

智能断路器在线监测系统研究

李 毅¹, 蒋 浩¹, 龚付高¹, 夏珩轶¹, 种俊龙²

(1. 国网重庆市电力公司检修分公司, 重庆 400039;

2. 重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400044)

摘要: 智能断路器是电力系统中最重要设备之一,其稳定可靠性对于电网运行有重大意义。在分析智能断路器振动信号检测原理的基础上,提出了一种基于虚拟仪器技术的在线监测与故障诊断系统。该系统利用 Labview 编程实现人机界面,完成对测量数据的存储、显示和分析处理,由数据信号处理模块和传感器模块构成现场监测单元,完成对断路器机械参数、分合闸电流信号和振动信号的采集、传输。实验结果表明,该系统能实时反映智能断路器机械运行状态,具有人机交互友好、功能齐全和可靠性高等特点,实现了断路器在线监测系统预期的功能。

关键词: 智能断路器; 在线监测; 虚拟仪器技术

Study on Online Monitoring System of Intelligent Circuit Breaker

LI Yi¹, JIANG Hao¹, GONG Fugao¹, XIA Hengyi¹, ZHONG Junlong²

(1. State Grid Chongqing Electric Power Co., Maintenance Branch Company, Chongqing 400039 China; 2. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: Intelligent circuit breaker is one of the most significant devices in the electric system, its stability and reliability are quite significant for the operation of power grid. According to the analysis of online monitoring of vibration signal in intelligent circuit breaker, an online monitoring and fault diagnosis system based on the vibration signal of virtual instrument technology is proposed. The system employs the Labview software, for programming HMI and accomplishing the storage, display, analysis and treatment, etc. of the measured data. The online monitoring unit is composed of digital signal processing module and sensor module to complete the acquisition and transmission of the mechanical parameters, switching current signals and vibration signals of the circuit breaker. The experimental results show that the system can reflect the mechanical operating state of intelligent circuit breaker in real time, with friendly man-machine interaction, complete functions and high reliability, etc. Moreover, it implements the expected system of the online monitoring system.

Key words: intelligent circuit breaker; online monitoring; virtual instrument technology

0 引言

电力系统的飞速发展,尤其是智能变电站的大力建设,对高压电器设备的可靠性提出了更严格的要求。断路器做为绝缘和灭弧装置,在电网中主要有控制和保护两种作用,当它发生故障时会造成很

大经济损失和社会影响^[1]。因此能否加强高压智能断路器在线监测关系到整个电力系统的安全运行。据国际大电网会议的统计分析结果表明,80%断路器的故障是机械部分,对高压智能断路器进行机械特性在线监测,提早发现潜在设备故障隐患,全面监控断路器的各项状态指标,有助于降低设备故障率,提高电力系统的安全性和可靠性^[2-3]。

国内外对于智能断路器的各种状态特征都有

收稿日期:2017-06-05; 修回日期:2017-07-12

基金项目:2013年国家自然科学基金项目(51207175)。

Project Supported by 2013 National Natural Science Foundation of China(51207175).

研究,其中机械振动特性研究较多,美国、挪威、澳大利亚、日本等已确定了一些较为实用的振动信号处理方法^[4]。文[5]提出了指数衰减振荡模型。文[6]提出了一种基于振动信号包络分析方法,挪威电力研究院提出动态时间归整(DTW)法。国内高等院校如清华大学、山东大学等通过建立数学模型、实验室研究提出了一些振动信号处理方法^[7-8]。由于断路器机械振动信号非常复杂,某一种机械故障包含的振动特征信号较多,并且不同的振动信号所反映的故障类型也不唯一^[9]。国内外的研究方法大多集中于对振动信号的处理分析,对于如何同时采集多种特征信号并处理分析研究较少^[10-11]。

基于断路器机械故障原因的复杂性和特征信号的多样性,本文通过分析断路器的几种主要特征信号(如断路器行程-时间特性、分合闸线圈电流)的监测原理,建立一种基于虚拟仪器技术的在线监测系统,为智能断路器的故障检测提供新的方案。

1 智能断路器在线监测原理

智能断路器分合闸控制是由电路产生的电磁力作用下实现的^[12-14],对于断路器的故障监测可以通过分析分合闸的控制线圈电路电流变化和开关动触头的运动特性来实现。

分合闸控制线圈的电流波形直接反映铁心运动机构的动态,有无脱扣、卡滞等情况,无故障时的电流波形见图1。图1中, $t_0 \sim t_1$ 铁心处于静止状态, t_2 时铁心开始运动。通过在断路器上安装电流传感器检测控制线圈电流变化可以评估铁心运动过程中是否存在异常情况^[15]。

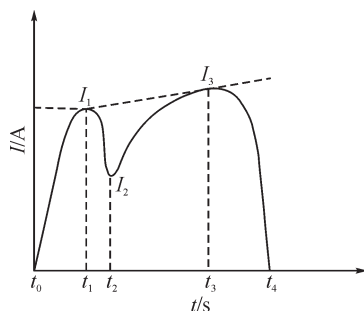


图1 断路器分合闸正常的电流波形示意图

Fig. 1 The current waveform of circuit breaker normal close

当电磁铁线圈刚通电时,反映了分闸电流与分闸铁芯运动的关系。此过程可分为4个阶段。

阶段1: $t_0 \sim t_1$ 线圈在 t_0 时刻通电,到 t_1 时刻铁心开始运动。 t_0 为断路器分闸命令下达时刻,是断路器动作计时的起点; t_1 时刻线圈中电流和磁通将会上升到足够驱动铁芯运动,此时为铁心运动的计时的起点。

阶段2: $t_1 \sim t_2$ 铁心运动,电流下降。 t_2 时刻控制电流的值达到最低,说明铁心已经触动操作机械的负载,速度明显下降或者已经停止运动。

阶段3: $t_2 \sim t_3$ 铁心停止运动,电流开始快速上升。

阶段4: $t_3 \sim t_4$ 电流开断阶段,辅助开关K开断,在辅助开关触头间产生电弧并被拉长,电弧电压快速升高,使得电流迅速减小直到熄灭。

通过分析所测量得到的电流波形就可以计算操动机构的启动时间、拉杆运动时间、线圈通电时间等一系列的参数,再根据断路器自身的参数范围,判断操动机构的运行状态。对于状态完好的同一类型断路器,分合闸线圈的电流波形是相似的,时间特征参数在一定范围内变化。因此,可采集其状态完好时的分合闸电流波形作为参考,以便对断路器口后动作时的分合闸电流波形进行指纹比对,从而达到检测故障的目的。

智能断路器动触头的运动行程与主轴连动杆运动行程之间的关系近似为直线特性,触头行程时间特性曲线可以反应机械振动是否出现故障^[16-18]。无故障时的行程时间特性曲线图见图2。通过安装角位移传感器、直线位移传感器、加速度传感器可以获得触头的运动特征信号,以此判断智能断路器是否存在异常^[19-21]。

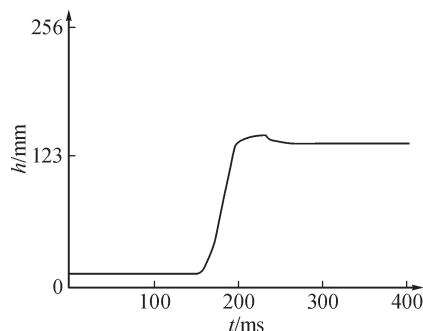


图2 断路器触头行程时间特性曲线

Fig. 2 The travel time curve of circuit breaker contact,

2 监测系统结构与硬件设计

根据智能断路器机械故障监测原理,设计基于多传感器的智能断路器在线监测系统,其结构见图3。该系统集成了基于传感器模块和DSP数据处理单元的现场检测单元、基于虚拟仪器技术的人机界面及数据存储的中央控制单元。

传感器对断路器动作参数进行实时采集,然后将数据传送给DSP进行滤波处理,接着传送到监控系统的中央控制单元。控制单元主要完成测量数据的存储、处理、显示、故障诊断等功能。人机界面采用Labview软件进行编写,与数据采集单元之间通

过 CAN 总线通信。

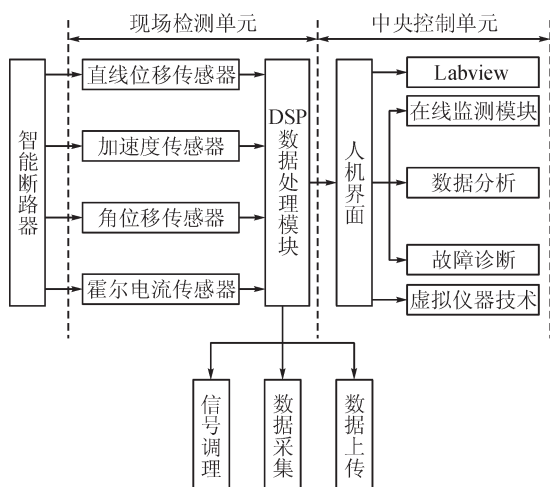


图3 智能断路器在线监测系统总体结构

Fig. 3 The overall structure of intelligent circuit breaker online monitoring system,

2.1 监测系统的硬件结构

在断路器上安装直线位移传感器 (WDL-25-2型)、加速度传感器 (LC0166T型)、角位移传感器 (WDD35D-4型) 测量其机械动作行程—时间特性曲线, 采用霍尔电流传感器 (YDG-HSD型) 测量分合闸线圈电流信号, 所有传感器组成数据采集模块。

为了同步采集断路器多种特征信号, 合理分布传感器在断路器操动机构上的位置, 采用型号为 PCI-1714UL 数据采集卡。PCI-1714 是一款高速同步 4 路模拟量数据采集卡, 采样速率可达 10MS/s, 具有同步采样功能, 每个模拟量通道使用 4 个相同电路和 A/D 转换器, 且带有 32kbit 的 FIFO 存储区, 能保证数据高速完整传输, 数据采集流程见图 4。

DSP 对所采集到的各种信号进行滤波处理, 计算出真空断路器的合(分)闸时间、合(分)闸平均速度、行程、开距、超程等机械特性参数, 在现场液晶模块上实时显示, 通过 CAN 总线将数据传送至中央控制单元, 从而对断路器的状态做出判断。

2.2 基于虚拟仪器的监测系统

系统监测平台包括数据采集、人机界面(HMI)、故障诊断分析、数据存储 4 部分。数据采集通过 PCI-1714UI 驱动程序编写数据采集模块实现断路器机械特性参数的收集; HMI 实现软件各功能的可视化界面; 故障诊断分析起着后台中央控制的作用, 负责从 HMI 接受断路器特征信号, 分析数据, 联系各功能模块并在它们之间起到数据传输的作用。PCI-1714UI 高速采集的特征信号数据可以利用数据库或者文本进行存储, 以备后期分析检查。

系统软件采用 Labview 进行开发, 其 HMI 主要

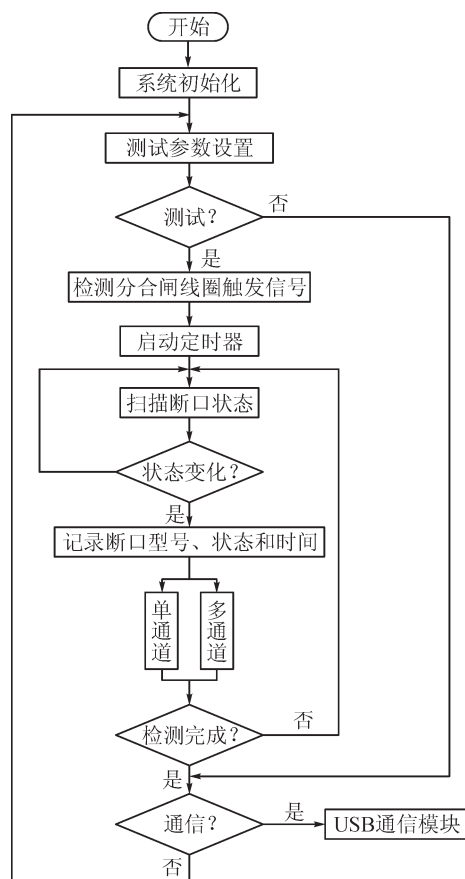


图4 多通道数据采集程序流程图

Fig. 4 Multi channel data acquisition program flow chart

实现初始化设置、通道信号实时显示、通道选择、触发设置、数据存储等功能。与传统的检测仪器相比, 系统实现了传统仪器的硬件和计算机的结合, 并扩展传统仪器的功能, 完成数据采集、分析和显示。

由于采集卡收集到的断路器特征信号数据量大, 为准确获得信号, 采用用数据库访问技术, 利用 LabSQL 创建一个数据库来管理复杂的监测任务、存储监测数据, 实现了 Labview 和 SQLserver 数据库之间的互访和管理, 有效的解决了 Labview 在访问和管理数据库方面的不足。LabSQL 利用 Microsoft ADO 及 SQL 操作封装成一系列的 LabSQL VIs。它可以访问 SQLserver 数据库和 Microsoft access 数据库, 系统对象库采用了 Microsoft access 数据库。

在使用 LabSQL 前, 优先需要在 Windows 操作系统中的开放数据库互连中创建一个数据源名 (DSN), 文中系统数据源名为 CSdb。LabSQL 与数据库的连接建立在 DSN 基础上。DSN 的创建步骤见图 5。完成了 DSN 的创建, LabSQL 就可利用这个 DSN 访问与之相关联的数据库了。

当断路器分、合闸控制回路接通时, 通过分、合

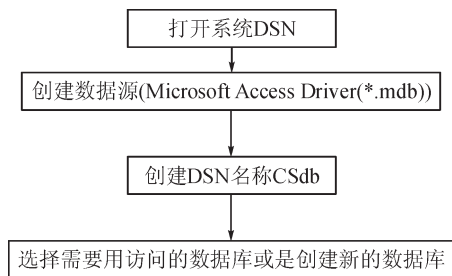


图 5 DSN 的创建实现图

Fig. 5 Implementation diagram of creating DSN,
 闸线圈中电流的有无触发传感器进行数据采集。系统利用 Labview 信号分析 Express VI 中的时域分析法对断路器机械特征信号进行故障诊断。在实际应用中,从传感器采集到的信号,经放大调理器到数

据采集卡有一定的距离,考虑到各方面因素的影响,采集到的机械特征信号需经过预处理,通过带通滤波器得到与测量传感器测量频谱一致的信号数据。为保证波形不失真,故必须满足香农采样定理,即采样频率高于两倍的信号最高频率。

3 实验结果波形分析

监测系统的软件部分主要实现的功能是:CAN 总线的操作和数据的传输,分合闸电流波形的显示,触头动作行程—时间波形的显示。通过搭建模拟实验平台,仿真断路器在正常和故障 2 种状态下的实际机械动作,检测断路器的振动信号,实验采集数据波形见图 6。

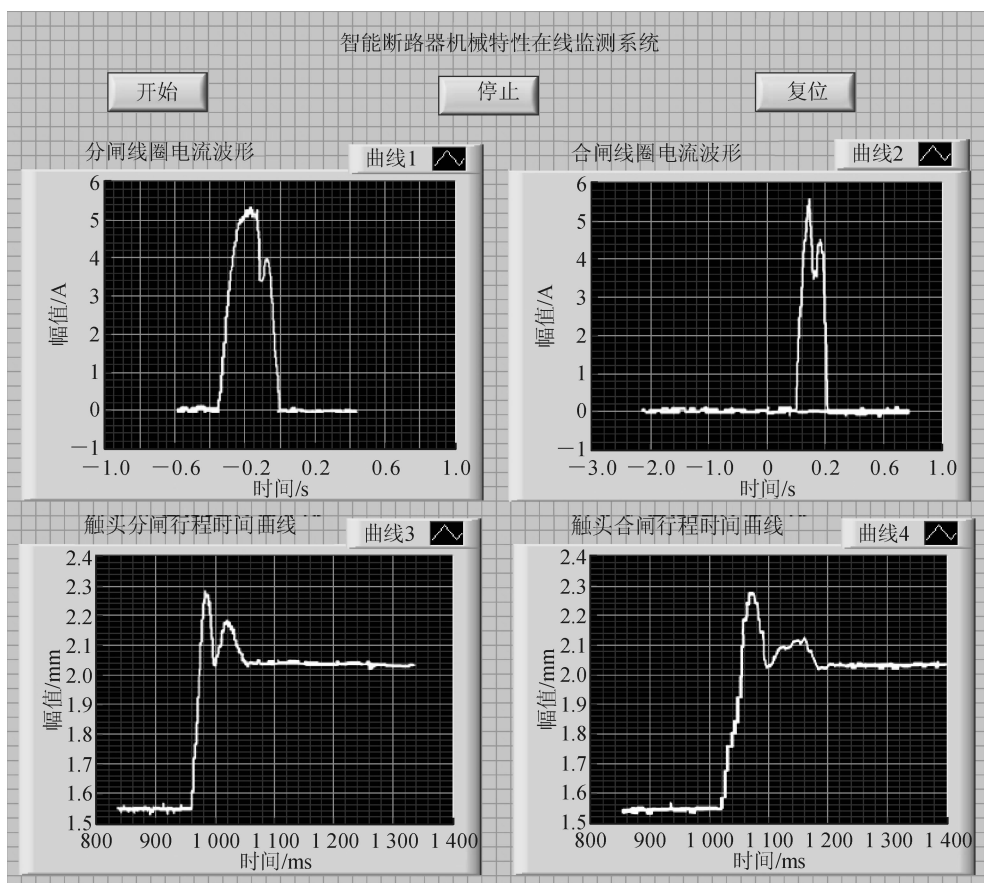


图 6 智能断路器机械特性在线监测波形界面

Fig. 6 Intelligent circuit breaker mechanical characteristic on-line monitoring wave interface,

图 6 中的实验结果表明,该系统能同时对分合闸 2 种状态下的线圈电流和形成时间同时采集,准确获得在正常情况下断路器的振动信号,滤波处理后可得到较好的波形,可以为故障诊断提供准确的数据参考。从图 6 中可以得到表 1 测量的 3 组线圈电流波形时间参数计算结果,类似从图形分析中可以得出断路器触头的时间—行程关系,参照测量原理中的判断方法便可有效地反应出断路器机械振动状态。

表 1 线圈电流波形时间参数计算结果

Table 1 Calculation results of time parameters of coil current

电流波形	时间参数				
	t_0	t_1	t_2	t_3	t_4
曲线 1	0.0	23.5	34.5	51.5	58
曲线 2	0.0	24.0	35.0	52.0	56.5
曲线 3	0.0	25.0	35.5	51.0	56.0

4 结语

智能电网技术的发展对智能断路器的可靠性有了更高的要求,对于系统化监测其运行状态,及时发现故障,也需要更加智能化、自动化、系统化。结合虚拟仪器技术和 Labview 软件建立了智能断路器在线监测系统,通过现场数据采集单元可以实现对断路器机械振动的分合闸线圈电流、行程-时间特征信号的收集,利用人机界面系统的数据处理、分析模块,可以实时显示出测量波形,根据变化情况评估断路器机械振动故障情况。

搭建实验平台进行模拟实验操作,表明系统能有效地采集信号,为故障诊断提供可靠的波形参数,实现智能断路器的故障诊断。

参考文献:

- [1] 黄新波,陶晨,刘斌.智能断路器机械特性在线监测技术和状态评估[J].高压电器,2015,51(3):129-134.
HUANG Xinbo,TAO Chen,LIU bin. On line monitoring technology and state evaluation of mechanical characteristics of intelligent circuit breakers[J]. High Voltage Apparatus,2015, 51(3):129-134.
- [2] DEMJANENKO R A, VALTIN M, SOUMEKH A. Noninvasive diagnostic instrument for power circuit breakers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1992, 7(2):656-663.
- [3] 周永斌.基于智能电网的智能式低压断路器的设计和开发[J].电工电气,2015(2):62-64.
ZHOU Yongbin. Design and development of intelligent low voltage circuit breaker based on smart grid[J]. Electrical and Electronics, 2015(2):62-64.
- [4] 常广.高压断路器振动监测与故障诊断的研究[D].北京:北京交通大学,2013.
CHANG Guang. Research on vibration monitoring and fault diagnosis of high voltage circuit breaker[D]. Beijing:Beijing Jiaotong University, 2013.
- [5] HOIDALEN H K, RUNDE M, HAUGLANG O, et al. Condition monitoring of circuit breakers using vibration analysis[C]// High Voltage Engineering Symposium[SI]: IEEE, 1999:22-27.
- [6] STOKES A D, TIMBS L. Diagnostics of circuit breakers[C]// International Conference on Large High voltage Electric Systems. New York: GIGRE, 1988:1-7.
- [7] POLYCARPOU A A, SOOM A, SWARNAKAR V, et al. Event timing and shape analysis of vibration bursts from power circuit breakers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1996, 11(2):848-857.
- [8] 徐立新.断路器操作振动非平稳信号分析方法的研究[D].北京:清华大学,1992.
XU Lixin. Study on the analysis method of the non-stationary signal of circuit breaker operation[D]. Beijing:Tsinghua University, 1992.
- [9] 于莉莉.高压断路器的在线监测与诊断系统[D].济南:山东大学,2005.
YU Lili. Online monitoring and diagnosis system for high voltage circuit breaker[D]. Jinan:Shandong University, 2005.
- [10] 杨壮壮,徐建源,李斌,等.高压真空断路器机械状态监测系统研制[J].高压电器,2013,49(8):26-34.
YANG Zhuangzhuang, XU Jianyuan, LI Bin, et al. Development of mechanical condition monitoring system for high voltage vacuum circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(8):26-34.
- [11] RUNDE M, OTTESEN G E, SKYBRG B, et al. Vibration analysis for diagnostic testing of circuit breakers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1996, 11(4):1816-1824.
- [12] PHESS D, YPARK S, TANGRI M K, et al. Noninvasive condition assessment and event timing for power circuit breakers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1992, 7(1): 353-360.
- [13] 关永刚,黄瑜珑,钱家骊.真空高压断路器电磨损监测技术的改进[J].高压电器,2001,37(4):1-4.
GUAN Yonggang, HUANG Yulong, QIAN Jiali. Improvement of electrical wear monitoring technology for high voltage circuit breaker[J]. High voltage apparatus, 2001, 37(4):1-4.
- [14] 程显,段雄英,廖敏夫,等.混合断路器大电流开断过程中真空电弧与SF₆电弧相互作用的仿真[J].高电压技术,2012,38(6):1529-1536.
CHENG Xian, DUAN Xiongying, LIAO Minfu, et al. Simulation of the interaction between vacuum arc and SF₆ arc in the process of large current interruption of hybrid circuit breaker[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(6):1529-1536.
- [15] HU X G, WANG J Z, JI Y C. The application of the wavelet analysis of analytic signals in mechanical fault diagnosis of circuit breakers[C]//2003 Instrumentation and Measurement Technology Conference.[S.l.]: IEEE, 2003:20-22.
- [16] 段旭.直流偏磁下变压器振动机理与振动信号分析研究[D].重庆:重庆大学,2013.
DUANG Xu. Analysis of vibration mechanism and vibration signal of transformer under DC bias[D]. Chongqing:Chongqing University, 2013.
- [17] 高控.真空高压断路器开断寿命的测量[J].高压电器,2001,37(5):45-47.
GAO Kong. Measurement of opening life of vacuum high voltage circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2001, 37(5):45-47.
- [18] 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(22):95-99.

(下转第 35 页)

- tion and simulation of the spring actuator for circuit breakers[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(4): 66-71.
- [10] 崔彦彬,高志,曹云鹏. 基于 Adams 的高压断路器操动机构动力学仿真研究[J]. 机械设计与制造, 2006(4):66-67.
- CUI Yanbin, GAO Zhi, CAO Yunpeng. Dynamics simulation study on application Adams for the operating device for HV circuit[J]. Machinery Design and Manufacture, 2006(4): 66-67.
- [11] 苗红霞,王宏华,齐本胜. 高压断路器操动机构的动力学建模与仿真研究[J]. 计算机工程与应用, 2010, 46(17):212-215.
- MIAO Hongxia, WANG Honghua, QI Bensheng. Research on dynamic modeling and simulating of operating mechanism of high-voltage circuit breaker[J]. Computer Engineering and Applications, 2010, 46(17):212-215.
- [12] 巫世晶,李菲,赵文强,等. 含多间隙副特高压断路器传动机构动力学特性研究[J]. 中国机械工程, 2015, 26(13): 1719-1724.
- WU Shijing, LI Fei, ZHAO Wenqiang, et al. Research on driving mechanism dynamics in UHV breaker with multiple clearance joints[J]. China Mechanical Engineering, 2015, 26(13):1719-1724.
- [13] 侯月玲,田德宇,李育文,等. 高压断路器壳体应力分析[J]. 郑州轻工业学院学报(自然科学版), 2008, 23(4):50-53.
- HOU Yueling, TIAN Deyu, LI Yuwen, et al. Stress analysis of the high voltage circuit breaker shell[J]. Journal of Zhengzhou University of Light Industry (Natural Science), 2008, 23(4): 50-53.
- [14] 侯月玲,李育文,王红卫,等. 高压断路器壳体翻边接管的强度分析[J]. 化工机械, 2009, 36(1):25-28.
- HOU Yueling, LI Yuwen, WANG Hongwei, et al. Strength analysis of the flanged nozzles on the shell of a high voltage circuit breaker[J]. Chemical Machinery, 2009, 36(1):25-28.
- [15] 周勇,周北岳,李小松. 基于 Ansys 的断路器保持弹簧冲击响应分析[J]. 高压电器, 2009, 45(3):15-22.
- ZHOU Yong, ZHOU Beiyue, LI Xiaosong. Impact response analysis for keeping-spring of circuit breaker using Ansys[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(3):15-22.
- [16] 王云峰,陈德桂. DW45 框架式断路器动作机构的仿真及应力应变的研究[C]//中国电工技术学会低压电器专业委员会第十二届学术年会论文集. 广州:中国电工技术学会, 2005: 174-177.
- WANG Yunfeng, CHEN Degui. Simulation and research on the stress and strain of the action mechanism of DW45 frame type circuit breaker[C]//Proceedings of the 12th Annual Conference of the China Institute of Electrical and Technology. Guangdong: CES, 2005: 174-177.
- [17] 肖翼洋,庄劲武,郭小程. 基于 Ansys 的新型直流断路器触头应力仿真与接触电阻分析[J]. 船海工程, 2008, 37(5): 71-74.
- XIAO Yiyang, ZHUANG Jinwu, GUO Xiaocheng. Stress simulation and contact resistance analysis of the new type DC circuit breaker contactor[J]. Ship & Ocean Engineering, 2008, 37(5):71-74.
- [18] 李世芸,邓荣兵. 高压断路器凸轮-轴承碰撞过程动态仿真及应用[J]. 高压电器, 2008, 44(6):497-500.
- LI Shiyun, DENG Rongbing. Dynamic simulation and application of colliding process of cam and rolling bearing in circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2008, 44(6): 497-500.
- [19] 邓荣兵. 高压开关弹簧操动机构中凸轮碰撞问题的动态仿真及二次开发[D]. 昆明:昆明理工大学, 2005.
- DENG Rongbing. Dynamic simulation and secondary development of cam collision in high-voltage switch spring operating mechanism[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2005.
- [20] 闻邦椿. 机械设计手册[M]. 第 5 版. 北京:机械工业出版社, 2010.
- WEN Bangchun. Mechanical design manual[M]. fifth edition. Beijing: Mechanical Industry Press, 2010.
- 刘荣海(1984—),男,工程师,硕士,主要从事电子技术诊断。

(上接第 23 页)

- HUANG Xinbo, WANG Xiaokuan, FANG Shouxian, et al. Design of breaker condition monitoring IED in smart substation[J]. Automation of Electric Power System, 2012(22): 95-99.
- [19] 董越. SF₆ 高压断路器在线监测及振动信号的分析[D]. 上海:上海交通大学, 2008.
- DONG Yue. Online monitoring and vibration signal analysis of SF₆ high voltage circuit breaker[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2008.
- [20] WHITE J E, DUPRAZ J E, MONTILLET G R. Strategy for applying a digital SF₆ monitoring device to high voltage circuit breakers[C]//Power Engineering Society General Meeting. [S.l.]: IEEE, 2003: 2227-2231.
- [21] DUPRAZ J E, SCHIEMANN A, MONTILLET G. Design objectives of new digital control and monitoring of high voltage circuit breakers[C]//Transmission and Distribution Conference and Exposition. Atlanta: IEEE/PES, 2001: 1088-1093.
- 李毅(1979—),男,博士,高级工程师,主要从事变电检修工作。