

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.04.004

基于虚拟样机技术的真空断路器合闸动态特性计算及影响因素分析

董华军¹, 李东恒¹, 时佳^{1,2}, 库照宇¹, 赵一鉴¹

(1. 大连交通大学机械工程学院, 辽宁大连 116028; 2. 辽宁机电职业技术学院自动控制工程系, 辽宁丹东 118009)

摘要: 研究如何改善永磁操动机构动态特性以减小触头合闸弹跳现象对提高真空断路器的工作性能具有重要意义。文中采用 Ansoft Maxwell 建立 12 kV 真空断路器单稳态永磁操动机构电磁场仿真模型, 通过参数化建模仿真技术对机构永磁体及动铁心的尺寸参数进行优化设计, 计算了永磁机构合闸过程动态特性; 利用 ADAMS 建立真空断路器动力学仿真模型, 将永磁机构动态计算结果导入 ADAMS 中作为合闸速度驱动控制, 对断路器合闸过程计算得到触头的运动特性; 分析了机构合闸线圈参数、触头弹簧预压力和分闸弹簧预压力对真空断路器触头合闸动态特性的影响。计算结果表明: 合闸线圈线径与断路器触头合闸速度、触头弹跳时间均呈现正向增长关系, 与机构合闸响应时间呈现负向关系; 分闸弹簧预压力与机构合闸响应时间呈现正向关系; 触头弹簧预压力对触头弹跳时间有着显著负向影响关系, 但对触头合闸速度及响应时间影响较小, 可忽略不计。

关键词: 虚拟样机; 永磁操动机构; 真空灭弧室; 合闸弹跳

Calculation of Closing Dynamic Characteristics and Analysis of Influencing Factors for Vacuum Circuit Breakers Based on Virtual Prototype Technology

DONG Huajun¹, LI Dongheng¹, SHI Jia^{1,2}, KU Zhaoyu¹, ZHAO Yijian¹

(1. School of Mechanical Engineering, Dalian Jiaotong University, Liaoning Dalian 116028, China; 2. Automatic Control Engineering, Liaoning Mechanical & Electrical College of Technology, Liaoning Dandong 118009, China)

Abstract: Research on how to improve the dynamic characteristics of permanent magnet operating mechanism to reduce the contact closing bounce phenomenon is of great significance for enhancing the operating performance of vacuum circuit breakers. Ansoft Maxwell is used in this paper to set up the electromagnetic field simulation model of the permanent magnet operating mechanism for 12 kV vacuum circuit breaker. The size parameters of the permanent magnet and the plunger of the mechanism are optimized by parametric modeling and simulation technology, and the dynamic characteristics of the permanent magnet mechanism during the closing process is calculated. ADAMS is used to set up the dynamic simulation model of vacuum circuit breaker, and the dynamic calculation results of the permanent magnet mechanism are imported into ADAMS as the closing speed drive control to obtain the motion characteristic of the contact by calculating the closing process of the circuit breaker. The influence of the closing coil parameters, the pre-pressure of contact spring and the pre-pressure of opening spring on the contact dynamic characteristics of vacuum circuit breaker is analyzed. The calculation results show that the diameter of coil has a positive increase relationship with the closing speed and the bounce time of contact, a negative relationship with the closing response time of the mechanism, and the pre-pressure of the opening spring has a positive relationship with the closing response time of the mechanism. The pre-pressure of contact spring has a significant negative impact on contact bounce time, but has little influence on contact closing speed and response time which can be neglected.

Key words: virtual prototype; permanent magnetic actuator; vacuum interrupter; closing bouncing

收稿日期:2025-09-07; 修回日期:2025-12-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51477023);辽宁省自然科学基金计划项目(2019-MS-036)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(51477023), Natural Science Foundation of Liaoning Province (2019-MS-036).

0 引言

真空断路器作为一种新兴控制和保护设备,因其优异的开断能力广泛用于中压电力系统中^[1-7]。真空断路器可分为真空灭弧室和操动机构两部分,其中永磁操动机构与其他操动机构相比具有结构简单,出力特性与真空灭弧室的反力特性配合性好等优点^[8-10],因而成为近年来断路器操动机构领域研究的热点。在断路器合闸过程中,永磁操动机构通过绝缘拉杆驱动真空灭弧室导杆及触头部分运动,动静触头接触时,动触头会在碰撞反力及触头弹簧力的作用下多次弹跳,导致触头间产生高温电弧,加剧触头熔焊现象,从而影响到真空灭弧室工作性能^[11-13]。因此研究如何改善永磁操动机构动态特性以减小触头合闸弹跳现象对提高真空断路器的工作性能具有重要意义。

在相关文献中学者大多基于达朗贝尔方程和麦克斯韦方程,利用 Ansoft Maxwell 对永磁操动机构动态特性进行计算^[14-15],这种方法能正确计算动铁心运动特性,但动触头动态特性及合闸弹跳参数则由于软件限制无法得到^[16]。基于刚体动力学理论的 ADAMS 软件可以计算操动机构运动特性,也能模拟触头合闸弹跳情况,但该方法难以进行复杂电磁驱动力的求解,而是多用于弹簧操动机构等机械结构的动态特性计算方面。对此孙丽琼等人^[17-19]利用 ADAMS 户子程序的方式,将电磁力计算结果以静态数值网格的形式嵌入到动力学方程中,对分离磁路式永磁操动机构动态特性进行了计算。杨文英等人^[20-22]在 Simulink 环境中通过 FLUX 电磁场模块与 ADAMS 动力学模块之间的实时数据传递与交换,计算了考虑弹跳的交流接触器合闸过程动态特性。以上学者提出的电磁机械系统耦合计算方法可很好的计算永磁系统的机械碰撞问题,但理论性较强,难以被大多技术人员所掌握。因此对现有永磁操动机构电磁运动及触头碰撞联合求解方法进行简化具有重要意义。实质上永磁操动机构合闸运动可分为两阶段:①刚合前阶段无机械碰撞问题,动铁心的运动可简化为线圈电磁力、永磁体吸力及机构弹簧反力等作用下的运动合成;②刚合时刻则涉及到触头碰撞弹跳问题,此时触头结构中存在着应力波的反射与折射,同时触头结构整体将在碰撞反力的作用下回弹。针对动铁心运动过程,可将其刚合前电磁力、位移、电流等复杂的迭代过程简单化,建立电磁运动模型自行计算出铁心运动特性。而正常情况下动触头与动铁心在刚合前阶段的运

动过程近乎同步,因此可将此阶段动铁心的运动速度视为触头速度。针对触头碰撞运动过程,在临界碰撞速度已知的条件下采用刚体动力学方法即可计算出触头反向回弹的时间、高度、回弹周期等参数。上述方法无需在 ADAMS 中考虑合闸线圈电流、永磁体磁力等影响因素,只需结合 Ansoft 软件对操动机构电磁运动特性进行求解,并将其施加到机构动力学模型上便可研究触头碰撞弹跳现象。

基于此,文中首先对永磁操动机构进行电磁场仿真,并利用 ADAMS 建立真空断路器动力学仿真模型,通过将永磁机构电磁动态计算结果导入到动力学仿真环境的方式对断路器合闸过程触头弹跳现象进行了仿真分析。在此基础上探究合闸弹簧及触头弹簧预压力、合闸线圈参数等因素对触头合闸弹跳现象的影响,从而在理论层面为真空开关动态特性优化工作提供支持。

1 永磁操动机构电磁场仿真

1.1 永磁机构工作原理

12 kV 真空断路器结构见图 1,永磁体安装在静铁心中,静铁心下端与非导磁垫块相连,永磁体产生的磁力将只通过动铁心的上端面,对动铁心的合闸过程起到推动的作用,对分闸过程起到阻碍的作用。

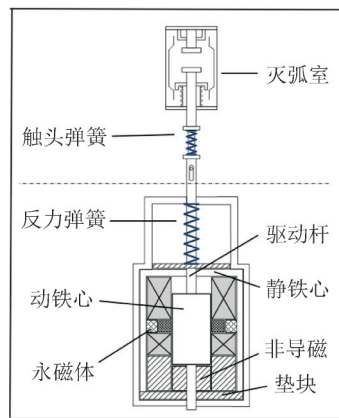


图1 真空断路器结构图

Fig. 1 The diagram of vacuum circuit breaker

合闸时,励磁电容对合闸线圈进行供电,动铁心在合闸线圈及永磁体产生的磁力作用下向上运动,并压缩分闸弹簧为其储能。动静触头接触时,动触头停止运动,动铁心在磁力作用下压缩触头弹簧继续向上运动;动静铁心接触时,永磁体产生的磁力会将动铁心吸附在合闸位置。

分闸时,励磁电容对分闸线圈进行供电,分闸线圈对动铁心产生的电磁力会对永磁体产生的吸力起到抵消的效果。当动铁心受到的总磁力小于

触头弹簧、分闸弹簧等机构反力之和时,动铁心在反力的作用下向下运动。在分闸结束时,由于触头弹簧预压力一般较大,动铁心与非导磁垫块之间会产生较强的碰撞,动触头亦会产生较明显的弹跳,对断路器的工作性能有着不利的影响。因此可在分闸末期阶段在合闸线圈中通入电流,使动铁心受到向上的缓冲力,在不影响动触头刚分速度的前提下降低动铁心对垫块的冲击。

1.2 静态仿真

在Ansoft Maxwell中可建立永磁操动机构2D电磁场仿真模型对其静态特性进行计算。永磁体产生的静态吸力主要与永磁体及动铁心的尺寸有关,通过参数化设计技术可对永磁体及动铁心尺寸进行优化设计^[23]。永磁体在合闸位置产生的保持力与动铁心的径向厚度及轴向高度之间的关系见图2。

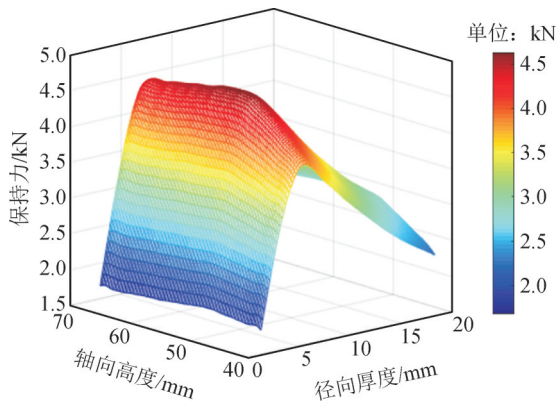


图2 永磁体保持力与动铁心厚度及高度的关系

Fig. 2 The relationship between permanent magnet retention force and core thickness and height

由图2可知随着动铁心径向厚度的增大,永磁体保持力起初也会随之增大,但是当越过拐点时,永磁体保持力会随着动铁心径向厚度的增大而减小,即永磁保持力存在最大值。永磁体保持力刚开始随着动铁心轴向高度的增加而增加,但到达一定程度后,保持力也开始略微减小。故取动铁心径向截面宽度为10 mm,轴向高度为54 mm较为合适。

永磁体在合闸位置产生的保持力与永磁体尺寸的关系见图3、4。

由图3可看出,永磁体保持力随其轴向高度基本呈现线性增长关系。图4中永磁体保持力基本也随着径向厚度的增长而增长,但增长速率会随着径向厚度的增长而减小,尤其当厚度大于5 mm时,减小幅度更为显著。因此选择永磁体径向厚度为4 mm,轴向高度为22 mm较为合适。

对优化后的永磁结构进行静态仿真,得到机构在合闸位,分闸位的磁力线分布见图5。

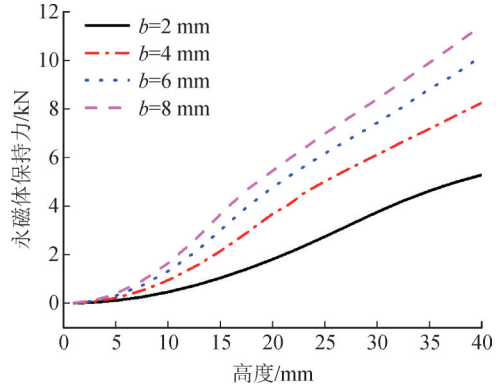


图3 永磁体保持力与永磁体高度的关系

Fig. 3 The relationship between permanent magnet retention force and permanent magnet height

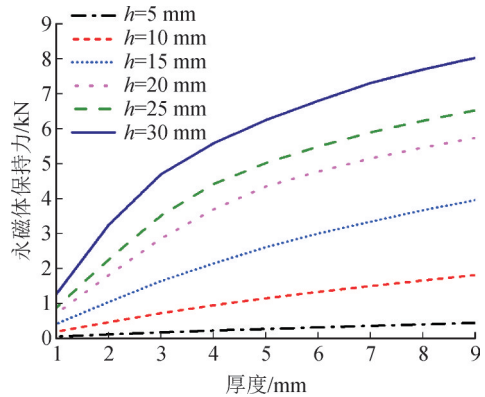


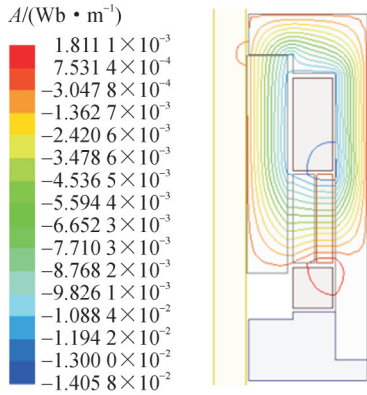
图4 永磁体保持力与永磁体厚度的关系

Fig. 4 The relationship between permanent magnet retention force and permanent magnet thickness

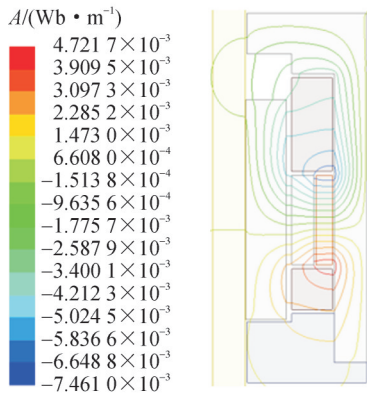
图5中永磁机构在合闸位置处,磁力线集中出现在动静铁心之间的工作气隙处,构成一个环形的导磁回路;动铁心与非导磁垫块之间的非工作气隙处磁力线分布较为稀疏,此时永磁体产生的大部分磁力通过动铁心上端面,将动静铁心吸合在一起。在分闸位置处,磁力线集中出现在合闸线圈与永磁体处;此时动静铁心间工作气隙处磁力线分布较为稀疏,但是由于动铁心下端处非导磁垫块的存在,永磁体产生的磁力较少通过动铁心的下端面,永磁体对动铁心作用的磁力方向为合闸运动方向。

不同气隙下动铁心受到的永磁体吸力及机构负载反力见图6。

由图6可知,在动铁心距离永磁体位置较远时受到的吸力较小,数值上要小于机构反力,使得动铁心稳定在分闸位置,需要合闸线圈通电提供额外电磁力,动铁心才能克服机构反力向合闸方向运动;随着二者逐渐接近,动铁心受到的吸力迅速增大,在最后1 mm距离内,保持力从1 500 N增长到4 200 N左右。此时合闸位置机构反力约为2 900 N,小于永磁体提供的吸力4 200 N,故机构仅靠永磁体提供的保持力即可稳定在合闸位置。



(a) 合闸位置



(b) 分闸位置

图5 永磁机构合、分闸位置磁力线分布云图

Fig. 5 The distribution of magnetic force line for permanent magnet mechanism

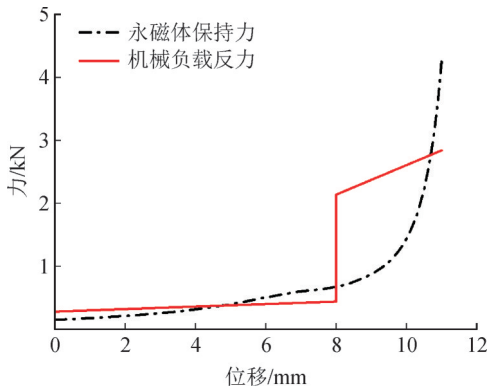


图6 永磁体保持力及机构反力随行程变化

Fig. 6 The variation of permanent magnet holding force and mechanism reaction force with position

1.3 操动机构动态特性分析

在静态特性仿真的基础上考虑到机构的负载反力及阻尼等特性,设置运动部件的运动域,并采用 Maxwell External Circuit 功能导入外电路为线圈添加激励后即可进行操动机构动态特性分析。其中合闸线圈激励外电路见图7。

图7左侧为合闸线圈主电路,采用电容放电,二极管续流的形式,电路通断受到压控开关 S_1 、 S_2 控

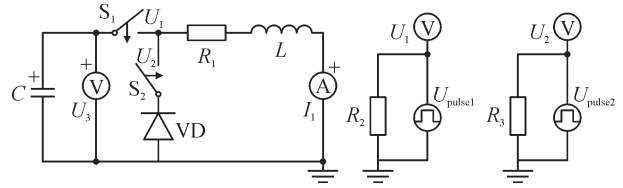


图7 驱动外电路设置

Fig. 7 The diagram of driving external circuit

制。右侧为脉冲信号控制电路,脉冲信号的开始时间和持续时间可自行设置,主要依靠脉冲电压 U_1 、 U_2 控制开关 S_1 、 S_2 的断开与闭合。

真空断路器动态仿真参数设置见表1。

表1 真空断路器仿真参数

Table 1 Simulation parameters of vacuum circuit breaker

项目	参数值	项目	参数值
触头开距/mm	8	电容初始电压/V	220
触头超程/mm	3	电容容量/F	0.022
触头反力/N	160	合闸线圈匝数	275
触头初压力/N	1 750~1 850	线圈电阻/ Ω	1.86
额定触头压力/N	2 400~2 500	运动部件质量/kg	3.5
触头自闭力/N	120		

合闸过程线圈中电流变化及动铁心运动速度计算结果见图8,由图8可知机构合闸响应时间约为20 ms,20 ms后动铁心速度随时间快速增长;当动静触头接触时,触头弹簧开始作用,机构反力瞬间变大,动铁心速度开始减小;随着动静铁心之间的距离减小,动铁心受到的永磁体吸力迅速增强,动铁心合闸速度又会出现增大的趋势;当动铁心到合闸位置后,与静铁心碰撞接触,速度会瞬间减小到0 m/s。

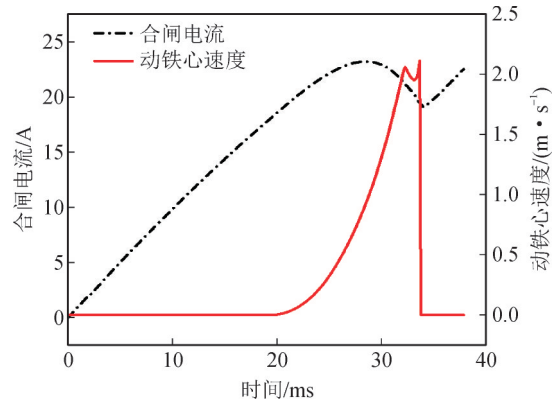


图8 合闸过程线圈电流及动铁心速度变化

Fig. 8 The changes of coil current and core speed during closing process

合闸线圈中电流随时间先增大后减小,电流峰值约为23.2 A;在动静铁心接触时,电流降到最低点,此后线圈电流在此基础上逐渐增大,直到合闸结束,开关 S_1 切断, S_2 闭合,线圈电流经过续流二极管放电。

2 真空断路器动力学仿真

2.1 真空断路器动力学模型的建立

利用刚体动力学仿真软件 ADAMS 可建立真空断路器动力学仿真模型, 见图 9。

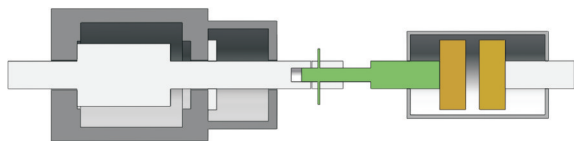


图 9 真空断路器模型

Fig. 9 The model of vacuum circuit breaker

真空断路器模型可分为操动机构和真空灭弧室两部分, 二者通过连接销及触头弹簧系统相连。首先根据真空断路器的工作方式为各部件添加运动副, 定义各部件接触碰撞关系, 并设置合闸弹簧, 触头弹簧参数。然后在 ADAMS 中将永磁机构动态仿真输出的动铁心速度参数以 AKISPL 插值函数的方式导入到 ADAMS 中, 为动力学模型中的动铁心部件添加速度控制驱动, 以实现两种仿真模型中操动机构部分运动特性相匹配。

2.2 仿真结果

为验证文中动力学仿真方法计算结果的正确性, 分别使用永磁机构常规的动态仿真方法以及动态数据与 ADAMS 连接的动力学计算方法对操动机构动铁心的动态特性进行计算。计算结果见图 10。

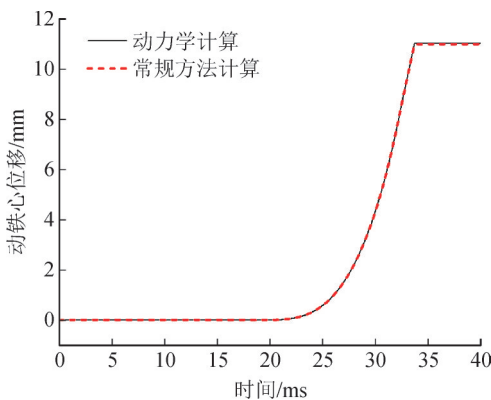


图 10 利用两种方法计算动铁心位移结果

Fig. 10 The calculation results of core displacement

由于动力学仿真中动铁心所添加驱动的速度数据为永磁机构常用的电磁场动态仿真计算所得, 故两种方法计算动铁心的位移变化几乎完全相同。因此采用 AKISPL 插值函数的方式能够在 ADAMS 中正确的拟合动铁心动态特性计算结果。但采用动力学计算方法可以处理常规的永磁机构动态计算方法无法求解的灭弧室侧动触头碰撞弹跳问题, 因此更具优势。动力学方法计算的灭弧室动触头运动特性见图 11。

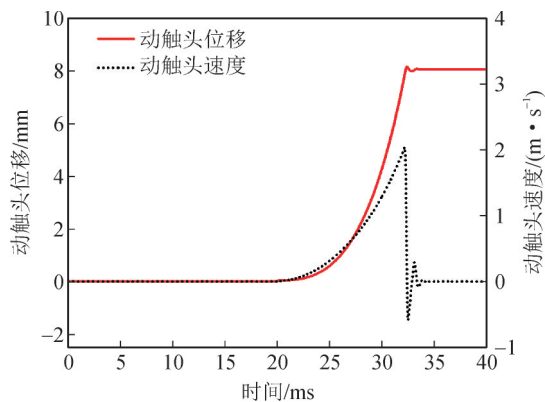


图 11 动触头位移与速度计算结果

Fig. 11 The calculation results of displacement and velocity of moving contact

动触头合闸响应时间为 20 ms, 合闸总时长约为 12.5 ms, 动静触头刚合速度约为 2.1 m/s, 平均合闸速度(触头闭合前 0~6 mm)为 1.327 m/s, 而断路器对此要求范围为 0.6~0.8 m/s。

3 断路器动态特性影响因素分析

对于模型结构已经确定的断路器机构, 影响其合闸动态特性的主要因素有线圈参数, 触头簧及分闸弹簧参数。线圈安置空间是固定的, 当线圈匝数较高时, 线径必然变细, 线圈电阻将增大, 此时若合闸电流较高将导致线圈严重发热, 甚至烧毁。故线圈匝数、线径及电阻设置时需要考虑到其内部联系。当线圈高度及宽度均固定时, 线圈线径 d 与匝数 N 有关系为^[24]

$$N = \frac{k_w \left(\frac{D_2 - D_1}{2} \right) H}{\frac{\pi}{4} d^2} \quad (1)$$

线圈电阻 R 的经验计算公式为

$$R = \rho \frac{N \pi D}{\frac{\pi}{4} d^2} \quad (2)$$

式(1)、(2)中: k_w 为填充系数, 一般取值为 0.6; H 为线圈高度; D_1 、 D_2 为线圈内外径; ρ 为导线电阻率; d 为导线直径; D 为线圈平均直径。

改变合闸线圈导线线径时, 线圈参数见表 2, 断路器动态特性计算结果见图 12。

表 2 线圈线径改变对线圈参数的影响

Table 2 The influence of coil diameter on coil parameters

线径 d /mm	匝数	电阻 R /Ω
0.8	275	1.86
1.0	175	0.76
1.1	145	0.52

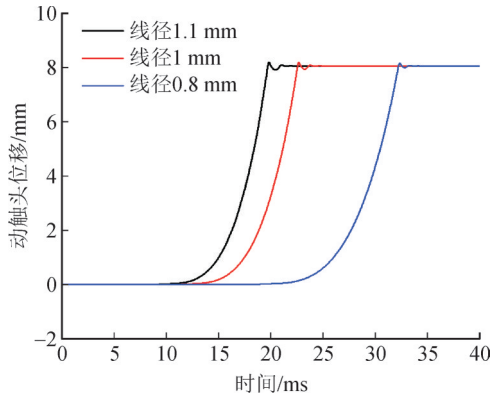


图12 线圈参数对机构合闸特性的影响

Fig. 12 The influence of coil parameters on closing characteristics of mechanism

由表2、图12可知,随着合闸线圈导线线径的增大,线圈匝数及回路电阻均会减小,机构合闸响应时间会明显变短,机构合闸动作总时长也会变短;在合闸末期动触头弹跳时间与高度均会随着线径的增大而增大。文[25]中计算了线圈匝数、电容容量等激励回路参数变化对永磁机构合闸动态特性的影响,结果表明:线圈匝数越小、线径越大,电容容量越高,则机构合闸响应时间及铁心动作时间就越短,同时铁心到达合闸位置时的碰撞速度也就越大,这与文中仿真计算结果较为一致。但相关文献后续并未进行触头动力学弹跳特性研究,文中则在考虑激励回路参数变化对机构合闸动态特性影响的基础上,引入动力学方法对不同线圈匝数、线径下的触头弹跳现象进行了分析。因此综合考虑相关文献研究成果与文中所得结论,当线径为1 mm时,基本可满足断路器性能要求。

改变分闸弹簧预压力时,得到断路器动态特性计算结果见图13。

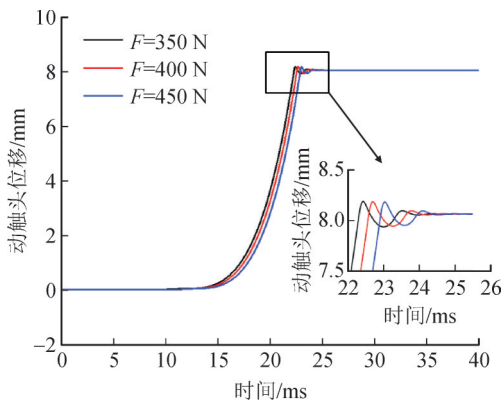


图13 分闸弹簧预压力对机构合闸特性的影响

Fig. 13 The influence of opening spring pressure on closing characteristics of mechanism

由图13可知增大分闸弹簧预压力会延长机构合闸响应时间,会略微减小动触头合闸速度、合闸

弹跳时间及高度。这是因为分闸弹簧会对永磁机构合闸过程起到一定阻碍作用,分闸弹簧力越大,操动机构合闸动作克服反力做功就越多,因此合闸速度就越低。文[26]建立了触头合闸弹跳数学理论模型分析开关合闸过程触头弹跳影响因素,结果表明触头弹跳时间及高度与其刚合速度有着较大相关性。而一般而言,合闸驱动力越大、分闸弹簧力越小,触头到达闭合位置时速度就越高。但针对文中研究的永磁机构而言,相较于合闸过程中起到驱动作用的合闸线圈电磁力及永磁体吸力,分闸弹簧力强度较低,影响较小。因此当增加分闸弹簧预压力时,合闸速度及弹跳高度仅会小幅度降低,改变分闸弹簧预压力并不是减小合闸弹跳的有效途径。

改变触头弹簧预压力时,得到断路器动态特性计算结果见图14。

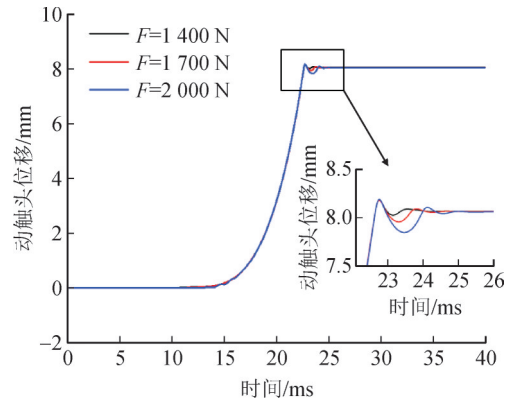


图14 触头弹簧预压力对机构合闸特性的影响

Fig. 14 The influence of contact spring pressure on closing characteristics of mechanism

由图14可知触头弹簧预压力的增大不会改变机构合闸响应时间及机构合闸速度,但对触头合闸弹跳现象影响较为显著。随着触头弹簧预压力的增大触头弹跳时间及高度均会有明显减弱的趋势。文[27-28]分别从建立真空开关动力学模型进行仿真计算及搭建机构动态特性测试平台进行实验分析等角度出发,揭示了触头弹簧力对触头合闸弹跳时间的影响规律,结果表明:触头弹簧压力越大,触头弹跳现象越小,这与文中所得结论基本一致。因此增大触头弹簧预压力是减小触头合闸弹跳最有效的方式。但是触头弹簧力也不宜过大,过大的触头弹簧力会加重操动机构在超程阶段的运动负载,当合闸线圈及永磁体提供的电磁力不足时,将可能导致合闸失败。同时触头弹簧力改变也会影响到如触头刚分速度、分闸振荡时间等机构分闸特性,因此触头弹簧力的选择需要考虑到其对机构各方面性能的影响。

4 结论

文中采用 Ansoft Maxwell 计算 12 kV 真空断路器的单稳态永磁操动机构动态特性,并通过多体动力学软件 ADAMS 建立了断路器虚拟样机模型,然后将电磁场分析得到的速度结果作为驱动控制添加到动力学虚拟样机模型上,在此基础上分析了影响真空断路器合闸弹跳的因素,得出以下结论:

1)增加超程弹簧预压力几乎不会影响操动机构合闸动态特性,但可有效控制合闸弹跳。

2)适当减小分闸弹簧的初压力可以减小机构合闸响应时间,使机构更快完成合闸动作,但对合闸弹跳现象影响不甚明显。

3)当合闸线圈线径增大时,机构合闸响应时间将缩短,机构合闸速度将变大,触头弹跳时间将变长。

除操动机构外,影响触头合闸弹跳现象的显著因素还包括触头质量、机构装配精度等,这些因素对触头弹跳的影响仍需进一步分析。同时衡量真空断路器合闸性能的指标不仅有合闸弹跳时间,还要考虑到触头预击穿时间。当合闸线圈线径过小时,线圈电阻较大,导致触头合闸速度较慢;此时触头回弹时间及高度虽均处于较低水平,但是在预击穿阶段电弧对触头表面烧蚀时间较长,同样会加剧触头熔焊现象。因此需要从多角度出发进行真空断路器动态特性优化设计工作。文中基于 Ansoft-ADAMS 的速度驱动方法可计算出合闸过程铁心运动特性及触头弹跳参数,论文研究可为永磁机构动态特性计算及优化工作提供理论参考。

参考文献:

- 王建华,耿英三,刘志远,等. 高电压等级真空开断技术[J]. 高压电器, 2017, 53(3): 1-11.
WANG Jianhua, GENG Yingsan, LIU Zhiyuan, et al. High voltage level vacuum switching technology[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(3): 1-11.
- 赵冠琨,贾科,陈金锋,等. 基于断路器重合闸的柔性直流输电线路单端故障测距方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(7): 48-56.
ZHAO Guankun, JIA Ke, CHEN Jinfeng, et al. A single terminal fault location method for a DC transmission line based on circuit breaker reclosing[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(7): 48-56.
- 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.
- 胡光福,沈忠威,李电,等. 真空断路器投切电容器组试验参数选择及判据的分析[J]. 电力电容器与无功补偿, 2019, 40(6): 7-11.
HU Guangfu, SHEN Zhongwei, LI Dian, et al. Test parameters selection and criteria analysis for capacitor bank switching by vacuum circuit breaker[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2019, 40(6): 7-11.
- 葛国伟,王文博,程显,等. 基于两间隙异步联动的一体化高压真空灭弧室电场设计[J]. 电工技术学报, 2024, 39(17): 5555-5564.
GE Guowei, WANG Wenbo, CHENG Xian, et al. Electric field design of integrated high-voltage vacuum interrupter based on two-gap asynchronous linkage[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(17): 5555-5564.
- 付威,苏伟平,王艺衡,等. 真空开关中杯状纵磁触头铁心结构对磁场分布的影响研究[J]. 电网与清洁能源, 2024, 40(12): 78-83.
FU Wei, SU Weiping, WANG Yiheng, et al. A study on the influence of the iron core structure on the magnetic field distribution in the cup-shaped axial magnetic contact of vacuum interrupters[J]. Power System and Clean Energy, 2024, 40(12): 78-83.
- 王阳光,张孝军,徐宇新,等. 基于断路器动作时序的双极性直流微电网保护方案[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(4): 81-88.
WANG Yangguang, ZHANG Xiaojun, XU Yuxin, et al. Protection scheme for a bipolar DC microgrid based on the operation sequence of DC circuit breakers[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(4): 81-88.
- 赵莉华,冀一玮,吴月峥,等. 基于电机电流的高压断路器弹簧操作机构的LM-BP故障诊断算法[J]. 电测与仪表, 2024, 61(9): 48-55.
ZHAO Lihua, JI Yiwei, WU Yuezheng, et al. LM-BP fault diagnosis algorithm for spring operating mechanism of high voltage circuit breaker based on motor current[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(9): 48-55.
- 马飞越,姚晓飞,刘志远,等. 2/3匝线圈式纵磁触头大开距真空断路器分闸速度设计[J]. 电工技术学报, 2024, 39(13): 4139-4152.
MA Feiyue, YAO Xiaofei, LIU Zhiyuan, et al. Design of opening velocities for large-gap vacuum circuit breakers with 2/3 coil-type axial magnetic field contacts[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(13): 4139-4152.
- 冯英,辛超,叶祖标,等. 高可靠性永磁机构真空断路器研究[J]. 高压电器, 2015, 51(12): 109-113.
FENG Ying, XIN Chao, YE Zubiao, et al. Vacuum breaker with permanent magnetic actuator and high reliability[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(12): 109-113.
- 李元钊,丁健刚,刘志远,等. 并联电容对真空灭弧室内部电位分布的改善作用[J]. 电工技术学报, 2025, 40(2): 610-625.
LI Yuanzhao, DING Jiangan, LIU Zhiyuan, et al. The improving effect of parallel capacitors on the internal potential distribution of vacuum interrupters[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2025, 40(2): 610-625.

- [12] 吕丹, 洪金琪, 邵志明, 等. 真空断路器操作机构性能对投切电容器组重燃的影响[J]. 电力电容器与无功补偿, 2015, 36(4): 72-75.
LYU Dan, HONG Jinqi, SHAO Zhiming, et al. Influence of operating mechanism's performance of vacuum circuit breaker on the reignition of switching capacitor bank[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2015, 36(4): 72-75.
- [13] 赵莹, 贾晨曦, 韩英爽. 磁控真空断路器机械特性的影响因素研究[J]. 电器与能效管理技术, 2025(1): 33-38.
ZHAO Ying, JIA Chenxi, HAN Yingshuang. Study on factors influencing mechanical characteristics of magnetically controlled vacuum circuit breaker[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2025(1): 33-38.
- [14] 宾丁炜, 黄彦全, 喻泉, 等. 单稳态永磁真空断路器铁芯动态电磁力计算方法研究[J]. 电工技术, 2020(13): 10-13.
BIN Dingwei, HUANG Yanquan, YU Quan, et al. Study on dynamic electromagnetic force calculation method of Iron core in monostable permanent magnet vacuum circuit breaker[J]. Electric Engineering, 2020(13): 10-13.
- [15] 林莘, 刘洋, 杜仁伟, 等. 三相分立式断路器的新型永磁机构[J]. 高压电器, 2015, 51(1): 1-5.
LIN Xin, LIU Yang, DU Renwei, et al. New permanent magnetic actuator for three phase discrete circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(1): 1-5.
- [16] 刘林平. 基于虚拟样机技术的永磁真空开关运动特性研究[D]. 成都: 西华大学, 2010.
LIU Linping. Movement characteristic study based on virtual prototype technique for vacuum switch with permanent magnetic actuator[D]. Chengdu: Xihua University, 2010.
- [17] 孙丽琼, 王振兴, 何塞楠, 等. 126 kV 真空断路器分离磁路式永磁操动机构[J]. 电工技术学报, 2015, 30(20): 49-56.
SUN Liqiong, WANG Zhenxing, HE Sainan, et al. A permanent magnetic actuator with separated magnetic circuit for 126 kV vacuum circuit breakers[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(20): 49-56.
- [18] 杨东文, 曾次玲, 谷丰强, 等. 配永磁机构真空断路器操动时间分散性的预测模型与影响因素研究[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(5): 180-187.
YANG Dongwen, ZENG Ciling, GU Fengqiang, et al. Influencing factor and forecasting model for the time dispersion of the operating mechanism of a vacuum circuit breaker with permanent magnetic actuator[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(5): 180-187.
- [19] 李亚峰, 王发展, 王雁琨, 等. 接触器触头系统弹跳行为仿真及影响因素分析[J]. 机械科学与技术, 2021, 40(1): 55-62.
LI Yafeng, WANG Fazhan, WANG Yankun, et al. Bumping behavior simulation and influencing factors analysis of contact system in AC contactor[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2021, 40(1): 55-62.
- [20] 杨文英, 刘兰香, 刘洋, 等. 考虑碰撞弹跳的接触器动力学模型建立及其弹跳特性影响因素分析[J]. 电工技术学报, 2019, 34(9): 1900-1911.
YANG Wenying, LIU Lanxiang, LIU Yang, et al. Establishing of contactor dynamic model considering collision bounce and analysis of influencing factors of bounce characteristics[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(9): 1900-1911.
- [21] 赵晓东. 大功率直流接触器动态特性建模及其优化方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
ZHAO Xiaodong. Investigation on dynamic characteristic modeling of high power DC contactor and its optimization method[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011.
- [22] 杨文英, 刘兰香, 翟国富. 热场影响下新能源用接触器弹跳特性研究[J]. 电工技术学报, 2019, 34(22): 4687-4698.
YANG Wenying, LIU Lanxiang, ZHAI Guofu. The bounce characteristics of contactors for new energy under the influence of thermal field[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(22): 4687-4698.
- [23] 杨明. 126 kV 真空断路器新型永磁操动机构研究[D]. 南京: 东南大学, 2017.
YANG Ming. Research of novel permanent magnet actuator for 126 kV vacuum circuit breaker[D]. Nanjing: Southeast University, 2017.
- [24] 徐喆明. 10 kV 真空断路器永磁机构电磁特性研究[D]. 南京: 东南大学, 2015.
XU Zheming. Electromagnetic properties research of permanent magnet actuator for 10 kV vacuum circuit breaker[D]. Nanjing: Southeast University, 2015.
- [25] 李晓丹. 基于有限元仿真的永磁操动机构参数设计研究[J]. 电力学报, 2018, 33(2): 140-143.
LI Xiaodan. Research on parameter design of permanent magnet actuator based on finite element simulation[J]. Journal of Electric Power, 2018, 33(2): 140-143.
- [26] 崔爱强. 合闸状态真空接触器动触头冲击弹跳时间计算及分析研究[J]. 电器与能效管理技术, 2021(2): 37-40.
CUI Aiqiang. Research on calculation and analysis of impact bounce time of closing contact of vacuum contactor[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2021(2): 37-40.
- [27] 李小格, 张楚仪, 谢江华. 基于Adams的高压断路器建模及合闸弹跳仿真分析[J]. 电工电气, 2019(4): 59-62.
LI Xiaoge, ZHANG Chuyi, XIE Jianghua. Modeling and simulation research of high voltage circuit breaker's closing bounce based on Adams[J]. Electrotechnics Electric, 2019(4): 59-62.
- [28] 王俊, 张伟, 刘路路, 等. 12 kV 永磁真空断路器合闸弹跳研究分析[J]. 现代制造技术与装备, 2021, 57(11): 84-86.
WANG Jun, ZHANG Wei, LIU Lulu, et al. Research and analysis on closing bounce of 12 kV permanent magnet vacuum circuit breaker[J]. Modern Manufacturing Technology and Equipment, 2021, 57(11): 84-86.

董华军(1978—), 男, 博士, 教授, 研究方向为真空开关电弧基础理论、图像处理及识别(通信作者)(E-mail: huajundong4025@163.com)。

李东恒(1996—), 男, 博士, 研究方向为真空开关电弧基础理论(E-mail: 1714837026@qq.com)。