

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.211293

TN-C-S 系统双突变量电流分离漏电保护方法

梁 栋¹, 王 玮¹, 孙中玉², 徐丙垠¹, 翟国亮¹

(1. 山东理工大学电气与电子工程学院, 山东 淄博 255000; 2. 山东大学电气工程学院, 山东 济南 250000)

摘要: 针对低压配网 TN-C-S 系统固有剩余电流大、多级剩余电流漏电保护难以投入的问题, 提出一种基于剩余电流和不平衡电流突变量的电流分离漏电保护方法。首先, 分析 TN-C-S 系统剩余电流成分, 提出负荷投切不影响剩余电流向量与不平衡电流向量之比 M , 而单相接地故障发生时刻会导致 M 值突变。其次, 利用低压配网负荷投切频繁的特点连续更新 M 值, 实时计算系统漏电流突变幅值, 以漏电流突变幅值越限作为故障判据。仿真和实测数据表明, 所提方法对 50 mA 以上漏电故障的正确识别率达 99% 以上, 变压器出口处可靠动作阈值可低至 70 mA, 能够满足 TN-C-S 系统多级漏电保护的灵敏度要求。

关键词: 漏电保护; 电流分离; 剩余电流; 不平衡电流; 双突变量

A current separation leakage protection method using double mutations for TN-C-S systems

LIANG Dong¹, WANG Wei¹, SUN Zhongyu², XU Bingyin¹, ZHAI Guoliang¹

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255000, China;

2. School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250000, China)

Abstract: To solve the problem that multi-level residual current (RC) leakage protection cannot be used in LV TN-C-S distribution systems because of the large inherent RC, a current separation leakage protection method based on RC and unbalanced current mutation vectors is constructed. First, the RC in TN-C-S systems is analyzed. It is proposed that load switching without faults does not affect M , the ratio of the RC vector to the unbalanced current vector, and single-phase grounding faults will lead to sudden changes of M . Then, M is continuously updated using the characteristics of frequent load switching in the LV systems, and the leakage current mutation amplitude of the system is calculated in real time. The 'amplitude exceeding limit' is used as the fault criterion. Simulations and field tests show that the proposed method has a correct recognition ratio of over 99% for leakage faults above 50 mA, and the reliable action threshold at the outlet of the transformers can be as low as 70mA. This meets the sensitivity requirements for the multi-level leakage protection of TN-C-S systems.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52077221).

Key words: leakage protection; current separation; residual current; unbalanced current; double mutations

0 引言

国家统计局有关数据显示, 中国每年因触电死亡的人数约 8000 人, 年用电量与触电死亡人数比约 8 亿 kWh/人, 相比美国的每年约 400 人和 100 亿 kWh/人还有较大差距。超过 85% 的触电事故发生在低压配网, 因此, 提高低压配网漏电保护能力是减少触电事故的重要途径^[1-2]。

目前国内外主要采用剩余电流保护装置(Residual

Current protection Device, RCD)实现漏电保护。国际电工标准 IEC 60364-5-53 规定, TT 系统电源进线处必须装设 RCD^[3]; TN 系统电源进线处也应装设, 用以切断电弧性接地故障。我国国家标准 GB/T 13955-2017《剩余电流动作保护装置安装与运行》规定, 低压配电线路应装设分级剩余电流保护^[4]。

现有 RCD 普遍采用基于剩余电流幅值的保护原理, 即幅值比较法^[5-9]。从基本原理上, 该方法适用于正常工作时近似完全封闭的系统, 即正常工作电流完全经由相线和零线返回电源中性点。然而实际系统中, 线路和用电器存在对地电容和电导, 会

产生一部分固有剩余电流。在我国当前大量新建或由旧系统改造的 TN-C-S 接地系统中, 除电源侧系统接地外, 还存在负荷侧保护接地, 也会产生固有剩余电流^[10]。幅值比较法判据需要躲过正常运行时的固有剩余电流, 不可避免地会存在保护死区, 因此仅适用于固有剩余电流小的 TT 系统和 TN-S 系统^[11]。

近年来, 为克服固有剩余电流的影响, 提高触电保护的灵敏度, 电流脉冲法、鉴相鉴幅法^[12-13]、电流分离法相继被提出。电流脉冲法利用剩余电流幅值的突变量进行判断, 由于故障电流相角的随机性, 同样存在较大的保护死区。鉴相鉴幅法同时利用剩余电流幅值和相角的突变量进行判断, 计算复杂, 在实际应用中存在保护误动和拒动现象, 保护效果并不理想。电流分离法主要基于生物体触电时的暂态和稳态特性, 从剩余电流中将触电电流分离出来, 根据触电电流进行动作判定从而消除保护死区。电流分离法是目前触电保护的主流研究方法, 部分学者提出了基于小波分析和神经网络^[14-15]、小波包分析和混沌理论^[16]、BRF-FNN^[17]、支持向量机^[18]、希尔伯特-黄变换^[19]、半波真有效值^[20]、循环谱和聚类分析^[21]、奇异值差分谱熵复杂度^[22]、椭圆域分割^[23]等触电电流分离方法, 但尚无一种方法能够确保其保护效果的普适性。

在低压配网尤其是农村配网中, 还普遍存在 RCD 安装不规范、接地点设置错误、末级保护人为关闭等现象, 同时各种电力电子设备的使用也使得固有剩余电流谐波特征越发复杂^[24-28], 使得依靠剩余电流幅值、相角或者时频特征的漏电保护方法难以满足应用需求。

目前的漏电保护方法研究过多注重数学工具的应用, 在保护基本原理上挖掘不够深入, 方法可操作性也没有达到足够实用的程度。故本研究针对单一重复接地点 TN-C-S 系统的漏电回路进行了分析, 研究了接地故障发生前后电源进线处电流变化情况, 根据电流的突变关系构建了一种原理上足够可靠的漏电保护方法, 为未来相关研究提供新的思路 and 方向。

1 TN-C-S 系统漏保无法投入原因分析

理想的 TN-C-S 系统及其三相剩余电流保护如图 1 虚线框以外部分所示, 除变压器处接地外, 线路上还存在重复接地点 P_1 。总保护(简称总保)的保护范围为一个台区, 由于 RCD 原理限制, 变压器出口处不能安装总保, 只进行短路过流保护; 中级保护(简称中保)保护一栋或多栋建筑, 一般安装在

建筑物的重复保护接地点之后, 动作定值以 30 mA、50 mA、100 mA 为标准; 末级保护(简称末保)为住宅配电保护(户保)或单台用电设备的保护, 动作阈值不高于 30 mA, 特别潮湿的场所动作值不高于 6 mA。

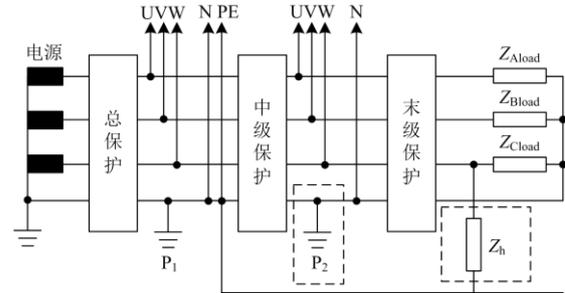


图 1 TN-C-S 系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram of TN-C-S systems

然而在实际 TN-C-S 系统中, 总保无法正常投入。除中保与总保之间存在接地点外(如图 1 的 P_1 处), 由于线路结构复杂、安装不规范等因素, 中保与末保之间存在重复接地点的现象十分普遍(如图 1 的 P_2 处), 这类中保也无法投入。为分析中保、总保无法投入的原因, 给定以下简化场景。

1) 变压器仅有 1 条出线, 且线路中无分支线路。

2) 线路中共有两处接地, 一为变压器中性点, 二为负荷处零线(对应图 1 中接地点 P_2), 此时变压器出口处保护既是总保也是中保。

3) 线路利用 T 模型进行描述。

系统完整电路如图 2 所示, 图中 Z_{Aline1} 、 Z_{Aline2} 、 Z_{Bline1} 、 Z_{Bline2} 、 Z_{Cline1} 、 Z_{Cline2} 、 Z_{Nline1} 、 Z_{Nline2} 为三相线路和零线阻抗, Z_{AG1} 、 Z_{BG1} 、 Z_{CG1} 为三相线路对地泄漏阻抗, Z_{NG} 为零线对地阻抗, Z_{AG2} 、 Z_{BG2} 、 Z_{CG2} 为用电器对地泄漏阻抗, Z_{OG} 为变压器中性点对地阻抗, Z_{SG} 为重复接地点对地阻抗, Z_{Aload} 、 Z_{Bload} 、 Z_{Cload} 为三相负荷, Z_H 为 C 相漏电故障的对地阻抗, \dot{I} 为工频电流相量, 下标对应不同阻抗支路, 箭头方向为参考方向。

图 2 所示电路结构具有一定的对称性, 但在低压配网中三相线路和零线参数对称性差, 三相负荷随机性强, 因此以对称分量法转化为序分量并不能有效降低问题的复杂度。为进一步分析, 对图 2 所示电路进行简化。

由于线路阻抗远小于负荷阻抗, 因此忽略三条相线的线路阻抗 Z_{Aline1} 、 Z_{Aline2} 、 Z_{Bline1} 、 Z_{Bline2} 、 Z_{Cline1} 、 Z_{Cline2} 。零线对地电压低, 经由 Z_{NG} 泄漏的

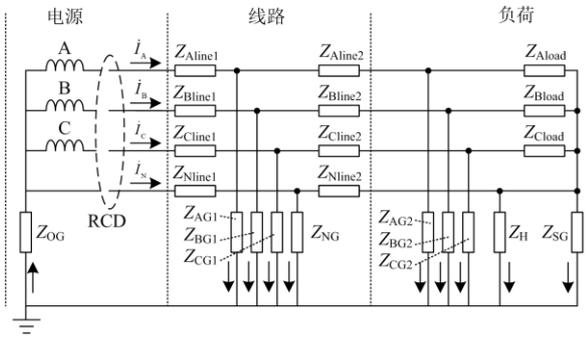


图 2 TN-C-S 系统等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit of TN-C-S systems

电流幅值小，故忽略 Z_{NG} 。经以上简化并合并同类元件后得到图 3 所示简化电路。图 3 中：

$$Z_{Nline} = Z_{Nline1} + Z_{Nline2} \quad (1)$$

$$Z_{AG} = Z_{AG1} PZ_{AG2} \quad (2)$$

$$Z_{BG} = Z_{BG1} PZ_{BG2} \quad (3)$$

$$Z_{CG} = Z_{CG1} PZ_{CG2} \quad (4)$$

对变压器中性点 O 作 KCL 分析易知，剩余电流为

$$I_r = I_{OG} = I_A + I_B + I_C - I_N = I_u - I_N \quad (5)$$

式中： I_r 为剩余电流； I_u 为不平衡电流。

又有

$$I_{OG} = I_{AG} + I_{BG} + I_{CG} + I_{SG} + I_H = I_{ABCG} + I_{SG} + I_H \quad (6)$$

式中： I_{ABCG} 为三相线路和负荷的正常漏电流； I_{SG} 为由重复接地点流入大地的泄漏电流； $I_{ABCG} + I_{SG}$ 为正常运行时的固有剩余电流。

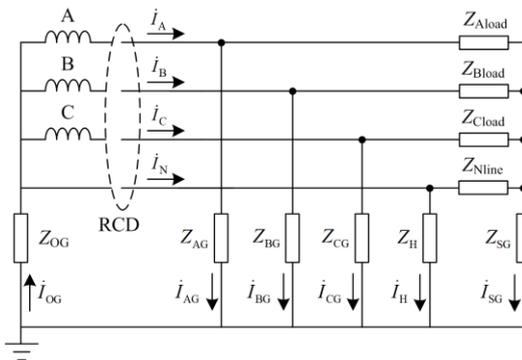


图 3 TN-C-S 系统简化等效电路

Fig. 3 Simplified equivalent circuit of TN-C-S systems

由式(6)可见，剩余电流 I_r 中除包含故障电流 I_H 外，还包括重复接地点电流 I_{SG} 和三相正常漏电流 I_{ABCG} 。

首先分析重复接地点电流 I_{SG} ，零线阻抗 Z_{Nline}

为 1Ω 以下量级，中性点接地阻抗 Z_{OG} 不高于 4Ω ，重复接地点阻抗 Z_{SG} 不高于 10Ω ，远小于线路和用电器的对地阻抗 Z_{AG} 、 Z_{BG} 、 Z_{CG} 。因此三相不平衡电流 I_u 几乎全部经由零线和大地流回中性点，忽略 I_{AG} 、 I_{BG} 、 I_{CG} ，有

$$\begin{cases} I_N + I_{SG} = I_u \\ \frac{I_{SG}}{I_N} = \frac{Z_{Nline}}{Z_{OG} + Z_{SG}} \end{cases} \quad (7)$$

整理得

$$I_{SG} = \frac{Z_{Nline}}{Z_{OG} + Z_{SG} + Z_{Nline}} I_u = M I_u \quad (8)$$

式中， M 是一个常复系数。

可见 I_{SG} 受负荷三相不平衡影响，如当 $Z_{Nline} = 0.1 \Omega$ 、 $Z_{OG} + Z_{SG} = 1 \Omega$ 、 $|I_u| = 11 \text{ A}$ 时， I_{SG} 可达到 1 A 。线路零线阻抗越大，重复接地点接地电阻越小，则重复接地点接地电流越大。

三相正常漏电流 I_{ABCG} 为

$$I_{ABCG} = I_{AG} + I_{BG} + I_{CG} = \frac{U_A}{Z_{AG}} + \frac{U_B}{Z_{BG}} + \frac{U_C}{Z_{CG}} \quad (9)$$

式中， U_A 、 U_B 、 U_C 分别为三相对地电压。由于 Z_{OG} 和 Z_{SG} 很小，不平衡电流导致 O 点和 S 点的电位改变较小，因此近似认为 U_A 、 U_B 、 U_C 不变，始终等于相线对中性点 O 点的电压。

一个台区负荷的改变通常意味着用电器投入数量的变化，以 A 相负荷增大为例，A 相投入的用电器增多、负荷增大，则 A 相用电器的对地漏电路增加，对地总阻抗 Z_{AG2} 减小，A 相漏电流 I_{AG} 增大。在正常情况下，线路和用电器的对地电导很小，正常漏电主要由对地电容导致，因此 Z_{AG} 、 Z_{BG} 、 Z_{CG} 主要呈容性。又由于用电器种类和投切具有强随机性， Z_{AG} 、 Z_{BG} 、 Z_{CG} 几乎不可能完全平衡，故实际运行的低压配网中均存在容性的三相正常漏电流 I_{ABCG} ，其幅值较小，一般一个台区的正常漏电流 I_{ABCG} 幅值在几十至几百毫安。

综上，TN-C-S 系统的固有剩余电流主要由系统对地电容、电导引起的正常漏电流 I_{ABCG} 和三相负荷不平衡引入的重复接地点电流 I_{SG} 构成，后者幅值远高于前者，是固有剩余电流的主要构成成分。在实际运行的低压配网中，一个 TN-C-S 台区正常运行时的固有剩余电流幅值可达到 5 A 甚至 20 A 以上，远高于漏电保护所要求的最大动作电流，导致总保和部分中保无法投入。

2 双突变量电流分离原理

根据第 1 节分析可知, TN-C-S 系统固有剩余电流与负荷直接相关, 负荷的投切可能造成剩余电流的突变, 为实现对故障电流 ΔI_H 的识别, 本节对负荷投切引起的剩余电流突变进行分析。

由式(5)、式(6)可知, 故障前剩余电流为

$$I_r = I_{ABCG} + I_{SG} \quad (10)$$

故障后剩余电流为

$$I_r = I_{ABCG} + \Delta I_{ABCG} + I_{SG} + \Delta I_{SG} + \Delta I_H \quad (11)$$

式中: ΔI_{ABCG} 为正常漏电流突变量; ΔI_{SG} 为重复接地点电流突变量; ΔI_H 为故障电流变化量。

则故障前后的剩余电流突变量为

$$\Delta I_r = \Delta I_{ABCG} + \Delta I_{SG} + \Delta I_H \quad (12)$$

在一个总保或中保的保护区域内, 系统正常运行时, 单一负荷投切造成的相电压波动可忽略。由于用电器数目有限, 同一工频周期内用电器投切数量较少, 而单一用电器的正常漏电流一般不足 1 mA, 最大不超过 5 mA, 故由负荷投切导致的正常漏电流突变量 ΔI_{ABCG} 应为 10 mA 以下量级。鉴于 ΔI_{ABCG} 幅值微小且随机性强, 故将其忽略并归入最终的系统误差, 有

$$\Delta I_r = \Delta I_{SG} + \Delta I_H \quad (13)$$

由式(8)、式(13)可得, 故障电流突变量 ΔI_H 为

$$\Delta I_H = \Delta I_r - M \Delta I_u \quad (14)$$

由式(8)、式(14)可见, 若接地点接地阻抗和零线阻抗为确定值, 且区内无接地故障, 则有

$$M = \frac{\Delta I_r}{\Delta I_u} \quad (15)$$

因此理论上, 当线路无故障且三相不平衡电流发生变化, ΔI_u 不为零时, 即可求得当前的 M 值。又由于 M 值取决于接地点阻抗、零线阻抗, 其改变主要由气温、湿度等非电气缓变量引起, 因此 M 值不会发生快速、剧烈的波动, 故可认为未来一段较短时间内 M 值等于当前的 M 计算值。

基于以上分析, 可得出一种利用剩余电流和不平衡电流两个突变量的漏电保护方法, 其基本构成和故障判定方法如下:

- 1) 按式(15)实时计算并更新复常数 M ;
- 2) 按式(14)实时计算当前的故障电流突变量 ΔI_H ;
- 3) ΔI_H 幅值大于确定的故障判定阈值 I_{th} , 则判定为故障, 否则判定为非故障。

这种利用剩余电流和不平衡电流两个突变量进

行保护的方法, 即为双突变量电流分离漏电保护方法, 简称双突变量法(Double Mutation Method, DMM)。

值得一提的是, 在以上分析中, 并不涉及剩余电流和不平衡电流的相位, 当测量的基准相位转过相角 θ 时, 由式(15)易知, M 计算值不变, 式(14)变为

$$\Delta I_H = (\Delta I_r - M \Delta I_u) e^{j\theta} \quad (16)$$

即当基准相位不同时, 计算的 ΔI_H 仅改变一个相角 θ , 相量幅值是不变的, 因此系统不需要固定的全局时钟。

3 双突变量漏电保护算法

由式(8)、式(14)一式(16)可知, 要实现 ΔI_H 的识别, 需满足以下条件。

1) 测量剩余电流相量 ΔI_r 和不平衡电流相量 ΔI_u ;

2) 不平衡电流突变量 ΔI_u 不恒为零;

3) 首次计算 M 值时, 系统中无故障。

当前智能配电终端的硬件已足以满足条件 1); 配电系统中, 三相不平衡是低压配网的常态, 任何负荷的投切都有可能产生不平衡电流突变, 产生 ΔI_u , 因此认为条件 2) 总可满足; 漏保装置首次运行时系统中已存在接地故障的几率很低, 因此默认条件 3) 总能满足。故基于式(8)、式(14)一式(16)的漏电保护方法在现有技术条件下可以实现。

构建如图 4 所示的双突变量保护算法。

图 4 中, K 为状态标志量, I_{th} 为故障判定阈值, I_{min} 为最小有效测量阈值。

算法以一个工频周期为时间步长, 逻辑如下。

1) 算法首次运行时, 状态标志量 $K=0$, 默认为无故障, 进入 M 值计算步骤。

2) 仅当 ΔI_u 幅值大于最小有效测量阈值 I_{min} 时, 进行 M 值计算和更新。

3) K 维持 0 值, 直至 M 值完成首次更新后, K 值变为 1。

4) 在 K 值为 1 状态下, 以本周期计算的剩余电流突变相量 ΔI_r 、不平衡电流突变相量 ΔI_u 以及当前 M 值, 按(14)计算故障电流突变相量 ΔI_H 。

5) 在 K 值为 1 状态下, 若 ΔI_H 幅值不大于故障判定阈值 I_{th} , 则判定为非故障, 进入 M 值计算步骤, 若 ΔI_H 幅值大于故障判定阈值, 则判定为故障, 保护动作。

以状态标志量 K 标记 M 值, 首次更新的原因为:

在算法启动后, M 值为设定的默认初始值, 由式(8)可知, M 值与线路参数和接地点阻抗有关, 不同线路或同一线路不同环境条件(如季节、天气等)下的 M 值不同, 以默认的 M 初始值计算的 $\Delta \dot{I}_p^{\&}$ 不可信, 仅当 M 值完成首次更新后, 算法才能生效。

为了保证计算的可靠性, 设置最小有效测量阈值 I_{\min} , 在实际环境中, 测量受 A/D 采样分辨率、环境噪声等因素影响, 测量计算的不平衡电流突变量中必然包含测量误差 $\Delta \dot{I}_e^{\&}$, 则有

$$M = \frac{\Delta \dot{I}_r^{\&}}{\Delta \dot{I}_u^{\&} + \Delta \dot{I}_e^{\&}} \quad (17)$$

由式(17)可知, 不平衡电流幅值越小, 测量误差 $\Delta \dot{I}_e^{\&}$ 对 M 值计算的影响越大, 尤其当 $|\Delta \dot{I}_u^{\&}|$ 趋于 0 时, 计算的 M 值将完全不可信。因此, 需要设置最小有效测量阈值 I_{\min} , 以保证 M 值及后续 $\Delta \dot{I}_p^{\&}$ 计算的可信性。

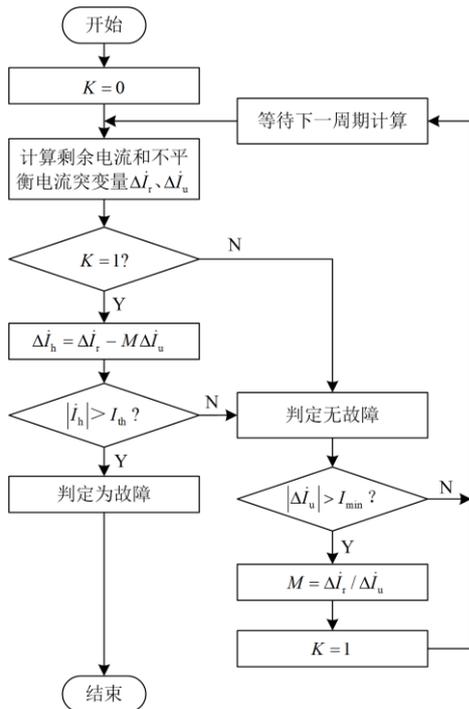


图 4 双突变量算法流程图

Fig. 4 Algorithm flow chart of DMM

4 仿真和试验验证

4.1 仿真

按照图 2 所示的系统电路对剩余电流 $\dot{I}_r^{\&}$ 和不平衡电流 $\dot{I}_u^{\&}$ 进行仿真。三相线路和零线的单位长度参数相同, 每相线路的长度在 0~2 km 内随机取值。每确定一种三相线路长度组合, 进行 4 组仿真, 分

别为无故障组、7333 Ω故障组、4400 Ω故障组和 2200 Ω故障组, 分别对应无故障、故障电流 30 mA、故障电流 50 mA 和故障电流 100 mA 情景。每组仿真 100 次, 三相负荷均为阻感性, 每次仿真中三相负荷阻抗独立随机取值, 电阻和感抗取值为 1~10 Ω, 每次仿真得到一个 $[\dot{I}_r^{\&}, \dot{I}_u^{\&}]$ 对(记作 I_p)。故障组仿真中, 接地相随仿真次数依次按 A 相、B 相、C 相顺序改变。

每种线路长度组合共计获得 400 个 I_p , 每个 I_p 对应一种无故障或有故障稳态, 以两个 I_p 表征系统在不同稳态间的切换, 模拟负荷投切或故障投入。

对每个线路长度组合的仿真数据处理时, 以无故障组的任意两个不同的 I_p 按(15)计算得到当前的 M 计算值。取无故障组 I_p 作为上一时刻状态, 分别从无故障组、7333 Ω故障组、4400 Ω故障组和 2200 Ω故障组取 I_p 作为当前时刻值(无故障组取与上一时刻值不同的 I_p), 二者遍历所有组合, 则每个线路长度组合下, 得到表征无故障负荷投切的结果 9900 个、表征负荷投切与故障同时发生的结果 30 000 个(三种故障电阻结果各 10 000 个)。最后, 对全部仿真结果进行统计分析。

剩余电流相量幅值、相角随负荷和故障的突变情况如图 5 所示, 由图 5(a)可见, 正常情况下, 负荷的突变可导致剩余电流幅值产生 0~20 A 的突变以及任意相角的突变。

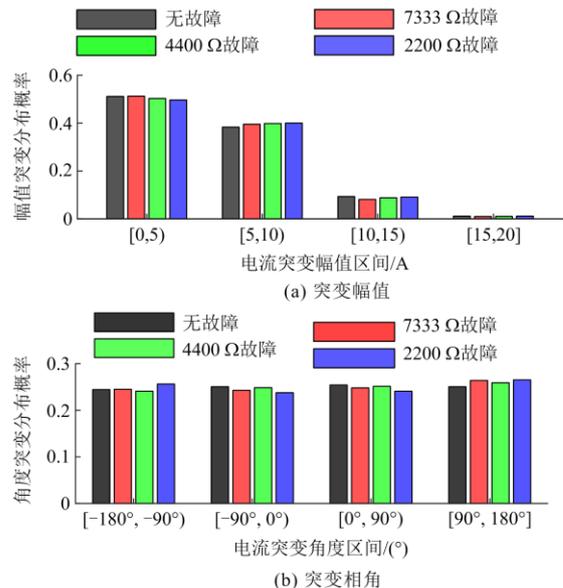


图 5 仿真剩余电流相量幅值、相角突变分布

Fig. 5 Mutation distributions of the simulated residual currents' amplitudes and phase angles

在幅值方面, 负荷投切对剩余电流幅值的影响远远超过漏电保护所要求的 30~100 mA, 传统阈值方法失效。

在幅值突变量方面, 故障造成的剩余电流幅值突变远小于负荷投切造成的剩余电流幅值突变, 即剩余电流幅值突变量无法判断故障的存在性, 则电流脉冲法失效。

在相角突变量方面, 负荷投切可造成任意相角的剩余电流突变, 故障造成的剩余电流相角突变与负荷投切无法区分, 即剩余电流突变相角不能用于故障判定。综上, 分析剩余电流幅值突变量和相角突变量可知, 利用剩余电流相量突变量进行故障判别的鉴相鉴幅法的可靠性不足。

从剩余电流突变波形来看, 阻性负荷投切可造成与故障极其相似的波形变化, 因此基于剩余电流波形突变特征识别的小波分析、人工智能等方法难以应用。

按本文所提 DMM 方法, 以无故障组 I_p 进行 M 值计算, 再以计算的 M 值对稳态切换时的故障电流突变相量 $\Delta\hat{I}_H$ 进行计算, 并取其幅值 $|\Delta\hat{I}_H|$ 。对于一组确定的线路长度组合, 典型的 $|\Delta\hat{I}_H|$ 计算值分布如图 6 所示。由图 6 可知, 在无故障、故障电阻不同时, 故障电流计算值具有明显不同的分布特征。

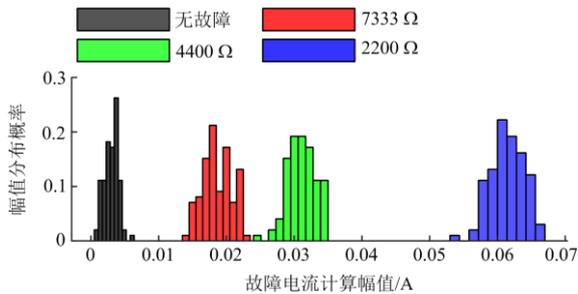


图 6 典型故障电流计算幅值分布

Fig. 6 Typical distribution of the calculated fault current amplitudes

在该组仿真中, 当故障过渡电阻为 7333 Ω 时, 实际故障电流约 30 mA, 其计算值中值为 19 mA; 当故障过渡电阻为 4400 Ω 时, 实际故障电流约 50 mA, 其计算值中值为 31 mA; 当故障过渡电阻为 2200 Ω 时, 实际故障电流约为 100 mA, 其计算值中值为 62 mA。故障电流计算值约为实际值的 60%。

若将故障判定阈值 I_{th} 设定为 8~13 mA, 则对于图 6 所示的典型结果而言, 能够完全区分无故障和有故障的情况。

进行 100 种三相线路长度随机组合的仿真, 总

计得到 399 万个仿真结果, $|\Delta\hat{I}_H|$ 计算值统计分布如表 1 所示。

由表 1 统计结果可见, 若故障判定阈值 I_{th} 设定为 5 mA, 则无故障保护误动次数所占比例约 2.43%, 99.9% 以上的 7333 Ω 故障能够正确动作, 4400 Ω 故障和 2200 Ω 故障正确动作率达到 100%; 当 I_{th} 提高至 10 mA 时, 保护误动率降为 0.011%, 此时 7333 Ω 故障正确动作率下降至 96.96%, 4400 Ω 故障和 2200 Ω 故障正确动作率仍保持在 99% 以上。

表 1 仿真故障电流幅值分布统计

Table 1 Total distribution of the simulated fault current amplitudes

分布区间	区间内次数占总次数比例/%			
	NC	7333 Ω	4400 Ω	2200 Ω
>5 mA	2.43	99.98	100.00	100.00
>10 mA	0.011	96.96	99.99	100.00
>15 mA	0.00	9.47	99.61	100.00
>20 mA	0.00	0.11	83.23	100.00
>25 mA	0.00	0.00	3.87	99.99
>30 mA	0.00	0.00	0.056	99.82

注: NC 表示无故障, 7333 Ω、4400 Ω、2200 Ω 分别表示投入的故障阻值。

进一步分析发现, 无故障而 $|\Delta\hat{I}_H|$ 计算值超过 10 mA 的仿真组别, 均为线路长度极端不平衡的情况, 如 A 相 1.76 km、B 相 1.98 km、C 相 0.001 km 或 A 相 1.31 km、B 相 0.22 km、C 相 1.87 km 等。在实际低压配网中, 这种情况极少出现, 即无故障情况下, 故障电流计算值达到 10 mA 的可能性要低于 0.011%, 故实际应用中, 当系统三相线路长度差别不太大时, I_{th} 可设定为 10 mA。此时, 当接地故障电流为 30 mA 时, 保护动作可靠性约为 97%; 当接地故障电流为 50 mA 时, 保护动作可靠性达 99% 以上。

4.2 实验室仿真系统试验

在实验室环境中搭建封闭试验系统进行试验, 以验证方法的可行性。为确保安全性以及参数的可控性, 按图 7 所示电路搭建封闭的试验环境, 以 100 kW 三相可调负荷的随机投切模拟线路负荷变化情况。

图 7 中, CTR、CT0 分别为剩余电流互感器、不平衡电流互感器, C_{AG} 、 C_{BG} 、 C_{CG} 分别为三相相对地电容, R_{OG} 、 R_{SG} 分别为电源中性点和重复接地点接地电阻, R_{Nline} 为零线电阻, Z_{Aload} 、 Z_{Bload} 、 Z_{Cload} 分别为三相负荷, R_H 为故障接地电阻。

试验时, R_{Nline} 、 R_{OG} 为 0.1 Ω, R_{SG} 为 5 Ω, R_H

取值分别为 5 kΩ、6.67 kΩ、10 kΩ 和 20 kΩ，故障电流幅值分别约为 44 mA、33 mA、22 mA 和 11 mA，进行负荷投切及故障投切试验，每一次负荷投切后进行一次故障投切，典型剩余电流测试波形如图 8 所示，其中箭头处为负荷或故障投入时刻。

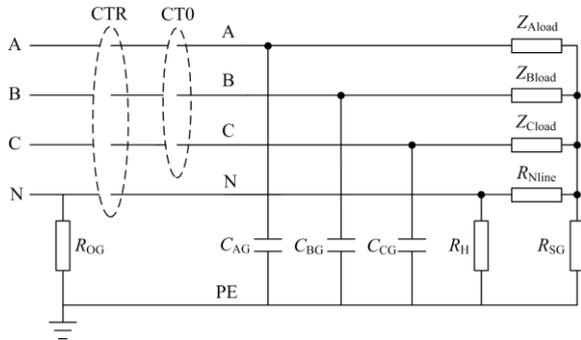


图 7 试验电路
Fig. 7 Test circuit

负荷投切造成的突变量约为 150 mA，故障投入造成的剩余电流幅值突变约为 33 mA，同时故障投入的相位变化、波形特征与负荷投切没有显著差异。幅值比较方法、电流脉冲方法、鉴相鉴幅方法或基于波形特征识别的电流分离方法均无法可靠完成故障检测。

图 8 所示的负荷投切和故障投入处，按本文双突变量方法进行处理后，剩余电流幅值 I_r 和故障电流突变幅值 $|\Delta I_{th}|$ 如图 9 所示。在负荷投切后， $|\Delta I_{th}|$ 变化量小于 1 mA；在故障投入后， $|\Delta I_{th}|$ 发生突变，最大值达 28.6 mA，通过简单的阈值判断即可完成故障判定。

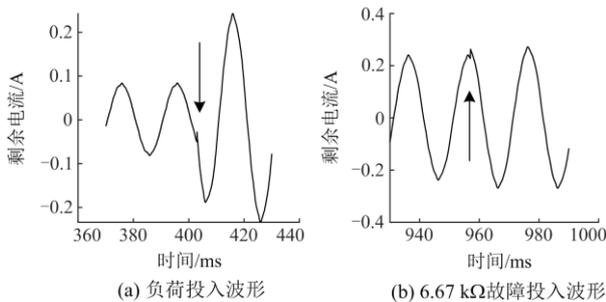


图 8 典型实测波形

Fig. 8 Typical tested waveforms

试验中，负荷投入、负荷切除和故障投入分别进行了 125 次，其中，5 kΩ 故障 37 次、6.67 kΩ 故障 38 次、10 kΩ 故障 30 次和 20 kΩ 故障 20 次，故障判定阈值 I_{th} 分别为 3 mA、5 mA、10 mA、15 mA 时，故障检出次数占比如表 2 所示。

在全部试验中，仅 20 kΩ 故障组在 $I_{th} = 3$ mA 时出现一次将负荷投入误判为故障，在 $I_{th} \geq 5$ mA 的所有测试组中，均未出现误判。

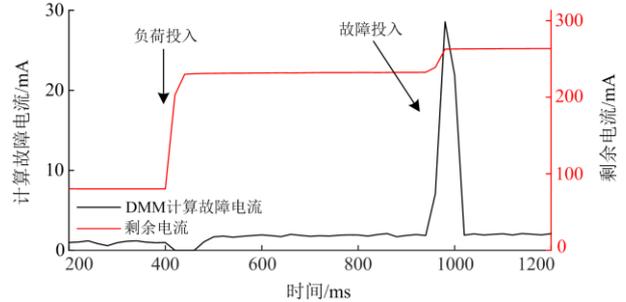


图 9 剩余电流实测幅值和 DMM 计算故障电流幅值
Fig. 9 Amplitude curves of tested residual current and calculated current in DMM

表 2 实测故障检出次数占比

Table 2 Proportion of detected times of tested fault

故障阻值/kΩ (试验总数/次)	故障检出次数占比/%			
	$I_{th}=3$ mA	$I_{th}=5$ mA	$I_{th}=10$ mA	$I_{th}=15$ mA
5(37)	100	100	100	100
6.67(38)	100	100	97.4	92.1
10(30)	96.7	93.3	80.0	40.0
20(20)	95.0	85.0	0	0

4.3 实境试验

在某大学 1 号、3 号开闭所两栋大学生公寓楼 B1、B2 的变压器出线处(即总保位置)进行测试。两栋楼均为 TN-C-S 接地系统，在电源进线处就地重复接地。测试时长为 5.6 h 和 6.6 h，分别包含 11:30—14:00、17:30—22:00 两个负荷剧烈变化的时段。测试期间，间隔随机时间进行 A、B、C 相接地，接地故障阻值从 400 Ω~10 kΩ 不等。B1 楼的典型测试结果如图 10 所示，图中 I_u 为不平衡电流工频分量幅值， I_r 为剩余电流工频分量幅值， I_{th} 为计算的故障电流突变相量幅值 $|\Delta I_{th}|$ ， I_f 为人工接地故障电流幅值。

根据实测结果，B1 楼不平衡电流和剩余电流中均包含大量谐波成分，不平衡电流真有效值大多在 50 A 以上且有约 30 A 的波动。图 10 测量时段内，不平衡电流工频分量幅值约 5~10 A，剩余电流中工频分量幅值约 1.6~2.4 A。

由图 10 可见，在绝大多数时间内， I_{th} 幅值都在 0.1 A 以下。从 I_u 、 I_r 和 I_{th} 在 K1、K4、K5 时段内的突变情况可见，负荷投切不会使 I_{th} 突变超过 0.05 A。从 K2 时段看，约 400 Ω 的故障分别接入 A、

B、C 三相时, 剩余电流的幅值突变方向和大小均有明显不同, 故障引起的剩余电流突变幅值可能小于负荷投切引起的剩余电流幅值变化, 故障投入和切除时刻 I_h 发生明显突变, 突变幅值与实际故障电流幅值相近。

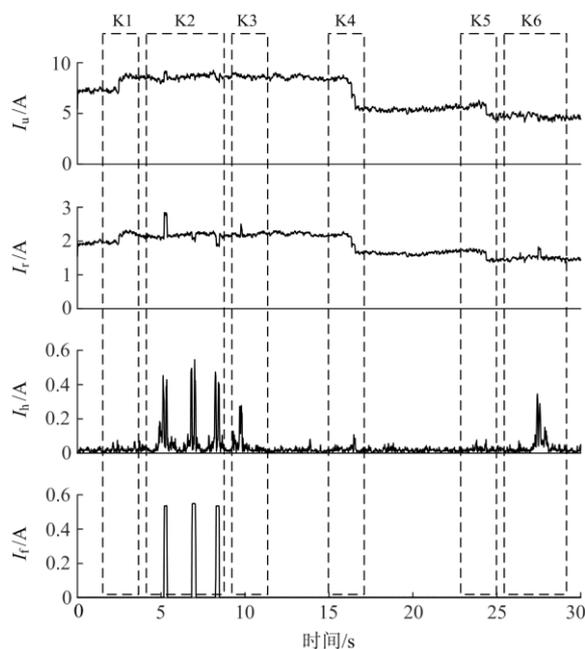


图 10 典型 B1 楼实测结果

Fig. 10 Typical result in the test of Building B1

另外, 在 K3、K6 时段, 未进行人工接地试验, 而 I_h 出现了 0.2~0.3 A 的突变, 分析时域波形(见图 11)发现, 对应 I_h 突变时刻的不平衡电流无明显突变, 剩余电流存在短时间的波形变化。在 B1 楼全部测试时段内, 均存在图 10 所示的 K3、K6 处这类 I_h 突变, 突变出现时间间隔具有随机性, 多在 1~30 s 之间。

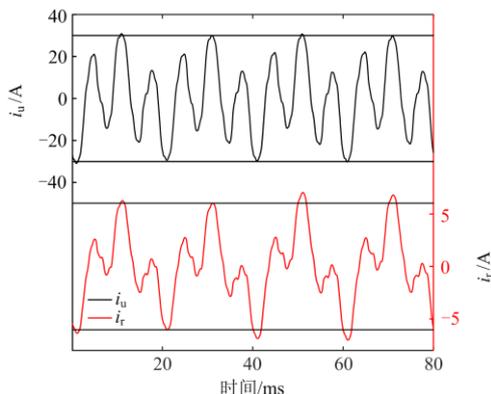


图 11 K6 异常突变处不平衡电流和剩余电流波形

Fig. 11 Unbalanced and residual current waveforms of the abnormal mutation in K6

通过有关部门了解到, B1 楼建成于 2002 年, 已使用近 20 年, 线路难以避免地存在老化、破损现象; 该楼启用期间进行过多次楼顶漏水维修。因此, 不在末保范围内的走廊电缆接头受潮可能性大, K3、K6 处的 I_h 突变可能为实际的线路漏电。

由于该类故障查找、再现困难, 采用对比方法进行间接证明。以相同的测试、数据处理方法, 对 B2 楼进行测试。B2 楼建成使用时间不足两年, 无漏水维修记录, 线路受潮漏电情况应远远好于 B1 楼, 若前文推测正确, 则 B2 楼测试中 I_h 异常突变情况出现次数应远少于 B1 楼。

B2 楼测试的全过程中, 除人工接地故障外, I_h 未出现超过 30 mA 的突变, 该结果能够有力支撑前文的推测。

仅考虑非故障时段, 则 I_h 计算值不高于 100 mA (对应有效值约为 70 mA), 即总保的最高灵敏度可达约 70 mA, 满足总保 300~500 mA 和中保 100 mA 的动作电流要求, 使 TN-C-S 系统具备全面部署三级漏电保护的可能。

5 结语

本文针对 TN-C-S 系统固有剩余电流幅值较大、漏电保护难以投入使用的问题, 提出了基于剩余电流和不平衡电流测量的 DMM 漏电保护方法, 能够克服固有剩余电流对漏电保护的影响, 实现大幅值固有剩余电流下单一重复接地点系统的高灵敏度漏电保护。仿真结果表明, 所提方法对接地电流 30 mA 的故障正确识别率可达约 97%, 50 mA 以上故障正确识别率可达 99%。实验室环境中, 保证不发生误动作条件下, 过渡电阻小于 6.67 k Ω 故障的正确识别率为 100%, 10 k Ω 故障正确识别率可达 93.3%。两栋楼的实境试验结果表明, DMM 方法能够有效克服固有剩余电流的影响, 具备最高约 70 mA 的保护灵敏度, 满足三级漏电保护对总保和中保动作电流的要求。

DMM 方法利用的是漏电故障的工频阻抗特性, 而不依赖生物体触电独有的暂态和时变特征, 相比目前基于剩余电流测量的其他漏电保护方法, 在检测原理上更加完备, 因此 DMM 方法的可靠性和普适性更强。

本文仅对 DMM 方法原理及可行性进行了初步探索, 实际应用中固有剩余电流连续缓慢变化、整条分支线路的投切、分布式电源、非线性负荷、生物体触电暂态过程、串并联电弧故障等对故障检测的影响尚未完全明晰。后续将在 TN-C-S 系统保护灵敏度和可靠性、多级保护配合、潜伏性故障辨识、

线路绝缘监测等方面对 DMM 方法继续进行深入研
究, 推动方法实用化。

参考文献

- [1] 李天友, 郭峰. 低压配电的触电保护技术及其发展[J]. 供用电, 2019, 36(12): 2-8.
LI Tianyou, GUO Feng. Electric shock protection technology and its development of low-voltage distribution[J]. Distribution & Utilization, 2019, 36(12): 2-8.
- [2] 李天友, 徐丙垠, 薛永端, 等. 配电网触电保护技术[R]. 北京: 中国电机工程学会, 2018.
LI Tianyou, XU Bingyin, XUE Yongduan, et al. Electric shock protection technology of distribution network[R]. Beijing: Chinese Society for Electrical Engineering, 2018.
- [3] Low-voltage electrical installations-part 5-53: selection and erection of electrical equipment-devices for protection for safety, isolation, switching, control and monitoring: IEC 60364-5-53—2019[S]. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2019.
- [4] 剩余电流动作保护装置安装与运行: GB/T 13955—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
Installation and operation of residual current operated protective devices: GB/T 13955—2017[S]. Beijing: China Standards Press, 2017.
- [5] 夏越, 杜松怀, 李春兰, 等. 中国剩余电流保护技术与装置的发展趋势[J]. 农业工程学报, 2010, 26(增刊 2): 151-155.
XIA Yue, DU Songhuai, LI Chunlan, et al. Development tendency of residual current protection technology and device in China[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(S2): 151-155.
- [6] 李奎, 陆俭国, 武一, 等. 自适应漏电保护技术及其应用[J]. 电工技术学报, 2008, 23(10): 53-57.
LI Kui, LU Jianguo, WU Yi, et al. Adaptive technology of leakage current operation protection and its application[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23(10): 53-57.
- [7] MITOLO M. Shock hazard in the presence of protective residual-current devices[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2010, 46(4): 1552-1557.
- [8] LI Rui. Analysis and realization method of selective leakage protection technology of self-adaptive full compensation domain[C] // 2020 5th International Conference on Power and Renewable Energy (ICPRE), September 12-14, 2020, Shanghai, China: 471-475.
- [9] HARID N, BOGIAS A C, GRIFFITHS H, et al. A wireless system for monitoring leakage current in electrical substation equipment[J]. IEEE Access, 2016, 4: 2965-2975.
- [10] ZHANG M, QIN P, CHEN Y, et al. Study on the detection method of leakage in TN-C area of low-voltage distribution network[C] // 2021 International Conference on Power System Technology (POWERCON), December 8-9, 2021, Haikou, China: 378-381.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 武一, 李奎, 岳大为, 等. 消除剩余电流保护动作死区的理论与方法[J]. 电工技术学报, 2008, 23(6): 44-49.
WU Yi, LI Kui, YUE Dawei, et al. Theory and method of eliminating operating dead zone of residual current protection[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23(6): 44-49.
- [14] 李春兰, 苏娟, 杜松怀, 等. 基于小波分析和 BP 神经网络的触电信号检测模型[J]. 农业工程学报, 2010, 26(增刊 2): 130-134.
LI Chunlan, SU Juan, DU Songhuai, et al. Detecting model of electric shock signal based on wavelet analysis and BP neural network[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(S2): 130-134.
- [15] 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.
- [16] 李春兰, 杜松怀, 苏娟, 等. 一种新的基于小波变换和混沌理论的触电信号检测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(10): 47-52, 154.
LI Chunlan, DU Songhuai, SU Juan, et al. A novel detecting method of electric shock signal based on wavelet transform and chaotic theory[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(10): 47-52, 154.
- [17] 关海鸥, 杜松怀, 苏娟, 等. 一种触电信号的自动快速检测模型[J]. 电网技术, 2013, 37(8): 2328-2335.
GUAN Haiou, DU Songhuai, SU Juan, et al. An automatic and quick detection model of electric shock signals[J]. Power System Technology, 2013, 37(8): 2328-2335.

- [18] 韩晓慧, 杜松怀, 苏娟, 等. 基于参数优化的最小二乘支持向量机触电电流检测方法[J]. 农业工程学报, 2014, 30(23): 238-245.
HAN Xiaohui, DU Songhua, SU Juan, et al. Determination method of electric shock current based on parameter-optimized least squares support vector machine[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(23): 238-245.
- [19] 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 Songhui, 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.
- [20] 左金威, 赵恒, 陈重佑, 等. 基于半波真有效值的触/漏电故障电流检测[J]. 四川电力技术, 2017, 40(3): 66-72.
ZUO Jinwei, ZHAO Heng, CHEN Chongyou, et al. Touch/leakage fault current detection based on half-wave true RMS[J]. Sichuan Electric Power Technology, 2017, 40(3): 66-72.
- [21] 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.
- [22] 王阳, 许志红, 郭清滔. 基于奇异值差分谱熵复杂度的生物触电信号识别研究[J]. 供用电, 2019, 36(12): 9-16, 21.
WANG Yang, XU Zhihong, GUO Qingtao. Analysis of transferred overvoltage of low-voltage system in medium-voltage system ground fault[J]. Distribution & Utilization, 2019, 36(12): 9-16, 21.
- [23] 李春兰, 夏兰兰, 王成斌, 等. 基于椭圆域分割的触电电流混沌检测方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(15): 69-76.
LI Chunlan, XIA Lanlan, WANG Chengbin, et al. Study on chaos detection method of electric shock current based on elliptic domain segmentation[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(15): 69-76.
- [24] 邵振国, 许昊铂, 肖颂勇, 等. 新能源电网中的谐波问题[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(4): 178-187.
SHAO Zhenguo, XU Haobo, XIAO Songyong, et al. Harmonic problems in a new energy power grid[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(4): 178-187.
- [25] 谢荣斌, 杜帆, 程湘, 等. 三相不平衡及谐波对三相四线低压配电网线损的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(21): 22-30.
XIE Rongbin, DU Fan, CHENG Xiang, et al. Influence of three-phase imbalance and harmonic on line loss of three-phase four-wire low-voltage distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(21): 22-30.
- [26] 韦莉珊, 贾文超, 焦彦军. 基于 5 次谐波与导纳不对称度的配电网单相接地选线方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(15): 77-83.
WEI Lishan, JIA Wenchao, JIAO Yanjun. Single-phase fault line selection scheme of a distribution system based on fifth harmonic and admittance asymmetry[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(15): 77-83.
- [27] LI R, WONG P, WANG K, et al. Power quality enhancement and engineering application with high permeability distributed photovoltaic access to low-voltage distribution networks in Australia[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2020, 5(3): 183-189.
- [28] 孙立明, 杨博. 蓄电池/超导混合储能系统非线性鲁棒分数阶控制[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(22): 76-83.
SUN Liming, YANG Bo. Nonlinear robust fractional-order control of battery/SMES hybrid energy storage systems[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(22): 76-83.

收稿日期: 2021-09-21; 修回日期: 2022-02-22

作者简介:

梁 栋(1988—), 男, 博士, 讲师, 研究方向为电力线路故障行波测距、配电线路故障检测; E-mail: greache@foxmail.com

王 玮(1983—), 男, 博士研究生, 副教授, 研究方向为配电线路故障检测技术; E-mail: wwsdut@163.com

孙中玉(1996—), 男, 博士研究生, 研究方向为电力线路故障监测。E-mail: sun_zy@163.com

(编辑 许 威)