

# 适用电子式互感器的变压器保护磁通制动技术

徐长宝<sup>1</sup>, 高吉普<sup>1</sup>, 鲁彩江<sup>1</sup>, 王宇<sup>1</sup>, 汤汉松<sup>2</sup>, 张炜<sup>2</sup>

(1. 贵州电网有限责任公司电力科学研究院, 贵州 贵阳 550002;

2. 江苏凌创电气自动化股份有限公司, 江苏 镇江 212009)

**摘要:** 为了解决传统变压器磁通制动技术在电子式互感器应用场合下的使用局限性, 提出了一种适用于电子式互感器及三相变压器的磁通复判保护技术。介绍了磁通制动技术在变压器差动保护中的运用情况及存在问题, 讨论了电子式互感器暂态特性对磁通制动原理的影响。研究了基于三相变压器差动保护的转角补偿、涌流选相、陷阱复判等问题, 给出了保护算法实现流程。实验结果表明, 适用电子式互感器的磁通制动技术能大幅提高差动保护动作速度, 同时具备可靠的涌流识别能力。

**关键词:** 电子式互感器; 变压器; 差动保护; 磁通制动; 涌流选相

## Flux restraint technology of transformer protection for electronic transformer

XU Changbao<sup>1</sup>, GAO Jipu<sup>1</sup>, LU Caijiang<sup>1</sup>, WANG Yu<sup>1</sup>, TANG Hansong<sup>2</sup>, ZHANG Wei<sup>2</sup>

(1. Electric Power Research Institute of Guizhou Power Grid Co., Ltd., Guiyang 550002, China;

2. Jiangsu Lingchuang Electric Automation Co., Ltd., Zhenjiang 212009, China)

**Abstract:** In order to solve the limitations of traditional transformer flux restraint technology in electronic transformer application, this paper proposes a flux complex judgment technology for electronic transformer and three-phase transformer. The application situation and the existing problems of flux restraint technology are introduced in transformer differential protection, the influence of transient characteristics of electronic transformer on flux restraint theory is discussed, the problems of angle compensation, inrush current phase selection, trap multiple identification which are used in differential protection of three-phase transformer are researched, and the algorithm implementation process is given. Experiments show that flux restraint theory for electronic transformer can greatly improve the speed of the action of differential protection, and has the reliable identification ability for inrush current.

**Key words:** electronic transformer; transformer; differential protection; flux restraint; inrush current phase selection

中图分类号: TM77

文献标识码: A

文章编号: 1674-3415(2015)18-0080-07

## 0 引言

励磁涌流的判别是变压器保护的关键性问题, 如何区分励磁涌流与故障电流, 是变压器保护从业人员多年来的主要研究方向。传统的变压器保护主要基于对整周波的差流波形特征分析原理, 如二次谐波制动、波形对称判别等, 由于此类算法需要利用完整数据窗, 且需通过经验参数来确定动作门槛, 导致变压器差动保护动作速度较慢, 在动作正确率上仍存在不足。随着大电网建设中电压等级的不断提高, 电力系统安全对继电保护的動作速度及可靠性提出了更高要求, 产生励磁涌流时对应的磁通参数成为了变压器保护新的研究热点。文献[1-2]分析

了变压器励磁涌流的产生机理, 描述了励磁状态与故障状态下励磁电感的变化区别, 提出了基于变压器励磁电感参数识别的励磁涌流的方法。国内最早建设的超高压青海750 kV官亭变电站变压器保护中也采用了磁通制动原理, 变压器保护的磁通制动技术凭借其快速性及可靠性, 在工程应用中逐渐推广。

电子式互感器具备暂态特性好、采样精度优良, 可输出高采样频率数字信号等特点<sup>[3-4]</sup>。变压器保护存在各间隔CT采样特性配合问题, 由于电子式互感器无铁芯, 不存在磁饱和, 采用电子式互感器能从根本上解决由CT饱和引起的变压器差动保护误动问题<sup>[5]</sup>。此外, 电子式互感器提供了高精度、高采样频率的数字采样信号, 对于磁通制动等基于瞬时

采样点计算的变压器保护算法, 能最大化提高保护出口速度及动作正确性。

磁通制动技术在原理上使用了单相变压器参数模型, 应用范围有限。当保护变压器为三相一体式时, 需要在变压器转角内部加装套管CT, 通过硬件方式将三相变压器的磁通计算转换为三个单相变压器的磁通计算。目前在电子式互感器的应用场合下, 三相变压器转角内部不配置套管CT, 常规的磁通制动技术无法直接使用。为适应智能变电站的发展, 本文提出了一种电子式互感器运用下的变压器差动保护磁通制动技术, 通过软件转角补偿及涌流选相等方式, 对传统的磁通制动原理进行改进。

## 1 变压器保护磁通制动原理及其存在问题

### 1.1 单相磁通制动原理

文献[6]讨论了变压器励磁涌流与励磁电感的关系, 提出了一种适用于变压器差动保护的快速判别算法。

采用单相变压器简化模型, 如图1所示。

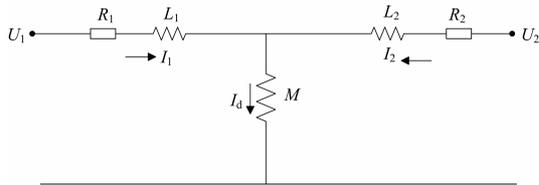


图1 双绕组单相变压器简化等值电路

Fig. 1 Simplified equivalent circuit of double winding single-phase transformer

可知一次侧励磁电感与电压电流关系为

$$U_1 - R_1 I_1 - L \frac{dI_1}{dt} = M \frac{dI_d}{dt} \quad (1)$$

式中:  $U_1$  为端电压;  $I_1$  为流入绕组电流;  $L$  为绕组电感;  $R_1$  为原绕组电阻;  $I_d$  为励磁涌流;  $M$  为励磁电感。

为简化计算, 忽略原副边绕组电感及原副边绕组电阻, 并将公式离散化后, 可得励磁电感的计算公式为

$$M_n = \frac{U_n}{I_{d(n+1)} - I_{d(n-1)}} \quad (2)$$

式中:  $M_n$  为励磁电感;  $U_n$  为端口电压;  $I_{d(n+1)}$  和  $I_{d(n-1)}$  分别为  $n+1$ 、 $n-1$  时刻差流。

根据故障状态与励磁状态下励磁电感的趋势不同, 可区分变压器励磁涌流。

磁通制动是一种基于对变压器励磁波形精密分析的快速动作技术, 与传统的波形对称, 二次谐波等波形模糊识别原理相比, 算法同时采用了电流与

电压瞬时值作为判据, 对互感器的暂态响应及传变精度要求更高。

### 1.2 三相变压器转角问题

通过变压器的磁通参数对励磁涌流进行识别, 在单相变压器应用场合下效果良好, 但对于三相变压器, 由于其内部普遍采用了Y, d转角的绕组接线方式, 且一般 $\Delta$ 侧的CT均安装在绕组外部, 其绕组内部电流无法直接获取, 导致单相磁通参数无法正确计算, 需要通过算法对接线电流进行转角修正。以Y0, d11接线的三相变压器为例, 常用的转角方式包括:

#### (1) Y侧转换至 $\Delta$ 侧

Y侧转角后修正电流为三相绕组电流差,  $\Delta$ 侧转角后修正电流为三相线电流。为简化计算, 假设两侧绕组匝数比为1, 可知

$$\begin{cases} I_{dA} = (I_{mA} - I_{mB})/\sqrt{3} \\ I_{dB} = (I_{mB} - I_{mC})/\sqrt{3} \\ I_{dC} = (I_{mC} - I_{mA})/\sqrt{3} \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $I_{mA}$ 、 $I_{mB}$ 、 $I_{mC}$  分别为ABC三相励磁电流;  $I_{dA}$ 、 $I_{dB}$ 、 $I_{dC}$  分别为三相转角后差流。

采用Y侧至 $\Delta$ 侧的转角修正后, 计算得到的差动电流为两相绕组励磁电流的差值。使用绕组励磁电流差值作为单相磁通计算电流显然是不合适的, 因此, Y侧转 $\Delta$ 侧的转角方式不宜采用磁通制动原理。

#### (2) $\Delta$ 侧转换至Y侧

转角后各相差流为

$$\begin{cases} I_{dA} = I_{mA} - I_0 - I_p \\ I_{dB} = I_{mB} - I_0 - I_p \\ I_{dC} = I_{mC} - I_0 - I_p \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $I_{mA}$ 、 $I_{mB}$ 、 $I_{mC}$  分别为ABC三相励磁电流;  $I_{dA}$ 、 $I_{dB}$ 、 $I_{dC}$  分别为三相转角后差流;  $I_0$  为Y侧零序电流;  $I_p$  为 $\Delta$ 侧绕组环流。

采用 $\Delta$ 侧至Y侧的转角修正后, 各相转角修正后的电流为绕组电流补偿值, 最终计算得到的差动电流为绕组励磁电流减去Y侧零流及 $\Delta$ 侧环流后的修正值。

变压器Y侧空载合闸时,  $\Delta$ 侧线电流  $I_{a1}$ 、 $I_{b1}$ 、 $I_{c1}$  均为0, 以A相为例,  $\Delta$ 侧A相转角后的修正电流  $I'_a$  为

$$I'_a = (I_{a1} - I_{c1})/3 = 0 \quad (5)$$

则转角后A相差流  $I_{dA}$  为

$$I_{dA} = (I'_a + I'_a) = I_A - I_0 \quad (6)$$

式中： $I_A$  为Y侧A相绕组电流； $I'_A$  为Y侧A相转角后的修正电流； $I'_a$  为△侧A相转角后的修正电流。

将式(6)带入式(4)可得

$$I_{mA} = I_A + I_p \tag{7}$$

式中： $I_A$  为Y侧A相绕组电流； $I_p$  为△侧绕组环流； $I_{mA}$  为A相励磁电流。

由式(7)可知，三相变压器空载合闸时，单相绕组励磁电流由Y侧相电流与△侧环流共同组成。当采用△侧转换至Y侧的转角方式后，由于Y侧CT安装在绕组外侧，通过△侧线电流只能计算得到不含环流分量  $I_p$  的近似绕组电流<sup>[7]</sup>。转角后直接采用单相磁通制动原理，结果也不正确。

### 1.3 环流助增对磁通制动原理的影响

采用△侧至Y侧转角方式，当变压器Y侧空载合闸时，饱和相的励磁电流会流过非饱和相，为防止非饱和相电流突变，变压器非饱和相的△侧必然会产生抵消作用的环流，即△侧环流。

△侧环流与非饱和相励磁电流同相，对非饱和相是去磁的；但对于饱和相，△侧环流与绕组电流反向，起到助磁作用。

采用△侧至Y侧转角后，绕组励磁电流由Y侧相电流与△侧环流组成，且△侧环流可由三相励磁电流求取，因此，三相差流与三相励磁电流相关<sup>[8-9]</sup>，由于△侧环流对Y侧电流的助增影响，三相变压器保护计算的差流由各相绕组励磁电流叠加形成，特定情况下，三相励磁电流线性组合后，二次谐波分量相互抵消，转角后差流呈现出故障电流特征的对称涌流，导致磁通制动原理失效。

## 2 适用于电子式互感器的磁通制动技术

### 2.1 电子式互感器对磁通制动技术的影响

传统电流互感器基于电磁感应原理，其暂态性能由内部铁芯决定。铁芯元件的磁化曲线是非线性的，当互感器工作在磁化曲线的饱和部分时，励磁电流急剧增大，互感器对暂态电流无法正确传变。电子式电流互感器一般采用罗氏线圈作为其传导元件，罗氏线圈是由非磁性材料为骨架构成的空心线圈，因此不会出现磁饱和以及磁滞现象，这些特点决定了罗氏线圈传感器具有良好的线性度和暂态特性<sup>[10-11]</sup>。

电子式互感器良好的暂态特性可有效反映励磁涌流与故障电流的波形特性区别，提高保护动作的正确性及快速性<sup>[12]</sup>，为所有基于波形识别原理的变压器保护提供了新的思路。区别变压器空冲涌流与空冲小匝间故障电流一直是变压器保护的难点，传

统互感器受铁芯饱和特性、磁回滞曲线、后端采样带宽等因素影响，其暂态传变过程无法阶跃，涌流波形失真，保护算法一般通过提高定值门槛的方式来防止误动，导致保护灵敏度降低，动作速度较慢。电子式互感器暂态传变特性均不受磁回路的影响，通过设置合适的外部积分参数，可实现对暂态电流的精确反映<sup>[13]</sup>，对涌流分辨更加清晰，由于电子式互感器没有电磁饱和问题，采样输出信号不会产生暂态畸变，能有效抑制非故障情况下的差动保护误动。

特别需要注意：磁通制动算法基于单相变压器模型提出，对于配置传统互感器的三相变压器，可通过在低压侧转角内部配置套内 CT，将三相磁通计算转换为单相磁通计算；但在智能变电站电子式互感器应用时，三相变压器转角内部不配置套内 CT，磁通制动算法不能直接使用，将变压器各侧电流按相顺序接入保护后，需通过后端算法进行转角补偿处理。

基于电子式互感器的变压器保护采样输入如图2所示。各侧电流互感器输出至对应的间隔合并器，各侧电压互感器输出至对应的 PT 合并器，间隔合并器接收 PT 合并器输入后，同步间隔内各相电流和电压，并按相传输至变压器保护装置。

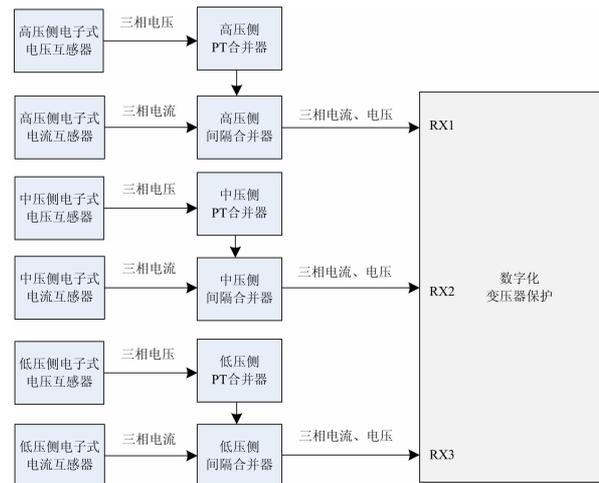


图2 基于电子式互感器的变压器保护采样输入

Fig. 2 Sampling input of transformer protection based on electronic transformer

### 2.2 磁通制动的转角补偿

磁通制动算法基于单相绕组变压器模型，当含△型绕组的三相绕组变压器采用电子式互感器输出采样时，存在△型侧绕组电流获取不便的局限性。针对这一问题，需要对△型绕组侧环外 CT 电流进行转角补偿处理，将三相变压器磁通制动问题转换

为独立的单相绕组磁通制动问题。

根据基尔霍夫电流定律, 将三相绕组变压器的 $\Delta$ 侧电流转换为Y侧电流, 同时考虑到 $\Delta$ 侧绕组零序环流对励磁电流的影响, 对转角后的电流进行环流补偿。故障时,  $\Delta$ 侧绕组环流 $I_p$ 等于Y侧零序电流 $I_0$ , 可以直接消除; 变压器空载合闸时, 由于励磁电流的反作用影响,  $\Delta$ 侧绕组环流 $I_p$ 不等于Y侧零序电流 $I_0$ , 但由于环流助增的影响,  $I_0$ 至少与一相主涌流的相位变化趋势仍保持一致, 而与其余相涌流的相位变化不一致。因此, 故障发生时转角后差流消去Y侧零序电流后可得到故障电流; 当变压器空载合闸时, 对于主涌流相, 消除Y侧零序电流后也不会影响对其磁通变化趋势的判断。

对三圈变的角型侧环外CT电流进行转角变换, 在Yd11绕组接线方式下, 对转角后电流进行如下环流补偿,

$$\begin{cases} I_{dA} = I_A + I'_a - I_0 \\ I_{dB} = I_B + I'_b - I_0 \\ I_{dC} = I_C + I'_c - I_0 \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $I_{dA}$ 、 $I_{dB}$ 、 $I_{dC}$ 分别为三相转角后差流;  $I_A$ 、 $I_B$ 、 $I_C$ 分别为Y侧三相电流;  $I'_a$ 、 $I'_b$ 、 $I'_c$ 分别为 $\Delta$ 侧转角后的修正电流;  $I_0$ 为Y侧零序电流。

经过绕组转角及环流补偿后, 可将对三相Y, d绕组连接变压器的励磁电流计算转换为分相的Y, y绕组单相励磁电流计算。

### 2.3 涌流选相

由于环流助增的影响, 变压器空载合闸时三相差流由各相绕组励磁电流叠加形成, 转角后差流可能出现类似故障电流的对称涌流特征, 导致磁通制动算法失效。涌流选相是基于变压器空载合闸或故障时差流涌流相与故障电流相之间的波形关系来实现的。保护启动后, 对三相转角后差流采取主涌流识别, 对选定的主涌流相进行磁通计算, 若判定主涌流相为故障态磁通, 则开放保护动作判据, 若判定主涌流相为涌流磁通, 则闭锁保护动作判据, 延迟等待慢速涌流算法判定。

算法对经过转角补偿处理的三相差流进行涌流选相, 判据为

$$\begin{cases} \Delta I_{d\phi} > K_1 \\ \text{MAX}(I_{da(t)}, I_{db(t)}, I_{dc(t)}) > K_2 \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $\Delta I_{d\phi}$ 为各相差流突变量;  $I_{da(t)}$ 、 $I_{db(t)}$ 、 $I_{dc(t)}$ 分别为三相差流瞬时值;  $K_1$ 、 $K_2$ 为对应定值。

通过比较三相差流瞬时值在同一时域内的突变率 $\Delta I_{da}$ 、 $\Delta I_{db}$ 、 $\Delta I_{dc}$ , 若至少其中有一相突变率超

过定值, 且相差流瞬时值满足条件, 则认定该相为主涌流相, 采用快速的磁通制动进行后续处理; 当因涌流助增明显或故障电流等原因导致涌流选相失败时, 算法退出陷阱状态, 等待整周波的慢速涌流算法对励磁涌流进行识别。

由图3可以看出: 变压器空载合闸时, 经转角及环流补偿后的三相差流中至少有一相会出现明显的涌流特征, 将该相选定为主涌流相进行磁通计算分析, 由于其涌流特征明显, 保护算法将可靠闭锁, 保护不会误动。

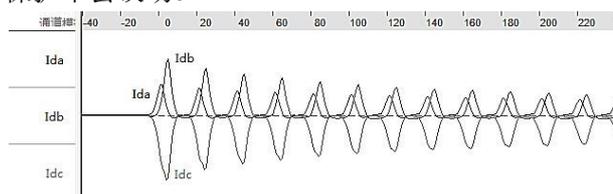


图3 变压器空载合闸波形

Fig. 3 Waveform of transformer no-load closing

由图4可以看出: 当变压器带故障合闸或发生故障时, 在故障相电流较大的情况下, 故障相将会被选择为主涌流相。对该相进行磁通计算分析, 由于其呈现了明显的故障波形特征, 磁通算法不会闭锁, 保护立即进入后续的保护动作判别算法, 最快情况下1/4周波后就可以实现保护出口。

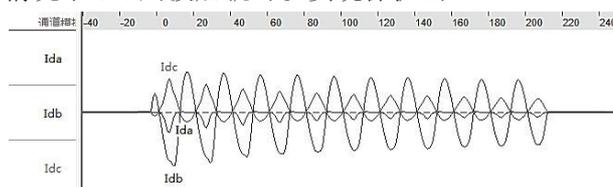


图4 变压器带故障空载合闸波形

Fig. 4 Waveform of transformer no-load closing with fault

由图5可以看出: 当变压器在匝间故障合闸时, 故障相电流较小, 其故障特征不明显, 采用主涌流选相后会选取瞬时电流较大的涌流相进行磁通计算, 磁通制动算法闭锁, 快速涌流判据失效, 待算法进入后续的慢速涌流计算后, 通过整周波的常规故障动作判据保证保护的可靠动作, 这种情况下, 保护需延迟到整周波后出口, 但不会发生拒动。

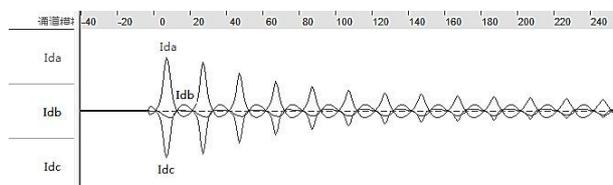


图5 变压器带匝间故障空载合闸波形

Fig. 5 Waveform of transformer no-load closing with interturn fault

### 2.4 陷阱态涌流复判

保护启动后,在未确定是否可采用快速涌流算法的情况下,设置算法陷阱状态,预设快速涌流算法有效,预先进入与算法相关的快速涌流判定模块和转角补偿模块,保证算法能最快时间出口,同时并行开始慢速涌流识别算法。

当涌流选相失败或采用磁通制动闭锁保护时,快速涌流判据无法继续使用,算法退出快速涌流陷阱状态,同时进入慢速涌流识别判据,由于相关涌流制动参数(二次谐波含量、波形对称系数等)在保护启动时已计算,最迟一周波后,算法可有效分辨励磁涌流或故障电流,在快速涌流算法无效的情况下保证差动保护的可靠动作。

### 2.5 保护方案实现

保护算法方案实现如图6所示。

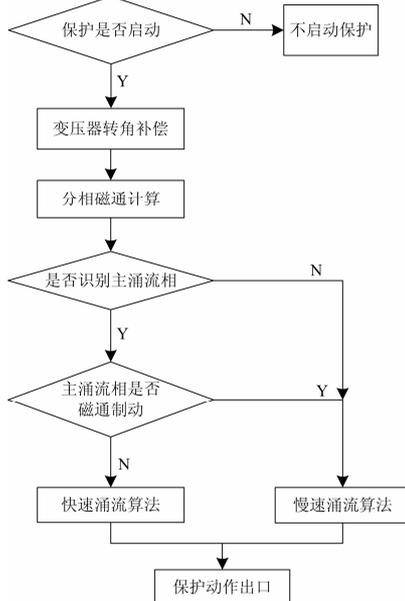


图6 保护算法框图

Fig. 6 Block diagram of protection algorithm

(1) 保护启动后,经转角补偿和磁通计算,对主涌流相进行识别,检测快速磁通制动算法有效性。

(2) 经过转角补偿和单相磁通计算后得到变压器各相的励磁电感  $M_{\phi}$ 。

(3) 结合主涌流选相结果,检测主涌流相励磁电感  $M$  在离散时域下的变化趋势。判据为

$$M_n - M_{n+6} > K \quad (10)$$

式中:  $M_n$  为当前采样点励磁电感;  $M_{n+6}$  为前推 6 个采样点的励磁电感;  $K$  为对应定值。

(4) 如果连续三次计算满足式(10),则判定差流为励磁涌流,闭锁差动保护,否则认为是故障电流,进入后续保护动作处理。

(5) 若保护未闭锁或涌流选相失败,则进入后续的慢速涌流复判。采用整周波的常规涌流判据继续对保护动作进行判定。

### 3 动模测试

采用动模系统对保护算法进行验证,如图7所示。其中:变压器额定容量为 5.68 kVA,高压侧额定电压为  $1000/\sqrt{3}$  V,低压侧额定电压为 400 V,接线方式 Y0/Δ-11,短路阻抗 17%,功率模拟比 26 400,高压侧电压模拟比 220,高压侧电流模拟比 120,高压侧阻抗模拟比 1.83。

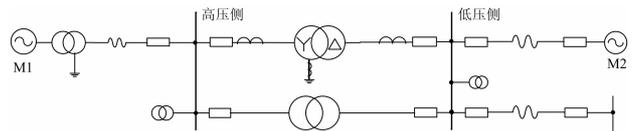


图7 动模系统接线图

Fig. 7 Wiring diagram of dynamic simulation system

实验采用基于罗氏线圈的电子式电流电压互感器,如图8所示。该电子式互感器采用双重化、内置采集器的电流电压组合式配置。额定一次输入电流 5 A,额定电流下输出数字量 463,电流输出精度 5TPE/0.2S;额定一次输入电压 1 kV,额定电压下输出数字量 11 585,电压输出精度 0.2/3P。

考虑到每台互感器可以输出一相电流和一相电压信号,实验共配置了变压器高、低压侧三相共 6 台电子式互感器,其中 3 台输出进入高压侧合并单元三相,3 台输出进入低压侧合并单元三相,采样最终通过合并单元接入保护。



图8 实验采用的电子式互感器

Fig. 8 Electronic transformer for the experiment

对变压器高压侧进行空载合闸实验,涌流波形及保护动作逻辑如图9所示。

实验记录如表1所示。可知,保护算法能正确

选择主涌流相, 通过转角补偿后的磁通计算识别变压器涌流并闭锁差动保护, 保护不会误动。

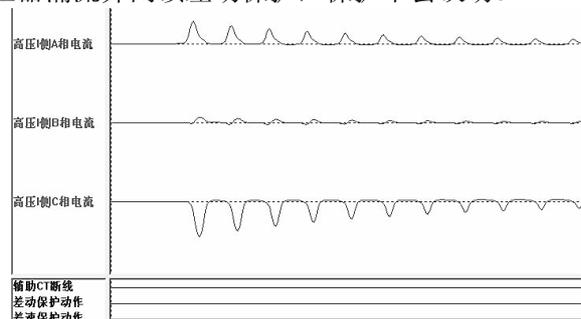


图 9 高压侧空载合闸波形

Fig. 9 Waveform of high voltage side no-load closing

表 1 变压器空载合闸动作记录

Table 1 Operation record of transformer no-load closing

实验次数	1	2	3	4	5
动作时间 (t/ms)	未动作	未动作	未动作	未动作	未动作

在变压器高压侧端部、低压侧端部、内部绕组、高压侧区外、低压侧区外模拟变压器的区内外故障, 故障波形及保护动作逻辑如图 10 所示。

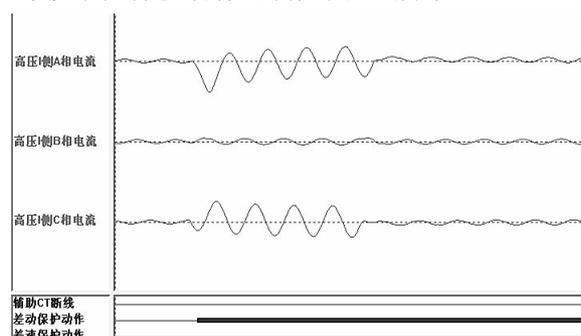


图 10 高压侧区内接地故障波形

Fig. 10 Waveform of high voltage side internal earth-fault

保护动作时间(算法动作时间)记录如表 2 所示。对于大部分故障电流特征明显的区内故障, 差动保护在 5 ms 左右可快速动作; 另外试验中出现过当变压器带匝间故障合闸时, 由于主涌流相识别为涌流相电流, 导致磁通计算闭锁的情况, 此时快速涌流算法失效, 进入慢速涌流判定, 保护动作时间延长至 20 ms 左右, 但仍能可靠出口。

表 2 变压器区内故障动作记录

Table 2 Operation record of transformer internal fault

实验次数	1	2	3	4	5
动作时间 (t/ms)	5.2	5.6	4.8	5.1	6.3

## 4 结论

电子式互感器是智能变电站的重要组成部分, 在绝缘结构、动态范围、饱和特性等方面都有显著的优势, 随着智能变电站工程化的不断扩大, 电子式互感器的相关标准也逐步建立, 对电子互感器的相关研究也将进一步深入。

本文针对电子式互感器下的应用, 采用了陷阱复判的励磁涌流识别机制, 在不改变传统变压器差动保护原理的基础上, 将快速磁通制动判据与常规涌流识别判据相结合, 并对磁通制动原理进行了改进。在提高故障动作时间的基础上, 增加了励磁涌流时保护制动的冗余性, 对数字化的变压器差动保护原理进行了补充。

## 参考文献

- [1] 康小宁, 何璐, 焦在滨, 等. 基于励磁电感参数识别的变压器励磁涌流判别方法[J]. 西安交通大学学报, 2007, 41(10): 1214-1218.  
KANG Xiaoning, HE Lu, JIAO Zaibin, et al. Distinguishing magnetizing inrush based on characteristic of excitation inductance[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2007, 41(10): 1214-1218.
- [2] 朱可, 姜杰, 张太勤. 基于等效瞬时电感参数辨识的变压器励磁涌流判别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(20): 12-16.  
ZHU Ke, JIANG Jie, ZHANG Taiqin. Distinguishing magnetizing inrush based on characteristic of equivalent instantaneous inductance[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(20): 12-16.
- [3] 及洪泉, 张健, 杨以涵, 等. 计及电子式电流互感器的差动保护性能分析[J]. 电网技术, 2006, 30(23): 61-66.  
JI Hongquan, ZHANG Jian, YANG Yihan, et al. Comment on performance of differential protection taking into account electronic current transducers[J]. Power System Technology, 2006, 30(23): 61-66.
- [4] 李伟, 尹项根, 陈德树, 等. 基于 Rogowski 线圈的电子式电流互感器暂态特性研究[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(10): 34-37.  
LI Wei, YIN Xianggen, CHEN Deshu, et al. Transient characteristics of Rogowski coil-based current sensor[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(10): 34-37.
- [5] 殷伯云, 罗志娟, 杨丽, 等. 主变差动保护采用不同原理 CT 的仿真研究[J]. 电网技术, 2013, 37(1): 281-286.  
YIN Boyun, LUO Zhijuan, YANG Li, et al. Simulation

- analysis of power transformer differential protection adopting current transformers based on different principles[J]. Power System Technology, 2013, 37(1): 281-286.
- [6] 孙志杰, 曾献华, 汤汉松, 等. 磁通制动原理在变压器差动保护中应用[J]. 电力自动化设备, 2005, 25(1): 79-81.  
SUN Zhijie, ZENG Xianhua, TANG Hansong, et al. Application of flux restraint theory in transformer differential protection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25(1): 79-81.
- [7] 郑涛, 刘万顺, 谷君, 等. 三相变压器等效瞬时电感的计算分析及CT配置新方案[J]. 继电器, 2006, 34(16): 1-6.  
ZHENG Tao, LIU Wanshun, GU Jun, et al. Analysis of the calculation of equivalent instantaneous inductance in three-phase transformer and a new CT's configuration[J]. Relay, 2006, 34(16): 1-6.
- [8] 刘志超. 三相变压器励磁涌流及保护方案[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(10): 58-60.  
LIU Zhichao. Analysis of magnetic inrush current of three-phase transformer and the differential protection scheme[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(10): 58-60.
- [9] 袁宇波, 陆于平, 陈久林, 等. 变压器三角形侧零序环流助增对差动保护的影响[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(3): 44-50.  
YUAN Yubo, LU Yuping, CHEN Jiulin, et al. Influence of add-assist circulation current at delta side on Y/Delta transformer differential protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(3): 44-50.
- [10] 李旭, 黄继东, 倪传坤, 等. 不同电流互感器混用对线路差动保护的影响及对策的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(3): 141-115.  
LI Xu, HUANG Jidong, NI Chuankun, et al. Influence of mixing different types of current transformers on line differential protection and the countermeasures[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(3): 141-115.
- [11] 任稳柱, 杨忠州, 胡新明, 等. 电子式电流互感器暂态误差的试验系统研究[J]. 高压电器, 2013, 49(1): 54-57.  
REN Wenzhu, YANG Zhongzhou, HU Xinming, et al. Introduction to a test system of instantaneous error of electronic current transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(1): 54-57.
- [12] 李秀丽, 李文正, 鲍都都, 等. 基于电子式互感器双A/D采样的差动保护可靠性方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(16): 106-110.  
LI Xiuli, LI Wenzheng, BAO Dudu, et al. Research of the differential protection reliability scheme based on the electronic transformer double A/D sampling[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(16): 106-110.
- [13] 邓茂军, 姚东晓, 倪传坤, 等. 基于电子式互感器的变压器励磁涌流识别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(18): 149-153.  
DENG Maojun, YAO Dongxiao, NI Chuankun, et al. Inrush current recognition in power transformer based on electronic transformer[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(18): 149-153.

---

收稿日期: 2014-12-01; 修回日期: 2015-05-14

作者简介:

徐长宝(1977-), 男, 硕士, 高级工程师, 从事数字化变电站技术研究; E-mail: 13985494586@163.com

高吉普(1982-), 男, 硕士, 工程师, 从事数字化变电站和智能变电站相关研究; E-mail: jipugao@sina.com

鲁彩江(1986-), 男, 博士, 工程师, 从事电子式互感器技术研究。

(编辑 张爱琴)