\Delta \dot{U}_B / \Delta \dot{I}_{B0}) < 90^\circ \\ 0^\circ < \arg(\Delta \dot{U}_B / \Delta \dot{I}_{B1}) < 90^\circ \\ 180^\circ < \arg(\Delta \dot{U}_B / \Delta \dot{I}_{B2}) < 270^\circ \end{cases} \quad (10)$$

若高阻接地故障发生在 $f_2$ 处,该配电网的正序故障附加网络见图5。其中, $Z_{1f}$ 、 $Z_{2f}$ 分别为故障点 $f_2$ 上游与下游的线路等效正序阻抗。母线A处的故障分量电压、电流相量关系与图3相似,故障分量电压和电流间的相位关系也满足式(6),故不再叙述。

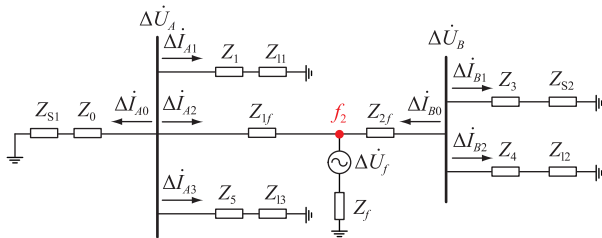


图5  $f_2$ 处故障时的正序故障附加网络

Fig.5 The additional positive sequence fault network when a fault occurs in  $f_2$

由图5可知,母线B处的故障分量电流满足:

$$\begin{cases} \Delta \dot{I}_{B1} = \Delta \dot{U}_B / (Z_3 + Z_{S2}) \\ \Delta \dot{I}_{B2} = \Delta \dot{U}_B / (Z_4 + Z_{12}) \\ \Delta \dot{I}_{B0} = -(\Delta \dot{I}_{B1} + \Delta \dot{I}_{B2}) \end{cases} \quad (11)$$

可得母线B处的正序故障分量电压、电流相量关系如图6所示。

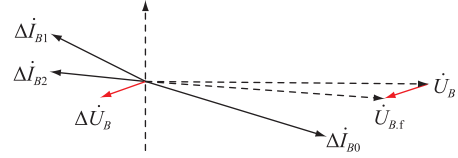


图6  $f_2$ 处故障时母线B处正序故障分量相量关系

Fig.6 The positive-sequence fault component phasors of bus B when a fault occurs in  $f_2$

母线B处故障分量电压和电流相位差范围为:

$$\begin{cases} 0^\circ < \arg(\Delta \dot{U}_B / \Delta \dot{I}_{B1}) < 90^\circ \\ 0^\circ < \arg(\Delta \dot{U}_B / \Delta \dot{I}_{B2}) < 90^\circ \\ 180^\circ < \arg(\Delta \dot{U}_B / \Delta \dot{I}_{B0}) < 270^\circ \end{cases} \quad (12)$$

综上所述,配电网内部发生高阻接地故障时,故障馈线所在母线的故障分量电压与该馈线故障分量电流的相位差都为 $180^\circ \sim 270^\circ$ ,与非故障馈线有明显的区别。利用该故障特征能准确地判断出故障馈线。

## 2 基于故障分量的高阻接地故障检测方法

### 2.1 故障特征分析

当配电网发生高阻接地故障时,母线正序电压故障分量与其相连接的各馈线正序电流故障分量间的相位关系具有明显的差异性,总结如下。

(1) 单端馈线发生故障。假设母线电压与单端馈线电流的正序故障分量间的相位差为 $\varphi_0$ ,当单端馈线上发生故障时,其取值范围为:

$$180^\circ < \varphi_0 < 270^\circ \quad (13)$$

未发生故障的单端馈线, $\varphi_0$ 的取值范围为:

$$0^\circ < \varphi_0 < 90^\circ \quad (14)$$

(2) 双端馈线发生故障。假设双端馈线两端的母线电压与馈线电流正序故障分量间的相位差分别为 $\varphi_1$ 与 $\varphi_2$ ,当双端馈线上发生故障时,其取值范围为:

$$\begin{cases} 180^\circ < \varphi_1 < 270^\circ \\ 180^\circ < \varphi_2 < 270^\circ \end{cases} \quad (15)$$

未发生故障的双端馈线,则有:

$$\begin{cases} 180^\circ < \varphi_1 < 270^\circ \\ 0^\circ < \varphi_2 < 90^\circ \end{cases} \quad (16)$$

### 2.2 故障定位判据

综上所述,配电网高阻接地故障的判据为启动判据和故障馈线判据。

#### 2.2.1 启动判据

正序分量主要受负荷影响,同时由于单相负

荷,尤其是分支馈线的存在,导致大多数配电网系统都是不平衡的。由于配电网系统的不平衡问题,负序分量通常在配电网正常运行条件下也存在,会导致基于序分量原理的故障检测方案的误操作。而当配电网中出现高阻故障时,故障前后电流和电压特征变化不明显,同时故障电流没有充分大于额定负载电流,因此基于序分量原理的故障启动判据的可靠性降低。为了克服这些问题,文中将故障分量引入启动判据的制定中,提出如下的启动判据:

$$R = F_i / F_n > R_{SET} \quad (17)$$

其中,

$$\begin{cases} F_i = (\Delta I_0 + \Delta I_2) / \Delta I_1 \\ F_n = (I_0 + I_2) / I_1 \end{cases} \quad (18)$$

式中: $R_{SET}$ 为启动判据设定值; $\Delta I_0$ ,  $\Delta I_2$ ,  $\Delta I_1$ 分别为馈线的零序、负序、正序电流故障分量有效值; $I_0$ ,  $I_2$ ,  $I_1$ 分别为馈线的零序、负序、正序电流有效值。

配电网固有的不平衡性导致  $F_n$  的值不为零。在正常情况下,系统不平衡度不是很大,通常小于 20%<sup>[20]</sup>。而当配电网系统发生低阻故障时, $F_n$  的值变化显著。因此,利用  $F_n$  来区分系统不平衡和发生低阻故障是一种有效方式。当配电网系统发生高阻故障时,零序分量值和负序分量值不一定大于其在正常运行条件下的值。因此,为了提高启动判据的可靠性,把故障分量以  $F_i$  的形式引入到启动判据  $R$  的制定之中。该启动判据反应了序分量从正常运行状态到故障状态的变化关系,对网络不平衡的敏感度低,可以有效用于高阻故障检测<sup>[21]</sup>。此外,在实际配电网中,存在系统中无故障但负载有变化的情况,而三相负载的变化通常是同步发生的,并不会出现额外的负序分量和零序分量。因此,所提出的启动判据式(17)不会误启动。

### 2.2.2 故障馈线判据

考虑到实际的测量误差等因素,对式(13)、式(15)给定一个 30° 的相角冗余度,由此得到配电网发生高阻接地故障时的故障判据。

(1) 单端馈线。馈线的电压、电流正序故障分量的相位差  $\varphi_0$  取值范围为:

$$150^\circ < \varphi_0 < 300^\circ \quad (19)$$

(2) 双端馈线。馈线两端的电压、电流正序故障分量的相位角  $\varphi_1$  与  $\varphi_2$  的取值范围为:

$$\begin{cases} 150^\circ < \varphi_1 < 300^\circ \\ 150^\circ < \varphi_2 < 300^\circ \end{cases} \quad (20)$$

### 2.3 故障检测方案流程

文中提出的配电网高阻接地故障检测方案流程如图 7 所示。

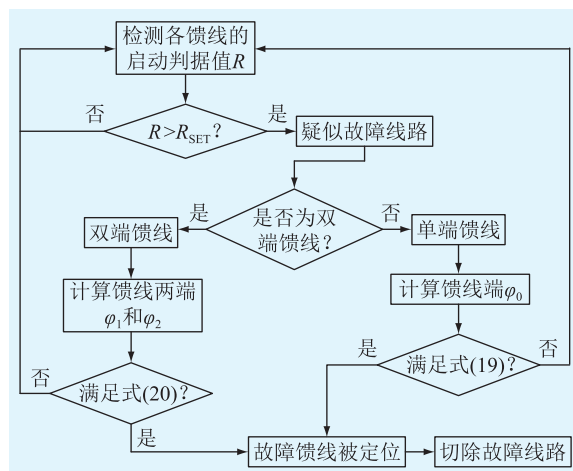


图 7 配电网高阻接地故障检测流程

Fig.7 Flow chart of high impedance grounding faults detection for distribution network

基本过程叙述如下:

(1) 计算配电网内部各馈线的启动判据  $R$ , 当满足判据式(17)时,判定该馈线为疑似故障馈线。

(2) 检测疑似故障馈线的相位差变化情况。当满足故障馈线判据式(19)时,故障发生在该单端馈线;当满足故障馈线判据式(20)时,故障发生在该双端馈线。

(3) 故障定位,切除故障馈线。

从上述判据及故障检测流程可知,在故障判据的推导中引入了大量的冗余,故障检测判据不是一个固定值,而是相位区间。为了准确定位故障线路,在完成对馈线电压、电流正序故障分量的相位差值的计算后,将相位差与故障检测判据进行比较。故障检测判据的比较结果用逻辑值“是”或“否”表示。对于故障馈线,逻辑值为“是”;对于非故障馈线,逻辑值为“否”。因此,在整个故障定位与故障切除过程中只需要传送逻辑值,即使存在通信延迟,也不会影响故障定位的结果。

对于双端馈线的定位与切除,必须满足式(20)的要求,因此,双端馈线需要通信,实现  $\varphi_1$  和  $\varphi_2$  的协同。而对于单端馈线的定位与切除,只需满足式(19)的要求,没有必要与其他相位差信息进行比较,不需要通信。同时,只有连接到同一母线的馈线的相量测量信息需要同步,不同母线之间的相量测量信息不需要同步。

### 3 算例仿真与分析

为了提取故障时各母线电压及各馈线电流的故障分量特征量,基于 PSCAD/EMTDC 的仿真环境,搭建了如图 8 所示的 10 kV 配电网的仿真模型。



该配电网采用双端电源供电,电源1和电源2通过降压变压器接入到配电网,变压器1和变压器2的变比分别为220 kV/10 kV和35 kV/10 kV。共包含6条母线,13条架空线路,线路采用分布式参数模型,架空线路 $T_0 \sim T_{13}$ 的长度如图8所示。

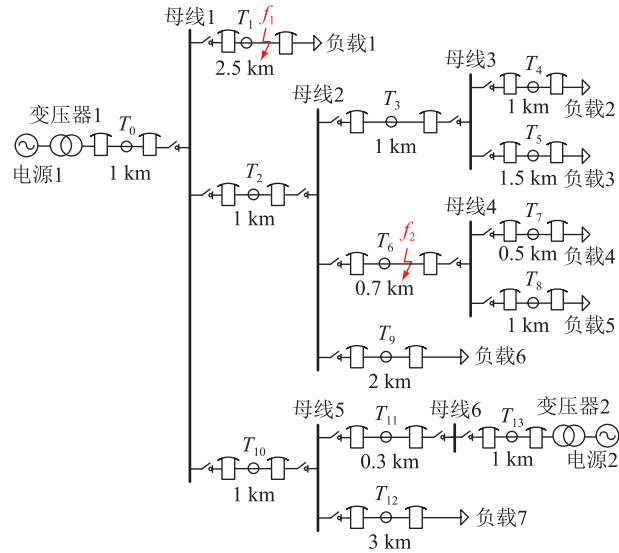


图8 配电网仿真模型

Fig.8 Simulation model of distribution network

选取 $f_1, f_2$  2个故障点进行故障分析,其中 $f_1$ 发生在单端馈线 $T_1$ 上,故障点距首端1.5 km; $f_2$ 发生在双端馈线 $T_6$ 内,故障点距首端0.4 km。 $f_1, f_2$ 均为100  $\Omega$ 的高阻接地故障。其中, $f_1$ 处为A、B相接地故障, $f_2$ 处为A相接地故障。

### 3.1 $f_1$ 处故障

当 $f_1$ 处发生高阻接地故障时,各母线和馈线处的正序故障分量电流、电压相位信息如表1所示。其中, $\varphi_U$ 为母线电压故障分量的相位角; $\varphi_I$ 为该母线上各馈线电流故障分量的相位角; $\varphi$ 为电压与电流故障分量的相位差。

由表1可知,母线1上单端馈线 $T_1$ 的电压和电流故障分量相位差为200.33°,满足故障单端馈线判据式(19),其他单端馈线 $T_4, T_5, T_7, T_8, T_9, T_{13}, T_{12}$ 的相位差不满足故障单端馈线判据;双端馈线 $T_2, T_3, T_6, T_{10}, T_{11}$ 都只有一端的电压和电流故障分量相位差在150°~300°之间,不满足故障双端馈线判据。综上,根据故障判据以及文中制定的配电网高阻接地故障检测流程,可将故障直接定位在馈线 $T_1$ 。

### 3.2 $f_2$ 处故障

当 $f_2$ 处发生高阻接地故障时,各母线和馈线处的正序故障分量电流、电压相位信息如表2所示。

由表2可知,母线2和母线4间的双端馈线 $T_6$ 两端的电压和电流故障分量相位差分别为225.41°

表1  $f_1$ 处故障时的正序故障分量相位信息

Table 1 Phase difference information of positive-sequence fault components when a fault occurs in  $f_1$

母线	$\Delta\varphi_U/(\circ)$	馈线	$\varphi_I/(\circ)$	$\varphi/(\circ)$
母线1	139.16	$T_0$	134.72	4.44
		$T_1$	-61.17	200.33
		$T_2$	135.57	3.59
		$T_{10}$	104.54	34.62
母线2	137.73	$T_2$	-44.44	182.17
		$T_3$	135.46	1.87
		$T_6$	135.57	2.16
		$T_9$	135.75	1.98
母线3	137.27	$T_3$	-44.44	181.71
		$T_4$	135.56	1.71
		$T_5$	135.54	1.73
		$T_6$	-44.44	181.71
母线4	137.27	$T_7$	135.56	1.71
		$T_8$	135.54	1.73
		$T_{10}$	-75.46	192.51
		$T_{12}$	114.80	2.25
母线5	117.05	$T_{11}$	81.76	35.29
		$T_{12}$	114.80	2.25
		$T_{13}$	81.77	29.58
母线6	111.35	$T_{11}$	-98.24	209.59
		$T_{12}$	114.80	2.25
		$T_{13}$	81.77	29.58

表2  $f_2$ 处故障时的正序故障分量相位信息

Table 2 Phase difference information of positive-sequence fault components when a fault occurs in  $f_2$

母线	$\Delta\varphi_U/(\circ)$	馈线	$\varphi_I/(\circ)$	$\varphi/(\circ)$
母线1	136.5	$T_0$	132.06	4.44
		$T_1$	134.38	2.12
		$T_2$	-64.29	200.79
		$T_{10}$	105.16	31.34
母线2	162.35	$T_2$	115.71	46.64
		$T_3$	160.07	2.28
		$T_6$	-63.06	225.41
		$T_9$	160.37	1.98
母线3	114.17	$T_3$	-110.73	224.90
		$T_4$	111.82	2.35
		$T_5$	111.91	2.26
		$T_6$	-11.94	181.71
母线4	169.77	$T_7$	168.06	1.71
		$T_8$	168.06	1.71
		$T_{10}$	-67.56	182.02
		$T_{11}$	78.89	37.57
母线5	111.46	$T_{12}$	135.56	-24.10
		$T_{11}$	-101.11	209.58
		$T_{13}$	78.88	29.59

和181.71°,满足故障双端馈线判据式(20),其他馈

线则不满足,故  $T_0$  被判定为故障馈线。

#### 4 结语

文中针对配电网的高阻接地故障检测问题,分析了中压配电网内部发生高阻故障时母线正序电压故障分量与馈线正序电流故障分量的相位差特征信息。基于该相位差特征,提出一种新的故障检测判据,结合所提故障启动判据,制定了一种配电网高阻接地故障检测方法。该方法具有以下优势:

(1) 电压、电流的故障分量是稳态特征量,计算量小、容易得到。

(2) 母线电压故障分量与馈线电流故障分量间的相位关系与系统电势无关,且不受故障点过渡电阻的影响,特别适用于配电网高阻接地故障检测。

(3) 对负载变化不敏感,有效适用于含有较多分支馈线的配电网。

本文得到南方电网数字电网研究院有限公司科技项目(670000KK52200091)资助,谨此致谢!

#### 参考文献:

[1] 刘健,张小庆,申巍,等. 中性点非有效接地配电网的单相接地定位能力测试技术[J]. 电力系统自动化,2018,42(1):138-143.  
LIU Jian,ZHANG Xiaoqing,SHEN Wei,et al. Performance testing of single phase to earth fault location for distribution network with neutral point non-effectively grounded systems[J]. Automation of Electric Power Systems,2018,42(1):138-143.

[2] 雷杨,杨帆,汪洋,等. 基于双模功能的配电网单相接地故障灵活处理策略[J]. 供用电,2020,37(8):60-67.  
LEI Yang,YANG Fan,WANG Yang,et al. The flexible strategy of single phase grounding fault in distribution network based on dual mode function[J]. Distribution & Utilization,2020,37(8):60-67.

[3] 白浩,李鹏,袁智勇,等. 人工智能在配电网高阻接地故障检测中的应用及展望[J]. 南方电网技术,2019,13(2):34-44.  
BAI Hao,LI Peng,YUAN Zhiyong,et al. Application and prospect of artificial intelligence in high impedance fault detection of distribution network[J]. Southern Power System Technology,2019,13(2):34-44.

[4] MORTAZAVI S H,MORAVEJ Z,SHAHRTASH S M. A searching based method for locating high impedance arcing fault in distribution networks[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2019,34(2):438-447.

[5] 庄胜斌,缪希仁,江灏,等. 基于改进欧氏-动态时间弯曲距离的谐振接地配电网单相高阻接地故障选线方法[J]. 电网技术,2020,44(1):273-281.  
ZHUANG Shengbin,MIAO Xiren,JIANG Hao,et al. A line selection method for single-phase high-impedance grounding fault in resonant grounding system of distribution network based on improved euclidean-dynamic time warping distance[J]. Power

System Technology,2020,44(1):273-281.

[6] 戴莹,王建平,张崇巍. 基于城市配电网的无线自组传感器网络结构研究[J]. 电子测量与仪器学报,2012,26(10):864-869.  
DAI Ying,WANG Jianping,ZHANG Chongwei. Research of wireless ad hoc sensor network communication topology based on power distribution network[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument,2012,26(10):864-869.

[7] 周蓝波,王圣元,王彦虹. 基于暂态方向和间歇性检测算法的间歇性高阻接地故障检测[J]. 水电能源科学,2016,34(12):194-197,131.  
ZHOU Lanbo,WANG Shengyuan,WANG Yanhong. Intermittent high resistance grounded fault detection method based on transient direction and intermittent detection algorithm[J]. Water Resources and Power,2016,34(12):194-197,131.

[8] 龙毅,欧阳金鑫,熊小伏,等. 基于零序功率变化量的配电网单相高阻接地保护[J]. 电工技术学报,2019,34(17):3687-3695.  
LONG Yi,OUYANG Jinxin,XIONG Xiaofu,et al. Protection principle of single-phase high resistance fault for distribution network based on zero-sequence power variation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2019,34(17):3687-3695.

[9] 王鹏,冯光,韦延方,等. 10 kV 配电网的接地故障测试述评及真型实验场设计[J]. 电力系统保护与控制,2020,48(11):178-187.  
WANG Peng,FENG Guang,WEI Yanfang,et al. Review of grounding fault testing and design of real experiment field for 10 kV distribution network[J]. Power System Protection and Control,2020,48(11):178-187.

[10] 魏曜,张尧,张勇刚,等. 一起高阻接地故障时线路差动保护拒动的分析及其改进研究[J]. 电力系统保护与控制,2014,42(2):127-131.  
WEI Yao,ZHANG Yao,ZHANG Yonggang,et al. An analysis and improvement of refusal-operation of line differential protection in high resistance grounding fault[J]. Power System Protection and Control,2014,42(2):127-131.

[11] 李欣唐,员志皓,孟昭勇. 一种适于高阻接地短路的故障测距新算法[J]. 电力自动化设备,2000,20(4):15-18.  
LI Xintang,YUN Zhihao,MENG Zhaoyong. A new algorithm of fault allocation for high impedance grounding[J]. Electric Power Automation Equipment,2000,20(4):15-18.

[12] 周封,朱瑞,王晨光,等. 一种配电网高阻接地故障在线监测与辨识方法[J]. 仪器仪表学报,2015,36(3):685-693.  
ZHOU Feng,ZHU Rui,WANG Chenguang,et al. Online criterion and identification of single-phase ground fault with high resistance in distribution network[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument,2015,36(3):685-693.

[13] 耿建昭,王宾,董新洲,等. 中性点有效接地配电网高阻接地故障特征分析及检测[J]. 电力系统自动化,2013,37(16):85-91.  
GENG Jianzhao,WANG Bin,DONG Xinzhou,et al. Analysis

- and detection of high impedance grounding fault in neutral point effectively grounding distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(16): 85-91.
- [14] 王宾, 耿建昭, 董新洲. 配网高阻接地故障伏安特性分析及检测[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(22): 3815-3823.  
WANG Bin, GENG Jianzhao, DONG Xinzhou. Analysis and detection of volt-ampere characteristics for high impedance faults in distribution systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(22): 3815-3823.
- [15] VICO J, ADAMIAK M, WESTER C, et al. High impedance fault detection on rural electric distribution systems[C]//2010 IEEE Rural Electric Power Conference (REPC). Orlando, FL, USA. IEEE, 2010: B3.
- [16] 梅睿, 程孟晗, 管廷龙, 等. 基于电流波形聚类的谐振接地系统高阻接地故障定位方法[J]. 供用电, 2020, 37(5): 36-41.  
MEI Rui, CHENG Menghan, GUAN Tinglong, et al. High-resistance grounding fault location method for resonance grounding system based on current waveform clustering[J]. Distribution & Utilization, 2020, 37(5): 36-41.
- [17] LIANG Z W, MU L H, ZHANG F, et al. The fault detection method of islanded microgrid with the V/f controlled distributed generation[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2019, 112: 28-35.
- [18] ZHANG F, MU L H, GUO W M. An integrated wide-area protection scheme for active distribution networks based on fault components principle[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(1): 392-402.
- [19] 马添翼, 金新民, 梁建钢. 孤岛模式微电网变流器的复合式虚拟阻抗控制策略[J]. 电工技术学报, 2013, 28(12): 304-312.  
MA Tianyi, JIN Xinmin, LIANG Jian'gang. Multiple virtual impedance control method of micro-grid converter under island mode[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(12): 304-312.
- [20] LEE C Y. Effects of unbalanced voltage on the operation performance of a three-phase induction motor[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1999, 14(2): 202-208.
- [21] ZAMANI M A, YAZDANI A, SIDHU T S. A communication-assisted protection strategy for inverter-based medium-voltage microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(4): 2088-2099.

作者简介:



张凡

张凡(1990),男,博士,工程师,从事电力系统控制与保护、智能电网技术等相关工作(E-mail: zhangfan1@csg.cn);

牟龙华(1963),男,博士,教授,博士生导师,研究方向为电力系统继电保护、分布式发电与微电网以及电能质量;

陈浩敏(1977),男,硕士,高级工程师,从事智能电网、电力系统保护等相关工作。

## High impedance grounding fault detection for distribution networks based on fault component principle

ZHANG Fan<sup>1</sup>, MU Longhua<sup>2</sup>, CHEN Haomin<sup>1</sup>, YU Li<sup>1</sup>, YAO Senjing<sup>1</sup>

(1. Digital Grid Research Institute, CSG, Guangzhou 510670, China;

2. Department of Electrical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

**Abstract:** The short-circuit current value of distribution network is small when high impedance grounding faults (HIGFs) occur, which cannot be detected tripped by the traditional over-current protection devices. If short-circuit cannot be tripped in time, it will lead to serious results. To solve the above problems, the fault components of microgrid in the operating conditions of HIGFs are analyzed. The phase differences characteristics between positive-sequence fault component of bus voltage and positive-sequence current fault components in the feeders are explained in detail. And based on the phase differences characteristics, the fault criterion for HIGFs in distribution network is proposed. Meanwhile, to overcome those problems caused by the imbalanced distribution network, the starting criterion is proposed. Based on the above fault criterion and the starting criterion, the new fault detection method is proposed. Finally, a medium distribution with the model of overhead lines is established in PSCAD/EMTDC, and simulation results verify the correctness of the fault detection method.

**Keywords:** distribution network; high impedance grounding faults; short-circuit current; fault detection; fault component; fault criterion

(编辑 陆海霞)