

# 数学形态学在电力系统中的应用综述

尹文琴, 刘前进

(华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640)

**摘要:** 数学形态学是一种非线性信号处理和分析工具, 对电力系统信号的特征提取完全在时域中进行, 且幅值不偏移和相位不衰减, 很多性质优于小波分析理论, 其发展正在受到越来越多关注, 但是系统的总结该技术的应用及研究并不多见。文中阐述了数学形态学的基本理论, 并介绍了电力系统常用的一些形态学方法, 在将形态学与小波分析进行比较后, 综述了数学形态学在电力系统中的应用, 如暂态信号谐波分析、奇异点检测与消噪、电能质量检测、故障诊断、继电保护与故障测距, 分析了其与电力系统中其他理论或方法如小波变换、分形理论、神经网络等的结合。结论提出了若干需要解决的问题, 并展望了其在电力系统中的应用前景。

**关键词:** 数学形态学; 信号处理; 电力系统; 综述

## Mathematical morphology review and its applications in power system

YIN Wen-qin, LIU Qian-jin

(Electric Power College, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** Mathematical morphology (MM) is a nonlinear signal processing and analysing technique which extracts the character of the power system signals completely in the time domain, while the amplitude spectrum doesn't shift and the phase spectrum doesn't attenuate, and many properties are better than wavelet transform, mathematical morphology becomes more important, but there is not summarization for it. In this paper, the basic theory of mathematical morphology is expatiated, and the morphology methods often used are introduced, moreover, after compared with the wavelet analysis, the applications in power system are summarized, which in transient signal harmonic wave analysis, singularities detection and denoising, power quality detection, fault diagnosis, protective relaying and fault location, and the combination with the other theories and methods are analysed, such as wavelet transform, fractal theory and neural network. In the conclusion, some problems to be solved are put forward and the prospect of the MM in power systems is proposed.

**Key words:** mathematical morphology; signal processing; power systems; survey

中图分类号: TM711 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2007)19-0076-08

## 0 引言

电力系统中的信号处理方法包括傅立叶变换 FT (Fourier Transform), 短时傅立叶变换 SFT (short-time Fourier Transform)、小波变换 WT (Wavelet Transform)、最小二乘法等, 但也具有不少局限性, 如窗口宽度较长、采样速率要求较高、数值计算量大、抗干扰性较差、相位移幅度衰减和信号非周期衰减分量等问题<sup>[1]</sup>。基于此, 一种广泛应用于形状分析、模式识别、视觉校验、计算机视觉等方面的基于集合理论的数学形态学<sup>[2,3]</sup>的方法被引入了电力系统的信号处理中, 并取得了相当的应用研究成果<sup>[4]</sup>。

数学形态学是从集合论和积分几何学发展起来的, 1964年, G.Matheron 和 J.Serra 在各自研究的

基础上几乎同时提出了击中与击不中、开闭运算等。1966年数学形态学这一术语被正式提出。最初, Matheron 和 Serra 提出的数学形态学主要是研究二值图像为主, 后来, Serra 和 Sternberg 等人将二值形态学算子推广到了灰度图像处理, 称为灰度形态学, 借助于它可对电力系统信号进行分解, 提取或者变形。80年代初, G.Matheron 和 J.Serra 等人创立形态滤波理论。20世纪数学形态学的发展过程大致可分为表1所示的四个阶段。

数学形态学方法是一种非线性分析方法, 和傅立叶变换和小波变换相比具有更快的计算速度, 大量研究表明其信号处理幅值不偏移, 相位不衰减, 且数据窗短, 处理速度快<sup>[5-7]</sup>。本文阐述了数学形态学的基本理论, 并介绍了电力系统常用的一些形态学方法, 综述了数学形态学在电力系统中的应用,

并将形态学理论和电力系统中其他理论或方法的结合进行了分析, 提出了若干需要解决的问题。

表 1 数学形态学理论的应用进程粗分

阶段	时间
孕育和形成期	60 年代
充实和发展期	70 年代
成熟和对外开放期	80 年代
扩展期	90 年代至今

## 1 数学形态学基本理论

### 1.1 数学形态学基本理论

数学形态学的基本思想是利用一个称作结构元素 (structuring element) 的“探针”搜集信息。当探针不断移动时, 便可考察信息各个部分间的相互关系。作为探针的结构元素, 可直接携带知识 (形态、大小等) 来探测所研究信息的结构特点<sup>[8]</sup>。一维离散情况下的灰度形态学运算包括两种最基本的运算: 灰度腐蚀 (简称腐蚀) 和灰度膨胀 (简称膨

胀), 由此可以产生出其他运算, 如开运算、闭运算、击中、细化和粗化等其他几个常用运算。

令  $f(n)$  和  $g(n)$  分别表示电力系统一维采样信号和结构元素 (这里  $g(n)$  也是一维信号),  $D_f$  和  $D_g$  分别表示  $f(n)$  和  $g(n)$  的定义域。用结构元素  $g(n)$  对信号  $f(n)$  进行的膨胀定义为

$$(f \oplus g)(n) = \max \left\{ f(n+m) + g(m) \right\} \begin{cases} (n-m) \in D_f \\ m \in D_g \end{cases}$$

用结构元素  $g(n)$  对信号  $f(n)$  进行的腐蚀定义为

$$(f \ominus g)(n) = \min \left\{ f(n+m) - g(m) \right\} \begin{cases} (n+m) \in D_f \\ m \in D_g \end{cases}$$

目前, 在电力系统中应用较广泛的形态学算子和多尺度形态学理论的应用方法如表 2 (其中  $f$  指  $f(n)$ ,  $g$  指  $g(n)$ )。

### 1.2 结构元素的选择

结构元素有直线、斜线、曲线(如正弦、余弦、

表 2 应用较广泛的数学形态学方法  
Tab. 2 Morphology methods that often used

名称	运算	备注
Top-hat 算子	$T = f - f \circ g$	寻波峰点
Bottom-hat 算子	$B = f - f \bullet g$	寻波谷点
峰谷探测算子	$D = 2f - f \circ g - f \bullet g$	寻峰值点和波谷点
开运算	$f \circ b = (f \ominus g) \oplus g$	过滤信号上方的峰值噪声, 除去毛刺及小桥结构
闭运算	$f \bullet b = (f \oplus g) \ominus g$	平滑或抑制信号下方的波谷噪声, 填平小沟结构
开闭运算	$Oc(f) = (f \circ g \bullet g)$	输出幅度偏小
闭开运算	$Co(f) = (f \bullet g \circ g)$	输出幅度偏大
自适应形态滤波	$y(x) = \alpha_1 Oc(f) + \alpha_2 Co(f)$	一, 开闭和闭开的加权系数的自适应 ( $\alpha_1$ 和 $\alpha_2$ 权重系数); 二, 结构元素的自适应
形态梯度运算 MG (Morphological Gradient)	$G_3(f) = (f \oplus g) - (f \ominus g)$	突现边缘信息
多分辨率形态梯度运算 MMG (Multi-resolution Morphological Gradient)	$\rho_g^\alpha = (\rho_g^{\alpha-1} \ominus g^+) - (\rho_g^{\alpha-1} \ominus g^+)$ $\rho_g^\alpha = (\rho_g^{\alpha-1} \ominus g^-) - (\rho_g^{\alpha-1} \oplus g^-)$ $\rho_g^\alpha = \rho_g^{\alpha-1} + \rho_g^\alpha$	一, 方便的单独设计只针对上升沿或下降沿更有效的结构元素; 二, 进行更细致的变换以揭示信号更细微的变换
级联多分辨率形态梯度运算 SMMG (Series Multi-resolution Morphological Gradient)	$F(x) \rightarrow \boxed{MF1} \rightarrow \boxed{MF2} \rightarrow \dots \rightarrow \boxed{MFn} \rightarrow \text{SMMG}(f)$	一, 表达直观, 可增强输入信号某些不明显的暂态特征; 二, 按结构元素的宽度连续递增可推导广义多分辨率形态学变换 GMMG (Generalized Multi-resolution Morphological Gradient)
多尺度形态学形态谱	同样有多尺度腐蚀、膨胀、开运算和闭运算 由形态量值分布曲线导出	属于时域的变换方法 基于多尺度形态分析的, 单个尺度下的形态谱表征信号是无意义

二次、三次等)、三角形、圆形、十字形及其他多边形(如矩形、菱形、六角形、钻石形等等)。在一维信号处理中宜采用非封闭曲线,如直线、斜线、三角折线或正弦线等,电力系统应用中常采用的结构元素有直线、扁平结构元素(定义域上值为零)、半圆、圆以及方形、规则的曲线等等,采用扁平结构元素的膨胀和腐蚀运算具有取局部极大和极小值形的效果,考虑到计算量和输入信号的不确定性,扁平结构元素具有重大意义。

与小波分析的基函数选取类似,形态学分析的结构元素选取同样还没有针对具体应用背景的选择原则,从而,对于何种结构元素比较适合处理何种具体的问题,需要一次次的试探和证明。若大小选取合适,则能有效屏抑类别内的细节差异,且不会弱化类别间的边界,但是长度越长,形状越复杂,需要的计算量会快速增加。一般来说,结构函数尺寸和形状的设计取决于变换后要保持的信号形状,只有与结构元素的尺寸和形状相匹配的信号才能被保持,且为滤除数据中的噪声干扰,结构元素的宽度要大于数据中最大噪声干扰的宽度。最优结构元素的选取与干扰或者故障的类型和频率、待处理数据序列的采样率等因素密切相关。

## 2 对几种信号分析工具的比较

### 2.1 各类信号处理研究方法优缺点对比<sup>[9]</sup>

表3 信号处理方法比较

Tab.3 Comparison of signal processing techniques

类型	变换性质	优点	缺点
DWT	线性/非线性变换	时窗可调,多分辨性,突变信号敏感性,子带信号良好时频局部化特性	平移敏感性,方向性差,无相位信息,无统一的小波母函数选取原则
WPT/ SWT	线性/非线性变换	相对于DWT减弱平移敏感性	方向性差,无相位信息,易计算冗余,无统一的小波母函数选取原则
CWT	线性/非线性变换	相对实小波变换,多提供相位信息	均是连续小波,计算复杂,无统一的小波母函数选取原则
MM	非线性变换	幅值不偏移,相位不衰减,计算量小,数据窗短	无统一的结构元素选取原则

目前,针对工程应用背景下传统信号处理工具FT、SFT的研究较成熟,WT也主要面临三个问题,即母小波和小波基的研究、小波变换的快速算法研究,以及小波变换中采样原理和技术研究。本文对这些信号处理方法的优缺点进行了对比,包括WT理论工程上较常用的离散小波变换DWT(Discrete Wavelet Transform)、平稳小波变换SWT(Stationary

Wavelet Transform)、复小波变换CWT(Complex Wavelet Transform)和MM。其中DWT、WPT和SWT只讨论实小波变换的情形,见表3。

### 2.2 WT和MM两种奇异点检测算法计算速度分析与比较<sup>[10,11]</sup>

数学形态学腐蚀和膨胀运算的计算量基本相等。假定采样数据长度为 $N$ ,而结构元素长度为 $K$ 时,若采用数学形态学多分辨梯度则运算次数为:

$$TM = ((N - K) * K * 2 + N) + N$$

可以证明若某一采样序列长度为 $N$ ,小波分解层数为 $G$ ,小波滤波器长度为 $L$ ,则小波分解的运算次数为:  $TW = 4(L + 1)(N + GL - 2L + G)$

总的来说,WT变换的算法大部分是乘法运算,使得微处理器的指令周期较长,计算量较大。

## 3 数学形态学在电力系统中的应用

### 3.1 在暂态信号谐波分析中的应用

数学形态学在电力系统暂态谐波分析的应用集中在谐波检测方面。

从数学形态学的基本运算膨胀和腐蚀,根据要分析对象的特征,可以组合出各种具有特性的算子,选择合适的结构元素和宽度,从而可以准确地分析各次谐波。文献[12]采用自适应滤波,通过合理选择扁平结构元素的长度,能快速准确的检测出电流(电压)中的谐波含量。

### 3.2 电能质量检测与评估

对电力系统电能质量的检测与评估主要分为两类,即对扰动的检测和对扰动的分类。文献[13]综合考虑电力扰动信号的特点后,从已得到的幅频特性和形态梯度,可有效地对五种动态电能质量扰动(电压暂降、暂升、中断、暂态脉冲和振荡)进行检测与分类。文献[14]在谐波检测的基础上提出了一种快速的电能质量扰动检测和定位方法,将电压幅值的平方值作为Top-hat变换的输入量,具有较高的检测灵敏性。另外,利用多刻度数学形态学由粗到细地对信号进行分层处理的特点,文献[15]不以传统的基于有效值理论的波形分析和基于稳态信号的频谱分析为辨识依据,而是直接从波形的几何形态出发,采用不同刻度的结构元素对波形进行变换,得到各刻度下的形态谱和对所研究对象的直观的理解。这些方法的使用为动态电能质量扰动的检测、识别与分类提供了新的思路。

在电能质量检测中,也有多种方法联合应用的,文献[16]先利用最小二乘递推算法估计信号的基本成分,以提取信号中的扰动成分和白噪声的混合信息,再利用短窗自相关算法滤除混合信息中的

随机噪声以提取扰动信息, 最后利用数学形态学的基本腐蚀算子检测扰动并进行精确定位。

总的来说, 数学形态学在电能质量评估中的应用还处于初步阶段, 相对于小波变换的计算复杂具有明显的优势。但是数学形态学的许多新理论还没有应用到电力系统上来, 相信随着数学形态学的理论拓展和研究深入以及电能质量自身特性的进一步深入研究, 今后的应用前景将十分广阔。

### 3.3 奇异点检测与消噪

信号的突变点往往含有非常丰富的故障信息, 它们反映了故障引起的撞击、振荡、摩擦、转速的突变和结构的变形与断裂等, 所以同稳定信号相比, 突变信号更应引起重视。不同于以往基于频域、时域的信号处理方法, 形态学方法能较好地将现场信号中的噪声、直流偏移量等干扰去掉, 并能保留信号的特性。

文献[17]采用 MMG 滤波后, 暂态过程中隐含的奇异信息能被清楚地识别和准确地定位, 从而可精确地获取故障发生时刻和差动电流产生时刻间的时间差。文献[18]采用数学形态学的方法来解决电力系统现场采集的数据存在的噪声污染、直流偏移等问题。介质损失角正切 ( $\tan \delta$ , 简称介损) 是评价高压电容型设备绝缘情况的重要参数, 在线监测高压电容型设备的介损能够及时发现设备故障隐患, 但是目前的在线检测系统效果不理想, 介损数据稳定性、重复性差。采用数学形态学的介损在线检测数据处理方法则可以获得良好的效果, 克服了传统方法的不足和小波分析计算复杂的缺点<sup>[19,20]</sup>。

### 3.4 设备的状态监测和故障诊断

电力设备状态监测和故障诊断是分解和处理电力系统基本设备在运行中产生的各种电磁、机械等物理信号, 实时判别其状态, 以期在故障初期或故障时发出警报。传统的状态监测方法, 如部分放电法和超声波法由于电力系统的高度非线性、强耦合且存在模型不确定性和外部随机干扰的诸种特性, 在实际使用中不但不方便且不尽如人意。考虑到电力设备正常运行时发出的电磁信号较为平稳, 一旦状态异常必然含有奇异, 因此利用数学形态学提取信号中所呈现的故障特征既快速又准确, 较之小波分析的处理更具有实时性。目前数学形态学在电力设备的状态监测和故障诊断中的应用主要集中在对发电机、电动机、变压器、电流互感器的诊断上, 和各种局部放电检测<sup>[17,21~23]</sup>。

文献[24]采用形态学梯度提取暂态电流故障特征进而识别故障类型, 在线路不同位置、不同过渡电阻、不同初始角等情况下均能快速准确选择故障

相。此外, 针对振荡中发生的故障, 现有的序分量选相元件可能会误选相的问题, 文献[25] SMMG 滤波器构成一个自适应的振荡故障启动元件, 使这一问题得到解决。

实现自适应重合闸对现代电力系统具有重要的意义, 其关键在于区分瞬时性故障和永久性故障。采用广义多分辨形态学梯度算子(GMMG)和形态学闭开-开闭梯度滤波算子(COOC)构成的自适应重合闸方案的判别可靠性高, 有利于电力系统的稳定运行<sup>[26,27]</sup>。

必须指出, 在设备状态检测与故障诊断中, 选取什么样的结构元素, 提取什么样的特征, 都应该与相关领域的其他方法积极配合, 尽可能找出最直观、最准确地描述被监测、被诊断对象的故障征兆。

### 3.5 继电保护和故障测距

#### 3.5.1 继电保护

变压器差动保护的难点在于励磁涌流、故障电流的识别和 CT 饱和的影响。综合利用 top-hat 算子和 bottom-hat 算子可以构造一种峰谷检测器, 文献[28]采用此种滤波器能定性区分变压器励磁涌流和故障电流, 且不受 CT 饱和和衰减非周期分量的影响, 有利于变压器的保护。文献[29]不用仿真而采用实际运行的变压器进行研究, 即采用形态开闭运算提取出高频暂态电流信号。

形态学在线路保护中的应用也很满意, 文献[30]提取故障产生的暂态电流信号的窗函数能量谱来实现区内外故障的识别, 超高压输电线路故障诊断结果不受故障类型、故障位置、过渡电阻和初始相角的影响。MMG 变换不仅能明显分辨信号的跃变沿, 而且可看出信号的极性信息。这对构造行波方向保护, 距离保护等都具有重要价值, 文献[31]提出基于 SMMG 的微机线路保护的选相元件能在 8 ms 内正确识别几乎所有故障情况的故障相别。

#### 3.5.2 行波故障测距

电力系统要求及时、准确得知线路故障位置以使用最短的时间清除故障, 尽快恢复供电。传统的各种故障测距方法, 但对于故障信号处理还存在许多问题, 包括波头形状、极性与波阻抗关系, 行波色散问题, 扰动与故障产生的行波的区别, 电压过零附近故障和雷击的处理。由于行波保护理论和其实现技术的不成熟, 目前交流系统中没有一套真正有效的行波保护装置。针对目前行波测距中的两大难点, 即行波滤波和行波波头获取, 文献[32]运用自适应形态滤波对高压直流输电线路的行波滤波和行波波头捕获进行较好的验证, 为行波故障测距理论的完善起了推动作用。

可以预见,随着数学形态学研究的不断深入,微型计算机的发展,形态学在电力系统微机保护和故障测距中的应用会越来越多。

## 4 与其他分析方法的结合应用

### 4.1 与小波变换结合

形态学与小波变换的结合有两种方式,一种是将形态学或者小波变换作为预处理器对信号进行滤波,这是一种松散的结合;另一种是紧致结合,利用形态学滤波器构造新的小波,即狭义的形态小波。

数学形态学和小波变换均可以用于信号处理,采用两种方法综合处理有时可以获得比一种方法更好的结果,具体应用中一般分为两种情形,一是将形态学作为前置滤波单元,文献[33]中前置的形态开/闭组合滤波单元可滤除各种随机噪声和脉冲噪声;小波变换算法检测故障行波;另一是将小波作为前置滤波单元,文献[34]利用小波作为前置滤波单元,有效检测出高频突变量的同时较好的抑制信号中的稳态分量,MMG突出信号的暂态特征。

2000年,goustias和heijmans提出了形态小波(Mathematical Morphology-wavelets),将形态学与小波变换结合起来,形成了非线性、多分辨的信号处理方法<sup>[35]</sup>。从采用形态学方法构造形态小波这方面来说,其意义是不仅助于小波框架、提升框架<sup>[36,37]</sup>等概念的理解,而且进一步发展了小波理论。形态小波是基于数学形态学的非线性小波变换,包含了几乎所有已知的线性和非线性小波变换,具有更好的细节保留特性和抗噪性。文献[38]提出了利用形态学算子将线性 Haar 小波构造成一个非线性 Haar 小波,并成功地构造出一维和二维形态 Haar 小波,得出形态 Haar 小波在信号处理中更具优势的结论。

### 4.2 与分形理论结合

B.B.Mandelbrot 所创造的分形概念已经成为探索复杂性的有力工具,其具有精细结构、尺度不变性、自相似性等,可以应用在图形生成、信号处理、图像压缩、故障诊断、无损检测等领域<sup>[39]</sup>。

在电力系统应用中,文献[40]采用并行、多结构元素形态滤波器和分形技术较好的实现了电能质量检测与定位。

### 4.3 与神经网络结合

单独的神经网络应用于电力系统效果并不理想,文献[41]介绍了另一种通过神经网络来识别扰动的方法,它的局限性表现在一种特定的神经网络只能检测出一种波形畸变现象,因此它的实用性并不强。

同小波分析与神经网络结合应用一样,数学形

态学也可以进行这样的结合,文献[42]采用将数学形态学变换的六种高压设备局部放电与干扰的结果输入到双隐层人工神经网络实现放电模式识别,得到了良好的结果。

## 5 结语

对于小波分析工具的不足,数学形态学较好地弥补了这一缺点,为信号处理提供了更丰富的分析手段和方法。本文介绍了数学形态学应用于一维信号处理的理论及其研究现状,说明了其在暂态信号谐波分析、奇异点检测与消噪、电能质量检测、故障诊断与定位和继电保护与故障测距中的应用。数学形态学在电力系统信号分析中主要分为四种方法,即采用形态变换突出信号的突变特征,对信号进行消噪等滤波处理,对信号波形进行波形分解,对波形进行形态的谱分析等,目前正处于起步阶段,还大有潜力可挖,它也正逐渐成为电力系统信号分析中新的热点和突破口。在今后的研究中,其研究的重点应该是:

(1)目前在电力系统中采用的形态学理论主要是形态滤波、梯度运算、多刻度形态运算等,对于其中的自适应滤波或者其他的形态学技术如骨架化、流域分析、形态分解,和经典形态学算子的多种拓广如模糊形态学运算,柔性形态学运算及调节形态学运算等,如何将这些新的形态学应用到电力系统上来,仍是研究的难点。

(2)形态学算法仍然是对一组信号进行分析,如果是进行了半个周期乃至多个周期的采样之后再行形态处理,仍会使得检测的实时性降低。

(3)由于低次谐波周期大,其形态学检测还需要进一步研究。从对基于形态学变换的谐波分析来看,对于频率比较接近的谐波信号,还没有进行比较过。另外,从目前掌握的资料来看,对于形态学变换在不对称系统谐波检测领域的应用,至今没有人提出较为合适的解决方案,如何建立起一套更为完善的形态学处理理论,提出新的谐波测量和分析的方法还需要研究。

(4)在诸多种类的非线性滤波器中,形态滤波器是最具代表性和很有发展前途的一种滤波器,具有并行快速实现的特点,但是形态滤波器至今尚未形成系统的设计方法。现有的算法大多是针对某一实际需要提出来的,缺乏深入的理论分析,且应用也存在着局限性。这一领域的研究还很不深入和完善,还有大量工作需要来完成。

(5)永久性故障判别原理一般有2种,即基于恢复电压和基于瞬时性故障的电弧特性,在形态学

应用于单相自适应重合闸的研究时,基本上是采用后者,由于只有恢复电压阶段的电气量能真实地反映重合闸时刻线路的状态,不存在推理和预测的成分,因此,采用形态学处理恢复电压阶段的电气量可以更好的分析单相自适应重合闸。

(6) 在行波测距中还有如下问题:

a.若输电线路为电缆和架空线混合,由于其波阻抗差异较大,所以行波在这种混合线路中的波速不一致,不能简单地用1个速度值 $v$ 来代替,由此导致形态学行波测距的不准确,目前还没有这方面的研究;

b.由于配电网分支较多,行波在分支点会频繁发生折反射,采用形态学变换进行新波测距,应该消除这些分支线路引起的形态学变换突变值。

(7) 由于形态小波具有很多的优良特性,其在电力系统中的应用还有很大的发展空间。另外,分形和小波作为描述和刻画内在复杂性的研究方法,均在故障诊断领域获得了广泛的应用。分形和小波融合技术,在故障诊断和模式识别领域已经获得了应用,其中在故障诊断领域的研究主要集中在特征提取和数据压缩上,从这个意义上说,形态小波与分形的结合也是一个值得研究的方向。

(8) 虚拟仪器具有编程灵活、可自定义、数据处理和分析功能强大、开发周期短等优点,在电力系统暂态信号处理中有着广阔的应用前景。如何将形态学变换引入虚拟仪器中,如利用 Matlab 和 Labview 软件结合开发出基于虚拟仪器的电力系统暂态信号分析的形态学分析仪等。

因此,形态学的理论研究和多种分析方法、理论的结合应用仍是当前研究热点。可以预见,采用数学形态学来分析设备、仪器的运行性能,进一步检测电能质量,识别电力系统中各种暂态现象,剔除不可靠信号、实现远方控制等将是可以实现。

## 参考文献

- [1] 吴青华,张东江.形态滤波技术及其在继电保护中的应用[J].电力系统自动化,2003,27(7):45-49.  
WU Qing-hua, ZHANG Dong-jiang. Morphological Filtering Techniques and Application in Protection Relaying[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(7): 45-49.
- [2] Serra J. Image Analysis and Mathematical Morphology[M]. New York: Academic Press, 1982.
- [3] Serra J. Image Analysis and Mathematical Morphology[M]. New York: Academic Press, 1988.
- [4] 赵青春.数学形态学及其在电力系统中的应用研究[D].武汉:华中科技大学,2004.  
ZHAO Qing-chun. Mathematical Morphology and its Application Research in Power Systems[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2004.
- [5] Sun P, Zhang J F, Zhang D J, et al. Morphological Identification of Transformer Magnetizing Inrush Current[J]. IEE Electronics Letters, 2002, 38(9): 437-438.
- [6] Zhong D J, Li Q, Zhang J F, et al. Improving the Accuracy of Single-ended Transient Fault Locations Using Mathematical Morphology[A]. In: IEEE/CSEE International Conference on Power System Technology[C]. Kunming(China):2002.788-792.
- [7] Wu Q H, Zhang J F, Zhang D J. Ultra-high-speed Directional Protection of Transmissin Lines Using Mathematical Morphology[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2003, 18(4): 1127-1133.
- [8] 孙兆林. MATLAB 6.x 图像处理[M].北京:清华大学出版社,2002.278-279.
- [9] 张大波,刘志刚,张亚军.复小波研究现状及其在电力系统中的应用进展[J].电力系统自动化,2006,30(17):97-104.  
ZHANG Da-bo, LIU Zhi-gang, ZHANG Ya-jun. Complex Wavelet Transform Review and Its Application in Power System[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(17): 97-104.
- [10] 章慧团,蔡自兴.基于数学形态学的突发性故障快速定位方法[J].计算机测量与控制,2006,14(1):9-12.  
ZHANG Hui-tuan, CAI Zi-xin. Abrupt Faults Fast Location Method Based on Mathematical Morphology[J]. Computer Measurement & Control, 2006, 14(1): 9-12.
- [11] 张杰.基于数学形态学的故障行波测距方法研究[D].昆明:昆明理工大学,2005.  
ZHANG Jie. The Study of Travelling Wave-based Locating Based on Mathematical Morphology[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2005.
- [12] 曾纪勇,丁洪发,段献忠.一种基于数学形态学的谐波检测方法[J].电力系统自动化,2005,29(6):55-59.  
ZENG Ji-yong, DING Hong-fa, DUAN Xian-zhong. A Harmonics Detection Method Based on Mathematical Morphology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(6): 55-59.
- [13] 凌玲,徐政.基于数学形态学的动态电能质量扰动的检测与分类[J].电网技术,2006,30(5):62-66.  
LING Ling, XU Zheng. Mathematical Morphology Based Detection and Classification of Dynamic Power Quality Disturbances[J]. Power System Technology, 2006, 30(5): 62-66.
- [14] 曾纪勇,丁洪发,段献忠.基于数学形态学的谐波检测与电能质量扰动定位方法[J].中国电机工程学报,2005,25(21):57-62.  
ZENG Ji-yong, DING Hong-fa, DUAN Xian-zhong. Harmonics Detection and Disturbance Location Methods Based on Mathematical Morphology[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(21): 57-62.

- [15] 束洪春, 王晶, 陈学允. 动态电能质量扰动的多尺度形态学分析[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24 (4): 63-67. SHU Hong-chun, WANG Jing, CHEN Xue-yun. Multiscale Morphology Analysis of Dynamic Power Quality Disturbances[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(4): 63-67.
- [16] 赵青春, 邹力, 刘沛. 基于短窗自相关算法和数学形态学的电能质量扰动信号检测和定位新方法[J]. 电网技术, 2005, 29 (6): 6-10. ZHAO Qing-chun, ZOU Li, LIU Pei. A New Method to Detect and Locate Power Quality Disturbing Signals Based Self-correlation Algorithm of Short Data Window and Mathematical Morphology[J]. Power System Technology, 2005, 29 (6): 6-10.
- [17] 林湘宁, 刘沛, 高艳. 基于数学形态学的电流互感器饱和识别判据[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25 (5): 45-49. LIN Xiang-ning, 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): 45-49.
- [18] 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. OU Yang-sen, WANG Jian-hua, SONG Zheng-xiang, et al. A New Power System Sampled Data Processing Method Based on Morphology Theory[J]. Power System Technology, 2003, 27 (9): 61-65.
- [19] 王楠, 律方成. 数学形态学滤波预处理  $\tan \delta$  在线监测数据[J]. 高电压技术, 2003, 29 (7): 32-33. WANG Nan, LU Fang-cheng. Data Preprocessing of On-line Monitoring  $\tan \delta$  Based on Mathematical Morphology filter[J]. High Voltage Engineering, 2003, 29 (7): 32-33.
- [20] 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, LU Fang-cheng, LIU Yun-peng, et al. Study on Application of Adaptive Generalized Morphological Filter in Processing On-line Monitoring  $\tan \delta$  Data[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24 (2): 161-165.
- [21] 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): 150-154. YU Yong, SONG Hai-long, XU Dian-guo. Research on Acquisition of Stator Flux of Induction Motor Based on Improved Morphology Filter Signal Pretreatment[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23 (6): 150-154.
- [22] 刘云鹏, 律方成, 李成榕, 等. 基于数学形态滤波器抑制局部放电窄带周期性干扰的研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24 (3): 169-173. LIU Yun-peng, LU Fang-cheng, LI Cheng-rong, et al. Study of the Mathematical Morphological Filter in Suppressing Periodic Narrow Bandwidth Noise of PD[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24 (3): 169-173.
- [23] 刘云鹏, 律方成, 李成榕, 等. 形态学-小波综合滤波器抑制局放现场干扰[J]. 高电压技术, 2004, 30(2): 29-31. LIU Yun-peng, LU Fang-cheng, LI Cheng-rong, et al. Study of Novel Integrated Morphology-Wavelet Filter in Suppressing PD'S Field Noise[J]. High Voltage Engineering, 2004, 30 (2): 29-31.
- [24] 杨明玉, 王世旭, 张举. 基于数学形态学梯度的快速选相方案[J]. 电网技术, 2006, 30 (7): 64-68. YANG Ming-yu, WANG Shi-xu, ZHANG Ju. A High-speed Phase Scheme Based on Mathematical Morphology Gradient[J]. Power System Technology, 2006, 30 (7): 64-68.
- [25] 邹力, 赵青春, 林湘宁, 等. 基于数学形态学的电力系统振荡中故障识别和改进的选相方法[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26 (13): 37-42. ZOU Li, ZHAO Qing-chun, LIN Xiang-ning, et al. Mathematical Morphology Based Fault Detector and Improved Phase Selector in Power Swing[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26 (13): 37-42.
- [26] LIN Xiang-ning, WENG Han-li, LIU Hai-feng, et al. A Novel Adaptive Single-phase Reclosure Scheme Using Dual-window Transient Energy Ratio and Mathematical Morphology[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2006, 21 (4): 1871-1877.
- [27] 刘海峰, 林湘宁, 刘沛, 等. 基于形态学闭开-开闭梯度变换的单相自适应重合闸方案[J]. 电力系统自动化, 2005, 29 (21): 39-44. LIU Hai-feng, LIN Xiang-ning, LIU Pei, et al. An Adaptive Single-phase Auto-reclosure Scheme Based on Morphological Close-opening-open-closing Gradient (COOC) Transform[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29 (21): 39-44.
- [28] 郑涛, 刘万顺, 肖仕武, 等. 一种基于数学形态学提取电流波形特征的变压器保护新原理[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24 (7): 18-24. ZHENG Tao, LIU Wan-shun, XIAO Shi-wu, et al. A New Algorithm Based on The Mathematical Morphology for Power Transformer Protection[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24 (7): 18-24.
- [29] 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): 19-24. MA Jing, XU Yan, WANG Zeng-ping. Power Transformer Protection Based on Transient Data Using Mathematical Morphology[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(6): 19-24.
- [30] 马静, 王增平, 徐岩, 等. 利用多分辨形态梯度实现单端暂态量保护新方案[J]. 华北电力大学学报, 2005, 32 (5): 7-11. MA Jing, WANG Zeng-ping, XU Yan, et al. New Scheme of Single-end Transient-based Protection Using Multi-resolution Morphological Gradient[J]. Journal North China Electric Power University, 2005, 32 (5): 7-11.
- [31] 邹力, 刘沛, 赵青春. 级联形态梯度变换及其在继电保护中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24 (12):

- 113-118.  
ZOU Li, LIU Pei, ZHAO Qing-chun. Series Multi-resolution Morphological Gradient and Applications in Protection Relaying[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24 (12): 113-118.
- [32] 李学鹏, 全玉生, 黄徐, 等. 数学形态学用于高压直流输电线路行波保护的探讨[J]. 继电器, 2006, 34 (5): 5-9.  
LI Xue-peng, QUAN Yu-sheng, HUANG Xu, et al. Study of Travelling Wave Protection of HVDC Transmission Line on Mathematical Morphology[J]. Relay, 2006, 34 (5): 5-9.
- [33] 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 Xiang-ning, LIU Pei, LIU Shi-ming, 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.
- [34] 马静, 王增平. 基于小波-形态学的串补线路超高速保护新方法[J]. 电网技术, 2006, 30 (11): 77-81.  
MA Jing, WANG Zeng-ping. A Novel Method of Ultra-high Speed Protection for Series Compensated Lines Based on Wavelet-Morphology[J]. Power System Technology, 2006, 30 (11): 77-81.
- [35] Goutsias J, Heijmans H J A M. Multi-resolution Signal Decomposition Schemes, Part 2: Morphological Wavelets[J]. IEEE Trans on Image Processing, 2000, 9 (11): 1877-1896.
- [36] 潘泉, 张磊, 孟晋丽, 等. 小波滤波方法及其应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005. 120-124.
- [37] 陈祥训. 对几个小波基本概念的理解[J]. 电力系统自动化, 2004, 28 (1): 1-6.  
CHEN Xiang-xun. Some Basic Concepts of Wavelets[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28 (1): 1-6.
- [38] 任获荣. 数学形态学及其应用[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2004.  
REN Huo-rong. Mathematical Morphology and Its Application[D]. Xi'an: Xidian University, 2004.
- [39] 赵林度. 大型机电系统故障诊断技术[M]. 北京: 中国石化出版社, 2001. 19-38.
- [40] LI Geng-yin, ZHOU Ming, LUO Yan, et al. Power Quality Disturbance Detection Based on Mathematical Morphology and Fractal Technique[A]. In: IEEE/PES Transmission and Distribution Conference & Exhibition, Asia and Pacific Dalian[C]. China: 2005. 1-6.
- [41] Kandil N, Sood V K, Khorasani K, et al. Fault Identification in an AC-DC Transmission System Using Neural Networks[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1992, 7 (2).
- [42] 刘云鹏, 律方成, 李成榕. 局部放电灰度图像数学形态谱的研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24 (5): 179-183.  
LIU Yun-peng, LU Fang-cheng, LI Cheng-rong. Study on Pattern Spectrum of Partial Discharge Grayscale Image[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24 (5): 179-183.

收稿日期: 2007-01-24; 修回日期: 2007-05-10

作者简介:

尹文琴 (1983-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统保护、控制与自动化; E-mail: qwenqin@126.com

刘前进 (1967-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为继电保护软件、硬件的开发, 电力系统图模一体化数字仿真系统, 电力系统 EMS 中各类管理软件的设计和开发。

(上接第 65 页 continued from page 65)

由于 101DL 手车开关柜内的 ZJ 继电器触点的打开和经过一定延时后再闭合, 造成 101DL 操作箱的 TWJ 继电器有一个动作→返回→动作的过程, 使得 10 kV CSB21A 在 14:10 和 14:40 两次动作合上 100DL。

### 3 结论

由于 101 开关的 TWJ 继电器出现了两次不正常的动作行为, 导致 CSB21A 发生后两次误合 100DL 的情况, 通过联系厂家也证实了我们上述二种试验结果。我们认为通过这次 CSB21A 的多次动作暴露出该装置在软件设计上有些缺陷, 一是该装置在没有完成一个完整的充电序列时也能动作出口, 使其抗干扰能力不强。我们对其它厂家的备投装置也进行了试验, 未发现此问题。虽然可将 CSB21A 装置

软件升级至 V3.61 版本及以上并将  $KGZ_7=1$  (装置本身动作后闭锁备自投), 但如果就地按下装置的复归按钮仍能将备投装置再次投入, 一旦这时 TWJ 触点输入发生变化, 备自投装置仍然会误动。二是当某一段母线失压、无流和 TWJ 触点变位同时发生或在小于  $t_{01}=t_{02}$  时限内全部满足, 该装置会不经过  $t_{01}$  或  $t_{02}$  时限直接以  $t_{03}$  时限动作出口。这样如果有小水、火电厂在变压器低压侧并网, 当分列运行的变压器跳闸, 很容易造成解列装置还未将小水、火电厂解除, 备自投装置就动作出口, 造成非同期合闸, 对小水、火电厂的发电机造成损坏。

收稿日期: 2007-03-02; 修回日期: 2007-06-14

作者简介:

李少谦 (1963-), 男, 工程师, 大专, 从事电网电力系统继电保护技术监督和运行管理工作。E-mail: xylsq5402@126.com