

计及磁动态特性的变压器励磁涌流机理分析

王松¹, 王翔², 曹阳³, 袁旭峰⁴(1. 贵州财经学院教务处, 贵州 贵阳 550004; 2. 湖南省电力公司, 湖南 长沙 410007;
3. 贵州大学化学生物工程学院, 贵州 贵阳 550003; 4. 贵州大学电气工程学院, 贵州 贵阳 550003)

摘要: 变压器的空载合闸过程容易引起较大的励磁涌流, 进而影响甚至危害变压器和电力系统的正常运行。对变压器励磁涌流的机理进行深入研究及仿真, 对于保证电力系统运行安全以及变压器的继电保护定值的设置具有十分重要意义。在考虑变压器的磁饱和及磁滞特性基础上, 利用计及变压器铁心磁滞特性的非线性数学模型, 对三相变压器励磁涌流形成的机理及影响因素进行了分析, 并采用了并联的非线性补偿电流源来模拟变压器的非线性特性。最后, 对三相变压器在不同合闸时间点的励磁涌流及谐波特性进行了仿真, 结果表明文中所采用的方法是正确可行的。

关键词: 励磁涌流; 磁滞特性; 磁饱和特性; 空载合闸; 非线性补偿电流源

Principle of the magnetizing inrush current in transformer with magnetic hysteresis characteristics

WANG Song¹, WANG Xiang², CAO Yang³, YUAN Xu-feng⁴(1. Department of Educational Administration, Guizhou College of Finance and Economics, Guiyang 550001, China;
2. Hunan Electrical Power Corporation, Changsha 410081, China;
3. School of Chemical Engineering, Guizhou University, Guiyang 550001, China;
4. Electrical Engineering Institute, Guizhou University, Guiyang 550001, China)

Abstract: The switching process of electrical transformer with no-load may result in magnetizing inrush current with high amplitude. Such currents have many unfavorable effects on electrical power system and electrical transformer. It is quite urgent to research on principle of magnetic inrush current for the safety of power system and the setup of relay protection operation, as well as to simulate the phenomena exactly. Considering the magnetic hysteresis characteristics and magnetic saturation of electrical transformer, the principle of magnetic inrush current is analyzed for three-phase transformers based on a nonlinear mathematical model with magnetic hysteresis and saturation characteristics. In the simulation, a parallel nonlinear compensating current source is proposed to simulate the nonlinear characteristics of electrical transformer. In the end, the magnetic inrush currents and harmonics currents of three-phase electrical transformer are given at different switching time, and the results have proven the nonlinear current can compensate the nonlinear of electrical transformer, such as magnetic hysteresis characteristics and magnetic saturation.

Key words: magnetic inrush current; magnetic hysteresis characteristics; magnetic saturation; switching with no-load; nonlinear compensating current source

中图分类号: TM772 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2008)15-0027-06

0 引言

变压器是电力系统中重要的设备, 它的安全性和稳定性对于整个电力系统的运行具有相当的重要性。在稳态运行时, 变压器的励磁电流只有其额定电流的1%~2%。然而, 当变压器空载投入电网时, 由于变压器铁心磁通饱和特性以及铁心材料的非线性特征, 会产生很大的励磁电流, 即励磁涌流^[1-3]。一般来说, 励磁涌流的幅值可达到变压器额定电流

的数十倍, 给电力系统及变压器本身带来了一系列的危害, 如损害变压器的绝缘、使继电保护装置误动作, 造成电能质量下降等。目前, 众多学者对变压器励磁涌流的机理分析^[4-6, 18]、识别^[7-12]、继电保护^[12-17]、以及对励磁涌流的抑制^[4]等方面进行了深入的研究, 并取得了大量的研究成果。然而, 大多数文献在分析变压器的励磁涌流时, 仅考虑了变压器铁心的磁饱和特性, 没有计及铁心材料的磁滞特性^[4-17]。文献[4]也仅研究了计及铁心材料磁滞特性

单相变压器的励磁涌流。

本文在考虑变压器的磁饱和及磁滞特性基础上,分析了单相及三相变压器励磁涌流形成的机理,并采用了并联的非线性补偿电流源来模拟变压器的非线性特性,最后给出了变压器在不同的合闸时间、带不同负载时的变压器励磁涌流仿真结果。

1 单相变压器励磁涌流机理分析

变压器涌流主要由变压器的磁饱和特性以及铁心材料的非线性特征所引起,其机理分析如下:

在正常稳态运行时,空载电流占额定电流 2.5% 以下,但当变压器空载合闸到电网时,电流可能比较大,往往超过额定电流的 10 倍甚至以上。图 1 所示为单相变压器空载合闸时的示意图。

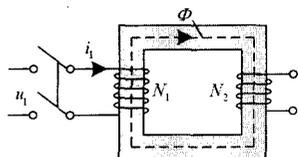


图 1 单相变压器空载合闸示意图

Fig.1 Diagram for energization of single-phase electrical transformer with no-load

图中,变压器二次侧开路、一次侧在 $t=0$ 时合闸到电压为 u_1 的电网上。其中

$$u_1 = \sqrt{2}U_1 \sin(\omega t + \alpha) \quad (1)$$

式中: α 为 $t=0$ 时电压 u_1 的初始相位。

在 $t \geq 0$ 期间,变压器一次绕组中电流 i_1 满足如下微分方程式

$$i_1 R_1 + N_1 \frac{d\phi}{dt} = \sqrt{2}u_1 \sin(\omega t + \alpha) \quad (2)$$

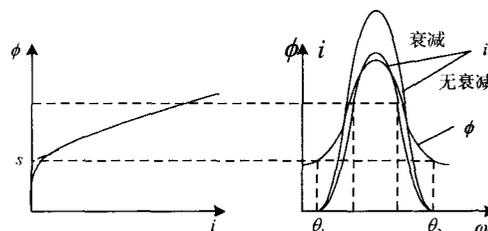
式中: ϕ 为与一次绕组相交链的总磁通,它包括主磁通和漏磁通,近似地认为等于主磁通。而电阻 R_1 本身较小,在瞬态过程的初始阶段作用较小,但它的阻尼作用使得瞬态电流逐渐衰减。在空载投闸的瞬间,假定变压器中存在剩磁,根据磁链守恒原理,有

$$\phi = \Phi_m [\cos \alpha - \cos(\omega t + \alpha)] + \phi_r \quad (3)$$

式中: Φ_m 为稳态磁通最大值, α 为初始相角, ϕ_r 为剩磁。在时间 $t=0$ 时合闸,则 $\phi = \phi_r$, 为铁心中的剩磁,说明铁心中的磁通不会产生突变,则此时铁心中不会产生涌流。

由于铁心的磁饱和特性,如图 2 所示,当磁通 ϕ 小于 s 时,产生的励磁电流近似为 0; 当大于 s 时,则励磁电流会急剧上升。故 S 点则相当于为磁饱和特性曲线的阈值,对应于右图中,相当于时间点 θ_1

和 θ_2 。当时间处于 θ_1 和 θ_2 之间时,将产生励磁涌流,反之励磁电流将会很小。当 $t = (\theta_1 + \theta_2)/2\omega$ 时,磁通和励磁涌流达到最大。由于磁饱和特性,产生的励磁涌流幅值相当大,一般为变压器额定励磁电流的 10 倍以上。考虑到铁心本身阻尼,即电阻 R_1 的作用时,励磁涌流的幅值将有所衰减。



(a)磁饱和特性 (b)磁通及励磁涌流

图 2 变压器空载合闸磁饱和特性

Fig.2 Magnetic saturation characteristic of the energizing process of single-phase electrical transformer with no-load

根据以上分析可知,单相变压器合闸时,有以下特性:

铁心的磁饱和特性是产生励磁涌流主要原因。因此励磁涌流受到铁心的材料与结构的影响。

励磁涌流与合闸时间有关。这一点可以作为单相变压器空载合闸时减小励磁涌流的主要控制方式。

励磁涌流及单相变压器的主磁通中均含有直流分量和二次谐波,这一点是变压器涌流保护动作的主要依据,并用来与短路电流相区别。

励磁涌流的大小也与剩磁有关,而且变压器容量越大,其励磁涌流对变压器额外电流的倍数越小。

2 三相变压器励磁涌流机理分析

三相变压器励磁涌流的形成机理与上节单相变压器的类似。但是,三相变压器的励磁涌流波形不能完全采用三个单相变压器来替代,有其相应的特点。本文分析了如图 3 所示一次侧为星型连接时三相变压器的空载合闸特性。其数学模型为:

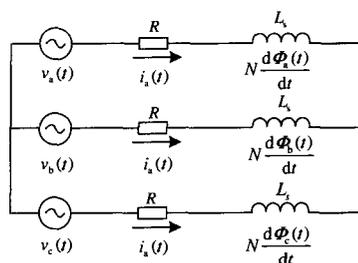


图 3 三相变压器等效电路图

Fig.3 Equivalent circuit of three-phase electrical transformer

$$v_a(t) - v_b(t) = R(i_a(t) - i_b(t)) + L_s \frac{d((i_a(t) - i_b(t)))}{dt} + N \left\{ \frac{d\Phi_a(t)}{dt} - \frac{d\Phi_b(t)}{dt} \right\} \quad (4)$$

$$v_b(t) - v_c(t) = R(i_b(t) - i_c(t)) + L_s \frac{d((i_b(t) - i_c(t)))}{dt} + N \left\{ \frac{d\Phi_b(t)}{dt} - \frac{d\Phi_c(t)}{dt} \right\} \quad (5)$$

$$i_b(t) = -(i_a(t) + i_c(t)) \quad (6)$$

$$v_a(t) - v_b(t) = V_{m1} \sin(\omega t + \alpha + \pi/6) \quad (7)$$

$$v_b(t) - v_c(t) = V_{m1} \sin(\omega t + \alpha + 5\pi/6) \quad (8)$$

考虑到磁通 $\Phi(t) = AB(t)$ 及磁场 $H(t) = Ni(t)/P$,

可得计及变压器铁心磁滞特性的数学模型。

$$v_a(t) - v_b(t) = R(i_a(t) - i_b(t)) + L_s \frac{d((i_a(t) - i_b(t)))}{dt} + \frac{N^2 A}{P} \left\{ \frac{dB_a(t)}{dH_a(t)} \frac{di_a(t)}{dt} - \frac{dB_b(t)}{dH_b(t)} \frac{di_b(t)}{dt} \right\} \quad (9)$$

$$v_b(t) - v_c(t) = R(i_b(t) - i_c(t)) + L_s \frac{d((i_b(t) - i_c(t)))}{dt} + \frac{N^2 A}{P} \left\{ \frac{dB_b(t)}{dH_b(t)} \frac{di_b(t)}{dt} - \frac{dB_c(t)}{dH_c(t)} \frac{di_c(t)}{dt} \right\} \quad (10)$$

式中: 项 $dB_a(t)/dH_a(t)$ 、 $dB_b(t)/dH_b(t)$ 及 $dB_c(t)/dH_c(t)$ 可以通过变压器铁心的 B-H 磁滞曲线求得, 也可以采用等效的 Preisach 模型通过迭代计算获得。

根据以上两式可知, 三相变压器的各相间励磁涌流是相互影响的, 大致与: 电源电压大小和合闸初相角; 变压器三相绕组的接线方式和中性点接地方式; 三相铁心结构形式; 铁心材质; 合闸前剩磁大小和方向等因素有关。

需要说明的是, 由于三相变压器接入三相电压的各相电压在时间上相差 120° , 因此无论在任何合闸时间点都不可能完全消除变压器的励磁涌流。

3 变压器励磁涌流机理的模拟分析

根据图 3 可知, 变压器励磁涌流的形成主要在于铁芯材料的非线性特性, 而在等效电路模型中则主要体现在变压器绕组电抗 $L_s(t)$ 的非线性上。为此, 可以采用图 4 所示的并联非线性电流源方案来模拟变压器的磁饱和及磁滞特性。

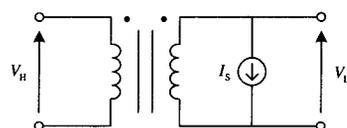


图 4 磁饱和和电流源补偿等效电路图

Fig.4 The equivalent circuit of current source to compensate the magnetic saturation of electrical transformer

图 4 中, 采用了一个非线性补偿电流函数 I_s 来补偿变压器绕组电抗 $L_s(t)$ 的非线性, 进而表征磁通 ϕ_s 的非线性, 即

$$\phi_s = L_s(t) \cdot I_s(t) \quad (11)$$

式 (11) 中的非线性特性可用图 5 中磁通为励磁电流的函数来表示。 I_s 定义为

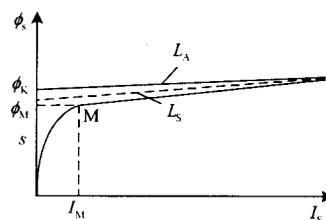


图 5 磁饱和特性模拟曲线

Fig.5 Simulation curve of magnetic saturation

$$I_s = \frac{\sqrt{(\phi_s - \phi_K)^2 + 4DL_A} + \phi_s - \phi_K}{2L_A} - \frac{D}{\phi_K} \quad (12)$$

式中: L_A 近似为漏电抗的两倍;

$$D = \frac{-B - \sqrt{B^2 + 4AC}}{2A}; \quad A = \frac{L_A}{\phi_K^2}; \quad B = \frac{L_A I_M - \phi_M}{\phi_K},$$

$C = I_M(L_A I_M - \phi_M + \phi_K)$; M 点定义为变压器磁饱和特性的电压拐点, 即铁心在该点达到磁饱和。

$$\phi_K = K\phi_M \quad (13)$$

式中: K 的范围为 $1.15 \sim 1.25$ 。

磁通 ϕ_s 定义为下式

$$\phi_s = \int v_L(t) dt \quad (14)$$

利用式(12)则可近似拟合式(9)和(10)中的最后一项, 即非线性项, 进而可以模拟计及磁饱和和磁滞特性的变压器动态特性。故可得图 6 所示计算励磁涌流的方法。

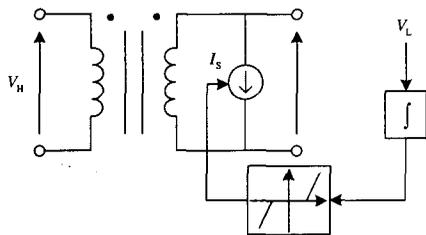


图 6 励磁涌流的计算方法

Fig.6 Computation of magnetic inrush current

如图 6 中所示，电压 V_L 为作用在变压器绕组上的电压，经过一个积分环节之后变为磁通 ϕ_s ；将 ϕ_s 输入式(12)所示非线性环节中得到非线性补偿电流 I_s ，以补偿变压器绕组的非线性特性。

4 三相变压器励磁涌流的仿真分析

为了分析三相变压器的励磁涌流特性，建立了图 7 所示的仿真系统。

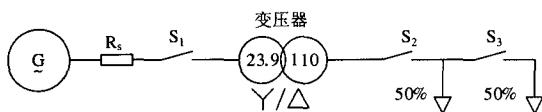


图 7 变压器励磁涌流仿真系统

Fig.7 Simulation system for the magnetic inrush current of three-phase electrical transformer

其中：交流电压源 G 通过一个等效电阻 R_e 与开关 S_1 连接；电源的额定电压为 23.9 kV、额定频率为 50 Hz。三相变压器变比为 23.9 kV/110 kV，采用 Y/ Δ 连接；且变压器通过开关 S_2 和 S_3 分别与两个容

量为汽轮发电机额定容量 50% 的额定负载相连接。

为验证变压器空载合闸与时间的关系，在仿真中，给出图 8 所示的两个合闸时间点。一个为 5.99832 s，a 相和 b 相间线电压过零点，c 相的相电压达到最大；一个为 6.00332 s，a 相和 b 相线电压幅值达到最大，c 相的相电压为 0。

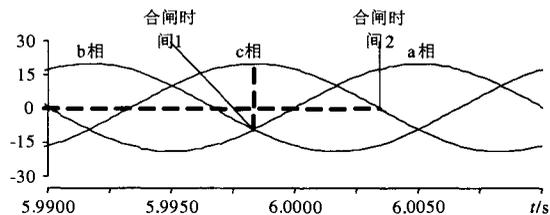


图 8 合闸时间点示意图

Fig.8 Diagram for switching time of electrical transformer

图 9 给出了在以上两个合闸时间点，三相变压器空载合闸时在各相绕组内产生的励磁涌流仿真波形结果。

在合闸时间点 1，励磁涌流波形如图 9(a)所示，a 相和 b 相间线电压过零点，c 相的相电压幅值最大。因此，流过变压器 c 相绕组的电流的绝对值最小，对应的励磁电流也达到最小。如图 2(a)和图 5 可知，此时变压器 c 相绕组未处于磁饱和状态，而且根据图 2(b)可知此时合闸角为 0，小于 θ_1 。因此，此时变压器 c 相励磁电流为 0。但由于在仿真过程不能精确获得该时间点，因此 c 相励磁电流不为 0，但非常接近于 0。与此同时，a 相与 b 相的电压幅值相等，电压幅值的变化趋势相反，因此对应的励磁电流幅值也相等，且方向相反，图 9(a)验证了这一结论。

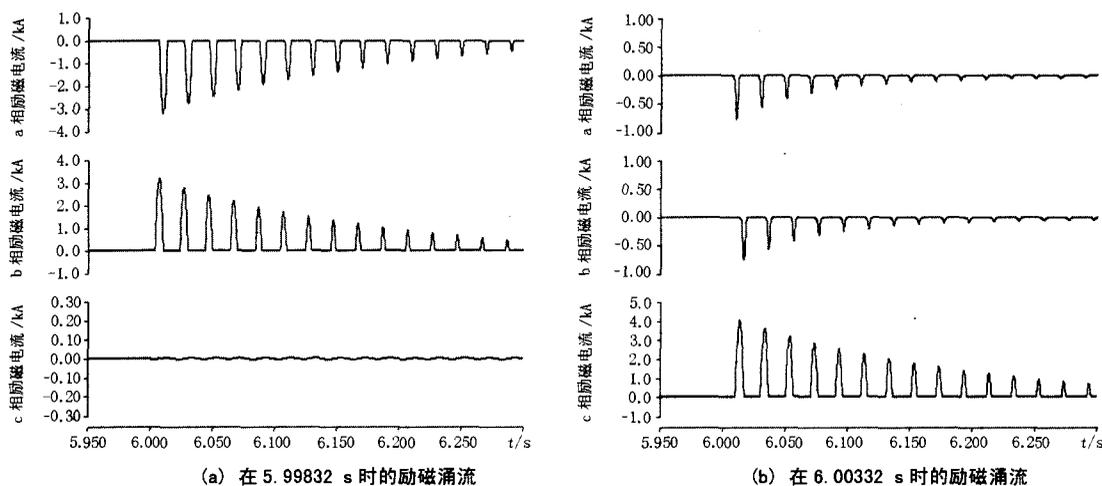


图 9 变压器在空载合闸时的励磁涌流模拟结果

Fig.9 Simulation result of magnetic inrush current when electrical transformer switching with no-load

在合闸时间点 2, 励磁涌流波形如图 9(b)所示, a 相和 b 相间线电压幅值最大, c 相的相电压幅值最小。因此, 流过变压器 c 相绕组的电流的幅值最大, 对应的励磁电流也达到最大。根据图 2(b)可知此时合闸角为介于 θ_1 和 θ_2 之间, 又由图 2(a)和图 5 可知, 变压器 c 相绕组处于磁饱和状态。因此, 变压器 c 相励磁电流为达到最大。与此同时, a 相与 b 相的电压瞬时值相反, 且幅值变化趋势相反, 对应获得的励磁电流幅值也相等, 且方向相同, 图 9(b)验证了这一结果。

如图 9 所示, 也可以知道, 在变压器的空载合

闸过程中, 变压器各相绕组的励磁涌流均含有直流分量, 且直流分量的大小与励磁电流的幅值成正比。

如表 1 所示为不同合闸时间点变压器各相的励磁涌流 2、3、4 次谐波。由表可知, 当变压器空载合闸过程中产生的励磁涌流越大, 对应的谐波幅值就越大。其中, 在各次谐波中, 二次谐波的幅值最大, 三次谐波次之, 也就是说, 谐波频率越高, 对应的幅值越小。这也说明了在变压器的继电保护中可以利用这一点与故障电流的继电保护予以区分的主要原因。

表 1 变压器在不同时间点空载合闸时各相励磁涌流的谐波数据

Tab.1 The data of 2th,3th,4th harmonics of magnetic inrush current when electrical transformer switching with no-load at different time

合闸 时间/s	a 相励磁涌流			b 相励磁涌流			c 相励磁涌流		
	2 次	3 次	4 次	2 次	3 次	4 次	2 次	3 次	4 次
5.998 32	0.626 7	0.423 5	0.312 7	0.632 4	0.425 3	0.293 0	0.001 3	0.001 1	0.000 6
5.999 99	0.801 8	0.515 0	0.373 0	0.101 9	0.085 2	0.064 5	0.110 2	0.091 6	0.071 9
6.001 65	0.630 4	0.426 8	0.298 9	0.001 3	0.001 1	0.000 6	0.631 9	0.427 5	0.305 7
6.003 32	0.106 6	0.088 8	0.070 3	0.105 9	0.088 0	0.070 5	0.804 3	0.525 8	0.358 4
6.004 99	0.001 3	0.001 1	0.000 6	0.636 2	0.435 6	0.301 1	0.624 2	0.411 3	0.304 8
6.006 65	0.107 5	0.088 9	0.071 0	0.809 6	0.530 8	0.364 9	0.103 6	0.085 8	0.068 5
6.008 32	0.626 7	0.423 6	0.312 7	0.632 4	0.425 4	0.293 0	0.001 3	0.001 1	0.000 6

5 结论

本文在考虑变压器绕组的磁动态特性基础上, 分析了单相变压器和三相变压器励磁涌流形成的机理; 采用非线性补偿电流源来模拟变压器绕组的磁动态特性; 对三相变压器在不同的合闸时间、带不同负载时的变压器励磁涌流进行了仿真, 结果表明:

本文所采用的非线性补偿电流源能够有效模拟变压器的磁动态特性, 以及变压器空载合闸过程中所产生的励磁涌流情况。

铁心的磁饱和特性是产生励磁涌流主要原因。如果不考虑变压器绕组的饱和特性, 则不会产生励磁涌流

励磁涌流与合闸时间有关。当变压器一次侧绕组线电压为零时合闸, 该线电压所对应相的励磁涌流最大, 而其它相的励磁涌流较小; 当变压器一次侧绕组线电压幅值最大时合闸, 该线电压所对应相的励磁涌流最小, 几乎为 0, 但其它相的励磁涌流则较大; 无论合闸时间为什么时刻, 如考虑变压器的饱和特性和铁心材料的非线性特性, 都不可能消除变压器的励磁涌流。

三相变压器励磁涌流和主磁通中一般均含有直流分量和二次谐波。

参考文献

- [1] 王维俭. 电气主设备继电保护原理与运行[M]. 北京: 中国电力出版社, 2001.
WANG Wei-jian. Theory and Application of Protection for Electric Main Equipment[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2001.
- [2] 王维俭, 候炳鑫. 大型机组继电保护理论基础[M]. 北京: 中国电力出版社, 2001.
WANG Wei-jian, HOU Bing-yun. The Theoretical Foundation of Large Scale Generator-transformer Set Relay Protection[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1997.
- [3] Harlow J H. Electric Power Transformer Engineering [M]. Florida: CRC Press LLC, 2003.
- [4] 李钜, 乌云高娃, 等. Preisach 模型剩磁计算与抑制励磁涌流合闸角控制规律[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(19): 37-41.
LI Po, WUYUN Gao-wa, et al. Calculation of Residual Flux Based on Preisach Model and Entering Phase Control of Transformer to Eliminate Inrush Current[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(19): 37-41.
- [5] 张新刚, 王泽忠. 基于 PREISACH 理论的电流互感器建模研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(16):

- 68-72.
ZHANG Xin-gang, WANG Ze-zhong. Research on CT Modeling Based on the Preisach Theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2005,25(16):68-72.
- [6] 郝文斌, 李群湛, 等. 基于支持向量机的变压器励磁涌流仿真实现[J]. 电网技术, 2006, 30(1): 60-64.
HAO Wen-bin, LI Qun-zhan, et al. Simulation Study and Algorithm Implementation of Transformer Excitation Inrush Current Based on Support Vector Machine[J]. Power System Technology, 2006, 30(1): 60-64.
- [7] 马静, 王增平, 徐岩. 用相关函数原理识别变压器励磁涌流和短路电流的新方法[J]. 电网技术, 2005, 29(6): 78-81.
MA Jing, WANG Zeng-ping, XU Yan. A New Method to Identify Inrush Current and Short Circuit Current of Transformer Based on Correlation Function[J]. Power System Technology, 2005, 29(6): 78-81.
- [8] 索南加乐, 焦在滨, 等. 基于波形系数的变压器励磁涌流快速识别算法[J]. 电网技术, 2006, 30(11): 71-76.
SUONAN Jia-le, JIAO Zai-bin, et al. A Fast Algorithm to Identify Inrush Current Based on Waveform Factor[J]. Power System Technology, 2006, 30(11): 71-76.
- [9] 吕志娟, 刘万顺, 等. 一种快速识别变压器励磁涌流和内部故障的新方法[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(2): 47-51.
Lü Zhi-juan, LIU Wan-shun, et al. A Novel Scheme to Fast Discriminate Inrush Current from Internal Fault of Power Transformer[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(2), 47-51.
- [10] 宗洪良, 金华烽, 等. 基于励磁阻抗变化的变压器励磁涌流判别方法[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(7): 91-94.
ZONG Hong-liang, JIN Hua-feng, et al. Transformer Inrush Detected by the Variation of Magnetizing Impedance [J]. Proceedings of the CSEE, 2001,21(7): 91-94.
- [11] 袁宇波, 陆于平, 等. 基于附加相位判别的自适应二次谐波励磁涌流制动方案研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(18): 21-24.
YUAN Yu-bo, LU Yu-ping, et al. An Adaptive Second Harmonic Restrained Method Using Phase Angle and Amplitude for Inrush Detection[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(18), 21-24.
- [12] 胡玉峰, 陈德树. 基于采样值差动的励磁涌流鉴别方法[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(9): 55-58.
HU Yu-feng, CHEN De-shu. A New Method to Identify Inrush Current Based on Sampled Values[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(9):55-58.
- [13] 郝治国, 张保会, 等. 基于等值回路平衡方程的变压器保护原理[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(10): 67-72.
HAO Zhi-guo, ZHANG Bao-hui, et al. Study on Transformer Protection Principle Based on Equivalent Circuit Equilibrium Equation[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(10):67-72.
- [14] 承文新, 刘志超. 变压器差动保护涌流制动原理分析[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(11): 90-92.
CHENG Wen-xin, LIU Zhi-chao. Analysis of Inrush Restraint Theory for Transformer Differential Protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(11): 90-92.
- [15] 袁宇波, 陆于平, 等. 三相涌流波形特征分析及差动保护中采用二次谐波相位制动的原理[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(19): 23-28.
YUAN Yu-bo, LU Yu-ping, et al. The Characteristic Analysis of Three Phase Transformer Inrush and the Discussion of Second Harmonic Restrained Method Using Phase Angle and Amplitude[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(19):23-28.
- [16] 马静, 徐岩, 王增平. 利用数学形态学提取瞬时量的变压器保护新原理[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(6): 19-23.
MA Jing, XU Yan, WANG Zeng-ping. Power Transformer Protection Based on Transient Data Using Mathematical Morphology[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(6), 19-23.
- [17] 李肖博, 肖仕武, 等. 基于形态滤波的变压器电流相关保护方案[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(6): 8-13.
LI Xiao-bo, XIAO Shi-wu, et al. Study on Transformer Correlation Protection Based on Morphological Filtering[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(6), 8-13.
- [18] 符杨, 蓝之达, 陈珩. 计及铁心动态磁化特性的三相变压器励磁涌流的仿真研究[J]. 变压器, 1997, 34(9): 4-11.
FU Yang, LAN Zhi-da, CHEN Heng. Simulation of Magnetizing Inrush Current in Three-phase Transformer Considering Dynamic Magnetization Performance of Core[J]. Transformer, 1997,34(9):4-11.

收稿日期: 2007-11-01; 修回日期: 2007-12-15

作者简介:

王松(1969-), 男, 硕士, 研究方向为应用物理技术。

E-mail: WangSong2000@sohu.com