

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2020.01.027

断路器分合闸线圈电流波形特征值提取算法研究

宋亚凯, 张一茗, 张文涛, 李少华, 李得祥, 左 琪

(平高集团有限公司, 河南 平顶山 467001)

摘要: 断路器操动机构分合闸线圈电流波形对分析机构已有或潜在机械故障有重要参考意义, 由于受外界环境的影响, 许多算法在数据采集及波形特征点提取一致性方面存在一定的不足。文中利用零偏置计算、改进后的均值滤波算法对采集到的原始电流波形数据进行预处理以降低外界因素的影响, 同时针对不同的特征点, 依据其在波形中的特征进行分类, 研究相应的特征点提取算法; 在此基础上, 搭建了断路器分合闸线圈电流信号采集处理系统并完成了相应算法软件的开发, 且以某 550 kV 断路器配套的液压碟簧操动机构为测试样机对算法进行了验证, 获得了一致性较高的波形特征值。

关键词: 断路器操动机构; 分合闸线圈电流; 波形分析; 滤波算法; 故障识别

Research on Extraction Algorithm of Current Waveform Characteristic Value of Circuit Breaker Opening and Closing Coil

SONG Yakai, ZHANG Yiming, ZHANG Wentao, LI Shaohua, LI Dexiang, ZUO Qi

(Pinggao Group Co., Ltd., Henan Pingdingshan 467001, China)

Abstract: The current waveform of the winding mechanism of the circuit breaker operating mechanism has important reference significance for the existing or potential mechanical failure of the analysis mechanism. Due to the influence of the external environment, many algorithms have certain deficiencies in data acquisition and waveform feature point extraction consistency. In this paper, the zero-bias calculation and the improved mean filtering algorithm are used to preprocess the collected raw current waveform data to reduce the influence of external factors. According to the characteristics of the different feature points, the classification is carried out to study the corresponding Based on the feature extraction algorithm, the circuit breaker switching coil current signal acquisition and processing system was built and the corresponding algorithm software was developed. The algorithm was verified by a 550 kV circuit breaker as the test prototype, and the waveform feature values with high consistency were obtained.

Key words: circuit breaker operating mechanism; current of circuit breaker opening and closing coil; waveform analysis; filtering algorithm; fault identification

0 引言

断路器在动作过程中, 其相应的分闸、合闸操作线圈电流波形能够反映线圈铁心动作过程各阶段的特性, 每台断路器在正常动作过程中, 其线圈电流波形具有一定的指纹特征, 这对于断路器操动机构的机械故障判别及潜在机械故障的诊断和识别有重要意义^[1-2]。但是, 在小电流信号采集和分析

的过程中, 受到外界环境干扰等因素影响, 当前许多算法在电流波形特征点提取的一致性方面存在着不足, 影响了断路器电流波形指纹特征的建立可识别。为解决该问题, 需要重点解决背景噪声去除、信号滤波以及特征点提取等问题^[3]。文中在介绍采集系统硬件设计的基础上, 重点介绍背景噪声去除、数据滤波、特征点提取等能够提高特征点提取一致性的算法, 并通过实践测试, 对算法效果进

收稿日期: 2019-08-05; 修回日期: 2019-10-15

基金项目: 平高集团有限公司科技项目(PGKJ2018-075)。

Project Supported by Science and Technology of Pinggao Group Co., Ltd.(PGKJ2018-075).

行验证。

1 采集处理系统整体方案

断路器分合闸线圈电流信号采集处理系统采用主控板与信号采集板分开的架构设计,这样可以提高信号采集的实时性。

系统架构见图1。霍尔电流传感器将相应的分(合)闸线圈的电流信号实时转换为电压信号,接入信号采集板的AI(模拟量输入)通道,将各通道的电压信号同步转换为数字信号并放入缓冲存储器中。主控板以一定的采集频率读取采集板卡的缓冲存储器中的数据并进行相应的处理,实现小电流信号的采集和分析。

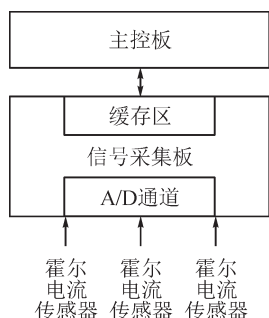


图1 线圈电流采集系统硬件架构图

Fig. 1 Cable current acquisition system hardware architecture diagram

2 小电流波形原始信号采集软件设计

首先,需要采集到小电流波形的原始信号,该信号由霍尔电流传感器转换为电压信号接入采集板卡,通过采集板卡将其转换为数字信号。采集板卡自身的程序主要包含参数初始化、A/D转换、缓存、通信等模块。文中所述方案采用通用采集板卡,在使用时直接通过主控板与采集板通信,主控板通过采集板的驱动接口函数向采集板卡设置相应的参数,定期从其缓存中读取各A/D通道转换后的数据并将数据按照规定的格式进行存储。

该程序模块的流程见图2。小电流信号采集程序启动后,首先进行初始化操作,然后对采集板卡参数进行设置。设置完成后,进入数据读取及存储环节。设置数据记录触发条件,一般情况下,设置采样电流的阈值作为触发条件,然后按固定的时间循环读取采集板卡缓存数据,并判断是否达到记录触发条件,如果未达到记录触发条件,则通过曲线实时显示采集到的数据,同时,进入下一次数据读取。如果达到记录触发条件,则新建并打开相应的数据文件,保存上一次读取的数据片段,及当前读

取数据片段,直至数据存储到设置的长度后,完成数据记录,关闭数据文件,完成数据记录,进入下一次数据读取。此时,文件记录的是采集到的原始波形数据。

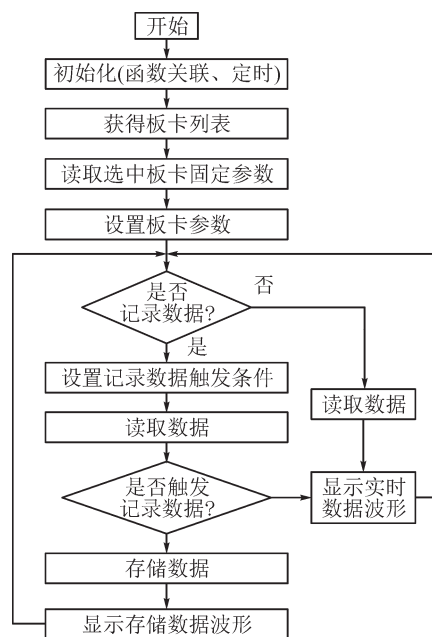


图2 小电流信号采集程序流程图

Fig. 2 Flow chart of small current signal acquisition program

3 小电流波形数据预处理算法

受到周围电磁环境等因素的影响,采集到的原始波形数据存在一定的信号干扰,如果不进行预处理处理,将无法进行特征点识别及后续的算法处理^[4-5]。主要的预处理过程有:零偏置计算处理、局部均值滤波计算。

3.1 采集数据零偏置处理

在线圈回路中无电流时,受周围环境影响,有底部噪声,电流传感器中会输出一个随机噪声波形,见图3。

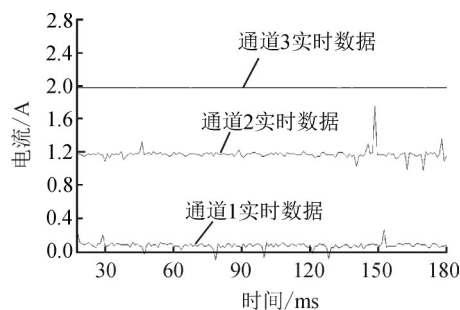


图3 电流信号为0时的背景噪声波形

Fig. 3 Background noise waveform when the current signal is 0

如图3所示,最下方曲线为采集通道1数据,中间曲线为采集通道2数据,最上方曲线为采集通道3

数据(测试时未接传感器,因此置零)。为了便于显示,将通道2和通道3数据分布在Y方向(竖直方向)向上偏置了1和2。因此,理想情况下,如果电路中输入电流流过,在图3的显示界面中,通道1的数据曲线应为 $Y=0$ 的直线,通道2的数据曲线应为 $Y=1$ 的直线。

经分析,该噪声在一定的环境条件下,其采样点幅值的均值维持在相对稳定的水平。因此,在正式进行电流采样前,可通过采集一组电流为0时传感器输出的数据,进行平均值运算,得到底部噪声的近似值。

$$F_{av} = \frac{1}{k} \left(\sum_{n=1}^k F_n \right) \quad (1)$$

式(1)中: F_{av} 为一段个数为 K 的采样数据片段的平均值; K 为采样数据片段中数据点个数; F_n 为第 n 个数据点的采样值。

将 F_{av} 作为当前环境下数据采样的底部噪声值。在正式采样过程中,将采集到的传感器输出值减去当前环境的底部噪声值,即可得到去除底部噪声后,相对准确的采样数值,分别见图4、5。

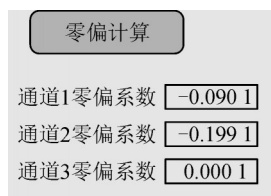


图4 零偏置系统计算结果

Fig. 4 Zero offset system calculation results

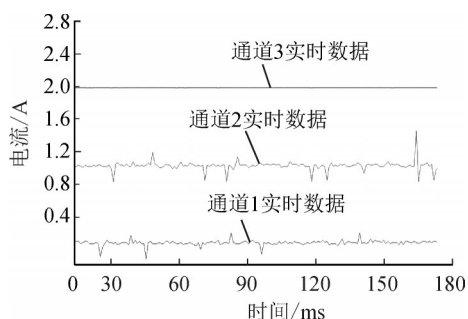


图5 经过零偏置处理后的波形

Fig. 5 Waveform after zero offset processing

对比图3、5可以发现,经过零偏置处理后,波形在Y方向上有明显的平移,其值在0幅值范围附近,可见该算法能够明显消除背景噪声。

3.2 数据滤波

滤波也称为平滑处理,采集到的原始电流幅值数据,由于受到环境中随机干扰的影响,存在一定的毛刺,需要进行平滑处理,见图6。

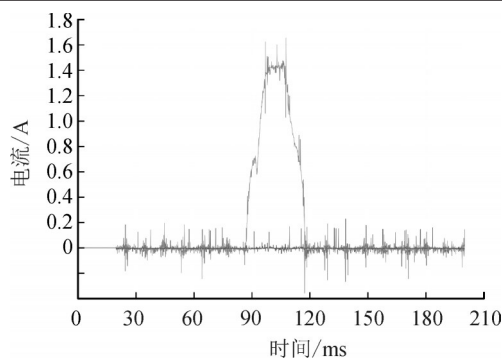


图6 采集到的原始波形

Fig. 6 The original waveform acquired

在记录的一组电流幅值数据中,当电路中没有电流流过时,仍然有噪声幅值数据,这类噪声数据可以通过区间筛选的方法将其去除,即根据幅值大小及较大幅值连续的点数,设置一定的阈值,高于该阈值则确定为电流波形数据,低于该阈值,则确定为无电流时的噪声信号,初步筛选出电流波形数据。

得到电流波形数据后,可采用滑动求均值的方法进行滤波。该方法基本思想是:对于某个采样点数据,以该采样点为中心,在其左右选择一定长度的对称邻域区间,该区间内所有采样点幅值的平均值即可作为该采样点的幅值。如果目标采样点位于波形的起始端或者是结束端,无法以该采样点为中心寻找对称邻域,则以该点前面或后面一定长度的邻域点内的平均值作为该点的采样幅值。

滤波算法的公式为

$$F'_i = \frac{\sum_{n=1}^R F_{i-n} + \sum_{n=1}^R F_{i+n} + F_i}{2R+1} \quad R \leq i \leq N-R \quad (2)$$

$$F'_i = \frac{\sum_{n=1}^R F_n}{R} \quad 0 \leq i < R \quad (3)$$

$$F'_i = \frac{\sum_{n=0}^{R-1} F_{N-n}}{R} \quad N-R < i \leq N \quad (4)$$

式(2)-(4)中: F'_i 为第 i 个数据点滤波后的幅值; F_i 为滤波前第 i 个数据点的幅值; N 为单次单通道总采样点数; R 为对称滤波邻域的半径。

滤波后的小电流信号波形见图7。从图7可以看出,采用不同滤波半径,得到的波形平滑度有一定的差距,在一定范围内,滤波半径 R 越大,波形越平滑,但是,如果 R 过大,则容易造成波形失真。因此,选择合适的滤波半径,对滤波效果影响较大,经过尝试,在单通道采样率为10 kHz时,滤波半径选择6,能够得到较为平滑且失真较小的波形。

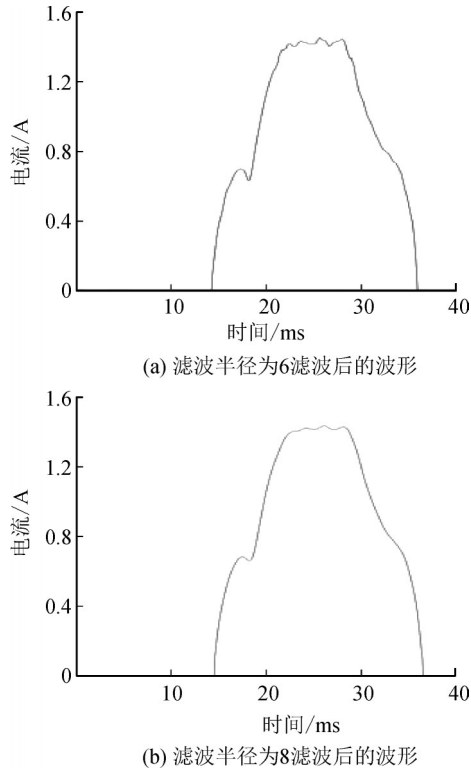


图7 滤波后的小电流信号波形

Fig. 7 Filtered small current signal waveform

4 小电流波形数据特征点提取算法及其在故障判别中的应用

4.1 典型分合闸线圈电流波形的特征

典型的断路器分合闸线圈电流波形特征见图8。

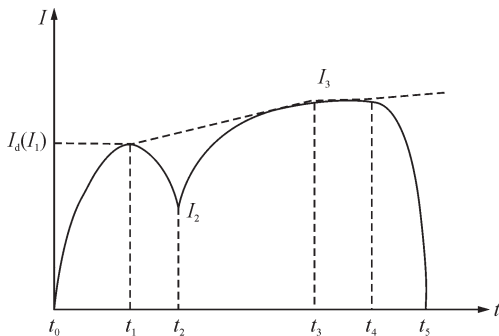


图8 典型分(合)闸线圈电流波形

Fig. 8 Typical sub-coil coil current waveform

理论上线圈电流可以分为5个工作阶段^[6-8],每个阶段对应铁心及操动机构的动作如下:

1) $t_0 \sim t_1$ 阶段。线圈在 t_0 时刻带电,电流开始增加,至 t_1 时刻铁心开始动作。该阶段,电流呈现指数规律上升,电流的上升时间和电流 I_1 能够反映线圈的电阻特性。

2) $t_1 \sim t_2$ 阶段。铁心开始运动速度增加,反电动势增加导致线圈电流减小,在 t_2 时刻铁心触及负载,运动速度迅速降低,反电动势减小,导致线圈电流到达谷底后开始增加。谷底对应的电流值 I_2 能够反应

铁芯撞击负载时的速度^[9-11]。如果操动机构存在卡涩、变形等问题,可通过该阶段的波形反映。

3) $t_2 \sim t_3$ 阶段。由于铁心停止运动,反电动势为0,线圈电流持续增加, I_3 为线圈电流的最大值^[12]。

4) $t_3 \sim t_4$ 阶段。电流基本达到稳定状态,在部分操动机构线圈中该阶段时间非常短。

5) $t_4 \sim t_5$ 阶段。辅助开关开始分断,线圈电流迅速降低,完成整个动作过程。

4.2 波形特征参数的提取算法

通过典型波形分析可知,需要从波形数据中自动提取 t_0 、 t_1 、 t_2 、 t_3 、 t_4 、 t_5 、 I_1 、 I_2 、 I_3 8个特征量,用于分析操动机构的机械状态^[13-15]。提取特征参数的关键是从波形数据中通过算法自动寻找出各时刻对应的数据点及相应的幅值。可以采用分类提取的算法,提取各特征值。

4.2.1 初始时刻及终止时刻的确定

t_0 即线圈通电时刻,即线圈电流开始增大的时刻, t_5 是线圈掉电时刻,即线圈电流幅值降为0的时刻。通过把连续的0值数据片段去掉后,得到的数据片段即可直接确定上述两个时刻值,得到的两个时刻作为参照标准,为后续各特征值的提取提供对照。

4.2.2 铁心动作时刻及辅助开关分断时刻的筛选

t_1 、 t_4 两时刻对应的幅值点可以看作极大值点,其共同特征是:位于数据点两侧附近的其他数据点的幅值均不大于该点。可利用该条件进行特征值筛选。

首先按式(5)、(6)计算,即

$$\Delta F_{i1} = F_i - F_{i-1} \quad (5)$$

$$\Delta F_{i2} = F_i - F_{i+1} \quad (6)$$

式(5)、(6)中, F_i 为第 i 个数据点的电流幅值。

上述计算完成后,遍历所有波形数据,如果第 i 点同时满足

$$\Delta F_{i2} \geq 0 \text{ 且 } \Delta F_{i1} \geq 0 \quad (7)$$

则该点确定为特征点,记录下对应的 i 值。正常情况下,一段完整的波形数据,可筛选出两个满足条件的特征点, i 值较小的点对应的为 t_1 ,另外一个点对应的时刻为 t_4 。 t_1 时刻确定后,其对应的电流幅值即为 I_1 。

4.2.3 铁心触及负载时刻的筛选

从典型特征波形分析可知,铁心触及负载时刻 t_2 最大的特征为电流幅值在邻域内最小,可利用该条件进行特征点筛选。利用式(5)、(6)计算第 i 点与左右两侧相邻点的差值,如果第 i 点同时满足

$$\Delta F_{i2} \leq 0 \text{ 且 } \Delta F_{i1} \leq 0 \quad (8)$$

则该点确定为 t_2 时刻特征点,其对应的电流幅值即为 I_2 。

4.2.4 电流稳态点的筛选

通过图8可知,电流稳态点的电流幅值最大,因此,可以通过遍历所有波形数据点,筛选出电流幅值最大的点即为 t_3 点,其对应的电流值为 I_3 ,该值一般也作为本次动作过程中整个线圈电流的幅值。

4.3 波形特征值的应用

在实际应用时,多采用与标准电流波形特征值对比的方法进行故障判别^[16]。以下是3种常见故障的判别方法。

4.3.1 机构动作线圈的匝间短路

线圈匝间短路会导致线圈阻抗减小,从而引起线圈电流增加^[17]。所以,如果某次动作过程线圈电流波形与该机构标准电流波形相比, I_1 、 I_2 电流值增加较多,则可能是线圈内匝间短路造成的。该故障如果不及时处理,会造成线圈电流异常增大,在辅助开关触点切换时会产生较大的电流,导致触点融毁。

4.3.2 铁心卡涩

铁心卡涩表现为从铁芯开始运动至开始脱扣的这个过程速度降低,从而该过程的时间延长,且在这个过程中由于铁心遇到的阻力增加会导致线圈电流增大^[18]。所以,如果某次动作过程线圈电流波形与该机构标准电流波形相比, t_1 不变或变化较小, t_2 、 t_3 、 t_4 以及 I_2 都增大,则说明存在铁心卡涩故障。严重的机构卡涩可能会造成拒分现象的发生^[19]。

4.3.3 铁心卡滞

铁心卡滞表现为铁心开始动作一段时间后,由于卡滞不再运动,线圈电流持续增加^[20]。即在 t_2 时刻线圈电流持续增加在 t_3 时刻电流达到一定数值后,一直处于带电状态,无法实现脱扣,辅助开关不能切换,直至电源断开。该故障可能导致线圈烧毁。

5 测试结果

分(合)闸线圈电流采集处理系统搭建完成后,在某550 kV断路器上进行了测试。该断路器采用碟簧液压操动机构,测试时将两个霍尔电流传感器分别穿过操动机构的分闸线圈及合闸线圈回路。依次进行了5次分闸、5次合闸操作,系统均有效记录了动作过程中的电流波形,并给出了特征值提取结果,见表1、2。

从表1、2中可看出,分闸线圈电流波形中 t_3 与 t_4 重合,通过对实际波形分析发现,波形中 t_3 与 t_4 时刻重合,见图9。

表1 合闸线圈电流波形特征值提取结果

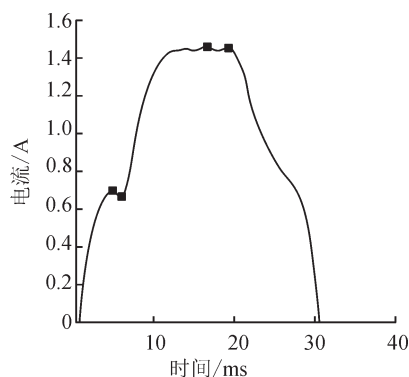
Table 1 Closing coil current waveform characteristic value extraction result

序号	t_1/ms	I_1/A	t_2/ms	I_2/A	t_3/ms	I_3/A	t_4/ms	I_4/A
1	4.2	0.685 5	5.2	0.652 3	14.4	1.409 3	19.4	1.409 1
2	4.1	0.681 6	5.3	0.641 9	15.6	1.417 8	18.7	1.417 9
3	4.3	0.700 1	5.3	0.667 6	14.0	1.438 1	19.3	1.438 2
4	4.2	0.684 1	5.3	0.644 6	15.1	1.423 8	18.5	1.423 5
5	4.2	0.687 5	5.3	0.652 7	14.4	1.426 8	17.6	1.427 0

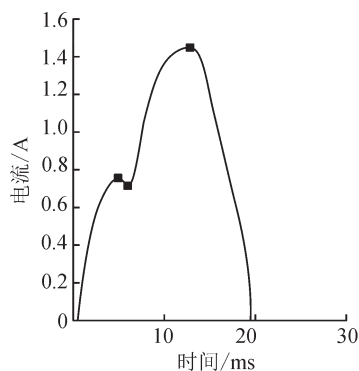
表2 分闸线圈电流波形特征值提取结果

Table 2 Opening coil current waveform characteristic value extraction result

序号	t_1/ms	I_1/A	t_2/ms	I_2/A	t_3/ms	I_3/A	t_4/ms	I_4/A
1	4.5	0.741 5	5.5	0.725 2	12.5	1.402 2	12.5	1.402 2
2	4.5	0.741 7	5.6	0.704 5	12.5	1.428 4	12.5	1.428 4
3	4.9	0.782 7	5.9	0.750 3	13.1	1.427 7	13.1	1.427 7
4	4.6	0.742 6	5.6	0.709 5	12.7	1.401 6	12.7	1.401 6
5	4.5	0.729 7	5.5	0.695 3	12.5	1.405 4	12.5	1.405 4



(a) 合闸线圈电流波形及特征点标注



(b) 分闸线圈电流波形及特征点标注

图9 小电流信号波形及特征点标注

Fig. 9 Small current signal waveform and feature point labeling

6 结语

从以上数据分析可知,系统自动提取的不同动作中同类特征值的差值均在相对较小的范围内波

动,说明文中所述的特征点提取算法的一致性能够满足要求。

参考文献:

- [1] 黄新波,王霄宽,方寿贤,等. 智能变电站断路器状态监测IED设计[J]. 电力系统自动化,2012,36(22):95-99.
HUANG Xinbo, WANG Xiaokuan, FANG Shouxian, et al. Design on status monitoring IED of circuit breaker for smart substation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012,36(22):95-99.
- [2] 钟建英,刘洋,林莘,等. 基于振动信号特征的高压断路器机械故障诊断技术研究[J]. 高压电器,2013,49(9):43-54.
ZHONG Jianying, LIU Yang, LIN Xin, et al. Mechanical fault diagnosis technology research of high-voltage circuit breaker based on the vibration signal characteristic[J]. High Voltage Apparatus, 2013,49(9):43-54.
- [3] 关永刚,杨元威,钟建英,等. 高压断路器机械故障诊断方法综述[J]. 高压电器,2018,54(7):10-19.
GUAN Yonggang, YANG Yuanwei, ZHONG Jianying, et al. Review on mechanical fault diagnosis methods for high-voltage circuit breakers[J]. High Voltage Apparatus, 2018,54(7):10-19.
- [4] RUNDE R H. Continuous monitoring of circuit breakers using vibration analysis[J]. IEEE Transaction on Power Delivery, 2005,20(20):2458-2465.
- [5] 朱萌,梅飞,郑建勇,等. 基于深度信念网络的高压断路器故障识别算法[J]. 电测与仪表,2019,56(2):10-15.
ZHU Meng, MEI Fei, ZHENG Jianyong, et al. Fault recognition algorithm for high voltage circuit breakers based on deep belief network[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019,56(2):10-15.
- [6] 董镒,李恒真,易林. 基于形态小波和支持向量机的高压断路器状态监测和故障诊断[J]. 电测与仪表,2017,54(4):92-98.
DONG Di, LI Hengzhen, YI Lin. Condition monitoring and fault diagnosis of high voltage circuit breaker based on morphology wavelet and support vector machine[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2017,54(4):92-98.
- [7] 王德文,闫春雨. 变电站在线监测系统的一体化建模与模型维护[J]. 电力系统自动化,2013,37(23):78-82.
WANG Dewen, YAN Chunyu. Integrated modeling and model maintenance of on-line monitoring system in substation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013,37(23):78-82.
- [8] 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):135-137.
ZHONG Jianying, SUN Yinshan, ZHANG Wentao, et al. High-voltage circuit breaker on-line monitoring system based on opening and closing coil current signal[J]. Modern Electronics Technique, 2016(39):135-137.
- [9] 彭鑫霞,关永刚,高凯,等. 应用形态学滤波方法去除高压断路器线圈电流信号的噪声[J]. 高压电器,2015,51(7):2-6.
PENG Xinxia, GUAN Yonggang, GAO Kai, et al. Noise removal from coil current signal of high voltage circuit breaker with the morphological filter[J]. High Voltage Apparatus, 2015,51(7):2-6.
- [10] 孙银山,张文涛,张一茗,等. 高压断路器分合闸线圈电流信号特征提取与故障判别方法研究[J]. 高压电器,2015,51(9):134-139.
SUN Yinshan, ZHANG Wentao, ZHANG Yiming, et al. Research on feature value extraction and fault recognition of coil current signal in high-voltage circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2015,51(9):134-139.
- [11] 张永奎,赵智忠,冯旭,等. 基于分合闸线圈电流信号的高压断路器机械故障诊断[J]. 高压电器,2013,49(2):37-42.
ZHANG Yongkui, ZHAO Zhizhong, FENG Xu, et al. Mechanical fault diagnosis of high voltage circuit breakers based on opening/closing coil current parameters[J]. High Voltage Apparatus, 2013,49(2):37-42.
- [12] 段传宗,鄢志平,鄢志辉. 高压断路器故障检测与诊断技术[M]. 北京:中国电力出版社,2014.
DUAN Chuanzong, YAN Zhiping, YAN Zhihui. Technology of fault detection and diagnosis for high voltage disconnectors[M]. Beijing:China Electric Power Press, 2014.
- [13] JOHAL H, MOUSAVI M J. Coil current analysis method for predictive maintenance of circuit breakers[C]//2008 T & D IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition. Chicago, America:IEEE,2008:1-7.
- [14] 张一茗,李少华,陈士刚,等. 基于Relief F特征量优化及BP神经网络识别的高压隔离开关故障类型与位置诊断方法[J]. 高压电器,2018,54(2):12-18.
ZHANG Yiming, LI Shaohua, CHEN Shigang, et al. Fault type and position diagnosis method of high-voltage disconnectors based on relief F characteristic quantity optimization and BP neural network recognition[J]. High Voltage Apparatus, 2018,54(2):12-18.
- [15] 高群伟,金光耀,谷君,等. 高压断路器分合闸时间控制方法研究[J]. 高压电器,2018,54(9):58-65.
GAO Qunwei, JIN Guangyao, GU Jun, et al. Reduction of breaking time of high-voltage circuit breaker for intelligent substation[J]. High Voltage Apparatus, 2018,54(9):58-65.
- [16] 史秋明. 直流电磁铁的动特性研究[J]. 自动化仪表,2007,28(5):20-23.
SHI Qiuming. Study on the dynamic characteristic of the dc electromagnet[J]. Process Automation Instrumentation, 2007,

- 28(5):20-23.
- [17] 刘旭东, 李 辉, 赵建峰. 断路器在线监测装置设计及仿真[J]. 沈阳理工大学学报, 2017, 36(3):65-67.
LIU Xudong, LI Hui, ZHAO Jianfeng. The design and simulation of circuit breaker monitoring equipment[J]. Transactions of Shenyang University of Science and Technology, 2017, 36(3):65-67.
- [18] 路光辉, 雍明超, 周水斌. 新一代智能变电站开关综合监测装置研制[J]. 电测与仪表, 2016, 53(16):118-122.
LU Guanghui, YONG Mingchao, ZHOU Shuibin. Research on switchgear integrated monitoring device for new smart substation[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2016, 53(16):118-122.
- [19] 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.
YUAN Jinli, LI Kui, GUO Zhitao, et al. Mechanical failure diagnosis of high voltage circuit breaker based on SVM and opening/closing coil current parameters[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(3):26-30.
- [20] 荣 强, 赵莉华, 朱林林, 等. 基于线圈电流特征量优化的断路器状态评估[J]. 高压电器, 2016, 52(6):199-203.
RONG Qiang, ZHAO Lihua, ZHU Linlin, et al. Status assessment of circuit breakers based on coil current characteristic quantity optimization[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(6):199-203.
- 宋亚凯(1987—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事高压开关设备智能化技术研究。
- 张一茗(1983—), 男, 高级工程师, 主要从事高压开关设备智能化技术方面的研究。