

半波傅氏算法与两点乘积算法相结合的励磁涌流识别新方法

陈达壮¹, 张玲²

(1. 华北电力大学电气与电子工程学院, 河北 保定 071003; 2. 福建省厦门电业局, 福建 厦门 361004)

摘要: 为解决变压器差动保护由于励磁涌流而经常误动的问题, 针对励磁涌流波形畸变严重且会出现尖顶波, 而故障电流基本保持基频正弦波特征的特点, 以半波傅氏算法为基础, 提出了两点乘积算法来识别变压器励磁涌流的新方法。该方法先通过差分滤波得到差动电流, 用半波傅氏算法求得其基波实部, 利用三角函数定理, 求得多组相邻 $\pi/2$ 两电流的平方和, 然后比较相邻两组平方和的比值来判断励磁涌流。通过对动模试验数据的分析计算验证了本方法的正确性和有效性。

关键词: 差动保护; 励磁涌流; 半波傅氏算法; 两点乘积算法; 三角函数

New algorithm to identify inrush current based on half-wave fourier and two points product method

CHEN Da-zhuang¹, ZHANG Ling²

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;
2. Xiamen Power Supply Bureau, Xiamen 361004, China)

Abstract: A new algorithm based on half-wave fourier and two points product method is presented for solving the mal-operation in transformer differential protection due to magnetizing inrush current. The method is based on the principle that the waveform of the inrush distorts seriously and even forms into vertex sharp wave, while the fault current keeps nearly sinusoid. Based on the half-wave fourier, this method samples currents with differential filter continuously, gets groups of square sum of two neighboring $\pi/2$ currents using trigonometric theorem, then distinguishes inrush current by the ratios of neighboring groups of square sum. Theoretical analysis and dynamic simulation results show that the method is correct and effective under various fault conditions.

Key words: differential protection; inrush current; half-wave fourier; two points product method; trigonometric function

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)17-0138-04

0 引言

电力变压器是电力系统重要设备之一。最新统计资料表明, 2001~2005年220 kV及以上变压器的平均正确动作率为79.794%, 仍然低于发电机及线路保护, 而造成这种局面的重要原因之一是变压器中的励磁涌流识别问题。

根据文献[1]的分析, 励磁涌流时, 用全波傅氏算法计算得到的基波有效值基本上是一条较平滑的直线, 无法反映励磁涌流的尖顶凸凹特性。而半波傅氏算法仅反映半个周期内波形采样值的特征, 得到的基波有效值则随着励磁涌流波形的变化而剧烈变化, 其根本原因是由于励磁涌流存在尖顶波和间断角。同时文献[2]也分析了当差动电流为短路电流时, 半波傅氏算法与全波傅氏算法的基波有效值计算结果一致。

很显然, 由文献[1-2]结论得到半波傅氏算法的

基波有效值能反映励磁涌流的特性, 其本质上揭示了基波分量的实部和虚部也能反映励磁涌流的特性。本文从揭示励磁涌流时半波傅氏算法与全波傅氏算法基波分量的不同出发, 提出利用半波傅氏算法得到基波分量, 结合微机保护中两点乘积算法的基本原理来识别励磁涌流的方法。该方法数据采样方便, 且两点乘积算法本身所需要的数据窗仅为很短的半个周期, 每次计算只需要三个对应的采样点, 因此计算量小, 可以快速准确地识别励磁涌流, 因此具有很高的实用价值。

1 变压器励磁涌流的波形特征分析

励磁涌流的波形具有尖顶波特性, 且含有间断角。对励磁涌流波形分别采用全波傅氏算法和半波傅氏算法进行基波分量的计算, 结果如图1所示。从图1(b)可以看出全波傅氏算法的基波分量都是正弦波; 而半波傅氏算法的基波分量则不是正弦波,

尤其是实部 a1 更加明显, 并且在励磁涌流的间断角附近时基波分量的绝对值越小, 如图 1 (c), 因此采用半波傅氏算法提取基波分量的实部来识别励磁涌流。

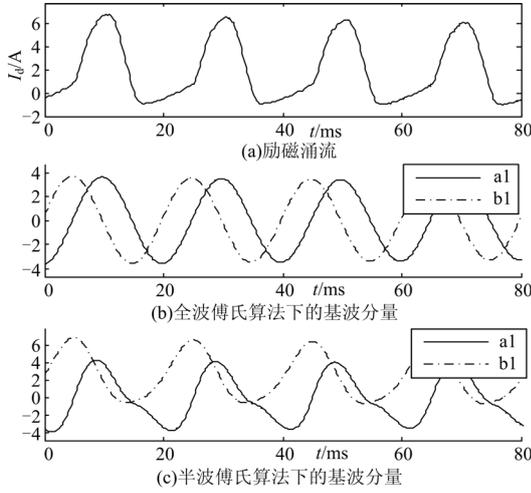


图 1 变压器励磁涌流的波形特征

Fig.1 Characteristic analysis of inrush current

2 基于两点乘积算法的变压器保护原理

2.1 两点乘积算法的基本原理

假定输入为正弦电流可表示为

$$i(nT_s) = I_m \sin(\omega nT_s + \alpha) \quad (1)$$

设 i_1 、 i_2 和 i_3 分别为三个电气角度相隔为 $\pi/2$ 的采样时刻 n_1 、 n_2 和 n_3 的采样值 (如图 2 所示), 即

$$\omega(n_2T_s - n_1T_s) = \pi/2 \quad (2)$$

$$\omega(n_3T_s - n_2T_s) = \pi/2 \quad (3)$$

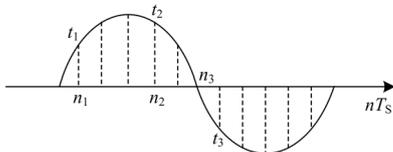


图 2 两点乘积算法采样示意图

Fig.2 Sampling schematic diagram of two points product method

根据式 (1) ~ (3), 有:

$$i_1 = i(n_1T_s) = I_m \sin(\omega n_1T_s + \alpha) = I_m \sin \alpha_1 \quad (4)$$

$$i_2 = i(n_2T_s) = I_m \sin(\omega n_2T_s + \alpha + \pi/2) = I_m \sin(\alpha_1 + \pi/2) = I_m \cos \alpha_1 \quad (5)$$

$$i_3 = i(n_3T_s) = I_m \sin(\omega n_3T_s + \alpha + \pi/2 + \pi/2) = I_m \sin(\alpha_1 + \pi/2 + \pi/2) = -I_m \sin \alpha_1 \quad (6)$$

式中, $\alpha_1 = \omega n_1T_s + \alpha$ 为 n_1 采样时刻电流的相角。

将式 (4) 和式 (5) 平方后相加, 式 (5) 和式 (6) 平方后相加即得

$$i_1^2 + i_2^2 = I_m^2 (\sin^2 \alpha_1 + \cos^2 \alpha_1) = I_m^2 \quad (7)$$

$$i_2^2 + i_3^2 = I_m^2 (\cos^2 \alpha_1 + \sin^2 \alpha_1) = I_m^2 \quad (8)$$

式 (7)、(8) 表明, 只要知道正弦量任意两个电气角度相隔 $\pi/2$ 的瞬时值, 就可以计算出该正弦量的有效值, 并且每个有效值都相等。

故障电流基本为正弦波形^[3], 任意两个电气角度相隔 $\pi/2$ 的瞬时值均会满足式 (7)、(8)。由第 1 节分析所知, 变压器励磁涌流具有尖顶波凸凹特性, 并且还有间断角的影响, 则半波傅氏算法的基波实部 a1 不是正弦波, 因此不满足三角函数定理 $\sin^2 \alpha_1 + \cos^2 \alpha_1 = 1$, 所以本文所采用原理的基本思路是: 通过差分滤波得到差动电流, 利用半波傅氏算法求得差动电流的基波分量实部, 然后用两点乘积算法来判断是否发生励磁涌流。

2.2 具体实现方法及判据

当变压器处于某种运行状态 (如空载合闸) 时, 对采样差动电流进行差分滤波并通过半波傅氏算法得到基波实部 n 个值 i (i_1 、 i_2 、 $i_3 \dots i_n$), 依次求得相邻 $\pi/2$ 两个电流的平方和 I_m^2 , 即

$$I_{m1}^2 = i_1^2 + i_{1+\pi/2}^2$$

$$I_{m2}^2 = i_2^2 + i_{2+\pi/2}^2$$

$$\dots$$

$$I_{mn-\pi/2}^2 = i_{n-\pi/2}^2 + i_n^2$$

然后依次求得相邻两组平方和的比值 k , 即

$$k_1 = \frac{I_{m1}^2}{I_{m2}^2}$$

$$k_2 = \frac{I_{m2}^2}{I_{m3}^2}$$

M

$$k_{n-\pi/2} = \frac{I_{mn-1-\pi/2}^2}{I_{mn-\pi/2}^2}$$

当基波实部为正弦波时, 相邻两个电流的平方和相等, 其比值 k 为 1, 而励磁涌流出现时, 不再是正弦波, 比值 k 不为 1。因此可得到保护判据如式 (9) 所示:

$$k_{\min} < k < k_{\max} \quad (9)$$

k 的整定原则见 3.6 节, 取 $0.8 < k < 1.25$ 。分

别计算三相差动电流的 k 值。如果有两相不满足式 (9)，则判断为励磁涌流；否则判断为内部故障。

3 仿真实验结果及分析

3.1 动模实验仿真分析

为验证上述方法的实用性和可行性，本文利用动模实验获得变压器在各种运行状况下的大量真实数据^[3-4]对保护判据进行验证，其采样频率为5 kHz。动模实验系统接线如图3所示，此系统中的实验变压器为三单相变压器组，采用Y/d-11 接线，单相变压器参数如下：额定容量为10 kVA；低压侧额定电压为380 V；低压侧额定电流为25.3 A；高压侧额定电压为1 kV；高压侧额定电流为10 A；空载电流为1.45%；空载损耗为1%；短路损耗为0.35%；短路电压为9.0%~15.0%。

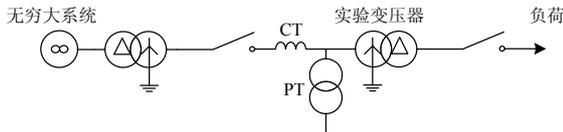


图3 动模实验系统接线图

Fig. 3 Dynamic analog testing system

3.2 变压器空载合闸

图4为变压器空载合闸时的A、B、C三相差动波形及其 k 曲线，很明显三相涌流波形不是正弦波形，且其三相的 k 值都超过判据的范围。

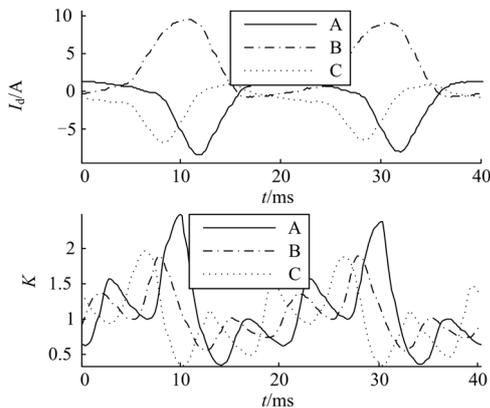


图4 变压器空投时电流波形及其 k 曲线

Fig. 4 Waveforms of differential currents and their k when switching on a no-load transformer

3.3 变压器相间短路

图5为A相32%位置和B相32%位置发生相间短路时的三相差动波形及其 k 曲线。Y侧取的电流依次为A、B相，B、C相，C、A相之差，因此

A、B相的故障将反映到最后的三相差流上。由图中可看出各相 k 都在判据范围内。

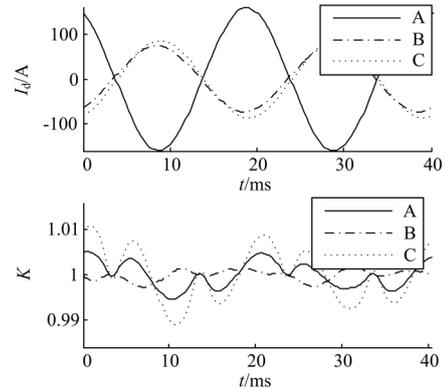


图5 变压器相间短路时的电流波形及其 k 曲线

Fig.5 Waveforms of differential currents and their k when phase-to-phase fault of transformer occurred

3.4 变压器单相接地短路

图6为A相32%处发生接地故障时的三相差动波形，A相故障将反映到A、C相差流上，B相差流小于最大不平衡电流。由图中可看出各相 k 都在判据范围内。

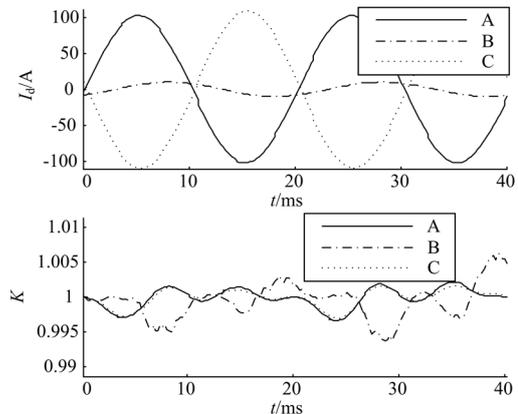


图6 变压器单相接地短路时的电流波形及其 k 曲线

Fig.6 Waveforms of differential currents and their k when phase-to-ground fault of transformer occurred

3.5 变压器带故障空投

图7(a)为变压器空投于A相32%处发生接地故障时的三相差动波形，A相故障将反映到A、C相差流上，B相出现比较大幅值的差动电流是由于合闸过程中涌流的影响，其 k 值超出范围。

图7(b)为变压器空投于A相8%处发生匝间短路时的三相差动波形，A相故障将反映到A、C相差流上，B相出现比较大幅值的差动电流是由于合

闸过程中涌流的影响, 此时B相 k 值较大且超出范围。

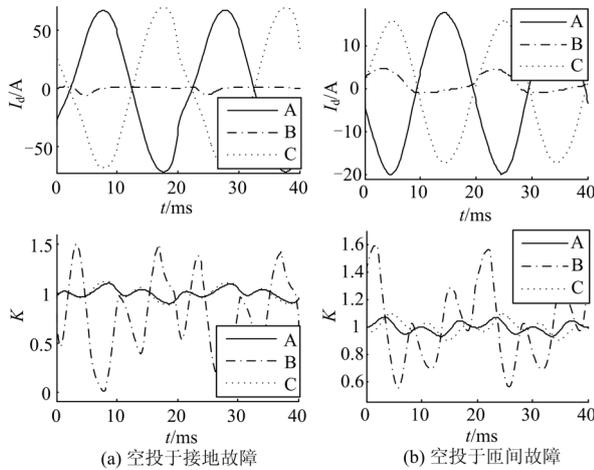


图7 (a)、(b) 分别是变压器空投于接地故障和空投于匝间故障时的电流波形及其 k 曲线

Fig.7 Waveforms of differential currents and their k when switching on a transformer in a state of phase-to-ground fault and inter-turn fault

3.6 各种情况的 k 值及分析

经过多次动模实验, 获取 k 值在各种状态下的变化范围如表1所示。可以看出, 当变压器处于故障状态时, 至少有两相满足 $0.87 < k < 1.13$, 考虑一定的裕度, 取 $0.8 < k < 1.25$, 此时应该开放保护。

表1 变压器在各种状态下 k 值的变化特征

Tab.1 Values of k under different conditions

运行状态		k 值范围
正常空载合闸		三相都超出(0.8~1.25)
运行中故障	匝间	三相都在(0.98~1.02)
	接地	三相都在(0.99~1.01)
	相间	三相都在(0.98~1.02)
带故障空投	匝间	两相都在(0.9~1.1)
	接地	两相都在(0.87~1.13)
	相间	三相都在(0.9~1.12)

4 结论

基于变压器励磁涌流波形畸变严重, 会出现尖顶凹凸, 而故障电流基本保持基频正弦波这一特征,

发现励磁涌流和故障电流在采用半波傅氏算法和两点乘积算法之后 k 的比值差异很大, 并以 k 的取值范围来构成变压器保护原理。理论分析及大量动模实验表明据此构成的变压器保护在各种运行条件下, 能快速地判别励磁涌流和内部故障电流。

参考文献

[1] 韩正庆, 高仕斌, 李群湛. 基于半波傅里叶算法的励磁涌流识别方法[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(14): 60-63.
 HAN Zheng-qing, GAO Shi-bin, LI Qun-zhan. New method to identify inrush current based on half-wave fourier analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(14): 60-63.

[2] 陈俊, 严伟, 陈佳胜, 等. 基于不同傅里叶算法之间相似度的励磁涌流鉴别方法[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(6): 21-24.
 CHEN Jun, YAN Wei, CHEN Jia-sheng, et al. Novel identification method for magnetizing inrush current based on the comparability of different fourier algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(6): 21-24.

[3] 黄家栋, 罗伟强. 采用改进数学形态学识别变压器励磁涌流的新方法[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(7): 98-105.
 HUANG Jia-dong, LUO Wei-qiang. New algorithm to identify inrush current based on improved mathematical morphology[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(7): 98-105.

[4] 王增平, 徐岩, 王雪, 等. 基于变压器模型的新型变压器保护原理的研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(12): 54-58.
 WANG Zeng-ping, XU Yan, WANG Xue, et al. Study on the novel transformer protection principle based on the transformer model[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(12): 54-58.

收稿日期: 2009-09-25; 修回日期: 2009-12-25

作者简介:

陈达壮(1985-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护及电力系统自动化控制; E-mail: devil7663579@gmail.com

张玲(1985-), 女, 硕士, 研究方向为电力系统运行分析与控制。