

doi: 10.7690/bgzd.2013.07.021

## 变压器差动保护中励磁涌流产生的机理分析与建模

王志英<sup>1</sup>, 唐祎侃成<sup>1</sup>, 王志伟<sup>2</sup>

(1. 湖南科技大学信息与电气工程学院, 湖南湘潭 411201;

2. 湖南铁道职业技术学院电气工程系, 湖南株洲 412001)

**摘要:** 变压器空载投入时会产生很高的励磁涌流, 造成差动保护装置误动作, 分析涌流波形可以设法抑制误动。对变压器差动保护中励磁涌流产生的机理进行分析, 分别对单相变压器和三相变压器的励磁涌流进行建模, 并对其进行实验验证。实验结果表明: 所建模型符合涌流的特点, 可用于变压器励磁涌流的计算机建模。

**关键词:** 差动保护; 励磁涌流; 建模**中图分类号:** TP273 **文献标志码:** A

## Mechanism Analysis and Modeling of Excitation Inrush Current in Transformer Differential Protection

Wang Zhiying<sup>1</sup>, Tang Yikan Cheng<sup>1</sup>, Wang Zhiwei<sup>2</sup>

(1. School of Information &amp; Electrical Engineering, Hunan University of Science &amp; Technology, Xiangtan 411201, China;

2. Department of Electrical Engineering, Hunan Railway Professional Technology College, Zhuzhou 412001, China)

**Abstract:** The overload transformer operation will generate high excitation inrush current and cause differential protection devices wrong operation. Analyze inrush current waveform to find out method to constrain wrong operation. Analyze generation mechanism of excitation inrush current in transformer differential protection. Then establish inrush current models of single-phase transformer and three-phase transformer separately. Validate the model by test. The test results show that the models accord with the characteristics of the flow, and can be used for computer modeling of transformer excitation inrush current.

**Key words:** differential protection; excitation inrush current; modeling

### 0 引言

大容量电力变压器常常用到差动保护。长期的运行经验表明, 变压器差动保护在一定程度上能够较好地区分内部故障和外部故障, 但在励磁涌流和内部故障电流的鉴别上还存在一定的不足。因此当前变压器差动保护的主要矛盾仍然集中在励磁涌流和故障电流的鉴别上<sup>[1]</sup>。当变压器空载投入和外部故障切除后电压恢复时, 可能出现数值很大的励磁涌流。由于励磁涌流的存在常常会使差动保护装置误动作。通过对励磁涌流产生的机理进行分析并建模, 可以找到涌流与内部短路电流的判据。

### 1 励磁涌流的产生机理

由于接入电力系统中的变压器基本上都是三相变压器, 因此在分析涌流的特征时以三相变压器的励磁涌流为主, 但对于励磁涌流产生机理的分析, 单相与三相基本上是一致的。因此, 以单相变压器空载合闸为例来说明其产生过程。

#### 1.1 空载合闸时励磁涌流的产生机理

正常运行时, 变压器的励磁电流很小, 一般不

超过额定电流的 2%~10%。当变压器空载投入时(即原边合闸而副边开路), 铁芯中的剩余磁通与稳态磁通在大小和相位上可能不一致。而铁芯中的磁通不能突变, 暂态中将产生很大的非周期磁通, 造成铁芯的严重饱和, 励磁阻抗大幅下降, 于是在一次侧产生了励磁电流<sup>[2]</sup>。从磁学本质的磁理论上来说, 假定所有磁性材料都是由独立分子组成的小磁体组成。这些微小的磁体可以在材料内运动。材料的磁化过程就是独立的磁微粒排列过程。磁性材料饱和时, 所有的磁畴基本上都以相同的方向排列好了。铁芯达到饱和状态后, 磁阻  $\mu$  降低使磁化电流  $I_m$  陡增, 这个磁化电流是感性的<sup>[3]</sup>。

#### 1.2 变压器外部故障切除后电压恢复时励磁涌流产生机理

变压器外部故障切除后, 电压恢复期间, 磁滞回线并未回到零位, 而是在基本 B-H 回线的某位置上, 铁芯中存在剩余磁通。这时如线圈重新导通, 磁通的变化就从某回线端点而不是零点坐标开始, 使变压器磁芯进入饱和, 在二次侧产生励磁涌流<sup>[3]</sup>。

收稿日期: 2013-01-24; 修回日期: 2013-02-23

基金项目: 电力系统的继电保护基金编号(E50470); 基于 SPWM 全数字化矢量控制系统研究(05JT1014)

作者简介: 王志英(1971—), 女, 湖南人, 硕士, 讲师, 从事电力系统继电保护、电力电子与电力传动研究。

在开始的瞬间，励磁涌流衰减很快(经 0.5~1 s 后，一般不会超过 0.25~0.5 倍的额定电流)。它的大小和衰减时间与外加电压的相位、铁芯中剩余磁通的大小和方向，电源的大小、回路的阻抗以及变压器的大小和铁芯的性质有关。对于单相变压器，如果正好在电压瞬时值为最大时合闸，就不会出现励磁涌流；对于三相变压器，在任何时候合闸，至少有两相中要出现程度不同的励磁涌流<sup>[2]</sup>。

## 2 励磁涌流的分析与建模

文献[2]给出了基于间断角判据而建立的励磁涌流模型，它是以楞次定律为基础的。而楞次定律的输入量是变化的磁场，与变压器空投时的物理过程不一致(变压器空投时输入量是变化的电量)。另外，得出的间断角公式也不符合励磁涌流 3 个特点中的 2 个特点。文献[6]也给出了涌流模型，是用磁通来表示的，而磁通是一个不易测量的量，故相对粗略。笔者的思路是励磁涌流与剩余磁通的大小和方向有关，就必然与铁心的  $i-\Phi$  曲线有关。而该曲线均是由实验测得的，建模时采用两折线法。由已知  $i-\Phi$  曲线(已由厂家测好)得到近似折线，从而得到不论铁心饱和与否时的磁化电流曲线，其间还要考虑变压器的铁损。

### 2.1 单相变压器的励磁涌流建模-两折线法

厂家已测得  $H-B(i-\Phi)$  曲线，为简化起见，用两折线代之，如图 1 中  $OSP$  折线。图中  $S$  点由饱和磁通  $\Phi_{sat}$  确定，铁芯不饱和时，磁化曲线的斜率很大，励磁电流  $i_m$  近似为零；铁芯进入饱和区后，磁化曲线的斜率  $L_m$  迅速变小， $i_m$  大大增加，从而形成励磁涌流。忽略涌流的衰减，励磁曲线采用近似的两折线模型，励磁曲线如图 1。

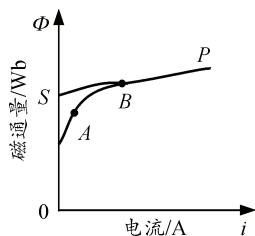


图 1 变压器铁芯的磁化曲线

当变压器空载投入时，铁芯内即产生磁通。一般情况下，在变压器投入前，铁芯中总有剩余磁通，再加上电压的瞬间，磁通不能突变；因此，必然产生暂态磁通，使投入瞬间的总磁通等于剩余磁通。所以，暂态过程中的总磁通比稳态磁通大得

多。当投入瞬间稳态磁通最大瞬时值与剩余磁通方向相反时，产生的总磁通为最大，如图 2。从图 2 中可见，总磁通等于稳态磁通加暂态磁通。由于稳态磁通与电源电压间的相角差为  $90^\circ$ ；因此，当电压瞬时值为零时投入变压器的瞬间，产生的总磁通最大<sup>[2]</sup>。

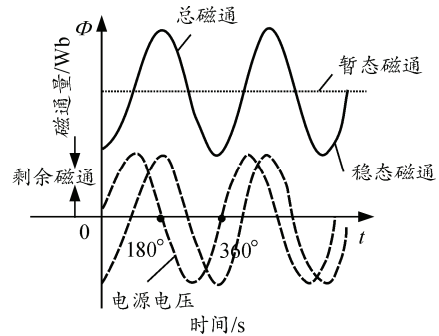


图 2 变压器空载投入时的最大总磁通

与一定的总磁通相对应的励磁电流，可由图 3 的图解法求得。图 3 中左折线  $OSP$  代表理想的磁化曲线，右侧是总磁通  $\Phi$  和电流  $i$  的波形。由右侧的总磁通  $\Phi$  曲线上任一点，例如  $90^\circ$  时的  $x$  点，投影到左侧的  $OSP$  折线上，在横轴上得出相应的电流  $i_x$ ，即可在右侧通过励磁涌流  $i$  曲线找到相应点  $i_x$ 。根据同样的方法可求得全部励磁涌流曲线。由图 3 可以发现，在总磁通  $\Phi$  瞬时值小于饱和磁通  $OS$  时，励磁电流的瞬时值为零。一个周期中，总磁通  $\Phi$  值小于  $OS$  的一段区域，即为涌流间断角，即  $t < t_1$ ， $t > t_2$  的角度<sup>[2]</sup>。

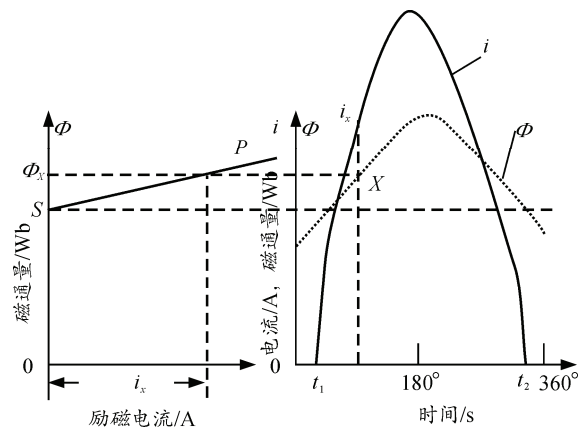


图 3 励磁涌流图解

如忽略回路中的电阻，变压器投入时的电压为

$$u = U_m \sin(\omega t + \alpha) \quad (1)$$

式中： $U_m$  为电压的最大值； $\alpha$  为空载投入时的电压初相角。当变压器中存在剩余磁通  $\Phi_r$  时，才可能产生涌流。此时铁芯中既有衰减的暂态磁通，又存在稳态磁通。

由图 3 可见，涌流的表达式为：

$$i(t) = i_m \frac{\sin(\omega t) - \sin t_1}{1 - \sin t_1} \quad (2)$$

式中： $t_1$  为第一个涌流的开始点； $\omega$  为输入电压信号的角频率； $i_m$  为电流的最大值。

考虑衰减和电源阻抗等因素，一个周期内涌流的表达式为：

$$\begin{cases} i(t) = i_m \frac{\sin(\omega t) - \sin t_1}{1 - \sin t_1} e^{-\beta t} & t_1 < t < t_2 \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

式中： $i_m$  是涌流峰值； $\beta$  为涌流回路的时间常数， $\beta=R/L$ ，其中  $R$  是涌流回路的电阻， $L$  是涌流回路的电感。

### 2.2 三相变压器的励磁涌流

单相变压器关于涌流的论述，只要各相之间的相位关系正常，也同样适用于多相变压器。分析一相就等于分析了多相。文献[5]说明了 1 台三相 Y/Y 联接变压器在  $U(\text{电压})=0$  瞬时合闸(铁芯中具有剩余磁通，与正常磁通相反)的瞬变磁通密度分布曲线。由于三相的关系，变压器仅能一相(比如 A 相)在零电压下合闸，因此剩余的 B 相和 C 相，在合闸瞬间的电压等于每相电压最大值的 86.6%，并且一相为正，另一相为负。如果合闸前变压器 A 相铁芯的剩余磁通对应于磁通最大值，其极性与等效额定电压的磁通极性相反，B 相和 C 相的剩余磁通将对应于每相正常磁通的一半，极性与 A 相剩余磁通的极性相反。因此，3 个相位的冲击电流不相等，会受到 A、B、C 三相剩余磁通的影响，同时还受到变压器绕组联接方式和磁路影响[5]。文献[5]还指出了当空载电流和磁通分别为正弦波时根据铁芯材料的 H-B( $i-\Phi$ ) 曲线可以得到磁通和空载电流非正弦波。

三相变压器涌流一个周期的表达式为：

$$\begin{cases} i(t_a) = i_{ma} \frac{\sin(\omega t) - \sin t_{a1}}{1 - \sin t_{a1}} e^{-\beta_a t} & t_{a1} < t < t_{a2} \\ i(t_b) = i_{mb} \frac{\sin(\omega t + 120) - \sin t_{b1}}{1 - \sin t_{b1}} e^{-\beta_b t} & t_{b1} < t < t_{b2} \\ i(t_c) = i_{mc} \frac{\sin(\omega t - 120) - \sin t_{c1}}{1 - \sin t_{c1}} e^{-\beta_c t} & t_{c1} < t < t_{c2} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

式中： $i_{ma}$ ， $i_{mb}$ ， $i_{mc}$  分别是 A，B，C 三相涌流峰值； $\beta_a$ ， $\beta_b$ ， $\beta_c$  为 A，B，C 三相涌流回路的时间常数， $\beta=R/L$ ，其中  $R$  是 A，B，C 三相涌流回路的电阻， $L$  是 A，B，C 三相涌流回路的电感。

## 3 实验分析

### 3.1 单相变压器实验

利用 1 台 3 kVA，220/110 V，50 Hz 的单相变压器进行了励磁涌流实验。测得波形如图 4。

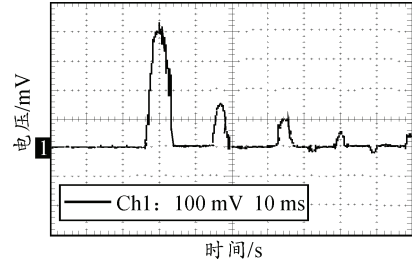
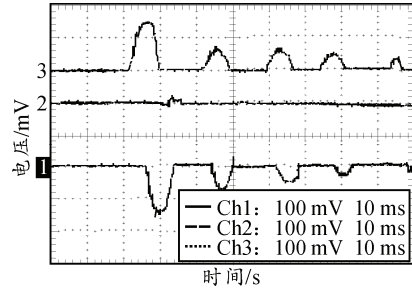


图 4 单相变压器涌流实验波形

### 3.2 三相变压器实验

利用 1 台 1 kVA，220/110 V，50 Hz 的三相变压器进行了实验。测得波形如图 5。



1. C 相; 2. B 相; 3. A 相

图 5 三相变压器三相涌流实验波形

## 4 结论

笔者建立了单相和三相变压器励磁涌流的模型。从实验结果可以看出：变压器合闸瞬间出现的初始电流值主要由合闸点的电压波形和铁芯合闸时剩余磁通的大小和极性确定；剩余磁通足够大时，涌流波形会出现间断。另外，涌流是偏向于时间轴的一侧。实验结果证明：所建模型符合涌流的特点，可以用于对变压器励磁涌流的建模与分析。

### 参考文献：

- [1] 吴丹. 变压器继电保护中励磁涌流识别方法的研究[D]. 长沙: 湖南大学电气与信息工程学院, 2007.
- [2] 山东电力研究所. 电力系统继电保护: 第 2 部分[M]. 北京: 中国电力出版社, 1981.
- [3] COLONEL WM. T. MCLYMAN. 变压器与电感设计手册[M]. 3 版. 北京: 中国电力出版社, 2009.
- [4] 张雪松. 数字式变压器差动保护若干问题的研究[D]. 浙江: 浙江大学, 2006.
- [5] Martin J. Heathcote. The J&P Transformer Book Twelfth edition[M]. England: Reed Educational and Professional Publishing Ltd, 1998.