

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2024.03.004

真空断路器弹簧操动机构的优化

于 宁¹, 曾建斌¹, 游一民¹, 施政前², 王永鑫¹

(1. 厦门理工学院电气工程与自动化学院, 福建 厦门 361024; 2. 兴电器有限公司, 浙江 温州 325000)

摘要: 真空断路器触头弹簧压力增大会导致断路器无法可靠合闸, 四连杆结构在一定程度上会影响机构的出力特性和机械效益, 进而影响断路器合闸的可靠与稳定。文中分析了真空断路器的动作原理, 建立弹簧操动机构的数学模型; 对机构中的凸轮轮廓、传动拐臂的角度和尺寸、连板与合闸滚子的尺寸参数进行优化, 建立弹簧操动机构的仿真模型。动力学仿真表明, 优化后的触头弹簧压力增大了58%(从1 700 N提升到2 686 N), 仍能保证断路器操动机构可靠合闸。试验结果显示, 触头弹簧压力为2 500 N时断路器触头能够可靠吸合, 平均合闸速度降至0.68 m/s, 弹跳时间缩短了18.4%, 整体优化后的方案满足设计要求并具有良好的可靠性与稳定性。

关键词: 真空断路器; 弹簧操动机构; 优化设计; Adams仿真; 合闸行程曲线

Optimization of Spring Operating Mechanism for Vacuum Circuit Breaker

YU Ning¹, ZENG Jianbin¹, YOU Yimin¹, SHI Zhengqian², WANG Yongxin¹

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Xiamen University of Technology, Fujian Xiamen 361024, China; 2. Xingji Electric Appliance Co., Ltd., Zhejiang Wenzhou 325000, China)

Abstract: The increase of spring pressure of contact of vacuum circuit breaker will cause the circuit breaker not to close reliably. The four-bar structure will, to a certain extent, affect the output characteristics and mechanical benefits of the mechanism, and thus affect both reliability and stability of circuit breaker in closing operation. In this paper, the operation principle of vacuum circuit breaker is analyzed and the mathematical model of the spring operation mechanism is set up. The cam profile, angle and size of transmission lever, dimension parameters of connecting plate and closing roller in the mechanism are optimized, and the simulation model of spring operating mechanism is set up. The dynamic simulation shows that the pressure of the spring of the contact after optimization is increased by 58% (increase from 1 700 N to 2 686 N), which can still assure the reliable closing of the operating mechanism of the circuit breaker. The test results show that when the contact spring pressure is 2 500 N, the contact of the circuit breaker can engage reliably, the average closing speed is reduced to 0.68 m/s, and the bouncing time is shortened by 18.4%. The overall scheme after optimization meets the design requirements and has good reliability and stability.

Key words: vacuum circuit breaker; spring operating mechanism; optimization design; Adams simulation; travel curve in closing operation

0 引言

环网供电以高可靠性与经济性成为配电网的首要选择, 广泛应用于电力系统^[1-3]。其中断路器的

稳定运行是环网供电稳定性与可靠性的重要保障。

文[4-6]以凸轮的轮廓曲线为优化参数, 通过设计新的轮廓曲线来满足动力特性匹配负载特性从而满足断路器的机械特性; 文[7-10]以断路器合闸

收稿日期: 2023-10-02; 修回日期: 2023-12-03

基金项目: 福建省自然科学基金面上项目(2020J01282)。

Project Supported by Fujian Province Natural Science Foundation of General Project(2020J01282).

速度为目标,通过优化合闸弹簧的参数和约束副中的变刚度系数,从而达到减小合闸时的冲击力和目标合闸速度;文[11-12]以断路器的分闸速度为依据,对绝缘拉杆和连杆的长度,拐臂的角度和尺寸进行优化设计,来满足断路器对分闸速度的要求;文[13-15]通过优化分合闸弹簧和连杆的长度、凸轮的轮廓和对整摩擦力值的调整,来满足断路器分合闸特性的要求。

上述文中提到的优化都是基于一个或两个零件的参数,而以四连杆传动整体为研究对象进行优化,未见报道。

文中针对在增大断路器触头弹簧的压力时会造成断路器合闸不可靠的问题,在保持断路器输入能量不变的条件下,以12 kV/630 A的真空断路器弹簧操动机构为研究对象,对操动机构四连杆部分进行优化^[16]。在保证断路器可靠合闸的情况下,触头弹簧的压力从1 700 N提升到2 686 N。

1 四连杆动作原理

真空断路器合闸时四连杆的动作原理图见图1。动作原理是:进行合闸操作时,推板2打开,合闸挚子4逆时针转动,与滚轮5的储能保持状态打破,合闸弹簧1推动弹簧拉板6逆时针转动,带动合闸轴7和凸轮3逆时针转动,凸轮的转动推动合闸滚子11顺时针转动,同时带动传动拐臂12、连板13和输出轴14顺时针转动,通过传动机构部分带动动触头8向下运动,完成合闸过程,与此同时分闸弹簧9在固定套10的推动下向上运动,进行压缩储能。

2 四连杆优化设计

2.1 数学模型

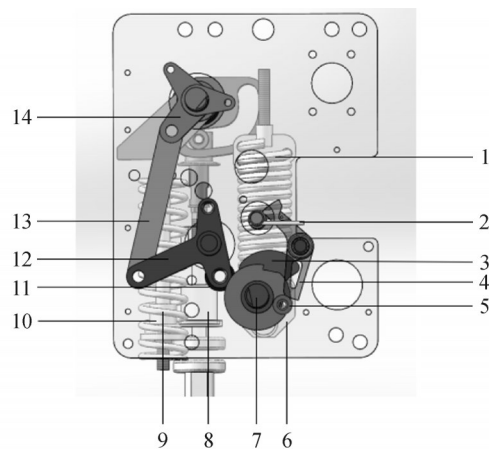
根据该断路器弹簧操动机构合闸过程的受力情况,见图2,并建立了数学模型。

2.1.1 输入力矩的计算

断路器机构的动力主要来源于合闸弹簧储存的能量。合闸弹簧推动合闸轴上的凸轮进行转动,等效在 O_1 点的驱动力矩为

$$M_1 = F_1 \times d_1 \quad (1)$$

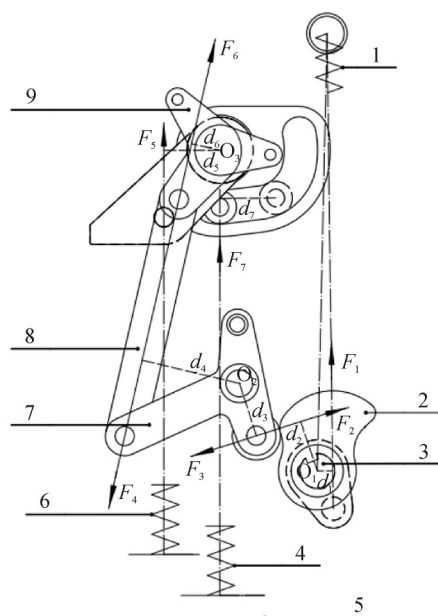
式(1)中: F_1 为合闸弹簧的力; d_1 为 F_1 的力臂; M_1 为合闸弹簧对 O_1 驱动力矩。



1—合闸弹簧; 2—推板; 3—凸轮; 4—合闸挚子; 5—滚轮;
6—弹簧拉板; 7—合闸轴; 8—动触头; 9—分闸弹簧;
10—固定套; 11—合闸滚子; 12—传动拐臂; 13—连板;
14—输出轴。

图1 四连杆动作原理图

Fig. 1 Action principle diagram of four connecting rods



1—合闸弹簧; 2—凸轮; 3—合闸轴; 4—触头弹簧; 5—触头;
6—分闸弹簧; 7—传动拐臂; 8—连板; 9—输出轴。

图2 断路器机构受力分析图

Fig. 2 Force analysis diagram of circuit breaker mechanism

2.1.2 负载力矩的计算

在合闸进行时,断路器受到的负载力主要来自于触头弹簧和分闸弹簧。在合闸开始到刚合前,负载力等于分闸弹簧的力,即: $F_{\text{负}} = F_5$;刚合之后开始超行程,此时的负载力为触头弹簧与分闸弹簧力的和:即: $F_{\text{负}} = F_5 + F_7$ 。 O_3 点的转矩关系为

$$M_3 = F_5 \times d_5 + F_7 \times d_7 = F_6 \times d_6 \quad (2)$$

式(2)中: M_3 为 O_3 点的转矩; F_5 为分闸弹簧的

力值; d_5 为 F_5 的力臂; F_7 为触头弹簧的力值; d_7 为 F_7 的力臂; F_6 为连板作用在输出轴上的力; d_6 为 F_6 的力臂。

等效在 O_2 点的负载力矩 M_2 的计算为:

$$F_6 = F_4 \quad (3)$$

$$M_2 = F_4 \times d_4 = F_3 \times d_3 \quad (4)$$

式(3)、(4)中: F_4 为输出轴作用在连板上的力; d_4 为 F_4 的力臂; M_2 为 O_2 点的负载力矩; F_3 为凸轮作用在合闸滚子上的力; d_3 为 F_3 的力臂。

等效在 O_1 点的负载力矩 M_4 的计算为:

$$F_3 = F_2 \quad (5)$$

$$M_4 = F_2 \times d_2 \quad (6)$$

式(5)、(6)中: F_2 为合闸滚子作用在凸轮上的力; d_2 为 F_2 的力臂; M_4 为在 O_1 点的负载力矩。

2.2 优化方案的设计

文中使用的断路器弹簧操动机构由凸轮、输出轴、连板和传动拐臂组成的四连杆结构, 见图2。合闸过程中凸轮轮廓对输出力的特性有决定作用。合闸后段, 合闸弹簧不但要压缩触头弹簧完成合闸, 还要对分闸弹簧进行储能。如果要得到更大的触头压力, 首先想到增大合闸弹簧的力, 这样就会导致合闸时冲击力过大和速度较高, 对断路器造成损伤, 但是利用凸轮的轮廓曲线改变输出力特

性, 就会使得这些情况得到改善^[17]。合闸前段, 阻力由分闸弹簧提供, 合闸后段, 阻力由触头弹簧与分闸弹簧共同提供。合闸后段为保证断路器能够可靠合闸, 合闸弹簧等效在凸轮处的力必须大于分闸弹簧与触头弹簧合力等效在凸轮处的力。弹簧操动机构的初始弹簧参数见表1。

表1 弹簧操动机构的初始弹簧参数

Table 1 Initial spring parameters of spring operating mechanism

弹簧种类	力值范围/N	能量/J
合闸弹簧	1 700~4 200	125
分闸弹簧	250~900	34
触头弹簧	860~1 700	5

原操动机构触头弹簧压力的最大值为1 700 N, 现在要求触头弹簧压力能够达到2 600 N, 在此要求下为了保证断路器能够可靠合闸, 需要对原操动机构的四连杆部分进行优化。

在分闸与合闸弹簧能量不变的情况下, 设计了3种优化方案, 3种方案中的合闸滚子、连板和传动拐臂的优化方案是一样的, 只有凸轮的优化设计不一样, 优化方案中对凸轮的轮廓有较大的改变, 对连板和合闸滚子只有尺寸的优化设计, 连板的长度减小了35 mm; 合闸滚子的直径减小了0.8 mm。优化设计主要零部件优化对比图见图3。

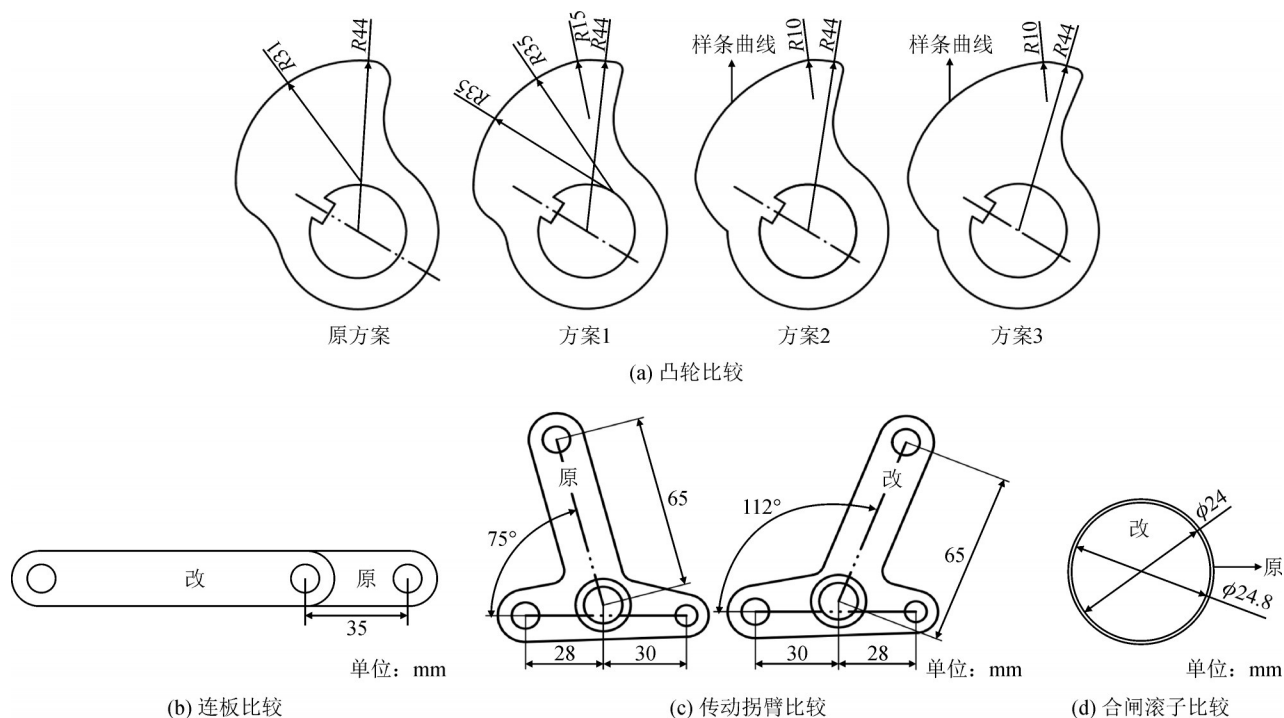


图3 主要零部件优化对比图

Fig. 3 Comparison diagram of optimization of main components

凸轮的轮廓曲线有很多形式,常用的有几段圆弧相连接、样条曲线、阿基米德螺旋线等^[18]。文中方案1的凸轮采用四段圆弧的连接方式;为了更好的满足凸轮对合闸滚子部位的机械利益,方案2和方案3的凸轮采用圆弧加样条曲线的连接方式。方案3中的样条曲线比方案2的长一些,会使机构运

行更加平稳,机械利益会更高,整个断路器机构也会更省力。

3 仿真结果分析

弹簧在 O_1 点负载力矩与输入力矩的对比图见图4。

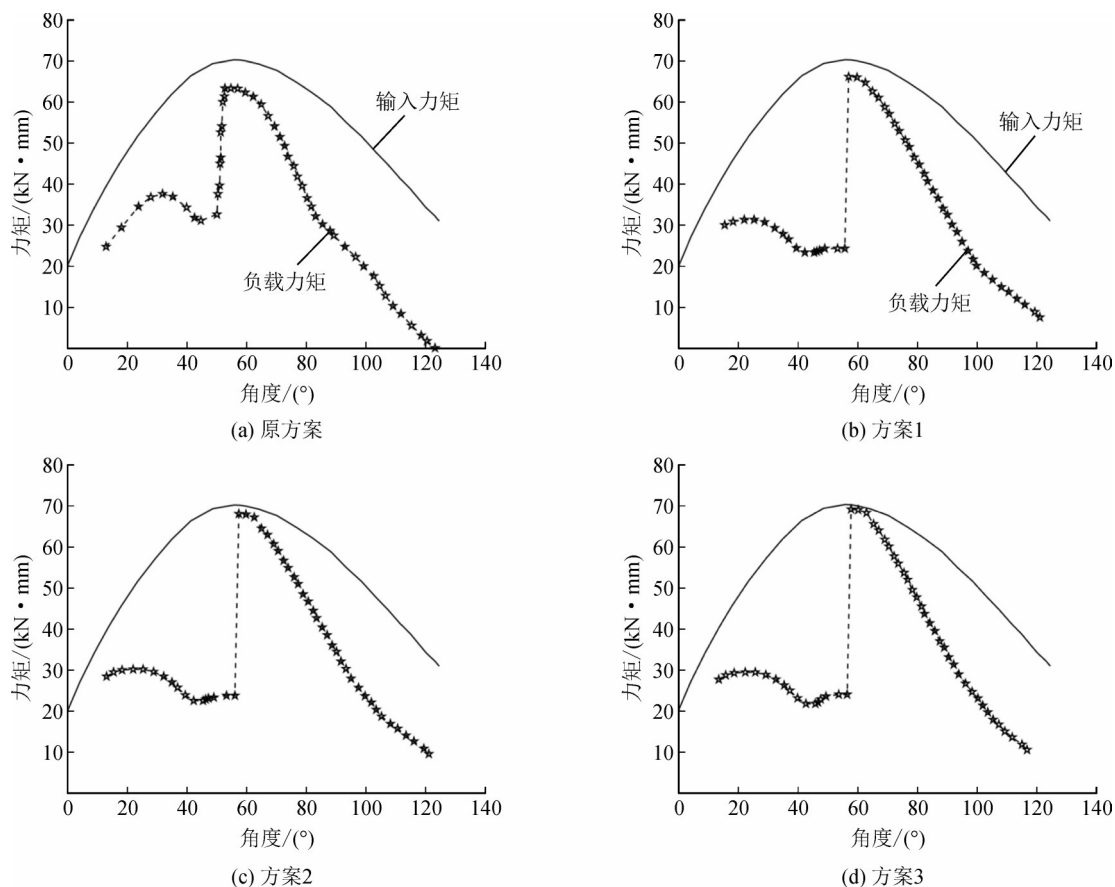


图4 原方案与3种优化方案的输入力矩和负载力矩对比图

Fig. 4 Comparison of input torque and output torque between the original scheme and the three optimized schemes

从图4(a)可得,负载力矩的最大值 $6.3 \times 10^4 \text{ N} \cdot \text{mm}$, 小于输入力矩的最大值 $7.0 \times 10^4 \text{ N} \cdot \text{mm}$; 图4(b)可得,负载力矩的最大值 $6.6 \times 10^4 \text{ N} \cdot \text{mm}$, 小于输入力矩的最大值 $7.0 \times 10^4 \text{ N} \cdot \text{mm}$; 图4(c)可得,负载力矩的最大值 $6.8 \times 10^4 \text{ N} \cdot \text{mm}$, 小于输入力矩的最大值 $7.0 \times 10^4 \text{ N} \cdot \text{mm}$; 图4(d)可得,负载力矩的最大值 $6.9 \times 10^4 \text{ N} \cdot \text{mm}$, 小于输入力矩的最大值 $7.0 \times 10^4 \text{ N} \cdot \text{mm}$ 。3种方案的输入力矩均大于负载力矩,都能够保证断路器可靠合闸。

为了得到优化方案的机械特性,文中使用Adams对弹簧操动机构进行动力学特性仿真,考虑了断路器操动机构的重力、碰撞力以及摩擦力等因素的影响。动力学仿真模型见图5。

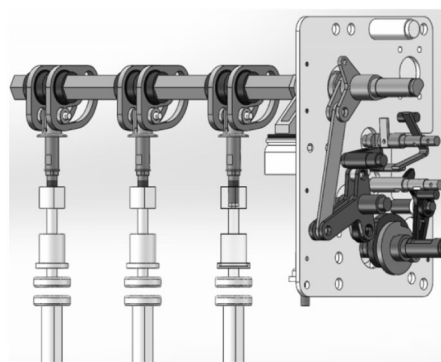


图5 动力学仿真模型

Fig. 5 Dynamic simulation model

将建立的弹簧操动机构仿真模型导入Adams进行动力学仿真分析^[19-20],得到合闸行程曲线和凸轮对合闸滚子的作用力曲线,见图6。

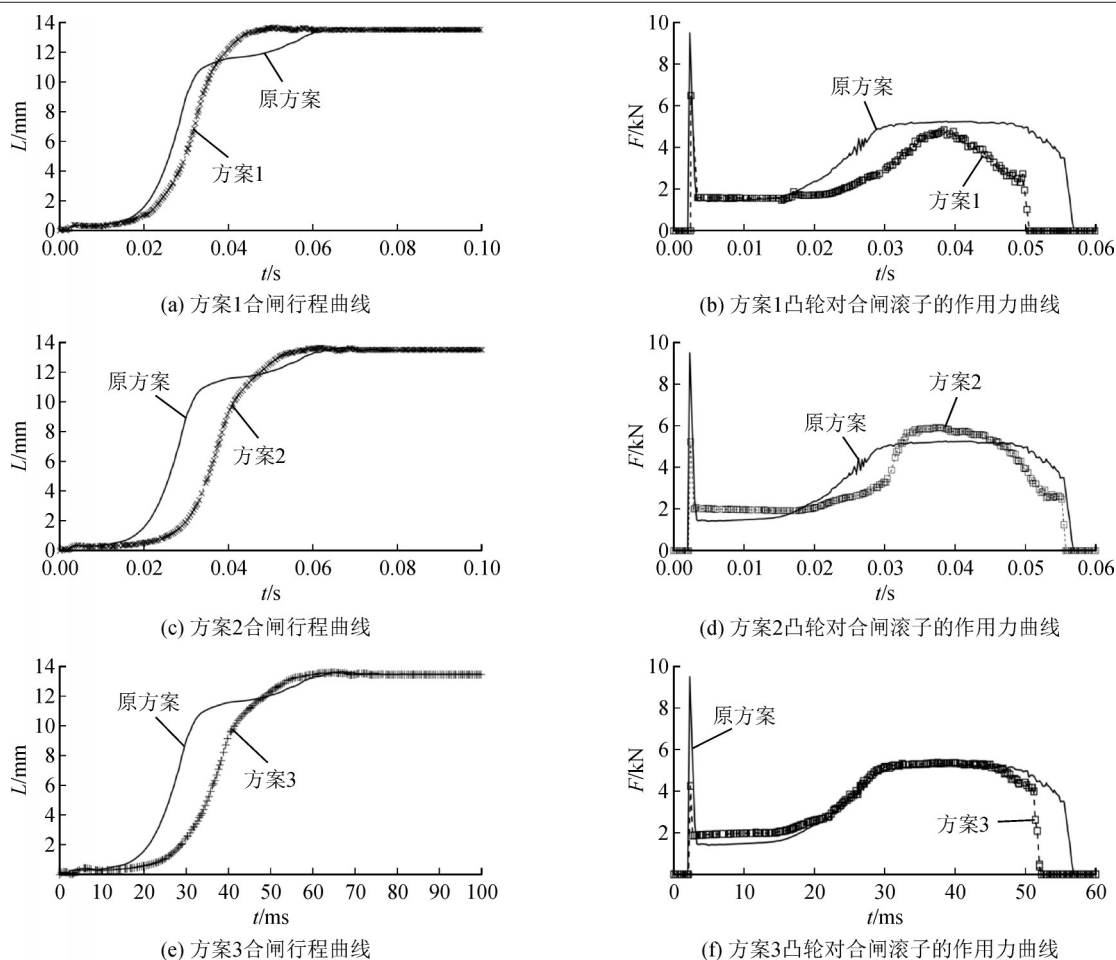


图6 3种优化方案合闸行程曲线以及合闸滚子与凸轮碰撞力曲线的对比

Fig. 6 Comparison of the closing travel curve of the three optimization schemes and the collision force curve of the closing roller and cam

由动力学的仿真结果可得,3种方案的操动机构触头弹簧满足的压力依次为2 346、2 510、2 686 N。从图6(a)可得,原方案机构的合闸速度为0.88 m/s,方案1的平均合闸速度为0.82 m/s,从图6(b)可看出方案1作用力的冲击有所减小,但稳定时间太短;从图6(c)可得,方案2的平均合闸速度为0.80 m/s,从图6(d)可看出方案2作用力的冲击进一步减小,稳定时间相比方案1有所延长;从图6(e)可得,方案3的合闸平均速度为0.72 m/s,从图6(f)可看出方案3作用力的冲击最小,稳定时间最长。合闸过程需要稳定的力,作用力越稳定越好,因此选择方案3为最终的优化方案。

4 试验验证

将12 kV/630 A真空断路器触头上的触头弹簧的压力换成2 500 N,对方案3进行试验验证,该实验在环网柜上进行。试验测试设备现场见图7,试

验的合闸曲线见图8。

从图8可得,断路器的平均合闸速度为0.68 m/s与备选方案3的平均合闸速度0.72 m/s的仿真结果误差为5.9%,符合误差在10%之内。另外断路器平均合闸速度的减小,带动触头运动速度的降低,从而减小对灭弧室和断路器整机的冲击,延长零部件的使用寿命,解决弹跳时间较长的问题。

5 结语

文中在断路器的分闸与合闸弹簧能量不变的条件下,对操动机构的凸轮轮廓、传动拐臂的角度和尺寸、连板和合闸滚子的尺寸进行3种方案的设计,并建立数学模型、使用Adams进行动力学仿真分析和试验验证。仿真分析结果表明,3种方案中,方案3的仿真结果能够达到目标,在触头弹簧的压力增大到2 686 N时断路器弹簧操动机构让能够可靠合闸。实验结果表明,装有2 500 N触头弹簧的断



(a) 传感器部分



(b) 整体设备

图7 试验设备

Fig. 7 Test equipment

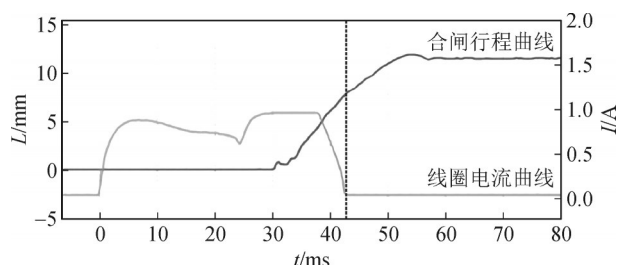


图8 试验的合闸曲线

Fig. 8 Closing curve of test

路器能够可靠合闸,平均合闸速度为0.68 m/s,能够减小触头合闸弹跳时间,减小对灭弧室和断路器整机的冲击,提高产品的机械寿命和可靠性。

参考文献:

- [1] 李得勇,张典,尚明. 浅谈环网柜在配电网中的应用[J]. 建筑工程技术与设计,2018(24):3765.
LI Deyong, ZHANG Dian, SHANG Ming. Talking about the application of ring network cabinet in distribution network[J]. Architectural Engineering Technology and Design, 2018(24):3765.
- [2] 刘东超,陈志刚,崔龙飞. 基于物联网的环网柜在线监测技术研究[J]. 电力系统保护与控制,2022,50(20):60-67.
LIU Dongchao, CHEN Zhigang, CUI Longfei. Online

monitoring technology of a ring network cabinet based on the internet of things[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(20):60-67.

- [3] 车日全. 环网柜在配电网中的应用[J]. 通信电源技术, 2018, 35(12):127-128.
CHE Riquan. Application of loop grid cabinet in distribution network[J]. Telecom Power Technologies, 2018, 35(12):127-128.
- [4] 邓慧心,邓斌. 断路器弹簧操动机构凸轮轮廓曲线参数化设计[J]. 机械设计与制造,2020(5):155-158.
DENG Huixin, DENG Bin. Parametric design of cam contour curve for spring operating mechanism of circuit breaker[J]. Machinery Design & Manufacture, 2020(5):155-158.
- [5] 程俊文,李俊蒂,桓露,等. 按输出力特性曲线设计凸轮轮廓曲线[J]. 高压电器,2020,56(4):199-203.
CHENG Junwen, LI Jundi, HUAN Lu, et al. Design of cam profile curve based on the output power characteristic curve[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(4):199-203.
- [6] 郭良超,韩国辉,刘宇,等. 高压断路器弹簧操动机构合闸凸轮优化设计[J]. 高压电器,2019,55(10):13-18.
GUO Liangchao, HAN Guohui, LIU Yu, et al. Optimum design of the closing cam in spring operating mechanism of high-voltage circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(10):13-18.
- [7] 王金龙,姚进. 真空断路器弹簧操动机构的动力学仿真分析[J]. 低压电器,2014(1):11-15.
WANG Jinlong, YAO Jin. Dynamics simulation and analysis of spring operating mechanism for vacuum circuit breakers[J]. Low Voltage Apparatus, 2014(1):11-15.
- [8] 吴际,艾世杰,陈应霞. 断路器操作机构的仿真及优化分析[J]. 机床与液压,2013,41(12):135-140.
WU Ji, AI Shijie, CHEN Yingxia. Simulation and optimization analysis of circuit breaker operating mechanism[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2013, 41(12):135-140.
- [9] 王连鹏,王尔智. 真空断路器弹簧操动机构仿真与优化[J]. 高电压技术,2006,32(2):27-29.
WANG Lianpeng, WANG Erzhi. Simulation and optimization of the spring actuator for vacuum circuit breaker[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(2):27-29.
- [10] ZHAO Fangshuai, WANG Yuhao, ZHANG Yang, et al. Dynamic simulation optimization of vacuum circuit breaker based on virtual prototype[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2020, 1654(1):012048-1-012048-5.
- [11] 任效龙,高宏力,田怀文,等. 断路器弹簧操动机构参数化建模与优化[J]. 机械设计与制造,2018(2):142-145.
REN Xiaolong, GAO Hongli, TIAN Huaiwen, et al. Parameterized modeling and optimization of spring operating mechanism for vacuum circuit breakers[J]. Machinery Design & Manufacture, 2018(2):142-145.

- [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)。