

基于差分双正交小波熵的变压器励磁涌流识别算法

张炳达, 黄杰

(智能电网教育部重点实验室(天津大学), 天津 300072)

摘要: 励磁涌流仍然是制约差动保护正确动作的最主要问题之一。分析了励磁涌流和内部故障电流的波形特征, 根据励磁涌流突变点分布特性, 提出了一种小波熵识别励磁涌流的新判据。用双正交多分辨率分析取代常规的正交多分辨率分析, 以解决下坡突变点难以辨识问题。采用差分预处理策略放大突变点的奇异性特征, 并利用三相小波熵的分布特征识别励磁涌流。在此基础上, 制定了励磁涌流识别的具体实现方案。仿真及实验表明, 所提出的励磁涌流识别方法有效。

关键词: 励磁涌流; 差动保护; 差分预处理; 双正交多分辨率分析; 小波熵

Identification of transformer inrush current based on difference biorthogonal wavelet entropy

ZHANG Bing-da, HUANG Jie

(Ministry of Education Key Laboratory of Smart Grid (Tianjin University), Tianjin 300072, China)

Abstract: Inrush current is still one of the most important issues which restricts the accuracy movements of differential protection. The characteristics of the differential current under the conditions of inrush and internal fault are analyzed. According to the feature of the inrush mutations, a new judgment to identify the inrush current based on wavelet entropy is proposed. In order to solve the problem that the downhill mutations are difficult to identify, biorthogonal multi-resolution analysis is used instead of the conventional orthogonal multi-resolution analysis. The difference pretreatment is used to amplify the characteristics of the singularity of mutations, and the inrush current is identified by the use of the distribution of the three-phase wavelet entropy. Based on the above analysis, the specific implementation scheme is made. Simulation and experiments show that the proposed method is effective.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51277128).

Key words: inrush current; differential protection; difference pretreatment; biorthogonal multi-resolution; wavelet entropy

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)18-0009-05

0 引言

电力变压器是电力系统中的重要组成部分, 大都采用纵联差动保护作为主保护。而差动保护存在的主要问题是空载合闸或外部故障切除后电压恢复的暂态过程中产生很大的励磁涌流, 有可能导致差动保护误动作^[1-3]。因此, 准确识别励磁涌流是差动保护能够正确动作的前提和基础。

目前主要应用二次谐波原理、间断角原理^[4-7]识别励磁涌流。由于现代变压器磁特性的变化、变压器容量的不断增大以及远距离传输所引起的分布电容等因素, 使得采用二次谐波原理易导致误动作或者延时动作等问题; 间断角原理保护受电流互感器饱和的影响, 使得它在实际应用中受到限制。

小波熵在励磁涌流识别方面已有初步探索。文

献[8]根据第一个工频周期的小波熵值大小来区分励磁涌流和故障电流。本文分析了励磁涌流突变点的分布特性, 提出了一种新的小波熵识别励磁涌流方法。考虑到因正交小波的不对称性使得某些突变点难以辨识, 用双正交多分辨率分析取代常规的正交多分辨率分析; 针对某些突变点可能由于某些原因造成失真或突变不明显, 采用差分预处理策略放大突变点的奇异性特征。

1 励磁涌流

单相变压器在空载合闸时的铁芯磁通可以表示为^[9]

$$\Phi = -\Phi_m \cos(\omega t + \alpha) + (\Phi_r + \Phi_m \cos \alpha) e^{-Rt/L} \quad (1)$$

其中: α 为变压器投入时刻的初相角; Φ_m 为稳态磁通的幅值; Φ_r 为合闸前铁芯中的剩磁; R 为变压

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51277128)

器绕组电阻； L 为变压器绕组电感。

式(1)中，第一项为稳态磁通，第二项为维持磁通不发生突变而产生的暂态磁通。当 $\alpha=0$ 时，有最大磁通 $\Phi_{\max}=2\Phi_m+\Phi_1$ 。 Φ_{\max} 可能远大于额定磁通，励磁电流达到额定电流的6~8倍，甚至更高。这就是励磁涌流现象，图1给出了典型的变压器励磁涌流波形。

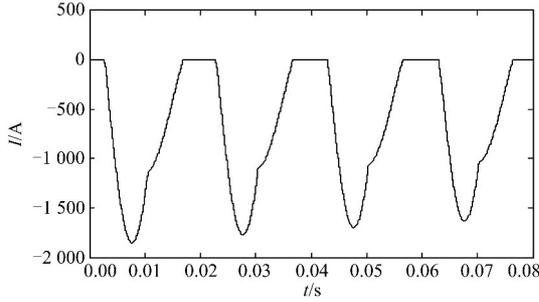


图1 典型的变压器励磁涌流波形

Fig. 1 Typical inrush current waveform of transformer

从图1可以看出，励磁涌流包含有非周期分量及大量高次谐波分量，表现在波形上就是信号有突变，奇异性较大。

2 基本原理

小波变换具有多尺度和局部特性好的优点，结合信息论中熵的理论，人们定义了多尺度下的小波熵，并用来度量信号的统计特性^[10-13]。

根据多分辨率分析理论，任意信号 $x(t) \in L^2(\mathbb{R})$ 可用多分辨率公式分解为^[14]

$$x(t) = \sum_k c_j(k) \phi_{j,k}(t) + \sum_{j=1}^J \sum_k d_j(k) \psi_{j,k}(t) \quad (2)$$

其中： J 为分解尺度； $c_j(k)$ 是离散平滑逼近信号； $\phi_{j,k}(t)$ 是尺度函数； $d_j(k)$ 是离散细节信号即小波变换系数； $\psi_{j,k}(t)$ 是具有带通性质的小波函数。

定义单一尺度下的小波能量为

$$E_j = \sum_k d_j^2(k) \quad (j=1,2,\dots,J+1) \quad (3)$$

其中， $d_{j+1}(k) = c_j(k)$ 。

定义信号的尺度总能量为

$$E_{\text{总}} = \sum_{j=1}^{J+1} E_j \quad (4)$$

定义各尺度下的小波能量概率为

$$p_j = \frac{E_j}{E_{\text{总}}} \quad (j=1,2,\dots,J+1) \quad (5)$$

定义小波熵为

$$H = -\sum_{j=1}^{J+1} p_j \log_a(p_j) \quad (6)$$

式(6)概率模型表示各尺度下的小波能量分布情况。在非电流突变点处，能量集中分布在低频带上，因而概率分布较不均匀，小波熵值较小；而在电流突变点处，能量分布在各个频带上，因而概率分布较平均，小波熵值较大。

常规小波熵建立在正交多分辨率分析基础之上。正交多分辨率分析具有很多优点，如分解的正交性、实现简单等。但是，除Haar小波外的正交小波的尺度函数和小波函数都不是对称的，使得其在励磁涌流突变点检测中难以辨识某些突变点。为了弥补这一缺陷，本文用双正交多分辨率分析代替正交多分辨率分析，并把采用正交多分辨率分析得到的小波熵称为正交小波熵，采用双正交多分辨率分析得到的小波熵称为双正交小波熵。

3 差分预处理

励磁涌流突变点可能由于种种原因被淹没，使得突变点不明显。这里采用差分预处理方法，其方程式为

$$y(n) = x(n) - x(n-1) \quad (7)$$

差分预处理方法可以完全滤除直流分量，对低频分量也有比较好的滤波效果，且能放大高频分量。对图1中的变压器励磁涌流波形进行差分处理，结果如图2所示。

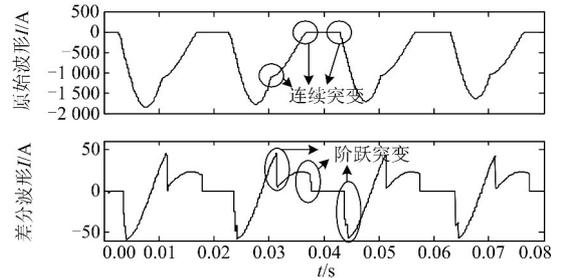


图2 励磁涌流差分处理前后的波形比较

Fig. 2 Comparison of inrush waveform before and after difference pretreatment

从图2可以看出：原始波形的连续突变转变成阶跃突变，从而放大了突变点的奇异性特征。

这里，将采用差分预处理和双正交多分辨率分析得到的小波熵称为差分双正交小波熵。

4 突变点检测

当采样周期到来时, 向新的采样数据方向移动窗口, 并对窗口中的采样数据进行小波熵分析, 从而形成一条随时间变化的小波熵分布曲线。

为了减少边界效应对高频能量的影响, 对窗口数据做了边界延拓。由于对称延拓能够避免窗口数据边界的不连续性^[15], 本文采用了对称延拓的方式。当窗口长度选得越短, 突变点被检测出的可能性就越大, 时间偏移也就越小。但是, 当窗口长度过短时, 多分辨率分析的边界效应可能会严重影响实际的能量分布。经分析对比, 本文选择窗口长度为 1 ms。

实验中, 采样频率取 10 kHz, 正交小波采用 db3 小波, 双正交小波采用 bior1.3 小波, 分解尺度为 $J=4$ (除特殊申明外, 以下分析都采用这种条件)。图 3 给出了图 1 所示励磁涌流的正交小波熵、双正交小波熵、差分双正交小波熵分布曲线。

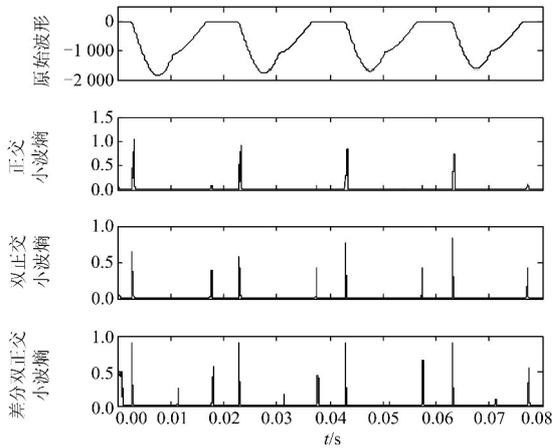


图 3 三种算法的小波熵曲线图

Fig. 3 Wavelet entropy curves of three algorithms

分析图 3 的小波熵分布曲线可以得到: 正交小波熵算法对上坡 (信号的绝对值由小变大) 突变点能够有效识别, 而对下坡 (信号的绝对值由大变小) 突变点难以辨识; 双正交小波熵算法使明显的下坡突变点能够识别; 差分双正交小波熵算法使得不明显的下坡突变点也能够识别。

5 保护判据

影响励磁涌流波形的因素有多种, 如合闸初相角、剩磁等; 内部故障电流波形也会因故障类型、故障严重程度的不同而不同。限于篇幅, 这里仅给出了三相变压器空载合闸、三相变压器正常运行时发生内部故障的三相电流典型波形。为了方便比较, 将变压器空载合闸时刻以及内部故障发生时刻均设在 $t=0.02$ s。

从图 4 可以看出, 变压器空载合闸时, 各相电流存在波形间断现象, 电流突变点在相当长的一段时间内频繁出现, 且各相出现的时刻有所不同; 变压器内部故障时, 各相电流不存在波形间断现象, 电流仅在故障发生时刻出现较大的突变, 此后会根据高次谐波含量的不同出现不同程度的轻微突变, 整体接近于正弦波。

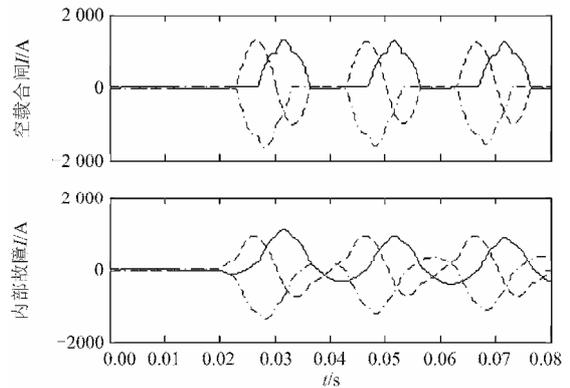


图 4 三相变压器空载合闸和内部故障时的电流波形

Fig. 4 Current waveforms of no-load closing and internal fault

为了识别三相变压器的励磁涌流, 定义三相小波熵, 即有

$$H_3 = \max(H_a + H_b + H_c) \quad (8)$$

对图 4 进行三相差分双正交小波熵计算, 得到的分布曲线如图 5 所示。

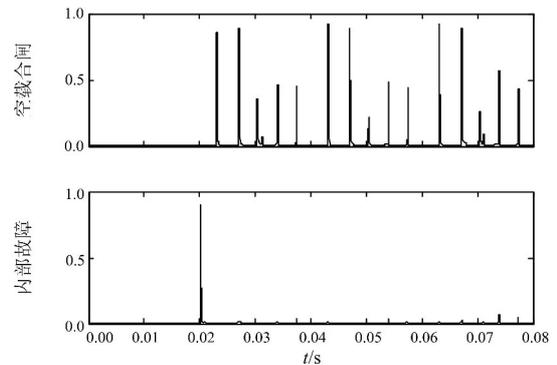


图 5 三相变压器空载合闸和内部故障时的三相小波熵

Fig. 5 Three-phase wavelet entropy of no-load closing and internal fault

从图 5 可以看出, 三相小波熵能够很好地表征电流突变点发生时刻, 同时对波形间断前后的电流突变点和波形持续期间的电流突变点具有不同的敏感性。基于此, 本文规定当三相小波熵值 H_3 大于阈值 K 时, 发生了电流突变; 否则, 认为未发生电流突变。因此, 通过合理整定阈值 K 可以有效躲避

内部故障电流因高次谐波而出现的电流突变点,这样内部故障电流就只保留了起始时刻的电流突变点。最后,本文把经过阈值筛选后的电流突变点的分布特征作为励磁涌流的识别依据。

6 励磁涌流识别器

根据前文的分析,本文设计了一种小波熵励磁涌流识别器,如图6所示。小波熵励磁涌流识别器由三部分组成:①突变点判决器。当三相小波熵值 H_3 大于阈值 K , 突变点判决器判定当前采样点为突变点,输出为真,否则为假。②励磁涌流特征点判决器。当同时满足当前采样点为突变点且与前一突变点的时间间隔在 $x \sim y$ 范围内时,该判决器判定该点为励磁涌流特征点,输出为真,否则为假。③闭锁信号控制器。当有励磁涌流特征点出现,该控制器就输出一个长度为 d 的脉冲型闭锁信号。

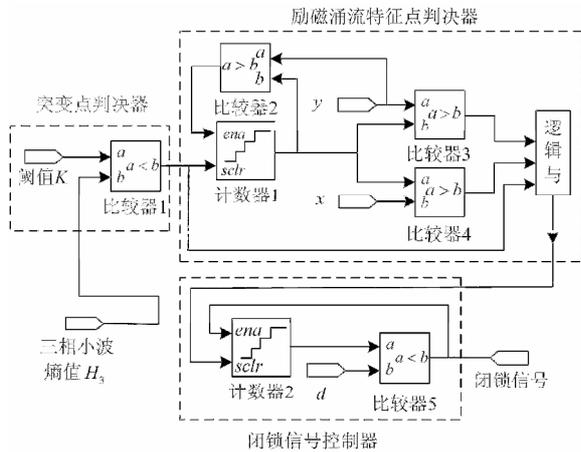


图6 小波熵励磁涌流识别器

Fig. 6 Recognizer of inrush current on wavelet entropy

图6中的 x 为 $1/36$ 个工频周期,这是为了避免对同一突变点的重复判定,同时可以避免内部故障电流因起始突变点不一致而引起的误判; y 为一个工频周期,原因是励磁涌流在一个工频周期内至少会出现一次波形间断现象; d 通常为一个工频周期,其原因与 y 相同并可根据实际需要灵活设置。

为了验证方法的有效性,本文对于变压器各种励磁涌流和内部故障进行了实验。在实验中,把变压器空载合闸、外部故障切除、变压器内部故障的发生时间都设在 $t=8$ s。采用本文提出的励磁涌流识别法得到的结果见表1。

大量实验结果表明,绝大多数情况下保护装置能在 7 ms 内做出判断,所需时间短,并且实现方便,能够满足现代大型变压器对保护动作快速性的要求。

表1 各种实验项目下的突变点和闭锁信号

Table 1 Mutations and block signals of various experiments

编号	实验项目	第一个突变点发生时间/s			闭锁信号 给出时间/s
		A相	B相	C相	
1	空载合闸	8.004 8	8.004 9	8.006 0	8.006 1
2	外部故障切除	8.004 3	8.006 2	8.004 5	8.006 3
3	内部匝间短路	8.003 1	8.003 4	8.004 0	不闭锁
4	内部接地短路	8.000 0	8.000 3	8.000 1	不闭锁
5	内部相间短路	8.000 0	8.000 2	8.000 3	不闭锁
6	内部三相短路	8.001 0	8.001 2	8.001 4	不闭锁

7 结论

(1) 通过移动加窗的方式,可实现对电流突变点的实时检测,同时采用对称延拓的方法能够有效减少边界效应的影响。

(2) 相较于传统的正交小波熵法,双正交小波熵法在电流突变点检测中既能检测出上坡突变点,又对下坡突变点具有较好的检测效果。

(3) 采用差分预处理策略,通过放大高频谐波分量,增强了对于电流突变点检测的敏感性和适应性。通过分析电流突变点的分布,可有效区分变压器励磁涌流和内部故障电流。

参考文献

- [1] 王立大,段周朝. 变压器励磁涌流引起保护误动分析[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(10): 138-140, 144. WANG Li-da, DUAN Zhou-chao. Mal-operation analysis on magnetic inrush current of power transformer[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(10): 138-140, 144.
- [2] 何越,林湘宁,黄景光. 一种直接消除变压器合闸励磁涌流的方法[J]. 电工技术学报, 2011, 26(11): 141-149. HE Yue, LIN Xiang-ning, HUANG Jing-guang. A method to eliminate the magnetizing inrush current of energized transformers[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(11): 141-149.
- [3] 王雪,王增平. 基于广义基波功率的新型变压器主保护方案[J]. 电工技术学报, 2012, 27(12): 191-198. WANG Xue, WANG Zeng-ping. Novel transformer main protection scheme based on generalized fundamental power[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(12): 191-198.
- [4] 孙洋,黄家栋. 基于新型半周期波形正弦特征的励磁

- 涌流判别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(18): 54-58, 68.
- SUN Yang, HUANG Jia-dong. Novel theory of identifying inrush current based on half-cycle sine waveform[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(18): 54-58, 68.
- [5] 马静, 王增平, 吴劼. 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 Zeng-ping, 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.
- [6] 卢雪峰, 王增平, 徐岩, 等. 基于波形间断角原理识别变压器励磁涌流的新方法[J]. 继电器, 2007, 35(增刊 1): 1-4.
- LU Xue-feng, WANG Zeng-ping, XU Yan, et al. A new method to identify inrush current based on the principle of dead angle[J]. Relay, 2007, 35(S1): 1-4.
- [7] 王雪, 王增平. 基于波形时域分布特征的变压器励磁涌流识别[J]. 电工技术学报, 2012, 27(1): 148-154.
- WANG Xue, WANG Zeng-ping. Identification of transformer inrush currents based on waveform distribution characteristics[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(1): 148-154.
- [8] 严屹宏, 陈剑云. 基于小波分析的变压器励磁涌流和内部故障电流识别[J]. 高压电器, 2010, 46(12): 74-77.
- YAN Yi-hong, CHEN Jian-yun. Identification of transformer inrush current and internal fault current on the basis of wavelet analysis[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(12): 74-77.
- [9] 兀鹏越, 余信, 李毅, 等. 变压器励磁涌流抑制器工程应用及探讨[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(6): 145-149.
- WU Peng-yue, YU Xin, LI Yi, et al. Engineering application of transformer excitation inrush suppressor[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(6): 145-149.
- [10] 张荣标, 胡海燕, 冯友兵. 基于小波熵的微弱信号检测方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2007, 28(11): 2078-2084.
- ZHANG Rong-biao, HU Hai-yan, FENG You-bing. Study on weak signal detection method based on wavelet entropy[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2007, 28(11): 2078-2084.
- [11] 李冬辉, 王波, 马跃贤. 基于小波熵神经网络的直流系统环网接地故障检测[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(3): 51-54.
- LI Dong-hui, WANG Bo, MA Yue-xian. Grounding fault detection based on wavelet entropy and neural network for loop net of DC system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(3): 51-54.
- [12] 何正友, 刘志刚, 钱清泉. 小波熵理论及其在电力系统中应用的可行性探讨[J]. 电网技术, 2004, 28(21): 17-21.
- HE Zheng-you, LIU Zhi-gang, QIAN Qing-quan. Study on wavelet entropy theory and adaptability of its application in power system[J]. Power System Technology, 2004, 28(21): 17-21.
- [13] 刘贵喜, 赵曙光, 陈文锦. 双正交小波变换多分辨率图像融合方法[J]. 光电工程, 2004, 31(4): 50-53.
- LIU Gui-xi, ZHAO Shu-guang, CHEN Wen-jin. A multi-resolution image fusion scheme using biorthogonal wavelet transform[J]. Opto-electronic Engineering, 2004, 31(4): 50-53.
- [14] 张炳达, 张硕. 基于能量成分的变压器励磁涌流识别法[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(17): 121-126.
- ZHANG Bing-da, ZHANG Shuo. Identification of transformer inrush current based on energy components[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(17): 121-126.
- [15] 侯正信, 王成优, 杨爱萍. 有限长度信号Mallat算法的边界延拓方法[J]. 数据采集与处理, 2009, 24(6): 714-720.
- HOU Zheng-xin, WANG Cheng-you, YANG Ai-ping. Boundary extension methods for Mallat algorithm of finite length signal[J]. Journal of Data Acquisition Processing, 2009, 24(6): 714-720.

收稿日期: 2013-12-03; 修回日期: 2014-03-31

作者简介:

张炳达(1959-), 男, 教授, 从事变电站培训仿真、电能质量监测与控制等方面的研究;

黄杰(1990-), 男, 硕士研究生, 主要从事变压器励磁涌流方面的研究。E-mail: tju_hj90@sina.com