

识别变压器励磁涌流和内部短路电流的小波能量谱图解法

齐辉¹, 应鸿², 李天云¹

(1. 东北电力学院, 吉林 吉林 132012; 2. 杭州供电局, 浙江 杭州 310005)

摘要: 基于小波多分辨率分析理论, 提出了一种以能量变化率的比值作为判据, 区分变压器励磁涌流和内部短路电流的新方法—小波能量谱图解法。它从信号的小波能量谱图中提取特征量, 作为模式识别的依据来鉴别励磁涌流和内部短路电流。仿真计算表明该方法简单有效, 具有一定的应用前景。

关键词: 变压器; 小波变换; 多分辨率分析; 励磁涌流; 能量谱图解法

中图分类号: TM771 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2004)04-0005-04

0 引言

当前, 变压器差动保护的核心问题之一是如何鉴别励磁涌流和内部短路电流^[1]。近年来, 国内外学者提出了不少鉴别涌流的新方法, 如依据磁通特性^[2]、等值电路参数^[4]、负功率方向^[5]、涌流波形^[6]、励磁阻抗^[7]等来识别励磁涌流。这些方法需要对变压器的某些参数作人为的假设, 应用前景取决于理论上的进一步突破。目前国内设计变压器差动保护装置主要是基于间断角原理^[8]和二次谐波制动原理^[9]。文献[1]研究表明: 励磁涌流在变压器一次侧有明显的间断角, 但进入差动继电器的二次涌流已大大丧失这种特性, 利用起来将增加装置的复杂性。二次谐波制动原理应用较为成熟, 同时文献[1]也提出, 在正常工况下, 大容量的变压器内部短路电流的二次谐波含量约为7%, 而在有串补电容的高压系统及高压电缆变压器的短路电流中, 二次谐波含量可能高达15%~20%, 这对二次谐波制动原理提出了新的挑战。

众所周知, 励磁涌流中的三次谐波含量是仅次于二次谐波的, 但是在其它工况下, 三次谐波电流也经常出现, 特别是内部短路电流很大时将有明显的三次谐波成分, 因此三次谐波不能作为涌流的特征量来组成差动保护的制动或闭锁部分。在具有差动电流速断辅助保护(防止在很大内部短路电流时差动保护拒动)的条件下, 吸收部分三次及更高的谐波分量作为差动保护的制动辅助量将是可取的^[1]。

本文通过分析信号的小波能量谱图, 提出一种鉴别励磁涌流和内部短路电流的新方法—小波能量谱图解法: 将电流信号进行小波分解, 计算相关尺度的高频段能量, 将其变化率的比值作为模式识别的特征量。该特征量反映了电流中各次谐波含量的变化, 以此为判据来区分变压器励磁涌流和内部短路电流。大量仿真计算表明该方法简单有效, 具有应

用前景。

1 小波多分辨率分析理论

小波分析是傅立叶分析方法的重要发展, 近年来成为众多学科关注的焦点。与傅立叶变换相比, 小波变换具有时-频局部化特性, 通过对信号进行多尺度变换分析, 精确地提取信号中的特征信息, 解决了傅立叶变换不能解决的许多困难问题, 它是近代调和与分析发展史上的里程碑。

设: 基小波 $\psi(t) \in L^2(\mathbb{R})$ 满足容许性条件

$$C = \int_0^\infty \frac{|\hat{\psi}(\omega)|^2}{\omega} d\omega < \infty \quad (1)$$

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

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

$\psi_{a,b}(t)$ 称为连续小波, 其中 a, b 分别为尺度参数和平移参数。信号 $f(t) \in L^2(\mathbb{R})$ 的连续小波变换:

$$W_f(a, b) = (f, \psi_{a,b}) = |\alpha|^{-1/2} \int_{\mathbb{R}} f(t) \hat{\psi}\left(\frac{t-b}{\alpha}\right) dt \quad (3)$$

其中: $\hat{\psi}_{a,b}(t)$ 是 $\psi_{a,b}(t)$ 的共轭。工程中实用的是离散小波变换。令式(3)中 $a = 2^j, b = 2^j k, j, k \in \mathbb{Z}$, 得到的就是二进小波变换。

多分辨率分析就是由不同的分辨率对信号进行逐级逼近, 用小波函数和尺度函数对信号进行不同尺度的分解, 这样可以了解不同尺度下的局部信号特征, 在信号分析中具有明显的优越性^[10]。

设 $\{V^j\}$ 是一给定的多分辨率分析, $\psi(t), \phi(t)$ 分别为相应的尺度函数和小波函数, 对 $\forall f(t) \in V^0$,

有

$$f(t) = \sum_{k=Z}^J \langle f, j,k \rangle_{j,k} + \sum_{j=1}^J \sum_{k=Z}^J \langle f, j,k \rangle_{j,k} = \sum_{k=Z}^J c_{kj,k}^j + \sum_{j=1}^J \sum_{k=Z}^J d_{kj,k}^j = V^j + \sum_{j=1}^J W^j \quad (4)$$

其中： $V^j, W^j, c_{kj,k}^j, d_{kj,k}^j$ 分别是 $f(t)$ 的近似信号、细节信号、近似信号系数和细节信号系数。

多分辨率分析主要用来获得两个重要的特征：暂态信号的位置特性；信号的能量在不同频段上的分布特性。

2 小波能量谱图解法

由多分辨率分析可知，同一尺度上的小波函数 $\psi_{j,k}(t)$ 与尺度函数 $\phi_{j,k}(t)$ 正交。根据 Parseval 定理，对于完备正交函数集应满足：

$$\int_R |f(t)|^2 dt = \sum_{k=Z}^J |c_k|^2 + \sum_{j=1}^J \sum_{k=Z}^J |d_k|^2 \quad (5)$$

即将信号 $f(t)$ 小波分解后，其近似信号系数与细节信号系数的平方和等于原始信号在时域上的能量。所以小波变换后的能量与原始信号的能量之间存在等价关系。按照能量方式表示的小波分解结果称为小波能量谱。因此用小波能量谱来表示原始信号的能量分布是可靠的。

不难看出，对不同信号进行小波分解，其在各频带的能量分布有较大的区别，因此对信号进行多尺度分解，做出能量分布曲线，根据分布曲线的不同特征来鉴别信号的类型。

如第 1 节所述，小波多分辨率分析实际是把信号 $f(t)$ 分解到不同尺度上的近似信号和细节信号。本文将细节信号的能量作为尺度的函数。对离散信号，通过二进小波变换，得到在各尺度下的小波系数 $d_{j,k}$ 。定义细节能量函数：

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

式中： j 是尺度。

由于励磁涌流和内部短路电流所包含的各次谐波不同，将电流信号进行小波分解后，分布在各高频段的能量也不同。相邻高频段上能量的变化率为：

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

鉴别变压器励磁涌流和内部短路电流的小波能量谱图解法的判据为：

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

它反映了不同尺度间高频段上的能量变化情

况。当 $K > M$ 时，判断其为励磁涌流； $K < M$ 时，其为内部短路电流。其中是 M 阈值。

3 仿真计算

通常设计制造变压器时，为了使铁芯材料得到有效的利用，把正常运行时的磁感强度 B 值选择在磁化曲线的‘膝点’附近，内部短路故障时，铁芯很容易饱和；当变压器空投或区外故障切除，电压恢复正常的过程中，由于磁通不能突变，磁通中出现非周期的暂态分量，与铁芯剩磁一起使变压器铁芯饱和。故本文重点分析在变压器铁芯饱和状态下，短路电流和励磁涌流的区别。对电流信号进行小波多分辨率分析时，选用不同小波函数，在不同尺度上得到的时频特性也不同。本文提取的信号在不同尺度上的频率分布如图 1 所示。

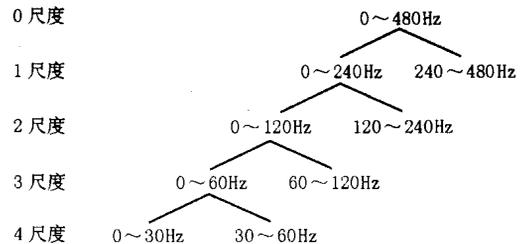


图 1 电流信号的频率分布

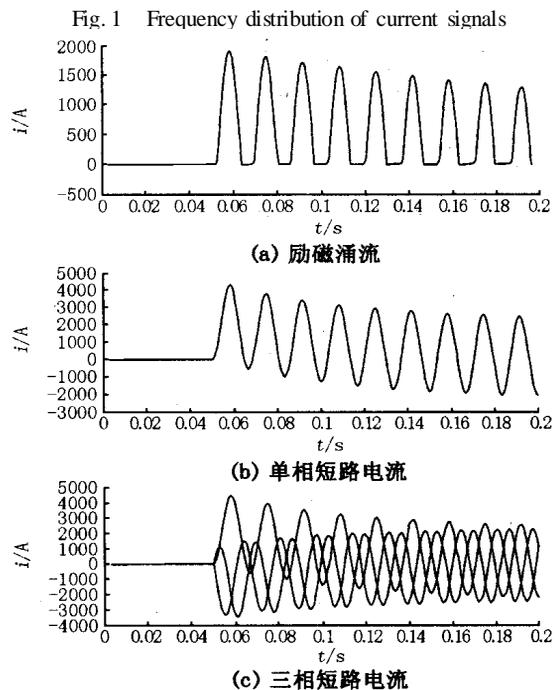


图 2 正常工况下三种电流波形

Fig. 2 Three kinds of current waveforms under normal performance

由于目前变压器的二次谐波制动大多采用“或”门制动方式,故分析重点放在二次谐波显著的一相电流中。正常工况下,典型励磁涌流中二次谐波含量较大,短路电流中二次谐波较小,如表 1 所示(以基波为基准的各次谐波的含量)。

表 1 正常工况下不同电流信号的谐波成分

Tab. 1 Harmonic components of different current signals under normal performance

	I_1 (%)	I_2/I_1 (%)	I_3/I_1 (%)	I_4/I_1 (%)
励磁涌流	100	27	8	8
短路电流	100	6	25	6

式(7)中 j 分别取 2,3,得 $k_1 = (E(3) - E(2)) / (3 - 2)$,反映了电流中所含 2 次谐波与 3、4 次谐波的能量变化; $k_2 = (E(4) - E(3)) / (4 - 3)$,反映了电流中所含基波与 2 次谐波的能量变化。判据 $k = k_1/k_2 = (E(3) - E(2)) / (E(4) - E(3))$,反映了电流信号中前四次谐波在不同尺度高频段上的能量变化情况。由于励磁涌流中 2 次谐波的含量大于其 3、4 次谐波,故图 3 中其 ab 段斜率 k_1 为正;而铁芯饱和时,短路电流的能量谱图中 ab 段斜率 k_1 为负。计算结果如表 2 所示,通过判据 k 的符号即可区分铁芯饱和状态下内部短路电流和励磁涌流。

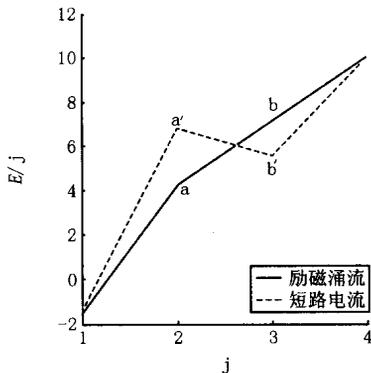


图 3 正常工况下不同电流信号能量谱图

Fig. 3 Energy spectrogram of different current signals under normal performance

表 2 正常工况下计算结果

Tab. 2 Calculation results under normal performance

	k_1	k_2	k
励磁涌流	2.89	2.96	0.98
短路电流	-1.7	4.5	-0.38

在某些特殊工况下,如有长线路串补电容的高压系统及有高压电缆的变压器,其励磁涌流和短路电流波形会发生畸变(图 4),其中短路电流中二次谐波的含量会增大,如表 3 所示。

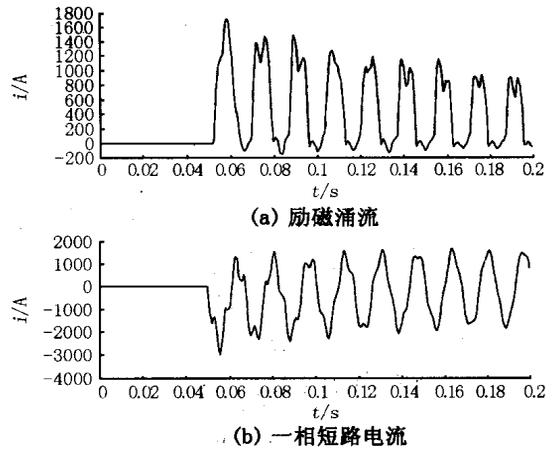


图 4 特殊工况下电流波形

Fig. 4 Current waveforms under special performance

表 3 特殊工况下不同电流信号的谐波成分

Tab. 3 Harmonic components of different current signals under special performance

	I_1 (%)	I_2/I_1 (%)	I_3/I_1 (%)	I_4/I_1 (%)
励磁涌流	100	25	12	9
短路电流	100	15	32	5

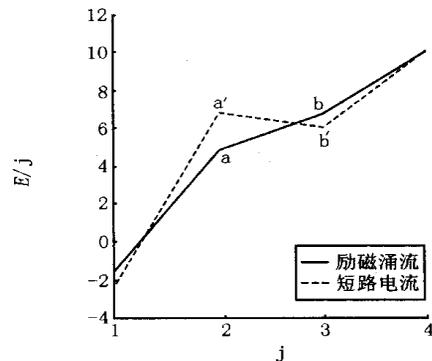


图 5 特殊工况下不同电流信号能量谱图

Fig. 5 Energy spectrogram of different current signals under special performance

表 4 特殊工况下计算结果

Tab. 4 Calculation results under special performance

	k_1	k_2	k
励磁涌流	1.9	3.2	0.6
短路电流	-1	4.0	-0.25

从图 5 中可以看出,在铁芯饱和状态下,即使短路电流的二次谐波含量高达 15%,由于其三次谐波的含量很大, ab 段斜率 k_1 仍为负。从计算结果表 4 中可知,本判据依然有效(仍可通过 k 的符号区分铁芯饱和状态下内部短路电流和励磁涌流)。在实际运用中,设定 k 的阈值,可以区分励磁涌流和短路电流(铁芯饱和状态下),从而在一定程度上有效

地解决了在特殊工况下,因短路电流中二次谐波增大,导致变压器差动保护误判的问题。

4 结论

1) 本文基于小波多分辨率理论和小波能量谱,提出一种用能量变化率的比值作为判据,来区分变压器内部短路电流和励磁涌流的新方法—小波能量谱图解法。

2) 本判据同时考虑了内部短路电流和励磁涌流的前四次谐波,包含信息量丰富,形式简单,应用简便。

3) 在变压器铁芯饱和状态下,本判据区分内部短路电流和励磁涌流,十分有效,通过其符号即可区分。

4) 某些情况下,励磁涌流的二次谐波含量比例较小(有时可能是10%左右),但在所有的高次谐波中其含量比例仍是最大,此时该判据依然有效,从而避免了如何选取适当的二次谐波制动比的难题。

5) 大量仿真表明:在信号的多分辨分析中,不同小波函数的选取,对结果会产生很大影响。本文选用的是 db18 小波函数。

参考文献:

- [1] 王维俭,侯炳蕴(WANG Wei-jian, HOU Bing-yun). 大型机组继电保护理论基础(第二版)(The Theoretical Foundation of Large-scale Generator set Relays, 2nd edition) [M]. 北京:中国电力出版社(Beijing: China Power Press), 1988.
- [2] Bogdan Kasztenny, Mladen Kezunovic. Digital Relays Improve Protection of Large Transformers[J]. IEEE Computer Application in Power, 1998, 11(4): 39-45.
- [3] Kitayama Masashi, Nakabayashi Miyuki. A Fast Discrimination Method of Inrush Current Based on Transformer Magnetizing Characteristics[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2001, 121-B(8): 982-989.
- [4] Keizo Inagaki. Inductance Characteristics of a Transformer and Its Equivalent Circuits under Steady State and Magnetizing Inrush Conditions[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 2002, 122-B(6): 739-747.

- [5] Liu P, Tian S H. Improved Operation of Differential Protection of Power Transforms for Internal Faults Based on Negative Sequence Powergy [C]. Proceeding of Empd 98 International Conference on Energy Management and Power Delivery, 1998.
- [6] 焦邵化,刘万顺(JIAO Shao-hua, LIU Wan-shun). 区分变压器励磁涌流和内部短路电流的积分型波形对称原理(A Novel Scheme to Discriminate Inrush Current and Fault Current Based on Integrating the Waveform) [J]. 电机工程学报(Proceedings of the CSEE), 1999, 19(8): 35-38.
- [7] 宗洪良,金华峰,等(ZONG Hong-liang, JIN Hua-feng, et al). 基于励磁阻抗变化的变压器励磁涌流判别方法(Transformer Inrush Detected by the Variation of Magnetizing Impedance) [J]. 电机工程学报(Proceedings of the CSEE), 2001, 21(7): 21-25.
- [8] 王祖光(WANG Zu-guang). 间断角原理的变压器差动保护(Transformer Differential Protection Based on the Dead Angle) [J]. 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 1979, 3(1): 18-30.
- [9] 陈曾光(CHEN Zeng-guang). 电力变压器保护(第二版)(The Power Transform Relay, 2nd Edition) [M]. 北京:水利电力出版社(Beijing: Hydraulic and Electric Power Press), 1989.
- [10] Mallat S, Hwang W L. Singularity Detection and Processing with Wavelet [J]. IEEE Trans. on Information Theory, 1992, 38(2): 617-643.
- [11] 严居斌,刘小川(YAN Ju-bin, LIU Xiao-chuan). 基于小波变换模极大值原理和能量分布曲线的电力系统短期扰动分析(Analysis of Short-term Power System Disturbance Based on Modulo Maximum Principle and Energy Distribution Curve of Wavelet Transform) [J]. 电网技术(Power System Technology), 2002, 26(4): 16-18.

收稿日期: 2003-06-05; 修回日期: 2003-07-14

作者简介:

齐辉(1976-),男,硕士,从事小波分析在电力系统继电保护中应用的研究;

应鸿(1972-),男,工学硕士,工程师,从事输配电自动化及保护管理工作;

李天云(1945-),男,教授,研究方向为自动控制理论,信号与系统,非线性系统的理论及其在电力系统中的应用。

Discrimination of transformer inrush current and inner short circuit current with wavelet energy spectrum grammatic method

QI Hui¹, YING Hong², LI Tianyun¹

(1. Northeast Institute of Electric Power Engineering, Jilin 132012, China;

2. Hangzhou Power Supply Bureau, Hangzhou 310005, China)

基于卡尔曼滤波的电力系统短期负荷预测

李明干, 孙健利, 刘沛

(华中科技大学电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 介绍了卡尔曼滤波的算法, 给出了一套递推计算公式, 将此算法应用于短期负荷预测, 并针对负荷预测本身的特点对算法进行了改进, 用两种算法进行了实际的负荷预测计算, 取得了比较准确的预测结果。

关键词: 负荷预测; 卡尔曼滤波; 预测模型

中图分类号: TM715

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897(2004)04-0009-04

0 引言

短期负荷预测是电力系统运行调度中一项非常重要的内容, 它是电网安全经济运行的前提, 也是调度安排开停机计划的基础, 对电网调度自动控制非常重要, 其预测精度直接影响电力系统的经济效益。随着电力改革的深化, 电力市场的进一步开放, 高质量的短期负荷预测愈显得重要和迫切。

负荷预测的方法较多, 传统的方法有回归分析法^[1]和最小二乘法^[2]等, 这些方法的算法比较简单, 技术成熟, 但因其模型过于简单, 难以将电力系统运行过程中负荷变化的新的信息反映到模型中去, 因而预测精度不尽如人意。近年来人们不断致力于将新的理论与方法应用于负荷预测, 并取得了很大进展, 提出了混沌模型方法^[3]、神经网络(RBF)^[4]、模糊神经网络方法^[5]、专家系统方法^[6]等。这些方法取得了比传统方法更好的预测结果。

卡尔曼滤波(KF)是Kalman于1960年提出的, 是采用状态方程和观测方程组成的线性随机系统的状态空间模型来描述滤波器, 并利用状态方程的递推性, 按线性无偏最小均方差估计准则, 采用递推算算法对滤波器的状态变量作最佳估计, 从而求得滤掉噪声的有用信号的最佳估计。卡尔曼滤波理论不仅有滤波器模型, 还有预报器模型^[7], 通过对模型参数的估计, 实现对观测序列的预报, 因此卡尔曼滤波适合于短期负荷预测。

将卡尔曼滤波用于短期负荷预测在国外已有研究, M. Huelsemann, M. D. Seiser等人1998年就对用卡尔曼滤波和自相关进行负荷预测进行了探讨^[8], 提出了用卡尔曼滤波进行负荷预测的思路, 取得了理论上的突破。随后, H. W. Ngan等人也对此方法进行了探讨^[9], 并取得了一定的进展。国内虽有将卡尔曼滤波用于其它方面的预测, 但用于负荷预测研究的尚属初探。笔者利用卡尔曼滤波理论建立了电力系统短期负荷预测模型, 利用历史数据中的负荷数据和气象数据等相关数据, 进行了短期负荷的预测。

1 卡尔曼滤波模型简介

考虑线性离散时间系统:

$$x(t+1) = (t+1, t)x(t) + B(t) \quad (1)$$

$$y(t) = H(t)x(t) + v(t) \quad (2)$$

式中: x 是 n 维状态变量, $(t+1, t)$ 是 $n \times n$ 的状态转移矩阵, $B(t)$ 是 $n \times r$ 的输入噪声转移矩阵, (t) 是 p 维的输入噪声; $y(t)$ 是 m 维的测量向量, $H(t)$ 是 $m \times n$ 维测量矩阵, $v(t)$ 是 m 维的测量噪声。

假设输入噪声 (t) 与测量噪声 $v(t)$ 是互不相关、均值为零的独立白噪声, 其统计特性如下:

$$E(t) = 0, \quad E(t) \quad {}^T(t) = Q(t);$$

$$E v(t) = 0, \quad E v(t) v^T(t) = R(t);$$

$$E(t) v^T(k) = 0;$$

其中: E 表示数学期望, $p \times p$ 阶的输入噪声协方差

Abstract: How to identify transformer inrush current is a main problem to transformer relay. Based on the wavelet and multiresolution theory, a new method is proposed to construct the protection judgment to discriminate the inrush current and internal fault by the ratio of high frequency segments in different scales of energy spectrogram. This method extracts the feature values from the energy spectrogram of the signal transformed by wavelet, and with these values, it can identify inrush current from internal short circuit current. Simulation results show that this new method is brief, effective, and applicable in practice.

Key words: transformer; wavelet transform; multi-resolution analysis; inrush current; energy spectrum diagrammatic method