

基于双端剩余电流突变量的漏电保护方法

周超群¹, 陈先凯¹, 盖午阳¹, 刘术波¹, 薛永端^{2*}

(1. 国网山东省电力公司青岛供电公司, 山东省 青岛市 266000;

2. 中国石油大学(华东)新能源学院, 山东省 青岛市 266580)

Leakage Protection Method Based on Double-terminal Residual Current Mutations

ZHOU Chaoqun¹, CHEN Xiankai¹, GE Wuyang¹, LIU Shubo¹, XUE Yongduan^{2*}

(1. State Grid Shandong Electric Power Company Qingdao Power Supply Company, Qingdao 266000, Shandong Province, China;

2. College of Renewable Energy of China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, Shandong Province, China)

Abstract: In order to overcome the defects of existing single-terminal leakage protection methods, and focus on the conveniences brought by the power distribution internet of things technology, based on analyses of single-phase leakage faults features in 0.4 kV LV (low voltage) distribution lines, this paper proposes a leakage protection method based on double-terminal residual current mutations, using the amplitudes of the double-terminal residual current mutations of protected line to construct the protection criteria. The protection acts when double-terminal criteria both meet the requirements of respective setting thresholds. The realization process and adaptability of the method are given. This method comprehensively utilizes the two terminal residual current information of protected section, and can be realized based on the distribution internet of things platform. It can effectively eliminate the influences of unbalanced leakage current of line during normal operation and other factors, reduce maloperation and improve the utilization rates of protection. It doesn't need multi-level protection delay coordination and has fast action speed. It has low setting thresholds and high sensitivity. The effectiveness of the method is verified by MATLAB simulation and test recording.

Keywords: low voltage (LV) distribution system; leakage fault; double-terminal; residual current; mutations; distribution internet of things

摘 要: 为克服现有单端量漏电保护方法的不足, 并着眼于配电物联网技术带来的便利条件, 在分析0.4 kV低压配电线路单相漏电故障特征的基础上, 提出一种基于双端剩余电流突变量的漏电保护方法, 利用被保护线路双端剩余电流突变

量的幅值构造保护判据, 在双端判据均符合各自整定阈值要求时保护动作。给出了方法实现流程和适应性。该方法综合利用线路双端剩余电流信息, 可基于配电物联网平台实现; 可排除正常运行时线路不平衡泄漏电流等因素的影响, 减少保护误动, 提高保护投用率; 不需多级保护延时配合, 动作速度快; 整定值低, 灵敏度高。通过MATLAB仿真和试验录波验证了方法的有效性。

关键词: 低压配电系统; 漏电故障; 双端; 剩余电流; 突变量; 配电物联网

0 引言

0.4 kV低压配电系统点多面广, 深入居民密集区, 其结构纵横交错、设备种类繁多、用户需求多样, 存在较多漏电故障隐患^[1-3]。漏电故障极易引起人身触电和电气火灾事故, 造成严重的生命财产损失^[4-6]。目前应用较为广泛的剩余电流过流保护方法, 可靠性差、灵敏度低、需要延时配合, 难以起到预期的保护效果, 实际投运率并不高^[7-9]。为实现漏电故障的准确检测和快速切除, 切实保障居民的用电安全, 亟需提出更加安全有效的保护方法。

近年来, 国内外学者对漏电保护技术进行了大量研究, 涌现出诸多新方法、新技术。文献[10]研究了鉴幅鉴相式保护方法, 可减少剩余电流过流保护的動作死区, 但仍较易误动。文献[11]对漏电流变化情况进行分析, 提出基于浮动阈值的自适应漏电保护方法, 但整定过程较为复杂。文献[12]提出一种基于近似熵的触电特征快速检测方法, 可缩短触电特征检测时间, 但计算较为困难。文献[13]提出基于局部均值

基金项目: 国网山东省电力公司科技项目(5206021900VU)。

Science and Technology Program of the State Grid Shandong Electric Power Company(5206021900VU).

分解的触电故障信号瞬时参数提取方法,可用于生物体触电总泄漏电流信号的特性分析和瞬时参数的提取,但对采样精度要求较高。文献[14]利用计算得到的标度指数的变化趋势实现触电特征检测,但实用性尚待进一步完善。此外,还有基于触发角识别^[15]、漏电阻抗^[16]、混沌理论^[17]等方法。上述保护方法多利用单端(就地)电气量,信息利用不够充分。作为新时期电网建设的风向标,配电物联网的高速发展与应用给利用多端信息的保护方法提供了便利条件,为解决现有低压配电系统漏电保护问题提供了新契机^[18-19]。

文中建立了低压配电系统模型,通过分析低压配电线路单相漏电特征,结合新兴的配电物联网技术,提出了一种基于双端剩余电流突变量的新型漏电保护方法,给出了方法运行流程并将其与传统剩余电流保护方法进行了性能比较,并利用仿真和试验进行了验证。

1 低压配电系统单相漏电故障特征分析

1.1 低压配电系统等值模型

典型低压配电系统等值模型如图1所示。图1中: L_1 为被保护区段,设其A相发生漏电故障, L_2 为 L_1 所有下级出线的等效线路; S_1 、 M_1 分别为安装在 L_1 首、末端的剩余电流监测终端; K_1 、 K_2 分别为区内、区外漏电故障触发开关; $\dot{U}_A$ 、 $\dot{U}_B$ 、 $\dot{U}_C$ 分别为A、B、C三相电压; r_1 、 r_2 分别为 L_1 、 L_2 单相对地绝缘电阻; C_1 、 C_2 分别为 L_1 、 L_2 单相对地电容; R_T 、 R_f 分别为变压器中性点接地电阻、故障漏电阻; $\dot{I}_f$ 为故障点漏电电流; $\dot{I}_{z1}$ 、 $\dot{I}_{z2}$ 分别为流经 L_1 、 L_2 固有对地阻抗的电流; $\dot{I}_K$ 为由末端负载杂散漏电等因素产生的下游泄漏电流; $\dot{I}_s$ 为 $\dot{I}_{z2}$ 与 $\dot{I}_K$ 之和,即正常运行时 L_1 下游总泄漏电流。当三相对地绝缘平衡时, $\dot{I}_{z1}$ 、 $\dot{I}_{z2}$ 为0,否则不为0。

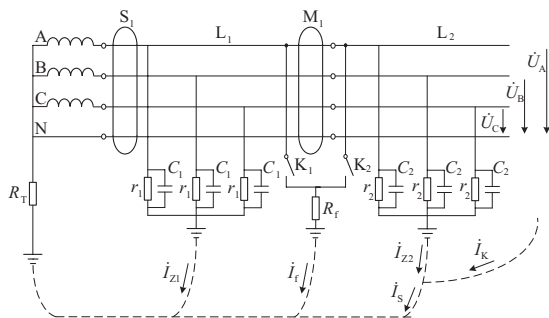


图1 低压配电系统等值模型

Fig. 1 Equivalent model of LV (low voltage) distribution system

设 S_1 、 M_1 所测剩余电流分别为 $\dot{I}_H$ 、 $\dot{I}_E$,二者突变变量分别为 $\Delta\dot{I}_H$ 、 $\Delta\dot{I}_E$, $\dot{I}_s$ 突变量为 $\Delta\dot{I}_s$ 。由于线路固有对地阻抗较大且变化较缓慢,故 $\dot{I}_{z1}$ 、 $\dot{I}_{z2}$ 突变变量较小,可忽略不计,因此 $\Delta\dot{I}_H$ 、 $\Delta\dot{I}_E$ 主要由 $\dot{I}_f$ 及 $\Delta\dot{I}_s$ 产生。

1.2 低压配电系统单相漏电故障特征

由于低压配电系统拓扑结构和负荷等变化缓慢,因此对图1系统,无故障发生时,有:

$$\begin{cases} \dot{I}_H = \dot{I}_{z1} + \dot{I}_s \\ \dot{I}_E = \dot{I}_s \end{cases} \quad (1)$$

因此:

$$\Delta\dot{I}_H = \Delta\dot{I}_s = \Delta\dot{I}_E \quad (2)$$

发生 L_1 区内故障时,有:

$$\begin{cases} \dot{I}_H = \dot{I}_{z1} + \dot{I}_s + \dot{I}_f \\ \dot{I}_E = \dot{I}_s \end{cases} \quad (3)$$

考虑到 $\dot{I}_s$ 变化与漏电故障同时出现的可能性极小,因此:

$$\begin{cases} \Delta\dot{I}_H = \Delta\dot{I}_s + \dot{I}_f \approx \dot{I}_f \\ \Delta\dot{I}_E = \Delta\dot{I}_s \approx 0 \end{cases} \quad (4)$$

发生 L_2 区内故障时,有:

$$\begin{cases} \dot{I}_H = \dot{I}_{z1} + \dot{I}_s + \dot{I}_f \\ \dot{I}_E = \dot{I}_s + \dot{I}_f \end{cases} \quad (5)$$

因此:

$$\begin{cases} \Delta\dot{I}_H = \Delta\dot{I}_s + \dot{I}_f \approx \dot{I}_f \\ \Delta\dot{I}_E = \Delta\dot{I}_s + \dot{I}_f \approx \dot{I}_f \end{cases} \quad (6)$$

分析式(2)、(4)、(6)可知:对被保护区段 L_1 ,无漏电故障发生时,首、末端剩余电流突变量相同;发生区内单相漏电故障时,首端突变量约为 $\dot{I}_f$,其值与故障电阻大小有关,阻值越小,漏电电流越大,则突变量越大,末端突变量约为0;发生下游区外单相漏电故障时,首、末端突变量均约为 $\dot{I}_f$ 。3种情形下被保护区段双端剩余电流突变情况各不相同,区别明显,因此可将双端剩余电流突变量作为漏电故障的判据。

2 基于双端剩余电流突变量的漏电保护

2.1 保护原理与整定

如图1所示,利用监测终端实时测量被保护区段双端剩余电流,并将所测双端剩余电流相量值分别

与各自整数周波前的相量值相减, 得到突变量 $\Delta \dot{I}_H$ 、 $\Delta \dot{I}_E$, 利用二者幅值构造保护方法的综合判据。其中: 利用 $|\Delta \dot{I}_H|$ 判断是否有漏电故障发生, 利用 $|\Delta \dot{I}_E|$ 判断漏电故障是否发生在区内。方法具体保护原理为: 若 $|\Delta \dot{I}_H|$ 达到首端整定阈值且 $|\Delta \dot{I}_E|$ 未达到末端整定阈值, 则判定发生区内漏电故障, 保护动作; 否则判定为无区内漏电故障发生, 保护不动作。保护的动作为

$$\begin{cases} |\Delta \dot{I}_H| \geq I_{\text{set1}} \\ |\Delta \dot{I}_E| < I_{\text{set2}} \end{cases} \quad (7)$$

式中: I_{set1} 、 I_{set2} 分别为首、末端整定阈值。考虑测量误差等因素的影响, 兼顾保护的可靠性和灵敏性, 由下式整定 I_{set1} 及 I_{set2} :

$$\begin{cases} I_{\text{set1}} = K_{\text{rel}} I_{\text{Zmax}} + I_{\text{d1}} \\ I_{\text{set2}} = I_{\text{d2}} \end{cases} \quad (8)$$

式中: K_{rel} 为可靠系数, 取值为 2; I_{Zmax} 为无故障时被保护区段泄漏电流的最大值, 一般取 10 mA; I_{d1} 、 I_{d2} 为直流偏置量, 分别取 10 mA、50 mA。因此 I_{set1} 、 I_{set2} 分别取 30 mA、50 mA。

2.2 保护方法基于配电物联网平台的实现

配电物联网是电力物联网与智能电网在配电领域深度融合的产物。基于配电物联网平台提供的边缘计算^[20]、智能感知^[21]、信息存储、设备互联等关键技术条件, 通过设备的即插即用和远程控制, 可实现更加安全化、自动化、信息化、智能化的漏电保护。基于配电物联网的低压配电系统架构可由图2表示。图2中: $S_1 \sim S_n$ 、 $S_{1-1} \sim S_{1-n}$ 、 $M_1 \sim M_n$ 、 $M_{1-1} \sim M_{1-n}$ 为剩余电流监测终端, 虚线表示设备通信。设备之间的信息交换利用配电物联网提供的有线或无线通信条件实现。

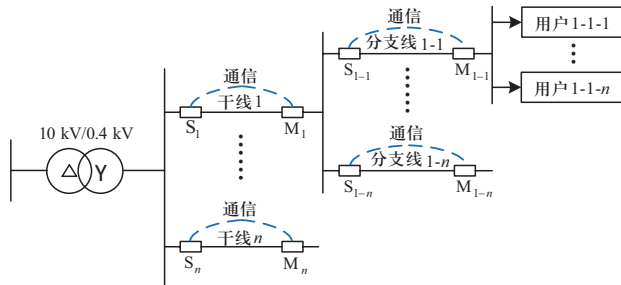


图2 基于配电物联网的低压配电系统架构

Fig. 2 LV distribution system architecture based on distribution internet of things

基于配电物联网平台的双端剩余电流突变量漏电保护方法运行流程如图3所示, 具体运行流程如下。

1) 在被保护区段首、末端安装智能监测终端, 实时测量双端剩余电流相量信息, 并计算剩余电流突变量幅值 (真有效值)。

2) 被保护区段双端终端实时比较各自突变量幅值与对应整定值。

3) 当末端终端检测到末端突变量幅值越限时, 立即持续将越限信息报送至首端终端。

4) 当首端终端检测到首端突变量幅值越限时, 立即开启一个时长为数个周波的时间窗口, 等待末端终端向其发送越限信息。

5) 在时间窗口内, 若首端终端未收到末端终端上报的越限信息, 则判断发生区内漏电故障, 立即控制保护装置动作, 切除故障区段; 否则保护返回。

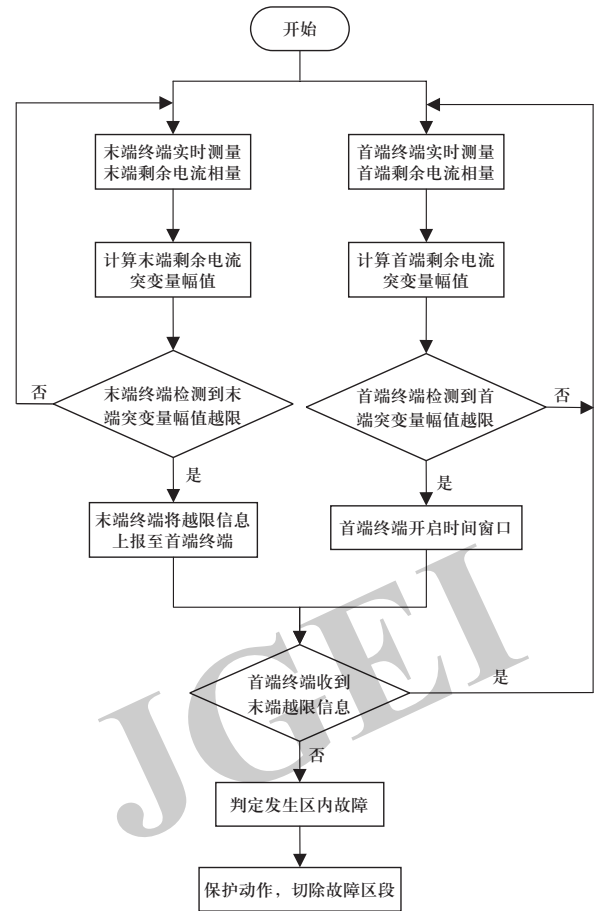


图3 基于配电物联网平台的保护方法运行流程

Fig. 3 Operation process of the method in this paper based on distribution internet of things platform

该方法原理类似于闭锁保护, 在首端突变量越限时, 若其收到末端越限信号, 则保护闭锁, 否则保护动作, 因此该方法不需实现精确对时。当存在通信故障时, 可将保护方案调整为传统多级保护。

3 与传统单端漏电保护方法的性能比较

1) 可靠性。由于低压配电线路不平衡电容电流及末端设备杂散泄漏电流的存在, 线路首端剩余电流监测装置总会检测到一定数值的剩余电流 $\dot{I}_0$, 即线路本身对地不平衡泄漏电流 $\dot{I}_Z$ 与下游正常泄漏电流 $\dot{I}_S$ 之和, 由于 $|\dot{I}_Z| \ll |\dot{I}_S|$, 故 $\dot{I}_0 \approx \dot{I}_S$ 。 $\dot{I}_S$ 为影响保护可靠性的主要因素。

传统单端漏电保护仅利用就地信息, 无法区分 $\dot{I}_S$ 与 $\dot{I}_f$, 在 $\dot{I}_S$ 超过整定值时保护会误动。保护频繁误动会严重影响居民用电质量, 致使部分用户主动退出保护, 这就使其直接暴露在漏电故障的危险下。产生保护死区的主要因素亦为 $\dot{I}_S$, 其幅值越大且与 $\dot{I}_f$ 间的夹角越大, 保护死区越大。死区会使保护在发生漏电故障时拒动, 大大增加漏电事故的危害性。因此, 传统剩余电流保护方法可靠性较差。文中方法采用线路双端剩余电流突变量的幅值作为保护判据。根据第1.2节, 在计算双端判据时消除了 $\dot{I}_S$ 的影响, 因此系统正常运行时双端判据相等, 保护不易误动; 与传统方法相比, 文中方法的保护死区明显减小, 对于保护范围内的漏电故障均能可靠动作, 其可靠性更高, 与传统方法的动作特性对比如图4所示。图中阴影部分为不正确反应区域, 空白部分为正确反应区域; I_{f0} 为保护临界动作漏电流值, I_{set} 为传统方法动作整定值, I_{set1} 为文中方法首端整定阈值, φ 为 $\dot{I}_0$ 与 $\dot{I}_f$ 的相位差。

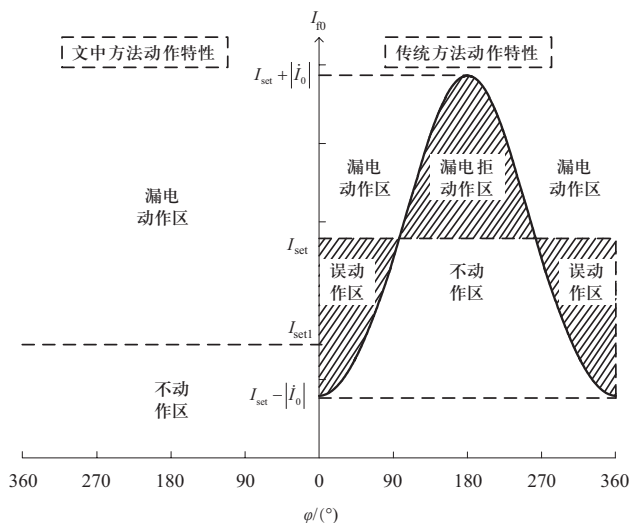


图4 文中方法与传统方法动作特性对比

Fig. 4 Comparison of action characteristics between the method in this paper and traditional method

2) 选择性。传统单端漏电保护采用多级保护配合的方式实现选择性, 但多级保护的整定配合存在一定困难, 若配合不当, 易发生越级跳闸事故, 扩大停电范围。应用文中方法时可采用分段保护方式, 自然保证了保护的选择性, 可提高系统供电连续性, 缩小停电范围, 减少停电事故造成的经济损失和不良影响。例如在图2所示系统中, 分支线1-1发生故障时, 采用传统保护需实现多级配合, 若配合不当导致干线1保护越级动作, 会扩大停电范围; 采用文中保护不需多级配合, 由分支线1-1的保护直接动作, 保证选择性。

3) 速动性。传统单端漏电保护中各级保护装置的动作时间必须协调配合, 上、下级保护装置的动作时间差不得低于0.2 s。这延长了漏电持续时间, 无法及时消除漏电隐患, 增大了人身触电和发生电气火灾的可能性。文中方法采用分段保护方式, 不需要多级延时配合, 其动作时长主要取决于数据计算和信息传输时间, 一般小于0.2 s^[22]。因此, 相比传统保护方法, 文中方法大幅提高了保护的速动性, 可迅速切除故障, 及时终止对触电者的伤害, 降低漏电故障的危险性。例如在图2所示系统中, 采用传统保护时, 其中级保护和一级保护的延时时间分别为0.2 s、0.4 s; 采用文中保护时, 动作时间一般小于0.2 s。

4) 灵敏性。为克服正常运行时线路下游泄漏电流的影响, 传统漏电保护的整定电流值较高, 总保一般为500 mA, 中保一般为200~300 mA, 这就导致其灵敏性较差, 难以有效判别高阻漏电故障。漏电故障多表现为高阻故障, 因此传统方法难以起到理想保护作用。根据第2.1节, 文中方法的首端整定阈值 I_{set1} 仅为30 mA, 远低于传统方法的整定值, 因此其保护灵敏性得以大幅提高, 在漏电电阻较高时仍具有较好的故障判别能力。相电压取220 V时, 其理论耐高阻能力可达220 V/30 mA=7.3 kΩ。

4 仿真及试验录波数据验证

4.1 仿真验证

4.1.1 仿真模型

利用MATLAB建立0.4 kV低压配电系统仿真模型, 如图5所示。图中 $S_1 \sim S_7$ 、 $M_1 \sim M_7$ 为剩余电流监测终端, F_1 、 F_2 分别为位于 L_1 、 L_2 中间位置的故障点, 仿真参数如表1所示。针对不同接地系统分别进行仿真, 故障时刻为0.02 s, 仿真时长为0.08 s。

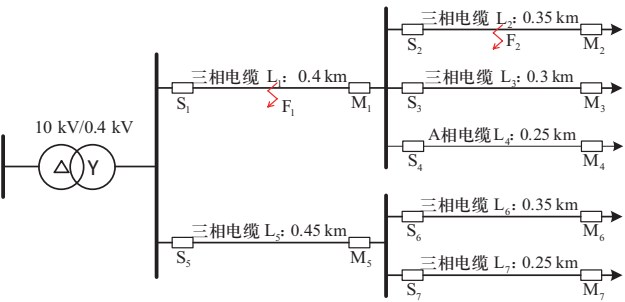


图 5 低压配电系统仿真模型
Fig. 5 Simulation model of LV distribution system

表 1 仿真模型参数

Table 1 Simulation model parameters

参数	数值
正序电阻 $R_+ / (\Omega \cdot \text{km}^{-1})$	0.113
零序电阻 $R_0 / (\Omega \cdot \text{km}^{-1})$	0.579
正序电感 $L_+ / (\text{H} \cdot \text{km}^{-1})$	2.481×10^{-3}
零序电感 $L_0 / (\text{H} \cdot \text{km}^{-1})$	8.685×10^{-3}
正序电容 $C_+ / (\text{F} \cdot \text{km}^{-1})$	12.71×10^{-9}
零序电容 $C_0 / (\text{F} \cdot \text{km}^{-1})$	7.725×10^{-9}
线路不平衡泄漏电流 I_Z / mA	5 (A相)
L_1 下游正常泄漏电流 I_S / mA	110 (A相)
L_2 末端A、B、C三相负荷/kW	15、15、15
L_3 末端A、B、C三相负荷/kW	10、10、10
L_4 末端A、B、C三相负荷/kW	8、0、0
L_6 末端A、B、C三相负荷/kW	20、20、20
L_7 末端A、B、C三相负荷/kW	12、12、12

4.1.2 TT系统仿真

设置系统接地方式为TT方式。设置故障点为 F_1 ，故障相为A相，故障电阻为2 k Ω ，所得 L_1 双端剩余电流突变量波形如图6所示。

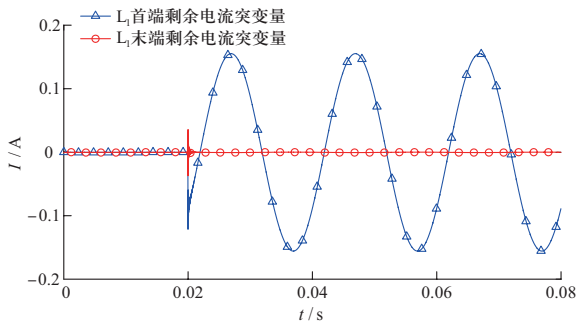


图 6 F_1 故障点2 k Ω A相漏电故障时 L_1 双端剩余电流突变量
Fig. 6 Mutations of residual current at both ends of L_1 when 2 k Ω A-phase leakage fault occurs in F_1

由图6可知，故障前 L_1 双端剩余电流突变量均较小，接近于0；故障后首端突变量迅速增大，末端突变量仍较小，这与第1.2节结论一致。经测量，故障前首、末端剩余电流突变量幅值均为0，即 $|\Delta \dot{I}_H| < I_{\text{set1}}$ 、 $|\Delta \dot{I}_E| < I_{\text{set2}}$ ，不满足保护动作条件；故障后二者分别为109.96 mA、0.23 mA，即 $|\Delta \dot{I}_H| > I_{\text{set1}}$ 、 $|\Delta \dot{I}_E| < I_{\text{set2}}$ ，保护动作。因此文中方法在无区内故障时不会误动，发生区内故障时可靠动作。

设置故障点为 F_2 ，其他条件不变，所得 L_1 双端剩余电流突变量波形如图7所示。

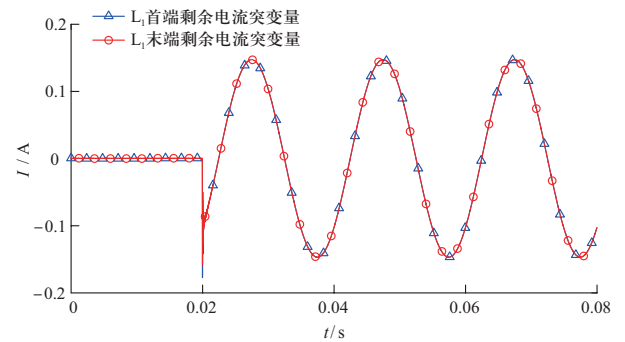


图 7 F_2 故障点2 k Ω A相漏电故障时 L_1 双端剩余电流突变量
Fig. 7 Mutations of residual current at both ends of L_1 when 2 k Ω A-phase leakage fault occurs in F_2

由图7可知，故障前 L_1 双端剩余电流突变量均很小，接近于0；故障后二者均迅速增大，这与第1.2节结论一致。经测量，故障前首、末端剩余电流突变量幅值均为0，即 $|\Delta \dot{I}_H| < I_{\text{set1}}$ 、 $|\Delta \dot{I}_E| < I_{\text{set2}}$ ，不满足保护动作条件；故障后二者分别为103.94 mA、104.02 mA，即 $|\Delta \dot{I}_H| > I_{\text{set1}}$ 、 $|\Delta \dot{I}_E| > I_{\text{set2}}$ ，不满足保护动作条件。因此文中方法在发生下游区外故障时不会误动。

为进一步验证方法的有效性，设置不同故障点和故障电阻，故障相为A相，实施大量仿真，部分结果如表2所示。

表 2 TT系统不同情形下的仿真结果

Table 2 Simulation results under different conditions of TT system

R_f / Ω	故障点位置	剩余电流突变量幅值/mA		故障位置判断结果
		$ \Delta \dot{I}_H $	$ \Delta \dot{I}_E $	
100	F_1	2 121.32	4.35	L_1 区内
1500	F_1	146.58	0.32	L_1 区内
3000	F_1	73.26	0.17	L_1 区内
5000	F_1	43.89	0.09	L_1 区内

续表

R_f/Ω	故障点位置	剩余电流突变量幅值/mA		故障位置判断结果
		$ \Delta \dot{I}_H $	$ \Delta \dot{I}_E $	
100	F_2	2 001.81	2 001.81	L_1 区外
1500	F_2	138.59	138.60	L_1 区外
3000	F_2	69.30	69.31	L_1 区外
5000	F_2	41.51	41.52	L_1 区外

仿真结果表明：该方法对TT系统不同情形下的阻性漏电故障均具有较好的判别能力，且可实现高阻漏电故障的有效保护。

4.2 现场录波数据验证

利用试验故障录波数据对算法进行了验证。图8为试验所用0.4 kV低压配电试验系统结构，系统接地方式为TT方式。图中 $S_1 \sim S_3$ 、 $M_1 \sim M_3$ 为剩余电流监测终端， F_1 、 F_2 分别为位于 L_1 、 L_2 中间位置的故障点，故障时刻为0.09 s， L_1 下游正常泄漏电流为70 mA。

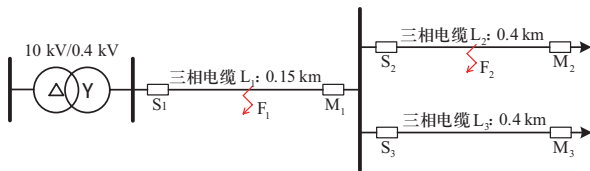


图8 0.4 kV低压配电试验系统结构

Fig. 8 Structure of 0.4 kV LV distribution test system

设置故障点为 F_1 ，故障相为A相，故障电阻为1.1 k Ω ，进行试验， S_1 、 M_1 所测原始剩余电流波形如图9所示。

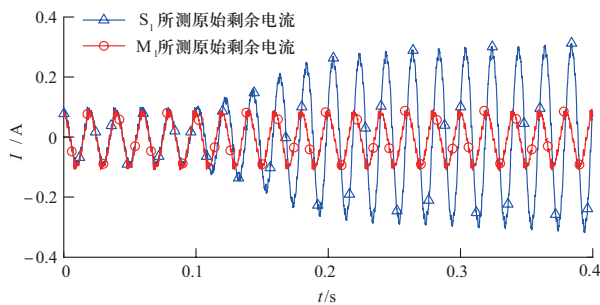


图9 F_1 故障点1.1 k Ω A相漏电故障时 S_1 、 M_1 所测剩余电流
Fig. 9 Residual current measured by S_1 and M_1 when 1.1 k Ω A-phase leakage fault occurs in F_1

将所测剩余电流相量与其各自5个周波前的相量值相减（故障后5个周波剩余电流达到稳定），所得 L_1 首末端剩余电流突变量波形如图10所示。

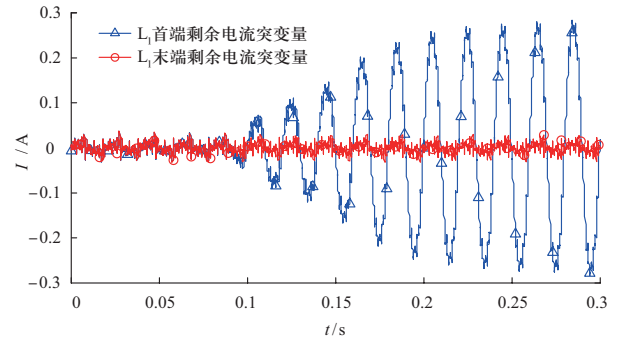


图10 F_1 故障点发生1.1 k Ω A相漏电故障时 L_1 双端剩余电流突变量

Fig. 10 Mutations of residual current at both ends of L_1 when 1.1 k Ω A-phase leakage fault occurs in F_1

经测量，故障前 L_1 首、末端剩余电流突变量幅值分别为11.20 mA、11.16 mA，即 $|\Delta \dot{I}_H| < I_{set1}$ 、 $|\Delta \dot{I}_E| < I_{set2}$ ，不满足保护动作条件；发生故障且稳定后二者分别为187.97 mA、10.54 mA，即 $|\Delta \dot{I}_H| > I_{set1}$ 、 $|\Delta \dot{I}_E| < I_{set2}$ ，保护动作。

设置故障点为 F_2 ，故障相为A相，故障电阻为1.1 k Ω ，进行试验， S_1 、 M_1 所测原始剩余电流波形如图11所示。

将所测剩余电流相量与其各自5个周波前的相量值相减，所得 L_1 首末端剩余电流突变量波形如图12所示。

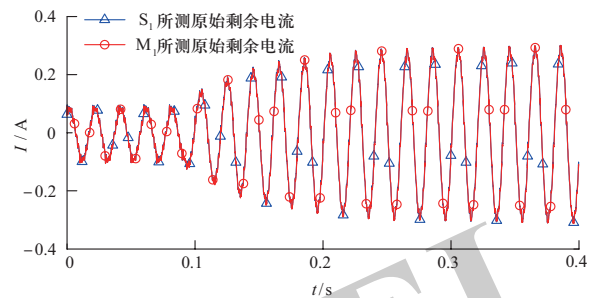


图11 F_2 故障点1.1 k Ω A相漏电故障时 S_1 、 M_1 所测剩余电流
Fig. 11 Residual current measured by S_1 and M_1 when 1.1 k Ω A-phase leakage fault occurs in F_2

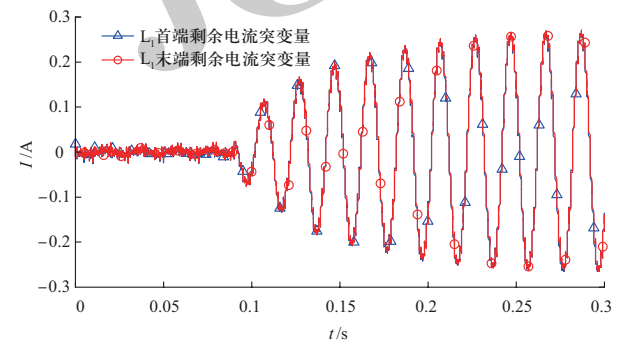


图12 F_2 故障点1.1 k Ω A相漏电故障时 L_1 双端剩余电流突变量
Fig. 12 Mutations of residual current at both ends of L_1 when 1.1 k Ω A-phase leakage fault occurs in F_2

经测量, 故障前 L_1 首、末端剩余电流突变量幅值分别为7.56 mA、7.27 mA, 即 $|\Delta \dot{I}_H| < I_{\text{set1}}$ 、 $|\Delta \dot{I}_E| < I_{\text{set2}}$, 不满足保护动作条件; 发生故障且稳定后二者分别为183.79 mA、183.86 mA, 即 $|\Delta \dot{I}_H| > I_{\text{set1}}$ 、 $|\Delta \dot{I}_E| > I_{\text{set2}}$, 不满足保护动作条件。

为进一步验证方法的有效性, 设置不同故障点和故障电阻, 故障相为A相, 部分结果如表3所示。

表3 TT系统不同情形下的试验结果

Table 3 Test results under different conditions of TT system

R_f / Ω	故障点位置	剩余电流突变量/mA		故障位置判断结果
		$ \Delta \dot{I}_H $	$ \Delta \dot{I}_E $	
100	F_1	1 964.59	10.93	L_1 区内
2200	F_1	95.24	10.15	L_1 区内
4400	F_1	48.35	10.61	L_1 区内
100	F_2	1 933.52	1 939.73	L_1 区外
2200	F_2	93.53	93.70	L_1 区外
4400	F_2	47.09	47.14	L_1 区外

试验结果表明, 该方法对TT系统不同情形下的阻性漏电故障均具有较好的判别能力。

同时进行了间歇性电弧接地故障录波试验, 设置故障点为 F_1 , 所得 L_1 首末端剩余电流突变量波形如图13所示。

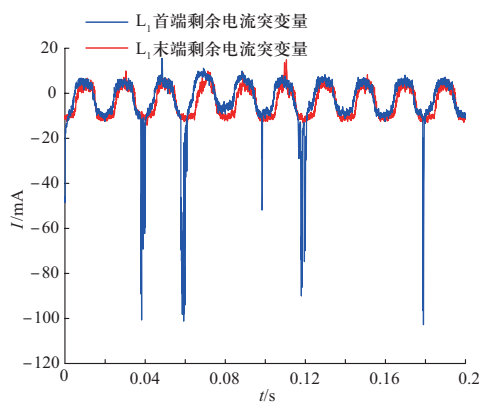


图13 F_1 故障点间歇性电弧接地故障时 L_1 双端剩余电流突变量

Fig. 13 Mutations of residual current at both ends of L_1 when intermittent arc grounding fault occurs in F_1

经测量, 第一次电弧击穿时, $|\Delta \dot{I}_H| = 49.4 \text{ mA} > I_{\text{set1}}$, $|\Delta \dot{I}_E| = 22.1 \text{ mA} < I_{\text{set2}}$, 保护动作。

5 结论

针对传统单端漏电保护方法的局限性, 文中提出一种基于双端剩余电流突变量的漏电保护方法, 将被保护区段双端剩余电流突变量幅值作为综合保护判据, 可充分利用故障时电气量信息, 有效克服传统方法的缺陷, 提高漏电保护的可靠性。与传统单端漏电保护方法相比, 文中方法可依托配电物联网提供的便捷条件, 实现更加安全智能的漏电保护; 可减少保护误动和拒动, 可靠性高; 避免多级保护配合, 选择性高, 动作速度快; 动作阈值低, 高阻漏电故障判别能力强, 灵敏性好。文中方法为新型漏电保护方法与技术的研究提供了新思路。

参考文献

- [1] 蔺华, 王子龙, 郭振华, 等. 考虑弧长动态变化的配电网电弧接地故障建模及辨识[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(7): 31-39.
LIN Hua, WANG Zilong, GUO Zhenhua, et al. Modeling and identification of a distribution network arc grounding fault considering arc length dynamic variation[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(7): 31-39 (in Chinese).
- [2] LI W B, SU J J, WANG X, et al. Fault location of distribution networks based on multi-source information[J]. Global Energy Interconnection, 2020, 3(1): 76-84.
- [3] DING Q Q, YAO Y, WANG B Q, et al. A modified lumped parameter model of distribution transformer winding[J]. Global Energy Interconnection, 2020, 3(2): 158-165.
- [4] 李敏, 靳绍平, 胡琛, 等. 高压电流互感器泄漏电流测量及消除方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(3): 156-163.
LI Min, JIN Shaoping, HU Chen, et al. Research on leakage current measurement and elimination method of high voltage current transformer[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(3): 156-163 (in Chinese).
- [5] 吴志强, 王德坤, 赵海龙, 等. 遏制电气火灾多发的阻性漏电检测技术分析[J]. 消防科学与技术, 2020, 39(7): 991-993.
WU Zhiqiang, WANG Dekun, ZHAO Hailong, et al. Analysis of resistance leakage detection technology to prevent frequent electrical fires[J]. Fire Science and Technology, 2020, 39(7): 991-993 (in Chinese).
- [6] 徐皓远, 刘波, 叶开, 等. 基于零序电流分布特性的配电网故障区段辨识[J]. 电力工程技术, 2020, 39(1): 110-117.
XU Haoyuan, LIU Bo, YE Kai, et al. Identification of fault zones in distribution network based on zero sequence current distribution characteristics[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(1): 110-117 (in Chinese).
- [7] 高生凯, 曹炜, 张旭航, 等. 一种改进型配网自适应过流

- 保护方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(7): 110-119.
GAO Shengkai, CAO Wei, ZHANG Xuhang, et al. A novel adaptive overcurrent protection method for a distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(7): 110-119(in Chinese).
- [8] 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(S2): 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 Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(S2): 151-155(in Chinese).
- [9] 冯宝成, 田志浩, 摆世彬, 等. 防止超高压设备自投诱发线路零序过流保护误动的对策初探[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(2): 98-106.
FENG Baocheng, TIAN Zhihao, BAI Shibin, et al. Study on countermeasures to prevent maloperation of zero-sequence overcurrent protection caused by ultra-high-voltage automatic device transfer[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(2): 98-106 (in Chinese).
- [10] 张福良, 蔡志远. 鉴幅鉴相式剩余电流保护方法的研究[J]. 低压电器, 2014(8): 17-19.
ZHANG Fuliang, CAI Zhiyuan. Research on amplitude and phase discrimination method of residual current protection[J]. Low Voltage Apparatus, 2014(8): 17-19(in Chinese).
- [11] 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(in Chinese).
- [12] 熊晓伟, 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(in Chinese).
- [13] 韩晓慧, 杜松怀, 苏娟, 等. 基于局部均值分解的触电故障信号瞬时参数提取[J]. 农业工程学报, 2015, 31(17): 221-227.
HAN Xiaohui, DU Songhuai, SU Juan, et al. Extraction of biological electric shock signal instantaneous amplitude and frequency based on local mean decomposition[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(17): 221-227(in Chinese).
- [14] 郭峰, 李天友, 叶荣, 等. 基于滑动去趋势波动分析的触电特征检测方法[J]. 供用电, 2020, 37(4): 65-70.
GUO Feng, LI Tianyou, YE Rong, et al. Electric shock feature detection method based on moving detrended fluctuation analysis[J]. Distribution & Utilization, 2020, 37(4): 65-70(in Chinese).
- [15] 李奎, 戴逸华, 牛峰, 等. 基于触发角识别的脉动直流剩余电流有效值检测方法[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(5): 80-84.
LI Kui, DAI Yihua, NIU Feng, et al. Residual pulsating DC detection based on triggering angle identification[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(5): 80-84(in Chinese).
- [16] 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(in Chinese).
- [17] 王飞, 何沁鸿, 袁睿, 等. 混沌理论在触电电流信号检测中的应用研究[J]. 陕西电力, 2017, 45(6): 66-69.
WANG Fei, HE Qinong, YUAN Rui, et al. Application of chaos theory in electric shock signal detection[J]. Shaanxi Electric Power, 2017, 45(6): 66-69(in Chinese).
- [18] 卞艺衡, 别朝红, 黄格超, 等. 弹性配电网分布式可再生能源电源最优配置模型[J]. 全球能源互联网, 2020, 3(3): 213-221.
BIAN Yiheng, BIE Zhaohong, HUANG Gechao, et al. Optimal renewable energy distributed generators placement for resilient distribution system[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2020, 3(3): 213-221(in Chinese).
- [19] 王梓珺, 王承民, 闫涛, 等. 基于序列线性关联度分析的配电网可靠性投资估算方法研究[J]. 全球能源互联网, 2022, 5(1): 55-61.
WANG Zijun, WANG Chengmin, YAN Tao, et al. Research on distribution network reliability investment estimation method based on sequence linearization correlation analysis[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2022, 5(1): 55-61(in Chinese).
- [20] 任汝飞, 胡旌伟, 孙秋野. 信息能源系统的边缘节点可信评估及控制策略[J]. 全球能源互联网, 2020, 3(6): 552-559.
REN Rufe, HU Jingwei, SUN Qiuye. Edge-node reliability assessment and control strategy in cyber energy systems[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2020, 3(6): 552-559(in Chinese).
- [21] 周峰, 周晖, 刁赢龙. 泛在电力物联网智能感知关键技术发展思路[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(1): 70-82.
ZHOU Feng, ZHOU Hui, DIAO Yinglong. Development of intelligent perception key technology in the ubiquitous Internet of Things in electricity[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(1): 70-82(in Chinese).
- [22] 孔垂跃, 陈羽, 赵乾名. 基于MQTT协议的配电物联网云边通信映射研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(8): 168-176.
KONG Chuiyue, CHEN Yu, ZHAO Qianming. Research on cloud-side communication mapping of the distribution Internet of Things based on MQTT protocol[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(8): 168-176(in Chinese).

收稿日期: 2022-02-13; 修回日期: 2022-03-29。



周超群

作者简介:

周超群 (1986), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统运行与稳定控制, E-mail: cqchou@163.com。

陈先凯 (1991), 男, 学士, 工程师, 研究方向为电力系统运行与稳定控制, E-mail: chen_xiankai@163.com。

盖午阳 (1990), 男, 硕士, 中级工程师, 研究方向为电气工程及其自动化, E-mail: 87123388@qq.com。

刘术波 (1983), 男, 学士, 高级工程师, 研究方向为配电网工程管理, E-mail: qdpower521@163.com。

薛永端 (1970), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为配电网接地故障分析与保护、配电网触电与电气安全防护。通信作者, E-mail: xueyd70@126.com。

(责任编辑 张宇)