

基于多频导纳测量的配电网接地故障辨识方法

李越宇, 喻 锟, 曾祥君, 毛 宇

(长沙理工大学智能电网运行与控制湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410004)

摘要:为解决谐振接地配电网高阻接地故障辨识困难的问题,提出基于多频导纳测量的配电网接地故障辨识方法。首先,建立由配电网中性点处注入特征信号等效回路,通过向配电网注入多频电流信号,测量返回电压信号,测算获得配电网多频导纳参数及阻尼率参数。然后,对由故障过渡电阻产生的增量阻尼率进行叠加,实现故障特征量的有效放大,同时大幅降低干扰的影响,从而有效地辨识高阻接地故障。最后,在 PSCAD/EMTDC 仿真环境中搭建典型 10 kV 配电网模型,对不同运行条件下的接地故障进行模拟,算例仿真表明该方法通过叠加多频段特征信号下的系统增量阻尼率,可使接地故障特征得以突显,并具备较高的抗噪声能力,大幅提高了高阻接地故障的辨识能力。

关键词:配电网;高阻接地故障;阻尼率;故障辨识

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2022.01.015 中图分类号:TM771 文章编号:1673-9140(2022)01-0122-08

Ground fault identification method for distribution networks based on multi-frequency admittance measurements

LI Yueyu, Yu Kun, ZENG Xiangjun, MAO Yu

(Hunan Province Key Laboratory of Smart Grids Operation and Control, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410004, China)

Abstract: In order to solve the difficulty when identifying the high-resistance ground faults in resonant grounded distribution networks, this paper proposes an identification method for based on multi-frequency admittance measurements. An equivalent circuit for injecting characteristic signals is established. By injecting multi-frequency current signals into the distribution network, and measuring the return voltage signal, the parameters of multi-frequency admittance and damping rate in the distribution networks can be obtained. The incremental damping rate generated by the fault transition resistance is superimposed to effectively amplify the fault characteristic signals, and thus the influence of interference can be reduced so as to effectively identify the high-resistance ground faults. A typical 10kV distribution network is established via the PSCAD / EMTDC to simulate the ground faults under different operating conditions. Simulation results show that the method can explore ground fault characteristics by superimposing the system's incremental damping rate under multi-band characteristic signals. This validates the high anti-noise ability of this method when identifying high resistance ground faults.

Key words: distribution networks; high impedance ground fault; damping rate; fault identification

随着配电网不断地深入用户终端,其运行条件复杂多变,极易发生故障,其中 80% 约为单相接地故障,且相间故障也多由未及时发现并处理的单相接地故障发展形成。当发生高阻接地故障(树障、避雷器不完全击穿等)时,过渡电阻往往高达数千欧姆,故障特征量十分微弱,中性点位移电压远小于国家标准的 15% 相电压,现有接地故障检测方法对高阻故障检测困难,故障点过渡介质持续放电直至过渡电阻降低至可检测范围时,检测装置方可识别,未识别期间可能导致故障扩大,严重威胁人身设备安全^[1-3]。

为解决配电网高阻接地故障检测难题,文献[4-5]分别提取接地故障前后的三相工频电流,根据其变化情况计算故障点残流,进一步计算过渡电阻阻值,但是该方法易受三相互感器不平衡的影响;文献[6]采用注入信号法,测量零序电压变化量判断故障,该方法需要接入大电源,且投资高、控制复杂;文献[7]通过注入信号测量配电网阻尼率,根据故障过渡电阻产生的增量阻尼率辨识故障,对金属性、低阻接地故障效果明显,但是高阻故障时往往无法达到启动值;文献[8]通过分析暂态零序电流在暂态零序电压上投影系数的差异,提出了高阻接地故障辨识方法,是一种方向保护的拓展,前提是需要有效地捕捉持续时间段的暂态信号,且该方法会受到电力电子设备高频谐波的干扰;文献[9]将改进非负矩阵分解算法引入到配电网故障检测中,实现配电网的运行状态监测和故障检测功能,但并未提及高阻接地故障的有效感知。

本文针对配电网高阻接地故障检测困难的问题,建立了由配电网中性点处注入特征信号等效回路,并分析了单相接地故障时的特征,结合本课题组注入信号方面的研究结果,提出了一种注入信号法与稳态法相结合的故障辨识方法,对由故障过渡电阻产生的增量阻尼率进行叠加,实现故障特征量的有效放大,达到有效辨识的目的,并进行了仿真验证。

1 配电网单相接地故障特征分析

单相接地故障时的配电网等值接线如图 1 所

示。图 1 中, \dot{U}_A 、 \dot{U}_B 、 \dot{U}_C 为配电网 A、B、C 三相相电压, C_A 、 C_B 、 C_C 为各相对地电容, r_A 、 r_B 、 r_C 为各相对地电导, R_d 为故障过渡电阻, L 为消弧线圈等值电感, r_L 为消弧线圈等值损耗电阻, \dot{U}_0 为系统中性点电压。

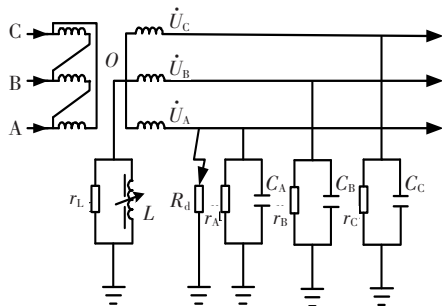


图 1 单相接地故障时的配电网等值接线

Figure 1 Equivalent wiring diagram of distribution network in case of single-phase ground fault

为方便分析故障点残流,假设系统进行了完全换位($C_A = C_B = C_C = C_0$, $r_A = r_B = r_C = r_0$),且负荷对称。利用戴维南定理对图 1 进行等效变换,得到单相接地故障时的配电网零序等值回路,如图 2 所示。

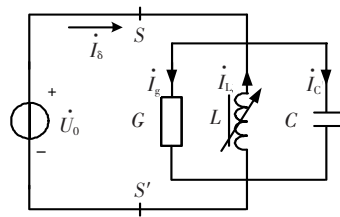


图 2 配电网零序等效回路

Figure 2 Zero sequence equivalent circuit of distribution network

图 2 中, R 为配电网总等值损耗电阻,由三相对地泄露电阻 $r = r_0/3$ 、消弧线圈损耗电阻 r_L 和故障过渡电阻 r_d 构成, G 为对地电导, $G = \frac{1}{R} = \frac{1}{r_L} + \frac{1}{r_d} + \frac{3}{r_0}$; L 为消弧线圈等值电感; $C = 3C_0$ 为配电网总对地电容。

根据故障零序等效回路,可求出残流 \dot{I}_s 大小及方向,即

$$\dot{I}_s = U_0 (G + j\omega C + \frac{1}{j\omega L}) = I_C (d + jv) \quad (1)$$

式中 I_g 为残流中的有功分量, $I_g = U_0 G$; I_C 为对地电容电流, $I_C = 3\omega C_0 U_0$; I_L 为消弧线圈电感电流; d 为系统阻尼率, $d = I_g / I_C$, 一般用百分比表示; v 为谐振接地配电网的失谐度, $v = (I_C - I_L) / I_C$, 一般用百分比表示, 且 $v = 1 - K$, 其中 K 为谐振接地配电网的合谐度。

由式(1)可知, 残流的大小、相位与系统参数阻尼率和失谐度相关。由于消弧线圈一般设置为靠近谐振点运行, v 为定值, 因此通过准确测算系统阻尼率, 可对配电网的运行状态进行有效地识别。

由式(1)可知, 配电网阻尼率 $d = I_g / I_C$, 即残流中阻性电流与容性电流之比。考虑到故障零序等效回路中各电流满足:

$$I_g = I_{r_0} + I_{r_L} + I_{r_d} \quad (2)$$

因此, 故障时谐振接地配电网的阻尼率由 3 部分组成, 即

$$d =$$

$$\frac{I_g}{I_C} = \frac{3g_0}{\omega C} + KP + \frac{g_d}{\omega C} = d_0 + d_L + d_d \quad (3)$$

式中 d_0 为中性点不接地配电网的固有阻尼率, 其值为该电网对地泄露电导与电容电纳之比; d_L 为消弧线圈有功损耗产生的附加阻尼率, 其值为消弧线圈合谐度 K 与其有功损耗 P 的乘积, 消弧线圈一般在谐振点附近运行, $K = \frac{I_L}{I_C} = \frac{1}{\omega^2 LC} \approx 1$ 为一定值; d_d 为接地故障电阻产生的增量阻尼率, 其值受接地故障过渡电阻的影响。

2 基于注入信号的配电网对地导纳测量方法

为实现配电网单相接地故障高灵敏度辨识, 需有效地测量系统对地导纳参数。现有的对地参数测量方法包括直接法、间接法、注入信号法。间接法又包括外加电容、外加电压、调谐法、变频法等。其中直接法、间接法均需要改变系统一次参数或系统拓扑结构, 操作复杂且有人身触电危险并不适用于实时测量系统参数。同时, 为配合本文多频导纳的测量需要, 采用注入信号法测量系统阻尼率。

通过消弧线圈内部电压互感器向配电网注入一

变频率恒幅值的小电流信号, 注入信号的同时通过配电网零序电压互感器测量反馈的特征频率电压信号, 注入信号等效流通回路如图 3 所示。计算频率为 f_i 下配电网的阻尼率为

$$d_i = \frac{G}{\omega_i C} = \frac{U_{0i} g}{U_{0i} \omega_i C} = \frac{I_{iR}}{I_{iC}} = \cot \alpha_i \quad (4)$$

式中 I_{iR} 为注入电流的实部; I_{iC} 为注入电流的虚部; α_i 为注入电流信号与反馈电压的相角差, 即注入特定频率信号的功角。

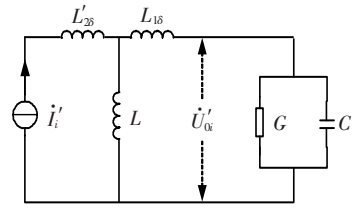


图 3 注入信号等效流通回路

Figure 3 Injection signal equivalent flow circuit

图 3 中, \dot{I}'_i 为注入信号 \dot{I}_i 归算到一次侧的值, 且 $\dot{I}'_i = \dot{I}_i / k_1$, \dot{U}'_{0i} 为二次侧反馈电压 \dot{U}_{0i} 归算至一次侧的值, 且 $\dot{U}'_{0i} = k_2 \dot{U}_{0i}$, L_{16} 为消弧线圈内部电压互感器的原边漏电感, L'_{28} 为副边漏电感归算到一次侧的值, 由于 L_{16} 、 L'_{28} 远小于 L , 因此, 电压互感器原、副边漏电感对于测量的影响可以忽略。由此得到如图 4 所示的注入特征信号简化等效回路。

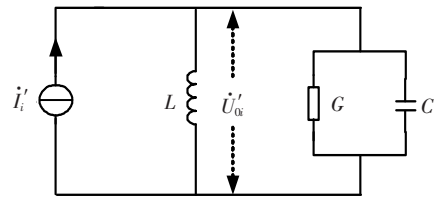


图 4 注入特征信号简化等效回路

Figure 4 Injecting characteristic signals to simplify equivalent circuits

由图 4 可知, 频率为 f_i 下系统等效对地导纳为

$$Y_i = \frac{\dot{I}'_i}{\dot{U}'_{0i}} = \frac{\dot{I}_i}{k_1 k_2 \dot{U}_{0i}} = G + j2\pi f_i C + \frac{1}{j2\pi f_i L} \quad (5)$$

消弧线圈等效电感 L 可根据挡位设定获取, 通过计算即可解得系统对地导纳参数。对图 1 中配电网模型, 注入变频信号后测得配电网反馈电压信号如图 5 所示。

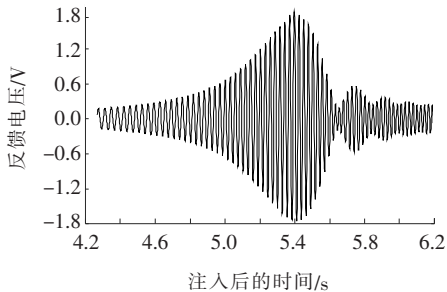


图 5 反馈电压信号

Figure 5 Feedback voltage signal

其频率 f_i 为一个关于时间 t 变化的函数, $f_i = 10t$, Hz(每次改变信号频率后维持注入信号不变, 一段时间后进行一次增频)。在 5.425 s 时, 测量反馈电压信号幅值有最大值, 证明系统总对地电纳与消弧线圈电感发生非工频并联谐振, 谐振频率 f_{im} 为 54.25 Hz, 对应该频率下系统对地导纳最小。此时满足:

$$2\pi f_{im}L = \frac{1}{2\pi f_{im}C} \quad (6)$$

对地导纳参数为

$$G = \frac{I'_{im}}{U'_{im}} = \frac{I_{im}}{k_1 k_2 U_{im}} \quad (7)$$

$$C = \frac{1}{4\pi^2 f_{im}L} \quad (8)$$

本文所提注入信号测量配电网导纳的方法可实时测量配电网参数, 不受系统运行方式及高频干扰的影响; 从二次侧完成测量, 不影响系统一次侧正常运行, 测量过程便捷可靠。

3 基于多频增量阻尼率的高阻接地故障辨识方法

10 kV 配电网通常为环网设计开环运行, 一般运行状态下为辐射型网络。发生单相接地故障时, 绝大多数情况为电阻性接地, 等效于在故障点与大地之间增加一电导支路, 该支路的存在使得线路零序导纳和阻尼率等参数发生变化。正常时, 线路对地零序导纳包括对地电纳和对地泄露电导, 当故障过渡电导支路加入后, 与线路对地导纳形成并联, 这样故障线路的对地导纳增大, 非故障线路基本保持不变, 系统的总对地导纳增大。

10 kV 配电网正常运行时, 架空线路的阻尼率约为 3%~5%, 线路绝缘受潮时可达 8%~10%; 电缆线路阻尼率较小, 约为 2%~4%, 当绝缘老化时会增加至 10%。

由于不同规模的配电网参数大不相同, 一般情况下, 辨识故障发生的配电网阻尼率整定值 d_{set} 为 20%, 此时接地故障过渡电阻约为 200~400 Ω ; 整定值 d_{set} 为 15% 时, 过渡电阻阻值约为 400~600 Ω 。对于过渡电阻大于 1 000 Ω 甚至更高的高阻, 接地单频阻尼率辨识方法将失效。基于此, 本文提出基于多频导纳测量的多频阻尼率接地故障辨识方法。

针对高阻接地故障时系统阻尼率变化不明显的情况, 提出多频阻尼率增量累加原理, 具体包括: 频域处理, 计算不同频率的对地导纳 Y_i 、阻尼率 d_i 参数; 时域处理, 将不同时刻的多频率下的对地导纳、阻尼率参数, 进行横向对比, 计算得出因接地故障过渡电阻产生的增量阻尼率 d_{di} , 进而进行累加, 实现接地故障特征多次放大。

频率为 f_i 下增量阻尼率为

$$d_{di} = d_i - d_{oi} - d_{Li} = \frac{G}{\omega_i C} - \frac{3g_0}{\omega_i C} - \frac{P}{\omega_i^2 LC} \quad (9)$$

式中 d_{oi} 为 f_i 频率下的固有阻尼率; d_{Li} 为 f_i 频率下的消弧线圈附加阻尼率。消弧线圈的补偿容量的表达式为 $Q_L = I_L U_{ph}$, 因此百分值形式下表示频率为 f_i 的消弧线圈有功损耗为

$$P_i = \frac{I_{rL}}{I_{iL}} \times 100\% = \frac{\omega_i L}{r_L} \times 100\% \quad (10)$$

即 P_i 为消弧线圈有功电流与电感电流之比, 或感抗与等值损耗电阻之比。联立式(9)、(10)得:

$$d_{di} = \frac{G}{\omega_i C} - \frac{3g_0}{\omega_i C} - \frac{1}{\omega_i C r_L} = \frac{1}{\omega_i C} (G - 3g_0 - \frac{1}{r_L}) \quad (11)$$

式中 G 、 C 为测量量; g_0 、 r_L 均为固有量; ω_i 为输入量。

为尽量避免 d_{di} 受注入信号频率的影响, 提出 2 种规避方法: 方法 1, 采用靠近工频 ($f \pm 5$ Hz) 的多

频增量阻尼率进行累加,尽可能地接近工频消除误差,具体参数需根据配电网实际运行情况进行设定;方法2,由于测量配电网对地参数 G 、 C 时存在误差,考虑最优注入信号时方法1通常不再适用,提出归一化整定方法,即将不同频率下的增量阻尼率 d_{di} 归算到工频角频率 ω_0 ,则归算后的增量阻尼率为

$$d'_{di} = d_{di} \frac{\omega_i}{\omega_0} \quad (12)$$

对多频增量阻尼率进行叠加并进行整定,即

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n d_{di} + d_0 + d_L \geq d_{set} \\ n = I_{NT} \left(\frac{d_{set} - d_0 - d_L}{g_{set}/\omega_{im}C} \right) + 1 \end{cases} \quad (13)$$

式中 g_{set} 为整定过渡电导; r_{dset} 为期望测量的过渡电阻阻值; n 为多频增量阻尼率叠加次数,其值受期望测量的最大过渡电阻阻值影响(一般过渡电阻为1 k Ω 时, n 取2或3; $I_{NT}(x)$ 为取整函数)。

根据式(13)进行逐次累加整定,直到第 n 次,期间满足整定不等式时判断发生接地故障;当累加至第 n 次时未满足条件且出现中性点电压位移,判断配电网为三相不平衡状态。

基于多频增量阻尼率的接地故障辨识流程如图6所示,故障辨识步骤如下。

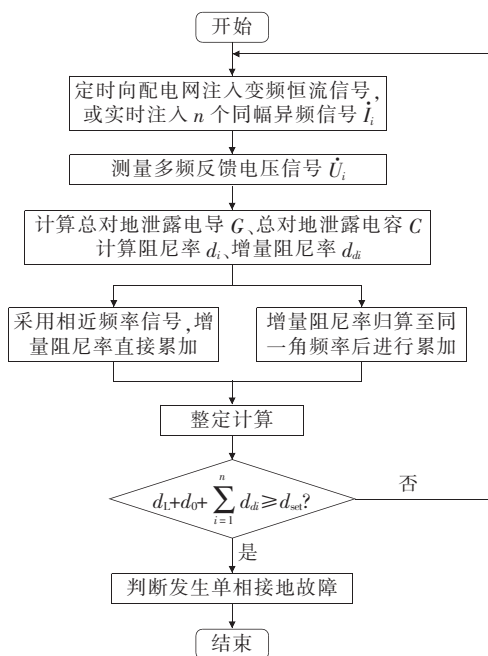


图6 接地故障辨识

Figure 6 Ground fault identification flowchart

1)定时向配电网注入恒幅变频电流信号,或实时向配电网注入 n 个同幅异频电流信号,测量多频反馈电压信号。

2)计算不同频率下的总对地泄露电导 G 、总对地泄露电容 C ,进而计算阻尼率 d_i 、增量阻尼率 d_{di} 参数并对后者进行归算。

3)对增量阻尼率进行叠加并进行整定,依据判据,进行故障辨识。

结合文第2章所提注入信号法,测量并计算获得系统多频增量阻尼率,进而进行叠加,放大高阻接地故障特征,实现高阻接地故障辨识,该方法不受系统高频噪声的干扰,且可靠性高。

4 算例分析

在PSCAD/EMTDC仿真软件中搭建如图1所示的10 kV谐振接地配电网模型,参数设置如表1所示,并对低阻接地故障、高阻接地故障、弧光接地故障分别进行仿真分析验证。

表1 10 kV配电网对地参数

Table 1 10 kV distribution network ground parameters

$\Sigma g/\mu S$	$\Sigma C/\mu F$	L_P/mH	$P/\%$
500	47.7	180	1.5

4.1 多频导纳测量

经消弧线圈电压互感器向配电网注入非工频电流,通过中性点零序电压互感器测量反馈电压信号。固定频率为70 Hz,初相角为 0° ,改变幅值测量结果如表2所示。

由表2可知,返回电压信号幅值随注入定频信号幅值的增大而增大,相对误差随之减小,一定程度上提高了测量精度。固定幅值1 A,初相角 0° ,改变频率测量结果如表3所示。

随着注入信号频率的增加电压互感器磁阻降低,且励磁阻抗变大,励磁电流减小,有效地降低了由PT励磁阻抗造成的影响,大大地提高了测量精

度。理论上提高注入频率可减小测量误差,但随频率升高会导致反馈信号小易受噪声及电力电子开关设备的干扰,并对继电保护设备造成影响。

表 2 改变注入信号幅值的对地参数测量结果

Table 2 Measurement results of ground parameters with varying amplitude of injected signal

信号幅值/ A	返回电压		对地参数		对地参数相对误差/%	
	幅值/ mV	相角/ (°)	电导/ μS	电容/ μF	电导	电容
0.1	1.21	-86.84	506.2	48.19	1.24	1.03
1.0	11.99	-86.56	504.8	48.03	0.96	0.69
3.0	38.92	-86.55	502.9	47.88	0.58	0.38
5.0	59.79	-86.53	503.0	47.88	0.60	0.38

表 3 改变注入信号频率的对地参数测量结果

Table 3 Measurement results of ground parameters that change the frequency of the injected signal

信号频率/ Hz	返回电压		对地参数		对地参数相对误差/%	
	幅值/ mV	相角/ (°)	电导/ μS	电容/ μF	电导	电容
45	16.16	85.29	505.7	48.10	1.14	0.84
60	11.96	-85.05	504.4	47.97	0.88	0.57
80	77.30	-87.79	502.6	47.79	0.52	0.13
100	47.28	-88.74	502.0	47.74	0.40	0.08

4.2 单相接地故障辨识

配电网单相接地故障导致中性点电压偏移,故障点残流大小受过渡电阻阻值的影响。仿真在 0.05 s 时设置接地故障,低阻接地、高阻接地、弧光接地故障^[10]波形如图 7~9 所示。

低阻接地故障时暂态特征明显,通过采集暂态特征信号即能有效辨识接地故障,但是经高阻抗接

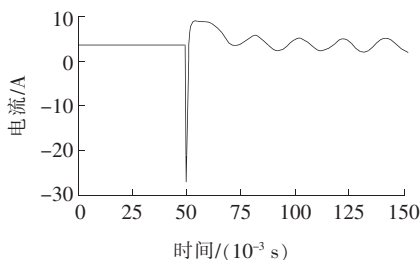


图 7 单相 200 Ω 低阻接地故障残流

Figure 7 Single-phase 200 Ω low resistance ground fault residual current

地或发生弧光高阻接地故障时该方法易受系统噪声的干扰,很难有效地捕捉故障暂态信号。基于多频导纳测量的接地故障辨识结果如表 4。分别对不同启动值 d_{set} 、不同过渡电阻、不同故障距离情况进行仿真,通过式(13)计算得到故障辨识情况及过渡电阻范围。

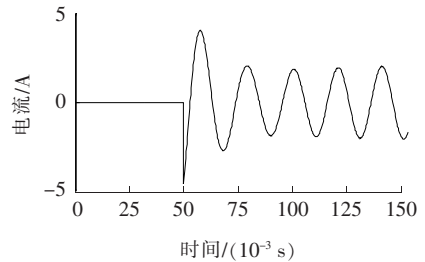


图 8 单相 1 500 Ω 高阻接地故障残流

Figure 8 Single-phase 1 500 Ω high impedance ground fault residual current

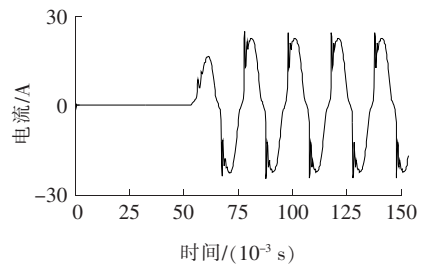


图 9 单相间歇性弧光接地故障点残流

Figure 9 Single-phase intermittent arc light ground fault point residual current

表 4 不同故障情况下辨识结果

Table 4 Identification results under different fault conditions

整定值 $r_{set}/k\Omega$	故障距 离/%	过渡电 阻/ $k\Omega$	启动值 $d_{set}/\%$	叠加 次数	辨识 情况
2	10	0.5	20	1	故障
2	10	0.8	20	2	故障
2	50	0.8	20	2	故障
2	90	1.5	20	4	故障
2	50	1.5	15	3	故障
1	50	1.5	50	1	正常
2	50	1.5	20	4	故障
2	50	1.8	20	5	故障
3	50	2.5	15	4	故障
3	50	2.5	20	6	故障

从表4可知,不同故障情况时,单一频率下测量阻尼率参数无法辨识高阻故障,对归一化后多频率下的增量阻尼率进行叠加,放大了高阻接地故障特征,达到故障判断启动值。通过设置不同的整定值 r_{set} 约束增量阻尼率的叠加次数,仿真结果显示,通过故障辨识启动值与整定值的合理配置,该方法均可有效地判断1 k Ω 以上的接地故障,验证了理论分析的结果。

为了验证本文所提方法不受电力电子开关频率以及系统噪声的影响,本文在仿真中叠加了不同分贝的高斯白噪声,图10为30 db白噪声情况下高阻接地故障残流,正常时中性点电压已发生偏移,故障辨识结果如表5所示。由于该方法本质上是对稳态特征参数进行处理,受系统干扰影响小。系统中存在30 db高斯白噪声时依然能够有效地判断过渡电阻为1 k Ω 以上的接地故障。

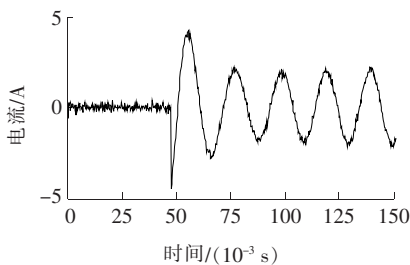


图10 30 db白噪声情况下高阻接地故障残流

Figure 10 High-resistance ground fault residual current under 30 db white noise

表5 含噪声情况下故障辨识结果

Table 5 Failure identification results with noise

白噪声/ db	整定值 $r_{set}/k\Omega$	过渡电 阻/ $k\Omega$	启动值 $d_{set}/\%$	叠加 次数	辨识 情况
	2	1.5	15	3	故障
30	2	1.5	20	4	故障
	3	2.5	20	6	故障
	2	1.5	20	4	故障
50	2	1.8	15	5	故障
	3	2.2	20	5	故障

5 结语

配电网发生高阻接地故障时,中性点位移电压

较小,传统的接地故障判据无法有效地判断故障发生。本文提出了基于多频导纳测量的配电网接地故障辨识方法,通过注入多频信号测得配电网多频对地导纳,计算对应频率下的增量阻尼率并进行叠加,多次放大故障特征,能够准确辨识高阻接地故障,大大地提高故障判断的准确率。

本文所提方法将注入信号法与稳态法进行融合,有效地避免了参数测量时高频分量的干扰以及谐波信号微弱、缺失对测量结果的影响;有效地规避了判定故障时暂态信号提取困难的问题,提高了高阻接地故障辨识的稳定性。

下一步将多频导纳、多频增量阻尼叠加的方法与智能算法相结合,提出无需整定的高阻接地故障辨识方法,进一步提高该方法的适用性。

参考文献:

- [1] 要焕年,曹梅月. 电力系统谐振接地[M]. 北京:中国电力出版社,2009,25-37.
- [2] 汤旻安,张凯越,许希元. 基于启发式规则与AHP-CRITIC算法的配电网故障恢复策略[J]. 电力系统保护与控制,2020,48(14):1-9.
TANG Minan, ZHANG Kaiyue, XU Xiyuan. Service restoration strategy of a distribution network based on heuristic rules and the AHP-CRITIC algorithm [J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(14): 1-9.
- [3] 徐丙垠,薛永端,冯光,等. 配电网接地故障保护若干问题的探讨[J]. 电力系统自动化,2019,43(20):1-7.
XU Bingyin, XUE Yonduan, FENG Guang, et al. Discussion on several problems of ground fault protection in distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(20): 1-7.
- [4] 张健磊,高湛军,孙旭日,等. 基于NSGA-II算法的有源配电网故障定位方法研究[J]. 电测与仪表,2020,57(9):33-39.
ZHANG Jianlei, GAO Zhanjun, SUN Xuri, et al. Research on fault location method for active distribution network based on NSGA-II algorithm [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(9): 33-39.

- [5] MA Hongjiang, ZENG Xiangjun, WANG Yuanyuan, et al. Grounding fault protection with fault resistance measuring for ineffectively earthed power systems [C]//Proceedings of 2005 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition: Asia and Pacific, Dalian, China: IEEE, 2005: 1-3.
- [6] 杨睿,高红均,李海波,等. 基于稀疏表示的配电网故障区段定位研究[J]. 智慧电力, 2021, 49(10): 8-15.
YANG Rui, GAO Hongjun, LI Haibo, et al. Fault section location in distribution network based on sparse representation[J]. Smart Power, 2021, 49(10): 8-15.
- [7] 刘渝根,陈超,杨蕊菁,等. 基于小波相对熵的变电站直流系统接地故障定位方法[J]. 高压电器, 2020, 56(1): 169-174.
LIU Yugen, CHEN Chao, YANG Ruijing, et al. Location method of ground fault in DC system of substation based on wavelet relative entropy[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(1): 169-174.
- [8] 王巍璋,王淳,尹发根. 基于可达矩阵和贝叶斯定理的含分布式电源的配电网故障区段定位[J]. 中国电力, 2021, 54(7): 93-99+124.
WANG Weizhang, WANG Chun, YIN Fagen. Reachability matrix and bayes' theorem based fault section location of power distribution network with distributed generation[J]. Electric Power, 2021, 54(7): 93-99+124.
- [9] 孔祥玉,徐勇,李鹏,等. 基于云边架构和小波神经网络的配电网故障诊断方法[J]. 供用电, 2020, 37(4): 17-23.
KONG Xiangyu, XU Yong, LI Peng, et al. Fault diagnosis method of distribution network based on cloud-edge computing architecture and wavelet neural network[J]. Distribution & Utilization, 2020, 37(4): 17-23.
- [10] 张欣,裴立耕,王永庆,等. 基于灰狼算法的多目标配电网重构[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(3): 34-41.
ZHANG Xin, PEI Ligeng, WANG Yongqing, et al. Multi-objective distribution network reconfiguration based on grey wolf algorithm[J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(3): 34-41.