

基于故障暂态电压的故障选相算法的研究

陈茂英, 杨明玉, 张新国, 胡 巨
(华北电力大学电气工程学院, 河北 保定 071003)

摘要: 讨论了各种故障类型下的高频暂态电压的特征, 提出一种利用小波变换的暂态电压选相新算法。该算法利用暂态电压模分量的小波模极大值和各相电压的李氏指数值, 从而可以实现可靠选相。对某典型的 500 kV 线路进行了仿真, 结果表明, 该算法在各种故障条件下均能准确、快速地选相。

关键词: 故障选相; 暂态电压; 小波变换

中图分类号: TM771 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2005)05-0004-04

0 引言

近年来, 为了进一步提高超高压输电线路的速动性和灵敏性, 基于故障产生的高频暂态分量的继电保护—暂态保护^[1]得到了广泛的研究。由于超高压输电线路具有明显的分布特性, 故障发生时线路上会出现大量的高频暂态信号。这些信号中含有丰富的故障信息, 其中包括故障的类型、方向、位置、持续时间等等。暂态量保护就是以检测故障暂态量中除工频以外的其它频率成分来实现传输线及电力设备的保护的, 克服了传统工频量保护受过渡电阻、系统振荡、CT饱和等影响的弱点, 具有响应快、准确度高的优点。目前, 研究最多的是暂态电流保护^[2~7]。这是因为普通电流互感器传变高频分量的特性优于普通电压互感器。随着光电互感器的发展, 光电电压互感器的高频传变能力的提高, 构造简单的单端暂态电压保护是可以实现的, 和暂态电流保护相配合, 能很好地提高暂态保护的可靠性。

实施暂态保护技术的关键是暂态特征的提取和暂态保护机理的建立。小波分析为暂态保护提取故障特征提供了一种有效的信号处理方法。本文对各种故障类型下的电压信号的暂态特征进行了讨论, 提出一种利用小波变换实现暂态电压故障选相的新算法。仿真结果表明, 该算法不受故障类型、故障时刻、故障过渡电阻、故障位置的影响。

1 小波变换理论^[8,9]

小波变换是近年来获得广泛应用的一种信号处理方法, 具有时频局部化性能, 能把分析对象“聚焦”到任意细节, 被誉为数学上的“显微镜”。本文提出的原理便是利用小波变换提取故障时暂态电压的特征, 从而实现选相。

1.1 小波变换的定义

假设 $f(t)$ 为所研究的信号, 小波 $\psi(t)$ 满足容许性条件, 那么该信号积分小波变换定义如下:

$$Wf(a, s) = s^{-\frac{1}{2}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \overline{\left[\frac{t-t_0}{s} \right]} dt \quad (1)$$

式中: s 为与频率对应的尺度参数, t_0 为与时间对应的位移参数, 将尺度参数和位移参数离散化, 可得离散小波变换, 其一般形式为:

$$Wf(j, n) = 2^{-\frac{j}{2}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \overline{\left[2^{-j} t - n \right]} dt \quad (2)$$

小波实际上相当于一个带通滤波器, 假设 $\psi(t)$ 频率中心为 ω_0 , 频带宽为 $\Delta\omega$, 对于一个离散的数字信号, 如果采样频率为 N , 那么信号是带限于 N 的, 信号第 j 个二进尺度的离散小波变换, 实际上相当于将信号通过一个带宽大约为 $[\omega_0 - \Delta\omega, \omega_0 + \Delta\omega] \cdot N \cdot 2^j$ 的带通滤波器。本文采用 Daubechies4 阶小波 (db4), 其中心频率为 0.7143 Hz, 频带为 0.3155 Hz。

1.2 小波变换奇异性理论

设 $W_s f(x)$ 是函数 (或信号) $f(x)$ 的小波变换, 在尺度 s 下, 在 x_0 的某一领域 R , 对一切 x 有

$$|W_s f(x)| = |W_s f(x_0)| \quad (3)$$

则称 x_0 为小波变换的模极大值点, $|W_s f(x_0)|$ 为小波变换的模极大值。

任何信号都可以用小波变换的模极大值进行描述, 利用小波变换模极大值可以重建原信号。信号的小波变换模极大值包含了信号的主要特性。

可以证明: 小波变换模极大值满足关系式:

$$|W_{\max} f(x)| \propto ks \quad (4)$$

当 $s = 2^j$ 时, 上式变为

$$|W_{\max} f(x)| \propto k(2^j) \quad (5)$$

式中: $|W_{\max} f(x)|$ 为信号 $f(x)$ 的小波变换模极大

值; k 为常数; 则为 Lipschitz 指数。表征了该点的奇异性大小, 越大, 该点的光滑度越高; 越小, 该点的奇异性越大。式 (5) 揭示了小波变换模极大值随尺度 j 变化的规律。因此, 信号某点的奇异性可以近似表示为两个相邻尺度下的小波模极大值之比。本文采用尺度 3 和尺度 2 下的模极大值之比表示。

2 暂态电压故障选相算法

2.1 故障暂态电压特征的分析^[10, 11]

设三相电流、电压的频域表达式分别为 $I_a(p)$ 、 $I_b(p)$ 、 $I_c(p)$ 、 $U_a(p)$ 、 $U_b(p)$ 、 $U_c(p)$, 则有:

$$\begin{cases} U_a(p) = Z_{aa}(p) I_a(p) + Z_{ab}(p) I_b(p) + Z_{ac}(p) I_c(p) \\ U_b(p) = Z_{ab}(p) I_a(p) + Z_{bb}(p) I_b(p) + Z_{bc}(p) I_c(p) \\ U_c(p) = Z_{ac}(p) I_a(p) + Z_{bc}(p) I_b(p) + Z_{cc}(p) I_c(p) \end{cases} \quad (6)$$

其中 $Z_{aa}(p) = Z_{bb}(p) = Z_{cc}(p) = Z_s(p)$; $Z_{ab}(p) = Z_{bc}(p) = Z_{ac}(p) = Z_m(p)$ 。

电力系统故障状态可视为非故障状态与故障附加状态的叠加。以下仅分析故障附加状态下的电压

特征。

本文对三相电压信号进行凯伦布尔模变换, 得三个模分量: $U_0(p) = U_a(p) + U_b(p) + U_c(p)$; $U_1(p) = U_a(p) - U_b(p)$; $U_2(p) = U_a(p) - U_c(p)$ 。为了便于分析判断, 引入第四个模分量, 定义为: $U_3(p) = U_b(p) - U_c(p)$ 。下面则对以上四个模分量的故障特征进行分析。

当线路发生 A 相接地故障时, 由于故障点处的 $I_{ag}(p) = 0$, $I_{bg}(p) = 0$, $I_{cg}(p) = 0$, 从而线路保护安装处的电流 $I_a(p) = 0$, $I_b(p) = 0$, $I_c(p) = 0$, 所以根据式 (6), 可得四个电压模分量为:

$$\begin{cases} U_0(p) = [Z_s(p) + 2Z_m(p)] I_a(p) \\ U_1(p) = [Z_s(p) - Z_m(p)] I_a(p) \\ U_2(p) = [Z_s(p) - Z_m(p)] I_a(p) \\ U_3(p) = 0 \end{cases} \quad (7)$$

同理可得其它故障类型的暂态电压各模量的特征, 如表 1 所列。

表 1 不同故障类型的故障暂态电压各模量特征

Tab 1 Characteristic of each model-quantity of transient voltage in different fault types

故障类型	故障相	故障模量特征			
		$U_0(p)$	$U_1(p)$	$U_2(p)$	$U_3(p)$
单相接地	A	$[Z_s(p) + 2Z_m(p)] I_a(p)$	$[Z_s(p) - Z_m(p)] I_a(p)$	$[Z_s(p) - Z_m(p)] I_a(p)$	0
	B	$[Z_s(p) + 2Z_m(p)] I_b(p)$	$[Z_m(p) - Z_s(p)] I_b(p)$	0	$[Z_s(p) - Z_m(p)] I_b(p)$
	C	$[Z_s(p) + 2Z_m(p)] I_c(p)$	0	$[Z_m(p) - Z_s(p)] I_c(p)$	$[Z_m(p) - Z_s(p)] I_c(p)$
两相短路	BCG	$[Z_s(p) + 2Z_m(p)] [I_b(p) + I_c(p)]$	$[Z_m(p) - Z_s(p)] I_b(p)$	$[Z_m(p) - Z_s(p)] I_c(p)$	$[Z_s(p) - Z_m(p)] [I_b(p) - I_c(p)]$
	ACG	$[Z_s(p) + 2Z_m(p)] [I_a(p) + I_c(p)]$	$[Z_s(p) - Z_m(p)] I_a(p)$	$[Z_s(p) - Z_m(p)] [I_a(p) - I_c(p)]$	$[Z_m(p) - Z_s(p)] I_c(p)$
	ABG	$[Z_s(p) + 2Z_m(p)] [I_a(p) + I_b(p)]$	$[Z_s(p) - Z_m(p)] [I_a(p) - I_b(p)]$	$[Z_s(p) - Z_m(p)] I_a(p)$	$[Z_s(p) - Z_m(p)] I_b(p)$
两相短路	BC	0	$[Z_m(p) - Z_s(p)] I_b(p)$	$[Z_s(p) - Z_m(p)] I_b(p)$	$2[Z_s(p) - Z_m(p)] I_b(p)$
	AC	0	$[Z_s(p) - Z_m(p)] I_a(p)$	$2[Z_s(p) - Z_m(p)] I_a(p)$	$[Z_s(p) - Z_m(p)] I_a(p)$
	AB	0	$2[Z_s(p) - Z_m(p)] I_a(p)$	$[Z_s(p) - Z_m(p)] I_a(p)$	$[Z_m(p) - Z_s(p)] I_a(p)$
三相短路	ABCG	0	$[Z_s(p) - Z_m(p)] [I_a(p) - I_b(p)]$	$[Z_s(p) - Z_m(p)] [I_a(p) - I_c(p)]$	$[Z_s(p) - Z_m(p)] [I_b(p) - I_c(p)]$

下面再简单分析一下, 不对称故障时三相电压的奇异性特征。图 2 为在图 1 所示的线路上发生各种不对称故障的三相电压波形及其李氏指数。从图中可以看到, 两个故障相或两个非故障相的波形很相似, 这是相对于故障相与非故障相的波形而言的。因此, 两个故障相或两个非故障相的电压的李氏指数很接近, 故障相与非故障的电压李氏指数相对差别较大。



图 1 简化的 500 kV 线路

Fig 1 A simplified 500 kV transmission line

2.2 故障选相算法

根据上述分析的暂态电压特征可以实现故障选相。在时刻 n , 对暂态电压各模量在固定的时间窗 N 内进行小波分析, 求取小波变换模极大值 E_j :

$$E_j = \max_{k=n-N}^n \{ |W_i U_j(k)| \} \quad (j=0, 1, 2, 3) \quad (8)$$

式中 $W_i U_j(k)$ 是模分量 U_j 在固定时间窗内的尺度 i 下的小波变换系数。 E_j 表征了暂态电压模分量 U_j 在固定时间窗内的频域特征。令 $E_{\max} = \max \{ E_0, E_1, E_2, E_3 \}$, 并分别取 E_0/E_{\max} , E_1/E_{\max} , E_2/E_{\max} , E_3/E_{\max} 进行比较。用尺度 3 下和尺度 2 下的小波模极大值之比近似表示三相电压波形的李氏指数 A 、

B 、 C 。实现故障选相方法具体如下:

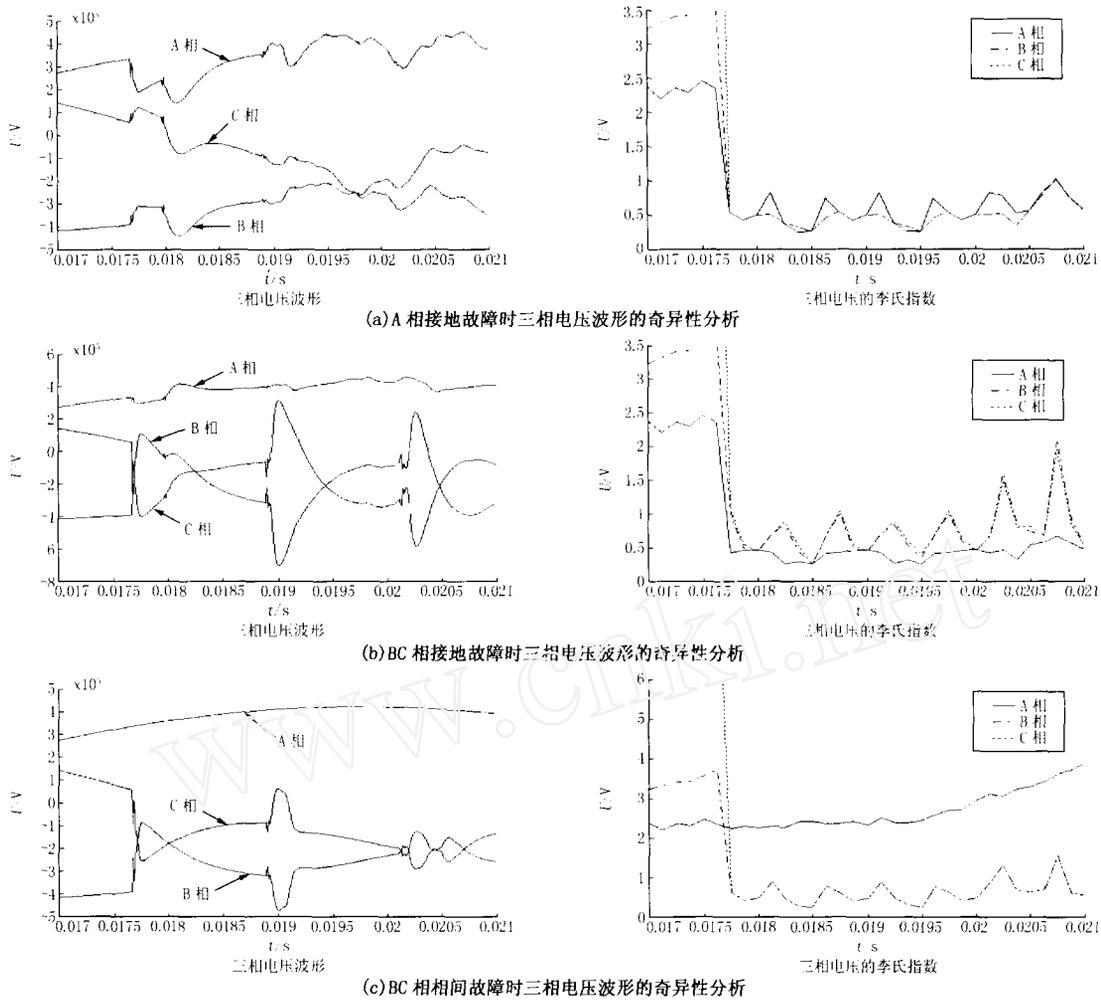


图 2 各种故障类型的电压波形的奇异性分析

Fig 2 Analysis of Lipschitz exponents of voltage waveforms for different fault types

$$1) E_0/E_{\max} < 1$$

a) 两相短路故障

$$E_j/E_{\max} \quad 2E_k/E_{\max} \quad 2E_m/E_{\max}, \quad j, k, m = 1, 2, 3 \quad (9)$$

则 E_j 所对应的两相为故障相。

b) 不满足 a) 的则为三相短路。

$$2) E_0/E_{\max} > 1$$

a) 单相接地故障

$$E_j/E_{\max} < 2, \quad j = 1, 2, 3 \quad (10)$$

则 j 所对应的两相为非故障相, 另一相为故障相。

b) 两相短路接地

不满足 a) 的条件为两相短路接地。

p 与 q 最接近, 则 p, q 所对应的相为故障相 (其中 $p, q = a, b, c$)

3 仿真实例和算法验证

本文采用如图 1 所示的一简化 500 kV 线路, 总长为 180 km, 母线两端的杂散电容估计为 $0.1 \mu\text{F}$, 线路两端三相均装有阻波器。采用频率为 200 kHz, 时间窗 $N = 500$ 。小波函数选取 Daubechies 的 4 阶小波, 在本算例中, α_1 取 10^{-3} , α_2 取 10^{-2} 。表 2~5 列出了不同故障类型、不同故障初相角 θ_0 、不同故障位置、不同故障过渡电阻 R 情况下暂态电压模分量的 E_0/E_{\max} 、 E_1/E_{\max} 、 E_2/E_{\max} 、 E_3/E_{\max} 的值和各相电压波形李氏指数 L_A 、 L_B 、 L_C 的值以及选相结果。

仿真结果表明, 小波变换很好地反映了不同故障类型暂态电压的特征。在各种故障情况下, 该算法都能准确地判别。不过, 以上算法只是在简单的模型仿真数据中得到初步的验证, 还不够深入, 算法的性能和实际运用还需进一步研究和探讨。

表 2 不同故障类型的选相结果 (线路中部, $\theta_0 = 45^\circ; R = 0$)Tab 2 Results of fault phase selection of different fault types (line s middle, $\theta_0 = 45^\circ; R = 0$)

故障类型	$\frac{E_0}{E_{max}}$	$\frac{E_1}{E_{max}}$	$\frac{E_2}{E_{max}}$	$\frac{E_3}{E_{max}}$	A	B	C	选相结果
AG	9.7067E-01	1.0000E+00	1.0000E+00	9.6291E-05	6.8726E-01	6.7631E-01	6.7641E-01	AG
BCG	3.4007E-01	6.5209E-01	4.3360E-01	1.0000E+00	9.8299E-01	5.6816E-01	5.8631E-01	BCG
BC	9.9546E-07	5.0000E-01	5.0000E-01	1.0000E+00	2.6429E+00	5.6770E-01	5.6780E-01	BC
ABCG	6.7842E-07	1.0000E+00	2.7295E-01	7.2705E-01	5.7274E-01	5.6955E-01	5.6078E-01	ABCG

表 3 不同故障时刻的选相结果 (线路首端, $R = 0, AG$)Tab 3 Results of fault phase selection of different fault time (line s head, $R = 0, AG$)

$\theta_0 / (^\circ)$	$\frac{E_0}{E_{max}}$	$\frac{E_1}{E_{max}}$	$\frac{E_2}{E_{max}}$	$\frac{E_3}{E_{max}}$	A	B	C	选相结果
0	9.9347E-01	1.0000E+00	9.9999E-01	8.1357E-03	2.2797E+00	1.2420E+00	1.2428E+00	AG
45	1.0000E+00	8.5109E-01	8.5109E-01	3.2596E-05	1.4296E+00	8.4113E-01	8.4213E-01	AG
90	1.0000E+00	8.5130E-01	8.5130E-01	1.3376E-05	1.4287E+00	8.3910E-01	8.3910E-01	AG

表 4 不同过渡电阻的选相结果 (线路末端, $\theta_0 = 90^\circ; BCG$)Tab 4 Results of fault phase selection of different fault resistances (line s end, $\theta_0 = 90^\circ; BCG$)

R / Ω	$\frac{E_0}{E_{max}}$	$\frac{E_1}{E_{max}}$	$\frac{E_2}{E_{max}}$	$\frac{E_3}{E_{max}}$	A	B	C	选相结果
0	1.0000E+00	6.9846E-01	6.9209E-01	1.4436E-02	5.2786E-01	7.7752E-01	7.6448E-01	BCG
150	8.0537E-01	9.4844E-01	1.0000E+00	5.1555E-02	4.2049E-01	1.9355E-01	2.2693E-01	BCG
300	9.3333E-01	9.8703E-01	1.0000E+00	1.1526E-01	4.8869E-01	2.3956E-01	2.4913E-01	BCG

表 5 不同故障位置的选相结果 ($\theta_0 = 90^\circ; R = 150, BC$)Tab 5 Results of fault phase selection of different fault positions ($\theta_0 = 90^\circ; R = 150, BC$)

位置	$\frac{E_0}{E_{max}}$	$\frac{E_1}{E_{max}}$	$\frac{E_2}{E_{max}}$	$\frac{E_3}{E_{max}}$	A	B	C	选相结果
首端	2.4308E-04	5.0008E-01	4.9992E-01	1.0000E+00	5.1221E+00	1.5903E+00	1.5904E+00	BC
中部	1.7387E-04	4.9995E-01	5.0005E-01	1.0000E+00	5.3844E+00	1.5902E+00	1.5904E+00	BC
末端	4.1891E-04	5.0010E-01	4.9990E-01	1.0000E+00	5.6582E+00	8.9573E-01	8.9595E-01	BC

4 结论

本文在暂态保护思想基础上,提出一种暂态电压故障选相算法。该算法在分析故障暂态电压特征的基础上,利用小波变换有效地提取了这些特征,仿真表明,该算法在各种故障条件下均能准确判别。

参考文献:

- [1] 薄志谦. 新一代电力系统继电保护——暂态保护 [J]. 电网技术, 1996, 20(3): 34-36
BO Zhi-qian Transient Based Protection——A New Generation of Power System Protection [J]. Power System Technology, 1996, 20(3): 34-36
- [2] 程正兴. 小波分析算法与应用 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1998
CHENG Zheng-xing Arithmetic and Application of Wavelet Analysis [M]. Xi an: Xi an Jiaotong University Press, 1998

- [3] 彭玉华. 小波变换与工程应用 [M]. 北京: 科学出版社, 1999.

PENG Yu-hua Transform and Engineering Application of Wavelet [M]. Beijing: Science Press, 1999.

- [4] 焦邵华, 刘万顺, 等. 基于故障产生的电压暂态高频分量的模糊选相新原理 [J]. 电力系统自动化, 1999, 23(9): 15-18

JIAO Shao-hua, LIU Wan-shun, et al Fuzzy Sets Based Novel Technique for Fault Phase Selection Using Fault-generated High Frequency Voltage Transient Component [J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(9): 15-18

- [5] 葛耀中. 新型继电保护与故障测距原理与技术 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1996

GE Yao-zhong New Types of Protective Relaying and Fault Location——Their Theory and Techniques [M]. Xi an: Xi an Jiaotong University Press, 1996

(下转第 46 页 continued on page 46)

参考文献:

- [1] Bishop A. 黄正,译. 固态继电器及其应用指南(一) [J]. 机电元件, 1996, 18(1): 48-64
Bishop A. HUANG Zheng, Trans Guide of Solid State Relays and Their Applications, Part [J]. Electromechanical Components, 1996, 18(1): 48-64.
- [2] Rozanov Y, Akimov E. Commutation of Static and Hybrid Switches[A]. Proceedings of the 3rd International Conference on Electrical Contacts, Arcs, Apparatus and Applications (IC-ECAAA). Xi an(China): 1997. 397-402
- [3] GJB1515A-2001 固体继电器总规范, 中国电子技术标准化研究所 [S].

General Specification for Solid State Relays, China Electronics Standardization Institute [S].

- [4] 丁道宏. 电力电子技术(修订版) [M]. 北京: 航空工业出版社, 1990
DING Dao-hong Power Electronic Technology, Revised Edition [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 1990.

收稿日期: 2004-07-02; 修回日期: 2004-08-28

作者简介:

林周布(1952-),男,高级工程师,副教授,硕士研究生导师,研究方向为电力电子技术及其应用。E-mail: lzb@fzu.edu.cn

A novel technique for a DC power control SSR driven by logical signal directly

L N Zhou-bu

(College of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350002, China)

Abstract: A novel technique for a DC power control SSR is proposed, which can drive the SSR applied to DC power control only with logical signal directly. Its feature is that the input logical signal is converted to drive power by a special isolated converter, which makes a IGBT module turn on or off quickly, without any other biased voltage sources. The converter accumulates the signal energy in short time firstly. As the energy is so large that can drive the module, the converter releases it then. Thus the advanced way of directly control SSR in the same signal line is realized. With the technique, a reset circuit of automatic discharge for energy captured in the turn-off snubber capacitor is also presented. In this paper, basic circuit construction and the design approach are presented, the operation principle of the circuit is analyzed theoretically. The circuit simulation study and experimental testing verify that the technique is feasible with better performance.

This project is supported by National Natural Science Foundation of Fujian Province (No. A0210010).

Key words: DC; solid-state relay (SSR); power control; logical signal

(上接第 7 页 continued from page 7)

收稿日期: 2004-07-02; 修回日期: 2004-09-17

作者简介:

陈茂英(1979-),女,硕士研究生,从事微机继电保护

方面的研究; E-mail: chenmaoying515@163.com

杨明玉(1965-),女,讲师,从事微机继电保护的的教学与研究工作;

张新国(1954-),男,副教授,从事微机继电保护的的教学与研究工作。

Research on a fault phase selection algorithm based on fault transient voltage

CHEN Mao-ying, YANG Ming-yu, ZHANG Xin-guo, HU Ju

(North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: On analysing the characteristic of high frequency transient voltage of various fault types, this paper puts forward a new fault phase selection algorithm based on transient voltage with wavelet transform. Using the wavelet modular maxima of transient voltage modular components and the Lipschitz exponents of transient voltage of each phase, reliable phase selection can be realized. The paper simulates a typical 500 kV transmission line and the results verify that the algorithm is correct and fast.

Key words: fault phase selection; transient voltage; wavelet transform