基于数学形态学暂态特征提取的分布式母线保护

李伟，王倩，杜延辉

（西南交通大学电气工程学院，四川 成都 610031）

摘要：为了避免电流互感器(CT)暂态饱和造成传统母线保护不正确动作，提出了一种基于暂态电流行波和数学形态学的分布式母线保护。利用形态学梯度提取母线内外部故障时的暂态特征，通过比较母线上各回路初始暂态电流行波的极性及其暂态能量的大小，实现母线内外部故障准确、快速的识别。ATP仿真试验表明所提保护原理和算法的正确性和有效性。

关键词：母线保护；暂态行波；分布式；数学形态学；形态学梯度

Extraction of transient character based on the mathematical morphology for distributed bus protection

LI Wei，WANG Qian，DU Yan-hui

(College of Electrical Engineering of Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031,China)

Abstract: To avoid wrong action of traditional bus protection caused by current transformer(CT) transient saturation, this paper presents a distributed bus protection based on transient current traveling waves and mathematical morphology, which extracts transient characters between internal and external faults of bus using morphological gradient, consequently, through comparing the polarity of initial transient current traveling waves and the amplitude of transient energy on all lines of protected bus, achieve precise and rapid distinguish between internal and external faults of protected bus. ATP simulations have proven the correctness of the principle and algorithm.

Key words: bus protection; transient traveling wave; distributed; Mathematical morphology; morphological gradient

中图分类号：TM773 文献标识码：A 文章编号：1674-3415(2009)02-0011-04

0 引言

母线是电力系统的输配电枢纽，其工作的可靠性将影响到电力系统的安全可靠运行。母线故障是电力系统最严重的故障之一，处理不当或不及时将会引起事故的扩大，破坏电力系统安全稳定运行。随着电力系统规模的日益扩大，在高压电网中配置快速灵敏、可靠性高的母线保护装置十分必要。

目前在我国电网中广泛采用的母线保护大多基于电流差动和电流比相式的原理，抗电流互感器(CT)饱和能力较差。虽然在实际运行中采取了很多抗CT饱和或者检测CT饱和的措施[1~3]，但是效果并不是很理想，仍出现不少因CT饱和而引起误动的情况。实际上系统故障后的CT饱和是一个渐变的过程。在CT发生饱和之前，利用故障暂态分量构成的暂态保护快速实现母线故障的判别，可以避免CT饱和的问题[4,5]。同时还能进一步提高母线保护的速动性和灵敏性。

现有的母线保护绝大多数采用的是集中式结构，需要将开关场CT二次侧用大量的电缆连接到主控制室，二次回路复杂，运行维护困难，传输的模拟电流信号容易受到开关场强电磁环境的干扰。随着计算机、通信技术的发展，继电保护下放到开关场的方式得到了逐步的认同，其经济效益愈加明显。母线保护的分布式结构很好地适应了变电站综合自动化的要求而得到关注[6]。

本文以行波保护理论为基础，发展了一种利用母线上线路暂态电流行波的分布式母线保护，并提出基于数学形态学的母线保护判据。理论分析和仿真结果表明，该母线保护是可行的。

1 基本原理

1.1 暂态电流行波的故障特征

线路或者母线故障时，在故障点相当于附加了一个该点正常负荷状态下大小相等、方向相反的电压$-\Delta u_f$。该电压会产生沿线路传输的暂态电流行波。假设暂态电流行波的极性均为母线流向线路为正。图1示出了一个系统母线内部故障和母线外部故障时所对应的故障附加分量电路图。

由图 1 可看出，当母线 B 发生故障时，所有线路暂态电流行波极性相同；而当某一线路(图中为 L1)发生故障时，故障线路的暂态电流行波极性与其它非故障线路暂态电流行波极性相反。归纳如表 1。

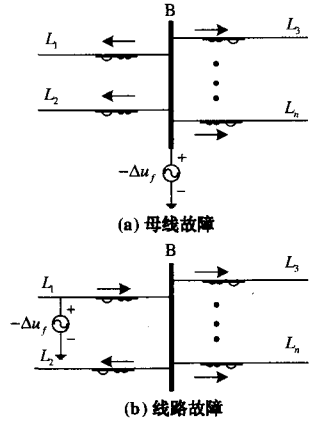

图 1 故障附加分量电路图

Fig.1 The circuit of equivalent superimposed

表 1 线路暂态电流行波的故障特征

Tab.1 Fault feature of line transient current tranvelling waves

故障位置	故障时刻	线路电流行波极性				
		L_1	L_2	L_3	$\cdots$	L_n
母线故障	$-\Delta u_f(+)$	+	+	+	$\cdots$	+
	$-\Delta u_f(-)$	−	−	−	$\cdots$	−
线路故障	$-\Delta u_f(+)$	−	+	+	$\cdots$	+
	$-\Delta u_f(-)$	+	−	−	$\cdots$	−

1.2 数学形态学

对行波极性的获取，需要对暂态电流行波进行特征提取。近年来，各种小波分析理论在提取暂态信号上使得暂态保护有了质的突破。但是，小波变换也有一定的局限性，需要靠增加分析的尺度来分辨，必然要降低保护的速度，同时存在信号频率越高，相位偏移和幅度衰减也就越大，采样数据窗口不够宽，将导致信息丢失等问题[7]。数学形态学 MM (Mathematical Morphology)的出现为电力系统信号处理方面提供了新的方法[8,9]。

与小波变换相比，MM 主要侧重于对信号进行时域的变换，着眼于波形形态，计算量仅涉及加、减和比较大小，不存在相位偏移和幅度衰减，数据处理速度更加优于小波变换。形态变换通过不同的结构元素达到对信号分析的目的。设 $f(x)$ 和 $g(x)$ 分别为一维输入信号和结构元素，D_f 和 D_g 表示两个函数的定义域集合。利用结构元素 $g(x)$ 对信号 $f(x)$ 的膨胀变换和腐蚀变换分别定义为：

$$(f \oplus g)(x) = \max_{y}\{f(x-y)+g(y)\} \quad (1)$$

$$(f \ominus g)(x) = \min_{y}\{f(x+y)-g(y)\} \quad (2)$$

式中：$x \in D_f$，$y \in D_g$。式（1）和式（2）说明膨胀和腐蚀运算具有取信号的局部极大和局部极小值的功能。膨胀和腐蚀是形态变换的基本算子。在膨胀和腐蚀的基础上即可定义基本的形态学梯度 MG (Morphological Gradient)[7]：

$$G_{\text{grad}}(f) = (f \oplus g)(x) - (f \ominus g)(x) \quad (3)$$

由式可以看出，MG 是由扁平结构元素定义域内的极大和极小值之差决定的，其运算结果受结构元素的大小和其原点位置影响，它可以有效地检测出信号的极性，通常用于图像的边缘检测[10]。本文采用结构元素为{-1, 0, -1}，后续的仿真表明本文采用的结构元素能够有效地检测出暂态信号的极性，完全满足要求。

1.3 暂态高频能量

设 $i(t)$ 表示 t 时刻的电流行波模量信号，将 $i(t)$ 离散化，设采样点数为 N，$M(i_k)$ 表示采样点所对应的形态分解系数，则 $t_0 \sim t_N$ 的暂态能量为：

$$E = \sum_{k=1}^{N} M^2(i_k) \quad (4)$$

2 基于数学形态学的分布式母线保护

2.1 母线保护方案

实际的电力系统三相线路之间存在电磁耦合，各相的波动方程相互不独立，因此其相间的暂态信号相互影响。故一般我们采用能反映故障各相信息的模量作为分析对象，应用模变换法对三相系统进行解耦得到模量。本文采用 Clark 变换式[11]：

$$\begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \\ I_0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3}\begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ 0 & \sqrt{3} & -\sqrt{3} \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中：I_0 为零模分量，I_α 和 I_β 为线模分量。零模分量受频率变化影响严重，不可靠，因此本文采用 α 模分量作为暂态保护的输入量。

本文提出的保护方案为：通过 Clark 变换将相电流解耦成模分量，根据 1.2 节中的数学形态学理论，对母线上的每回线路的 α 模电流行波进行含三个元素的三角波函数为结构元素的形态学梯度变换：当 MG 输出的绝对值大于门槛值 δ 时开始检测，当 MG 输出的绝对值再次低于门槛值 δ 时检测结束。

以最大绝对值的 5%作为门槛值。检测结果为初始暂态电流行波的极性，同时计算其首波头的暂态能量。若所有线路的初始暂态电流行波的极性相同且相互间暂态能量的比值小于η，则判定为母线区内故障，母线保护动作；若只要存在一回线路的初始暂态电流行波的极性与其它的不同，同时相互间暂态能量的比值有的大于η，则判定为母线区外故障，母线保护闭锁。

母线的接线方式很多，母线保护当判别出母线故障后，还要有选择地区分出故障母线组。本文提出的保护方案能很好地适应各种母线接线方式，以双母线并列运行为例，只要以每组母线上的所有回路及其联络线直接构成各自的母线组保护，就能有选择性区地分出故障母线组。

该原理的母线保护当因为某种原因(如区外故障转为区内故障)造成的保护拒动，尚需要进一步的研究克服。

2.2 母线保护的分布式结构

基于上述保护方案，可以在每一回出线和母线联络线上单独装设一个母线保护单元 BU。分布式母线保护的总体结构如图 2 所示，光纤以太网的冗余配置提高了母线保护数据传输及其动作的可靠性。其保护功能为：当系统发生故障后，所有的 BU 采集各自的暂态电流数据，根据前述的算法取得该回路初始暂态电流行波的幅值，从而得到其极性信息，并计算其首波头暂态能量。通过光纤以太网将本单元的信息发送给其它回路单元，同时接收其它回路单元的信息。如果某一单元 BU 综合本单元和接收来的信息满足动作条件，那么该 BU 动作，并将本线路从母线上跳开；相反如果不满足，那么该 BU 不动作，同时向其它 BU 发出闭锁信号。

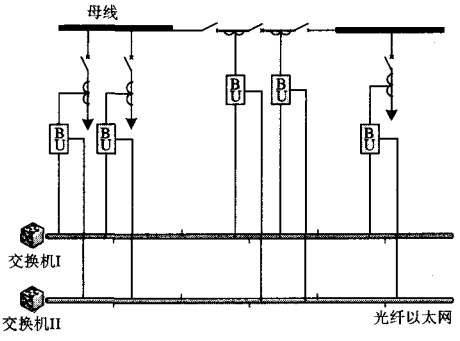

图 2 分布式母线保护结构

Fig.2 The structure of distributed bus protection

该母线保护的分布式结构很好地适应了变电站综合自动化系统保护下放的要求，就地布置，实现了分布式数据采集和分布式算法实现。如果某个 BU 发生误动作，也只是将该回路切除，避免了传统母线保护误动作造成大面积停电的事故，提高了供电的可靠性。

3 仿真研究

为了充分验证本文所提出的保护原理，利用 ATP 和 Matlab 进行仿真计算。图 3 所示为一 500 kV 系统等值简化接线图，其中以母线 BUS1 为研究对象，图中 F1、F2 分别为母线内、外部故障的两个故障点。信号进行了归一化处理，故障时刻为 0.2 s，仿真采样频率为 1 MHz。大量仿真测得的η值一般为大于 2。

图 4 给出了在 F2 点发生母线外部故障（A 相接地短路）时母线所检测到的各回线路暂态电流α模分量 MG 变换结果。图中横坐标为采样点，纵坐标为 MG 变换系数。由上至下分别为线路L_1、L_2、L_3的变换结果。由图可以看出，母线外部发生故障时，线路暂态极性信息不一致，各线路暂态高频能量计算如表 2 所示，其比值不满足动作条件，此时母线保护不应动作，发出闭锁信号。

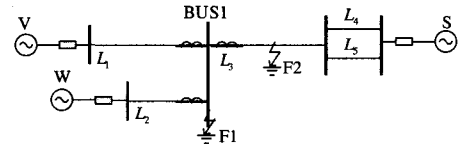

图 3 仿真系统图

Fig.3 System diagram for simulation

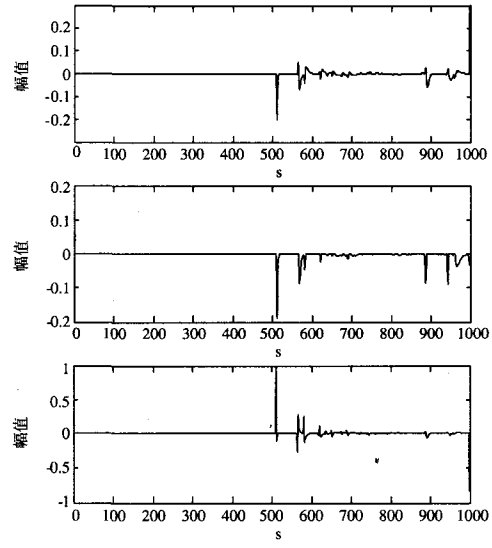

图 4 F2 点故障所对应的 MG 输出

Fig.4 The MG outputs about fault occuring on F2

表 2 各线路暂态高频能量与极性信息

Tab.2 Transient energy and polarity information on all lines

线路	极性	首波头能量
L_1	−	0.069 6
L_2	−	0.087 6
L_3	+	1.026 1

表 3 各线路暂态高频能量与极性信息

Tab.3 Transient energy and polarity information on all lines

线路	极性	首波头能量
L_1	−	0.862 1
L_2	−	0.846 8
L_3	−	0.872 2

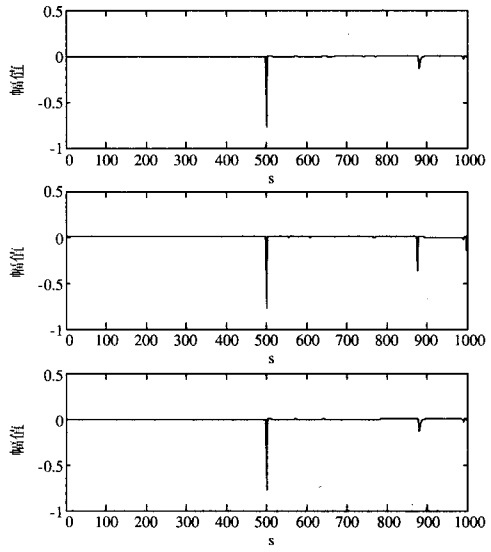

图 5 F1 点故障所对应的 MG 输出

Fig.5 The MG outputs about fault occuring on F1

图 5 是在母线上 F1 点发生 A 相接地短路时，母线所检测到的各回线路暂态电流 α 模分量 MG 变换结果。由上至下分别为线路 L_1、L_2、L_3 的变换结果。各线路暂态高频能量计算如表 3 所示。由图和表可以清晰地看出此时各回线路的暂态极性信息一致，暂态能量也满足母线故障动作条件，此时母线保护动作。

4 结论

本文对基于数学形态学暂态特征提取的分布式母线保护的基本原理进行了分析和大量的仿真，结果表明：

（1）利用线路初始暂态电流行波的极性与初始波头的暂态能量，构成母线内外部故障准确识别的判据，由于行波传播速度很快，能在 1~2 ms 内完成判定，不受 CT 饱和的影响，提高了保护的速度。

（2）采用形态学梯度算法能准确地检测出初始暂态电流行波的极性，且该算法具有计算量小，处理速度快的特点。

参考文献

[1] Cesareo Fernandez. An Impedance-Based CT Saturation Detection Algorithm for Bus-bar Differential Protection[J].IEEE Trans on Power Delivery, 2001,16(4): 468-472.

[2] Sachdev M S, Sidhu T S, Gill H S. A Busbar Protection Technique and Its Performance During Saturation and CT Ratio-mismatch[J].IEEE Trans Power Delivery, 2000, 15(3):895-901.

[3] 李贵存，刘万顺，贾清泉，等. 利用小波原理检测电流互感器饱和的新方法[J]. 电力系统自动化，2001, 25(5):36-44.
LI Gui-cun, LIU Wan-shun, JIA Qing-quan, et al. A New Method for Detecting Saturation of Gurrent Transformer Based on Wavelet Transform[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001,25(5):36-44.

[4] 葛耀中，董杏丽，董新洲，等. 基于小波变换的电流行波母线保护的研究(一)原理与判据[J]. 电工技术学报, 2003, 18(2):95-99.
GE Yao-zhong, DONG Xing-li, DONG Xin-zhou,et al. A New Bus-bar Protection Based on Current Travelling Waves and Wavelet Transform(1)-Basic Princple and Criterion[J].Transactions of China Electrotechnical Society, 2003,18(2):95-99.

[5] 卢大海，朱亚东，董新洲，等. 基于小波分析的母线暂态行波保护新原理的探讨[J]. 电力自动化设备, 2002, 22(8):63-66.
LU Da-hai, ZHU Ya-dong, DONG Xin-zhou,et al. New Principle of Transient Travelling Wave Bus Protection Based on Wavelet Analysis[J]. Electric Power Automation Equipment, 2002,22(8):63-66.

[6] HE Jia-li, LUO Shan-shan, WANG Gang, et al. Implementation of a distributed digital bus protection system[J].IEEE Trans on Power Delivery, 1997,12(4): 445-451.

[7] 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.
Q H Wu, D J Zhang. Morphological Filtering Techniques and Applications in Protection Relaying[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(7):45-49.

[8] 林湘宁，刘沛，高艳. 基于故障暂态和数学形态学的超高速线路方向保护[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(4): 13-18.

（下转第 19 页　continued on page 19）

参考文献

[1] 徐苏晨，张士军. 电力市场中输电定价的探讨[J]. 电力科学与工程，2003，(3)：30-33.
XU Su-chen，ZHANG Shi-jun. A Reliminary Research on Electricity Transmission Pricing[J]. Electric Power Science and Engineering，2003，(3)：30-33.

[2] Perez-Arriaga I J. Principles of Transmission Network Pricing, Access and Investment[J]. IEE Colloquium on Network Pricing, Investment and Access: A Review of International Experiences，1995，10：1-7.

[3] Ferrero R W，Shahidehpour S M，Ramesh V C. Transaction Analysis in Deregulated Power Systems Using Game Theory[J]. IEEE Trans on Power Systems，1997，12(3)：1340-1347.

[4] Moya Oscar. Marginal Cost of Transmission System Adequacy for Spot Pricing[J]. Electric Power Systems Research，2002，61(2)：89-92.

[5] Caramanis M C，Roukos N，Schweppe F C. WRATES: a Tool for Evaluating the Marginal Cost of Wheeling[J]. IEEE Transactions on Power Systems，2002，4(2)：594-605.

[6] Shirmohammadi D，Filho X V，Gorenstin B, et al. Some Fundamental, Technical Concepts About Cost Based Transmission Pricing[J]. IEEE Trans on Power Systems，1996，11(2)：1002-1008.

[7] Yu C W. Long-run Marginal Cost Based Pricing of Interconnected System Wheeling[J]. Electric Power Systems Research，1999，50(3)：205-212.

[8] Jing Zhao-xia，Duan Xian-zhong，Wen Fu-shuan, et al. Review of Transmission Fixed Costs Allocation Methods[J]. IEEE Trans on Power Systems，2003，9(1)：2585-2592.

[9] Bialek J. Tracing the Flow of Electricity[J]. IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution，1996，143(4)：313-320.

[10] Zhang Qian,Yu Ji-hui. Research on Transmission Services Pricing Based on Allocation of Fixed Transmission Cost[J]. In：2005. Proceedings of ICSSSM '05. 2005 International Conference on Services Systems and Services Management，2005，2：1369-1374.

[11] Ping Wei，Bin Yuan，Yixin Ni, et al. Power Flow Tracing for Transmission Open Access[J]. In：2000. Proceedings. DRPT 2000. International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies，2000，4：476-481.

[12] Rosado S P，Abdel-Rahman K，HadjSaid N. Tracing the Path of Electric Power Flow-a Study for Deregulated Power Systems[J]. In：2001. IEEE Power Engineering Society Winter Meeting，2001,3：1479-1484.

[13] Tsukamoto Y，Iyoda I. Allocation of Fixed Transmission Cost to Wheeling Transactions by Cooperative Game Theory[J]. IEEE Trans on Power Systems，1996，11(2)：620-629.

[14] 江孟蜀. 电路功率的电磁场理论[J]. 渝州大学学报，2001，18(4)：1-5.
JIANG Meng-shu. The Electromagnetic Field Theory on Electrocircuit Power[J]. Journal of Yuzhou University(Nat. Scien. Edit.), 2001，18(4)：1-5.

[15] 王楚，李椿，周乐柱. 电磁学[M]. 北京：北京大学出版社，2000，29-31.
WANG Chu, LI Chun, ZHOU Le-zhu. Electromagnetism[M]. Beijing: Beijing University Press, 2000，29-31.

收稿日期：2008-03-25；　修回日期：2008-07-14

作者简介：

高　效（1980-），女，博士，从事电力市场、电价方面的研究工作；E-mail: gaoxiao_9802@yahoo.com.cn

彭建春（1964-），男，教授，博士生导师，从事电能质量、电力市场决策运营和管理、电力系统优化等方面的研究工作。

（上接第 14 页　continued from page 14）

LIN Xiang-ning, LIU Pei, GAO Yan. Ultra-speed Line Directional Protection Based on Transient and Mathematical Morphology[J].Proceedings of the CSEE, 2005,25(4): 13-18.

[9] 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, 2003,4(18):35-39.

[10] 崔屹. 图像处理与分析——数学形态学方法及应用[M]. 北京：科学出版社，2000.

[11] 张飚，和敬涵，薄志谦. 基于凯伦贝尔变换的单端母线集成保护[J]. 继电器，2006, 34(22:1-4.
ZHANG Biao, HE Jing-han, Z Q Bo. Integrated Protection of a Single Bus based on Karrenbauer Transformation[J]. Relay, 2006,34(22):1-4.

收稿日期：2008-03-18；　修回日期：2008-05-18

作者简介：

李　伟(1982-)，男，硕士研究生，研究方向为电力系统继电保护；E-mail:cris.lee@163.com

王　倩(1962-)，女，教授，研究方向为电力调度综合自动化系统，分布式开放式 SCADA 系统，嵌入式工业测控系统；

杜延辉(1981-)，男，硕士研究生，研究方向为电力系统继电保护。