

# 基于新型半周期波形正弦特征的励磁涌流判别方法

孙洋, 黄家栋

(华北电力大学, 河北 保定 071003)

**摘要:** 提出一种新型基于波形正弦特征判别变压器励磁涌流的方法, 利用变压器励磁涌流和内部故障电流波形特征的不同, 即变压器正常运行、内部故障时波形具有正弦函数的性质; 而空投时涌流波形包含非周期分量、间断角并具有尖顶波特性。通过对各种情况下波形极值点的快速识别, 构造出与之对应的半周期正弦波形, 进而定义正弦贴近函数  $K$ , 通过正弦贴近函数  $K$  来区分变压器励磁涌流和内部故障。变压器各种运行情况的动模试验验证了所提方法的可行性和判据的正确性。

**关键词:** 变压器; 励磁涌流; 故障电流; 尖顶波; 正弦贴近系数

## Novel theory of identifying inrush current based on half-cycle sine waveform

SUN Yang, HUANG Jia-dong

(North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

**Abstract:** A novel theory of identifying inrush current and fault current based on the different characteristics of waveform is given. The waveform has the nature of sine function during normal operation of transformer and internal fault, but the magnetizing inrush current possesses fastigium wave characteristic with non-periodic components and intermittent angle during no-load switching. By identifying the extreme point of the waveform in all cases, a corresponding half cycle sine waveform is constructed. Then  $K$  function of sine degree of nearness is defined and used to distinguish magnetizing inrush current from fault current of power transformers. Results of dynamic tests show that the proposed method is feasible and correct.

**Key words:** transformer; inrush; fault current; fastigium wave; sine degree of nearness

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)18-0054-05

## 0 引言

电力变压器是电力系统中最重要设备之一, 它在整个电力系统中起着能量和电压转换的作用, 其安全运行直接关系到整个电力系统能否连续稳定地工作。有资料表明<sup>[1]</sup>, 在2003~2007年间, 220 kV及以上变压器保护的平均正确动作率仅为85.866%, 远低于100 MW发电机及220 kV及以上线路保护的98.852%及99.506%, 而造成这种局面的重要原因之一是变压器中的励磁涌流识别问题。因此, 如何区别励磁涌流和故障是变压器差动保护的重要研究课题之一<sup>[2-5]</sup>。

目前现场运行的变压器差动保护, 主要采用二次谐波制动原理和间断角原理来判别励磁涌流。随着变压器铁心材料的改进, 导致其磁饱和点降低, 当剩磁较高且合闸角满足一定条件时, 二次谐波含量有时低于10%, 其中最小的一相可能小于7%, 导致二次谐波制动比将很难选取, 变压器纵差保护将

无法避免误动作。间断角原理又时常因为电流互感器(CT)的饱和, 导致间断角消失, 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<sup>[6]</sup>。近些年来, 提出了一类根据波形相关或相似程度鉴别励磁涌流与故障电流的方法, 它综合利用波形中的形状、大小及变化率等多种特征, 提高了鉴别励磁涌流的能力。

文献[7]提出利用变压器内部故障时电压与电流的波形比较相似, 空载合闸且铁心饱和时电压与电流的波形有较大差别的特点区分励磁涌流和内部故障电流; 文献[8-9]利用励磁涌流的波形在一个周期内前半周期与后半周期存在不对称, 而变压器内部故障时, 故障电流一个周期波形的前半周期与后半周期是对称的特征区分励磁涌流; 文献[10]根据最大面积法将数据窗内的信号严格等分成尽可能不相关的两部分, 在励磁涌流波形前后半周期总是很不对称、而故障电流总是非常对称的基础上, 计算两部分的波形系数, 区分励磁涌流和故障电流。文

献[11]根据初始有限个采样点, 采用最小二乘拟合算法拟合出一个标准正弦波, 利用标准正弦波与实际采样波形的相似程度识别励磁涌流与故障电流。文献[12]通过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, 区分励磁涌流与故障电流。但是, 当变压器带轻微匝间故障合闸时, 恰逢故障相发生涌流, 一个周期内的前后半波相似度很差, 以上方法都有可能使纵差保护经较长延时, 待涌流衰减后才能动作<sup>[13]</sup>。

基于以上认识, 本文在对变压器励磁涌流和内部故障相差电流波形综合分析的基础上, 提出了根据励磁涌流波形的尖顶特性与正弦函数相差较大, 而故障波形与正弦函数相差较小的鉴别方法, 并构造了 $K$ 值来表示与正弦波形贴近的程度, 由于空载及故障的情况下, 故障和非故障波形都会有或多或少的谐波影响, 使得波形发生畸变。通过对波形以极值为中心做对称性修正后, 得到的结果有了显著的改善。

### 1 励磁涌流的产生及波形特征

励磁涌流是当变压器空载投入或外部故障切除后电压恢复时, 由于电压的突然上升, 使变压器严重饱和, 磁通进入非线性区域, 产生的暂态励磁电流, 其最大值可达额定电流的4~8倍, 可与短路电流相比拟。图1中曲线OABP为变压器的基本励磁曲线, 如果用OC和CP来替代曲线OABP, 设合闸时电源电压为  $u = U_m \sin(\omega t + a)$ , 并忽略变压器的漏抗, 可以得到变压器空载合闸 ( $t=0$ ) 时励磁涌流的近似表达式如式 (1) 所示<sup>[14]</sup>。

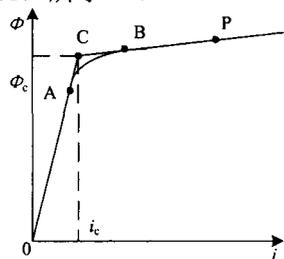


图1 变压器励磁曲线

Fig.1 Transformer excitation curve

$$i = \begin{cases} \frac{U_m}{\omega L_{OC}} \left[ \cos a - \cos(\omega t + a) + \frac{\phi_r}{\phi_m} \right], & \phi < \phi_c \\ \frac{U_m}{\omega L_{CP}} \left[ \cos a - \cos(\omega t + a) + \frac{\phi_r - \phi_c}{\phi_m} \right] + i_c, & \phi \geq \phi_c \end{cases} \quad (1)$$

式 (1) 中:  $\phi$  为变压器铁心磁通;  $\phi_r$  为变压器剩磁;  $\phi_m$  为稳态磁通幅值, 额定工况下为额定磁通幅值;  $L_{OC}$  和  $L_{CP}$  依次为折线段OC及CP对应的励磁电感。

由式 (1) 知, 当变压器磁化曲线采用简化的2段折线模型时, 由于  $L_{OC}$  和  $L_{CP}$  均为常数, 励磁涌流由2段正弦曲线构成, 但是图1中的励磁电感采用的简化折线模型在AC段比实际的偏大, 而在CB段偏小, 导致所得到的两段正弦曲线更“窄”, 这样使涌流的尖顶特征更加明显<sup>[15]</sup>。另外, 由于变压器采用Y/△接法, 因此在形成差动电流时, 需要对Y侧电流进行△变换, 此时的励磁涌流为两相磁化电流之差, 由于各相磁化电流进入深度饱和的时间不同, 因此两相差流的波形更加剧了波形的尖顶特征。

### 2 正弦波形贴近度原理

正弦波形贴近度鉴别涌流与故障的基本思想是: 从励磁涌流具有尖顶波特性着手, 找出波形的极值点, 并提取出幅值和频率构造出相应的正弦函数, 通过比较以极值点为中心左右各1/4个周期, 总共半个周期内的采样点的幅值比, 用 $K$ 函数来表示, 根据 $K$ 值的大小来判别是否发生涌流, 由于故障波形近似于正弦波, 没有尖顶特性, 所以 $K$ 值较小, 而涌流时 $K$ 值则很大。根据判别的基本思想定义出 $K$ 值:

$$K = \sum_{i=t_n-\frac{\pi}{4}}^{t_n+\frac{\pi}{4}} \frac{|A_n \sin(\omega t) - x(i)|}{A_n} \quad (2)$$

其中:  $A_n$  为第 $n$ 个极大值点对应的幅值;  $t_n$  为第 $n$ 个极大值点对应的时刻;  $\omega$  为根据50 Hz对应的角频率。

根据公式可以看出, 如果是标准的正弦波形, 所对应的 $K$ 值应该为0。如图2所示, 图2(a)为一个正弦波形, 通过对极值点的贴近度分析得到图2(b)所对应的 $K$ 值均为0。

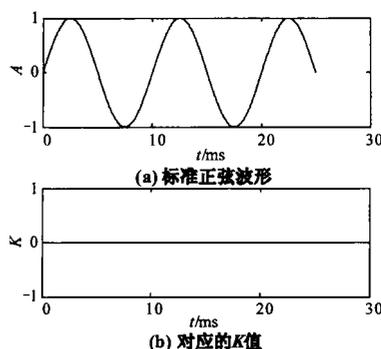


图2 正弦函数及对应的 $K$ 值

Fig.2 Sine function and the corresponding  $K$ -value

### 3 波形对称性修正

在现场中, 变压器微机保护装置从电力系统一次侧采集的数据很容易被各种噪声和干扰污染, 加上故障时所产生的谐波对非故障相的干扰, 即便故障之前的正弦波形也会发生波形的轻微变化。反映到 $K$ 值上则会产生不必要的误差, 影响判据的稳定性, 从而提出了改进的方法, 对极值点两侧的 $1/4$ 个周期的采样点做对称处理, 即

$$x(n-i) = x(n+i) = \frac{x'(n-i) + x'(n+i)}{2} \quad (3)$$

其中:  $x'(i)$  为未作波形对称性修正时波形第  $i$  个点对应的采样值;  $x(i)$  为修正之后的第  $i$  个采样点对应的采样值;  $i$  为距离极大值点的第  $i$  个采样点。

如图3所示, 虚线为进行波形对称性修正之后的波形, 实线为微机采样的正弦波形, 从图形中可以看出, 即便是正弦波形也会出现或多或少的畸变, 通过对称性修正之后, 图形变得平滑许多。

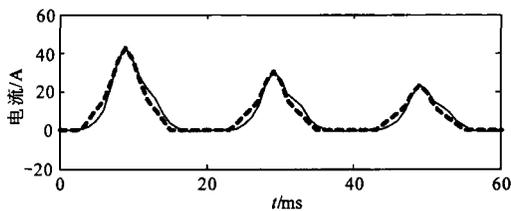


图3 对称度修正前后的波形对比

Fig.3 Comparison of waveform before and after the amendment of symmetry

### 4 保护方案设计

根据以上的分析, 制定变压器正常运行时以及空投情况下的保护判据, 同时利用动模实验数据测试该判据的效果。图4~7分别为变压器正常运行时出现故障、变压器正常空投、变压器空投于A相接地故障以及变压器空投于匝间故障的情况。

图4 (a) 为变压器A相出现轻微匝间故障的情况下三相相间差动电流  $i_{ab}$ 、 $i_{bc}$  和  $i_{ca}$  的波形。由图4 (b) 可以看出, 故障发生后, 贴近系数 $K$ 值将随着波形的尖顶程度而变化, 但从电力系统一次侧采集的数据很容易被各种噪声和干扰污染, 所以得到的波形即便是内部故障前(或后)的正弦波形都会出现许多“小凹点”和“小凸点”, 从而影响 $K$ 值的大小, 图4 (c) 经过波形对称修正得到的 $K$ 值相比较可以看出,  $K$ 值明显比 (b) 图下降, 更接近于理论值, 故障前后的最大值均在0.5以下。

图5 (a) 为变压器正常空投情况下的三相相间差动电流  $i_{ab}$ 、 $i_{bc}$  和  $i_{ca}$  的波形。可以看出, 涌流波形

的尖顶特性比较明显, 通过对称性修正之后得到的 $K$ 值也是比较大的, 最小的 $K_{ab}$ 也比1要大, 其余两个 $K$ 值均在2附近。

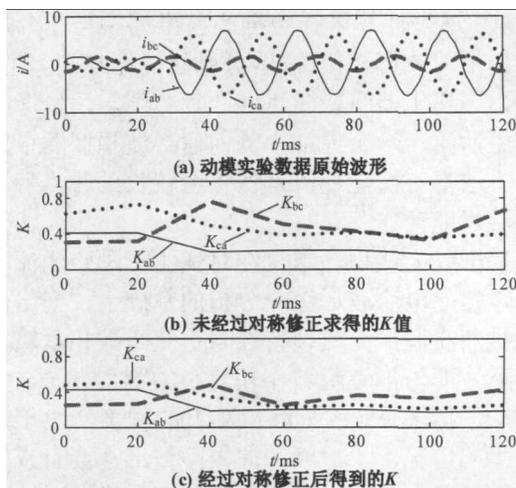


图4 内部轻微故障的情况  
Fig.4 Case of slight internal fault

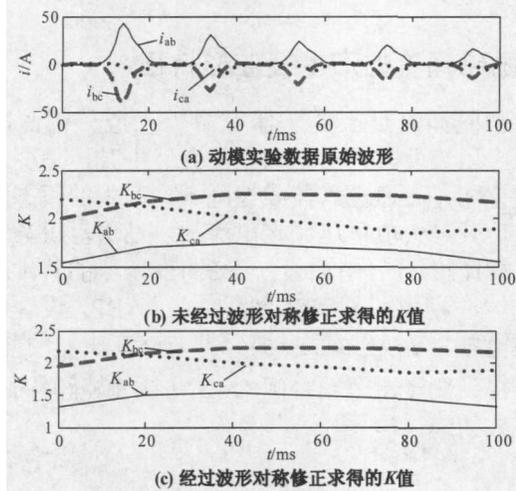


图5 变压器空载合闸的情况  
Fig.5 Case of transformer no-load switching

图6 (a) 为变压器空投于A相接地故障的情况下的三相相间差动电流  $i_{ab}$ 、 $i_{bc}$  和  $i_{ca}$  的波形。可以看出, A相的故障反映到  $i_{ab}$  和  $i_{ca}$  差流上, 具有内部故障波形的特点成正弦波形特征, 而非故障相  $i_{bc}$  仅具有励磁涌流的性质, 反映到 $K$ 值的变化上,  $K_{ab}$  和  $K_{ca}$  的值明显小于  $K_{bc}$ , 在0.5左右, 而  $K_{bc}$  由于涌流的特性值偏大, 最大值在5左右。

图7 (a) 为变压器空投于A相匝间(3%)故障的情况下的三相相间差动电流  $i_{ab}$ 、 $i_{bc}$  和  $i_{ca}$  的波形。可以看出, 由于匝数少, 反映到差流上  $i_{ab}$  和  $i_{ca}$  两个故障相的波形的涌流特点显著, 而  $i_{bc}$  由于耦合比较小几乎为故障电流特性, 呈明显的正弦波特征。从 $K$ 值可以看出  $K_{ab}$  值比较大, 而  $K_{bc}$  和  $K_{ca}$  均在0.5以下。

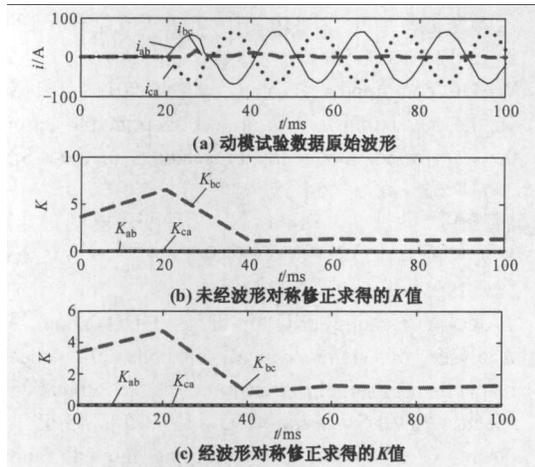


图6 空投于内部接地故障的情况

Fig.6 Case of no-load switching with ground fault

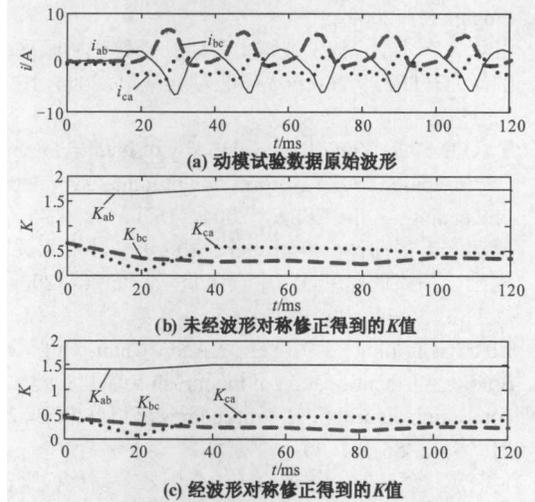


图7 空投于匝间故障的情况

Fig.7 Case of no-load switching with inter-turn fault

由上面的分析可以得出, 只有空载合闸时候的波形的  $K$  值均较大, 最小相也大于 1, 其他情况下至少有一相的  $K$  值小于 0.5, 所以可以做出差动保护的判据为:  $K < 0.5$ 。

### 5 方案验证

为了考察基于正弦贴近度和正弦修正保护判据的实用性和可行性, 笔者在华北电力大学动模实验室获得了变压器各种运行状态下的大量数据, 本文通过这些数据对保护判据进行验证。

动模试验系统接线如图 8 所示。在此系统中的试验变压器为三单相变压器组 Y/△接, 单相变压器的参数如下: 额定容量为 10 kVA, 低压侧额定电压 380 V, 低压侧额定电流为 25.3 A, 高压侧额定电压为 1000 V, 高压侧额定电流为 10 A, 空载电流为 1.45%, 空载损耗为 1%, 短路损耗为 0.35%, 短路电压为 9.0%~15%。

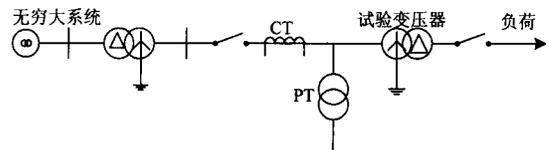


图 8 动模实验系统接线图

Fig.8 Connection diagram of the dynamic analogue testing system

表1给出了变压器运行中出现内部故障的情况下  $K$  值的计算结果。可以看出, 变压器正常运行时  $K$  值最大值仅为 0.116, 而出现故障时的  $K$  值也只有 0.340, 因此将阈值整定为 0.5, 裕度的范围很大, 可以保证较高的灵敏度。

表1 变压器运行中出现故障的情况下  $K$  的计算结果

Tab.1 Calculation results of  $K$  when transformer internal fault occurs during normal operation

运行状态	$K_{ab}$	$K_{bc}$	$K_{ca}$	序号
正常运行	0.083~0.116	0.037~0.056	0.031~0.053	1
运 匝间 3%	0.081~0.112	0.058~0.086	0.060~0.090	2
行 5%	0.052~0.073	0.042~0.061	0.027~0.031	3
中 故障 9%	0.114~0.186	0.275~0.340	0.082~0.128	4
出 接地 A 相	0.016~0.024	0.061~0.080	0.003~0.019	5
现 故障 B 相	0.026~0.047	0.005~0.014	0.060~0.077	6
故 相间 AB 相	0.006~0.303	0.034~0.053	0.003~0.071	7
障 故障 BC 相	0.107~0.140	0.133~0.162	0.013 9~0.05	8

表2给出了变压器空载合闸情况下  $K$  值的计算结果。可以看出, 正常空投情况下, 三相  $K$  值中最小值为 1.329, 大于 1。而空投于故障的情况至少有一相的  $K$  值小于 0.5, 而且有较大的裕度, 如果把整定值定为 0.5, 通过判断至少有一相的  $K$  值小于 0.5 则能可靠区分涌流与故障电流。

表2 变压器空投的情况下  $K$  的计算结果

Tab.2 Calculation results of  $K$  during no-load switching of transformer

运行状态	$K_{ab}$	$K_{bc}$	$K_{ca}$	序号
正常空投	1.329~1.533	1.955~2.235	1.848~2.186	1
空 匝间 3%	1.411~1.503	0.162~0.436	0.007~0.470	2
投 5%	0.148~0.256	1.468~1.852	0.301~0.383	3
于 故障 9%	0.314~0.376	0.546~1.203	0.209~0.271	4
故 接地 A 相	0.078~0.111	0.793~4.738	0.016~0.054	5
障 故障 B 相	0.167~0.242	0.097~0.211	0.900~1.215	6
相间 AB 相	0.048~0.294	0.337~1.616	0.015~0.483	7
故障 BC 相	0.159~0.291	0.290~0.656	0.038~0.071	8

## 6 结论

基于波形正弦特征算法的变压器差动保护涌流判别方法是利用变压器励磁涌流和内部故障电流的波形特征不同来判别的, 变压器内部故障时差动电流波形具有明显的正弦函数特征, 而励磁涌流因其包含非周期分量、间断角, 波峰成尖顶状不具有正弦特征。

大量动模试验证明了波形正弦度算法的可行性, 利用正弦贴近度函数  $K$  来区分故障和涌流, 经验数据表明设门槛值  $K_{zd} = 0.5$  比较合理, 且在判别过程中裕度很大, 当出现涌流波形时三相波形畸变都比较严重,  $K$  值较大, 闭锁保护。当变压器发生内部故障时, 远小于  $K_{zd}$ , 闭锁保护, 各种动模试验及波形分析表明了所提判别方法及判据的正确性。与其他判别故障电流和励磁涌流的判别方法相比, 本文方法原理简单, 易于实现; 计算量少, 对芯片运算速度要求不高; 并且不受 CT 饱和的影响。CT 饱和时涌流时间断角虽然消失但对于波峰波谷的特性仍旧存在, 故具有很好实用价值。

### 参考文献

- [1] 沈晓凡, 舒治淮, 刘宇, 等. 2007年国家电网公司继电保护装置运行情况[J]. 电网技术, 2007, 32(16): 5-8. SHEN Xiao-fan, SHU Zhi-huai, LIU Yu, et al. Operation situation of protective relays of state grid corporation of China in 2007[J]. Power System Technology, 2007, 32(16): 5-8.
- [2] 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, et al. A new algorithm based on the mathematical morphology for power transformer protection[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(7): 18-24.
- [3] 和敬涵, 李静正, 姚斌, 等. 基于波形正弦度特征的变压器励磁涌流判别算法[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(4): 54-59. HE Jing-han, LI Jing-zheng, YAO Bin, et al. A new approach of transformer inrush detected based on the sine degree principle of current waveforms[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(4): 54-59.
- [4] 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 Zeng-ping, YANG Qi-xun, et al. Research on novel transformer protection based on the characteristics of voltage and differential current[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(2): 61-65.
- [5] 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 Zeng-ping, 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.
- [6] 唐跃中, 徐进亮, 郭勇, 等. 几种变压器励磁涌流判别方法的特点及其内在联系的分析[J]. 电力系统自动化, 1995, 19(9): 53-59. TANG Yue-zhong, XU Jin-liang, GUO Yong, et al. Analysis of some typical methods for checking magnetizing surge in transformer[J]. Automation of Electric Power Systems, 1995, 19(9): 53-59.
- [7] Shang G C, Yu D C. Identifying internal faults of transformers through the similarity degree between voltage and current[C]. //IEEE PES Winter Meeting. Singapore: 2000.
- [8] 姚斌, 李永丽. 基于波形上下对称系数识别励磁涌流的新原理[J]. 电力系统及其自动化学报, 2004, 16(2): 32-35. YAO Bin, LI Yong-li. Novel theory of identifying inrush current based on waveform longitudinal symmetry[J]. Proceedings of the EPSA, 2004, 16(2): 32-35.
- [9] 林湘宁, 刘沛, 杨春明, 等. 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, 70. LIN Xiang-ning, LIU Pei, YANG Chun-ming, et al. Studies for identification of the inrush based on improved correlation algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(5): 56-60, 70.
- [10] 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, 404. HE Ben-teng, XU Xi-dong. Protection based on wave comparison[J]. Proceedings of the CSEE, 1998, 18(6): 395-398, 404.
- [11] 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 self-correlation analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(14): 15-18.
- [12] 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(17): 25-28. LI Gui-cun, LIU Wan-shun, TENG Lin, et al. A new algorithm of discrimination between inrush current and fault current transformer based on forecasted waveform[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(17): 25-28.

(下转第68页 continued on page 68)

the methods for the determination of harmonic loss on HVDC converter transformer[J]. Hubei Electric Power, 2002 (1) : 12-15.

[4] IEEE Std 1158-1991 IEEE recommended practice for determination of power losses in high-voltage direct-converter (HVDC) station[S].

[5] 刘成君, 杨仁刚. 变压器谐波损耗的计算与分析[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36 (13) : 40-43, 48.  
LIU Cheng-jun, YANG Ren-gang. Calculation and analysis of transformer's harmonic loss[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36 (13) : 40-43, 48.

[6] 陶顺, 肖湘宁. 变压器降容率及谐波损耗因子 $F_{HL}$ 与K的比较[J]. 电工电能新技术, 2008 (1) : 65-68.  
TAO Shun, XIAO Xiang-ning. Comparing transformer derating computed using the harmonic loss factor  $F_{HL}$  and K-Factor[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2008 (1) : 65-68.

[7] ANSI/IEEE Standard C57. 110-1986 IEEE recommended practice for establishing transformer capability when supplying nonsinusoidal load currents[S].

[8] 吴竞昌. 电力系统谐波[M]. 北京: 中国电力出版社, 1998.  
WU Jing-chang. The harmonic in power system[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1998.

[9] Fuchs E F, Yildirim D, Grady W M. Measurement of eddy-current loss coefficient  $P_{EC-R}$ , derating of single-phase transformers, and comparison with K-factor approach[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2000.

[10] Makram E F, Thompson R L, Girgis A A. A new laboratory experiment for transformer modeling in the presence of harmonic distortion using a computer controlled harmonic generator[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1988.

[11] Arri E, Locci N, Mocci F. Measurement of transformer power losses and efficiency in real working conditions[J]. IEEE Trans on Instrum Meas, 1991.

[12] 肖湘宁, 韩民晓, 徐永海, 等. 电能质量分析与控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.  
XIAO Xiang-ning, HAN Min-xiao, XU Yong-hai, et al. Analysis and control of power quality[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004.

[13] 王兆安, 黄俊. 电力电子技术[M]. 四版. 北京: 机械工业出版社, 2006.  
WANG Zhao-an, HUANG Jun. Power electronics [M]. Fourth edition. Beijing: China Machine Press, 2006.

收稿日期: 2009-10-08; 修回日期: 2009-12-29

作者简介:

李国栋 (1978-), 男, 工程师, 主要研究电能质量分析与控制技术, 无功优化, 电网安全稳定等;

李培 (1985-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电能质量分析与控制; E-mail: lipeifly@163.com

徐永海 (1966-), 男, 教授, 主要从事电力系统谐波、电能质量分析与控制方面的工作。

(上接第 58 页 continued from page 58)

[13] 毕大强, 张项安, 杨恢宏, 等. 基于非饱和区域波形相关分析的励磁涌流鉴别方法[J]. 电力系统自动化, 2006, 30 (6) : 16-19.  
BI Da-qiang, ZHANG Xiang-an, YANG Hui-hong, et al. Correlation analysis of waveforms in non-saturation zone based method to identify magnetizing inrush in transformer[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30 (6) : 16-19.

[14] 王维俭. 发电机变压器继电保护应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 1998: 76-95.  
WANG Wei-jian. Application of power generator transformer relay protection[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1998: 76-95.

[15] 黄家栋, 罗伟强. 采用改进数学形态学识别变压器励磁涌流的方法[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29 (7) : 98-105.  
HUANG Jia-dong, LUO Wei-qiang. New algorithm to identify inrush current based on improved mathematical morphology[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29 (7) : 98-105.

收稿日期: 2009-10-01; 修回日期: 2009-12-04

作者简介:

孙洋 (1984-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护及电力系统自动化控制; E-mail: sunnyboby2006@163.com

黄家栋 (1961-), 男, 硕士, 副教授, 主要研究方向为电力系统自动化控制及计算机计算在电力系统中的应用。