

DOI: 10.7667/PSPC151996

# 利用电流变化率极值特征的变压器涌流识别研究

邵文权<sup>1</sup>, 乔妮<sup>1</sup>, 焦在滨<sup>2</sup>, 吴淑<sup>1</sup>

(1. 西安工程大学电子信息学院, 陕西 西安 710048; 2. 西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049)

**摘要:** 为进一步提高电力变压器差动保护性能, 提出一种利用电流变化率极值特征的励磁涌流识别的方法。变压器发生涌流时, 三相电流波形至少存在一相以上有间断及尖顶波特性, 一个工频周期内电流变化率的极大值与极小值的时间间隔小于半个周期, 且不具备周期性特点。而内部故障时, 故障电流变化率波形近似呈正弦特征, 一个工频周期内极大值与极小值的时间间隔近似为半个周期, 且具有周期性特征。利用电流变化率一方面可以削弱非周期直流分量的影响, 另一方面可以凸显幅值较小的间断变化临界点的特征, 构造了利用电流变化率特征的涌流识别判据及实现方案。最后利用动模试验进行验证, 不同情况下的计算分析结果表明该算法原理清晰、判据简单、计算量小, 在一个周波内能可靠识别出涌流与内部故障, 为进一步提升和优化变压器保护性能提供了有益的理论基础。

**关键词:** 电力变压器; 差动保护; 励磁涌流; 内部故障; 电流变化率

## A method to detect inrush currents in power transformer using current derivation characteristics

SHAO Wenquan<sup>1</sup>, QIAO Ni<sup>1</sup>, JIAO Zaibin<sup>2</sup>, WU Shu<sup>1</sup>

(1. Department of Electronic and Information, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China;

2. Department of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** To further improve the performance of differential protection for power transformers, this paper presents a new method for distinguishing inrush currents from internal faults using the extreme values of current derivation rate. In the condition of inrush currents, there are at least one phase whose current waveforms have the characteristics of discontinuity and steep wave and the time span between the maximum value and the minimum one of the derivation rate in a power frequency cycle is less than half a cycle. While in the case of internal faults, its derivation rate curve is close to sine waveform and the time span between the maximum value and the minimum one is approximately near to half a cycle. Using the current derivation rate, on the one hand, can weaken the impact of DC component. On the other hand, it can also highlight characteristics of the intermittent critical point. Thus, a criterion using the features of current derivation rate is developed and the corresponding realization flow is presented. At last, the results of dynamic tests under different conditions suggest that the proposed algorithm can identify inrush currents from internal faults in a power frequency period accurately and quickly, with clear principle, simple criterion, and a small amount of calculation. It also provides a helpful theoretical basis for improving the performance and optimization of differential protection in power transformers.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51207119).

**Key words:** power transformer; differential protection; magnetizing inrush current; internal faults; current derivation rate

## 0 引言

差动保护是电力变压器保护的主保护, 其存在的主要问题是变压器空载合闸过程中产生的励磁涌

流可能引起差动保护的误动作<sup>[1]</sup>。因此, 寻找准确、可靠、灵敏的涌流识别方法, 对提高变压器差动保护性能及整个电力系统的安全可靠运行具有重要的意义。

目前工程上普遍采用的是间断角原理<sup>[2]</sup>、二次谐波原理<sup>[2]</sup>、波形特征原理<sup>[3-18]</sup>。其中间断角原理由受电流互感器饱和的影响, 在实际应用中受限。二次谐波原理应用最为广泛, 但随着现代变压器容

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(51207119); 西安工程大学博士启动基金资助项目(BS1018); 西安工程大学青年学术骨干支持计划

量的不断增大及超高压、远距离输电引起分布电容的影响, 内部故障电流和涌流中均存在一定量的二次谐波, 导致二次谐波制动比的选取比较困难。波形特征原理主要利用波形的对称性、相关性、正弦度等的特征差异区分涌流。近年来, 随着计算机技术的飞速发展, 与新技术如数学形态学<sup>[19]</sup>、神经网络<sup>[20]</sup>、小波变换<sup>[21-22]</sup>等相结合的新方法不断提出, 涉及到复杂的信号处理及数学分析方法导致算法的计算量大, 实现复杂, 对硬件要求高。因此, 研究方法简单、计算量小、易于工程应用的算法, 有利于提高基于波形特征方法的适用性及可实现性, 有望为后续的工程应用提供有益的理论基础。

本文在分析变压器涌流与内部故障电流微分波形特征的基础上, 研究了利用电流变化率极值特征的变压器涌流与内部故障识别方法。通过计算一个周波内电流微分极大值与极小值的时间间隔来区分涌流和故障, 并给出了具体的实现方案, 最后仿真及动模试验验证了所提方法的有效性和适用性。

## 1 基本原理

### 1.1 变压器空载合闸数学模型

变压器空载合闸时, 在一定的铁芯剩磁、合闸初相角作用下, 可能使铁芯达到饱和。此时, 励磁支路中将产生幅值相当于额定电流 6~8 倍的励磁涌流。单相变压器空载合闸等效电路如图 1 所示。

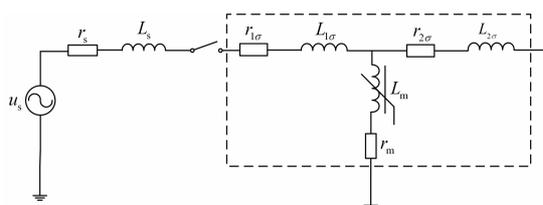


图 1 单相变压器空载合闸等效电路

Fig. 1 Equivalent circuit of transformer no-load closing

设电源电压  $u_s = U_m \sin(\omega t + \alpha)$ , 则合闸回路方程为

$$U_m \sin(\omega t + \alpha) = ri + L \frac{di}{dt} = \frac{r}{L} \psi + \frac{d\psi}{dt} \quad (1)$$

式中:  $r = r_s + r_{1\sigma} + r_m$ ;  $L = L_s + L_{1\sigma} + L_m$ 。

解微分方程得铁芯磁通的表达式:

$$\psi = \psi_m \sin(\omega t + \alpha + \varphi) + [\psi_r - \psi_m \sin(\alpha - \varphi)] e^{-t/\tau} \quad (2)$$

其中,  $\psi_m = \frac{LU_m}{\sqrt{r^2 + (\omega L)^2}}$ ,  $\tau = L/R$ 。

通常情况下变压器  $X \gg r$ , 进一步简化得:

$$\psi = -\psi_m \cos(\omega t + \alpha) + \psi_r + \psi_m \cos \alpha \quad (3)$$

则励磁支路中电流的表达式为

$$i = \psi/L = [-\psi_m \cos(\omega t + \alpha) + \psi_r + \psi_m \cos \alpha]/L = \frac{U_m}{\omega L} [\cos \alpha = \cos(\omega t + \alpha) + \frac{\psi_r - \psi_s}{\psi_m}] \quad (4)$$

式中,  $L$  为非线性电感。

由此可见, 励磁涌流的大小与铁芯的剩磁、铁芯的饱和特性、电源合闸初相角等有关。

### 1.2 涌流识别原理

变压器空载合闸时产生励磁涌流其铁芯磁通状态先后经历非饱和状态、饱和状态和退出饱和状态 3 个阶段, 如图 2(a)所示。空载合闸后瞬间, 铁芯磁通非饱和状态大约持续 3~5 ms, 此时励磁支路电流很小且波形具有间断性特点; 当铁芯进入饱和状态时, 励磁支路电流瞬间增大, 且饱和最严重时电流波形具有显著尖顶特性; 当铁芯退出饱和状态时, 电流波形又具有间断性特征; 对应的励磁电流及其电流微分波形分别如图 2(b)和图 2(c)所示。

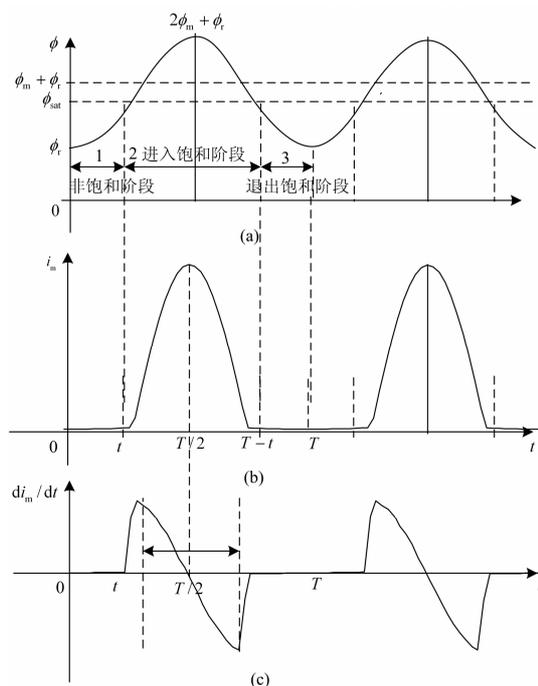


图 2 变压器磁通曲线及对应的励磁涌流

Fig. 2 Flux curve and corresponding inrush current

由图 2(c)可知, 变压器空投时励磁涌流存在一定的间断性特征, 其一个周波内电流微分极大值与极小值间隔小于半个周期。

变压器匝间故障时的故障电流及其变化率波形分别如图 3(a)和图 3(b)所示。可以看出, 内部故障时, 变压器故障电流无间断特征, 其电流变化率波形近似为正弦波, 一个周期内电流极大值与极小值的时间间隔近似为半个周期。

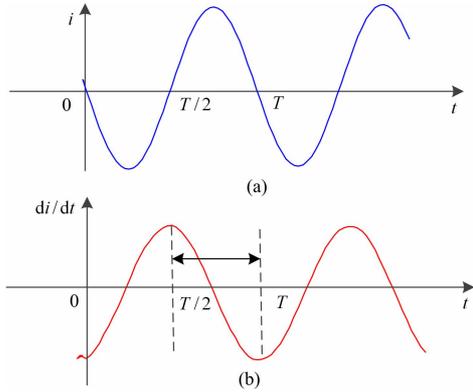


图3 匝间故障电流及相应的变化率波形

Fig. 3 Intra-turns fault current and its derivative current

图4为利用PSCAD/EMTDC软件仿真得到的涌流及内部匝间故障时一个周波内电流变化率的计算结果。

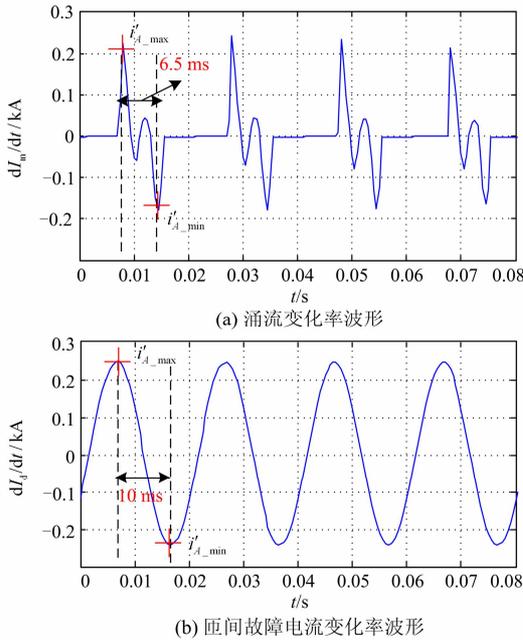


图4 涌流及内部故障电流变化率波形

Fig. 4 Derivative current waveforms of inrush current and intra-turns fault

由图4(a)明显可以看出，励磁涌流变化率波形具有间断角且为一尖顶波，一个周波内电流极大值与极小值的时间间隔小于半个工频周期；由图4(b)可以看出，匝间故障电流变化率波形近似呈正弦规律，一个周期内极大值与极小值时间间隔近似为半个周期。上述情况下的仿真计算结果分别为涌流时极大值与极小值时差为6.5 ms，而匝间故障时极大值与极小值的时差为10 ms。

因此，利用以上所讨论的变压器电流变化率的极值特征有望为变压器涌流鉴别提供一种实现思路。

## 2 涌流识别判据及实现方案

### 2.1 涌流识别判据

由上节相关分析可知，变压器的励磁涌流波形具有一定的间断特征，至少存在一相电流变化率波形依旧具有间断和尖顶特性，一个周波内极大值与极小值时间间隔小于半个周期；而内部故障时，故障电流变化率波形近似为正弦波，一个周波内极大值与极小值的时间间隔理论上为半个周期。据此，利用一个周波内电流变化率的极值特征构造式(5)所示的涌流识别判据。

$$\frac{|t_\phi - T/2|}{T/2} \geq \rho \quad (\phi = A, B, C) \quad (5)$$

式中： $t_\phi$  分别 A、B、C 三相电流在计算数据窗内的极大值与极小值的时间间隔，即  $t_\phi = |k_{1\phi} - k_{2\phi}| \cdot T_s$ ， $k_{1\phi}$  和  $k_{2\phi}$  分别三相电流在计算数据窗内极大值  $i'_{\phi\_max}(k_{1\phi})$  与极小值  $i'_{\phi\_min}(k_{2\phi})$  对应的采样点； $T_s$  为采样周期； $T$  为工频周期。 $\rho$  为整定门槛系数，综合考虑内部故障时电流谐波分量及计算误差等因素的影响，建议  $\rho$  取值 0.2~0.3。

若三相电流至少有一相满足判据式(5)，则判为涌流；否则，三相均不成立则判为内部故障。

### 2.2 涌流识别实现方案

依据本文所提出的电流变化率极值特征的涌流识别方法的实现方案如图5所示。

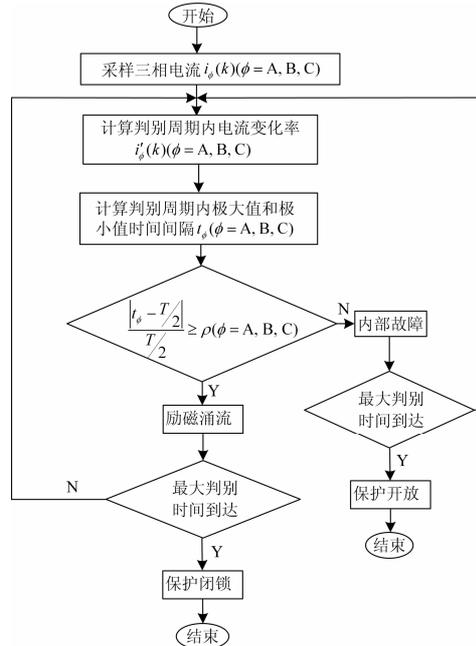


图5 算法实现流程

Fig. 5 Flow chart of implementation

其中, 假定工频周期采样点数为  $N$ , 为了提高涌流判别的可靠性, 采用顺次推移数据窗连续多次进行式(5)所示判据的判别, 利用多次确认实现励磁涌流的可靠判别, 进而闭锁变压器差动保护以避免保护误动。

### 3 动模试验

为了验证上述仿真分析结果的正确性, 本文利用西安交通大学动模实验室对变压器各种运行情况进行试验, 利用录波数据对所提判据进行验证。

#### 3.1 动模试验模型

图 6 为变压器动模试验系统图。其中无穷大系统为一调压变压器, 额定容量为 30 kVA, 试验变压器采用三单相变压器, 具体参数如下: 连接组别为 Yd-11, 单台变压器容量为 2 kVA, 高压/低压侧额定电压 380/220 V, 空载电流为  $I_0\% = 1.17\%$ , 空载损耗为  $P_0\% = 0.71\%$ , 短路电压为  $U_k\% = 11.2\%$ , 短路损耗为  $P_k\% = 1.05\%$ , 原边最小短路匝数比为 4.54%, 副边最小短路匝数比为 2.27%。

动模试验采样频率为 10 kHz, 数据窗选取为 4 ms(40 个采样点)。

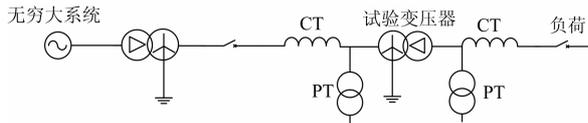


图 6 动模试验系统

Fig. 6 Dynamic testing system

#### 3.2 试验结果及分析

##### 3.2.1 变压器空载合闸试验

变压器 Y 侧进行空载合闸的典型铁芯深度、轻微饱和情况下的计算结果如图 7、图 8 所示。

为了方便分析, 作如下定义:

$$K_{\phi} = \frac{|t_{\phi} - T/2|}{T/2} \quad (\phi = A, B, C)$$

其中,  $\rho$  取值 0.2。

由图 7、图 8 可以看出, 在空载合闸产生励磁涌流工况下的三相电流具有不同程度的间断和尖顶波特征, 至少存在一相电流严重偏离正弦周期性波形特征; 且对应的电流变化率也具有一定的间断特性和尖顶波特征, 采用电流变化率一方面差分计算处理减小了涌流非周期衰减直流分量的影响, 另一方面对于幅值较小的间断变化临界点处电流变化率的微分计算凸显了其特性。显然, 在深度饱和状态

下和轻微饱和状态下, 至少存在一相电流极值特征的计算值  $K_{\phi}$  在门槛定值 0.2 以上, 且进入涌流工况下较长时间内持续满足本文所提涌流识别判据, 能够可靠识别出涌流。

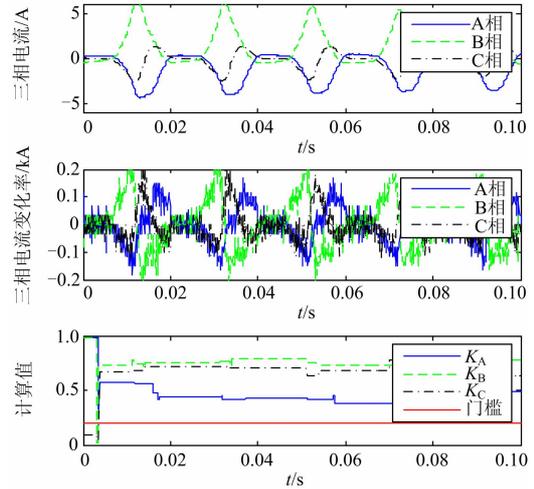


图 7 深度饱和和下励磁涌流计算分析结果

Fig. 7 Results of deeply saturated inrush current

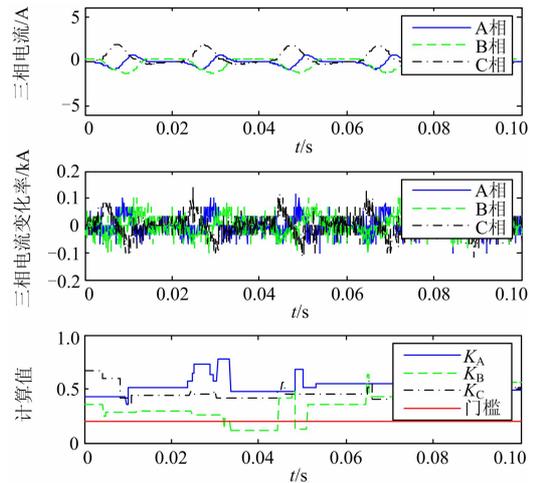


图 8 轻微饱和和下励磁涌流计算分析结果

Fig. 8 Results of slightly saturated inrush current

##### 3.2.2 变压器匝间故障试验

为了评估本文所提涌流识别算法对于轻微匝间故障的识别性能, 利用变压器原边 C 相 4.55%匝间短路、副边 C 相发生 2.27%、4.55%、9.09%匝间短路时的动模试验录波数据得到的计算结果如图 9 所示(A 相、B 相为非故障相, 由于差电流为零, 不进行计算判别)。

由图 9 所示结果可以看出, 不论是变压器原边绕组还是副边绕组发生匝间故障, 故障相的差电流具有显著周期性特征, 与涌流时电流波形有较大的

差异；且故障电流对应的变化率波形同样具有明显的周期性特征，在一个计算周期内的极大值与极小值的间隔时差接近 10 ms(0.5 个工频周期)，与前节相关故障特征分析一致。利用本文所提的涌流识别判据得到的计算值  $K_C$  在阈值定值 0.2 以下，能够有效识别变压器各种不同程度下的内部匝间故障，表现出良好的性能。

此外，利用了大量动模试验录波数据进行本文所提算法的验证，分析结果表明所提利用电流变化率的极值特征的涌流识别方法具有较好的适用性，能够有效的识别不同饱和程度下的励磁涌流状态；同时，对于变压器的内部故障尤其是轻微匝间故障时亦表现出良好的性能。

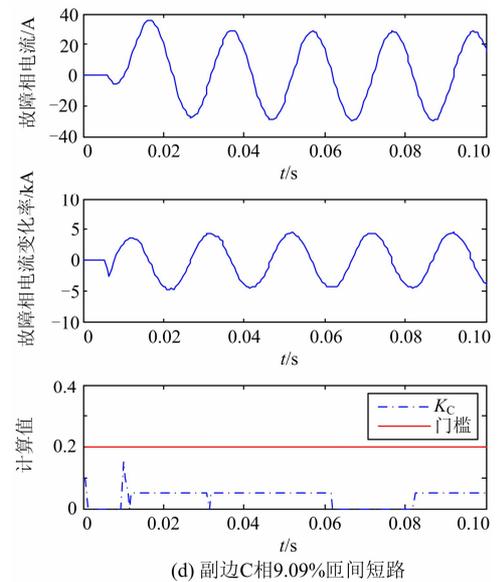
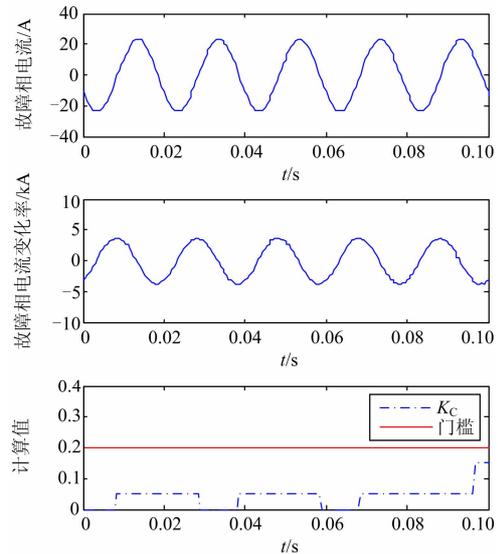
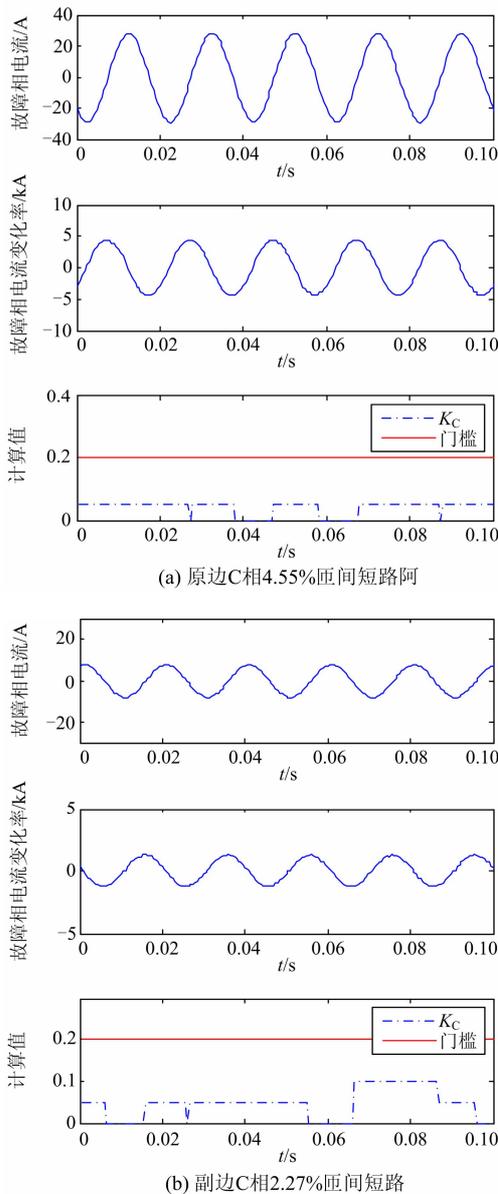


图9 匝间故障时计算分析结果

Fig. 9 Results of differential intra-turns faults

### 5 结论

本文在剖析变压器涌流及内部故障电流波形特征的基础上，提出一种利用电流变化率极值特征的励磁涌流识别方法。利用一个计算周期内电流变化率的极大值与极小值的特征进行涌流识别。变压器处于涌流状态时，由于电流波形间断性和尖顶波特征，计算周期内极值时间间隔小于半个工频周期，且不具备周期性特征；而内部故障时，计算周期内极值时间间隔为半个工频周期，且具有周期性特征。构造的利用电流变化率极值特征的涌流识别判据原

理简单, 计算量小, 易于工程实现; 大量仿真试验表明该判据的有效性与适用性, 为下一步变压器保护的工程应用提供良好的理论基础。

### 参考文献

- [1] 沈晓凡, 舒治淮, 刘宇. 2008 年国家电网公司继电保护装置运行情况[J]. 电网技术, 2010, 34(3): 173-177.  
SHEN Xiaofan, SHU Zhihuai, LIU Yu, et al. Operation situation of protective relaying of state grid corporation of China in 2008[J]. Power System Technology, 2010, 34(3): 173-177.
- [2] 王维俭. 电气主设备继电保护原理与运行[M]. 2 版. 北京: 中国电力出版社, 2002.
- [3] 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): 19-23.  
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): 19-23.
- [4] 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): 28-32.  
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): 28-32.
- [5] 兰生, 张小帆. 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): 125-131.  
LAN Sheng, ZHANG Xiaofan. A transformer differential protection method based on multi-criterion[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(23): 125-131.
- [6] 范兴明, 葛琳, 张鑫, 等. 基于选相合闸技术的变压器励磁涌流的仿真分析[J]. 高压电器, 2014, 50(2): 54-59, 67.  
FAN Xingming, GE Lin, ZHANG Xin, et al. Analysis and simulation of power transformer inrush current based on the phase selection switch technology[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(2): 54-59, 67.
- [7] 王业, 陆于平, 蔡超, 等. 采用自适应数据窗电流的励磁涌流鉴别方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(4): 702-709.  
WANG Ye, LU Yuping, CAI Chao, et al. A magnetizing inrush identification method applying adaptive data-window currents[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(4): 702-709.
- [8] 熊小伏, 齐晓光, 欧阳金鑫. 双馈风电机组短路电流对变压器保护二次谐波制动的影响[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(13): 2201-2209.  
XIONG Xiaofu, QI Xiaoguang, OUYANG Jinxin. Effect of doubly-fed wind turbines short-circuit current on second harmonic escapement of transformer protection[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(13): 2201-2209.
- [9] 金恩淑, 李晓娜, 宋晓刚, 等. 自适应变压器励磁涌流判据研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(20): 41-46.  
JIN Enshu, LI Xiaona, SONG Xiaogang, et al. Study on adaptive criterion of transformer magnetizing inrush current[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(20): 41-46.
- [10] 公茂法, 夏文华, 李国亮, 等. 变压器和应涌流和励磁涌流识别新判据[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(18): 139-143.  
GONG Maofa, XIA Wenhua, LI Guoliang, et al. New judgment to identify sympathetic inrush and inrush current[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(18): 139-143.
- [11] 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.
- [12] 张炳达, 张硕. 基于能量成分的变压器励磁涌流识别法[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(17): 121-126.  
ZHANG Bingda, ZHANG Shuo. Identification of transformer inrush current based on energy components[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(17): 121-126.
- [13] 邓祥力, 高亮, 刘建峰, 等. 特高压变压器模型漏感参数的稳态识别方法[J]. 电工技术学报, 2015, 29(5): 255-260.  
DENG Xiangli, GAO Liang, LIU Jianfeng, et al. Steady-state parameter identification of UHV transformer model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 29(5): 255-260.
- [14] 徐岩, 周霏霏. 基于幅值特征的变压器励磁涌流和故障电流的识别[J]. 电网技术, 2011, 35(9): 205-209.  
XU Yan, ZHOU Feifei. A method to distinguish inrush current of power transformer from fault current based on amplitude characteristics[J]. Power System Technology, 2011, 35(9): 205-209.
- [15] 孙洋, 黄家栋. 基于新型半周期波形正弦特征的励磁涌流判别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(18): 54-58, 68.  
SUN Yang, HUANG Jiadong. Novel theory of identifying

- inrush current based on half-cycle sine waveform[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(18): 54-58, 68.
- [16] 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.
- [17] 姚斌, 李永丽. 基于波形上下对称系数识别励磁涌流的新原理[J]. 电力系统及其自动化学报, 2004, 16(2): 32-35.  
YAO Bin, LI Yongli. Novel theory of identifying inrush current based on waveform longitudinal symmetry[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2004, 16(2): 32-35.
- [18] 马静, 王增平, 吴劫. 利用基波幅值变化特征快速识别励磁涌流和故障电流[J]. 电工技术学报, 2009, 24(6): 166-171.  
MA Jing, WANG Zengping, WU Jie. A novel method to rapidly identify inrush current and internal fault current based on variation characteristic of fundamental current amplitude[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(6): 166-171.
- [19] GU J, ZHENG T, HUANG S F. A new algorithm based on the morphological gradient for avoiding mal-operation of transformer differential protection[C] // IEEE Power and Energy Society General Meeting, 25-29 July, 2010.
- [20] TRIPATHY M, MAHESHWARI R P, VERMA H K. Power transformer differential protection based on optimal probabilistic neural network[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(1): 102-112.
- [21] 严屹宏, 陈剑云. 基于小波分析的变压器励磁涌流和内部故障电流识别[J]. 高压电器, 2010, 46(12): 74-77.  
YAN Yihong, CHEN Jianyun. Identification of transformer inrush current and internal fault current on the basis of wavelet analysis[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(12): 74-77.
- [22] ELDIN A A H, REFAEY M A. A novel algorithm for discrimination between inrush current and internal faults in power transformer differential protection based on discrete wavelet transform[J]. Electric Power Systems Research, 2011, 81: 19-24.
- 
- 收稿日期: 2015-11-14; 修回日期: 2016-03-01  
作者简介:  
邵文权(1978-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统继电保护; E-mail: shaowenquan@xpu.edu.cn.  
乔妮(1990-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护。E-mail: 1059531518@qq.com.  
(编辑 姜新丽)