

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2024.10.022

一种断路器分闸时间调整优化分析方法

宋广民, 段晓辉, 惠勇锋, 刘宇, 李新刚, 李美荣, 郭良超

(平高集团有限公司, 河南 平顶山 467001)

摘要:文中提出了一种断路器用弹簧操动机构分闸时间调整方法,该方法可以在不改变断路器操作电压和运动速度的工况下,实现断路器分闸时间的调整,并通过仿真优化和实际样机试验测试,验证了调节分闸时间的有效性,为后续断路器弹簧操动机构的设计、运维检修以及变电站保护时间调整等工作提供优化参考,具有一定的指导意义。

关键词:断路器; 弹簧操动机构; 分闸时间; 优化设计

Adjustment and Optimization Analysis Method of Opening Time for Circuit Breaker

SONG Guangmin, DUAN Xiaohui, HUI Yongfeng, LIU Yu,

LI Xingang, LI Meirong, GUO Liangchao

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

Abstract: In this paper, the adjustment method of opening time of spring operating mechanism for high voltage circuit breaker is proposed. The method can achieve the opening time adjustment of circuit breaker without changing the operating voltage and moving speed of the circuit breaker. The effectiveness of the opening time adjustment is verified through the simulation optimization and test verification of the actual prototype, which provides optimization reference for the subsequent design, operation and maintenance of the spring operating mechanism for the circuit breaker, protection time adjustment of the substation and has certain guiding significance.

Key words: circuit breaker; spring operating mechanism; breaking time; optimization design

0 引言

在电网运行系统中,断路器的作用之一是切断故障电路,保证电网安全可靠运行^[1-3]。而断路器在进行分合闸操作时产生的过电压及涌流,会危及设备的绝缘及电力系统电压稳定性,因此保证断路器分合闸时间稳定性,实现选相分合闸操作,对电网安全稳定运行至关重要^[4-6]。

文中以断路器分闸切除电网系统故障为例,进行研究分析。变电站的故障切除时间包括保护整组动作时间和断路器开断时间^[7-9]。在保护整组策略不变的情况下,调整故障切除时间,需调整断路器开断时间。因此,在不影响断路器灭弧特性的情况下,对断路器开断时间进行可调设计,解决断路

器分合闸时间和断路器三相同期时间不满足技术要求的问题,达到选相分闸状态,可大大提高断路器的使用寿命,对电网的安全稳定运行,起到至关重要的作用^[10-15]。

1 断路器开断时间分析

断路器的开断时间包括断路器操动机构的分闸时间和断路器开断时的燃弧时间,见图1。

断路器的燃弧时间是从断路器动静触头刚分位置开始至所有极电弧熄灭为止的时间段^[16-17]。燃弧时间是由断路器灭弧特性决定的,一款灭弧室研制成功后,其断路器开断燃弧时间基本确定,且灭弧室处于密封状态,不具备可调设计,文中不做研究。

断路器的分闸时间是从分闸电磁铁得电开始

收稿日期:2024-05-11; 修回日期:2024-07-26

基金项目:平高集团有限公司科技项目(PGKJ2021-007)。

Project Supported by Science and Technology of Pinggao Group Co., Ltd.(PGKJ2021-007).

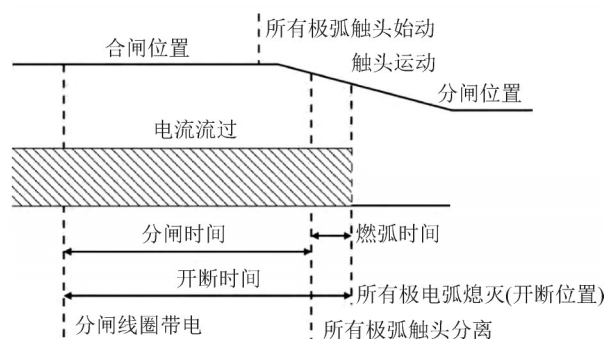


图1 断路器开断时间示意图

Fig. 1 The diagram of breaking time of circuit breaker

至断路器分闸运动到刚分点的时间^[16-17]。通过对断路器分闸时间的具体分析,可以得出断路器的分闸时间由机构分闸电磁铁动作时间+机构分闸锁扣系统动作时间+断路器分闸运动时间3部分组成,分闸过程各时间段见图2。

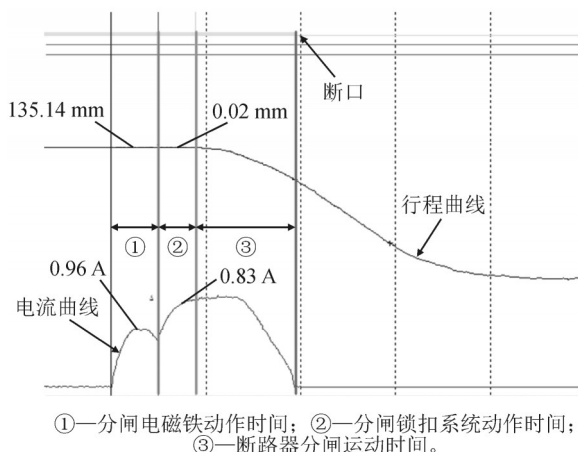


图2 断路器分闸时间示意图

Fig. 2 The diagram of opening time of circuit breaker

1)分闸电磁铁动作时间:断路器分闸电磁铁得电时刻至电磁铁动铁心运动到最大行程时刻的时间,用 t_1 表示。

根据GB 1984—2014和DL/T 402—2016标准中对断路器分闸时间的限制条件以及国网公司运检部编写的十八项反措技术要求^[16-17]:电磁铁设计额定功率 ≤ 500 W;电磁铁设计额定电流 ≤ 2.5 A;65%~110%操作电压范围内可靠动作;30%以下操作电压范围内不允许动作。

在断路器实际工程应用中,控制系统电压经常会出现波动,断路器设计时尽可能减小电磁铁出力特性受控制系统电压波动的影响,同时保证断路器在30%以下额定操作电压范围内不动作。因此通过调节断路器控制电压调整断路器的分闸时间与上述设计原则相悖,而调节断路器分闸电磁铁动铁心与撞击杆间隙,将导致冲击力变化,很难保证65%~110%额定操作电压范围内可靠动作,30%以下额定

操作电压范围内不动作的标准要求,且调节量有限,锁扣系统零部件强度很难保证。因此,通过调整分闸电磁铁动作时间调整断路器的分闸时间,原理上不可行。

2)分闸锁扣系统动作时间:电磁铁动铁心运动到最大行程时刻至断路器动端开始动作时刻的时间,用 t_2 表示。

分闸锁扣系统动作属于机械传动过程,该部分动作时间的变化不会对断路器控制电压和断路器分闸速度产生影响,在保证断路器特性不变的情况下,分闸锁扣系统动作时间部分最适合作为断路器时间调整的方向。

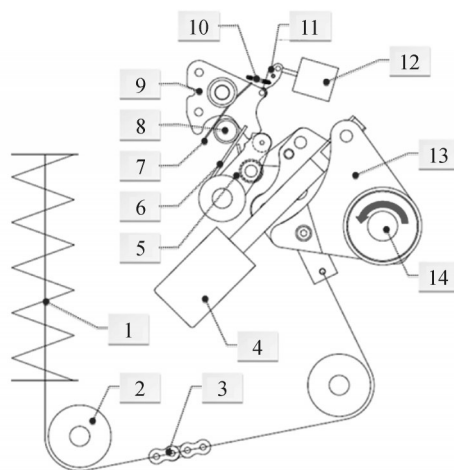
3)断路器分闸运动时间:断路器动端开始运动时刻至断路器动端运动至刚分点时刻时间,用 t_3 表示。

断路器分闸运动时间是由断路器超行程长度和断路器分闸速度决定的,由于断路器的超行程较短,因此只有断路器分闸速度有大幅度变化时,才会对断路器分闸时间有一定的影响,而断路器分闸速度是断路器电气性能的最直接影响因素,因此,通过调整断路器分闸速度来调节断路器的分闸时间不可行。

通过以上断路器开断时间分析,只有断路器分闸锁扣系统动作时间具备可调整功能,且不影响断路器整体机械、电气性能。

2 断路器分闸时间优化设计方法

对分闸锁扣系统打开时间进行调整优化设计,需要对弹簧操动机构分闸动作原理进行介绍,见图3。



1—分闸弹簧; 2—槽轮; 3—分闸链条; 4—缓冲器;
5—分闸二级锁扣; 6—分闸二级扭簧; 7—分闸一级扭簧;
8—挡轴; 9—分闸一级锁扣; 10—小锁扣拉簧; 11—小锁扣;
12—电磁铁; 13—主拐臂; 14—输出轴。

图3 弹簧操动机构分闸动作原理

Fig. 3 The opening action principle of spring operating mechanism

断路器弹簧操动机构分闸过程:分闸电磁铁12得电,电磁铁动铁心推动小锁闩11动作,打破分闸系统的受力平衡,分闸弹簧1通过分闸链条3拉动主拐臂13逆时针方向转动,通过输出轴14带动灭弧室动端动作,完成断路器的分闸操作,这时缓冲器4被压缩,起到断路器的分闸缓冲作用。

从断路器弹簧操动机构分闸操作过程可知,影响分闸时间的因素主要有电磁铁出力特性、锁闩复位弹簧力、锁闩力臂、锁闩作用线长度、锁闩转动惯量、分闸弹簧力等。而这些因素中,电磁铁出力特性的变化将改变断路器的控制电压,分闸弹簧力的变化将改变断路器的分闸速度,锁闩力臂变化将改变分闸电磁铁打开锁扣系统的动作电压,以上3个因素的调整将影响断路器整体机械、电气性能,不是最佳方案,不做具体研究。

文中将通过仿真计算的方法,对锁闩复位弹簧力值、锁闩作用线长度和锁闩转动惯量等因素进行优化计算,得到各因素对断路器分闸时间的影响,找到调整断路器分闸时间关键因素,并通过试验,验证调整时间方法的有效性。

3 仿真分析

文中以252 kV智慧性GIS断路器为研究对象,在分闸弹簧力值 F 不变的条件下,采用动力学仿真方法^[18-19],研究断路器弹簧操动机构锁闩复位弹簧力值、锁闩作用线长度和锁闩转动惯量对断路器分闸时间的影响,仿真模型见图4。

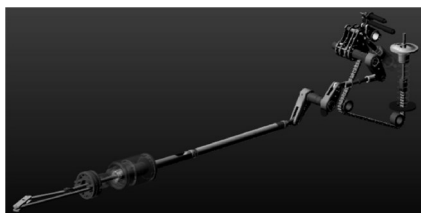


图4 断路器仿真模型

Fig. 4 The simulation model of circuit breaker

3.1 锁闩复位弹簧力值优化分析

以分闸一级锁闩复位扭簧优化分析为例,进行复位扭簧初始扭矩和扭簧刚度仿真分析,分闸一级锁闩扭簧见图5。

1)对分闸一级扭簧初始扭矩进行优化分析,分别取初始扭矩为118、138、158 N·mm,刚度为1 N·mm/(°),进行仿真计算得到仿真特性曲线见图6。

从图6中可以得出结论:断路器弹簧操动机构分闸一级扭簧初始扭矩值变化,分合闸仿真特性曲线基本重合一致,对断路器分合闸性能没有影响,分闸时间基本不变,因此,设计分闸一级扭簧初始

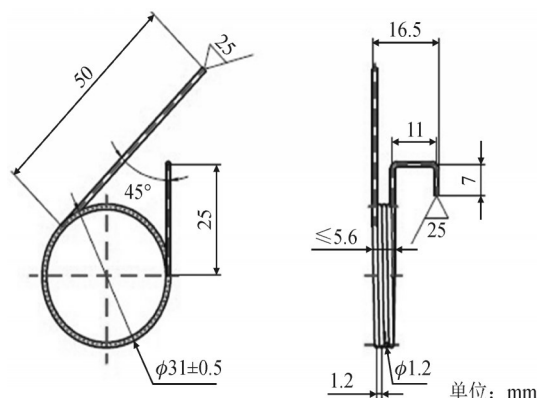


图5 分闸一级锁闩扭簧示意图

Fig. 5 The diagram of torsion spring of opening first lock latch

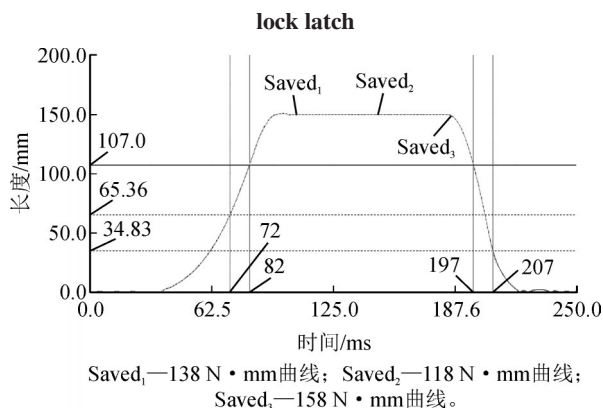


图6 断路器分合闸特性曲线

Fig. 6 Switching characteristic curve of circuit breaker

扭矩可以相对放宽设计精度要求,不影响断路器和机构的基本性能。

2)对分闸一级扭簧刚度进行优化分析,在分闸一级扭簧初始扭矩为138 N·mm的条件下,分别取刚度为0.8、1、1.2 N·mm/(°)进行仿真计算,得到仿真特性曲线见图7。

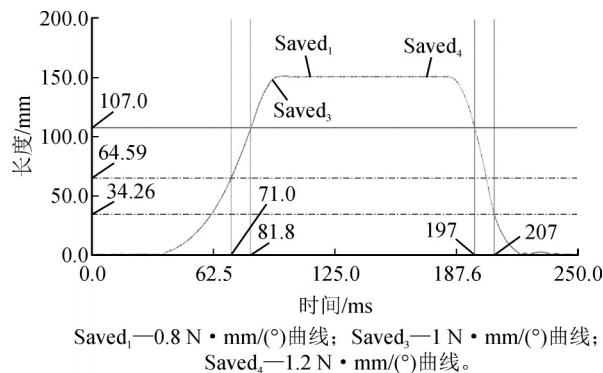


图7 断路器分合闸特性曲线

Fig. 7 Switching characteristic curve of circuit breaker

从图7中可以得出结论:断路器弹簧操动机构分闸一级扭簧刚度变化,分合闸仿真特性曲线基本重合一致,对断路器分合闸性能没有影响,分闸时间基本不变,因此,设计分闸一级扭簧刚度可以相对放宽设计精度要求,不影响断路器和机构的基本

性能。

综上所述,利用优化分闸锁闭复位弹簧参数的方法,不能对断路器分闸特性参数产生影响,但可以合理降低锁闭复位弹簧加工精度等级,降低生产成本。

3.2 锁闭脱扣线长度优化分析

以分闸一级锁闭脱扣线长度优化分析为例,在原机构零部件基础上,对分闸一级锁闭的脱扣线长度 X 进行调整,每次调整量 Y 为 1.5 mm,具体方案见图 8。

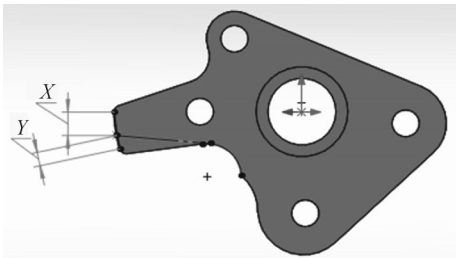


图 8 分闸一级锁闭示意图

Fig. 8 The diagram of opening first lock latch

对分闸一级锁闭不同脱扣线长度进行断路器分闸特性仿真分析,得到分闸特性曲线见图 9。

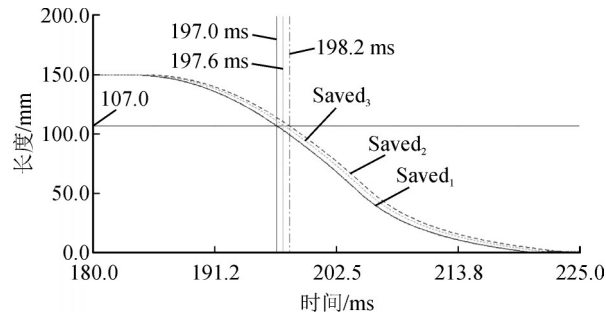


图 9 断路器分闸特性曲线图

Fig. 9 Opening characteristic curve of circuit breaker

从图 9 断路器分闸特性曲线中测量断路器运动到刚分点位置的时间和断路器运动到刚分点后 10 ms 至刚合点位置的平均速度^[16-17],得到结果见表 1。

表 1 分闸一级锁闭不同脱扣线长度仿真结果

Table 1 Simulation results of different trip length of opening first level latch

脱扣线长度/mm	刚分点时间/ms	变化时间/ms	分闸速度/(m·s ⁻¹)
X	197.0	—	7.2
$X+1.5$	197.6	0.6	7.2
$X+1.5$	198.2	0.6	7.2

从表 1 中可以看出:通过优化断路器弹簧操动机构分闸一级锁闭脱扣线长度 3 mm,可以有效的改变断路器分闸时间 1.2 ms,对调整分闸时间起到一

定作用,但是时间调整量有限。

另外,断路器弹簧操动机构分合闸脱扣线长度的设计原则是在保证脱扣系统稳定的工况下,尽量减小脱扣线的长度。分闸锁闭的脱扣线长度过长,将导致锁扣打开运动的角度变大,锁闭运动速度受锁闭脱扣面的尺寸及粗糙度影响波动较大,致使断路器分闸时间的稳定性变差,分闸锁闭的脱扣线长度过短,在弹簧操动机构制造、装配误差的影响下,会导致合闸保持不住,出现合分现象,对分闸动作的稳定相产生影响。因此,通过此种方法对时间的调节不经济,甚至会影响断路器弹簧操动机构的稳定性。

3.3 锁闭转动惯量优化分析

以分闸一级锁闭转动惯量优化分析为例,进行锁闭转动惯量对断路器分闸时间的影响分析。

刚体的转动惯量:刚体转动时惯性的度量,刚体对任意轴 z 的转动惯量定义为^[20]

$$J_z = \sum_{i=1}^n m_i r_i^2 \tag{1}$$

平行轴定理:刚体对于任一轴的转动惯量,等于刚体对于通过质心、并与该轴平行的轴的转动惯量,加上刚体的质量与两轴间距离平方的乘积^[20]即

$$J_z = J_{zc} + md^2 \tag{2}$$

利用刚体转动惯量计算公式和刚体转动惯量平行轴定理,在原有分闸一级锁闭的基础上,增加转动惯量调整板,并在转动惯量调整板上开设惯量调整孔,通过适配不同配重的螺栓装配,设计整个分闸一级锁闭的转动惯量,分析锁闭转动惯量对分闸时间的影响程度,具体方案见图 10。

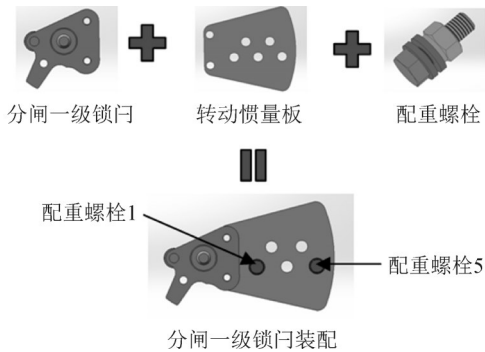


图 10 分闸一级锁闭转动惯量调整示意图

Fig. 10 The diagram of moment of inertia adjustment of opening first level latch

由于本设计的弹簧操动机构配 252 kV 智慧型 GIS 断路器的分闸时间为 22.7 ms,而技术条件要求分闸时间为 (27 ± 3) ms,如果要满足分闸时间中间值

27 ms,则需要提高分闸时间4.2 ms,采用如图10所示的调整方案,对分闸一级锁闭不同转动惯量进行断路器分闸特性仿真分析,得到分闸特性曲线见图11。

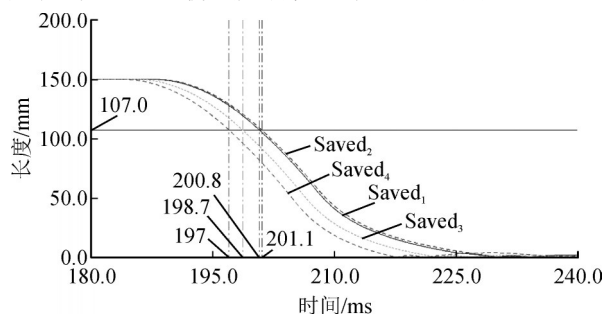


图11 断路器分闸特性曲线图

Fig. 11 Opening characteristic curve of circuit breaker

从图11特性曲线中测量分闸刚分点时间,得到的结果见表2。

表2 分闸一级锁闭不同转动惯量仿真结果

Table 2 Simulation results of different Moment of inertia of opening first level latch

脱扣线 长度	刚分点 时间/ms	变化 时间/ms	分闸 速度/(m·s ⁻¹)
原锁闭	197.0	—	7.2
增加配重板	198.7	1.7	7.2
增加配重螺栓5	200.8	3.8	7.2
增加配重螺栓1	201.1	4.1	7.2

从表2中可以看出:通过优化断路器弹簧操动机构分闸一级锁闭转动惯量后,4条曲线近似平行线,说明对分闸速度没有影响,对分闸锁闭打开时间有影响,增加转动惯量板后,分闸时间可以调整1.7 ms,再增加配重螺栓5后,分闸时间可以继续调整2.1 ms,继续增加配重螺栓1后,分闸时间可继续调整0.3 ms,以上方案共计可调整分闸时间4.1 ms,断路器分闸时间可调整至22.7+4.1=26.8 ms,满足断路器技术条件(27±3) ms的要求,该调整断路器分闸时间方案可行。

4 试验验证

采用文中介绍的方法对其弹簧操动机构进行优化仿真结果验证,在同一台高压断路器弹簧操动机构样机上,分别安装原分闸一级锁闭和原分闸一级锁闭+惯性板+配重螺栓1+配重螺栓2方案的分闸一级锁闭惯量调整装置,采用智能化集总式数据处理装置对断路器的分闸行程曲线和分合闸电磁铁电流曲线进行机械特性对比测试^[21],见图12、13。

通过断路器状态全感知集成控制柜中的行程传感器和电磁铁电流传感器监测到的特性数据,绘制出断路器分闸行程曲线和分闸电磁铁电流曲线

见图14。



图12 行程传感器安装示意图

Fig. 12 Installation diagram of travel sensor

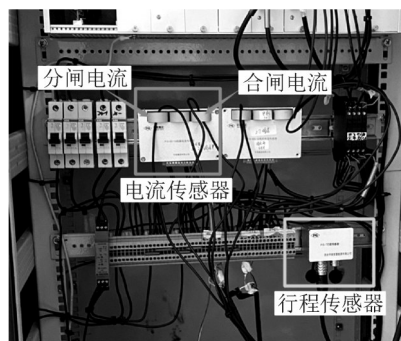


图13 传感器集成控制柜安装图

Fig. 13 Installation diagram of sensor integrated control cabinet

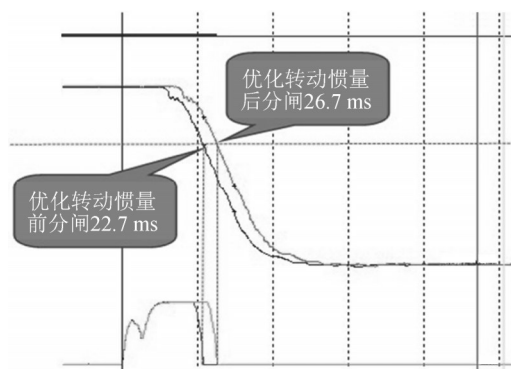


图14 断路器分闸特性曲线图

Fig. 14 Opening characteristic curve of circuit breaker

从特性曲线中可以看出:

- 1)对电磁铁受力影响。通过试验结果可知,分闸电磁铁电流曲线启动时间、锁扣打开时间、电磁铁运动过程电流等参数基本吻合,表明增加分闸一级锁闭转动惯量前后,电磁铁电流和受力情况未发生变化,不影响各级锁扣系统力学传递关系和大小。
- 2)对分闸速度影响。通过仿真和试验结果可知,在分闸弹簧能量相同的情况下,增加分闸一级锁闭转动惯量前后,分闸特性曲线近似平行线,断路器分闸特性曲线斜率基本保持一致,分闸速度保持不变。
- 3)对分闸时间影响。通过试验结果可知,增加分闸一级锁闭转动惯量前后,分闸时间由22.7 ms调

整至 26.7 ms, 断路器分闸时间调整了 4 ms, 满足断路器分闸时间(27±3) ms 的技术条件要求。

此试验结果与表 2 中仿真得到的分闸时间调整 4.1 ms 相比, 结果基本吻合, 具有一定的研究价值。

5 结语

文中对断路器开断时间进行了分析, 找到断路器控制电压和分闸速度不变的情况下, 调整断路器分闸时间的方法, 并通过断路器分闸锁扣系统动作时间影响因素的仿真计算和试验验证, 得到调整分闸锁扣系统锁栓转动惯量的方法, 可以实现断路器分闸时间调整, 提高了断路器产品的可靠性和参数适配性, 对断路器分闸时间参数的设计和优化提供参考依据, 具有一定的指导意义。

参考文献:

- [1] 黎 斌. SF₆高压电器设计[M]. 北京:机械工业出版社, 2003.
LI Bin. SF₆ high voltage apparatus design[M]. Beijing: China Machine Press, 2003.
- [2] 楼家法. 高压开关机构设计[M]. 北京:机械工业出版社, 1981.
LOU Jiafa. High-voltage switchgear mechanism design[M]. Beijing: China Machine Press, 1981.
- [3] 王 振. 高压电器中的开关设计分析[J]. 价值工程, 2012, 31(20): 80-81.
WANG Zhen. Switch design of high voltage electric appliance[J]. Value Engineering, 2012, 31(20): 80-81.
- [4] 陈振生. 断路器选相合分闸技术[J]. 华通技术, 2003(1): 10-15.
CHEN Zhensheng. Close - open technique by phase - controlled in circuit breaker[J]. Huatong Technique, 2003(1): 10-15.
- [5] 姚灿江, 徐 刚, 孙龙勇, 等. 选相合闸断路器机械稳定性研究与设计[J]. 高压电器, 2022, 58(11): 167-175.
YAO Canjiang, XU Gang, SUN Longyong, et al. Research and design on mechanical stability of phase selective closing circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(11): 167-175.
- [6] 罗干平. 126 kV SF₆断路器分闸时间特性统计分析[J]. 高电压技术, 2001, 27(1): 67-68.
LUO Ganping. Statistical analysis of opening time of 126 kV SF₆ circuit breaker[J]. High Voltage Engineering, 2001, 27(1): 67-68.
- [7] 高群伟, 金光耀, 谷 君, 等. 高压断路器分闸时间控制方法研究[J]. 高压电器, 2018, 54(9): 58-66.
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): 58-66.
- [8] 郭贤珊, 李仲夫, 方定江. 断路器合分时间及其与继电保护配合的探讨[J]. 华中电力, 2004, 17(2): 14-17.
GUO Xianshan, LI Zhongfu, FANG Dingjiang. Discussion on time sharing of circuit breaker and its coordination with relay protection[J]. Central China Electric Power, 2004, 17(2): 14-17.
- [9] 李少龙, 张国琪. 高压系统继电保护的时间配合[J]. 大众用电, 2003(2): 26-27.
LI Shaolong, ZHANG Guoqi. Time coordination of re-lay protection in high voltage system[J]. Popular Utilization of Electricity, 2003(2): 26-27.
- [10] 杨 政, 钟宏乐, 陈 光, 等. 一起断路器分闸时间不稳定故障的分析与处理[J]. 电工电气, 2022(5): 41-44.
YANG Zheng, ZHONG Hongle, CHEN Guang, et al. An analysis and treatment of a circuit breaker's unstable opening time fault[J]. Electrotechnics Electric, 2022(5): 41-44.
- [11] 余 聪. 一起组合电器 SF₆断路器分闸机械特性不合格分析处理[J]. 青海电力, 2022, 41(3): 64-66.
YU Cong. Analysis on unqualified mechanical characteristics of the circuit breaker brake in a SF₆ composite apparatus[J]. Qinghai Electric Power, 2022, 41(3): 64-66.
- [12] 陈 飞, 饶 磊, 饶洪林, 等. 高压断路器合分闸时间超标故障的处理[J]. 电世界, 2013, 54(11): 26.
CHEN Fei, RAO Lei, RAO Honglin, et al. Treatment of failure of high voltage circuit breaker exceeding the closing and opening time[J]. Electrical World, 2013, 54(11): 26.
- [13] 张四江, 曹小龙, 张敏强, 等. SF₆断路器分合闸时间及三相不同期超标的处理[J]. 电力设备, 2007, 8(2): 76-78.
ZHANG Sijiang, CAO Xiaolong, ZHANG Mingqiang, et al. Handling of switching off and switching in time and three-phase un - synchronization for SF₆ circuit breaker[J]. Electrical Equipment, 2007, 8(2): 76-78.
- [14] 崔景春, 袁大陆, 杜彦明. SF₆断路器操动机构的运行可靠性和选型探讨[J]. 高压电器, 2001, 37(2): 1-4.
CUI Jingchun, YUAN Dalu, DU Yanming. Investigation on operational reliability and type selection of actuator for SF₆ circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2001, 37(2): 1-4.
- [15] 魏 泉, 成 勇, 武 星, 等. 浅析高压 SF₆断路器可靠性研究的特点和难点[J]. 高压电器, 2013, 49(11): 82-87.
WEI Quan, CHENG Yong, WU Xing, et al. Discussion of characteristics and difficulties on reliability research of high-voltage SF₆ circuit - breaker[J]. High Voltage Apparatus,

(下转第 220 页)

- 2013,41(21):58-64.
- [14] 赵西贝,许建中,卢铁兵,等. 采用架空线的MMC-HVDC单极接地过电压分析[J]. 电力系统自动化,2018,42(7):44-49.
- ZHAO Xibei, XU Jianzhong, LU Tiebing, et al. Overvoltage analysis on overhead line based MMC-HVDC system under single - pole - to - ground[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(7):44-49.
- [15] BADRKHANI AJAEI F, IRAVANI R. Cable surge arrester operation due to transient overvoltages under DC - side faults in the MMC - HVDC link[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(3):1213-1222.
- [16] GOERTZ M, WENIG S, BECKLER S, et al. Overvoltage characteristics in symmetrical monopolar HB MMC-HVDC configuration comprising long cable systems[J]. Electric Power Systems Research, 2020(189):106603.
- [17] 李英彪,卜广全,王姗姗,等. 张北柔直电网工程直流线路短路过程中直流过电压分析[J]. 中国电机工程学报, 2017,37(12):3391-3399.
- LI Yingbiao, BU Guangquan, WANG Shanshan, et al. Analysis of DC overvoltage caused by DC short-circuit fault in Zhangbei VSC - based DC grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(12):3391-3399.
- [18] 韩雪,杨鸣,司马文霞,等. 500 kV柔性直流电网直流断路器操作过电压研究[J]. 高电压技术, 2019, 45(1): 72-81.
- HAN Xue, YANG Ming, SIMA Wenxia, et al. Study of switching overvoltage of DC circuit breaker in 500 kV VSC-based DC grid[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(1): 72-81.
- [19] 张明瀚,简翔浩,陆子凯. 珠海“互联网+”柔性直流配电网换流站设计方案[J]. 南方能源建设, 2020, 7(1):95-100.
- ZHANG Minghan, JIAN Xianghao, LU Zikai. Zhuhai “internet + ” flexible DC distribution network converter station design scheme[J]. Southern Energy Construction, 2020, 7(1):95-100.
- [20] QU L, YU Z, SONG Q, et al. Planning and analysis of the demonstration project of the MVDC distribution network in Zhuhai[J]. Frontiers in Energy, 2019, 13(1):120-130.
- [21] 张营奎. 基于人工过零的高压直流真空断路器关键技术研究[D]. 西安:西安交通大学, 2016.
- ZHANG Yingkui. Investigation on the key technologies of the HVDC vacuum circuit breaker based on artificial current zero[D]. Xi'an:Xi'an Jiaotong University, 2016.
- [22] 薛英林,徐政,张哲任,等. MMC-HVDC换流器阻抗频率特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(24):4040-4048.
- XUE Yinglin, XU Zheng, ZHANG Zheren, et al. Analysis on converter impedance - frequency characteristics of the MMC-HVDC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(24):4040-4048.

赵紫辉(1985—),男,硕士,工程师,主要从事配电网规划、过电压防护与绝缘配合方面的研究工作(E-mail: 66582486@qq.com)。

史宗谦(1975—),男,博士,教授,博导,主要从事真空放电等离子体理论及其应用、直流开断技术方面的研究工作(通信作者)(E-mail: zqshi@mail.xjtu.edu.cn)。

(上接第211页)

- 2013,49(11):82-87.
- [16] 高压交流断路器:GB 1984—2014[S].2014.
- High - voltage alternating - current circuit - breakers: GB 1984—2014[S].2014.
- [17] 高压交流断路器订货技术条件:DL/T 402—2016[S].2016.
- Specification of high voltage alternating - current circuit - breakers: DL/T 402—2016[S].2016.
- [18] 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.
- [19] 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 & Manufacture, 2006(4):66-67.
- [20] 王铎,程靳. 理论力学[M]. 北京:高等教育出版社, 2007.
- WANG Duo, CHENG Jin. Theoretical mechanics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2007.
- [21] 贾一凡,殷晓刚,姚晓飞,等. 智能化高压开关机械试验测试用位移传感器的分析与研究[J]. 高压电器, 2013, 49(10):58-63.
- JIA Yifan, YIN Xiaogang, YAO Xiaofei, et al. Analysis and study on displacement transducer for testing in mechanical test of intelligent high-voltage switch[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(10):58-63.
- 宋广民(1986—),男,高级工程师,硕士研究生,从事高压开关及操动机构设计与研发工作(E-mail: 15893418778@163.com)。