

基于形态学的 HVDC 线路故障识别与定位方法研究

束洪春^{1,2}, 王超³, 张杰¹, 吴娜¹

(1. 昆明理工大学 电力学院, 云南 昆明 650051;

2. 哈尔滨工业大学 电气工程系, 黑龙江 哈尔滨 150001;

3. 云南华能澜沧江水电有限公司 小湾水电工程建设管理局, 云南 小湾 675702)

摘要: 有效的故障行波波头辨识及测距方法是行波保护应用的重要环节。在介绍数学形态学原理及算法的基础上, 通过对故障暂态电压行波的多分辨率形态学梯度 MMG (Multi-resolution Morphological Gradient) 处理, 提取出故障折、反射行波的幅值及极性, 以此对高压直流输电 HVDC (High Voltage DC transmission) 线路故障类型进行识别, 并利用单端或双端测距算法进行故障测距。同时, 讨论了几种与线路故障暂态相似的故障类型: 换相失败和逆变侧单相接地故障。Matlab 仿真结果表明, 所提保护算法能够很好地区别 HVDC 线路故障和其他相似的暂态过程, 也能准确地进行故障定位。

关键词: 高压直流输电; 故障识别; 故障定位; 数学形态学

中图分类号: TM 711

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2007)04-0006-04

0 引言

要保障高压直流输电 (HVDC) 线路正常稳定运行, 及时检测和清除线路故障是非常重要的。当故障发生时, 电压和电流行波沿线传播, 这些行波含有足够的暂态故障信息, 可用于选线、选相及测距^[1-4]。由于 HVDC 不存在电压过零点的问题, 可以更好地运用行波检测、辨识故障^[5]。

与现在常用的小波辨识方法相比, 数学形态学对信号波形特征的研究完全在时域中进行, 而不是将信号变换到频域空间处理, 因此计算简单、并行快速, 一般只包括布尔运算、加减法运算和极值运算, 而不需要做乘法, 它能比小波分析更好、更快地确定波形突变的大小、位置以及变化方向, 处理后的暂态信号幅值不衰减、相位不偏移。当作用于一个具有复杂形态的信号时, 形态学能有效地揭示波形形状的主要特征, 同时抑制非相关部分及噪声信号, 是一种易于硬件实现的波形检测方法^[5-14]。

现运用 Matlab 的 PSB 工具箱, 分析了 HVDC 不同故障情况下的运行状况, 根据数学形态学中的多分辨率梯度算子对故障波形的辨识, 提出了故障判据。仿真结果表明, 这种故障判据在不同故障状况下均能正确辨别线路故障并进行正确的故障定位。

1 数学形态学原理及算法

1.1 形态学原理

形态学用集合描述目标信号, 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。在信号中不断移动结构元素, 便可以提取有用的信息进行特征分析和描述。2 种基本的形态函数是膨胀和腐蚀。设待处理信号 $f(n)$ 是采样得到的一维多值信号, 其定义域为 $D_f = \{0, 1, 2, \dots, N\}$; $b(n)$ 为一维结构元素序列, 其定义域为 $D_b = \{0, 1, 2, \dots, P\}$; 其中 P 和 N 都是整数, $N \geq P$ 。膨胀和腐蚀分别定义为

$$(f \oplus b)(n) = \max \{f(n-x) + b(x) \mid (n-x) \in D_f \text{ 且 } x \in D_b\} \quad (1)$$

$$(f \otimes b)(n) = \min \{f(n+x) - b(x) \mid (n+x) \in D_f \text{ 且 } x \in D_b\} \quad (2)$$

式中 $\oplus$ 表示膨胀运算; $\otimes$ 表示腐蚀运算。

膨胀是扩张过程, 会削掉波峰; 腐蚀则是收缩变换, 会填平波谷。再由式 (1) 和 (2) 可引出形态学开运算、闭运算的定义分别为

$$(f \circ b)(n) = (f \otimes b \oplus b)(n) \quad (3)$$

$$(f \cdot b)(n) = (f \oplus b \otimes b)(n) \quad (4)$$

式中 $\circ$ 表示开运算; $\cdot$ 表示闭运算。

开运算使信号轮廓光滑, 抑制了峰值噪声; 闭运算则填平了小沟, 滤除了低谷噪声。其中, 结构元素的选取非常重要, 不同尺寸、形状的结构元素, 结合这些基本运算的不同组合可以达到滤波、消噪、奇异点检测等目的。

收稿日期: 2006-09-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (90610024, 50467002, 50347026); 云南省科技攻关项目 (2003GG10, 2000B2-02); 云南省自然科学基金项目 (2005F0005Z, 2004E0020M, 2002E0025M)

1.2 多分辨形态学梯度

膨胀和腐蚀常结合使用以计算形态学梯度。用扁平结构元素 $b(n)$ 膨胀和腐蚀信号函数 $f(n)$, 结果的数学差分构成了基本的形态学梯度:

$$G_{\text{grad}}(f) = (f \oplus b)(n) - (f \otimes b)(n) \tag{5}$$

用扁平结构函数的膨胀和腐蚀运算具有取局部极大和极小值形态滤波的效果, 所以对应其每一点, 形态梯度是由扁平结构函数定义域内的极大和极小值决定的。由此可见, 结构元素的大小和其原点位置影响了形态梯度的运算结果。在图象和信号处理应用中, 通常用形态梯度进行边沿检测。

针对电力系统电磁暂态信号的研究, 文献[15]使用了一种多分辨形态学梯度 MMG (Multi-resolution Morphological Gradient) 技术。应用这种技术处理暂态信号, 可以有效抑制信号中的稳态分量, 同时突出波形的暂态特征。为了提取暂态波形中的上升沿和下降沿, 设计了一种可变并具有不同原点位置的扁平结构元素, 其定义为

$$b^+ = \{ \underline{b}_1, b_2, \dots, b_{L-1}, b_L \} \tag{6}$$

$$b^- = \{ \underline{b}_1, b_2, \dots, b_{L-1}, b_L \} \tag{7}$$

其中, 结构元素 b^+ 和 b^- 分别用来对应于暂态波中上升沿和下降沿的提取。结构元素宽度为 L , 在 b^+ 和 b^- 中的下划线采样点 $\underline{b}$, 分别表示它们的原点位置。

结合形态梯度定义式(5)与可变扁平结构元素定义式(6)(7), 根据情况, 简化的二值多分辨形态学梯度定义为

$$f_{b^+}(n) = (f \oplus b^+)(n) + (f \otimes b^+)(n) \tag{8}$$

$$f_{b^-}(n) = (f \otimes b^-)(n) + (f \oplus b^-)(n) \tag{9}$$

$$\text{Grad}_b(n) = f_{b^-}(n) - f_{b^+}(n) \tag{10}$$

上式中 $f_{b^+}(n)$ 和 $f_{b^-}(n)$ 符号正好与暂态波形中上升沿和下降沿相对应。因此, 式(10)中的 $\text{Grad}_b(n)$

不仅能够定位信号波形中的暂态突变, 而且还能够指示出其变化的极性。

2 HVDC 故障测距判据

采用 Matlab 中 1 000 MW (500 kV, 2 kA) 12 脉波直流输电系统, 送端是 500 kV、5 000 MV·A 的交流网络, 受端是 345 kV、10 000 MV·A 交流网络, 直流线路 300 km, 如图 1 所示 (ACF、DCF 分别为交流、直流滤波设备)。几种类型故障分别为: a 处的直流线路短路故障; b 处换相失败; c 处逆变站 AC 系统单相短路。仿真都用 80 kHz, 算法分析故障附近 3 ms 内的直流电压数据。

2.1 HVDC 典型故障电磁暂态

图 2~4 分别是直流线路短路、换相失败、逆变侧单相短路时整流侧直流电压及电流。由图可见, 不同类型故障的暂态过程是相似的, 如何快速地区别直流线路故障并进行准确定位可以用以上所述的多分辨形态学梯度实现。

2.2 故障识别与测距判据

直流线路上出现故障时, 行波沿线传播, 在阻抗不连续点之间来回反射, 造成直流电压、电流的瞬态突变, 多分辨形态学梯度可以有效地检测出这些边沿突变, 并保留其极性。因此, 故障识别可以运用 2 个判据: 阈值和极性。对于采用标么值的仿真系统, 阈值可以设为 0.5。同时, 在故障点短路瞬间直流电压会从正常跌落到零, 根据故障分量理论, 行波第 1 个波头应该是下降沿。即若多分辨形态学梯度结果中有大于阈值 0.5 且极性为负时, 判断有线路区内故障, 否则判断为逆变侧故障。

测距采用单端和双端电气量行波保护原理^[3-5]。设行波初始波头到达测量点的时间是 t_1 , 经母线反射

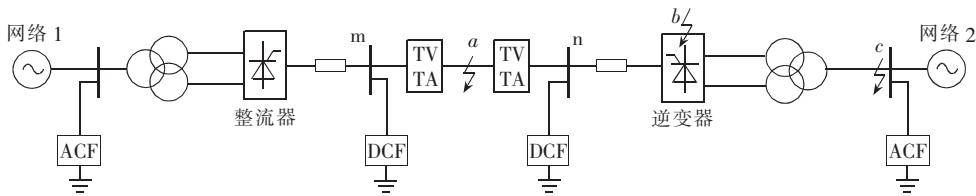


图 1 仿真模型

Fig.1 Simulation model

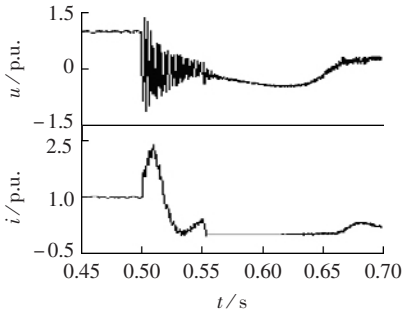


图 2 直流线路故障时整流侧直流电压及电流

Fig.2 Rectifier DC voltage and current when DC line fault occurs

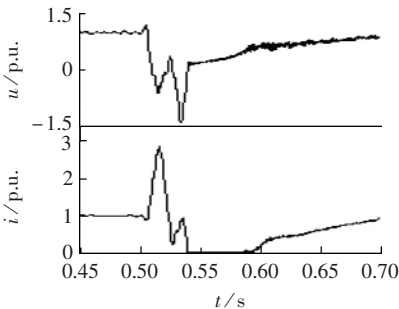


图 3 换相失败时整流侧直流电压及电流

Fig.3 Rectifier DC voltage and current when DC commutation failure occurs

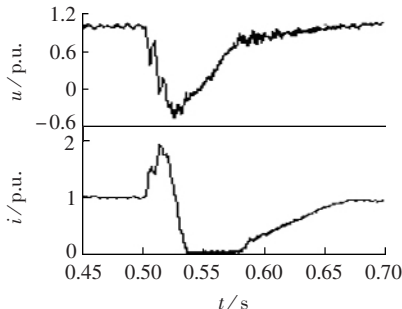


图 4 逆变侧单相接地故障时整流侧直流电压及电流

Fig.4 Rectifier DC voltage and current when single-phase grounding fault occurs near inverter station

到达故障点后再反射的波头到达测量点的时间是 t_2 , 极性如前所述。单端测距计算公式为

$$D_m = 0.5(t_2 - t_1)v \quad (11)$$

设故障初始行波波头到达 m、n 侧电压互感器的时间分别为 t_m 、 t_n , 则双端测距计算公式为

$$D_m = [(t_m - t_n)v + L] / 2 \quad (12)$$

式中 D_m 为故障点到测量点母线 m 之间的距离; L 为全线长度 300 km; v 为行波波速, 这里取 296 112 km/s。

3 仿真结果

3.1 直流线路故障

为了验证测距原理的实用性, 进行了距离测量点母线 m 侧分别为 100 km 和 200 km 的金属性接地故障仿真。图 5 是整流侧电压, 其中 (b)(d) 是 (a)(c) 在故障时间附近的放大图, (c)(d) 是经过多分辨率学梯度算法处理过的波形, (d) 中前 2 个尖峰脉冲极性相反(前述), 代表了到 m 的初始行波波头和在故障点反射波, 其电压幅值为 ± 2 p.u., 满足上述故障判据。2 个箭头间时间间距 $\Delta t = 0.501\ 012\ 5 - 0.500\ 337\ 5 = 0.000\ 675$ (s), 据单端算法算出故障距 m 侧 99.93 km。

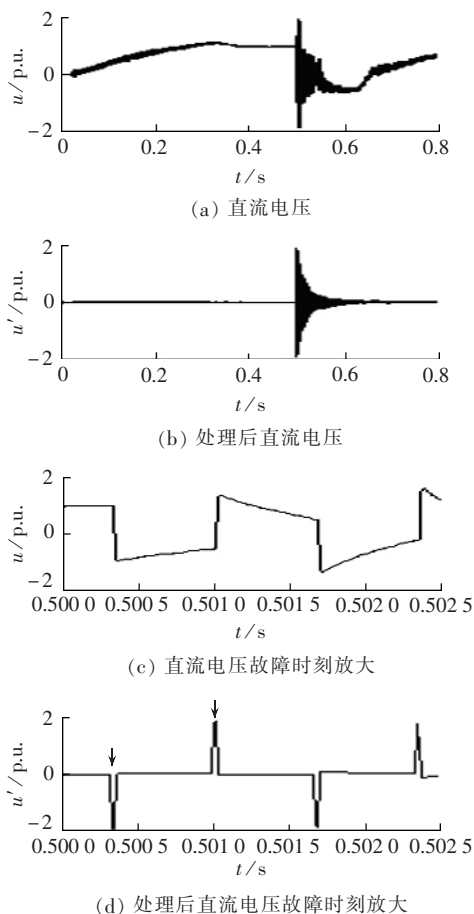


图 5 故障点距离 m 侧 100 km 的整流侧直流电压行波及经过 MMG 处理过的波形

Fig.5 Rec DC voltage traveling wave when fault point is 100 km from m, and its result of MMG treatment

图 6 类似图 5, 采用双端算法, (d) 中整流、逆变侧的 2 个初始波头(如箭头所示, 1 为整流, 2 为逆变)之间的时间间距 $\Delta t = 0.500\ 662\ 5 - 0.500\ 325\ 0 = 0.000\ 337\ 5$ (s), 据此算出故障距 m 侧 199.97 km。

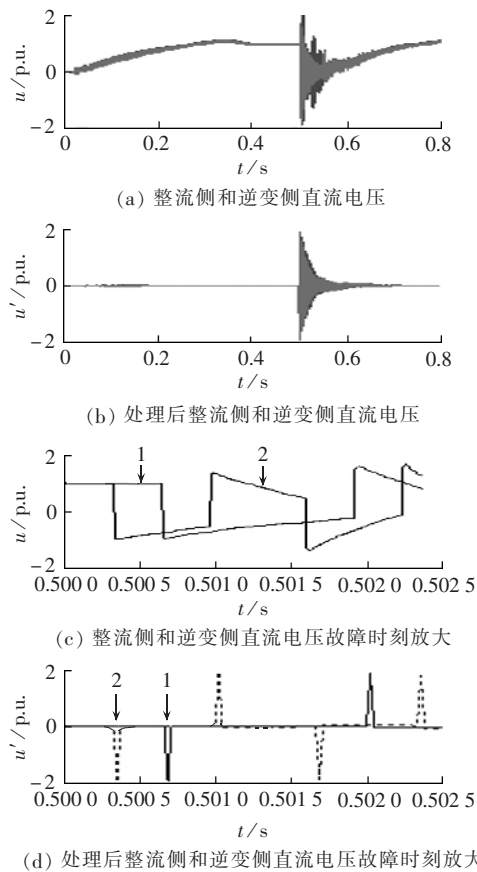


图 6 故障点距离 m 侧 200 km 的整流、逆变侧直流电压行波及经过 MMG 处理过的波形图

Fig.6 Rec DC voltage traveling wave when fault point is 200 km line fault from m, and its result of MMG treatment

3.2 换相失败的 MMG 检测

如图 7 所示, 用 MMG 算法处理换相失败的电压波形后, 其变化幅值远小于设定的阈值 0.5, 且极性不明确, 能够和线路故障明显区分。

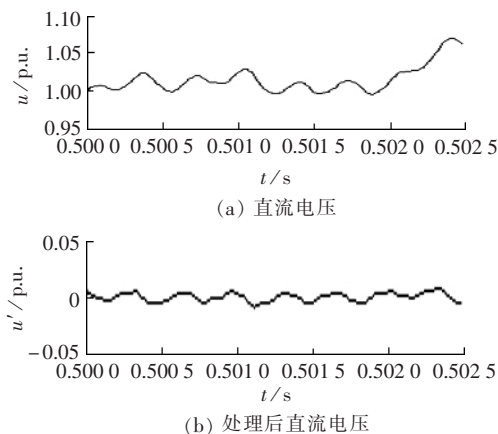


图 7 换相失败直流电压及经过 MMG 处理过的波形图

Fig.7 Rec DC voltage when commutation failure occurs and its result of MMG treatment

3.3 逆变侧交流单相接地故障的 MMG 检测

如图 8 所示,类似于换相失败,提出的算法判据也将这种故障与线路故障明确区分开。

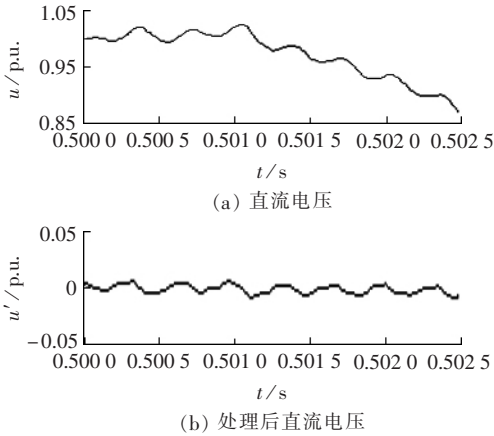


图 8 逆变侧交流单相接地故障直流电压及经过 MMG 处理过的波形图

Fig.8 Rec DC voltage when single-phase grounding fault occurs near inverter station and its result of MMG treatment

4 结论

对于 HVDC 线路行波保护而言,数学形态学的多分辨梯度算法提供了快速有效的暂态信号分析方法。它是一种纯粹基于时域的分析方法,只有简单的加减法和极值比较,因此要比另一种暂态边缘检测方法——小波分解要简单、快速,且其变换后幅值衰减很小,无相移,便于硬件检测。仿真实验表明,根据该算法提出的故障辨识判据能够正确区分 HVDC 线路故障和换相失败、逆变侧交流系统故障,测距算法也准确可靠。

参考文献:

[1] 徐丙垠,葛耀中. 现代行波测距技术及其应用[J]. 电力系统自动化,2001,25(23):62-65.
XU Bing-yin,GE Yao-zhong. Modern fault location techniques based on fault generated traveling waves and their application [J]. Automation of Electric Power Systems,2001,25(23):62-65.
[2] 董新洲,葛耀中,徐丙垠. 利用暂态电流行波的输电线路故障测距研究[J]. 中国电机工程学报,1999,19(4):76-80.
DONG Xin-zhou,GE Yao-zhong,XU Bing-yin. Research of fault location based on current traveling waves[J]. Proceedings of the CSEE,1999,19(4):76-80.
[3] 哈恒旭,张保会,吕志来. 利用暂态电流的输电线路单端量保护新原理探讨[J]. 中国电机工程学报,2000,20(11):56-61.
HA Heng-xu,ZHANG Bao-hui,LÜ Zhi-lai. A novel principle of non-unit protection based on transient components for EHV transmission lines[J]. Proceedings of the CSEE,2000,20(11):56-61.
[4] BO Z Q. Transient based protection for transmission lines[J]. IEEE Trans on Power Delivery,1998,13(3):1067-1071.
[5] SHANG L,HEROLD G,JAEGER J,et al. High-speed fault identification and protection for HVDC line using wavelet technique[C]//IEEE Porto Power Tech Conference. Porto,Portugal: IEEE,2001:173-176.
[6] 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.
[7] 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.
[8] 束洪春,王晶,陈学允. 动态电能质量波形辨识的暂态分析方法(I)[J]. 华北电力大学学报,2004,31(1):1-3.
SHU Hong-chun,WANG Jing,CHEN Xue-yun. Fractal exponent wavelet analysis of dynamic power quality (I) [J]. Journal of North China Electric Power University,2004,31(1):1-3.
[9] 束洪春,王晶,陈学允. 动态电能质量波形辨识的暂态分析方法(II)[J]. 华北电力大学学报,2004,31(2):1-4.
SHU Hong-chun,WANG Jing,CHEN Xue-yun. Fractal exponent wavelet analysis of dynamic power quality (II) [J]. Journal of North China Electric Power University,2004,31(2):1-4.
[10] 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.
[11] 李凤慧. 基于数学形态学的图像噪声处理[J]. 信息技术,2006,30(6):45-46.
LI Feng-hui. Processing of image noise based on mathematical morphology[J]. Information Technology,2006,30(6):45-46.
[12] 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方法[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.
[13] 张金萍,刘杰,李允公. 数学形态学在工件识别预处理中的应用[J]. 机械与电子,2006(1):31-33.
ZHANG Jin-ping,LIU Jie,LI Yun-gong. Application of the mathematical morphology to workpiece recognition pre-processing [J]. Machinery & Electronics,2006(1):31-33.
[14] 岳蔚,刘沛. 基于数学形态学消噪的电能质量扰动检测方法[J]. 电力系统自动化,2002,26(7):13-17.
YUE Wei,LIU Pei. Detection of power quality disturbances based on mathematical morphology (MM) filter [J]. Automation of Electric Power Systems,2002,26(7):13-17.
[15] 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.
[16] 束洪春,司大军,葛耀中,等. 基于分布参数模型的串补线路故障测距方法研究[J]. 中国电机工程学报,2002,22(4):72-76.
SHU Hong-chun,SI Da-jun,GE Yao-zhong,et al. Study for locating faults on series compensated lines based-on distributed parameter line model [J]. Proceedings of the CSEE,2002,22(4):72-76.
[17] 束洪春,司大军,葛耀中,等. 长输电线路电弧故障定位方法研究[J]. 电力系统自动化,2000,24(21):27-30,39.
SHU Hong-chun,SI Da-jun,GE Yao-zhong,et al. A new fault location algorithm for HV long transmission line [J]. Automation of Electric Power Systems,2000,24(21):27-30,39.

(责任编辑:李育燕)

作者简介:

束洪春(1961-),男,江苏丹阳人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为新型继电保护与故障测距、分布式求解方法在电力系统中的应用(E-mail: kmsmc@sina.com.cn)。

HVDC transmission system fault identification and locating algorithm using mathematical morphology

SHU Hong-chun^{1,2}, WANG Chao³, ZHANG Jie¹, WU Na¹

(1. Kunming University of Science & Technology, Kunming 650051, China; 2. Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China; 3. Yunnan Huaneng Lancang River Hydropower Company Xiaowan Hydropower Project Bureau, Xiaowan 675702, China)

Abstract: Effective fault traveling wavefront identification and fault locating method is the basis of traveling wave protection. The principle and algorithm of mathematical morphology are introduced, based on which the amplitude and polarity of the refractive and reflected transient traveling waves are abstracted by transient fault voltage traveling wave treatment using MMG (Multi-resolution Morphological Gradient) method and the HVDC (High Voltage DC transmission) line faults identified and located using single and double ending fault locating methods. Some types of HVDC faults similar to line fault transient are discussed, such as commutation failure and AC single-phase grounding fault near inverter station. Simulations with Matlab show that the proposed criterion and algorithm work well in distinguishing HVDC line fault and some other similar faults, and correct locating the fault position.

This project is supported by the National Natural Science Foundation of China (90610024, 50467002, 50347026), Yunnan Province Science and Technology Key Project (2003GG10, 2000B2-02) and Natural Science Foundation of Yunnan Province (2005F0005Z, 2004E0020M, 2002E0025M).

Key words: HVDC; fault identification; fault locating; mathematical morphology