

灰色关联分析在输电线故障判相中的应用

周静¹, 陈允平¹, 梁劲², 周策³

(1. 武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072; 2. 武汉大学系统工程研究所, 湖北 武汉 430072;
3. 国家电网公司, 北京 100053)

摘要: 基于灰色关联度理论, 提出了将灰色关联分析用于判断输电线的故障类型。把各种故障类型与 RTDS 的真实故障波形运用灰色关联度进行分析, 运用实例验证了该方法评判输电线故障类型的正确性、可行性。

关键词: 灰色关联分析; 判相; 输电线

中图分类号: TM762.2 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2004)14-0001-04

0 引言

在行波故障定位中, 每一种故障类型不受过渡电阻大小和系统运行方式的影响, 波形大体保持相似, 而灰色关联分析就是根据序列曲线集合形状大体相似程度来判断其联系是否紧密。基于这一点本文运用灰色关联分析方法结合 RTDS 的真实故障模型对发生的故障进行判相。目前在高压线路保护中所采用稳态故障量选相元件(不包括突变量选相元件)主要有两类, 一类为阻抗选相, 这类选相元件主要依据阻抗测量元件的测量结果来确认故障相, 它在大多数简单故障的情况下能正确选择故障相, 但它受系统运行方式、故障点的过渡电阻影响较大, 选相结果往往不很理想。另一种广泛采用以零序电流和负序电流的相位差来判别故障相别的谓之序分量的选相元件^[1~3]。序分量选相元件具有受故障点过渡电阻的影响较小和不受负荷电流影响等优点, 但也存在两个缺陷: 一是不能区分单相接地和两相接地, 必须采用其它辅助选相方法; 二是在转换性故障(一点在保护正方向, 另一点在保护反方向)中, 零序电流和负序电流的相位不能正确反映故障相别, 要误选相, 在同杆并架线路的跨线故障中也存在类似的问题。我们在行波故障定位中采集到大量故障数据, 这些数据的波形跟真实故障波形很相似, 我们运用灰色关联分析对发生的故障进行判相, 判断结果不受系统运行方式、故障点的过渡电阻影响, 能有效区分单相接地和两相接地实验, 结果说明了该方法的真实可靠性。

1 灰色关联分析原理

1.1 灰色关联分析的描述

灰色关联是指事物之间不确定关联。关联分析

主要是对事物态势发展变化的分析, 也就是对系统动态发展过程的量化分析, 它根据因素之间发展态势的相似或相异程度来衡量因素间的接近程度。灰色关联分析是灰色系统理论的一种新的分析方法, 它是用关联度大小来描述事物之间、因素之间关联程度的一种定量化的方法。它以系统的定性分析为前提、定量分析为依据, 进行系统因素之间、系统行为之间曲线相似性的关联分析。灰色关联度则是描述事物间在发展过程中, 因素间相对变化的大小、方向和速度等等, 如果两因素在发展过程中, 相对变化基本一致, 则认为两者关联程度大, 反之亦反。因此灰色关联分析的基本思想是根据序列曲线几何形状的相似程度来判断其联系是否紧密。曲线越接近, 相应序列之间的关联度就越大, 反之就越小。由于关联分析是按发展趋势作分析, 因而对样本的大小没有太高的要求, 分析时也不需要典型的分布规律, 而且分析结果一般与定性分析相同。

1.2 灰色关联公理与灰色关联度

设 $X_0 = (x_0(1), x_0(2), \dots, x_0(n))$ 为系统特征序列, 在本文中特征序列就是我们要进行判相的故障数据。我们在行波故障实验中采集了各种故障类型的线路两端的数据, 我们只需选择一端的 ABC 三相数据作为特征序列。且

$$X_1 = (x_1(1), x_1(2), \dots, x_1(n))$$

... ..

$$X_i = (x_i(1), x_i(2), \dots, x_i(n))$$

... ..

$$X_m = (x_m(1), x_m(2), \dots, x_m(n))$$

为相关因素序列。该相关因素序列就是我们从 RTDS 采集的各种标准故障数据序列, 给定实数 $(x_0(k), x_i(k))$, 若实数

$$(X_0, X_i) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (x_0(k), x_i(k)) \quad (1)$$

在式(1)中:

$$(x_0(k), x_i(k)) = \frac{\min + \max}{|x_0(k) - x_i(k)| + \max}$$

式中: $|x_0(k) - x_i(k)|$ 是 $(x_0(k), x_i(k))$ 两序列在第 k 个元素处的绝对差; $\min = \min \min |x_0(k) - x_i(k)|$ 为两级最小差, 其中 $\min |x_0(k) - x_i(k)|$ 是第一级最小差, 表示在第 x_i 曲线找出各点与 x_0 的最小差, $\min \min |x_0(k) - x_i(k)|$ 是第二级最小差, 表示在各曲线中, 找出最小差的基础上, 再按 $i = 1, 2, \dots$ 找出所有曲线 x_i 中的最小差; $\max = \max \max |x_0(k) - x_i(k)|$ 其意义与最小差相同; α 为分辨系数, $\alpha \in [0, 1]$, 这里乘以 α 是为减小极值时对计算的影响, 从而可以提高分辨率, 可调节关联系数 $(x_0(k), x_i(k))$ 的大小和变化区间。 (X_0, X_i) 满足:

1) 规范性

$$0 < (X_0, X_i) \leq 1, \quad (X_0, X_i) = 1 \Leftrightarrow X_0 = X_i$$

2) 整体性

对于

$$X_i, X_j \quad X = \{ X_s | s = 0, 1, 2, \dots, m; m \geq 2 \}$$

$$(X_i, X_j) = (X_j, X_i) \quad (i, j)$$

3) 偶对称性

对于 $X_i, X_j \in X$, 有

$$(X_i, X_j) = (X_j, X_i) \Leftrightarrow X = \{ X_i, X_j \}$$

4) 接近性

$|x_0(k) - x_i(k)|$ 越小, $(x_0(k), x_i(k))$ 越大,

则称 (X_0, X_i) 为 X_i 对 X_0 的灰色关联度, 我们可以分别求出 ABC 三相的灰色关联度, $(x_0(k), x_i(k))$ 为 X_i 对 X_0 在 k 点关联系数, 并称条件 (1), (2), (3), (4) 为灰色关联四公理。

在灰色关联四公理中, $(X_0, X_i) \in (0, 1]$ 表明系统中任何两个序列都不可能是严格无关联的。

整体性则体现了环境对灰色关联比较的影响, 环境不同, 灰色关联度也随之变化, 因此对称原理不一定满足。

偶对称性表明, 当灰色关联因子集中只有两个序列时, 两两比较满足对称性。

接近性是对关联度量化的约束。

2 分析步骤

图 1 是从 RTDS 采集到的标准故障模型, 图 2 是

从我们研制的 AHL2001 故障定位装置中采集到的数据波形, 其实根据经验我们从故障后的波形就很容易判断该故障为何种故障类型。但主观的判断缺乏理论根据。从图 1 和图 2 的比较中我们发觉图 2 和图 1 中的 AB 相短路的波形很相似, 我们还做了各种故障类型的实验, 发现每一种故障类型的波形总是与标准故障类型的某种故障波形相似, 这表明我们可以通过故障波形的相似性来判断故障类型, 而理论实验的结果也表明用灰色关联度来判断是行之有效的。

2.1 被比序列的选定

在同一种故障类型当中, 无论故障点在何处, 输电线两端采集到数据波形无很大的变化, 因此对同一种故障, 故障的波形在两端可以认为是相同的。我们以在 RTDS 中采集到的各种故障波形为被比序列。在本文中以十种故障类型为参考波形: A 相短路接地, AB 相间短路, AB 相间短路接地, ABC 三相短路, B 相短路接地, BC 相间短路, BC 相间短路接地, C 相短路接地, AC 相间短路, AC 相间短路接地。其十种标准故障波形如图 1 所示。我们在各种故障发生前取 20 个点, 故障发生后取 80 个点。

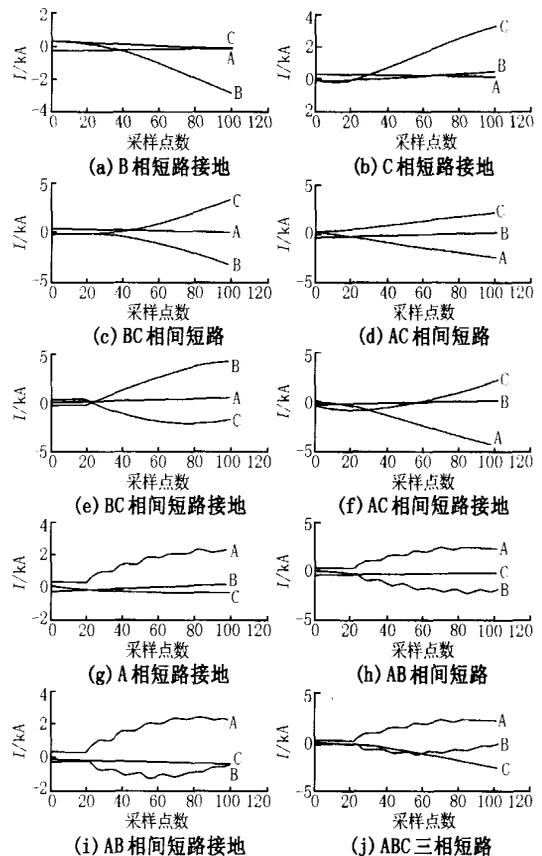


图 1 十种标准故障波形

Fig. 1 Ten waveforms of standard faults

标准被比序列 X_j 表示为:

$$X_j = \{ X_j(k) \} = \{ X_j(1), X_j(2), \dots, X_j(n) \}$$

$$j=1, 2, 3, 4; \quad k=1, 2, 3, \dots, 100$$

进行系统分析,选准系统行为特征的映射量后,还需要进一步明确影响系统主行为的有效因素。如要作量化研究分析,则需对系统行为特征映射量和各有效因素进行适当处理,通过算子作用,使之化为数量级大体相近的无量纲数据,并将负相关因素转化为正相关因素。为了便于分析,我们采用初值化方法对数据进行处理。

令 $X_j = (x_j(1), x_j(2), \dots, x_j(n))$ 为因素 X_j 的行为序列, D 为序列算子,且 $X_j D = (x_j(1) d, x_j(2) d, \dots, x_j(n) d)$, 其中 $x_j(k) d = x_j(k) / x_j(1)$; $k=1, 2, \dots, n$, 则称 D 为初值化算子。

2.2 参考序列的选定

我们以在故障定位中采集到各种故障的数列为参考数列,由于我们采集到数据含有大量噪声,所以我们首先进行小波包消噪处理,又因为我们的采样率很高,必须在消噪后按照 RTDS 的采样率进行归算。

以 AB 相短路为例,如图 2 所示。

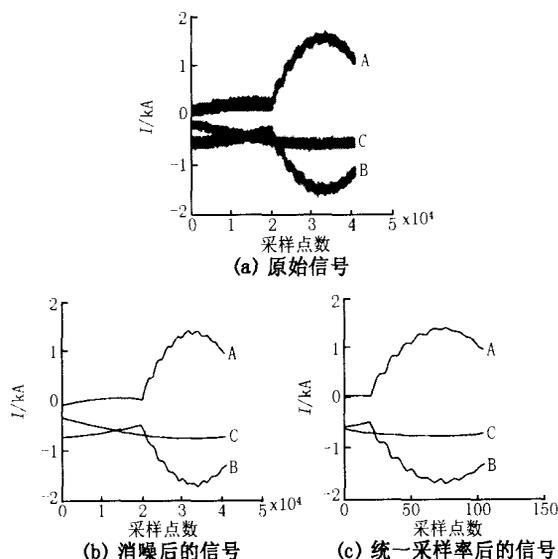


图 2 AB 相短路波形

Fig. 2 Waveforms of phase A and B fault

其实我们从参考图形和被比图形中可以很直观的判断出该故障属于何种故障类型。为了从数学上更明了的表示这种相似关系,现在求出参考序列与被比序列的关联系数。参考序列为:

$$X_{0i} = (x_{0i}(1), x_{0i}(2), \dots, x_{0i}(n))$$

初始化后的序列:

$$X_{0i} = (x_{0i}(1), x_{0i}(2), \dots, x_{0i}(n))$$

2.3 求关联系数

将式(2)结合具体条件稍作变形,参考序列与被比序列的关联系数为:

$$o_{ij}(k) = \frac{\min + \max}{o_{ij}(k) + \max}$$

式中:

$$o_{ij} = |X_{0i}(k) - X_j(k)|$$

$$\min = \min \min |X_{0i}(k) - X_j(k)|$$

$$\max = \max \max |X_{0i}(k) - X_j(k)|$$

根据约束条件,本文取 $\alpha = 0.6$ 。

灰色关联度的计算:

$$o_{ij} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n o_{ij}(k)$$

该公式可将结果较多、信息过于分散、不便于比较的关联系数集中用一个值体现出来。

经计算可得 A、B、C 三相的灰色关联度分别如表 1 所示。

表 1 灰色关联度

Tab. 1 Gray relational analysis

故障类型	A 相	B 相	C 相
B 相短路接地	0.006 787 4	0.006 913	0.007 760 3
C 相短路接地	0.007 320 6	0.006 236	0.003 816 7
BC 相短路	0.007 166 6	0.006 292	0.003 717 2
AC 相短路	0.004 939 9	0.006 598	0.004 241 6
BC 相短路接地	0.007 193 0	0.003 717	0.006 378 0
AC 相短路接地	0.003 714 9	0.006 622	0.004 611 4
A 相短路	0.007 427 8	0.006 557	0.007 912 4
AB 相短路	0.007 508 7	0.008 419	0.007 917 2
AB 相短路接地	0.007 217 4	0.007 736	0.007 917 5
ABC 相短路接地	0.006 358 4	0.007 338	0.006 358 4

我们在 A、B、C 各相中都要挑出每一相的最大关联度系数,从而可以判断故障类型。在表 1 中,A 相短路,AB 相短路,AB 相短路接地,ABC 相短路接地中 A 相的各关联度系数非常接近,即在参考序列 A 相波形与被比序列中各 A 相波形很是接近,这一点可以从图 1 与图 3 很明显的看出。但是 A 相的第八行中关联度系数最大。

从表 1 中可以看出 B 相的第八行关联度系数最大,我们从而可以判断故障为第八种故障类型,这与我们的实际故障类型相符合。

为了更直观的得出结论,我们采用各相的相对关联度方法,即:

$$r = \frac{r_p(k) - \max r_p(k)}{\max r_p(k)} \quad p = A, B, C$$

相对关联度如表 2 所示。

表 2 相对灰色关联度

Tab. 2 Relative gray relational analysis

故障类型	A 相	B 相	C 相
B 相短路接地	- 0.096 057	- 0.178 94	- 0.019 846
C 相短路接地	- 0.025 038	- 0.259 35	- 0.517 94
BC 相短路	- 0.045 55	- 0.252 66	- 0.530 5
AC 相短路	- 0.342 11	- 0.216 29	- 0.464 27
BC 相短路接地	- 0.042 038	- 0.558 52	- 0.194 44
AC 相短路接地	- 0.505 25	- 0.213 49	- 0.417 56
A 相短路	- 0.010 771	- 0.221 21	- 0.000 634
AB 相短路	0	0	- 0.000 369
AB 相短路接地	- 0.038 791	- 0.081 15	0
ABC 相短路接地	- 0.153 2	- 0.128 45	- 0.196 92

从表 2 中我们可以看出,灰色关联度越大,该数据的相对误差的绝对值就越小。在表 2 中第八行的 A 和 B 相的相对误差为零,虽然 C 相的关联度系数不是最大,但是它的相对误差是最小的,我们由此可以判断为 AB 相短路,这正好和我们的实验结果相符合。

再如 A 相短路接地的灰色关联度如表 3 所示。

表 3 灰色关联度

Tab. 3 Gray relational analysis

故障类型	A 相	B 相	C 相
B 相短路接地	0.006 236 8	0.004 762 0	0.007 905 8
C 相短路接地	0.006 596 1	0.008 398 5	0.003 818 3
BC 相短路	0.006 466 8	0.004 371 4	0.003 717 1
AC 相短路	0.004 727 1	0.009 076 1	0.004 269 7
BC 相短路接地	0.006 914 8	0.003 726 5	0.006 269 8
AC 相短路接地	0.003 714 5	0.009 066 2	0.004 630 2
A 相短路	0.009 109 3	0.008 953 1	0.007 902 0
AB 相短路	0.008 599 2	0.005 564 6	0.007 906 8
AB 相短路接地	0.008 614 3	0.007 074 8	0.007 907 1
ABC 相短路接地	0.008 079 3	0.007 118 7	0.008 079 3

相对关联度见表 4。

表 4 相对灰色关联度

Tab. 4 Relative gray relational analysis

故障类型	A 相	B 相	C 相
B 相短路接地	- 0.315 34	- 0.475 33	- 0.021 477
C 相短路接地	- 0.275 89	- 0.074 663	- 0.527 39
BC 相短路	- 0.290 09	- 0.518 36	- 0.539 092
AC 相短路	- 0.481 07	- 0.013 55	- 0.471 52
BC 相短路接地	- 0.240 91	- 0.589 41	- 0.223 97
AC 相短路接地	- 0.592 23	- 0.001 088	0.426 91
A 相短路	0	0	- 0.021 94
AB 相短路	- 0.055 998	- 0.386 89	- 0.021 343
AB 相短路接地	- 0.054 338	- 0.220 5	- 0.021 306
ABC 相短路接地	- 0.113 07	- 0.215 67	0

从表 3 和表 4 我们很容易的判断出为 A 相短

路接地。

我们还做了其它各种情况,实验精度很高,因此用灰色关联度判断故障类型的方法确实是可行的。

3 结论

本文运用灰色关联度对输电线的故障类型进行了研究,通过理论与实例证明了该方法的有效性与可行性。

该方法对采样率要求不高,同时对数据的精度要求也不高,我们采集的数据含有大量的噪声,在对信号进行小波包或其它消噪时,我们只需要消噪后信号的波形不变,即可用该方法进行故障类型的判断。

我们先用波形进行初判,然后再用关联度进行精确判断,若是两相故障或三相故障,在用关联度判断时,被比序列不需进行初值化,判断结果反而更精确。

该算法是在 MATLAB 下编程实现的,程序编写简单,可操作性强,该判相方法可利用故障定位的数据直接进行判相,一举两得,与其它选相方法相比,成本低。

参考文献:

- [1] 朱声石 (ZHU Sheng-shi). 高压电网继电保护原理与技术 (第二版) (The Relay Protection Theory and Technology of High Voltage Grid, Second Edition) [M]. 北京:中国电力出版社 (Beijing:China Electric Power Press), 1995.
- [2] 葛耀中 (GE Yao-zhong). 新型继电保护故障测距原理与技术 (The Theory and Technology of Fault of New Relay Protection) [M]. 西安:西安交通大学出版社 (Xi'an:Xi'an Jiaotong University Press), 1996.
- [3] 徐振宇 (XU Zhen-yu). 一种序分量高压线路保护选相元件 (A Sequence Fault Phase Selector for Transmission Line Protective Relay) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 1997, 17(3): 214-216.
- [4] 刘思峰, 郭天榜, 党耀国, 等 (LIU Si-feng, GUO Tiarr bang, DANG Yao-guo, et al). 灰色系统理论及其应用 (Theory and Application of Gray System) [M]. 北京:科学出版社 (Beijing:Science Press), 1999.

收稿日期: 2003-10-27; 修回日期: 2004-01-16

作者简介:

周 静 (1975 -), 女, 博士研究生, 研究方向为输电线中的故障定位; E-mail: zhoujinghello @163.com

陈允平 (1945 -), 男, 博士生导师, 研究方向为高电压技术, 电力系统保护与控制。

介损角测量中非同步采样算法的研究

陈楷, 王卉, 张承学

(武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 介绍了基波相位分离法测量介质损耗角的原理, 指出了目前的软件同步采样措施难以实现真正的同步采样, 并通过推导得出非同步采样条件下的基波相位分离法的算法。使用本算法, 在测量时可以有固定采样率进行采样, 不必根据电网频率调整采样间隔。仿真结果表明, 该算法具有很高的精度。

关键词: 介质损耗角; 基波相位分离法; 非同步采样

中图分类号: TM835.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2004)14-0005-03

0 引言

介质损耗角是反映高电压电气设备绝缘性能的一项重要指标。通过测量介质损耗角可以反映出绝缘的一系列缺陷, 如绝缘受潮、劣化变质或绝缘中有气体发生放电等。由于实际高压电气设备的介质损耗角通常很小, 因而对测量的绝对精度要求较高。本文对用基波相位分离法测算介质损耗角时由于非同步采样引起的误差进行了分析, 并提出了非同步采样下的补偿算法。

1 测量原理及误差

通常电容型设备的绝缘结构可以等效成无损电容 C 和电阻 R 的并联(或串联)电路的物理模型, 因此设备上加电压 U 时, 流过设备的电流就含有容性电流和阻性电流。流过设备基波电流和设备两端基波电压的相角差的余角我们定义为介质损耗角, 其正切值即介质损耗因数。由于通常情况下流过设备的阻性电流相比容性电流很小, 所以介质损耗角很小。

实际中由于电压和电流信号中含有高次谐波, 它们对基波相位的测量有不可忽视的影响^[1]。要实现介质损耗角的高精度测量, 必须消除谐波影响。

目前常用的算法是基波相位分离法(傅氏算法)^[2]。基波相位分离法利用三角函数的正交性, 通过采样信号与基波频率的正余弦样品函数进行周期积分(即在进行傅立叶变换的时候, 信号只对基波频率进行变换), 从而得到需要的基波分量的幅值和相位特征信息。具体过程如下:

设电压信号为 $u = U \sin(\omega t + \varphi)$ 。令

$$A = \int_0^T u \cos \omega t d(\omega t) = U \sin \varphi \quad (1)$$

$$B = \int_0^T u \sin \omega t d(\omega t) = U \cos \varphi \quad (2)$$

这样可得电压基波的初相角的正切值 $\tan \varphi = A/B$, 同理可得电流基波的初相角的正切值。从而可算出两者的相角差, 进而得到介质损耗角。

实际测量过程中, 需将式(1)、(2)用数值积分方法离散化。设采样间隔为 T_s , 被测信号的基波周期为 T , 且 $T = N \cdot T_s$, 即一个周期采样 N 点。

则令

$$A = \sum_{k=0}^{N-1} u(k) \cos \frac{2\pi}{N} k \quad (3)$$

$$B = \sum_{k=0}^{N-1} u(k) \sin \frac{2\pi}{N} k \quad (4)$$

Application of grey relational analysis to judging the type of fault phase in transmission line

ZHOU jing¹, CHEN Yurping¹, LIANG Jin², ZHOU Ce³

(1. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. Institute of System Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 3. State Grid Corporation of China, Beijing 100053, China)

Abstract: Based on the principle of grey relational analysis, the application of judging the fault type of transmission line is proposed. With the grey relational analysis of actual fault data from all kinds of fault types and RTDS, the type of fault phase is obtained. And the test demonstrates that the proposed method is reliable and feasible.

Key words: grey relational analysis; judging the type of fault phase; transmission line