

小波变换识别变压器励磁涌流和故障电流的新方法

冯小玲¹, 郭 袅², 谭建成², 李振然²

(1. 西安理工大学自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710049; 2. 广西大学电气工程学院, 广西 南宁 530004)

摘要: 利用小波变换对变压器两侧的电流信号进行分解, 得到突变点的故障跳乘积符号, 从而准确地区分励磁涌流和故障电流。利用实时数字仿真器 (RTDS) 对不同内部故障类型和励磁涌流进行了仿真, 算法不受最严重故障 (带故障空载投入) 以及严重 CT 饱和情况的影响。

关键词: 内部故障; 外部故障; 励磁涌流; 小波变换; 故障跳

中图分类号: TM41; TM77 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897 (2005) 11-0031-06

0 引言

区分励磁涌流和内部短路电流是变压器保护的关键问题。目前应用的主要区别方法有两种: 二次谐波制动原理和间断角原理。但是近年来随着变压器容量越来越大, 越来越长的输电线路所引起的分布电容以及电流互感器饱和等因素使得内部故障电流也含有较大的二次谐波, 有时甚至超过励磁涌流; 而现代先进的变压器制造工艺和材料, 使励磁涌流所含二次谐波分量减少。这导致了二次谐波制动的继电器必须经过一定延时才能做出判断, 破坏了变压器保护要求的快速性。而间断角法的保护硬件成本很高并受 CT 饱和的影响, 使得该原理在微机保护的的实际应用中受到限制。因此人们提出了很多新的变压器保护方案。文 [1] 用小波系数的平方加权之和算出信号的能量, 根据涌流和内部故障的能量分布不同来区分二者。文 [2] 利用小波分析提取励磁涌流的间断角特征来识别涌流和短路电流, 但是对于干扰较严重的现场, 可靠性较低。文 [3, 4] 联合了小波和人工神经网络来区分。这些算法大都比较较好地解决了涌流和内部短路的识别, 但在计算量方面和实际系统的训练样本的获得上都存在一些问题, 且采样用的是二次侧电流, 而保护处理的是 CT 传变的二次侧电流, 不适用于实际应用。文 [5, 6] 构造了新的基本小波利用小波变换结果的能量值与原始电流波形的能量值之比作为判据, 但计算量较大。本文在文 [7] 的基础上利用小波对变压器两侧信号进行分解, 得到故障跳乘积符号来区分励磁涌流和内外故障, 不受 CT 饱和的影响。采用实时研究电力系统电磁暂态的数字仿真系统 RTDS^[8] 对算法进行仿真分析。仿真结果表明该算法具有较高可靠性和鲁棒性, 而且相对别的小波应用减小了计算量。

1 小波概论

当电力系统故障时, 其暂态信号具有持续时间短、所占频带宽等特点, 传统的傅里叶和加窗傅里叶变换均难以对其进行有效的分析。而小波变换是一个有力的分析工具, 它既具有 Fourier 的变换和反变换的性质, 同时又具备时间窗和频率窗性质, 且相应的时频窗又是可调的。它的多尺度分析和时-频局部化特性, 特别适用于边缘和峰值突变信号的处理和特征抽取。下面对小波变换进行简单介绍。

1.1 小波变换定义

设 $(t) \in L^2(R)$ ($L^2(R)$ 表示平方可积的实数空间, 即能量有限的信号空间), 其傅里叶变换为 $\hat{f}(\omega)$ 。当 $\hat{f}(\omega)$ 满足允许条件:

$$C = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} |\hat{f}(\omega)|^2 d\omega}{\int_{-\infty}^{\infty} |\hat{f}(\omega)|^2 d\omega} < \infty \quad (1)$$

时, 称 (t) 为一个基本小波或母小波。

对于连续的情况, 小波序列为

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right), \quad a, b \in R; a > 0 \quad (2)$$

其中: a 为伸缩因子, b 为平移因子。

对于任意的函数 $f(t) \in L^2(R)$ 的连续小波变换为

$$W_f(a, b) = \langle f, \psi_{a,b} \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \overline{\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)} dt \quad (3)$$

在实际使用时, 将 a, b 离散化, 则 $\psi_{a,b}$ 变为:

$$\psi_{j,k}(t) = 2^{-j/2} \psi(2^{-j}t - k) \quad (4)$$

本文采用的是 daubechies4 (db4) 小波函数, 将电流信号分解到第 5 尺度 ($j=5$)。图 1 为 db4 小波的尺度函数和小波函数。

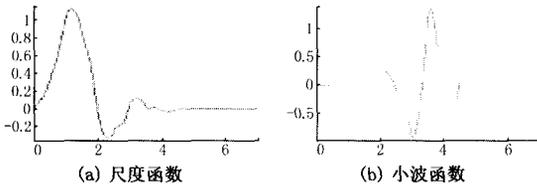


图 1 db4的尺度函数和小波函数

Fig 1 Scale function and wavelet function of db4

1.2 小波变换极值点表示信号奇异点原理

由信号变换的奇异点在多尺度上的综合表现来表示信号(特别是它们的突变或瞬时特征)是小波变换引人注意的一个应用领域。利用小波变换的过零点或极值点来检测信号的突变点,设 $\psi_a(t)$ 是某一低通平滑函数:

$$\psi_a(t) = \frac{1}{\sqrt{2}} e^{-\frac{t^2}{2}} \quad (5)$$

任何一个低通平滑函数 $\psi_a(t)$,

$$\int_{-\infty}^{\infty} \psi_a(t) dt = 0 \quad (6)$$

的各阶导数必定是带通函数,因为当 $t=0$ 时,它们为 0。因为根据傅里叶变换的微分定理,它们的频率特性在 $\omega=0$ 必有零点。因此,

$$\psi_a^{(1)}(t) = \frac{d}{dt} \psi_a(t), \quad \psi_a^{(2)}(t) = \frac{d^2}{dt^2} \psi_a(t) \quad (7)$$

都可用作小波变换的基本小波。把上述两个基本概念结合起来便得到下述结论:

1) 如果 $\psi_a(t)$ 是某一低通平滑函数 $\psi_a(t)$ 的一阶导数,则可用 $\psi_a^{(1)}(t)$ 对 x_i 作小波变换。此时小波变换的极值点是 $(dy/dt=0)$ 之处 ($y(t)$ 是 x_i 被 $\psi_a(t)$ 平滑后的结果),也就是 $y(t)$ 的转折点。

2) 如果 $\psi_a^{(2)}(t)$ 是平滑函数 $\psi_a(t)$ 的二阶导数,则可用 $\psi_a^{(2)}(t)$ 对 x_i 作小波变换。此时小波变换的过零点就是 $y(t)$ 的转折点 ($dy/dt=0$)。

这些结论对基本小波的伸缩

$$\psi_a^{(1)}(t) = \frac{1}{a} \psi_a^{(1)}\left(\frac{t}{a}\right), \quad \psi_a^{(2)}(t) = \frac{1}{a} \psi_a^{(2)}\left(\frac{t}{a}\right) \quad (8)$$

也同样适用。

要使得有效地检测局部突变,必须满足适当条件,首先, $\psi_a(t)$ 应是一个平滑函数的一、二阶导数。其次,尺度 a 必须适当,以便一方面使 $y(t)$ 的突变点基本上能反映分析信号 $x(t)$ 的突变点;另一方面,只有在适当尺度下各突变点引起的小波变换才能避免交叠干扰。

2 励磁涌流小波变换特征

2.1 变压器空载投入

励磁涌流是在变压器空载投入时或在外部故障清除后电压恢复时所引起的,幅值可能高达额定电流的 8 倍以上。而在变压器正常运行时,励磁电流很小(不超过额定电流的 2%~10%)。励磁涌流的产生主要是与变压器的主磁通有关,励磁涌流时主磁通公式如下:

$$\phi_1 = -\phi_m \cos(\omega t + \alpha) + [\phi_m \cos \alpha] e^{-\frac{r_1}{L_{av}} t} \quad (9)$$

式中: ϕ_m 为稳态时的磁通幅值; α 为外施电压初相角; r_1 为初级绕组的电阻; L_{av} 为正常运行时的平均电感。

图 2 为通过仿真器 RDS 仿真三相变压器在 $t=0.1$ s 空载投入时两侧原始励磁涌流波形。

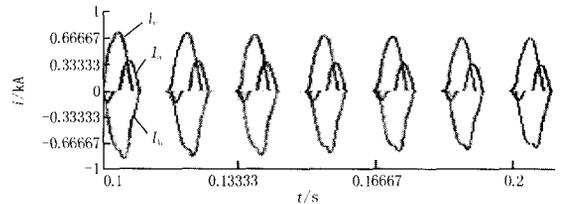


图 2 典型三相励磁涌流波形(两侧)

Fig 2 Typical three-phase inrush current on both ends

研究表明^[9],对于三相变压器来说,无论在任何瞬间合闸,至少有两相要出现程度不同的励磁涌流,副边侧三相励磁涌流全部接近于 0。从两侧励磁涌流波形图 2 中可以看出,变压器励磁涌流 i_L 仅流经变压器的接入电源的一侧,因此通过电流互感器反映到差动回路中不能被平衡。利用涌流仅流经某一侧的特点,对两侧涌流信号进行小波变换。图 3 显示了小波变换后的波形。

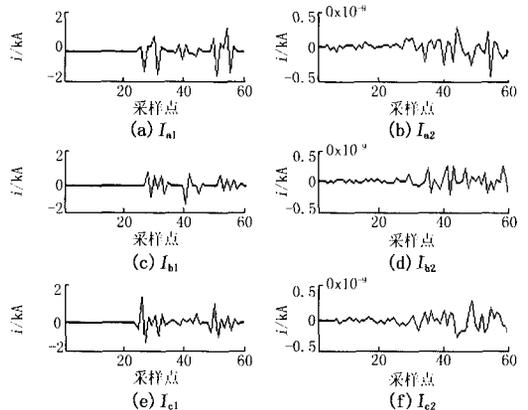


图 3 励磁涌流小波变换后图形(空载投入) $j=5$

Fig 3 Pattern of spikes at the ends of transformer in case of inrush(energized without load) when $j=5$

图 3(a)、3(c)、3(e)是原边侧小波变换后的励磁涌流,由于励磁涌流含有衰减的非周期分量,畸变程度很大,因此每个工频周波都有很多奇异点。而图 3(b)、3(d)、3(f)是变压器空载投入时副边侧小波变换后的励磁涌流,副边侧电流幅值几乎接近于零 (10^{-9}),因此无突变的奇异点。

2.2 外部故障清除后变压器投入

产生励磁涌流的另一种情况是当故障清除后电压恢复时,一侧为励磁涌流,另一侧为正常的正弦波电流,因此图 4(a)、4(c)、4(e)显示一侧电流小波变换后有突变的奇异点,而图 4(b)、4(d)、4(f)显示另一侧无突变的奇异点,检测结果如图 4。

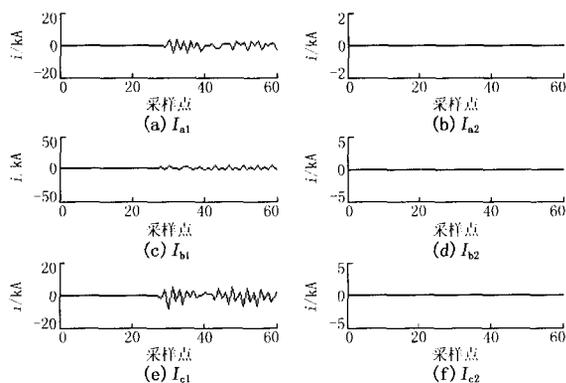


图 4 励磁涌流小波变换后图形 (清除外部故障后) $j=5$

Fig 4 Wavelet transform at the ends of transformer in case of inrush (after clearing external faults) $j=5$

2.3 考虑最严重情况 (带故障空投)

变压器空载投入最严重情况是带故障投入,测试当 $t=0.1$ s 时发生 A 相接地故障,此时变压器空载投入,故障持续时间为 0.2 s 时的电流原始波形。仿真图形如图 5。

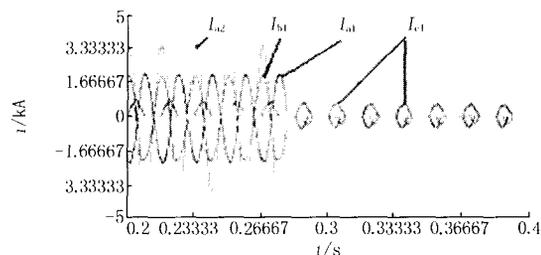


图 5 变压器空投发生内部故障时原、副边侧三相电流

Fig 5 Primary and secondary internal three-phase current with inrush current

图形显示出原边侧 A、B 相流过幅值较大的正弦电流, C 相始终是典型励磁涌流。而副边侧 A 相流过幅值较大的故障电流, B、C 两相电流为 0。两侧 A 相电流方向相反。两侧电流小波变换后得到如图 6。

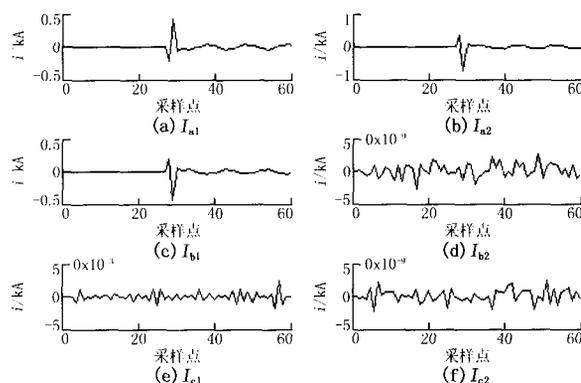


图 6 空投故障时三相电流小波变换

Fig 6 Wavelet transform on of three-phase current with inrush on internal fault

从图 6 中可明显看出两侧 A 相模极大值方向相反,而 B、C 两相副边侧无模极大值 (10^{-9})。

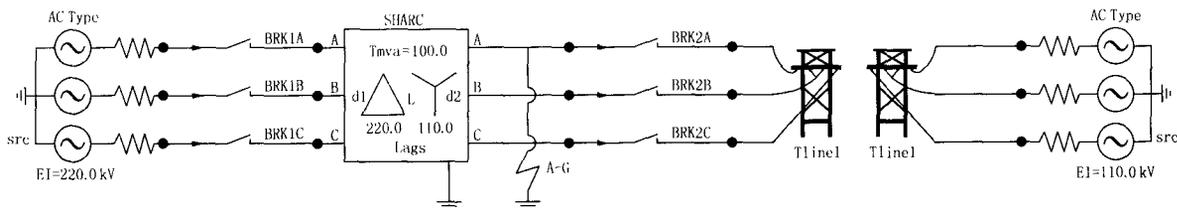


图 7 仿真系统接线图

Fig 7 Wiring diagram of simulation power system

3 故障电流小波变换特征

3.1 变压器内部 A 相接地故障

仿真采用双电源带长线系统如图 7 所示,当 $t=0.1$ s 时发生内部 A 相接地故障,持续时间为 0.2 s,

用 db4 分别对 A、B、C 三相故障电流进行小波变换,分解到第 5 尺度,提取第 5 尺度的一维小波变换高频系数 ($j=5$)。分析结果如图 8 中 a、b、c、d、e、f 所示。

图 8(a)、8(b)明显反映了两侧 A 相小波变换后模极大值符号相反。图 8(c)中 B 相原边侧有模

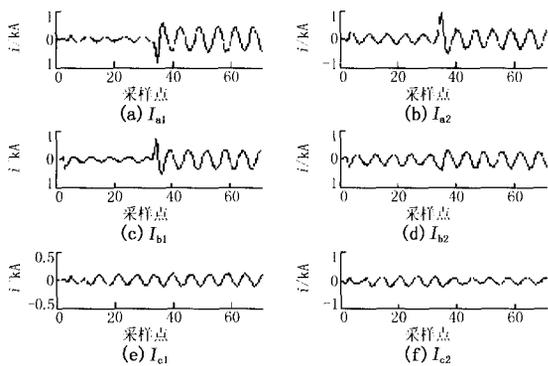


图 8 变压器两侧三相电流小波变换

Fig 8 Wavelet transform 8(a) and 8(b) of three-phase current at the ends of transformer with an internal fault

极大值,图 8(d)中 B 相副边侧无模极大值,图 8(e)、8(f)表示 C 相原副边均无模极大值。

3.2 考虑 CT 暂态饱和和小波变换的特征

暂态饱和和主要由非周期分量所引起的电流互感器暂态饱和。仿真当 A 相发生短路时,发生 CT 暂态饱和,图 9 显示了 CT 饱和时小波变换后的内部短路电流。

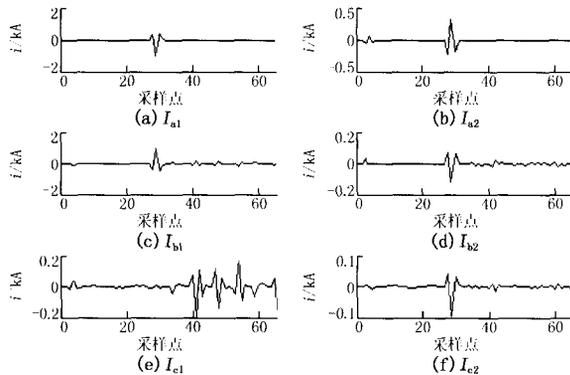


图 9 CT 饱和时小波变换后的内部短路电流

Fig 9 Internal short-circuit current on CT s saturation

从图 9 可看出 A 相内部短路时,由于 CT 饱和导致 B 相电流发生畸变,使得 B 相两侧模极大值的符号也相反,但 A 相仍然符号相反,基本上不受 CT 饱和的影响。

3.3 变压器外部 A 相接地故障

当变压器在 $t=0.1$ s 时发生 A 相外部接地故障,持续时间为 0.2 s 时,A 相电流的小波变换如图 10 所示。

从图 10 中可看出当发生外部故障时,两侧电流的小波变换后的模极大值符号相同。

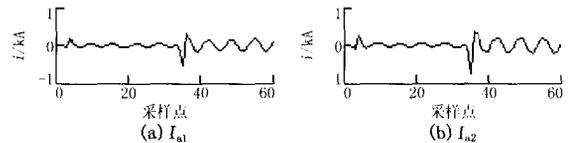


图 10 外部故障时两侧 A 相电流

Fig 10 Phase a current at the ends of transformer with an external fault

4 特征提取及算法

4.1 特征提取和判据构造

从小波变换后的图形可以明显看出信号的突变点对应小波变换后模极大值。根据励磁涌流仅流经一侧的特点,空投和清除故障后投入变压器两种情况所产生的励磁涌流,都必有一侧小波变换后无模极大值。而内部短路电流在故障发生时,两侧具有符号相反的模极大值。当发生外部故障时,两侧具有符号相同的模极大值。为了便于后面的描述,规定大于整定门槛值(常数 K)的模极大值称为故障跳。

根据图形得到门槛值常数 K 的取值范围如下

无故障跳范围: $[1E-9, 1E-3]$

有故障跳范围: $[1E-2, 1E-1]$

提取各种波形图特征如下:

1) 当变压器空载投入产生励磁涌流时,原、副边侧故障跳的乘积等于 0。

2) 当变压器内部短路时,同一时刻两侧 A 相电流的故障跳符号相反,因此原副边故障跳乘积小于 0,非故障相 B、C 故障跳乘积等于 0。

3) 当变压器外部故障时,两侧故障跳符号相同,因此原副边故障跳乘积大于 0。

4) 当变压器带故障空投时,两侧故障相的故障跳的符号相反,两侧故障跳乘积小于 0。

4.2 新的判据

综上所述,构建新的内部故障判据如下:

以信号小波变换的故障跳为标志 ($K=1E-2$)。设原副边侧故障跳乘积符号为 S 。

$$|i_1(t)| > K \quad (10)$$

$$|i_2(t)| > K \quad (11)$$

$$S = i_1(t) \times i_2(t) < 0 \quad (12)$$

公式中 $i_1(t)$ 、 $i_2(t)$ 表示在 t 时刻两侧 CT 二次侧电流的小波变换后的电流值。

判据解释如下:

对变压器两侧 CT 的二次侧电流数据进行采样,载入 Matlab 里得到两侧电流的小波变换。

1) 当两侧电流值满足判据 (10)、(11) 为故障跳, 取两侧的故障跳的值进行相乘, 若满足判据 (11), 则为内部故障, 不满足为外部故障。

2) 当两侧满足判据 (10)、(11) 其中一个, 则令不满足的一侧为零, 此时一定不满足判据 (12), 则为励磁涌流。

3) 当两侧均不满足判据 (10)、(11), 则为正常运行。

同时检测变压器三相的故障跳乘积, 判断结果取逻辑或, 有一相满足判据 (10)、(11)、(12) 即是内部故障, 继电器动作出口跳闸。算法流程如图 11。

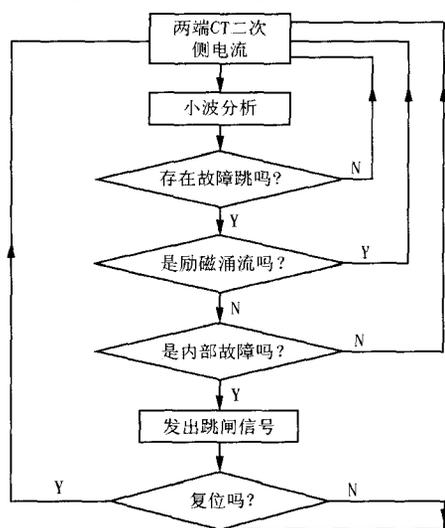


图 11 算法流程图

Fig 11 Flow chart of the proposed algorithm

表 1 两侧励磁涌流和各种故障类型的故障跳乘积

Tab 1 The products of fault jump of inrush and kinds of faults at the ends of transformer

	故障类型	I_A 的乘积	I_B 的乘积	I_C 的乘积
三相励磁涌流		=0	=0	=0
内部单相短路	A - G	<0	=0	=0
	B - G	=0	<0	=0
	C - G	=0	=0	<0
内部三相短路	A - B - C	<0	<0	<0
内部两相短路	A - B	<0	<0	=0
	B - C	=0	<0	<0
	A - C	<0	=0	<0
空投时	A - G	<0	<0	=0
内部单相短路	B - G	=0	<0	=0
	C - G	=0	=0	<0
外部单相短路	A - G	>0	=0	=0
	B - G	=0	>0	=0
	C - G	=0	=0	>0

本文分析了变压器内、外部各种故障类型以及在空载投入时的小波变换, 该判据均可精确地区分励磁涌流和内部故障以及外部故障。表 1 给出了变压器两侧三相电流故障跳乘积测试结果。

5 结论

小波分析具有多尺度分析和良好的时频局部化特性, 可以准确地捕捉突变信号特征。本文提出了基于小波变换来区分励磁涌流和内部短路电流的新方法。根据励磁涌流具有仅流经变压器一侧且小波变换后一侧无故障跳的特点, 以及内部故障两侧具有符号相反故障跳的特点, 构建了新的算法, 并利用优秀的实时数字仿真系统 RTDS 进行仿真, 仿真证明了所提出的判据简单, 计算量小, 且能在故障或是空载合闸瞬间迅速做出判断, 不受带故障空载合闸和严重 CT 饱和的影响。新判据从原理上根本解决了现代变压器励磁涌流所含二次谐波逐渐减少而导致继电器延时的问题。但是从测试结果中也可看出两点不足: 其一, 当发生 CT 饱和时该方法有时不能完全判断出故障相别, 这点还需要在现场测试中进一步进行检验; 其二, 硬件采样频率偏高, 此不足随着日后硬件的发展会逐步得到解决。

参考文献:

- [1] Mois G G ómez-Morante, Denise W, Nicoletti A. Wavelet-based Differential Transformer Protection [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1999, 14(4).
- [2] 焦邵华, 刘万顺, 刘建飞, 等. 用小波理论区分变压器的励磁涌流和短路电流的新原理 [J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(7): 1-6
JIAO Shao-hua, LIU Wan-shun, LIU Jian-fei, et al A New Principle of Discrimination between Inrush Current and Fault Current of Transformer Based on Wavelet [J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(7): 1-6
- [3] Mao P L, Aggarwal R K. A Novel Approach to the Classification of the Transient Phenomena in Power Transformers Using Combined Wavelet Transform and Neural Network [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2001, 16(4).
- [4] 王莉丽, 荣雅君. 基于小波神经网络的变压器励磁涌流和内部故障电流识别 [J]. 继电器, 2003, 31(7): 20-22
WANG Li-li, RONG Ya-jun Discrimination between Inrush Current and Internal Fault Current of Transformer Based on Wavelet Neural Network [J]. Relay, 2003, 31(7): 20-22
- [5] 张传利, 黄益庄, 马晓旭, 等. 改进递归小波在变压器

- 保护中的应用研究 [J]. 电力系统自动化, 1999, 23 (17): 20-22
- ZHANG Chuan-li, HUANG Yi-zhuang, MA Xiao-xu, et al Study on Relaying Protection for Transformer Applying RWT[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23 (17): 20-22
- [6] 张秀川, 黄益庄. 二次 B 样条小波变换的快速算法及其在变压器保护中的应用 [J]. 继电器, 2004, 32 (1): 32-36
- ZHANG Xiu-chuan, HUANG Yi-zhuang A Fast Algorithm of 2B-spline Wavelet Transform and Its Application to Transformer Protection [J]. Relay, 2004, 32 (1): 32-36
- [7] Wong Chi-kong, Lam Chi-wai, Lei Kuok-cheong, et al Novel Wavelet Approach to Current Differential Pilot Relay Protection [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2003, 18 (1).
- [8] 梁志成, 马献东, 王力科. 实时数字仿真器 RTDS 及其应用 [J]. 电力系统自动化, 1997, 21 (10): 61-64
- LIANG Zhi-cheng, MA Xian-dong, WANG Li-ke Real-time Digital Simulator (RTDS) and Its Applications [J]. Automation of Electric Power Systems, 1997, 21 (10): 61-64.
- [9] 孙国凯, 霍利民, 柴玉华. 电力系统继电保护原理 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2002
- SUN Guo-kai, HUO Limin, CHAI Yu-hua Principle of Power System Relay Protection [M]. Beijing: China Water Power Press, 2002

收稿日期: 2004-08-16; 修回日期: 2004-11-25

作者简介:

冯小玲 (1979 -), 女, 硕士研究生, 主要从事电力系统继电保护的研究; E-mail: haoduchun@126.com

郭 袅 (1980 -), 女, 硕士研究生, 主要从事电力系统继电保护及安全稳定控制的研究;

谭建成 (1963 -), 女, 教授, 博导, 主要从事电力系统运行规划及继电保护的研究。

A new wavelet transform approach to discriminate magnetizing inrush current and fault current

FENG Xiao-ling¹, GUO Niao², TAN Jian-cheng², LI Zhen-ran²

(1. Automation and Information Engineering Department, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710049, China;

2. Electrical Engineering Department, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: Current signals at both sides of transformer are analyzed by wavelet transform. The sign of fault jump's product is used to discriminate magnetizing inrush current and fault currents. Different types of internal faults and magnetizing inrush are simulated by Real-time Digital Simulator (RTDS), this approach is not affected by the severe fault that transformer is energized without load when internal fault occurs and CTs saturate.

Key words: internal fault; external fault; magnetizing inrush; wavelet transform; fault jump

西安远征 YZ 系列综合微机保护装置达到国内先进水平

日前, 西安市远征科技有限公司开发生产的“YZ 系列综合微机保护装置”通过了省级新产品鉴定。

该系列产品是电力系统自动化的基础装置, 集测量、保护、控制、通讯、事件追忆等功能于一体, 可以替代传统保护系统, 从而实现开关的智能化控制, 使系统运行更加安全可靠, 具有多种功能高度集成、灵活的配置、高可靠性、友好的人机界面等特点。

本次鉴定会由陕西省工业交通办公室组织并主持, 以沈绪榜院士为首的与会专家听取了远征公司关于该系列产品的技术总结和研制报告、生产工艺报告、企业标准、产品检测报告、经济效益分析报告、用户使用报告等, 审查了有关技术文件, 并考察了生产现场。经过认真讨论, 一致认为: 该系列产品具有设计理念先进、功能强大、操作使用简捷、性能稳定可靠等优点, 已达到国内同类产品先进水平。

YZ 系列综合微机保护装置融合了计算机技术、传感器技术、数据处理技术、通讯技术、电力电子技术等多项高新技术, 集保护、测量、控制、通讯等多功能于一体, 具有设计理念先进、功能强大独特、人机界面友好、操作使用简捷、性能稳定可靠等优点。目前, 该产品获得了“西安名牌产品”称号, 并且通过了国家继电器监督检验中心检验。