

网格分形在识别电流互感器饱和中的应用

马 静, 王增平

(电力系统保护与动态安全监控教育部重点实验室(华北电力大学), 河北省 保定市 071003)

Application of Grille Fractal in Identification of Current Transformer Saturation

MA Jing, WANG Zeng-ping

(Key Laboratory of Power System Protection and Dynamic Security Monitoring and Control
(North China Electric Power University), Ministry of Education, Baoding 071003, Hebei Province, China)

ABSTRACT: The different singularity characteristics of differential current of transformer differential protection under inner-zone and out-zone faults are analyzed while current transformer is saturated, then by use of grille fractal a new approach to prevent maloperation of transformer differential protection is proposed. Combining the proposed approach with adaptive generalized morphological filter, the singularity characteristic of signal can be fully reserved; meanwhile noises and interferences can be restrained. It is not necessary for the proposed approach to accurately determine the moment when fault occurs and differential current appears; by use of relative magnitude of smooth domain of maximal value and that of minimal value and by means of setting appropriate threshold, the inner fault of transformer can be reliably identified and the identification is not affected by inrush current; besides, the evolved fault can be reliably identified. Results of dynamic simulation prove that the proposed approach is effective and feasible.

KEY WORDS: grille fractal; direct current blocking method; transformer differential protection; morphological filter; current transformer saturation

摘要: 分析了电流互感器饱和情况下变压器区内、外故障时差动电流的奇异特征, 提出一种利用网格分形原理防止变压器差动保护误动的新方法, 与自适应广义形态滤波器结合使用, 可在抑制各种噪声和干扰的同时, 完整保留信号的奇异特征。该方法不需要准确定位故障发生和差流出现的时刻, 利用差流网格变化曲线的极大值与极小值平滑域的相对大小, 通过设定合适的阈值, 能可靠识别变压器内部故障, 且不受励磁涌流的影响, 并能可靠识别转换性故障。动模试验结果证明了该方法的有效性和可行性。

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20060079009)。
Project Supported by Special Scientific and Research Funds for Doctoral Speciality of Institution of Higher Learning(20060079009).

关键词: 网格分形; 直流闭锁法; 变压器差动保护; 形态滤波; 电流互感器饱和

0 引言

差动保护作为电气主设备内部故障的主保护, 在发电机上的应用十分成功, 但将其用到变压器上则存在一些问题。常规变压器具有 2 个或 3 个电压等级, 由于差动保护所用电流互感器(简称 TA)的电压等级、变比、容量、铁芯饱和特性以及三相接线方式的不同, 差动回路的稳态和暂态不平衡电流都比较大。尤其是外部发生短路故障时, 不平衡电流更大, 可能会使差动回路表现出内部故障的特征, 如果不采取措施, 保护必然误动^[1]。比率差动继电器通过选择合理的制动特性可提高避开不平衡电流的能力。在此基础上, 人们根据不平衡电流的波形特征提出了不同对策, 如时差法^[2-3]、谐波检测法^[4]、直流闭锁法等。其中时差法通过检测故障发生和差流出现时刻是否同步来判别区内、外故障, 由于区外故障时 TA 可能在很短的时间内饱和, 此时若定位出现微小偏差, 将不能做出准确判断。对于谐波检测法, 由于暂态电流中的谐波无法准确地定量, 只能根据经验决定整定值, 整定值的选取还和滤波器的参数和算法有关, 其灵敏性有待提高。

不平衡电流的显著特征是直流分量大于交流分量的最大值, 因此会出现电流的波形偏于时间轴一侧的现象, 即电流的瞬时值为单极性; 而绕组的绝缘只有在电压接近峰值时才被击穿, 因此变压器本体故障时短路电流的瞬时值为双极性。若在被保护变压器本体外发生区内故障, 且对系统稳定有威胁而要求快速切除时, 可增设一个差动电流速断保护^[5], 从而构成 TA 暂态饱和的直流闭锁方案。

传统的基于直流分量速饱和原理的保护继电器常因避不开变压器空载合闸时的励磁涌流而误动。为此,本文在分析TA暂态饱和行为的基础上,通过网格分形算法充分挖掘电流波形的奇异信息,提出一种既能防止区外故障时TA饱和引起的保护误动,又能闭锁励磁涌流的新方法。利用广义形态滤波器结合自适应算法可实现对网格分形曲线的去噪和平滑功能。最后通过动模试验验证了该方法的正确性和可行性。

1 TA暂态饱和行为分析

TA饱和^[6]分为稳态饱和与暂态饱和2种。稳态饱和是指一次侧电流处于稳态时TA铁芯磁通的饱和情况。对于电压等级较低的电网,一般保护装置适应TA的稳态饱和并无太大困难。但实际线路发生故障后总会存在一个暂态过程,该过程中TA励磁回路的直流分量大于交流分量,从而使TA的暂态误差增大,其性能与稳态情况下相比有较大差别,此时若发生饱和,即为TA的暂态饱和。下面着重讨论TA发生暂态饱和对传变特性的影响。

假设当外部发生短路故障且TA未饱和时,TA一次侧暂态电流为

$$i_1 = I_{1m}(A - \cos \omega t) \quad (1)$$

式中: I_{1m} 为一次侧短路电流最大值; $A=e^{-t/T}$ 表示衰减直流分量, T 为一次系统时间常数。在TA未饱和时,其励磁电流非常小,即 $i_m=0$ 。在故障的初始阶段,一次侧电流 i_1 被毫无畸变地传变到二次侧。二次侧暂态电流为

$$i_2 = I_{2m}(A - \cos \omega t) \quad (2)$$

式中 I_{2m} 为二次侧短路电流的最大值。

由TA的等效电路可得

$$W_2 \frac{dF'}{dt} = i_2 r_2 \quad (3)$$

$$\Delta F' = \frac{1}{W_2} \int_{t_1}^{t_2} i_2 r_2 dt \quad (4)$$

式中: W_2 为TA二次匝数; $\Delta F'$ 为一个周期内TA铁芯磁通 F' 的增量; r_2 为互感器二次侧负载,只计电阻部分,不计电抗部分。将式(2)代入式(4)得

$$\Delta F' = \frac{2I_{2m}r_2}{wW_2} [A(\pi - \arccos A) + \sqrt{1-A^2}] \quad (5)$$

连续经过 n 个周期后,铁芯磁通达到TA的饱和值 F'_s , 其值为

$$F'_r + n\Delta F' = F'_s \quad (6)$$

式中 F'_r 为TA铁芯剩磁。由此可得TA开始饱和需

经的周波数为

$$n = \frac{wW_2(F'_s - F'_r)}{2I_{2m}r_2[A(\pi - \arccos A) + \sqrt{1-A^2}]} \quad (7)$$

由式(7)可以看出,虽然TA不会立即饱和,存在一个线性传变区,然而该区间的大小受诸多因素的制约:①一次侧短路电流的大小和偏移程度;②一次系统的时间常数;③TA二次侧所接负荷的大小;④TA剩磁与饱和值的大小和方向等。当区外出现严重故障,且TA剩磁与饱和值之间的大小和方向均十分接近时,TA有可能在很短的时间内饱和,这给时差法的应用带来一定的困难^[7]。

由前面的分析可知,励磁涌流与区外故障时TA饱和2种情况下,铁芯均会周期性地进入和退出饱和区,对应铁芯进、退饱和区的时刻都会有奇异点出现,对称性涌流也不例外。变压器内部故障时,由于铁芯一直处在线性区,因此仅在故障发生时刻存在奇异点,即使TA饱和造成故障电流波形的高频细节数增多,也不及故障点处的奇异特征明显。因此本文利用电流波形的奇异特征识别变压器内部故障。以下所说区内故障均指变压器本体故障。

2 网格分形的基本原理和算法

分形是对没有特征长度但具有一定意义的自相似图形和结构的总称,其典型性质是在小尺度下表现出的局部相似性。分形理论目前已被成功地应用于电力系统许多领域的奇异信号检测。而网格分形算法由于对采样频率不做要求,并且不需对频段进行划分,因此很适合于信号的实时处理^[8-9],受到越来越多研究者的青睐。本文参考网格分形中网格的定义(见图1),提出一种简单快捷的信号奇异性检测判据,其描述为:

对于信号 X , 设时间段 $[t_k - \Delta t, t_k]$ 上包含 $n+1$ (n 为偶数) 个采样点 $(x_1, x_2, \dots, x_{n+1})$ 。令 $\delta = \Delta t/n$, 则

$$N_d = \frac{1}{d} \sum_{j=1}^n |x_j - x_{j+1}| \quad (8)$$

式中: d 为2采样点之间的时间差; N_d 表示在时间

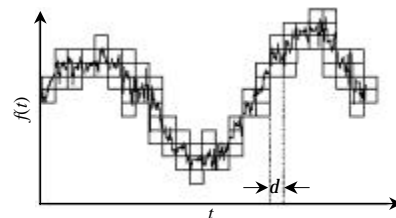


图1 网格的定义

Fig. 1 Grille definition

段 $[t_k-\Delta t, t_k]$ 内以 d 为边长的正方形网格覆盖信号所需的网格格子数。

由于变压器正常运行时的差动电流为近似纯正弦信号, 如果取 Δt 为1/2周波, 则对任意 Δt 时段, 信号中的 N_d 都是相同数值。倘若变压器发生区外故障, 由于在暂态过程中短路电流含有直流分量, TA对直流分量变换误差较大, 以致很快进入饱和, 二次绕组的感应电动势迅速降为0, 在相应的一段时间内 i_2 也为零; 随着一次电流瞬时值下降TA退出饱和, 二次绕组的感应电动势增大, i_2 又开始增加。由此可见, 伴随TA进退饱和区, i_2 的波形会出现严重畸变, 对应畸变点 N_d 也会发生剧烈变化。同理, 由于铁芯的高度非线性特性, 伴随着铁芯进、退饱和的时刻, 励磁涌流中必然包含大量的高频细节。表现在网格变化曲线上, 2者均会有“先上升后下降”的变化趋势。

变压器内部故障时, 故障电流将在故障点产生高频奇异信号, N_d 也随之剧烈变化, 直至又恢复到正弦波形特征为止, 表现在网格变化曲线上, 将会出现“先上升后平稳”的变化趋势。

由上面的分析可以看出, 运用网格曲线变化规律可有效识别出TA饱和情况下变压器区内、外故障, 且不受励磁涌流的影响。在现场中, 变压器微机保护装置从电力系统一次侧采集的数据很容易被各种噪声和干扰污染, 反应到网格变化曲线上, N_d 可能会产生波动, 导致曲线极值数目增加。此时若出现变压器内部故障且TA饱和的情况, 网格曲线也会出现“先上升后下降”的变化趋势, 因此仅对网格曲线分析有可能造成保护拒动。本文利用自适应广义形态滤波器, 在有效提取奇异信号的同时, 达到抑制噪声和扰动的目的。

3 自适应广义形态滤波器

近年来, 基于数学形态学的滤波方法因其物理意义明确、高效实用等优点在电力系统中的应用逐渐增多。但其算法主要集中在形态开闭运算、形态开闭运算以及它们的平均组合形式上^[10-12]。为有效去除噪声和干扰信号, 本文选取不同尺寸的结构元素 B_1 和 B_2 , 令后级结构元素 B_2 的宽度约是前级元素 B_1 的2倍。在形态开、闭运算的基础上, 构造了一类广义形态开-闭和闭-开滤波器, 分别定义为

$$y_1(n) = \text{GOC}(x(n)) = (x \circ B_1 \bullet B_2)(n) \quad (9)$$

$$y_2(n) = \text{GCO}(x(n)) = (x \bullet B_1 \circ B_2)(n) \quad (10)$$

由于以上2种滤波器仍存在统计偏倚现象, 单独使用很难取得最好的滤波效果。因此采用2种广义滤波器的平均组合形式, 滤波输出信号为

$$y(n) = 0.5(y_1(n) + y_2(n)) \quad (11)$$

结构元素的形状和尺寸是决定形态滤波效果的另一重要因素。考虑到计算量和网格曲线变化的特点, 选用最适合平滑处理的扁平结构元素进行分析。另外, 开度运算^[13]可以保证结构元素宽度大于最大噪声干扰的宽度, 因此为了最大程度地抑制噪声干扰, 结构元素 B_1 的宽度必须大于最大开度。

4 保护方案设计与结果验证

4.1 动模试验系统

根据上面的分析, 制定TA饱和情况下识别变压器内部故障的保护判据。考虑一侧TA深度饱和而另一侧TA能正确传送的极端情况, 此时TA的二次侧电流差值非常大, 极易造成差动保护误动。利用动模试验系统^[14-15]测试该判据的实用性和可行性。动模试验系统接线及各电气元件参数如图2所示。图中, 变压器为两绕组三相变压器, YNd11接线, 变比为19kV/550kV, 额定容量 $S_{\text{rated}}=670$ MVA, 短路电抗 $X_{\text{short-circuit}}=13\%$; 电源参数为 $P_{\text{rated}}=600$ MW, $U_{\text{rated}}=19$ kV, $I_{\text{rated}}=20.26$ kA; 输入系统的容量 $S_{\text{system}}=11000$ MVA; 线路长度为257km, 参数为 $Z_1=0.01808+j0.27747 \Omega/\text{km}$, $C_1=0.012917 \mu\text{F}/\text{km}$, $Z_0=0.23084+j0.9728 \Omega/\text{km}$, $C_0=0.0081161 \mu\text{F}/\text{km}$ 。

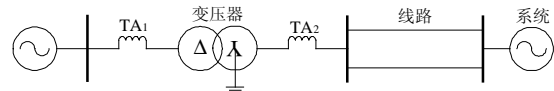


图2 动模试验模型及参数

Fig. 2 Electrical power dynamic test model and parameters

4.2 区外故障且TA饱和时的情况分析

图3(a)为变压器区外故障且TA饱和情况下差动电流的波形。与图3(b)网格变化曲线对照可知, 故障前, 由于差动电流波动较小, N_d 一直保持在较低的水平; 发生故障后, N_d 随着电流波形畸变程度的增减而发生变化, 且波形的奇异点对应 N_d 的极大值或极小值点。仔细观察不难发现, 网格变化曲线还保留着由扰动或噪声信号形成的“小凸点”或“小凹点”。若不加以区分, 很容易与奇异点对应的极值点混淆。形态滤波器由于采用扁平结构元素, 可在平滑“小凸点”或“小凹点”的同时, 在奇异点对应的极值点附近捕捉到小块平滑区域, 如图3(c)

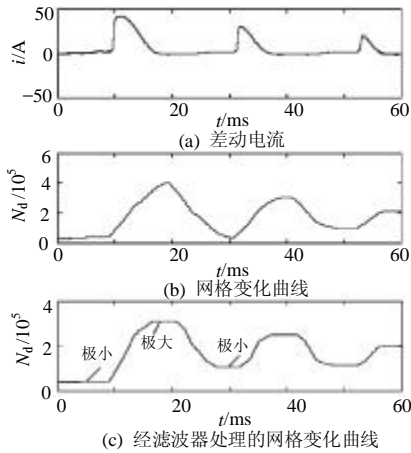


图 3 变压器区外故障 TA 饱和时差动电流波形及其处理结果
Fig. 3 The differential current waveform and its results under TA saturation at out-zone fault

所示。即使没有完全覆盖噪声或干扰信号，利用“极小值平滑域-极大值平滑域-极小值平滑域”的波形特征，也完全可以闭锁变压器保护。

4.3 励磁涌流情况分析

图 4(a)为变压器空载合闸情况下对称性励磁涌流的波形。由于波形不再偏于时间轴一侧，利用直流分量闭锁的 BCH-1 型差动继电器就要误动作。但由图 4(b)所示网格变化曲线可以看出，变压器铁芯进、退饱和形成的奇异点仍对应着 N_δ 的极值点。经滤波器平滑处理后，图 4(c)波形同样呈现出“极小值平滑域-极大值平滑域-极小值平滑域”的特征。利用这一特征可实现差动保护制动。

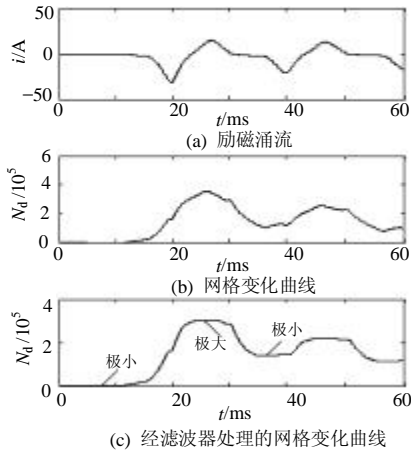


图 4 变压器空载合闸时对称涌流波形及其处理结果
Fig. 4 The symmetrical inrush current and its results

4.4 内部故障且 TA 饱和时的情况分析

图 5(a)为变压器内部故障且 TA 饱和情况下差动电流的波形。由图 5(b)可以看出，发生故障后， N_δ 随差动电流畸变而发生剧烈变化，而后随着波形

畸变程度减弱，网格曲线趋于平缓。然而由于 TA 饱和与各种干扰作用的影响，曲线上仍有小波动存在，“先上升后平稳”的变化趋势并不是很明显。利用自适应广义形态滤波器处理，不仅可以有效抑制噪声和干扰信号，而且不模糊故障点处的奇异特征，如图 5(c)所示，处理后的波形仅保留“极小值平滑域-极大值平滑域”的波形特征。与图 3(c)和图 4(c)对比可以看出，图 5(c)的波形缺少由极大值平滑域过渡到极小值平滑域的变化趋势，因此如何识别极大值平滑域，是保护可靠动作的关键。在变压器差动保护启动后，实时测量差动电流 t_k 时刻的 N_δ 与 t_k 时刻前 1ms 处的 N_δ ，若 2 个时刻的 N_δ 相等，且依次取 5 个点也能满足这些条件，就判定 (t_k-1) 时刻以后的点落到了极大值平滑域上。

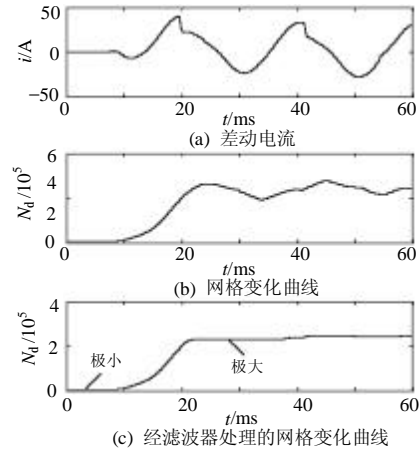


图 5 变压器内部故障 TA 饱和时差动电流波形及其处理结果
Fig. 5 The differential current waveform and its results under TA saturation in the case of internal fault

在确定极大值平滑域后，利用式(12)从 (t_k-1) 时刻起取 M 个点计算网格变化率平均值

$$B_e = \left| \frac{1}{M} \sum_{i=0}^{M-1} \frac{N_d^2(i)}{N_d^2(i+S)} - 1 \right| \quad (12)$$

式中： $M=10$ ； $N_\delta(0)$ 为 (t_k-1) 时刻的网格数； S 为 1/2 周波的采样点数。

表 1 列出了 3 种情况下分别测取 15 组动模试验数据的综合结果。可以看出，若设 B_e 的阈值值为 0.5，则能可靠识别出变压器内部短路故障。

表 1 变压器 3 种典型状态下的网格计算结果
Tab. 1 Calculation results of three kinds of states

计算项目	TA 饱和		对称性涌流
	内部故障	区外故障	
半波前 $N_\delta/10^5$	5.7997~6.6973	2.7816~3.4374	2.7655~3.2906
半波后 $N_\delta/10^5$	5.7369~6.6492	0.7988~1.2859	1.1852~1.6547
$B_e/10^5$	0.019~0.034	4.5936~12.1857	2.7481~5.3794

4.5 特殊情况分析

考虑区外故障且 TA 不立即饱和的情况, 此时需要与转换性故障区分开。区外故障且 TA 不饱和时, 可根据比率制动特性闭锁保护, 经几个周波 TA 饱和后, 可根据上述方法继续闭锁保护; 对于经过几个周波发生转换性故障同时 TA 饱和的复故障情况, 区外故障电流经历几个周波的衰减, 与区内故障电流波形叠加, 必然表现出区内故障的特征, 即差流过零点附近不会出现明显的奇异信号, 因此保护能可靠动作。

5 结论

(1) 自适应广义形态滤波技术在不模糊信号奇异特征的同时, 可有效滤除各种噪声和干扰信号, 并对衰减直流分量有很好的抑制作用。

(2) 利用网格曲线极大值与极小值平滑域的相对大小, 通过设定合适的门槛值, 能正确区分出变压器故障与 TA 饱和。

(3) 新算法克服了直流饱和继电器的缺点, 不受励磁涌流的影响, 特征明显, 实现简单, 动模试验数据验证了此算法的有效性和可行性。

参考文献

- [1] 郑涛, 刘万顺, 刘建飞, 等. 采用数学形态学防止变压器差动保护误动的新方法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(20): 6-11.
Zheng Tao, Liu Wanshun, Liu Jianfei, et al. A new algorithm based on the mathematical morphology for avoiding mal-operation of transformer differential protection[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(20): 6-11(in Chinese).
- [2] 李贵存, 刘万顺, 贾清泉, 等. 一种利用小波原理防止变压器差动保护误动的新算法[J]. 电网技术, 2001, 25(7): 48-51.
Li Guicun, Liu Wanshun, Jia Qingquan, et al. A new algorithm to prevent misoperation of transformer differential protection based on principle of wavelet transform[J]. Power System Technology, 2001, 25(7): 48-51(in Chinese).
- [3] 林湘宁, 刘沛, 高艳. 基于数学形态学的电流互感器饱和和识别判据[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(5): 44-48.
Lin Xiangning, Liu Pei, Gao Yan. A novel method to identify the saturation of the current transformer using mathematical morphology[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(5): 44-48(in Chinese).
- [4] 王志鸿, 郑玉平, 贺家李. 通过计算谐波比确定母线保护中电流互感器的饱和[J]. 电力系统及其自动化学报, 2000, 12(7): 19-24.
Wang Zhihong, Zheng Yuping, He Jiali. A algorithm to distinguish current transformers's saturation by calculating the harmonics ratio of branch current[J]. Proceedings of Electric Power System and Automation, 2000, 12(7): 19-24(in Chinese).
- [5] 朱声石. 高压电网继电保护原理与技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.
- [6] 胡晓光, 于文斌. 电流互感器的暂态仿真及其铁芯饱和的小波分析[J]. 电网技术, 2001, 25(11): 58-61.
Hu Xiaoguang, Yu Wenbin. Transient simulation of current transformer and wavelet analysis of its core saturation[J]. Power System Technology, 2001, 25(11): 58-61(in Chinese).
- [7] 马静, 徐岩, 王增平. 利用数学形态学提取暂态量的变压器保护新原理[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(6): 19-23.
Ma Jing, Xu Yan, Wang Zengping. Power transformer protection based on transient data using mathematical morphology[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(6): 19-23(in Chinese).
- [8] 吴敏金. 分形信息导论[M]. 上海: 上海科学技术文献出版社, 1994.
- [9] 杨丹, 刘沛, 王冬青, 等. 基于分形理论的输电线路故障检测和选相[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(15): 35-39.
Yang Dan, Liu Pei, Wang Dongqing, et al. Detection of faults and phase-selection using fractal techniques[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(15): 35-39(in Chinese).
- [10] 欧阳森, 王建华, 宋政相, 等. 基于数学形态学的电力系统采样数据处理方法[J]. 电网技术, 2003, 27(9): 61-65.
Ouyang Sen, Wang Jianhua, Song Zhengxiang, et al. A new power system sampled data processing method based on morphology theory[J]. Power System Technology, 2003, 27(9): 61-65(in Chinese).
- [11] 王楠, 律方成, 刘云鹏, 等. 自适应广义形态滤波方法在介损在线监测数据处理中的应用研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(2): 161-165.
Wang Nan, Lü Fangcheng, Liu Yunpeng, et al. Study on application of adaptive generalized morphological filter in processing on-line monitoring tand data[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(2): 161-165(in Chinese).
- [12] 张兆礼, 赵春晖, 梅晓丹. 现代图象处理技术及 Matlab 实现[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2001.
- [13] 刚铁, 王东华. 基于自适应形态学滤波的 X 射线图像的缺陷提取[J]. 机械工程学报, 2001, 37(3): 85-89.
Gang Tie, Wang Donghua. Defect extraction of X-ray images based on adaptive morphology filtering[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2001, 37(3): 85-89(in Chinese).
- [14] Ma Jing, Xu Yan, Wang Zengping, et al. A novel adaptive scheme of discrimination between internal faults and inrush currents of transformer using mathematical morphology[C]. IEEE Power Engineering Society General Meeting, Canada, 2006.
- [15] 马静, 王增平. 自适应加权形态梯度在变压器保护中的应用[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(17): 59-64.
Ma Jing, Wang Zengping. Application of morphological gradient with adaptive weighting in transformer protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(17): 59-64(in Chinese).

收稿日期: 2007-02-08。

作者简介:

马静(1981—), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统继电保护, E-mail: majing_1234@sohu.com;

王增平(1964—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统继电保护和变电站综合自动化。

(实习编辑 李兰欣)