

变压器励磁涌流的相移比较鉴别方法

张雪松, 何奔腾

(浙江大学电气工程学院, 浙江省 杭州市 310027)

A NEW METHOD TO IDENTIFY INRUSH CURRENT BY PHASOR COMPARISON

ZHANG Xue-song, HE Ben-teng

(Zhejiang University, Hangzhou 310027, Zhejiang Province, China)

ABSTRACT: To meet the need of rapid action character in modern power transformer protection, this paper puts forward a new short window algorithm by phasor comparison. Based on the nonlinearity of transformer's core, the method can discriminate fault currents from inrush currents by comparing the two phasors. The first one is formed by shifting the fundamental phasor evaluated from the current data window. The latter is the phasor evaluated from the next data window. Detailed scheme for fault identification is also presented. The dynamic test shows that the new method with simple principle and easy implementation can rapidly and reliably cut all the inner faults in the power transformer.

KEY WORDS: Power system; Power transformer; Inrush current; Differential protection; Phasor comparison

摘要: 为了满足现代变压器保护动作快速性的要求, 针对变压器铁心饱和的过程中具有非线性特性, 提出了一种利用相移比较的短数据窗算法。该方法利用前一段波形估计出的基波相量经移相后与后一段波形估计的相量相比较来判别故障和励磁涌流, 并给出了具体的故障判别方案。动模试验表明: 该方法原理简单、易于实现, 能够迅速、可靠地切除各种情况下变压器的内部故障。

关键词: 电力系统; 变压器; 励磁涌流; 差动保护; 相移比较

1 引言

变压器是电力系统中的主要设备, 在电力系统安全运行中起着重要作用。差动保护原理简单, 动作灵敏, 几十年来一直用于变压器主保护, 而如何鉴别励磁涌流和内部故障电流是变压器差动保护的核心问题。随着电力系统日趋复杂, 对变压器保护的動作速度要求越来越高。

目前应用的变压器差动保护原理主要有二次

谐波制动法^[1]、间断角识别法^[2]、波形对称原理^[3-6]、采样值差动原理^[7]等, 它们都是直接或间接地利用励磁涌流波形具有间断角这个特征进行涌流和故障的鉴别。近年来出现的基于变压器励磁阻抗变化的识别法^[8-13]等虽在理论上有了的进展, 但它们的動作时间都在 20ms 以上, 且很难进一步提高動作速度。在对变压器涌流的生成机理进行了深入的研究后发现, 变压器铁心在饱和的过程中具有严重的非线性, 其原因一方面是由于变压器铁心材料的导磁性能随着饱和程度的增加而下降; 另一方面是矽钢片的饱和是非均匀的, 表层较里层容易饱和。本文根据这个特征, 提出了一种基于相移比较的短数据窗算法, 该方法能够迅速、可靠地切除各种情况下的短路电流, 動作时间一般为 9~13ms, 在很大程度上提高了变压器保护的動作速度。

2 励磁涌流的特点

当变压器空载合闸时, 由于其铁心饱和的非线性, 可能产生与短路电流可比拟的励磁涌流。图 1 中曲线 *OABP* 为变压器的基本励磁曲线, *S* 点由饱和磁通 f_{sat} 确定, 从 *S* 点作逼近饱和曲线的近似直线 \overline{SP} 。设合闸方电源电压为: $u=U_m \sin(\omega t+a)$, 通过变压器的近似磁化特性折线 *OSP*, 并忽略变压器漏抗, 可以得到变压器空载合闸 ($t=0$) 时励磁涌流的表达式^[14]为

$$i = \begin{cases} 0, & (f < f_{sat}) \\ \frac{U_m}{\omega L} [\cos a - \cos(\omega t + a) - \frac{f_r - f_{sat}}{f_m}], & (f > f_{sat}) \end{cases} \quad (1)$$

式中 f 为变压器铁心磁通; f_m 为稳态磁通幅值, 工况下为额定磁通幅值 f_e ; f_r 为变压器剩磁; L 为 $f > f_{sat}$ 时变压器的励磁电感, 近似看作常数。

由式(1)可知,当变压器磁化曲线采用简化的两折线模型时,励磁涌流为正弦波的一部分(不计直流)。而实际的大型变压器,从不饱和到深度饱和之间是一个非线性过程,被称之为非线性段,如图1中AB线段所示;图中OA为变压器的正常运行段,此时变压器不饱和,呈线性变化,其励磁电感非常大;BP为变压器深度饱和段,基本上也是线性的,其电感 L 可近似地看作一个常数。由涌流产生的机理^[1]可知:在磁化曲线的非线性段AB,其涌流波形是非正弦的,直到变压器进入深度饱和BP段后,涌流才呈现正弦特征。因此,实际的励磁涌流波形应是一个具有间断角的尖顶波,其非间断部分的波形与正弦波形存在着较大的差异。

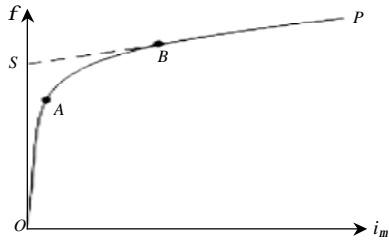


图1 变压器励磁曲线示意图

Fig. 1 Curve of magnetic flux and exciting current

图2为动模试验录波得到的励磁涌流波形,其中,图2(a)为变压器Y侧三相非对称性涌流波形,从中可清楚地看到非对称涌流的尖顶波特征。另外,由于变压器采用Y/Δ接法,因此在形成差动电流时,需要对Y侧电流进行Δ变换,此时的励磁涌流为两相磁化电流之差,如图2(b)所示,其中, i_{a-b} 、 i_{b-c} 仍为非对称性涌流,由于各相磁化电流进入深度饱和的时间不同,因此两相差流的尖顶波特征更加明显。 i_{c-a} 为对称性涌流,其间断角有所减小,但其波形与基频正弦波差异性仍很大。而对于变压器内部故障电流,其波形基本上为基频正弦波。

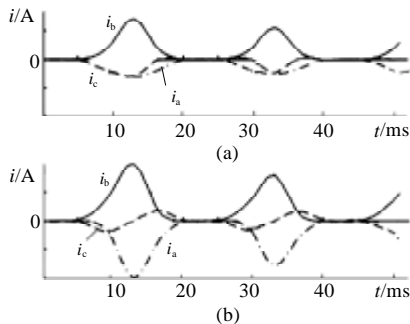


图2 变压器励磁涌流

Fig. 2 Inrush current of transformer

3 鉴别涌流的短数据算法

通过上一节的分析可知,变压器励磁涌流的尖顶波特征主要是由于励磁铁心的非线性饱和和引起的,根据这一特征本文提出了一种利用相移比较的短数据窗算法来鉴别变压器励磁涌流和内部故障,该算法首先利用前一数据窗估计出相应的基波相量 \dot{y}_1 ,利用下一个数据窗估计出相应的基波相量 \dot{y}_2 ,然后将 \dot{y}_2 移相 $q = 2\pi/N$ (N 为每周波采样点数)得到 \dot{y}_2' ,将其与 \dot{y}_1 相比较来判别是否为励磁涌流:如果 \dot{y}_1 与 \dot{y}_2' 相同,则此时为变压器故障电流;如果两者不同,则此时为励磁涌流。

由于该算法主要基于涌流的尖顶波特征,因此数据窗可以取得比较短,但如果数据窗太短,则会影响到向量估计的精度,综合考虑2个方面的因素,数据窗取为5ms。由于该算法并没有直接利用涌流具有的间断角特性,因此其具有快速性,且仿真实验证明间断角的存在对本算法是有利的。

为了减小非周期分量的影响,文中采用预估时间常数的三参数最小二乘法来估计相应的基波相量 \dot{y} 和 \dot{y}_1 。从高压线路、系统阻抗和滤波效果^[15]总体上考虑,预估时间常数 t 取40ms。

设采样周期为 T_s ,数据窗长度为 N ,令

$$\begin{cases} \mathbf{X} = [i_0, i_1, \dots, i_{N-1}]^T \\ \mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & e^{-T_s/t} & \dots & e^{-(N-1)T_s/t} \\ 0 & \sin(\omega_0 T_s) & \dots & \sin[(N-1)\omega_0 T_s] \\ 1 & \cos(\omega_0 T_s) & \dots & \cos[(N-1)\omega_0 T_s] \end{bmatrix} \\ \mathbf{Y} = [y_a, y_c, y_s]^T \end{cases} \quad (2)$$

式中 \mathbf{X} 为由输入量 i_k 构成的数组; \mathbf{A} 为系数矩阵; ω_0 为基波角频率; \mathbf{Y} 为估计值。其最小二乘算法为

$$\mathbf{Y} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{X} \quad (3)$$

估计得到的相量为

$$\dot{y} = y_c + jy_s \quad (4)$$

则相移比较公式为

$$\Delta Y = \frac{|\dot{y}_1 - \dot{y}_2|}{\min(|\dot{y}_1|, |\dot{y}_2|)} = \frac{|\dot{y}_1 - \dot{y}_2 e^{jq}|}{\min(|\dot{y}_1|, |\dot{y}_2|)}, (\dot{y}_2 = \dot{y}_2 e^{jq}) \quad (5)$$

式中 $\min(|\dot{y}_1|, |\dot{y}_2|)$ 是在2个相量绝对值中较小的一个。

式(5)中的 ΔY 表征了2个估计相量的相似程度,很显然,当2个相量相等时, ΔY 为零。2个相量差异越大, ΔY 的值越大。故可得相应的故障判据为

$$\Delta Y < \Delta Y_{dc} \quad (6)$$

当 ΔY 小于整定值时, 判断为故障, 反之判断为涌流。由于矩阵 $(A^T A) A^T$ 的值可预先得到, 所以该算法运算量小、实现简单。

由涌流波形特征分析可知, 当变压器深度饱和时, 变压器工作在图 1 所示的 *BP* 段, 此时励磁电流的波形为正弦波, 虽然保护用差动电流为两相励磁电流之差, 且各相励磁电流进入深度饱和的时间不同使得涌流中线性段显著减小, 但涌流波形中仍有可能含有正弦波段, 判据式(6)有可能得到满足, 而且在一定条件下, 在 1 个周期内变压器处于深度饱和的时间较长, 有可能出现连续多点满足故障判据的情况, 如果保护采用按相闭锁的方案, 则会造成保护误动。考虑到各相涌流进入深度饱和区的时间不同, 本文采用三相中最大的两相进行判别, 当故障判据同时满足时保护才开放, 同时将另一相的差动继电器闭锁, 这样可使两相同时满足判据的点很少。为保证保护不误动, 特设定了一计数器, 计数采用累加的形式, 即判据满足时加 1, 否则减 1, 减到 0 时不再减。当计数达到预设的整定值 k_{dc} 时, 保护出口, 动作于跳闸。

空投变压器时, 初始合闸角造成的非周期暂态磁通与剩磁方向相反, 可能会出现只有一相发生饱和的情况, 且 2 个最大相涌流达到深度饱和的时间相同, 但此时涌流并不严重, 变压器进入深度饱和的时间也比较短, 相移不变的点也较少, 可以通过计数器环节躲过。

当变压器合闸于匝间故障时, 由于短路电流的去磁作用, 使涌流相幅值显著减小, 算法将选取幅值较大的两故障相进行判别, 因此保护仍能快速动作。

4 间断角部分的处理

间断角是励磁涌流的一个典型特征, 在此期间, 变压器的磁化曲线是线性的, 差动电流很小, 几乎为零。但如果间断角比较大, 超过算法时间窗的长度 (5ms), 则在算法数据窗完全移动到此部分时, 式(5)会出现 0/0 的情况。为了避免这一问题, 并防止保护误动作, 应设置 1 个检验环节, 当时间窗内数据累加值 $\sum_{k=0}^4 |i_k|$ 很小时, 认为此时是涌流间断角期间, 不满足故障判据, 不妨令此时的 $\Delta Y=1$ 。当变压器励磁涌流较大时, 有可能引起 TA 饱和, 间断角随之消失, 此时的电流为一衰减的非周期电流, 其波形与基频正弦波差异很大, 故障判据不会

满足, 保护不会发生误动。

5 动模试验

为了验证本文提出的方法, 本文对采用 $y_0, y, d11$ 接线方式的三卷变压器组进行了动模试验。算法的采样频率为每周期 20 点, 相移比较整定值 ΔY_{dc} 取 0.25, 计数器整定值 k_{dc} 取 4 (允许 2 个最大相同时进入深度饱和区 8ms)。

图 3 (a)~(c)、(d)~(f)为不同条件下空投变压器时的三相励磁涌流及其识别曲线。其中图 3(a)、(d) 为三相励磁涌流波形, 由于变压器为 Y/ Δ 接法, 因此这里的涌流均为两相差流, 其中图 3(a)中 i_{c-a} 为对称性涌流。图 3(b)、(e)为三相电流的 ΔY 曲线, 从中可以看到, 在 1 个周期中, 每一相都存在小于 ΔY_{dc} 的点, 并且还会出现连续 2 点小于 ΔY_{dc} 的情况 (ΔY_{c-a}), 所以采用按相闭锁是不安全的, 有可能发生误动。但两相同时小于 ΔY_{dc} 的点很少, 而且不会出现连续 2 点小于 ΔY_{dc} 的情况, 如图 3(c)、(f)所示,

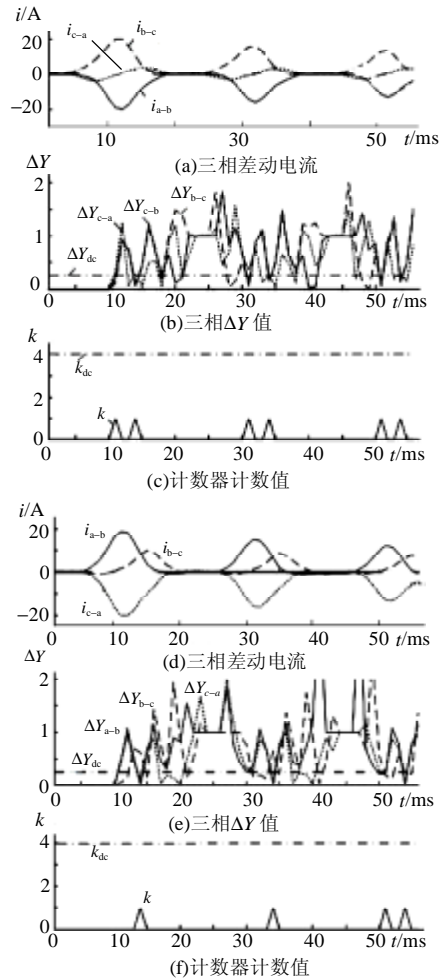


图3 变压器励磁涌流及其识别曲线
Fig. 3 Curves of $\Delta Y, k$ in energization

每个周期也只有1~2个点满足故障判据,且不连续,保护始终被闭锁。因此采用本文所提出的两最大相制动方案是可靠的。同时可知,当算法数据窗包含部分间断角时, ΔY 会出现较大值,对涌流的判别是有利的。

图4为变压器中压侧AC相短路接地故障时的情况,从图4(b)中可以看到,算法投入后,三相故障电流相应的 ΔY 始终小于 ΔY_{dz} (0.25)。因此,按照本文所提出的故障判别方案,算法计数器将不断累加,如图4(c)所示,计数值在故障后9ms达到整定值 $k_{dz}(4)$,保护快速出口。

图5为空投变压器中压侧3.56% A相匝间故障时的情况: i_{a-b} 和 i_{c-a} 主要为故障电流, i_{b-c} 为励磁涌流,受去磁作用的影响,其电流幅值较两故障相电流要小,因此算法采用 i_{a-b} 、 i_{c-a} 两相来判别故障,从图5(c)中可知,由于涌流的影响,计数器在开始

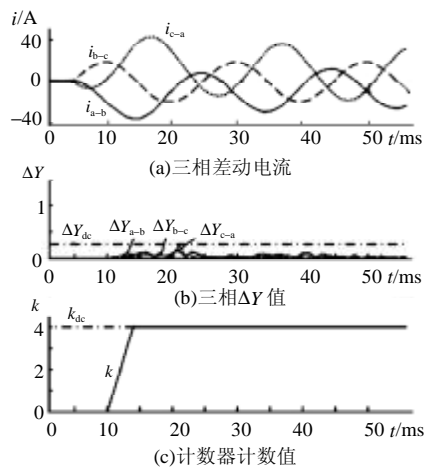


图4 中压侧AC相短路接地故障及其识别曲线
Fig. 4 Curves of ΔY , k in internal ACG fault

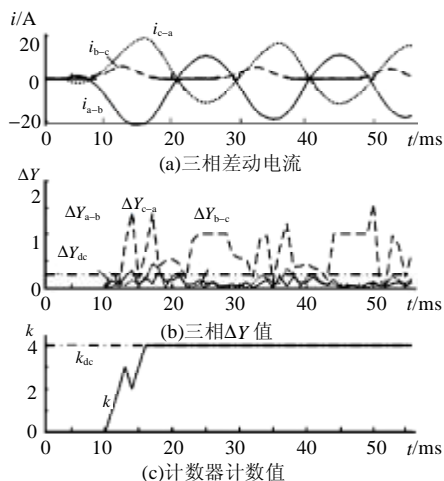


图5 空投变压器中压侧3.56%匝间故障及其识别曲线
Fig. 5 Curves of ΔY , k in energization with 3.56% turn-to-turn fault

阶段有一点跳动,从而使得保护的動作速度有所减慢,故障后11ms保护才出口动作。

动模试验项目包括高、中、低压各侧空投变压器、各侧变压器的接地和相间故障、空投于变压器匝间故障等。表1给出了部分试验结果。

表1 部分动模试验结果
Tab. 1 Result of dynamic test

试验类型	动作时间/ms
空投变压器1	不动作
空投变压器2	不动作
空投变压器3	不动作
中压侧A相接地	9
中压侧ABC相接地	9
高压侧1.7%匝间故障	11
中压侧3.56%匝间故障	9
空投于高压侧1.7%匝间故障	13
空投于中压侧3.56%匝间故障	11

动模试验结果表明:本文提出的方法能够可靠的闭锁各种条件下的励磁涌流,并且能够在变压器内部故障时迅速地开放保护;在空投变压器故障时,即使受励磁涌流的影响,保护仍能快速地动作;判据的動作门槛 ΔY_{dz} 和 k_{dz} 的取值是可行的。在实际应用时,可将 ΔY_{dz} 作为固定门槛,并根据变压器空投试验适当调整延时 k_{dz} 。

在空投变压器时,若三相断路器合闸时间相差较大,在先合相产生涌流后,后合相还未合闸时,会产生较严重的单相涌流(若按照0.7倍剩磁、1.15倍饱和磁通考虑,最大涌流持续时间达到14ms),其深度饱和时间也相应会较长。为了提高安全性,可以增加1个环节,在检测到这种情况(例如变压器某侧只有一相有电流)时,适当增加延时 k_{dz} 。

6 结论

本文通过对变压器励磁涌流及故障电流的深入分析和研究,提出了一种基于相移比较识别涌流的短数据窗算法。与其它基于波形特征识别的算法相比,该算法有以下优点:

(1) 保护动作速度快,算法的时间窗仅为5ms,保护的動作时间最快可达9ms。

(2) 算法采用两最大相同时满足故障才开放保护的方案,从而使得算法的可靠性很高,不会出现误动作的情况。

(3) 不受间断角消失的影响。

参考文献

- [1] 王维俭. 电气主设备继电保护原理与运行[M]. 北京: 中国电力出版社, 1996.
- [2] 朱亚明, 邓玉平. 间断角原理的变压器差动保护的性能特点及微机实现[J]. 电力系统及其自动化, 1996, 20(11): 36-40.
Zhu Yaming, Deng Yuping. Performance and digital realization of transformer differential relay based on dead angle philosophy [J]. Automation of Electric Power System, 1996, 20(11): 36-40.
- [3] 何奔腾, 徐习东. 波形比较法变压器差动保护原理[J]. 中国电机工程学报, 1998, 18(6): 395-398.
He Benteng, Xu Xidong. The principle transformer differential protection based on wave comparison[J]. Proceedings of the CSEE, 1998, 18(6): 395-398.
- [4] Lin Xiangning, Liu Pei, Malik O P. Studies for identification of the inrush based on improved correlation algorithm[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2002, 17(4): 901-907.
- [5] 林湘宁, 刘沛, 杨春明, 等. 利用改进型波形相关法鉴别励磁涌流的研究[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(5): 56-60.
Lin Xiangning, Liu Pei, Yang Chunming *et al.* Studies for identification of the inrush based on improved correlation algorithm [J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(5): 56-60.
- [6] 焦邵华, 刘万顺. 区分变压器励磁涌流和内部短路的积分型波形对称原理[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(8): 35-38.
Jiao Shaohua, Liu Wanshun. A novel scheme to discriminate inrush current and fault current based on integrating the waveform [J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(8): 35-38.
- [7] 胡玉峰, 陈德树. 基于采样值差动的励磁涌流鉴别方法[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(9): 55-58.
Hu Yufeng, Chen Deshu. A new method to identify inrush current based on sampled values[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(9): 55-58.
- [8] 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 Zengping, 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.
- [9] 徐岩, 王增平, 杨奇逊. 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.
Xu Yan, Wang Zengping, Yang Qixun. Study on the novel transformer protection principle based on the transformer model[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(12): 54-58.
- [10] 宗洪良, 金华锋, 朱振飞, 等. 基于励磁阻抗变化的变压器励磁涌流判别方法[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(7): 91-94.
Zong Hongliang, Jin Huafeng, Zhu Zhenfei *et al.* Transformer inrush detected by the variation of magnetizing impedance[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(7): 91-94.
- [11] 徐岩, 王增平, 杨奇逊. 基于电压电流微分波形特性的变压器保护新原理的研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(2): 61-65.
Xu Yan, Wang Zengping, Yang Qixun. Research on novel transformer protection based on the characteristics of voltage and differential current[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(2): 61-65.
- [12] 葛宝明, 苏鹏声, 王维俭, 等. 基于瞬时励磁电感频率特性判别变压器励磁涌流[J]. 电力系统及其自动化, 2002, 26(17): 35-40.
Ge Baoming, Su Pengsheng, Wang Weijian *et al.* Distinguish inrush currents for transformers using frequency characteristic of instantaneous excitation inductance [J]. Automation of Electric Power System, 2002, 26(17): 35-40.
- [13] Phadke A G, Thorp J S. A New Computer-based Flux-restrained Current-differential Relay for Power Transformer Protection[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1983, 102(11): 3624-3629
- [14] 王维俭, 侯炳蕴. 大型机组继电保护理论基础. 北京: 中国电力出版社, 1996.
- [15] 张哲, 陈德树. 递推滤波算法中的非周期分量方法的探讨[J]. 电力系统及其自动化, 1994, 18(1): 16-20.
Zhang Zhe, Chen Deshu. Rejection of D.C offset component in recursive estimator [J]. Automation of Electric Power System. 1994, 18(1): 16-20.

收稿日期: 2005-04-16。

作者简介:

张雪松(1979-), 博士研究生, 从事电力系统继电保护的研究;

何奔腾(1959-), 教授, 博士生导师, 从事电力系统继电保护的研究。