

DOI: 10.7667/PSPC161044

## 变压器多特征励磁涌流识别方案研究

姚东晓<sup>1</sup>, 张凯<sup>2</sup>, 贺要锋<sup>3</sup>, 邓茂军<sup>1</sup>, 张景丽<sup>1</sup>, 俎丽萍<sup>1</sup>

(1. 许继电气股份有限公司, 河南 许昌 461000; 2. 国网湖南省电力公司电力调度控制中心, 湖南 长沙 410000;  
3. 国网河南省电力公司许昌供电公司, 河南 许昌 461000)

**摘要:** 研究了变压器空投时, 其等值电路模型参数在铁芯饱和后的变化情况, 并通过分析不同情况下励磁涌流的特征, 指出了传统励磁涌流判别方法的局限性。通过将传统方法优化组合, 同时新加 CT 饱和识别判据, 建立了一套多特征励磁涌流识别方案。通过对不同情况下励磁涌流的仿真分析, 验证了所述方案的正确性。在高剩磁同时电压过零附近空充主变、低剩磁空充主变、无剩磁空充主变等环境下, 所述方案均可通过多种识别方法配合正确地识别励磁涌流, 可靠闭锁差动保护。在空投于故障变压器同时 CT 饱和时, 所述方案也可根据 CT 饱和识别判据开放差动保护。

**关键词:** 励磁涌流; 变压器等值电路; 二次谐波; 多特征识别; 差动保护

### Research on multi feature recognition scheme of transformer inrush current

YAO Dongxiao<sup>1</sup>, ZHANG Kai<sup>2</sup>, HE Yaofeng<sup>3</sup>, DENG Maojun<sup>1</sup>, ZHANG Jingli<sup>1</sup>, ZU Liping<sup>1</sup>

(1. XJ Electric Co., Ltd., Xuchang 461000, China; 2. Electric Power Dispatch and Control Center of State Grid Hunan Electric Power Company, Changsha 410000, China; 3. Xuchang Power Supply Company of State Grid Henan Electric Power Company, Xuchang 461000, China)

**Abstract:** This paper studies the changes of the transformer equivalent circuit model parameters in the saturation of iron core when the transformer closes to power system without load, and by analyzing the characteristics of inrush current in different situations, points out the limitation of the traditional method to identify inrush current. By optimizing the combination of traditional methods and adding the new CT saturation recognition criteria, it establishes a set of multi characteristic inrush current identification scheme. By the simulation analysis of inrush current in different situations, it verifies the correctness of the scheme: such as closing transformer breaker in one side with high remanence and at the voltage near zero-cross, with low remanence, and without remanence, the scheme in this paper can correctly identify the inrush current by multiple methods cooperating with each other and reliably locking the differential protection; when closing to the fault transformer with CT saturation, the scheme can also unblock the differential protection with the CT saturation criterion.

**Key words:** inrush current; transformer equivalent circuit; second harmonic; multi feature recognition; differential protection

## 0 引言

识别变压器励磁涌流方法有很多种<sup>[1-14]</sup>, 比较常用的有二次谐波法、波形比较法、间断角识别法等, 另外一些方法因存在尚未解决的问题或难以实现, 还未进入应用阶段。然而, 目前常用的方法由于仅判别励磁涌流的一个或少数几个特征, 尚存在一定的局限性。文献[15]通过分析剩磁与合闸角对励磁涌流的影响发现, 二次谐波法和波形比较法在励磁涌流间断角比较小时往往失去作用。而间断角识别法难以区分励磁涌流与 CT 饱和电流。

励磁涌流间断角较小(小于 180°)的情况往往发

生在主变铁芯含较大剩磁进行空投时。在主变铁芯含较大剩磁时, 若同时在电压过零点附近空投主变, 且磁通增加方向与剩磁方向一致, 就会导致铁芯快速饱和, 产生间断角很小的励磁涌流, 而且波形接近正弦波, 二次谐波含量很低。通过对现场变压器高剩磁空投时的录波波形分析, 发现励磁涌流间断角可小至 70°左右, 此时二次谐波含量仅为 9%左右, 低于一般的二次谐波闭锁定值 15%。

为防止励磁涌流时变压器差动保护误动作, 同时避免区内故障 CT 饱和时差动保护拒动作, 本文研究了通过多特征识别励磁涌流的方案。论文首先研究了 Y-Δ 变压器高压侧空投时的等值电路模型,

得出了励磁涌流产生的原理及其在深度饱和后类似正弦波的特点。然后分析了不同间断角励磁涌流二次谐波特征及与区内故障 CT 饱和波形的差异,并基于这些分析研究了综合差流二次谐波、间断角及最大点附近波形跃变特征,形成多特征励磁涌流识别的方法,并给出了各环节具体判据。通过对现场波形的仿真分析,验证了该方案的可行性:该方案能够有效识别出各种情况下的励磁涌流,保证主变出现励磁涌流时可靠闭锁差动保护,而在区内故障 CT 饱和时正确开放差动保护。

### 1 主变励磁涌流分析模型建立

以 Y/D11 接线形式的双绕组三相变压器为例,建立变压器高压侧空投时的电路模型,如图 1 所示。

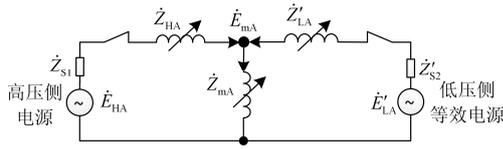


图 1 变压器高压侧空投等值电路

Fig. 1 Transformer equivalent circuit when closing the high voltage side breaker without load

图中:  $\dot{E}_{HA}$  为高压侧 A 相电源;  $\dot{Z}_{S1}$  为高压侧系统阻抗;  $\dot{E}_{ma}$  为励磁感抗  $\dot{Z}_{mA}$  上的感应电动势;  $\dot{Z}_{HA}$  为高压侧 A 相等效漏阻抗;  $\dot{Z}_{mA}$  为励磁阻抗;  $\dot{Z}'_{LA}$  为低压侧三相绕组等效漏阻抗之和;  $\dot{E}'_{LA}$  为低压侧 A 相等效电源;  $\dot{Z}'_{S2}$  为低压侧等效系统阻抗。以上所有关于低压侧的参数均为折算到高压侧后的值。

令高压侧 A 相电流为  $\dot{I}_{HA}$ , 低压侧 A 相绕组电流为  $\dot{I}'_{LA}$ , 励磁支路电流为  $\dot{I}_{mA}$ , 各电流方向如图 1 中箭头所示。根据图 1 等值电路模型,可列出如下方程组:

$$\begin{cases} \dot{E}_{HA} = (\dot{Z}_{S1} + \dot{Z}_{HA})\dot{I}_{HA} + \dot{Z}_{mA}\dot{I}_{mA} \\ \dot{E}'_{LA} = (\dot{Z}'_{S2} + \dot{Z}'_{LA})\dot{I}'_{LA} + \dot{Z}_{mA}\dot{I}_{mA} \\ \dot{I}_{mA} = \dot{I}_{HA} + \dot{I}'_{LA} \\ \dot{E}_{ma} = \dot{Z}_{mA}\dot{I}_{mA} \end{cases} \quad (1)$$

令  $\dot{Z}'_{LA1} = \dot{Z}'_{S2} + \dot{Z}'_{LA}$ ,  $\dot{Z}_{HA1} = \dot{Z}_{S1} + \dot{Z}_{HA}$ 。根据式(1)解出互感抗  $\dot{Z}_{mA}$  上的感应电动势  $\dot{E}_{ma}$  为

$$\dot{E}_{ma} = \frac{\frac{\dot{Z}'_{LA1}}{\dot{Z}_{HA1}}\dot{E}_{HA} + \dot{E}'_{LA}}{1 + \frac{\dot{Z}'_{LA1}}{\dot{Z}_{HA1}} + \frac{\dot{Z}'_{LA1}}{\dot{Z}_{mA}}} \quad (2)$$

式中,  $\dot{Z}_{HA}$ ,  $\dot{Z}_{mA}$ ,  $\dot{Z}'_{LA}$  受铁芯磁导率变化影响,随

磁导率降低而减小。

由于变压器空投时,某一相励磁涌流若要达到最大,其合闸角应为  $0^\circ$  或  $180^\circ$ 。此时对另外两相来说,合闸角为  $\pm 120^\circ$  或  $\pm 60^\circ$ ,不会出现励磁涌流或仅出现很小的励磁涌流。假设在某一相励磁涌流达到最大时,变压器另两相铁芯不饱和。低压侧绕组感应电动势相量图如图 2 所示。

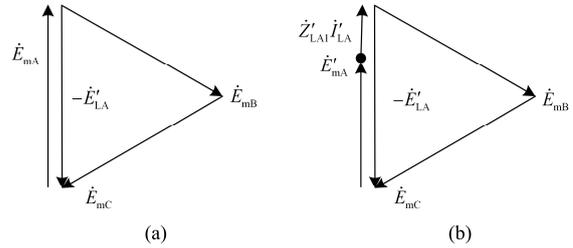


图 2 低压侧绕组感应电动势

Fig. 2 Low voltage side winding induction electromotive force

图 2 中,  $\dot{E}_{mB}$ ,  $\dot{E}_{mC}$  分别为 B, C 相励磁电抗感应电动势;  $\dot{E}'_{LA}$  前面加负号的原因为 B, C 相感应电动势合成的电势正极性端接在了 A 相绕组的尾端。由于非饱和相电流较小,漏抗电压降很小,因此可认为  $\dot{E}'_{LA}$  与  $\dot{E}_{HA}$  近似相等,式(2)可简化为

$$\dot{E}_{ma} \approx \frac{\dot{E}_{HA}}{1 + \frac{\dot{Z}'_{LA1}\dot{Z}_{HA1}}{(\dot{Z}'_{LA1} + \dot{Z}_{HA1})\dot{Z}_{mA}}} \quad (3)$$

由式(3)推出励磁电流计算公式如式(4)。

$$\dot{I}_{mA} \approx \frac{\dot{E}_{HA}}{\dot{Z}_{mA} + \frac{\dot{Z}'_{LA1}\dot{Z}_{HA1}}{(\dot{Z}'_{LA1} + \dot{Z}_{HA1})}} \quad (4)$$

当变压器 A 相铁芯未饱和时,  $|\dot{Z}_{mA}|$  可达上万欧,远大于漏阻抗和系统阻抗,由式(3)可知  $\dot{E}_{ma}$  与  $\dot{E}_{HA}$  也基本相等,由式(4)可知励磁电流  $\dot{I}_{mA}$  很小。

若变压器 A 相铁芯饱和,磁导率下降,此时  $|\dot{Z}_{mA}|$  大大降低,深度饱和后其值缩小千倍以上,由式(3)、式(4)可知  $\dot{E}_{ma}$  小于  $\dot{E}_{HA}$ ,励磁电流  $\dot{I}_{mA}$  会迅速上升。

为研究励磁涌流特征,需要研究励磁涌流期间铁磁材料磁导率变化对励磁阻抗及漏抗的影响。铁磁材料的磁导率并不是固定不变的常数,其值随磁场强度变化曲线如图 3 所示。

随着铁芯饱和程度加深,铁磁材料的磁导率不断向真空磁导率  $\mu_0$  逼近,最终可近似为  $\mu_0$ ,而且铁芯饱和后,励磁涌流迅速增大,铁芯由轻度饱和到深度饱和的过渡过程很短。因此当铁芯深度饱和后,式(4)中阻抗参数均可认为是不变的,励磁支路在正

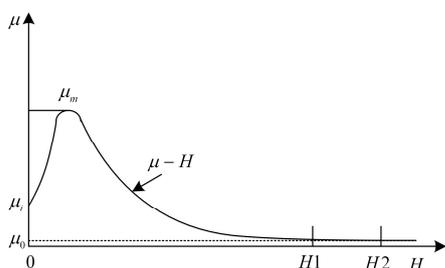


图3 磁导率-磁场强度曲线图

Fig. 3 Magnetic permeability vs. magnetic field intensity curve

弦电压驱动下产生的励磁涌流也应为正弦波。这就是铁芯高剩磁空投导致深度饱和后励磁涌流间断角很小, 波形近似为正弦波的原因, 此时2次谐波含量也比较低。

## 2 多特征励磁涌流识别方案研究

### 2.1 不同间断角励磁涌流二次谐波含量分析

变压器在不同剩磁及合闸角空投时, 铁芯饱和程度不同, 产生励磁涌流的间断角及二次谐波含量也不同。若铁芯剩磁较小或无剩磁, 空投时励磁涌流就小, 间断角大于 $180^\circ$ , 此时二次谐波含量比较大, 均会超过30%以上; 若铁芯剩磁较大, 同时在电压过零点附近合闸, 且磁通增加方向与剩磁方向一致, 则空投时励磁涌流就比较大, 间断角可远小于 $180^\circ$ , 二次谐波含量也比较低, 最低可达10%以下。根据仿真分析, 当励磁涌流间断角为 $180^\circ$ 时, 励磁涌流中二次谐波含量为30%左右, 因此30%可作为小间断角励磁涌流的依据; 由于现场一般不会出现变压器多相铁芯同时高剩磁的情况, 不考虑励磁涌流二次谐波含量低于7.5%的情况, 同时考虑到电源线路较长时, 变压器故障初始阶段会有较大谐波成分, 不宜将二次谐波门槛设置过低, 保证一般故障时差动能够不受谐波影响快速动作。励磁涌流间断角判据一般采用 $65^\circ$ <sup>[3]</sup>。不同间断角励磁涌流的二次谐波含量在本文第3节做了仿真分析。

### 2.2 励磁涌流与CT饱和波形区别

为防止变压器空充于故障导致CT饱和时差动保护拒动作, 需要区分励磁涌流与变压器区内故障CT饱和的情况。变压器空投于故障导致CT饱和时, 同样会使差流产生间断角, 且暂态饱和时会含有较大二次谐波, 因此采用二次谐波和间断角区分励磁涌流和CT饱和行不通。

分析CT饱和特点发现, CT饱和后, 其电流传变能力迅速衰减, 在短时间内二次电流以大斜率衰减到零附近。而励磁涌流受系统阻抗、饱和后变压

器漏抗及励磁阻抗影响, 其非间断部分近似为正弦波。对变压器差动电流进行差分处理, 区内故障CT饱和时, 差分后波形在CT饱和时刻存在采样点的跃变现象, 即差分波形最大值(一个工频周波内)往往发生在CT饱和时刻, 且与其前面未饱和采样值之差非常大, 大于0.8倍差分波形最大采样值(求绝对值后); 而励磁涌流在间断角较小时近似为正弦波, 在差分波形的最大采样值附近不存在较大的采样值跃变。CT饱和波形与小间断角励磁涌流波形及其差分波形如第3节图5所示。

另外, 励磁涌流与CT饱和电流二次谐波含量的变化趋势也不相同。CT暂态饱和时虽然二次谐波含量较大, 但是其含量随着直流分量的衰减而快速降低, 进入稳态饱和后, 二次谐波含量会衰减到0。而励磁涌流则相反, 在开始间断角较小时二次谐波含量较小, 随着励磁涌流的衰减, 间断角逐渐增大, 二次谐波含量不断上升, 最高可升至80%以上。因此利用该特性可设置一个二次谐波含量门槛值, 该门槛在一般区内故障CT饱和时能够快速开放, 在大直流分量CT饱和时, 经过短时间的直流衰减后也能开放。

### 2.3 多特征励磁涌流识别方案

根据励磁涌流在不同间断角二次谐波含量的变化规律以及与CT饱和特征的区别, 综合多特征对励磁涌流进行识别, 以提高识别的准确度。判据采用分相判别方案, 具体识别方法为: 当本相差动电流大于励磁涌流判别门槛时, 首先判别本相差动电流二次谐波含量, 若二次谐波含量大于30%, 直接判为励磁涌流, 闭锁本相差动保护; 若差流二次谐波含量大于7.5%而小于30%, 将差动电流采样值进行差分处理, 判别差分后电流间断角及在一周波最大点附近是否有跃变, 若间断角大于 $65^\circ$ 同时波形最大点附近无跃变, 确定为励磁涌流, 闭锁本相差动保护; 否则开放本相差动保护。判别流程图如图4所示。

图4中, 流程②、③为判据投入条件, 若差动电流有效值大于判据启动门槛时, 投入多特征励磁涌流识别判据。流程④、⑤、⑥为二次谐波判据, 当二次谐波含量大于30%时, 直接闭锁本相差动保护; 当二次谐波含量小于7.5%时, 直接开放本相差动保护; 当二次谐波含量大于7.5%同时小于30%时, 进入流程⑦, 将差动电流采样值进行差分处理。以每周波采样点数80为例, 差分方程如式(5)。

$$\Delta i_k = C(i_k - i_{k-2}) \quad (5)$$

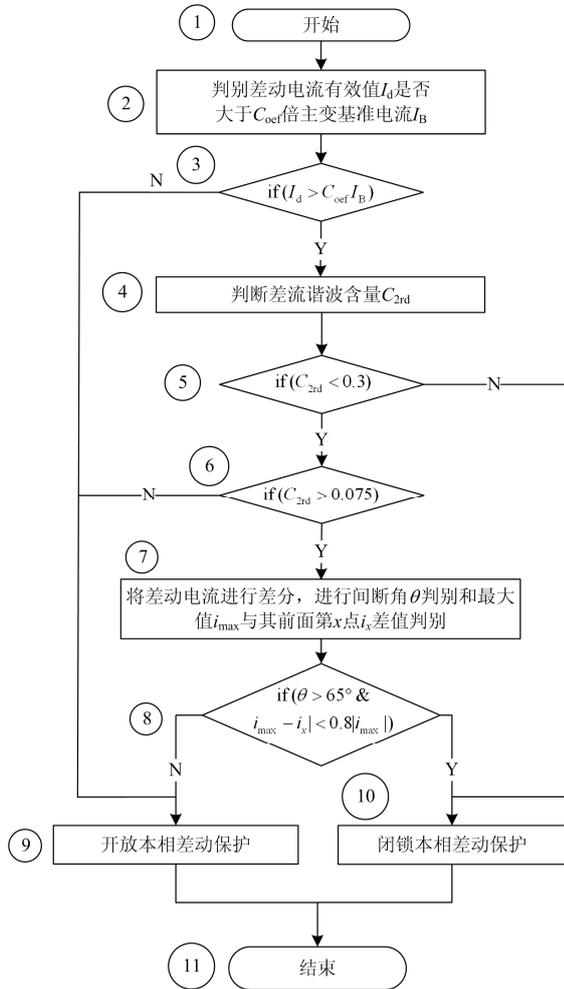


图4 励磁涌流多特征判别流程图

Fig. 4 Flow chart of inrush current multi-feature discrimination

式中： $i_k$  为第  $K$  点采样值； $i_{k-2}$  为第  $K-2$  点采样值； $\Delta i_k$  为第  $K$  点差分后的电流采样值； $C$  为系数，与采样点数  $N$  有关， $C = N / 4\pi$ 。采用 2 点差分主要为了降低高次谐波的影响。对于每周波采样点比较少的情况，也可采用 1 点差分。

对差分后电流采样值判别间断角及在一周波最大点附近是否有跃变。

对流程⑧中间断角判据  $\theta > 65^\circ$ ，程序实现时可将间断角折算成无电流采样点数，通过对无流采样点数的判别实现对角度的判别。无流采样点的判别如式(6)所示。

$$\Delta i_k < 0.2 \min(|i_{\max}|, I_n) \quad (6)$$

式中： $i_{\max}$  为本周波差分电流最大采样值； $I_n$  为 CT 额定电流。对于每周波  $N$  点采样，若连续  $13N/72$  个采样点满足上式，则判为间断角满足。对于 80 点采样，应为连续 14 个采样点满足间断角判别公式。

差分波形最大点处的跃变特征判别如式(7)。

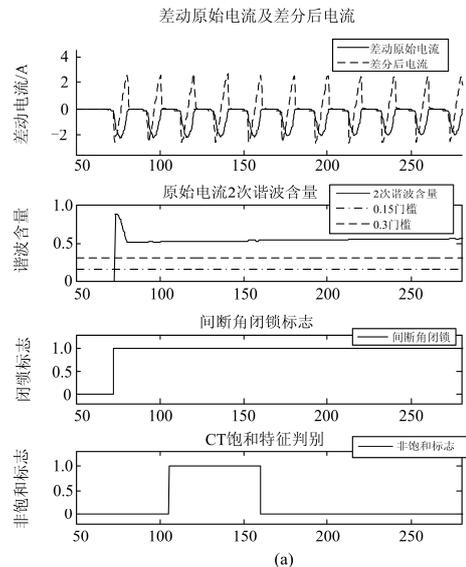
$$|i_{\max} - i_x| < 0.8|i_{\max}| \quad (7)$$

式中， $i_x$  为  $i_{\max}$  前某一点，两者之间的相位差可设置为  $18^\circ \sim 30^\circ$ ，对于 80 点采样， $i_x$  可定为  $i_{\max}$  前第 4 点。该相位差的设置用于适应不同深度 CT 饱和的情况，提高判据可靠性，同时不影响涌流时判据整体正确性。

本方案中用到的主要算法有差流有效值算法、二次谐波幅值算法、差分算法、间断角及最大采样点跃变判别算法。差流有效值及二次谐波幅值在差动保护中会用到，可以直接引用；差分算法、间断角及最大采样点跃变判别算法都比较简单，而且在具体实现中可以作为一个模块同时实现：在进行差分运算时，同时搜索一周波中最大采样点，并记忆其位置，差分运算完成后，最大采样点及其下标也同时确定，整体计算量并不大，完全可以应用在微机继电保护中。

### 3 仿真分析

为了验证本文研究的多特征励磁涌流识别方案的可行性，采用 Matlab 分析工具对现场出现的多种间断角励磁涌流进行了谐波含量、间断角及跃变特征分析，并与区内故障 CT 饱和波形进行了对比。为节约篇幅，本文选择几种比较典型的情况进行展示，如图 5 所示。图 5 中采用的差分算法、间断角闭锁判据、非饱和标志判据与 2.3 节所述对应判据完全一致，其中非饱和标志判据即 2.3 节跃变特征判据见式(7)；二次谐波含量为二次谐波幅值除以基波幅值，其中二次谐波幅值和基波幅值均采用全周傅里叶变换计算。



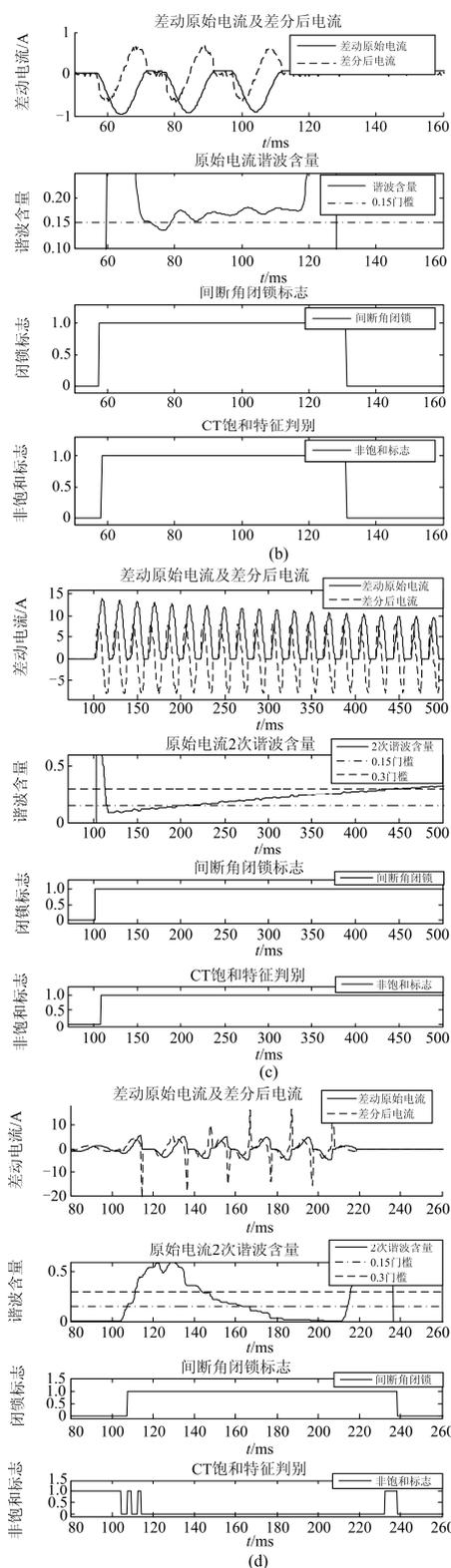


图5 不同间断角励磁涌流及区内故障CT饱和电流的二次谐波、间断角、CT饱和和特征判别情况

Fig. 5 Second harmonic, discontinuous angle and CT saturation characteristics of the inrush current with different discontinuous angle and the CT saturation current

图5(a)为主变铁芯剩磁较小或无剩磁时空投波形, 间断角较大, 二次谐波含量远大于30%; 由于涌流波形宽度较窄, 不利于CT饱和和特征识别判据判别, 除第106~159ms正确识别为非饱和特征外, 其余部分均误识别为CT饱和特征, 但由于二次谐波判据满足, 不影响最终判别结果, 可正确闭锁差动保护。

图5(b)为主变铁芯剩磁较大时空投波形, 间断角较小, 为 $90^\circ$ 左右, 二次谐波含量不超过20%, 最小值为12%; CT饱和和特征识别判据正确识别为非饱和特征, 同时间断角满足条件, 最终可正确判别为励磁涌流, 闭锁差动保护。

图5(c)为主变铁芯剩磁非常大时空投波形, 间断角非常小, 最小为 $70^\circ$ , 二次谐波含量很小, 最小值为8.6%; CT饱和和特征识别判据正确识别为非饱和特征, 同时间断角满足条件, 最终可正确判别为励磁涌流, 闭锁差动保护。

图5(d)为主变区内故障CT饱和波形, 间断角为 $100^\circ$ 左右, 满足间断角判别条件; 在暂态饱和和部分, 二次谐波含量较大, 超过了30%, 进入稳态后二次谐波含量小于7.5%; CT饱和和特征识别判据正确识别为饱和特征, 可以开放差动保护。

## 4 结语

传统单一励磁涌流判别方法均存在一定缺陷, 本文分析了励磁涌流产生的原理及特点, 并在此基础上研究了通过多特征识别励磁涌流的方案。励磁涌流间断角较大时, 二次谐波含量很大, 可通过二次谐波含量大于30%判据闭锁差动保护; 励磁涌流间断角较小时, 波形连续部分接近正弦波, 二次谐波含量小, 二次谐波判据失效, 此时启动间断角加CT饱和和识别判据, 可正确识别出小间断角励磁涌流。通过对现场多种间断角励磁涌流的仿真研究, 验证了本文方案的正确性及可靠性。

## 参考文献

- [1] 兰生, 张小钊. 基于多判据的变压器差动保护方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(23): 1-7.  
LAN Sheng, ZHANG Xiaofan. A transformer differential protection method based on multi-criterion[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(23): 1-7.
- [2] 袁宇波, 陆于平, 李澄, 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): 19-24.  
YUAN Yubo, LU Yiping, LI Cheng, et al. An adaptive second harmonic restrained method using phase angle and amplitude for inrush detection[J]. Proceedings of the

- CSEE, 2006, 26(18): 19-24.
- [3] 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.
- [4] 王雪, 王增平. 变压器励磁涌流变权综合识别方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(6): 63-68.  
WANG Xue, WANG Zengping. Study on the transformer inrush current synthetic identification based on variable weights[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(6): 63-68.
- [5] 古斌, 谭建成. 一种有效区分空投涌流与空投于故障的变压器保护新算法[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(6): 34-37.  
GU Bin, TAN Jiancheng. A novel transformer protection algorithm to effectively distinguish switching the transformer with an internal fault from switching inrush current[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(6): 34-37.
- [6] 何越, 林湘宁, 黄景光. 一种直接消除变压器合闸励磁涌流的方法[J]. 电工技术学报, 2011, 26(11): 141-149.  
HE Yue, LIN Xiangning, HUANG Jingguang. A method to eliminate the magnetizing inrush current of energized transformers[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(11): 141-149.
- [7] 凌光, 苏斌. 一种基于差流波形特征的励磁涌流识别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(6): 19-24.  
LING Guang, SU Bin. A method to identify inrush current based on waveform characteristics of differential current[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(6): 19-24.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 赵永彬, 陆于平. 基于磁通对称特性的变压器励磁涌流判别新算法[J]. 电工技术学报, 2007, 22(12): 66-71.  
ZHAO Yongbin, LU Yuping. A new algorithm based on flux symmetry character for judging transformer inrush current[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(12): 66-71.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 孙庆森, 张海峰, 王猛, 等. 变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.
- [14] 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.
- [15] 王维俭. 电气主设备继电保护原理及应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.

收稿日期: 2016-07-11; 修回日期: 2016-11-09

作者简介:

姚东晓(1982—), 男, 通信作者, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统及其自动化; E-mail: yaodongxiao1@163.com

张凯(1982—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为电力系统;

贺要锋(1972—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为继电保护运维管理。

(编辑 周金梅)