

# 一种适用于暂态保护的模糊故障选相新方案

成敬周, 张举, 席晓丽, 陈琛

(华北电力大学电气工程学院, 河北 保定 071003)

**摘要:** 提出一种配合暂态保护的模糊故障选相方案, 该方案是分析暂态电流在线路上的传输耦合特征的基础上提出的。其对小波提取的一定频段暂态电流差值建立相似性测度分析, 并使用模糊集对相关性的隶属度综合评判来进行选相。基于该原理的选相装置动作迅速, 以配合暂态保护使用, 并且不受过渡电阻、故障初始角、振荡中发生故障的影响, 均能进行正确选相。EMTP对典型线路故障的仿真说明了该方法的正确性。

**关键词:** 故障选相; 测度分析; 模糊理论; 暂态保护

**中图分类号:** TM769 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2004)22-0004-05

## 0 引言

由于小波分析技术可变的时频窗及检验信号奇异性的能力, 电力系统故障时的各种暂态分量能方便提取。目前出现了一系列基于小波提取的暂态电压、电流等高频分量的超高速保护概念<sup>[1,2]</sup>。由于暂态保护是在故障初期进行故障判断的, 因此为配合其保护动作的快速性, 对故障选相元件动作速度也提出了更高要求。另外在(超)高压输电系统中, 当系统发生故障时, 不仅要能选出单相故障的相别, 以断相运行保持系统的稳定性, 还要能准确地判别相间故障的相别, 这就需要有比传统选相方法更佳的选相原理。

目前国内外学者已经提出了一些适用于暂态保护的选相方法。文献[3]提供了一种方向元件兼做选相元件的方法, 其非故障相的方向元件可能误动作, 运行并不可靠。改进型是利用行波电流幅值构成选相元件, 比较故障相和非故障相电流的故障分量峰值进行故障选相, 但受滤波器前后所出现突发性脉冲干扰影响会造成误选相。文献[4,5]构造了新型行波故障选相元件, 其计算模量初始行波电流在小波变换下的模极大值, 根据模量特征进行选相, 但对于突然出现的行波信号, 不易捕获极大值, 可能出现漏选相。文献[6]介绍了基于提取各模暂态能量特征的选相元件, 其利用三相平衡线路的模量关系进行比较选相。文献[7]提供了基于神经网络的暂态保护故障选相方法, 以上方法均取得了一定的效果。

本文将利用模糊集来识别故障的类型和相别。经小波变换提取一定频段暂态电流差的信息, 利用相关系数法建立模糊测度, 并利用模糊推理进行选

相。仿真结果表明, 该方法不受传统保护不利因素的影响, 能正确选出故障相别。

## 1 模糊集识别技术

基于模糊集的识别是指识别给定对象和哪一类模糊样本相同或相接近, 即把模糊样本分成若干类, 判别给定的对象应属于哪一类。如果在识别中考虑的因素有  $n$  个, 对每一个具体对象来说, 具有  $n$  个特性, 把每个特性用  $[0, 1]$  闭区间内无穷多个值的连续值逻辑来表示隶属度, 以  $\mu_1, \mu_2, \mu_3, \dots, \mu_n$  表示, 根据各个特征在模式识别中起的作用大小, 用一定权重  $a_i$  表示。设定阈值  $\lambda$  满足:  $\sum_{i=1}^n a_i \mu_i > \lambda$ , 则可按此阈值进行对象归类。

## 2 模糊测度分析

利用模糊集进行特征识别中, 一个重要的问题就是建立起合理的测度来衡量事物的特征性。其一般测度分析有欧氏距离法、数量积法、相关系数法、指数相似法、几何平均法等方法。本文将采用相关性测度来建立度量。相关分析是信号处理的基本方法, 目前在差动保护、行波测距等保护领域有一定应用。相关技术是用来研究两个信号波形之间的相似及相依程度的。离散信号  $x(n)$  和  $y(n)$  的互相关函数定义为:

$$r_{xy} = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} x(n) y(n) \quad (1)$$

对上式进行归一化处理, 并考虑到实际信号的有限长度, 设定某段时间内的采样点数为  $N$ , 则定义该段时间内  $r_{xy}$  为:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^N x(i) y(i)}{\left( \sum_{i=1}^N x^2(i) \sum_{i=1}^N y^2(i) \right)^{1/2}} \quad (2)$$

$r_{xy}$ 可称为归一化的相关系数,由上式知  $r_{xy} = \pm 1$  时,两个波形完全相似,其它情况下  $r_{xy}$  在 -1 到 +1 之间变化。由  $r_{xy}$  确定波形关系用于保护中不需要进行整定,具有一定的自适应性。

由小波多分辨率知识,若  $L^2(R)$  中的信号  $f(t)$  在某个子空间  $V_N$ ,则  $f(t)$  可表示为:

$$f(t) = f_N(t) = f_{N-M}(t) + \sum_{j=N-1}^{N-M} g_j(t) \quad (3)$$

上式中  $\sum_{j=N-1}^{N-M} g_j(t)$  是信号  $f(t)$  的高频细节成分,  $f_{N-M}(t)$  是信号的低频成分。按 Mallat 算法有下列分解公式:

$$\begin{cases} f_j(t) = \sum_k c(j, k) \phi(2^j t - k) \\ g_j(t) = \sum_k d(j, k) \psi(2^j t - k) \end{cases} \quad (4)$$

由上述公式可知,如果两个信号的细节部分  $g_j(t)$  和  $g_j(t)$  是相似的,则  $d_j(j, k)$  和  $d(j, k)$  也是相似的,因此可以分析其小波系数得到细节的相关性测度。

### 3 用故障产生的高频电流分量进行相关分析选相原理简析

#### 3.1 模量变换提取的特征量简析

线路经非线性一次电弧短路时,会产生一定的高频分量。高频分量是叠加在工频分量上的故障分量的一部分,其不受工频变化量的影响。现有的利用暂态分量的选相原理中,普遍采用模量变换技术,以消除输电线路各相之间存在的互感耦合作用。其各模量网络相互独立,可提取相应的故障特征进行选相。

在经 Clark 变换后的模量系统中,各分量记为模 1、模 2、模 0。其各种故障类型特征可以从工频电流信号模选相原理推得<sup>[6]</sup>,设各模量电流为  $S_1, S_2, S_0$ 。结果如表 1 所示。

表 1 不同类型故障时的模量特征

Fig. 1 Characteristics of model components

in various fault types

故障类型	单相接地	两相短路	两相接地短路	三相短路
模量特征	$S_0 = 0 \quad S_2 = 0$	$S_0 = 0 \quad S_1 = 0$	$S_0 = 0 \quad S_2 = 0$	$S_0 = 0 \quad S_1 = 0 \quad S_2 = 0$

本文将组合其它类型的判据进行判别,利用了传统的电流极性比较原理中的相间波形差作为特征量的提取,即提取暂态电流差  $i_c - i_a, i_a - i_b, i_b - i_c$  为分析的特征量。

#### 3.2 三相电流差特征的提取

由 Clark 模量变换知,其逆矩阵变换式如下:

$$\begin{bmatrix} S_A \\ S_B \\ S_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 & 1 \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

把表 1 中的模量特征代入上式,以求得相应的相特征。以下将以 A 为特殊相进行分析。

##### 3.2.1 AG 故障

对于 AG 故障,由表 1 知 0 模分量不等于零,模 2 分量为零。把  $S_2 = 0$  代入式(10)可得  $S_B = S_C$ 。即模 2 量为零的实质是对于平衡线路,由故障 A 相产生的暂态高频分量在 B、C 两相上的耦合电流是一致的,行波电流如图 1(a) 所示。

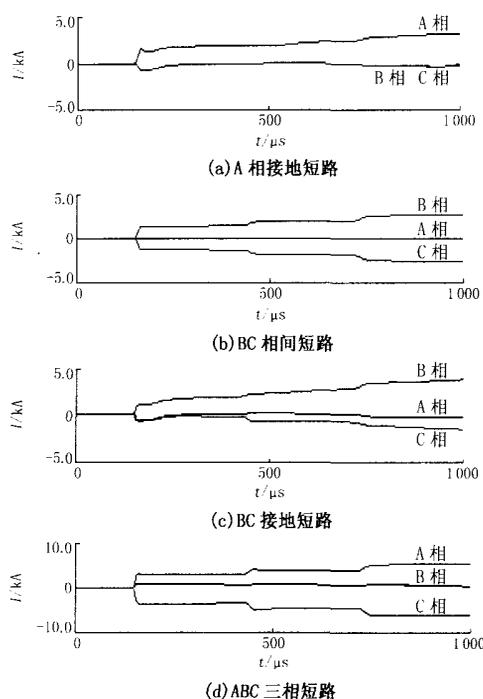


图 1 A 为特殊相 45 时各种故障暂态电流

Fig. 1 Transient currents of various fault types when phase A is special at 45°

A 相接地时三相上的电流相间波极性如图 2(a) 所示<sup>[8]</sup>。可知  $i_c - i_a$  与  $i_a - i_b$  大小相等方向相反,  $i_b - i_c$  为零,由式(3)得  $r_1(i_c - i_a, i_a - i_b) = -1$ ,  $r_2(i_a - i_b, i_b - i_c) = 0$ ,  $r_3(i_b - i_c, i_c - i_a) = 0$ 。因此得到 AG 故障时组合判据为: 0 模分量不为 0,  $r_1 = -1$ ,  $r_2 = 0$ ,  $r_3 = 0$ , 即均含故障相的两种相电流差求得的相关系数为 -1, 另两种相电流差的相关系数约为零。

##### 3.2.2 BC 相间故障

BC相间故障时,对应模0和模1分量为零。把两个边界条件代入式(10),可以得到 $S_B = -S_C$ 、 $S_A = 0$ ,其物理意义为B、C两相高频暂态电流方向相反,在A相上的耦合暂态电流分量也相反,因此A相总的暂态电流分量呈现零。对应的电流波形如图1(b)所示,电流相间波如图2(b)所示。可得到 $(i_c - i_a) = (i_a - i_b)$ ,  $(i_a - i_b) = -0.5(i_b - i_c)$ ,  $(i_b - i_c) = -2(i_c - i_a)$ 方向相反,可知三个都成相似关系。即当B、C相间短路的组合判据为:0模分量为零,  $\lambda_1 = 1$ ,  $\lambda_2 = -1$ ,  $\lambda_3 = -1$ ,即均含非故障相的两种相电流差求得的相关系数为1。

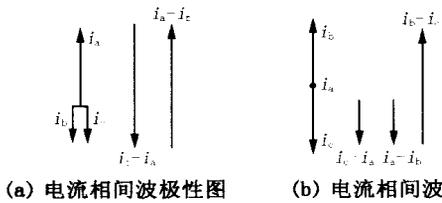


图2 行波电流示意图

Fig. 2 Currents of travelling waves generated by faults

3.2.3 BCG故障

BC相接地故障时,0模分量不为零。存在模1和模2分量,因此 $S_A = 0, S_B = 0, S_C = 0$ ,且三者不等,其差没有相似关系。即在三相传输线上均有相互耦合暂态高频电流。此时,对应相关系数为: $-1 < \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3 < 1$ ,并且可以得到故障两相 $i_b - i_c$ 的能量大于 $i_c - i_a$ 和 $i_a - i_b$ 的能量。三相波形如图1(c)所示。

3.2.4 ABC三相短路

ABC三相短路时,0模分量为零。存在模1和模2分量。类似BCG故障也可以得到 $-1 < \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3 < 1$ ,三相波形如图1(d)所示。

4 算法实现

在实际的输电系统中,由于各一次设备的暂态过程非常复杂,其高频分量难以用精确的数学模型进行解析和表达。综合智能技术中的模糊集理论能够十分有效地从多个角度实现特征提取,进行复杂系统的识别,本文对前述判据进行模糊化实现选相。在对暂态电流建立相似性测度之前,须用小波提取相应频段的暂态信息。本文采用最简单的Haar小波进行分析,其具有对称性和正交性。本文采用尺度3下的小波变换系数为 $W_x(k)$ 和 $W_y(k)$ ,则在时刻 $n$ ,固定的时间窗 $N$ 内的相关性测度

值可以表示为:

$$= \frac{\sum_{k=n-N}^n W_x(k) W_y(k)}{(\sum_{k=n-N}^n W_x^2(k) \sum_{k=n-N}^n W_y^2(k))^{1/2}} = \frac{R_{xy}}{(R_{xx}R_{yy})^{1/2}} \quad (6)$$

式中: $x, y$ 为 $i_c - i_a, i_a - i_b, i_b - i_c$ 中的任意两量, $R_{xx}, R_{yy}$ 代表时间窗内尺度3下各自的小波能量, $R_{xy}$ 代表尺度3下小波互能量。

计算求得相关性测度后,进行模糊化表达,模糊关系如图3所示。

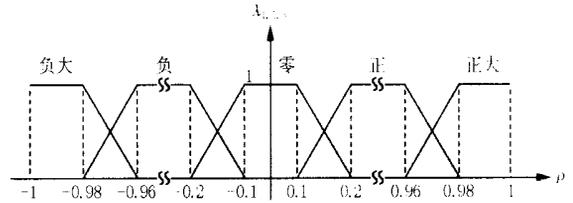


图3 模糊关系及隶属函数

Fig. 3 Fuzzy relationship and membership of

三相相关系数隶属函数输出分别为 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 。对判断是否接地的0模分量也进行模糊化。 $I_0$ 的模糊关系及隶属函数如图4所示,输出为 $\lambda_4$ 。其模糊输入为 $K_{0,R} = I_0 / R_{max}$ ,其中 $I_0 = R_{I,1}, R_{max} = \max(R(i_c - i_a, i_c - i_a), R(i_a - i_b, i_a - i_b), R(i_b - i_c, i_b - i_c))$ 。即模糊输入为零模电流小波能量与相差电流小波能量最大值的比值。当发生不接地短路时,零模量很小,所以比值很小。

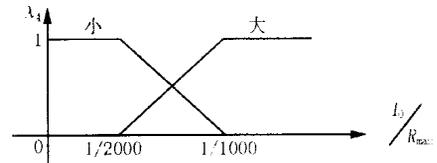


图4  $K_{0,R}$ 模糊关系及隶属函数

Fig. 4 Fuzzy relationship and membership of  $K_{0,R}$

以上节所述判据可以把各种故障归类如表2。表中以A为特殊相为例,其余情况类似。

表2 不同类型故障的模糊判据和关系

Tab. 2 Fuzzy criterion and relation between various fault types

故障类型	模糊输出			
	1/1	2/2	3/3	$K_{0,R}/4$
A G	负大	零	零	大
B C	正大	负大	负大	零
B C G	非正、负大	非正、负大	非正、负大	大
A B C	非正、负大	非正、负大	非正、负大	零

对以上4种模糊输出设定权值进行综合评判。

可设定

$$out = i_1 \cdot 0.22 + i_2 \cdot 0.22 + i_3 \cdot 0.22 + i_4 \cdot 0.34$$

当  $out > 0.9$  时判定该故障类型。再根据上节所述判据求取故障相别。归类如表 3。

表 3 故障相别特征

Tab. 3 Characteristics of fault phases

故障类型	单相接地	两相短路	两相接地短路
故障相判别方法	相关性负大的两种电流差中均含相为故障相	相关性正大的两种电流差中均含相为非故障相	相电流差能量最大的为两故障相

以上即为选相算法,可见由于获得相关系数时,除计算自能量外,比普通的能量法选相多出要计算信号之间的互能量,因此计算量稍大。但选相结果较可靠,具有较强的鲁棒性。

## 5 仿真验证

由于暂态信号中富含高频分量,EMTP 仿真线路采用依频线路模型,各种故障在线路上进行设置分析。其数据来自实际的系统。三相线路半径 2.682 cm,阻抗(考虑集肤效应)0.073 89  $\Omega$ /km,三相水平距离 12.4 m,线路高度(杆塔处)22 m,线路高度(塔间)11 m,导线分裂距离 45 cm,导线分裂角

度 45 deg,4 分裂导线;地线半径 1.425 cm,阻抗 0.36  $\Omega$ /km,两线偏心距 10.65 m,线路高度(杆塔处) = 41.05 m,线路高度(塔间) = 26.15 m,线路长度 95 km,线路如图 5。

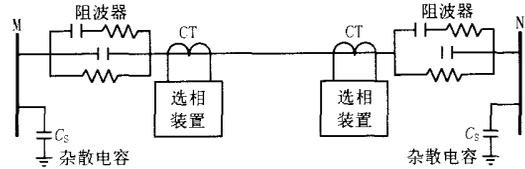


图 5 仿真系统模型

Fig. 5 Simulation system model

仿真中选取 A 相为特殊相,采样频率为  $f = 200$  kHz,在第 3 个尺度参数(频率范围为 12.5 ~ 25 kHz)下,选取 1 ms(200 点)数据,在 3 尺度下  $N = 25$  点。得到表 4,5,6,7 中不同故障角  $\theta_0$ 、不同过渡电阻  $R$ 、不同故障位置时暂态电流差的相关系数及 0 模分量,以及隶属度及综合评判结果。表中设定  $i_c = i_a - i_b$ ,  $i_b = i_b - i_c$ 。

仿真结果表明,各种故障均能选出相应的故障相。该方法在计算相关性测度时,只反映了相似性,用隶属函数进行模糊判别,不需整定,具有一定的自适应性和鲁棒性。

表 4 不同类型故障选相结果

Tab. 4 Fault phase selection results for various fault types

故障类型	(, )	1	(, )	2	(, )	3	$I_0$	4	out
AG	- 1	1	0	1	0	1	0.009	1	1
BC	1	1	- 1	1	- 1	1	0	1	1
BCG	0.479 9	1	- 0.918 1	1	- 0.651 9	1	0.003 9	1	1
ABC	0.944 8	1	0.874 4	1	- 0.955	1	5e- 5	1	1

表 5 不同初相角故障时选相结果(A 相接地)

Tab. 5 Fault phase selection results for various fault inception (phase A grounding)

$\theta' / (^\circ)$	(, )	1	(, )	2	(, )	3	$I_0$	4	out
0	1	1	0	1	0	1	0.009	1	1
45	1	1	0	1	0	1	0.009	1	1
90	1	1	0	1	0	1	0.002 5	1	1

表 6 不同过渡电阻故障时的选相结果(A 相接地)

Tab. 6 Fault phase selection results for various fault resistances (phase A grounding)

$R/$	(, )	1	(, )	2	(, )	3	$I_0$	4	out
200	1	1	0	1	0	1	0.002 6	1	1
500	1	1	0	1	0	1	0.002 6	1	1

表 7 不同位置故障时的选相结果(A 相接地)

Tab. 7 Fault phase selection results for various fault locations (phase A grounding)

故障位置	(, )	1	(, )	2	(, )	3	$I_0$	4	out
始端	1	1	0	1	0	1	0.013 1	1	1
终端	1	1	0	1	0	1	0.001 4	1	1

## 6 结语

本文提出一种利用电流高频分量进行模糊故障选相新方法。该方法在对模分量特征分析的基础上,合理地利用了几个数学分支有效地提取了线路故障时的明显区分信息,并进行多特征的综合评判。理论和仿真证明该方法原理清晰,应用于实际具有有效性和可行性,可以用保护硬件简易实现。

### 参考文献:

- [1] Bo Z Q. A New Non-communication Protection Technique for Transmission Lines[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1998, 13(4):1073-1078.
- [2] Johns A T, Aggarwal R K, Bo Z Q. Nonunit Protection Technique for EHV Transmission Systems Based on Fault-generated Noise, Part One: Signal Measurement [J]. IEE Proc — Gener, Transm, Distrib, 1994, 141(2):133-140.
- [3] Chamia M, Liberman S. Ultra High Speed Relay for EHV/UHV Transmission Lines: development Design and Application [J]. IEEE Trans PAS, 1978, 97(6):35-41.
- [4] 董新洲 (DONG Xin-zhou). 小波理论应用于输电线路行波故障测距的研究 (博士学位论文) (Study of Wavelet Theory Applied in Fault Location of Transmission Line Based on Traveling Waves, Doctoral Dissertation) [D]. 西安:西安交通大学 (Xi'an: Xi'an Jiaotong University), 1996.
- [5] DUAN Jiannong, ZHANG Bao-hui. A Novel Approach to Faulted-phase Selection Using Current Travelling Waves and Wavelet Analysis[A]. 2002 International Power Conference, 2002, 2:1146-1150.
- [6] 张保会, 哈恒旭, 吕志来 (ZHANG Bao-hui, HA Heng-xu, Lü Zhi-lai). 利用单端暂态量实现超高压线路全线速动保护新原理的研究 (三) —— 故障选相与尚需解决的问题 (Study of Nonunit Transient-based Whole-line High Speed Protection for EHV Transmission Line — Part Three: Fault Phase Selection and Problems to Be Studied) [J]. 电力自动化设备 (Electric Power Automation Equipment), 2001, 21(8):1-4.
- [7] Bo Z Q, Aggarwal R K, Johns A T, et al. A New Approach to Phase Selection Using Fault Generated High Frequency Noise and Neural Networks[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1997, 12(1):106-115.
- [8] 葛耀中 (GE Yao-zhong). 新型继电保护与故障测距原理与技术 (New Types of Protective Relaying and Fault Location Their Theory and Techniques) [M]. 西安:西安交通大学出版社 (Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press), 1996.

收稿日期: 2004-03-24; 修回日期: 2004-07-05

### 作者简介:

成敬周 (1980 - ), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为微机保护及相关领域; E-mail: cjzpower@sohu.com

张 举 (1946 - ), 男, 教授, 从事电力系统微机保护理论研究及产品的开发。

## A novel scheme to fuzzy faulted-phase selection applied to transient protection

CHENG Jingzhou, ZHANG Ju, XI Xiaoli, CHEN Chen

(School of Electrical Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

**Abstract:** A new scheme for fuzzy fault-phase selection in EHV power system cooperated to transient protection is presented. This scheme is based on the characteristics of the coupling transient circuit. Correlation algorithm, that is a kind of fuzzy measurement analysis is applied to the results which extracted from the high-frequency signals by wavelet transform. By analyzing the characteristics of faults, a series of new principles are preferred based on fuzzy set. The scheme acts vary fast in EHV power system without influence of transient resistance, fault inception angle and power swing. All the conclusions are verified by the EMTP simulation.

**Key words:** fault phase selection; fuzzy measurement analysis; fuzzy theory; transient protection

## 居民电价可能上调 考虑分段收费“峰谷电价”

央视报道:由国家电监会和亚洲开发银行合作制定的“中国电力定价改革方案”将于12月出台。按照此方案,居民电价可能适当上调,但整体电价仍会保持稳定。

亚洲开发银行中国电价改革项目负责人林伯强表示:现在(我国)居民(电价)付得比较低,居民电价比工业低,这是不合理的。工业负荷平稳,而居民是集中用电,“峰”上消费,必须加大投资才能满足这部分消费,成本较高。林伯强表示,此次调整可望给电力需求大的企业一个更合理的定价。

此外,电价调整还将在全国范围对居民和所有行业用电统一实施分时段消费,峰谷定价。此前,“峰谷定价”已在部分地区针对工业和商业企业施行。