

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2013.05.026

基于小波能量矩的变压器励磁涌流识别

金 燕, 刘 华

(浙江工业大学 信息工程学院, 浙江 杭州 310023)

摘要: 针对变压器差动保护中励磁涌流与内部短路电流不能准确识别的问题, 将小波多分辨分析理论与能量矩法结合起来, 提出了一种判别励磁涌流与内部短路电流的新方法—小波能量矩法。采用 Matlab 软件对一个单端供电系统进行了仿真, 利用小波变换的多尺度分析和良好的时频局部化特征, 选用了“db2”小波对仿真得到的样本数据进行了分析, 通过分解后的高频分量对应的小波能量矩, 求得了表征不同尺度间谐波含量变化的小波能量矩变化率, 以变化率的比值 K 作为特征量, 实现了对励磁涌流与内部短路电流的识别; 通过对不同变压器参数及不同故障类型的仿真, 得到了比值 K 定量的参考值。研究表明: 励磁涌流的 K 值比内部短路电流的 K 值小, 该方法可在采集一个周期数据后实现正确鉴别。

关键词: 变压器; 励磁涌流; 小波能量矩; 内部短路电流; 小波变换

中图分类号: TM771

文献标识码: A

文章编号: 1001-4551(2013)05-0623-04

Transformer magnetizing inrush current discrimination based on wavelet energy moment

JIN Yan, LIU Hua

(School of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

Abstract: Aiming at distinguishing the inrush current and internal fault current correctly, a new method—wavelet energy moment method, based on the wavelet and energy moment was presented. Matlab was used for the simulation calculation about an one-source power system. With the ability of multi-scale analysis and good time-frequency localization of wavelet transform, the “db2” wavelet was chosen to analyze the simulating data attained from the Matlab. The wavelet energy moments of high-frequency components of wavelet transforms were analyzed, to get the energy moment change rate which means harmonic content changes in different scales, then the ratios of the change rate which was labeled by ‘ K ’ were used to separate the inrush and internal fault current. The reference values of K were determined through simulating different parameters of transformer and fault types. The results indicate that the ratio of the inrush current is lower, the method correctly identifies inrush and fault currents in one power frequency cycle.

Key words: transformer; inrush current; wavelet energy moment; internal fault current; wavelet transform

0 引 言

变压器差动保护的核心问题之一是如何鉴别其中的励磁涌流与内部短路电流? 目前, 广泛应用的变压器差动保护装置主要采用间断角原理、二次谐波制动原理^[1]。由于电流互感器的饱和和使得故障电流会有一些的波形畸变, 致使间断角原理的可靠性受到影响^[2];

另外, 现代变压器饱和倍数趋低, 涌流二次谐波分量可能低于10%以下, 出现内部故障谐振等因素时短路电流二次谐波分量显著增大, 二次谐波原理也越来越显示出其局限性^[3]。

近年来, 随着小波理论的发展, 小波理论逐渐被应用到电力系统的各种保护中^[4]。本研究通过分析信号的小波能量矩, 提出一种鉴别励磁涌流和内部短路

收稿日期: 2012-11-12

作者简介: 金 燕(1964-), 女, 浙江绍兴人, 副教授, 硕士生导师, 主要从事嵌入式系统研究与应用, 计算机自动检测与控制, 图像处理与识别方面的研究。 E-mail: jy@zjut.edu.cn

电流的新方法—小波能量矩法:该方法将电流信号进行小波分解,计算相关尺度的高频能量矩变化率,将能量矩变化率的比值作为鉴别励磁涌流与短路电流的特征量;同时在 Matlab 环境下建立励磁涌流模型和短路电流模型,通过小波变换对模型进行仿真分析。

1 小波多分辨分析理论

从傅里叶变换发展起来的小波变换具有多尺度分析和良好的时频局部化特征,可以用于精确提取信号的特征,已成为信号特征提取的有力工具^[5-6]。设 $\psi(t) \in L^2(R)$, 为满足能量有限性的母小波,通过对母小波的平移与伸缩产生一个函数族,即:

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

式中: a —尺度参数, b —平移参数。

则连续小波变换定义为:

$$W_f(a, b) = (f, \psi_{a,b}) = |a|^{-\frac{1}{2}} \int_R f(t) \overline{\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)} dt \quad (2)$$

式中: $\overline{\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)}$ — $\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$ 的共轭。

工程中适用的是离散小波变换,本研究采用二进离散小波进行分析,令式(2)中 $a=2^j, b=2^j(j, k \in Z)$, 即得到二进小波变换。设 $\{V^j\}$ 是一给定的多分辨分析, 尺度函数为 $\phi(t)$, 小波函数为 $\psi(t)$, 则对 $\forall f(t) \in V^0$, 有^[7]:

$$\begin{aligned} f(t) &= \sum_{k \in Z} (f, \phi_{j,k}) \phi_{j,k} + \sum_{j=1}^J \sum_{k \in Z} (f, \psi_{j,k}) \psi_{j,k} = \\ & \sum_{k \in Z} c_k^j \phi_{j,k} + \sum_{j=1}^J \sum_{k \in Z} d_k^j \psi_{j,k} = V^j + \sum_{j=1}^J W^j \end{aligned} \quad (3)$$

式中: V^j, W^j, c_k^j, d_k^j — $f(t)$ 的近似信号、细节信号、近似信号系数和细节信号系数。

尺度函数为:

$$\phi(t) = \sqrt{2} \sum_k h_0(k) \phi(2t-k) \quad (4)$$

小波函数为:

$$\psi(t) = \sqrt{2} \sum_k h_1(k) \phi(2t-k) \quad (5)$$

式中: h_0, h_1 —滤波器。

本研究利用小波的目的是获得两个重要的特征: ①暂态信号的位置特性; ②信号的能量在不同频段上的分布特性。根据电力系统暂态信号自身的特点, 本研究选取“db2”小波作为小波变换的母小波, 对信号进行5层分解^[8]。

2 小波能量矩法

由式(3)中基于多分辨分析的暂态信号小波表示可知, 各尺度上的能量即为各频段分量的能量。为更好地描述每个分解频带上的能量大小及沿时间轴上的分布特点, 引入能量矩 M_j , 其定义如下^[9]: 对信号进行小波分解并进行单支重构, 重构后各频带内信号 $E_j(k)$ 的能量矩 M_j 为:

$$M_j = \sum_{k=1}^n (k \cdot \Delta t) |E_j(k \cdot \Delta t)|^2 \quad (6)$$

式中: Δt —采样时间间隔, n —总的采样点数, k —采样点数。

从式(6)中可以看出, 能量矩 M_j 不仅考虑到能量的大小, 还考虑了能量随时间参数 t 的分布情况, 因此相对于简单的能量谱, 能量矩可更好地揭示能量的分布特征, 有利于信号特征的提取。本研究采用固定窗内的小波变换系数的能量矩对变换结果进行后处理, 即特征提取, 设小波变换后在尺度 2^j 上的能量矩为 S_j , 则:

$$S_j = \sum_{k=n-M}^M (k \cdot \Delta t) |I_j(k \cdot \Delta t)|^2 \quad (7)$$

式中: M —窗口采样数, I_j —电流信号。

励磁涌流是由于变压器铁芯饱和后铁芯磁导率的减小所造成的; 而内部故障电流不受铁芯饱和程度的限制, 它是由于短路造成的瞬时电流的增大。虽然两者都具有很高的谐波含量, 但根据二者的产生机理不同, 电流信号经小波分解后各频带的能量矩分布也是不同的。

本研究利用小波变换对仿真波形的分析过程如下: 由 db2 小波对原始信号进行5尺度变换, 得到不同尺度下的小波变换波形, 计算相关尺度的高频段能量矩, 将其变化率的比值作为模式识别的特征量。该特征量反映了不同尺度间谐波含量的变化, 变化率由下式求得:

$$K_i = \frac{S_{i+1} - S_i}{(i+1) - i} \quad (i=1, 2, 3, 4) \quad (8)$$

鉴别变压器励磁涌流和内部短路电流的小波能量矩法的判据为:

$$K = \frac{K_3}{K_2} = \frac{S_{i+1} - S_i}{S_{j+1} - S_j} \quad (i=3, j=2) \quad (9)$$

设定一个阈值 M , 当 $K < M$ 时, 判定为励磁涌流, $K > M$ 时, 判定为内部短路电流。

3 模型建立与仿真分析

电力系统仿真模型如图1所示。

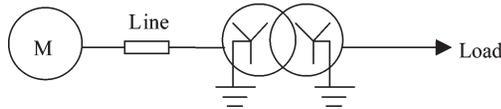


图1 电力系统仿真模型示意图

系统参数如表1所示。

表1 电力系统参数

电源	220 kV ;50 Hz
线路	线路长度: $L=20$ km
	正序: $R_1=0.012\ 73$ ohm/km,
	$L_1=0.933\ 7e-3$ H/km, $C_1=12.74e-9$ F/km
	零序: $R_0=0.386\ 4$ ohm/km,
变压器	$L_0=4.126\ 4e-3$ H/km, $C_0=7.751e-9$ F/km
	容量:300 MVA 接线方式:Yg/Yg
	电压比:220 kV/132 kV
	一次侧: $R=0.02$ p.u, $X=0.08$ p.u
	二次侧: $R=0.02$ p.u, $X=0.08$ p.u

本研究利用Matlab提供的Simulink建立电力系统模型,并仿真了变压器在各种状态下差动电流变化情况。仿真中,采样频率设为10 kHz,即每周波采样200点。

合闸角 $\alpha=0$ 时,电力变压器空载合闸的励磁涌流波形如图2所示。

合闸角 $\alpha=0$,电力变压器内部三相接地短路时的电流波形如图3所示。

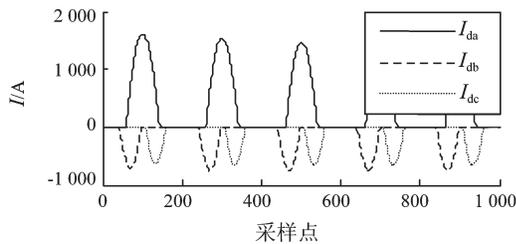


图2 励磁涌流波形

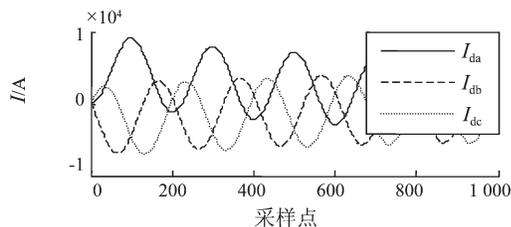
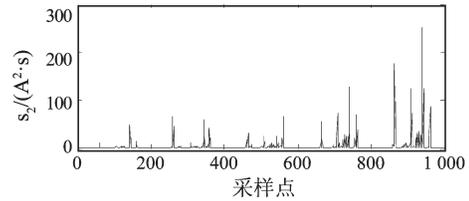
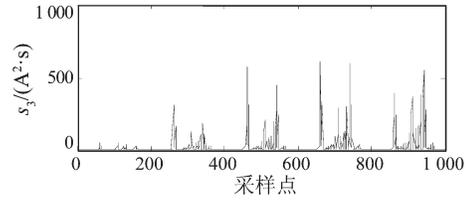


图3 短路电流波形

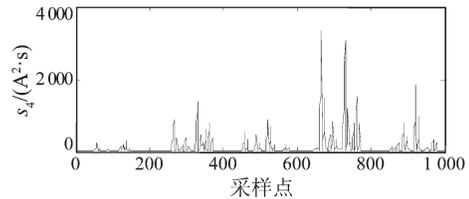
记 $I_1=I_{da}-I_{dc}$, $I_2=I_{db}-I_{da}$, $I_3=I_{dc}-I_{db}$, 本研究采用 I_1, I_2, I_3 作为算法的输入。本研究利用db2小波对图2中的 I_1 (即励磁涌流波形)进行5层小波处理,将小波变换结果代入式(7),得到 I_1 的小波能量矩波形如图4所示。第2,3,4尺度的小波能量矩,分别如图4(a)、4(b)、4(c)所示。



(a) 第2尺度小波能量矩



(b) 第3尺度小波能量矩



(c) 第4尺度小波能量矩

图4 $\alpha=0$ 时 I_1 能量矩变换结果

本研究利用图4所得的能量矩结果,代入式(9),即可得到 $\alpha=0$ 时涌流波形小波能量矩变化率比值 K ,由于变压器空载合闸的励磁涌流波形跟变压器的剩磁以及空载合闸的合闸角有关,本研究给出了无剩磁、最大剩磁即0.7倍额定磁通与合闸角关系的仿真结果^[10],结果如表2所示。

I_2, I_3 及短路情况下的 K 值求取步骤与上述过程相似,在此不再赘述。

表2 励磁涌流能量矩比值

$\alpha(^{\circ})$	剩磁/(p.u.)	I_1		K
		K_2	K_3	
0	0/0/0	519.053 9	3.992 7+e3	7.692 2
0	0.7/0.7/-0.7	520.272 6	3989 5+e3	7.668 2

该算法只需取第1个周期的能量矩,由表2可知能量矩变化率。其中, K_2 为2尺度与3尺度的能量矩变化率, K_3 为3尺度与4尺度的能量矩变化率。为确保能量矩法能正确识别各种状态下的励磁涌流与内部故障电流,本研究采用了30种状态的仿真系统数据,各种状况下计算的能量矩变化率比值分别如表3、表4所示。

表3、表4的数据表明励磁涌流的能量矩变化率的比值明显比内部短路电流的能量矩变化率的比值要小,励磁涌流最大 $K_0=11.965\ 7$,而短路电流最小的 $K_0=13.993\ 3$,因此可设定一个介于 K_0 与 K_0 的整定值 M ,当

$K > M$ 时,判定为短路电流。考虑实际电力系统中有噪声的存在,本研究将整定值取为 K_c 和 K_d 的中点,即 $M=13$ 。当 $K < 13$ 时,判为励磁涌流; $K > 13$ 时,判为短路电流,可以区分励磁涌流与短路电流。

表 3 空载合闸时涌流能量矩比值

$\alpha/(\circ)$	剩磁/(p.u.)	K			Max(K)
		I_1	I_2	I_3	
0		7.692 2	10.846 7	3.461 1	10.846 7
30		2.392 4	2.256 4	3.134 7	3.134 7
45	0/0/0	8.379 4	11.965 7	7.105 4	11.965 7
60		10.845 5	4.769 9	4.768 8	10.845 5
90		2.257 2	4.445 5	1.981 7	4.445 5
0		7.668 2	10.837 0	3.465 8	10.837 0
30		2.397 9	2.255 6	3.135 0	3.135 0
45	0.7/0.7/-0.7	8.379 8	11.961 4	7.104 0	11.961 4
60		10.831 5	4.769 1	4.766 5	10.831 5
90		2.256 9	4.443 7	1.981 6	4.443 7

表 4 短路电流能量矩比值

$\alpha/(\circ)$	变压器状态	K			Max(K)
		I_1	I_2	I_3	
0		24.652 5	15.230 6	23.454 5	24.652 5
30	三相接地短路 (a-b-c-g)	14.580 6	21.601 6	27.181 8	27.181 8
45		13.345 1	25.260 0	25.756 8	25.756 8
60		14.960 8	29.990 0	21.928 8	29.990 0
90		20.808 3	31.543 7	13.147 2	31.543 7
0		19.351 0	15.132 8	16.936 1	19.351 0
30	两相接地短路 (a-b-g)	15.044 1	21.298 1	17.191 6	21.298 1
45		20.799 9	25.035 1	18.908 7	25.035 1
60		18.366 7	26.368 5	17.749 5	26.368 5
90		18.758 7	31.330 5	14.057 2	31.330 5
0		14.155 5	15.447 0	11.688 3	15.447 0
30	两相相间短路 (a-b)	18.449 4	21.358 3	16.054 4	21.358 3
45		17.977 4	24.890 9	17.730 4	24.890 9
60		25.113 2	28.272 7	21.150 7	28.272 7
90		21.813 1	31.496 5	21.945 9	31.496 5
0		16.567 0	10.387 4	5.106 1	16.567 0
30	单相接地短路 (a-g)	8.789 2	13.993 3	3.998 1	13.993 3
45		12.677 0	17.789 8	5.907 8	17.789 8
60		15.322 0	17.957 7	3.409 5	17.957 7
90		21.414 4	20.370 3	4.195 4	21.414 4

4 结束语

针对变压器差动保护中励磁涌流与内部短路电流不能准确识别的问题,本研究采用多分辨分析的方法对变压器励磁涌流及短路电流进行了分析,并且通过小波能量矩法,提取出了励磁涌流及短路电流的 K 值,将 K 值与设定的阈值 M 进行比较,实现了对励磁涌流与短路电流的辨别。

仿真结果验证了该方法在采集一个周波的数据后可实现励磁涌流与短路电流的正确判别;且该方法简单有效,对保证电力变压器安全运行具有一定的实际意义。

参考文献(References):

- [1] 王增平,王 雪. 基于改进主成分分析的变压器励磁涌流识别方法[J]. 电力系统保护与控制,2011,39(22):1-5.
- [2] 陶友抗. 一种新的基于小波分析的变压器励磁涌流判别方法[J]. 合肥工业大学学报,2009,32(3):421-424.
- [3] 王红钢,陈开明,张开斌,等. 小波变换在励磁涌流和短路电流识别中的应用[J]. 电力系统及其自动化学报,2009,21(4):125-128.
- [4] SALEH S A, RAHMAN M A. Modeling and protection of a three-phase power transformer using wavelet packet transform [J]. **IEEE Transactions on Power Delivery**, 2005, 20(2):1273-1282.
- [5] MIX D F, OLEJNICZAK K J. Elements of Wavelets for Engineers and Scientists[M]. 北京:机械工业出版社,2005.
- [6] 袁云龙,迟 军. 基于小波分析的滚动轴承故障诊断[J]. 机电工程,2008,25(6):31-34.
- [7] 张德丰. MATLAB小波分析[M]. 北京:机械工业出版社,2010.
- [8] RASOULPOOR M, BANEJAD M, AHMADYFARD A. Discrimination between inrush and short circuit currents in differential protection of power transformer based on correlation method using the wavelet transform[J]. **Iranica Journal of Energy & Environment**, 2011, 2(4):302-312.
- [9] 何正友. 小波分析在电力系统暂态信号处理中的应用[M]. 北京:中国电力出版社,2011.
- [10] 陈 军. 基于波形不对称系数的新型变压器差动保护[D]. 天津:天津大学电气与自动化工程学院,2005.

[编辑:李 辉]