

配网绝缘渐损接地增量电流波形及 选线定位分析

周奕轩¹, 皮杰², 宋天宝², 邹运², 杨丽丽², 骆德昌³

(1. 上海电力大学自动化工程学院, 上海 200090; 2. 中国矿业大学电气与动力工程学院, 江苏 徐州 221116;
3. 武汉大学电气与自动化学院, 湖北 武汉 430072)

摘要:为提高配网包括绝缘渐损接地在内的单相接地选线定位的可靠性, 仿真观察绝缘渐损接地在不同阶段的电流波形。首先, 根据这些电流波形及发展变化的共有规律, 选择接地相的次暂态锯齿波增量电流和健全相与之对应时刻的增量电流作为配网绝缘渐损接地自举选线定位的判据信号源, 分析锯齿波电流反映所有接地电流的通用性特点, 并研究设计锯齿波标量和矢量相位差的计算方法; 然后, 仿真研究并比较包括锯齿波在内的单相接地电流与操作性、诱发性扰动电流的波形特征, 为辨识真伪单相接地找寻判别基准, 并以此为依据, 研究设计包括绝缘渐损在内的配网单相接地防误辨识和选线定位方法; 最后, 采用所制作的接地定位器在低压配网模型的合环运行线路上验证所设计方法的正确性。

关键词:配网; 绝缘渐损接地; 锯齿波; 镰刀波; 相地增量电流; 选线定位

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2020.04.008 中图分类号:TH411 文章编号:1673-9140(2020)04-0058-08

Incremental current waveform analysis and line-selection fault-location method for intermittent breakdown grounding in distribution network

ZHOU Yixuan¹, PI Jie², SONG Tianbao², ZOU Yun², YANG Lili², LUO Dechang³

(1. Automation Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China; 2. School of
Electrical and Power Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China;
3. School of Electrical and Power Engineering, Wuhan University, Wuhan 518052, China)

Abstract: In order to improve the reliability of line-selection and fault-location for single-phase grounding failures in distribution network, the current waveform at different stages were studied and stimulated. Firstly, in terms of the summarized common features of current waveforms during their development, the incremental current of the sub-transient sawtooth wave in the grounding phase and the incremental current in the sound phase are selected as the criterion signal sources for the fault location of the insulation loss in distribution networks. The general characteristics of

收稿日期:2018-01-23; 修回日期:2018-05-08

基金项目:上海市电站自动化技术重点实验室资助(13DZ2273800); 国家级大学生创新训练计划资助(201610290026); 江苏省研究生科研与实践创新计划项目(SJCX17_0527)

通信作者:周奕轩(1992-), 女, 硕士研究生, 主要从事智能配电网、传感技术和能源检测等研究; E-mail:15618228061@163.com

all grounding currents reflected by the saw tooth currents are analyzed. Then, the difference of waveform characteristics is analyzed between single-phase grounding current and operation-induced disturbance currents. It provides a criterion for identifying the authenticity of single-phase grounding failure. The line selection and location method are proposed for the single-phase grounding including the insulation loss to avoid misidentification. Finally, the proposed method is applied to the grounding locator in a low voltage distribution network model for verification.

Key words: distribution network; intermittent breakdown grounding; sawtooth wave; sickle wave; incremental current of grounding phase; line-selection and fault-location

现有经典理论教材和科技文章在关于配网单相接地的分析当中,通常以连续金属性接地为案例^[1]。而现有微机继电保护中采用的滤波与算法一般都以连续性全工频周期正弦波的故障电流为基础^[2]。这些理论和算法仅适用于连续接触性接地和绝缘击穿性接地发展到后期严重程度的大量值故障电流。运行经验表明,除雷击损坏和各种意外接触性接地以外,绝缘击穿引起的早期接地电流为连续性或间歇性非全工频周期的小量值电流,存在于不接地和各种间接接地的配网系统中。针对这种情况,有些文献应用了零序突变量选线法^[3-5]、相电流突变量选线法^[6]、小波选线法^[7]和行波测距选线法^[8-9]进行探索。这些方法分别利用了信号强度较大的瞬态和暂态接地电流的幅值与极性信息或者行波信息,有一定条件下的应用效果,但也受到各自的局限。

为根本解决各种单相接地电流波的选线定位问题,该文基于多时态的三相相地增量电流矢量关系特征^[10],研究配网真伪接地辨识和选线定位基理与方法,其中包括对于间歇性绝缘渐损性质的接地电流波形及其监测方法的探讨研究。

1 绝缘渐损接地电流波形及其变化过程

线路绝缘子因污染受潮使得表面绝缘逐渐降低,电缆连接处因接触不良运行发热使得接触点附近的绝缘逐渐老化。这些情况下当绝缘介质接近完全损坏程度时,其残留绝缘与导体之间的空气介质开始被交流电的峰值电压瞬时击穿,然后经历一个接地电流逐渐发展的过程。

第 1 阶段,产生小量值锯齿波相地增量电流。在此阶段,因残留绝缘介质表面空气部分的对地距

离很短,故障相的电压峰值通过绝缘已损坏部分的碳化电阻将该空气介质击穿而产生电弧,此刻流经由碳化电阻和电弧电阻串联形成的过渡电阻上的瞬时接地电流最大,该电流在该过渡电阻上的电压降形成了接地后的故障相对地电压。当故障相电压下降到零值相位时,流经过渡电阻的电流也减小到零值。此刻该电弧消失,受电弧电流加热部分的空气介质散开,残余绝缘恢复,直到下半个周期的电压幅值相位时再将该绝缘表面的空气击穿,重新呈现接地电流从幅值至零值状态。如此循环,形成双向锯齿状接地电流波,如图 1 所示,其中锯齿波的宽度和间隔时间都为 $1/4$ 工频周期即 0.005 s 。因这种连续性或者间歇性锯齿状电流波电弧将电弧通道中的空气在一个 $1/4$ 工频周期内骤然加热膨胀,又在紧接着的另一个 $1/4$ 周期内迅速消散,故在现场架空线路上可以看到闪烁弧光,并伴随着短促吱吱声;而在电缆线路连接处的封闭容器内,该电弧则伴随着短促噗噗声。

因为高阻值锯齿波电流对于残余绝缘介质表面渐进热损坏的能量相对小,故锯齿波电流持续时间也相对长。

第 2 阶段,产生小量值镰刀波与锯齿波相间的相地增量电流。在经过一段时间锯齿波电弧电流对于残余绝缘介质表面的渐进热损坏以后,该介质表面的绝缘恢复性能处于不稳定期,此时相地增量电流波形由全锯齿波渐进为锯齿波与镰刀波相间的状态,但幅值无明显变化。该电流的检测波形如图 2 所示。在现场观察中,此阶段的闪烁弧光有所增亮,短促放电声有所加重。

第 3 阶段,产生小量值渐增的连续正弦波相地增量电流。残余绝缘介质在经过渐进损坏的不稳定期之后,该介质表面在电弧路径上被基本碳化,失去

零值电压下残余绝缘恢复的性能。此阶段相地增量电流为连续性工频正弦波,其每周期的时间为 0.02 s ,如图3所示。但因此阶段被碳化介质的路径截面比较狭窄,呈现较高的电阻值,故接地电流值增加不大。在现场观察中,此阶段的电流弧光和吱吱声连续不断。

第4阶段,发展为相对大的连续正弦波相地增量电流。在接地电流路径的介质被碳化以后,接地电流逐渐增大,该碳化路径截面被逐渐扩大,过渡电阻值被逐渐减小,最终导致低值过渡电阻接地。若配网为低值电阻接地系统,此阶段的相地增量电流可以达到或者接近最大设计值。现场观察中,此阶段的电流弧光耀眼,放电声响连续刺耳。

从以上仿真和分析可见,绝缘渐损性单相接地的相地增量电流先后经历从高阻值锯齿波、镰刀波到高中阻值连续波的渐进过程,再到低阻值大电流连续波的质变过程。其中前3个阶段所经历的时间

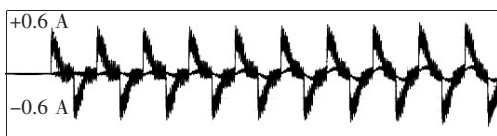


图1 相地电容 $40\ \mu\text{F}$ 配网发生 $15\ \text{k}\Omega$ 电阻接地的全锯齿波相地增量电流

Figure 1 Sawtooth wave current of $15\ \text{k}\Omega$ grounding in $40\ \mu\text{F}$ distribution network

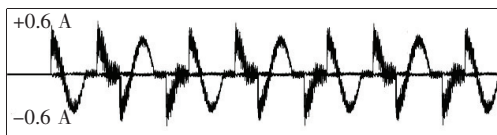


图2 相地电容 $40\ \mu\text{F}$ 配网发生 $10\ \text{k}\Omega$ 电阻接地的镰刀波与锯齿波相间的相地增量电流

Figure 2 Sawtooth wave and sickle wave current of $10\ \text{k}\Omega$ grounding in $40\ \mu\text{F}$ distribution network

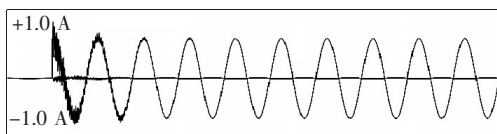


图3 相地电容 $40\ \mu\text{F}$ 配网发生 $9\ \text{k}\Omega$ 电阻接地的全正弦波相地增量电流

Figure 3 Full sine wave incremental current of $9\ \text{k}\Omega$ grounding in $40\ \mu\text{F}$ distribution network

较长、相地增量电流值较小,特别是幅值较小的锯齿状和镰刀状电流波形,使其成为传统接地选线方法的高概率失灵区。

2 相地电容大小对绝缘渐损接地电流波形的影响

仿真观察发现,非全工频周期相地增量电流波的持续时间与配网相对地电容的大小有关:

2.1 大量值相地电容配网的绝缘损坏接地电流波形

对于相对地电容为 $115\ \mu\text{F}$ 的配网,当绝缘损坏渐损接地过渡电阻为 $15\ \text{k}\Omega$ 时,所检测的相地增量电流工频分量为 $0.4\ \text{A}$ 的锯齿波如图4所示;当过渡电阻渐变到 $5\ \text{k}\Omega$ 时,所检测的相地增量电流为工频幅值增大到 $1.5\ \text{A}$ 的锯齿波如图5所示,其间延续的时间较长。

当绝缘击穿电阻由 $5\ \text{k}\Omega$ 渐变到 $4.3\ \text{k}\Omega$ 时,所检测的相地增量电流渐变为工频分量幅值为 $2\ \text{A}$ 的锯齿波与镰刀波相间的波形,如图6所示,此阶段电流变化速率不大;而绝缘击穿电阻由 $3\ \text{k}\Omega$ 减小到 $1\ \text{k}\Omega$ 时,锯齿波与镰刀波相间的相地增量电流就渐变到幅值为 $7.8\ \text{A}$ 的连续工频波(每周期的时间为 $0.02\ \text{s}$),如图7所示,此阶段的电流增加速率变大。



图4 相地电容 $115\ \mu\text{F}$ 配网发生 $15\ \text{k}\Omega$ 电阻接地的全锯齿波相地增量电流

Figure 4 Sawtooth wave current of $15\ \text{k}\Omega$ grounding in $115\ \mu\text{F}$ distribution networks

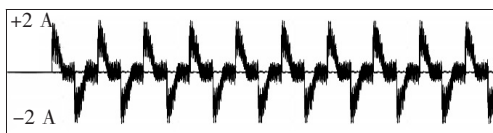


图5 相地电容 $115\ \mu\text{F}$ 配网发生 $5\ \text{k}\Omega$ 电阻接地的全锯齿波相地增量电流

Figure 5 Sawtooth wave current of $5\ \text{k}\Omega$ grounding in $115\ \mu\text{F}$ distribution networks



图 6 相地电容 115 μF 配网发生 4 k Ω 电阻接地的
镰刀波与锯齿波相间的相地增量电流

Figure 6 Sawtooth wave and sickle wave current of
4 k Ω grounding in 115 μF distribution network

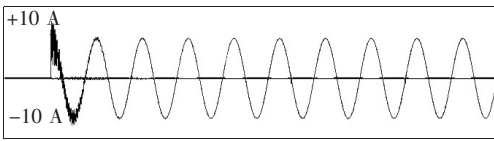


图 7 相地电容 115 μF 配网发生 1 k Ω 电阻接地的
全正弦波相地增量电流

Figure 7 Full sine wave current of 1 k Ω grounding in
115 μF distribution network

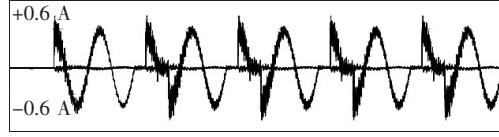


图 10 相地电容 30 μF 配网发生 14 k Ω 电阻接地的
全周波与锯齿波相间的相地增量电流

Figure 10 Full sine wave and sawtooth wave current of
14 k Ω grounding in 30 μF distribution network

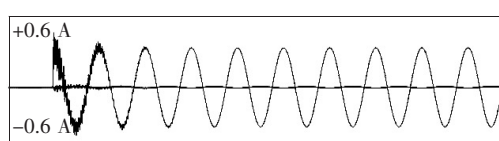


图 11 相地电容 30 μF 配网发生 11 k Ω 电阻
接地的全正弦波相地增量电流

Figure 11 Full sine wave incremental current of 11 k Ω
grounding in 30 μF distribution network

2.2 小量值相地电容配网的绝缘渐损接地电流波形

对于相对小量值相地电容的电缆与架空线混合线路的配网,其发生高阻值绝缘损坏接地电流的波形与大量值相地电容城市电缆配网的该电流波形相似,量值相近,但从锯齿波到连续波之间的过渡电阻和对应电流的变化速率却明显较小,如图 8~11 所示。

比较大、小相地电容配网的锯齿波接地电流,可以看出两者的异同性。

1) 差异性。大量值相地电容配网从可监测到的



图 8 相地电容 30 μF 配网发生 15 k Ω 电阻接地的
全锯齿波相地增量电流

Figure 8 Sawtooth wave current of 15 k Ω grounding in
30 μF distribution network



图 9 相地电容 30 μF 配网发生 14.5 k Ω 电阻接地的
镰刀波与锯齿波相间的相地增量电流

Figure 9 Sawtooth wave and sickle wave incremental
current of 14.5 k Ω grounding in
30 μF distribution network

绝缘渐损接地的锯齿波电流发展到连续波电流期间,其接地过渡电阻值从 15 k Ω 渐变到 1 k Ω 为 15 倍,相地增量电流幅值从 0.5 A 渐变到 7.5 A 也为 15 倍,渐变速率较大;而小量值相地电容配网在该期间的过渡电阻值从 15 k Ω 渐变到 10.7 k Ω 仅为 1.4 倍,相地增量电流幅值从 0.5 A 渐变到 0.7 A 也仅为 1.4 倍,渐变速率较小。

2) 共同性。①在绝缘渐损接地的初始阶段,相地增量电流的波形都为双向锯齿波;②同一量值过渡电阻的相地增量电流锯齿波工频分量幅值基本相同,无论配网对地电容的大、小还是配网中性点接地方式有何不同;③从小电流锯齿波到镰刀波所占时间相对于从接地发生发展到传统零序电流保护定值所需全部时间的占比相对较长。

3 绝缘渐损接地电流的监测分析

3.1 接地电流检测波形的选择原则

根据文献[1]所提电力系统的继电保护必须满足准确性、灵敏性、速动性和可靠性的技术性能要求,从电网运行安全和供电可靠率的发展需要来看,这种要求同样适用于现代配网的接地选线定位装置。为满足此“四性”要求,对于接地电流检测波形的选择应当遵循波形通用原则,即所选波形需适用于①工频波的全周期波和非全周期波;②瞬态、暂态

及其他时态接地电流出现的全过程;③检测精度设计范围内的各种大、小接地电流。

3.2 监测绝缘渐损接地电流的波形选择

绝缘渐损接地电流波形包括 1/4 周期的工频锯齿波、1/2 周期的工频镰刀波和全工频周期波。根据接地电流检测波形选择的通用性原则,因镰刀波和全工频周期波中都包括锯齿波,可见选择锯齿波电流作为绝缘击穿接地的监测电流波形不仅在小电流接地监测中具有通用意义,而且对于其他各种配网接地的大电流也具备通用意义。

3.3 锯齿波的工频分量计算分析

同一接地线路监测点的三相电流当中的每两相锯齿波电流分量的幅值和该两相幅值之间的相位关系如图 12 所示, I_{m+} 为被标注锯齿波的工频分量电流幅值,其极性为正; N 为每工频周期的采样次数。

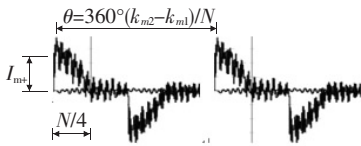


图 12 锯齿波的宽度、工频幅值及两路锯齿波之间的相位关系

Figure 12 The width, the power frequency amplitude and the phase of sawtooth waves

由该文所述锯齿波的形成过程可见:①锯齿波电流以线电压和接地电阻所决定的间歇性双负序电流与相地电容电荷平衡电流为主导;②锯齿波发生时相地电容电荷平衡电流仅出现于有过渡电阻的接地相;③在绝缘损坏接地发生的初始时刻,电感性的消弧线圈不起作用,故锯齿波电流中不存在非周期分量。

因锯齿波的主体为 1/4 工频周期电流波,其中又含有中、高频谐振波,故难以采用经典数字信号处理算法进行幅值和相位的定量计算。根据锯齿波的波形特征,该文采用如下方法进行处理。

3.3.1 锯齿波的标量分析计算

1) 滤除中频分量的软件方法。

仿真结果表明,单相接地的中、高频谐振波在故障线路各监测点上被综合为一个幅值较大的中频正弦波;在对此谐振波的软件滤波方面,根据正弦波在一个周期内积分为零的原理,该文简化到采用在一

个谐波周期内取偶次采样值之和的方法予以滤除。例如,在相地电容为 30~100 μF 的配网线路发生单相接地时,在其各监测点所检测到的综合中频谐振波频率为 1 000 Hz,即 20 倍工频左右,取工频每周采样次数 N 为 80~160,则每个中频谐振波周期可用 4~8 个采样值之和予以滤除。仿真和模拟实验结果表明其滤波效果较好。

2) 锯齿波的幅值筛选。

该文的接地区间定位方法涉及到接地电流的幅值极性和相位关系比较。对于锯齿波电流幅值的求取方法,考虑到通用性原则,要求兼顾到对镰刀波和所有种类单相接地半周工频波的幅值求取。该文结合中频滤波,采用半周扩展筛选法筛选出锯齿波幅值。具体方法流程如图 13 所示,工频每周采样次数 $N=80$, k 为接地发生后的接地电流采样次数, K 为滤波次数, I_{K_m} 为所选锯齿波幅值, k_m 为对应于所选幅值的采样次数。该流程中将幅值筛选范围扩展到 k 为 0~43,共 44 个采样点,即超过半周 4 个采样点,以保证幅值筛选的可靠性。由此,所选幅值也有可能位于第 2 个锯齿波,但不影响锯齿波的定量计算和将其作为选线定位的判别依据。

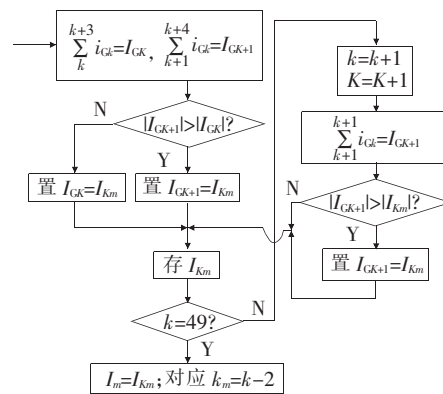


图 13 锯齿波幅值筛选流程

Figure 13 Flow chart of amplitude sieving for sawtooth

3.3.2 两路锯齿波之间的相位关系计算

因所设计新接地定位系统在对真伪接地线路进行辨识选线和区间定位时,可能涉及到接地线路不同相别锯齿波接地电流之间的相位关系计算。根据采样次数与被采样电气量之间的相位关系,该文采用图 13 所示流程筛选出不同相别的锯齿波电流幅值后,按各自所对应的采样次数 k_{m2} 和 k_{m1} 将 2 个

采样次数之差转换为相位差 θ ,转换公式为

$$360^\circ(k_{m_2} - k_{m_1})/N = \theta \quad (1)$$

式中 N 为每工频周期的采样次数; k_{m_1} 、 k_{m_2} 分别为两相锯齿波幅值所对应的采样次数; θ 为两幅值之间的相位差。仿真和模拟实验表明,这种相位关系测算方法实用有效。

4 对锯齿波电流的接地选线定位分析

4.1 锯齿波电流的接地选线分析

因绝缘损坏性的锯齿波电流仅存在于接地线路接地相,而健全线路只有幅值和相位都相同的三相相地增量电流和零序电流;又因接地线路各监测点接地相的次暂态相地增量电流与健全相电流之间的面积比值在各时态的比值当中数值最大,故在未经过真伪单相接地的辨识环节之前,先采用次暂态的面积比值进行疑似接地线路的预先判别。若监测点的选线定位器检测到某相电流面积大于另两相电流面积的 2 倍,则自举选择所监测线路为疑似接地线路,再提交防误辨识环节进行真伪接地的辨识和确认。

4.2 锯齿波电流的防误辨识分析

真实单相接地的锯齿波电流具有 3 项并存特征:①接地相锯齿波电流从峰值开始的 1/4 工频周期内的面积大于健全相在同时段电流的面积,即前者与后者的面积比值较大;②不接地系统的锯齿波电流接地线路在各时态始终保持此电流比值,而消弧线圈接地系统接地线路的此电流面积比值虽然随着零序谐振电流的逐渐增大而相应减小,但仍然保持明显大于 1 的势态;③ 2 个健全相的电流矢量始终同相位。仿真和模拟实验表明,连续性全工频周期电流波的真实单相接地同样具有这 3 项并存的特征,而各种操作性和诱发性扰动电流则不具备这种特征。根据两者之间的这种差异,以此 3 项并存特征为依据,将其设计成逻辑相或相与关系有机结合的定量判别程序,可以有效辨识真伪单相接地。

4.3 锯齿波电流的区间定位分析

在接地线路各监测点的选线定位器确认该监测线路为接地线路后,结合该线路各纵向监测点之间

的相邻通信,实现接地点的区间定位。现有接地选线方法与配网通信相结合可以实现辐射和开环线路较为严重接地的区间定位^[10],但不能解决闭环运行线路的接地区间定位问题,特别是绝缘损坏早期的锯齿波电流接地问题。在接地线路各纵向相邻监测点之间,该文采用比较接地相接地电流幅值极性的解决方法,其中包括比较锯齿波电流的幅值极性。

如图 14 所示,当闭环运行线路的 d 点发生绝缘损坏接地时,流经过渡电阻的接地相相地增量电流分别来自两侧电源母线,使得接地点两侧监测点电流的功率方向相异。但许多配网线路上的监测点往往缺失三相电压信号,使得单相接地电流的功率无法计算。

根据仿真该闭环运行线路在 d 点发生绝缘损害接地时所录 4 个监测点分别对应的相地增量电流,在对其滤除中高频谐波后的波形如图 15 所示,可以发现:①将这些幅值点纵向连接,可构成一条垂直的幅值线,如图中虚线所示;由此说明,全接地线路各监测点的接地相锯齿波电流的幅值都在同一时刻出现;②接地点至该闭环运行线路任一侧电源间

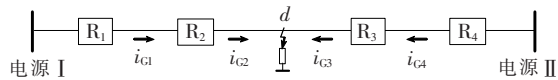


图 14 合环运行线路中段发生绝缘损坏单相接地的各监测点三相电流瞬时流向示意

Figure 14 The instantaneous flow direction of three-phase currents of each monitoring point in the middle segment of the closed-loop

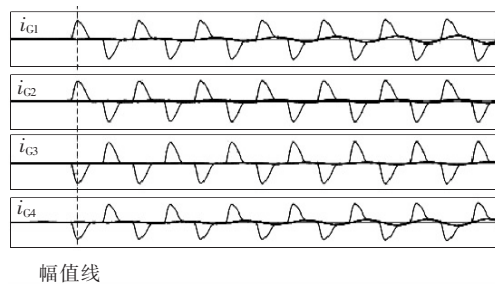


图 15 合环运行线路中段发生绝缘损坏早期的各监测点锯齿波接地电流幅值极性比较

Figure 15 Comparison of amplitude polarity of sawtooth-wave ground current between monitoring points in the early stage of insulation damage in the middle section of closed-ring operation line

各相邻监测点间的电流幅值极性相同;③接地点两侧相邻监测点间的电流幅值极性相异。由此可见,对于含锯齿波电流接地的区间定位,只需将各两相邻监测点间的接地相接地电流的幅值极性进行比较,其中两者极性相异的两监测点间的线路区段即为接地区间。以图 15 为例,因两相邻监测点 R_2 、 R_3 分别对应的接地相锯齿波电流 i_{G2} 、 i_{G3} 在同一时刻的幅值极性相异,故判 R_2 、 R_3 之间的线段为接地区间。

对于辐射和开环运行线路的单相接地,接地点的负荷侧监测点接地相因不具有接地电流而不发出接地报告,与其相邻的电源侧监测点在选出该点以下为接地线段时,由于接收不到下邻点的接地电流幅值极性信息,故视下邻点的接地电流幅值极性与该点极性相异,则定位该点与下邻点之间为接地区间。

在基于对绝缘渐损接地锯齿波电流波形的特征分析基础上,所设计的真伪接地防误辨识和接地选线定位理论方法的正确性已经得到仿真实验的验证;按照电阻电压比为 $1 \Omega/V$ 的设计精度,在线电压为 $400 V$ 的配网模型的合环运行线路上,用相控接地模拟器在 d 点模拟对地间歇性接通 400Ω 的接地电阻时,合环运行线路的接地相产生了锯齿波电流。将各监测点的接地定位器所监测到的故障相与健全相次暂态增量电流的幅值比及次暂态锯齿波幅值极性列入表中,如表 1 所示。

由表 1 可见:①该合环线路 4 个监测点的接地相次暂态增量电流幅值都大于设定值 $0.2 A$,接地相与健全相的电流比值都大于设定值 2,故各点都在对其防误辨识后,自举选出该线路为接地线路;②接地 d 点两侧相邻监测点 R_2 与 R_3 的次暂态增量电流幅值

表 1 环网 d 点接地的各监测点次暂态增量电流

Table 1 Increment currents of when point d was grounded in the closed-loop line

监测点	接地相与健全相次暂态增量电流幅值比	接地相次暂态增量电流幅值极性
R_1	0.39/0.03	+
R_2	0.39/0.02	+
R_3	0.39/0.02	-
R_4	0.39/0.03	-

极性相异,该两侧监测点的接地定位器均定位出该两点之间为接地区间。

5 结语

该文针对解决配网单相接地中的绝缘渐损接地选线定位问题的实际工程需求,仿真并观察总结了绝缘渐损接地在不同阶段的电流波形。一方面根据这些波形的共有规律,选择将锯齿波电流作为广泛适用于锯齿波、镰刀波和全工频周期波电流接地选线定位的通用判据信号源,研究了对于锯齿波标量和矢量相位差的计算方法;另一方面,研究了包括锯齿波在内的单相接地电流波形特征与操作性和诱发性扰动电流波形的区别,为辨识真伪单相接地找到了判别基准。以此为依据,研究设计了包括锯齿波电流特征在内的真伪单相接地防误辨识和选线定位方法。在此基础上,制作了接地定位器,并在低压配网模型的合环运行线路上进行了包括锯齿波电流在内的单相接地实验验证,说明了所设计包括绝缘渐损在内的配网接地辨识和选线定位方法的正确性。

参考文献:

- [1] 贺家李. 电力系统继电保护原理[M]. 北京:中国电力出版社,2010.
- [2] 王家林,夏立,吴正国,等. 电力系统微机保护故障信息检测算法综述[J]. 电测与仪表,2011,48(2):1-5+35.
WANG Jialin, XIA Li, WU Zhengguo, et al. State of arts of fault detection arithmetic of power systems microcomputer protection[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2011, 48(2): 1-5+35.
- [3] 李卫国,许文文,乔振宇,等. 基于暂态零序电流凹凸特征的配电网故障区段定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(10): 164-173.
LI Weiguo, XU Wenwen, QIAO Zhenyu, et al. Fault section location method for a distribution network based on concave and convex characteristics of transient zero sequence current[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(10): 164-173.
- [4] 但扬清,赵伟,朱艳伟,等. 基于 ABC-DNN 的小电流接地故障选线方法[J]. 智慧电力,2019,47(4):46-52.

- DAN Yangqing, ZHAO Wei, ZHU Yanwei, et al. Fault line selection in small current ground power system based on ABC-DNN[J]. Smart Power, 2019, 47(4): 46-52.
- [5] 梁睿, 杨学君, 薛雪, 等. 零序分布参数的单相接地故障精确定位研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(12): 472-479.
- LIANG Rui, YANG Xuejun, XUE Xue, et al. Study of accurate single-phase grounding fault location based on distributed parameter theory using data of zero sequence components[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(12): 472-479.
- [6] 宋国兵, 李广, 于叶云, 等. 基于相电流突变量的配电网单相接地故障区段定位[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(21): 84-90.
- SONG Guobing, LI Guang, YU Yeyun, et al. Single-phase earth fault section location based on phase current fault component in distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(21): 84-90.
- [7] 吴乐鹏, 黄纯, 林达斌, 等. 基于暂态小波能量的小电流接地故障选线新方法[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(5): 70-75.
- WU Lepeng, HUANG Chun, LIN Dabin, et al. Faulty line selection based on transient wavelet energy for non-solid-earthed network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(5): 70-75.
- [8] 李振兴, 吴李群, 谭洪, 等. 基于简单通信的双端行波测距新方法[J]. 中国电力, 2018, 51(3): 74-79.
- LI Zhenxing, WU Liqun, TAN Hong, et al. A novel method for double terminal traveling wave fault location based on simple communication[J]. Electric Power, 2018, 51(3): 74-79.
- [9] 付华, 刘公权, 邢亮. 基于同步挤压小波变换的故障行波测距方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(2): 18-24.
- FU Hua, LIU Gongquan, XING Liang. Fault traveling wave ranging method based on synchrosqueezing wavelet transform[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(2): 18-24.
- [10] 孙永超, 邵能灵, 郑晓冬. 含分布式电源的配电网单相接地故障区段定位新方法[J]. 电力科学与技术学报, 2016, 31(3): 73-80.
- SUN Yongchao, TAI Nengling, ZHENG Xiaodong. Research on single-phase grounding fault location of distribution network with DG[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2016, 31(3): 73-80.