

一种基于差动电流波形特征的 励磁涌流识别新方法

韩正庆,刘淑萍

(西南交通大学 电气工程学院,四川 成都 610031)

摘要: 分析变压器励磁涌流和内部故障电流的波形特征,提出励磁涌流识别的新方法。内部故障电流的全波傅氏计算结果与半波傅氏计算结果接近,而励磁涌流的全波傅氏计算结果与半波傅氏计算结果差别较大。根据差动电流的全波傅氏算法计算结果以及全波傅氏算法计算结果与半波傅氏算法计算结果的差值,求取半个工频周期内该差值的积分与全波傅氏算法计算结果的积分的比值。若比值大于整定值判为励磁涌流,否则判为内部故障电流。理论分析和动模试验结果表明,该方法能够快速区分励磁涌流和内部故障电流,同时可以分相制动,提高了差动保护的可靠性和安全性。

关键词: 励磁涌流; 对称涌流; 故障电流; 差动保护

中图分类号: TM 772

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2007)09-0051-04

0 引言

差动保护作为变压器的主保护,其主要矛盾一直集中在如何准确识别励磁涌流和内部故障电流上。随着电力系统的发展,传统的制动原理如二次谐波原理^[1-2]和间断角原理^[1,3-4]已不能满足现代电力系统的要求。当前,工程上应用最广泛的是二次谐波原理作为制动判据,但该原理面临以下问题:制动比难以选择^[5-6];可能无法识别对称涌流^[7-8];现代变压器磁特性的变化,使得涌流时二次谐波含量降低,保护容易误动,超高压长线对地电容的增大和无功补偿设备的投入运行又延长了保护的动作时间^[5-8]。间断角原理同样面临问题:需要较高的采样率,因而对硬件要求较高^[3,6];需要采取一定的措施以测量电

流互感器(TA)饱和后的间断角^[4]。

针对传统制动原理的局限性,出现了许多新的励磁涌流识别方法^[7-16]。其中,电流波形特征识别法仅需识别励磁涌流与短路电流波形特征的不同,无需考虑电压互感器暂态和断线等情况,是当前研究的主流。笔者从差动电流的全波傅氏算法计算结果和半波傅氏算法计算结果的差异出发,根据励磁涌流的波形特征,提出了一种新的励磁涌流识别方法。理论分析和动模试验表明,所提出的方法可以快速、可靠地区分励磁涌流和内部故障电流,并较好地克服了传统制动原理的缺点。

1 理论分析

目前,工程上广泛应用全波傅氏算法计算差动电流的各次谐波分量。全波傅氏算法的数据窗为一工频周期,算法本身具有滤波作用,能抑制恒定直流和

收稿日期:2006-09-25;修回日期:2007-01-28

消除各种谐波。与之相比,半波傅氏算法的数据窗为半个工频周期,算法的响应速度更快,但半波傅氏算法受非周期分量的影响较大,一般采用差分法作为补偿算法。

在变压器空投或外部故障切除时的电压恢复过程中,励磁磁通中出现的非周期性暂态分量与铁芯剩磁可能使变压器铁芯饱和,并且交变电压将使变压器铁芯周期性地进入和退出饱和区。当铁芯进入饱和区时,励磁电流表现为瞬时值很大的尖顶波特性;当铁芯退出饱和区时,励磁电流表现为瞬时值很小的间断角特性。因而周期与交变电压一致的励磁涌流就这样产生了。

文献[11]对比分析了励磁涌流的全波傅氏算法和半波傅氏算法计算结果:由于全波傅氏算法的数据窗为一工频周期,而励磁涌流也按同一周期而变化,因此无法通过全波傅氏算法的有效值来区分励磁涌流波形。但是,半波傅氏算法仅反映半个周期内波形采样值的特征,因而半波傅氏算法计算结果与全波傅氏算法计算结果有明显的差异,能够较好地反映励磁涌流的尖顶波和间断角特征。

当变压器发生内部短路时,差动电流为正常励磁电流和内部故障电流的叠加。对于内部故障电流,可以看作是在变压器内部存在一虚拟第三绕组发生短路,因此内部故障电流为含有衰减直流分量的正弦波。由于内部故障电流较大,变压器差流接近正弦波,所以其半波傅氏算法与全周波傅氏算法的计算结果一致^[9]。

根据以上分析可以发现,半波傅氏算法与全波傅氏算法的差值可用于区分变压器励磁涌流和内部故障电流。

半波傅氏算法与全波傅氏算法差值的计算公式如式(1)所示。

$$\begin{aligned} i_{\text{dif}} &= \frac{4}{N} \sum_{k=1}^{N/2} i_k \cos \frac{2k\pi}{N} + \frac{4i}{N} \sum_{k=1}^{N/2} i_k \sin \frac{2k\pi}{N} - \\ &\quad \frac{2}{N} \sum_{k=1}^N i_k \cos \frac{2k\pi}{N} - \frac{2i}{N} \sum_{k=1}^N i_k \sin \frac{2k\pi}{N} = \\ &\quad \frac{2}{N} \sum_{k=1}^{N/2} (i_k + i_{k+N/2}) \cos \frac{2k\pi}{N} + \\ &\quad \frac{2i}{N} \sum_{k=1}^{N/2} (i_k + i_{k+N/2}) \sin \frac{2k\pi}{N} \end{aligned} \quad (1)$$

式中 N 为每工频周期的采样点数; i_k 、 $i_{k+N/2}$ 分别表示第 k 次采样值与 $k+N/2$ 次采样值。

从式(1)可以看出,半波傅氏算法与全波傅氏算法差值体现前后半波不对称值的基波分量。

2 励磁涌流识别判据

若直接利用 i_{dif} 是否大于某个阈值作为励磁涌流的识别判据会面临 2 方面的问题:

a. 当差动电流为励磁涌流时,半波傅氏算法与全波傅氏算法差值也有可能较小,这样就可能导致

变压器差动保护误动;

b. 当差动电流为较大的内部故障电流时,若前后半波有轻微不对称,变压器差动保护可能延时动作甚至拒动。

因此,这里定义了如下的励磁涌流识别判据:

$$K = \frac{\int_0^{T/2} |i_{k,\text{dif}}| dt}{\int_0^{T/2} |i_k| dt} = \frac{\sum_{k=1}^{N/2} |i_{k,\text{dif}}|}{\sum_{k=1}^{N/2} |i_k|} > K_{\text{dz}} \quad (2)$$

式中 T 为一工频周期; $i_{k,\text{dif}}$ 为第 k 点处的式(1)计算

值; i_k 为由全波傅氏算法计算得到的差动电流基波值; K_{dz} 为判定为励磁涌流的阈值。

从式(1)(2)可以看出,所提出的励磁涌流识别判据反映了差动电流基波分量的综合不对称度,并对采样频率无特殊要求,且不易受各次谐波影响。同时,励磁涌流识别判据易于构造递推算算法,计算简单。

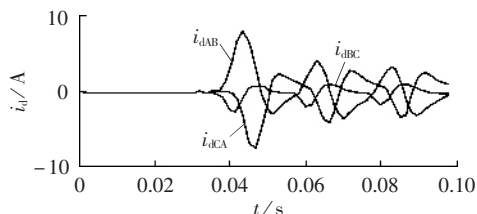
3 动模试验

通过动模试验数据验证所提出方法的可行性。动模试验系统中,试验变压器为 $Y_n/d11$ 联接的三单相变压器组,单相变压器参数为:额定容量 $2 \text{ kV} \cdot \text{A}$, 高、低压侧电压 462 V 、 200 V 。动模试验录波数据的采样周期为 12 点/周期。动模试验工况有:高压侧单相接地及相间短路故障、低压侧相间短路故障、高压侧 A 相 2.18% 及 4.35% 匝间短路故障、空载合闸以及各种带内部故障下的空载合闸等。大量动模试验结果表明,取 $K_{\text{dz}}=0.2$ 能够可靠地区分励磁涌流和内部故障电流。

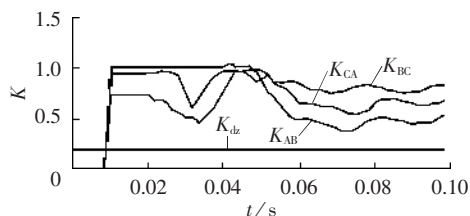
用 i_{dCA} 、 i_{dAB} 、 i_{dBC} 分别表示各差流, K_{CA} 、 K_{AB} 、 K_{BC} 分别表示各差流的式(2)计算结果。下面是变压器在几种情况下的试验及分析结果。

3.1 空载合闸

变压器空载合闸时产生励磁涌流,试验结果如图 1 所示。



(a) 差动电流波形



(b) K 值变化曲线

图 1 空载合闸

Fig.1 Closing without load

图1(a)中, i_{dCA} 、 i_{dAB} 为非对称性励磁涌流, i_{dBC} 为对称性励磁涌流。从图1(b)可以看出, K_{CA} 、 K_{AB} 、 K_{BC} 都满足励磁涌流识别判据的条件, 因此可以被正确地识别。非对称涌流是由剩磁方向相反的两相涌流相减生成的, 而对称涌流是由剩磁方向相同的两相涌流相减生成的。但2种涌流都存在间断角, 不可能达到波形任意处的前后半波对称, 因而文中的识别方法可以可靠识别。从图1还可以看出, 文中的识别方法对TA饱和造成的间断角变形不敏感。

3.2 内部故障

变压器在正常运行时, 高压侧A相绕组发生2.18%匝间短路故障时的仿真图形如图2所示。

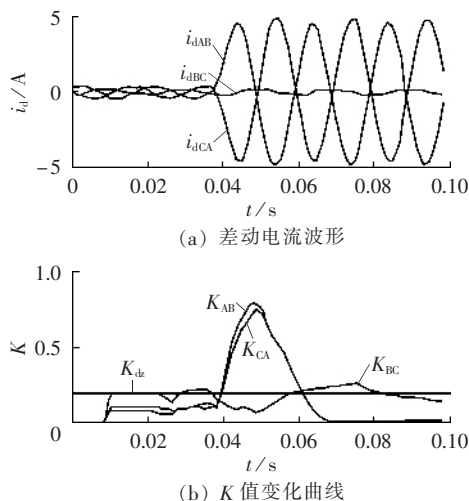


图2 内部故障

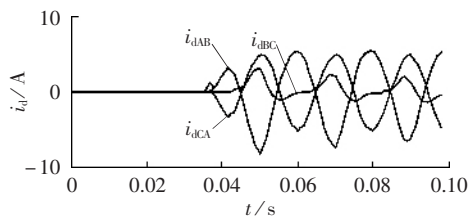
Fig.2 Internal fault

从图2可以看出, 由于差动电流是两相差流的差值, A相绕组发生故障后, 差动电流的变化使 K_{CA} 、 K_{AB} 迅速升高并满足于励磁涌流的判据条件, 从而闭锁了差动保护。并且内部故障发生后一个工频周期左右差动保护迅速开放并动作于跳闸。因而, 文中的识别判据可以保证差动保护能完全反映故障后的差动电流, 增加了差动保护的可靠性。图2中, i_{dBC} 仅是变压器正常运行时的励磁电流, K_{BC} 不会影响B相差动保护的動作行为。

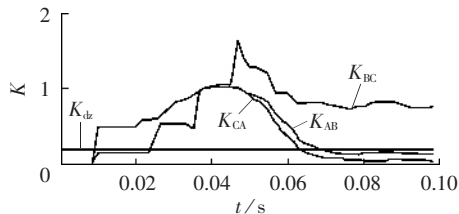
3.3 带内部故障空载合闸

变压器空投于带内部故障的变压器时, 由于变压器空投时的合闸角度不同, 非故障相中可能产生励磁涌流, 因而励磁涌流和短路电流可能同时存在。图3为变压器空投于高压侧A相带2.18%匝间短路故障的变压器时的仿真图形。

从图3可以看出, 变压器空投后, A、C两相差动保护可于空投后一个工频周期左右快速开放并动作于跳闸。由于 i_{dBC} 为变压器的励磁涌流, B相差动保护将被闭锁。由于文中判据可以分相闭锁差动保护, 因此励磁涌流和短路电流并存时差动保护不会被延时动作。



(a) 差动电流波形



(b) K 值变化曲线

图3 带内部故障空载合闸

Fig.3 Closing without load, but with internal fault

4 结论

从差动电流的全波傅氏算法计算结果和半波傅氏算法计算结果的差异出发, 根据励磁涌流与内部故障电流的不同特征, 提出了一种基于差动电流波形特征的励磁涌流识别新方法。通过理论分析和动模试验, 可以得出4点结论。

a. 励磁涌流识别判据反映了差动电流基波分量的综合不对称度, 对采样频率无特殊要求, 且不易受各次谐波的影响。同时, 识别判据易于构造递推算法, 计算简单、计算量少, 易于推向工程应用。

b. 无论是对称涌流还是非对称涌流, 由于其存在间断角, 无法达到波形任意处的前后半波对称, 因而文中的判据可以对其可靠识别。与二次谐波制动原理相比, 文中的识别判据从根本上保证了不受电力系统中补偿电容和超长输电线对地电容的影响, 且克服了二次谐波制动原理可能无法识别对称性涌流的问题。与间断角原理相比, 文中的识别判据对采样频率要求不高, 且从原理上保证了对TA饱和造成的间断角变形不敏感。

c. 文中的识别判据可以做到分相闭锁, 不会因健全相的励磁涌流而延迟故障相差动保护的動作, 提高了差动保护的可靠性。

d. 文中的识别判据可以保证差动保护完全以故障后信息为依据, 提高了差动保护的安全性。

参考文献:

- [1] 王维俭. 电气主设备继电保护原理与应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.
- [2] YABE K. Power differential method for discrimination between fault and magnetizing inrush current in transformers[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1997, 12(3): 1109-1118.
- [3] 朱亚明, 郑玉平, 叶峰, 等. 间断角原理的变压器差动保护的性能特点及微机实现[J]. 电力系统自动化, 1996, 20(11): 36-40.

ZHU Ya-ming, ZHENG Yu-ping, YE Feng, et al. Performance

- and digital realization of transformer differential relay based on dead angle philosophy[J]. Automation of Electric Power Systems, 1996,20(11):36-40.
- [4] 徐习东,何奔腾. 变压器差动保护中 CT 饱和和后间断角的测量[J]. 电力系统自动化,1998,22(5):22-25.
- XU Xi-dong, HE Ben-teng. The measurement of dead angle during CT saturation in transformer differential protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 1998,22(5):22-25.
- [5] 王维俭. 变压器保护运行不良的反思[J]. 电力自动化设备, 2001,21(10):1-3.
- WANG Wei-jian. Consideration on the improper operation of transformer protection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2001,21(10):1-3.
- [6] 葛宝明,王祥珩,苏鹏声,等. 电力变压器的励磁涌流判据及其发展方向[J]. 电力系统自动化,2003,27(22):1-6.
- GE Bao-ming, WANG Xiang-heng, SU Peng-sheng, et al. Criteria and development trend to identify inrush current of power transformers[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003,27(22):1-6.
- [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):55-59.
- HU Yu-feng, CHEN De-shu. A new method to identify inrush current based on sampled values[J]. Proceedings of the CSEE, 2000,20(9):55-59.
- [8] 胡玉峰,陈德树,尹项根. 采样值差动及其应用[J]. 电力系统自动化,2000,24(10):40-44.
- HU Yu-feng, CHEN De-shu, YIN Xiang-gen. New differential protection of power apparatus based on sampled values and its application[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000,24(10):40-44.
- [9] 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):395-404.
- HE Ben-teng, XU Xi-dong. Protection based on wave comparison[J]. Proceedings of the CSEE, 1998,18(6):395-404.
- [10] 李贵存,刘万顺,刘建飞,等. 用波形拟合法识别变压器励磁涌流和短路电流的新原理[J]. 电力系统自动化,2001,25(14):15-18.
- LI Gui-cun, LIU Wan-shun, LIU Jian-fei, et al. New principle of discrimination between inrush current and fault current of transformer based on forecasted waveform[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001,25(14):15-18.
- [11] 韩正庆,高仕斌,李群湛. 基于半波傅氏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. A new method to identify inrush current based on half-wave Fourier analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005,29(14):60-63.
- [12] ZAMAN M R, RAHAN M A. Experimental testing of the artificial neural network based protection of power transformer[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1998,13(2):510-517.
- [13] MAO P L, AGGARWAL R K. A wavelet transform based decision making logic method for discrimination between internal faults and inrush currents in power transformers[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2000,22(6):389-395.
- [14] 陈晓东,柳亦钢,李天云. 利用二次小波变换区分变压器励磁涌流和短路电流的符号法[J]. 电力自动化设备,2006,26(6):52-56.
- CHEN Xiao-dong, LIU Yi-gang, LI Tian-yun. Sign identifying method to discriminate inrush current and fault current of transformer based on twice wavelet[J]. Electric Power Automation Equipment, 2006,26(6):52-56.
- [15] 褚云龙,张保会,郝治国. 新技术手段在变压器差动保护励磁涌流识别中应用研究的现状[J]. 电力自动化设备,2004,24(8):90-94.
- CHU Yun-long, ZHANG Bao-hui, HAO Zhi-guo. Application of new techniques in magnetizing inrush current identification for transformer differential protection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004,24(8):90-94.
- [16] 许正亚. 几个励磁涌流新判据分析[J]. 电力自动化设备,2002,22(1):23-28.
- XU Zheng-ya. Analysis on several new criteria of inrush current[J]. Electric Power Automation Equipment, 2002,22(1):23-28.
- [17] 郑涛,刘万顺,肖仕武,等. 一种基于数学形态学提取电流波形特征的变压器保护新原理[J]. 中国电机工程学报,2004,24(7):18-24.
- ZHENG Tao, LIU Wan-shun, XIAO Shi-wu. A new algorithm based on the mathematical morphology for power transformer protection[J]. Proceedings of the CSEE, 2004,24(7):18-24.

(责任编辑:李玲)

作者简介:

韩正庆(1977-),男,山东安丘人,讲师,博士,研究方向为继电保护与变电站综合自动化(E-mail:hanzhengqing@sohu.com);

刘淑萍(1979-),女,安徽阜阳人,博士研究生,研究方向为继电保护与变电站综合自动化。

Magnetizing inrush identification based on differential current characteristics

HAN Zheng-qing, LIU Shu-ping

(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: The waveform characteristics of transformer magnetizing inrush and internal fault current are analyzed and a method to identify magnetizing inrush is presented. The internal fault current calculated by full-wave Fourier algorithm is close to that by half-wave Fourier algorithm. Contrastively, the magnetizing inrush calculated by full-wave Fourier algorithm is quite different to that by half-wave Fourier algorithm. Calculate the differential currents by both full-wave and half-wave Fourier algorithms and their difference, then calculate the ratio of the integral of the differential currents calculated by full-wave Fourier algorithm for half power frequency period and that of the differences. The differential current is taken as the magnetizing inrush if the ratio is greater than a setting value, otherwise as the internal fault current. The theoretic analysis and the dynamic emulational test results indicate that, it can distinguish the magnetizing inrush from internal fault current rapidly and can be applied to each phase separately, improving the reliability and security of differential protections.

Key words: magnetizing inrush; symmetrical inrush; fault current; differential protection