

一种基于差流波形特征的励磁涌流识别方法

凌光¹, 苏斌²

(1. 国网绍兴供电公司, 浙江 绍兴 312000; 2. 国网杭州供电公司, 浙江 杭州 310000)

摘要: 提出了一种基于差动电流波形特征的励磁涌流和故障电流识别方法。励磁涌流的共同特征是受铁芯饱和和程度的影响, 差动电流是流过励磁绕组的实际电流, 因而这一特征表现得更加明显。定义波形系数为磁通未饱和部分对应的电流在整个周期中所占比例, 当系数大于阈值时判定为励磁涌流。为防止误动, 当系数小于阈值时, 引入“是否完全偏向时间轴一侧”作为辅助判据, 使得该方法更加可靠。最后进行空载合闸仿真试验, 证明了该方法能识别各种情况下的励磁涌流, 性能优于二次谐波制动和间断角判据。

关键词: 变压器保护; 励磁涌流; 差流; 磁通饱和; 波形特征

A method to identify inrush current based on waveform characteristics of differential current

LING Guang¹, SU Bin²

(1. State Grid Shaoxing Power Supply Company, Shaoxing 312000, China; 2. State Grid Hangzhou Power Supply Company, Hangzhou 310000, China)

Abstract: A new method to distinguish inrush current from fault current based on waveform characteristics of differential current is proposed. The common characteristic of inrush currents is that they are all influenced by core saturation. Differential current is the real magnetizing current so that it shows this character more obviously. Waveform coefficient is defined as the percentage of current corresponding to flux unsaturated area in one cycle. If this coefficient is bigger than set value, it would be judged as inrush current. Otherwise an auxiliary criteria of whether waveform is completely located on one side of time axis is introduced to make a further judgment, which makes this method more reliable. The proposed method is verified by digital simulation experiments of no-load closing. The results show that inrush currents in various situations, and the performance of the method is superior to the second harmonic restraint principle and the dead angle principle.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51177148).

Key words: transformer protection; inrush current; differential current; flux saturation; waveform characteristic

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)06-0019-06

0 引言

差动保护是变压器的主保护, 影响保护性能的关键问题是能否快速准确地地区分励磁涌流和故障电流。目前工程上常用二次谐波制动、间断角识别、波形对称度判别等方法来鉴别励磁涌流^[1-3]。但随着变压器铁芯材料的改进以及大量新设备的接入, 励磁涌流的特征变得越来越不显著, 使得由单一判据构成的保护性能下降, 增加了变压器空投时误动的风险^[4]。

为了提高差动保护性能, 近年来不少学者提出了新的励磁涌流鉴别方法。文献[5-6]考虑了二次谐波、间断角、尖顶波等波形特点, 提出一种综合识别方法。文献[7]引入直方图的概念来分析励磁涌流的波形特征, 但由于影响涌流的因素众多使得共同特征难以准确提取, 因而也缺少针对性的方法, 从而限制了基于波形特征识别励磁涌流方法的进一步推广。文献[8-11]引入了电压量, 分别构造了变压器有功差、广义基波功率和等效瞬时电感等特征量, 根据新构造量的变化特征来识别励磁涌流, 理论上讲可以构成完备的保护, 但由于电压量的引入, 在电压二次回路断线、电压互感器饱和等情况下,

保护均需退出，同样给实际应用带来了不便。

差动电流是非故障时流经励磁绕组的实际电流，本文根据励磁电感的饱和程度，按磁通饱和区与非饱和区划分差流。非饱和区差流幅值较小，而饱和区较大，设定合适的门槛值来区分这两个区域，然后计算磁通非饱和区差流占整周期电流的比例。故障时的差流应呈现正弦波特征，该比例值要小得多。根据这个特征，同时以“故障电流不可能完全偏向时间轴一侧”作为辅助判据，本文提出了一种区分励磁涌流和故障电流的方法。经数字仿真实验验证，对于实际差流和工程应用所取差流，该方法都能成功区分出励磁涌流，具有判断准确和反应灵敏的特点，性能优于二次谐波和间断角判据。

1 变压器差流波形特征分析

首先就故障态和非故障态时差流的波形特征进行分析。忽略电阻，把变压器低压侧折算到高压侧，得到如图 1 所示的单相变压器等效电路。

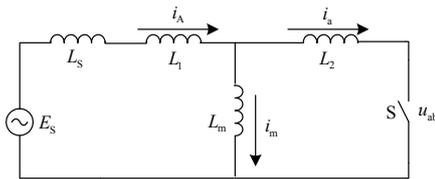


图 1 变压器单相等效电路

Fig. 1 Single phase equivalent circuit of transformer

图中， E_s 是变压器背后的电源， L_s 是等效内阻抗； L_1 和 L_2 分别为变压器高低压侧绕组的漏电感，经折算后两者近似相等， L_m 是励磁电感。开关 S 的状态和位置不同，对应不同的状态。 S 断开代表变压器正常运行状态， S 闭合代表低压侧短路，匝间故障时 S 则与励磁电感 L_m 并联且处于合位。在故障状态时励磁绕组基本被短路，因而可以忽略励磁电流 i_m ，只要获取高低压侧的电流，就可以准确求取差流。不考虑互感器饱和和因素，故障状态下的差流应具备良好的正弦波特征。

Y/Δ 接线变压器空载合闸于正常状态时，低压侧 Δ 绕组内存在环流。高压侧电流实际上包含了两个部分：励磁电流和低压侧环流的折算值。工程应用中近似认为零序电流和环流折算值是相等的，所以传统的差流就是高压侧电流减去零序电流，即

$$i_{d0} = i_A - i_0$$

式中： i_d 为差流； i_A 为高压侧电流； i_0 为零序电流。实际上环流并不等于零序电流，文献[12]指出了环流和零序电流之间的关系为

$$i_p = -\frac{L_1 + L_s}{L_2} i_0$$

式中， i_p 为环流，文献[12]同时给出了在参数未知情况下的环流计算方法，实际差流应为

$$i_d = i_A - i_p$$

所以实际差流和传统差流存在差别，其差值 $\Delta i_d = i_{d0} - i_d = L_s / L_2 \times i_0$ 。若变压器背后是无穷大电源系统，即 $L_s = 0$ ，此时传统差流和实际差流一致。但当电源阻抗 L_s 不可忽略时，两种差流在数值上存在差别。在非故障状态时，不考虑测量误差、变比不一致的影响，由图 1 可知，变压器差流 i_d 就等于励磁电流 i_m ，即： $i_d = i_A - i_a = i_m$ 。

正常情况下励磁阻抗很大， i_m 可以忽略，所以差流近似为 0。但在空载合闸时，励磁电感可能出现饱和而造成励磁涌流，使得 i_m 的数值足以引起保护动作。图 2 所示是变压器的近似磁化曲线，忽略饱和过渡区域，采用二段折线描述。

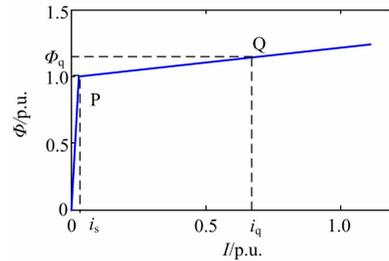


图 2 变压器励磁曲线示意图

Fig. 2 Curve of magnetic flux and exciting current

图中转折点 P 即为铁芯由非饱和转向饱和的过渡点，对应的电流 i_s 为临界饱和电流。当励磁电流小于 i_s 时，铁芯不饱和，励磁阻抗很大；而铁芯饱和时，绕组等效于空心线圈，励磁阻抗大大降低。因而空载合闸时的励磁涌流由两部分组成，分别对应铁芯磁通非饱和区和饱和区。图 3 所示是利用仿真计算得到的励磁涌流和对应的磁通。

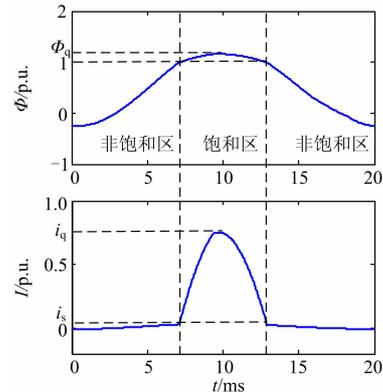


图 3 励磁涌流和对应的磁通

Fig. 3 Inrush current and its corresponding flux

所以非故障状态时, 差流可以划分为饱和区和非饱和区两部分, 饱和区的电流远大于非饱和区电流。

常规的励磁涌流算法只关注高压侧电流, 由于未能准确补偿 Δ 侧环流, 使得波形特征复杂多变而缺乏本质上的共同特征, 使得基于波形特征的分析很难准确判断励磁涌流。而差流由于剔除了环流影响, 是实际流进励磁绕组的电流, 因而也更容易提取共同特征。利用仿真计算, 得到如图 4 所示的励磁涌流和差流。

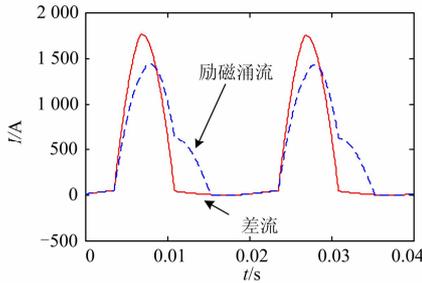


图 4 励磁涌流和差流比较

Fig. 4 Comparison between inrush and differential current

由图 4 可知, 与常规算法关注的励磁涌流相比, 差流对应的磁通饱和区和非饱和区的分界更加明显。定义电流阈值 $\delta > 0$, 通过和差流绝对值的比较来区别这两个区域。记一个周期内总采样点数是 n , 差流绝对值小于 δ 的采样点数为 m , 则定义波形系数 k 为

$$k = m/n$$

由于不同情况下差流数值差别很大, δ 采用浮动阈值。磁通不饱和时, 励磁电流应小于差动保护动作值 I_c , 因此 I_c 可以作为 δ 的一个取值。另一方面, 对于轻微的匝间故障, 差流较小, 波形中有较大区间低于差动阈值, 容易误判为励磁涌流。阈值 δ 应与差流幅值 A 正相关, 取为 A/N , 按正弦波计算, 系数 k 的值为

$$k = \frac{\arcsin(1/N)}{\arcsin 1}$$

N 应为大于 1 的整数, N 不应太大, 否则 k 值太小而精度不够; N 也不宜过小, 因为饱和区和非饱和区的电流数值差别很大, N 过小导致阈值过高, 不能很好地区分饱和区和非饱和区。经过多次仿真试验, 发现 N 取 10 左右是比较合适的数值, 此时系数 k 为 0.063 8。

若合闸于正常状态, 由于励磁涌流的非正弦特征, k 值应大于 0.063 8, 即不会误判为故障电流。当故障电流较大, $A/10$ 超过保护动作值 I_c 时, 选取

I_c 作为阈值计算系数 k , 显然 k 值要小于 0.063 8, 即此时不会误判为涌流。综合考虑两种状态, 阈值 δ 取保护动作值 I_c 和幅值分量 $A/10$ 的较小值:

$$\delta = \min(I_c, A/10)$$

2 励磁涌流鉴别方法

波形系数 k 值的计算前提是差流越限, 否则保护尚未启动, 计算 k 值无意义。另一方面, k 值小于设定阈值也不能完全断定就是故障电流。极端情况下可能出现整个周期内的磁通都饱和的现象。仿真计算得到如图 5 所示的差流, k 值很小, 但不属于故障电流。注意到励磁涌流的波形完全偏向时间轴一侧, 故障电流则不然, 以此作为故障电流的辅助判据。

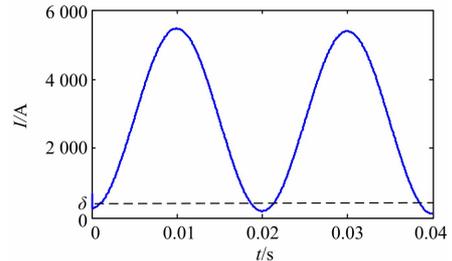


图 5 磁通全周期饱和时的差流

Fig. 5 Differential current of whole cycle flux saturated

基于对非故障态励磁涌流和故障电流差流特征的分析比较, 得到如图 6 所示的励磁涌流识别方法, 其中 D 为波形系数 k 的比较阈值。

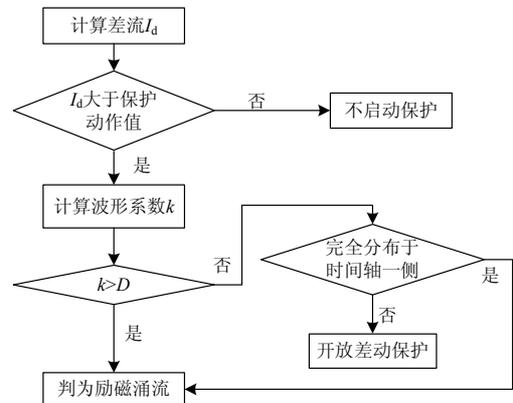


图 6 励磁涌流识别流程图

Fig. 6 Flowchart of inrush current identification

差流与保护定值比较, 当差流小于保护定值时不启动差动保护, 否则计算波形系数 k 。然后把得到的 k 值与阈值 D 比较, 若大于 D 则判为励磁涌流, 否则进一步判断是否全部位于时间轴一侧, 若是则判为励磁涌流, 否则判为故障电流而开放保护。

通过大量的数字仿真来获取正常空载合闸情况

下 k 的取值范围, 如图 7 所示。

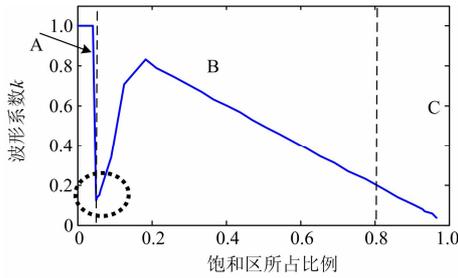


图 7 波形系数 k 值分布

Fig. 7 Distribution of waveform coefficient k

按照饱和电流占整个周期的比例, 把 k 取值划分为 A、B、C 三个区域。A 区域时, 饱和程度最低, 差流有效值未达到保护动作值, 因而未启动 k 值计算程序, 此时 k 取 1。

随着饱和程度增加, 直至剩磁达到额定磁通幅值且合闸角为 0° 的情况, 为图 7 中的 B 区域, k 的取值范围是 $0.1 \sim 0.85$ 。进一步计算 k 的理论最小值, 位于图 7 中虚线椭圆框所示区域内的, 此时对应轻微的励磁涌流, 如图 8 所示。

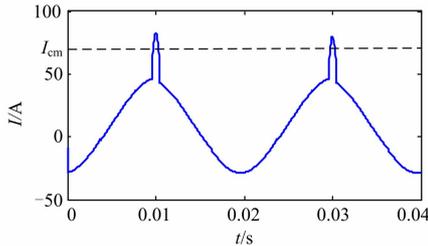


图 8 励磁涌流较小时的差流

Fig. 8 Differential current with small inrush current

启动差动保护的是差流有效值, 图 8 中所示 I_{cm} 是保护动作电流对应的幅值, 整定为正常励磁电流幅值 I_m 的 1.3 倍左右。当差流出现尖顶波时, 相比于同样幅值的正弦波, 有效值较低, 所以保护动作电流的尖顶波幅值 A 要大于 I_{cm} , 保守估计取 I_m 的 1.5 倍。计算励磁涌流刚好启动保护时的波形系数 k , 此时的门槛值 δ 应取 $A/10$, 即 $0.15I_m$, 所以

$$k = \frac{\arcsin(0.15)}{\arcsin 1} = 0.096$$

在极少数情况下, 剩磁会达到饱和磁通, 此时 k 取值进一步变小, 数值依赖于饱和磁通大小, 如图 7 中 C 区所示, 这一区域内的差流全部偏向时间轴一侧。再对变压器匝间、接地、相间各类故障进行仿真, 计算得到的 k 值均不超过 0.07。考虑到采样误差等因素, 阈值 D 应大于 0.07; 所以阈值 D 的取值范围是 $0.07 \sim 0.096$ 。取中间值 0.083 作为阈

值, 可以保证两边的裕量, 从而确保了故障电流和励磁涌流的准确识别。取不同门槛值 δ , 就会有不同的波形系数 k 的分布, 所以阈值 D 取值并不唯一。

3 仿真验证

利用 Matlab 建立如图 9 所示的模型, 电源阻抗 L_s 较大, 以验证本文提出的励磁涌流鉴别方法。Y, d11 接线变压器电压等级为 110 kV/35 kV, 容量为 250 MVA。Y 侧绕组电阻和电感标幺值分别是 0.002 和 0.08, Δ 侧绕组电阻和电感标幺值分别是 0.002 和 0.08, 铁芯饱和特性为 $[0 \ 0; \ 0.024 \ 1.2; \ 1 \ 1.52]$ 。

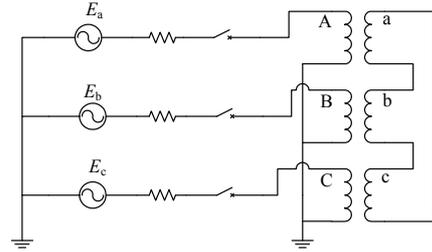


图 9 变压器仿真模型

Fig. 9 Simulation model of transformer

变压器空载合闸于无故障时, 分别记录传统算法得到的差流以及准确的差流, 如图 10 所示。

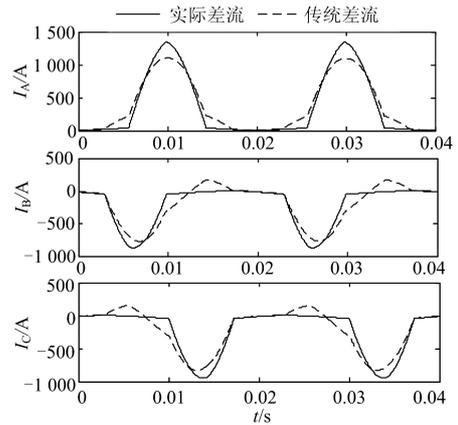


图 10 传统差流和实际差流

Fig. 10 Traditional and real differential currents

以 A 相为例, 应用文中提到的方法计算波形系数 k 值为 0.57, 大于阈值 0.083, 判定为励磁涌流。对励磁涌流进行频谱分析, 如图 11 所示, 计算二次谐波制动比 $(I_2/I_1)\%$ 和间断角, 均满足一般整定值, 此时单独依靠这两个判据也能准确判断励磁涌流。

当合闸角为 0° 且 A 相剩磁达到饱和磁通时, A 相会产生较大的励磁涌流, 空载合闸得到如图 12 所示的传统差流和实际差流比较图。

若能准确计算差流, 利用本文的方法计算 A 相

的波形系数 k 为 0.324, 判为励磁涌流。然后对励磁涌流进行频谱分析, 如图 13 所示, 得到 $(I_2/I_1)\%$ 为 5.44%; 再计算波形间断角为 137° , 此时二次谐波制动判据已经失效, 会引起误动。

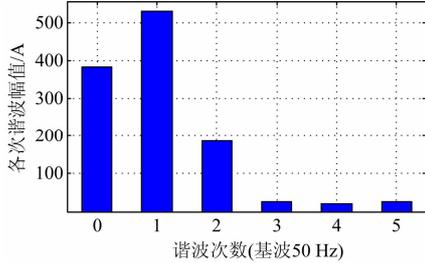


图 11 励磁涌流的频谱分析

Fig. 11 Spectral analysis of inrush current

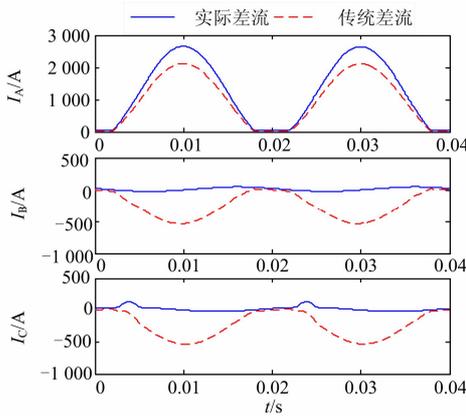


图 12 高剩磁时实际和传统差流

Fig. 12 Real and traditional differential currents in high residual magnetism

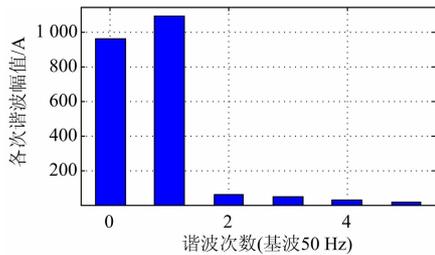


图 13 励磁涌流频谱分析

Fig. 13 Spectral analysis of inrush current

利用本文的方法计算传统差流的三相波形系数, 分别是 0.356、0.437 和 0.452, 三相均判为励磁涌流, 判断正确。若采用二次谐波制动, A 相制动比为 7.31%, 同样会引起误动。

当变压器发生故障时, 以 A 相发生 2% 匝间故障为例, 假设此时恰好 A 相剩磁较大, 仿真得到 A 相的实际差流和传统差流, 如图 14 所示。

应用本文的方法计算得到实际差流和传统差流的波形系数 k , 分别为 0.028 和 0.035, 均小于阈值

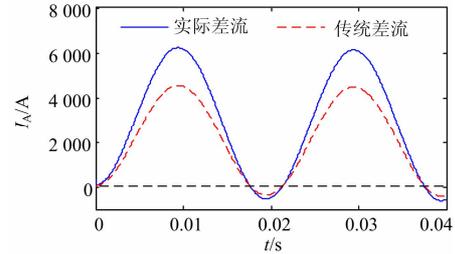


图 14 匝间故障时的实际差流和传统差流

Fig. 14 Real and traditional differential current when turn-to-turn fault occurs

0.083, 但均不完全位于时间轴一侧, 故满足故障电流条件。再计算两种差流的间断角, 分别是 130° 和 138° , 间断角判据均将误判为励磁涌流而闭锁保护。所有仿真结果如表 1 所示, 可见用本文提出的方法在各种情况下都不会误动, 性能优于其他两种常用判据。

表 1 励磁涌流识别仿真试验结果

Table 1 Simulation results of inrush current identification

判涌流方法	正常合闸	剩磁较大	匝间故障
本文方法	✓	✓	✓
谐波制动	✓	×	×
间断角原理	✓	✓	×

差流类型	传统	实际	传统	实际	传统	实际

实际的差流波形特征明显, 因而可以根据波形系数变化规律, 设定阈值, 确保本方法有效。传统的差流会有误差, 但误差与实际差流成比例, 因而仍保留了实际差流的波形特征, 本方法依然有效。

4 结论

本文通过对励磁涌流产生机理的分析和差流波形特征的提取, 提出了一种识别励磁涌流和故障电流的新方法, 并给出了具体的实施方案。准确的差流由于剔除了 Δ 侧环流的影响, 使得励磁涌流受铁芯饱和程度的影响能更直观显现, 更好地反应了励磁涌流和故障电流的差别。由于采用了浮动阈值来区分涌流的饱和与非饱和区, 使得本方法能广泛应用于各等级各容量的变压器。仿真试验证明了本方法具有更高的可靠性, 性能优于二次谐波判据和间断角判据。

参考文献

[1] 王祖光, 任杰. 变压器谐波闭锁差动保护新判据[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(12): 50-55.
WANG Zuguang, REN Jie. New criteria for harmonic blocking differential protection of transformers[J].

- Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(12): 50-55.
- [2] 朱亚明, 邓玉平. 间断角原理的变压器差动保护的性
能特点及危机实现[J]. 电力系统自动化, 1996, 20(11):
36-44.
ZHU Yaming, DENG Yuping. Performance and digital
realization of transformer differential relay based on dead
angle philosophy[J]. Automation of Electric Power
Systems, 1996, 20(11): 36-44.
- [3] 承文心, 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 Wenxin, LIU Zhichao. Analysis of inrush
restraint theory for transformer differential protection[J].
Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(11):
90-92.
- [4] 张荣海, 熊小伏, 夏莹. 基于模糊信息检索的变压器
差动保护[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(16):
132-136.
ZHANG Ronghai, XIONG Xiaofu, XIA Ying. Power
transformer differential protection based on fuzzy
information retrieval[J]. Power System Protection and
Control, 2010, 38(16): 132-136.
- [5] 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.
- [6] 潘书燕, 郑玉平, 吴崇昊, 等. 变压器新型励磁涌流识
别元件[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(19): 63-67.
PAN Shuyan, ZHENG Yuping, WU Chonghao, et al. A
new identification component for inrush current of power
transformer[J]. Automation of Electric Power Systems,
2011, 35(19): 63-67.
- [7] 王雪, 王增平. 基于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): 63-68.
WANG Xue, WANG Zengping. Identification of
transformer inrush currents based on waveform
distribution characteristics[J]. Transactions of China
Electrotechnical Society, 2012, 27(1): 63-68.
- [8] 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.
- [9] 王雪, 王增平. 基于广义基波功率的新型变压器主保
护方案[J]. 电工技术学报, 2012, 27(12): 191-198.
WANG Xue, WANG Zengping. Novel transformer main
protection scheme based on generalized fundamental
power[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,
2012, 27(12): 191-198.
- [10] 毕大强, 王祥珩, 杨恢宏, 等. 变压器差动保护中电流
相位补偿方式的分析[J]. 电力系统自动化, 2006,
30(18): 33-37.
BI Daqiang, WANG Xiangheng, YANG Huihong, et al.
Analysis on current phase compensation methods in
differential protection for transformer[J]. Automation of
Electric Power Systems, 2006, 30(18): 33-37.
- [11] 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.
- [12] 夏石伟, 郑涛. Y, d 接线变压器三角形侧绕组中环流求
取方法[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(24): 60-64.
XIA Shiwei, ZHENG Tao. Calculation of circulating
current in delta winding of transformers with Y, d
connection[J]. Automation of Electric Power Systems,
2008, 32(24): 60-64.

收稿日期: 2014-06-09; 修回日期: 2014-10-12

作者简介:

凌光(1986-), 男, 硕士研究生, 从事继电保护与智
能变电站研究工作; E-mail: lingguang86@163.com

苏斌(1981-), 男, 博士研究生, 从事电力系统设备
和新能源技术的研发工作。E-mail: Supeninsula@gmail.com

(编辑 魏小丽)