

基于相关分析的同杆双回线故障序分量选相研究

唐宝锋, 徐玉琴

(华北电力大学电气工程学院, 河北 保定 071003)

摘要: 提出一种基于相关分析的同杆双回线故障序分量选相元件, 采用六序复合序网法作为基本的分析方法。六序复合序网直观地反映了同杆双回线各种故障时六序故障分量之间的相位关系和幅值关系, 为故障选相提供了简单、方便的手段。相关分析法应用于故障选相可以迅速、准确地反映故障分量之间的相位关系。通过大量的仿真计算, 验证了该原理的正确性和有效性。

关键词: 双回线; 故障选相; 相关分析; 故障分量

中图分类号: TM771 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2005)09-0039-04

0 引言

目前电力系统中, 超高压同杆双回线的保护主要有分相式电流纵联差动保护及方向纵联或距离纵联保护^[3]。纵联保护在很大程度上受通道可靠性的制约, 我国目前电力系统通道十分拥挤, 许多线路难以满足通道要求, 因此研究反应单端量的双回线保护具有重要意义。

同杆双回线故障类型多达 120 种, 其中跨线故障约占 82%。因此, 如何正确区分跨线故障类型是双回线故障选相的关键所在。传统的选相元件, 如相电流差突变选相, 序电流比相选相, 一般能正确区分单回线的简单故障类型, 但是在双回线跨线故障时, 可能会误选相。六序分量是通过消去相间互感和线间互感而得到的相互独立的序分量。当故障类型确定后, 六个序分量之间的相位关系和幅值关系也就随之确定, 并且不受系统参数变化和过渡电阻的影响。

本文提出一种新型的双回线选相原理, 将数字信号处理的相关分析法应用于故障信号的分析中, 能够快速、准确地识别故障信号之间的相位关系, 为准确地故障选相奠定了基础。通过 ATP 仿真验证, 该方法对于各种双回线故障类型都能正确识别。

一般认为, 正序和负序电流的分支系数相同, 而且, 对于 110 kV 以上的高压及超高压线路及系统, 一般零序及负序的电流分支系数相位之差都很小^[4]。本文所提原理中选用的裕度角较大, 并且进行幅值比较的各个量均存在着明显的大小关系 (远大于或远小于的关系), 因此, 输电线路中电流分支系数对各序电流相角差及幅值比较结果的影响较小。本文只是提供了一种同杆双回线故障选相的可

行性方案, 为了理论分析的简便, 将不考虑电流分支系数的影响。在如图 5 所示的实际仿真系统中, 取 M 侧保护的线路电流, 在各种故障时所得结果均能正确选择故障相, 这也从实际验证了以上分析的正确性。如果在实际的选相元件中想尽可能的精确, 考虑到在双回线系统中反序网 F_0 、 F_1 、 F_2 的阻抗仅取决于双回线本身而和系统阻抗无关, 且电流分支系数都相同, 在选相过程中尽可能利用 F_0 、 F_1 、 F_2 之间的相位关系, 这样就大大减弱了分支系数及系统阻抗对选相灵敏度的影响。以下分析均采用故障分量, 因此选相结果不受负荷电流的影响。

1 相关分析法简介

由文献 [6] 可知, 对于功率型信号, 两信号 $x(t)$ 和 $y(t)$ 之间的相关系数应为:

$$r_{xy}(\tau) = \frac{\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T x(t)y(t+\tau) dt}{\sqrt{\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T x^2(t) dt} \sqrt{\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T y^2(t+\tau) dt}} \quad (1)$$

式中: r_{xy} 为信号 $x(t)$ 和 $y(t)$ 的相关系数, τ 为信号相差的时间。

令 $\tau = 0$, 则 $r_{xy}(0)$ 表示为同一数据窗内两路信号的相关系数。若两路信号均为正弦函数, 如 $x(t) = A \sin(\omega t)$, $y(t) = B \sin(\omega t + \theta)$, 通过式 (1) 可以得出:

$$r_{xy}(0) = \cos \theta \quad (2)$$

上式表明, 两个相同频率的正弦信号之间的相关系数是它们相位差的余弦函数。由此可见, 利用相关系数可以很好地确定两个信号的相位关系。

相关系数 r_{xy} 可以用来描述两个信号波形的相

似或相依程度。当 $x(t) = x_y y(t)$, 且 $x_y > 0$ 时, 表示信号 $x(t)$ 和 $y(t)$ 的波形相同, 仅有幅度上的放大或缩小, $x_y = 1$; 当 $x(t) = x_y y(t)$, 且 $x_y < 0$ 时, 表示信号 $x(t)$ 和 $y(t)$ 的波形相同, 极性相反, 幅度上也有放缩, $x_y = -1$ 。这就是说, $|x_y| = 1$ 表明两个信号的波形是相同的, 一个信号 ($x(t)$) 可以用另一个信号 ($y(t)$) 乘以一个非零实数来表示, 这种表示的相对误差为 0, 表明这种表示是精确的。相反, 若相关系数 $x_y = 0$, 表明信号 $x(t)$ 和 $y(t)$ 的波形毫无相似之处。一般情况下, $0 < |x_y| < 1$, $|x_y|$ 越接近于 1, 表示近似程度愈高; 反之, $|x_y|$ 越接近于 0, 表示近似误差愈大。

2 同杆双回线选相原理

文献 [1] 详尽介绍了各种故障时同杆双回线的六序故障分量特征, 在此不再赘述。根据六序分量的相位特征, 可以将 120 种故障归纳为 13 个具有独立相位特征的故障类型, 而每一种故障的相位特征都可以由这 13 种类型故障推演出来。此 13 类故障为: 1) AG; 2) BC; 3) ABC; 4) B IC; 5) BC IB; 6) BC IC; 7) A IBC; 8) AB IBC; 9) ABC IA; 10) ABC IBC; 11) A IAG; 12) BC IBC; 13) ABC I-ABC。

双回线故障类型总体上可分为 3 类: 单回线故障、同名相跨线故障及非同名相跨线故障。图 1 为区分这 3 类故障的流程图。根据在各种故障条件下六序电流分量的特征可知, 当 $I_{T0} = 0$ 时, 为不接地故障, 反之为接地故障。当同名相发生跨线故障时 (如 BC IBCG), I_{F0} 、 I_{F1} 、 I_{F2} 均为 0。A IBC 类故障比较特殊, 在接地故障时 I_{T0} 仍然为零, 因此无法判断此种故障是否接地, 但并不影响选相结果。

图 1 中, I_{T0} 、 I_{F1} 、 I_{F2} 分别为零序、正序和负序电流的同序量, I_{F0} 、 I_{F1} 分别为零序和正序电流的反序量, 其中, 正序电流均为故障分量。 ρ_1 为 I_{F0} 、 I_{F1} 在 $I_{T0} = 0$ 时的相关系数, $\rho_1 = \cos(\arg I_{F0} / I_{F1})$ 。单回线接地故障时, I_{F0} 、 I_{F1} 相差 0 或 180°, 因此 $|\rho_1| = 1$ 。然而非同名相跨线故障类型中的 ABC IA 和 AB- CIAB 也符合此关系, 但在三相类故障 (包括有 ABC 三相的单回线及跨线故障) 中有 $|I_{T0}| \ll |I_{F1}|$ 及 $|I_{T2}| \ll |I_{F1}|$, 因此附加判据 $|I_{F1}| < 10|I_{T0}|$ 及 $|I_{F1}| < 10|I_{T2}|$ 即可将此两种故障排除。

2.1 同名相跨线故障类型的识别

需要注意的是, A IA、B IB、C IC 故障时的相位特征与正常时完全相同, 不影响线路的运行, 因而

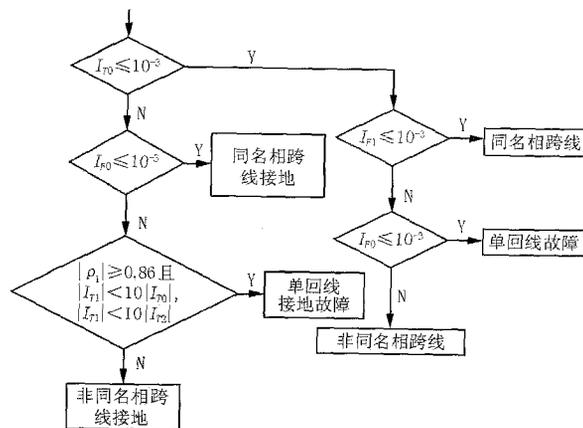


图 1 故障识别流程图

Fig 1 Flow chart of fault types discriminating

在选相中不考虑此种故障。对于不接地故障, 存在两种故障类型, BC IBC 和 ABC IA BC。若 $I_{T2} = 0$, 为 ABC IA BC 故障; 反之, 为 BC IBC 故障。

若为接地故障, 故障识别流程图如图 2 所示。

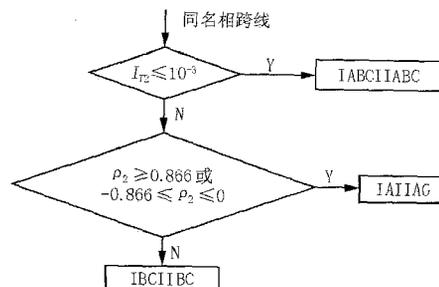


图 2 同名相跨线接地故障识别流程图

Fig 2 Flow chart of same phase-earth fault discriminating

图 2 中, ρ_2 为 I_{T0} 和 I_{T1} 在 $I_{T2} = 0$ 时的相关系数, $\rho_2 = \cos(\arg I_{T0} / I_{T1})$ 。当发生 A IA IAG 故障时, I_{T0} 和 I_{T1} 相角差为 0 或 120 或 -120°, 取 ±30° 的裕度值, 即得 ρ_2 的取值范围。

2.2 单回线故障识别

单回线故障识别与同名相跨线故障识别相类似。在不接地故障时, 若 $I_{T2} = 0$, 为 ABC 类故障, 反之为 BC 类故障。在接地故障时, 将图 2 中的 ρ_2 改为 ρ_3 ($\rho_3 = \cos(\arg I_{F0} / I_{F1})$), ABC IA BC 改为 ABC, A IA IAG 改为 A, BC IBC 改为 BC, 则为单回线故障识别流程图。

2.3 非同名相跨线故障的识别

图 3 为非同名相跨线故障识别流程图, 其中, I_{T2} 为负序电流的同序量, ρ_4 为 I_{F2} 和 I_{F1} 在 $I_{T2} = 0$ 时的相关系数, $\rho_4 = \cos(\arg I_{F2} / I_{F1})$, ρ_5 、 ρ_5 分别为 I_{F1} 和 I_{F1} 在 $I_{T0} = 0$ 及 $I_{T0} = T/4$ 时的相关系数, $\rho_5 = \cos(\arg$

I_{F1}/I_{T1}), $\rho_5 = \cos(\arg I_{F1}/I_{T1} + \pi/2)$ 。由于相关系数为两正弦信号相位差的余弦值,并不能区别相位差的正负,因此,通过附加 $\pi/2$ 进行判断。对于三相类故障 IAB IBC和 IABC IAB,前者故障幅值特征有 $|I_{F0}| > |I_{F1}|$ 及 $|I_{F2}| > |I_{F1}|$, 后者的幅值特征为 $|I_{F0}| < |I_{F1}|$ 及 $|I_{F2}| < |I_{F1}|$ 。

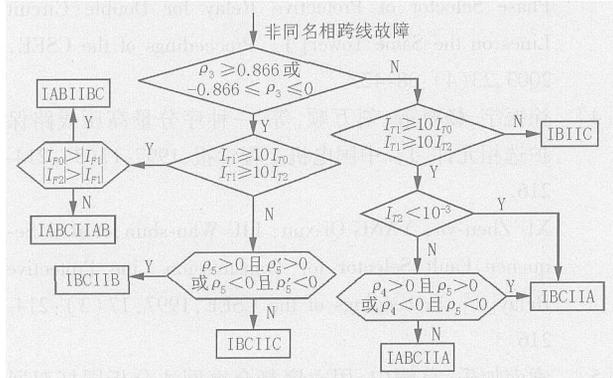


图 3 非同名相跨线故障识别流程图

Fig 3 Flow chart of different phase faults discriminating

在接地故障类型中,六序分量之间的相位关系与不接地时基本相同,因此,故障识别流程图也如图 3 所示。

2.4 故障相的识别

每一种故障类型都对应着几种不同的故障相序,由上述方法将故障类型确定后,还应进一步选出故障相。以 B IC类故障为例,它对应着 6 种不同的故障: A IB, C IA, B IC, B IA, A IC, C IB。它们的相位关系如表 1 所示。

表 1 B IC类故障相位关系

Tab 1 Fault phase relationship of B IC

| $\arg \frac{I_{F0}}{I_{F2}}$ | 60° | -60° | 180° |
|------------------------------|-------------|-------------|-------------|
| $\arg \frac{I_{F2}}{I_{T2}}$ | -90° | A IB | C IA |
| $\arg \frac{I_{F2}}{I_{T2}}$ | 90° | B IA | A IC |
| | | B IC | C IB |

用相关分析法对上述 6 种故障的识别流程图如图 4 所示。其中 $\rho_4 = \cos(\arg I_{F2}/I_{T2} + \pi/2)$, $\rho_6 = \cos(\arg I_{F0}/I_{F2})$, $\rho_6 = \cos(\arg I_{F0}/I_{F2} + \pi/2)$ 。

对于其它类型故障的相序,也可通过与此相同的方法加以识别,在此就不一一列举。

3 系统仿真

图 5 为 500 kV 双端供电系统双回线模型。线路全长 300 km,采用分布式换位线路,保护安装在 M 侧。用 ATP 得到仿真数据,再用 Matlab 进行数据处理。

系统等效参数如下:

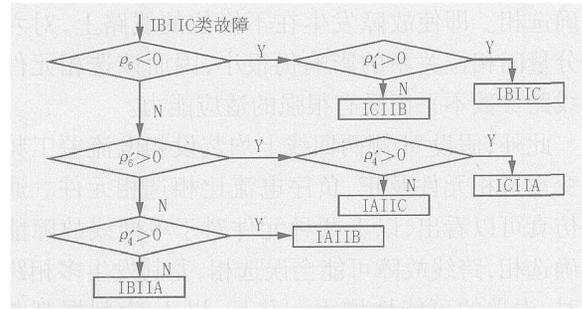


图 4 B IC类故障相序识别流程图

Fig 4 Flow chart of fault phase discriminating in B IC

M 端: $Z_{M1} = j60$, $Z_{M0} = j46.80$

N 端: $Z_{N1} = j45.20$, $Z_{N0} = j22.01$

线路参数为:

$r_1 = 0.027$ /km, $l_1 = 0.303$ /km,

$c_1 = 3.61 \times 10^{-6}$ S/km

$r_0 = 0.196$ /km, $l_0 = 0.695$ /km,

$c_0 = 6.3 \times 10^{-6}$ S/km

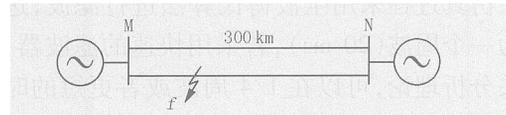


图 5 系统仿真模型

Fig 5 System simulation model

假设在输电线路的 1/3 处发生 BCG 单回线故障。得到数据 $|I_{F0}| = 506.1471$, $|I_{F1}| = 571.9537$, $\rho_1 = 0.9941$, 通过图 1 确定为单回线接地故障。并且 $|I_{F2}| = 580.4943 > 10^{-3}$, $\rho_3 = -0.9988$, 可以进一步确定为 BC 类故障。再通过 2.4 中介绍的故障相序识别方法可以判定为 BCG 故障。

假设发生非同名相跨线故障 A IB, 在 Matlab 中所得数据为: $|I_{F0}| = 1.4001 \times 10^{-4}$, $|I_{F1}| = 767.9495$, $|I_{F2}| = 767.9503$, $|I_{F0}| = 1.1221 \times 10^3$, $|I_{F1}| = 561.0484$, $\rho_3 = 0.5$, 由此可以判断为 B IC 类故障。又由于 $\rho_6 = 0.8812$, $\rho_6 = -0.8860$, $\rho_4 = 0.0312$, 通过图 4 可以确定发生 A IB 故障。

当在故障点发生同名相跨线故障 IAB IABG 时,由仿真得到的数据为: $|I_{F0}| = 691.7$, $|I_{F1}| = 3.6 \times 10^{-14}$, 从图 1 可知为同名相跨线接地故障。又由于 $|I_{F2}| = 671.5$, $\rho_2 = 0.5437$, 从图 2 中即可判断为 BC IBC 类故障,再由图 4 所示方法可以准确选出 IAB IABG 故障。

以上对单回线故障、同名相跨线故障以及非同名相跨线故障各举一例,选相结果理想。通过大量的仿真验证,该种选相方法对于所有故障类型均能

正确选相。即使故障发生在不换位的线路上,对六序分量间相位关系的影响仍很小,因而该选相元件对线路参数不平衡具有很强的适应能力。

此外,假设 M 侧两回线上均装设相电流差工频突变量选相元件及正、负序电流比相选相元件。通过仿真可以看出,以上两种元件对于单回线故障能准确选相,跨线故障可能会误选相,尤其发生多相跨线时,误选的可能性增大。并且,以 I_0 为判据判断是否为接地故障的条件将不再成立。因此以上两种选相元件不能独立用于同杆双回线的保护中。

4 结论

本文提出了一种基于相关分析的双回线选相元件,对于各种故障类型,采用故障序分量,基于相关分析确定了相关系数的取值,所得结果均能正确选相,并且不受过渡电阻及线路参数不平衡的影响。本文仿真过程采用全波傅氏算法进行滤波,选相时间为一个周波(20 ms),若采用快速的滤波器,根据相关分析理论,可以在 1/4 周波或者更短的时间内判断出信号之间的相位关系,因此可以大幅度缩短选相时长,从而满足高压及超高压电网的要求。

参考文献:

- [1] 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
- [2] 林湘宁,刘沛,杨春明,等. 基于相关分析的故障序分量选相元件 [J]. 中国电机工程学报,2003,22(5): 16-21.
L N Xiang-ning, L U Pei, YANG Chun-ming, et al A

Superimposed Phase Selector Based on Symmetrical Components and Correlation Analysis [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 22(5): 16-21.

- [3] 俞波,杨奇逊,李莹,等. 同杆并架双回线保护选相元件研究 [J]. 中国电机工程学报,2003,23(4): 38-42
YU Bo, YANG Q i-xun, LI Ying, et al Research on Fault Phase Selector of Protective Relay for Double Circuit Lines on the Same Tower [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(4): 38-42
- [4] 徐振宇,杨奇逊,刘万顺,等. 一种序分量高压线路保护选相元件 [J]. 中国电机工程学报,1997,17(3): 214-216
XU Zhen-yu, YANG Q i-xun, L U Wan-shun, et al A Sequence Fault Selector for Transmission Line Protective Relay [J]. Proceedings of the CSEE, 1997, 17(3): 214-216
- [5] 索南加乐,葛耀中. 用六序复合序网法分析同杆双回线的一些特殊问题 [J]. 继电器,1991,19(1): 2-14
SUONAN Jia-le, GE Yao-zhong Analysis of the Special Problems of Double Circuit Lines on the Same Tower Using Six Sequence Composite Sequence Nets [J]. Relay, 1991, 19(1): 2-14
- [6] 赵光宙,舒勤. 信号分析与处理 [M]. 北京:机械工业出版社,2001.
ZHAO Guang-zhou, SHU Qin Signal Analysis and Transaction [M]. Beijing: China Machine Press, 2001.

收稿日期: 2004-08-12; 修回日期: 2004-10-15

作者简介:

唐宝锋(1980-),男,硕士,研究方向为微机继电保护;
E-mail: pumpkin_24@163.com
徐玉琴(1964-),女,硕士,副教授,从事电力系统故障分析及微机继电保护的教学与研究工作。

Research on superimposed phase selector for double circuit lines on the same tower

TANG Bao-feng, XU Yu-qin

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

Abstract: A fault phase selector for double circuit lines on the same tower based on superimposed sequential components and correlation analysis is put forward in the paper, interconnection of six sequence networks (ISSN) is employed as a basic analysis method. The method is simple in fault selecting, and relations of phase angle and amplitude among six-sequence components are displayed directly in the ISSN. At last, the simulation results prove the method is correct and valid.

Key words: double circuit lines; fault phase selecting; correlation analysis; superimposed component