

基于励磁电感参数识别的变压器励磁涌流判别方法

康小宁, 何璐, 焦在滨, 索南加乐, 王桂林
(西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安)

摘要: 对基于励磁电感参数识别的变压器励磁涌流判别方法进行了研究, 指出其不能直接应用于电流互感器接于绕组外侧三相变压器的局限性. 针对这一问题, 提出了一改进算法, 使此原理不仅可以应用于单相变压器和能直接测量三角形接线侧绕组相电流的三相变压器, 而且也可以直接应用于三角形接线侧电流互感器接于绕组外的三相变压器, 并通过动模试验验证了该方法的正确性与判据的有效性. 仿真结果表明, 改进的保护算法能够快速有效地进行励磁涌流和内部故障电流的识别, 算法本身稳定, 在内部故障时具有较高的灵敏度.

关键词: 变压器; 励磁涌流; 瞬时励磁电感

中图分类号: TM41; TM772 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-987X(2007)10-1214-04

Distinguishing Magnetizing Inrush Based on Characteristic of Excitation Inductance

Kang Xiaoning, He Lu, Jiao Zaibin, Suonan Jiale, Wang Guilin
(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: A transformer protection algorithm based on the characteristic of excitation inductance is unable to apply to Y- Δ transformer, if the current inner the Δ windings is difficult to measure. Thus an improved algorithm for evaluating inner Δ windings via measured current outer Δ windings is proposed, which makes it feasible to use on both single-phase transformer and Y- Δ three-phase transformer. Simulation results verify validity and effectivity.

Keywords: transformer; magnetizing inrush; instantaneous excitation inductance

变压器差动保护原理简单, 动作灵敏, 一直用于变压器主保护, 但如何准确有效地区分变压器的励磁涌流和内部故障电流, 一直是变压器差动保护的难点.

目前, 系统中配置的变压器差动保护主要是根据励磁涌流的波形特征进行励磁涌流和内部故障电流识别^[1-5]. 实际上, 由于三相变压器励磁涌流的波形受系统电压和等值阻抗、合闸初相角、剩磁大小和方向等诸多因素的影响, 任何以励磁涌流波形特征为依据的防止由励磁涌流而引起误动的措施均不能保证变压器差动保护不误动, 差别仅是误动次数的多少^[6].

产生励磁涌流的最根本原因在于变压器励磁支路由于铁芯饱和而导致的非线性^[7]. 基于励磁电感

参数识别励磁涌流的方法从励磁涌流产生的本质原因(变压器铁芯磁路饱和)出发, 通过励磁电感的变化情况进行励磁涌流和故障电流的识别, 可以有效地减小谐波分量变化带来的影响.

该方法是在单相双绕组变压器模型基础上提出的, 但由于该原理使用的是采集到的变压器两端相电压和相电流量, 对于 Y/ Δ 接线方式的三相变压器, 如果 Δ 侧没有配置绕组电流互感器(TA)而是将 TA 接在出线上, 即只能得到 Δ 侧绕组线电流而不能获取侧绕组相电流时, 就会使得此方法的应用受到限制. 文献[8]提出在变压器 Δ 侧内部某相加装一组绕组 TA, 利用基尔霍夫电流定律求得 Δ 侧各相的绕组电流, 但是此方案只适用于三相分体式变压器, 对于 Y/ Δ 接线方式的三相一体式变压器, 工

程上通常采用“角变星”和“星变角”的转角方式来进行差流平衡.这两种转角方式都不能准确计算出励磁电感参数,不能反映出励磁涌流情况下励磁电感应有的变化规律^[8].

针对上述问题,本文以 Yn、d11 接线的三相变压器为例,提出一种计算△侧绕组内部环流的方法,使基于励磁电感参数识别励磁涌流的方法能够得到更广泛的应用,并利用动模试验验证了所提出算法的正确性和判据的有效性.

1 变压器瞬时励磁电感计算方法

根据变压器的励磁曲线,铁心未饱和时励磁电感数值比较大,而当变压器开始饱和时瞬时励磁电感 L_m 开始减小,而且随着饱和程度的加深, L_m 急剧减小,由此可以作为励磁涌流判别依据^[9].

图1所示为单相两卷式变压器的简化模型,设变压器变比为1:1, L_1 和 L_2 为两侧绕组的漏电感,并假定 $L_1=L_2=L$,同时考虑 $I_m=I_A+I_a$ 可得

$$U_A + U_a = (L + 2L_m) \frac{d(I_A + I_a)}{dt} \quad (1)$$

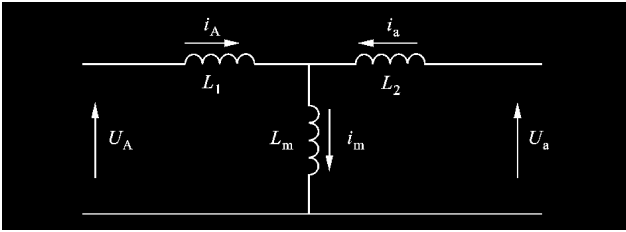


图1 两卷式变压器简化模型

通常情况下 $L_m \gg L$, 因此可以得到

$$L_m = \frac{(U_A + U_a)/2}{d(I_A + I_a)/dt} \quad (2)$$

将计算得到的 L_m 的变化情况作为励磁涌流的判别依据. 当此算法用于三相变压器的时候, 以图2所示的 Yn、d11 接线组别的双绕组变压器为例, 图中变量的下标 a、b、c 表示△侧三相, A、B、C 表示 Y 侧三相, i_{La} 、 i_{Lb} 、 i_{Lc} 表示△侧三相线电流, 变压器两侧电流的正方向如图中箭头所示, 假设变比为1:1.

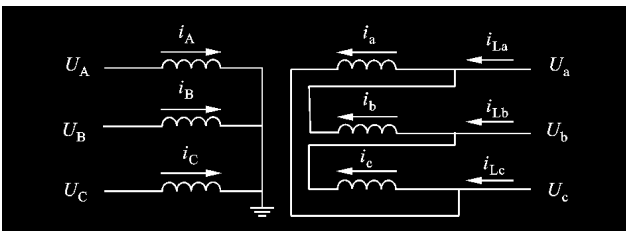


图2 Yn、d11 三相双绕组变压器简化模型

假设变压器△侧 TA 接于绕组外侧, 即只能测量到△侧的线电流. 由于以上推导出的涌流判据需要用到相电流, 因此需由△侧的线电流计算得到△侧内环各相电流才能应用上述判据. 本文采用如下方法得到△侧内环各相电流, 具体步骤如下, 其中△侧电压电流均已归算到 Y 侧.

(1) △侧内环各相电流可分解为零模分量 i_0 和线模分量 i_{12} 之和, 即

$$i_{a12} + i_0 = i_a; i_{b12} + i_0 = i_b; i_{c12} + i_0 = i_c \quad (3)$$

(2) △侧内环电流中各相电流的线模分量 i_{12} 可由采集到的△侧线电流得到, 具体推导如下

$$\left. \begin{aligned} i_a - i_b &= i_{a12} - i_{b12} = i_{1a} \\ i_b - i_c &= i_{b12} - i_{c12} = i_{1b} \\ i_{a12} + i_{b12} + i_{c12} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

由式(4)得到

$$i_{a12} = \frac{2i_{1a} + i_{1b}}{3}; i_{b12} = \frac{2i_{1b} + i_{1c}}{3}; i_{c12} = \frac{2i_{1c} + i_{1a}}{3} \quad (5)$$

(3) △侧内环电流中零模分量 i_0 可由 Y 侧的零模电流通过变压器变比折算到△侧计算得到, 以图2所示变压器为例, 由于变压器变比为1:1, 得到

$$i_0 = (i_A + i_B + i_C)/3 \quad (6)$$

由以上的推导及式(3)、式(5)、式(6)可得到△侧内环各相电流

$$\left. \begin{aligned} i_a &= (2i_{1a} + i_{1b})/3 + (i_A + i_B + i_C)/3 \\ i_b &= (2i_{1b} + i_{1c})/3 + (i_A + i_B + i_C)/3 \\ i_c &= (2i_{1c} + i_{1a})/3 + (i_A + i_B + i_C)/3 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

(4) 将式(7)计算出的△侧内环各相电流代入判据, 判断是否发生励磁涌流.

以 A 相为例, △侧绕组相电流 i_a 为式(7)中的结果, △侧 a 相绕组相电压为 $U_a - U_c$, 从而可以利用式(7)得到

$$L_m = \frac{(U_a + U_a - U_c)/2}{d(i_a + i_a)/dt} \quad (8)$$

当三相变压器 Y 形接线侧中性点不接地时, 由于 Y 侧 0 模电流没有通路, 所以在△侧不能感应出环流, 因此 i_0 为 0. 这时同样可以利用式(7)计算出△侧相电流, 只是此时 i_0 等于 0.

由上面的推导可以看出, 所提出的原理不仅可用于三相分体式变压器, 也可应用于 Y、d 接线的三相一体式变压器, 解决了将此原理用于三角形接线侧电流互感器接于绕组外的三相变压器的问题.

2 判别方法

当变压器发生励磁涌流时, 瞬时励磁电感的变

化幅度比较大.如果是内部故障,则瞬时励磁电感的变化幅度很小,理论上为零.可以通过求取一个周波内瞬时励磁电感的变化幅度作为是否出现励磁涌流的判据^[10],瞬时励磁电感变化幅度的计算式为

$$\bar{L}_m = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N L_m(i) \quad (9)$$

$$\Delta \bar{L}_m = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [L_m(i) - \bar{L}_m]^2 \right)^{1/2} \quad (10)$$

$$\Delta L = (\Delta \bar{L}_m / L) \times 100\% \quad (11)$$

式中: N 为工频一个周期的采样点; L_m 表示由式(8)计算出的瞬时励磁电感值; $\bar{L}_m$ 表示一周波内瞬时励磁电感的平均值; $\Delta \bar{L}_m$ 以方差的大小来表示一周波内瞬时励磁电感的变化幅度; L 代表正常运行情况下的励磁电感; ΔL 代表计算出的瞬时励磁电感变化幅度对正常运行情况下励磁电感的相对值.

依据此原理分相进行瞬时励磁电感的计算,相应地,保护采用分相制动的方法.如果某相(或某几相)差流大于差流保护的動作值,则应用式(9)~式(11)求取其瞬时励磁电感的相对变化幅度 ΔL .设 ϵ 为门槛值,则 $\Delta L > \epsilon$ 时,判为涌流;否则,判为该相故障.实际应用中 ϵ 可以通过仿真试验分析的方法确定其定值的大小.

3 动模试验及结果分析

变压器动模试验原理接线如图3所示.其中无穷大系统为一调压变压器,额定容量为30 kV·A.试验变压器选用3个单相变压器,采用Y、d11接线方式,各侧电流互感器二次接成星形,其中变压器三角形接线侧的电流互感器装在绕组外侧.单相变压器的额定容量为2 kV·A,低压侧额定电压为380 V,高压侧额定电压1 040 V,改变绕组抽头的连接关系,可以改变试验变压器的变比.空载电流为1.15%,空载损耗为0.9%,短路电压为12.6%,短路损耗1.6%.试验中,考虑到负载选取比较困难,使移相变压器的输出电压为220 V,试验变压器单相变比选择为1:1,输入电压为220 V.负载为 Δ 接法,负载大小可调.试验中采样频率为10 kHz,主要进行了变压器空载合闸、内部发生匝间短路和空投于内部故障的试验,对判据进行了验证.

3.1 空载合闸试验

在变压器Y侧进行空载合闸,涌流波形如图4所示,可以看到三相都发生了明显的涌流.由式(8)

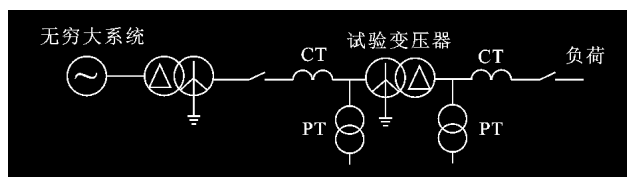


图3 动模试验原理接线图

~式(10)对瞬时励磁电感及其变化幅度进行计算,结果示于图5~图7中,可以看到三相瞬时励磁电感的变化幅度及相对值都有剧烈的变化.应用第3节所提出的判据,三相都表现为涌流,判别结果与实际情况相符,也就是说通过式(7)、式(8)能够较为准确地计算出瞬时励磁电感值,并反映出变压器铁心交替饱和和退出饱和的过程.

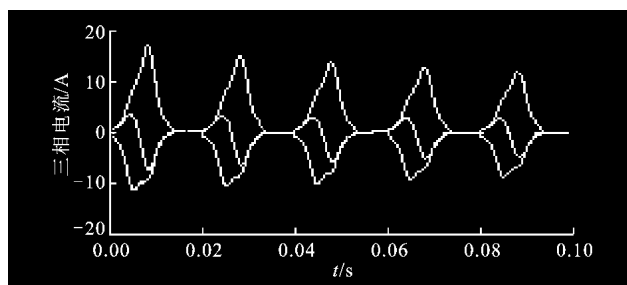


图4 空载合闸时三相励磁涌流

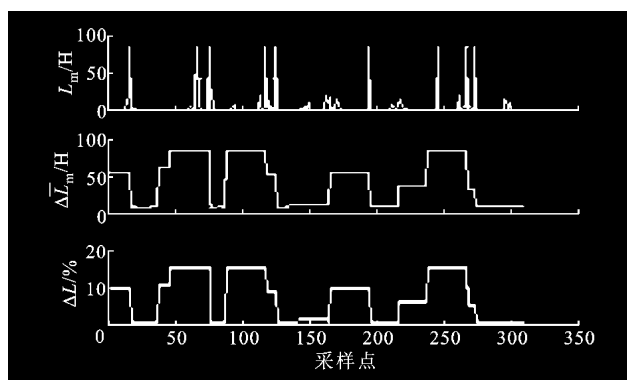


图5 空载合闸A相 L_m 及其变化幅度

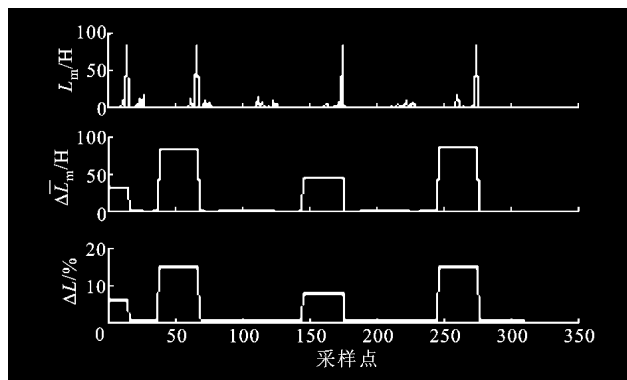
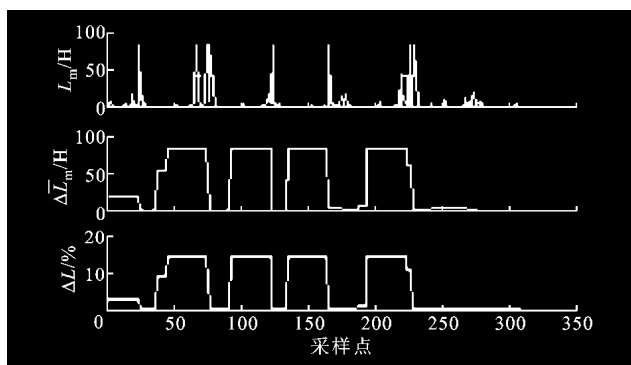


图6 空载合闸B相瞬时 L_m 及其变化幅度图

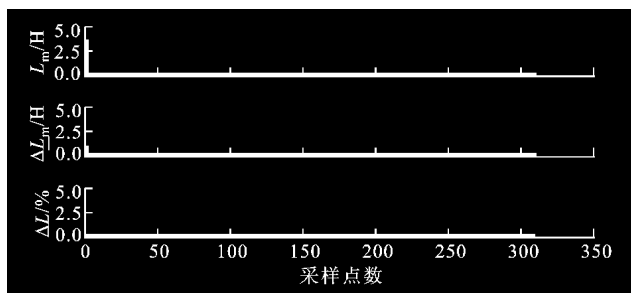
3.2 变压器内部发生匝间短路

变压器为Y、d11接线,在稳态运行中Y侧A相发生4.5%匝比的匝间短路,此时B、C相是变压

图7 空载合闸C相 L_m 及其变化幅度

器正常运行时的励磁电流,A相差流数值比较大.对A相进行瞬时励磁电感值和变化幅度的计算,可得如图8所示的结果.

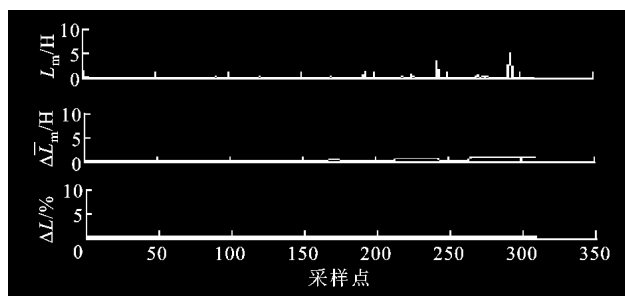
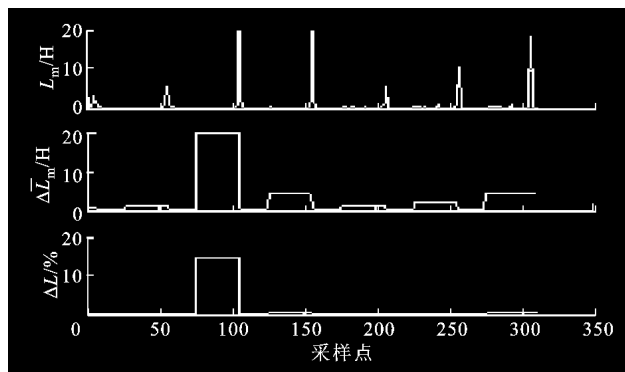
由图8可得,通过将式(7)中的电流值代入瞬时励磁电感计算公式,计算出的瞬时励磁电感变化幅度微乎其微,与空载合闸时的结果相比,有很大的差别.这充分证实了匝间短路时变压器铁心未饱和、励磁电感基本保持不变的原理,也说明了式(7)计算方法的有效性.

图8 A相发生匝间短路相A相 L_m 及其变化幅度

3.3 空投于内部故障

在带有内部故障的变压器空投时,三相差流中既有故障电流的特征,又有涌流的特征.动模试验中采用合闸前原边侧A相发生2.3%匝比的匝间短路,此时A相为正常的励磁电流,而B、C相出现励磁涌流.分别对A相和B相的瞬时励磁电感和其变化幅度进行计算,C相的变化情况类似于B相,结果分别示于图9、图10中.

由图9、图10可以看出,发生匝间短路的A相励磁电感变化幅度比较小,而B相励磁电感变化幅度很大.基于励磁电感参数识别判别励磁涌流采用分相计算瞬时励磁电感的方法,因此保护采用分相制动.由此可以判定A相发生短路故障,而且表现的特征明显,可以准确判断出故障情况.

图9 空投于A相匝间短路时A相 L_m 及其变化幅度图10 空投于A相匝间短路时B相 L_m 及其变化幅度

4 结 论

本文对基于励磁电感参数识别的变压器励磁涌流判别方法进行了改进,使此原理不仅可以应用于单相变压器和能直接测量 Δ 接线侧绕组相电流的三相变压器,而且也可以直接应用于 Δ 接线侧电流互感器接于绕组外的三相变压器,并通过动模试验验证了该方法的正确性与判据的有效性.

参考文献:

- [1] Sharp R L, Glassburn W E. A transformer differential relay with second harmonic rescrut[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1958, 77(3): 913-918.
- [2] 王祖光. 间断角原理的变压器差动保护[J]. 电力系统自动化, 1979, 3(1): 18-30.
Wang Zuguang. Transformer differential protection based on the dead-angle[J]. Automation of Electric Power System, 1979, 3(1): 18-30.
- [3] 孙志杰, 陈云仑. 波形对称原理的变压器差动保护[J]. 电力系统自动化, 1996, 20(4): 42-46.
Sun Zhijie, Chen Yunlun. Transformer differential protection based on the characteristic analysis of the first and second half cycle of the magnetizing inrush current[J]. Automation of Electric Power System, 1996, 20(4): 42-46.
- [4] 李贵存, 刘万顺, 腾林, 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(17):25-28.
- Li Guicun, Liu Wanshun, Teng lin, et al. A new algorithm of discrimination between inrush current and fault current of the transformer based on self-correlation analysis[J]. Automation of Electric Power System, 2001, 25(17):25-28.
- [5] 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 Guicun, Liu Wanshun, Liu Jianfei, et al. New principle of discrimination between inrush current and fault current of the transformer based on forecasted waveform[J]. Automation of Electric Power System, 2001, 25(14):15-18.
- [6] 郑涛.变压器仿真和数字式保护新原理的研究[D].北京:华北电力大学电气工程学院,2004.
- [7] 郑涛,刘万顺,谷君,等.三相变压器等效瞬时电感的计算分析及CT配置新方法[J].继电器,2006,34(16):1-6.
- Zheng Tao, Liu Wanshun, Gu Jun, et al. Analysis of the calculation of equivalent instantaneous inductance in three-phase transformer and a new CT's configuration[J]. Relay, 2006, 34(16):1-6.
- [8] 孙朋年,胡有富,郭至善.电机学[M].郑州:河南科学技术出版社,1997.
- [9] 葛宝明,于学海,王祥珩,等.基于等效瞬时电感判别变压器励磁涌流的新算法[J].电力系统自动化,2004, 28(7):44-48.
- Ge Baoming, Yu Xuehai, Wang Xiangheng, et al. Anovel equivalent instantaneous inductance based algorithm used to distinguish inrush current for transformers[J]. Automation of Electric Power System, 2004, 28(7):44-48.
- [10] 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 Weijian. Consideration on the improper operation of the transformer protection [J]. Electric Power Automation Equipment, 2001, 21(10):1-3.
- (编辑 杜秀杰)