

# 基于前置数学形态滤波器的采样值差动方案

李刚<sup>1</sup>, 陈军良<sup>2</sup>, 李君毅<sup>1</sup>

(1. 浙江工业大学, 浙江 杭州 310014; 2. 杭州市电力设计院有限公司, 浙江 杭州 310002)

**摘要:** 将数学形态学分析引入电力系统继电保护领域, 利用数学形态学中的开闭运算分析设计的滤波算法能有效地滤除高压电网和变电站内可能产生的包括脉冲干扰在内的各种噪声, 从而较好地保持信号的几何特征。基于该方法计算简单、易于并行实现, 且对波形有良好的平滑作用, 提出了一种前置数学形态滤波器的采样值差动算法。该算法能在保证可靠的前提下大大地提高保护的速度。

**关键词:** 采样值差动; 数学形态学; 滤波器

## A differential protection method with mathematical morphology filter

LI Gang<sup>1</sup>, CHEN Jun-liang<sup>2</sup>, LI Jun-yi<sup>1</sup>

(1. Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310027, China;

2. Hangzhou Electric Power Design Institute Ltd., Hangzhou 310002, China)

**Abstract:** A mathematical morphology is originally introduced to the field of protective relaying. All possible noises include pulse interference generated in HV power networks and substations can be filtered out depending on the low-pass filter designed with morphological analysis. Then, geometric features of the signal can be maintained better. On basis of the above filter algorithm which is simple, achievable and beneficial to smooth the wave, a sampling value differential protection is proposed, which has higher speed and speedy response sensitivity.

**Key words:** sampling value differential protection; mathematical morphology; filter

中图分类号: TM774 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2008)14-0052-05

## 0 引言

长期以来, 差动保护一直是变压器的主保护。常规的电流差动继电器反应的差电流是流入被保护设备的各支路电流之和, 继电器的工作原理可以反应和电流的有效值或平均值等。

近年来, 一种直接利用采样值实现的差动保护原理逐渐在工程中得到实际应用和推广<sup>[1]</sup>。根据基尔霍夫定律, 流入一个节点的各支路电流之和为零, 无论对于瞬时值和还是向量和, 该定律均成立。对微机保护而言, 只要所采得的是各支路电流在同一时刻的瞬时值, 在被保护设备没有横向短路故障时, 各采样值之和为零。发生横向短路故障后, 亦即被保护设备额外增加一个支路时, 原来各支路电流的瞬时值之和便等于新增故障支路的电流的瞬时值。利用此采样值电流之和(称作采样值差动电流)即可构成采样值差动保护判据。由于该原理无需等待故障后一个周波的数据即可开始进行有关的判断, 因

此可用于实现各种快速保护<sup>[2]</sup>。同时, 如果保护可以在故障后半个周内完成判断, 即可回避 CT 饱和带来的各种不利影响, 提高保护的可靠性。作为差动保护的一种特殊形式, 采样值差动具有动作速度快、计算量少等特点, 同时也是微机应用在传统差动保护领域中的一个突破。

然而, 采样值差动算法应用的前提是基于下面一个假设: 故障时的电流仅由基波分量构成, 即已滤去谐波分量、非周期分量等非工频成分。常规的模拟式差动保护输入量都是瞬时值, 如果此时出现干扰脉冲群, 可能使保护不正确动作。所以, 这种算法前端必须配备模拟或数字滤波器保证输出为基波分量。但模拟滤波器由于参数不匹配往往带来较大的误差; 若另配传统的数字滤波器又增加了计算时间, 这就体现不出采样值差动速度快的优势。为了消除直流分量, 文献[3]采用采样值微分与采样值相结合的差动算法, 对采样值中的直流分量有所抑制, 但在一定程度上可能使谐波分量放大而使判别

结果受到谐波分量的影响。一种称为数学形态学 MM (Mathematical Morphology) 的信号处理工具为解决上述问题带来了希望。形态学滤波仅采用 BOOL 和加减计算,与传统的数字滤波相比,仅占用很少的保护处理时间。本文利用数学形态学中的开闭运算,构造了一种形态开-闭组合滤波方法,该方法计算简单,易于并行实现,且对波形有良好的平滑作用。仿真实验表明,该方法不仅可以有效地抑制包括脉冲干扰在内的各种噪声,而且较好地保持了信号的几何特征。

## 1 计算原理

### 1.1 比率制动特性的差动保护

对电流差动保护而言,无论被保护对象是发电机、变压器、线路或是母线,其输入量均可归结为流入电流  $I_g$  和流出电流  $I_d$ 。众所周知,常规比例差动的差动量一般取为  $I_{cd1} = |I_g + I_d|$ ,而制动量有多种选取方法,如果被保护对象为双端网络,如发电机(电动机)、两卷变压器或无分支线路,比较习惯的一种方法是将制动电流取为  $I_{zd1} = |I_g - I_d|/2$ <sup>[4]</sup>,判据为

$$i_{cd1} \geq i_{d0} \quad (1)$$

$$i_{cd1} > K_{cd1} I_{zd1} \quad (2)$$

其中:  $i_{d0}$  为动作门槛,是正实数。满足上面两个判据时出口动作。

### 1.2 采样值差动原理及应用中存在的若干问题

采样值电流差动保护就是利用电流采样的瞬时值来实现基于相量的常规电流差动保护的判据。这种判据成立的前提是:假设故障时采样的电流仅由基波分量构成,即已滤去谐波分量、非周期分量等非工频成分。由于采样值差动判据涉及到的实际问题较多,本文仅就其最基本的原理,即上一节中的式(1),做一些分析。对于采样值差动,该式可以表示为:

$$i_d \geq i_{d0} \quad (3)$$

其中:  $i_d$  为差动电流采样值,  $i_{d0}$  为动作门槛,是正实数。

采样值差动判据的一般性原则是,在一定的采样率(每周  $N$  点)下,连续采样  $R$  点,其中如果有  $S$  点满足动作条件,保护动作。即所谓的  $R$  取  $S$  原则。一般,  $R$  次比  $S$  次大 2 次则是为了保证内部短路时可靠动作,不受个别采样点误判的影响。

再进一步分析判据式(3)的一般形式及对应式(3)的传统差动判据的一般形式为:

$$|A \sin \theta| > C \quad (4)$$

其中:  $A$  为差动电流,  $\theta$  为变量,  $C$  为常数。

$$|A| > C \quad (5)$$

要使这两个判据等效,必须满足

$$C \leq A/\sqrt{2} \quad (6)$$

当前应用采样值差动算法存在的一些问题如下:①周期性变化的采样值的不稳定性。②直流分量带来的不利影响可能导致电流波形偏移。③不良数据可能使差动保护误出口。

### 1.3 数学形态学

数学形态学<sup>[5]</sup>是一门建立在集论基础之上的学科,它是几何形态分析和描述的有力工具。数学形态学用集合来描述目标信号,在考察信号时,要设计一种收集信号信息的“探针”,称为结构元素。观察者在信号中不断移动结构元素,便可以提取有用的信息做特征分析和描述。形态变换能将一个复杂的信号分解为具有物理意义的各个部分,并将其与背景剥离,同时保持其主要的形状特征<sup>[6-9]</sup>。利用数学形态学构成低通滤波器,即使原始信号伴随较强的噪声、甚至发生了严重的畸变,其基本形状仍可以被识别、重构及增强。值得指出的是,形态变换主要为 BOOL 运算及少量的加减运算,可以认为,与传统的数字滤波算法相比,形态学前置滤波单元仅占用很少的保护处理时间。

形态变换一般分为二值形态变换和多值形态变换。多值形态变换也称灰度变换。由于在电力系统信号分析中一般只涉及一维信号,这里只限于介绍一维离散情况下的多值形态变换包括腐蚀、膨胀、形态开和形态闭,以及形态开、闭的级联组合。

定义 1 设  $f(n)$  和  $g(n)$  分别为定义在  $F = \{0, 1, \dots, N-1\}$  和  $G = \{0, 1, \dots, M-1\}$  上的离散函数,且  $N \geq M$ 。这里,  $f(n)$  为输入序列,  $g(n)$  为结构元素,则  $f(n)$  关于  $g(n)$  的腐蚀和膨胀分别定义为:

$$(f \ominus g)(n) = \min\{f(n+m) - g(m)\}_{0,1,\dots,M-1} \quad (7)$$

其中  $n = 0, 1, \dots, N-1$

$$(f \oplus g)(n) = \max\{f(n+m) + g(m)\}_{0,1,\dots,M-1} \quad (8)$$

其中  $n = 0, 1, \dots, N-1$

腐蚀和膨胀<sup>[10]</sup>是最基本的形态变换,如图 1 所示。腐蚀变换是一种收缩变换,这种变换使目标肢体收缩,使孔洞扩张。作为对偶,不难理解膨胀变换是一个扩张过程,这种变换使目标肢体扩张,孔洞收缩。

用于电力系统消噪时,采样后经过 A/D 转换后的信号即为  $f(n)$ 。  $M$  为结构函数的长度,其取值与

采样率和希望滤除的脉冲噪声宽度及白噪声特性有关。

一般情况下, 腐蚀和膨胀是不可逆运算。先腐蚀后膨胀与先膨胀后腐蚀的结果通常是不相同的, 并且它们均不能使目标函数复原。于是产生了新的形态学变换, 即开运算(opening)和闭运算:

定义 2 设  $f(n)$  为输入序列,  $g(n)$  为结构元素,

则  $f(n)$  关于  $g(n)$  的形态开和形态闭分别定义为:

$$(f \circ g)(n) = (f \oplus g \ominus g)(n) \quad (9)$$

$$(f \bullet g)(n) = (f \ominus g \oplus g)(n) \quad (10)$$

通常形态开、闭运算用于形态滤波, 它们以不同的方式平滑信号。形态开可以抑制信号中的峰值噪声, 而形态闭可以抑制信号中的底谷噪声。为了同时去除信号中正、负两种噪声, 通常采用形态开、闭的级联形式。

Maragos 采用开闭运算的级联组合形式, 定义了形态开-闭 (Open-closing) 和闭-开 (Close-opening) 滤波器<sup>[10]</sup>:

定义 3 设  $f(n)$  为输入序列,  $g(n)$  为结构元素,

则  $f(n)$  关于  $g(n)$  的形态开-闭 (OC) 和闭-开 (CO) 滤波器分别定义为:

$$OC(f(n)) = (f \circ g \bullet g)(n) \quad (11)$$

$$CO(f(n)) = (f \bullet g \circ g)(n) \quad (12)$$

易知, 形态开-闭和闭-开滤波器具有开闭运算的所有性质。灰度开闭运算均可理解为基本的滚球变换。“球”的形状由结构函数  $g(x)$  决定。滚球的轨迹是光滑的, 开运算使目标轮廓光滑, 并去掉毛刺和孤立点, 它可以抑制信号中的峰值(正脉冲)噪声; 闭运算则填平了小沟, 弥合了孔洞和裂缝, 由此可以滤除信号中的底谷(负脉冲)噪声。开闭运算均具有低通特性, 它们的组合可以用作形态学滤波。

## 2 结合形态滤波的采样值差动算法

形态开-闭和闭-开滤波器虽然可以同时滤除信号中的正、负脉冲噪声, 但由于开运算的扩展性和闭运算的反扩展性, 两种滤波器均存在统计偏倚现象, 此时开-闭滤波器输出幅度偏小, 而闭-开滤波器的输出幅度偏大, 在很多情况下, 单独使用它们并不能取得较好的滤波效果, 为了有效地抑制电力系统故障时伴随的各种噪声, 本文采用这两种滤

波器的平均组合形式:

设输入信号为  $x(k) = s(k) + n(k)$ , ( $k=1, \dots, M$ ), 其中  $s(k)$  为原始信号,  $n(k)$  为噪声。则滤波输出信号为  $y(k)$  为

$$y(k) = [OC(x(k)) + CO(x(k))] / 2 \quad (13)$$

结构元素将根据滤波后要保持的信号形状和需要滤除的噪声进行设计。本文主要是讨论脉冲干扰的影响, 因此采用三角形结构元素。和传统的数字滤波算法比较经过改进的形态滤波由于克服了统计偏移的影响, 且具有良好的滤波效果, 因此只对差流进行形态变换就可以得到满意的结果, 大大地节约了保护计算时间。

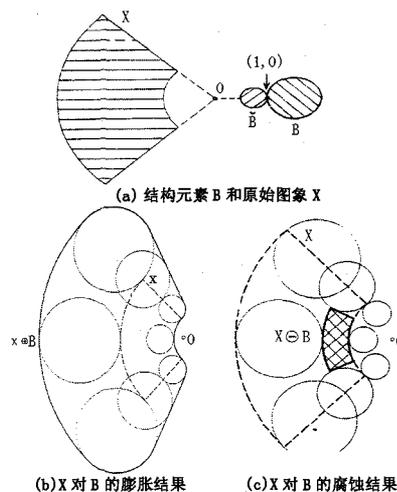


图 1 膨胀和腐蚀

Fig.1 Inflation and corrosion

## 3 算例

采样值差动目前应用的领域包括母线保护、线路纵联保护、变压器保护。下面将只分析基于采样值的变压器保护。

最基本的采样值差动原理(即式 3)。设变压器发生故障后差流是正弦波, 波形如图 2。加入脉冲性噪声后波形如图 3。运用 MM 滤波以后的波形如图 4。由图 5 可以看出, 前置的数学形态滤波器确实很好地滤除了脉冲干扰。

利用式 (3) 的判据分别对干扰后的故障电流和 MM 滤波后的电流进行分析。设采样率为 12 点/周。计算结果表明, 对有脉冲干扰的故障电流, 在 25 ms 以后才能出口; 而经 MM 处理后的故障电流, 21.7 ms 就可以出口。这证明经过 MM 滤波以后, 保护的速度确实有所提高。

为了更有力的说明问题, 考虑带比率制动特性的采样值差动原理(如式 (1), (2))。将不带数学

形态滤波单元的采样值差动原理记为判据 1. 带前置形态滤波单元的采样值差动原理记为判据 2; 下面用动模试验的数据来验证带比率制动特性的采样值差动原理。这里的动模数据来自华中理工大学动模试验室模拟三相变压器各类故障及空投产生励磁涌流时故障录波器实时纪录的一、二次侧各相电流和各相电压故障前两周波及故障后五周波的录波数据, 试验原理接线图见图 5。

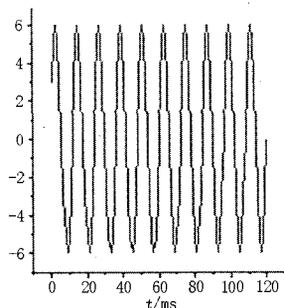


图 2 故障电流波形

Fig.2 Curve of fault current

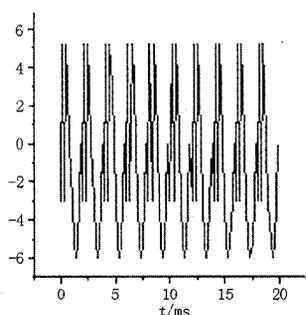


图 3 加入脉冲干扰后的故障电流波形

Fig.3 Fault current curve with pulse interference

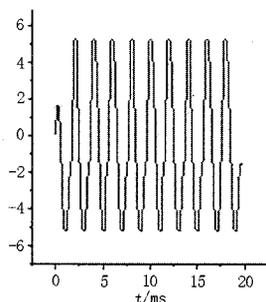


图 4 对图 3 所示信号经过 MM 滤波以后的波形

Fig.4 Curve filtered by MM against the signal shows on Fig.3

试验由一个 2 kVA, 462 V:200 V, 50 Hz 三相变压器组成, 其中, 高压侧星形接法, 低压侧三角形接法。高压侧还连接着一根 500 kV, 340 km 的长

线。试验中采样频率为 600 Hz, 即每周波 12 点。下面分析的是带长线和负荷发生故障或只带长线发生故障的情况。对于前置数学形态滤波器滤波函数的选取, 为了使计算量尽量减少, 同时又能有满意的滤波效果, 经过大量的仿真计算, 我们精选了结构元素。两种判据的斜率  $k=0.5$ ; 动作电流取为 0.3 倍的额定电流。

变压器带负荷或带长线时故障往往比不带负荷和长线时情况更为复杂, 为节省篇幅期间, 这里我们就只讨论带长线或带负荷情况下的故障。试验项目如表 1 所示。对应于中表 1 中的实验项目, 相应地给出了差分滤波后直接用采样值差动算法和不经差分滤波而前置数学形态滤波单元的采样值差动的两种判据计算出的保护出口时间, 如表 2 所示。由表 2 结果可以看出, 对于采样率为 12 点/周的故障电流, 判据 2 要比判据 1 提前两个点出口, 相当于节约了  $2 \times 1.667 = 3.3340$  ms。对应于表 1 中第 7 种情况, 传统的采样值差动要在 20.0040 ms 以后才能出口, 而采用判据 1, 只需要 16.670 ms 就可以出口, 这样就能够将动作时间控制在 20 ms 以内。

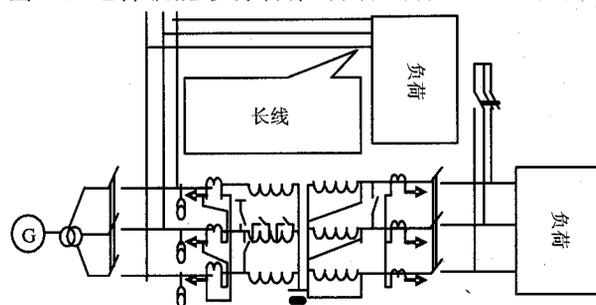


图 5 动模试验原理接线图

Fig.5 Wiring chart of principle active simulace test

表 1 实验内容和项目

Tab.1 Test content

试验	试验内容	有无	有无	
1	高压侧 B 相接地	有	无	
2		有	有	
3	高压侧 BC 相间短路	有	无	
4		有	有	
5	低压侧 AB 相间短路	有	无	
6		有	有	
7	高压侧 B 相 匝间短路匝 数比	4.35%	有	无
8		4.35%	有	有

表 2 两种采样值差动判据计算的故障开始至保护出口时间  
Tab.2 The time of the beginning of failure and the protecting  
export calculation by two sampling criterion value difference

试验 编号	普通的采样值差动 计算的结果/ms	前置数学形态滤波单元 的采样值差动计算的结 果/ms
1	8.3350	5.0010
2	8.3350	5.0010
3	11.6690	8.3350
4	8.3350	5.0010
5	8.3350	5.0010
6	6.6680	3.3340
7	20.0040	16.6700
8	18.3370	15.0030

#### 4 结论

将数学形态学和采样值原理相结合是一种新颖,有效的思想和方法。本文运用的数学形态变换,不仅能有效抑制干扰,而且还能平滑不良数据。前置的形态开-闭组合滤波单元可以滤除各种随机噪声和脉冲噪声;在硬件条件许可的前提下,该方案可望提高采样值差动保护的安全性,从而有效地改善电力系统的安全运行水平。

#### 参考文献

- [1] 胡玉峰, 陈德树. 采样值差动及其应用[A]. 全国高校电力系统自动化专业学术论文[C]. 武汉: 1999.667-672.  
HU Yu-feng, CHEN De-shu. Sampling and Its Application of Differential[A]. In: National Universities Power System Automation Professional Academic Papers Set[C]. Wuhan: 1999. 667-672.
- [2] 胡玉峰, 陈德树. 基于采样值差动的励磁涌流鉴别方法[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(9):55-59, 63.  
HU Yu-feng, CHEN De-shu. Based on the Sampling of the Inrush Current Differential Identification[J]. China Electrical Engineering Journal, 2000, 20(9):55-59, 63.
- [3] 南京自动化设备总厂. WM-41 母线保护技术说明书[Z].

- Nanjing Automation Equipment Plant. WM-41 Busbar Protection Technology Specification[Z].
- [4] 陈德树, 等. 采样值电流差动微机保护的一些问题[A]. 第六届全国继电保护学术研讨会论文集[C]. 1996.  
CHEN De-shu, et al. Sampling of Current Differential Protection of Computer Problems[A]. In: Protection of the Sixth National Symposium Proceedings[C]. 1996.
- [5] Rahman M A, Jeyasurya B. A State-of-the Art Review of Transformer Protection Algorithm[J]. IEEE Trans on PWRD, 1988, 3(2):534-544.
- [6] Serra J. Morphological Filtering: an Overview[J]. Signal Processing, 1994, 38(4):3-11.
- [7] 龚炜, 石青云, 程民德. 数字空间中的数学形态学—理论及应用[M]. 北京: 科学出版社, 1997.  
GONG Wei, SHI Qing-yun, CHENG Min-de. Digital Space in the Mathematical Morphology Theory and Application[M]. Beijing: Science Press, 1997.
- [8] Sedaaghi M H, Wu Q H. Real-time Implementation of Grey-scale Morphology Operators[J]. Electronics Letters, 1997, 33(21):1761-1763.
- [9] Sun P, Wu Q H. Morphological Systems for Signal and Imaging Processing in Power Systems[D]. UK: The University of Liverpool, 1998.
- [10] Giardina C R, Dougherty E R. Morphological Methods of Image and Signal Processing[M]. Prentice-Hall: Englewood Cliffs, 1988.
- [11] Heijmans and Ronse H J A M. The Algebraic Basis of Mathematical Morphology[J]. I : Dilations and Erosions. Comput Vision, Graphics Image Process, 1990:245-295.

收稿日期: 2008-05-20

作者简介:

李刚(1971-), 男, 工程硕士, 工程师, 从事电力系统分析和电力自动化方面的研究工作; E-mail: Ligang@zjut.edu.cn

陈军良(1972-), 男, 硕士, 从事电力系统继电保护研究工作;

李君毅(1979-), 男, 硕士, 从事电力自动化方面的研究工作。

《继电器》杂志成功更名为《电力系统保护与控制》

欢迎投稿 欢迎刊登广告 欢迎订阅