

基于幅值特征的变压器励磁涌流和故障电流的识别

徐岩, 周霏霏

(华北电力大学 电气与电子工程学院, 河北省 保定市 071003)

A Method to Distinguish Inrush Current of Power Transformer From Fault Current Based on Amplitude Characteristics

XU Yan, ZHOU Feifei

(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, Hebei Province, China)

ABSTRACT: An amplitude characteristic based principle for transformer differential protection is proposed. The proposed principle uses empirical mode decomposition (EMD) and singular point detection algorithm to accurately fault moment, and then corresponding amplitude of fundamental current is calculated by two-instantaneous-value-product algorithm. Calculation results show that due to the existence of non-saturation stage, the fundamental amplitude of inrush current is small, however because of the influence of faulty branch the fundamental amplitude of fault current is far larger than the threshold, therefore whether internal fault of power transformer occurs or not can be reflected by the fundamental amplitude relative to the threshold. Dynamic simulation results show that the proposed algorithm is convenient to implement and possesses following advantages: light calculation burden and reliable and rapid action.

KEY WORDS: power transformer; inrush current; empirical mode decomposition (EMD); two-instantaneous-value-product algorithm; fundamental amplitude

摘要: 提出一种基于幅值特征的变压器差动保护原理, 利用经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)奇异点检测算法准确定位故障时刻, 然后利用两点乘积算法计算出对应基波幅值。结果表明, 由于非饱和阶段的存在, 励磁涌流的基波幅值很小, 而由于故障支路的影响, 故障电流的基波幅值远大于阈值, 因此可以用幅值相对阈值的大小来反映是否发生了内部故障。动模实验验证了此算法易于实现, 计算量小, 动作可靠、迅速。

关键词: 变压器; 励磁涌流; 经验模态分解; 两点乘积算法; 基波幅值

0 引言

现在实际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。近年

来发展的有代表性的励磁涌流鉴别方法有波形对称原理^[1]、波形正弦度原理^[2]、波形相关性分析法^[3]和波形拟合法^[4]。实际上, 由于三相变压器励磁涌流的波形特征随系统电压和等值阻抗、合闸初相角、剩磁大小和方向、绕组接线方式和中性点接地方式、三相铁心结构、铁心材料和组装工艺、磁滞回线和局部磁滞环等的不同而改变, 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^[5]。不依赖于励磁涌流波形特征的方案有磁通特性识别法^[6], 等值电路参数鉴别法^[7], 基于励磁阻抗^[8]或瞬时励磁电感原理^[9]的变压器保护方案、功率差动法^[10]等, 但都未从根本上解决问题, 应用前景取决于理论的进一步突破。

本文提出一种基于故障电流幅值特征的变压器保护原理。该原理首先利用经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)算法准确定位故障时刻, 然后利用两点乘积算法计算出对应基波幅值, 以幅值相对阈值的大小来反映是否发生了内部故障。文献[11]也应用了两点乘积算法求得基波幅值, 该文献是在变压器退出饱和时间段内根据基波幅值下降程度的不同区分励磁涌流和故障电流。本文与文献[11]有很大区别, 本文是利用空载合闸之后变压器首先进入的不饱和阶段, 用 EMD 方法定位不饱和区域的开始位置, 然后利用两点乘积算法实时计算出非饱和区域对应的基波幅值, 根据基波幅值与阈值的大小区分励磁涌流和故障电流。动模实验表明该算法具有计算简单、判别速度快、灵敏度高等特点。

1 算法介绍

1.1 EMD 奇异性检测

在信号分解中, 信号的急剧变化之处常是分析

基金项目: 国家自然科学基金项目(50777016)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (50777016).

特性的最关键之处。EMD 算法的思想是把复杂信号分解成一组称为固有模态函数 (intrinsic mode function, IMF) 的单分量信号算法。其分解过程^[12]为:

1) 确定原始信号 $x(t)$ 的所有极大值点和极小值点。

2) 本文采用 3 次样条函数求出 $x(t)$ 的上包络线 $v_1(t)$, 下包络线 $v_2(t)$, 并计算均值 $m(t)$ 。

$$m_{11} = [v_1(t) + v_2(t)] / 2 \quad (1)$$

3) 作差 $h_{11}(t) = x(t) - m_{11}$ 。

4) 若 h_{11} 不是 IMF, 将其视为新的 $x(t)$, 重复步骤 3) k 次 $h_{1k} = h_{1(k-1)} - m_{1k}$, 最终的 h_{1k} 为第 k 次筛选所得数据, $h_{1(k-1)}$ 为第 $k-1$ 次筛选所得数据, m_{1k} 为 $h_{1(k-1)}$ 上下包络线之平均值, 利用 S_D 的值判断每次筛选结果是否为 IMF 分量, S_D 的值常取 0.2~0.3。

$$S_D = \sum_{t=0}^T \left| \frac{h_{1(k-1)}(t) - h_{1k}(t)}{h_{1(k-1)}^2(t)} \right| \quad (2)$$

5) 若 h_{1k} 满足 S_D 值的要求, 令 $c_1 = h_{1k}$, c 为一个 IMF 分量, 作差 $r = x(t) - c_1$ 。

6) 若 $r(t)$ 基本呈单调趋势或者 $|r(t)|$ 很小并可视作测量误差时, 停止分解。若不满足, 视 r 为新的 $x(t)$, 转至步骤 1), 直到满足 EMD 分解条件后结束, 不能提取的为残余量。

EMD 奇异性检测的准则^[13]是:

1) 对信号进行 EMD 分解, 求取高频 IMF 分量(通常是最高频 IMF 分量)。

2) 分解后的高频 IMF 分量求极值点, 计算相邻极大值点与极小值点的幅度差的绝对值, 以及相邻极大值点与极小值点的间隔。

3) 对极值差绝对值最大及极值间隔最小处进行定位。通常奇异性都是瞬间的, 因此奇异值点处的极值间隔一般情况下都只有 1 个采样间隔, 通常取极值间隔最小处的极大值点的位置为奇异值点的位置。本文中得到 2 个点后再进行取舍, 判断出真实的突变点。

与小波分析方法^[14]相比, EMD 方法避免了小波基选取的困难, 不仅可以分析非线性、非平稳信号, 还可以较好地分析信号的局域动态行为和特性。

1.2 两点乘积算法

假设输入为正弦量时, 使用 2 个采样点就可以计算出相应的基波幅值。当 2 个采样点为相邻采样点时, 设

$$\begin{cases} i_{t_1} = I_m \sin(\omega t_1) \\ i_{t_2} = I_m \sin(\omega t_2) = I_m \sin \omega(t_1 + T_s) \end{cases} \quad (3)$$

式中: t_1 为当前采样时刻; t_2 为下一个采样时刻; T_s 为 2 采样点之间的时间间隔, $T_s = t_2 - t_1$ 。利用两点乘积算法可得电流基波幅值^[11]为

$$I_m = \sqrt{\frac{i_{t_2}^2 + i_{t_1}^2 - 2i_{t_1}i_{t_2} \cos(\omega T_s)}{\sin^2(\omega T_s)}} \quad (4)$$

使用两点乘积算法计算幅值的优势在于: 如图 1 所示, 可以将一个近似直流和近似正弦波形在前 3 点内瞬时值相差不大的前提下区别开来。算法可以把瞬时值并不大, 但符合正弦规律的波形变换到体现幅值的标量上, 从而使两者有明显的区别。

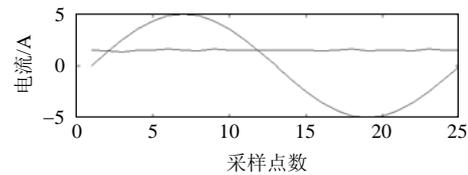


图 1 一个幅值为 5 A 的近似正弦波与一个近似的直流电流

Fig. 1 A sine wave which amplitude is 5 A and an approximate DC

2 基于基波幅值特征的励磁涌流鉴别方法

2.1 基本原理

在空载合闸时, 变压器的电流并不是瞬间就开始剧烈变化, 因为铁心需要经过一段时间才能达到饱和, 这个阶段被称为不饱和阶段, 这一个阶段约持续 3~5 ms^[15]。如果变压器在空载合闸时存在故障, 虽然铁心饱和需要一段时间, 但是由于故障支路、故障电流的存在, 故障相的电流在合闸之后就迅速变化。这是空载合闸和空投于故障 2 种运行状态的重要区别。

实现以上思想存在 2 个问题: 1) 合闸时刻的准确定位。上述思想是建立在准确定位合闸时刻的前提之上。而一般认为励磁涌流的非饱和阶段电流很小, 又受到零漂电流等因素的影响, 使得突变量启动不能准确测量到合闸时刻。本文则使用可以准确检测信号奇异性的 EMD 算法正确反映这个变化, 用于合闸时刻定位。2) 即使是合闸于故障, 由于电流一开始都从零开始变化, 与励磁涌流的非饱和阶段在瞬时值上差别不明显, 需使用一个特征量来表征 2 种情况下电流的不同, 本文选用两点乘积算法求得电流基波幅值作为特征量。

本文采用电流突变量启动作为变压器保护的启动条件, 当电流采样值连续 3 点的突变量大于 0.2 倍的额定电流时, 认为发生了故障或空载合闸, 进入判断程序。在突变量启动的前提下, 以启动

点(记为 t_1)为基准点,取 $[t_1-T, t_1+T_s]$ 区间的变压器两侧三相相电流进行奇异点检测(T 代表一个基波周期, T_s 代表一个采样间隔),得到真正的故障开始位置,记为 t (t 应在 t_1 前几个点的位置,故区间设为 t_1 向前取 1 个周期,向后取 1 个采样点,这样可以防止边界效应,也能排除饱和区域对判断的影响)。检测时有可能检测到 2 个奇异点,为排除零漂电流的影响,统计奇异点之前的突变量的最大值,若 2 个奇异点处的突变量小于前面的最大值,就认为是扰动,舍去此点;若 2 个点都是扰动引起的奇异点,或奇异点晚于突变量启动时刻,则取启动点 t_1 作为 t 。然后以 t 为首端开始取点计算,得到基波幅值与门槛值进行比较。

2.2 保护判据

2.2.1 空投于故障时

发生空投于故障时,由于变压器三相的铁心首先都进入非饱和阶段,则 t 时刻后至少有 3 个点体现的完全是故障电流(近似正弦规律)的变化。这时每相的等值阻抗为每相的漏阻抗和故障的过渡电阻,总体阻抗应很小,电压为额定值,则此时求出的电流幅值应很大,本文用系统的额定相电流的幅值 I_1 作为门槛值,大于门槛值时则认为发生了空投于故障。

2.2.2 发生励磁涌流时

发生励磁涌流时,变压器三相的铁心首先都进入非饱和阶段,这时三相中的电流为励磁电流,由于励磁涌流非饱和阶段持续 3~5ms,本文一个周期采样 24 点,则非饱和阶段至少包括 3 个点。则 t 时刻后取 3 个点进行判断,结果应很小,小于 I_1 ,可靠闭锁。

3 动模实验数据及分析

3.1 动模实验系统

为验证上述方法的实用性和可行性,本文利用动模试验获得了变压器在各种运行状况下的大量真实数据对保护判据进行验证。

动模试验系统接线如图 2 所示。此系统中的试验变压器为三单相变压器组,采用 Y, d11 接线。单

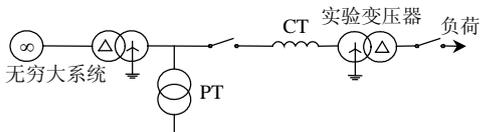


图 2 动模实验系统

Fig. 2 Connection diagram of the dynamic analogue testing system

相变压器参数如下:额定容量为 10kVA;低压侧额定电压为 380V,低压侧额定电流为 25.3A;高压侧额定电压为 1kV,高压侧额定电流为 10A;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%~15.0%。电压互感器变比为 1000/100;电流互感器的变比为 10/5;一周采样 24 个点。根据运行状态,本文原边侧的额定线电流为 5A,则门槛值 I_1 应为 4.1A,考虑一定的裕度,本系统中门槛值 I_1 设为 5A。

3.2 动模实验结果分析

图 3 为变压器发生励磁涌流时(以 A 相为例)电流波形及其高频 IMF 分量 and 对应的基波幅值曲线。其中 t_1 为突变量启动点, t 为判出的真实突变时刻, $t_{虚}$ 为由零漂电流引起的虚假奇异点,下同。实际上奇异点检测的处理区间只有 $[t_1-T, t_1+T_s]$,求幅值的点也是 t 后 3 个采样点,图中为了显示明显,画出了较长时间的处理波形,下同。由图可以看出,由突变量启动的点不能表征不饱和区域的开始,而经过 EMD 奇异点检测后可以得到可靠的突变点。而 t 时刻之后的基波幅值远远小于 5A,与理论分析一致。

图 4 为变压器发生空投于 A 相匝间故障(6.0%)

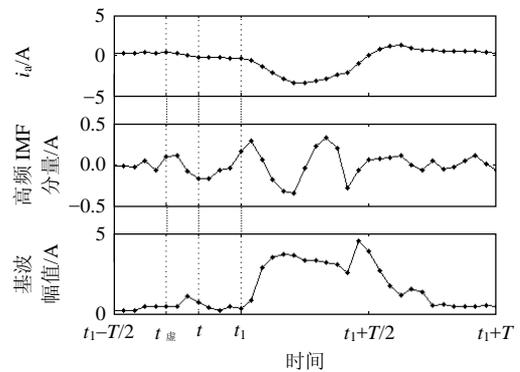


图 3 A 相发生励磁涌流时的处理波形

Fig. 3 Processed waveforms of phase A when switching on a no-load transformer

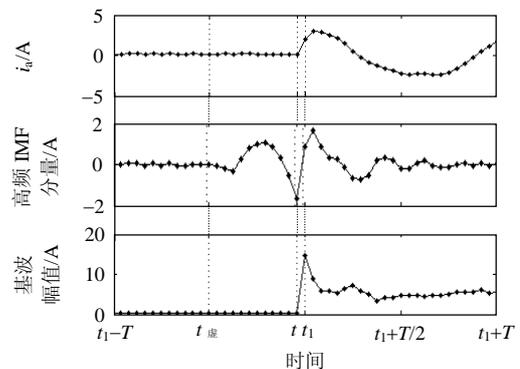


图 4 A 相发生空投于匝间故障(6%)时的处理波形

Fig. 4 Processed waveforms of phase A when switching on a transformer in a state of inter-turn fault(6%)

时 A 相电流波形及其高频 IMF 分量和对应的基波幅值曲线。可得 t 时刻之后的基波幅值都大于 5A。比较图 4 和图 3 可以看出，在 t 时刻之后的至少 3 个点内，对应电流基波幅值有明显的区别，证明了理论分析的正确性。

图 5 为变压器发生空投于 Δ 侧 A 相匝间故障时 (4.5%) 时电流波形及其高频 IMF 分量和对应的基波幅值曲线。其中 EMD 求出的奇异点晚于 t_1 时刻，则认为 t 即为 t_1 ，图 6、7 中也存在同样的情况，不再复述。可得 t 时刻之后的基波幅值都大于 5A。比较图 5 和图 3 可以看出，在 t 时刻之后的一个周期内，对应电流基波幅值都大于 5A，与励磁涌流时完全不同。比较图 4、5 可以看出，虽然故障位置不同，但本算法都可以准确判断出故障。值得说明的是，在图 5 中 t_1 时刻处，虽然电流瞬时值只有 3A，但是求出的对应基波幅值为 10A，远远高于阈值，这也证明了基波幅值算法的巨大作用，是反映出励磁涌流和故障电流的重要保证。

图 6、7 为变压器发生空投于相间和接地故障时电流波形及其高频 IMF 分量和对应的基波幅值曲线。由图看出，由于故障特征非常明显，所以在 t 时刻之后的一个周期内，对应电流基波幅值都大

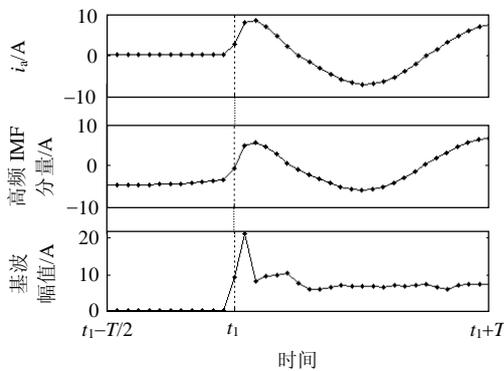


图 5 A 相发生空投于三角侧匝间故障(4.5%)时的处理波形
Fig. 5 Processed waveforms of phase A when switching on a transformer in a state of inter-turn fault (4.5%) of Δ side

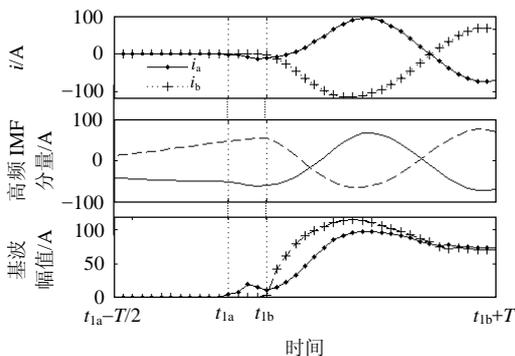


图 6 发生空投于 AB 相间故障时的处理波形
Fig. 6 Processed waveforms of phase AB when switching on a transformer in a state of inter-phase fault

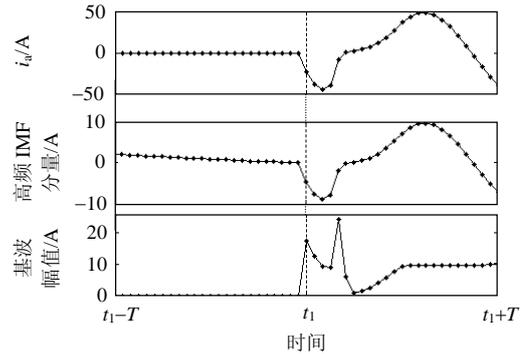


图 7 A 相发生空投于接地故障时的处理波形

Fig. 7 Processed waveforms of phase A when switching on a transformer in a state of ground fault

于 5A，能正确判断为故障。

表 1 为变压器各种运行方式下对电流处理所得的结果统计(以 A 相为例)。

表 1 动模实验数据统计(空载合闸部分)

Tab. 1 Statistics of dynamic analog testing (switching on a no-load transformer)

运行状态	故障形式(短路匝数占线圈匝数之比)	第 1 个	第 2 个	第 3 个	
		基波幅值变化范围/A	基波幅值变化范围/A	基波幅值变化范围/A	
正常空投		0~2	1~3	2~4	
带故障	匝间	3.6%~15.9%	4.8~49.8	5.9~35.4	
	星侧故障	接地	A 相	16.8~63.4	28.2~47.3
空投	相间	A、B 相	4.9~8.2	5.4~56.3	
		角侧故障	匝间	4.5%	3.8~24.5

从表中可以看出，发生故障时处理的 3 点中，至少有 2 点大于 5A；正常空投时处理结果 3 点都小于等于 4A，与阈值相比，具有很大的裕度。原边侧至少 2 点大于 5A 即可认为发生了空投于故障。3 个采样间隔就可以正确区分出来各种故障形式，与理论分析结果相符合。

4 结论

本文针对变压器电流在各种情况下与阈值相对大小的不同进行分析，并利用精确的算法可靠实现原理。算法的特点有以下几个方面：

1) 本文利用 EMD 分析信号的奇异性，准确定位变压器合闸时刻，为整个算法提供精确的处理时间段，保证了原理的可应用性。本文中 EMD 无需进行多层分解，只需提取出最高频率的 IMF 分量，大大节约了时间，同时也考虑了边界效应的影响。

2) 不受电流互感器饱和的影响。由于分析的是故障之初的特性，电流互感器未饱和，电流互感器传变的电流能正确反映一次侧的情况。

3) 动作时间迅速，空投过程一般需要小于 1/4

个周期的时间就可以判断出来。

4) 两点乘积算法可将瞬时值相似但变化趋势不同的2种波形区分开来,构成了区别励磁涌流和故障电流的重要算法。其构成原理简单,数据采集方便,计算量小,动作快速。

5) 此算法是利用励磁涌流和故障电流在合闸之初电流的不同变化趋势进行区别的,所采用的2种算法可以将原理可靠准确地实施。

参考文献

- [1] 林湘宁,刘世明,杨春明,等.几种波形对称法变压器差动保护原理的比较研究[J].电工技术学报,2001,16(4):44-70.
Li Xiangning, Liu Shiming, Yang Chunming, et al. Study on comparisons among some waveform symmetry principle based transformer differential protection[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2001, 16(4): 44-70(in Chinese).
- [2] 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 Jinghan, Li Jingzheng, 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(in Chinese).
- [3] 毕大强,张项安,杨恢宏,等.基于非饱和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):16-24.
Bi Daqiang, Zhang Xiang'an, Yang Huihong, 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): 16-24(in Chinese).
- [4] 韩正庆,高仕斌,李群湛.基于差动电流正弦曲线拟合波形的变压器保护原理[J].电力系统自动化,2005,29(12):29-32.
Han Zhengqing, Gao Shibin, Li Qunzhan. Transformer protection scheme based on the sine curve fitting of differential current[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(12): 29-32(in Chinese).
- [5] 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(in Chinese).
- [6] 徐岩,王增平,杨奇逊,等.基于磁通特性的改进型变压器保护方案研究[J].继电器,2003,31(9):9-14.
Xu Yan, Wang Zengping, Yang Qixun, et al. Study on the improved transformer protection method based on magnetic flux characteristics[J]. Relay, 2003, 31(9): 9-14(in Chinese).
- [7] 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(in Chinese).
- [8] 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.
Zhong Hongliang, Jin Huafeng, Zhu Zhengfei, et al. Transformer inrush detected by the variation of magnetizing impedance[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(7): 91-94(in Chinese).
- [9] 郑涛,刘万顺,庄恒建,等.用归一化等效瞬时电感分布特性识别励磁涌流的新算法[J].中国电机工程学报,2005,25(23):47-53.
Zheng Tao, Liu Wanshun, Zhuang Hengjian, et al. A new algorithm based on the distribution of the normalized equivalent instantaneous inductance for the discrimination of inrush[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(23): 47-53(in Chinese).
- [10] 孙鸣.正序有功功率差作为变压器励磁涌流判据的研究[J].中国电力,2004,37(12):5-8.
Sun Ming. Argumentation of differential theory for transformers based on positive sequence active power[J]. Electric Power, 2004, 37(12): 5-8(in Chinese).
- [11] 马静,王增平,吴劫.利用基波幅值变化特征快速识别励磁涌流和故障电流[J].电工技术学报,2009,24(6):166-171.
Ma Jing, Wang Zengping, Wu Jie. A novel method to rapidly identify inrush current and internal fault current based on variation characteristic of fundamental current amplitude[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(6): 166-171(in Chinese).
- [12] 罗伟强,边铁.基于EMD分解的变压器励磁涌流鉴别[J].电力科学与工程,2009,25(5):1-6.
Luo Weiqiang, Bian Tie. One new scheme to discriminate inrush current from internal fault of power transformer based on EMD decomposition[J]. Electric Power Science and Engineering, 2009, 25(5): 1-6(in Chinese).
- [13] 束洪春.电力工程信号处理[M].北京:科学出版社,2009:322-325.
- [14] 安源,刘家军.基于小波理论和多分辨分析的变压器励磁涌流识别方法[J].电网技术,2007,31(17):21-25.
An Yuan, Liu Jiajun. A method to identify inrush current of transformer based on wavelet theory and multiresolution analysis[J]. Power System Technology, 2007, 31(17): 21-25(in Chinese).
- [15] 曾湘,林湘宁,翁汉珺,等.基于相电压和差流时差特征的变压器保护新判据[J].电力系统自动化,2009,33(3):79-83.
Zeng Xiang, Lin Xiangning, Weng Hanli, et al. Novel criterion of transformer protection based on time difference characteristic between phase voltage and differential current[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(3): 79-83(in Chinese).



徐岩

收稿日期:2011-01-08。

作者简介:

徐岩(1976),男,博士,副教授,主要研究领域为电力系统继电保护, E-mail: xy19761001@yahoo.com.cn;

周霏霏(1986),女,硕士研究生,主要研究方向为电力系统继电保护, E-mail: zhoufeifei8601@163.com。

(责任编辑 李兰欣)