

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.08.003

真空断路器分闸电磁铁动态仿真及故障分析

张 岩¹, 符鑫哲¹, 王昭雷², 王 芳¹, 杨 帅¹

(1. 河北科技大学电气工程学院, 石家庄 050018; 2. 国网河北省电力有限公司超高压分公司, 石家庄 050070)

摘要: 分合闸电磁铁机构故障是真空断路器分断异常、拒动、误动的主要原因,准确分析真空断路器分闸电磁铁运行状态,对电力系统的稳定运行具有重要意义。文中以真空断路器分闸电磁铁为研究对象,建立真空断路器分闸电磁铁动态仿真模型。首先,对分闸电磁铁动作原理进行推导,分析了正常状态下的动铁心运行状态。其次,对比了接触不良、铁心卡涩、匝间短路故障状态下仿真电流波形特点,系统分析了不同故障对断路器分闸的影响。最后进行断路器分闸电磁铁故障模拟分闸实验,接触不良、铁心卡涩、匝间短路3种故障进行设置,采集故障状态下的分闸线圈电流与仿真波形进行对比,实验结果验证了仿真模型的有效性,该模型为断路器电磁机构故障分析、故障监测及状态评估提供了重要手段。

关键词: 电磁铁; 运动特性; 线圈电流; 故障分析; 真空断路器

Dynamic Simulation and Fault Analysis of the Opening Electromagnet in Vacuum Circuit Breaker

ZHANG Yan¹, FU Xinzhe¹, WANG Zhaolei², WANG Fang¹, YANG Shuai¹

(1. School of Electrical Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018, China; 2. State Grid Hebei Extra High Voltage Company, Shijiazhuang 050070, China)

Abstract: The fault of the opening and closing electromagnetic mechanism is the main reason for the abnormal switching, refusal operation and mal-operation of vacuum circuit breaker. Accurate analysis of the operating state of the opening electromagnet of the vacuum circuit breaker is of great significance for stable operation of power system. In this paper, the opening electromagnet of the vacuum circuit breaker is taken the study object and a dynamic simulation model of the opening electromagnet of the vacuum circuit breaker is set up. First, the operating principle of the opening electromagnet is derived and the operating state of the plunger in normal condition is analyzed. Then, the simulation current waveform characteristics under such failure states as poor contact, core jamming and inter-turn short circuit are compared to analyze systematically the influence of different faults on the opening of the circuit breaker. Finally, a simulated opening experiment is performed on the circuit breaker's opening electromagnet, with three types of faults- poor contact, core jamming and inter-turn short circuit, being configured. The opening coil current under fault conditions is collected and compared with the simulated waveforms. The effectiveness of the simulation model is verified by the experimental result, which provides an important means for fault analysis, fault monitoring, and condition assessment of circuit breaker electromagnet mechanisms.

Key words: electromagnet; motion characteristic; coil current; fault analysis; vacuum circuit breaker

0 引言

高压真空断路器是在电力系统中起到保护和控制作用的关键设备,其运行状态对于整个电力系

统的安全有着重要意义^[1-5]。相关调查统计表明,在各类高压断路器故障中,断路器操作机构机械及其辅助控制回路故障在所有故障中占比约为60%,且呈逐年上升趋势^[6-10]。高压真空断路器电磁机构零件

收稿日期:2026-02-13; 修回日期:2026-05-27

基金项目:河北省自然科学基金(E2019208443);河北省高等学校科学技术研究项目(ZD2021202)。

Project Supported by Hebei Natural Science Foundation(E2019208443), Science and Technology Research Project of Colleges and Universities in Hebei Province(ZD2021202).

多、结构复杂,在长期运行过程中分合闸电磁铁容易出现动铁心生锈卡涩、线圈绝缘破损匝间短路、线路控制触点接触不良等故障导致断路器无法正常分合闸发生事故^[11-15]。在真空断路器电磁结构检修过程中大部分故障人工检修不易被发现。因此,需要对分合闸电磁铁运行状态进行在线状态监测。

高压断路器在分闸动作过程中,分闸电磁铁线圈电流可以反映出断路器分闸的状态信息,通过分析电流波形对断路器电磁机构故障做出诊断^[18-25]。目前研究主要方法是通过模拟故障实验,采集分合闸线圈电流信号、振动信号、声音信号,根据采集到的信号对真空断路器故障进行分析^[26-30]。但是,进行高压真空断路器故障模拟实验存在成本高、故障程度不易把握、获取的信号容易受到干扰导致故障特征不准确、同种故障采集到的信号存在差异难以进行横向对比,因此需要借助仿真方法对故障进行模拟分析。文[31]建立了操作机构分闸电磁系统仿真参数化模型,研究了断路器分合闸电磁铁电气参数对线圈电流的影响。为了对真空断路器故障类型进行分析,任明等人借助主成分分析方法构建了三元特征图谱,直观展示了不同故障下波形曲线的演变过程,并将真空断路器故障分类准确率提高到了97%以上^[32]。文[33]介绍了如何利用有限元方法对电磁铁进行三维磁场分析,得到了电磁铁磁通密度与线圈电流之间的关系。文[34]建立了断路器分合闸动作数学模型,对分合闸电磁铁在不同故障下的线圈电流变化进行了对比分析,分析了不同故障下线圈电流的变化特点,但文中缺少对分闸电磁铁的速度、电磁力等动作特性进行分析。

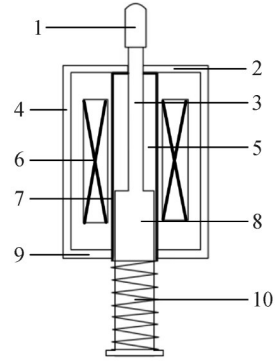
对于以上问题,文中以施耐德公司ZN63(VS1)型号高压真空断路器为研究对象,采用场路结合方法建立分闸电磁铁动态有限元模型,对分闸电磁铁动作状态进行分析,研究了高压真空断路器分闸电磁铁在分闸过程中动铁心速度、电磁力、线圈电流的变化特点。对接触不良、铁心卡涩、匝间短路故障进行仿真模拟,对比不同故障下线圈电流波形的故障特点。最后,设计不同故障类型实验,采集实验线圈电流信号并与仿真线圈电流信号进行对比,根据实验结果验证了仿真模型分析的准确性。

1 高压真空断路器分闸电磁铁动作分析

高压真空断路器采用电磁铁进行分合闸脱扣,分合闸脱扣能量来自于储能弹簧,储能弹簧通过电机进行储能,再通过分合闸电磁铁进行脱扣释放弹簧能量,进而完成分合闸。因此分合闸电磁铁在断

路器分合闸过程起到关键性作用。

施耐德公司ZN63型号高压真空断路器中分闸电磁铁结构见图1,该电磁铁结构在高压断路器分合闸机构中应用广泛,具有电磁力大、分断时间快、结构简单等优点。



1—推杆头;2—上磁轭;3—推杆;4—侧磁轭;5—工作气隙;6—线圈;7—导向管;8—动铁心;9—下磁轭;10—复位弹簧。

图1 断路器电磁铁结构图

Fig. 1 Structure diagram of circuit breaker electromagnet

通过分析分闸电磁铁动作过程及原理,可得到断路器二次侧分闸电磁铁等效电路,见图2。

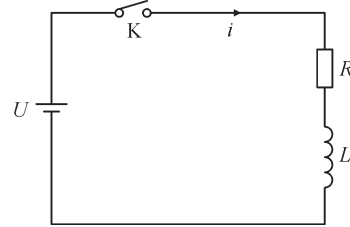


图2 分闸电磁铁等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit of opening electromagnet

图2中: U 为直流供电电压; K 为开关; L 、 R 分别为分闸线圈的电感、电阻。根据等效电路可列写分闸电磁铁电压方程为

$$U = Ri(t) + \frac{d\psi}{dt} = Ri(t) + L(x)\frac{di}{dt} + i\frac{dL(x)}{dx} \quad (1)$$

式(1)中: i 为线圈电流; ψ 为线圈磁链; x 为动铁心位移; $L(x)$ 为随动铁心位移 x 变化的非线性线圈电感; v 为动铁心运动速度。电磁铁动态吸力计算公式为

$$F_s = \frac{1}{2}i^2 \frac{dL(x)}{dx} \quad (2)$$

式(2)中, F_s 为电磁铁动态吸力。

动铁心运动阻力计算公式为

$$f = f_1 + mg + k(x + l_0) \quad (3)$$

式(3)中: f 为动铁心运动阻力; f_1 为动铁心和导向管之间的摩擦力; k 为复位弹簧弹性系数; l_0 为复位弹簧压缩长度。由于文中针对的断路器型号中分闸电磁铁为竖直摆放,所以动铁心额外受到自身重力 mg ,其中 m 为动铁心质量, g 为重力加速度。

根据式(1)-(3)可推导出分闸电磁铁运动方程

$$\begin{cases} F_s - f = m \frac{dx^2}{dt^2} \\ i = \frac{1}{L(x)} \int_0^t \left[u - iR - v \frac{dL(x)}{dx} \right] dt \\ v = \frac{1}{m} \int_0^t (F_s - f) dt \\ x = \int_0^t v dt \end{cases} \quad (4)$$

由式(2)、(4)可得到电磁吸力 F_s 是线圈电流和电流 i 和位移 x 的函数也是时间 t 的函数。同时以可得到分闸电磁铁分闸时的电流特性 i 、速度特性 v 、位移特性 x 。所以,分闸电磁铁动态特性不仅与电磁铁自身参数有关,还与电磁铁相关联的机械结构的状态有关,电磁铁的动态特性完全可以从线圈电流变化中体现出来,因此基于分合闸线圈电流对断路器进行故障诊断的研究切实可行^[35]。

为进一步分析分闸电磁铁动作状态与线圈电流的关系对分合闸线圈电流进行测量,分闸电磁铁线圈电流试验波形见图3。

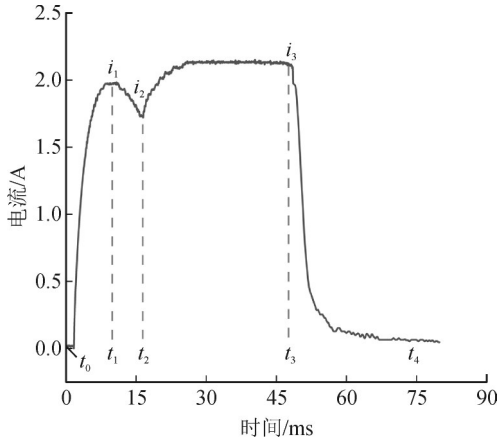


图3 分闸电磁铁线圈电流实验波形

Fig. 3 Current waveform of the opening electromagnet coil obtained from the experiment

根据分闸的不同阶段电磁铁线圈电流变化主要分为4个阶段。

1)第1阶段($t_0 \sim t_1$)。动铁心静止 $v=0$, t_0 时刻开始通电,电流指数型增涨,在 t_1 时刻线圈电流达到 i_1 ,此阶段线圈电流表达式为

$$i(t) = \frac{U}{R} (1 - e^{-\frac{R}{L_m} t}) \quad (5)$$

电流上升速率为

$$\frac{di(t)}{dt} = \frac{U}{L_m} e^{-\frac{R}{L_m} t} \quad (6)$$

式(5)、(6)中: U 为电源电压; R 为线圈回路电阻; L_m 为电磁铁静止时的电感。第1阶段线圈电流较小,动铁心受到的电磁力小于摩擦力、动铁心重力、复位弹簧压缩弹力三者之和的阻力动铁心静止不动,此时电磁铁工作气隙最大电感最小,结合式(2)、

(3)可以得出电源电压、线圈回路电阻、电磁铁工作气隙、阻力共同影响分闸线圈电流第一阶段的持续时间、电流上升速率、电流大小。第1阶段的持续时间、电流上升速率以及峰值 i_1 的大小,可以反应出电磁铁是否存在铁心卡滞、线圈回路接触不良,电源电压波动等问题。当线圈电流达到第一个峰值 i_1 后,动铁心所受电磁力大于阻力开始运动进入第2阶段。

2)第2阶段($t_1 \sim t_2$)。动铁心动作 $v>0$,在此阶段,动铁心运动速度不断增大,电磁铁工作气隙逐渐减小线圈电感不断增大,磁阻不断减小,铁心在运动过程中产生反电动势,导致线圈电流减小。 t_2 时刻铁心运动速度达到最大,动铁心运动到位,撞杆与分闸脱扣器撞击。由式(3)、(4)可得,动铁心在此阶段的运动状态受到阻力影响,该阶段的持续时间及电流模型可反映出分闸电磁铁动铁心与导向管之间是否存在卡涩,如果卡涩该阶段时间将会延长,同时,如果出现弹簧疲软故障则动铁心所受到的阻力减小,加速度增大,动铁心会提前到达脱扣位置,第2阶段持续时间变短。

3)第3阶段($t_2 \sim t_3$)。动铁心保持静止 $v=0$,分闸机构进行分闸。 t_2 时刻动铁心运动到位,此时电磁铁工作气隙最小电感最大为 L_m ,线圈电流表达式见式(7),从 t_2 时刻电流以指数形式速率上升在 t_3 时刻电流达到峰值,由于 $L_m > L_m$ 所以该阶段电流上升速度小于第1阶段电流上升速度。第3阶段的持续时间主要与分闸脱扣机械结构相关,在此阶段可通过电流反映出分闸脱扣机械结构是否存在故障。

$$i = \frac{U}{R} (1 - e^{-\frac{R}{L_m} t}) \quad (7)$$

4)第4阶段($t_3 \sim t_4$)。分闸完成。 t_3 时刻控制回路辅助开关断开,由于辅助开关的分离,线圈电感电流以辅助开关分离点间的电弧和向寄生电容充电的方式得以续流。因此,阶段4电流波形呈现迅速减小的现象,直至电流彻底消失。该阶段可通过对比正常电流波形的圆滑程度和下降速度反映出分闸回路辅助触点是否完好^[36]。

通过对断路器分闸电磁铁等效电路及运动状态分析,明确了分闸电磁铁工作原理,为建立分闸电磁铁模型和诊断分闸电磁铁故障提供了理论基础。

2 分闸电磁铁动作建模

2.1 分闸电磁铁动作仿真模型设计

采用场路结合方法建立断路器分闸电磁铁动

态仿真模型,模型示意图见图4。选用二维轴对称瞬态仿真模型模拟空间三维电磁铁,减小计算量的同时保留了计算精度。为模拟断路器分闸电磁铁完整动作过程,文中在建模过程中设计了电磁铁脱扣结构,通过事件接口定义动铁心与脱扣片接触撞击后电流关闭动作,结合状态指示器对动铁心不同的状态定义不同变量,并设置动铁心受到的电磁力与弹簧阻力以及与脱扣器撞击位置之间的逻辑关系,根据逻辑关系可以模拟断路器分闸动作的整个过程。

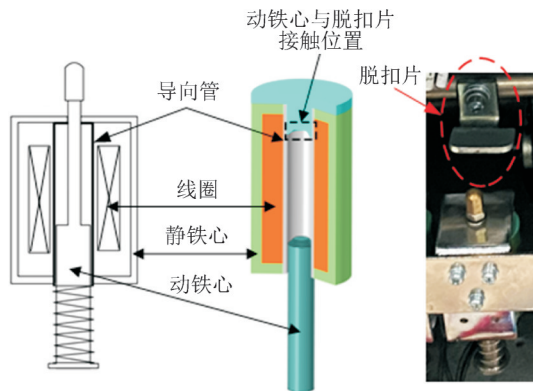


图4 分闸电磁铁仿真模型示意图

Fig. 4 Schematic diagram of simulation model for opening electromagnet

2.2 分闸电磁铁动作模型激励及参数设置

模型材料设置参照ZN63型号断路器电磁铁材料,线圈区域材质为金属铜,动铁心和静铁心材质为软铁,导向管材质为金属铜,其余空间和气隙采用空气填充,其他具体电气参数见表1。

表1 分闸电磁铁主要电气参数

Table 1 Main electrical parameters of the opening electromagnet

电气参数	数值
额定工作电压/V	DC 220
额定工作电流/A	2.3
线圈电阻/ Ω	100
线圈匝数	4 700
线径/mm	0.23

分闸电磁铁线圈激励设置中采用场路耦合方法,在电路设置中设置220 V直流电压源作为供电电源,线路中通过串接电阻和电感模拟分闸电磁铁线圈以外的线路电阻和线路电感。在模型参数设置中为保证仿真模型参数与真实模型参数一致对电磁铁结构尺寸进行了测量,对电磁铁竖直静止状态下的阻力和滑动时的阻力采用测力计分别进行测量,针对线圈电阻采用万用表对室温温度下的线圈电阻进行实测,根据测试结果对模型参数进行

修正。

2.3 分闸电磁铁动作仿真模型力计算及网格划分

在有限元电磁力计算中采用了Maxwell应力张量法计算磁场力与机械运动之间的相互作用,Maxwell应力张量方法是基于电磁场Maxwell方程组,利用应力张量与磁场乘积对电磁力进行计算,Maxwell应力张量法电磁力为^[37-38]

$$F = \int_S (T_{ij} \cdot n_j) \cdot dS \quad (8)$$

式(8)中: F 为电磁力大小; S 为动铁心受力面积; T_{ij} 为应力张量; n_j 为面积单位法向量; dS 为微面积元素。应力张量 T_{ij} 的计算公式为

$$T_{ij} = \frac{1}{\mu_0} \left[(B_i B_j - \frac{1}{2} B^2 \delta_{ij}) + \epsilon_0 (E_i E_j - \frac{1}{2} E^2 \delta_{ij}) \right] \quad (9)$$

式(9)中: ϵ_0 为真空中介电常数; μ_0 为真空中磁导率; B_i, B_j, E_i, E_j 分别为磁场和电场在各个坐标轴上的分量; δ_{ij} 为克罗内克函数。在使用Maxwell应力张量法求解电磁力时,由于动铁心顶端、底端存在倒角和尖端,尖端附近网格稀疏时会因为表面法向不确定性影响结果准确性,因此为保证Maxwell应力张量法的计算精度单独对力计算区域进行了网格加密见图5。

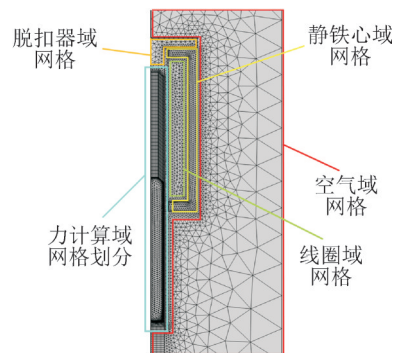


图5 网格划分

Fig. 5 Grid division

在求解器设置中采用瞬态求解器,并且为了减小计算量保留计算精度,根据分闸电磁铁不同阶段的动作特点,对分闸过程中电流变化大变化速度快的第1阶段,第2阶段动铁心动作阶段、第4阶段分闸完成阶段设置较小的时间步长,对电流变化平缓的第3阶段分闸阶段设置较大的时间步长,以此提高计算效率。

3 分闸电磁铁故障模拟及分析

3.1 分闸电磁铁正常状态模拟

通过对分闸断路器电磁铁建模求解,得到了正常

状态下的分闸电磁铁的运动状态特性曲线,见图6、7。

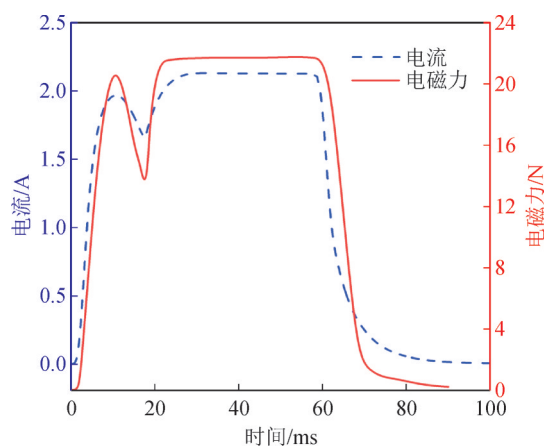


图6 正常状态下动铁心电磁力及线圈电流曲线

Fig. 6 Electromagnetic force and coil current curve of moving iron core under normal state

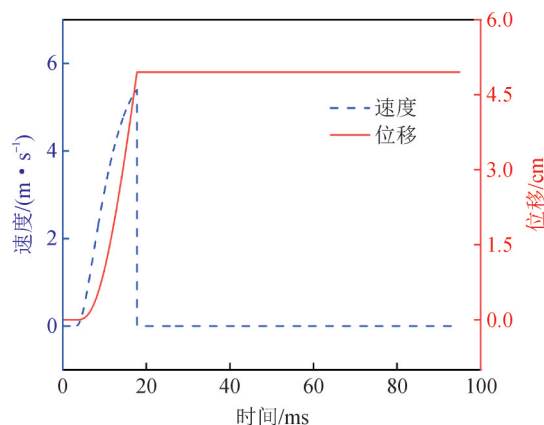


图7 正常状态下动铁心速度及位移曲线

Fig. 7 Velocity and displacement curve of moving iron core under normal state

从图6分析电流波形可知,仿真线圈电流波形分为4个阶段,与理论分析一致。结合动铁心电磁力波形分析可得,初始时刻线圈电流与电磁力都为0,在 t_1 时刻线圈电流达到第一个峰值1.96 A,此时电磁力也同样达到第一个峰值为20.52 N;在 t_2 时刻由与反电动势的产生线圈电流下降此刻电流为1.71 A,电磁力为13.75 N;在 t_3 时刻线圈电流达到最大值为2.12 A,此时电磁力为21.73 N。整个分合闸过程电磁力大小与线圈电流大小正相关。

从图7可知,动铁心在撞击分闸脱扣器时达到最大速度为5.39 m/s 同时动铁心位移达到最大行程4.95 cm。

3.2 分闸电磁铁线圈回路接触不良故障

接触不良故障通常是由于线圈分断辅助触点烧蚀老化造成的接触电阻增大,所以仿真模型中在电路部分通过设置不同阻值的电阻串接在线圈回

路中来模拟接触不良故障的不同程度。正常状态和分别接入10、20、30 Ω 时的接触不良故障状态线圈电流波形见图8。

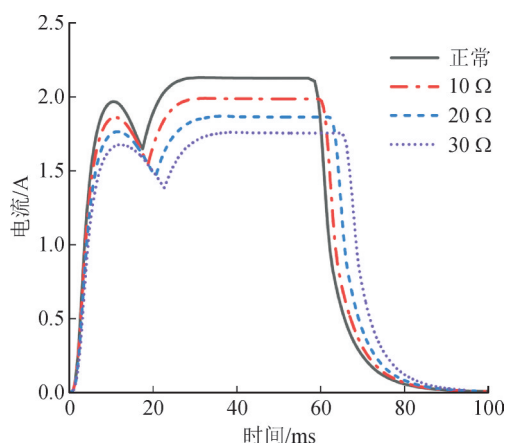


图8 接触不良

Fig. 8 Poor contact

线圈回路发生接触不良故障时回路电阻增大,结合式(4)当控制电压一定回路电阻增大线圈电流减小,动铁心所受电磁力减小,第2阶段动铁心运动速度变慢,导致动铁心运动到最大行程需要更长时间,无法按时完成分闸。将不同状态下的分闸电磁铁线圈实验测试电流与仿真计算结果进行对比,见图9。由图9分析可以看出,仿真与试验得到的波形变化规律相同。

从图9中可以看出发生接触不良故障后分闸电磁铁分闸速度明显变慢,接触不良电阻达到30 Ω 时分闸时间与额定分闸时间相比慢5.32 ms。同时,接触电阻增大线圈电流降低,会导致脱扣时的电磁力降低,增加第3阶段分闸脱扣失败的风险。因此,线圈回路接触不良故障主要影响分闸的第2阶段和第3阶段。通过判断线圈电流最大值和分闸时间可对接触不良故障作出相应判断。

3.3 分闸电磁铁动铁心卡涩故障

铁心卡涩故障时断路器分闸电磁铁的常见故障之一,由于分合闸过程中动铁心与导向管频繁摩擦,导致铁心与导向管之间摩擦阻力增大。仿真模型中通过设置动铁心与导向管之间不同的摩擦力大小来模拟铁心卡涩故障。额定状态下根据实验测试获得动铁心与导向管之间摩擦力和自身重力总和为0.6 N,仿真模型中额外设置摩擦力2、4、6 N,其仿真电流波形见图10。

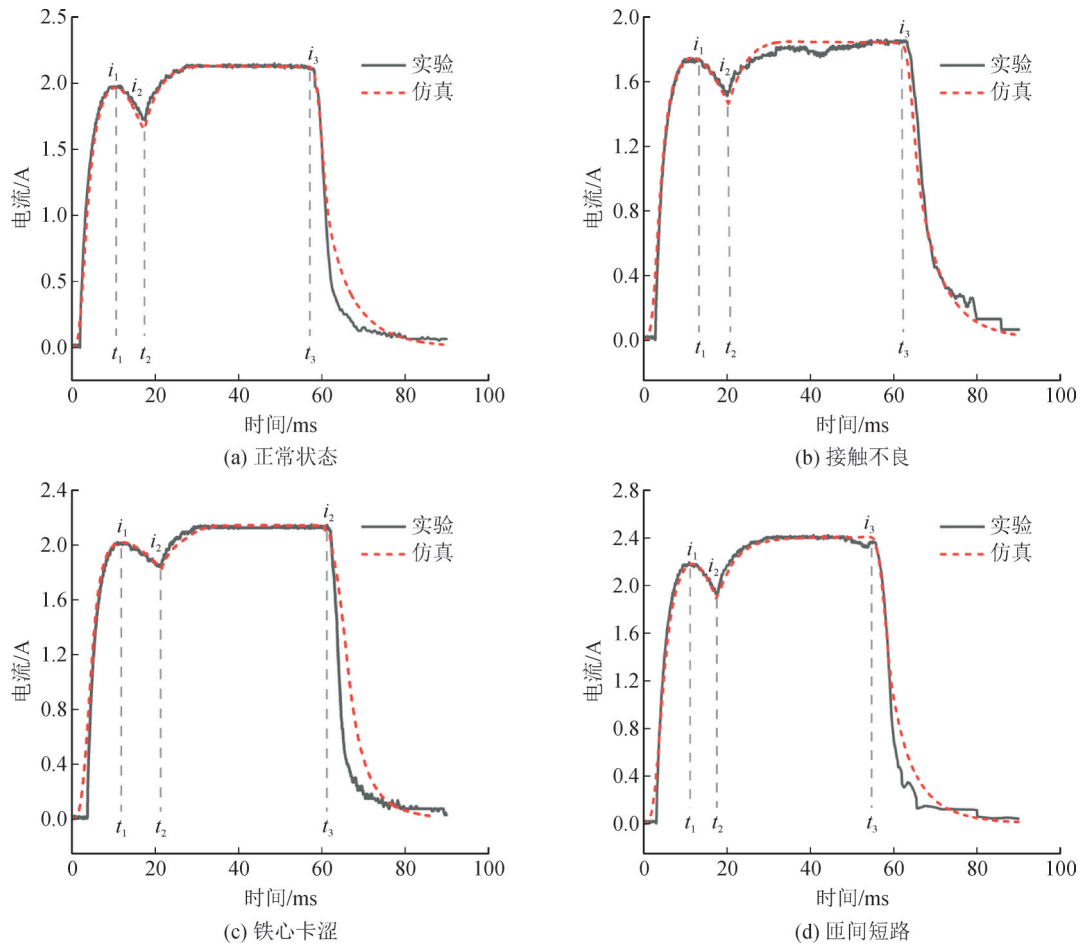


图9 不同状态仿真与实验电流曲线对比

Fig. 9 Comparison of simulation and experimental current curves in different states

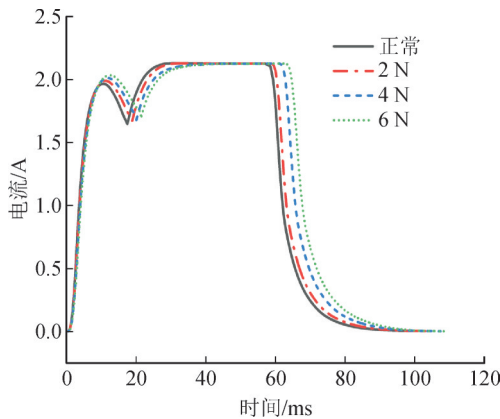


图10 铁心卡涩

Fig. 10 Iron core jamming

由图10可以发现,随摩擦力的增加,分闸电磁铁动铁心达到最大行程时间增加,分闸完成时间延长,同时由于摩擦力的增加动铁心动作需要更大的电磁力,因此在当电流达到第一个峰值时摩擦力越大峰值越大。当卡涩阻力设置为6 N时分闸完成时间比额定分闸完成时间慢5.13 ms,铁心卡涩故障严重时会导致分闸机构拒动发生事故。结合式(4)通过分析可知铁心卡涩故障主要增大摩擦力 f 影响分闸的第2阶段。

3.4 分闸电磁铁线圈匝间短路故障

断路器分合闸电磁铁线圈匝间短路故障是线圈烧毁的主要原因,通常线圈绝缘会存在生产时绝缘漆涂抹不均匀以及后续加工缠绕时绝缘破损导致存在匝间短路。另外,线圈长时间工作后线圈外部绝缘也会存在绝缘老化问题。仿真模型中通过减少线圈匝数来模拟分闸电磁铁的匝间短路故障,分别设置了正常状态和短路10%、20%、30%线圈电流波形见图11。

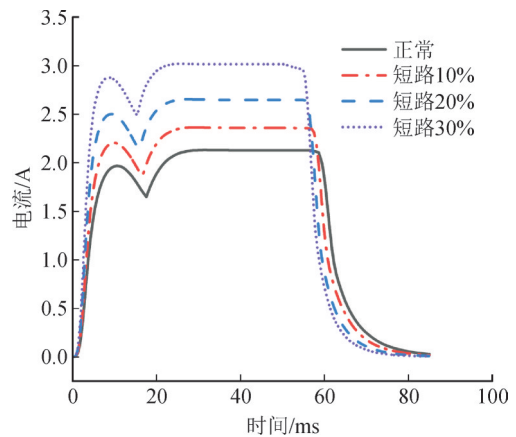


图11 匝间短路

Fig. 11 Interturn short circuit

从图 11 可以发现,发生匝间短路故障后分闸线圈电流的 4 个阶段时间均提前,不同阶段线圈电流也整体上升。随短路程度的增加线圈电流迅速增加,但分闸时间并未明显提前,当短路 30%时分闸完成时间比正常状态提前 4.12 ms,最大峰值电流从正常状态的 2.12 A 增至 3.01 A,线圈电流的增大会使线圈温升超标加速线圈的老化,如不及时发现更换线圈则长时间工作会从匝间短路逐渐转变为层间短路最终烧毁线圈。

4 实验验证

为验证仿真模型的准确性,搭建了断路器故障实验平台见图 12。实验采用施耐德 ZN63 12 kV 高压断路器;电流传感器为霍尔闭环直流电流传感器,响应时间小于 $1\ \mu\text{s}$ 、采样频率 0~100 kHz、量程 DC 0~5 A,采样变比 5 A/5 V;数据采集装置为 Hantek 6000BE 型号数据采集卡,该型号采集卡具有 2.4 MSa/s 实时采样率和 1 mV 的灵敏度;阻力测力计型号为 WDMF-100,量程 0~100 N,精度 1%。将电流传感器与分闸电磁铁线圈相连,在利用数据采集卡采集电流传感器中的线圈电流信号,最后通过 USB 总线上传到电脑中。

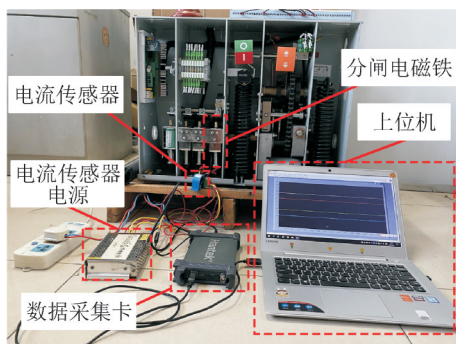
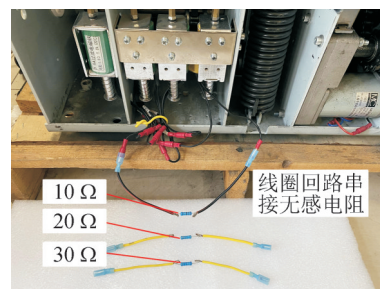


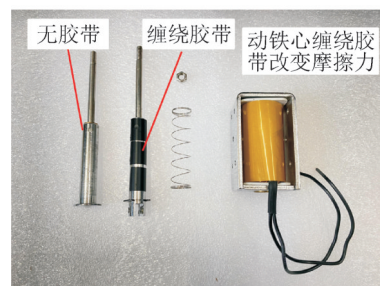
图 12 分闸故障模拟实验平台

Fig. 12 Opening fault simulation experiment platform

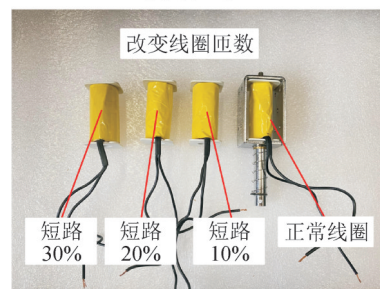
在断路器分闸故障模拟实验中,接触不良故障通常是由于线圈分断辅助触点烧蚀老化造成的接触电阻增大,所以实验通过在线圈回路串接电阻进行模拟见图 13(a);铁心卡涩故障通过在动铁心上缠绕部分胶带增加动铁心与导向管之间的摩擦力并采用拉力计进行阻力测量,以此模拟铁心卡涩故障见图 13(b);在匝间短路故障模拟中,对同一分闸电磁铁定制线径相同匝数不同的线圈模拟匝间短路故障见图 13(c)。



(a) 接触不良



(b) 铁心卡涩



(c) 匝间短路

图 13 分闸电磁铁故障模拟方案设置

Fig. 13 Setting of the simulation scheme for the fault of the opening electromagnet

断路器分闸电磁铁在正常状态、匝间短路、接触不良、铁心卡涩时的实验波形与仿真电流波形对比见图 9,其中接触不良故障中串接电阻为 $20\ \Omega$,铁心卡涩故障摩擦力为 6 N,线圈匝间短路故障中选用了短路程度约为 10%的线圈。

不同状态分闸电磁铁分闸仿真与实测电流曲线的特征值及误差率见表 2-5。

表 2 正常状态仿真与实测曲线的特征值及误差

Table 2 Characteristic values and errors of simulated and measured curves in normal state

参数	t_1/ms	t_2/ms	t_3/ms	i_1/A	i_2/A	i_3/A
实验值	10.76	17.59	57.44	1.96	1.73	2.11
仿真值	10.92	17.42	57.49	1.98	1.65	2.12
误差率/%	-1.48	0.97	-0.08	-1.02	4.62	-0.47

表3 接触不良仿真与实测曲线的特征值及误差

Table 3 Characteristic values and errors of simulated and measured curves with poor contact

参数	t_1/ms	t_2/ms	t_3/ms	i_1/A	i_2/A	i_3/A
实验值	10.87	20.16	61.24	1.74	1.51	1.88
仿真值	10.79	20.52	60.89	1.72	1.46	1.83
误差率/%	0.74	-1.79	0.57	1.15	3.31	2.60

表4 铁心卡涩仿真与实测曲线的特征值及误差

Table 4 Characteristic values and errors of simulation and measured curves of iron core stuck

参数	t_1/ms	t_2/ms	t_3/ms	i_1/A	i_2/A	i_3/A
实验值	11.23	21.26	62.87	2.01	1.84	2.14
仿真值	11.58	21.75	62.62	2.01	1.82	2.13
误差率/%	-3.12	-2.30	0.39	0.00	1.09	0.47

表5 匝间短路仿真与实测曲线的特征值及误差

Table 5 Characteristic values and errors of simulation and measured curves of interturn short circuit

参数	t_1/ms	t_2/ms	t_3/ms	i_1/A	i_2/A	i_3/A
实验值	11.31	16.91	56.09	2.20	1.91	2.35
仿真值	11.81	16.62	56.64	2.21	1.88	2.39
误差率/%	-4.42	1.71	-0.62	-0.45	1.57	-1.70

从表2-5可以看出,特征值误差率在5%以内,说明了该模型可有效反映出断路器分闸电磁铁在正常状态、接触不良、铁心卡涩、匝间短路不同状态下的特征。结合图9可以得出,在铁心撞击脱扣器时仿真与实验误差较大,分析可知动铁心与脱扣器撞击时与脱扣器之间存在作用力,在仿真模型中难以进行模拟。另外,在 t_3 时刻线圈回路断开时由于实验过程中开关触点断开会存在拉弧现象,该现象在电磁仿真中模拟存在困难,因此该阶段仿真与实验值存在误差较大。

5 结论

文中以高压真空断路器分闸电磁铁为研究对象,建立了断路器分闸动作有限元瞬态模型。对正常状态下分闸电磁铁动作过程中动铁心运动速度、位移、动铁心所受电磁力、线圈电流变化特性进行计算,同时模拟了接触不良、铁心卡涩、匝间短路等故障状态下分闸线圈电流的变化情况,并进行电流特性分析。

1)当电磁铁出现线圈回路接触不良故障时,断路器线圈电流低于额定值,分闸时间变长,接触不良故障主要影响线圈电流变化的第2阶段和第3阶段。

2)当出现铁心卡涩故障时,第1阶段线圈电流

峰值高于正常状态线圈电流峰值,分闸时间明显变长,铁心卡涩故障主要影响线圈电流变化的第2阶段。

3)当出现匝间短路故障时线圈电流高于额定值,动铁心运动速度加快导致分闸时间提前,但匝数的减少会带了线圈电流的增加和电感的降低,当匝间短路程度严重时可直接导致线圈烧毁和分闸电磁铁拒动故障。

最终通过设计断路器分闸故障模拟实验验证了仿真模型的准确性有效性,利用该模型进行了断路器故障分析解决断路器故障模拟困难,成本高等问题,为断路器的故障故障检测、故障识别提供重要参考。

参考文献:

- [1] 胡博凯,李奎,牛峰,等. 低压断路器机械特性状态监测方法研究[J]. 电工技术学报,2022,37(13):3317-3330.
Hu Bokai, Li Kui, Niu Feng, et al. Research on condition monitoring method of mechanical characteristics of low-voltage circuit breaker[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022,37(13):3317-3330.
- [2] 韩翔宇,纽春萍,何海龙,等. 电磁式断路器状态监测与智能评估技术综述[J]. 电工技术学报,2023,38(8):2191-2210.
Han Xiangyu, Niu Chunping, He Hailong, et al. Review of condition monitoring and intelligent assessment of electromagnetic circuit breaker[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023,38(8):2191-2210.
- [3] 孙曙光,魏硕,王景芹,等. 基于深度学习的万能式断路器剩余寿命预测优化方法[J]. 电测与仪表,2025,62(5):200-207.
Sun Shuguang, Wei Shuo, Wang Jingqin, et al. Optimization method for remaining life prediction of conventional circuit breaker based on deep learning[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2025,62(5):200-207.
- [4] 盛勇兵,唐付龙,张进,等. 智慧小型断路器操作机构设计与分析[J]. 电器与能效管理技术,2024(7):50-53.
Sheng Yongbing, Tang Fulong, Zhang Jin, et al. Design and analysis on operating mechanism of smart miniature circuit breakers[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2024(7):50-53.
- [5] 冯春贤,于彦雪,时珉,等. 混合同步控制型构网变流器阻抗建模及稳定性分析[J]. 智慧电力,2026,54(1):118-127.
Feng Chunxian, Yu Yanxue, Shi Min, et al. Impedance modeling and stability analysis of hybrid synchronization-controlled grid-forming converters[J]. Smart Power, 2026,54(1):118-127.
- [6] 万书亭,马晓棣,陈磊,等. 基于振动信号短时能熵比与DTW的高压断路器状态评估及故障诊断[J]. 高电压技术,2020,46(12):4249-4257.
Wan Shuting, Ma Xiaodi, Chen Lei, et al. State evaluation and fault diagnosis of high-voltage circuit breaker based on short-time energy entropy ratio of vibration signal and DTW[J]. High Voltage

- Engineering, 2020, 46(12): 4249-4257.
- [7] 郅鑫, 文韬, 韩彬, 等. 考虑变电站内接线和拓扑瞬态调整的断路器短路电流分析[J]. 电力建设, 2024, 45(7): 113-121.
Qie Xin, Wen Tao, Han Bin, et al. Analysis of short-circuit current of circuit breakers considering substation wiring and topology transient adjustment[J]. Electric Power Construction, 2024, 45(7): 113-121.
- [8] 张东进, 何柏娜, 程婷, 等. 基于振荡回路的光伏直流断路器拓扑结构设计[J]. 供用电, 2024, 41(6): 97-107.
Zhang Dongjin, He Baina, Cheng Ting, et al. Topology design of photovoltaic DC circuit breaker based on oscillation circuit[J]. Distribution & Utilization, 2024, 41(6): 97-107.
- [9] 李奎, 于明浩, 牛峰, 等. 电磁式漏电断路器保护特性分析与稳健性设计[J]. 电工技术学报, 2025, 40(22): 7375-7386.
Li Kui, Yu Minghao, Niu Feng, et al. Protection characteristics analysis and robustness design of electromagnetic residual current device[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2025, 40(22): 7375-7386.
- [10] 苟方杰, 王忠飞, 邱东, 等. 具备低幅值振荡电流和重合检测功能的晶闸管型混合式直流断路器[J]. 电力科学与技术学报, 2025, 40(6): 164-174.
Gou Fangjie, Wang Zhongfei, Qiu Dong, et al. Thyristor-based hybrid DC circuit breaker with low-amplitude oscillation current and reclosing detection function[J]. Journal of Electric Power Science And Technology, 2025, 40(6): 164-174.
- [11] Yang Jian, Ruan Zhe, Zhuang Zhou, et al. Fault identification for circuit breakers based on vibration measurements[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2020, 69(7): 4154-4164.
- [12] Wang Yanxin, Yan Jing, Ye Xinyu, et al. Few-shot transfer learning with attention mechanism for high-voltage circuit breaker fault diagnosis[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2022, 58(3): 3353-3360.
- [13] 王冰青, 张森林. 基于Maxwell 3D/ADAMS的小型断路器脱扣过程仿真[J]. 电器与能效管理技术, 2024, (7): 74-78.
Wang Bingqing, Zhang Senlin. Simulation of tripping process of miniature circuit breaker based on Maxwell 3D/ADAMS[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2024, (7): 74-78.
- [14] 王鹤钧, 姜炯挺, 蒋科若, 等. 基于角点定位的高压断路器分合闸线圈电流特征提取及状态判别[J]. 浙江电力, 2024, 43(6): 125-132.
Wang Shaohu, Jiang Jiongting, Jiang Keruo, et al. Feature extraction and state discrimination of opening and closing coils of highvoltage circuit breakers based on corner point location[J]. Zhejiang Electric Power, 2024, 43(6): 125-132.
- [15] 樊荣, 刘俊翔, 莫永鹏, 等. 高压真空断路器分闸过程中段缓冲装置的仿真设计与研究[J]. 高压电器, 2026, 62(2): 19-24.
Fan Rong, Liu Junxiang, Mo Yongpeng, et al. Simulation design and study of mid-stage buffer device during the opening process of high voltage vacuum circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2026, 62(2): 19-24.
- [16] 邵阳, 武建文, 马速良, 等. 用于高压断路器机械故障诊断的AM-Relief特征选择下集成SVM方法[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(8): 2890-2900.
Shao Yang, Wu Jianwen, Ma Suliang, et al. Integrated SVM method with AM-Relief feature selection for mechanical fault diagnosis of high voltage circuit breakers[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(8): 2890-2900.
- [17] 王艳新, 闫静, 王建华, 等. 基于特征融合度量学习的高压断路器机械故障诊断[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(9): 98-105.
Wang Yanxin, Yan Jing, Wang Jianhua, et al. Mechanical fault diagnosis for high voltage circuit breaker via a novel feature fusion metric learning[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(9): 98-105.
- [18] 金立军, 张志伟, 郑含博, 等. 基于物理信息网络的高压断路器分合闸电流分析及故障诊断[J]. 电力系统保护与控制, 2026, 54(10): 162-172.
Jin Lijun, Zhang Zhiwei, Zheng Hanbo, et al. Analysis of opening/closing coil current and fault diagnosis of high-voltage circuit breakers based on physics-informed neural networks[J]. Power System Protection and Control, 2026, 54(10): 162-172.
- [19] 范兴明, 许洪华, 张思舜, 等. 基于改进蜣螂优化算法深度混合核极限学习机的高压断路器故障诊断[J]. 电工技术学报, 2025, 40(12): 3994-4003.
Fan Xingming, Xu Honghua, Zhang Sishun, et al. Fault diagnosis of high voltage circuit breaker based on improved dung beetle optimizer algorithm deep hybrid kernel extreme learning machine[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2025, 40(12): 3994-4003.
- [20] 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.
- [21] Zhang Jianzhong, Wu Yongbin, Xu Zheng, et al. Fault diagnosis of high voltage circuit breaker based on multi-sensor information fusion with training weights[J]. Measurement, 2022(192): 110894.
- [22] 屠立忠, 祝智祥, 洪岑岑, 等. 一种具有限流功能的电容型高压直流断路器[J]. 浙江电力, 2024, 43(8): 57-65.
Tu Lizhong, Zhu Zhixiang, Hong Cencen, et al. A capacitive high voltage DC circuit breaker incorporating a current limiting function[J]. Zhejiang Electric Power, 2024, 43(8): 57-65.
- [23] 李维希, 何晋, 胡林, 等. 基于最优云熵-灰云证据的中高压断路器健康状态综合评估[J]. 电子设计工程, 2024, 32(5): 60-65.
Li Weixi, He Jin, Hu Lin, et al. Comprehensive assessment of health status of medium and high voltage circuit breakers based on optimal cloud entropy-grey cloud evidence[J]. Electronic Design Engineering, 2024, 32(5): 60-65.
- [24] 赵彦军, 雷乔舒, 王国喜, 等. 断路器重击穿过电压对电容器组的影响及抑制策略研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2026, 47(1): 18-27.
Zhao Yanjun, Lei Qiaoshu, Wang Guoxi, et al. Research on the Impact of circuit breaker restrike overvoltage on capacitor banks and suppression strategies[J]. Power Capacitor & Reactive Power

- Compensation, 2026, 47(1): 18-27.
- [25] 章宝歌, 李国栋, 黄嘉宏, 等. 耦合电感辅助限流型混合式直流断路器拓扑[J]. 电力建设, 2025, 46(10): 23-33.
- Zhang Baoge, Li Guodong, Huang Jiahong, et al. Topology of a hybrid DC circuit breaker with coupled inductor-assisted current limiting[J]. Electric Power Construction, 2025, 46(10): 23-33.
- [26] 刘会兰, 许文杰, 赵书涛, 等. 面向高压断路器故障分类的电流—振动信号类聚几何敏感特征优选方法[J]. 电工技术学报, 2023, 38(1): 26-36.
- Liu Huilan, Xu Wenjie, Zhao Shutao, et al. Optimization method of clustering geometric sensitive features of current vibration signals for fault classification of high voltage circuit breakers[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(1): 26-36.
- [27] Yang Jian, Zhang Guo, Chen Bo, et al. Vibration signal augmentation method for fault diagnosis of low-voltage circuit breaker based on W-CGAN[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2023(72): 1-11.
- [28] 张 帅, 彭在兴, 李锐海, 等. 断路器分合闸线圈电流波形的差异机制研究[J]. 高压电器, 2020, 56(6): 165-172.
- Zhang Shuai, Peng Zaixing, Li Ruihai, et al. Research on the difference mechanism of current waveform of circuit breaker opening/closing coil[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(6): 165-172.
- [29] Hoidalén H K, Runde M. Continuous monitoring of circuit breakers using vibration analysis[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(4): 2458-2465.
- [30] 赵书涛, 许文杰, 刘会兰, 等. 基于振动信号谱形状熵特征的高压断路器操动状态辨识方法[J]. 电工技术学报, 2022, 37(9): 2170-2178.
- Zhao Shutao, Xu Wenjie, Liu Huilan, et al. Identification method for operation state of high voltage circuit breakers based on spectral shape entropy characteristics of vibration signals[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(9): 2170-2178.
- [31] 赵莉华, 张 浩, 景 伟, 等. 基于线圈电流的高压断路器操作机构性能研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2015, 47(5): 146-152.
- Zhao Lihua, Zhang Hao, Jing Wei, et al. Research on operating mechanism performance of high voltage circuit breaker based on the coil current[J]. Journal of Sichuan University(Engineering Science Edition), 2015, 47(5): 146-152.
- [32] 任 明, 陈荣发, 夏昌杰, 等. 基于三元图谱的真空断路器机电故障诊断研究[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(s1): 332-342.
- Ren Ming, Chen Rongfa, Xia Changjie, et al. Mechanical and electrical fault diagnosis of vacuum circuit breaker based on ternary plot[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(s1): 332-342.
- [33] 王立军, 张 拓, 刘光伟, 等. 高压断路器操动机构用合闸电磁铁动作特性仿真研究[J]. 高压电器, 2020, 56(7): 50-55.
- Wang Lijun, Zhang Tuo, Liu Guangwei, et al. Simulation study on action characteristics of closing electromagnet for operating mechanism of high voltage circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(7): 50-55.
- [34] 张 浩, 赵莉华, 景 伟, 等. 高压断路器弹簧机构电磁铁部分动态数学模型研究[J]. 高压电器, 2016, 52(7): 110-115.
- Zhang Hao, Zhao Lihua, Jing Wei, et al. Dynamic model of electromagnetic component in spring operating mechanism of high-voltage circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(7): 110-115.
- [35] 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 Taiheng, et al. Fault diagnosis for conventional circuit breaker based on switching coil current[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(2): 130-140.
- [36] 陈 辰, 厉小润. 基于线圈电流分析的操动机构故障诊断方法[J]. 浙江大学学报(工学版), 2016, 50(3): 527-535.
- Chen Chen, Li Xiaorun. Fault diagnosis method of circuit breaker operating mechanism based on coil current analysis[J]. Journal of Zhejiang University(Engineering Science), 2016, 50(3): 527-535.
- [37] Jefimenko O D. Correct use of maxwell stress equations for electric and magnetic fields[J]. American Journal of Physics, 1983, 51(11): 988-996.
- [38] Griffiths D J. Introduction to electrodynamics[M]. 3rd ed. New Jersey: Prentice Hall, 1998: 351-356.
- 张 岩(1983—), 男, 讲师, 博士, 硕士生导师, 主要研究方向为研究方向工程电磁场数值分析与应用(通信作者)(E-mail: yanyanfly163@163.com)。
- 符鑫哲(1996—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为断路器故障智能检测处理、断路器故障诊断技术(E-mail: 726855495@qq.com)。