

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2016.11.032

基于最小二乘法的断路器位移监测数据的拟合与处理

雍明超, 赵 宝, 路光辉, 牧继清, 周 钟,
郭 旭, 梁武民, 吕 侠, 王伟杰

(许继电气股份有限公司, 河南 许昌 461000)

摘要: 针对高压断路器行程位移监测中刚分点和刚合点处由于机械振动和电磁干扰产生的抖动现象, 提出了一种基于最小二乘法的断路器行程位移数据拟合与处理算法。通过在线监测原始数据的导数判别剔除相应的干扰并进行数据的第 1 次拟合, 在此基础上对拟合数据和原始数据的比较, 再次剔除一定数量的干扰后进行二次拟合。并对拟合后的数据进行录波处理和机械特性参数计算。实际验证表明, 该算法可以有效地剔除行程位移数据的干扰点, 并且能够真实地反映断路器行程位移曲线, 从而准确计算出分合闸速度, 分合闸时间等关键参量, 说明该算法是有效和实用的。

关键词: 断路器; 行程位移曲线; 分合闸速度; 干扰; 最小二乘法

Fitting and Processing of Circuit Breaker Displacement Monitoring Data Based on Least Square Method

YONG Mingchao, ZHAO Bao, LU Guanghui, MU Jiqing, ZHOU Zhong, GUO Xu,
LIANG Wumin, LYU Xia, WANG Weijie

(XJ Electric Co., Ltd., Henan Xuchang 461000, China)

Abstract: To eliminate the jitter at the very on and off points of high voltage breakers caused by mechanical vibration and EMI in their stroke displacement monitoring, a stroke displacement data fitting and processing algorithm based on least square method is presented. The derivative criterion of the original data of online monitoring is adopted to eliminate the corresponding interference and perform first data fitting, then the fitted data and the original data are compared to exclude a certain number of interference data for second fitting. And record waveform processing and calculation of mechanical parameters of the fitted data are conducted. Practical verification indicates that the proposed algorithm can effectively eliminate the interference points of displacement data and reflect real circuit breaker displacement curve, so as to accurately calculate the key parameters such as circuit breaker stroke displacement, switching speed, switching time, and so on, showing its effectiveness and applicability.

Key words: circuit breaker; stroke displacement curve; opening and closing speed; interference; least square method

0 引言

在电力系统中, 高压断路器能否可靠运行关系到整个电网的安全稳定。随着技术的发展, 国内外电气制造商不断提升断路器可靠性及运行寿命, 但目前断路器故障分析主要停留在停电大检修阶段进行^[1-2]。

根据国家电网公司统计, 高压断路器出现的故障 80% 是由于机械特性不良造成, 因此对高压断路器机械特性进行在线监测显得尤为重要。国内外研究表明, 断路器分合闸时的行程—时间特性是表征断路器机械特征的重要参数, 也是计算断路器分合闸速度的依据, 对断路器机械特性监测的关键是获取表征机械特性的特征量。目前主要通过综合分合闸线圈、断路器分合位置与断路器行程位移数据计

算分析得出分合闸速度、分合闸时间等特征参数。用来反映断路器铁心运动情况,判断断路器是否处于正常状态。因此断路器分合闸时的行程位移数据的准确性对高压断路器机械特性的在线监测及故障诊断具有重要的意义^[3]。断路器机构在分合闸的状态下,机构出现的剧烈振动以及现场的电磁干扰会造成行程位移曲线在刚分点和刚合点处出现较大的抖动,造成分合闸速度、分合闸时间等特征参数计算出现较大误差。因此如何处理行程位移曲线出现的干扰成为断路器机构在线监测准确性的关键因素。

1 断路器机械特性计算方法

1.1 分合闸时间计算

合闸时间是从合闸线圈有电流开始到极触头都接触瞬间为止(即为刚合点)的时间间隔;分闸时间是从分闸线圈有电流开始到所有极触头都分离瞬间(刚分点)为止的时间间隔。通过每次分合闸线圈的电流启动特征,记录分合闸线圈和行程位移数据,以此进行分析计算分合闸时间特征参量^[4]。分合闸时间计算的关系见图1。

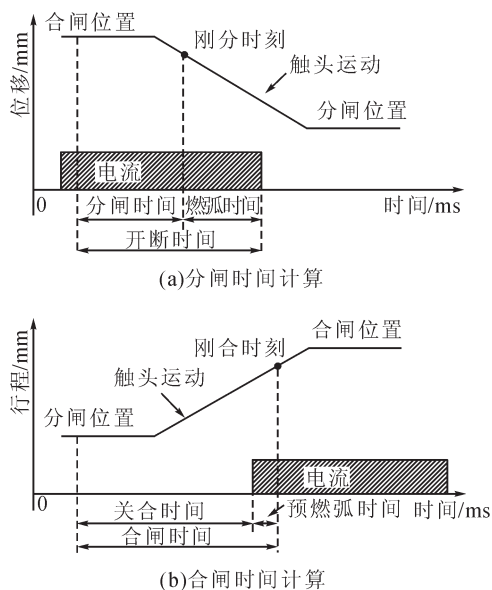


图1 分合闸时间计算

Fig. 1 Calculation of opening and closing time

1.2 分合闸速度计算

断路器正常运行时行程位移曲线见图2。 H_1 代表断路器刚分刚合点,根据行程曲线(最终位移 H -超程)的位移值 H_1 ,所对应的时间 t_1 ,前推10 ms所对应的位移值 H_0 。

$$V=(H_1-H_0)/0.01. \quad (1)$$

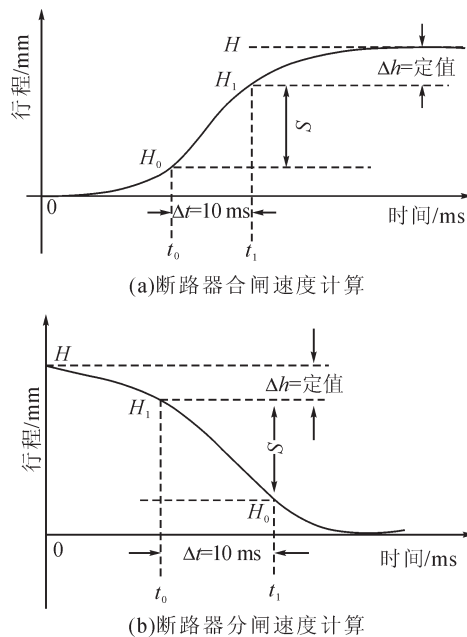


图2 断路器分合闸速度计算

Fig. 2 Calculation of opening and closing speed of circuit breaker

2 行程位移曲线的常规滤波算法

断路器行程位移数据是在现场多种干扰环境下在线测量的。传感器安装、空间电磁干扰、断路器本身的性能及供电电源性能等都可能造成所得到的波形曲线含有干扰产生的“毛刺”,尤其在刚分刚合点时出现较大的毛刺,这对计算断路器机构的几个特征量非常不利,因此对分合闸行程位移特性数据进行预处理显得非常重要。预处理滤除断路器刚分刚合点出现的较大干扰的同时,又要保证数据的真实性才能达到计算的准确性。

电磁干扰产生的干扰可以通过将信号采集回路外加屏蔽层且可靠接地和加装浪涌抑制器等方法进行滤除。其他因素引起的刚分刚合点的干扰处理,目前主要的预处理方法是采用低通滤波器、中值滤波算法等,在一定程度上达到了一定的预处理的效果,能够处理分合闸结束时出现的小毛刺。在断路器上安装电阻式角位移传感器,采用低通滤波与中值滤波相结合的方法对断路器行程位移数据进行预处理并进行录波,图3为经过200次单分单合录波的分合闸行程位移曲线中的一组。

由图3可以看出,采用低通滤波和中值滤波的方法无法处理断路器在刚分刚合点造成的较大干扰。

3 基于最小二乘法的位移曲线拟合与处理

为有效处理断路器机构在刚分刚合点出现较

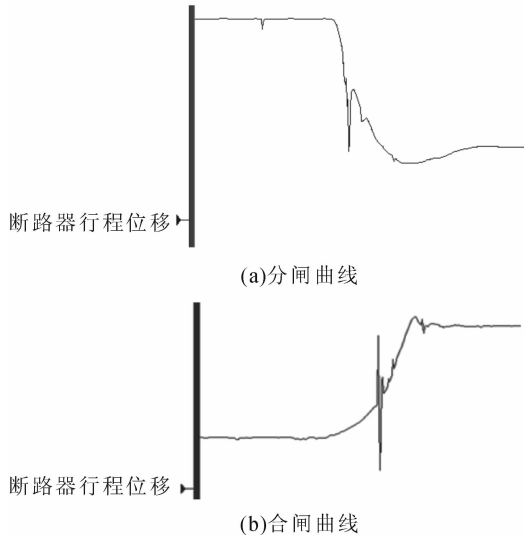


图 3 基于常规算法处理的断路器行程曲线

Fig. 3 The stroke displacement curve of circuit breaker based on conventional algorithm

大的干扰问题,文中提出基于最小二乘法的处理方式来解决该问题^[5]。按偏差平方和最小的原则选取拟合曲线,并且采取二项式方程为拟合曲线的方法,称为最小二乘法。最小二乘法原理与方法是保证具有最佳拟合和回归的最常用的方法^[6-9]。最小二乘法多项式曲线拟合,根据给定的 m 个点,并不要求这条曲线精确地经过这些点,而是曲线 $y=f(x)$ 的近似曲线 $y=\varphi(x)$ 。断路器刚分刚合点位置与相邻采样点在相对小的时间内可以认为是一个分段线性关系。如果采样率较高,可以利用最小二乘法方法进行曲线拟合消除相应的干扰点,且最大限度的保证数据的可用性。

3.1 基于最小二乘法的位移曲线拟合

基于最小二乘法的位移曲线拟合算法的程序实现见图 4。首先采用电阻式角位移传感器对断路器行程位移数据进行采样,得到一系列的采样点: $(t_1, x_1), (t_2, x_2), \dots, (t_n, x_n)$ 。对各采样点的数值和采样时刻对每个采样周期内的波形进行求导,得到的导数分别为 $(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{n-1})$; 如此时在第 k 个采样周期得到的导数值为 λ_k , 同时,在第 k 个采样周期之前保留了 m 个导数值,它们分别为 $(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m)$, 若此时 $|\lambda_k - (\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_m)/m| \geq \Delta_1$ (Δ_1 为设定的第一阈值), 则判别该采样周期内第 $k+1$ 个采样点为干扰点, 并进行剔除, 否则保留该点。在程序中, 递增 k 值实现, 对每个周期均进行上述判断过程。

其次利用最小二乘法对剔除干扰之后的采样点进行拟合, 得到断路器行程位移波形曲线, 从而得到各采样时刻的行程曲线值^[10-20]。将各采样时刻

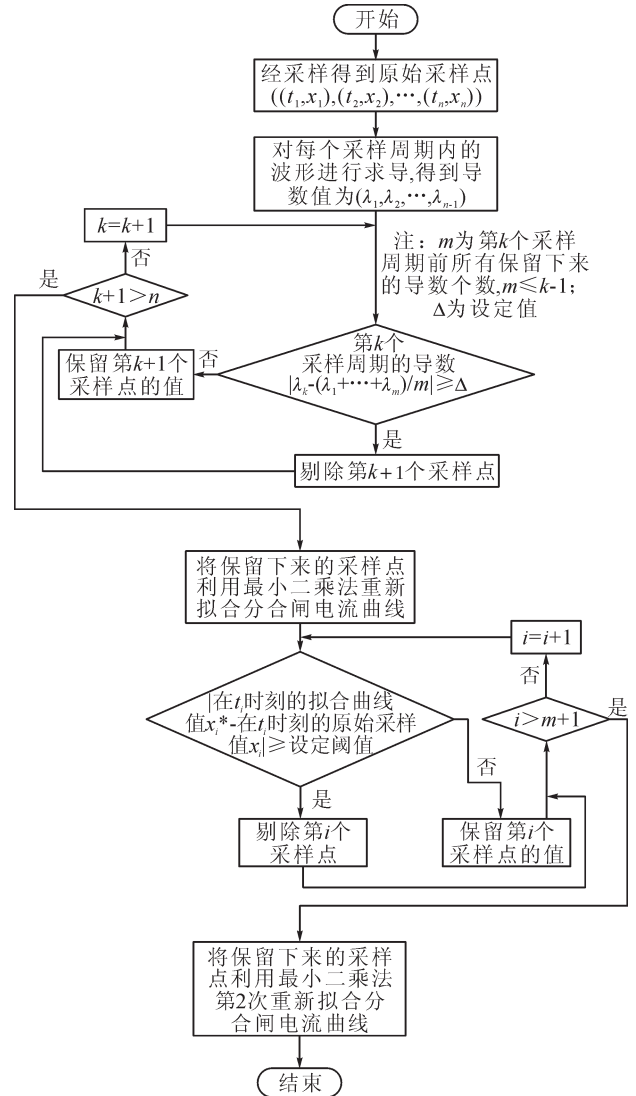


图 4 算法流程图

Fig. 4 Flow chart of algorithm

的原始采样点值 X_i^* 与所得到对应采样时刻的行程拟合值 X_i 进行比较, 若他们之间差值的绝对值大于设定的第二阈值 Δ_2 , 即若 $|X_i^* - X_i| \geq \Delta_2$, 则剔除掉 X_i , 否则保留该点, i 小于等于 n 。在程序中, 递增 i 以实现, 对每个周期均进行上述判断过程。

最后利用最小二乘法对两次剔除干扰点之后的采样点进行重新拟合, 得到处理后的断路器分合闸行程—时间曲线, 完成对其的预处理。

3.2 行程位移参数处理

根据 3.1 节所述的数据预处理后, 再综合线圈电流递增、断路器分合位置、行程数据的递增或递减进行判断分合闸线圈和行程是否启动, 判别启动后保存线圈电流数据和行程数据。根据开距等定值数据获取刚分刚合点, 采用 1.1 和 1.2 节所述的计算方法计算出断路器行程、分合闸时间、分合闸速

度等参量。断路器合闸监测的程序流程图见图 5。

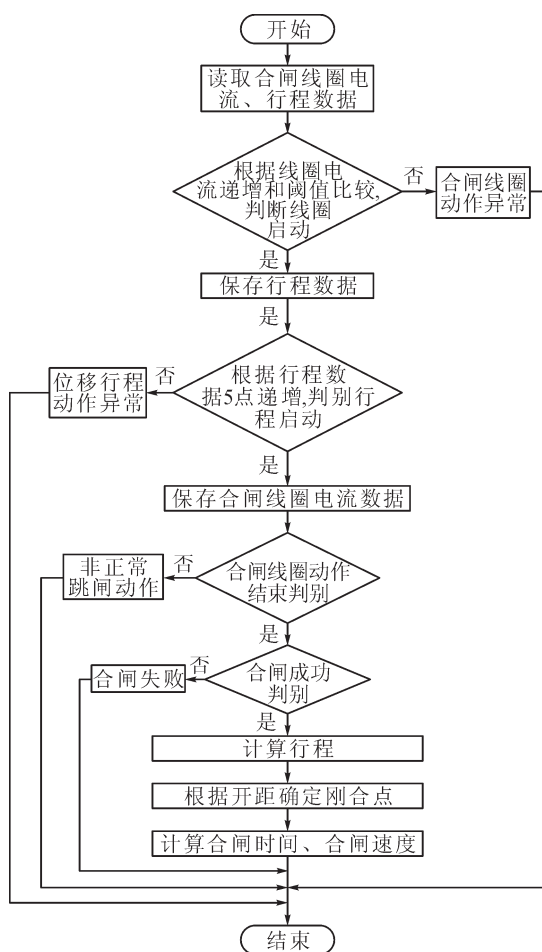


图 5 合闸参数计算程序流程图

Fig. 5 Flow chart of switching parameter calculation

断路器分闸监测与合闸监测程序流程类似。

4 算例验证

该算法在整合型开关监测装置上实现并应用, 装置采样率为每周波 100 点, 采用电阻式角位移传感器用于测量行程位移数据。装置在某高压开关上测试, 经过 300 次单分单合验证, 成功滤除刚分刚合点附近出现的干扰, 利用装置录波获得的波形见图 6。

从图 6 中可以看出, 经过最小二乘法处理后, 分合闸行程曲线光滑, 没有出现剧烈的干扰现象。

根据图 5 所示的流程图进行特征量计算, 其分合闸时间、分合闸速度、行程位移等参量见表 1。

在表 1 中可以看出, 经过处理后, 断路器几个特征量值比较稳定, 误差率控制在 1% 以内。

5 结语

文中针对断路器在刚分刚合点处出现的干扰

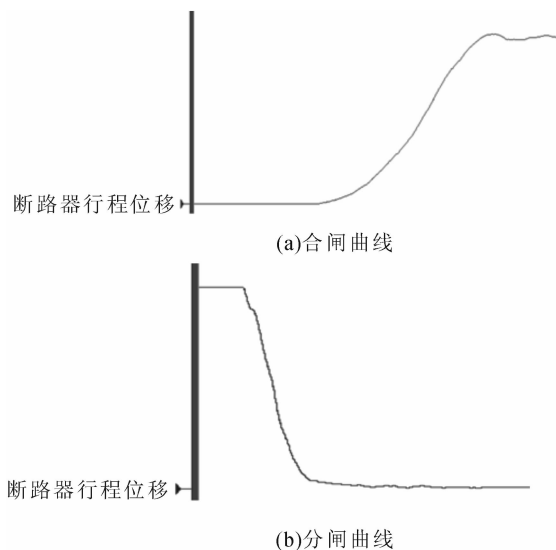


图 6 最小二乘法拟合后断路器行程曲线

Fig. 6 Stroke displacement curve of circuit breaker based on conventional algorithm based on least squares algorithm

表 1 测试结果

Table 1 Test results

合闸行程/mm	合闸时间/ms	合闸速度/(m·s ⁻¹)	分闸行程/mm	分闸时间/ms	分闸速度/(m·s ⁻¹)
22.50	43.10	1.01	21.70	22.90	1.66
22.60	44.10	1.00	21.60	23.40	1.66
22.50	43.60	0.99	21.50	23.40	1.66
22.50	44.10	1.00	20.90	22.90	1.67
22.30	43.30	0.99	21.40	23.80	1.65
22.40	43.50	0.99	20.90	23.40	1.66
22.30	42.80	1.01	21.40	23.20	1.63
22.30	43.50	0.99	20.70	23.60	1.66
22.20	42.30	1.00	21.60	23.40	1.64
22.40	43.30	1.00	21.20	23.40	1.66
22.30	42.90	1.00	21.50	23.30	1.65
22.30	42.60	1.01	22.00	23.50	1.63
22.70	43.80	1.01	21.40	23.20	1.63

问题, 提出并实现了一种最小二乘法的断路器位移监测数据的拟合与处理方法。对现场采集到的行程—时间特性数据至少利用一种方式进行拟合, 达到剔除干扰点的目的, 并对拟合后的数据进行录波处理和机械特性参数计算。实际验证表明, 该算法可以有效地剔除行程位移数据的干扰点, 并且能够真实地反映断路器行程位移曲线, 从而准确计算出断路器的分合闸速度, 分合闸时间等关键参量, 说明该算法是有效和实用的。

参考文献:

[1] 牟涛, 周水斌, 王晓峰, 等. 断路器机构状态监测数据

- 采集的实现[J]. 低压电器, 2013(3):26-30.
- MO Tao, ZHOU Shuibin, WANG Xiaofeng, et al. Data acquisition in the mechanical condition monitoring of circuit breaker[J]. Low Voltage Apparatus, 2013(3):26-30.
- [2] 郝建成, 李 斌, 韦德福, 等. 断路器两端接地时分, 合闸时间的测试方法[J]. 高压电器, 2015, 51(5):95-98.
- HAO Jiancheng, LI Bin, WEI Defu, et al. Testing method of opening and closing time for circuit breaker with two-terminal grounding[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(5):95-98.
- [3] 孟永鹏, 贾申利, 荣命哲. 真空断路器机械特性的在线监测方法[J]. 高压电器, 2006, 42(1):31-34.
- MENG Yongpeng, JIA Shenli, RONG Mingzhe. On-line monitoring method for mechanical characteristics of vacuum circuit breakers[J]. High Voltage Apparatus, 2006, 42(1):31-34.
- [4] 李 刚, 王晓锋, 周水斌, 等. 一种智能变电站断路器状态监测方案[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(14):140-143.
- LI Gang, WANG Xiaofeng, ZHOU Shuibin, et al. Design scheme of circuit breakers state monitoring in intelligent substation[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(14):140-143.
- [5] 李 丽, 马宏忠, 姜 宁, 等. 基于改进偏最小二乘法的系统谐波阻抗及谐波发射水平估算[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(1):92-95.
- LI Li, MA Hongzhong, JIANG Ning, et al. Assessing harmonic impedance and the harmonic emission level based on improved partial least-squares regression method[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(1):92-95.
- [6] 孟玲玲, 孙常栋, 韩宝如, 等. 基于最小二乘法和独立分量分析的间谐波检测算法[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(11):76-81.
- MENG Lingling, SUN Changdong, HAN Baoru, et al. Algorithm for inter-harmonic detection based on least square method and ICA[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(11):76-81.
- [7] 秦 业, 袁海文, 袁海斌, 等. 基于优化最小二乘支持向量机的电能质量扰动分类[J]. 电工技术学报, 2012, 27(8):209-214.
- QIN Ye, YUAN Haiwen, YUAN Haibin, et al. Application of LS-SVM in classification of power quality disturbances[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(8):209-214.
- [8] 曹 健, 林 涛, 徐遐龄, 等. 基于最小二乘法和时频原子变换的谐波/间谐波测量算法[J]. 电工技术学报, 2011, 26(10):1-7.
- CAO Jian, LIN Tao, XU Xialing, et al. Monitoring of power system harmonic/inter-harmonics based on least squares algorithm and time frequency transform[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(10):1-7.
- [9] 许 丹, 于 龙, 王玉梅. 基于用最小二乘法改进的 EMD 与能量熵融合的断路器机械故障诊断方法[J]. 高压电器, 2014, 50(8):99-103.
- XU Dan, YU Long, WANG Yumei. Mechanical fault diagnosis method for circuit breaker based on the combination of energy entropy and improved EMD by using the least square method[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(8):99-103.
- [10] 甘德刚, 青晨唯, 刘 凡. 基于最小二乘法的变压器油中微水含量在线监测方法[J]. 高压电器, 2012, 48(1):48-52.
- GAN Degang, QING Chenwei, LIU Fan. Study on the on-line monitoring of moisture content in power transformer oil using least square method[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(1):48-52.
- [11] 黄聿琛, 阮江军, 邱志斌, 等. 隔离开关操动机构电机输出轴扭矩和电流关系的研究[J]. 高压电器, 2015, 51(6):139-144.
- HUANG Yuchen, RUAN Jiangjun, QIU Zhibin, et al. Study on the relationship between motor output shaft torque and motor current of disconnector operation mechanism[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(6):139-144.
- [12] 孙艳玲, 王永良, 雷 琴, 等. 特高压断路器液压操动机构仿真研究[J]. 高压电器, 2014, 50(10):15-19.
- SUN Yanling, WANG Yongliang, LEI Qin, et al. Simulation study on ultra-high voltage circuit breaker with hydraulic operating mechanism[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(10):15-19.
- [13] 李劲彬, 全江涛, 陈 隽, 等. 基于分合闸线圈电流的某换流站开关故障分析[J]. 高压电器, 2015, 51(2):141-145.
- LI Jinbin, QUAN Jiangtao, CHEN Juan, et al. Fault analysis of circuit breaker in a converter station based on switching coil currents[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(2):141-145.
- [14] 闫海宁. 基于在线监测的开关特性分析[J]. 高压电器, 2014, 50(8):119-123.
- YAN Haining. Analysis of switchgear performance based on on-line monitoring[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(8):119-123.
- [15] 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.
- [16] 张红军, 张 强, 邓洪祥, 等. 252~1 100 kV GIS 用 CJA6 电动操动机构的研制与分析[J]. 高压电器, 2012, 48(11):125-129.
- ZHANG Hongjun, ZHANG Qiang, DENG Hongxiang, et al.

- Development and analysis of CJA6 electric operating mechanism for 252~1100 kV GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(11): 125-129.
- [17] 杨凌霄, 朱亚丽. 基于概率神经网络的高压断路器故障诊断[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(10): 62-67.
- YANG Lingxiao, ZHU Yali. High voltage circuit breaker fault diagnosis of probabilistic neural network[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(10): 62-67.
- [18] 谢涛, 曹军威, 高田, 等. 基于滑动最小二乘算法和电池荷电状态的储能系统平滑控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(5): 1-7.
- XIE Tao, CAO Junwei, GAO Tian, et al. An energy storage system smoothing control strategy based on sliding least square algorithm and battery SOC[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(5): 1-7.
- [19] 牛胜锁, 张达, 梁志瑞, 等. 基于抗差总体最小二乘法的电力系统谐波状态估计[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(11): 106-111.
- NIU Shengsuo, ZHANG Da, LIANG Zhirui, et al. Power system harmonic state estimation based on robust total least squares[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(11): 106-111.
- [20] 任先文, 薛雷, 宋阳, 等. 基于分形特征的最小二乘支持向量机局部放电模式识别[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(14): 143-147.
- REN Xianwen, XUE Lei, SONG Yang, et al. The pattern recognition of partial discharge based on fractal characteristics using LS-SVM[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(14): 143-147.
- 雍明超(1984—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为电力系统自动化、高压设备状态监测及故障诊断。
- 赵宝(1985—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为高压设备状态监测及故障诊断。
- 路光辉(1968—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统自动化、高压设备状态监测及故障诊断。
- 牧继清(1985—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为高压设备状态监测及故障诊断。
- 周钟(1983—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为高压设备状态监测及故障诊断。

(上接第 193 页)

- tests of thyristor valves by short-circuit generator system[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(5): 69-73.
- [16] 盛宝良, HANS-OLD B, PIERRE R, et al. 使用合成试验回路对三峡-常州 HVDC 晶闸管阀进行运行试验[J]. 高压电器, 2002, 38(6): 1-4.
- SHENG Baoliang, HANS-OLD B, PIERRE R, et al. Operational tests of the three gorges-changzhou hvdc thyristor valves by using a synthetic test circuit[J]. High Voltage Apparatus, 2002, 38(6): 1-4.
- 张长春(1985—), 男, 本科, 工程师, 从事电力电子产品试验技术研究工作。