

# 一种基于波形相关分析识别变压器励磁涌流的方法

安源, 刘家军

(西安理工大学水电学院, 陕西 西安 710048)

**摘要:** 提出了一种基于波形相关分析识别变压器励磁涌流的方法。该方法首先用线性插值法找出保护启动后最近的差流过零点, 然后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分析, 计算过零点后一周波中前后半波的自相关系数, 根据自相关系数的大小构成区分励磁涌流和故障电流的主判据。动模试验结果表明该方法算法简单, 原理清楚, 识别正确, 具有较高的可靠性和灵敏性。

**关键词:** 变压器; 过零点; 相关系数; 励磁涌流

## A measure to identify the inrush current of transformer based on wave correlation analysis

AN Yuan, LIU Jia-jun

(The Faculty of Water Resources and Hydraulic Power, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** A new scheme based on wave correlation analysis to distinguish the inrush and internal fault occurred in the transformer is proposed. Firstly, it is to find out the zero-crossing of the differential current using the linear interpolation method after the protection has enabled. Then it is to calculate self-correlation coefficients of the former semiwave and the backward semiwave after analyzing the sampling data. According to the magnitudes of the calculated coefficients, inrush current and fault current of transformer can be distinguished. The results of dynamic simulation verify the feasibility of the proposed method. Meanwhile, dynamic model test indicates that this algorithm has a simple calculation and its principle is clear.

**Key words:** transformer; zero-crossing; correlation coefficient; inrush current

中图分类号: TM77

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897(2007)18-0001-05

## 0 引言

变压器是电力系统中最重要设备之一, 在系统安全运行中起着非常重要的作用。现场运行的变压器大都采用纵联差动保护作为主保护, 该保护的主要问题就是如何正确识别励磁涌流和内部故障时的短路电流。传统方案中主要用二次谐波制动原理和间断角原理来识别励磁涌流, 其中二次谐波制动应用最为广泛<sup>[1]</sup>。但是, 随着电网电压等级的提高和规模的扩大以及变压器单机容量的增大, 大型变压器内部严重故障时, 由于谐振使短路电流中的二次谐波含量明显增加, 有可能引起二次谐波制动的差动保护延时动作。特别是对变压器端部接长线的情况更是如此<sup>[2]</sup>。而且, 随着变压器铁心材料的改进, 导致其磁饱和点降低, 当剩磁较大且合闸角满足一定条件时, 三相励磁涌流中二次谐波含量可能均小于15%, 其中最小一相可能在7%以下, 其对应的间断角将小于30°<sup>[3]</sup>。此时无论是采用二次谐波制动还是采用按相制动的间断角原理, 变压器纵差保护均无法避免误动作。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<sup>[4]</sup>、等值电路参数鉴别法<sup>[5]</sup>等。这些原理需对变压器的某些参数进行人为的假设, 其应用前景取决于理论上的进一步突破。

基于以上认识, 文献[6]在综合分析变压器励磁涌流和内部故障差流的基础上, 提出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, 根据自相关系数的大小来区分变压器励磁涌流和内部故障。该方法不像二次谐波制动原理只是单纯利用励磁涌流和故障电流某一方面的特征差异, 而是充分利用了包括幅值、形状、相位等信息, 并且有严密的理论基础。但笔者对其分析发现, 当变压器带轻微匝间故障合闸, 或者空投故障时, 该方法可能使纵差保护经较长延时, 待涌流衰减后才能动作。因此, 本文在文献[6]的基础上, 增加了波形比较起点的确定方法, 优化了具体的判据表达式, 提出了改进后的波形相关分析法, 为提高判据的可靠性并尽量减小变压器空投匝间故障时保护动作的延时, 引入一个辅助判据, 使整个判据具有更高的可靠性和灵敏性。动模实验表明该方法能够正确区分励磁涌流和故障电流。当变压器空载合闸时能够可靠闭锁保护; 在

各种匝间故障(包括 2.27% 的轻微匝间故障)下,能够可靠开放保护;当变压器空投匝间故障时,能够有效减小保护动作的延时。

## 1 基本理论

### 1.1 相关函数及相关系数分析随机信号的理论基础

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,等于将  $x(n)$  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,可写成:

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

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:

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

$\rho_{xy}$  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  $r_{xy}$  取最大值;当  $x(n)$  和  $y(n)$  有某种程度相似时,  $r_{xy} \neq 0$ ,  $\rho_{xy}$  在 0 和 1 之间取值。因此  $r_{xy}$  和  $\rho_{xy}$  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<sup>[7]</sup>。

### 1.2 励磁涌流与故障电流的波形比较

以单相变压器为例来说明。当变压器发生短路故障时,其稳态故障电流与正弦波十分相似,在暂态过程中,若去掉直流衰减分量,故障电流也与正弦波相似,也就是说,变压器内部故障短路电流的前半周波与后半周波几乎完全相同(如图 1(a)所示,每周波采样 200 点),而当变压器空载合闸时,将产生励磁涌流,由于涌流具有间断性和偏向时间轴一侧的特点,因此在某一时间段上涌流与正弦波相似,但在另一时间段(间断角部分)上与正弦波差别很大(如图 1(b)所示),通俗地讲,涌流在一周波内,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 鉴别励磁涌流的方法

1) 一般的文献中,大都采用故障发生后的半周波数据作为研究的数据窗,计算该数据窗在时间轴上的投影面积,取其中最大面积对应的起点

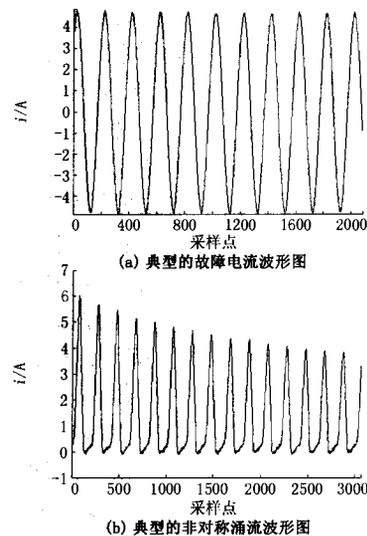


图 1 变压器故障电流和励磁涌流波形图  
Fig.1 Waveform of fault current and inrush

作为保护启动点<sup>[9]</sup>。本文将变压器副边电流幅值和相位归算到原边, 并对各相原、副边电流分别做差流, 采用差流突变量启动的方法, 记录差流发生突变的点  $j$ , 然后采用线性插值法确定距突变点  $j$  最近的差流过零点(根据动模试验表明, 只需确定近似过零点即可, 不会对保护判据构成影响), 将此过零点作为本文所研究数据窗的起点。动模试验表明采用此过零点作为保护的启动点, 能明显提高保护动作的可靠性, 并且不会带来较大延时。

2) 本文将过零点后的前半波数据作为信号  $x_1(n)$ ,  $x_1(n+m)$  则表示  $x_1(n)$  向后移动  $m$  点后的采样值(文中  $m$  取为采样周期的一半, 为 100 点), 即比较前后半波的相似性, 计算出归一化自相关系数, 具体表达式可以采用式(6)来表示:

$$\rho_{x_1 x_1} = \frac{\sum_{n=1}^{100} |x_1(n)| |x_1(n+100)|}{\left[ \sum_{n=1}^{100} x_1^2(n) \sum_{n=1}^{100} x_1^2(n+100) \right]^{1/2}} \quad (6)$$

根据变压器处于各种运行状况下的计算结果, 确定保护的整定值  $J_{zd}$ , 经过动模试验确定, 该值可取为 0.75。具体判据为: 分别计算三相差电流的自相关系数  $J$ , 然后与整定值  $J_{zd}$  比较:

$$J \geq J_{zd} \quad (7)$$

$$J < J_{zd} \quad (8)$$

如果有两相同时满足式(7), 则判断为内部故障; 如果有两相同时满足式(8), 则判断为励磁涌流。将此作为区分励磁涌流和故障电流的判据。

由于把过零点作为研究数据窗的起点, 在变压器发生匝间短路时, 前后半波几乎完全相似, 能较大地提高自相关系数; 而当变压器空载合闸产生涌流时, 由于间断角以及涌流的前后半波的差异, 又能相应减小自相关系数, 使得定值选取范围更宽, 保护更容易判断, 因此能够在更大程度上区分励磁涌流和故障电流, 并且动模试验表明不会带来较大延时。

3) 为提高判据的可靠性并减小变压器空投匝间故障时保护动作的延时, 若计算出有两相及以上的自相关系数  $\rho_{x_1 x_1}$  在模糊带(本文将模糊带取为区间(0.6, 0.85))内, 或者有一相的结果在模糊区内, 另两相中的一相小于 0.6, 另一相大于 0.85, 都将延时一个周波再进行判断。

### 3 动模实验及结果

为验证以上鉴别方法的正确性和可靠性, 用动模试验数据对本文提出的保护判据进行了测试。其中, 试验变压器为三单相变压器组, 联结方式为 Y/ $\Delta$  接法。单相变压器参数为: 额定容量 5 kVA, 原副边额定电压比:  $U_1/U_2 = 220V/220V$ , 每周波采样 200 个点。

表 1 经过判据计算后求得的自相关系数 ( $J_{zd} = 0.75$ )

Tab.1 The value of auto correlation coefficients after mainly criterion's numeration ( $J_{zd} = 0.75$ )

编号	试验项目	A 相( $J$ )	B 相( $J$ )	C 相( $J$ )	判断结果
1	星侧匝间短路(2.27%)	0.999 98	0.999 73	0.999 88	内部故障
2	星侧匝间短路(4.54%)	0.998 28	0.998 14	0.996 83	内部故障
3	星侧匝间短路(13.64%)	0.999 05	0.999 48	0.999 87	内部故障
4	角侧匝间短路(4.54%)	0.993 67	0.991 01	0.998 81	内部故障
5	角侧匝间短路(9.09%)	0.997 75	0.998 63	0.998 15	内部故障
6	角侧匝间短路(13.64%)	0.999 47	0.999 17	0.997 76	内部故障
7	空载合闸	0.147 2	0.064 85	0.418 42	励磁涌流
8	空载合闸	0.292 41	0.289 39	0.378 1	励磁涌流
9	空载合闸	0.316 75	0.175 81	0.271 33	励磁涌流
10	空载合闸	0.720 8	0.086 82	0.342 45	励磁涌流
11*	星侧空投匝间短路(2.27%)	0.731 54	0.653 97	0.564 67	延时一周波
		0.897 09	0.658 03	0.884 88	内部故障
12	星侧空投匝间短路(4.54%)	0.962 97	0.774 75	0.938 37	内部故障
13	星侧空投匝间短路(4.54%)	0.933 45	0.520 43	0.968 28	内部故障
14*	角侧空投匝间短路(2.27%)	0.801 29	0.598 98	0.922 27	延时一周波
		0.968 92	0.660 49	0.922 27	内部故障
15	角侧空投匝间短路(9.09%)	0.993 6	0.983 39	0.996 04	内部故障

注: “\*” 表示经过判据计算后结果在模糊带内, 需延长一周波才能满足动作要求, 下一行为延时一周波后的判别情况。

本次试验, 共进行 3 大类, 即: 变压器运行中发生匝间短路, 空载合闸以及带匝间故障空投

合闸。其中匝间短路(包括: 星侧发生 2.27% 轻微匝间短路, 4.54% 匝间短路, 角侧发生 4.54% 匝间

短路)和所有空载合闸产生励磁涌流均能在一个周波内满足判据的动作条件,其中:发生匝间短路时,计算的自相关系数全都超过 0.97,甚至很大一部分能达到 0.99;空载合闸时,计算结果中绝大部分的自相关系数都小于 0.6,可能有某一相的自相关系数大于 0.75(如:表 1 中编号 16 的 A 相),但其它两相的自相关系数均小于 0.6,故也能满足判据要求;此外,带匝间故障空投合闸试验中,一般情况下判据均能满足要求,仅当空投于轻微匝间故障,需要一个周波的延时才能满足动作要求。因此,动模试验结果表明:在各种情况下,该方法均能正确识别故障电流和励磁涌流,在变压器空载合闸时能够可靠闭锁保护;在各种匝间故障(包括 2.27%的轻微匝间故障)下,能够可靠开放保护;在空投匝间故障时,能够有效减小保护动作的延时。

表 2 变压器 c 相匝间故障空载合闸时的计算结果

Tab.2 The numeration results for switching on a transformer without load and turn-to-turn fault in phase C

试验编号	相关系数		
	A 相	B 相	C 相
1	0.924 5	0.516 2	0.978 2
2	0.985 5	0.832 1	0.965 6
3	0.951 0	0.735 2	0.735 2
4	0.895 6	0.885 2	0.855 3
5	0.996 3	0.992 5	0.996 5
6	0.997 8	0.976 2	0.926 5
7	0.812 2	0.889 2	0.982 6
8	0.995 6	0.983 1	0.992 8
9	0.337 5	0.735 2	0.875 2
10	0.645 4	0.095	0.650 1
11	0.307 5	0.658 0	0.640 2
12	0.740 3	0.658 2	0.586 0
13	0.760 2	0.647 2	0.586 3
14	0.510 4	0.900 2	0.996 3
15	0.809 6	0.600 2	0.912 3

表 3 变压器空载合闸时的计算结果

Tab.3 The numeration results for switching on a transformer without load

试验编号	相关系数		
	A 相	B 相	C 相
1	0.572 3	0.100 2	0.262 5
2	0.062 8	0.065 2	0.082 3
3	0.290 1	0.105 2	0.213 1
4	0.268 9	0.308 2	0.269 1
5	0.172 5	0.375 2	0.557 3
6	0.122 0	0.375 1	0.219 8
7	0.063 5	0.089 3	0.315 2
8	0.296 5	0.301 5	0.378 6
9	0.001 2	0.212 2	0.056 2
10	0.049 8	0.146 3	0.300 7
11	0.136 2	0.322 5	0.385 4
12	0.136 8	0.586 3	0.726 5
13	0.131 0	0.045 63	0.175 3
14	0.399 6	0.138 9	0.379 3
15	0.364 3	0.260 1	0.255 3

表 4 变压器运行中发生匝间故障时的计算结果

Tab.4 The numeration results for an operating transformer occurring turn-to-turn fault

试验编号	相关系数		
	A 相	B 相	C 相
1	0.998	0.993 5	0.998 8
2	0.999 5	0.998 2	0.994 3
3	0.999 5	0.998 0	0.997 5
4	0.999 5	0.999 6	0.999 5
5	0.996 9	0.999 5	0.997 4
6	0.997 2	0.997 6	0.998 2
7	0.999 5	0.981 5	0.993 0
8	0.999 4	0.999 3	0.998 5
9	0.999 6	0.999 8	0.999 7
10	0.999 2	0.999 3	0.999 0
11	0.999 3	0.999 2	0.997 5
12	0.998 9	0.997 6	0.982 1
13	0.998 1	0.997 5	0.979 6
14	0.998 4	0.997 9	0.992 8
15	0.998 4	0.997 5	0.997 2

表 1 为笔者选取的典型试验项目经过判据计算后的结果。

表 2、表 3 和表 4 为所有试验项目中,变压器分别在带匝间故障空投、空载合闸和运行中发生匝间短路等情况下经过主判据后计算得到的自相关系数。

#### 4 与文献[6]提出的计算自相关系数的方法作比较

文献[6]采用的计算自相关系数的具体方法为:取故障发生(或者空载合闸)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  $x(n+m)$ 。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。具体表达式可用式(9)表示:

$$\rho_{xx} = \frac{\sum_{n=1}^{16} |x(n)||x(n+8)|}{\left[ \sum_{n=1}^{16} x^2(n) \sum_{n=1}^{16} x^2(n+8) \right]^{1/2}} \quad (9)$$

其中:  $x(n)$  表示差流采样数据,每周波采样 32 点。

在表 5 中列出了文献[6]和本文提出判据的比较数据,可以看出:在变压器运行中发生匝间故障时,本文计算得到的相关系数比文献[6]的一般都能高 0.3,并且本文提出的判据在 2.27%的轻微故障时仍能较好地满足判据要求;在变压器空载合闸时,本文计算得到的相关系数比文献[6]的低,最多的一相能低 0.4;当变压器空投匝间故障时,总的来说,利

用本文判据得到的相关系数更高, 并且在轻微匝间 故障时能在更短的时间内达到动作要求。

表 5 利用两个判据计算得到的几种故障相关系数比较  
Tab. 5 Comparison of correlation coefficients by two criterions

故障类型	本文判据计算得到的相关系数			利用式(9)计算得到的相关系数		
	A 相(J)	B 相(J)	C 相(J)	A 相(J)	B 相(J)	C 相(J)
星侧匝间短路(2.27%)	0.999 68	0.999 05	0.982 75	0.639 62	0.641 06	0.640 27
星侧匝间短路(4.54%)	0.999 91	0.999 75	0.993 89	0.638 58	0.636 8	0.637 82
星侧匝间短路(13.64%)	0.998 24	0.999 04	0.999 58	0.610 95	0.632 35	0.667 47
角侧匝间短路(4.54%)	0.998 78	0.993 05	0.991 86	0.634 5	0.627 85	0.635 39
角侧匝间短路(9.09%)	0.999 96	0.999 95	0.999 94	0.624 77	0.639 4	0.661 27
角侧匝间短路(13.64%)	0.997 76	0.999 47	0.999 17	0.661 04	0.630 26	0.714 76
星侧空投	0.568 65	0.101 69	0.258 08	0.573 73	0.452 67	0.731 98
星侧空投	0.059 79	0.064 22	0.089 95	0.290 67	0.462 3	0.469 8
星侧空投	0.279 44	0.104 55	0.210 55	0.095 86	0.199 6	0.247 18
星侧空投	0.265 38	0.301 76	0.266 74	0.233 84	0.277 88	0.284 6
星侧空投	0.172 59	0.378 64	0.124 41	0.252 08	0.292 14	0.177 06
星侧空投匝间短路(2.27%)	0.337 68	0.709 32	0.872 43	0.252 08	0.292 14	0.177 06
星侧空投匝间短路(4.54%)	0.933 45	0.520 43	0.968 28	0.659 39	0.774 31	0.612 45
星侧空投匝间短路(9.09%)	0.997 63	0.977 96	0.996 17	0.600 26	0.613 55	0.675 86
角侧空投匝间短路(2.27%)	0.801 29	0.598 98	0.922 27	0.726 99	0.907 46	0.601 5
角侧空投匝间短路(9.09%)	0.996 56	0.990 51	0.994 81	0.468 65	0.447 51	0.607 4

## 5 结论

本文利用数字信号处理中归一化自相关系数的有关理论, 通过优化保护判据的启动点, 计算采样数据前后半波的自相关系数, 来识别变压器励磁涌流和内部故障电流, 并通过辅助判据的引入使该方法具有更高的可靠性和灵敏性。动模试验结果表明该方法能够正确区分励磁涌流和故障电流, 在变压器空载合闸时能够可靠闭锁保护; 在运行中发生匝间故障时, 能够可靠开放保护; 在空投匝间故障时, 能够有效减小保护动作的延时。

## 参考文献

- [1] Sharp R L, Glassburn W E. A Transformer Differential Relay with Second Harmonic Restraint [J]. IEEE Trans on PAS, 1958, (12):913-918.
- [2] LIU Pei, Malik O P, CHEN De-shu. Improved Operation of Differential Protection of Power Transformers for Internal Fault [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1992, 7(4):1246-1251.
- [3] 王维俭. 电气主设备继电保护原理与应用(第二版)[M]. 北京:中国电力出版社,2002.
- [4] Phadke A G, Thorp J S. A New Computer-based Flux-restrained Current-differential Relay for Power Transformer Protection[J]. IEEE Trans on Power Appl Systems,1983,102(11): 3624-3629.

- [5] Keizo, Masaru H, Yoshiaki M, et al. Digital Protection Method for Power Transformers Based on an Equivalent Circuit Composed of Inverse Inductance [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1988, 3 (4): 1501-1510.
- [6] 李贵存, 刘万顺, 滕林,等. 基于波形相关性分析的变压器励磁涌流识别新算法[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(9):25-28.  
LI Gui-cun, LIU Wan-shun, TENG Li, et al. A New Algorithm of Discrimination Between Inrush Current and Fault Current of Transformer Based on Self-correlation Analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 8(17): 25-28.
- [7] 胡广书. 数字信号处理——理论、算法与实现[M]. 北京:清华大学出版社, 2003.  
HU Guang-shu. Digital Signal Process——Theory, Algorithm and Implement[M]. Beijing: Tsinghua University Press,2003.

收稿日期: 2007-04-22; 修回日期: 2007-05-22

作者简介:

安源(1968-), 男, 讲师, 长期从事电力系统继电保护、安全自动装置及其高压技术的研究; E-mail: yy19820316@163.com

刘家军(1967-), 男, 副教授, 从事电力系统自动化研究。