

超高压线路暂态保护选相研究

卜春霞¹, 张义含², 姜自强³, 吕毅⁴

(1. 许继集团技术中心, 河南 许昌 461000; 2. 上海海兰电气有限公司, 上海 201203;
3. 许继集团电网系统设计部, 河南 许昌 461000; 4. 四川省电力公司眉山公司, 四川 眉山 620010)

摘要: 在分析超高压各种故障类型模分量的特征基础上, 通过提取信号暂态波头能量, 提出了一种利用数学形态学梯度提取暂态电流故障特征进而识别故障类型的新方案。通过一个典型 500 kV 双端系统进行大量的 ATP/EMTP 仿真计算表明, 在不同位置、过渡电阻、故障初始角的情况下发生各种故障均能正确、快速地识别故障相, 与传统算法相比具有较少的计算量, 且具有更高的灵敏度和更快的故障响应速度。

关键词: 超高压输电线路; 数学形态学; 形态学梯度; 故障选相; 暂态保护; ATP/EMTP 仿真

Research on phase-selection of transient based protection for EHV line

BU Chun-xia¹, ZHANG Yi-han², JIANG Zi-qiang³, Lü Yi⁴

(1. Technology Center, XJ Group Corporation, Xuchang 461000, China;
2. Shanghai Hailan Electric Power Co., Ltd., Shanghai 201203, China;
3. Power System Design Department, XJ Group Corporation, Xuchang 461000, China;
4. Meishan Branch of Sichuan Electric Power Corporation, Meishan 620010, China)

Abstract: The paper presents a scheme of fault type identification based on extracting the fault characteristics of transient currents by mathematical morphological gradient, through analysis of characteristics of the mold component of various EHV faults, and by extracting the wavehead energy of transient signal. A large number of ATP / EMTP simulation computation of a typical 500 kV double-end system show that the fault phase can be identified correctly and rapidly if fault occurred with different locations, transitional resistances and fault initial angles. Compared with the traditional method, it has less amount of computation, a higher sensitivity and faster response to the fault.

Key words: EHV transmission lines; mathematical morphology; morphological gradient; fault phase selection; transient protection; ATP / EMTP simulation

中图分类号: TM771 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)16-0030-05

0 引言

随着我国国民经济的迅速发展, 对电力的需求日益增长, 电力系统的规模日益扩大, 电压等级不断提高, 对系统运行安全性和可靠性的要求也在不断提高。特别是面对我国电网西电东送、南北互供, 全国联网的新形势以及厂网分开的运营机制, 继电保护技术要求有新的发展, 以满足大电力系统的需要^[1]。电力系统继电保护是电力系统的必不可少的组成部分, 它在保证电力系统安全、经济和稳定运行等方面担当着非常重要的角色。由于大规模联合电力系统的建立, 系统容量迅速增加, 输电线路的数量增多, 所以系统结构和运行方式更加复杂多变,

系统的运行方式和故障的类型也越来越复杂, 为了确保系统的安全稳定运行和提高输电线路的传输能力, 要求继电保护更加可靠、快速地切除故障。选相元件对于继电保护装置的正确动作具有非常重要的作用, 快速切除故障能够提高系统的稳定性。特别是近年来得到广泛关注的基于暂态量原理的保护^[2-5]更需要快速、可靠的故障类型识别元件。

目前常用的选相元件主要有两种: 基于稳态故障量选相元件和暂态量选相元件。前者主要基于工频量, 能在大多数简单故障下正确选择故障相, 但受系统运行方式、故障过渡电阻等因素影响较大, 选相结果往往不理想; 后者主要利用行波的波头信息进行选相, 而对波头进行处理的方法也很多, 包

括神经网络和小波分析等。其中神经网络在进行数据的预处理和训练时要花费大量的时间；小波分析在处理波头信息方面有明显优势，但为了得到更理想的结果，需要取更长时间窗的分析阶数^[6]，这违背了继电保护速动性原则。

本文在数学形态学^[7]（Mathematical Morphology, MM）的基础上，通过分析各种故障类型故障电流的模电流特征，提出了一种基于数学形态学梯度（Morphological Gradient, MG）的选相方案，本文通过对一条典型的 500 kV 超高压输电线路进行仿真，ATP/EMTP 仿真结果表明该方案在线路不同位置、不同过渡电阻、不同故障初始角等情况下发生故障时均能快速准确地选择出故障相。

1 数学形态学

1.1 数学形态学基本运算

数学形态学（MM）是由法国学者 G.Matherom 和 J.Serra 根据集合代数及拓扑论提出的新的图象处理方法，它将对象集合化，对集合进行研究，对象之间可通过结构元素进行联系^[7]。数学形态学用集合来描述目标信号，通过设计一种收集信号信息的“探针”——结构元素，提取有用的信息作特征信息分析。其变换一般分为二值形态变换和灰度值形态变换。由于本文的检测对象故障电流属于一维信号，所以这里只讨论一维离散形态变换。数学形态学运算可以归结为腐蚀和膨胀两种基本的运算方法。它们各包含两个要素：被腐蚀或膨胀的对象和结构元素。令 $f(x)$ 和 $g(x)$ 分别表示一维原始信号和结构元素。设 $D_f \subseteq E$ 和 $D_g \subseteq E$ 分别表示两个函数的定义域，则利用结构体 $g(x)$ 对信号 $f(x)$ 进行腐蚀和膨胀可分别定义为^[7]：

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

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

其中： $x \in D_f$ ； $y \in D_g$ 。

由式（1）和式（2）可知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。形态学运算可以看作是用一个探针（结构元素）去局部探测图像中每一区域的几何特征。结构元素的形状大、小和其原点位置与图像信息提取有着密切的关系。

1.2 形态学梯度

在腐蚀和膨胀的基础上，即可定义基本的形态学梯度（MG）^[8]：

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

则由式（3）可知，形态梯度是由结构元素定义域内的极大和极小值之差决定的，所以形态梯度的

运算受结构元素的大小和其原点位置的影响，通常用于图像或信号的边缘检测。本文原始信号 $f(x)$ 为线路故障电流的线模分量；结构元素 $g(x)$ 为 $\{-1, 0, -1\}$ ；变量 x 为时间变量。若结构体取直线则会更有效地检测出原始信号的上升沿和下降沿，但这样会增加计算的复杂程度，需花费较长的计算时间^[9]。仿真结果表明本文所取的结构体完全满足要求，能在不丢失能量信息的条件下有效检测出信号的突变。

2 基于数学形态学（MG）的选相原理

2.1 故障暂态电流特征分析

电力系统状态可视为非故障状态与故障附加状态的叠加，以下分析故障附加状态下的电流特征。

本方案采用故障电流作为分析对象，由于输电线路各相之间存在互感耦合，以各相量为分析对象的保护会受到其他相的互感作用。为便于分析故障行波及其传播特性，继电保护领域广泛应用了模变换技术。本文采用凯伦布尔相模变换，经过转换后各模量相互独立，可从故障边界条件出发对各模量的独立网络进行分析。凯伦布尔变换矩阵^[10]为：

$$P = S * I \quad (4)$$

$$\text{其中：} S = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix}; I = \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}; P = \begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix}.$$

为了便于表达，定义模 3 量如下。

定义 模 3 量是一个线模分量，它具有以下特征：波速度为线模波速度；波阻抗为线模波阻抗。数值为 B, C 两相电流之差；该模分量以 B, C 相导线为回路。

为了识别相间故障，本文同时引入克拉克变换的 1 模分量，分别以 A, B, C 相为基准的三个新模量。综上所述我们得出选相的模变换矩阵为：

$$P' = [I_0 \quad I_1 \quad I_2 \quad I_3 \quad I_{1A} \quad I_{1B} \quad I_{1C}]^T$$

$$S' = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 2 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & 0 & 1 & -1 & 2 & -1 \\ 1 & 0 & -1 & -1 & -1 & -1 & 2 \end{bmatrix}^T$$

$$P' = S' * I \quad (5)$$

由式（4）可以知道，当 A 相接地故障时，由于故障点处的 $I_a = I_a(P)$ ， $I_a = I_b = 0$ ，各模量故障电流为：

$$I_0 = I_a(P); I_1 = I_a(P); I_2 = I_a(P); I_3 = 0;$$

$$I_{1A} = 2I_a(P); I_{1B} = -I_a(P); I_{1C} = -I_a(P)。$$

当 BC 相间故障时，相应的为：

$$I_a = 0; I_b = I_b(P); I_c = -I_b; I_0 = 0;$$

$$I_1 = -I_b(P); I_2 = I_b(P); I_3 = I_b(P);$$

$$I_{1A} = 0; I_{1B} = 3I_b(P); I_{1C} = -3I_b(P)$$

当 BC 接地故障时，相应的故障电流为：

$$I_a = 0, I_b = I_b(P); I_c = I_c(P);$$

$$I_0 = I_b(P) + I_c(P); I_1 = -I_b(P); I_2 = I_c(P);$$

$$I_3 = I_b(P) - I_c(P); I_{1A} = -I_b(P) - I_c(P);$$

$$I_{1A} = 2I_b(P) - I_c(p); I_{1A} = -I_b(P) + 2I_c(p)。$$

当 ABC 三相接地故障时，相应的故障电流为：

$$I_a = I_a(P); I_b = I_b(P); I_c = I_c(P);$$

$$I_0 = 0; I_1 = I_a(P) - I_b(P);$$

$$I_2 = I_a(P) - I_c(P); I_3 = I_b(P) - I_c(P);$$

$$I_{1A} = 2I_a(P) - I_b(p) - I_c(p);$$

$$I_{1B} = 2I_b(P) - I_a(p) - I_c(p);$$

$$I_{1C} = 2I_c(P) - I_a(p) - I_b(p)。$$

2.2 选相原理分析

本文通过计算各模分量初始波头能量的不同来提取特殊相，通过式 (6) 计算波头能量：

$$E_{im} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N |C_{ki}|^2 \quad (6)$$

设 $E_i, i=i_0, i_1, i_2, i_3, i_{1A}, i_{1B}, i_{1C}$ 分别为各电流在故障时刻的波头能量。令 $E_{\max} = \max\{E_0, E_1, E_2, E_3, E_{1A}, E_{1B}, E_{1C}\}$, $E_{1\min} = \min\{E_{1A}, E_{1B}, E_{1C}\}$, $E_{2\min} = \min\{E_1, E_2, E_3\}$, $E_{2\max} = \max\{E_1, E_2, E_3\}$ 。从上面的分析可以看出，接地与非接地故障可以通过 E_0 / E_{\max} 是否小于 ε 来区分，其中相间故障相的特殊相可以通过以 A、B、C 三相为基准的 1 模的波头能量区分，本文通过引入各模分量的波头能量 $E_i, i=i_1, i_2, i_3$ 来区分单相接地与两相接地故障，通过 $E_{2\min} / E_{2\max}$ 是否小于阈值 ε_1 来判别，对于单相接地故障的故障相通过 E_i 对应的特殊相来判别。对于两相接地故障，可以通过计算 $\{E_{i_i} / E_0 - 1\} < \varepsilon_2$ 来判别故障相， $\{i=A,B,C, E_0$ 为故障电流模 0 分量的波头能量}。

由此可以得出选相原理图如图 1 所示。

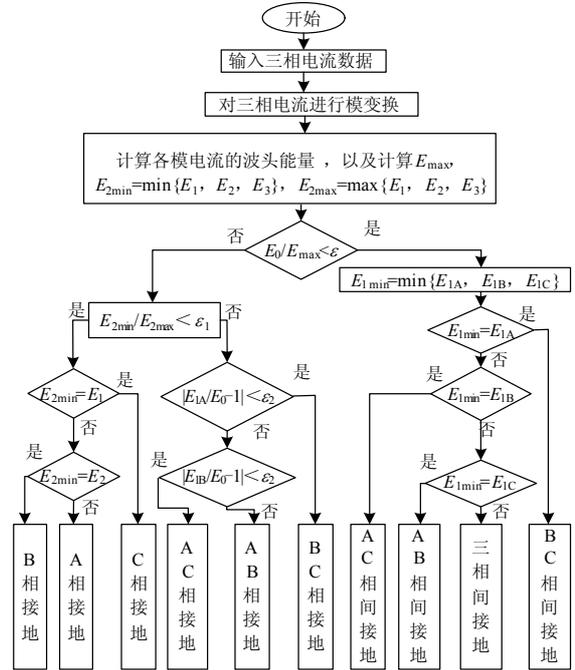


图 1 选相流程图

Fig.1 Flow chart of phase selection

3 故障选相原理的 ATP 仿真

3.1 仿真模型

系统参数：

$$Z^{m1}=1.92+j191.92 \Omega, \quad Z^{m0}=1.16+j116.33 \Omega,$$

$$Z^{n1}=1.645+j164.5 \Omega, \quad Z^{n0}=1.33+j133.33 \Omega。$$

线路参数：

$$Z^1=0.034+j0.27 \Omega/\text{km}, \quad C^1=0.0141 \mu\text{F}/\text{km},$$

$$Z^0=0.253+0.97 \Omega/\text{km}, \quad C^0=0.0171 \mu\text{F}/\text{km}。$$

本文选用图 2 所示的典型 500 kV 线路，线路和系统参数如上所示，母线对地电容为 0.1 μF ，线路两端为宽频阻波器。三相电流通过安装在 M 侧的 CT 进行测量。

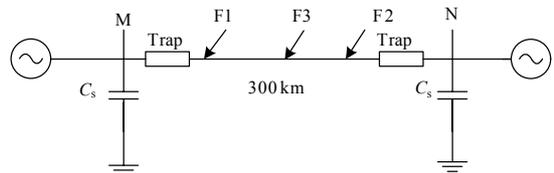


图 2 500 kV 典型系统图

Fig.2 Diagram of 500 kV typical system

针对此线路进行了一系列仿真计算，考虑的故障类型有单相接地故障、两相接地故障、两相相间故障和三相接地故障；合闸角考虑了 0° 、 45° 和 90° 三种情况；过渡电阻考虑了 0Ω 、 100Ω 和 300

Ω 三种情况; 故障距离取距M端10 km和290 km 两两种情况。经过大量的仿真验证, 本文取 $\varepsilon=10^{-8}$, $\varepsilon_1=10^{-3}$, $\varepsilon_2=0.8$ 能满足选相要求。

3.2 仿真结果

表1~4为系统发生各种不同条件故障时的选相结果, 显示了故障类型、过渡电阻、故障位置和初

始角对本方案的影响。表2为距M侧100 km、合闸角为45°的C相单相接地故障; 表3为过渡电阻为100 Ω 、合闸角为45°的C相单相接地故障; 表4为距M侧100 km (F3)、过渡电阻为100 Ω 的C相单相接地故障。由仿真结果可以看出本方案基本不受以上各种因素的影响, 可靠性较高。

表1 不同故障类型的选相结果 (F1)

Tab.1 Phase-selection result of different fault type (F1)

故障类型	$\frac{E_0}{E_{\max}}$	$\frac{E_{2\min}}{E_{2\max}}$	$E_{1\min}$	$E_{2\min}$	$ \frac{E_{1A}}{E_0}-1 $	$ \frac{E_{1B}}{E_0}-1 $	$ \frac{E_{1C}}{E_0}-1 $	选相结果
CG	0.355 27	2.84e-3	5.3338e+006	10108(E_1)	0.474 31	0.103 28	1.385 95	AG
AB	7.4552e-10	0.264 43	2.5333e+6(E_{1C})	1.7001e+7	1.34133e+9	1.13375e+9	1.98831e+7	AB
ABG	0.025 41	0.164 97	5.4562e+6	4.9861e+6	9.607 8	3.400 8	0.689 45	ABG
ABCG	1.5124e-9	0.020 7	2.9658e+7	6.1537e+5	6.6119e+8	9.4175e+7	1.7097e+8	ABCG

表2 不同故障位置的选相结果 (C相接地故障)

Tab.2 Phase-selection result of different fault location (earth fault of phase C)

故障位置	$\frac{E_0}{E_{\max}}$	$\frac{E_{2\min}}{E_{2\max}}$	$E_{1\min}$	$E_{2\min}$	$ \frac{E_{1A}}{E_0}-1 $	$ \frac{E_{1B}}{E_0}-1 $	$ \frac{E_{1C}}{E_0}-1 $	选相结果
F1	0.701 35	2.83e-3	4.0943e+6	8957.3(E_1)	0.425 8	0.330 50	1.053 4	正确
F2	0.367 68	2.57e-3	5.2481e+6	10109 (E_1)	0.587 6	0.083 62	1.719 74	正确

表3 不同过渡电阻的选相结果 (F3位置C相接地故障)

Tab.3 Phase-selection result of different transitional resistance (earth fault of phase C on F3 location)

过渡电阻	$\frac{E_0}{E_{\max}}$	$\frac{E_{2\min}}{E_{2\max}}$	$E_{1\min}$	$E_{2\min}$	$ \frac{E_{1A}}{E_0}-1 $	$ \frac{E_{1B}}{E_0}-1 $	$ \frac{E_{1C}}{E_0}-1 $	选相结果
0 Ω	0.392 74	6.1525e-4	1.9324e+7	10108(E_1)	0.124 50	0.247 91	1.546 1	正确
300 Ω	0.259 5	2.8354e-3	1.5632e+6	10108(E_1)	2.853 45	0.083 14	1.470 13	正确

表4 不同故障初始角的选相结果 (F3位置C相接地故障)

Tab.4 Phase-selection result of different fault initial angles (earth fault of phase C on F3 location)

故障初始角	$\frac{E_0}{E_{\max}}$	$\frac{E_{2\min}}{E_{2\max}}$	$E_{1\min}$	$E_{2\min}$	$ \frac{E_{1A}}{E_0}-1 $	$ \frac{E_{1B}}{E_0}-1 $	$ \frac{E_{1C}}{E_0}-1 $	选相结果
0°	0.549 7	7.4e-3	3.9433e+5	2278.5(E_1)	0.410 34	0.294 66	0.819 06	正确
90°	0.402 14	7.6e-4	1.841e+7	8216.9(E_1)	0.162 58	0.073 21	1.486 6	正确

4 故障条件因素的影响

4.1 不同故障位置的影响

从表2可以看出, 随着故障位置增加, 保护的灵敏度也随之增加; 无论在故障发生在始端还是末端, 选相元件都能正确地选相(对于C相接地, $E_{2\min}$ 始终为 E_1)。

4.2 不同故障过渡电阻的影响

从表3可以得出结论, 随着弧光电阻的增加, 零序分量的能量比例减少, 增加其灵敏度, 有利于保护的选相。

4.3 故障初始角的影响

从表4可以发现: 电压故障时刻过零时, 暂态电流的波头能量大大地减少, 电压峰值故障时, 对应的波头能量最大。对于本方案, 即使在电压零度故障时还能正确地选相。

5 结论

超高压输电线路的故障暂态电流含有丰富的故障信息。本文在分析 EHV 线路在发生各种故障模电流的基础上, 充分利用数学形态学在检测信号奇异性的优越性, 提取暂态信号的在故障时刻的波头

能量, 构成新的选相原理。仿真结果表明: 在不同过渡电阻、不同故障位置 and 不同故障初始角都能正确地选相, 具有很好的可靠性。

参考文献

- [1] 张保会. 加强继电保护与紧急控制系统的研究提高互联电网安全防御能力[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24 (7): 1-6.
ZHANG Bao-hui. Strengthen the protection relay and urgency control system to improve the capability of security in the interconnected power network[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24 (7): 1-6.
- [2] 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.
- [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] 何正友, 王晓茹, 钱清泉. 利用小波分析实现 EHV 输电线路单端量暂态保护的研究[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21 (10): 10-14.
HE Zheng-you, WANG Xiao-ru, QIAN Qing-quan. A study of EHV transmission lines non-unit transient protection based on wavelet analysis[J]. Proceedings of

the CSEE, 2001, 21 (10): 10-14.

- [5] 哈恒旭, 张保会, 吕志来. 基于暂态量超高压输电线路无通信保护的研究[J]. 电力自动化设备, 2000, 20 (4): 4-7.
HA Heng-xu, ZHANG Bao-hui, Lü Zhi-lai. Super pressure power transmission line non-communication protection based on transient component[J]. Electric Power Automation Equipment, 2000, 20 (4): 4-7.
- [6] 彭玉华. 小波变换与工程应用[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [7] 唐常青, 吕宏伯. 数学形态学方法及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 1990.
- [8] 崔屹. 图像处理与分析—数学形态学方法及应用[M]. 科学出版社, 2000.
- [9] 李婷, 杨明玉. 数学形态学在电力系统暂态信号分析的应用研究[C]. //中国高等教育电力系统及其自动化专业第二十一届学术年会论文集. 2005: 1822-1826.
- [10] 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.

收稿日期: 2009-09-15

作者简介:

卜春霞 (1977-), 女, 工程师, 从事继电保护、数字化变电站方面的技术研究工作; E-mail: Bucxxjzdh@163.com
张义含 (1977-), 男, 硕士, 工程师, 从事继电保护、水利电力自动化以及电力系统监控方面的技术研究工作;
姜自强 (1979-), 男, 工程师, 从事继电保护、变电站自动化方面的技术工作。

(上接第 29 页 continued from page 29)

- [5] Adibi M M. New approaches in power system restoration[J]. IEEE Trans on Power Syst, 1992, 7 (4): 1428-1434.
- [6] Nordman M, Lehtonen M, Takala J, et al. TETRA radio in monitoring and control of secondary substations[J]. Proc Inst Elect Eng, 2001, 9 (12): 283-286.
- [7] 童晓阳, 王晓茹, 汤俊. 电网广域后备保护代理的结构和工作机制研究[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28 (13): 91-98.
TONG Xiao-yang, WANG Xiao-ru, TANG Jun. Study on the structure and working mechanisms of wide-area backup protection agents for power networks[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28 (13): 91-98.
- [8] 朱永利, 宋少群. 基于广域网和多智能体的自适应协调保护系统的研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26 (16): 15-20.
ZHU Yong-li, SONG Shao-qun. Study on multi-agent

and WAN based adaptive coordinated protection system[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26 (16): 15-20.

- [9] Nordman M, Lehtonen M. An agent concept for managing electrical distribution networks[J]. IEEE Trans Power Del, 2005, 20 (2): 696-703.
- [10] Ferber J. Multi-agent systems—an introduction to distributed artificial intelligence[M]. MA: Addison-Wesley, 1999: 30-35.

收稿日期: 2009-05-14; 修回日期: 2010-03-05

作者简介:

孙辉 (1981-), 男, 硕士生, 研究方向为电力系统保护、控制与自动化; E-mail: sho2007@163.com
刘前进 (1967-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为继电保护软、硬件的开发, 电力系统图模一体化数字仿真系统。