

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.241577

# 基于双电流突变量比值的含光伏电源低压配电网 触电故障检测和定位方法

李军, 朱劲涛, 张玉琼, 吕干云, 刘克天, 黄嘉伟

(南京工程学院电力工程学院沈国荣学院, 江苏 南京 210000)

**摘要:** 针对分布式光伏接入的低压配电网中, 剩余电流波形复杂、幅值随机多变, 现有剩余电流保护装置频繁误动作、难以投入使用的问题, 提出剩余电流与重复接地点电流突变量的比值结合剩余电流动作整定值的双重判据。首先, 分析含光伏电源的 TN-C-S 系统发生触电故障时、重复接地点和负荷数量逐渐增加的情况下剩余电流的组成成分以及变化情况, 提出剩余电流与重复接地点电流突变量的比值的阈值作为触电判据。接着分析重复接地点对触电电流分流的影响, 提出利用比值的平均值大小定位故障区段。通过仿真验证, 所提判据可以准确检测触电故障, 抗干扰能力强, 有效改善保护装置的误动作问题, 实现不同故障位置下的故障区段准确定位。

**关键词:** 光伏电源; 低压配电网; 剩余电流; 生物触电; 故障定位

## Electric shock fault detection and positioning method for low-voltage distribution networks with PV power supply based on the ratio of dual-current mutant amount

LI Jun, ZHU Jintao, ZHANG Yuqiong, LÜ Ganyun, LIU Ketian, HUANG Jiawei

(School of Electrical Power Engineering, School of SHEN Guorong, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 210000, China)

**Abstract:** In low-voltage distribution networks with distributed photovoltaic (PV) integration, residual current waveforms are complex and their amplitudes vary randomly. This often leads to frequent maloperation of existing residual current protection devices, making them difficult to apply effectively. To address this issue, a dual-criterion approach is proposed, combining the ratio of the mutation values of residual current and repeated grounding current with the residual current setting threshold. First, the composition and variation of residual current in a TN-C-S system with PV power supply under electric shock faults are analyzed, considering increasing numbers of repeated grounding points and loads. Based on this, a threshold for the ratio of the residual current and repeated grounding current mutation is established as fault detection criterion. Then, the influence of repeated grounding points on the diversion of electric shock current is examined, and a method for fault location is proposed using the average value of the mutation ratio. Simulation results verify that the proposed criteria can accurately detect electric shock faults, demonstrate strong anti-interference capability, effectively reduce maloperation of protection devices, and achieve accurate positioning of fault sections under different fault positions.

This work is supported by the Key Project of Science and Technology Innovation Special Fund of Jiangsu Province (No. BE2022003).

**Key words:** PV power supply; low-voltage distribution network; residual current; human electric shock; fault location

## 0 引言

随着可再生能源发电装机规模的不断提高, 以非隔离型光伏为代表的分布式电源(distributed generation, DG)接入低压配电网给基于剩余电流保护

装置(residual current protection device, RCD)的传统漏电保护带来新的挑战<sup>[1-4]</sup>。一方面, 缺少变压器的非隔离型光伏由于光伏电池板与电网存在电气连接, 流经寄生电容的共模漏电流容易引起 RCD 频繁误动作。另一方面, 并网逆变器的高比例接入给低压配电网带来波动性的高次谐波污染, 使波形特征复杂的漏电流区别于传统的正弦形式, 给基于动作阈值的漏电保护准确动作带来困难<sup>[5-6]</sup>。此外, 光

**基金项目:** 江苏省科技创新专项基金重点项目资助 (BE2022003)

伏电源接入与系统容易形成双端供电，共同向触电故障点流入电流并增大流经断路器的电流，减小剩余电流保护范围<sup>[7-8]</sup>。

为了解决这些问题，复杂场景下剩余电流检测技术和建立触电识别模型成为主要的研究方向，包括基于鉴相鉴幅法<sup>[9-10]</sup>、磁调制<sup>[11-12]</sup>、近似熵<sup>[13]</sup>、谐波突变<sup>[14]</sup>等检测方法。近年来，将提取触电故障信号的时频域特征与分类器、神经网络相结合成为主流的研究方法，基于 Hilbert-Huang 变换<sup>[15]</sup>、暂态特征和支持向量机(support vector machine, SVM)<sup>[16]</sup>、小波包变换和神经网络<sup>[17-18]</sup>、循环谱和 K-means 聚类分析<sup>[19]</sup>、Mallat 算法和 BP 神经网络<sup>[20]</sup>等电流分离降噪方法被相继提出。

其中，文献[20]将剩余电流信号经 Mallat 算法降噪后提取低频分量构建阈值，基于 BP 神经网络训练识别触电类型，但 BP 神经网络、DFNN 等深度学习算法结构较复杂，训练时间长，且识别结果的高精度依赖大量的数据样本。文献[21]基于近邻成分分析(neighbor component analysis, NCA)筛选出光伏接入配电网漏电流的特征子集，通过核极限学习机 KELM 训练后识别光伏电源漏电与触电故障。此方法只考虑了共模漏电流对漏电流的影响，并未分析对地泄漏电流和三相不平衡电流对故障检测的扰动。文献[22]分析了含光伏电源配电网影响剩余电流的 3 种扰动因子，将奇次谐波幅值变化作为漏电判据，并依据随机森林算法建立检测模型。该方法尚未考虑负荷投切时剩余电流谐波幅值变化可能造成的误扰动。

针对上述分析，本文首先分析分布式光伏接入的低压配电网 TN-C-S 系统发生触电故障时剩余电流的组成成分及变化特征，由此提出基于双电流突变量比值  $N$  的触电故障判据。此方法算力要求较低，能快速检测触电故障，可根据实际的低压配电网条件自适应设置阈值，克服多种扰动因素带来的保护装置误扰动问题，并根据突变量比值的均值大小准确定位故障发生的具体区段。

### 1 含光伏电源的低压系统触电故障分析

低压配电网 TN-C-S 系统中，三相负荷不平衡导致产生三相不平衡电流是系统的常态<sup>[23-24]</sup>。三相不平衡电流经零线阻抗、变压器中性点和重复接地点流入大地。三相线路和负荷也会产生正常对地漏电流。随着分布式光伏的接入，非隔离型三相并网系统中电压型逆变器端口产生共模电压，从而导致在光伏电源对地寄生电容、逆变器、滤波器和低压配电网组成的回路中形成共模漏电流，从而向电网注

入谐波分量。因此，三相不平衡电流、对地漏电流和共模漏电流为电网系统正常运行时的固有成分，称为固有剩余电流。此外，当发生触电故障时，会产生触电电流，由此得到分布式光伏接入的低压配电网触电故障系统。

#### 1.1 触电故障判断分析

图 1 中： $Z_{ALine1}$ 、 $Z_{BLine1}$ 、 $Z_{CLine1}$  分别为三相线路阻抗； $Z_{ALine2}$ 、 $Z_{BLine2}$ 、 $Z_{CLine2}$  分别为光伏电源并网线路阻抗； $Z_{AG}$ 、 $Z_{BG}$ 、 $Z_{CG}$  分别为线路对地泄漏阻抗； $Z_{ALoad}$ 、 $Z_{BLoad}$ 、 $Z_{CLoad}$  分别为三相负荷； $Z_{OG}$  为 10/0.4 kV 变压器中性点对地阻抗； $Z_h$  为生物触电阻抗模型； $C_{pv}$  为光伏电源对地寄生电容； $Z_{SG1}$ 、 $Z_{SG2}$  分别为不同负荷处的重复接地阻抗； $Z_{NLine1}$ 、 $Z_{NLine2}$  分别为不同位置的零线阻抗。为了保证设备运行安全，当配电路径较长时，接入用户处的零线上可能存在多点重复接地。 $i_{AG}$ 、 $i_{BG}$ 、 $i_{CG}$  分别为 A、B、C 三相正常对地泄漏电流(由于零线对地电压幅值较低，通常忽略流经零线对地阻抗的地泄漏电流)； $i_{ub}$  为三相不平衡电流； $i_{SG1}$ 、 $i_{SG2}$  分别为三相不平衡电流经重复接地点流入大地的泄漏电流； $i_h$  为触电故障电流； $i_{cm}$  为光伏电源流向系统的共模漏电流。

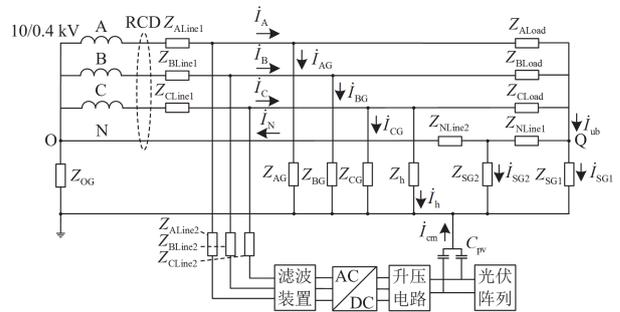


图 1 含光伏电源的两点重复接地系统电路图

Fig. 1 Circuit diagram of the two-point repeated grounding system including photovoltaic power supply

对  $Z_{SG1}$ 、 $Z_{SG2}$ 、 $Z_{NLine1}$  作 Y- $\Delta$  变换，得到节点 O 与节点 Q 之间的等效电路如图 2 所示。

$$\begin{cases} Z_{1Y} = \frac{Z_{NLine1} \cdot Z_{SG1}}{Z_{NLine1} + Z_{SG1} + Z_{SG2}} \\ Z_{2Y} = \frac{Z_{NLine1} \cdot Z_{SG2}}{Z_{NLine1} + Z_{SG1} + Z_{SG2}} \\ Z_{3Y} = \frac{Z_{SG1} \cdot Z_{SG2}}{Z_{NLine1} + Z_{SG1} + Z_{SG2}} \end{cases} \quad (1)$$

则重复接地点电流  $i_{SG}$  为

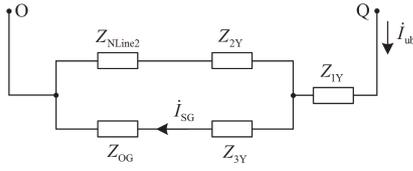


图 2 节点 O、Q 之间等效电路图

Fig. 2 Equivalent circuit diagram between nodes O and Q

$$\begin{aligned} \dot{i}_{SG} &= \dot{i}_{SG1} + \dot{i}_{SG2} = \\ &= \frac{Z_{2Y} + Z_{NLine2}}{Z_{3Y} + Z_{OG} + Z_{2Y} + Z_{NLine2}} \dot{i}_{ub} = \beta_1 \cdot \dot{i}_{ub} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\dot{i}_{ub} = \dot{i}_A + \dot{i}_B + \dot{i}_C \quad (3)$$

正常运行的低压配电台区的剩余电流  $\dot{i}_r$  为

$$\dot{i}_r = \dot{i}_{SG} + \alpha(\dot{i}_{ABCG} + \dot{i}_{cm}) \quad (4)$$

$$\dot{i}_{ABCG} = \dot{i}_{AG} + \dot{i}_{BG} + \dot{i}_{CG} = \frac{\dot{U}_A}{Z_{AG}} + \frac{\dot{U}_B}{Z_{BG}} + \frac{\dot{U}_C}{Z_{CG}} \quad (5)$$

$$\dot{i}_{cm} = C_{pv} \frac{d\dot{U}_{cm}}{dt} \quad (6)$$

$$\alpha = \frac{Z_{3Y} + Z_{2Y} + Z_{NLine2}}{Z_{OG} + Z_{3Y} + Z_{2Y} + Z_{NLine2}} \quad (7)$$

发生触电故障时的剩余电流  $\dot{i}_r$  为

$$\dot{i}_r = \dot{i}_{SG} + \alpha(\dot{i}_{ABCG} + \dot{i}_{cm} + \dot{i}_h) \quad (8)$$

式中:  $\dot{U}_{cm}$  为寄生电容上产生的共模电压;  $\alpha$  为电流分流系数, 根据三相正常对地泄漏电流  $\dot{i}_{ABCG}$ 、触电故障电流  $\dot{i}_h$  和共模漏电流  $\dot{i}_{cm}$  分别经过通路一  $Z_{OG}$  和通路二  $Z_{SG}$ 、 $Z_{3Y}$ 、 $Z_{2Y}$ 、 $Z_{NLine2}$  流回变压器中性点计算得到。

由此可得, 重复接地点电流由零线阻抗、变压器中性点对地阻抗和不同点重复接地阻抗共同决定。由于剩余电流突变量的推导表达式以及系数  $\alpha$  形式与单点重复接地系统类似, 因此推广可得, 可将触电故障位置到三相负荷之间的多点重复接地等效成单点进行分析。

根据式(8)可知, 含光伏电源的低压配电台区发生触电故障时, 剩余电流与三相正常对地泄漏电流、重复接地点电流、共模漏电流和触电故障电流有关, 下面依次分析他们对剩余电流的影响。

### 1) 重复接地点电流及其变化量

重复接地点电流  $\dot{i}_{SG}$  主要由三相不平衡电流  $\dot{i}_{ub}$ 、零线阻抗  $Z_{NLine}$ 、变压器中性点对地阻抗  $Z_{OG}$  和重复接地阻抗  $Z_{SG}$  决定。根据国标 GB 51348—2019,  $Z_{NLine}$  一般为  $0.1 \Omega$  以下量级,  $Z_{OG}$  一般不高于  $4 \Omega$ ,  $Z_{SG}$  一般不高于  $10 \Omega$ 。零线阻抗  $Z_{NLine}$  越大,

重复接地阻抗  $Z_{SG}$  越小, 则  $\dot{i}_{SG}$  越大。实际运行时, 一个台区的三相不平衡电流可达到数安培, 流经重复接地点电流可达到数百毫安, 为剩余电流的主要构成成分。

### 2) 三相对地泄漏电流及其变化量

三相对地泄漏电流主要由配电线路和用电设备的对地泄漏电流两部分组成。正常情况下, 线路和负荷的对地电导很小, 因此对地泄漏电流的主要成分为对地分布电容产生的容性电流。由于低压配电网实际运行时负荷种类的多样性和投切的随机性,  $Z_{AG}$ 、 $Z_{BG}$ 、 $Z_{CG}$  很难满足平衡, 故一个台区的正常对地泄漏电流幅值一般在几十到几百毫安。而  $\Delta \dot{I}_{ABCG}$  幅值的大小主要与负荷投切时造成的相电压波动有关。根据国标 GB 4706.1—2005 以及 IEC 60335-1:2020 规定, 在同时投切的用电器具不多的情况下, 造成的相电压波动很小, 由此产生的对地泄漏电流变化值较小, 一般在  $10 \text{ mA}$  以下量级。

### 3) 共模漏电流及其变化量

共模漏电流的大小主要由光伏系统的共模电压、系统的开关频率、共模回路阻抗和寄生电容大小等决定<sup>[25-26]</sup>。其中系统的开关频率和共模回路中滤波器参数一般不会随意更改, 因此实际运行时共模电压和寄生电容大小是影响共模漏电流大小的主要因素。其中共模漏电流大小与共模电压近似成正比关系, 寄生电容则受温度、湿度等非电气量的影响, 其值一般为  $50 \sim 150 \text{ nF/kW}$ 。目前已经有诸多抑制共模漏电流的研究<sup>[27-28]</sup>, 但受限于抑制效果和适用范围, 光伏系统正常运行时的共模漏电流仍有几十到几百毫安, 影响剩余电流保护装置的投入。

### 4) 触电故障电流

由于在实际中难以获取真实的人体触电电流信号, 本文采用应用广泛的弗莱贝尔格(Freiberger)的生物体等值电路模型<sup>[29]</sup>, 以模拟发生触电故障时的触电电流信号, 具体阻抗模型如图 3 所示。

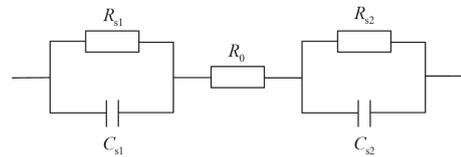


图 3 Freiberg 等值电路模型

Fig. 3 Equivalent circuit model of Freiberg

图 3 中:  $R_0$  为人体内部电阻, 取建议值  $500 \Omega$ 。皮肤电阻  $R_s$  和皮肤电容  $C_s$  并联组成皮肤阻抗, 其中皮肤电阻  $R_s$  大小为  $1000 \sim 2000 \Omega$ , 皮肤电容  $C_s$  取建议值  $2 \times 10^{-8} \text{ F/cm}^2$ 。

### 1.2 触电故障定位分析

在 TN-C-S 系统中，一条馈线上通常连接多个负荷，并在关键负荷处进行重复接地。以图 4 中两个负荷为例进行分析，其中蓝色虚线为负荷 1 中三相不平衡电流  $i_{ub1}$  的流路径，绿色半划线为负荷 2 中三相不平衡电流  $i_{ub2}$  的流路径，紫色点划线为触电故障发生在变压器与负荷 1 之间时触电电流  $i_{h1}$  的流路径，红色点划线为触电故障发生在负荷 1 与负荷 2 之间时触电电流  $i_{h2}$  的流经路径。

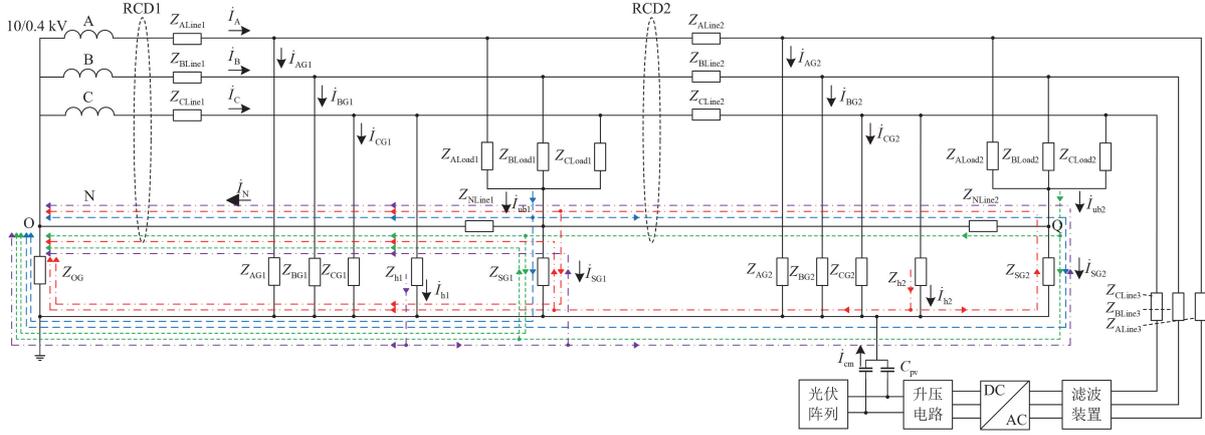


图 4 含光伏电源的多负荷系统电路图

Fig. 4 Circuit diagram of a multi-load system with photovoltaic power supply

1) 不同区段重复接地点电流  $i_{SG1}$ 、 $i_{SG2}$

负荷 1 中：三相不平衡电流  $i_{ub1}$  分别经过通路一  $Z_{NLine1}$ 、通路二  $Z_{SG1}$ 、 $Z_{OG}$  和通路三  $Z_{NLine2}$ 、 $Z_{SG2}$ 、 $Z_{OG}$  流回变压器中性点，则流经重复接地阻抗  $Z_{SG1}$  的电流  $i_{SG1}$  为

$$i_{SG1} = \frac{Z_{NLine1}}{Z_{OG} + Z_{NLine1} + [Z_{SG1} \parallel (Z_{NLine2} + Z_{SG2})]} \cdot \frac{Z_{NLine2} + Z_{SG2}}{Z_{SG1} + Z_{NLine2} + Z_{SG2}} \cdot i_{ub1} = \beta_2 \cdot i_{ub1} \quad (9)$$

由于对地泄漏阻抗  $Z_{AG}$ 、 $Z_{BG}$ 、 $Z_{CG}$  的数值达到数千欧及以上，远超过  $Z_{OG}$ 、 $Z_{SG}$ 、 $Z_{NLine}$ ，因此分析三相不平衡电流  $i_{ub2}$  和触电电流  $i_h$  时，忽略  $Z_{AG}$ 、 $Z_{BG}$ 、 $Z_{CG}$  的影响，对  $Z_{OG}$ 、 $Z_{SG1}$ 、 $Z_{NLine1}$  作 Y-Δ 变换，得到负荷 2 处节点 Q 与变压器处节点 O 之间的等效电路如图 5 所示。

$$\begin{cases} Z_{4Y} = \frac{Z_{NLine1} \cdot Z_{OG}}{Z_{OG} + Z_{NLine1} + Z_{SG1}} \\ Z_{5Y} = \frac{Z_{NLine1} \cdot Z_{SG2}}{Z_{OG} + Z_{NLine1} + Z_{SG1}} \\ Z_{6Y} = \frac{Z_{OG} \cdot Z_{SG1}}{Z_{OG} + Z_{NLine1} + Z_{SG1}} \end{cases} \quad (10)$$

则负荷 2 中，流经重复接地阻抗  $Z_{SG2}$  的电流  $i_{SG2}$  如式(11)所示。

中三相不平衡电流  $i_{ub2}$  的流路径，紫色点划线为触电故障发生在变压器与负荷 1 之间时触电电流  $i_{h1}$  的流路径，红色点划线为触电故障发生在负荷 1 与负荷 2 之间时触电电流  $i_{h2}$  的流经路径。

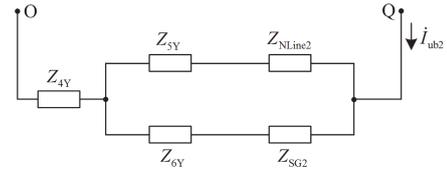


图 5 负荷 2 处节点 O、Q 之间等效电路图

Fig. 5 Equivalent circuit diagram between nodes O and Q at load 2

$$i_{SG2} = \frac{Z_{NLine2} + Z_{5Y}}{Z_{NLine2} + Z_{5Y} + Z_{6Y} + Z_{SG2}} \cdot i_{ub2} = \beta_3 \cdot i_{ub2} \quad (11)$$

2) 不同区段发生触电故障分析

故障区段 1：触电故障发生在负荷 1 与负荷 2 之间(红色点划线路径)时，流经变压器与负荷 1 之间的剩余电流  $i_{r1}$  为

$$\begin{aligned} i_{r1} = & \frac{Z_{NLine1}}{Z_{OG} + Z_{NLine1} + [Z_{SG1} \parallel (Z_{NLine2} + Z_{SG2})]} \cdot i_{ub1} + \\ & p \cdot i_{SG2} + q \cdot \frac{Z_{6Y} + Z_{SG2}}{Z_{NLine2} + Z_{5Y} + Z_{6Y} + Z_{SG2}} \cdot i_{ub2} + \\ & k j_{ABCG1} + [p \cdot s + q \cdot (1-s)] \cdot (j_{ABCG2} + i_{cm} + i_{h2}) = \\ & \frac{Z_{SG1} + Z_{NLine2} + Z_{SG2}}{Z_{NLine2} + Z_{SG2}} \cdot i_{SG1} + k j_{ABCG1} + \\ & [p \cdot s + q \cdot (1-s)] \cdot (j_{ABCG2} + i_{cm} + i_{h2}) + \\ & \left( p + q \cdot \frac{Z_{6Y} + Z_{SG2}}{Z_{5Y} + Z_{NLine2}} \right) \cdot i_{SG2} \end{aligned} \quad (12)$$

式中:

$$p = \frac{Z_{SG1} + Z_{NLine1}}{Z_{OG} + Z_{SG1} + Z_{NLine1}} \quad (13)$$

$$q = \frac{Z_{NLine1}}{Z_{OG} + Z_{SG1} + Z_{NLine1}} \quad (14)$$

$$k = \frac{Z_{NLine1} + [Z_{SG1} \parallel (Z_{NLine2} + Z_{SG2})]}{Z_{OG} + Z_{NLine1} + [Z_{SG1} \parallel (Z_{NLine2} + Z_{SG2})]} \quad (15)$$

$$s = \frac{Z_{SG2} + Z_{NLine2} + Z_{5Y}}{Z_{6Y} + Z_{SG2} + Z_{NLine2} + Z_{5Y}} \quad (16)$$

流经负荷 1 与负荷 2 之间的剩余电流  $i_{r2}$  为

$$i_{r2} = \frac{Z_{SG1}}{Z_{NLine2} + Z_{SG2}} \cdot i_{SG1} + i_{SG2} - (1-k) \cdot \frac{Z_{SG1}}{Z_{SG1} + Z_{SG2} + Z_{NLine2}} \cdot i_{ABCG1} + \quad (17)$$

$$s(i_{ABCG2} + i_{cm} + i_{h2})$$

式中:  $i_{r1}$  中触电电流系数为  $[p \cdot s + q \cdot (1-s)]$ ;  $i_{r2}$  中触电电流系数为  $s$ , 计算得

$$p \cdot s + q \cdot (1-s) = \frac{Z_{SG1}}{Z_{OG} + Z_{SG1} + Z_{NLine1}} \cdot s + \frac{Z_{NLine1}}{Z_{OG} + Z_{SG1} + Z_{NLine1}} \quad (18)$$

低压配电网中, 由于线路长度一般在几十米到几百米之间, 因此零线阻抗  $Z_{NLine}$  一般在  $0.1 \Omega$  以下量级, 远小于  $(Z_{OG} + Z_{SG1} + Z_{NLine1})$ , 推导可得系数  $p \cdot s + q \cdot (1-s) < s$ , 即剩余电流  $i_{r1}$  中的触电电流突变量小于  $i_{r2}$  中的触电电流突变量。

故障区段 2: 触电故障发生在变压器与负荷 1 之间(紫色点划线路径)时, 流经变压器与负荷 1 之间的剩余电流  $i_{r1}$  为

$$i_{r1} = \frac{Z_{SG1} + Z_{NLine2} + Z_{SG2}}{Z_{NLine2} + Z_{SG2}} \cdot i_{SG1} + \left( p + q \cdot \frac{Z_{6Y} + Z_{SG2}}{Z_{5Y} + Z_{NLine2}} \right) \cdot i_{SG2} + [p \cdot s + q \cdot (1-s)] \cdot (i_{ABCG2} + i_{cm}) + k(i_{ABCG1} + i_{h1}) \quad (19)$$

流经负荷 1 与负荷 2 之间的剩余电流  $i_{r2}$  为

$$i_{r2} = \frac{Z_{SG1}}{Z_{NLine2} + Z_{SG2}} \cdot i_{SG1} + i_{SG2} - (1-k) \cdot \frac{Z_{SG1}}{Z_{SG1} + Z_{SG2} + Z_{NLine2}} \cdot (i_{ABCG1} + i_{h1}) + s(i_{ABCG2} + i_{cm}) \quad (20)$$

式中:  $i_{r1}$  中触电电流系数为  $k$ ;  $i_{r2}$  中触电电流系数为  $(1-k) \cdot Z_{SG1} / (Z_{SG1} + Z_{SG2} + Z_{NLine2})$ , 推导可得系数  $k > (1-k) \cdot Z_{SG1} / (Z_{SG1} + Z_{SG2} + Z_{NLine2})$ , 即剩余电流  $i_{r1}$  中的触电电流突变量大于  $i_{r2}$  中的触电电流突变量。

根据上述分析, 触电故障发生时故障点对应区段的触电电流  $i_h$  的系数最大, 即突变量幅值最大, 流经其他区段的  $i_h$  由于重复接地点的分流而依次减小, 由此可以对各区段  $i_h$  突变量大小进行分析并判断发生触电故障的位置, 从而进行故障定位。

## 2 暂态触电故障判据

根据第 1 节分析可知, 低压配电台区发生触电故障产生的突变相比于负荷投切产生的突变, 剩余电流中多出触电电流分量, 且各区段的触电电流系数受负荷处重复接地点的影响, 由此构建触电故障判据, 并进行故障定位分析。

### 2.1 基于双电流突变量比值的触电故障判据

系统运行时, 正常负荷投切引起的扰动易被误判成触电故障。现分别对触电故障和正常负荷投切引起的剩余电流突变进行分析。定义比值  $N$  为剩余电流突变量  $\Delta i_r$  与重复接地点电流突变量  $\Delta i_{SG}$  比值的绝对值。

系统正常运行负荷投切时, 比值  $N$  为

$$N = \left| \frac{\Delta i_{SG} + \Delta i_{ABCG} + \Delta i_{cm}}{\Delta i_{SG}} \right| \quad (21)$$

触电故障发生时, 比值  $N$  为

$$N = \left| \frac{\Delta i_{SG} + \Delta i_{ABCG} + \Delta i_{cm} + i_h}{\Delta i_{SG}} \right| \quad (22)$$

依据系统正常运行时的  $N$  值设定阈值  $N_{th}$ , 当发生触电故障时, 由于  $\Delta i_r$  中增加  $i_h$  变量,  $i_h$  幅值一般达到几十毫安,  $N$  值则会因此发生突变, 大于设定阈值  $N_{th}$ , 判断发生触电故障。

在实际工程应用中, 由于一个台区中存在多点重复接地,  $\Delta i_{SG}$  受各个重复接地阻抗的共同影响, 难以通过测量一个重复接地点的电流得到  $\Delta i_{SG}$ 。根据之前分析可知

$$i_{SG} = \beta i_{ub} \quad (23)$$

式中:  $\beta$  为常数, 因此比值  $N$  可近似为

$$N = \left| \frac{\Delta i_{SG} + \Delta i_{ABCG} + \Delta i_{cm} + \Delta i_h}{\Delta i_{SG}} \right| \approx \left| \frac{\Delta i_r}{\beta \cdot \Delta i_{ub}} \right| \quad (24)$$

当低压配电系统无故障运行时, 三相不平衡电流  $i_{ub}$  发生变化产生  $\Delta i_{SG}$ 。由 1.1 节分析得,  $\Delta i_{ABCG}$

的幅值一般在 10 mA 以下量级，而  $\Delta \dot{I}_{cm}$  主要受光照辐射值、温度和湿度等非电气缓慢变量的影响，短时间内不会发生快速的剧烈波动，因此当外界环境稳定时，可暂时忽略  $\Delta \dot{I}_{ABCG}$  和  $\Delta \dot{I}_{cm}$  的影响，得到

$$\Delta \dot{I}_r \approx \Delta \dot{I}_{SG} = \beta \Delta \dot{I}_{ub} \quad (25)$$

因此当系统正常运行且外界环境稳定时，可通过测量  $\Delta \dot{I}_r$  和  $\Delta \dot{I}_{ub}$  的比值得到  $\beta$ ，而  $\beta$  值主要取决于零线阻抗、变压器中性点对地阻抗、重复接地点数量及各接地点阻抗等参数的影响，当系统线路结构不变时  $\beta$  值会保持稳定，不会发生大幅度变化。

综合以上分析，通过事先测量系统线路对应的  $\beta$  值，可以将测量剩余电流突变量  $\Delta \dot{I}_r$  与重复接地点电流突变量  $\Delta \dot{I}_{SG}$  的比值等效为测量剩余电流突变量  $\Delta \dot{I}_r$  与三相不平衡电流突变量  $\Delta \dot{I}_{ub}$  的比值。

### 2.2 触电保护算法构建

阈值  $N_{th}$  的设置与台区的光伏电源和负荷接入的拓扑结构有关，可根据实际的系统拓扑、线路参数和环境条件设置相应的阈值。此外，在实际运行时，受采样分辨率和环境噪声等因素影响，测量计算的剩余电流突变量  $\Delta \dot{I}_r$  和三相不平衡电流突变量  $\Delta \dot{I}_{ub}$  必然含有测量误差，并且当  $\Delta \dot{I}_r$  和  $\Delta \dot{I}_{ub}$  越小时，测量误差对比值  $N$  值计算的影响越大。例如系统正常运行时剩余电流  $\dot{I}_r$  产生 1 mA 以下量级的微小波动，此时计算的  $N$  值因为含有测量误差可能超过设定阈值，导致保护装置误动作。因此，剩余电流  $\Delta \dot{I}_r$  和三相不平衡电流  $\dot{I}_{ub}$  需要设置一定最小有效测量阈值  $\Delta \dot{I}_{rmin}$  和  $\Delta \dot{I}_{ubmin}$ ，只有当  $\Delta \dot{I}_r$  大于阈值  $\Delta \dot{I}_{rmin}$  且  $\Delta \dot{I}_{ub}$  大于阈值  $\Delta \dot{I}_{ubmin}$  时，才开始计算  $N$  值，以保证判断的可靠性和准确性。

构建的触电故障判据算法流程如图 6 所示，算法以两个工频周期为时间步长，逻辑如下。

1) 首次运行时默认系统无故障，计算馈线各个区段  $(i, j)$  对应的  $\beta$  值，当系统线路结构或外界环境(比如不同季节)变化时实时更新  $\beta_{(i,j)}$  值，其中  $i, j = 1, 2, \dots, n$ ，状态标志量  $K = 0$ 。

2) 判断剩余电流有效值是否大于动作整定值，如果是，则进入下一步。

3) 仅当剩余电流  $\Delta \dot{I}_r$  大于最小有效测量阈值  $\Delta \dot{I}_{rmin}$  且三相不平衡电流  $\Delta \dot{I}_{ub}$  大于阈值  $\Delta \dot{I}_{ubmin}$  时，状态标志量  $K$  值变为 1，计算和更新馈线各个区段的  $N_{(i,j)}$ 。

4) 在  $K$  值为 1 的状态下，若  $N_{(i,j)}$  值大于触电故障阈值  $N_{th}$ ，则判定发生触电故障，保护装置动

作；若  $N_{(i,j)}$  值小于阈值  $N_{th}$ ，则判定为非故障， $K$  值变为 0，进入下一周期的  $N_{(i,j)}$  值计算步骤。

5) 判断发生触电故障时，计算各个测量点的  $N_{(i,j)}$  的平均值  $\bar{N}_{(i,j)}$  并进行大小排序， $\bar{N}_{(i,j)}$  值为最大值的测量点即为触电故障发生的区段。

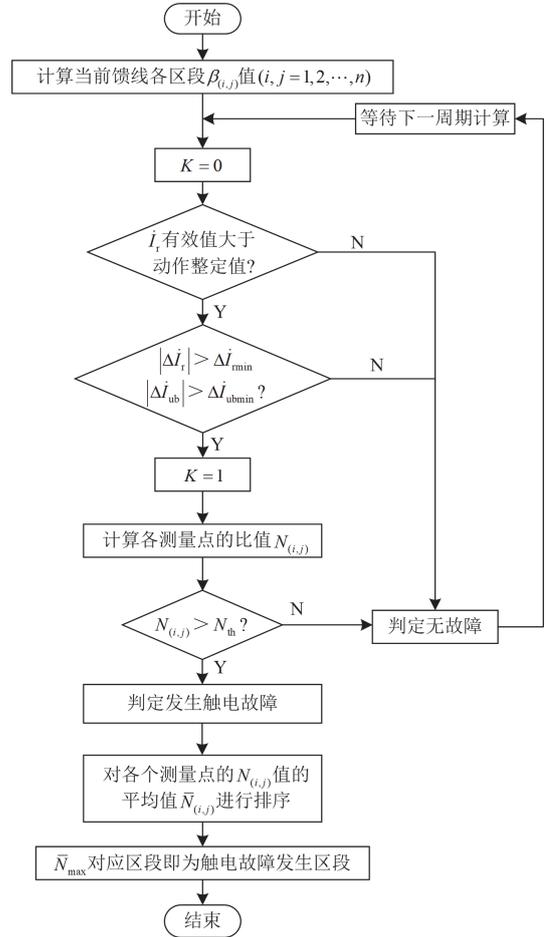


图 6 触电故障判据算法流程图

Fig. 6 Flow chart of electric shock fault criterion algorithm

### 3 仿真验证

搭建含分布式光伏电源的低压配电台区仿真模型，以此获取剩余电流和三相不平衡电流突变量的信号数据，搭建的仿真模型分别如图 7 和图 11 所示。其中单馈线系统主要验证分布式电源、负荷投切、共模漏电流等扰动因素对触电判据的影响，多馈线系统主要验证触电故障定位的准确性。

#### 3.1 单馈线系统扰动因素仿真

在图 7 中，10/0.4 kV 低压配电单馈线系统模型包含两个独立运行的非隔离型三相光伏并网系统，线路参数和负荷参数来源于广东某市安东台区数据。通过改变光照辐射值和温度设置不同的光伏电

源输出功率; 通过 Break 模块设置线路通断时间, 以此模拟三相负荷的随机投切, 改变系统的三相不平衡状态; 通过改变人体等值电路模型的阻抗大小和发生触电故障时间模拟任意相角发生的触电故障。

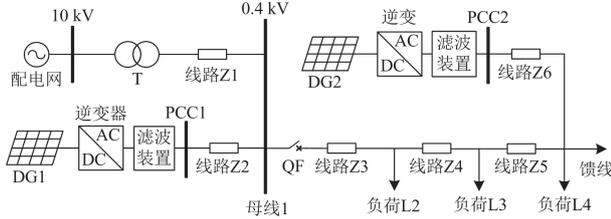


图 7 单馈线系统仿真模型

Fig. 7 Simulation model of the single-feeder system

通过改变线路长度、寄生电容大小、负荷水平等参数生成不同场景的剩余电流数据。关键参数设置如表 1 所示, 采样率为 10 kHz/s。

表 1 仿真参数设置

Table 1 Simulation parameter setting

| 参数                        | 数值       |
|---------------------------|----------|
| 光伏面板开路电压/V                | 39.85    |
| 光伏面板短路电流/A                | 9.75     |
| 最大功率点电压/V                 | 32.26    |
| 最大功率点电流/A                 | 9.30     |
| 光照辐射值/(W/m <sup>2</sup> ) | 600~1000 |
| 寄生电容/(nF/kW)              | 50~150   |
| 重复接地电阻/ $\Omega$          | 2~10     |

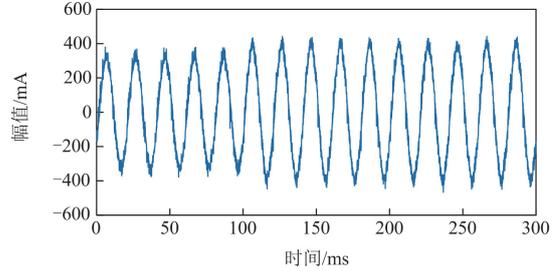
仿真模型中分为两种场景, 其中场景一主要考虑光伏电源向配电网倒送功率以及负荷投切对触电判据的影响; 场景二考虑由外界环境引起的共模漏电流变化对触电判据的影响。

### 3.1.1 场景一仿真分析

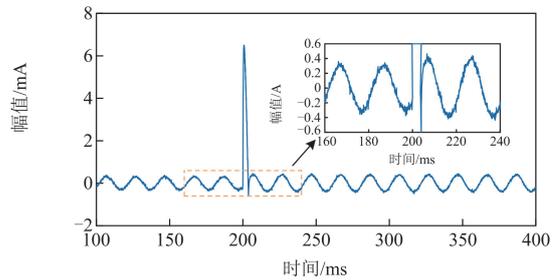
单馈线系统场景一仿真中, 分布式电源 DG2 的输出功率大于负荷 L4, 且 DG1、DG2 两者的总输出功率大于负荷 L2、L3、L4 之和, 由此多出的功率向低压配电交流系统输送。设置负荷 L2、L3 之间的区段(2,3)上在 100 ms 时刻发生触电故障, 200 ms 时刻发生两相负荷投切, 对应的剩余电流波形如图 8 所示。分别获取各区段上的剩余电流和三相不平衡电流, 计算对应的比值  $N$ , 如图 9 所示。

图 9 中: 发生触电故障时, 区段(2,3)上大约延迟 3 ms 后  $\Delta i_r$ 、 $\Delta i_{ub}$  大于最小有效测量阈值, 开始计算比值  $N$ 。其中  $N$  值突变最高达到 67.6, 最后稳定在 20.7 左右。区段(1,2)大约延迟 4 ms 后  $\Delta i_r$ 、 $\Delta i_{ub}$  大于阈值, 其中  $N$  值突变最高达到 41.9, 最后稳定在 10.4 左右。而在区段(3,4)上, 发生触电故障时  $\Delta i_r$  略大于阈值  $\Delta i_{rmin}$ , 但  $\Delta i_{ub}$  小于阈值  $\Delta i_{ubmin}$ , 因此

不进行比值  $N$  的计算。负荷发生投切时, 区段(1,2)、(2,3)、(3,4)上  $N$  值突变最高达到 6 左右。计算的各区段的均值  $\bar{N}$  如表 2 所示。



(a) 发生触电故障时剩余电流波形



(b) 负荷投切时剩余电流波形

图 8 不同状态下剩余电流信号

Fig. 8 Residual current signals in different states

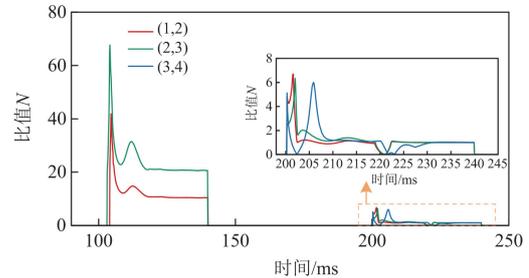


图 9 单馈线系统仿真场景一

Fig. 9 Single-feeder system simulation in scenario 1

表 2 区段(2,3)上触电故障和负荷投切时均值  $\bar{N}$   
Table 2 Average value  $\bar{N}$  of electric shock failure and load switching in section (2,3)

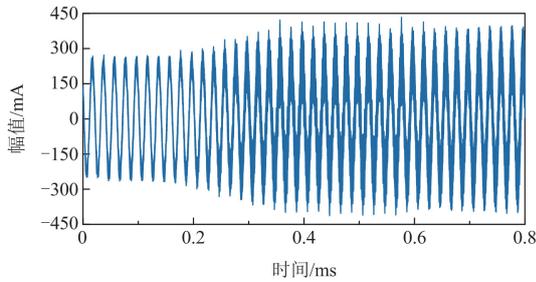
| 测量区段  | 触电 $\bar{N}$ | 负荷 $\bar{N}$ |
|-------|--------------|--------------|
| (1,2) | 12.36        | 1.14         |
| (2,3) | 24.03        | 1.25         |
| (3,4) | —            | 1.19         |
| 故障定位  | (2,3)        |              |

当增加分布式电源 DG2 的输出功率到大于负荷 L2、L3、L4 之和, 并向配电网倒送功率时, 触电判据依旧适用。此外, 当发生单相或三相负荷随机投切时, 依旧可以通过  $N$  值排除剩余电流突变可

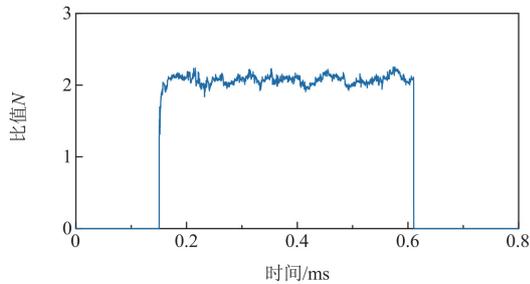
能带来的误扰动。

### 3.1.2 场景二仿真分析

系统未发生触电故障或负荷投切时，光照辐射值和寄生电容大小可能随着外界环境的变化而改变，导致光伏电源的共模漏电流逐渐增加，进而影响剩余电流的幅值逐渐增大并超过 RCD 动作阈值，引起 RCD 误动作，波形图如图 10(a)所示。



(a) 场景二中剩余电流波形



(b) 计算比值N

图 10 单馈线系统仿真场景二

Fig. 10 Single-feeder system simulation in scenario 2

图 10(a)中，剩余电流幅值大约从 0.15 s 开始从 260 mA 左右逐渐增加到 390 mA，超出 RCD 动作阈值，导致其误动作。计算剩余电流增加过程中  $\Delta \dot{I}_r$  大于测量阈值时间段内的  $N$  值，如图 10(b)所示， $N$  值在 1.8~2.4 内波动，与发生触电故障时形成对比，从而通过设置阈值  $N_{th}$  减少 RCD 因寄生电容增大等环境因素而产生的误动作。

### 3.1.3 触电判定动作时限

根据国标 GB/T 6829—2024 规定 RCD 最大分断时间标准，本文以触电故障检测耗时对检测效果进行评价。选取 100 组仿真数据，每组数据均为 2 个工频周期，记录算法检测触电判定时间。其中，检测判定最长耗时 0.0176 s，最短耗时 0.0084 s，平均检测判定耗时 0.0119 s。本文方法对算力要求低，响应速度快，可以满足剩余电流保护灵敏度要求，能够有效降低触电伤害持续的时间。

## 3.2 多馈线系统触电故障定位仿真

搭建如图 11 所示的分布式光伏接入辐射状低压配电网模型。配电网中包含 3 条馈线、8 个负荷

和 5 个分布式电源，其中 DG3、DG4、DG5 分别在负荷 L2 与 L3、L6 与 L7、L8 与 L9 之间接入，以考虑复杂潮流下触电判据的可靠性和触电定位的准确性，仿真主要参数仍然参照表 1 设置。

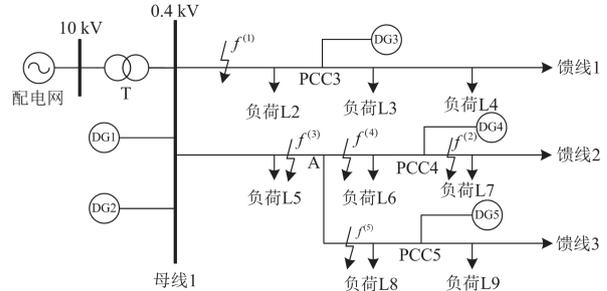


图 11 三馈线系统仿真模型

Fig. 11 Simulation model of the three-feeder system

### 3.2.1 馈线上游侧触电故障 $f^{(1)}$

设置在馈线 1 上的母线 1 与负荷 L2 之间发生触电故障  $f^{(1)}$ ，计算此时各区段间的  $N$  值，如图 12 所示。

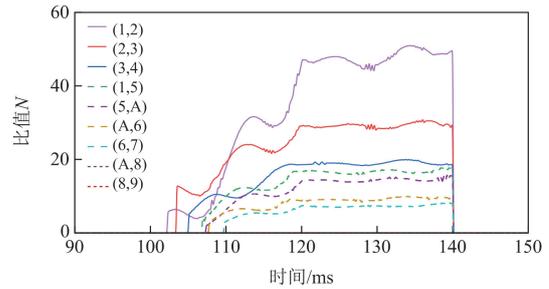


图 12 区段(1,2)之间发生触电故障时  $N$  值

Fig. 12 Value  $N$  of electric shock failure between sections (1,2)

其中区段(1,2)的  $N$  值最高，120 ms 后达到 44~50，区段(2,3)、(3,4)、(1,5)、(5,A)、(A,6)、(6,7)的  $N$  值依次降低，此外区段(A,8)、(8,9)的  $\Delta \dot{I}_r$  均未能超过阈值  $\Delta \dot{I}_{min}$ ，因此不计算  $N$  值。计算各区段的均值  $\bar{N}$  如表 3 所示。根据  $N$  值大小定位触电故障发生区段为(1,2)，符合仿真设定。

表 3 触电故障  $f^{(1)}$  时的均值  $\bar{N}$

Table 3 Average value  $\bar{N}$  of electric shock failure  $f^{(1)}$

| 测量区段  | $\bar{N}$ | 测量区段  | $\bar{N}$ |
|-------|-----------|-------|-----------|
| (1,2) | 34.93     | (A,6) | 8.23      |
| (2,3) | 24.73     | (6,7) | 6.61      |
| (3,4) | 16.16     | (A,8) | —         |
| (1,5) | 14.57     | (8,9) | —         |
| (5,A) | 12.27     | 故障定位  | (1,2)     |

### 3.2.2 馈线下游侧触电故障 $f^{(2)}$

设置在馈线 2 上负荷 L6 与负荷 L7 之间发生触

电故障  $f^{(2)}$ , 计算的  $N$  值如图 13 所示。其中区段(6,7)的  $N$  值最高, 120 ms 后达到 66~70, 区段(A,6)、(5,A)、(1,5)、(A,8)、(1,2)、(2,3)的  $N$  值依次降低, 此外区段(3,4)、(8,9)的  $\Delta I_r$  均未能超过阈值  $\Delta I_{r\min}$ , 因此不计算  $N$  值。

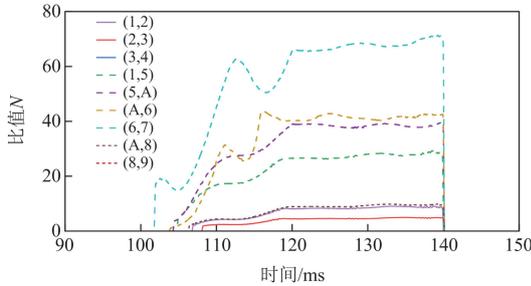


图 13 区段(6,7)之间发生触电故障  $N$  值

Fig. 13 Value  $N$  of electric shock failure between sections (6,7)

计算各区段的均值  $\bar{N}$  如表 4 所示, 根据  $\bar{N}$  大小定位触电故障发生区段为(6,7), 符合仿真设定。

表 4 触电故障  $f^{(2)}$  的均值  $\bar{N}$

Table 4 Average value  $\bar{N}$  of electric shock failure  $f^{(2)}$

| 测量区段  | $\bar{N}$ | 测量区段  | $\bar{N}$ |
|-------|-----------|-------|-----------|
| (1,2) | 7.17      | (A,6) | 33.91     |
| (2,3) | 4.06      | (6,7) | 55.16     |
| (3,4) | —         | (A,8) | 7.65      |
| (1,5) | 23.21     | (8,9) | —         |
| (5,A) | 32.18     | 故障定位  | (6,7)     |

### 3.2.3 馈线分支处触电故障 $f^{(3)}$ 、 $f^{(4)}$ 、 $f^{(5)}$

在馈线 2 上负荷 L5 与负荷 L6 之间连接着馈线 3, 因此负荷 L5、L6、L8 之间存在分支线路, 分别设置在负荷 L5 与分支点 A、分支点 A 与负荷 L6、分支点 A 与负荷 L8 之间发生触电故障, 计算此时各区段间的比值  $N$ 。

#### 1) 触电故障 $f^{(3)}$

图 14 中: 区段(5,A)的  $N$  值最高, 区段(1,5)、(A,6)、(6,7)、(A,8)、(1,2)、(2,3)的  $N$  值依次降低,

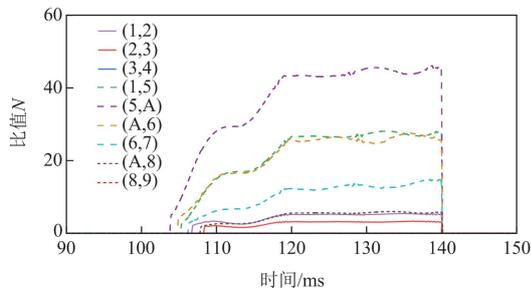


图 14 区段(5,A)之间发生触电故障时的  $N$  值

Fig. 14 Value  $N$  of electric shock failure of sections (5,A)

此外区段(3,4)、(8,9)的  $\Delta I_r$  均未能超过阈值  $\Delta I_{r\min}$ , 因此不计算  $N$  值。

计算各区段的均值  $\bar{N}$  如表 5 所示。根据  $\bar{N}$  大小定位触电故障发生区段为(5,A), 符合仿真设定。

表 5 触电故障  $f^{(3)}$  的均值  $\bar{N}$

Table 5 Average value  $\bar{N}$  of electric shock failure  $f^{(3)}$

| 测量区段  | $\bar{N}$ | 测量区段  | $\bar{N}$ |
|-------|-----------|-------|-----------|
| (1,2) | 3.89      | (A,6) | 17.46     |
| (2,3) | 2.55      | (6,7) | 8.63      |
| (3,4) | —         | (A,8) | 4.78      |
| (1,5) | 18.03     | (8,9) | —         |
| (5,A) | 29.78     | 故障定位  | (5,A)     |

#### 2) 触电故障 $f^{(4)}$

计算各区段的均值  $\bar{N}$  如表 6 所示, 其中区段(A,6)的  $\bar{N}$  最高, 区段(3,4)、(8,9)的  $\Delta I_r$  均未能超过阈值  $\Delta I_{r\min}$ , 因此不计算  $N$  值。根据  $\bar{N}$  大小定位触电故障发生区段为(A,6), 符合仿真设定。

表 6 触电故障  $f^{(4)}$  的均值  $\bar{N}$

Table 6 Average value  $\bar{N}$  of electric shock failure  $f^{(4)}$

| 测量区段  | $\bar{N}$ | 测量区段  | $\bar{N}$ |
|-------|-----------|-------|-----------|
| (1,2) | 7.37      | (A,6) | 53.73     |
| (2,3) | 4.14      | (6,7) | 11.54     |
| (3,4) | —         | (A,8) | 5.09      |
| (1,5) | 23.45     | (8,9) | —         |
| (5,A) | 37.73     | 故障定位  | (A,6)     |

#### 3) 触电故障 $f^{(5)}$

计算各区段的均值  $\bar{N}$  如表 7 所示, 其中区段(A,8)的  $\bar{N}$  最高, 区段(3,4)、(6,7)的  $\Delta I_r$  均未能超过阈值  $\Delta I_{r\min}$ , 因此不计算  $N$  值。根据  $\bar{N}$  大小定位触电故障发生区段为(A,8), 符合仿真设定。

表 7 触电故障  $f^{(5)}$  的均值  $\bar{N}$

Table 7 Average value  $\bar{N}$  of electric shock failure  $f^{(5)}$

| 测量区段  | $\bar{N}$ | 测量区段  | $\bar{N}$ |
|-------|-----------|-------|-----------|
| (1,2) | 4.39      | (A,6) | 4.77      |
| (2,3) | 2.72      | (6,7) | —         |
| (3,4) | —         | (A,8) | 44.07     |
| (1,5) | 13.36     | (8,9) | 16.08     |
| (5,A) | 20.61     | 故障定位  | (A,8)     |

综上, 触电故障  $f^{(3)}$  发生在区段(5,A)之间时, 区段(5,A)的  $\bar{N}$  值最高, (1,5)、(A,6)次之; 触电故障  $f^{(4)}$  发生在区段(A,6)之间时, 区段(A,6)的  $\bar{N}$  值最高, (5,A)、(1,5)次之; 触电故障  $f^{(5)}$  发生在区段(A,8)

之间时，区段(A,8)的 $\bar{N}$ 值最高，(5,A)、(8,9)次之，根据 $\bar{N}$ 值大小定位的故障位置与仿真设置一致。由此通过建立基于双电流突变量比值 $N$ 的触电故障判据，判断是否发生触电故障，并根据均值 $\bar{N}$ 大小进行故障定位。

#### 4 触电试验

为追求模拟生物触电时触电电流数据的合理性，选用细胞容抗特性与人体阻抗相似的活体鸡作为触电试验对象，在自制的触电试验平台上进行试验。

如图 15 所示，本试验平台包括主电路和辅助电路 2 个部分。主电路中，220 V 交流电通过三相变压器转变成 36 V 电源，Load1、Load2、Load3 为三相不平衡负载，此外在插座处通过随机投入或切除用电器具模拟负荷投切对剩余电流的影响。辅助电路由直流电源、示波器以及时间继电器等组成。活体通过接触器连接到 C 相， $R_1$  为试验对象保护电阻。 $R_a$ 、 $R_b$ 、 $R_c$  分别为模拟的各相线路的对地分布电阻， $C_a$ 、 $C_b$ 、 $C_c$  分别为各项对地分布电容。

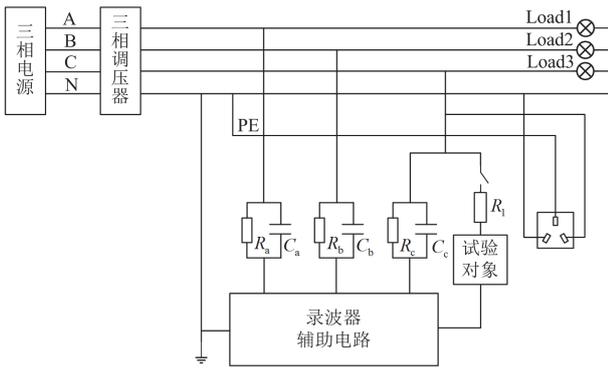


图 15 触电试验平台

Fig. 15 Electric shock test platform

活体触电试验中，设置采样频率为 1000 Hz，试验时间 1 s，触电发生时刻为 0.4 s，在 0.6 s 时刻继电器断开线路，示波器记录整个触电过程的电流波形。

试验过程中通过在干燥和潮湿环境下，分别进行翅一翅、脚一脚，以及翅一脚等部位之间的触电试验共计 50 组，以模拟不同环境条件下活体触电的不同部位对触电电流的差异。干燥环境下翅一脚触电时的一组剩余电流波形如图 16 所示。

根据活体鸡触电电流数据计算的  $N$  值如图 17 所示，其中黑色曲线为翅一翅(Ch-Ch)部位触电，均值  $\bar{N}$  为 32.07；红色曲线为干燥环境脚一脚(JJ)部位触电，均值  $\bar{N}$  为 34.27；蓝色曲线为潮湿环境脚一脚(JJ-Shi)部位触电，均值  $\bar{N}$  为 43.02；绿色曲线

为腿一腿(TT)部位触电，均值  $\bar{N}$  为 31.56。

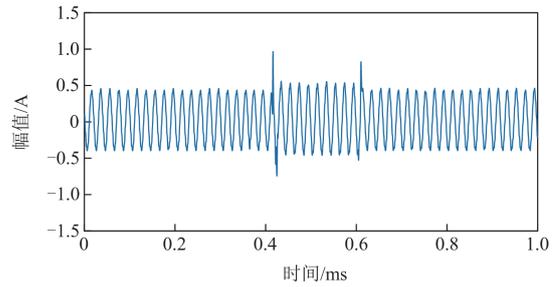


图 16 活体鸡触电试验剩余电流波形

Fig. 16 Residual current waveform of living chicken electrocution test

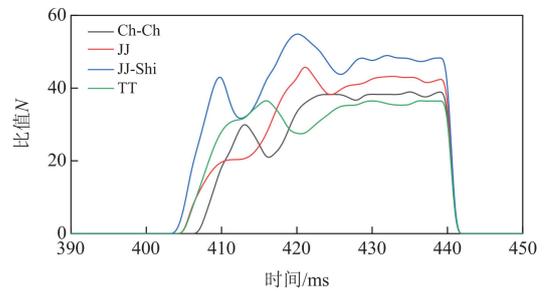


图 17 活体鸡触电试验对应  $N$  值

Fig. 17 Value  $N$  of living chicken electrocution test

#### 5 结论

非隔离型分布式光伏接入的低压配电系统中，台区剩余电流中的共模漏电流易受外界环境变化影响，剩余电流波形复杂。区别于传统的正弦形式，加上三相不平衡负荷的随机投切，幅值随机多变，传统剩余电流保护装置的动作阈值难以整定。为解决上述问题，提出基于剩余电流与重复接地点电流突变量比值的触电故障检测方法，并通过仿真和物理试验验证其可行性，得出以下结论。

- 1) 通过单负荷两点重复接地系统和多负荷多点重复接地系统分别分析了发生触电故障时剩余电流的组成成分中重复接地点电流、正常泄漏电流、共模漏电流和触电故障电流的流通过程。
- 2) 通过仿真验证了触电故障检测判据能够克服分布式电源的接入位置和输出功率、外界环境变化导致共模漏电流发生改变、负荷的随机投切等扰动因素带来的影响，从而减少保护装置的误动情况。
- 3) 通过仿真验证了所提判据可以对计算出的  $N$  值的均值大小进行排序，并根据均值最大值定位发生触电故障的具体区间。

#### 参考文献

[1] 牟浩东. 低压线路泄漏电流监测与漏电保护技术研究[D].

- 淄博: 山东理工大学, 2021.
- MOU Haodong. Research on leakage current monitoring and leakage protection technology of low voltage lines[D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2021.
- [2] UMA U U, D NMADU, N UGWUANYI, et al. Adaptive overcurrent protection scheme coordination in presence of distributed generation using radial basis neural network[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2023, 8(4): 1-19.
- [3] KESAVAN P K, SUBRAMANIAM U, ALMAKHLES D J, et al. Modelling and coordinated control of grid connected photovoltaic, wind turbine driven PMSG, and energy storage device for a hybrid DC/AC microgrid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2024, 9(1): 154-167.
- [4] 翟苏巍, 李银银, 杜凡, 等. 考虑海量分布式能源接入的配电网分布式无功控制策略[J]. 中国电力, 2024, 57(8): 138-144.
- ZHAI Suwei, LI Yinyin, DU Fan, et al. Distributed reactive power control strategy of distribution network considering massive distributed energy access[J]. Electric Power, 2024, 57(8): 138-144.
- [5] YAO Zhilei. Review of dual-buck-type single-phase grid-connected inverters[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2021, 9(4): 4533-4545.
- [6] 沃建栋, 潘武略, 李跃辉, 等. 基于综合谐波驱动的光伏场站集电线路保护新方案[J]. 中国电力, 2025, 58(2): 133-139.
- WO Jiandong, PAN Wulüe, LI Yuehui, et al. New solution for photovoltaic station collector line protection based on comprehensive harmonic drive[J]. Electric Power, 2025, 58(2): 133-139.
- [7] 李倩. 含光伏电源的配用电系统漏电保护的研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2019.
- LI Qian. Study on leakage protection of distribution system with photovoltaic power[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2019.
- [8] 谢小诚, 杨文呈, 赵彦宏, 等. 基于改进双流网络的光伏漏电故障检测算法[J]. 电网与清洁能源, 2025, 41(1): 146-154.
- XIE Xiaocheng, YANG Wencheng, ZHAO Yanhong, et al. An algorithm for detecting photovoltaic leakage faults in low-voltage distribution substations based on two-stream network[J]. Power System and Clean Energy, 2025, 41(1): 146-154.
- [9] 蔡志远, 庞佳, 陈廷辉. 基于剩余电流和漏电阻抗的漏电保护方法的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(12): 61-64.
- CAI Zhiyuan, PANG Jia, CHEN Tinghui. Research on method of leakage current protection based on residual current and leakage impedance[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(12): 61-64.
- [10] LI Kui, LIN Jingyi, NIU Feng, et al. A novel fault leakage current detection method with protection deadzone elimination[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70: 1-9.
- [11] 王尧. 复杂波形条件下剩余电流检测技术研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2012.
- WANG Yao. Research on detecting technology of residual currents under complicated waveform conditions[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2012.
- [12] 武一, 李奎, 王尧, 等. 磁调制式剩余电流传感器的动态励磁过程分析与仿真[J]. 电工技术学报, 2014, 29(7): 244-252.
- WU Yi, LI Kui, WANG Yao, et al. Analysis and simulation of synamic process of excitation current of magnetic modulation residual current transformer[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(7): 244-252.
- [13] 熊晓祎, 肖先勇, 左金威, 等. 触电事故特征改进近似熵检测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(13): 27-33.
- XIONG Xiaoyi, XIAO Xianyong, ZUO Jinwei, et al. Electrical shock feature detection method based on improved approximate entropy[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(13): 27-33.
- [14] 李军, 邓晖, 蔡峥嵘, 等. 低压配电线路剩余电流断路器动作判据的研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2022, 18(3): 217-223.
- LI Jun, DENG Hui, CAI Zhengrong, et al. Research on operation criterion of residual current circuit breaker for low voltage distribution line[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2022, 18(3): 217-223.
- [15] 关海鸥, 李伟凯, 杜松怀, 等. 基于 Hilbert-Huang 变换的生物触电电流检测模型[J]. 农业工程学报, 2017, 33(14): 202-209.
- GUAN Haiou, LI Weikai, DU Songhuai, et al. Detection model of biological electric shock current based on Hilbert-Huang transform[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(14): 202-209.
- [16] 韩晓慧, 杜松怀, 苏娟, 等. 触电信号暂态特征提取及故障类型识别方法[J]. 电网技术, 2016, 40(11): 3591-3596.
- HAN Xiaohui, DU Songhuai, SU Juan, et al. Fault transient feature extraction and fault type identification for electrical shock signals[J]. Power System Technology, 2016, 40(11): 3591-3596.
- [17] 关海鸥, 刘梦, 李春兰, 等. 基于小波包变换和量子神经网络的触电故障类型识别模型[J]. 农业工程学报,

- 2018, 34(5): 183-190.
- GUAN Haiou, LIU Meng, LI Chunlan, et al. Classification recognition model of electric shock fault based on wavelet packet transformation and quantum neural network[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(5): 183-190.
- [18] ZHANG X, LIU Z, WANG Y, et al. Residual current detection method based on variational modal decomposition and dynamic fuzzy neural network[J]. IEEE Access, 2021, 9: 142925-142937.
- [19] 李春兰, 罗杰, 王长云, 等. 基于循环谱特征和聚类分析的触电识别[J]. 电工技术学报, 2021, 36(22): 4677-4687.
- LI Chunlan, LUO Jie, WANG Changyun, et al. Electric shock recognition method based on cyclic spectrum features and cluster analysis[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(22): 4677-4687.
- [20] 蔡智萍, 郭谋发, 魏正峰. 基于 BP 神经网络的低压配电网生命体触电识别方法研究[J]. 电网技术, 2022, 46(4): 1614-1623.
- CAI Zhiping, GUO Moufa, WEI Zhengfeng. Research on recognition method of living body shock in low-voltage distribution network based on BP neural network[J]. Power System Technology, 2022, 46(4): 1614-1623.
- [21] 汪自虎, 王文天, 惠慧, 等. 基于近邻成分分析与优化核极限学习机的光伏接入配电网漏电识别[J]. 高压电器, 2024, 60(6): 203-211.
- WANG Zihu, WANG Wentian, HUI Hui, et al. Leakage recognition method of photovoltaic connected to distribution network based on neighborhood component analysis and optimized kernel extreme learning machine[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(6): 203-211.
- [22] 慕静茹, 喻锟, 曾祥君, 等. 考虑多扰动因子的含光伏电源低压台区漏电故障检测[J]. 南方电网技术, 2024, 18(10): 130-141.
- MU Jingru, YU Kun, ZENG Xiangjun, et al. Leakage fault detection in low-voltage station area with photovoltaic power supply considering multi-disturbance factors[J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(10): 130-141.
- [23] ILIC B, ADAMOVIC Z, SAVIĆ B, et al. Dangers of stray current to information and communication technologies in electrical installations with TN-C-S system of distribution[C]// 2011 19th Telecommunications Forum (TELFOR) Proceedings of Papers, November 22-24, 2011, Belgrade, Republic of Serbia: 1020-1023.
- [24] 高雪寒, 高源, 赵健, 等. 基于数据潮流模型的高比例光伏配电网三相不平衡优化[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(8): 77-87.
- GAO Xuehan, GAO Yuan, ZHAO Jian, et al. Three-phase unbalanced optimization of a distribution network with a high proportion of distributed photovoltaic energy based on a data-driven power flow model[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(8): 77-87.
- [25] 肖华锋, 王晓标, 张兴, 等. 非隔离光伏并网逆变技术的现状与展望[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(4): 1038-1054, 1397.
- XIAO Huafeng, WANG Xiaobiao, ZHANG Xing, et al. State-of-the-art and future trend of transformerless photovoltaic grid-connected inverters[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(4): 1038-1054, 1397.
- [26] 陈果, 龚春阳, 朱丽华, 等. 基于 I-DPWM 的三电平中点钳位光伏逆变器漏电流抑制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(11): 119-130.
- CHEN Guo, GONG Chunyang, ZHU Lihua, et al. Leakage current suppression method of a three-level neutral point clamp photovoltaic inverter based on I-DPWM[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(11): 119-130.
- [27] 宋声远. 非隔离型光伏并网系统漏电流抑制研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2020.
- SONG Shengyuan. Research on leakage current suppression of transformerless photovoltaic grid-connected system[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2020.
- [28] 熊振中. 非隔离型模块级联单相光伏并网逆变器漏电流抑制研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2020.
- XIONG Zhenzhong. Research on leakage current suppression of non-isolated module cascade single-phase photovoltaic grid-connected inverter[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2020.
- [29] 刘永梅, 盛万兴, 杜松怀. 一种面向剩余电流保护装置的触电阻抗建模方法[J]. 河北工业大学学报, 2017, 46(4): 15-23.
- LIU Yongmei, SHENG Wanxing, DU Songhuai. An electric shock impedance modeling method of living organisms in low-voltage distribution network[J]. Journal of Hebei University of Technology, 2017, 46(4): 15-23.

收稿日期: 2024-11-26; 修回日期: 2025-03-05

作者简介:

李军(1979—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 研究方向为主动配电网技术、电力系统继电保护与控制; E-mail: Lijun98313@163.com

朱劲涛(2000—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护与控制。

(编辑 石晋美)