

高压电网子站故障选线诊断新方案研究

董志赞¹,乐全明¹,郑华珍¹,张沛超¹,郁惟镛¹,章启明²,王忠民²,周岚²

(1. 上海交通大学电子信息与电气工程学院,上海 200240; 2. 上海市电力公司保护处,上海 200122)

摘要:详细分析了高压电网子站端故障线路实时或准实时诊断的必要性。提出利用小波技术和单端故障录波数据确定故障线路的新思想:通过四阶中心 B 样条半正交二进小波分解子站故障电流数据,准确提取故障时刻,以及对故障后一周波暂态数据进行归约计算,结合录波数据中的保护接点变位信息,精确确定故障线路。大量仿真验证了算法的有效性。

关键词: 高压电网; 故障选线; 故障诊断; 小波

中图分类号: TM76 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2006)10-0007-05

0 引言

电力系统发生故障后,与故障线路电气距离较小的馈线,往往也会呈现出故障特征,相关录波器将启动,并记录下海量故障录波数据。如何有效、科学地利用故障录波数据进行准确的故障诊断,以便给调度员和变电站值班员提供一个实时或准实时的参考决策信息,一直是个紧迫和具有重大现实意义的研究课题。因为,当电网发生故障后,变电站运行人员最想知道故障是否发生在本站?如果故障没发生在本站,其相应的录波数据就没必要立即上传调度中心,这样可减少通道传输压力,避免通讯堵塞;如故障发生在本站,其故障类型、故障距离、以及采取什么样的紧急措施,这些分析结果信息对值班员采取紧急应对措施尤为重要。所以,故障线路的准确识别是实现子站和全网实时或准实时故障诊断的前提和基础。

现有故障诊断系统,缺乏对海量故障录波数据的有效处理和查询手段,对事故的分析仍主要依靠故障分量的工频量以及保护和开关接点的数字量信息^[1~3]。在子站端,通过开关量、保护接点的变位信息以及故障相电流增量来判断故障发生的回路,在一般情况下能够实现。但是,当保护或开关发生误动或拒动时,由此识别出的故障线路不准确甚至完全错误。

应用小波分析工具进行故障选线是近年提出的,其基本思想是利用小波工具来分析故障引起的暂态量,以达到选线目的^[4]。文献[5]应用小波奇异性检测功能,获取单相接地故障引起的电压、电流

突变量的极性和大小,达到选线目的。由于暂态量频率成分复杂,有的情况下这种突变并不明显,这时该选线方法的灵敏度将大大降低。文献[6]对发生单相接地故障后各条线路的暂态零序电流进行分解,按照能量最大的观点确定各条线路电流分布最集中的特征频段,通过比较所有线路在各自特征频段下的小波包分解系数的极性来自适应地实现故障选线。上述故障选线诊断算法,主要利用保护和开关接点数字量信息,几乎没有考虑保护和开关发生误动、拒动的特殊情况,算法主要应用于配网小电流接地选线,不适用于高压电网故障选线诊断。

基于此,本文提出将四阶中心 B 样条半正交二进小波用于故障电流奇异点的确定,并阐释了其理论依据;并对故障后一周波信号进行归约计算,借助保护接点变位信息,实现故障选线。该方案克服了传统的基于数字量信息和工频量突变特性故障选线的缺陷。并通过上海供电局某 220kV 高压局部电网,仿真验证了该算法的有效性。

1 信号奇异检测原理和小波基选择

1.1 信号奇异性检测原理

在小波变换中,奇异性可定义为:设 $f(x) \in L^2(R)$,小波 $\psi(x)$ 为实数函数且连续可微,并具有 n 阶消失矩 (n 为正整数)。若 $f(x)$ 对任意 $x = x_0$,有 $|Wf(s, x)| \leq Ks$ (K 为常数),则称为 x_0 点的奇异性指数。对任意 $x = x_0$,若 $|Wf(s, x)| = |Wf(s, x_0)|$,则称 x_0 为小波变换在尺度 s 下的局部极大点^[7]。

如果选择小波函数为平滑函数的一阶导数,则由小波变换系数的绝对值的极大值点(模极大值

点)可以检测到信号的突变点^[8]。所以在信号的奇异性检测中,通常希望所使用的小波是某一种平滑函数的导数。

文献[9]中定理证明了信号 $f(x)$ 的所有奇异点可以通过跟踪细尺度下小波变换模极大点检测出来。随着分解尺度的增加,定位精度会越来越差。这是由于随着尺度的增加,小波基函数的支撑长度增加,所以不为零的数据的个数也在增加,致使对奇异点的定位精度降低。因此在对奇异点进行检测时,要注意选择合适的小波变换尺度。根据定理, $f(x)$ 的所有奇异点总可以在细尺度上找到,所以本文选择第一尺度上的小波系数来进行奇异性检测。

1.2 小波基的选择

同样的信号利用不同的小波函数进行变换处理,其效果大不相同,因此应根据分析的对象和目的采用合适的小波函数。小波性能通常用正交性、正则性、紧支性、消失矩以及对称性来描述。

二进小波变换是连续小波变换与离散小波变换的折中,由于它保持了连续小波变换的平移不变性,且具有快速算法,因而适用于信号奇异性检测。

中心B样条函数是典型的平滑函数。利用B样条函数的导数构造的具有紧支集的样条小波称为紧支撑样条小波,即B小波。该小波是紧支撑半正交小波,且是对称的,它在小波空间上具有最小紧支撑。作为半正交小波,它可以生成 $L^2(R)$ 上的一个正交分解,但还需用到它的对偶小波,且具有广义线性相位。B小波的时频窗的面积在 $m > 3$ 时非常接近由Heisenberg原理给出的最优值,而且具有完全振荡性,因此经常用于异常信号的定位和检测^[8,9]。

故本文采用文献[9]构造的具有紧支撑的四阶中心B样条半正交二进小波进行奇异性检测,该小波滤波器系数具有有限长度,关于中心 $t=0.5$ 具有反对称性,且有一阶消失矩。符合电力系统故障奇异性检测小波基的要求。

2 故障选线诊断新方案

为了便于算法的描述,本文以上海市供电局220 kV某部分电网为例,加以说明。如图1所示。

2.1 传统故障选线诊断算法缺陷分析

在变电站,传统故障选线诊断,一般结合故障电流工频突变特点和保护开关变位信息。以图1电网为例,金都站为本站。若线路2294发生某简单故

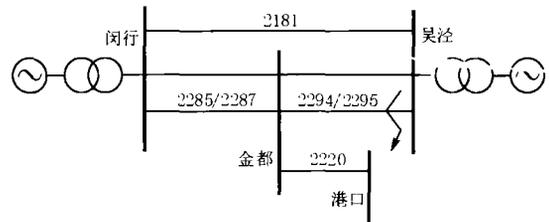


图1 上海220 kV电压等级子网

Fig 1 220 kV partial network of Shanghai power

障,则金都站记录2285/2287、2295,甚至2220线路的录波器将启动记录,在故障时刻,各电流分量的工频量一般情况下均将呈现突变特性。如果线路保护不发生越级动作,则只有故障线路的保护启动,并出口跳闸,所以借助保护接点变位信息可以选出故障线路;但是,当2294保护拒动,发生越级动作,2285/2287保护启动跳闸,而2285/2287线路录波电流也具有工频突变特点,此时在闵行站将误诊为故障发生在2285或2287。尤其是,当故障发生在线路首端,保护越级动作时,2285/2287工频突变特性比较显著,增加了误选线的概率。然而,当故障发生本线末,并带大电阻接地故障时,其工频故障分量突变不明显,又将给选线诊断带来识别上的误差。

2.2 故障选线新方案

本文故障选线整体思路为:首先用二进小波对故障录波电流进行故障时刻提取,选出故障时刻小波系数最大的电流,并对其后一周波电流进行归约计算,辅助保护接点变位信息,实现准确故障选线。

1) 故障时刻提取

无论什么规模的电网,其本质上是一R、L、C电路。故障时,由于电感电流不能突变,所以产生了大量的衰减直流分量,由于串联电容和高阻接地的缘故,导致了大量高频分量的产生,而对地充电电容的存在,导致了大量低频分量的产生。所以,故障电流分量中大量高频分量包含丰富的故障信息,通过对高频分量的挖掘分析,并借助保护接点变位信息可以实现准确故障选线诊断,从而克服传统故障选线的缺陷。

本文采用四阶中心B样条半正交二进小波对录波电流进行小波变换,根据第一尺度上的小波系数模极大值点确定故障时刻。四阶中心B样条半正交二进小波的小波函数是光滑的,具有紧支撑性和一阶消失矩,且关于其中心具有反对称性,根据奇异性检测原理,该小波适合于检测电力系统故障信

号的奇异性。经大量仿真和实际故障录波数据分析研究表明,该二进小波具有较好的提取奇异点性能。

实际应用中,信号的奇异突变是一个相对的概念,对于电力系统来讲,正常情况下的电流电压波形基本为 50 Hz 的正弦基波,因此希望小波对于正弦基波的小波变换系数要小,而对于波形的间断或者突变要非常敏感。但是,B 样条小波变换不能满足这一要求,其小波变换结果在很大程度上受正弦基波的影响,真正的故障信息往往湮没在其中,这对于故障的准确判别非常不利,必须消除基波分量对信号奇异性检测的影响。本文先通数字滤波器,采用文献 [8]介绍的零、极点配置方法滤除基波分量,其转移函数为:

$$H_k(z) = 1 - 2r\cos(k\omega_1 T_s)z^{-1} + r^2z^{-2} \quad (1)$$

令 $k=1, r=1$ 则可以完全抑制 1 次谐波,即工频量。为解决离散卷积的边界问题,本文采用周期对称延拓,等效于对原信号在边界上做对称折叠。

若故障发生在非终端线 2294,金都和吴泾变电站的相关录波器将启动记录。金都站为本站,先通过式 (1)滤掉故障电流基波分量,并用二进小波分解录波电流,提取故障时刻小波系数,并找出小波系数最大的故障相,则该相电流所在的回路可能为故障线。因为无论理论分析还是大量仿真验证均发现:故障相电流故障时刻的小波系数均大于其他录波电流分解的小波系数。

2) 模拟量状态值归约

提取出故障时刻后,仍无法进行准确故障选线。而故障时刻后的暂态量也是刻画故障特征本质的重要因素。

对于子站故障诊断系统而言,故障时刻后的模拟量值存在不确定性,为了减少组合推理的容量,以及降低推理冗余,可将诸多电流值归类成三种特征状态:“故障状态”、“额定运行状态”、“零值状态”,其分别描述了模拟量处于故障状态、额定运行状态、以及故障线路被切除状态。

对于不同运行状态,各线路上上述三种模拟量值存在较大差异,所以采用相对值概念对各模拟量值进行归约,即 $k_i = \frac{x}{x_n}$,其中 x 为故障时刻后第一周

期实际模拟量采样绝对均值 $x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i|$, x_i 为

该周期内离散采样值, n 为采样点数, x_n 为该线路额定运行时一周期内模拟量采样绝对均值, k_i 表示该时区电流量状态值,经全面仿真分析得出归约计算式如下:

$$k_i = \begin{cases} 1, & x/x_n \in [1.4, \quad] \\ 0.5, & x/x_n \in [0.25, 1.4] \\ 0, & x/x_n \in [0, 0.25] \end{cases} \quad (2)$$

其中: $k_i = 1, 0.5, 0$ 分别表示电流模拟量“故障状态”、“额定运行状态”、“零状态”。

上述归约方法考虑线路末端带 100 Ω 电阻接地(对 220 kV 电网,考虑 100 Ω 较切合实际)、故障后负荷转移、合闸于空载线路等特殊工况。

3) 故障选线诊断

找出本站录波电流故障时刻二进小波分解系数最大的故障相后,利用归约计算式,对该相电流故障后一周波暂态量进行归约计算,若 $k_i = 1$ 则该线路为故障线路。此时,需参考保护接点变位信息,以进一步确定诊断结果。如果该线路的某保护接点变位,则该线路一定为故障线路;若保护可作相邻线路远后备,则需同时考核平行线路保护接点变位信息,若平行双回线路的远后备保护接点同时变位,则属越级跳闸,故障不在本站线路。图 2 为故障线路确定流程。

3 仿真验证

以图 1 所示电网为例,通过 ATP 仿真验证本文算法的有效性,网络参数见附录。

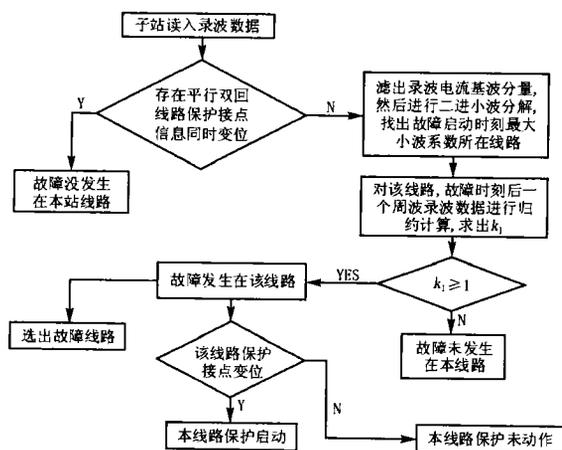


图 2 故障线路确定算法流程

Fig 2 Algorithm flow to determine the faulted line

设 2287 线路靠近闵行侧 A - G 经 100 Ω 接地。图 3 为故障相变电站两侧故障电流及其二进小波分

解波形。表 1 给出了故障时刻提取小波系数大小, 及其模拟量归约值。根据仿真结果发现, 无论在闵行站, 还是金都站, 故障相录波电流在故障时刻和故障切除时刻, 其分解得到的小波系数均大于同变电站其他录波电流, 并且其归约计算值为 1, 而非故障线路归约计算值均为 0.5。利用单端故障录波数据, 都将诊断出故障线路发生 2287, 从而实现单端量准确故障选线诊断。

作者根据本文算法, 还仿真了其他故障类型, 以及在各种极限情况 (电网发生切机、切负荷、白噪声干扰、负荷转移、空载合闸) 下的故障选线, 结果发现本文算法均适用, 限于篇幅, 不便给出具体仿真参数。

表 1 2287 A-G故障, 各线路小波系数及其归约值

Tab 1 Wavelet coefficient from 2287 A-G

变电站	线路号	相别	故障时刻小波系数	故障后状态	故障切除时刻小波系数	故障切除后状态
金都	2	A	0.064842	0.5	0.002288	0.5
	2	B	0.014802	0.5	0.000249	0.5
	2	C	0.014801	0.5	0.00025	0.5
	2	A	0.60916	0.5	0.19551	1.0
	2	B	0.015114	0.5	0.045688	1.0
	5	C	0.015114	0.5	0.045688	1.0
	2	A	0.82892	1.0	0.23707	0
	2	B	0.007981	0.5	0.048771	0
	7	C	0.007981	0.5	0.048771	0
	2	A	0.25925	0.5	0.035549	0.5
闵行	2	B	0.024975	0.5	0.007394	0.5
	4	C	0.024973	0.5	0.007395	0.5
	2	A	0.25925	0.5	0.035549	0.0
	2	B	0.024975	0.5	0.007394	0.0
	5	C	0.024973	0.5	0.007395	0.0
	2	A	0.60916	0.5	0.19551	1.0
	2	B	0.015114	0.5	0.045688	1.0
	5	C	0.015114	0.5	0.045688	1.0
	2	A	1.51	1.0	0.1964	0.0
	2	B	0.007981	0.5	0.048771	0.0
吴泾	2	A	0.25925	0.5	0.035549	0.5
	2	B	0.024975	0.5	0.007394	0.5
	4	C	0.024973	0.5	0.007395	0.5
	2	A	0.25925	0.5	0.035549	0.5
	2	B	0.024975	0.5	0.007394	0.5
5	C	0.024973	0.5	0.007395	0.5	

4 结论

本文提出了基于单端量故障选线诊断新思想: 首先利用二进小波分解故障录波电流, 确定出故障时刻最小波系数对应的故障相, 然后归约出该相电流故障后一周波电流值, 借助保护接点变位信息, 实现故障选线诊断。通过真实电网仿真验证了本文算法的有效性。

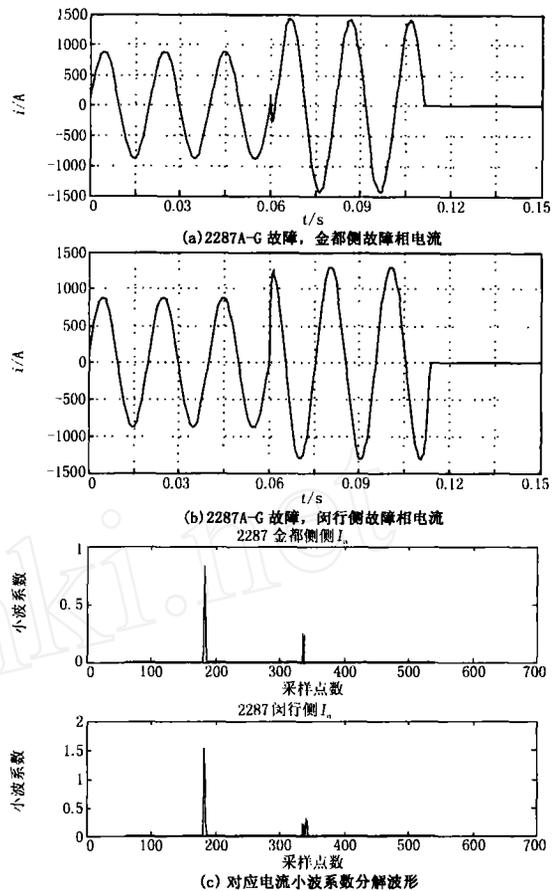


图 3 2287A - G故障, 金都、闵行侧故障相电流及其小波分解波形

Fig 3 Faulted currents and their wavelets when A-G faulted on 2287 line

附录: 图 1 电网参数

其系统参数如下: 线路标么参数 (基准容量: 1 000 MVA, 基准电压: 230 kV)

线路编号	r_1^*	x_1^*	r_0^*	x_0^*	x_{0m}^*
2220	0.0101	0.0588	0.0350	0.1357	
2181	0.0162	0.1062	0.0515	0.2310	
2285	0.0204	0.1253	0.0664	0.2686	0.1242
2287	0.0214	0.1248	0.0654	0.2696	0.1312
2294	0.0084	0.0561	0.0284	0.1221	0.0560
2295	0.0091	0.0567	0.0280	0.1181	0.0543
厂站	正序大方式	正序小方式	零序大方式	零序小方式	终端线自耦变
闵行电厂	0.5089	1.9455	0.8148	0.8148	
吴泾电厂	0.2862	1.1249	0.7958	1.0701	
港口站 (港口是终端用户, 在测距时一定要注意)	T1: 0.9868	T2: 1.0113			

线路长度: 2220 (25 km), 2181 (30 km), 2285/2187 (25 km), 2294/2295 (45 km)

参考文献:

- [1] Wen F S, Chang C S Possibilistic-diagnosis Theory for Fault-section Estimation and State Identification of Unobserved Protective Relays Using Tabu-search Method [J]. IEE Proceedings on Gener, Transm and Distrib, 1998, 145 (6): 722-730.
- [2] 文福拴,韩祯祥. 计及警报信息时间特性的故障诊断模型 [J]. 电力系统自动化, 1999, 23 (17): 6-9.
WEN Fu-shuan, HAN Zhen-xiang A New Fault Diagnosis Model Capable of Dealing with the Temporal Information of Alarm Messages [J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23 (17): 6-9.
- [3] 周明,任建文,李庚银,等. 基于模糊推理的分布式电力系统故障诊断专家系统 [J]. 电力系统自动化, 2001, 25 (24): 33-36.
ZHOU Ming, REN Jian-wen, LI Geng-ying, et al Distributed Power System Fault Diagnosis Expert System Based on Fuzzy Inference [J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25 (24): 33-36.
- [4] Chaari O, Minichel M, Bouaye F. Wavelet a New Tool for the Resonant Grounded Power Distribution System Relaying [J]. IEEE Trans on PWRD, 1996, 11 (3): 1301-1308.
- [5] 贾清泉,刘连光,杨以涵,等. 应用小波检测故障突变特性实现配电网小电流故障选线保护 [J]. 中国电机工程学报, 2001, 21 (10): 78-82.
JIA Qing-quan, LU Lian-guang, YANG Yi-han, et al Abrupt Change Detection with Wavelet for Small Current Fault Relaying [J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21 (10): 78-82.
- [6] 戴剑锋,张艳霞. 基于多频带分析的自适应配电网故障选线研究 [J]. 中国电机工程学报, 2003, 23 (5): 44-47.
DAI Jian-feng, ZHANG Yan-xia Study on Adaptively Choosing Fault Line Under Single-phase to Ground Fault Based on Analysis of Multi-frequency Bands [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23 (5): 44-47.
- [7] 孙延奎. 小波分析及其运用 [M]. 北京:机械工业出版社, 2005.
SUN Yan-kui Wavelet Analysis and Its Application [M]. Beijing: China Machine Press, 2005.
- [8] 李弼程. 小波分析及其应用 [M]. 北京:电子工业出版社, 2003.
LI Bi-cheng Wavelet Analysis and Its Application [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2003.
- [9] Mallat S G, Zhong S. Characterization of Signals from Multiscale Edges [J]. IEEE Trans on Pattern and Machine Intelligence, 1992, 14 (7): 710-732.

收稿日期: 2005-10-09; 修回日期: 2005-12-05

作者简介:

董志赞 (1978-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统继电保护及其软件工程;

乐全明 (1974-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为电力系统继电保护及其软件工程; E-mail: yqm8341@sjtu.edu.cn

郑华珍 (1981-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统继电保护及其软件工程。

Novel algorithm to determine the faulted line of HV network in substation

DONG Zhi-yun¹, YUE Quan-ming¹, ZHENG Hua-zhen¹, ZHANG Pei-chao¹,
YU Wei-yong¹, ZHANG Qi-ming², WANG Zhong-min², ZHOU Lan²

(1. Academy of Electronic Information and Electric Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China;

2. Protection Department, Shanghai Electrical Power Company, Shanghai 200012, China)

Abstract: This paper discusses the task of diagnosing the line faults in high voltage substation in detail, which is imperative and the decision made almost in real-time. A new method of using wavelet analysis is proposed to select the fault line with Fault Recorder Data in one side substation. Fault current data in substation decomposed by the four-rank center B-spline semi-orthonormal dyadic wavelet, and the fault time detected accurately. Then the statistic data in 20 ms after fault time is analyzed and classified into discrete states, the fault line is selected exactly by combining with the action information of protections. The validity of the method is verified by simulation examples.

Key words: HV power network; fault line selection; fault diagnosis; wavelet