

DOI: 10.7667/PSPC171046

# 基于非周期分量衰减速率的变压器励磁涌流鉴别方法

黄少锋<sup>1</sup>, 李姗姗<sup>1,2</sup>, 肖远清<sup>3</sup>

(1. 新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京 102206; 2. 大唐华中电力试验研究所, 河南 郑州 450000; 3. 北京四方继保自动化股份有限公司, 北京 100085)

**摘要:** 提出一种基于非周期分量与基波分量比值(简称  $k_0$ )衰减速率的励磁涌流鉴别方法。首先利用变压器仅一侧有电流还是多侧都有电流的特点, 实现变压器空充与非空充状态的初步划分。判出空充状态后, 利用三相差流中  $k_0$  衰减速率的差异进一步判别励磁涌流与故障电流。基于  $k_0$  衰减速率的励磁涌流鉴别方法原理简单可靠、计算量小, 易于工程实现, 对传统的二次谐波判据是个有益的补充。Matlab 仿真和现场误动数据表明该方法不仅能够 在变压器剩磁较大时确保空载合闸的成功率, 当变压器空充到轻微匝间故障时亦能大大缩短保护的闭锁时限。

**关键词:** 变压器保护; 空充状态识别; 励磁涌流;  $k_0$  衰减速率

## A novel identification criterion for transformer inrush current based on decay rate of aperiodic component

HUANG Shaofeng<sup>1</sup>, LI Shanshan<sup>1,2</sup>, XIAO Yuanqing<sup>3</sup>

(1. State Key Laboratory of New Energy Power System, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;  
2. Datang Central-China Electric Power Test Research Institute, Zhengzhou 450000, China;  
3. Beijing Sifang Automation Co., Ltd., Beijing 100085, China)

**Abstract:** A novel identification criterion for transformer inrush current based on the decay rate of the ratio of aperiodic component and fundamental component (referred to as  $k_0$ ) is proposed. Under the no-load closing status of a transformer, the current only exists on the power source side, while under other operating conditions, the current exists on all sides. Therefore it is possible to make use of this difference to identify the no-load closing status first. In case of no-load closing status, the decay rate of  $k_0$  is then adopted to distinguish between inrush current and internal fault current. The simplicity of the proposed criterion in principle and computation enables its implementation in real-time applications. Simulation results by Matlab and the malfunction data on the field indicate that the proposed method can not only reliably block the protection when the transformer is in the ultra-saturation condition, but also provide a faster operation speed under slight internal faults, which is a beneficial complementary to the conventional second-harmonic criterion.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51777071).

**Key words:** transformer protection; no-load closing status identification; inrush current; decay rate of  $k_0$

## 0 引言

实践表明, 在变压器正常运行过程中发生区内、区外故障时, 作为变压器主保护之一的差动保护均能很好地满足保护“四性”的要求。但当变压器空载合闸并出现励磁涌流时, 由于励磁涌流数值很大且完全流入差动保护的差动回路, 差动元件中将产生非常大的不平衡电流, 从而导致差动保护误动。

为防止励磁涌流引起的误动, 实际工程中广泛采用二次谐波制动原理<sup>[1-4]</sup>。但随着变压器容量的不断增大及变压器饱和磁通的逐渐降低, 当变压器剩磁较大时有可能产生趋于正弦波形的励磁涌流, 二次谐波含量很低, 使得采用二次谐波闭锁判据的差动保护误动<sup>[5-6]</sup>。此外, 当变压器空投到轻微匝间故障时, 由于故障电流很小, 差流为励磁电流与故障电流的叠加, 其二次谐波含量可能很大, 将造成保护动作时间的大大延长。故正确识别变压器励磁涌流和内部故障电流依然是当前变压器差动保护的难点<sup>[7-13]</sup>。

基金项目: 国家自然科学基金项目(51777071)

变压器空充到内部故障的几率较小,为提高空载合闸的正确率,变压器差动保护应在保证空充不误动的前提下尽量提高空充到内部故障时保护的動作速度。考虑到变压器差动保护在除空载合闸外的其他运行状态下均有较好的表现,若能将空载合闸状态区分出来,之后辅以判据有针对性地判别正常空充与空充故障这两种情况,将会大大改善变压器差动保护的動作特性,尤其是保护的動作速度。

本文首先利用变压器空载合闸时差动电流与制动电流之间特殊的数量关系,实现空载合闸状态的初步划分;之后根据正常空充与空充故障时电流衰减时间常数的不同,利用三相差流中非周期分量与基波分量比值(简称  $k_0$ )的衰减速率差异进一步区分正常空充与空充故障两种情况。Matlab 仿真和现场误动数据表明基于  $k_0$  衰减速率的方法不但能在变压器剩磁较大、二次谐波含量较低的情况下可靠地闭锁保护,当变压器空充到轻微匝间故障时亦能大大提高保护的動作速度。

## 1 变压器空载合闸状态的识别

以指向变压器为正方向,常用的差流、制动电流的计算公式为(变压器各侧电流均归算至高压侧)

$$I_d = \left| \sum_{i=1}^N \dot{I}_i \right| \quad (1)$$

$$I_r = \frac{1}{2} \left| \dot{I}_{\max} - \sum \dot{I}_i \right| \quad (2)$$

式中:  $I_d$  为差动电流;  $\left| \sum_{i=1}^N \dot{I}_i \right|$  为变压器各侧电流相量和;  $I_r$  为制动电流;  $\dot{I}_{\max}$  为变压器各侧电流中幅值最大的电流相量;  $\sum \dot{I}_i$  为除幅值最大的电流相量外,其余各侧电流相量和。

在变压器空载合闸时,励磁电流只流经合闸侧,其余各侧的电流理论上均为 0,于是,式(1)、式(2)可写为

$$I_d = \left| \dot{I}_m \right| \quad (3)$$

$$I_r = \frac{1}{2} \left| \dot{I}_m \right| \quad (4)$$

式中,  $\dot{I}_m$  为合闸侧的电流。

由式(3)、式(4)可知,变压器空载合闸时的差动电流和制动电流均由流过电源侧的电流决定,且二者之间存在 2 倍的数量关系。进一步分析可知此 2 倍关系从断路器合闸时刻开始就一直存在,且不仅对相量值差动保护成立,对采样值差动保护也成立。

下面说明保护启动后的一段时间内,差动电流

与制动电流之间的 2 倍关系仅存在于变压器空载合闸状态。

由式(1)、式(2)可知变压器正常运行时差流为不平衡电流,其值很小,制动电流为负荷电流,其值在变压器额定电流附近,此时差流与制动电流的比值很小。运行变压器发生区内故障时,由于电流不能突变,计算出的差流将由故障前的不平衡电流值逐渐增大为稳态故障电流值,制动电流将由故障前的穿越电流值向故障后的新穿越电流值过渡(此暂态过程的长短取决于所采用算法的数据窗长度,对于全周傅氏算法,此暂态过程为一个工频周期)。相应地,此时差流与制动电流的比值也将有一个由故障前稳态值向故障后稳态值变化的暂态过程,即在保护启动后算法的暂态过程中该比值是动态变化的,并不会维持在一个固定数值附近。同理可知运行变压器发生区外故障时,差流与制动电流的比值在算法的暂态过程中也将动态变化,不会维持在一个固定数值附近。故利用保护启动后算法暂态过程中差流与制动电流的比值关系可以初步识别出变压器的空载合闸状态。

考虑到电流互感器和测量回路零点漂移的影响,在变压器空载合闸状态判别时,应当引入一个较小的门槛值,即保护启动后算法的暂态过程中,若差流与制动电流的比值维持在数值 2 的附近,即可判为空载合闸状态。

## 2 电流衰减时间常数分析

为简便起见,以单相变压器为例来分析。单相变压器空充时的等效电路图如图 1 所示,图中  $R_s$ 、 $L_s$  分别为系统等效电阻与等效电感;  $r_s$ 、 $L_s$  分别为变压器电源侧绕组的等效电阻与等效漏感;  $L_m$  为励磁支路等效电感(不计励磁支路电阻)。

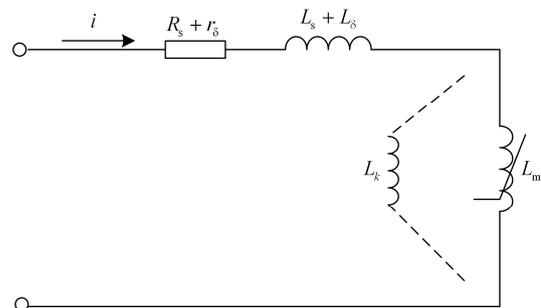


图 1 单相变压器空载合闸等效电路图  
Fig. 1 Equivalent circuit of single-phase transformer no-load closing

当变压器发生匝间短路时,可以把短路部分看

作第三绕组, 相当于一台三绕组变压器在第三绕组发生短路<sup>[14]</sup>。故变压器空充到匝间短路的等效电路图相当于在图 1 的励磁支路( $L_m$ )上并联了短路匝的漏感(如虚线所示的 $L_k$ )。

由图 1 可列出变压器正常空充、空充匝间故障时电流流经回路的衰减时间常数分别为(因所考虑的短路匝数不大, 可假设变压器电源侧绕组的 $L_\delta$ 、 $r_\delta$ 保持不变)

$$\tau = \frac{(L_s + L_\delta) + L_m}{R_s + r_\delta} \quad (5)$$

$$\tau' = \frac{(L_s + L_\delta) + L'_m // L_k}{R_s + r_\delta} \quad (6)$$

式中:  $\tau$  和  $\tau'$  分别为单相变压器正常空充和空充匝间故障时电流流经回路的衰减时间常数;  $L'_m$  为空充匝间故障时励磁支路的等效电感。

当变压器空载合闸产生励磁涌流时, 变压器铁芯将交替经历饱和与非饱和过程, 其励磁电感 $L_m$ 的瞬时值也将随之发生剧烈变化; 空充匝间故障时, 由于短路匝的漏感 $L_k$  相对较小且基本保持不变, 因此 $L'_m // L_k$  的值将更小。

单相变压器正常空充时, 由于回路的衰减时间常数较大, 电流中的非周期分量、基波分量均为暂态分量, 二者将同步衰减且衰减较慢, 基于非周期分量与基波分量比值的 $k_0$  将平缓下降; 单相变压器空充匝间故障时, 回路的衰减时间常数较小, 电流中的非周期分量衰减加快, 基波分量中由于含有强制分量(短路电流)衰减变慢, 此时 $k_0$  衰减较快。

故比较式(5)与式(6)可知: 变压器正常空充时电流流经回路的衰减时间常数 $\tau$  大于空充匝间故障时电流衰减时间常数 $\tau'$ 。因此, 可利用 $k_0$  的衰减速率区分正常空充与空充故障两种情况。

### 3 三相变压器 $k_0$ 特征分析

上面以单相变压器为例, 从原理上简单说明了正常空充与空充故障时 $k_0$  变化趋势之间的差别, 得出结论“正常空充时 $k_0$  平缓衰减”、“空充故障时 $k_0$  衰减较快”, 这里的“平缓”与“较快”是相对而言的, 是正常与故障两种情况下对比得到的。对于三相变压器来说, 除励磁支路外三相参数对称, 故相与相之间提供了这种对照标准。套用单相变压器的分析结论可知: 三相变压器空充单相故障时, 因故障相的结构破坏, 该相 $k_0$  的衰减趋势与正常相 $k_0$  的衰减趋势相比就是“快速”的; 但三相变压器正常空充时, 三相励磁支路参数是不对称的, 此时三

相 $k_0$  的衰减具有怎样的规律, 这需要进行进一步的分析论证。经研究发现, 对于 YNd11 接线的变压器来说, 由于 D 侧环流和相差补偿方式的共同作用, 变压器正常空充时, 励磁支路参数的不对称对三相 $k_0$  衰减的影响并不大, 三相 $k_0$  的衰减速率具有相似性。下面具体分析 D 侧环流和相差补偿方式对三相 $k_0$  衰减速率的影响。

#### 3.1 D 侧环流助增对三相励磁电流衰减速率的影响

以图 2 为例进行分析(变压器二次侧参数已归算至一次侧)。图中变压器接线方式为 YNd11 接线, 三相变压器由三台单相变压器构成, 相与相之间不存在磁场耦合。

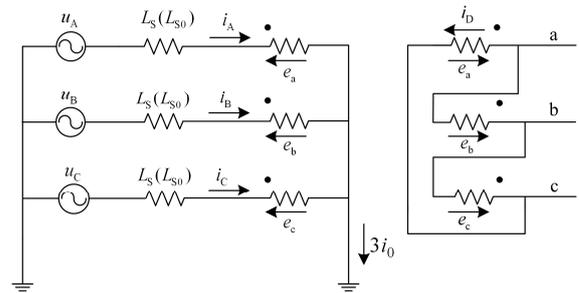


图 2 YNd11 变压器三相接线图

Fig. 2 Circuit of YNd11 connection transformer

通过对图 2 列写微分方程及求解(详细推导过程见文献[15]), 并考虑到励磁支路电流等于环流与线电流之和, 可得 D 侧环流和高压侧线电流的表达式为

$$i_D = \frac{L_\delta + L_{s0}}{3(L_\delta + L_{\delta D} + L_{s0})} (i_{\mu a} + i_{\mu b} + i_{\mu c}) \quad (7)$$

$$\begin{cases} i_A = l_1 i_{\mu a} - l_2 (i_{\mu b} + i_{\mu c}) \\ i_B = l_1 i_{\mu b} - l_2 (i_{\mu a} + i_{\mu c}) \\ i_C = l_1 i_{\mu c} - l_2 (i_{\mu a} + i_{\mu b}) \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $i_D$  为 D 侧环流;  $i_A$ 、 $i_B$ 、 $i_C$  分别为三相线电流;  $L_\delta$ 、 $L_{\delta D}$  分别为变压器高、低压侧绕组的漏感;  $L_{s0}$  为系统零序电感;  $i_{\mu a}$ 、 $i_{\mu b}$ 、 $i_{\mu c}$  分别为三相励磁电流;  $l_1 = \frac{2L_\delta + 2L_{s0} + 3L_{\delta D}}{3(L_\delta + L_{\delta D} + L_{s0})}$ ;  $l_2 = \frac{L_\delta + L_{s0}}{3(L_\delta + L_{\delta D} + L_{s0})}$ 。

为说明 D 侧环流对三相励磁电流衰减速率的影响, 下面以三相励磁电流中非周期分量的衰减为例进行分析。图 3 给出了 YNy 接线和 YNd11 接线的三相变压器(除接线方式外, 两变压器其余参数相同)相同角度合闸时, 各相的励磁电流波形及非周期分量衰减百分比, 其中图 3(a)和图 3(b)是 YNy 接线变压器的相关曲线, 图 3(c)和图 3(d)是 YNd11 接线变

压器的相关曲线。非周期分量衰减百分比反映了合闸后各数据窗计算出的非周期分量占非周期分量初始值的百分比(以空充一周波后的数据窗作为初始数据窗,将该数据窗计算出的非周期分量作为非周期分量初始值)。

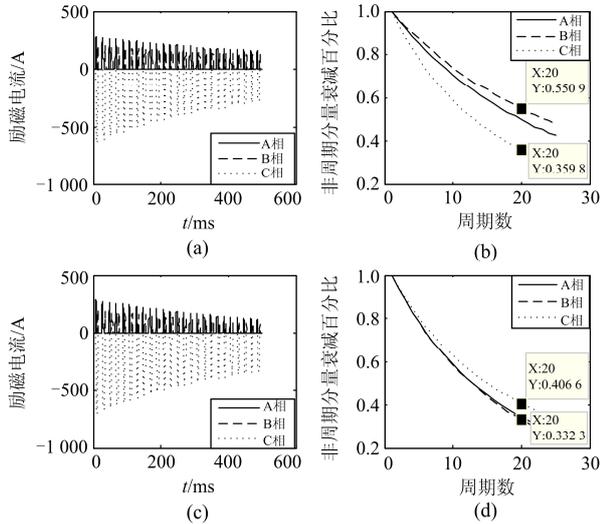


图3 励磁电流波形及非周期分量衰减趋势图

Fig.3 Waveform of inrush current and the attenuation trend of aperiodic component

由图3可看出,YNy接线和YNd11接线的变压器在相同角度合闸时,二者的三相励磁电流初始值基本相同,但衰减趋势不同:对YNy接线的变压器来说,励磁电流的衰减速率与励磁电流的大小呈现正相关;对于YNd11接线的变压器来说,励磁电流越小则衰减越快。对该现象的解释如下。

YNy接线的变压器相与相之间几乎没有电的联系也没有磁的联系,各相励磁电流仅按照本相的电路参数进行衰减。如图3所示的合闸角度下,B相励磁电流最小,该相励磁支路的等效励磁电感最大(所对应的电流衰减时间常数最大,参考式(5)),故B相非周期分量衰减最慢,见图3(b),B相合闸后第20周期的非周期分量衰减到初始值的55.09%;C相励磁电流最大,该相励磁支路的等效励磁电感最小,故C相非周期分量衰减最快,见图3(b),C相合闸后第20周期的非周期分量衰减到初始值的35.98%。

而对于YNd11接线的变压器来说,图3的合闸角度下,B相励磁电流最小,但由于D侧环流的影响,B相的励磁电流同时出现在A、B、C三相的线电流表达式中(见式(8)),即 $i_{ub}$ 除流经本相电路、经由本相电路参数衰减外,还有部分 $i_{ub}$ 流经A、C两相电路、经由A、C两相的电路参数衰减。因A、

C两相励磁支路的等效励磁电感远小于B相励磁支路的等效励磁电感,故B相非周期分量的衰减速率大大加快,见图3(d),B相合闸后第20周期的非周期分量衰减到初始值的33.23%;同理可解释此时C相励磁电流中非周期分量衰减速率变慢,见图3(d),C相合闸后第20周期的非周期分量衰减到初始值的40.66%的原因。

由上面的分析可知,YNd11接线的变压器正常空充时由于D侧环流的存在,各相励磁电流的衰减速率在一定程度上互相牵制,具体表现在原本衰减快的励磁电流衰减变慢、原本衰减慢的励磁电流衰减加快(与同等条件下YNy接线变压器的三相励磁电流相比),缩小了各相励磁电流衰减速率上的差别。

### 3.2 相位补偿方式对差流衰减速率的影响

由于无法得到D侧绕组电流,YNd11接线的变压器通常采用相间差动的相位补偿方式。采用相差补偿方式后,正常空充时各相差流为

$$\begin{cases} i_{da} = \frac{1}{\sqrt{3}}(i_{ua} - i_{ub}) \\ i_{db} = \frac{1}{\sqrt{3}}(i_{ub} - i_{uc}) \\ i_{dc} = \frac{1}{\sqrt{3}}(i_{uc} - i_{ua}) \end{cases} \quad (9)$$

式中, $i_{da}$ 、 $i_{db}$ 、 $i_{dc}$ 分别为三相差流。

由式(9)可知每相差流均为两相励磁电流之差,这使得各相差流的衰减速率与两相电路参数均有关(暂不考虑D侧环流的影响),增大了三相差流衰减常数之间的耦合性。

相差补偿方式的另一个特点是均衡三相差流的大小。以A相 $30^\circ$ 合闸为例(见图4),此时B、C两相的合闸角度分别为 $-90^\circ$ 、 $150^\circ$ 。因合闸时刻B相的强制磁通瞬时值为0,故B相不会饱和、励磁电流为0,而A、C两相由于合闸时刻强制磁通瞬时值大小相等、方向相反,从而出现大小相等方向相反的涌流。经过相差补偿之后,三相差流均有值,且大小差别不大(见图5)。

由于相差补偿方式均衡了三相差流的大小,同时又使得三相差流的衰减时间常数互相耦合,故三相差流衰减速率的差别并不大。

综上所述,YNd11接线的变压器正常空充时,D侧环流的存在缩小了三相励磁电流衰减速率上的差别,相差补偿方式的运用均衡了三相差流的大小、使得三相差流的衰减时间常数互相耦合。D侧环流和相差补偿方式这两个因素共同作用,保证了正常空充时三相差流的衰减速率差别不大,也即保证了

三相差流中  $k0$  的衰减速率差别不大。而三相变压器空充到单相故障时, 由于故障相的结构破坏, 该相电流的衰减时间常数将大大减小, 计算得到的  $k0$  迅速衰减; 而差流为正常励磁电流的相, 其  $k0$  衰减缓慢。故若横向比较三相差流中  $k0$  的衰减速率, 则既可以确保保护在变压器正常空充时不误动, 又可以快速检测出空充到单相故障的情况。

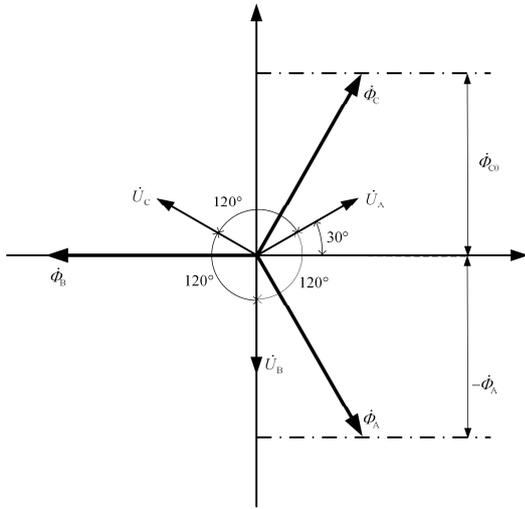


图 4 电压、磁通旋转矢量图

Fig. 4 Diagram of voltage and flux rotation vector

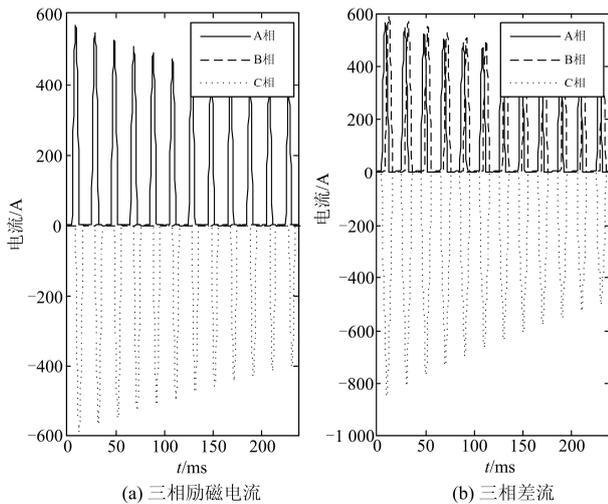


图 5 三相励磁电流与三相差流

Fig. 5 Three-phase inrush current and differential current

## 4 保护方案设计

为便于横向比较三相差流中  $k0$  的变化趋势, 首先对  $k0$  采取归一化的处理方法, 用  $gk0$  表示归一化后的  $k0$ , 则

$$gk0(i) = \frac{k0(i)}{k0(1)} \quad (10)$$

式中:  $k0(i)$  表示第  $i$  个数据窗计算出的  $k0$  值;  $k0(1)$  表示变压器空充一周波后计算出的第一个  $k0$  值。

用  $gk0$  的差分  $dgk0$  表征  $k0$  的衰减速率, 则

$$dgk0_{\varphi}(i) = \frac{gk0_{\varphi}(i-N) - gk0_{\varphi}(i)}{T} \quad (11)$$

式中:  $\varphi$  表示 A、B、C 三相;  $N$  为一周期的采样点数;  $T$  为工频周期。

基于  $k0$  衰减速率的判据如下。

计算同一时刻三相差流中的  $dgk0$  绝对值, 记

$$m = \frac{\max(|dgk0_{\varphi}|)}{\min(|dgk0_{\varphi}|)} \quad (12)$$

当  $m > m_{set}$  ( $m_{set}$  为门槛值) 时, 判为空充故障; 其余情况判为正常空充。为保证判断结果的合理性和准确性, 还应注意以下几点。

1) 由于正常空充时,  $k0$  衰减较平缓, 计算出的三相  $dgk0$  的绝对值较小, 此时可设置差分门槛值  $dgk0_{set}$ , 当  $\max(|dgk0_{\varphi}|) < dgk0_{set}$  时, 可直接判为励磁涌流。

2) 由式(11)可知基于  $k0$  衰减速率的判据在变压器空充 2 周波后才投入运行, 故该判据应和二次谐波判据相配合, 作为二次谐波判据的辅助判据使用: 在判出空载合闸状态后, 采用二次谐波“一相闭锁三相”的闭锁方式闭锁保护, 之后利用基于  $k0$  衰减速率的判据进一步判断保护应继续闭锁还是开放。

3) 为了降低判据门槛值  $m_{set}$ , 同时为了防止差流为对称性涌流时算出的  $dgk0$  太小从而导致判据误判, 当某相差流的  $k0 < 10\%$  时, 基于  $k0$  衰减速率的励磁涌流识别判据应退出运行, 此时涌流闭锁判据仅使用二次谐波判据。

## 5 方案验证

### 5.1 仿真模型

本文利用 Matlab 进行仿真实验, 按照图 1 的电路图搭建仿真模型。变压器参数: 额定容量为 240 MVA, 额定电压为 500 kV/220 kV, 一次侧和二次侧的电阻标幺值为 0.002, 电感标幺值为 0.08。系统电阻、电感取 500 kV 系统典型值  $R_s = 5 \Omega$ ,  $L_s = 0.3 \text{ H}$ 。结合大量的仿真实验, 判据门槛值  $m_{set} = 5$  较为合适。

### 5.2 仿真结果分析

图 6 给出了变压器空载合闸于 A 相带 3%匝间故障情况下,三相的二次谐波含量和归一化后的  $k_0$  变化趋势。由于故障电流较小,由图 6(a)可以看出此时三相的二次谐波含量均远高于 15%,若仅使用传统的二次谐波判据,保护将长时间闭锁。使用基于  $k_0$  衰减速率的判据后,由于 A、C 两相差流中均含有故障电流,A、C 相的  $k_0$  迅速衰减,B 相差流中因只含有正常的励磁涌流,其  $k_0$  平缓衰减见图 6(b)。计算三相  $k_0$  的衰减速率,可得  $dgk_{0A}=3.8049$ 、 $dgk_{0C}=2.5493$ 、 $dgk_{0B}=0.1881$ ,此时  $m=20.23$ ,远大于门槛值  $m_{set}=5$ ,保护可以快速开放。

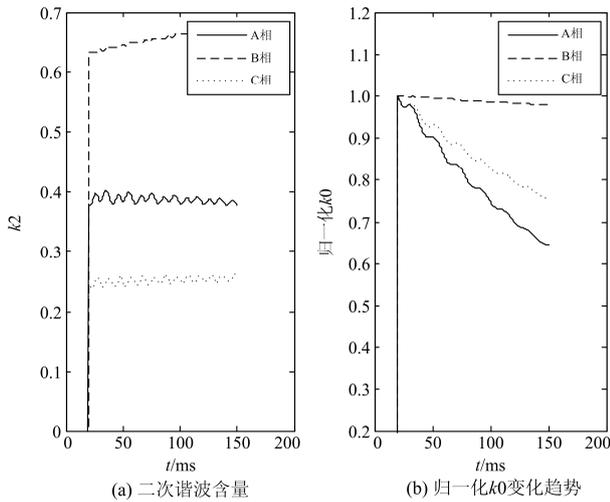


图 6 空充匝间故障时二次谐波含量及归一化  $k_0$  变化趋势  
Fig. 6 Second harmonic ratio and the trend of normalized  $k_0$  when switching on a transformer without load and with turn-to-turn fault

图 7 给出了变压器剩磁较大、空载合闸产生励磁涌流时,三相的二次谐波含量和归一化  $k_0$  的变化趋势。由于变压器剩磁较大,由图 7(a)可看出 A、C 相差流中的二次谐波含量远低于 15%,但此时三相  $k_0$  的衰减速率差别不大,见图 7(b),计算可得  $dgk_{0A}=1.4559$ 、 $dgk_{0B}=1.4221$ 、 $dgk_{0C}=1.4359$ , $m=1.02$ ,远小于门槛值 5,保护可以可靠闭锁。

### 5.3 实例验证

图 8(a)为现场变压器某次空充误动时各相差流中二次谐波含量。由于变压器剩磁较大,由图可知合闸一周波后,B 相的二次谐波含量稳定在 10%附近,小于二次谐波的闭锁门槛值 15%,故保护误动,变压器空充不成功。图 8(b)给出了空充 2 周波后,三相归一化  $k_0$  的变化趋势。由于变压器无故障,三相  $k_0$  衰减速率的差别并不大,此时计算出的  $m$  值为 1.34,远小于门槛值 5。故利用本文所提判据可

以在变压器剩磁较大时,可靠防止由于二次谐波含量较低造成的变压器空充不成功。

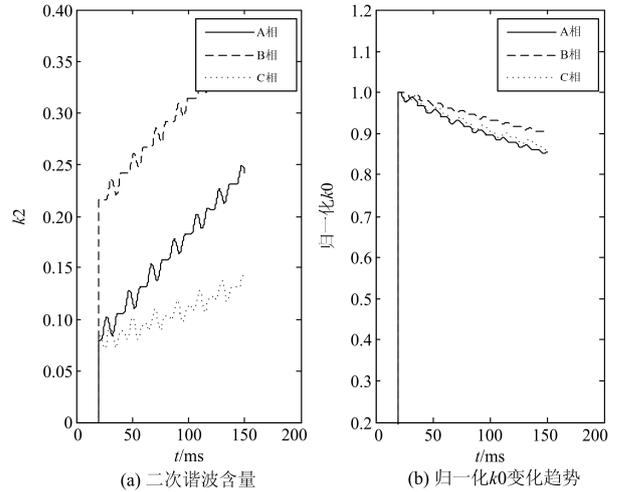


图 7 剩磁较大时二次谐波含量及归一化  $k_0$  变化趋势  
Fig. 7 Second harmonic ratio and the trend of normalized  $k_0$  when switching on a transformer with high remanence

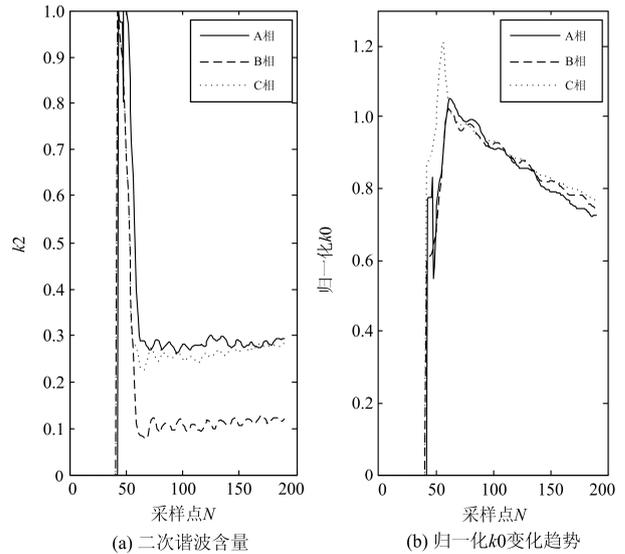


图 8 现场空充误动数据  
Fig. 8 Data of malfunction when switching on a transformer on the field

## 6 结论

本文提出了一种基于  $k_0$  衰减速率识别励磁涌流与故障电流的方法,该方法作为二次谐波判据的辅助判据,为二次谐波判据添彩、不捣乱,不仅能够 在变压器剩磁较大、二次谐波含量较低时实现保护的可靠闭锁,当变压器空充到轻微匝间故障时亦能大大缩短保护的闭锁时限,具有较好的工程应用价值。

## 参考文献

- [1] 张双梓, 王铮, 孙世勇, 等. 变压器差动保护二次谐波制动方案分析与改进[J]. 电测与仪表, 2014, 51(23): 123-128.  
ZHANG Shuangzi, WANG Zheng, SUN Shiyong, et al. Analysis and improvement of 2nd harmonic restraint strategy for transformer differential protection[J]. Electrical Measurement & Instrument, 2014, 51(23): 123-128.
- [2] 骆健, 吴罡明, 丁大德. 一种高可靠的自适应励磁涌流制动方法[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(2): 80-83.  
LUO Jian, WU Gangming, DING Dade. A highly reliable adaptive inrush current restraint principle[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(2): 80-83.
- [3] 刘小宝, 吴崇昊, 宋艳, 等. 基于二次谐波的自适应制动涌流方案[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(18): 131-134, 139.  
LIU Xiaobao, WU Chonghao, SONG Yan, et al. Adaptive second harmonic restraint method for inrush current[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(18): 131-134, 139.
- [4] 李贞, 张明珠, 倪传坤, 等. 变压器励磁涌流的自适应二次谐波分相制动方案[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(6): 121-124.  
LI Zhen, ZHANG Mingzhu, NI Chuankun, et al. An adaptive secondary harmonic split-phase restrained scheme for magnetizing inrush current in transformers[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(6): 121-124.
- [5] 王业, 袁宇波, 高磊, 等. 基于 FSAD 及非周期分量的励磁涌流鉴别算法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(21): 127-135.  
WANG Ye, YUAN Yubo, GAO Lei, et al. An algorithm to identify magnetizing inrush current based on FSAD and aperiodic components[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(21): 127-135.
- [6] 郑涛, 张婕, 高旭. 一起特高压变压器的差动保护误动作分析及防范措施[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(18): 92-97.  
ZHENG Tao, ZHANG Jie, GAO Xu. Analysis on a maloperation of differential protection for ultra-high voltage transformer and its countermeasure[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(18): 92-97.
- [7] 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.
- [8] 王雪, 王增平. 基于波形时域分布特征的变压器励磁涌流识别[J]. 电工技术学报, 2012, 27(1): 148-154.  
WANG Xue, WANG Zengping. Identification of transformer inrush currents based on waveform distribution characteristics[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(1): 148-154.
- [9] 黄少锋, 申洪明, 刘欣, 等. 基于能量信息的变压器励磁涌流识别方法[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(18): 110-113.  
HUANG Shaofeng, SHEN Hongming, LIU Xin, et al. A novel identification criterion for inrush current based on energy information[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(18): 110-113.
- [10] 焦在滨, 行武, 王钊, 等. 变压器励磁涌流负序二次谐波特征及机理[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(11): 146-151.  
JIAO Zaibin, XING Wu, WANG Zhao, et al. Features and mechanism of negative-sequence second harmonics of magnetizing inrush current in transformers[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(11): 146-151.
- [11] 孙庆森, 张海峰, 王猛, 等. 小波算法在变压器励磁涌流中的应用研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(8): 121-125.  
SUN Qingsen, ZHANG Haifeng, WANG Meng, et al. Application of wavelet algorithm in the transformer inrush current[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(8): 121-125.
- [12] 刘鹏辉, 黄纯, 江亚群, 等. 基于峭度系数的变压器励磁涌流识别方法[J]. 电网技术, 2015, 39(7): 2023-2028.  
LIU Penghui, HUANG Chun, JIANG Yaqun, et al. An approach to identify inrush current of transformers based on the kurtosis coefficient[J]. Power System Technology, 2015, 39(7): 2023-2028.
- [13] 邵文权, 乔妮, 焦在滨, 等. 利用电流变化率极值特征的变压器涌流识别研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(22): 64-70.  
SHAO Wenquan, QIAO Ni, JIAO Zaibin, et al. A method to detect inrush currents in power transformer using current derivation characteristics[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(22): 64-70.
- [14] 王维俭. 发电机变压器继电保护应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 1998.
- [15] 陈增田. 电力变压器保护[M]. 2版. 北京: 水利水电出版社, 1989.

收稿日期: 2017-07-14; 修回日期: 2017-11-03

作者简介:

黄少锋(1958—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统继电保护与控制;

李姗姗(1991—), 女, 通信作者, 硕士, 主要研究方向为电力系统继电保护; E-mail: liss199108@163.com

肖远清(1972—), 男, 工程师, 主要研究方向为微机保护装置的研究与开发。

(编辑 周金梅)