

DOI: 10.7667/PSPC160664

小波算法在变压器励磁涌流中的应用研究

孙庆森, 张海峰, 王猛, 王华兴

(国网泰安供电公司, 山东 泰安 271000)

摘要: 为了满足电气化设备对高性能变压器的需求, 针对大功率变压器中存在的励磁涌流现象展开研究, 并建立了仿真模型。利用一种新型的小波算法对变压器中的励磁涌流现象进行分析和数学建模, 并研究了三相变压器的励磁涌流产生机制和信号提取方法, 建立了精确的故障识别模型。最后, 利用 Matlab/Simulink 软件设计了仿真系统, 实现了对三相变压器的励磁涌流波形识别。仿真结果表明, 该仿真模型能够有效提取出变压器励磁涌流的有关特性, 为提高变压器的性能提供了理论支持。

关键词: 变压器; 励磁涌流; 小波算法; 建模; 信号提取

Application of wavelet algorithm in the transformer inrush current

SUN Qingsen, ZHANG Haifeng, WANG Meng, WANG Huaxing

(State Grid Taian Power Supply Company, Taian 271000, China)

Abstract: In order to meet the demand of electrical equipment for high-performance power transformer, this paper studies inrush current phenomenon existing in high-power transformer and establishes the simulation model. The transformer inrush current phenomena is analyzed and mathematical modeling is done by using a new wavelet algorithm, the generating mechanism of three-phase transformer magnetizing inrush current and signal extraction method are studied, and the accurate fault recognition model is established. Finally, the simulation system is designed through Matlab/Simulink to achieve the recognition of three-phase transformer magnetizing inrush current waveform. Simulation results show that the simulation model can extract the relevant characteristics of the transformer inrush current, which provides a theoretical support for improving the performance of the transformer.

Key words: transformer; inrush current; wavelet algorithm; modeling; signal extraction

0 引言

目前, 随着中国经济的快速发展, 工业化设备被广泛使用, 人们对电力的需求越来越高, 各种变压器设备出现在日常生产生活中。因此, 变压器设备能否可靠运行, 直接影响着用电设备的安全, 但是变压器在设备中占据了很大一部分成本, 而且内部结构复杂, 技术含量也相对较高。为了尽可能降低变压器运行时的故障率, 人们发明了各种技术来保证设备长期稳定运行^[1-2]。在变压器系统中, 差动保护功能一直都是研究的重点领域, 为了能够抑制差动回路中的电流不平衡现象, 降低变压器系统的不稳定性, 本文提出了一种基于小波算法的励磁涌流识别技术。通过仿真实验, 本文提出的识别算法准确率提高明显, 应用前景广泛。

1 变压器励磁涌流分析与研究

1.1 励磁涌流的产生机制

常见的电力变压器是基于电磁感应原理制成的, 其功能是通过互感线圈和铁芯把低电压转换成高电压, 或者把高电压转换成低电压, 其也遵循能量守恒定理。由于其电压变换能力突出, 且结构简单, 转化效率高, 已经成为电网中交流电输配系统中非常重要的一种设备。但是当变压器线圈在形成回路的瞬间, 变压器的两侧线圈绕组在瞬间电压的激励下, 整个铁芯中的磁场将会发生剧烈的变化, 由于在线圈接通前后, 磁链形成的瞬间依然服从守恒原理, 电磁回路中将迅速产生单极性的偏感应磁场^[3]。另外, 由于铁芯材料具有某些不可预测的非线性特性, 磁场的快速变化会使线圈流过很大的励

磁瞬态电流来克服这种变化趋势^[4]。尤其当变压器初始时存在大量剩磁时，且偏磁的极性与剩磁极性同向时，线圈中产生的励磁电流饱和情况会更加严重，这会使变压器线圈绕组中的励磁电抗大大降低，从而产生了很大的励磁涌流，造成了变压器效率大大降低，同时产生了大量的能量损耗。下面分别对单相变压器和三相变压器的励磁涌流产生机理进行建模研究。

1) 单相变压器励磁涌流

首先设线圈上的额定电压为 u ， ϕ 则表示线圈中的额定磁通量，两者满足关系式(1)。

$$u = \frac{d\phi}{dt} \quad (1)$$

假设在 t 为 0 时变压器线圈导通，此时变压器单侧的瞬态电压为 $u = U_m \sin(\omega t + \alpha)$ 。同时获得式(1)微分方程的解，如式(2)所示。

$$\phi = -\phi_m \cos(\omega t + \alpha) + \phi_0 \quad (2)$$

式中，稳态磁通分量为 $-\phi_m \cos(\omega t + \alpha)$ ， $\phi_m = U_m / \omega$ ，其中自由分量由式(3)表示。

$$\phi_0 = \phi_m \cos(\alpha) + \phi \quad (3)$$

式中， ϕ 表示变压器磁芯的剩磁量。假若磁芯的剩磁量 $\phi > 0$ ， $\cos(\alpha) > 0$ ，则 ϕ 在半周期后能够达到最大值，此时 $\phi = 2\phi_m \cos(\alpha) + \phi$ ，变压器已经严重饱和。变压器暂态磁通时 ϕ 的波形如图 1 所示。

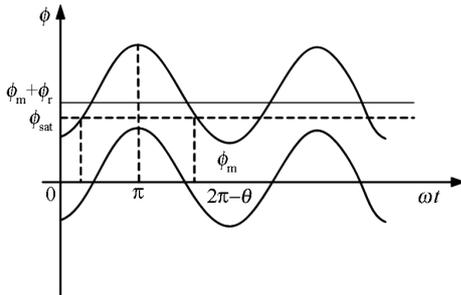


图 1 变压器暂态磁通波形图

Fig. 1 Transformer flux transient waveforms

2) 三相变压器的励磁涌流

在现代社会，三相变压器已经被广泛应用在世界各国的工业系统中。众多大型的三相变压器一般由三个单相独立变压器共同组成，三个线圈使用的磁芯也互相独立，因此可以使用单相变压器励磁涌流产生机制来推断三相变压器的工作原理^[5]。

三相变压器电路原理图如图 2 所示。当三相变压器三路线圈同时接通时，每组线圈都会产生励磁涌流。每个单相相差动保护的瞬态电流即为变压器绕组之间的电流差，其励磁涌流可分别表示为

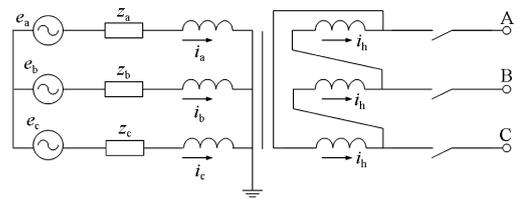


图 2 三相变压器电路原理图

Fig. 2 Schematic of three-phase transformer circuit

$$i_{u.A.r} = i_a - i_b; \quad i_{u.B.r} = i_b - i_c; \quad i_{u.C.r} = i_c - i_a \quad (4)$$

在三相变压器中的励磁涌流即单侧两相涌流的差值，但是差值计算获得涌流的频域和时域特性^[6]。主要具有以下三个特点：

1) 变压器的励磁涌流幅值与线圈导通电压初始相位角有一定的关系，当相位电流在 0° 时会出现涌流，且最大的线圈电流涌流在 $\pm 30^\circ$ 合闸相角时出现。

2) 常见的变压器涌流波形属于尖顶波，其中包含了众多的高次谐波和非线性分量，在初始时刻的几个周期内，波形完全偏向于时间轴的一侧，如果此时的饱和磁通值越低，则铁芯的剩磁量越大，变压器的瞬时励磁涌流峰值也越高^[7-8]。在三相变压器励磁涌流中并非所有三相都包含非周期分量，也存在至少一相为周期性的，这会使最终的波形中包含周期性衰减的励磁涌流。而且变压器磁通容量越大，励磁涌流对输出电流的幅值影响也会越小。

3) 变压器励磁涌流的波形在开始几个周期处于状态。其波形如图 3 所示，两相之间的间断角都不相等，最大相差 100° 左右，且比单相变压器的励磁涌流间断角要小。还需注意，当铁芯剩磁量变大或者饱和磁通量降低时，励磁涌流的间断角最小值将会变小。

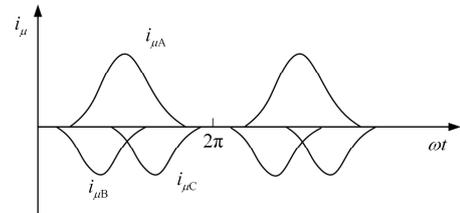


图 3 三相变压器励磁涌流波形

Fig. 3 Inrush current waveform of three-phase transformer

1.2 变压器励磁涌流的危害

由于变压器线圈在关闭和导通瞬间产生的励磁涌流会对电力网络造成各种不可避免的干扰，形成过大的瞬态高频电流，产生的危害非常巨大，甚至会对其他的用电系统造成影响。因此在设计变压器系统时，需要仔细考虑励磁涌流发生时的运行状态，

有效识别, 并从根本上对其进行抑制。主要来看, 其暂态现象的危害主要有以下三种:

1) 强大的瞬态电流会造成变压器继电保护装置发生故障, 造成误操作, 使变压器不能顺利接入到电网中。

2) 如果电力系统中变压器输出端突发短路故障, 需要被断开时, 由于励磁涌流的作用, 电压将会突然变大, 从而使变压器的保护装置误动, 造成变压器两侧的用电系统全部瘫痪。

3) 诱导附近的变压器系统发生故障。当一台变压器在接通电源时造成了励磁涌流, 由于电网互联, 邻近的其他电站中的变压器也会产生所谓的“和应涌流”(sympathetic inrush), 从而触发保护装置, 造成大范围停电; 最糟糕的情况是, 如果励磁涌流过大, 变压器和保护装置可能会因电压过大而遭受损坏。

2 基于改进型小波分析算法的变压器励磁涌流识别方法

2.1 改进型的小波分析算法识别原理

为突出小波分析算法在检测微小信号方面的优势, 本文提出了一种可以不同尺度和不同分辨率下对励磁涌流信号滤波额识别的方法。首先在变压器系统中选择合适的母小波信号, 然后分别在频域上把小波变换结果集中起来, 同时在时域上作类似的分析, 这样研究人员就能同时在频域和时域上对励磁涌流信号作局部的特征分析。不同于傅里叶分析, 小波分析在时域和频域信号分析上具有非常明显的优势。由于变压器中的励磁涌流信号非常复杂, 通常采用的傅里叶分析方法已经不能满足识别要求, 而采用小波分析算法可以弥补这方面的缺陷, 极大地提高了分析速度和准确度。下面对改进后的小波分析算法作数学建模。

设函数 $\psi(t) \in L^2(R)$, 傅立叶变换后为 $\hat{\psi}(\omega)$, 如果能够满足公式(5)。

$$C_\psi = \int_R \frac{|\hat{\psi}(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega < \infty \quad (5)$$

则称 $\psi(t)$ 为一个基本小波量。将 $\psi(t)$ 作平移和伸缩变换后得到一个小波序列, 如公式(6)所示。

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad a, b \in R; a \neq 0 \quad (6)$$

式中: a 表示伸缩因子; b 表示平移因子。任意的时变函数 $f(t) \in L^2(R)$ 的连续小波可以变换为公式(7)。

$$W_f(a,b) \leq f, \psi_{a,b} \geq |a|^{-\frac{1}{2}} \int_R f(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (7)$$

式(7)的重构公式表示为

$$f(t) = \frac{1}{C_\psi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{a^2} W_f(a,b) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) da db \quad (8)$$

由于基小波 $\psi(t)$ 形成的 $\psi_{a,b}(t)$ 在小波信号变换中起着特征识别的作用, 所以基小波函数 $\psi(t)$ 还应该满足公式(9)所示的约束条件。

$$\int_{-\infty}^{\infty} |\psi(t)| dt < \infty \quad (9)$$

可以得到 $\hat{\psi}(\omega)$ 为连续函数。因此为了能够满足重构条件式的约束条件, $\hat{\psi}(\omega)$ 在原点需要等于 0, 即满足公式(10)。

$$\hat{\psi}(0) = \int_{-\infty}^{\infty} \psi(t) dt = 0 \quad (10)$$

为了保证信号重构在数值上是收敛且稳定的, 在满足重构条件的同时, 小波函数 $\psi(t)$ 的傅立叶变化需要满足公式(11)所示的稳定性条件。

$$A \leq \sum_{-\infty}^{+\infty} |\hat{\psi}(2^{-j}\omega)|^2 \leq B \quad (11)$$

注意: 式中 A 、 B 满足条件 $0 < A \leq B < \infty$ 。

2.2 一种新型的变压器励磁涌流的故障识别模型

由于目前的工业用变压器励磁涌流识别系统, 种类繁多, 但识别精度还不够完善, 需要进一步优化。而上文提出的改进型小波变换在变压器励磁涌流的信号特征识别方面具有突出的优势, 故在此基础上建立涌流电流发生时的故障模型^[9-10]。

由于常见的三相变压器为非线性的时变系统, 当励磁涌流发生时, 系统磁链路的电压和电流呈现非线性相关特性。因此, 分别从电压和电流两个参量对变压器的励磁涌流进行建模。为了准确识别出变压器的励磁涌流波形, 利用小波算法的信号分解原理, 对变压器线圈在短路故障发生时的电流模型进行分析。现假设变压器在输出端发生短路, 其电压电流的暂态模型可用公式(12)表示。

$$L_k \frac{di}{dt} + R_k i = U_m \sin(\omega t + \alpha) \quad (12)$$

通过对上式的微分方程进行求解, 可以得到如下三个解:

$$i = I_m [\sin(\omega t + \alpha - \varphi) - \sin(\alpha - \varphi) e^{-\frac{R_k t}{L_k}}] \quad (13)$$

$$I_m = \frac{U_m}{\sqrt{R_k^2 + (\omega L_k)^2}} \quad (14)$$

$$\varphi = \arctg \frac{\omega L_k}{R_k} \quad (15)$$

式中, R_k 和 L_k 分别表示短路故障时的变压器电阻和电感。由公式(13)可得到故障电流波形为正弦波。

但由于故障线圈中电阻和不断衰减的直流分量共同作用,故障电流的波形会随时间不断衰减,其波形如图4所示。

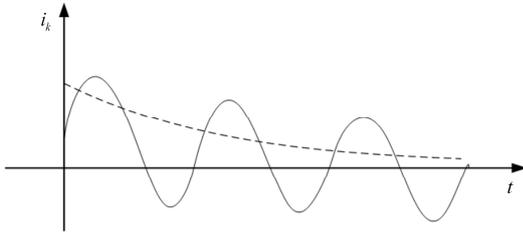


图4 变压器线圈故障电流变化曲线

Fig. 4 Fault current changing curve of transformer coil

由于电流波形中存在多重的相位信息,需要使用小波分析法对各种相位信息进行相关性分析,而不是只分析励磁涌流中电压幅度方面的特征。

假设在电流信号中,存在小波信号 $x(n)$ 和 $y(n)$, 其互相关函数可以定义为

$$r_{xy}(m) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(n)y(n+m) \quad (16)$$

式中,当时 $x(n) = y(n)$, 则两者的互相关函数可转化成自相关函数,变换后的表达式为

$$r_{xx}(m) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(n)x(n+m) \quad (17)$$

如果 $x(n)$ 和 $y(n)$ 分别表示两个具有有限能量的确定性信号,而且两者之间存在因果关系,那么可以推断出两者能量的乘积开方值 $(E_x E_y)^{1/2}$ 为常数,在进行归一化计算后,得到 $x(n)$ 和 $y(n)$ 的归一化相关系数,其表达式如公式(17)所示。

$$\rho_{xy} = \frac{\sum_{n=0}^{\infty} x(n)y(n)}{\left[\sum_{n=0}^{\infty} x^2(n) \sum_{n=0}^{\infty} y^2(n) \right]^{1/2}} \quad (18)$$

3 识别系统的仿真

本文使用 Matlab/Simulink 仿真软件建立变压器的励磁涌流仿真模型,控制系统的流程图如图5所示。

首先建立用户图形窗口,然后构建仿真原理图,并设置系统参数,最后根据仿真状态对系统进行优化,并输出对应的仿真结果。在构建 Simulink 系统仿真图时,需要使拥到 SimPowerSystem 工具箱中的多种控制模块,主要有电力电子模块、连线模块、电源模块、基础电路模块、系统检测模块和其他功率模块。

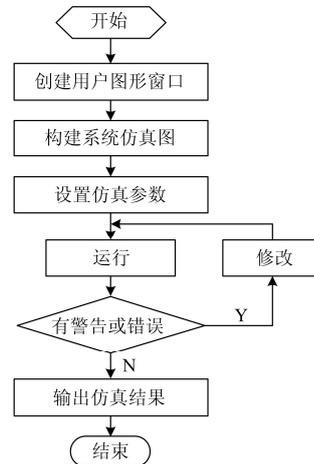


图5 Matlab/Simulink 仿真流程图

Fig. 5 Matlab/Simulink simulation flowchart

利用软件建立三相变压器的励磁涌流仿真系统,三相变压器仿真原理图如图6所示。

设定该电力仿真系统的初始参数:变压器额定容量设为 S_n 取值 180 MVA,电压变换变比设定为

$$U_{1n} / U_{2n} = 220 / 110 \quad (19)$$

一次侧边线圈回路的参数设为

$$L_1 = 0.008 \text{ p.u.}, R_1 = 0.001 \text{ p.u.} \quad (20)$$

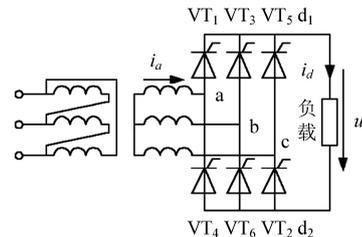
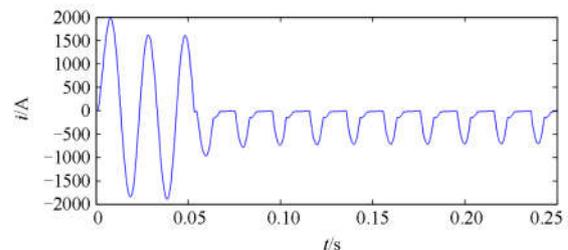


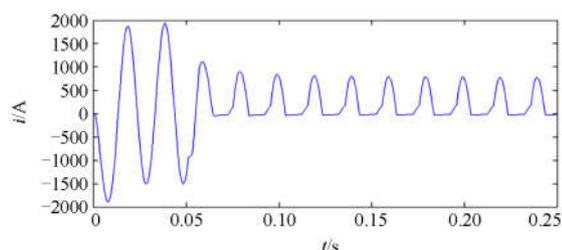
图6 三相变压器仿真原理图

Fig. 6 Simulation schematic of three-phase transformer

三相变压器在不同状态下的励磁涌流波形图如图7所示。切除 AB 相短路故障后的励磁涌流波形如图7(a)所示,切除 ABC 三相短路故障后的励磁涌流波形如图7(b)所示。从图中波形可以观察到,当 ABC 三相任意两个或者三个相位在发生故障时线圈上的电流为尖顶形状,并且出现了间断角,符合



(a) 切除 AB 相短路故障后的励磁涌流波形



(b) 切除 ABC 三相短路故障后的励磁涌流波形

图 7 不同状态下的三相变压器励磁涌流波形图

Fig. 7 Three-phase transformer inrush current waveforms under different conditions

励磁涌流波形的一般特征。当故障被切除后励磁涌流的波形幅度迅速变小, 并达到稳定状态。

4 总结

本文通过对变压器励磁涌流特性的研究, 提出了一种新型的基于小波变换算法的变压器励磁涌流识别技术, 并通过仿真实验验证了此算法的涌流波形识别性能。从仿真结果来看励磁涌流的信号经过小波变换后, 其特征变得非常明显, 也变得易于识别。本文为变压器控制领域的研究提供了有价值的理论支持, 相信不久的将来, 该项技术会获得更为广泛的应用, 为电力保护系统的发展做出贡献。

参考文献

- [1] 陈贵平. 励磁变压器的选型及保护方式配置[J]. 江西电力, 2006(1): 1-3, 17.
CHEN Guiping. Selection and excitation transformer protection configuration[J]. Jiangxi Electric Power, 2006(1): 1-3, 17.
- [2] 姚东晓, 邓茂军, 倪传坤, 等. 变压器多侧励磁涌流产生机理及对差动快速动作区影响研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(5): 36-41.
YAO Dongxiao, DENG Maojun, NI Chuankun, et al. Transformer's multi-side inrush current generation mechanism and its influence on the differential protection's fast action zone[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(5): 36-41.
- [3] 傅伟, 赵莉华, 梁勇, 等. 多台变压器空载合闸励磁涌流及其抑制方案的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(1): 28-33.
FU Wei, ZHAO Lihua, LIANG Yong, et al. Study on no-load closing inrush current of transformer group and suppression measures[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(1): 28-33.

- [4] 安源, 刘家军. 一种基于波形相关分析识别变压器励磁涌流的方法[J]. 继电器, 2007, 35(18): 1-5.
Anyuan, LIU Jiajun. Wave correlation analysis to discriminate magnetizing inrush based methods[J]. Relay, 2007, 35(18): 1-5.
- [5] 李波, 江亚群, 侯立峰, 等. 利用波形曲率识别变压器励磁涌流的新方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2010, 22(6): 93-98.
LI Bo, JIANG Yaquin, HOU Lifeng, et al. Novel method to identify transformer inrush current based on the curvature characteristics of waveform[J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2010, 22(6): 93-98.
- [6] COLORADO D, DEMESA N, HUICOCHEA A, et al. Irreversibility analysis of the absorption heat transformer coupled to a single effect evaporation process[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 92: 101.
- [7] 邵文权, 乔妮, 王建波. 基于波形互相关系数的变压器励磁涌流识别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(23): 14-20.
SHAO Wenquan, QIAO Ni, WANG Jianbo. A novel algorithm of identifying inrush current based on waveform cross-correlation coefficient[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(23): 14-20.
- [8] ANNAKAGE U D, MCLAREN P G, DIRKS E, et al. A current transformer model based on the Jiles-Atherton theory of ferromagnetic hysteresis[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2000, 15(1): 57-61.
- [9] QIU Z, LEE C M, XU Z H, et al. A multi-resolution filtered-x LMS algorithm based on discrete wavelet transform for active noise control[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2016: 66-67.
- [10] HOWE E D, NICOLIS O. Genetic algorithm in the wavelet domain for large p small n regression[J]. Communications in Statistics-Simulation and Computation, 2015, 44(5): 1144-1157.

收稿日期: 2016-05-10; 修回日期: 2016-06-28

作者简介:

孙庆森(1980-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为高电压与绝缘技术、继电保护;

张海峰(1970-), 男, 学士, 工程师, 主要研究方向为电力系统自动化、变电运行;

王猛(1981-), 男, 学士, 工程师, 主要研究方向为电力系统自动化、变电检修。

(编辑 张爱琴)