

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.240927

## 基于注入扰动电流响应特征的主动式故障性质判别方法

王晓卫<sup>1</sup>, 岳阳<sup>1</sup>, 张帆<sup>1</sup>, 王毅钊<sup>2</sup>, 张志华<sup>2</sup>

(1. 西安理工大学电气工程学院, 陕西 西安 710054; 2. 国网陕西省电力公司电力科学研究院, 陕西 西安 710199)

**摘要:** 针对配电网相间短路后盲目重合于永久性故障导致系统遭受二次冲击, 且保护跳开后自适应重合闸缺少可用有效信息的问题, 提出一种利用外接电源注入扰动电流信号, 通过其响应特征差异实现对故障性质可靠识别的方法。短路故障发生后, 利用外接电源注入低频扰动电流, 提取稳态扰动电压波形数据。若为瞬时性故障, 线路间为电容模型。若为永久性故障, 故障相间存在过渡电阻, 线路不符合电容模型。故注入扰动信号在不同故障时响应特征存在明显差异, 利用该差异构造判据。提出基于曼哈顿距离算法和能量相对熵算法表征的故障性质识别判据, 并构造附加判据进一步识别永久性故障和注入信号时故障已消失的情况, 克服主动式故障辨识方法应对故障随机性不足的问题。PSCAD/EMTDC 仿真结果表明, 所提方法具有较高的灵敏度和可靠性。

**关键词:** 配电网; 注入法; 能量相对熵; 重合闸; 相间故障

### Active fault property discrimination method based on injected disturbance current response characteristics

WANG Xiaowei<sup>1</sup>, YUE Yang<sup>1</sup>, ZHANG Fan<sup>1</sup>, WANG Yizhao<sup>2</sup>, ZHANG Zhihua<sup>2</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710054, China;

2. State Grid Shaanxi Electric Power Research Institute, Xi'an 710199, China)

**Abstract:** This paper proposes a method for reliably identifying fault nature by injecting disturbance current signals using an external power source, to address the issues of blind reclosing after inter-phase short circuits in distribution networks, which may lead to secondary impact on the system, and the lack of available effective information in adaptive reclosing after protection tripping. After a short circuit fault occurrence, an external power supply injects a low-frequency disturbance current and steady-state disturbance voltage waveform data are extracted. If it is a temporary fault, the inter-line relationship conforms to a capacitive model. If it is a permanent fault, the fault phases exhibit a transition resistance, deviating from the capacitance model. Therefore, the response characteristics of the injected disturbance signal differ significantly between different fault types, thus forming the identification criterion using the difference. This paper introduces a fault property identification criterion based on the Manhattan distance algorithm and the energy relative entropy algorithm. Additionally, an auxiliary criterion is established to further differentiate between permanent faults and cases where faults disappear during signal injection. This approach overcomes the limitations of active fault identification methods in handling fault randomness. PSCAD/EMTDC simulation results show the proposed method has high sensitivity and reliability.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52177114 and No. 61403127).

**Key words:** distribution network; injection method; energy relative entropy; reclosing; inter-phase fault

## 0 引言

国家发改委、国家能源局 2024 年 02 月 06 日印

基金项目: 国家自然科学基金项目资助 (52177114, 61403127);  
国网陕西省电力有限公司科技项目资助 (5226KY23001U)

发的《关于新形势下配电网高质量发展的指导意见》中明确指出: 坚持安全供电, 增强保障能力。将保障电力安全可靠供应作为首要任务, 适当提高设防标准, 协同提升重要用户应急保障水平, 夯实本质安全基础。对提升配电网的安全、稳定运行, 保障用户安全、可靠供电提出了更高的要求。为了提高

配电网供电可靠性, 通常会在变电站出线位置配置三相重合闸装置, 以期实现瞬时性故障快速恢复供电<sup>[1-3]</sup>。但通常重合闸装置不具备故障性质识别功能, 当系统发生永久性故障时, 盲目进行重合闸操作, 可能会导致系统遭受过电流的冲击, 使得电力设备面临损坏的风险, 影响配电网安全、稳定运行<sup>[4-5]</sup>。可见, 在重合闸装置动作之前, 增加故障性质判别环节尤为重要, 根据故障性质的识别结果, 制定故障恢复策略, 是确保配网免受短路电流二次冲击、系统安全稳定运行的前提条件<sup>[6-7]</sup>。

由于线路短路故障后断路器跳闸, 因此, 缺少用于故障性质判别的可用信息, 给自适应重合闸研究带来困难<sup>[8-9]</sup>。近些年, 随着新型配电网的发展, 分布式电源、有源逆变装置等不断接入配电网, 通过主动注入信号增加故障信息, 给自适应重合闸研究提供了新的思路。

目前, 国内外学者针对高压输电线路的注入式自适应重合闸的相关研究较多<sup>[10-14]</sup>, 而针对中压配电网注入式自适应重合闸的研究还相对较少<sup>[15-19]</sup>。关于主动式的故障性质判别方法主要分为利用电容的储能放电特征作为电源设备向配网注入信号、外接附加装置注入探测信号两种方式。通过储能电容实现特征信号注入, 由于电容放电的指数性衰减特性, 电容接入初期电流特征明显, 但在很短的时间内能量值快速衰减, 可能导致算法失效<sup>[15]</sup>。而利用外接附加装置注入特征信号的方式, 不仅能够为故障性质检测提供稳定、可靠的故障信息, 而且由于其输出信号具有高度可控性, 能够按照需求选择注入合适的信号类型、频率、幅值以及注入时间等特征, 无疑丰富了故障信息, 具有一定优势<sup>[16-17]</sup>。

文献[15]基于预充电电容投切至相间回路, 利用电容在各个相间放电电流的衰减特性的差异识别故障相和故障性质, 但其需要对电容进行多轮充放电操作, 且存在将三相故障误判为无故障的风险; 文献[16]利用外接扰动装置通过分相开关多次注入扰动电压信号, 然后基于 Hausdorff 距离算法分析不同相间扰动电流波形的差异性, 构造故障性质识别判据。文献[17]提出一种配电线路三相自适应重合闸方法, 通过在配变侧接入逆变电源, 给故障线路施加瞬时高压, 根据其响应的暂态量计算谐波阻抗, 对线路参数进行辨识, 进而完成故障性质判别。文献[18]基于瞬时性故障下线路为电容模型, 永久性故障下不符合电容模型, 提出一种利用分相开关重合其中一相进行探测的故障性质辨识方法, 但存在重载长线路末端故障可能发生误判的风险。文献[19]针对不带并联电抗器线路故障性质判别困难的

问题, 提出利用线路电压互感器二次侧注入电压信号的响应特征来判断线路绝缘状态的方法, 实现故障性质判别。

针对上述分析, 本文提出一种利用注入扰动电流信号响应特性差异的主动式故障性质辨识方法。当发生短路故障时, 首先根据三相电流变化情况确定故障相, 经过一定的延时释放掉线路残余电流后, 通过外接电源由故障相间注入低频扰动电流; 其次, 利用曼哈顿距离算法和能量相对熵算法对故障相间扰动电压信号波形差异进行提取, 构造短路故障性质辨识判据; 此外, 基于附加判据进一步识别永久性故障和注入信号时故障已消失的情况。最后, 通过 PSCAD/EMTDC 验证了本文方法的有效性, 多种仿真工况结果表明, 所提方法灵敏度高、可靠性好, 且受采集数据丢失的影响小。

### 1 含扰动信号的响应特征分析

利用图 1 所示的仿真模型验证本文所提注入扰动信号的故障性质判别方法。图 1 中, 扰动信号主要依赖于外接单相逆变电源, 由单相逆变电源产生恒流信号, 通过分相开关  $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$ 、 $S_4$  的切换, 实现扰动电流的准确注入。开关  $S_1$ — $S_4$  的控制策略如表 1 所示。

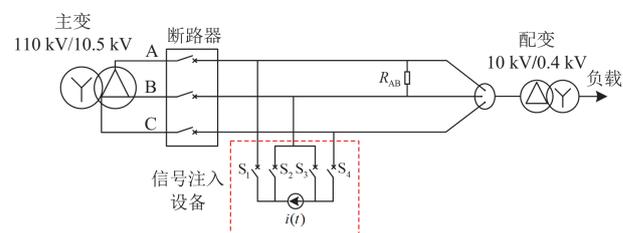


图 1 扰动信号注入电路

Fig. 1 Disturbance signal injection circuit

表 1 信号注入开关控制策略

Table 1 Signal injection switch control strategy

注入相	闭合开关
AB	$S_1$ 、 $S_3$
BC	$S_2$ 、 $S_4$
CA	$S_1$ 、 $S_4$

配电网发生相间故障后, 基于主动扰动信号的故障性质判别方法具体步骤如下:

- 1) 当检测到系统发生故障后, 故障线路的首端断路器跳闸, 切除故障;
- 2) 根据检测到的故障线路三相电流结果, 确定故障回路;
- 3) 延时 200 ms, 待故障线路释放掉残余电气

量,按照表 1 的控制策略控制分相开关,由故障相间注入扰动电流,检测故障相间扰动电压信息;

4) 对采集到的故障相间电压信息进行分析,依据相间扰动电压响应特性判断故障性质。

以 AB 相间发生短路故障为例,推导扰动电流信号注入后故障线路等值网络拓扑,分析瞬时性故障与永久性故障时注入扰动电流的响应特征差异。断路器跳闸后注入扰动电流的故障线路相间等值网络如图 2 所示。

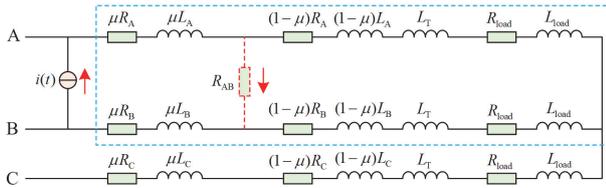


图 2 扰动信号注入的等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit of perturbation signal injection

图 2 中,断路器跳闸,故障线路相当于线性无源二端口网络,选择故障相间回路分析其端口响应特性。图中: $i(t)$  为单相逆变器等效恒流源注入的扰动电流; $R_A$ 、 $R_B$ 、 $R_C$  为线路等效电阻; $L_A$ 、 $L_B$ 、 $L_C$  为线路等效电感,且  $R_A = R_B = R_C$ ,  $L_A = L_B = L_C$ ;  $\mu$  为母线到故障点的距离与整条线路长度的比值; $L_T$  为配电变压器的等效电感; $R_{load}$ 、 $L_{load}$  分别为配电路径负载等效电阻、电感; $R_{AB}$  为相间故障电阻。

### 1.1 故障特征分析

#### 1) 故障持续阶段

如图 2 所示,发生 AB 相间短路故障后,由于过渡电阻  $R_{AB}$  的存在,线路原有参数和结构发生变化,此时注入扰动电流也会产生不同的响应。为了便于分析,将图 2 所示 AB 相间故障持续阶段等效为图 3。将图 3 电路进一步简化为图 4 所示电路。

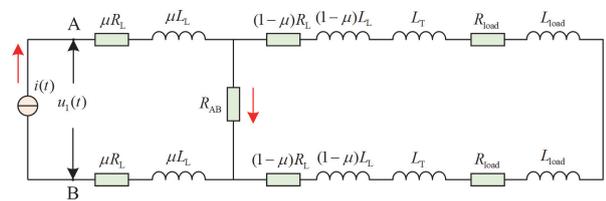


图 3 故障持续阶段等效电路

Fig. 3 Equivalent circuit of fault duration stage

图 3 中,线路自电阻用  $R_L$  代替,线路自电感用  $L_L$  代替。

由图 4 可知,注入扰动电流后,在故障持续阶段,AB 故障相间的等值阻抗  $Z_{1eq}$  为

$$Z_{1eq} = 2\mu(R_L + j\omega L_L) + \frac{2R_{AB}[R_{load} + R_L(1-\mu) + j\omega(L_L + L_{load} + (1-\mu)L_L)]}{R_{AB} + 2R_{load} + 2R_L(1-\mu) + 2j\omega(L_L + L_{load} + (1-\mu)L_L)} \quad (1)$$

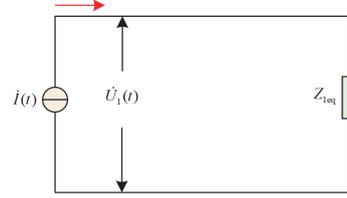


图 4 故障持续阶段简化电路

Fig. 4 Simplified circuit of fault duration stage

进一步计算得到扰动电流在故障相间产生的扰动电压  $\dot{U}_1(t)$  为

$$\dot{U}_1(t) = \dot{I}(t) \cdot Z_{1eq} \quad (2)$$

式中,  $\dot{I}(t)$  为等效电路注入的扰动电流。

#### 2) 故障消失阶段

由图 2 可知,若发生瞬时性故障,故障消失后 AB 相间等效电路如图 5 所示。此时,扰动电流从 AB 相注入,在 AB 相间产生的电压扰动响应与故障时存在明显差异。

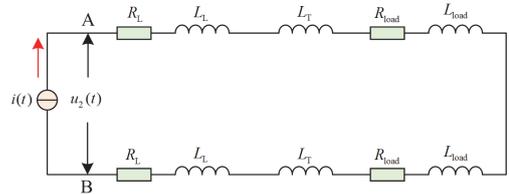


图 5 无故障阶段等效电路

Fig. 5 Equivalent circuit in the non-fault stage

进一步得到简化等效电路如图 6 所示。

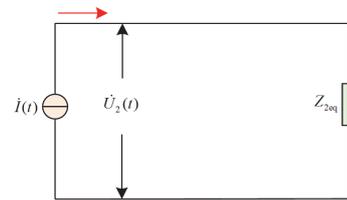


图 6 无故障阶段简化电路

Fig. 6 Simplified circuit in non-fault phase

由图 6 得到故障消失后相间回路等值阻抗  $Z_{2eq}$  为

$$Z_{2eq} = 2[R_L + L_L + R_{load} + j\omega(L_T + L_{load})] \quad (3)$$

此时,注入相同的扰动电流,AB 相间所产生的扰动电压  $\dot{U}_2(t)$  为

$$\dot{U}_2(t) = \dot{I}(t) \cdot Z_{2eq} \quad (4)$$

由式(1)和式(3)可知, 当发生相间短路故障时, 永久性故障由于过渡电阻的存在, 相间等值阻抗与无故障阶段相间阻抗存在明显差异。此时, 给相间回路施加相同的扰动电流, 扰动电压呈现出不同的响应特性, 结果如式(2)和式(4)所示。因此, 可以基于扰动电压的差异构建相间故障性质判别方法。

## 1.2 注入信号的特征选取

### 1) 幅值

注入信号幅值的选择主要基于配电线路电压互感器的测量精度以及注入装置输出功率两方面考虑。若注入信号幅值过小, 则互感器无法测量到注入信号, 影响故障性质判别; 理论上, 注入信号强度越大, 故障持续阶段与无故障阶段相间电压差异越明显, 越有利于故障性质判别方法的应用<sup>[20]</sup>。但是一方面, 注入电流越大, 所需单相逆变器输出功率越大, 成本越高<sup>[21]</sup>; 另一方面, 无限增大注入电流幅值有可能造成相间绝缘击穿, 使得瞬时性故障发展成为永久性故障<sup>[22]</sup>。综合考虑, 本文选取注入信号电流幅值为 20 A, 以满足互感器测量精度和单相逆变器输出功率的要求。

### 2) 频率

注入电流频率的选择会对本文故障性质判别方法产生较大影响, 是故障性质判决的关键因素。配电网正常运行时, 线路等效为电容模型, 而发生相间短路故障时, 由于过渡电阻的存在, 线路不再符合电容模型。在电容模型下, 扰动电压  $U_d$  表达式为

$$U_d = \frac{I_d}{j\omega_d C} \quad (5)$$

式中:  $I_d$  为注入扰动电流的大小;  $\omega_d$  为注入信号的角频率;  $C$  为故障线路相间等效电容。

由式(5)可知, 扰动电压的大小受注入扰动电流大小和频率的影响, 注入扰动电流幅值越大、频率越小, 则相间扰动电压响应越明显, 越有利于故障性质判别。而注入扰动电流幅值受注入装置的输出功率的限制, 不宜过大<sup>[23]</sup>, 出于降低成本的考虑, 故可以降低注入扰动电流的频率, 提升相间扰动电压的响应特征。

若扰动电流信号频率过低, 则扰动电压周期过长, 所需信号的采样时间就越长, 不利于快速恢复供电。参考文献[24], 本文选择的注入扰动信号频率为低频 20 Hz。

### 3) 持续时间

注入信号的持续时间可以综合考虑瞬时性故障持续时间、信号注入时刻以及时间窗的选取, 本文选择注入信号的持续时间为 1.2 s。

## 2 故障性质判别方法

文献[16]提出利用 Hausdorff 距离算法识别多次注入扰动电压下的故障性质判别方法。通过计算各相间回路扰动电流的 Hausdorff 距离值, 利用其中最大值与最小值的比值构造判据。曼哈顿距离 (Manhattan distance) 是由 19 世纪德国数学家赫尔曼·闵可夫斯基提出的算法, 在几何中用来度量 2 个点在标准坐标系上的绝对轴距总和的平均值。采用曼哈顿距离算法构造故障性质识别判据 1。

### 2.1 曼哈顿距离算法

#### 2.1.1 计算公式

已知 2 组向量  $\mathbf{x}$ 、 $\mathbf{y}$ , 可以通过曼哈顿距离算法得到曼哈顿平均距离值, 进而可表征 2 组扰动波形的相似度, 如式(6)所示。

$$d = d(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \sum_{i=1}^n |x_i - y_i| \quad (6)$$

式中: 向量  $\mathbf{x} = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ ;  $\mathbf{y} = \{y_1, y_2, \dots, y_n\}$ 。

#### 2.1.2 归一化处理

故障相间扰动电压在瞬时性故障和永久性故障时的曼哈顿距离值  $d$  不够直观, 不利于故障性质的判断, 先对计算得到的距离值  $d$  进行归一化处理, 之后根据归一化结果与对应阈值的大小关系判断故障性质。本文选择按照最大、最小值进行归一化处理, 如式(7)所示。

$$d' = \frac{d - \min(d)}{\max(d) - \min(d)} \quad (7)$$

式中:  $d'$  为归一化处理后的数据;  $\min(d)$  和  $\max(d)$  分别为扰动电压曼哈顿距离计算结果的最小值和最大值。 $d'$  取值范围为 [0,1], 计算结果  $d$  越接近于最小值, 则  $d'$  越接近于 0, 说明 2 组向量的波形相似度越高; 反之,  $d$  越趋向于最大值,  $d'$  越趋向于 1, 说明 2 组向量的波形相似度越低。

将计算结果归一化处理, 根据 1.1 节分析, 瞬时性故障时过渡电阻消失前后扰动电压波形明显不同, 永久性故障的波形具有高度相似性, 利用此特性构造出瞬时性故障判据 1, 如式(8)所示。

$$d' \geq x_{\text{set}} \quad (8)$$

式中,  $x_{\text{set}}$  为瞬时性故障阈值。当结果满足式(8)时, 则为瞬时性故障。结合仿真结果, 考虑一定的测量误差和模型误差, 对其留有一定的裕度。综合考虑, 本文选择阈值  $x_{\text{set}} = 0.2$ 。

### 2.2 能量相对熵

利用能量相对熵来表征不同信号间能量谱的相似性, 结果准确可靠、清晰明了。能量相对熵值

越大, 说明 2 段波形能量差异性越大; 结果越小, 说明 2 段波形的相似性越高。特别地, 当 2 段波形能量相对熵为 0 时, 则说明 2 段波形完全相同<sup>[25]</sup>。

### 2.2.1 稳态电压波形能量计算

通过能量的定义可知, 注入扰动电流后, 所产生的扰动电压稳态部分的能量  $E_u(t)$  表达式为

$$E_u(t) = \int_0^t u_0(\tau) i_0(\tau) d\tau \quad (9)$$

式中:  $u_0(\tau)$  为电压波形表达式;  $i_0(\tau)$  为注入电流表达式。

在初始阶段和结束阶段各取时间窗  $T$  进行波形能量的计算。扰动电压在时间窗  $T$  的稳态能量为

$$E_u = \int_0^T u_0(t) i_0(t) dt \quad (10)$$

式中:  $u_0(t)$  为扰动电压表达式;  $i_0(t)$  为扰动电流表达式。

### 2.2.2 计算公式

假设第 1 段时间窗求取的波形能量为  $E_{u1}$ , 第 2 段时间窗求取的波形能量为  $E_{u2}$ , 根据能量相对熵的相关定义, 信号  $u_1$  相对于信号  $u_2$  的能量相对熵  $H_{u_{1-2}}$  如式(11)所示。其中  $E_{u1_j}$  和  $E_{u2_j}$  分别代表第 1、2 段时间窗第  $j$  个采样点的能量,  $N$  为采样总点数。

$$H_{u_{1-2}} = \sum_{j=1}^N \left| E_{u1_j} \ln \frac{E_{u1_j}}{E_{u2_j}} \right| \quad (11)$$

信号  $u_2$  相对于信号  $u_1$  的能量相对熵  $H_{u_{2-1}}$  为

$$H_{u_{2-1}} = \sum_{j=1}^N \left| E_{u2_j} \ln \frac{E_{u2_j}}{E_{u1_j}} \right| \quad (12)$$

构造 2 段时间窗的能量相对熵综合指标  $H_u$  为

$$H_u = H_{u_{1-2}} + H_{u_{2-1}} \quad (13)$$

通过式(13)得到 2 段波形的能量相对熵后, 由能量相对熵的定义可知, 熵值大小反映波形幅值的差异程度, 根据幅值差异程度判断故障性质。

设置瞬时性故障判据阈值  $K_{rel}^1$ , 在留有一定裕度的前提下, 取  $K_{rel}^1 = 20$ 。则瞬时性故障判据 2 为

$$H_u \geq K_{rel}^1 \quad (14)$$

计算结果满足式(14)时, 则判定为瞬时性故障。

### 2.3 注入信号前故障已消失

注入式的故障性质识别方法可能存在注入前线路已恢复绝缘的情况, 因此利用快速傅里叶变换分解扰动电压波形, 构造判据 3。判据 3 阈值的选取一方面参考 1.1 节理论计算结果, 另一方面依据故障性质识别中的大量仿真计算结果, 同时考虑一定的测量误差、计算误差和保留一定的裕度, 判据 3 如式(15)所示。

$$A \leq K_{rel}^1 \quad (15)$$

式中:  $A$  为扰动电压波形中 20 Hz 频率分量大小;  $K_{rel}^1$  为判据 3 的阈值, 取 0.5。结果满足式(15)时, 为永久性故障, 否则, 判定为故障已消失, 即瞬时性故障。

## 3 实施方案

根据本文所构建判据, 注入扰动电流信号的故障性质判别流程如图 7 所示。

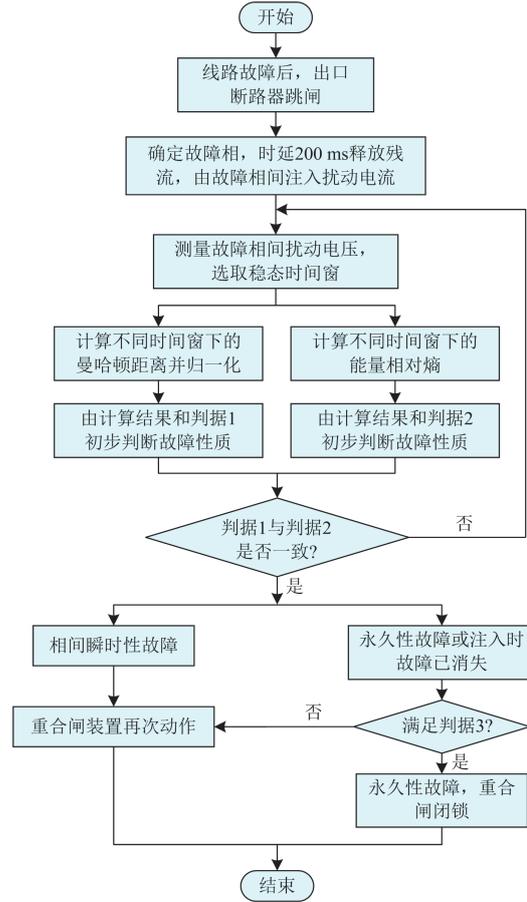


图 7 故障性质判别流程

Fig. 7 Fault nature determination process

1) 当线路发生短路故障后, 故障线路出口断路器跳闸, 根据故障线路各相短路电流的变化情况, 电流急剧增大的判定为故障回路。

2) 延时 200 ms, 释放故障线路残余电气量。启动有源逆变装置, 控制分相开关由故障相间注入低频 20 Hz 扰动电流信号。

3) 由电压互感器测量并记录故障相间扰动电压波形, 选取 2 段扰动电压稳态波形时间窗, 计算 2 段波形数据的曼哈顿距离归一化值  $d'$  和能量相对熵  $H_u$ , 并根据判据 1 和判据 2 初步判断故障性质。

若两组判据不同, 则重新采集扰动电压波形; 反之, 若两组判据结果相同, 继续执行步骤 4)。

4) 若判断结果为瞬时性故障, 则重合闸动作; 否则, 可能存在永久性故障或者注入信号时故障已消失的情况。此时, 利用判据 3 对扰动电压波形数据进一步判断。由快速傅里叶变换得到扰动电压波形频谱, 判断其中 20 Hz 频率分量大小是否满足判据 3。若满足判据, 则输出为永久性故障, 重合闸装置闭锁; 若不满足判据, 则说明在信号注入前短路故障已消失, 故重合闸装置动作。

## 4 仿真验证

### 4.1 仿真模型

为了验证本文方法的可行性, 在 PSCAD/EMTDC 中搭建如图 8 所示的 10 kV 辐射状配电网模型。该配电网模型由 5 条线路组成, 其中包括架空线路、电缆线路和架空-电缆混合线路, 线路参数采用 Bergeron 模型。

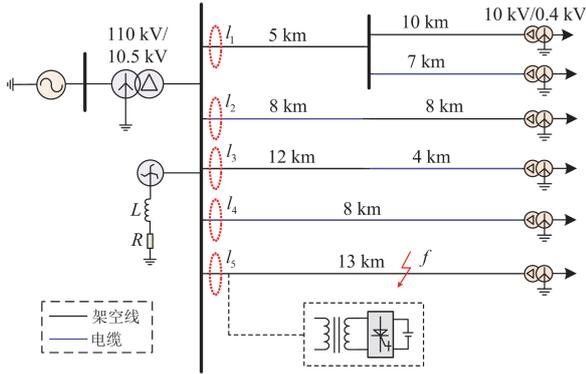


图 8 10 kV 配电网仿真模型

Fig. 8 Simulation model of 10 kV distribution network

系统中性点通过 Z 型变压器经消弧线圈接地, 主变压器 110 kV/10.5 kV, 配电变压器变比为 10 kV/0.4 kV。扰动电流注入装置采用单相有源逆变器, 逆变器直流侧电源为 400 V, 输出滤波电感为 5 mH, 注入扰动电流为频率 20 Hz、幅值 20 A 的交流信号。系统各参数设置如表 2 所示。

### 4.2 仿真分析

为验证本文方法的可靠性, 以  $l_5$  架空线 11 km 处发生  $R_{AB} = 1\Omega$  短路故障为例进行说明。在 0.1 s 时发生故障, 故障后线路  $l_5$  断路器跳闸, 由于配电线路中仍然有较大电气量残留, 故延迟 200 ms 释放残留电气量后再由 AB 相间注入扰动电流。瞬时性故障持续时间设置为 0.7 s, 永久性故障存在于整个仿真过程, 信号注入时刻为 0.3 s。瞬时性故障、永久性故障下 AB 相间扰动电压波形如图 9 所示。

表 2 系统参数设置

Table 2 System parameter setting

设备	参数	
架空线路	正序: $R_1 = 0.1700 \Omega/\text{km}$	零序: $R_0 = 0.2300 \Omega/\text{km}$
	$L_1 = 1.2000 \text{ mH}/\text{km}$	$L_0 = 5.4800 \text{ mH}/\text{km}$
	$C_1 = 0.0097 \mu\text{F}/\text{km}$	$C_0 = 0.0060 \mu\text{F}/\text{km}$
电缆线路	正序: $R_1 = 0.2700 \Omega/\text{km}$	零序: $R_0 = 2.7000 \Omega/\text{km}$
	$L_1 = 0.2550 \text{ mH}/\text{km}$	$L_0 = 1.0190 \text{ mH}/\text{km}$
	$C_1 = 0.3390 \mu\text{F}/\text{km}$	$C_0 = 0.2800 \mu\text{F}/\text{km}$
Z 型变	漏抗: 0.1000 p.u.	空载损耗: 0.0034 p.u.
	短路损耗: 0.016 65 p.u.	额定功率: 0.2 MVA
消弧线圈	$L_p = 0.4049 \text{ H}$	$R_p = 3.8161 \Omega$
逆变器	滤波器: $L = 5 \text{ mH}$	直流侧电压: 400 V
	注入信号频率: 20 Hz	注入电流值: 20 A

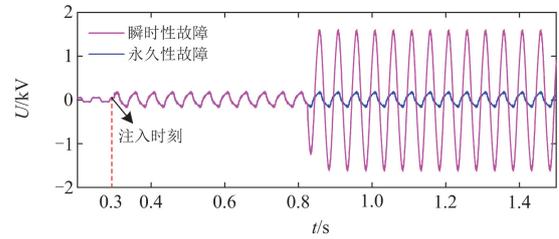


图 9 AB 相间扰动电压波形

Fig. 9 AB interphase disturbance voltage waveform

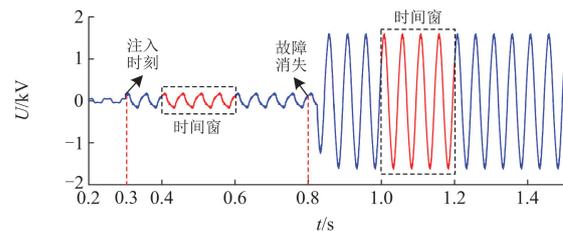
由图 9 可知, 相间短路故障后, 注入扰动电流时, 故障下的扰动电压波形与 1.1 节分析结果类似。瞬时性故障时的波形包括两个阶段。故障存在时, 扰动电压信号幅值为 275 V 左右; 0.8 s 短路故障消失后, 扰动电压能够达到 1600 V 以上。而永久性故障由于系统运行参数不会改变, 故扰动电压波形一直维持在 275 V 左右。两组工况下的扰动电压形成对比, 无故障与故障存在时具有明显差异。

#### 4.2.1 不同工况下仿真分析

##### 1) 瞬时性故障

瞬时性故障时相间扰动电压波形如图 10 所示。在 AB、BC、CA 扰动电压稳态波形中截取 2 段时间窗, 基于本文所提算法进行计算。2 段时间窗分别为 0.4~0.6 s、1.0~1.2 s。

由图 10(a)可知, 选择扰动电压波形的稳态部分, 在 0.8 s 故障消失前, 扰动电压波形处于较低电压



(a) AB 相间回路扰动电压

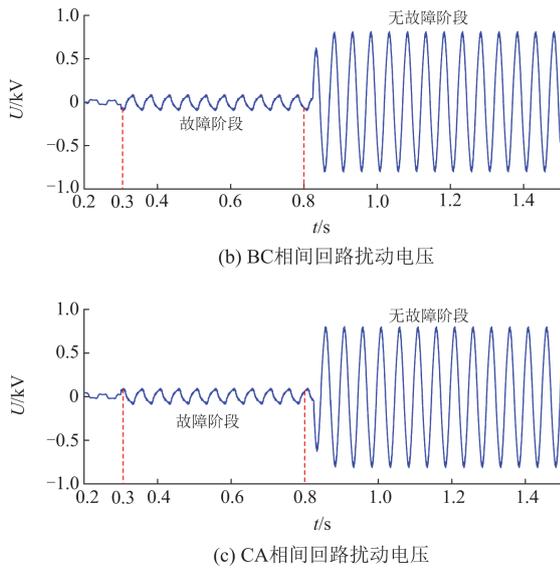


图 10 瞬时性故障相间扰动电压

Fig. 10 Interphase disturbance voltage during transient faults

位，故障消失后，扰动电压响应明显增大。

2) 永久性故障

永久性故障时 AB、BC、CA 相间扰动电压波形以及用于信号处理计算的时间窗选取如图 11 所示。同样选择时间窗为 0.4~0.6 s、1.0~1.2 s。

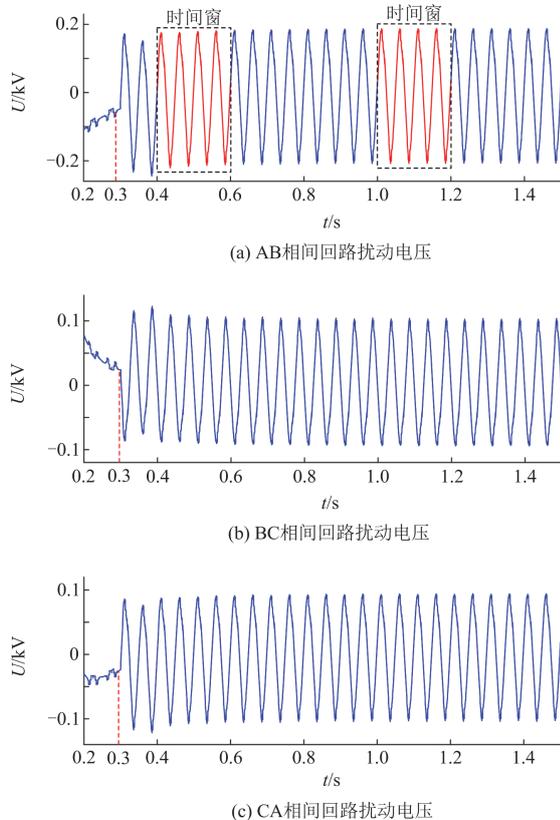


图 11 永久性故障相间扰动电压

Fig. 11 Interphase disturbance voltage during permanent faults

如图 11(a)所示 2 段时间窗，由于永久性故障不存在运行状态变化，故扰动电压波形无明显区别。

3) 注入前故障已消失

与永久性故障和瞬时性故障的情形不同，还存在一种故障持续时间较短、注入扰动信号之前故障已消失的情况，仿真结果如图 12 所示。

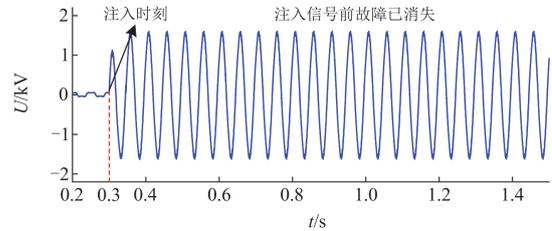


图 12 AB 相间回路扰动电压

Fig. 12 Disturbance voltage of AB interphase circuit

由图 12 的仿真结果可以看出，永久性故障和信号注入前故障已消失的工况下，二者波形趋势相似，基于波形差异的判据会失效，需要额外地附加判据加以区分。

4.2.2 曼哈顿距离算法

基于 AB 相间扰动电压波形的曼哈顿距离计算及归一化结果如表 3、表 4 所示。其中， $D_1$  为瞬时性故障时计算结果， $D_2$  为永久性故障时计算结果。对表 3 的计算结果按式(7)进行归一化处理，计算结果如表 4 所示。

表 3 不同故障位置及过渡电阻时的仿真结果

Table 3 Simulation results for different fault locations and transition resistances

故障位置	过渡电阻/ $\Omega$					
	0.1	2	5	10	20	
2 km	$D_1$	1964.7	1930.3	1877.2	1795.2	1645.0
	$D_2$	0.4190	7.2551	18.334	17.679	14.437
5 km	$D_1$	1952.2	1917.7	1865.7	1783.4	1633.1
	$D_2$	0.8852	8.0821	14.113	17.335	15.667
11 km	$D_1$	1828.0	1793.7	1741.7	1660.6	1513.5
	$D_2$	1.8225	4.7866	12.233	16.795	16.176
13 km	$D_1$	1863.7	1828.9	1775.0	1695.2	1546.4
	$D_2$	2.1564	5.9822	19.104	16.800	16.455

由表 3 结果可知， $D_1$  与  $D_2$  结果缺少统一标准，为使结果更加直观，归一化处理后的结果如表 4 所示。

由表 4 可知，归一化后  $D_1$  接近于 1，说明 2 段波形差异明显，因为故障消失，线路参数发生突变，导致扰动电压波形突变； $D_2$  的结果趋近于 0，说明 2 段波形几乎相同，因为故障一直持续，线路参数不存在突变的情况。故根据判据 1 能够较好地实现故障性质识别，并且特征明显、可靠性高。

表 4 归一化处理结果

Table 4 Results after normalization

故障位置	过渡电阻/ $\Omega$					
	0.1	2	5	10	20	
2 km	D <sub>1</sub>	1	0.9825	0.9554	0.9137	0.8372
	D <sub>2</sub>	0	$3.5 \times 10^{-3}$	$9.1 \times 10^{-3}$	$8.8 \times 10^{-3}$	$7.1 \times 10^{-3}$
5 km	D <sub>1</sub>	0.9936	0.9761	0.9496	0.9077	0.8312
	D <sub>2</sub>	$2.4 \times 10^{-4}$	$3.9 \times 10^{-3}$	$7.0 \times 10^{-3}$	$8.6 \times 10^{-3}$	$7.8 \times 10^{-3}$
11 km	D <sub>1</sub>	0.9304	0.9129	0.8865	0.8452	0.7703
	D <sub>2</sub>	$7.1 \times 10^{-4}$	$2.2 \times 10^{-3}$	$6.0 \times 10^{-3}$	$8.3 \times 10^{-3}$	$8.0 \times 10^{-3}$
13 km	D <sub>1</sub>	0.9486	0.9309	0.9034	0.8628	0.7870
	D <sub>2</sub>	$8.8 \times 10^{-4}$	$2.8 \times 10^{-3}$	$9.5 \times 10^{-3}$	$8.3 \times 10^{-3}$	$8.2 \times 10^{-3}$

4.2.3 能量相对熵算法

表 5—表 8 为不同位置、不同过渡电阻下 AB 相间发生瞬时性故障时, 能量相对熵的计算结果。

表 5 线路  $l_5$  2 km 处故障

Table 5 Fault at 2 km of line  $l_5$

过渡电阻/ $\Omega$	$H_{u_{-1-2}}$	$H_{u_{-2-1}}$	$H_u$	是否启动重合闸
0.1	6.9863	$1.93 \times 10^4$	$1.93 \times 10^4$	√
1	11.8022	$1.78 \times 10^4$	$1.79 \times 10^4$	√
5	58.6231	$1.32 \times 10^4$	$1.33 \times 10^4$	√
10	140.0075	$1.05 \times 10^4$	$1.07 \times 10^4$	√
20	318.4238	$7.80 \times 10^3$	$8.12 \times 10^3$	√

表 6 线路  $l_5$  5 km 处故障

Table 6 Fault at 5 km of line  $l_5$

过渡电阻/ $\Omega$	$H_{u_{-1-2}}$	$H_{u_{-2-1}}$	$H_u$	是否启动重合闸
0.1	11.7584	$1.79 \times 10^4$	$1.79 \times 10^4$	√
1	19.9529	$1.64 \times 10^4$	$1.64 \times 10^4$	√
5	74.4321	$1.25 \times 10^4$	$1.26 \times 10^4$	√
10	160.0732	$1.01 \times 10^4$	$1.03 \times 10^4$	√
20	339.7630	$7.57 \times 10^3$	$7.91 \times 10^3$	√

表 7 线路  $l_5$  11 km 处故障

Table 7 Fault at 11 km of line  $l_5$

过渡电阻/ $\Omega$	$H_{u_{-1-2}}$	$H_{u_{-2-1}}$	$H_u$	是否启动重合闸
0.1	108.5437	$1.13 \times 10^4$	$1.15 \times 10^4$	√
1	117.1838	$1.11 \times 10^4$	$1.12 \times 10^4$	√
5	170.2160	$9.92 \times 10^3$	$1.01 \times 10^4$	√
10	254.1403	$8.59 \times 10^3$	$8.84 \times 10^3$	√
20	428.0772	$6.72 \times 10^3$	$7.14 \times 10^3$	√

表 8 线路  $l_5$  末端故障

Table 8 Fault at the end of line  $l_5$

过渡电阻/ $\Omega$	$H_{u_{-1-2}}$	$H_{u_{-2-1}}$	$H_u$	是否启动重合闸
0.1	56.6836	$1.33 \times 10^4$	$1.34 \times 10^4$	√
1	68.8866	$1.27 \times 10^4$	$1.28 \times 10^4$	√
5	137.4699	$1.06 \times 10^4$	$1.07 \times 10^4$	√
10	229.0009	$8.94 \times 10^3$	$9.17 \times 10^3$	√
20	411.3954	$6.87 \times 10^3$	$7.28 \times 10^3$	√

由表 5—表 8 结果可知, 瞬时性故障时, 在不同位置、不同过渡电阻情况下, 能量相对熵值均在  $10^4$  量级, 说明 2 段波形的能量差异性较大。即瞬时性故障下, 扰动电压波形在故障存在前后差异明显, 基于该算法处理结果能显著表征该特性, 并且受故障位置和过渡电阻的影响较小。

表 9—表 12 为不同位置、不同过渡电阻下 AB 相间发生永久性故障时, 能量相对熵的计算结果。表 9—表 12 的结果表明, 永久性故障时, 在不同位置、不同过渡电阻情况下, 能量相对熵值接近于 0, 说明 2 段波形能量几乎相同。即永久性故障下, 扰动电压波形能量无明显区别, 基于该算法的处理结果清晰可靠, 且该特征受故障位置和过渡电阻的影响较小。

表 9 线路  $l_5$  2 km 处故障

Table 9 Fault at 2 km of line  $l_5$

过渡电阻/ $\Omega$	$H_{u_{-1-2}}$	$H_{u_{-2-1}}$	$H_u$	是否启动重合闸
0.1	0.0010	0.0010	0.0020	×
1	0.0046	0.0046	0.0093	×
5	0.3375	0.3272	0.6647	×
10	0.0451	0.0451	0.0902	×
20	0.6789	0.6835	1.3624	×

表 10 线路  $l_5$  5 km 处故障

Table 10 Fault at 5 km of line  $l_5$

过渡电阻/ $\Omega$	$H_{u_{-1-2}}$	$H_{u_{-2-1}}$	$H_u$	是否启动重合闸
0.1	0.0224	0.0221	0.0445	×
1	0.1229	0.1180	0.2409	×
5	0.5762	0.5538	1.1299	×
10	0.5389	0.5314	1.0703	×
20	0.4425	0.4407	0.8832	×

表 11 线路  $l_5$  11 km 处故障

Table 11 Fault at 11 km of line  $l_5$

过渡电阻/ $\Omega$	$H_{u_{-1-2}}$	$H_{u_{-2-1}}$	$H_u$	是否启动重合闸
0.1	0.0518	0.0519	0.1037	×
1	0.0872	0.0875	0.1746	×
5	0.2722	0.2740	0.5462	×
10	0.6588	0.6648	1.3236	×
20	0.7754	0.7793	1.5547	×

表 12 线路  $l_5$  末端故障

Table 12 Fault at the end of line  $l_5$

过渡电阻/ $\Omega$	$H_{u_{-1-2}}$	$H_{u_{-2-1}}$	$H_u$	是否启动重合闸
0.1	0.0118	0.0118	0.0236	×
1	0.0190	0.0190	0.0379	×
5	0.6903	0.6754	1.3657	×
10	0.0296	0.0296	0.0592	×
20	0.0852	0.0853	0.1705	×

综上，瞬时性故障与永久性故障时的扰动电压波形有明显差异，基于能量相对熵故障性质判据结果能够可靠识别故障性质，且受故障位置、过渡电阻影响小，可靠性好。

#### 4.2.4 信号注入前故障已消失

采用主动注入的方法识别故障性质可能存在注入信号前故障已消失的情况，此时无法与永久性故障工况很好地区分。根据两种情况下扰动电压频域响应不同，考虑增加快速傅里叶变换处理扰动电压波形的补充判据，观察两者扰动电压波形在频域下的差异性。永久性故障和故障已消失两种情况下的快速傅里叶变换结果如图 13 和图 14 所示。

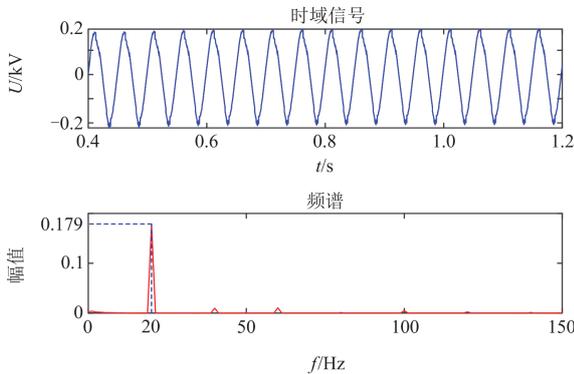


图 13 永久性故障扰动电压时域和频域波形

Fig. 13 Time and frequency domain waveforms of disturbance voltage during permanent faults

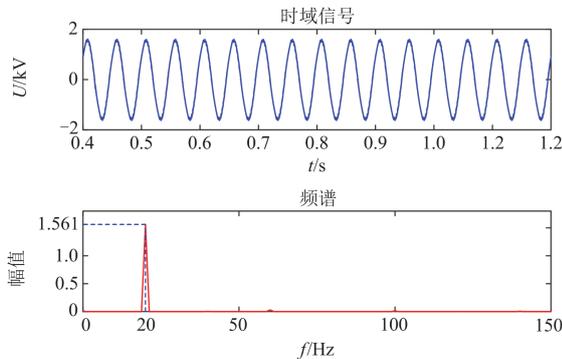


图 14 无故障时扰动电压时域和频域波形

Fig. 14 Disturbance voltage time-domain and frequency-domain waveforms without faults

由图 13、图 14 可知，在相同扰动电流下，永久性故障和注入信号前故障已消失两种工况下扰动电压时域波形趋势一致。而频谱分析结果显示，永久性故障时，扰动电压波形中 20 Hz 频率分量幅值为 0.179；故障消失后扰动电压波形中 20 Hz 频率分量达到 1.561，接近永久性故障时的 9 倍。故根据扰动电压波形的频域分布差异，利用判据 3 区分永久性

故障和注入信号前故障已消失的情况。

#### 4.3 数据丢失工况分析

为了进一步验证基于能量相对熵的故障性质判别方法的可靠性，增加了采集扰动电压数据随机丢失情况下线路不同位置发生过渡电阻为 10 Ω 时的仿真验证。分别设置数据丢失量为 5%、10%、25%，瞬时性故障和永久性故障的能量相对熵的仿真结果如表 13 所示。

表 13 随机数据丢失情况下故障性质判别结果

Table 13 Discriminant results in case of random data loss

故障位置/km	数据丢失比例/%	瞬时性故障下的 $H_u$	永久性故障下的 $H_u$	是否正确
2	5	$1.05 \times 10^4$	0.5131	√
	10	$1.01 \times 10^4$	0.0141	√
	25	$9.48 \times 10^3$	2.4256	√
5	5	$9.91 \times 10^3$	2.6690	√
	10	$9.60 \times 10^3$	1.6753	√
	25	$8.93 \times 10^3$	0.4840	√
11	5	$8.71 \times 10^3$	2.3472	√
	10	$8.43 \times 10^3$	0.9303	√
	25	$7.93 \times 10^3$	1.8923	√
13	5	$8.94 \times 10^3$	0.2990	√
	10	$8.73 \times 10^3$	0.0838	√
	25	$8.03 \times 10^3$	0.7516	√

由表 13 结果可知，线路不同位置发生故障时，随机数据缺失 5%、10%、25% 的情况下，瞬时性故障和永久性故障的能量相对熵差异明显，满足所提判据，能够准确识别故障性质。进一步说明本文方法受测量数据丢失的影响较小，抗干扰能力强，具有较高的鲁棒性。

#### 4.4 方案对比

按照注入信号源的不同，现有的主动式自适应重合闸方案可以分为 2 类：1) 通过直流电源给储能电容预充电，利用电容的放电特性识别故障性质的方案<sup>[15]</sup>；2) 基于附加电源注入特征信号进行探测，利用注入信号的响应特征识别故障性质的方案<sup>[16-17]</sup>。第 1 类方案需要对储能电容进行多次充放电，且放电过程电流不断衰减，因此需要提取衰减波形的前几个周波。第 2 类方案得益于电力电子设备的可控性，根据响应特性不同，选择合适参数的信号进行注入，利用注入信号响应特征的差异构建故障性质识别判据。本文在第 2 类方案的基础上，提出了能够有效辨识该响应特征差异的故障性质辨识方法，根据扰动信号下的稳态响应特征差异进行识别，可靠性更高，具有普适性。

## 5 结论

针对配电网传统交流自适应重合闸缺乏有用的故障信息的问题, 本文提出了一种利用外加有源逆变装置注入扰动电流信号的主动式故障性质判别方法, 且通过大量仿真验证了本文方法在不同工况下的可靠性和优越性, 主要结论如下:

1) 瞬时性故障包括故障持续阶段和无故障阶段, 前后 2 个阶段线路参数发生突变, 而永久性故障时, 系统运行方式稳定, 无明显区别。注入扰动电流, 根据扰动电压波形的响应特征差异实现故障性质判别。

2) 所提方案只需一次注入即可实现故障性质判别, 且操作简单、计算量小、可靠性高。

3) 本文方法在随机数据丢失 5%、10%和 25%的情况下, 能够可靠辨识故障性质, 受数据丢失影响小, 可靠性高。

## 参考文献

- [1] 徐丙垠, 薛永端, 冯光, 等. 配电网接地故障保护若干问题的探讨[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(20): 1-7.  
XU Bingyin, XUE Yongduan, FENG Guang, et al. Discussion on several problems of earthing fault protection in distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(20): 1-7.
- [2] 梁振锋, 索南加乐, 康小宁, 等. 利用自由振荡频率识别的三相重合闸永久性故障判别[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(7): 124-130, 10.  
LIANG Zhenfeng, SUONAN Jiale, KANG Xiaoning, et al. Permanent faults identification using free oscillation frequency for three-phase reclosure on transmission lines with shunt reactors[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(7): 124-130, 10.
- [3] 梁振锋, 伍美娟, 陈阳, 等. 基于故障指示器的配电混合线路重合闸策略[J]. 供用电, 2023, 40(3): 47-54.  
LIANG Zhenfeng, WU Meijuan, CHEN Yang, et al. Reclosing strategy of distribution mixed line based on fault indicator[J]. Distribution & Utilization, 2023, 40(3): 47-54.
- [4] 蒋江波, 解超, 李凤婷, 等. 适用于带并抗的同杆双回线接地故障分相自适应重合闸策略[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(5): 12-24.  
JIANG Jiangbo, XIE Chao, LI Fengting, et al. Phase-separation adaptive autoreclosing strategy for ground faults on double-circuit transmission lines with shunt reactors[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(5): 12-24.
- [5] 莫金龙, 杨欢红, 俞京锋, 等. 柱上断路器控制器重合闸逻辑分析与现场校验技术研究[J]. 供用电, 2023, 40(4): 92-97.  
MO Jinlong, YANG Huanhong, YU Jingfeng, et al. Logical analysis and research field verification technology of on-column circuit breaker controller reclosure[J]. Distribution & Utilization, 2023, 40(4): 92-97.
- [6] 刘健, 张志华, 芮俊, 等. 一二次配合的配电线路自适应重合闸[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(22): 26-32.  
LIU Jian, ZHANG Zhihua, RUI Jun, et al. Adaptive reclosing of distribution lines based on primary and secondary device coordination[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(22): 26-32.
- [7] 张烁, 邹贵彬, 魏秀燕, 等. 适用于柔性直流电网的新型多端口混合式直流断路器[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(11): 99-105.  
ZHANG Shuo, ZOU Guibin, WEI Xiuyan, et al. Novel multiport hybrid DC circuit breaker suitable for flexible DC grid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(11): 99-105.
- [8] WANG Shunliang, ZHOU Junjie, SHU Ji, et al. Reclosing current limiting for DC line faults in VSC-HVDC systems[J]. Modern Power Systems and Clean Energy, 2022, 10(4): 1040-1049.
- [9] 周伟绩, 李凤婷, 解超. 带并联电抗器同杆双回输电线路跨线接地故障自适应重合闸策略[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(1): 33-41.  
ZHOU Weiji, LI Fengting, XIE Chao. Adaptive autoreclosing scheme for line-to-line grounded faults on double-circuit transmission lines with shunt reactors[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(1): 33-41.
- [10] 王常琪, 路佳宁, 洪玮, 等. 基于直流限流电路的直流单极接地故障自适应重合闸技术[J]. 电网技术, 2023, 47(12): 4877-4887.  
WANG Changqi, LU Jianing, HONG Wei, et al. An adaptive reclosing technology for DC pole-to-ground fault based on DC current limiting circuit[J]. Power System Technology, 2023, 47(12): 4877-4887.
- [11] 蔡晋成, 向往, 周猛, 等. 基于混合型 MMC 主动信号注入的直流故障自适应重合闸方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(12): 3867-3878.  
CAI Pucheng, XIANG Wang, ZHOU Meng, et al. Research on adaptive reclosing of DC fault based on active signal injected by hybrid MMC[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(12): 3867-3878.
- [12] 李猛, 宁家兴, 和敬涵, 等. 基于模型校核的柔性直流输电线路自适应重合闸方案[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(9): 191-199.  
LI Meng, NING Jiaying, HE Jinghan, et al. Adaptive reclosing scheme for flexible DC transmission line based on model verification[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(9): 191-199.

- [13] 宋国兵, 王婷, 张晨浩, 等. 利用健全极 MMC 注入特征信号的直流线路故障性质判别方法[J]. 电工技术学报, 2019, 34(5): 994-1003.  
SONG Guobing, WANG Ting, ZHANG Chenhao, et al. DC line fault identification based on characteristic signal injection using the MMC of sound pole[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(5): 994-1003.
- [14] 宋金钊, 李永丽, 张云柯, 等. 逆变侧交流线路单相自适应重合闸的适用性分析与改进策略[J]. 高电压技术, 2022, 48(3): 1001-1010.  
SONG Jinzhao, LI Yongli, ZHANG Yunke, et al. Applicability analysis and improved strategy of adaptive single-phase reclosure for AC lines on inverter side[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(3): 1001-1010.
- [15] 邵文权, 刘一璇, 关欣, 等. 一种主动探测式的配电网相间重合前永久性故障判别方案[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(14): 96-103.  
SHAO Wenquan, LIU Yixuan, GUAN Xin, et al. An active detection scheme for permanent fault identification before phase-to-phase reclosing in a distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(14): 96-103.
- [16] 邵文权, 贺雨昕, 关欣, 等. 利用多次扰动电流波形特征的配电网相间永久故障识别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(7): 146-157.  
SHAO Wenquan, HE Yuxin, GUAN Xin, et al. Identification method for an interphase permanent fault in a distribution network using waveform characteristics of multiple disturbance currents[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(7): 146-157.
- [17] 朱珂, 宋玉涛, 徐玉刚, 等. 一种配电线路有源自适应重合闸技术研究[J]. 电网技术, 2017, 41(3): 993-999.  
ZHU Ke, SONG Yutao, XU Yugang, et al. An active adaptive reclosing scheme for distribution lines[J]. Power System Technology, 2017, 41(3): 993-999.
- [18] 李浩, 宋国兵, 樊艳芳, 等. 利用分相开关探测的配电网永久性故障识别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(5): 11-21.  
LI Hao, SONG Guobing, FAN Yanfang, et al. Permanent fault identification method of a distribution network based on detection using a phase segregated switch[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(5): 11-21.
- [19] 廖宏宇, 康小宁, 袁燕磊, 等. 利用注入信号的配电网自适应三相重合闸研究[J]. 电网技术, 2021, 45(7): 2623-2630.  
LIAO Hongyu, KANG Xiaoning, YUAN Yanlei, et al. Adaptive three-phase reclosing device of distribution network based on injected signals[J]. Power System Technology, 2021, 45(7): 2623-2630.
- [20] 方重凯, 牟龙华, 欧锐, 等. 基于控保协同的微电网注入式保护方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(9): 3389-3402.  
FANG Chongkai, MU Longhua, OU Rui, et al. Research on control-protection coordination based on injection protect scheme of microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(9): 3389-3402.
- [21] 李理, 喻锟, 曾祥君, 等. 基于发电机定子接地燃弧电阻变化特征的主动降压熄弧机理与抑制方法[J]. 电工技术学报, 2024, 39(17): 5379-5393.  
LI Li, YU Kun, ZENG Xiangjun, et al. Mechanism and suppression method of active arc extinguishing based on the variation characteristics of arc resistance of stator[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(17): 5379-5393.
- [22] ZHANG Shuo, ZOU Guibin, LI Bowei, et al. Fault property identification method and application for MTDC grids with hybrid DC circuit breaker[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2019, 110: 136-143.
- [23] 束洪春, 邵宗学, 赵伟, 等. 含柔性直流的交直流混联电力系统紧急频率控制研究[J]. 电工技术学报, 2023, 38(20): 5590-5604.  
SHU Hongchun, SHAO Zongxue, ZHAO Wei, et al. Research on emergency power control of AC-DC hybrid power system with flexible DC[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(20): 5590-5604.
- [24] 赵国亮, 陈维江, 邓占锋, 等. 柔性低频交流输电关键技术及应用[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(15): 1-10.  
ZHAO Guoliang, CHEN Weijiang, DENG Zhanfeng, et al. Key technologies and application of flexible low-frequency AC transmission[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(15): 1-10.
- [25] 徐艳春, 赵彩彩, 孙思涵, 等. 基于改进 LMD 和能量相对熵的主动配电网故障定位方法[J]. 中国电力, 2021, 54(11): 133-143.  
XU Yanchun, ZHAO Caicai, SUN Sihan, et al. Fault location for active distribution network based on improved LMD and energy relative entropy[J]. Electric Power, 2021, 54(11): 133-143.

收稿日期: 2024-07-15; 修回日期: 2024-11-12

作者简介:

王晓卫(1983—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统继电保护、配电网接地故障处理等; E-mail: proceedings@126.com

岳阳(1995—), 男, 硕士研究生, 研究方向为配电网继电保护。E-mail: yue4230@126.com

(编辑 许威)