

漏电排查系统中漏电电流基波和谐波分量分离方法

杨 帅¹, 张治国¹, 黄治国¹, 李政廉²

(1. 国网湖南省电力有限公司益阳供电分公司, 湖南 益阳 413000; 2. 湖南省送变电工程有限公司, 湖南 长沙 410015)

摘要:为了能够快速排查漏电点, 漏电排查系统在低压配电台区(简称“台区”)被广泛使用。由于台区存在非线性负荷所造成的零序谐波, 严重降低了漏电排查系统的漏电电流检测精度, 且现有的频域滤波方法难以准确测量暂态漏电电流。因此, 提出一种漏电电流基波和谐波分量分离的方法, 即单相 $d-q$ 变换滤波法, 相对于频域滤波方法, 该方法能够对台区线路中的零序谐波进行较好抑制, 同时又不会造成暂态漏电电流基波幅值的衰减, 解决了漏电排查系统检测漏电电流时受零序谐波干扰的问题, 并用 MATLAB 软件仿真验证该文方法的可行性。

关键词:漏电排查系统; 频域滤波; 零序谐波; 漏电电流

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2020.06.024 中图分类号:TM930 文章编号:1673-9140(2020)06-0180-07

Method for separation of base and harmonious wave component of leakage current in the leakage detection system

YANG Shuai¹, ZHANG Zhiguo¹, HUANG Zhiguo¹, LI Zhenglian²

(1. Yiyang Power Supply Branch, State Grid Hunan Electric Power Co., Ltd., Yiyang 413000, China; 2. Hunan Power Transmission and Transformation Engineering Co., Ltd., Changsha 410015, China)

Abstract: In order to quickly check the leakage point, the leakage detection system is widely used in the low voltage radio station area ("station area"). Due to the zero-order harmonic caused by the nonlinear load in the station area, the accuracy of leakage current detection in the leakage detection system is seriously reduced, and the existing frequency domain filtering method is difficult to measure the transient leakage current accurately. Therefore, a separation method of leakage current base wave and harmonic component is proposed, that is, a single-phase $d-q$ transformation filtering method. Comparing with the frequency domain filtering method, It can suppress the zero-order harmonics in the station line well without causing the attenuation of the temporary leakage current base wave value. The leakage current is detected by the leakage system and the problem of zero-order harmonic interference is then solved. The feasibility of the method is verified by MATLAB software simulation finally.

Key words: leakage investigation system; frequency domain filtering; zero sequence harmonic; leakage currents

收稿日期:2019-10-06; 修回日期:2020-09-26

基金项目:国网湖南省电力公司科技项目(5216AB50009); 湖南省重点实验室开放研究基金(5216A01600VZ)

通信作者:杨 帅(1983-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事电能计量及用电信息采集技术的研究; E-mail: yang_shuai@126.com

随着中国智能电网的建设,城镇居民和农村用电的智能配电台区也得到了很大的发展,目前台区都安装了智能总保或漏电保护器,通过这些智能设备可以实现对台区内的漏电电流进行实时在线监测和保护,大大提升了对漏电电流的监管工作^[1]。但是也引进了新的问题,如果漏电电流过大,会造成总保或漏保自动跳闸。当用户内部漏电导致漏电保护器动作而自动停电时,很多用户由于专业知识的限制无从找到漏电点,为了能继续用电,客户的第一反应是将漏电保护器退出运行。但随着漏电保护器退出运行的数量增加,因电气设备绝缘损坏或潮湿等其他原因而引起的漏电点依然存在,台区漏电电流逐步上升,最终就造成变压器总保护动作,扩大停电面积^[2-4]。对于这种情况很难快速定位漏电点、隔离漏电点并恢复供电。

针对传统的漏电排查方式简单、单一,不能批量、快速有效定位漏电点,长期存在漏电点处理不及时的问题^[5]。为能快速排查漏电点,漏电排查系统在台区被广泛使用。但由于台区中非线性负荷(如 UPS 电源、电脑大型数据服务器等)的存在,造成台区三相线路普遍存在谐波畸变率高和负荷不平衡问题,使得零序谐波过大,严重降低了漏电排查系统对漏电电流检测和定位的精确度,导致误报漏电点定位信息^[6-9]。传统的频域滤波方法实现漏电电流基波和谐波分量分离时,能够比较精确地提取出稳态的漏电电流基波幅值,实现漏电电流基波和谐波分量的有效分离,并且抗噪声干扰能力较强。但这种方法在准确提取漏电电流基波幅值前,会根据采集到的一个周期的电流值进行计算,该方法主要适用于稳态量的分析,难以分析出漏电电流的暂态分量(比如发生间歇性暂态漏电故障时引起的漏电电流基波幅值);通过安装无源滤波器和有源电力滤波器的方法能够对零序谐波进行很好地抑制,但是会造成暂态漏电电流基波幅值的衰减,而且还会增加硬件成本;因此,该文提出一种漏电电流基波和谐波分量分离方法,相对于频域滤波方法能够对台区线路中的零序谐波进行很好地抑制,同时又不会造成暂态漏电电流基波幅值的衰减,解决了漏电排查系统检测漏电电流时受零序谐波干扰的问题,显著提高漏电排查系统对漏电电流检测和定位的精确度。

1 漏电排查系统工作原理

漏电排查系统的工作原理如图 1 所示,通过位于低压配电线路首末端的漏电排查系统中的采集钳表检测出线路干线和支线中的电流,当出现干线首末端、支线首末端或者进线端总电流和出线端节点处总电流不一致或超出某一限值时,即该线路或节点处存在漏电电流,通过 GPRS 数据通讯技术处理后经过信号杆塔将数据上传至服务器并对该采集钳表进行定位,当定位距离较远时(中国低压配电网输送距离为 0.35 km 以下),则表示漏电点发生在该区域间的干线或支线上,同时将各干线和支线状态信息发送至后台监控与移动手持终端,快速定位漏电点,隔离漏电点并恢复供电。

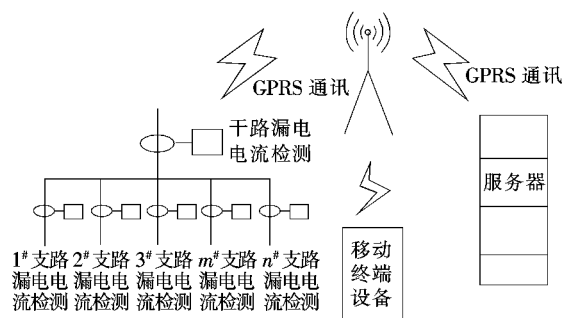


图 1 漏电排查系统的工作原理

Figure 1 A schematic diagram of the working principle of the leakage detection system

在各台区的漏电电流采集过程中,由于用电台区的负荷差异,故漏电排查系统中不平衡的非线性负荷会造成三相供电支路存在零序谐波,严重干扰漏电排查系统采集钳表的检测精度^[10]。台区中漏电电流采集原理如图 2 所示, R_1 、 L_1 、 C_1 分别为线路在集总参数模型下的等效电阻、等效电感以及线路对地电容^[11-13]。

漏电排查系统通过测量 i_A 、 i_B 、 i_C 、 i_N , 计算这 4 条线路的电流值总和来检测台区中漏电电流的数值,即

$$i_{de} = i_A + i_B + i_C + i_N \quad (1)$$

式中 i_A 、 i_B 、 i_C 分别为流经 A、B、C 相主干线路的电流值; i_N 为流经中性线线路的电流值。

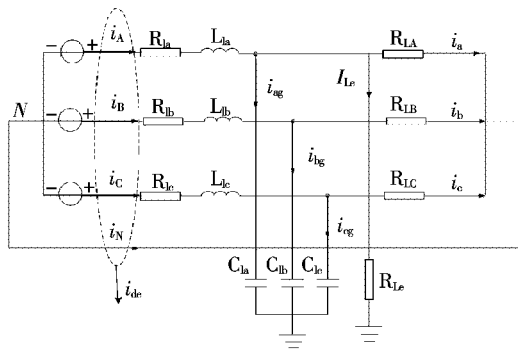


图 2 漏电排查系统的工作原理

Figure 2 Schematic diagram of collecting principle of leakage current

由图 2 可知,通过基尔霍夫电流定律计算为

$$-i_N = i_a + i_b + i_c \quad (2)$$

$$i_A = i_a + I_{Le} + i_{ag} \quad (3)$$

$$i_B = i_b + I_{bg} \quad (4)$$

$$i_C = i_c + I_{cg} \quad (5)$$

综合式(1)~(5)计算可得:

$$i_{de} = i_A + i_B + i_C - (i_a + i_b + i_c) \quad (6)$$

进一步化简得:

$$i_{de} = I_{Le} + i_{ag} + i_{bg} + i_{cg} \quad (7)$$

式(6)、(7)中 i_a, i_b, i_c 分别为流经 A、B、C 相所有分支线路的电流值总和; i_{ag}, i_{bg}, i_{cg} 分别为 A、B、C 相线路通过对地电容的漏电电流值; I_{Le} 为 A 相线路发生触电故障时产生的漏电电流值。

假设在 A 相发生触电故障,由于电源电压中含有 3 次谐波分量,则会导致每一相的电流中都会含有 3 次谐波分量,即

$$i_A = i_{A1} + i_{A3} \quad (8)$$

式中 i_{A1}, i_{A3} 分别为 A 相线路电流的基波、3 次谐波分量。

在理想情况下,台区中三相线路负荷平衡分布且各分支线路未发生触电故障时($I_{Le} = 0$),由式(7)可得漏电排查系统中漏电采集钳表所检测到的漏电电流为

$$i_{de} = i_{ag} + i_{bg} + i_{cg} \quad (9)$$

理想情况下尽管台区三相线路中 i_{ag}, i_{bg}, i_{cg} 的三次谐波分量是平衡分布的,但是由于其零序性质,导致三相线路通过对地电容的漏电电流之和不为零。因此,三次谐波的存在会导致采集钳表所检测

到的 i_{de} 不为零,当 i_{de} 超过台区漏电保护装置所设定的动作电流阈值时,会导致漏电保护装置误动作。

当系统中存在 3 次谐波分量的情况下 A 相发生单相触电故障时,漏电排查系统中采集钳表所检测到的漏电电流为

$$i_{de} = 3i_{ag3} + I_{Le3} + I_{Le1} \quad (10)$$

式中 I_{Le1} 为单相触电故障电流的基波分量; I_{Le3} 为 A 相触电故障电流的 3 次谐波分量。

由式(10)可知,当台区中不平衡的非线性负荷过多时,在线路对地电容上会产生不对称谐波电流,从而影响漏电电流检测的精度和漏电保护装置的可靠动作。因此,有效抑制漏电排查系统检测漏电电流时受零序谐波的干扰,研究一种对零序谐波能够进行很好地抑制,同时又不会造成基波幅值衰减的漏电电流基波和 3 次谐波分量分离方法有着重大的理论意义和工程应用价值。

2 漏电电流基波和 3 次谐波分量分离方法工作原理

由于零序谐波对线路漏电电流检测干扰较大,因此,该文提出采用一种漏电电流基波和 3 次谐波分量分离方法滤除非线性负荷在线路上产生的零序谐波,提高线路漏电定位检测的精确度。

漏电电流基波和 3 次谐波分量分离方法的工作原理:首先,将漏电排查系统中的采集钳表钳夹在 A、B、C 相主干线路和中性线线路 N 这 4 根供电线路上,得到 i_A, i_B, i_C, i_N ,然后将 i_A, i_B, i_C, i_N 的总电流值 i_{de} 作为 a 相电流,通过将 i_{de} 分别延时 1/3、2/3 个工频周期得到虚拟的 b、c 相电流。假定:

$$i_{de} = I_{de3} \sin(3\omega t + \varphi_3) + I_{de1} \sin(\omega t + \varphi_1) \quad (11)$$

式中 I_{de1}, I_{de3} 分别为采集到的漏电电流的基波、3 次谐波幅值。则此时的 a、b、c 相电流分别为

$$\begin{cases} i_a = I_{de3} \sin(3\omega t + \varphi_3) + I_{de1} \sin(\omega t + \varphi_1) \\ i_b = I_{de3} \sin(3\omega t + \varphi_3) + I_{de1} \sin(\omega t + \varphi_1 - \frac{2}{3}\pi) \\ i_c = I_{de3} \sin(3\omega t + \varphi_3) + I_{de1} \sin(\omega t + \varphi_1 + \frac{2}{3}\pi) \end{cases} \quad (12)$$

通过恒功率 $d-q$ 变换矩阵:

$$T = \frac{2}{3} \cdot \begin{bmatrix} \sin(\omega t + \varphi) & \sin(\omega t + \varphi - \frac{2}{3}\pi) & \sin(\omega t + \varphi + \frac{2}{3}\pi) \\ \cos(\omega t + \varphi) & \cos(\omega t + \varphi - \frac{2}{3}\pi) & \cos(\omega t + \varphi + \frac{2}{3}\pi) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (13)$$

则得到:

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{de1} + I_{de3} \sin(2\omega t + \varphi_3) \\ 0 \\ I_{de3} \sin(3\omega t + \varphi_3) \end{bmatrix} \quad (14)$$

式中 i_d, i_q 分别为漏电电流经 $d-q$ 变换后的 d, q 轴分量。

经此处理后, i_{de} 中漏电电流的基波分量成为直流分量,而 3 次谐波分量则成为 2 次谐波分量。由于 i_{de} 在 $d-q$ 旋转坐标系中为直流分量,因此,可以用低通滤波器无衰减提取,其中,该文提出的方法只需取一相电流就能有效滤去谐波,较传统方法能更快地提取漏电电流基波幅值,计算量小,并减小了台区三相线路中谐波污染对漏电检测产生的误差,显著提高了漏电排查系统采集数据的准确性。

综上所述,采用漏电电流基波和谐波分量分离方法的工作原理框图如图 3 所示。

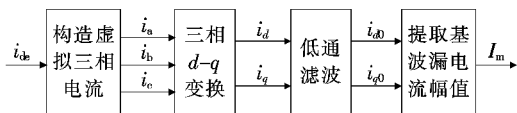


图 3 工作原理

Figure 3 Working principle block diagram

3 仿真验证

3.1 仿真参数设置

仿真电路如图 4 所示,加法器所测值就是台区三相系统的漏电电流数值。该仿真取 200 m 长度的配电线路,其线路阻抗和对地泄漏电容采用集中参数模式。将 200 m 的线路分为 2 段等值电路以

提高仿真的精确度,接地电阻取 1 000 Ω ,仿真参数设置如表 1 所示^[14-15]。

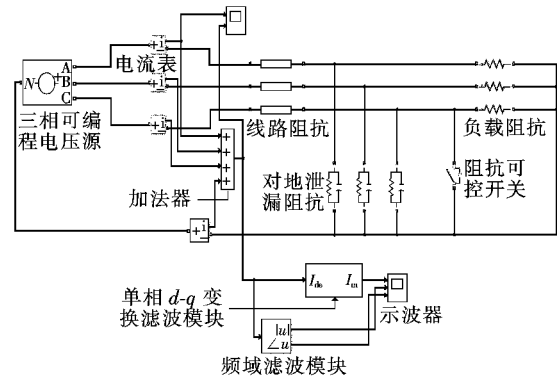


图 4 仿真电路

Figure 4 Simulation diagram

表 1 仿真参数设置

Table 1 Simulation parameter setting

项目	参数设置
基波	线路电压有效值为 380 V, 频率为 50 Hz
3 次谐波有效值(p. u.)	0 0.10 0.20 0.30 0.40 0.50
5 次谐波有效值(p. u.)	0 0.05 0.10 0.15 0.20 0.25
输电线路	线路阻抗: $0.967 + 0.367j \Omega/\text{km}$ 对地绝缘电阻: $5 \times 10^4 \Omega/\text{km}$ 对地泄漏电容: $0.22 \times 10^{-7} \text{ F}/\text{km}$
三相负载	$L_a = L_b = L_c = 8\ 000 \text{ W}$
人体阻抗	1 000 Ω

由于漏电排查系统主要通过检测漏电电流的基波幅值来表示漏电电流数值,因此,在三相线路和负载是否平衡的情况下,比较频域滤波方法和该文方法的漏电电流基波幅值,通过检测基波幅值的精确度来对比 2 种滤波方法的分离效果。

3.2 三相线路和负载平衡情况下 2 种滤波方法分离效果对比

由式(10)可知,在三相线路和负载平衡情况下,当台区线路中存在 3、5 次谐波的影响,A 相线路发生单相触电故障时,漏电排查系统的漏电采集钳表所检测到的漏电电流为

$$i_{de} = 3i_{ag3} + I_{Le5} + I_{Le3} + I_{Le1} \quad (15)$$

式中 I_{Le1}, I_{Le3} 分别为 A 相触电故障电流的基波、3 次谐波分量; I_{Le5} 为 A 相触电故障电流的 5 次谐波分量; i_{ag3} 为 A 相线路通过对地电容的漏电电流 3 次谐波分量。

由式(15)可知,如何快速提取漏电电流基波幅

值,消除 3、5 次谐波带来的测量误差,对提高漏电排查系统漏电电流检测数据的准确性至关重要。

通过表 1 中的仿真参数,将台区的三相配电路长度均设置为 200 m,为提高仿真精确度,将线路分为 2 段等值电路,0.06 s 时通过可控开关人为设置触电故障,仿真时长设置为 0.1 s,接地电阻设置为 1 000 Ω 。由于漏电排查系统主要通过检测漏电流的基波幅值来表示漏电电流数值,因此,在三相线路和负载平衡情况下,可通过比较频域滤波方法和该文方法的漏电电流基波幅值检测精确度来对比 2 种滤波方法的分离效果,如图 5 所示。

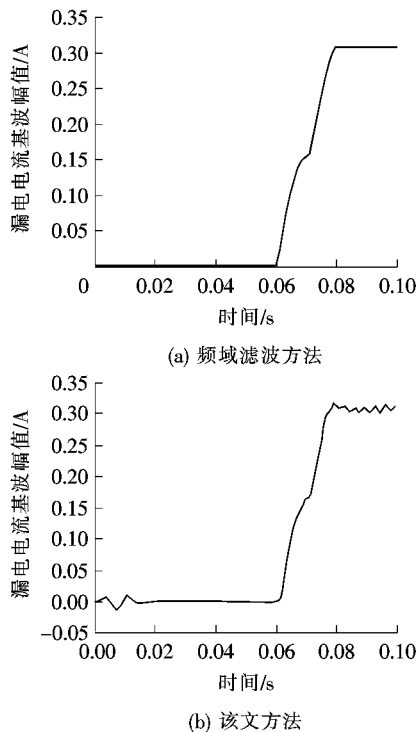


图 5 三相线路和负载平衡情况下 2 种滤波方法分离效果对比

Figure 5 Two filtering methods for three-phase lines and load balancing comparison of separation effects

在 $t=0.08$ s 时,通过仿真电路可得 A 相触电故障电流的基波幅值 $I_{Le1}=0.3129$ A,由式(15)可知, I_{Le1} 即为漏电排查系统的采集钳表所检测到的 i_{de} 基波幅值理论值。

由图 5 可知,在 $t=0.08$ s 时,频域滤波方法和该文方法分离得到的 i_{de} 基波幅值分别为 0.307 9、0.316 7 A。为消除测量数据的随机性影响,当 t 为 0.09、0.10 s 时,通过比较 2 种方法分离得到的 i_{de} 基波幅值、仿真电路得到的 A 相触电故障电流基波

幅值 I_{Le1} 的相对误差,对三相线路和负载平衡情况下 2 种滤波方法的分离效果进行对比分析,如表 2 所示,可知在三相线路和负载平衡情况下,将该文所提方法即单相 $d-q$ 变换滤波法与频域滤波法分离效果的相对误差进行比较,该文方法具有相对误差更小、检测结果更精确的特点。

表 2 三相线路和负载平衡情况下 2 种滤波方法的分离效果相对误差

Table 2 The separation effect of the two filtering methods is relatively error in the case of three-phase line and load balancing %

时间/ s	相对误差	
	频域滤波方法	该文方法
0.08	1.60	1.21
0.09	1.60	1.09
0.10	1.60	0.13

3.3 三相线路和负载不平衡情况下 2 种滤波方法分离效果对比

由式(7)、(8)、(10)综合可得,在三相线路和负载不平衡情况下,当台区线路中存在 3、5 次谐波影响且 A 相线路发生单相触电故障时,由于台区三相线路中 i_{ag} 、 i_{bg} 、 i_{cg} 的 1、3、5 次谐波分量是不平衡分布的,其零序性质导致三相线路通过对地电容的漏电电流之和不为零,故此时漏电排查系统的采集钳表所检测到的漏电电流为

$$i_{de} = I_{Le5} + I_{Le3} + I_{Le1} + i_{ag5} + i_{bg5} + i_{cg5} + i_{ag3} + i_{bg3} + i_{cg3} + i_{ag1} + i_{bg1} + i_{cg1} \quad (16)$$

由式(16)可知,在三相线路和负载不平衡情况下,漏电电流基波分量主要由 A 相触电故障电流的基波分量 I_{Le1} 和 A、B、C 三相线路通过对地电容的漏电电流基波分量 i_{ag1} 、 i_{bg1} 、 i_{cg1} 两部分组成。因此,如何消除 3、5 次谐波带来的测量误差,对提高漏电排查系统漏电电流检测数据的准确性至关重要。

该文通过修改仿真电路图中的设置参数来模拟低压配电台区中三相线路和负载不平衡的情况,其中,A、B、C 相线路长度分别设置为 80、200、320 m,每公里输电线路仿真参数见表 1。为提高仿真精确度,将 200 m 的线路分为 2 段等值电路,0.04 s 时通过可控开关人为设置触电故障,仿真时长设置为 0.1 s,接地电阻设置为 1 000 Ω 。在三相线路和负

载不平衡情况下,通过比较频域滤波方法和该方法的漏电电流基波幅值检测精确度来对比两种滤波方法的分离效果,如图 6 所示。

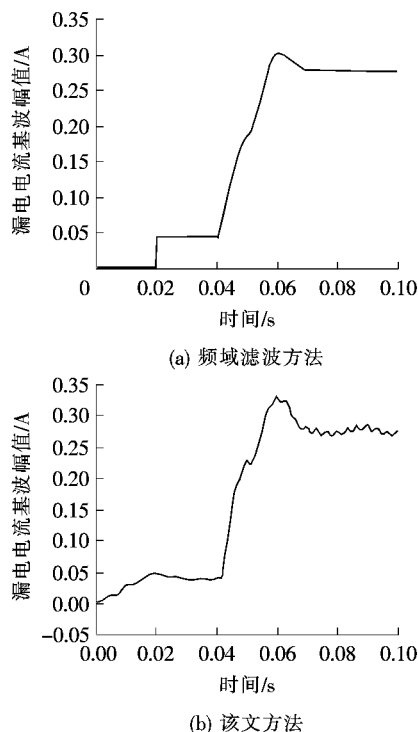


图 6 三相线路和负载不平衡情况下
2 种滤波方法分离效果对比

Figure 6 The separation effect of the two filtering methods is compared in the case of three-phase line and load imbalance

在 $t=0.06$ s 时,通过仿真电路可得 A 相触电故障电流和 A、B、C 三相线路通过对地电容的漏电电流的基波幅值, $I_{Le1} + i_{ag1} + i_{bg1} + i_{cg1} = 0.335$ A 即为漏电排查系统的采集钳表所检测到的漏电电流 i_{de} 的基波幅值理论值。

由图 6 可知,在 $t=0.06$ s 时,频域滤波方法和该文方法分离得到的 i_{de} 基波幅值分别为 0.302 5、0.335 8 A。为消除测量数据的随机性影响,在 t 为 0.08、0.09 s 时,通过比较 2 种方法分离得到的 i_{de} 基波幅值、仿真电路得到的 i_{de} 基波幅值 $I_{Le1} + i_{ag1} + i_{bg1} + i_{cg1}$ 的相对误差,对三相线路和负载不平衡情况下 2 种滤波方法的分离效果进行对比分析,如表 3 所示。

由表 3 可知,在三相线路和负载不平衡情况下,将该文所提方法即单相 $d-q$ 变换滤波法与频域滤波法分离效果的相对误差进行比较,该文方法在检测暂态漏电电流时,能够快速提取漏电电流中的基

波幅值,计算量小,减小了台区三相线路中的谐波污染对漏电检测产生的误差,提高了漏电电流检测数据的准确性,而且能够对零序谐波进行很好地抑制,同时又不会造成漏电电流基波幅值的衰减,克服了频域滤波方法难以快速准确检测暂态漏电电流基波幅值的缺点,解决了漏电排查系统检测漏电电流时受零序谐波干扰的问题,同时不增加硬件成本。

表 3 三相线路和负载不平衡情况下 2 种
滤波方法的分离效果相对误差

Table 3 The separation effect of the two filtering methods is relatively error in the case of three-phase line and load imbalance %

时间/ s	相对误差	
	频域滤波方法	该文方法
0.06	9.73	0.21
0.08	0.29	0.36
0.09	0.29	0.75

4 结语

该文提出了一种漏电电流基波和谐波分量分离方法,即单相 $d-q$ 变换滤波法,此方法易实现,并且只需要取一相电流就能有效滤除谐波影响,实现了对零序电流的抑制,提高了漏电点定位的准确度。该方法相较于频域滤波法适用性更广,计算速度更快,更易于实现对漏电电流的准确采集和数据分析。可通过物联网技术实现对台区各主干、分支线路漏电电流状态的远程在线监测,可以帮助电力运维人员实时了解台区各主干、分支线路监测点的漏电电流变化情况。当某一主干或分支线路的漏电电流数值超限时,根据监测点上传的漏电电流数据可实现对漏电点的准确定位、线路异常状态提前预警,并通知线路运维人员迅速赶赴现场进行处理,有效缩短了线路故障恢复时间,切实提升了配电网运维水平。

参考文献:

- [1] 于传,徐修华,李先允,等. 基于 $dq0$ 变换的三相四线制系统电流综合检测方法[J]. 电力科学与技术学报, 2019,34(4):173-179.
- YU Chuan, XU Xiuhua, LI Xianyun, et al. Integrated current detection method for three-phase four wire system based on instantaneous power theory[J]. Journal of

- Electric Power Science and Technology, 2019, 34(4): 173-179.
- [2] 魏睿,周力行,彭超敏,等. 同相供电系统中负载突变时的电流检测方法[J]. 电力科学与技术学报, 2020, 35(4):147-153.
WEI Rui, ZHOU Lixing, PENG Chaomin, et al. In phase change in load current monitoring method in power system research[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(4): 147-153.
- [3] Janjan B, Ahmadi V, Fathi D. Quasi-phase matched second harmonic generation in plasmonic-organic hybrid structures[J]. Journal of Lightwave Technology, 2020, 38(6):1391-1399.
- [4] 陈强伟,蔡文皓,牛春光,等. 基于VMD的APF谐波检测算法[J]. 电力科学与技术学报, 2018, 33(1):120-124.
CHEN Qiangwei, CAI Wenhao, NIU Chunguang, et al. A APF harmonics detection method based on VMD[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2018, 33(1):120-124.
- [5] 杨帅,陈远扬,胡军华,等. 基于物联网的配电网漏电排查装置的研制[J]. 电测与仪表, 2018, 55(22):87-91.
YANG Shuai, CHEN Yuanyang, HU Junhua, et al. Development of leakage investigation device for distribution network based on internet of things[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2018, 55(22): 87-91.
- [6] 仇新艳,李付亮. 基于Nuttall窗DFT校正的微电网谐波检测算法[J]. 电力科学与技术学报, 2017, 32(1):65-70.
QIU Xinyan, LI Fuliang. Microgrid harmonic detection algorithm based on Nuttall window DFT correction[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2017, 32(1): 65-70.
- [7] Pedroli F, Marrani A, Le M Q, et al. Reducing leakage current and dielectric losses of electroactive polymers through electro-annealing for high-voltage actuation[J]. RSC Advances, 2019, 9(23):12823-12835.
- [8] Matsuzaki Y, Tachikawa Y, Baba Y, et al. Leakage Current and chemical potential profile in proton-conducting bi-layered solid oxide electrolyte with BZY and hole-blocking layers [J]. ECS Transactions, 2019, 91(1): 1009-1018.
- [9] 孙伟. 一种带故障报警的漏电保护器电路设计[J]. 电子测试, 2020(7):27-28+114.
SUN Wei. A circuit design of residual current circuit breaker with fault alarm[J]. Electronic Test, 2020(7): 27-28+114.
- [10] 张树楠,罗海云,程晓绚,等. 基于双dq变换正负序提取及锁相环的FPGA实现[J]. 高压电器, 2020, 56(3): 182-189.
ZHANG Shunan, LUO Haiyun, CHENG Xiaoxuan, et al. Realization of positive & negative sequence component picking up and phase locked loop using FPGA based on dual-dq transform[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(3): 182-189.
- [11] 李博,孙建军,王朝亮,等. 考虑高次谐波影响的智能配电网合并单元改进采样数据同步方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(18):20-27.
LI Bo, SUN Jianjun, WANG Chaoliang, et al. Improved sampling synchronization method used by merging unit in smart distribution network considering higher harmonic effects[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(18): 20-27.
- [12] 章宝歌,马伟杰. 电容均压三相四开关整流器多矢量模型预测控制[J]. 中国电力, 2019, 52(10):45-53+99.
ZHANG Baoge, MA Weijie. Multi-vector model predictive control for three-phase four-switch rectifier with capacitor voltage balancing[J]. Electric Power, 2019, 52(10): 45-53+99.
- [13] 汪冬辉,方芳,吕文韬,等. 锁相环的动态性能及对线路保护的影响分析[J]. 中国电力, 2020, 53(3):110-118.
WANG Donghui, FANG Fang, LU Wentao, et al. Analysis of dynamic performance of phase lock loop and its effect on line relay[J]. Electric Power, 2020, 53(3): 110-118.
- [14] 牛峰,曹石然,王尧,等. PWM电机系统漏电流分析[J]. 电工技术学报, 2019, 34(8):1599-1606.
NIU Feng, CAO Shiran, WANG Yao, et al. Analysis of leakage current in PWM motor system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(8): 1599-1606.
- [15] 王付胜,李祯,付航,等. 一种抑制系统漏电流非隔离型三电平逆变器中点平衡载波调制算法[J]. 电工技术学报, 2017, 32(Z2):128-138.
WANG Fusheng, LI Zhen, FU hang, et al. A new pulse-width modulation algorithm for the comprehensive neutral-point balancing and leakage current reducing in the three-level transformerless inverter [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(S2): 128-138.