

高压断路器合（分）闸线圈电流信号特征值提取方法研究

高压断路器合（分）闸线圈电流信号在故障识别、检测及诊断方面有重要意义，正确提取合（分）闸线圈电流信号特征值可为断路器的故障诊断提供依据。首先采用Db4小波基、分解层次为4及Rigrsure阈值策略对合（分）闸线圈电流信号去噪；然后结合小波分析与时域求极值点法对去噪后的电流信号进行特征值提取；最后以ABB VD4高压断路器合（分）闸线圈电流为样本，采用Matlab编程实现电流去噪及特征值提取。结果表明噪声滤除效果较好，并能有效提取线圈电流极值点及对应时间点，从而为后期的故障诊断奠定了基础。

杜小康^{1,2} 陈志英^{1,2} / 1. 厦门理工学院电气工程与自动化学院 2. 厦门理工学院福建省高电压技术重点实验室

0 引言

高压断路器是电力系统中最重要电气设备，起着控制和保护的双重作用^[1]。断路器的可靠性在很大程度上取决于其机械操作系统的可靠性，断路器的机械故障诊断可以通过监测断路器的多种电气或机械参数来完成，其中合（分）闸线圈的电流信号是重要监测参数之一^[2-3]。电磁线圈中的电流波形蕴含着丰富的信息，通过线圈电流信号的一些特性可以判断铁心运动是否存在卡滞、脱扣、拒分或拒合等现象^[4-5]。在对高压断路器进行监测、故障诊断过程中，获取电流信号特征值是重要的环节^[6-7]。

文献[8]根据检测波形与样本波形的对比来判断断路器是否出现故障，没有对波形进行分析处理；文献[9]采用三次

样条插值法对线圈电流波形进行滤波处理，但对去噪后的电流波形仅进行了最大值的提取，并没有涉及到具体特征值的提取。目前很少有文献详细介绍电流信号特征值提取，因此本文将介绍如何提取高压断路器线圈电流信号的特征值；为了更准确地提取线圈电流信号特征值，采用小波分析法对信号进行去噪处理，并对消噪效果进行结果分析；再结合小波分析与时域求极值点法提取线圈电流信号特征值。

1 合（分）闸线圈电流特性

电磁铁是高压断路器操作机构的重要元件之一，其线圈中的电流波形包含了大量的信息，该波形反映电磁铁本身以及所控制的阀门和脱扣器在操作过程中的工作情况^[10-11]。典型合（分）闸线圈电流波形如图1所示，图中电流变化可分为如下四个阶段^[12-13]。

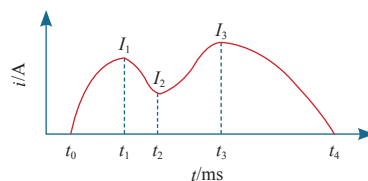


图1 典型合（分）闸线圈电流波形

1) $t_0 \sim t_1$: 在 t_0 时刻线圈开始通电，线圈电流不断增大，但电磁力不足以驱动铁心运动，直到 t_1 时刻铁心才开始运动。该阶段持续时间与控制电源和线圈电阻有关。

2) $t_1 \sim t_2$: 铁心运动，电流下降。 t_2 为控制电流的最低点，代表铁心已触动



杜小康/硕士研究生

关键词/Keywords

高压断路器 ·

小波分析 ·

合（分）闸线圈电流信号 ·

特征值提取 ·

去噪 ·

福建省自然科学基金计划项目（2015J01650）。

操作机械的负载而显著减速或停止运动。该阶段电流的变化表征电磁铁铁心运动机构有无卡涩、脱扣及机械负载变动情况^[14]。

3) $t_2 \sim t_3$: 铁心停止运动, 电流值呈指数形式上升。该阶段可以反映操作机构传动系统运动的情况。

4) $t_3 \sim t_4$: 电流开断阶段, 辅助开关触头间的电弧被拉长, 电弧电压快速升高, 迫使电流迅速减小直至熄灭。

通过上述分析可知, 线圈电流值 I_1 、 I_2 及 I_3 分别反映了电源电压、线圈电阻及铁心运动的速度信息; $t_0 \sim t_4$ 的电流变化全面地反映了机械操作机构传动系统的工作情况^[15]。因此, 特征参量 $t_0 \sim t_4$ 以及电流 $I_1 \sim I_3$ 是线圈电流信号的关键信息, 通过适当方法提取这些特征值, 对断路器进行故障诊断有重要意义。

2 小波变换去噪

2.1 小波变换定义

设 $\varphi(t)$ 为基本小波函数, $x(t)$ 为二次方可积函数, 即 $x(t) \in L^2(R)$, 则 $x(t)$ 小波变换为

$$WT_V = \frac{1}{\sqrt{a}} \int x(t) \varphi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (1)$$

式中, a 为小波尺度伸缩; b 为小波位移^[16]。

实际上, 小波变换是将信号分解成尺度不同的一系列小波组合, 在高频区, 采用小尺度的小波以表征高频的细节信号; 在低频区, 采用大尺度的小波再现信号的整体概况。小波分析的去噪功能能够将噪声的高频部分和干净信号区分开来^[17]。

2.2 小波阈值去噪

小波阈值去噪与传统方法相比, 优势在于去除噪声的同时, 还能很好地保留信号的突变部分与图像的边缘。小波阈值去噪的基本步骤为: ①选择小波基函数和小波分解层数 N , 对信号进行 N 层小波分解; ②选择阈值作为量化准则, 对每一层中的高频系数进行阈值量化处理; ③根据小波分解的第 N 层低频系数和各层高频系数进行小波逆变换, 重构降噪信号。

在小波消噪过程中, 小波基的选择、阈值的选取以及阈值策略函数的选择对消噪效果都会产生重要的影响。

阈值函数量化选择策略主要有软阈值和硬阈值两种: 软阈值是将不等于阈值的小波系数变为两者的差值; 硬阈值是将小于阈值的小波系数变为0, 大于阈值的小波系数保持不变。其数学表达式分别为

$$\text{软阈值 } W_\delta = \begin{cases} \text{sign}(|W| - \delta) & |W| \geq \delta \\ 0 & |W| < \delta \end{cases} \quad (2)$$

$$\text{硬阈值 } W_\delta = \begin{cases} W & |W| \geq \delta \\ 0 & |W| < \delta \end{cases} \quad (3)$$

通常有四种可供选择的阈值估计规则:

1) 固定阈值规则 (Sqrtwolog)。固定阈值 $T = \sigma \sqrt{2 \ln(N)}$, 其中 N 为信号长度, σ 为噪声方差。

2) 无偏阈值选择规则 (Rigrsure)。对一个给定的阈值 T , 得到其似然估计, 再将非似然估计 T 最小化, 即得所选的阈值。

3) 启发式阈值规则 (Heursure)。它是前两种阈值的综合, 也是最优预测变量阈值选择。

4) 极大极小阈值规则 (Minimaxi)。它和Sqrtwolog一样也是一种固定阈值, 即产生一个最小均方误差的极值。具体形式如下

$$\lambda = \begin{cases} \sigma \left[0.3939 + 0.1829 \left(\frac{\ln N}{\ln 2} \right) \right] & N > 32 \\ 0 & N \leq 32 \end{cases} \quad (4)$$

为了比较去噪后的效果, 一般选取信噪比 (Signal - Noise Ratio, SNR) 和最小均方误差 (Mean Squared Error, MSE) 作为参考指标, 其表达式如下

$$\text{SNR} = 10 \lg \frac{P_s}{P_r} = 10 \lg \frac{\frac{1}{N} \sum f^2}{\frac{1}{N} \sum (f - f')^2} = 10 \lg \frac{\sum f^2}{\sum (f - f')^2} \quad (5)$$

$$\text{MSE} = \frac{1}{N} \sqrt{\sum (f - f')^2} \quad (6)$$

式中, f 为原始信号; f' 为去噪后信号; N 为信号

长度。

2.3 线圈电流小波阈值去噪实现

针对采集的ABB VD4高压断路器合闸线圈电流信号原始波形,采用Matlab小波工具箱对信号进行去噪处理。具体操作流程如下:

- 1) 在Matlab命令窗口中输入wavemenu指令,打开小波工具箱并选择Wavelet 1-D一维小波。
- 2) 加载未去噪的原始信号,并选择用于小波分析的小波基以及分解层次。
- 3) 经过分析后图像中出现原始信号 S 、近似信号 a^* 和细节分量 d^* 。
- 4) 从四种阈值策略(Sqtwolog、Rigrsure、Heursure和Minimaxi)中选择一种策略,并选择软阈值。
- 5) 选择噪声结构,由于工程应用中噪声一般不只含有白噪声,所以将噪声结构选为非白噪声。
- 6) 对信号进行正式去噪处理,并根据去噪后信号计算信噪比(SNR)与最小均方误差(MSE)。

综合分析选取了Db4、Sym6和Boir4.4三种小波基进行比较分析,表1为分解层数为4时,在四种不同阈值策略下不同小波基函数的消噪结果。

其中,均方根误差MSE越小,消噪效果越好;信噪比SNR越大,消噪效果越好;从表中可以清晰地看出,选用Db4小波基,分解层次为4,Rigrsure和Heursure阈值策略下可得到较高的信噪比和较低的均方根误差。因此,本文选取Db4小波基、分解层次为4、Rigrsure阈值策略及软阈值对信号进行除噪。图2为小波去噪界面,图3为去噪效果图。从图中可以看到消噪后信号明显变得平滑,从而为后期信号特征值提取和故障诊断提供了保障。

表1 不同阈值策略消噪效果对比

小波基阈值策略	Sqtwolog		Minimax		Rigrsure		Heursure	
	SNR	MSE	SNR	MSE	SNR	MSE	SNR	MSE
Db4	67.802	0.0961	71.910	0.0599	98.647	0.0028	98.647	0.0028
Sym6	67.956	0.0944	72.021	0.0591	67.956	0.0944	96.587	0.0035
Boir4.4	67.958	0.0944	72.066	0.0588	95.457	0.0040	95.457	0.0040

3 合(分)闸线圈电流特征值的提取

线圈电流信号特征提取的思路为:先从电流波形中截取 $t_0 \sim t_4$ 时间段,然后进一步确定 t_1 、 t_2 和 t_3 时刻,并得到相应的电流值,即可确定电流波形的所有特征。

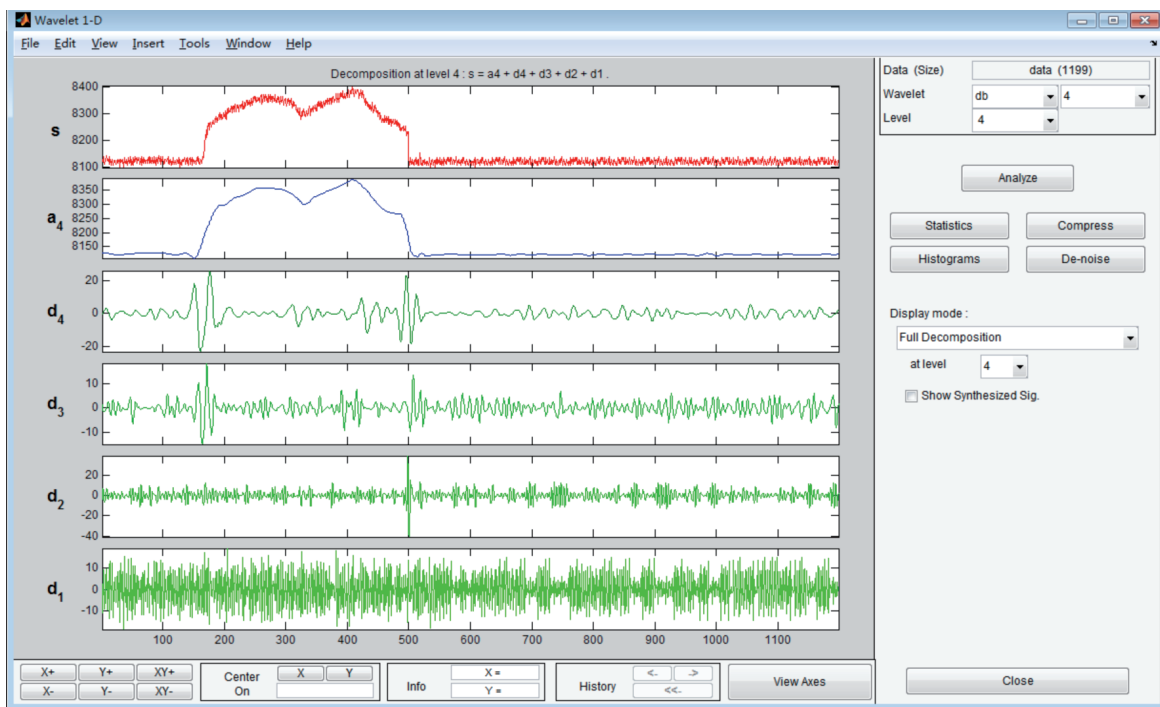


图2 小波去噪界面

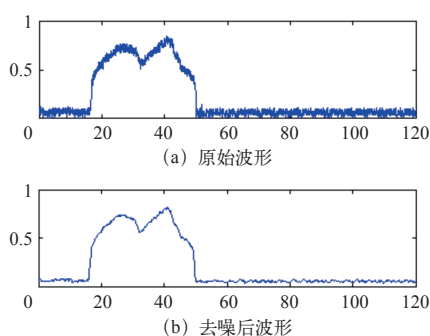


图3 小波阈值去噪效果

3.1 $t_0 \sim t_4$ 时间段的截取

为了从电流波形数据中截取 $t_0 \sim t_4$ 时间段，利用小波分析在检测突变点方面的优势分别确定 t_0 、 t_4 时刻。将经过小波去噪的信号进行四层分解： $[c,l]=\text{wavedec}(\text{BF},4,'Db4')$ ，其中BF为去噪后的信号，Db4为小波类型。通过如下代码，生成四层细节系数：

```
for i=1: 4
    decmp=wrcoef('d',c,l,'Db4',5-i); //小波系数的重构
    subplot(4,1,i);
    plot(decmp);
    ylabel(['d',num2str(5-i)]);
End
```

图4为四层细节分量图，从实验效果来看，进行第一层的分解即可满足要求。

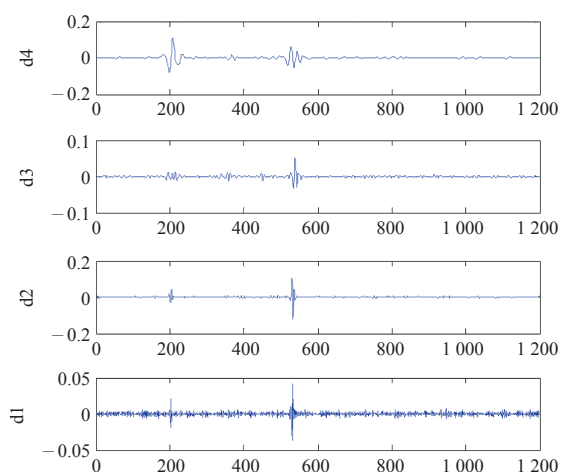


图4 细节分量图

通过 $cD1=\text{wrcoef}('d',c,l,'db4',1)$ 提取尺度1的高频系数，为了更好地提取突变点，对系数作如下处理：

1) 取绝对值

$$cD=\text{abs}(cD1) \quad (7)$$

2) 规正处理

$$Ca=[cD-\min(cD)]/[\max(cD)-\min(cD)] \quad (8)$$

3) 削波处理

$$Ca=\begin{cases} Ca(i) & Ca(i) \geq m \\ 0 & Ca(i) < m \end{cases} \quad (9)$$

式中， i 为序号； m 为阈值，根据实验统计，最终确定取 $m=0.3$ ，通过 Ca 即可找到峰值，从而确定起始突变点 t_0 和最终突变点 t_4 。图5为削波处理后系数图。

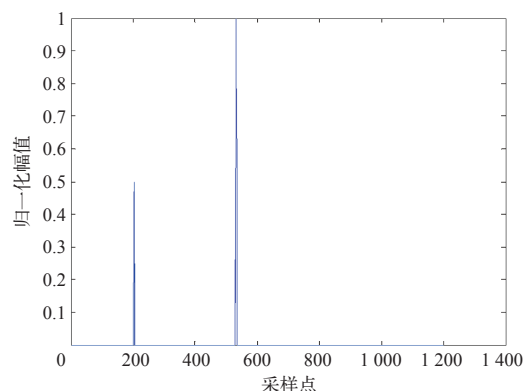


图5 削波处理后系数图

3.2 t_1 、 t_2 和 t_3 时刻的选择

将电流波形截取出来之后即确定了波形的起始位置 t_0 和终止位置 t_4 ，再确定 t_1 、 t_2 和 t_3 三个点即可。观察图1知， t_1 、 t_2 和 t_3 刚好为波形的三个极值点。因此可用求导的方式找出极值点，电流的波形是由数字序列组成的，根据导数的定义可得

$$f'(x)=\lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta y}{\Delta x} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{f(x_0+\Delta x)-f(x_0)}{\Delta x} \quad (10)$$

当采样间隔足够小时，可以通过相连两点间的连线重构信号。因此可用相邻两点连线的斜率来代替采样点处的导数值。为了找到三个极值点，只需要找到导数过零点即可。在寻找极值点过程中，由于干扰信号的存在，可能会出现连续多个过零点，因此需要确定一个采样间隔阈值，对检测的零点作分组处理，由于电流波形为先波峰再波谷后波峰，所以可在第一分组中求最大值确定 t_1 ，第二分组中求最小值确定 t_2 ，第三分组中

求最大值确定 t_3 ，这样就找到了 t_1 、 t_2 和 t_3 三个特征点，并可得到相应的电流值 I_1 、 I_2 和 I_3 。

根据上述方法，对断路器正常合闸线圈电流波形进行特征值提取，得到的特征值如表2所示。通过实验分析可知，特征值能够准确地提取，并为后续的故障检测与诊断提供依据。

表2 线圈电流波形特征值

合闸动作	t_1/ms	t_2/ms	t_3/ms	t_4/ms	I_1/A	I_2/A	I_3/A
第一组参数	31.1	36.0	44.8	52.9	0.735	0.543	0.817
第二组参数	30.7	36.3	45.0	52.8	0.730	0.541	0.815
第三组参数	30.9	35.9	44.6	53.0	0.733	0.548	0.820

4 结束语

1) 文中针对高压断路器合(分)闸线圈电流特征值提取进行了研究，为准确提取合(分)闸线圈电流信号特征值，首先采用小波阈值去噪法对合闸线圈电流信号进行预处理，选出最佳的去噪方案；然后采用小波分析、近似求斜率及求极值点的方法，提取去噪后合(分)闸线圈电流信号的特征值点。结果表明，特征值能够被准确地提取出来，为后期的故障检测、诊断等奠定了基础。

2) 由于在特征值提取过程中，几处阈值选取均是统计意义上的值，固定阈值不能适用于所有信号；而且文中仅对特征值进行了提取，并没有实现真正意义上的故障诊断。故采用自适应的阈值以及采集多种故障数据，并进行故障分类判别，将是下一步的研究方向。

参考文献

- [1] 林莘. 现代高压电器技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- [2] 刘艳, 陈丽安. 基于SOM的真空断路器机械故障诊断 [J]. 电工技术学报, 2017, 32(5): 49-54.
- [3] 程序, 关永刚, 张文鹏, 等. 基于因子分析和支持向量机算法的高压断路器机械故障诊断方法 [J]. 电工技术学报, 2014, 29(7): 209-215.
- [4] White J P E, Dupraz J P, Montillet G F. Strategy for applying a digital SF₆ monitoring device to high voltage circuit breakers [C]. Power Engineering Society General Meeting, IEEE, 2003: 2223-2227.
- [5] 谢文靖. 高压断路器智能故障诊断方法研究 [D]. 昆明: 云南大学, 2013.
- [6] 钟建英, 孙银山, 张文涛, 等. 基于分合闸线圈电流信号的高压断路器在线监测系统 [J]. 现代电子技术, 2016, 39(22): 133-137.
- [7] 卞和营, 代克杰. 基于分合闸线圈信号的断路器状态在线监测系统 [J]. 现代电子技术, 2014(3): 100-104.
- [8] 李大卫, 徐党国, 孙云生, 等. 基于分合闸线圈电流的断路器缺陷诊断及试验方法研究 [J]. 高压电器, 2015(8): 114-118.
- [9] 陈志英, 周小娜, 卢超龙. 高压断路器合(分)闸线圈电流在线监测系统的研制 [J]. 厦门理工学院学报, 2016, 24(5): 6-12.
- [10] Nelson J H. Electric utility considerations for circuit breaker monitoring [C]. Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2001 IEEE/PES, IEEE, 2001(2): 1094-1097.
- [11] 蒋志浩, 于群, 董骊. 基于改进动态时间规整算法的断路器故障诊断 [J]. 工矿自动化, 2016, 42(8): 52-55.
- [12] 徐国政, 张节容, 钱家骊. 高压断路器原理和应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.
- [13] 袁金丽, 李奎, 郭志涛, 等. 基于SVM与合分闸线圈电流参数的高压断路器机械故障诊断 [J]. 高压电器, 2011, 47(3): 26-30.
- [14] 李大进. 高压断路器在线监测研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2004.
- [15] 胡晓光, 戴景民, 纪延超, 等. 基于小波奇异性检测的高压断路器故障诊断 [J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(5): 67-70.
- [16] 孙鹏, 郑志成, 高翔. 基于小波分析的故障电弧检测方法 [J]. 高压电器, 2012, 48(1): 25-29.
- [17] 赵海龙, 王芳, 胡晓光. 小波包-能量谱在高压断路器机械故障诊断中的应用 [J]. 电网技术, 2004, 28(6): 46-48.

(收稿日期: 2017-08-03) EA