

基于波形相关性分析的变压器励磁涌流识别新算法

李贵存, 刘万顺, 滕 林, 郑 涛

(华北电力大学四方研究所, 北京 100085)

摘要: 提出一种利用数字信号处理中的相关函数的基本概念, 对采样数据进行分析, 计算采样数据在不同时段上的自相关系数, 利用自相关系数的大小来区分变压器励磁涌流和内部故障差流的新方法。由于波形自相关性的定义中不仅包含波形幅值大小、形状的信息, 而且还包含波形的相位信息, 因此, 文中所提出的波形相关性分析方法, 不是单纯地利用涌流或故障电流的单一方面的特征, 而是对波形进行有机、综合地分析。理论分析和 EMTP 仿真结果均表明: 该算法原理清晰, 识别正确, 特征明显, 且不受非周期分量和电流互感器饱和等的影响。

关键词: 变压器保护; 自相关系数; 励磁涌流

中图分类号: TM 41; TM 403.5

0 引言

变压器差动保护的核心问题是如何鉴别励磁涌流和变压器内部故障差流。目前在工程上普遍采用二次谐波制动原理和间断角原理的差动保护, 但是现代变压器铁心广泛采用高导磁冷轧晶粒硅钢材料, 饱和点低且剩磁较大, 使得励磁涌流中某一相或两相电流的二次谐波分量很小。为了防止励磁涌流引起的误动作, 往往采用三相二次谐波综合制动的方式。这种方式带来的问题是合闸于内部故障时保护动作很慢。间断角原理的优点是能够快速切除合闸于内部故障。其缺点是电流互感器(TA)饱和时间间断角消失, 要采取某些措施恢复间断角, 从而增加了保护硬件的复杂性。同时由于 TA 饱和的非线性特点, 要精确地恢复间断角确实存在困难。有的间断角差动保护还采用波宽鉴别的辅助判据, 但是在带长线的变压器内部故障时, 丰富的谐波分量会延长保护的动作时间。近年来, 国内外学者提出了很多鉴别励磁涌流的新原理和新算法, 如磁通特性鉴别法、等值电路参数鉴别法等。这些原理需要对变压器的某些参数进行某些人为的假设, 其应用前景取决于理论上的进一步突破^[1~4]。

基于以上认识, 本文在对变压器励磁涌流和内部故障差流综合分析的基础上, 提出了一种利用数字信号处理中相关函数的基本原理, 对采样数据进行综合分析, 计算采样数据的自相关系数, 以此来区分变压器励磁涌流和内部故障的新算法。理论分析和 EMTP 仿真均表明: 该算法具有原理清晰、特征明显、识别正确, 且不受 TA 饱和的影响等优点。

1 相关函数及相关系数在励磁涌流和故障电流分析中的理论基础

在数字信号处理中, 经常要研究两个信号的相似性, 或一个信号经过一段延时后自身的相似性, 以实现信号的检测、识别与提取等。相关函数及相关系数是研究这一类问题的有力工具。

信号 $x(n)$ 和 $y(n)$ 的互相关函数定义为:

$$r_{xy}(m) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(n)y(n+m) \quad (1)$$

式(1)表示 $r_{xy}(m)$ 在 m 时刻的值, 相当于将 $x(n)$ 保持不动而 $y(n)$ 左移 m 个采样点后两个序列对应相乘再相加的结果。如果 $x(n)=y(n)$, 则式(1)定义的互相关函数就变成自相关函数, 可以写为:

$$r_{xx}(m) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} x(n)x(n+m) \quad (2)$$

自相关函数 $r_{xx}(m)$ 反映了信号 $x(n)$ 和其自身经一段延迟之后的信号 $x(n+m)$ 之间的相似程度。由数字信号处理的有关知识可知, 周期信号的自相关函数也是周期的, 且和原信号同周期。在实际工程中, 常常采用相关系数或自相关系数代替相关函数或自相关函数来分析两信号或同一信号不同时间段的相似程度。

设 $x(n), y(n)$ 是两个能量有限的确定性信号, 并假设它们是因果的, 定义 r_{xy} 为 $x(n)$ 和 $y(n)$ 的相关系数:

$$r_{xy} = \sum_{n=0}^{\infty} x(n)y(n) \quad (3)$$

由于 $x(n), y(n)$ 是两个能量有限的确定性信号, 它们各自能量乘积的平方, 即 $(E_x E_y)^{1/2}$, 是一常数, 式(3)除以 $x(n), y(n)$ 各自能量乘积的平方, 进

行归一化处理后可得:

$$\rho_{xy} = \frac{\sum_{n=0}^{\infty} x(n)y(n)}{\left[\sum_{n=0}^{\infty} x^2(n) \sum_{n=0}^{\infty} y^2(n) \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (4)$$

ρ_{xy} 称为 $x(n)$ 和 $y(n)$ 的归一化相关系数。由许瓦兹(Schwartz)不等式,有

$$|\rho_{xy}| \leq 1 \quad (5)$$

分析式(5)可知,当 $x(n)=y(n)$ 时, $\rho_{xy}=1$,两个信号完全相关(相同),这时 r_{xy} 取得最大值;当 $x(n)$ 和 $y(n)$ 完全不相关时, $\rho_{xy}=0, r_{xy}=0$;当 $x(n)$ 和 $y(n)$ 有某种程度的相似时, $r_{xy} \neq 0, \rho_{xy}$ 在 0 和 1 之间取值。因此 r_{xy} 和 ρ_{xy} 可用来描述 $x(n)$ 和 $y(n)$ 之间的相似程度。在式(4)中,用信号 $x(n)$ 滞后一段时间后的 $x(n+m)$ 来代替 $y(n)$,即可得到 $x(n)$ 的归一化自相关系数,可以用来分析信号 $x(n)$ 的自相似性^[5]。

大量仿真和实验表明:变压器励磁涌流的波形畸变严重,含有大量的二次谐波和高次谐波分量,在波形上以间断角和波形不对称的形式出现,即:在一个周期内的前半周期数据和后半周期数据在波形上表现出完全的不相似性,而在变压器发生内部故障时,差流波形具有类似于标准正弦波的波形,含有较少的二次谐波和高次谐波分量,此时前半周期数据和后半周期数据在波形上表现出明显的相似性。图 1 是典型的变压器非对称性励磁涌流和带长线 B 相短路故障时差流波形(每周期 32 点采样)。

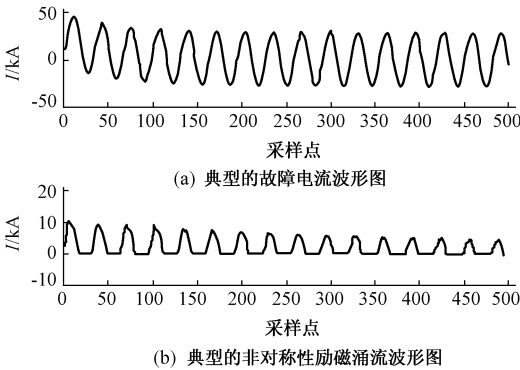


图 1 变压器非对称性励磁涌流和故障电流波形图
Fig. 1 Waveform of asymmetry inrush current and fault current

由图 1 可以看出,在不考虑直流分量影响的情况下,故障电流前半周期的波形与后半周期的波形几乎完全相同,而非对称性励磁涌流在某一时间段上与标准正弦波类似,在另一时间段(间断角部分)上与标准正弦波差别很大,通俗地讲,非对称性励磁涌流在一周期内总是某一时间段上的波形与另一时

间段上的波形不相似,存在很大的不相关性。因此我们可以利用随机信号的自相关系数的概念,来分析和计算同一采样序列在前半周期和后半周期的自相关系数的不同来区分变压器内部故障和励磁涌流。

2 实现算法及仿真结果

图 2~图 6 是利用 EMTF 仿真得到的变压器内部故障电流、对称性励磁涌流、非对称性励磁涌流、带故障空载合闸时的电流波形以及 TA 饱和后非对称性励磁涌流波形图(每周期 32 点采样)。

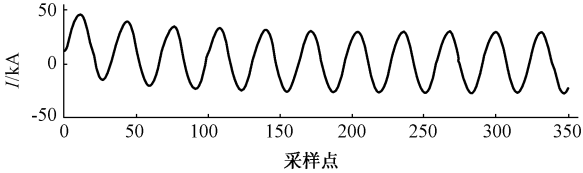


图 2 故障电流波形图
Fig. 2 Fault current

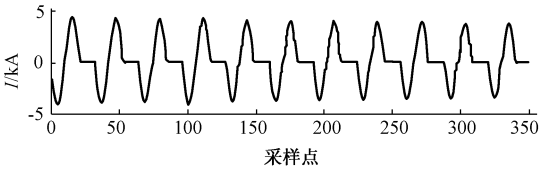


图 3 对称性励磁涌流波形图
Fig. 3 Symmetry inrush current

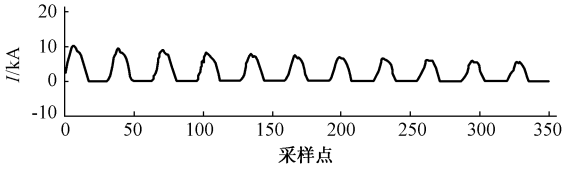


图 4 非对称性励磁涌流波形图
Fig. 4 Asymmetry inrush current

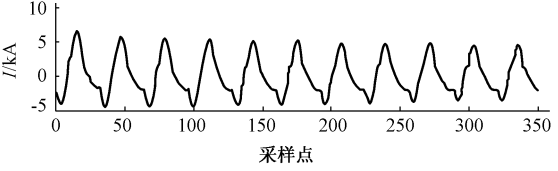


图 5 带故障空载合闸时的电流波形图
Fig. 5 Transformer fault current when close the switch without load

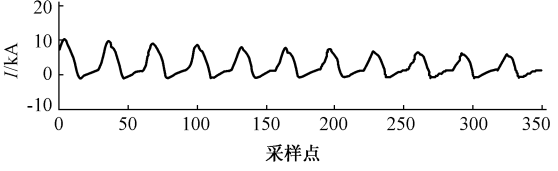


图 6 饱和时非对称性励磁涌流波形图
Fig. 6 Asymmetry inrush current when TA saturated

本文所采用的具体方法为:取故障发生(或空载合闸)后,采集到的 3/4 周期采样数据作为信号 $x(n)$,取差分后得到的采样序列定义为 $x(n+m)$ 。由于信号的归一化自相关系数是反映同一信号不同时段内的相似程度,它不仅与信号的幅值有关,而且也与信号的相位有关,也就是说,两个形状完全相同的信号,只要它们的相位不同,它们的相关系数就不为 1,例如,正、余弦信号是正交的,它们的相关系数为 0,但实际上这两个信号属于同一信号,将其中一个移动 $\pi/2$,其相关系数便可等于 1。基于上述认识,逐次取原始采样信号 $x(n)$ 后移 1/4 周期后的半个周期数据,再与差分后所得的 $x(n+m)$ 信号的半周期数据,来计算其自相关系数,计算数据窗为半个周期,可以逐次移动多个周期,计算故障发生(或空载合闸)后,多个周期内它们的归一化自相关系数。为了保证保护快速出口,本文只以数据窗平移半个周期来计算归一化自相关系数,以后的仿真结果也证明了采用半个周期的数据,移动半个周期,所得的仿真结果完全能够满足要求。具体表达式可用式(6)来表示:

$$\rho_{xx} = \frac{\sum_{n=1}^{16} |x'(n)| |x(n+8)|}{\left[\sum_{n=1}^{16} x'^2(n) \sum_{n=1}^{16} x^2(n+8) \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (6)$$

其中 $x(n)$ 表示差流采样数据,每周期 32 点采样。

本文采用式(6)来计算归一化自相关系数,分析差流采样数据的前半周期与差分后的后半周期波形的相似程度,以此来作为区分变压器励磁涌流和内部故障的基础。表 1 是针对图 2 所示的各种情况,利用式(6)计算出的采样数据在半个周期内的归一化自相关系数。

表 1 计算出的采样数据在半个周期内的归一化自相关系数
Table 1 The numerical value of auto correlation coefficients in half a sampling cycle

序 号	内部故障电 流(B相短路)	对称性励 磁涌流	非对称性 励磁涌流	带故障空载合 闸(B相短路)	饱和时非对称 性励磁涌流
1	0.806 8	0.715 3	0.624 6	0.790 6	0.392 6
2	0.854 7	0.529 3	0.488 4	0.673 9	0.472 7
3	0.799 1	0.530 6	0.443 7	0.704 2	0.399 4
4	0.819 1	0.573 6	0.578 7	0.710 8	0.441 8
5	0.841 8	0.545 5	0.354 9	0.722 9	0.383 1
6	0.858 2	0.528 6	0.501 2	0.686 6	0.486 7
7	0.872 6	0.533 4	0.547 6	0.732 4	0.294 7
8	0.880 9	0.470 2	0.577 0	0.875 1	0.573 5
9	0.901 0	0.478 4	0.547 9	0.721 2	0.318 1
10	0.911 1	0.518 3	0.452 7	0.721 4	0.462 5
11	0.926 1	0.344 5	0.733 0	0.627 7	0.408 0
12	0.926 8	0.575 9	0.608 1	0.739 5	0.353 1
13	0.930 9	0.517 0	0.477 5	0.678 2	0.389 8
14	0.937 1	0.516 4	0.478 8	0.710 0	0.355 2
15	0.940 7	0.414 0	0.292 1	0.643 4	0.392 3
16	0.960 0	0.551 5	0.554 0	0.940 9	0.524 5

对表 1 进行统计处理,可以得到在半周期内满足归一化自相关系数小于 K 的采样点个数,为了分析问题的方便,可用表 2 来表示。

表 2 满足归一化自相关系数小于 K 的半周期采样点数
Table 2 The numerical value in half a sampling cycle with auto correlation coefficients less than K

K	内部故障电 流(B相短路)		对称性励 磁涌流		非对称性 励磁涌流		带故障空载合 闸(B相短路)		饱和时非对称 性励磁涌流	
	个数	比率	个数	比率	个数	比率	个数	比率	个数	比率
0.8	15	0.937 5	0	0	0	0	1	0.062 5	0	0
0.7	16	1	1	0.062 5	1	0.062 5	11	0.687 5	0	0
0.6	16	1	1	0.062 5	3	0.187 5	16	1	0	0
0.5	16	1	12	0.75	9	0.562 5	16	1	2	0.125

由表 2 可以看出:在励磁涌流和内部故障情况下,利用该算法计算出的归一化自相关系数具有明显的差别,在内部故障电流(B相短路)情况下,计算的半周期(16 点)所得的归一化自相关系数,有 15 个点都在 0.8 以上;在图 2 所示由 EMTP 仿真所得的对称性励磁涌流、非对称性励磁涌流以及饱和时非对称性励磁涌流等励磁涌流情况下,半周期绝大多数点计算所得的归一化自相关系数都在 0.6 以下;图 2 所示的带故障空载合闸(B相短路)的情况下,计算出的归一化自相关系数有 11 个点超过 0.7,所有的点计算出的归一化自相关系数都超过 0.6。为了更好地表明上述规律,我们采用数理统计中的数学期望的概念对表 2 所示的数据进行处理。

随机变量的数学期望的定义为^[6]:设离散随机变量 X 的分布率为 $P\{X=x_k\}=P_k, k=1,2,\dots$,若级数 $\sum_{k=1}^{\infty} x_k P_k$ 绝对收敛,则称上述级数的和为随机变量 X 的数学期望,记为:

$$E(X) = \sum_{k=1}^{\infty} x_k P_k \quad (7)$$

可以求出上述 5 种情况下的数学期望 $E(X)$ 分别为 2.55, 0.456 25, 0.437 5, 1.631 25 和 0.062 5。可以看出:励磁涌流和故障电流具有明显的区别,由此可以整定为:采样数据在半周期内计算所得的数学期望值大于 1,判为内部故障,否则判为励磁涌流。

由以上仿真结果可以看出:二次谐波原理、间断角原理、波形对称原理以及本文所提出的波形相关性分析原理的变压器差动保护,在本质上都是利用差流波形来区分励磁涌流和短路故障,但前 3 种方法都是利用涌流的单一方面的特性来区分,只不过所选特征不同,实现手段不同,继电器动作行为也有差别。本文所提出的波形相关性分析,不是单纯利用

涌流和故障电流的单一方面的特征,而是对波形进行有机、综合分析,波形相似度的定义不仅包含幅值大小、形状的信息,而且还包含相位信息,同时,具有较强的抗干扰能力。因此,该算法在理论上具有严密的数字信号处理的理论基础,在实际工程中不受非周期分量和直流分量的影响,能够有效区分变压器励磁涌流和内部故障,特征明显,识别迅速,并且不受 TA 饱和的影响。

3 结论

本文在对变压器励磁涌流和内部故障的波形进行深入研究的基础上,提出了一种利用数字信号处理中的归一化自相关系数的有关理论,计算采样数据的前半周期与差分后的后半周期的波形相似度,来识别变压器励磁涌流和内部故障电流的新算法。在理论上,该算法并不是单纯利用涌流和故障电流的单一方面的特征,来区分励磁涌流和故障电流,而是利用数字信号处理中的自相关函数的理论进行综合分析,具有严密的数字信号处理的理论基础,抗干扰能力强。仿真结果表明:该算法具有特征明显,识别迅速,且不受非周期分量、二次谐波含量以及 TA 饱和的影响等优点。

参考文献

- 1 王维俭(Wang Weijian). 电气主设备继电保护原理与运行(Principle and Application of Electric Power Equipment Protection). 北京:中国电力出版社(Beijing: China Electric Power Press),1996

- 2 唐跃中,徐进亮,郭勇,等(Tang Yuezhong, Xu Jinliang, Guo Yong, et al). 变压器保护中的几种励磁涌流判别方法的分析和评价(Analysis and Evaluation of Several Inrush Current Differentiation in Transformer Protection). 电力自动化设备(Electric Power Automation Equipment),1995,14(1)
- 3 孙志杰,陈云仑(Sun Zhijie, Chen Yunlun). 波形对称原理的变压器差动保护(Differential Protection of Power Transformer Based on Waveform Symmetry Principle). 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems),1996,20(4)
- 4 Liu Pei, Malik O P, Chen Deshu. Improved Operation of Differential Protection of Power Transformers of Internal Fault. IEEE Trans on Power Delivery, 1992, 7(4)
- 5 胡广书(Hu Guangshu). 数字信号处理——理论、算法与实现(Digital Signal Process——Theory, Algorithm and Implement). 北京:清华大学出版社(Beijing: Tsinghua University Press),1997
- 6 盛骤,谢式千,潘承毅(Sheng Zhou, Xie Shiqian, Pan Chengyi). 概率论与数理统计(Statistical Theory and Methodology in Science and Engineering). 北京:高等教育出版社(Beijing: High Education Press),1993

李贵存,男,博士研究生,IEEE 会员,主要研究方向为变压器微机保护与仿真、小波理论在电力系统中的应用等。

刘万顺,男,教授,博士生导师,研究方向为电力系统数字仿真、电力系统微机保护等。

滕林,男,博士研究生,主要研究方向为电力系统微机保护、电力系统稳定分析等。

A NEW ALGORITHM OF DISCRIMINATION BETWEEN INRUSH CURRENT AND FAULT CURRENT OF TRANSFORMER BASED ON SELF-CORRELATION ANALYSIS

Li Guicun, Liu Wanshun, Teng Lin, Zheng Tao

(North China Electric Power University, Beijing 100085, China)

Abstract: A new algorithm of discrimination between inrush current and fault current of transformer is brought forward based on self-correlation analysis, which is to calculate self-correlation coefficients of variant periods after analyzing the sampling data and then discriminate between inrush current and fault current by using the magnitudes of the calculated coefficients. Due to the self-correlation of differential current comprises not only the information of the magnitude value, waveform, but the phase information, all those information can be used to analyze organically and synthetically. Simulation studies with respect to different faults and inrush conditions are conducted, and the results prove that the proposed technique is able to offer fast responses on protection and accurately discriminate between inrush magnetizing current and internal faults.

Keywords: transformer protection; self-correlation coefficient; inrush current