

基于小波变换的电力变压器继电保护研究

刘 军 薛 蓉 王得发

(青岛科技大学 自动化与电子工程学院 青岛 266042)

摘要:以小波变换中多分辨分析为理论依据,对电流信号进行多尺度小波分解,提取各尺度高频段能量,提出小波能量法,该方法以不同尺度能量变化之比为判据,对变压器的励磁涌流和内部短路电流进行区分。使用 SIMULINK 搭建模型对励磁涌流与短路电流的仿真,得到两者波形。通过小波工具箱提取两者的高频系数,得到各尺度能量。仿真实验结果表明,该方法计算简单便利,能够对励磁涌流和短路电流进行有效地区分。

关键词: 变压器;励磁涌流;小波变换;小波能量法;MATLAB

中图分类号: TP2 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.4017

Research on power transformer relay protection based on wavelet transform

Liu Jun Xue Rong Wang Defa

(College of Automation and Electronic Engineering, Qingdao University of Science & Technology, Qingdao 266042, China)

Abstract: In this paper a new method based on multi-resolution analysis of wavelet transform is presented to distinguish the inrush current and internal faults with the ratio of energy change rate as the criterion. This algorithm is called the wavelet energy method. This research uses SIMULINK to build simulation models of inrush current and short-circuit current to get waveforms of them. The high frequency coefficients of the two are extracted by wavelet toolbox, and the energy of each scale is obtained. Simulation results show that the method is simple, convenient and it is capable to distinguish inrush current and short-circuit currents effectively.

Keywords: transformers; inrush current; wavelet transform; the wavelet energy method; MATLAB

1 引言

在电力系统中,经常会根据需要对电压进行升高或降低,因此,电力变压器被广泛地使用在电力系统之中,具有举足轻重的地位。如果电力变压器发生故障,电力系统的供电可靠性和安全运行将受到直接影响。而且,大容量的电力变压器价格不菲,是非常贵重的电气设备。因此,为了保证电力系统安全、稳定和经济运行,电力变压器继电保护多年来一直是主要的研究对象。在变压器保护当中,励磁涌流和内部故障电流的甄别一直是重中之重^[1,9]。

目前判别励磁涌流的方法有利用二次谐波制动原理、间断角原理、波形对称原理等,但实践证明,这些原理均有弊端^[2]。以二次谐波制动原理为例,已知励磁涌流中含有大量二次谐波分量,该方法根据励磁涌流的这一特点,设置二次谐波含量整定值,当设备检测到差电流中的二次谐波含量大于该整定值时,闭锁差动保护继电器,从而防止了励磁涌流引起的保护误动作。通常,整定按二次谐波制动比 $K=15\% \sim 20\%$, K 即二次谐波分量的含量比例。而根据

实践可知,励磁涌流严重时,二次谐波的含量会小于 15%,此时可能会引起保护误动作;如果降低 K 的整定值,内部故障时差动保护会因为要等待短路电流中二次谐波含量的衰减,从而延长了动作时间,降低了动作速度,影响保护效果^[3]。其他几种鉴别方法,也都或多或少存在缺陷和不足。近年来,随着研究的深入,针对几种鉴别方法分别做出了改进和提高,形成新的鉴别方法,例如二次谐波自适应制动涌流法,波形时域分布特征系数法,基于有功和功率因数法等^[4-8]。

本研究针对二次谐波制动方法的不足之处,不直接检测二次谐波的含量,而是根据励磁涌流(空载合闸所产生)中二次谐波含量通常大于三次谐波含量,对两者的含量进行比较,从而对励磁涌流和短路电流进行鉴别。本文首先建立模拟励磁涌流和短路电流电路,提取电路中的电流信号,对其进行小波分析,得到各尺度高频系数,并以此计算高频段能量以及能量变化率的比值。由于该比值能够展现出电流中各次谐波含量的变化,故将其作为特征值,以区分

变压器励磁涌流和短路电流。经过仿真计算,从结果可以看出,此方法行之有效,简单可靠,同时具有理论和应用前景。

2 小波变换

小波变换(wavelet transform, WT)是一种近年来发展迅速的变换分析方法,基于时频局部化的思想,它能够提供一个随频率改变的“时间-频率”窗口,克服了原有变换方法窗口大小不随频率变化等优点,是理想的数字信号处理工具,尤其是分析非平稳变换信号或奇异性突变信号,效果最突出。理论上说,小波变换可以用在大部分傅里叶变换适用的场合,而小波变换还具有很多优点是傅里叶变换没有的,因此,小波变换的应用空间会愈加广泛。

设基小波 $\Psi(t) \in L^2(R)$ 满足容许性条件:

$$C_\Psi = \int_0^\infty \frac{|\bar{\Psi}(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega < \infty \quad (1)$$

式中: $\bar{\Psi}(\omega)$ 是 $\Psi(t)$ 的傅立叶变换的共轭。由 $\Psi(\omega)$ 生成一个函数族:

$$\Psi_{a,b}(t) = |a|^{-1} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad a, b \in \mathbf{R}, a \neq 0 \quad (2)$$

$\Psi_{a,b}(t)$ 称为小波函数(wavelet function),其中 a, b 分别为尺度伸缩(scale dilation)参数和时间平移(time translation)参数。信号 $f(t) \in L^2(R)$ 的连续小波变换定义为:

$$W_f(a, b) = [f, \Psi_{a,b}] = |a|^{-1} \int_R f(t) \bar{\Psi}\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (3)$$

式中: $\bar{\Psi}_{a,b}(t)$ 是 $\Psi_{a,b}(t)$ 的共轭。

3 多分辨率分析与 Mallat 算法

空间 $L^2(R)$ 中的任意函数都可以用一连续函数逼近,如果把函数 $f(t) \in L^2(R)$ 看成是某一逐级逼近的极限情况。那么,对它进行的每一级逼近都是用一个低通平滑函数 $\Phi(t)$ 对函数 $f(t)$ 做平滑效果。在逐级逼近 $f(t)$ 时,平滑函数 $\Phi(t)$ 也做逐级地伸缩,这就是“多分辨率分析”,即用不同的分辨率来步步逼近函数 $f(t)$,或者说,把尺度函数的空间不断进行有序地递推分解的过程。

若将函数 $f(t)$ 在小波基下分解为各分量之和,则 $f(t)$ 可以表示为:

$$f = f_0 + w_0 + w_1 + \dots + w_j \quad (4)$$

式中: f_0 和 w_j 分别为函数 $f(t)$ 在尺度空间与小波空间的投影,即函数 $f(t)$ 的近似部分与细节部分。近似部分属于低频部分,细节部分属于高频部分,他们分别可用尺度函数 $\Phi_{j,k}(t)$ 和小波函数 $\Psi_{j,k}(t)$ 分解得出。

基于多分辨率分析, Mallat 引入了一种快速算法。该算法能够计算隔离栅格上的小波变换,使小波变换理论登上了一个新的高度。通过 Mallat 算法,初始信号将被低通滤波与高通滤波器分解为近似(低频)部分与细节(高频)部

分,之后进行二抽取,其网络结构示意图如图 1 所示。

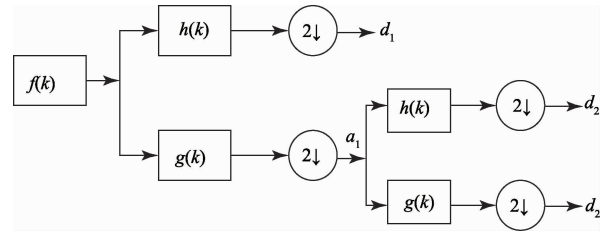


图 1 Mallat 算法的网络级联结构图

4 小波能量法

从多分辨率的分析中可以看出,小波函数 $\Psi_{j,k}(t)$ 与尺度函数 $\Phi_{j,k}(t)$ 在相同的尺度下正交。根据 Parseval 能量守恒定理,信号在时域上的能量等于其在频域上的能量,在完备正交函数集中应满足:

$$\int_R |f(t)|^2 dt = \sum_{k \in \mathbf{Z}} |c|_k|^2 + \sum_{j=1}^J \sum_{k \in \mathbf{Z}} |d|_k|^2 \quad (5)$$

对信号 $f(t)$ 进行小波分解后,其在时域上的能量就等于低频系数与高频系数的平方和。由此可知,信号经小波变换后的能量与原始信号的能量也是对等的,所以我们可以用小波变换后的结果来描述原始信号的能量分布。

经分析可知,不同的信号进行小波分解时,因为其各次谐波含量不同,所以其各个频带的能量分布是不同的。当对信号进行多尺度分解时,我们可以得到能量分布曲线。不同的信号,能量特征曲线的特征值是不一样的,由此可以用它来作为鉴别信号的判据。定义细节能量函数:

$$E(j) = \log_2 \left(\sum_{k \in \mathbf{Z}} |d_{j,k}|^2 \right) \quad (6)$$

式中: j 是尺度。根据后文展示的仿真结果可以看到,励磁涌流与短路电流是特征不同的电流信号,因此所含的各次谐波不同,对其进行小波分解后,各频段的能量分布也不同。相邻尺度高频段上能量的变化率可以定义为:

$$K_i = \frac{E(i+1) - E(i)}{(i+1) - i} \quad (i = 1, 2) \quad (7)$$

变化率的比值为:

$$K = \frac{K_1}{K_2} = \frac{E(j+1) - E(j)}{E(j+2) - E(j+1)} \quad (8)$$

它能够反映出不同尺度间高频段上的能量变化情况,取其作为判据,能够有效区分励磁涌流与短路电流。当 $K > M$ 时,判断其为励磁涌流;当 $K < M$ 时,其为内部短路电流。其中 M 是阈值。

5 仿真及结果分析

利用 SIMULINK 中的 PSB 工具箱构建仿真模型,对励磁涌流与短路电流进行模拟仿真。图 2 为励磁涌流仿真模型。图 3 为短路电流仿真模型。

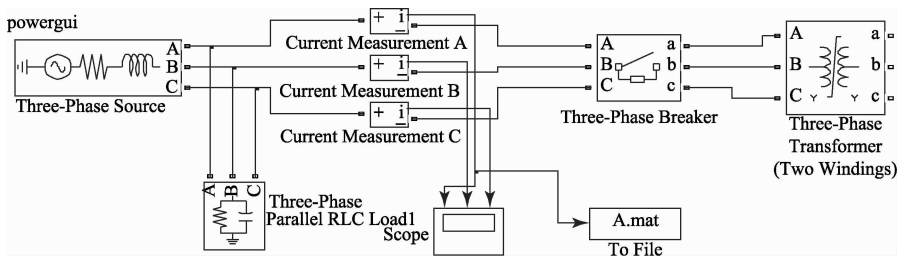


图 2 励磁涌流仿真模型

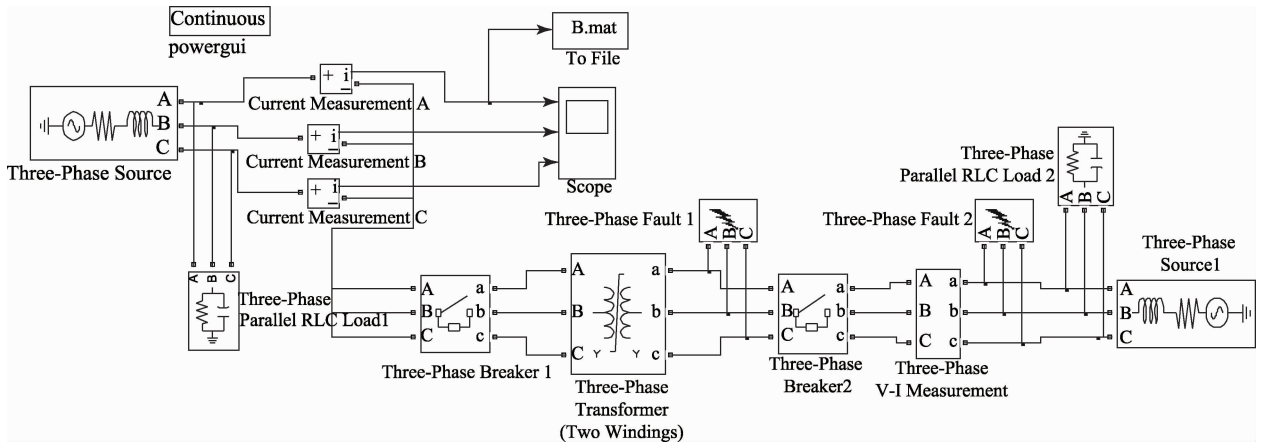


图 3 短路电流仿真模型

利用上面所示的模型进行仿真后,得到图 4 为 A 相励磁涌流的仿真波形,图 5 为 A 相短路电流的仿真波形。

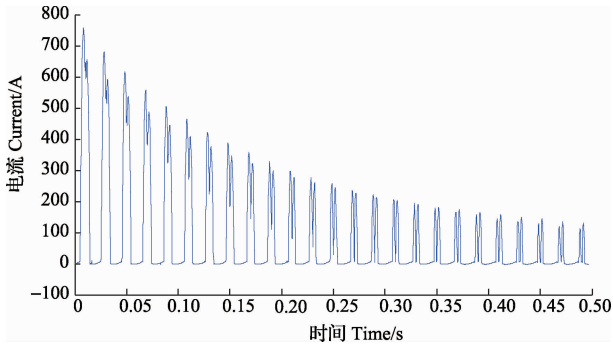


图 4 A 相励磁涌流的仿真波形

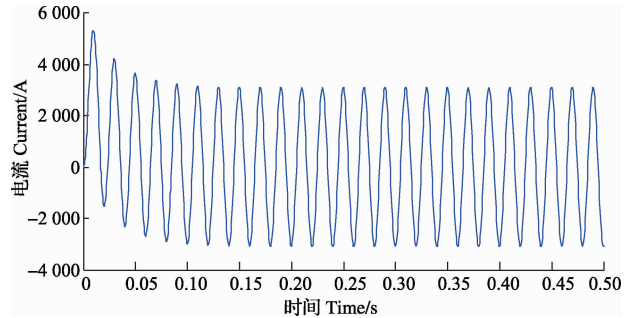
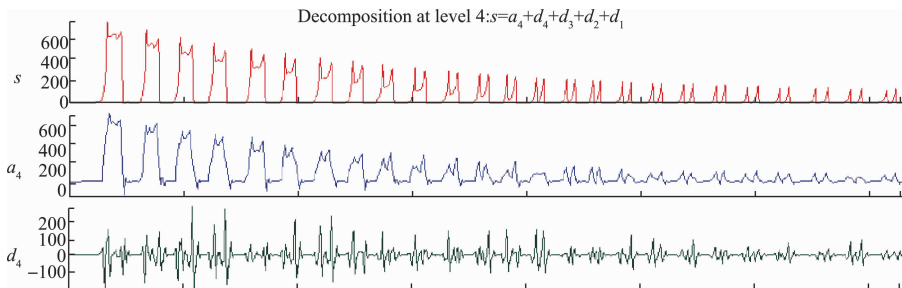


图 5 A 相短路电流的仿真波形

将所得电流信号载入 MATLAB 小波工具箱,采用 db2 小波函数,进行 4 尺度小波分解,得到如图 6、图 7 所示结果。



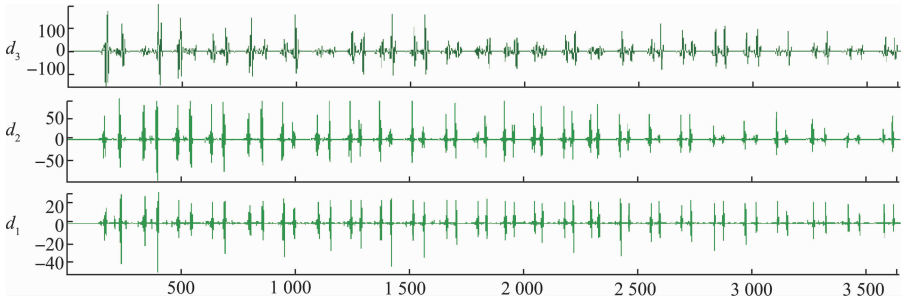


图 6 励磁涌流的小波分解

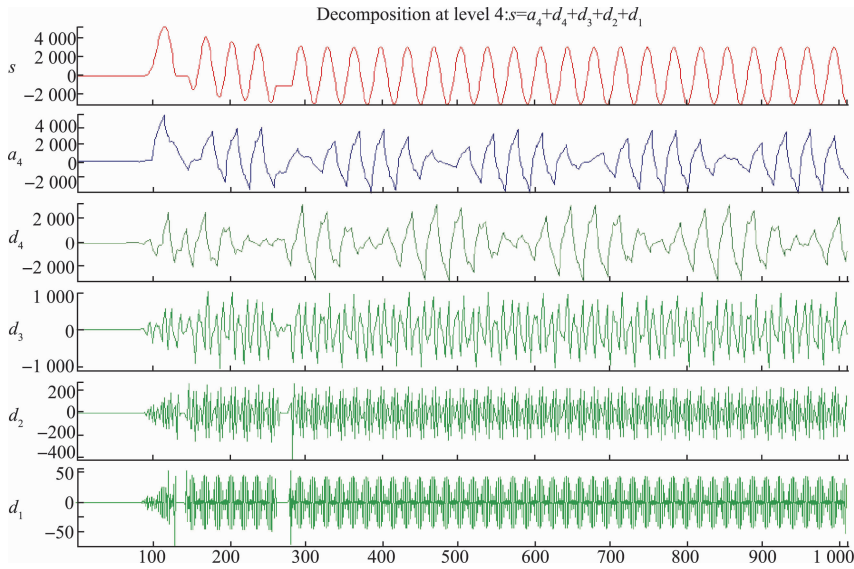


图 7 短路电流的小波分解

不同尺度上各次谐波的分布不同,具体分布情况如表 1 所示。不同信号所包含的谐波分量不同,进行小波变换后,得到的小波系数也不同。因此,根据前文所讲,能量在不同尺度上的分布情况也会有所差别。具体的分布情况如表 1 所示^[10]。

表 1 电流信号经小波变换各次谐波的分布情况

尺度	2 尺度	3 尺度	4 尺度
谐波分布	3 次、4 次谐波	2 次谐波	基波

当式(7)中的 i 值取 1,得到 $K_1 = E(3) - E(2)$,表现 2 尺度与 3 尺度上的能量差,即电流信号中所含二次谐波与三次谐波的能量差;当式(7)中的 i 值取 2,得到 $K_2 = E(4) - E(3)$,

表现了 3 尺度与 4 尺度上的能量差,即电流信号中所含基波与二次谐波的能量差。判据 $K = \frac{K_1}{K_2} = \frac{E(3) - E(2)}{E(4) - E(3)}$,直观表现了电流信号中所包含的前 4 次谐波在相邻尺度高频段上的能量变化情况,依据 K 的正负就可以对内部短路电流和励磁涌流进行鉴别。

利用小波工具箱,将小波分解后得到的高频系数提取出,并根据式(6) $E(j) = \log_2(\sum_{k \in Z} |d_{j,k}|^2)$,计算励磁涌流与短路电流各尺度小波能量 $E(j)$ 。

表 2 给出了在初相角不同(其他条件和参数不变)的情况下,所求得的 $E(j)$ 值和 K 值。

表 2 各种情况下 $E(2)$ 、 $E(3)$ 、 $E(4)$ 、 K 的值

	A 相初相角($^{\circ}$)	$E(2)$	$E(3)$	$E(4)$	$K = \frac{E(3) - E(2)}{E(4) - E(3)}$
励磁涌流	0	15.5286	18.1367	20.0080	1.3937
	30	15.1879	17.8218	19.9577	1.2332
	60	14.4992	17.0413	18.9582	1.3262
短路电流	0	20.3915	19.6366	21.5138	-0.4021
	30	19.7286	19.2126	20.9136	-0.3034
	60	18.2204	17.5225	19.6128	-0.3339

电信号中,基波的含量最大,所以基波的能量大于所有其他谐波的能量,而基波主要分布在 4 尺度上,所以 $E(4) > E(3)$, $K_2 > 0$ 。在励磁涌流中, $E(3) > E(2)$, $K_2 > 0$; 原因是在励磁涌流高次谐波中,二次谐波的含量相较于所有高次谐波,是最大的,所以根据谐波在各尺度的分布,3 尺度的能量应大于 2 尺度, K_1 为正,其中 $K_1 = E(3) - E(2)$ 。

而在短路电流中, $E(3) < E(2)$, $K_1 < 0$; 原因是短路电流中基本只含有基波和非周期分量,高次谐波的含量很低很低,并且以三次、五次等奇次谐波为主,二次谐波的含量很低,所以根据谐波分布,3 尺度能量小于 2 尺度,故 K_1 为负。

由此可见,选取 $Y = 0$ 为阈值。令 K 与其比较,如若 $K > 0$, 辨别其为励磁涌流,若 $K < 0$, 辨别其为短路电流。由此,便可对二者进行区分。

6 结 论

运用所提出的小波能量法,进行了 MATLAB 仿真实验,实验结果表明,当载入信号为励磁涌流时, K 值为正,当载入信号为短路电流时, K 值为负。符合实验预期结果,所以,该方法能够对励磁涌流和短路电流进行判断区分,且该方法计算简单便利,对电力变压器继电保护的研究具有一定意义。

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.
- [2] 李家坤. 电力变压器差动保护励磁涌流识别方法比较研究[J]. 广东水利电力职业技术学院学报,2009, 7(2): 43-47.
- [3] 张保会,尹项根. 电力系统继电保护[M]. 北京: 中

国电力出版社,2005.

- [4] 刘小宝,吴崇昊,宋艳,等. 基于二次谐波的自适应制动涌流方案[J]. 电力系统保护与控制,2010 (18): 131-134.
- [5] 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.
- [6] 王婷,张侃君,李茗,等. 一种变压器励磁涌流与故障电流的鉴别方法[J]. 湖北电力,2014 (4): 20-23.
- [7] 胡静,周霏霏. 基于有功和功率因数的变压器励磁涌流鉴别新方法[J]. 电力科学与工程,2011, 27(2): 22-24.
- [8] 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):1-5.
- [9] 潘洋,来磊,石雷兵,等. 单相变压器空载合闸励磁涌流暂态特性建模与实验[J]. 仪器仪表学报,2012, 33(5): 1148-1153.
- [10] 田有文,王睿. 基于小波变换的变压器励磁涌流识别方法[J]. 沈阳农业大学学报,2010, 41(2): 247-250.

作者简介

刘军,1960 年出生,博士,硕士生导师,研究方向为复杂系统建模与控制,太阳能、风能发电与并网调度。

薛蓉,1990 年出生,硕士研究生,研究方向为控制理论与控制工程。

E-mail:peggy0713@sina.com

王得发,1989 年出生,男,硕士研究生,研究方向为控制理论与控制工程。