

基于录波数据的断路器本体及其二次回路异常辨识研究

孟晓承¹, 黄河², 郑茂然², 张静伟², 许易经¹, 陈旭², 余江²

(1. 山东大学电气工程学院, 山东 济南 250061; 2. 中国南方电网有限责任公司电力调度控制中心, 广东 广州 510623)

摘要: 断路器 (Circuit Breaker, CB) 故障包括本体故障以及二次控制回路引起的故障。选取分闸时间、分闸不同期性等作为断路器本体异常判别的指标。首先, 利用小波变换对故障录波电流进行多尺度分析, 判别断路器开断的燃弧时刻。其次, 利用统计学原理统计分析大量断路器分闸时间、分闸不同期性数据, 并给出其置信区间。最后, 根据所得置信区间对新采集的断路器分闸时间、分闸不同期性进行异常判别; 另一方面, 选取信号回路响应时间作为断路器二次回路异常判别的指标, 通过累计数据, 利用偏差的概念对其进行异常判别。提供了一种判别断路器开断异常的新方法, 可作为衡量断路器运行可靠性水平的依据。最终通过实际工程算例验证了所提方法的有效性。

关键词: 断路器; 小波变换; 故障录波; 置信区间

Research on abnormal identification technology of circuit breaker bodies and its secondary loops based on wave data

MENG Xiaocheng¹, HUANG He², ZHENG Maoran², ZHANG Jingwei², XU Yijing¹, CHEN Xu², YU Jiang²

(1. School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China; 2. Power Dispatching Control Center, China Southern Power Grid Company Limited, Guangzhou 510623, China)

Abstract: The failure of the circuit breaker can be caused by the body or its secondary control loop. The opening time is selected as an indicator of the abnormality of the circuit breaker body. Firstly, wavelet transform is used to analyze fault current in multi-scale, and the mode maximum value of each frequency band is selected to judge the arcing moment. Secondly, statistic analysis is used to analyze the circuit breakers' a large amount of opening time and after that its confidence interval is given. Finally, the new confidence interval is used to judge the abnormality of the new circuit breaker opening time. On the other hand, signal loop response time is selected as indicators of the abnormality of the secondary loop of the circuit breaker. By accumulating data, the abnormality is discriminated using the concept of deviation. A new method for judging the abnormality of circuit breakers is provides, and can be used as the basis to measure the operating reliability of circuit breakers. And examples in the last verify the effectiveness of the proposed method.

Key words: circuit breaker; wavelet transform; fault recording; confidence interval

0 引言

断路器的可靠性与可用率对系统安全、设备安全 and 人身安全有着重要意义。断路器是隔离电力系统故障的执行元件。断

早期电力设备的维修策略属于“事后维修”，即在设备发生故障之后再对其进行维修，这种维修方式往往会造成突发性停电事故，带来巨大经济损失和不良社会影响^[1]。为避免这一弊端，众多学者对电力设备的“事前维修”展开了研究。具有代表性的包括设备状态检修和定期计划检修，两者均强调在设备发生故障前实施检修^[2-5]，都可以在一定程度上减少“事后维修”带来的损失，但在检修时机的把握上，状态检修的准确性更强。状态检修的实现包含两个方面：一方面是表征设备状态指标的获取，如高压断路器中绝缘介质的微水含量、分闸与合闸线圈电流及开断次数等，它是分析设备是否存在潜在故障的基础；另一方面是设备状态的评估，它根据设备状态指标数据，采用灰色模糊理论^[6]、物元可拓理论^[7]等对设备状态进行评估，从而为下一步的状态检修提供支持，以上对于设备状态检修的研究均具有借鉴意义。当前断路器状态检修多依赖于在线监测所获得的数据，然而在线监测的可靠性和准确度离工程实用还有较大差距，并且断路器状态检修侧重于开关本体，无法分析其二次控制回路异常所导致的安全隐患。

在断路器进行故障隔离过程中，其每一次的动作都可以等同于一次冲击试验。以往对故障电流的分析仅仅从系统角度考虑，局限在故障持续时间上面，没有充分挖掘出数据的价值。实际上，依据断路器每一次开断时的故障录波数据，不仅可以分解断路器开断故障电流的全过程，分析各环节的响应是否符合预期，还可以分析出断路器相关二次回路时序是否与保护原理相匹配，从而确保回路监视的有效性。

本文从断路器动作原理出发，以断路器开断电流的全过程时序为基础，建立了基于录波数据的断路器本体及其二次回路异常辨识模型。提出了以小波变换提取断路器燃弧时间，分析断路器本体异常的方法；统计分析断路器二次回路响应时间，以置信区间辨识断路器回路异常的方法。相关原理已应用于南方电网“基于大数据的继电保护运行支撑系统”，并通过多起实际案例的

分析，成功发现断路器二次回路的隐患。

1 分析建模

1.1 本体特征维度

断路器从接收到保护发出的分闸信号到动静触头分离这个过程中，主要由操动机构与连杆机构来完成，这个过程所花费的时间（分闸时间）是一个相对固定的数值，体现了断路器机械性能。从断路器动静触头分离产生电弧到电弧电流在过零时熄灭，这个过程所花费的时间称为燃弧时间，分闸时间与燃弧时间之和为开断时间。在录波文件中，断路器开断录波波形如图1所示。

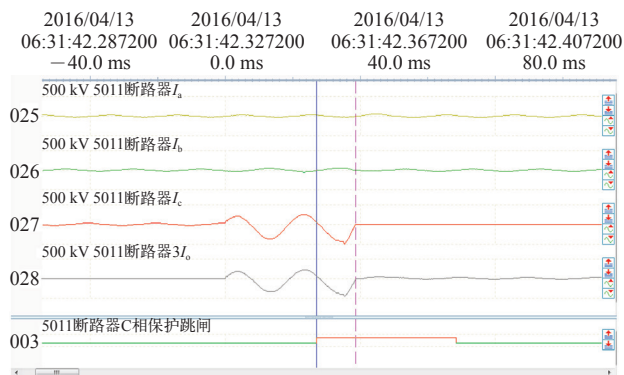


图1 断路器开断录波波形

Fig. 1 Circuit breakers' opening waveform

通过分析电力系统录波数据可视化软件呈现的某输电线路5011断路器C相跳闸故障录波数据可知，断路器发出跳闸指令时间（如图1中实线所示）与电弧电流过零熄灭时间（如图1中虚线所示）是容易得到的，这段时间间隔称为断路器的开断时间。因此，判别出燃弧时刻是获得断路器分闸时间与燃弧时间的关键。

1.2 二次回路特征维度

在断路器接收到继电保护二次回路及自动装置的分、合闸命令后，要以毫秒级的速度去执行分闸动作，以避免事故的蔓延和扩大。因此，断路器在投运中，要求二次回路能随时处于待命状态，并能令行禁止。高压断路器的二次回路主要分为控制回路和信号回路。控制回路由控制开关与断路器的传递机构、操动机构组成，作用是实

现对断路器的合、分操作。信号回路由发送机构和信号继电器等构成,作用是反映一、二次设备的工作,并给控制回路发送信号使其带动断路器动作。因此,断路器信号回路的可靠响应是断路器本体可靠动作的前提,只有二次系统及时快速响应系统的故障,才能保证断路器的正确动作。断路器二次信号回路如图2所示。

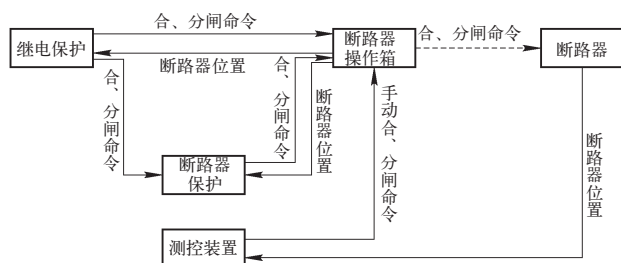


图2 二次信号回路

Fig. 2 Secondary signal loop

图2中,虚线表示为断路器分、合闸线圈接收到保护发出的分、合闸命令后作用于断路器动作,直至动作完成的过程,属本体特征。实线为二次信号回路,以图2中继电保护到断路器操作箱为例,此过程表示线路继电保护发出合、分闸信号到断路器操作箱接收到跳闸命令,包括信号传输以及时间间隔的含义。

2 基于小波变换的燃弧时刻判别方法

2.1 小波变换理论

小波变换与傅里叶变换是进行信号分析两种有效方法。傅里叶变换可以有效地提供频率域信息,而时间域信息基本丢失。与傅里叶变换不同,小波变换通过平移母小波可获得信号的时间信息,而通过缩放小波的宽度(尺度)可获得信号的频率特征,因此,小波变换是一种时频域的信号分析方法。可充当母小波函数必须满足以下条件^[8]

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \psi(t) dt = 0 \quad (1)$$

设信号 $f(t)$ 是实函数,且二次方可积,则对该信号进行连续的小波变换表示为

$$W(a, b) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi(t) dt \quad (2)$$

因此,只需对参数 a 和 b 进行展开便能得到

任意时刻任意准确度的频谱,为避免计算量过大,首先对 a 、 b 进行离散化处理,得到离散小波变换的系数。离散小波^[9]可表示为

$$WT_x(a_0^j, kb) = \int f(t) \Psi_{a_0^j, kb}^*(t) dt \quad j=0,1,2,\dots,k \in Z \quad (3)$$

小波分析的时频窗口形状包括两个矩形,分别为时间窗和频率窗,这与傅里叶变换的时频窗口特性不同。设 t 为时间窗的中心, ω 为频率窗的中心, Δt 为时间窗的半径, $\Delta \omega$ 为频率窗的半径,那么用于信号分析的时间-频率窗可以表示为

$$[b+at-a\Delta t, b+at+a\Delta t] \times \left[\frac{\omega-\Delta\omega}{a}, \frac{\omega+\Delta\omega}{a} \right] \quad (4)$$

因此,小波变换克服了傅里叶变换仅能获得频率域信息而时间域信息丢失的缺点,可以同时从信号的时间域以及频率域中提取信息。

2.2 燃弧时刻的判别

在断路器进行分闸操作,动、静触头开始分离时,触头间绝缘介质击穿产生电弧。由于电弧电导率随着电流的增大而增大且电弧截面亦随之增大,电弧可以等效为非线性电阻,其阻值具有负阻特性,即阻值随着电流的增大而减小^[10]。同时,在电弧产生时刻,不仅暂态电流幅值发生改变,而且会引入高频分量。这些特性符合小波分析可以对任意的频率分量进行分析的特点。电流畸变带来的高频成分可以通过小波分析提取,并确定发生的时间,其实质是确定信号的奇异点。具体方法是根据小波变化各尺度模极大值的传递性来判断奇异点的位置和奇异指数的计算,设每个尺度下小波变换的模极大值为 M_i ,则奇异性指数可近似表示^[11]为

$$\alpha = \log_2 M_{i+1} - \log_2 M_i \quad (5)$$

所求奇异点即为燃弧时刻。

文献[12]通过搭建短路开断试验线路考察燃弧时间确定方法的可靠性。根据试验结果得出以下结论:采用小波理论,通过寻找信号的奇异点进而确定起弧时刻,计算所得的燃弧时间与实际测量的结果相差很小,其误差在可以接受的范

围；并且当采样频率达到5 kHz时，通过小波分析计算得到的燃弧时间差在0.4 ms以内。本文利用该方法对第1节中的5011断路器电流录波波形进行小波分析，已知此录波波形采样频率为5 kHz，则小波分解结构和小波分解结果分别如图3、图4所示。

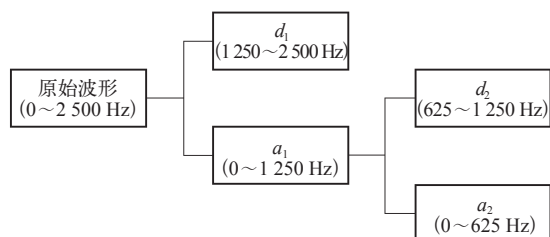


图3 小波分解频带分布

Fig. 3 Wavelet decomposition band distribution

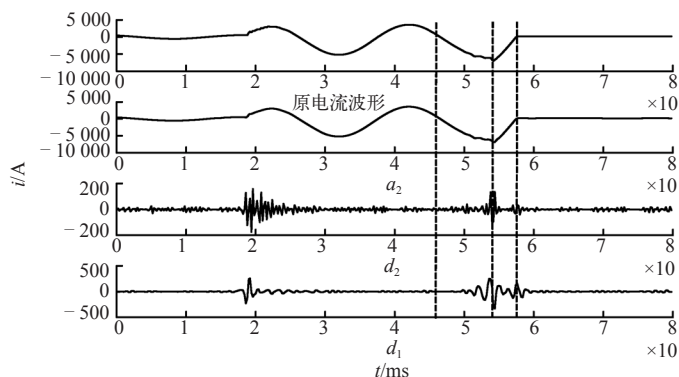


图4 小波分解结果

Fig. 4 Wavelet decomposition results

图4所示虚线1、虚线2和虚线3分别代表断路器发出跳闸指令时刻、燃弧时刻以及断路器完全开断时刻。

3 基于统计分析的断路器异常判别

3.1 断路器本体的异常判别

本文选取分闸时间以及分闸不同期性作为断路器本体异常的判别指标。上文介绍分闸时间可以反映高压断路器所配操动机构的机械特性，分闸不同期性亦然，其表示为断路器三相联动分闸操作时三相中最大和最小分闸时间之差，通过该参数可以判断出断路器在机械方面的缺陷或潜在故障，比如结构松动、元件卡涩和异常等。

分闸时间以及分闸不同期性的样本数量属于大样本，故可用Z统计量进行区间估计。若统计

数据样本均值为 $\bar{X}$ ，样本标准差为 S ，取显著性水平为 α ，通过查表得到临界值 $Z_{\alpha/2}$ ，则单项分闸时间置信度为 $1-\alpha$ 的置信区间为

$$[\bar{X} - Z_{\alpha/2} \frac{\sigma}{\sqrt{n}}, \bar{X} + Z_{\alpha/2} \frac{\sigma}{\sqrt{n}}] \quad (6)$$

当样本数据不满足在所得置信区间之内时，则可判定此数据样本存在异常。

3.2 断路器二次回路的异常判别

本文通过累积录波文件中大量二次信号回路样本，对于某一确定信号回路的第 N 次数据利用偏差的概念对此回路的可靠性进行异常判别。设某一时间前 $N-1$ 次数据的均值为 T_{ave} ，则有

$$T_{ave} = (T_1 + T_2 + \dots + T_{N-1}) / (N-1) \quad (7)$$

对于第 S 次数据 T_N ，当 $1 - (T_N / T_{ave}) \geq \delta$ 时，判定此响应时间出现了异常。式中， δ 为偏差阈值，可根据需要灵活设定。

需要说明的是，两种方法对断路器本体以及二次回路的异常判别均适用。

4 算例验证

4.1 断路器本体异常案例分析

本文利用第2节所述小波分解法对故障录波电流进行分析，在剔除具有明显波形缺陷的录波文件后，采集得到某变电站100组同类SF₆断路器三相联动操作数据，结果如表1所示。

表1 高压断路器分闸时间表

Tab. 1 Circuit breakers' opening time

样本序号	A相	B相	C相	分闸不同期性
1	27	27.6	27	0.6
2	26.6	26	25.4	1.2
3	26	26	27	1
4	29	28.4	29	0.6
5	26	26	26.6	0.6
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
96	25.2	26.4	26.4	1.2
97	28.8	28	28.6	0.8
98	25.4	25.6	25	0.6
99	25.8	26	25.4	0.6
100	26.4	26.2	25.4	1

由表1数据计算得各相分闸时间以及分闸不同期性的均值、方差以及置信度为99%（取显著性水平 $\alpha=1\%$ ）的置信区间如表2所示，需要说明的是，显著水平 $\alpha=1\%$ 下临界值 $Z_{\alpha/2}$ 为2.576。

表2 计算结果表
Tab. 2 Calculation results

计算项目	均值	方差	置信区间
A相	25.900	1.880	[25.416, 26.384]
B相	25.852	1.818	[25.384, 26.320]
C相	26.008	1.864	[25.528, 26.488]
分闸不同期性	0.882	0.652	[0.714, 1.050]

以A相分闸时间为例，当新获取的分闸时间数据值在置信区间[25.416, 26.384]之内时，可被判定为正常开断；若在置信区间之外，则被判定为异常开断。

4.2 断路器二次回路异常典型案例

统计南方电网某变电站（a站）两月内高压断路器二次回路信号响应时间间隔，以继电保护发信—断路器保护发信为例，统计结果如图4所示。

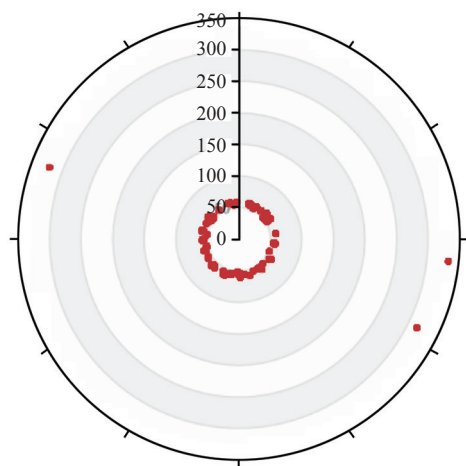


图4 线路继电保护发信—断路器保护发信统计结果
Fig. 4 Signal statistical results for line relay protection to CB protection

从图4中可以看出，该变电站近两月高压断路器二次回路的线路继电保护发信—断路器保护发信响应时间间隔集中在50~70 ms，但存在三个明显异常数据。经调查，三个异常数据由同一高压断路器的同一次动作产生，数据产生原因为a站500 kV输电线路（ab线路，b为对端变电站）

出现BC相故障，电流差动保护动作跳开ABC三相。三相时间间隔分别为：A相为324 ms，B相为340 ms，C相为353 ms。由于ab线与ac（c为另一变电站）线的保护型号及断路器型号相同，因此在ac线路模拟ab线路的故障情况，测试TWJ的动作时间，其中c侧TWJ的动作时间为60 ms，a侧的动作时间大于300 ms，判定a站断路器分闸位置信息（TWJ）开入量由0~1的相对时间过长。分析相对时间过长的原因如下：①保护装置开入响应过慢；②TWJ动作过慢；③断路器辅助触头动作过慢；④断路器机构箱合闸回路延时导通。

本文通过搭建试验测试线路对a站断路器故障原因进行排查，试验结果为：保护起动至A相TWJ动作的时间为357.7 ms；保护起动至差动保护出口的时间为10 ms；A相TWJ的动作时间小于5 ms；断路器机构分闸后合闸回路的导通时间为308 ms。因此，保护起动至A相TWJ动作的时间=10 ms+5 ms+308 ms+ Δt =323 ms+ Δt （ Δt 为测试误差），与测试的357.7接近。

试验测试结论如下：试验1排除了保护装置在外部开入后未及时响应的情况，证明保护装置的开入功能正常；试验2排除了断路器辅助触头变位慢的情况，证明了断路器辅助触头是完好的；试验3排除了TWJ动作过慢的情况，证明TWJ是完好的；试验4证明了保护装置TWJ开入过慢的原因是因为断路器机构箱合闸回路在分闸后的导通时间过长。经与现场人员实地调查，为了满足断路器分—合—分动作特性，该类型断路器厂家在合闸控制回路中加入了时间继电器，时间继电器的存在使断路器机构箱内合闸回路在分闸后延时导通，因此，造成保护动作后TWJ动作时间过长的原因是合闸回路加入时间继电器。

5 结束语

本文通过挖掘故障录波数据，利用统计学原理分析所得数据，对断路器本体及其二次回路进行异常判别，本文所提方法具有清晰直观、不需要附加其他设备等优点，且通过实际算例可以看

出,该方法可以发现断路器回路中存在的异常,该异常评判的结果可作为断路器状态检修、消缺的依据,为断路器的可靠性评估提供了新思路。该方法基于对波形数据的分析处理,所提算法仍可不断优化以减小噪声干扰,从而提高所得结果准确度,相关研究将会在后续工作中展开。

参考文献

- [1] 高全. 电气设备在线监测与状态检修技术研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2013.
- [2] 李明, 韩学山, 杨明. 等. 电网状态检修概念与理论基础研究[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(34): 43-52.
- [3] MARSEGRERRA M, ZIO E, PODOFILLINI L. Condition-based maintenance optimization by means of genetic algorithm and Monte Carlo simulation[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2002, 77(2): 151-166.
- [4] CHEN Dongyan, TRIVEDI K S. Optimization for condition based maintenance with semi-Markov decision process[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2005, 90(2): 25-29.
- [5] 杨良军, 熊小伏, 张媛. 基于灰色关联度和理想解法的电力设备状态维修策略[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(18): 74-78.
- [6] 国连玉, 李可军, 梁永亮, 等. 基于灰色模糊综合评判的高压断路器状态评估[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(11): 161-167.
- [7] 常怡东, 张开轩, 金潇. 基于物元可拓理论的高

压断路器状态评估方法[J]. 高压电器, 2017(9): 107-113.

- [8] 宫宇, 吕金壮. 大数据挖掘分析在电力设备状态评估中的应用[J]. 南方电网技术, 2014, 8(6): 74-77.
- [9] 刘明才. 小波分析及其应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2013.
- [10] 徐国政. 高压断路器原理和应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.
- [11] 何正友, 钱清泉. 基于小波变换的信号奇异性指数计算方法及其应用[J]. 电力自动化设备, 2000, 20(3): 12-15.
- [12] 彭博, 肖登明. 断路器电寿命的在线监测[J]. 电网与清洁能源, 2012, 28(12): 38-41.

作者简介



孟晓承

孟晓承(1993—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统运行与控制、电力设备运行可靠性分析。

黄河(1972—), 男, 硕士, 教授级高工, 从事电力系统调度运行管理工作。

郑茂然(1981—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事电力系统继电保护运行管理工作。

(收稿日期: 2018-11-06) **EA**