

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2024.03.003

直流真空断路器永磁斥力机构运动特性监测系统研究

刘晓明¹, 张煦松¹, 姜文涛², 宋柏阳¹

(1. 河北工业大学省部共建电工装备可靠性与智能化国家重点实验室, 天津 300401; 2. 天津工业大学机械工程学院, 天津 300387)

摘要: 针对短行程直流真空断路器永磁斥力机构运动速度快、动态参数多且难以精准监测的问题, 文中设计了一种多参数动态特性监测系统。以400 V/400 A/25 kA直流真空断路器永磁斥力机构为研究对象, 采用光耦隔离技术采集分合闸线圈电压模拟信号, 同时采用传感技术和二阶滤波的方式对电流信号与位移信号进行降噪采集, 并基于C#自主开发上位机显示界面, 实现短行程快速操动机构多参数的实时同步显示。通过与高精度电流传感器和机械特性测试仪监测参数的比对分析可知, 系统采集误差可控制在3.5%以内。

关键词: 直流真空断路器; 永磁斥力机构; 机械特性; 动态特性; 光耦隔离; 误差分析

Research on Mechanical Characteristic Monitoring System of Permanent Magnet Repulsion Mechanism for DC Vacuum Circuit Breaker

LIU Xiaoming¹, ZHANG Xusong¹, JIANG Wentao², SONG Boyang¹

(1. State Key of Reliability and Intelligence of Electrical Equipment, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China;
2. School of Mechanical Engineering, Tiangong University, Tianjin 300387, China)

Abstract: In view of such issues as high movement speed, multiple dynamic parameters and difficulty in accurate monitoring of the permanent magnet repulsion mechanism for short stroke DC vacuum circuit breaker, a kind of multiple parameter dynamic characteristic monitoring system is designed. The permanent magnet repulsion mechanism for 400 V/400 A/25 kA DC vacuum circuit breaker is taken as the research object, the optocoupler isolation technology is used to collect the voltage simulation signal of the opening and closing coil and, at the same time, the sensing technology and second-order filtering mode are used for noise reduction collection of the current and displacement signal. The upper computer display interface is developed independently based on the C# to achieve the real-time synchronous display of multiple parameters of the short stroke and fast operating mechanism. It is known through comparison and analysis of monitoring parameters of current sensor and mechanical characteristic tester that the collection error of the system can be controlled within 3.5%.

Key words: DC vacuum circuit breaker; permanent magnet repulsion mechanism; mechanical characteristics; dynamic characteristics; opto-coupler isolation; error analysis

0 引言

真空断路器运行特性是影响其所在电力系统安全可靠运行的主要因素之一^[1-4]。随着电力系统

的快速发展, 智能电网等对机械式真空断路器的运行可靠性提出了更高的要求。据统计, 机械故障占真空断路器故障的80%左右^[5-7], 对真空断路器机械信号和电气信号动态特性进行实时监测, 具有实际

收稿日期: 2023-10-03; 修回日期: 2023-12-02

基金项目: 河北省自然科学基金重点项目(E2020202086); 中央引导地方科技发展专项(20ZYJDJC00060); 国家电网有限公司科技项目(SGHEDK00DYJS2000285)。

Project Supported by Natural Science Foundation of Hebei Province of China(E2020202086), Central Project Guiding the Local Science and Technology Development(20ZYJDJC00060), Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (SGHEDK00DYJS2000285).

工程意义。

传统断路器状态监测通常针对断路器的某一信号,如文[8]提出了一种基于线圈电流的断路器故障诊断和程度评估方法,适用于断路器出厂试验和检修;文[9]采用小波分析与时域求极值点相结合的方法,对高压断路器分合闸线圈电流信号特征值进行故障判别;文[10]针对断路器刚分刚合点的抖动现象,提出基于最小二乘法的行程数据拟合与处理算法,两次处理剔除了数据干扰点,以反映断路器位移信号;文[11]针对断路器振动信号采用小波包分解数据,提取敏感节点形成分解树,进行重构作为系统指纹信号,采用“一对其余”策略进行特征分类,以实现诊断。而当断路器发生故障时,借助单一信号不能准确判断故障类型且难以全面反映断路器运行中的动态性能。如只借助分合闸线圈电流虽可以反映分合闸电容与线圈老化、控制电源电压过大或者过小等问题,但不能表征分合闸时间、速度等机械特性参数变化;只借助机构位移信号无法反映分合闸电容与线圈老化、动铁心卡涩、真空灭弧室与安装机构不同心等预伏故障;振动信号虽能够反映断路器分合闸过程中机构的机械状态(如是否出现卡顿),但不能表征分合闸电流电压大小和机构运动速度等参数变化。

文[12]采用红外通信测温装置和角位移传感器,以开关柜温度、机械和绝缘为监测目标进行机械特性检测;文[13]以交流中压断路器线圈电流、触头角位移和振动信号为研究对象,应用RT-Thread操作系统对断路器机械特性进行监测。

文中以直流真空断路器为研究对象,其斥力机构为分合闸提供动力,相比于弹簧机构、气动液压等机构,斥力机构具有响应及时、速度快、部件少和

精度高等优点^[14-17]。但其运动速度快、冲击力强、弹跳大以及动态参数多等问题不容忽视。文中400 V/400 A/25 kA真空断路器永磁斥力机构行程短,动作时间只有十几个、甚至几个毫秒,这对直流真空断路器永磁斥力机构的动态特性监测精度提出了更高的要求。常用的断路器监测系统采样率常为毫秒级,对于永磁斥力机构,毫秒级的监测精度难以达到工程需要,而提高监测精度往往会导致杂波大且信号处理困难。同时,多信号采集会引入监测电路干扰问题,线圈电压监测电路如何分压,不影响线圈电流大小是目前斥力机构监测需要解决的问题。

基于上述分析,文中针对400 V/400 A/25 kA真空断路器永磁斥力机构,运用线性光耦隔离技术,采集断路器斥力线圈的模拟电压信号,解决监测电路干扰设备侧电压问题;通过二阶电流滤波电路对分合闸线圈电流信号进行去噪处理,降低电流传感器要求,从而减少整机系统成本;采用价格低廉、稳定性好、抗干扰的电阻式直线位移传感器采集斥力机构位移信号;自主设计C#程序和上位机显示界面,完成多参数同步采集、显示与输出等功能;经信号处理,得到永磁斥力机构分合闸过程的性能参数,并进行误差分析。

1 系统总体结构

永磁斥力机构动态监测系统见图1,主要由监测电路与传感器组成的信号源模块、信号采集模块和上位机显示模块组成。信号源包括断路器分合闸线圈电压信号、机构位移信号和分合闸线圈电流信号,信号采集部分由USB采集卡实现,上位机显示是基于C#平台编程实现,主要由初始化部分、参数配置部分、数据流盘部分以及输出存储部分组成。

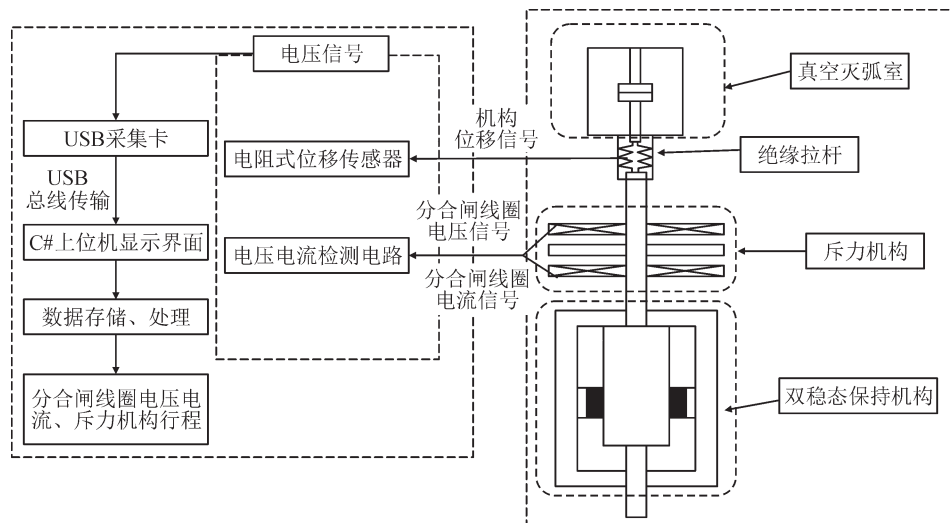


图1 系统结构图

Fig. 1 The system structure diagram

器,放大的电压信号经过二阶滤波电路,去除杂波,见图5。二阶低通滤波电路传递函数为

$$H(j\omega) = \frac{[R + 1/(j\omega C)] \frac{1}{j\omega C} / [R + 2/(j\omega C)]}{R + \frac{[R + 1/(j\omega C)] \frac{1}{j\omega C}}{R + 2/(j\omega C)}} \quad (4)$$

单独采集电流传感器输出波形并分析,选取截止频率 100 kHz,由式(4)求得 $R_6 = R_7 = 56 \Omega$, $C_{10} = C_{11} = 10 \text{ nF}$ 。

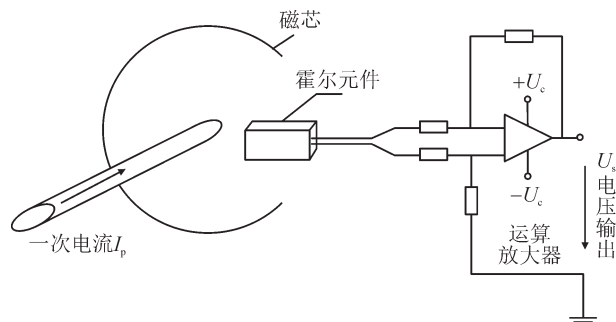


图4 电流传感器原理图

Fig. 4 Schematic diagram of current sensor

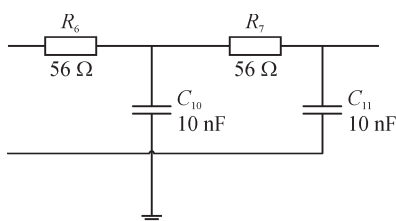


图5 电流信号二阶滤波电路

Fig. 5 Second order filter circuit of current signal

2.3 位移传感器

位移信号反映了机构运动过程中的分合闸时间、机构行程与刚分刚合速度等动态参数^[22-23],通过位移信号可以判断机构运动过程中是否存在动铁心摩擦或卡顿、机构安装是否同心以及碰撞弹跳的大小,进而判断出故障类型。本系统采用电阻式直线位移传感器,其通过电位器将机械信号转换成电压信号^[24],具有结构紧凑、价格低且受温度影响小的优点。

3 监测装置设计与实现

3.1 信号采集

上位机采用的数据采集卡提供了应用程序编程接口,通过引入COM组件库,配置Task函数完成对函数库中模块的调用,从而解决 Visual Studio2015与数据采集卡之间的通信问题,基于C#语言,自主开发采集程序,设计上位机前面板显示界面,实现采集信号同步显示与输出等功能。400 V/400 A/25 kA 直流真空断路器样机分合闸时间在 ms 级,选取 120 kHz 采样率满足采集性能需求。同时系统采集信号为位移信号、线圈电压和电流信号,四通道同步采集可以完整采集永磁斥力机构动态运行参数。

3.2 C#软件平台设计

采集程序流程图见图6,程序启动自动将采集卡程序初始化,通过配置Task函数,实现参数配置。

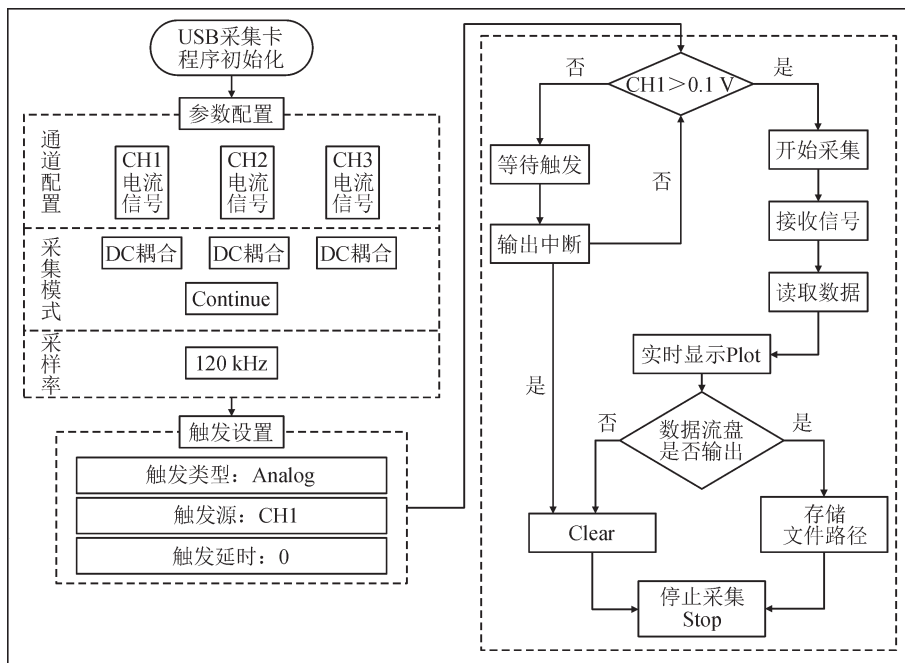


图6 主程序系统构成

Fig. 6 Composition of main program system

图6中CH1-CH3设置为DC耦合方式,关闭IEPE功能,分别记录线圈电流信号、线圈电压信号以及机构位移信号,采样模式设置为连续采样。由于系统内存有限,为了节约资源,尽可能少占用内存,需设置触发模式,对于永磁斥力机构,从分合闸线圈放电到机构开始动作,需要一定的响应时间,因此,本系统选取线圈电流信号Ch1为触发源。

上位机显示界面见图7。本系统采用3通道同步采集,3路信号同时显示在plot当中,在界面左侧,用户可以放大、缩小与暂停等来观察波形中的相互关系以及信号量的变化;右侧界面用户可以通过前面板,配置采集参数,如采集通道、采集模式、采样率和触发模式等;右侧界面下方为工具区,包括开始、结束按钮以及曲线图形和数据存储路径对话框,人机交互前面板显示界面提高了本系统的易用性和实用性。

4 实验结果与分析

4.1 实验平台

针对 400 V/400 A/25 kA 直流真空断路器永磁

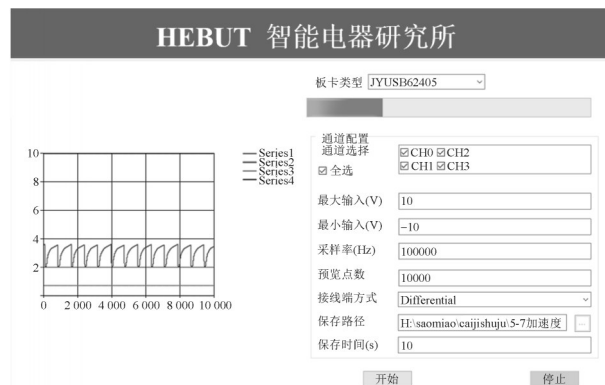


图7 上位机显示界面

Fig. 7 Upper computer display interface

斥力机构样机,搭建了测试平台,见图8。其中电流传感器A(成本几十元)为采集电流的信号源,高精度电流传感器B和示波器组成采集电流的实验比对组,同时采用SWT-VIII型机械特性测试仪,验证本监测系统位移采集的准确度。监测电路见图9,具体由光耦隔离电压监测电路和电流二阶滤波电路组成。位移传感器的安装位置见图10,固定于机构与灭弧室之间的绝缘杆上,易于安装且同步性好。

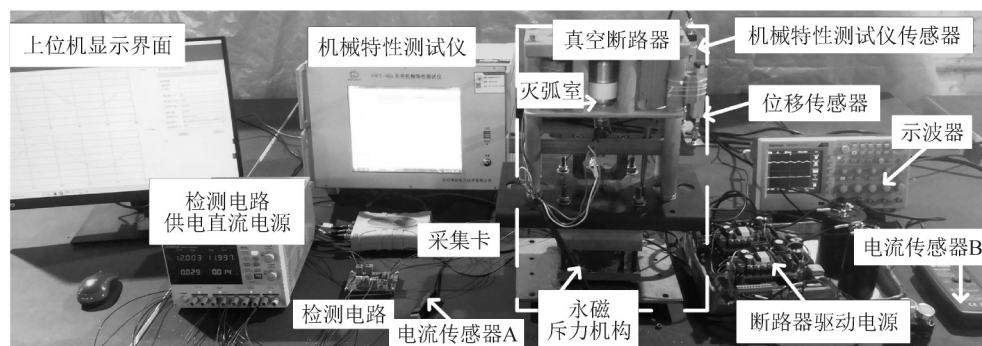


图8 实验测试平台整体图

Fig. 8 Overall diagram of experimental test platform

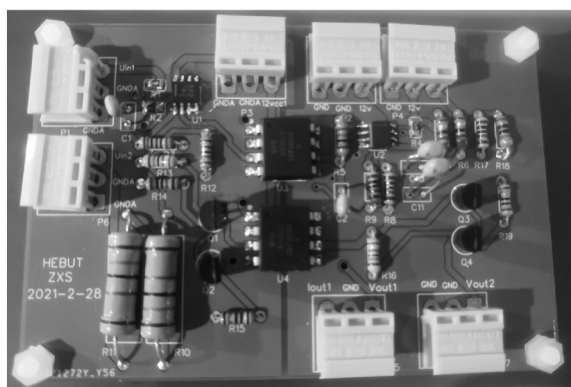


图9 监测电路

Fig. 9 Physical diagram of monitoring circuit

4.2 实验结果显示

分闸预充电电压 320 V,配置参数,采集卡初始化,等待触发,分闸线圈产生分闸电流,触发开始,



图10 位移传感器安装位置

Fig. 10 Installation position of displacement sensor

机构分闸动作。上位机显示界面见图11。同理,选取合闸电压 330 V,进行合闸动作,上位机显示界面见图12。Series1、Series2和Series3分别为电流、电压和位移信号,图示采集信号曲线清晰无杂波,达

到预期设计目标。

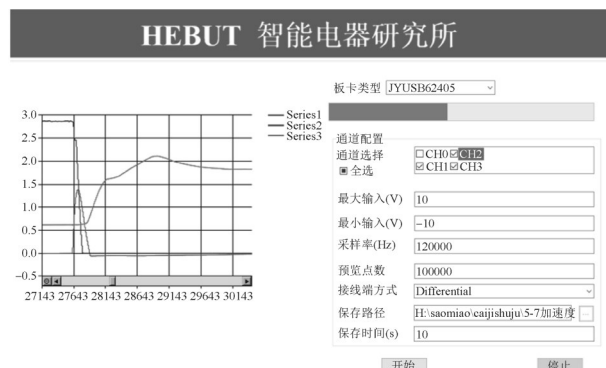


图11 分闸电压320 V上位机界面

Fig. 11 Upper computer display interface with opening voltage 320 V



图12 合闸电压330 V上位机界面

Fig. 12 Upper computer display interface with closing voltage 330 V

由于多路信号同步采集,每路信号需要观察的时间范围不同,如位移曲线需要几十个ms时间尺度观察,并且采集数据均是电压信号需要分别转换成电流、电压、位移参数群,故数据还需进一步处理。

4.3 实验结果处理与系统精度分析

对采集信号数据进行存储导出和再处理,得到机构分闸过程中运动特性曲线见图13。由图13电流曲线可知,斥力线圈的电压、电流变化起始时间是一致的,由位移曲线可知,机构动作时间为4.32 ms,表明从线圈放电到机构分闸动作的反应时间为1 ms。

由图13电压时间曲线可知,光耦隔离电压监测电路开始的监测电压值为310.21 V,理论输出值为310 V,误差为0.06%。分闸过程电流时间曲线见图14。由图14传感器A的电流时间曲线可知,文中所用电流传感器和二阶滤波电路输出电流最大值为1.09 kA,传感器B电流时间曲线可知,高精度电流传感器输出电流最大值为1.08 kA,误差为0.92%。分闸过程位移时间曲线见图15。由图15位移传感器曲线和机械特性仪的曲线比对可知,本监测系统分闸位移为5.51 mm、分闸时间为17.64 ms,机械特性测试仪分闸位移为5.55 mm、分闸时间为18.26 ms,

位移误差为0.72%,时间误差为3.39%。

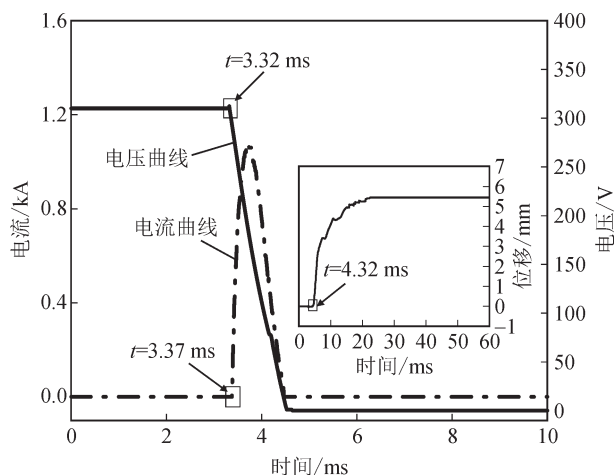


图13 分闸过程多参数曲线

Fig. 13 Multi parameter curve of mechanism opening process

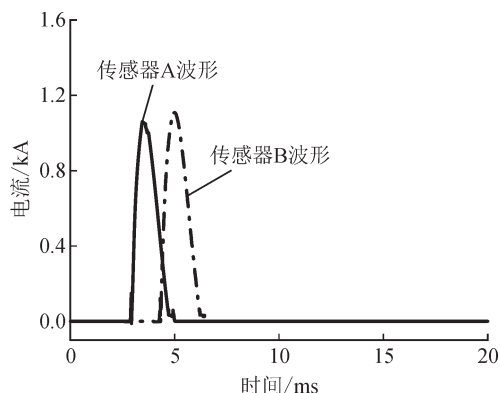


图14 分闸过程电流—时间曲线

Fig. 14 Current-time curve of opening process

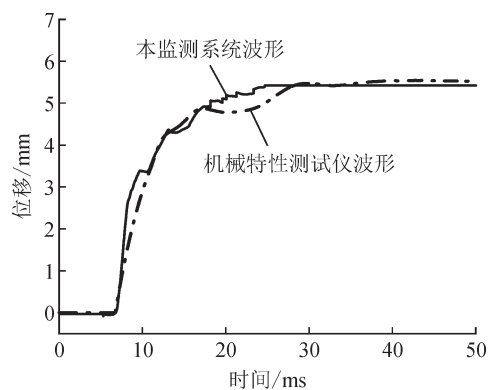


图15 分闸过程位移—时间曲线

Fig. 15 Displacement-time curve of opening process

机构合闸过程中多参数曲线见图16。由图16电流曲线可知,斥力线圈电压电流变化起始时间一致,由位移曲线可知,机构动作时间为4.36 ms,表明从线圈放电到机构分闸动作的反应时间约为1 ms。

合闸过程电流时间曲线见图17。断路器机构合闸动作,本系统电压监测电路的误差是3.02%,由图17电流曲线可知电流监测部分的误差是2.16%。

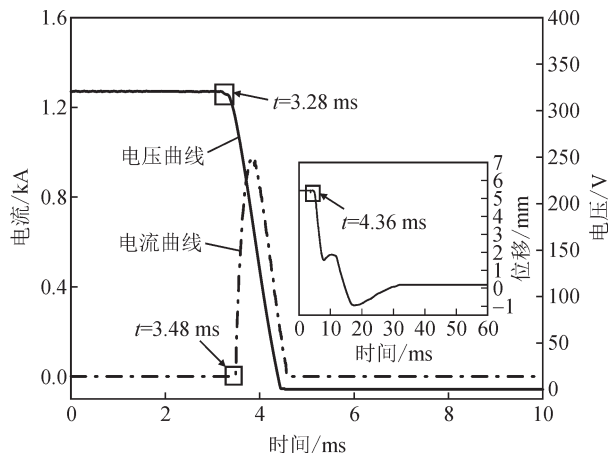


图 16 合闸过程多参数曲线

Fig. 16 Multi parameter curve of closing process

合闸过程位移时间曲线见图 18。由图 18 位移曲线可知位移部分的误差是 1.64%，时间误差为 2.83%。

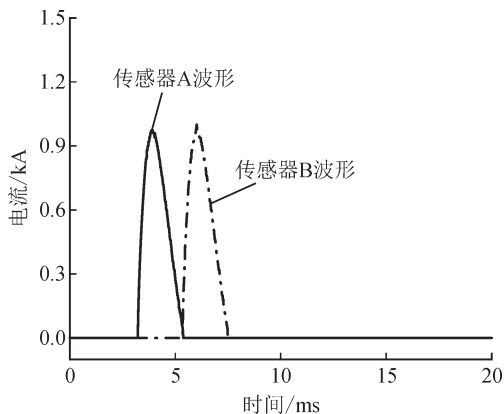


图 17 合闸过程电流—时间曲线

Fig. 17 Current-time curve of closing process

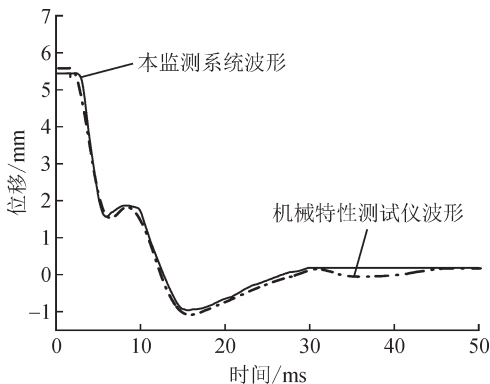


图 18 合闸过程位移—时间曲线

Fig. 18 Displacement-time curve of closing process

综上,本系统实现了直流真空断路器永磁斥力机构多参数信号同步采集,并且分合闸动作过程中,监测系统的电流、电压与位移信号误差均不超过 3.5%。

5 结语

以 400 V/400 A/25 kA 短行程直流真空断路器

永磁斥力机构为研究对象,自主设计了对机构分合闸过程中线圈的电压、电流信号和机构位移信号实时监测的软硬件系统。硬件系统包括以线性光耦 HCNR200 芯片为主的隔离电压监测电路、霍尔电流传感器与二阶滤波电路组成的电流监测模块、电阻式直线位移传感器组成的位移监测模块。

基于 C# 语言,自主开发同步采集、显示和数据输出等模块。通过数据处理和状态特征参数提取,获得了机构分合闸过程中的机械状态参数群,并监测定量分析了永磁斥力机构从线圈放电到机械动作这一完整动态过程。

通过与高精度电流传感器和机械特性测试仪比对验证,本系统监测误差在 3.5% 以内,满足工程实际需求。

参考文献:

- [1] 刘路辉,叶志浩,付立军,等.快速直流断路器研究现状与展望[J].中国电机工程学报,2017,37(4):966-977.
LIU Luhui, YE Zhihao, FU Lijun, et al. Research & development status and prospects of fast DC circuit breakers[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(4):966-977.
- [2] 王秀环,周军川,靳祖磊,等.直流电网用直流断路器短时电流试验方法研究[J].电网与清洁能源,2022,38(3):8-15.
WANG Xiuhuan, ZHOU Junchuan, JIN Zulei, et al. Research on the short-time current test method of DC circuit breaker used in DC grids[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(3):8-15.
- [3] 孙义,刘景晖,郑昕雷,等.特高压 GIL 接入对断路器瞬态恢复电压的影响[J].电力工程技术,2022,41(5):240-245.
SUN Yi, LIU Jinghui, ZHENG Xinlei, et al. Influence of UHV GIL access on transient recovery voltage of circuit breaker[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(5):240-245.
- [4] 苏湛威,蔡定国,连骏,等.用于断路器温升试验的大电流发生器研制[J].变压器,2022,59(11):6-10.
SU Zhanwei, CAI Dingguo, LIAN Jun, et al. Development of high current generator for temperature rise test of circuit breaker[J]. Transformer, 2022, 59(11):6-10.
- [5] 杜凌艳,王振浩,王刚,等.高压断路器运行状态实时监测系统[J].电力自动化设备,2006,26(1):58-61.
DU Lingyan, WANG Zhenhao, WANG Gang, et al. Design of real-time operating state monitoring system for HV breaker[J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26(1):58-61.
- [6] 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.
- [7] 刘晓明, 张煦松, 姜文涛, 等. 基于混沌吸引子的真空断路器永磁斥力机构机械故障识别方法[J]. 电工技术学报, 2022, 37(20): 5334-5346.
- LIU Xiaoming, ZHANG Xusong, JIANG Wentao, et al. A method of mechanical fault identification of permanent magnet repulsion mechanism of vacuum circuit breaker based on chaos attractor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(20): 5334-5346.
- [8] 孙曙光, 张强, 杜太行, 等. 基于分合闸线圈电流的万能式断路器故障诊断[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(2): 130-140.
- SUN Shuguang, ZHANG Qiang, DU Taihang, et al. Fault diagnosis for conventional circuit breaker based on switching coil current[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(2): 130-140.
- [9] 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.
- [10] 雍明超, 赵宝, 路光辉, 等. 基于最小二乘法的断路器位移监测数据的拟合与处理[J]. 高压电器, 2016, 52(11): 194-199.
- YONG Mingchao, ZHAO Bao, LU Guanghui, et al. Fitting and processing of circuit breaker displacement monitoring data based on least square method[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(11): 194-199.
- [11] 孙来军, 胡晓光, 纪延超. 一种基于振动信号的高压断路器故障诊断新方法[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(6): 157-161.
- SUN Laijun, HU Xiaoguang, JI Yanchao. A new method of fault diagnosis for high voltage circuit breakers based on vibration signals[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(6): 157-161.
- [12] 王小华, 苏彪, 荣命哲, 等. 中压开关柜在线监测装置的研制[J]. 高压电器, 2009, 45(3): 52-55.
- WANG Xiaohua, SU Biao, RONG Mingzhe, et al. Development of on-line monitoring system of medium voltage switchgear[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(3): 52-55.
- [13] 谭佳明, 陈玲玲, 蒋佳成, 等. 交流中压真空断路器机械特性在线监测装置的研制[J]. 高压电器, 2020, 56(7): 69-76.
- TAN Jiaming, CHEN Lingling, JIANG Jiacheng, et al. Development of on-line monitoring device for mechanical characteristics of AC medium voltage vacuum circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(7): 69-76.
- [14] 何俊佳, 袁召, 经鑫, 等. 电磁斥力机构研究综述[J]. 高电压技术, 2017, 43(12): 3809-3818.
- HE Junjia, YUAN Zhao, JING Xin, et al. Review of research on repulsion mechanism[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(12): 3809-3818.
- [15] JIANG Wentao, LIU Xiaoming, CHEN Hai, et al. Analysis on dynamic characteristics of fast operating mechanism of vacuum circuit breaker[C]//2020 IEEE International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices (ASEMD). Tianjin, China: IEEE, 2020: 1-2.
- [16] 程显, 赵海洋, 葛国伟, 等. 快速斥力机构线圈盘磁场优化设计[J]. 高电压技术, 2020, 46(8): 2643-2653.
- CHENG Xian, ZHAO Haiyang, GE Guowei, et al. Optimum design of coil disc magnetic field of rapid repulsion mechanism[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(8): 2643-2653.
- [17] 王军龙, 杨欢红, 张劲松, 等. 基于低能量直流的真空断路器短路开断能力评估[J]. 智慧电力, 2022, 50(7): 23-28.
- WANG Junlong, YANG Huanhong, ZHANG Jinsong, et al. Short-circuit breaking capacity evaluation of vacuum circuit breaker based on low-energy DC[J]. Smart Power, 2022, 50(7): 23-28.
- [18] 尹永强, 韦盟杰, 余宏伟. 基于高线性光耦HCNR201的交流信号隔离电路的实现[J]. 电测与仪表, 2008, 45(11): 50-54.
- YIN Yongqiang, WEI Mengjie, YU Hongwei. The realization of AC signal isolation circuit based on the high linearity analog optocoupler HCNR201[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2008, 45(11): 50-54.
- [19] 郑良广, 倪喜军, 闫安心, 等. 基于线性光耦的强隔离直流电压检测方法[J]. 电工电气, 2009(11): 53-55.
- ZHENG Lianguang, NI Xijun, YAN Anxin, et al. High isolated DC voltage detecting technique based on linear optocoupler[J]. Electrotechnics Electric, 2009(11): 53-55.
- [20] 张宝生, 王念春. 基于高线性模拟光耦器件HCNR200的模拟量隔离板[J]. 仪表技术, 2005(5): 59-60.
- ZHANG Baosheng, WANG Nianchun. Analog isolation board based on high-linearity analog optocoupler HCNR200[J]. Instrumentation Technology, 2005(5): 59-60.
- [21] 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 of mechanical properties and state evaluation method for intelligent circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(3): 129-134.

- [12] 张应中, 徐可新, 阎崇毅, 等. 高压断路器弹簧操动机构的优化与仿真[J]. 高压电器, 2014, 50(4): 66-71.
ZHANG Yingzhong, XU Kexin, YAN Chongyi, et al. Optimization and simulation of spring operating mechanism of high voltage circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(4): 66-71.
- [13] 杨秋玉, 彭彦卿, 庄志坚. 基于 ADAMS 的高压断路器弹簧机构动力学仿真与故障分析[J]. 高压电器, 2018, 54(6): 67-73.
YANG Qiuyu, PENG Yanqing, ZHUANG Zhijian. Dynamic simulation and failure analysis of spring mechanism of high-voltage circuit breaker based on ADAMS[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(6): 67-73.
- [14] 刘超, 赵伟涛, 张强, 等. 真空断路器弹簧操动机构机械特性的仿真与优化[J]. 高压电器, 2019, 55(8): 65-71.
LIU Chao, ZHAO Weitao, ZHANG Qiang, et al. Simulation and optimization of mechanical characteristics of vacuum circuit breaker spring operating mechanism[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(8): 65-71.
- [15] 徐晓东. 断路器操作机构运动仿真[J]. 机械研究与应用, 2020, 33(6): 179-181.
XU Xiaodong. Motion simulation of circuit breaker operating mechanism[J]. Mechanical Research & Application, 2020, 33(6): 179-181.
- [16] 钟舒凌, 游一民, 马宗雄, 等. 环网柜真空断路器弹簧操动机构的优化[J]. 厦门理工学院学报, 2020, 28(5): 27-32.
ZHONG Shuling, YOU Yimin, MA Zongxiong, et al. Optimization of spring operating mechanism of vacuum circuit breaker for ring main unit[J]. Journal of Xiamen University of Technology, 2020, 28(5): 27-32.
- [17] 赵玉芝, 张杰, 张鹏, 等. 真空断路器弹簧操动机构合闸凸轮优化设计[J]. 高压电器, 2017, 53(3): 205-210.
ZHAO Yuzhi, ZHANG Jie, ZHANG Peng, et al. Optimum design of the spring actuator cam during closing operation in vacuum circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(3): 205-210.
- [18] 熊显智, 王平. 真空断路器弹簧操动机构凸轮优化设计[J]. 高压电器, 2020, 56(11): 116-123.
XIONG Xianzhi, WANG Ping. Cam optimization design of spring operating mechanism of vacuum circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(11): 116-123.
- [19] 邢垒垒, 陈大江, 侯魁, 等. 基于 Adams 的框架断路器机构及触头系统动力学仿真[J]. 电力科学与工程, 2018, 34(12): 62-66.
XING Leilei, CHEN Dajiang, HOU Kui, et al. Dynamic simulation of frame circuit breaker based on Adams[J]. Electric Power Science and Engineering, 2018, 34(12): 62-66.
- [20] 吴吉, 吕鸿, 王流火, 等. 断路器槽凸轮曲线和负载特性的匹配[J]. 电气应用, 2015, 34(13): 76-83.
WU Ji, LYU Hong, WANG Lihuo, et al. Matching of circuit breaker groove cam curve and load characteristics[J]. Electrotechnical Application, 2015, 34(13): 76-83.
- 于宁(1995—), 男, 硕士, 主要从事户内断路器疲劳分析和可靠性研究(E-mail: yu_ning1995@163.com)。
- 曾建斌(1975—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为智能磁性材料磁特性的测量、仿真与建模以及电机控制(E-mail: Jianbin.Zeng@outlook.com)。
- (上接第 24 页)
- [22] 夏宁, 郭兴宇, 邹积岩, 等. 高压直流真空断路器安全开距的试验研究[J]. 高电压技术, 2020, 46(5): 1823-1829.
XIA Ning, GUO Xingyu, ZOU Jiyan, et al. Experimental research on the safe stroke of HVDC vacuum circuit breaker[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(5): 1823-1829.
- [23] HUANG Xinbo, HE Xia. Design of an on-line monitoring system of mechanical characteristics of high voltage circuit breakers[C]//2011 International Conference on Electronics, Communications and Control. Ningbo, China: IEEE, 2011: 3646-3649.
- [24] 程显, 王华清, 葛国伟, 等. 城市轨道交通 1 800 V 高速混合式直流断路器研制[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(1): 212-218.
CHENG Xian, WANG Huaqing, GE Guowei, et al. Research and design of 1 800 V high-speed hybrid DC circuit breaker for urban rail transit system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(1): 212-218.
- 刘晓明(1968—), 女, 教授, 博士研究生导师, 主要研究方向为现代电器设计与应用、高电压与绝缘技术、智能电器(E-mail: liuxiaoming@hebut.edu.cn)。
- 张煦松(1996—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为现代电器设计与应用、电器设备状态检测、智能电器(E-mail: 1508189330@qq.com)。
- 姜文涛(1985—), 男, 工程师, 博士研究生, 主要研究方向为现代电器设计与应用、电机控制与应用(E-mail: 1736671718@qq.com)。
- 宋柏阳(1998—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为现代电器设计与应用、开关电源设计与应用(E-mail: xiaosongts@163.com)。