

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2019.08.007

基于多物理场耦合的高速机械开关气体缓冲仿真研究

方春恩^{1,2}, 常晓丹^{1,2}, 李 伟^{1,2}, 任 晓^{1,2}, 张彼德^{1,2}

(1. 四川省电力电子节能技术与装备高校重点实验室, 成都 610039; 2. 西华大学电气与电子信息学院, 成都 610039)

摘要: 针对高压直流断路器用的气体绝缘高速机械开关行程短、分闸速度高和机械冲击大的问题, 文中提出一种气体缓冲系统用于降低触头运动速度和提高开关机械、电气性能。气体缓冲的高速机械开关的运动涉及瞬态电磁场、气流场和机械场等多物理场问题, 文中采用多物理场耦合方法, 利用有限元软件建立气体缓冲的高速机械开关动态模型, 仿真了气体缓冲的高速机械开关运动特性, 并分析了气体缓冲系统参数对开关动态性能的影响。仿真结果表明, 电磁斥力机构的金属盘高速运动导致内部气流场变化和产生的气体阻力能有效实现高速机械开关的缓冲, 同时气体压力在运动的最后阶段能恢复到初始气压, 为高速隔离开关的快速重合闸操作提供保证。

关键词: 电磁斥力机构; 动态特性; 多物理场耦合; 气体缓冲

Simulation Research on High-speed Mechanical Switchgear with Gas Damper Based on Multi-physics Coupling Method

FANG Chun'en^{1,2}, CHANG Xiaodan^{1,2}, LI Wei^{1,2}, REN Xiao^{1,2}, ZHANG Bide^{1,2}

(1. Sichuan Province Key Laboratory of Power Electronics Energy-saving Technologies & Equipment, Chengdu 610039, China;
2. School of Electrical Engineering and Electronic Information, Xihua University, Chengdu 610039, China)

Abstract: The gas-insulated high-speed mechanical switchgear (HSMS) for high-voltage DC circuit breaker has the shortcomings of short stroke, high separating speed and big mechanical shock. In this study, a gas damper system is proposed to reduce the speed of contact movement and improve mechanical and electrical performances of switchgear. The motion of the HSMS with gas damper involves multiple physical fields such as transient electromagnetic field, airflow field and mechanical field. The multi-physics coupling method is adopted, and a dynamic model of HSMS with gas damper is established by using a finite element software. The motion characteristics of the HSMS with gas damper are simulated, and the influences of the parameters of the gas damper system on the dynamic performance of the switchgear are analyzed. Simulation results show that the high-speed movement of the metal plate in the electromagnetic repulsive mechanism results in the change of internal airflow field, and the hence produced air resistance can realize damping of HSMS effectively. At the last stage of the movement, the gas pressure gradually returns to the initial atmospheric pressure to prepare next high-speed reclosing operation of high-speed disconnect switch.

Key words: electromagnetic repulsive mechanism; dynamic characteristics; multi-physics coupling; gas damper

收稿日期: 2019-01-30; 修回日期: 2019-03-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51477142); 四川省教育厅项目(12ZB131, 14ZB0123); 四川省电力电子节能技术与装备重点实验室(SZjj2014-14); 省部共建教育部重点实验室项目(SBZDPY-11-13, 14)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(51477142), the Education Department of Sichuan Province (12ZB131, 14ZB0123), Sichuan Province Key Laboratory of Power Electronics Energy-saving Technologies & Equipment(SZjj2014-14), Key Laboratory of Authorized by China's Ministry of Education(SBZDPY-11-13, 14).

0 引言

随着传统石化能源短缺和环境污染问题日益加剧,清洁能源技术受到广泛重视。风能、太阳能等可再生能源技术得到快速发展,但由于其具有间歇性、不稳定性等特点,使得新能源通过传统技术并网发电受到较大限制。基于柔性直流输电的直流电网技术^[1-2]是解决新能源并网和消纳的有效手段之一。

然而,与传统交流输电系统相比,直流系统具有阻尼低,短路电流上升快等特点,故障电流可能在数毫秒内超过换流阀电力电子器件的耐受电流值。因此,采用高压直流断路器快速限制并切断故障电流以保证系统安全稳定运行至关重要。近年来,各种开断原理和拓扑结构的高压直流断路器被国内外专家学者提出;其中,混合式直流断路器和强迫过零机械式直流断路器是目前高压直流断路器研发的主要方向。高速机械开关^[3-16]作为混合式高压直流断路器的核心设备之一,在开断电路时无弧分闸,不仅能提高开关的动作速度,同时能延长开关的使用寿命。高速机械开关在正常工况下承担长期通流功能,在故障工况下承受切除短路电流过程中产生的暂态开断电压TIV。这就要求超高速机械开关在极短时间(2 ms内)运动到耐受暂态开断电压的绝缘距离,并以较低末速度运动到分闸位置。因此,研究高性能的缓冲装置对于高速机械开关具有重要意义。

传统的高速机械开关采用碰撞缓冲、聚氨酯缓冲、弹簧缓冲和油缓冲等方法用于实现开关的运动减速^[10-13]。传统的缓冲方式具有体积较大、缓冲末速度较高、分闸反弹大和机械冲击高等不足。针对SF₆气体绝缘的高速机械开关,文中提出一种新型的气体缓冲方法。气体缓冲装置利用高速机械开关合分闸运动过程中,电磁斥力机构金属盘两侧的气体压差产生的阻尼力实现高速机械开关合分闸缓冲。高速机械开关用的气体缓冲器的难点在于合分闸操作的前期加速阶段不能对开关运动起到阻碍作用,当开关动触头运动到耐受暂态开断电压TIV后又能较短行程内必须快速高速降低开关的运动速度,实现无冲击、无回弹运动到合分闸位置。气体缓冲的高速机械开关的运动涉及到瞬态电磁场、气流场、机械场等多物理场问题,因此需要考虑气流场对高速机械开关运动性能的影响,将气流场与瞬态电磁场、电路以及开关机械运动结合进

行耦合计算。基于上述研究思路,采用软件 Ansys ICEM CFD 建立高速机械开关的气体缓冲模型并对模型进行网格划分,利用 Ansys Fluent 软件的动网格技术对高速机械开关的动态特性进行数值模拟,获得高速机械开关运动过程中缓冲系统的气体压力、气流速度分布以及开关运动速度和运动位移,并仿真分析进出气孔、气体初始压力等对开关系统缓冲性能的影响。

1 电磁斥力机构工作原理

气体缓冲的高速机械开关的原理见图1,电磁斥力机构工作原理见图2。气体缓冲的高速机械开关包括动静触头、滑动连接、绝缘拉杆、驱动杆以及电磁斥力机构,其基本工作原理为:当预充电的储能电容C向分合闸线圈放电,产生了持续时间为数毫秒的脉冲电流,在此电流的作用下,金属盘内感应出与线圈电流方向相反的涡流,这样一对方向相反的脉冲电流相互作用产生电磁斥力;金属盘受到电磁斥力作用带动灭弧室动触头和导电杆一起运动,从而使得灭弧室动静触头分离,实现机械开关的高速合分闸。

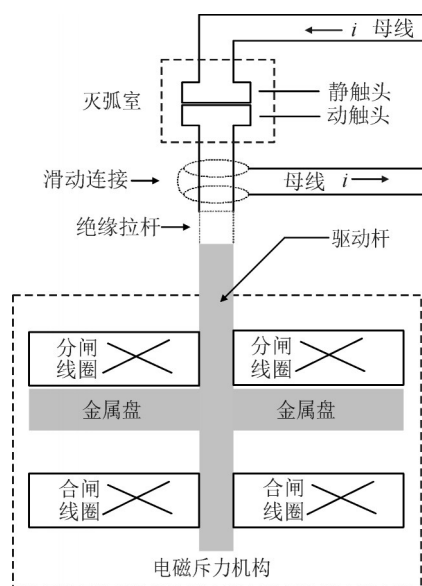


图1 气体缓冲的高速机械开关原理图

Fig. 1 The schematic diagram of high speed mechanical switchgear with gas damper

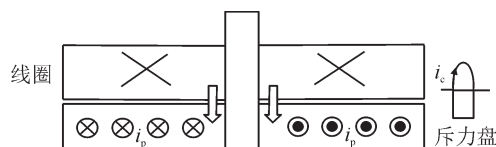


图2 电磁斥力机构的工作原理图

Fig. 2 The work principle of electromagnetic repulsive mechanism

Ansys Maxwell 和 Ansys Simplorer 软件联合仿真高速机械开关的电磁斥力、触头运动位移和速度以及线圈电流波形见图3。从图3可知,电磁斥力机构运动行程短、动作速度快,20 mm的总行程仅用了2.7 ms,在2 ms时的触头开断距离能达到12 mm;高速机械开关运动平均速度可达7.6 m/s且末期速度高达12.5 m/s,如此高的分闸速度如果没有有效的缓冲系统,不仅可能极大降低电磁斥力机构和高速机械开关的机械寿命,而且触头分闸回弹容易导致开关绝缘击穿。因此,缓冲系统的性能对高速机械开关至关重要。

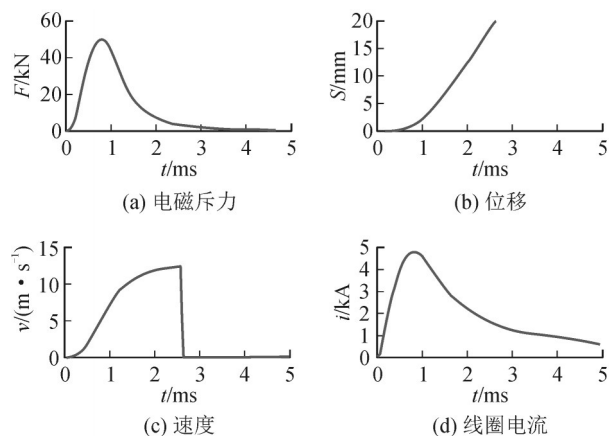


图3 高速机械开关的分闸动态特性

Fig. 3 The dynamic characteristics of fast mechanical switchgear's opening operation

2 电磁斥力机构气体缓冲模型设计

气体缓冲的电磁斥力机构结构图见图4,线圈和金属斥力盘放置于充满SF₆气体的气室内。电磁斥力机构气室内壁设置进口气孔和出口气孔,以及金属斥力盘与气室内壁之间留有运动间隙。

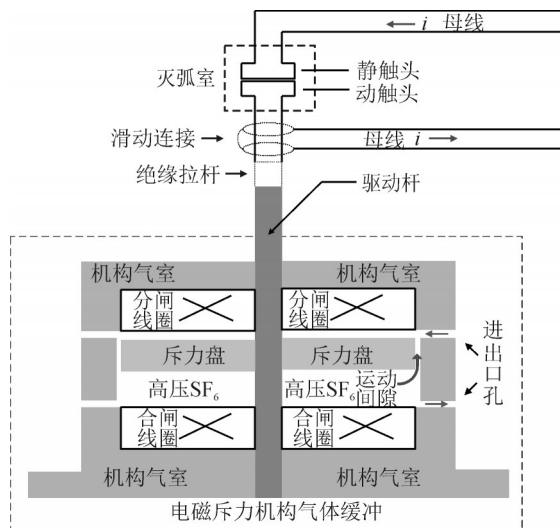


图4 电磁斥力机构气体缓冲设计图

Fig. 4 The design chart of electromagnetic repulsive mechanism including gas damper

高速机械开关在执行合分闸操作时,金属斥力盘以非常高的加速度开始运动,此时电磁斥力机构气室中的气流场开始产生剧烈变化。随着金属斥力盘的高速运动,金属斥力盘上下两部分区域压力梯度的剧烈变化产生了压差阻力。产生的压差阻力与电磁斥力共同作用影响着金属斥力盘的速度和位移;随着金属斥力盘的运动,压差阻力不断增大,从而对高速机械开关的运动产生了非常明显的缓冲效果。另一方面,为了避免因缓冲过度引起高速机械开关的分闸反弹幅值过大导致开关绝缘击穿,在机构气室内部和气室与金属斥力盘的边缘之间分别设计了泄压孔和间隙,提供压力释放通道,从而平衡内部压力分布。

高速机械开关的气体缓冲系统的涉及瞬态电磁场—机械场—气流场等多物理场问题,文中利用Ansys的有限元软件进行耦合仿真,多物理场耦合仿真原理见图5。瞬态电磁场和电路在Maxwell和Simplorer中完成,气流场计算在ICEM CFD和Fluent中完成。利用Fluent软件动网格技术中的UDF(用户自定义函数)宏命令将电磁场仿真获得的电磁斥力和弹簧保持力导入到气流场仿真编写的程序中,实现了软件之间的数据耦合。

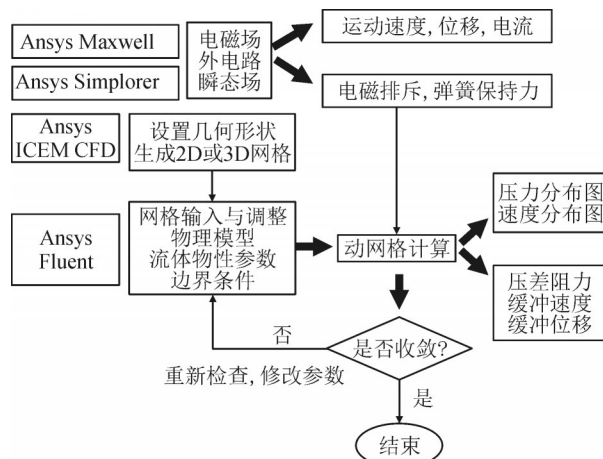


图5 Ansys软件耦合仿真过程

Fig. 5 Coupled simulation process of Ansys software

3 数值计算模型

3.1 计算模型

考虑到电磁斥力机构结构具有轴对称的特点,在仿真建模中,将计算区域简化为结构尺寸的一半,利用Ansys ICEM CFD软件建立二维轴对称模型,见图6。气体缓冲器模型的参数及数值见表1。在模型的实际三维结构中,泄压孔均匀离散地分布在机构气室的周围,气体通道的总截面面积不变,求解

泄压孔 d 为

$$d = \frac{n \cdot A}{2\pi \cdot (R + \alpha)} \quad (1)$$

式(1)中: n 为机构气室周围泄压孔的总数; A 为每个孔的截面面积; R 为金属斥力盘的半径; α 为金属斥力盘与机构气室之间的间隙。

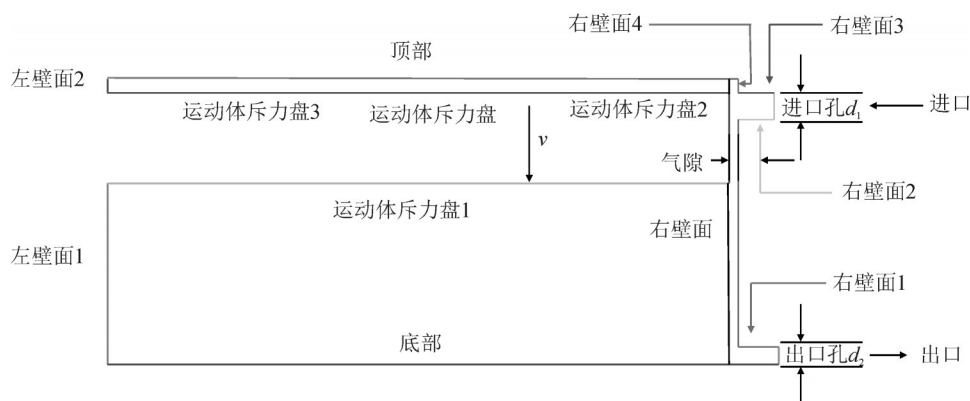


图6 气体缓冲系统有限元模型

Fig. 6 The finite element model of gas damper

表1 模型参数

参数	数值	参数	数值
顶部	71	右壁面3	4
底部	75	右壁面4	1
气隙	1	斥力盘1	70
左壁面1	20	斥力盘2	10
左壁面2	1	斥力盘3	70
右壁面	25	进口孔 d_1	3
右壁面1	4	出口孔 d_2	2
右壁面2	4	—	—

3.2 数学方程

为了准确描述高速机械开关的运动特性,采用一系列多物理场方程进行耦合计算,方程涉及电磁斥力机构的瞬态电磁场,电路,流体力学以及运动方程。

3.2.1 瞬态电磁场方程

在整个计算域中计算电势和磁场。运用矢量势法计算电磁场:

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{A}) = \mu \mathbf{J} \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = 0 \quad (3)$$

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \quad (4)$$

$$\mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \nabla \Phi + \mathbf{v} \times \nabla \times \mathbf{A} \quad (5)$$

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (6)$$

式(2)–(6)中, $\mathbf{A}$ 为磁矢势; $\mathbf{J}$ 为电流密度; $\mathbf{B}$ 为磁通密度; Φ 为电动势; $\mathbf{E}$ 为电场强度; μ 为磁导率; σ 为电导率; $\mathbf{v}$ 为高速机械开关运动速度。

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v u)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w u)}{\partial z} = \rho F_x + \frac{\partial p_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial p_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial p_{xz}}{\partial z} \quad (10)$$

3.2.2 电路方程

电磁斥力机构的等效电路图见图7。图7中: C 为储能电容; R_c 为储能电容的内阻; M 为金属斥力盘与励磁线圈(分闸或合闸线圈)的互感; R_1 和 R_2 为线路的等效电阻; L_1 和 L_2 为线路的等效杂散电感; VT 是晶闸管; VD 是功率二极管。根据图7可得电磁斥力机构的电路方程为:

$$L_1 \frac{di_1}{dt} - M \frac{di_2}{dt} - \frac{dM}{dx} \frac{dx}{dt} i_2 + i_1 (R_c + R_1) = U_c(t) \quad (7)$$

$$L_2 \frac{di_2}{dt} - M \frac{di_1}{dt} - \frac{dM}{dx} \frac{dx}{dt} i_1 + i_2 R_2 = 0 \quad (8)$$

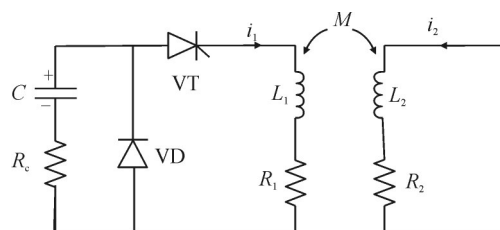


图7 电磁斥力机构等效电路

Fig. 7 The equivalent circuit of electromagnetic repulsive force mechanism

3.2.3 流体力学方程

电磁斥力机构的气动力相互作用可用质量、动量以及能量守恒方程数值描述。

质量守恒方程为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (9)$$

式(9)中: ρ 为气体密度; u 、 v 、 w 分别为速度沿 x 、 y 、 z 方向的速度矢量。

动量守恒方程为:

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho wv)}{\partial z} = \rho F_y + \frac{\partial p_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial p_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial p_{yz}}{\partial z} \quad (11)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho ww)}{\partial z} = \rho F_z + \frac{\partial p_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial p_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial p_{zz}}{\partial z} \quad (12)$$

式(10)–(12)中: ρF_x 、 ρF_y 、 ρF_z 为单元体积上的质量力; p 为二阶对称应力张量。

能量守恒方程为

$$S_h = \rho q \quad (13)$$

$$\varphi = \mu \left\{ 2 \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right] + \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \right\} \quad (14)$$

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u T)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v T)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w T)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{k}{c_p} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{k}{c_p} \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{k}{c_p} \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \varphi + S_h \quad (15)$$

式(13)–(15)中: T 为流体温度; k 为热传导系数; c_p 为流体比热容; q 为单位时间内传入单位质量的热量分布函数; S_h 为单位体积的内热源; φ 为耗散函数。

3.2.4 开关运动方程

由于运动过程中高速机械开关受到的合力是由电磁斥力、气体阻力和弹簧保持力共同决定,所以运动方程应由电磁场方程和流体力学方程耦合求解得出。基于虚位移原理,由式(16)可求出电磁斥力,高速机械开关的运动方程可表示为

$$F_z = -\frac{dW}{dS} = -\frac{d}{dS} \int_v \mathbf{B} \cdot \mathbf{H} dV \quad (16)$$

$$F_z - F_d - F_k = ma \quad (17)$$

$$v = \int_0^t a dt \quad (18)$$

$$S = \int_0^t v dt \quad (19)$$

式(16)–(19)中: F_z 为电磁斥力; F_d 为气体阻力; F_k 为弹簧保持力; m 为运动质量; a 为加速度; v 为运动速度; S 为运动位移。

4 数值计算与结果分析

4.1 网格及边界条件

网格的划分是流体仿真的前处理,网格质量的好坏直接决定在软件仿真过程中的收敛问题,同时也影响计算的精度,高质量的网格划分对于流体仿真的求解至关重要^[17–19]。由于非结构网格比结构网格的截断误差大,为了避免仿真结果出现较大误差,文中利用 Ansys ICEM 软件对图 6 中设计的二维模型采用四边形结构化网格划分,网格剖分结果见图 8。

考虑到 SF₆ 气体对高速机械开关的影响^[20–22],仿真中气体缓冲器的进出口压力均设为 0.45 MPa,计算流域设为湍流,采用标准 $k-\varepsilon$ 模型。高速机械开关的运动负载总质量为 7.0 kg,金属斥力盘和励磁

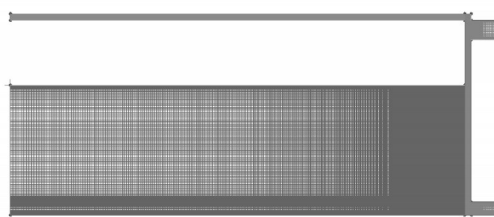


图8 气体缓冲机构的网格剖分图

Fig. 8 The grid of mechanism including gas damper

线圈的材料均为紫铜,预充电压为 1 100 V,储能电容为 4 700 μ F,线路的等效电阻 R_1 、 R_2 均为 2 m Ω ,线路的等效杂散电感 L_1 、 L_2 分别为 2.2、1 μ H,机构气室周围泄压孔的数量为 12 个,机构负载运动总行程为 20 mm,仿真步长为 6.25 μ s,计算方法采用流体常用的 SIMPLE 算法。考虑到金属斥力盘运动过程中网格也会随之改变,仿真采用的动网格模型为动态分层和局部网格重划模型,同时将编写好的 UDF 程序通过编译和加载导入 Fluent 软件从而实现电磁斥力机构的动态变化过程。

4.2 数值模拟结果与分析

高速机械开关在分闸运动过程中加入气体缓冲前后所受到的力、位移以及速度见图 9。由图 9(b)、(c)可知,尽管由于斥力盘刚分闸时会产生一定的振荡导致产生的曲线均出现不同程度的抖动,但速度与位移曲线的总体趋势与数据在 1.4 ms 前十分接近。由图 9(a)可知,金属斥力盘在 1.4 ms 前产生的压差阻力较小,电磁斥力对斥力机构的影响起主要作用。在 1.4 ms 时产生的压差阻力与电磁斥力相等,同时金属斥力盘速度达到最大为 9.0 m/s。随着金属盘运动,压差阻力增大,到 1.65 ms 达到峰值 20.09 kN。在 2 ms 时位开关触头运动距离为 10.7 mm,表明气体缓冲对高速机械开关耐受暂态开断电压 TIV 前的运动特性影响较小,实现开关触头快速运动到耐受暂态开断电压 TIV 的绝缘距离;运动后期,由于气体缓冲的阻尼作用,高速机械开关得到有效减速和缓

冲,从而尽最大可能地减小冲击对开关机械寿命的影响,保证了高速机械开关的电气机械特性以及电力系统的运行可靠性。

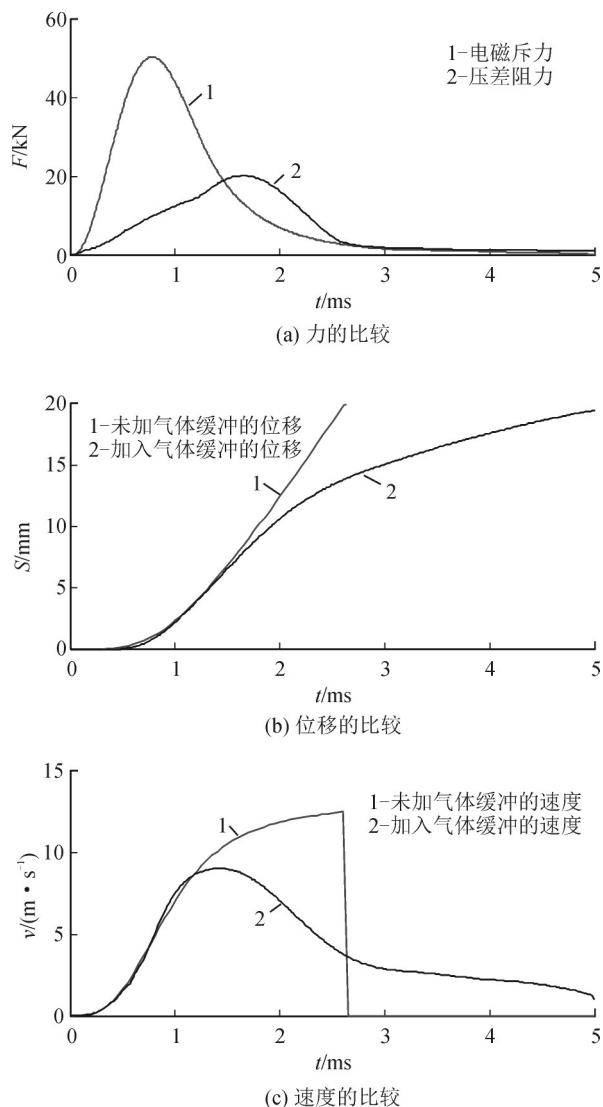


图9 加入气体缓冲前后高速机械开关的动态特性曲线

Fig. 9 The dynamic characteristic curves of high speed mechanical switchgear before and after adding gas damper

斥力盘与线圈刚分闸时,因从进口孔通入 0.45 MPa 的 SF_6 气体,使得整个斥力机构内部在开关还未分闸时压力为 0.45 MPa,所以刚分闸时气室内部的压力相等,见图 10(a),气体通过运动间隙流入斥力盘的下部分区域,由于气体之间的碰撞较小,产生了一个小涡流。由图 9(a)和图 10(b)可知,气体阻力在 1.65 ms 时达到最大值,表明此时斥力盘的上下两部分区域的压差也达到最大值,下部分区域的气体压力达到 645 kPa。当金属斥力盘向下继续运动时,上部分区域的气体开始增多并且持续在上区域流动,1.65 ms 时气体速度达到 279 m/s,因气体速度增大导致气体间的激烈碰撞,在斥力盘上区域形成一个巨大的圆形旋涡,有利于平衡斥力盘继续

运动的上下两部分区域的压力。由图 10(c)可知,气体压力在斥力盘运动后期逐渐恢复接近初始值 0.45 MPa,气体缓冲比较理想。

5 气体缓冲模型影响因素分析

根据气体缓冲系统工作原理,气体初始压力、进出口气孔尺寸以及气室与金属斥力盘之间的间隙对高速机械开关运动特性产生较大影响。

5.1 气体初始压力的影响

为了考虑 SF_6 气体初始压力对高速机械开关运动特性的影响,初始压力值分别设定为 0.35、0.45、0.55、0.65 MPa,计算结果见图 11。在刚开始的 0.8 ms 内,气体初始压力对开关运动特性影响较小,这主要是因为电磁斥力增长很快,远大于气体压差阻力。随着金属斥力盘加速移动,气体压差阻力逐渐增大,不同初始压力对高速机械开关的运动速度和位移产生较大影响。当气体初始压力 $P=0.65$ MPa 时,开关末期速度为负值导致高速机械开关分闸回弹;当初始压力 $P=0.35$ MPa 时,高速机械开关在 4.0 ms 时运动到满行程,同时开关具有较高的末速度;当气体初始压力 $P=0.55$ MPa 和 $P=0.45$ MPa 时,开关分闸末速度较低,能很好实现开关分闸缓冲。综上所述,初始气压选择为 0.45~0.55 MPa。

5.2 进口气孔尺寸的影响

在初始压力值 $P=0.45$ MPa、出口气孔直径为 2 mm,金属盘与气室内壁间隙为 1 mm,进口气孔直径分别为 3、2、1 mm 时,高速机械开关分闸动态特性见图 12。由图 12 可知,进口气孔越小产生的压差阻力就越大,高速机械开关的分闸时间越长和运动到满行程的末速度越低。当进口气孔直径为 1 mm 时,不利于高速机械开关的分闸缓冲,且末期速度小于零容易造成高速机械开关分闸反弹。综合考虑分闸末期速度和较短分闸时间,进口气孔的直径选择 3 mm。

5.3 出口气孔尺寸的影响

出口气孔尺寸变化对高速机械开关运动特性影响见图 13。从仿真结果可知,随着出口气孔尺寸减小,气体压差阻力越大,开关运动末速度越小。当出口气孔直径大于进口气孔的直径时,此时气体泄放速度较快,分闸后期的压差阻力小于电磁斥力,不利于高速机械开关的分闸缓冲。综合考虑,当出口气孔直径为 2 mm 时具有较好的缓冲效果。

5.4 间隙的影响

考虑到高速机械开关的运动特性,比较分析了金属斥力盘与气室内壁之间的间隙为 0.5 mm 和 1 mm 时对开关运动特性的影响,结果见图 14。间隙

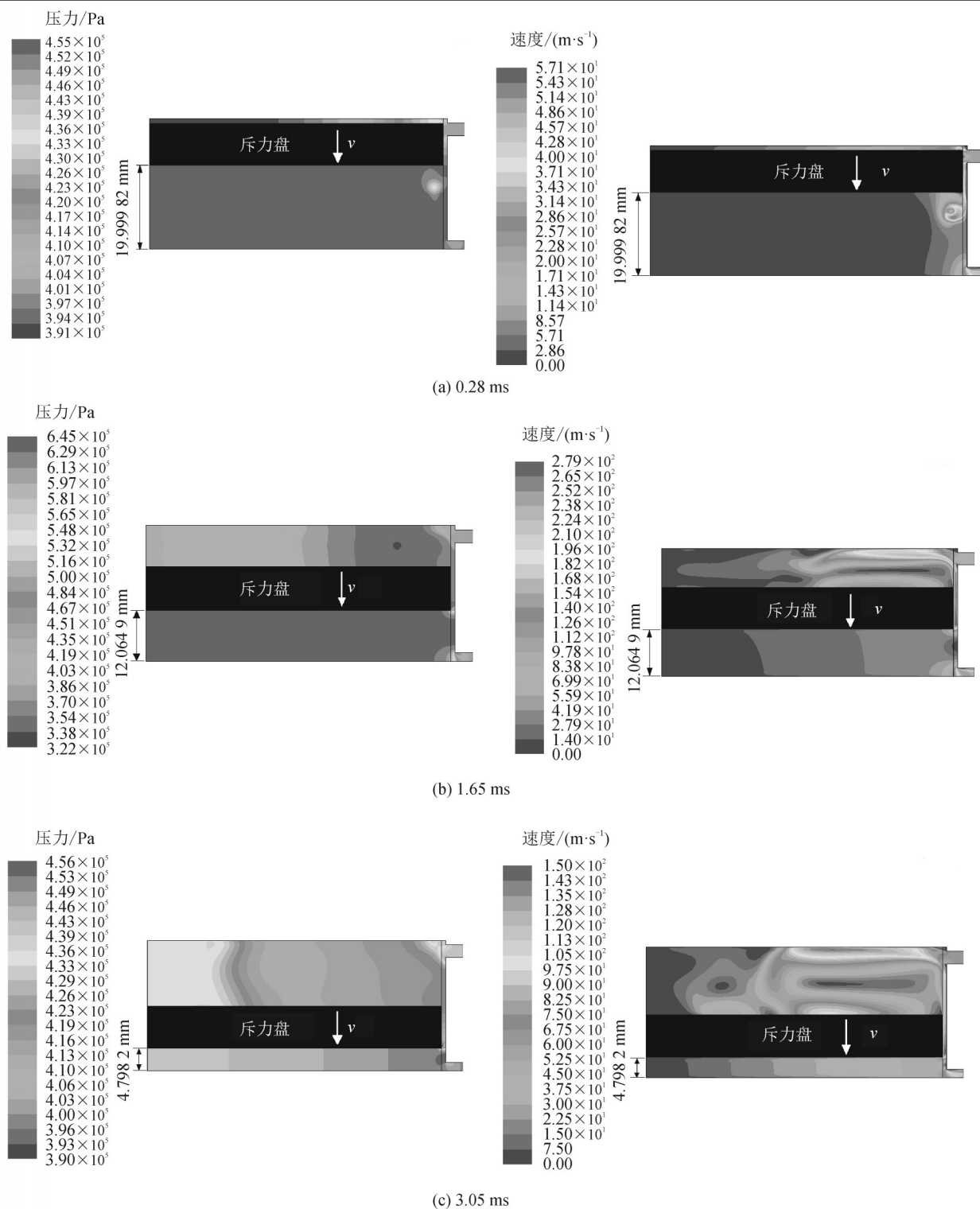


图10 不同时刻的压力与速度分布图

Fig. 10 Distributions of pressure and velocity at different instants

变化对高速机械开关运动特性影响并不明显,在2 ms时触头运动距离相差较小,均符合高速开关的运动特性要求。为了避免金属斥力盘与气室内壁的摩擦,故金属盘与气室内壁之间的间隙选择为1 mm。

6 结论

文中针对应用于高压直流断路器的高速机械

开关行程短、分闸速度高、机械冲击大的问题,提出一种新型的气体缓冲方法,采用多物理场耦合和有限元软件建立气体缓冲的高速机械开关动态模型,研究了气体缓冲对高速机械开关运动特性的影响,得出以下结论:

1)在金属斥力盘运动过程中产生由压力梯度变化引起的气体阻力,能有效降低高速机械开关触头

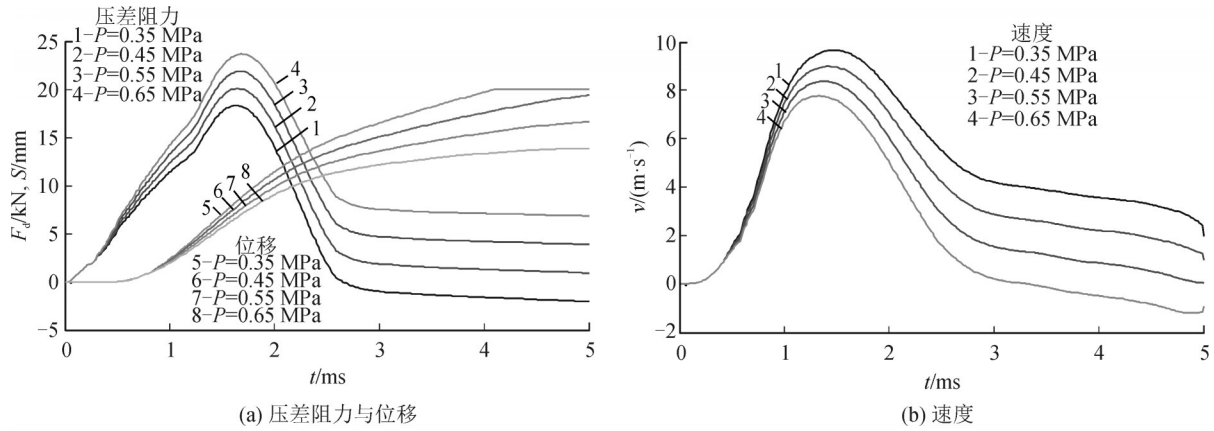


图 11 气体初始压力对开关分闸特性的影响

Fig. 11 Influence of initial gas pressure on switching opening characteristics

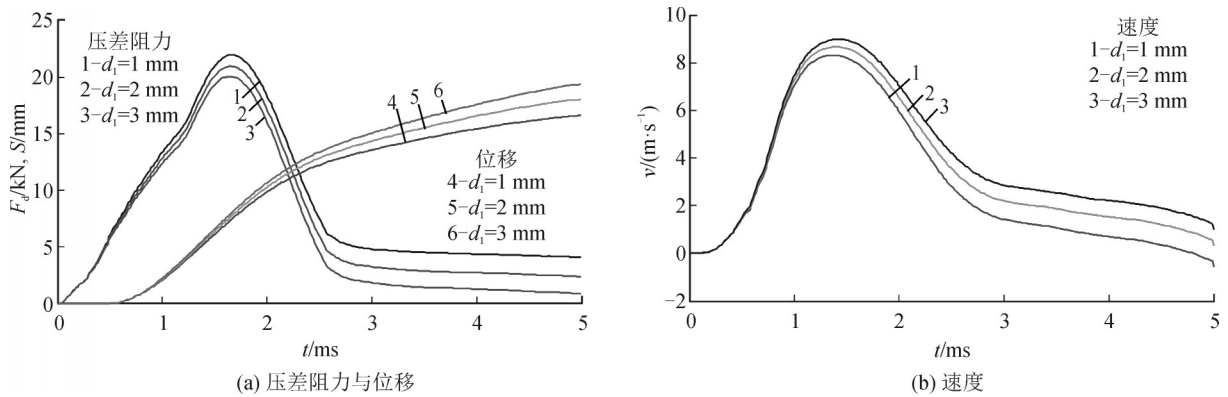


图 12 进口气孔直径对开关分闸特性的影响

Fig. 12 Influence of inlet stomatal diameter on switching opening characteristics

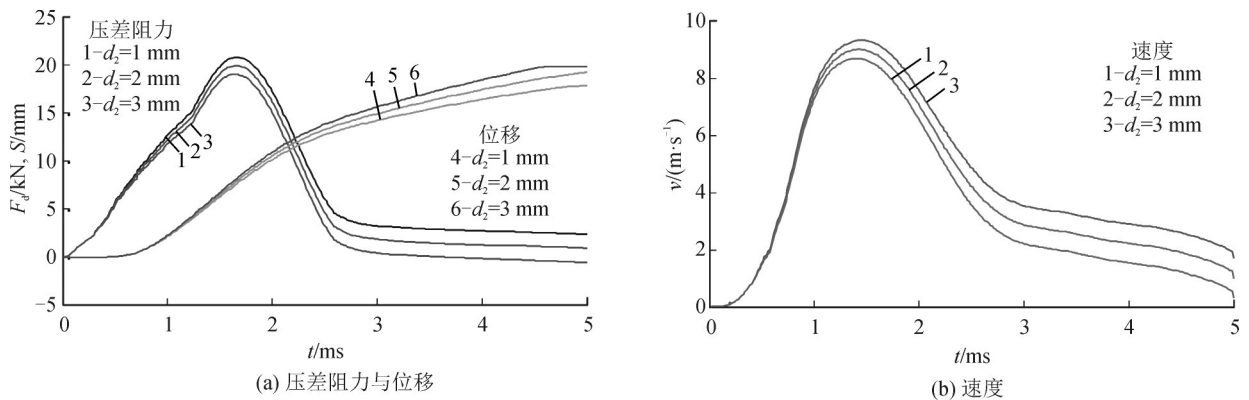


图 13 出口气孔直径对开关分闸运动特性的影响

Fig. 13 Influence of outlet stomatal diameter on switching opening characteristics

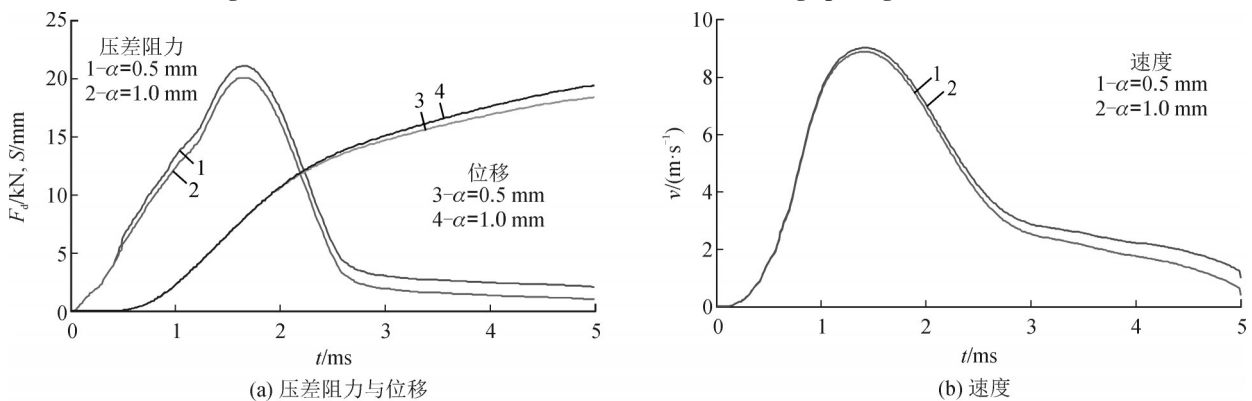


图 14 金属斥力盘与气室间隙对分闸运动特性影响

Fig. 14 Influence of gap of metal repulsion plate and gas chamber on switching opening characteristics

的分闸运动速度,满足高速机械开关分闸性能要求,同时对于高速机械开关合闸缓冲的设计与仿真提供了参考依据;

2)获得了不同的气体初始压力值、进出口孔尺寸大小以及气隙对高速机械开关运动的影响规律。通过曲线图的比较分析可知,气体初始压力对开关的分闸特性影响最大,斥力盘与气室的运动间隙对分闸的影响最小。在满足开关分闸特性的前提下,适当增大气体初始压力、减小泄压孔和运动间隙的尺寸可降低触头的末速度,为后期实验样机的加工验证提供了理论支持。

参考文献:

- [1] 汤广福,罗 湘,魏晓光.多端直流输电与直流电网技术[J].中国电机工程学报,2013,33(10):8-17.
TANG Guangfu, LUO Xiang, WEI Xiaoguang. Multi-terminal HVDC and DC-grid technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(10):8-17.
- [2] 李 岩,罗 雨,许树楷,等.柔性直流输电技术:应用、进步与期望[J].南方电网技术,2015,9(1):7-13.
LI Yan, LUO Yu, XU Shukai, et al. VSC-HVDC transmission technology: Application, advancement and expectation [J]. Southern Power System Technology, 2015, 9(1):7-13.
- [3] 王子建,何俊佳,尹小根,等.基于电磁斥力机构的10 kV快速真空开关[J].电工技术学报,2009,24(11):68-75.
WANG Zijian, HE Junjia, YIN Xiaogen, et al. 10 kV high speed vacuum switch with electromagnetic repulsion mechanism[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(11):68-75.
- [4] 武 瑾,庄劲武,王 晨,等.电磁斥力机构数学模型的简化与求解[J].中国电机工程学报,2013,33(24):175-182.
WU Jin, ZHUANG Jinwu, WANG Chen, et al. Simplification and solution of the mathematical model to electromagnetic repulsion mechanism[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(24):175-182.
- [5] 袁 召,喻新林,魏晓光,等.线圈型电磁斥力机构综合优化[J].高电压技术,2015,41(12):4207-4212.
YUAN Zhao, YU Xinlin, WEI Xiaoguang, et al. Comprehensive optimization of coil-coil electromagnetic repulsive actuators[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(12):4207-4212.
- [6] 田 宇,朱苛葵,许家源,等.10 kV快速分相断路器样机研制[J].电网技术,2015,39(8):2346-2350.
TIAN Yu, ZHU Kelou, XU Jiayuan, et al. Development of 10 kV high-speed vacuum breaker prototype[J]. Power System Technology, 2015, 39(8):2346-2350.
- [7] 周煜韬,戚连锁,庄劲武,等.考虑弹性变形的电磁斥力机构运动特性分析及实验[J].中国电机工程学报,2016,36(s1):206-212.
ZHOU Yutao, QI Liansuo, ZHUANG Jinwu, et al. Analysis and experimentation of motion characteristics in electromagnetic repulsion mechanism considering the elastic deformation[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(s1):206-212.
- [8] 卢彦辉,荣命哲,韩国辉,等.高速电磁斥力机构运动特性影响因素研究[J].高压电器,2015,51(8):29-34.
LU Yanhui, RONG Mingzhe, HAN Guohui, et al. Research on the influencing factors of motion characteristics of high speed electromagnetic repulsion mechanism[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(8):29-34.
- [9] 吴文耿,方春恩,陈军平,等.超快速隔离开关电磁斥力机构设计及试验研究[J].高压电器,2017,53(4):156-163.
WU Wengeng, FANG Chun'en, CHEN Junping, et al. Design and experimental study on electromagnetic repulsion mechanism of ultra-fast disconnect switch[J].
- [10] 姜 楠.电磁斥力机构设计方法研究[D].北京:中国舰船研究院,2013.
JIANG Nan. Research on the design method of the electromagnetic repulsion mechanisms[D]. Beijing: China Ship Research and Development Academy, 2013.
- [11] 方 帅,袁 召,魏晓光,等.聚氨酯缓冲材料的出力特性研究与聚氨酯缓冲器设计[J].高压电器,2015,51(11):91-96.
FANG Shuai, YUAN Zhao, WEI Xiaoguang, et al. Force characteristic of polyurethane material and design of polyurethane buffer[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(11):91-96.
- [12] ROODENBURG B, KAANDERS MAM, HUIJSER T. First results from an electro-magnetic(EM) drive; High acceleration of a circuit breaker contact for a hybrid switch[C]//11th European Conference on Power Electronics & Applications. Dresden, Germany: IEEE, 2005:1-10.
- [13] WU Yi, HE Hailong, HU Zhengyong, et al. Analysis of a new high-speed DC switch repulsion mechanism[J]. IEICE Transactions on Electronics, 2011, E94C(9):1409-1415.
- [14] SKARBY P, STEIGER U. An ultra-fast disconnecting switch for a hybrid HVDC breaker - A technical breakthrough[C]//CIGRE. Canada: IEEE, 2013:9-11.
- [15] WU Yifei, LI Mei, RONG Mingzhe, et al. A new model for thomson-type actuator including the pressure buffer[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2015, 7(8):1-8.
- [16] WU Yifei, WU Yi, RONG Mingzhe, et al. A new thomson coil actuator: principle and analysis[J]. IEEE Transactions on Components Packaging and Manufacturing Technology, 2015, 5(11):1644-1655.
- [17] 龙新平,姚 鑫,杨雪龙.多孔喷嘴射流泵流动模拟与涡结构分析[J].排灌机械工程学报,2012,30(2):136-140.
LONG Xinping, YAO Xin, YANG Xuelong. Flow

- simulation and vortex structure analysis of multi-nozzle jet pumps[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2012, 30(2): 136-140.
- [18] 沈 洋. 基于动网格技术的高速液压缸动态过程流场数值模拟[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2013.
- SHEN Yang. Numerical simulation of high speed hydraulic cylinder dynamic process flow field based on dynamic mesh technology[D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2013.
- [19] 隋洪涛, 李鹏飞, 马世虎, 等. 精通CFD动网格工程仿真与案例实战[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2013.
- SUI Hongtao, LI Pengfei, MA Shihu, et al. Dynamic grid engineering simulation and case of actual combat[M]. Beijing: The People's Posts and Telecommunications Press, 2013.
- [20] 姜 旭, 贾申利, 李兴文, 等. 基于真实气体模型的SF₆断路器中冷态气流场特性的仿真分析[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(7): 167-173.
- JIANG Xu, JIA Shenli, LI Xingwen, et al. Simulation and analysis of cold flow field characteristics in SF₆ circuit breakers with UDRGM[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(7): 167-173.
- [21] 李俐莹, 刘晓明, 邹积岩. 高压SF₆断路器能量分离喷口区域的气流参数特性[J]. 高电压技术, 2015, 41(9): 3123-3129.
- LI Liying, LIU Xiaoming, ZOU Jiyang. Gas flow characteristics of high voltage SF₆ circuit breaker with energy separated nozzle[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(9): 3123-3129.
- [22] 张 权, 杨 芳, 祁海洋, 等. 直流条件下空气与SF₆喷口电弧换热机理分析[J]. 高压电器, 2016, 52(12): 41-47.
- ZHANG Quan, YANG Fang, QI Haiyang, et al. Analysis of the energy transport processes in DC air and SF₆ nozzle arcs [J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(12): 41-47.
- 方春恩(1975—), 男, 教授, 研究方向为智能化开关电器理论及应用。
- 常晓丹(1991—), 男, 硕士研究生, 研究方向为智能化开关电器理论及应用(通讯作者)。

(上接第47页)

- tures using Green's functions[J]. IEE Proc. Sci. Meas. Technol., 1996, 143(1): 63-70.
- [23] OKABE S, YUASA S, KANEKO S, et al. Simulation of propagation characteristics of higher order mode electromagnetic waves in GIS[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2006, 13(4): 855-861.
- [24] 郑惠莉, 刘 陈, 翟丹妮. 基于雷达图的综合评价方法[J]. 南京邮电学院学报, 2001, 21(2): 75-79.
- ZHENG Huili, LIU Chen, ZHAI Danni. Comprehensive evaluating method based on radar-graph[J]. Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2001, 21(2): 75-79.
- [25] 吴 翔, 何怡刚, 张大波, 等. 基于最优权重与雷达图的变压器状态评估[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(2): 55-60.
- WU Xiang, HE Yigang, ZHANG Dabo, et al. Transformer condition assessment based on optimal weight and radar map[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(2): 55-60.
- 杨 宁(1986—), 男, 工程师, 硕士, 主要从事电力设备状态检修与故障诊断技术方面的研究工作。