

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2021.08.005

基于结构分析的断路器操作机构的建模及仿真分析

赵洪山, 赵 阳, 宋 玮, 余 洋
(华北电力大学电气与电子工程学院, 河北 保定 071003)

摘要: 基于断路器的结构来建模有利于研究断路器每个元件对其分合闸过程特性的不同影响,这对实现故障部位识别,进行故障分类及诊断都具有重要意义。文中针对断路器各个部分的功能特性分别建立机械与电气模型。然后利用机械与电气之间的相互联系,通过 MATLAB/Simulink 软件将单个部分模型组合来形成高压断路器的多域模型。随后设定所研究的高压断路器参数,在 MATLAB/Simulink 环境中进行仿真获取断路器的分闸行程曲线及分闸线圈电流特性,再通过改变模型中机械部分的摩擦参数及弹簧刚度系数得到不同的位移特性以及改变电气部分的参数获取不同的线圈电流特性。最后将所得结果进行分析,得出不同参数对断路器部分特性的影响,为未来更好、更全面地进行故障分类及诊断奠定一定的基础。

关键词: 高压断路器; MATLAB/Simulink; 多域模型; 运动特性; 线圈电流特性

Modeling and Simulation Analysis of Operating Mechanism for Circuit Breaker Based on Structural Analysis

ZHAO Hongshan, ZHAO Yang, SONG Wei, YU Yang

(School of Electrical and Electronical Engineering, North China Electric Power University, Hebei Baoding 071003, China)

Abstract: Modeling based on the structure of circuit breaker is beneficial to study the different effects of each component of the circuit breaker on its opening and closing characteristic process, which is of great significance for fault location identification, fault classification and diagnosis. In this paper, both mechanical and electrical models for the functional characteristic of each part of the circuit breaker are set up respectively. Then, the multi-domain model of the high-voltage circuit breaker is formed by the use of interrelation between mechanical and electrical and by way of combining individual part model with MATLAB/Simulink software. After that, the parameters of high-voltage circuit breaker under study are set, the simulation is performed in the MATLAB/Simulink environment to obtain the opening stroke curve of the circuit breaker and the current characteristics of the opening coil, and then the different displacement characteristics are obtained by changing the friction parameters of the mechanical part and the spring rigidity coefficient of the model and different coil current characteristics are obtained by changing parameters of the electrical part. Finally, the obtained results are analyzed to obtain the influence of different parameters on partial characteristics of circuit breaker, which lays a foundation for better and more comprehensive fault classification and diagnosis in the future.

Key words: high voltage circuit breaker; MATLAB/Simulink; multi-domain model; operation characteristics; characteristics of coil current

0 引言

高压断路器作为电力系统中最为重要的控制

和保护设备,其可靠性对保证电力系统稳定运行起着极为重要的作用^[1-5]。研究断路器运行过程中易出现的异常情况、主要组成部件在断路器动作过程

收稿日期:2020-12-14; 修回日期:2021-02-09

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52077078)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(52077078).

中以及出现故障时对其行为特性的影响,可以有助于识别断路器的故障部位以及提高检修人员对各类异常的认识,能够及时地发现问题,快速并尽可能准确地进行维修^[3],减少损失,同时对进行故障分类及诊断也是十分必要的。

目前,国内外许多学者从不同角度采用各种方法对断路器各个方面都进行了大量的研究。在故障诊断方面,主要集中于机械故障诊断。文[2]提出了一种改进的经验模态分解(EMD)能量熵和支持向量机相结合的诊断断路器机械故障的方法,以此分析振动信号,并验证了该方法的良好效果。此外,文[6]采用基于集合经验模态分解(EEMD)方法对高压断路器振动信号构造新的故障特征向量,并采用马氏距离判别法进行机械故障识别,并利用该方法有效识别了断路器基座螺丝松动、传动机构卡涩等常见机械故障;文[7]提出了一种基于小波变换的信号奇异性检测理论,求取了振动信号包络的奇异性指数,并将此作为特征参数用于故障诊断,并通过高压断路器合闸振动信号进行分析,验证了该方法的有效性;文[8]中采用了一种基于S变换和极限学习机(ELM)的高压断路器机械故障诊断新方法。首先基于S变换计算高压断路器动作期间产生的振动信号在不同时段与频段的局部奇异值,选取最大奇异值作为故障诊断的特征向量,然后采用极限学习机对故障进行分类,最后通过实验方法验证了该方法的效果。在实体建模方面,文[9]利用多体动力学软件 Adams 建立弹簧操动机构的三维实体模型及电动力仿真计算模型,进行断路器开断过程的仿真,分析了其动力学特性,并用试验来进行验证;文[10]采用 MSC.Adams 软件对断路器的操动机构虚拟样机进行动力学仿真研究,得到绝缘拉杆在断路器分合闸过程中受力变化;文[11]中评估了高压断路器技术状态所需的参数,介绍了运动学特性对断路器性能的影响,并基于人工神经网络(ANN)的方法分析了断路器的运动学特性。另外,就高压断路器状态评估方面,国内外许多学者也做了系统的研究。文[12]基于模糊数学理论建立模糊综合评估模型,利用多种评价因素对高压断路器的状态进行评估;文[13]在文[12]的基础上考虑到断路器状态评估因素的特点,基于灰色理论建立灰色模糊判别矩阵,进而对高压断路器运行状态进行评估,并用实例验证所提出的模型。

目前,针对断路器机械部分与电气部分的结合分析工作做的还不够。文中利用断路器机械部分与电气部分之间所存在的特殊联系,基于断路器结

构分别建立了机械模型与电气模型,实现多域建模,然后在 MATLAB/Simulink 软件环境中分别对各个主要部分进行仿真实现,获得运动特性曲线及分闸线圈电流特性,并分析摩擦参数及不同的线圈电压和电阻对高压断路器特性的影响。

1 断路器基本结构及工作原理

高压断路器一般是由灭弧室、绝缘支撑、传动机构、操动机构、二次控制回路及基座组成^[14-16]。以 ZN63 型高压断路器作为研究对象,它的操作机构采用弹簧储能式操动机构,具有手动储能与电动储能功能,包括储能部分、传动部分(凸轮机构)、脱扣部分和缓冲部分。其基本结构见图 1^[17]。

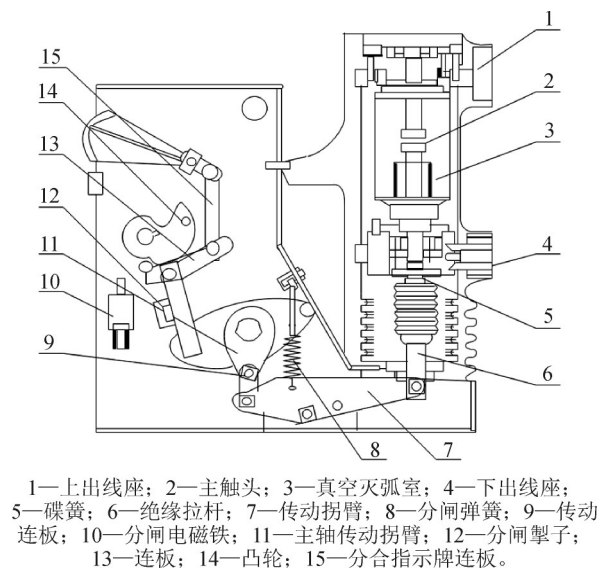


图1 断路器结构简化示意图

Fig. 1 Circuit breaker structure diagram

高压断路器按照各部分的功能可以分为:导电部分、绝缘部分、触头机构以及操作机构。导电部分主要是起到断路器电流的导通和开断的作用,它允许断路器长时间流过正常电流且在电流流过时接触良好,同时还要满足能通过异常电流的要求且故障电流流过时能够快速动作。绝缘部分需要满足规定的电气绝缘要求,它包括相间绝缘、断口绝缘以及对地绝缘三部分。触头机构包括动、静触头与灭弧部分,它是断路器进行开断与关合的部分,代表了断路器的分、合闸能力。操作机构是断路器最重要的部分之一,主要是为断路器的分、合闸动作提供动力来带动触头运动,它决定了断路器的工作状态^[18]。

2 断路器多域建模

2.1 多域关系

断路器是一种具有电气性能的机械产品,电气

性能的实现主要依赖于机械特性,同时机械特性参数的确定需要以电气性能为依据,并且要以实现电气性能为目的^[19-22]。针对断路器所具有的这种特殊关系,下面分别对断路器建立机械与电气模型,实现多域建模。

2.2 机械模型

将操动机构进行一定的简化,保留其主传动机构及触头系统。缓冲部分采用液压缓冲器,为简化运动过程,分析时先暂时不考虑其作用。针对分合闸运动过程及初始条件的不同,分别建立分合闸过程的数学模型。

2.2.1 合闸运动分析

如图1断路器结构简图所示,机构储能后,控制回路接到合闸信号,合闸电磁铁动作,使储能传动轴转动,带动掣子松开滚轮,解除储能保持,合闸弹簧释放能量,使传动凸轮轴和轴上的凸轮14转动,通过转动拐臂7,传动连板9带动绝缘拉杆6带动动触头向上运动进入合闸位置,并压缩触头弹簧5,保持触头所需接触压力^[23]。

合闸过程需要对凸轮机构进行分析,单纯的功能关系分析不能满足要求,需要使用经典力学对该过程进行分析^[24]。运动分析简图见图2(图中数字表示同图1)。

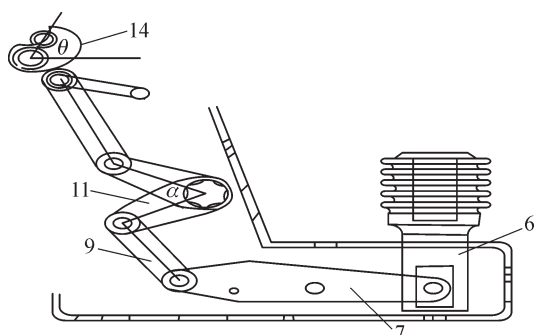


图2 合闸运动分析简图

Fig. 2 Closing motion analysis diagram

由拉格朗日方程可得

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} + \frac{\partial V}{\partial q_i} = Q_i \quad (1)$$

式(1)中: T 为系统的动能; V 为系统的势能; Q_i 为广义力。

系统动能为

$$T = \frac{1}{2} I_{cs} \dot{\theta}^2 + \frac{1}{2} I_{sh} \dot{\alpha}^2 + \frac{1}{2} M_{con} (L_{37} \dot{\alpha})^2 + \frac{1}{6} M_l \dot{h}_l^2 + \frac{1}{6} M_c \dot{h}_c^2 \quad (2)$$

系统势能为

$$V = \frac{1}{2} k_c (x_{c0} - x_c)^2 + \frac{1}{2} k_l (x_{l0} - x_l)^2 + \frac{1}{2} k_{con} (x_{con0} - x_{con})^2 + M_{cs} g h_{cs} + M_{sh} g h_{sh} + M_{con} g h_{con} \quad (3)$$

式(2)、(3)中: I_{cs} 为凸轮的转动惯量; $\dot{\theta}$ 为凸轮轴的角速度; M_{cs} 为凸轮质量; h_{cs} 为凸轮重心高度; I_{sh} 为主轴的转动惯量; $\dot{\alpha}$ 为主轴的角速度; M_{sh} 为主轴质量; h_{sh} 为主轴重心高度; M_{con} 为触头的等效质量; M_l 为合闸弹簧等效质量; M_c 为合闸弹簧等效质量; k_c 为合闸弹簧刚度; x_{c0} 为合闸弹簧初始长度; x_c 为合闸弹簧最终的长度; k_l 为分闸弹簧刚度; x_{l0} 为分闸弹簧初始长度; x_l 为分闸弹簧最终长度; k_{con} 为触头弹簧弹性系数; x_{con0} 为触头弹簧初始长度; x_{con} 为触头弹簧最终长度。

由拉格朗日方程可得

$$\begin{cases} A_1 \ddot{S} + A_2 \dot{S} + A_3 = 0 & k_1 \leq S \leq k_2 \\ B_1 \ddot{S} + B_2 \dot{S} + B_3 = 0 & k_2 < S \leq k_3 \end{cases} \quad (4)$$

由此可得,合闸过程触头的运动行程为二阶微分方程。

2.2.2 分闸运动分析

如图1断路器结构简图所示,合闸动作完成后,控制回路一旦接到分闸信号或者手动按下分闸按钮,分闸脱扣磁铁10动作,合闸保持掣子的约束被解除。由触头弹簧5和分闸弹簧12储存的能量带动一系列连杆使灭弧室3中的动静触头2分离,实现分闸操作。在分闸过程后段,液压缓冲器起作用,吸收分闸过程剩余能量,减缓分闸速度并限定分闸位置^[25]。其分闸分析简图见图3(图中数字表示同图1)。

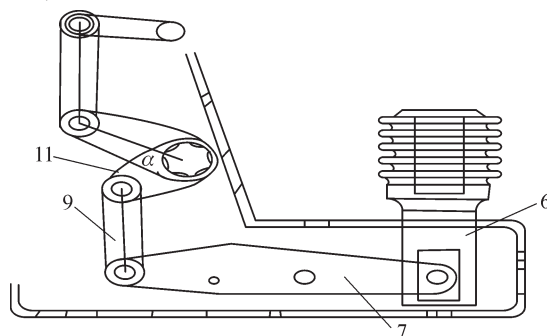


图3 分闸运动分析简图

Fig. 3 Opening motion analysis diagram

对于分闸过程,是靠分闸弹簧与触头弹簧力使触头快速分开,合闸弹簧及凸轮机构在此过程中不起作用,所以在建立分闸模型时可不考虑合闸弹簧及凸轮机构等,简化分闸过程,其他部分分析与合闸相同。只是在分闸操作的后半段需要考虑缓冲力的作用,即

$$Q = \frac{1}{2} c \dot{h}_c^2 \quad (5)$$

由拉格朗日方程可得

$$\begin{cases} C_1\ddot{S} + C_2\dot{S} + C_3S = 0 & l_1 \leq S \leq l_2 \\ D_1\ddot{S} + D_2\dot{S} + D_3S = 0 & l_2 < S \leq l_3 \end{cases} \quad (6)$$

分闸过程, 触头行程仍为二阶微分方程。

式(4)、(6)中: A_i 、 B_i 、 C_i 、 D_i ($i=1, 2, 3$) 分别由所选定的断路器技术参数决定; S 、 $\dot{S}$ 、 $\ddot{S}$ 分别表示触头的位移、速度及加速度。

2.2.3 触头运动过程

ZN63-12 真空断路器的主触头位于真空灭弧室内, 其分、合闸过程中动触头的动作行为均在高空度中进行^[26]。其结构如图1中的部件2、3。

在合闸过程中, 传动拐臂通过绝缘拉杆推着动触头朝着静触头向上运动, 刚开始时, 动、静触头没有接触, 触头弹簧(碟簧)处于预压缩的状态, 在动静触头接触瞬间, 静触头会对动触头产生一个接触反力, 碟簧被压缩, 直到完成整个合闸。此时, 碟簧保持动静触头间足够的接触压力, 为分闸做准备, 这既可以使动触头获得一定的分闸速度, 同时又满足灭弧的需求。

在分闸过程中, 传动拐臂通过绝缘拉杆拉着动触头向下运动, 使之与静触头分离, 此时碟簧在压缩状态下快速分离, 保证了动触头获得足够大的分闸速度, 在动静触头分离瞬间, 碟簧的压缩力消失, 回到了最初的预压缩状态, 此时主要由分闸弹簧来提供后面分闸过程的动力, 在分闸过程的后半段, 液压缓冲器开始起作用, 主要是吸收分闸过程中的剩余能量, 减小分闸速度, 同时也减小了部件间的撞击并限定分闸位置。

利用曲柄滑块模型来描述触头的运动过程, 见图4。

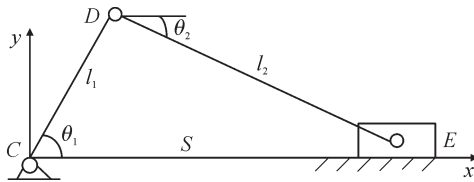


图4 曲柄滑块模型

Fig. 4 Sketch of crank slider

根据图2-4所建坐标系, 列方程得

$$\begin{cases} l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos \theta_2 = S \\ l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin \theta_2 = 0 \end{cases} \quad (7)$$

将式(7)对时间 t 求一次导数, 得速度关系

$$\begin{cases} -l_1 \omega_1 \sin \theta_1 - l_2 \omega_2 \sin \theta_2 = \dot{S} \\ l_1 \omega_1 \cos \theta_1 + l_2 \omega_2 \cos \theta_2 = 0 \end{cases} \quad (8)$$

写成矩阵形式

$$\begin{pmatrix} l_2 \sin \theta_2 & 1 \\ -l_2 \cos \theta_2 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \omega_2 \\ \dot{S} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -l_1 \omega_1 \sin \theta_1 \\ l_1 \omega_1 \cos \theta_1 \end{pmatrix} \quad (9)$$

将式(7)对时间 t 求二次导数, 得加速度关系

$$\begin{pmatrix} l_2 \sin \theta_2 & 1 \\ -l_2 \cos \theta_2 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \alpha_2 \\ \ddot{S} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -l_1 \sin \theta_1 & -l_1 \cos \theta_1 \\ l_1 \cos \theta_1 & -l_1 \sin \theta_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \alpha_1 \\ \omega_1^2 \end{pmatrix} - \omega_2^2 \begin{pmatrix} l_2 \cos \theta_2 \\ l_2 \sin \theta_2 \end{pmatrix} \quad (10)$$

2.3 电气模型

高压断路器及主要部件的通用模型图^[27]见图5。现利用Simulink对断路器各个主要部分进行建模仿真。

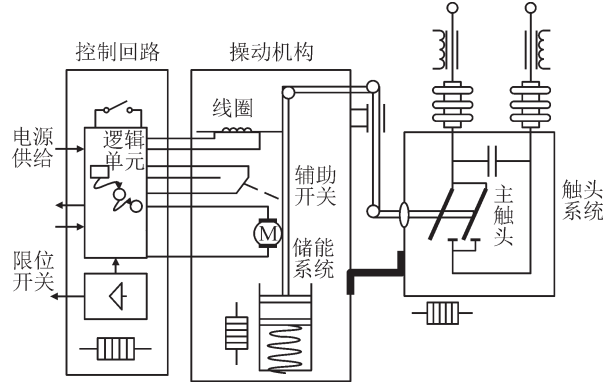


图5 通用模型图

Fig. 5 Generic component-oriented model of a high voltage circuit breaker

2.3.1 分合闸线圈

电磁铁是高压断路器中较为重要的元件, 当线圈中流过电流时, 在电磁铁内就会产生磁通, 铁心受到电磁力的吸合, 从而驱动断路器的分合闸动作^[28], 其典型的分合闸线圈电流曲线见图6^[24], 主要展示了前三阶段的电流特性曲线。此处先分析分闸线圈电流变化, 合闸时, 合闸线圈电流变化与之相似。

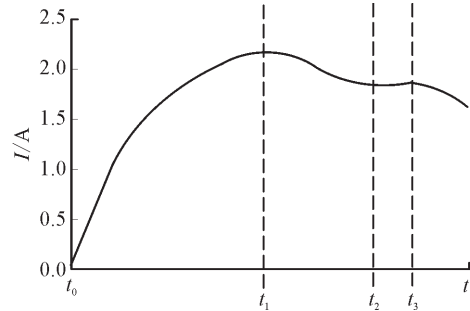


图6 典型的分合闸线圈电流

Fig. 6 Typical switching coil current

根据法拉第电磁感应定律

$$\mathcal{E} = -N \frac{d\phi}{dt} \quad (11)$$

1) $t_0 \sim t_1$ 阶段, 刚开始通电时, 线圈电流逐渐从0开始增加, 铁心的吸引力也逐渐增加, 但是还不能够让铁心动作^[24]。

$$i = \frac{U}{R} \left[1 - e^{-\left(\frac{R}{L_0}\right)t} \right] \quad (12)$$

2) $t_1 \sim t_2$ 阶段: 在 t_1 时刻, 电流增大到一定值, 电磁力超过反作用力, 如铁心重力、加在铁心上的弹簧力等, 铁心开始运动, 铁心开始运动产生反电动势, 使得线圈电流呈下降趋势, 铁心驱动操动机构后又逐渐减速直至停止运动^[24]。

3) 在 $t_2 \sim t_3$ 阶段, 铁心停止运动, 电流大小指数上升, 其表达式为

$$i = \frac{U}{R} \left[1 - e^{\left(-\frac{R}{L_m} \right) t} \right] \quad (13)$$

4) 最后, 辅助开关的触头间产生电弧, 电弧电压迅速增大, 线圈电流减小, 最后减小到 0。

2.3.2 储能系统

在弹簧操动机构的断路器中, 储能系统的作用是在合闸弹簧合闸后, 完成对合闸弹簧的储能。储能系统中主要的部分为储能电机^[29], 下面对电机电流进行简要分析。

1) 电机的动态方程

电压方程为

$$U_a = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + C\omega \quad (14)$$

转矩方程为

$$C i_a = J \frac{d\omega}{dt} + T_L + R_\omega \omega \quad (15)$$

2) 电机启动电流的微分方程为

$$i_a = \frac{U_a}{R_a} e^{-\frac{t}{T_m}} \quad (16)$$

3) 储能电机上电时, 即开始接通电源时, 未拉动弹簧做功, 做无负载启动, 电流趋于稳定, 其电流遵循以下规律

$$i = \frac{R_\omega u_a}{R_\omega R_a + C^2} \quad (17)$$

4) 储能电机做功, 此时电机拉动合闸弹簧储能, 由式(14)、(15)可知, 此过程电流受负载的影响, 忽略过程中阻力影响, 并假设弹簧初始长度为 l , 弹簧动端到其轴心的半径为 r , 合闸弹簧的一端绕储能轴作圆周运动, 当以储能轴的轴心与弹簧固定点的连线为基准轴时, 若传动轴转过的角度为 α , 弹簧转过的角度为 β , 简化模型见图 7^[29]。

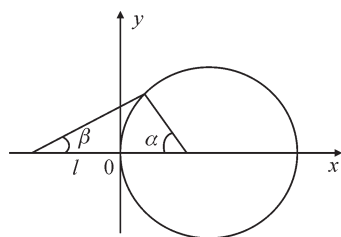


图7 储能电机负载简化模型

Fig. 7 Simplified model of energy storage motor load

弹簧在初始位置时, 即未储能状态下有

$$\begin{cases} x = r(1 - \cos \alpha) \\ y = r \sin \alpha \end{cases} \quad (18)$$

弹簧的伸长量为

$$\Delta l = \sqrt{(l+x)^2 + y^2} - l \quad (19)$$

若弹簧的弹性系数为 k , 则拉力

$$F = k \Delta l \quad (20)$$

储能轴受到的力矩的力臂为 r , 则所受弹簧拉力在圆周的切向上的分力为

$$F_\tau = F \cos \left| \frac{\pi}{2} - \alpha - \beta \right| \quad (21)$$

力 F_τ 经过一定的传动比之后, 即可变换得到储能电机在储能过程中所承受的负载变化情况。

3 搭建 MATLAB/Simulink 模型

3.1 控制回路

控制电路通过将分合闸信号设置为高电平或者使用过电流继电器提供的输入来发送分合闸信号, 信号从辅助触点接收。在所有输入信号的基础上, 确定输出分闸和合闸电压信号。一旦发生故障, 来自过电流继电器的信号就会变高^[30]。控制电路的 Simulink 模型见图 8, 主要由一些逻辑单元构成, 包括控制信号、辅助开关、控制电压等。

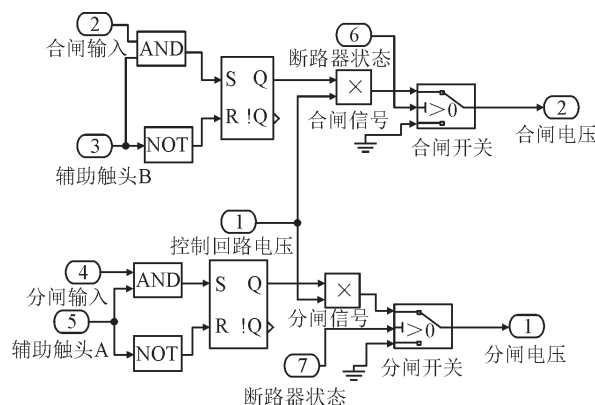


图8 控制回路的 Simulink 图

Fig. 8 Simulink diagram of the control circuit

3.2 分合闸线圈

分合闸线圈驱动铁心动作, 从而使断路器进行分合闸运动。依据上述分析的线圈电流变化行为, 以分闸线圈为例描述分闸过程中线圈电流特性。建立分闸线圈电流前 3 个阶段的 Simulink 模型见图 9。

3.3 储能系统

储能系统主要是建立储能电机的模型, 该模型可以看做是一个简单的直流电机。将上述分析的电机启动过程、上电时电流遵循的规律及电机做功过

程在 MATLAB/Simulink 环境中进行实现, 见图 10。

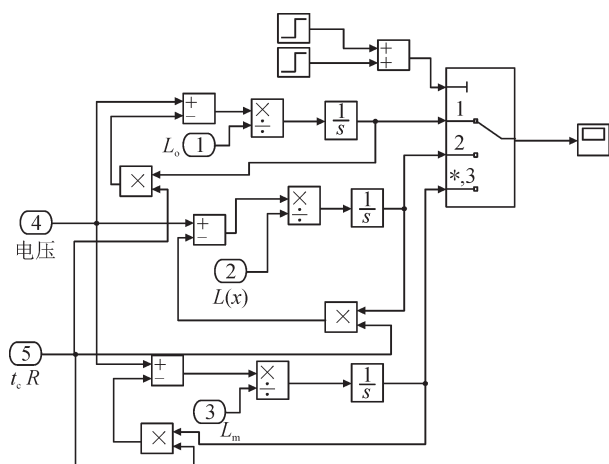


图9 分闸线圈的 Simulink 图

Fig. 9 Simulink diagram of the trip and close coils

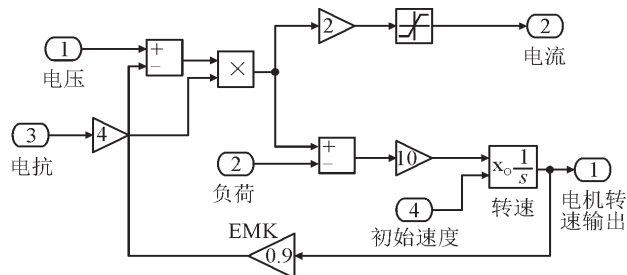


图10 储能电机的 Simulink 图

Fig. 10 Energy storage motor Simulink diagram

3.4 触头模型

触头部分是断路器重要结构之一, 见图 11, 搭建主触头的 Simulink 模型。在该模型中, 计算出的电流有效值及触头侧连杆的位置可用于确定断路器状态, 此外电流有效值可用于确定断路器故障, 从而向控制回路发送信号^[18]。

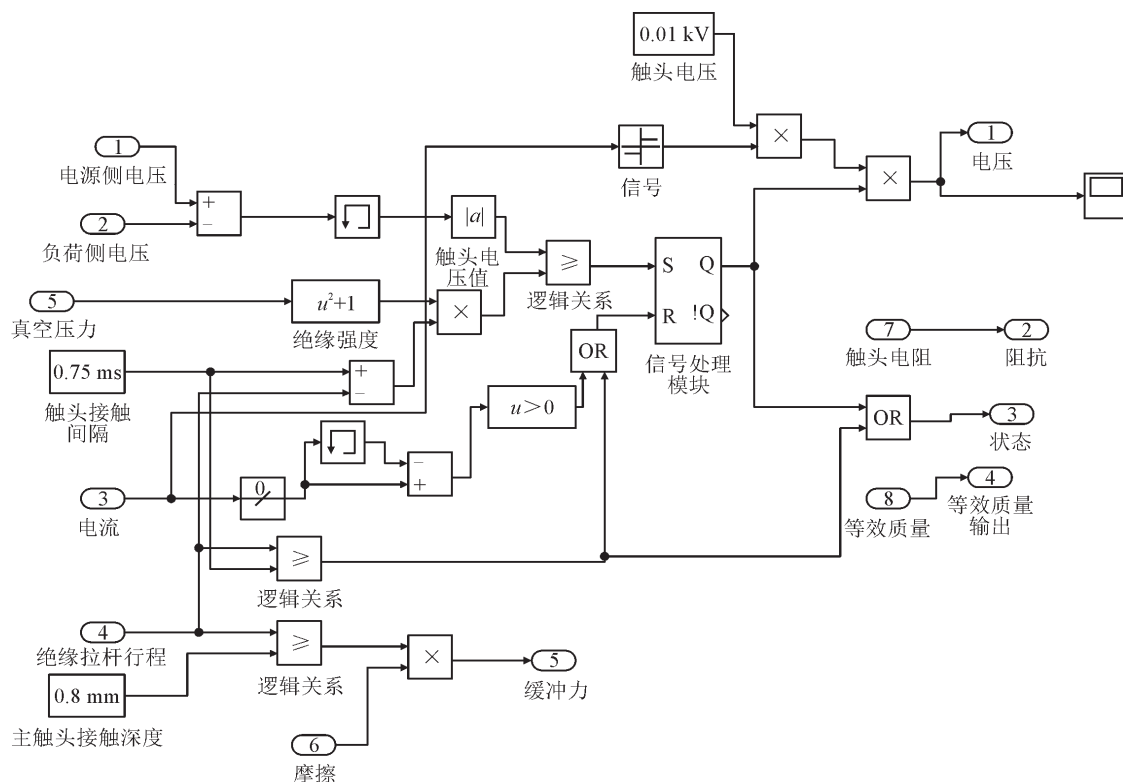


图11 触头的 Simulink 模型

Fig. 11 Simulink diagram of the primary contacts

4 仿真分析

将上述 Simulink 仿真图进行连接, 并利用 MATLAB 设置其各个输入参数, 得到分闸时触头位移特性曲线, 并通过改变机械模型中摩擦及弹簧刚性系数, 来分析研究摩擦及弹簧老化对分闸特性曲线的影响, 以及改变电气部分控制回路电压及线圈电阻来研究其电气量对分闸过程中线圈电流特性的影响, 见图 12-15。

由上述结果可得:

1) 图 12 表示分闸过程中位移曲线。由图 15 可知, 不同摩擦下具有不同的速度及行程时间, 这将对断路器的分合闸性能产生一定的影响。可以通过此特征来监测断路器运行过程中某些部件间摩擦的大小甚至是否存在部件卡涩的问题。

2) 典型的分闸位移特性曲线如图 12 中实线所示, 文[18, 26-27]等多篇文章, 典型的分合闸线圈电流特性曲线见图 14 中实线所示。

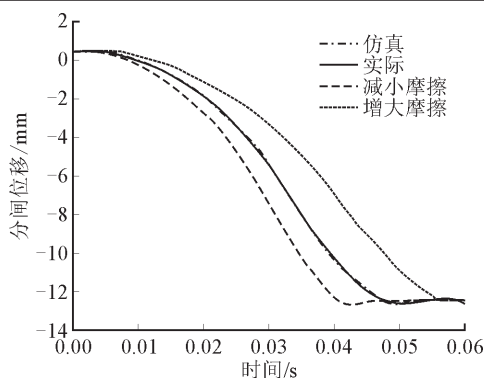


图12 摩擦参数对分闸特性的影响

Fig. 12 Effect of friction parameters on opening characteristics

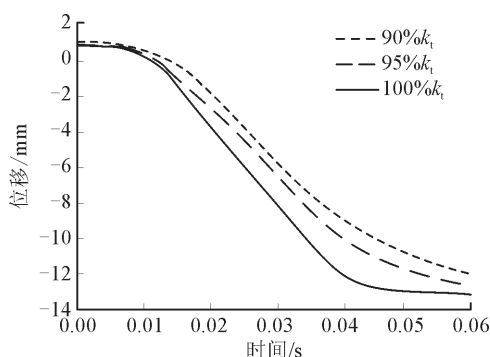


图13 弹簧刚度系数对分闸特性的影响

Fig. 13 Effect of spring stiffness coefficient on opening characteristic

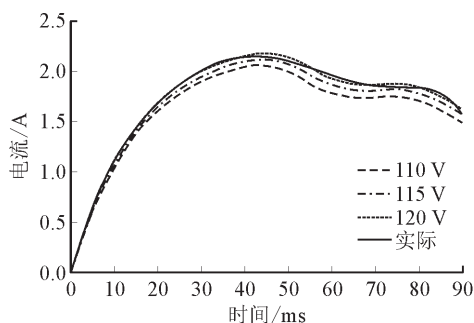


图14 不同控制电压下线圈电流特性

Fig. 14 Current characteristics of coils under different control voltages

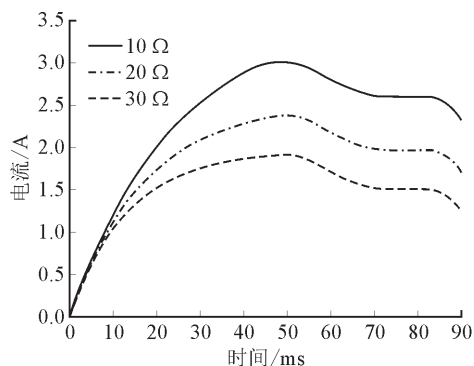


图15 串入不同电阻值下的电流特性

Fig. 15 Current characteristics of different resistance values

3)图13表示在不同弹簧刚度系数下的位移特性曲线。将机械模型中分闸弹簧刚度系数进行调整,分别以100%、95%、90%的比例将刚度系数进行减小,得到其各情况下的分闸位移特性曲线。由曲线可知,随刚度系数的减小,使分闸时间延迟,可能导致不能满足及时快速的切断故障,将在一定程度上不利于设备的稳定运行。弹簧刚度系数的大小可以表征其弹簧的老化程度,即图13表征出老化弹簧与正常弹簧情况下分闸特性的不同,此特征可为诊断弹簧老化故障奠定基础。

4)图14表示在不同控制电压下的分闸线圈电流曲线,分闸线圈电压发生偏移会对线圈电流特性有一定的影响。如图13所示,线圈端子电压过低时,会使得线圈电磁铁的启动电流过小,可能出现铁心启动但分闸四连杆不动的现象,从而导致启动延迟甚至会拒动,损坏线圈,这将不利于电力系统的稳定运行,并可能会造成一定的经济损失。

5)图15表示串入线圈电阻的阻值不同时所反映的线圈电流的变化。电阻增大,线圈电流也随之减小。当电阻过大时,会使电流达不到额定值,可能会出现铁心不能启动,或者行程不足等现象。而造成电阻增大的原因可能是由于环境的因素,使得线圈被氧化,从而引起线圈的老化,使得电阻值变大。

5 结语

文中基于断路器部件之间的特殊联系,分别建立了机械与电气模型,在MATLAB/Simulink环境中进行仿真实现该多域模型,得到高压断路器的操作行为,最后对仿真结果进行简要分析。

通过对上述结果的分析可知,得到不同参数下对断路器行程曲线及线圈电流特性的影响。通过获取这些特征曲线并加以分析,确定断路器的运行状态,同时为后续获取更多的特征参数提供了方向。以及为预测其未来的发展趋势及故障诊断做准备。

文中只研究了断路器分闸性能,即分闸行程曲线及线圈电流特性。接下来将研究更多参数对断路器分合闸过程的影响,并将之反映在振动行为上,进行基于振动信号的故障诊断研究。

参考文献:

- [1] 常广,张振乾,王毅. 高压断路器机械故障振动诊断综述[J]. 高压电器, 2011, 47(8): 85-90.

- CHANG Guang, ZHANG Zhenqian, WANG Yi. Review on mechanical fault diagnosis of high-voltage circuit breakers based on vibration diagnosis[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(8): 85-90.
- [2] 黄建, 胡晓光, 巩玉楠. 基于经验模态分解的高压断路器机械故障诊断方法[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(12): 108-113.
- HUANG Jian, HU Xiaoguang, GONG Yunan. Machinery fault diagnosis of high voltage circuit breaker based on empirical mode decomposition[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(12): 108-113.
- [3] 王婷, 梁梦婕, 张佳颖. 高压断路器分合闸电磁铁的仿真建模和故障诊断研究[J]. 电网与清洁能源, 2019, 35(2): 63-68.
- WANG Ting, LIANG Mengjie, ZHANG Jiaying. Research on modeling and fault diagnosis of the opening/ closing electromagnet of the 550 kV high voltage circuit breaker[J]. Power System and Clean Energy, 2019, 35(2): 63-68.
- [4] 陈家超, 张勇军, 黄国权, 等. 计及保护和断路器告警信息可信度的电网故障诊断优化模型[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(4): 28-36.
- CHEN Jiachao, ZHANG Yongjun, HUANG Guoquan, et al. Optimal model of power grid fault diagnosis considering reliability of protection and circuit breaker alarm information[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(4): 28-36.
- [5] 吴思源, 柯飒, 李婉卿, 等. 基于故障仿真分析的高压直流断路器测试要求的确定方法[J]. 智慧电力, 2019, 47(4): 53-58.
- WU Siyuan, KE Sa, LI Wanqing, et al. Method to determine experimental requirements of HVDC circuit breaker based on fault simulation analysis[J]. Smart Power, 2019, 47(4): 53-58.
- [6] 孙抗, 刘永超. 基于EEMD和马氏距离的高压断路器机械故障诊断研究[J]. 高压电器, 2018, 54(12): 43-49.
- SUN Kang, LIU Yongchao. Research on mechanical fault diagnosis of high voltage circuit breaker based on EEMD and mahalanobis distance discriminant[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(12): 43-49.
- [7] 胡晓光, 戴景民, 纪延超, 等. 基于小波奇异性检测的高压断路器故障诊断[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(5): 67-70.
- HU Xiaoguang, DAI Jingmin, JI Yanchao, et al. The fault diagnosis of high voltage breakers based on wavelet singularity detection[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(5): 67-70.
- [8] 黄南天, 陈怀金, 林琳, 等. 基于S变换和极限学习机的高压断路器机械故障诊断[J]. 高压电器, 2018, 54(6): 74-80.
- HUANG Nantian, CHEN Huaijin, LIN Lin, et al. Mechanical fault diagnosis of high voltage circuit breakers based on S-transform and extreme learning machine[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(6): 74-80.
- [9] 杨武, 荣命哲, 王小华, 等. 考虑电动力效应的高压断路器动力学特性仿真分析[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(5): 103-107.
- YANG Wu, RONG Mingzhe, WANG Xiaohua, et al. Dynamic simulation of high-voltage circuit breaker concerning electrodynamic force[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(5): 103-107.
- [10] 张红军, 王文文, 张强. 断路器绝缘拉杆的动力学仿真分析与试验研究[J]. 高压电器, 2012, 48(10): 83-87.
- ZHANG Hongjun, WANG Wenwen, ZHANG Qiang. Dynamics simulation analysis and experimental study of circuit-breaker's insulation pull rod[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(10): 83-87.
- [11] ADAM M, BARABOI A, PANCU C, et al. The analysis of circuit breakers kinematics characteristics using the artificial neural networks[J]. Wseas Transactions on Circuits & Systems, 2009, 8(2): 187-196.
- [12] SOHN J H, LEE S K, KIM S O, et al. Study of spring modeling techniques for kinematic and dynamic analysis of a spring operating mechanism for the circuit breaker[J]. Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A, 2007, 31(7): 777-783.
- [13] 国连玉, 李可军, 梁永亮, 等. 基于灰色模糊综合评判的高压断路器状态评估[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(11): 161-167.
- GUO Lianyu, LI Kejun, LIANG Yongliang, et al. HV circuit breaker state assessment based on gray-fuzzy comprehensive evaluation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(11): 161-167.
- [14] 常广, 王毅, 王玮. 采用振动信号零相位滤波时频熵的高压断路器机械故障诊断[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(3): 155-162.
- CHANG Guang, WANG Yi, WANG Wei. Mechanical fault diagnosis of high voltage circuit breakers utilizing zero-phase filter time-frequency entropy of vibration signal[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(3): 155-162.
- [15] 曹宇鹏, 罗林, 王乔, 等. 基于卷积深度网络的高压真空断路器机械故障诊断方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(3): 39-47.
- CAO Yupeng, LUO Lin, WANG Jiao, et al. Fault diagnosis of high-voltage vacuum circuit breaker with a convolutional deep network[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(3): 39-47.
- [16] 辛忠良, 霍明霞, 贾鹏举, 等. 基于经验小波变换和相关向量机的断路器机械故障诊断[J]. 电测与仪表, 2019, 56(13): 97-103.
- XIN Zhongliang, HUO Mingxia, JIA Pengju, et al. Circuit-

- breaker mechanical fault diagnosis based on empirical wavelet transform and relevance vector machine[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2019, 56(13): 97-103.
- [17] 赵书涛, 张佩, 申路, 等. 高压断路器振声联合故障诊断方法[J]. *电工技术学报*, 2014, 29(7): 216-221.
- ZHAO Shutao, ZHANG Pei, SHEN Lu, et al. Vibration and acoustic joint mechanical fault diagnosis method of high voltage circuit breakers[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2014, 29(7): 216-221.
- [18] FOROOTANI A, AKBAR AFZALIAN A, NADIAN GHOM-SHEH A. Model-based fault analysis of a high-voltage circuit breaker operating mechanism [J]. *Turk. J Elec. Eng. & Comp. Sci.*, 2017(25): 234 -236.
- [19] 程学珍, 朱晓林, 杜彦宾, 等. 基于神经模糊Petri网的高压断路器故障诊断研究[J]. *电工技术学报*, 2018, 33(11): 2535-2544.
- CHENG Xuezhen, ZHU Xiaolin, DU Yanbin, et al. High voltage circuit breaker fault diagnosis based on neural fuzzy petri nets[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2018, 33(11): 2535-2544.
- [20] 王竞, 夏加富, 刘晓晖, 等. 牵引变电站直流断路器机械状态监测与故障诊断研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(1): 33-40.
- WANG Jing, XIA Jiafu, LIU Xiaohui, et al. Research on mechanical condition monitoring and fault diagnosis for DC circuit breaker in traction substation[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(1): 33-40.
- [21] 朱萌, 梅飞, 郑建勇, 等. 基于深度信念网络的高压断路器故障识别算法[J]. *电测与仪表*, 2019, 56(2): 10-15.
- ZHU Meng, MEI Fei, ZHENG Jianyong, et al. Fault recognition algorithm for high voltage circuit breakers based on deep belief network[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2019, 56(2): 10-15.
- [22] 徐晓静, 夏岩, 燕德丽. 永磁机构真空断路器同步关合技术相关问题研究[J]. *电力科学与技术学报*, 2019, 34(4): 29-34.
- XU Xiaojing, XIA Yan, YAN Deli. Research on synchronous switching technology for permanent magnetic actuator vacuum breakers[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2019, 34(4): 29-34.
- [23] 石梦洁. 弹簧操动机构断路器建模与故障诊断方法研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2017.
- SHI Mengjie. Modeling and fault diagnosis of circuit breakers with spring operated mechanism[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2017.
- [24] STANEK M, FROHLICH K. Model-aided diagnosis-a new method for online condition assessment of high voltage circuit breakers[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2000, 15(2): 585 -591.
- [25] ZEINELDIN H H, EL-SAADANY E F, SALAMA M, et al. High voltage circuit breaker modeling for online model-based monitoring and diagnosis[C]//2007 Innovations in Information Technologies (IIT). [S.l.]: IEEE, 2007: 317-321.
- [26] STANEK, MICHAEL. Model-aided diagnosis for high voltage circuit breakers[D]. Switzerland: PhD Thesis, Faculty of Engineering, Swiss Federal Institute of Technology Zurich, 2000.
- [27] 关永刚, 黄瑜珑, 钱家骊. 基于振动信号的高压断路器机械故障诊断[J]. *高电压技术*, 2000, 26(3): 66-68.
- GUAN Yonggang, HUANG Yulong, QIAN Jiali. An overview on mechanical failure diagnosis technique for high voltage circuit breaker based on vibration signal[J]. *High Voltage Engineering*, 2000, 26(3): 66-68.
- [28] HAIDALEN H K, RUNDE M, HAUGLAND O, et al. Continuous monitoring of circuit-breakers using vibration analysis[J]. *Eleventh International Symposium on High Voltage Engineering*, 1999(1): 102- 106.
- [29] HOIDALEN H K, RUNDE M. Continuous monitoring of circuit breakers using vibration analysis[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2005, 20(4): 2458 -2465.
- [30] LEE D S S, LITHGOW B J, MORRISON R E. New fault diagnosis of circuit breakers[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2003, 18(2): 454-459.
- 赵洪山(1965—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统分析、运行与控制、电力设备故障预测与优化检修(E-mail: zhaohshcn@ncepu.edu.cn)。
- 赵阳(1993—), 女, 硕士在读, 主要研究方向为配电网电力设备的在线监测与状态评估。