

基于形态小波的低压系统短路故障早期检测

陈丽安^{1,2}, 张培铭¹

(1. 福州大学电气工程与自动化学院, 福建省福州市 350002;

2. 厦门理工学院电子工程系, 福建省厦门市 361005)

EARLY DETECTION FOR SHORT-CIRCUIT FAULT IN LOW-VOLTAGE SYSTEMS BASED ON MORPHOLOGY-WAVELET

CHEN Li-an^{1,2}, ZHANG Pei-ming¹

(1.College of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350002, Fujian Province, China;

2. Department of Electronic Engineering, Xiamen Institute of Technology, Xiamen 361005, Fujian Province, China)

ABSTRACT: A variety of pulses and white noises exist in the low-voltage distributed systems. These noises are obstructive to the accurate extraction of the short-circuit faults. The effective filter ought to be designed to utilize the abrupt change of the current deviation in the fault occurrence for the purpose of the early fault detection. In this way, the characteristics of the fault signal can be preserved and the noise interferences are suppressed. The morphological filter is utilized as the preposed unit of the multi-scale wavelet transform, which are combined as a novel model of the morphology-wavelet filtering algorithm and applied to the ultra-high speed detection of the short-circuit faults of the low-voltage systems. This model incorporates the advantages of morphological filter and multi-scale wavelet transform to extract the feature of faults meanwhile restraining various noises. Besides, it can be implemented in real time using the available hardware. The effectiveness of this model was verified with the simulation results and the tests based on TI TMS320F2812 DSP.

KEY WORDS : Power system; Low-voltage system; Short-circuit fault; Morphological filter; Wavelet transform; Early detection

摘要: 低压配电系统中存在着较强的脉冲噪声及白噪声干扰, 影响了短路故障特征的准确提取。为充分利用短路后电流变化率剧增这一重要故障信息以对短路故障进行早期检测, 必须设计有效的滤波算法, 在保留故障信号特征的前提下最大限度地抑制噪声干扰的影响。该文将数学形态学滤波器作为多尺度小波变换的前置滤波单元, 形成一种新型的形态小波算法模型, 并应用于低压系统短路故障早期检测中。该模型兼顾了数学形态学滤波器与多尺度小波变换各自的优点, 可以较好地提取故障特征、抑制各种噪声, 并能够在

硬件上实时实现。计算机仿真结果和在以 TI TMS320F2812 DSP 为核心的硬件系统实验证实了该模型的有效性。

关键词: 电力系统; 低压系统; 短路故障; 形态学滤波器; 小波变换; 早期检测

1 引言

现代电力系统, 包括低压配电系统的容量不断增大, 短路容量及短路电流也随之增大, 无限度地提高短路保护装置的分断能力以及电气设备的动热稳定性以防止由巨大的短路电流所引起的各种危害是很不经济的。因此有必要研究一种新的短路故障保护方案, 即采用先进的传感技术及数据采集技术对系统进行实时在线快速检测, 用现代数学手段对短路故障进行早期检测并在高速微处理器上实时实现, 当故障处于萌芽状态时便判断出来并使保护装置动作或使短路电流限制器(FCL, Fault Current Limiter)快速接入线路, 从而减轻短路电流对电力系统及电气设备的威胁。

文[1]利用短路电流变化率在故障后极短时间内即超过正常运行时最大值这一原理, 将电流的导数值作为短路的判据。该方法虽然做到了故障的早期检测, 但微分运算对噪声干扰十分敏感, 当信号中混杂较严重的噪声时易发生误判。文[2]在求导基础上引入电流值及其积分以剔除小噪声的影响, 但该方法检测时间较长, 不易做到故障的早期检测。

为充分利用短路后电流变化率剧增的故障信息, 同时剔除噪声干扰影响, 在提取故障特征(如求导)之前, 应对信号进行平滑和消噪处理。文[3]对低

压配电系统短路电流信号进行了研究，证实了小波分解算法对短路故障早期检测的有效性。小波分析以其独有的特性在电力系统等领域得到了广泛的研究与应用^[4-13]，但是，其分解方法存在着对脉冲干扰的抑制作用不够理想及故障特征随尺度增加逐渐被削弱等问题。本文针对这一问题，在小波分解基础上引入一种善于剔除脉冲干扰的新型非线性滤波器—数学形态学滤波器，建立基于形态小波的短路故障早期检测模型。仿真及实验结果证明了该模型可有效提取短路故障特征，且在降低小波分解尺度的情况下，仍可有效地抑制噪声干扰，尤其是可降低脉冲干扰的影响。

2 三次 B 样条二进小波变换

本文将小波变换所具有的突变信号检测能力及消噪特性应用于低压系统短路故障早期检测中。

由于实际信号是经采样后的离散信号，因此本文将使用的是离散信号的二进小波变换，其分解的快速递推算算法为^[14]

$$\begin{cases} S_{2^j} f(n) = \sum_k h_k S_{2^{j-1}} f(n - 2^{j-1} k) \\ W_{2^j} f(n) = \sum_k g_k S_{2^{j-1}} f(n - 2^{j-1} k) \end{cases} \quad (1)$$

本文以三次 B 样条函数的导函数为小波函数，其低通及带通滤波器的脉冲响应系数为 $g_0 = -2$ ， $g_1 = 2$ ； $h_{-1} = h_2 = 0.125$ ， $h_0 = h_1 = 0.375$ 。

由式(1)及脉冲响应系数可得三次 B 样条二进小波分解的意义如下：①小波分解在某一尺度下的光滑分量 $S_{2^j} f$ 实为对上一尺度的光滑分量 $S_{2^{j-1}} f$ 进行进一步平滑处理，信号中的高频成分随尺度的增加而逐渐被剥离，光滑分量中具有较高频率的噪声成分也随尺度的增加而减少。尺度越高，噪声干扰的剔除作用越显著，但运算量越大，且故障信号的奇异性也将随尺度的增加而削弱。②小波分解在某一尺度下的细节分量 $W_{2^j} f$ 与上一尺度的光滑分量 $S_{2^{j-1}} f$ 的差分成正比，说明细节分量体现了信号不断被平滑后的差分。

总之，三次 B 样条小波分解的细节分量既能体现信号变化率的大小，又能剔除噪声干扰的影响，恰巧满足本文短路故障早期检测的要求。

尽管小波分解在故障特征提取及滤波等领域得到广泛应用，但它仍存在如下问题：①小波分解算法虽然可以较好地滤除白噪声，但不能有效地抑制脉冲噪声。若需抑制较强的脉冲干扰，需提高小波

分解尺度，使计算量线性增加，难以在硬件上实时实现。②随着尺度增加，在剔除噪声干扰的同时，也使信号中陡峭阶跃部分变得平缓，削弱了故障特征。因此，以下引入可有效地抑制脉冲噪声的数学形态学滤波器并与小波分解结合以弥补其不足。

3 数学形态学滤波器

形态学滤波器的基本原理是用结构元素通过形态学变换滤除信号中比结构元素小的噪声。形态学滤波器在数字图像处理等领域已获得广泛应用^[15]，但在电力系统中的应用近两年才见报道^[16-24]。

形态学滤波器的变换形式是影响滤波效果的重要因素之一。腐蚀及膨胀是最基本的变换。对于本文所研究的一维离散信号有如下定义：

定义 1: 设输入序列 $f(n)$ 和结构元素 $g(n)$ 分别为定义在 $F = \{0, 1, \dots, N-1\}$ 和 $G = \{0, 1, \dots, M-1\}$ 上的一维离散函数，且 $N \geq M$ ，则 $f(n)$ 关于 $g(n)$ 的腐蚀及膨胀变换分别为

$$(f \ominus g)(n) = \min_{m=0,1,\dots,M-1} \{f(n+m) - g(m)\} \quad (n=0,1,\dots,N-M) \quad (2)$$

$$(f \oplus g)(n) = \max_{m=0,1,\dots,M-1} \{f(n-m) + g(m)\} \quad (n=0,1,\dots,N+M-2) \quad (3)$$

腐蚀及膨胀变换构成了最基本的形态学滤波器，它们可分别剔除那些脉冲宽度不超过所选结构元素长度的正、负脉冲。为了同时滤除信号中正、负两种脉冲噪声，可将腐蚀、膨胀串行组合，形成开或闭滤波器。

定义 2: $f(n)$ 关于 $g(n)$ 的开及闭变换分别为

$$(f \circ g)(n) = [(f \ominus g) \oplus g](n) \quad (4)$$

$$(f \bullet g)(n) = [(f \oplus g) \ominus g](n) \quad (5)$$

除了形态变换形式，影响形态滤波效果的另一个重要因素是结构元素的形状及尺寸。在对输入信号缺乏先验知识的情况下，通常选用扁平结构元素（指在其定义域上取常数的结构元素，通常假设该常数为零），其长度小于信号中有用波的最小周期而大于噪声的长度。

前面所述的形态学滤波器均采用单一、固定的结构元素，若信号中含有复杂噪声，则将要么滤波效果不佳，要么破坏信号的原特征。以形态开滤波为例，由于先执行的腐蚀变换在滤除正脉冲噪声的同时，也增强了负脉冲噪声，如果采用相同的结构元素进行膨胀变换，就不能有效地滤除全部的负脉冲噪声。为克服这一缺陷，可用多个不同形状或尺

寸的结构元素构成一类具有多结构元素的广义形态学滤波器。

为保证在硬件上实时实现滤波算法,从而达到对短路故障早期实时检测的目的,本文采用广义形态开滤波器对电流采样信号进行前置滤波,以滤除脉冲噪声。下面给出广义形态开滤波的定义:

定义 3: $f(n)$ 为在 $F=\{0,1,\dots,N-1\}$ 上的一维离散函数, $g_1(n)(n \in G_1)$ 和 $g_2(n)(n \in G_2)$ 是 2 个结构元素, G_1 和 G_2 是整数集 z 的 2 个有限子集,且 $G_1 \subset G_2$,则广义形态开滤波器(EXO)定义为

$$E_{\text{EXO}} = [(f \oplus g_1) \oplus g_2](n) \quad (6)$$

广义形态开滤波器的腐蚀与膨胀变换采用尺寸不同的扁平结构元素。由于先腐蚀后膨胀,因此膨胀的结构元素尺寸大于腐蚀的结构元素尺寸。

虽然采用这种具有单边滤波效果的形态开滤波器会造成统计偏倚现象,但由于本文所关心的是信号的局部奇异特征,因此这种偏倚不会给本文结果带来很大的影响。

4 基于形态小波的短路故障早期检测

4.1 模型简介及仿真结果

本文用MATLAB电力系统工具箱对负载为三相异步电动机的低压系统进行仿真计算^[25],以研究单相、两相及三相短路在不同故障初相角下的暂态过程,并探索短路故障早期特征,同时搭建实验线路验证该仿真模型的正确性^[3]。

对电流信号 $f(n)$ 进行不同的故障特征提取及滤波处理,得到如表 1 所列的 5 种短路故障决策函数模型。当连续 3 个决策函数值达到预先设定的门限值时即认为短路发生。这里,门限值设置的原则是在线路末端发生单相对中线短路且在最不严重的故障初相角下能够可靠脱扣,但在电动机启动、过载或有噪声干扰的情况下不误脱扣。同时在可靠性与灵敏度之间进行优化处理(具体内容另文详述)。

低压配电系统存在着较强的噪声干扰,常见的有背景白噪声及随机脉冲噪声。背景白噪声主要来源于交直流两用电动机;而随机脉冲噪声主要来源于雷电及负载(电容器组、自动调温器、电冰箱及空调等)的开关操作。这些噪声叠加在测量信号上,影响了短路故障特征的准确提取。为此,必须采用有效的滤波方法剔除噪声干扰,才不至于在短路故障早期检测中造成误判。

为了校验表 1 所列各种模型对脉冲噪声及白噪

声的抑制效果,本文对故障相短路电流进行了仿真计算。计算中取故障前、后各 1000 个采样点作为标准序列,然后人为地加上白噪声及脉冲噪声以得到被测信号。图 1 为原始电流信号及其差分、被噪声污染的信号及其差分以及表 1 所列 5 种模型的决策函数波形。所加白噪声均值为 0,均方差为 I_N 10%;每隔 1.67ms交替地叠加幅值为 $2 I_N$ 、频率为 50kHz 的正、负脉冲噪声(其中, I_N 为额定电流幅值)。图中各量均采用标么值,基准值为 I_N 。由图 1(f)可见,如果不对图 1(b)的电流信号进行滤波而直接求差分,那么短路故障特征完全被淹没在噪声中。若将其作为决策函数,则将发生误判。

表 1 五种短路故障决策函数模型

Tab. 1 Five models of short-circuit fault decision function

模型	决策函数	说明
1	MF	形态滤波后求差分
2	WT(4D) ^[3]	小波分解,得第四尺度细节分量
3	MF+WT(2D)	形态滤波后小波分解,得第二尺度细节分量
4	MF+WT(3D)	形态滤波后小波分解,得第三尺度细节分量
5	MF+WT(4D)	形态滤波后小波分解,得第四尺度细节分量

注:表中, MF 指广义形态开滤波(腐蚀和膨胀结构元素的序列长度分别取 3 和 4); WT 为三次 B 样条二进小波分解。

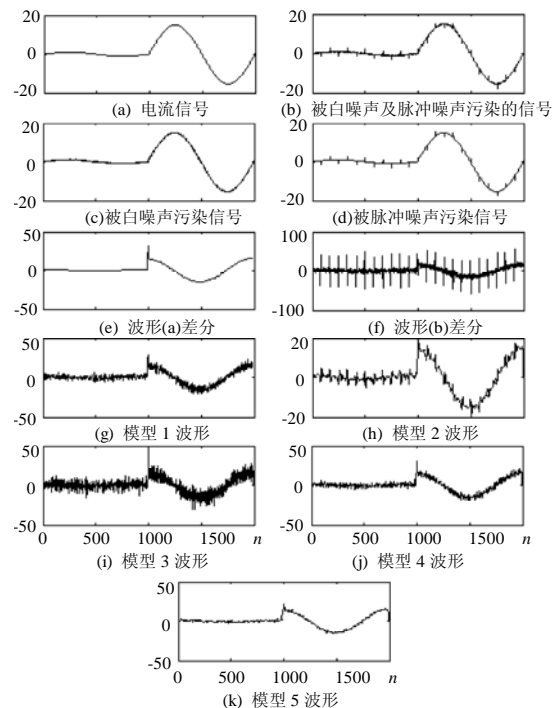


图 1 仿真波形图

Fig.1 Simulation waveforms

4.2 滤波效果的定量评价

为了对上述 5 种模型的滤波效果进行定量评价,本文用平均绝对误差 ε_{MAE} 及均方误差 ε_{MSE} 衡量

滤波效果，其表达式为

$$\varepsilon_{MAE} = \frac{1}{RN} \sum_{n=0}^{N-1} |d(n) - d'(n)| \quad (7)$$

$$\varepsilon_{MSE} = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} (d(n) - d'(n))^2} \quad (8)$$

式中 $d(n)$ 及 $d'(n)$ 分别为不含噪声及滤波后的短路故障决策函数值， N 为采样点数。

ε_{MAE} 及 ε_{MSE} 均由 R 归一化处理，一般取 R 为 $d(n)$ 正常运行时的幅值，但对模型 3 及模型 4，将其纳入门限值的统一框架下，即再分别除以 4 及 2。

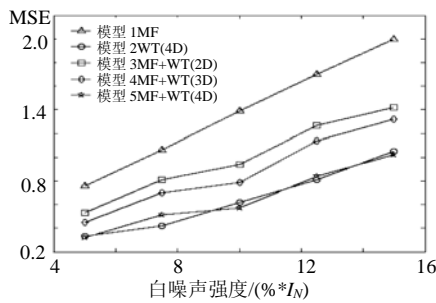
表 2 示出了在不同噪声污染情况下 5 种模型的滤波效果定量评价。其中白噪声的均方差为 I_N 10%；脉冲噪声幅值为 $2 \times I_N$ 。

图 2 定量地给出了 5 种模型在不同的噪声强度下滤波效果的对比折线。根据图 1、图 2 及表 2，对比 5 种模型的滤波效果可见，小波分解模型对白噪声的滤除比较有效，且随着分解尺度的提高，抑制

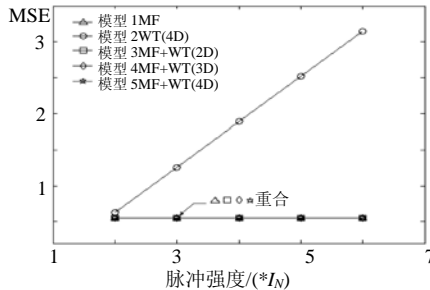
表 2 滤波效果定量评价

Tab. 2 Quantificational evaluation on filtering effect

模型	决策函数	白噪声		脉冲噪声		白噪声+脉冲噪声	
		ε_{MAE}	ε_{MSE}	ε_{MAE}	ε_{MSE}	ε_{MAE}	ε_{MSE}
1	MF	0.76	1.39	1.12	0.04	2.00	0.04
2	WT(4D)	0.49	0.62	0.85	0.64	1.05	1.28
3	MF+WT(2D)	0.71	0.94	1.10	0.05	1.42	0.05
4	MF+WT(3D)	0.62	0.79	1.06	0.05	1.32	0.05
5	MF+WT(4D)	0.45	0.57	0.82	0.05	1.02	0.05



(a) 对白噪声滤波效果



(b) 对脉冲噪声滤波效果

图 2 滤波效果对比

Fig. 2 Comparison of the filtering effect

白噪声的能力也随之增强；而形态学滤波器对脉冲噪声的抑制能力远超过小波方法，且随着噪声强度的增加，形态学滤波器对脉冲噪声的抑制能力愈发显得突出。因此，将两者结合而组成形态小波模型并选择合适的小波分解尺度是较理想的方案。

4.3 硬件实现

本文以 TI 公司新近推出的 TMS320F2812 DSP 芯片为核心，研制了低压系统短路故障早期检测装置。TMS320F2812 DSP 芯片可执行 150 兆次指令/s，具有单周期 32x32 bit MAC 功能，片内有 128Kx16 位的 FLASH。此外，该芯片还集成了丰富的外围设备，如有采样率达 12.5 MSPS 的 12 bit/16 通道模数转换器等，设计者仅需添加少量外围器件便可实现所需功能。上述 5 种模型的程序代码均采用汇编与 C 语言混合编程的方法编制。表 3 为 5 种模型在该 DSP 芯片上实现的实时性指标对比。

表 3 实时性指标对比

Tab. 3 Contrast of the real-time target

模型	决策函数	编译后汇编	三相计算所需	三相计算所需
		代码长度	指令周期数	CPU 时间/ μ s
1	MF	962	1550	10.33
2	WT(4D)	998	1830	12.20
3	MF+WT(2D)	1310	2136	14.24
4	MF+WT(3D)	1523	2611	17.41
5	MF+WT(4D)	1740	3113	20.75

注：表中所示为计算 1 个采样点的指标。

根据图 2(a)知，模型 1(纯形态算法)滤除白噪声的效果明显不如其它方法，而由图 2(b)知，模型 2(纯小波算法)滤除脉冲噪声的效果远逊于其他方法，因此模型 1、2 均不予考虑。在模型 3~5 之间，从综合的滤波效果看，模型 5 最佳，模型 4、3 依次次之；而从代码量、计算量和实时性方面，根据表 3，模型 3 最佳，模型 4、5 依次次之。设计者可根据算法实现的软、硬件平台和实际应用的需求从模型 3~5 中进行恰当的选择。本文综合考虑上述 2 方面因素，选择模型 4 进行深入研究。在测试该模型的有效性时，短路故障信号源采用 HP33120A 任意函数发生器，用基于 Windows 环境的 HP34811A BenchLink/Arb 波形产生软件将由 MATLAB 仿真得到的短路故障电流波形下载至任意函数发生器并进行回放，验证所提算法。

表 4 列出了由实验实测的从故障发生到发出触发信号的时间间隔及触发信号发出时的电流标么值。由表 4 知，在大部分故障初相角下，短路可在

0.25ms内判断出来,此时电流值小于额定值的4倍。虽然当故障初相角为 150° 时判断短路故障所需时间较长,但此刻短路电流值较小,所以仍达到了故障早期检测的目的。由此可见,本文所提短路故障早期检测中“早期”的概念是相对于不同的故障初相角及不同的短路故障初始状态而言的。

表4 短路故障检测时间及其电流标么值

Tab. 4 Duration of fault detection and normalized current

故障初相角/ $^\circ$	0	30	60	90	120	150
t_0/ms	0.205	0.197	0.169	0.197	0.221	1.320
i^*/pu	1.59	3.10	3.81	3.35	1.82	-3.80

5 结论

本文将广义形态开滤波器与三次B样条二进小波变换结合,形成形态小波模型,并应用于低压系统短路故障早期检测中。大量的仿真及实验结果证实了该模型既能有效地提取短路故障特征、抑制各种噪声干扰的影响,又能满足故障信号分析在硬件上实现的实时性要求,说明本文提出的理论模型及硬件装置对低压系统短路故障早期检测是有效的,具有较高的理论意义及实用价值,该研究为开发具有短路故障早期检测与短路电流快速分断功能的智能型低压保护电器奠定了基础。

参考文献

- [1] 淡淑恒,王季梅,闫静,等.采用电流变化率判断短路电流的新型限流熔断器[J].低压电器,1998(2):10-14.
Dan Shuheng, Wang Jimei, Yan Jing *et al.* A new type of current limiting fuse using the rate of change of current as its short circuit criterion[J]. Low Voltage Apparatus, 1998(2): 10-14.
- [2] King E F, Chikhani A Y, Hackam R *et al.* A microprocessor- controlled variable impedance adaptive fault current limiter[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1990,5(4): 1830-1838.
- [3] 陈丽安,张培铭,缪希仁.基于小波变换的低压系统短路故障的早期预测.电工技术学报,2003,18(2):91-94.
Chen Lian, Zhang Peiming, Miao Xiren. Prediction for the short-circuited fault based on wavelet transform[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2003,18(2): 91-94.
- [4] 林湘宁,刘沛,程时杰.基于小波包变换的变压器励磁涌流识别新方法[J].中国电机工程学报,1999,19(8):15-19,38.
Lin Xiangning, Liu Pei, Cheng Shijie. A wavelet packet based new algorithm used to identify the inrush[J]. Proceedings of the CSEE, 1999,19(8): 15-19,38.
- [5] 林涛,陈德树,尹项根.小波分析在大型同步发电机微机继电保护中的应用研究[J].中国电机工程学报,1999,19(8):59-65.
Lin Tao, Chen Deshu, Ying Xianggen. Study on wavelet analysis and its application to numerical protection for large synchronous generator[J]. Proceedings of the CSEE, 1999,19(8): 59-65.
- [6] HE Jianjun, Ren Zhen, Huang Wenying. A new real-time algorithm of wavelet transform for detection of sudden-changing signals of power

- systems[J]. Science in China(Series E), 1999, 43(6): 609-615.
- [7] Yuan Liao, Elangovan S. Fault noise based approach to phase selection using wavelets based feature extraction[J]. Electric Machines and Power Systems, 1999, 27(4): 389-398.
- [8] Yong Sheng, Steven M. Rovnyak. Decision trees and wavelet analysis for power transformer protection [J]. IEEE Trans. On Power Delivery, 2002, 17(2): 429-433.
- [9] 董杏丽,葛耀中,董新洲,等.基于小波变换的行波测距式距离保护原理的研究[J].电网技术,2001,25(7):11-16.
Dong Xingli, Ge Yaozhong, Dong Xinzhou *et al.* Distance protection scheme based on travelling wave fault location by using wavelet transform[J]. Power System Technology, 2001,25(7): 11-16.
- [10] Dongjiang Zhang, Q. Henry Wu, Zhiqian Bo. Transient positional protection of transmission lines using complex wavelets analysis [J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 2003,18(3): 705-710.
- [11] Karen L. Butler-Purry, and Mustafa Bagriyanik. Characterization of transients in transformers using discrete wavelet transforms [J]. IEEE Trans. on Power Systems, 2003,18(2): 648-656.
- [12] 林湘宁,刘沛,程时杰.电力系统振荡中轻微故障识别的小波算法研究[J].中国电机工程学报,2000,20(3):39-44.
Lin Xiangning, Liu Pei, Cheng Shijie. Researches on fault identification during fast power swings with wavelet transform based algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2000,20(3): 39-44.
- [13] 张征平,任震,黄雯莹,等.基于小波脊线的电动机转子故障检测新方法[J].中国电机工程学报,2003,23(1):97-101.
Zhang Zhengping, Ren Zhen, Huang Wenying *et al.* A Novel Method of Motor Faulted Rotor Detection Based on Wavelet Ridge[J]. Proceedings of the CSEE, 2003,23(1): 97-101.
- [14] Mallat S, Zhong S. Characterization of signal from multiscale edges[J]. IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1992,14(7): 710-729.
- [15] 章毓晋. 图象工程(上册)—图象处理与分析. 北京:清华大学出版社,2001.
- [16] 林湘宁,刘沛,刘世明,等.电力系统超高速保护的形态学-小波综合滤波算法[J].中国电机工程学报,2002,22(9):19-24.
Lin Xiangning, Liu Pei, Liu Shiming *et al.* A novel integrated morphology-wavelet filter algorithm used for ultra-high speed protection of power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2002,22(9): 19-24.
- [17] Wu Q H, Zhang J F, Zhang D J. Ultra-high-speed directional protection of transmission lines using mathematical morphology[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 2003, 18(4): 1127-1133.
- [18] 于泳,宋海龙,徐殿国.基于改进的形态滤波器信号预处理的感应电机定子磁链信号获取方法的研究[J].中国电机工程学报,2003,23(6):149-153.
Yu Yong, Song Hailong, Xu Dianguo. Research on acquisition of stator flux of induction motor based on improved morphological filter signal pretreatment[J]. Proceedings of the CSEE, 2003,23(6): 149-153.
- [19] 欧阳森,王建华,宋政湘,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 Shen, 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.