

开断速度对电磁斥力高速开断器介质恢复特性的影响

袁志方¹, 庄劲武¹, 陈倩¹, 江壮贤¹, 陈搏²

(1. 海军工程大学 电气工程学院, 湖北 武汉 430033; 2. 海军驻大连 426 厂军事代表室, 辽宁 大连 116005)

摘要: 为了提高电磁斥力高速开断器的介质恢复特性, 在建立电磁斥力高速开断器斥力仿真模型的基础上, 优化了外部驱动电路的电气参数, 获取了可以将开断速度提升至 37.2 m/s 的参数方案, 这个速度与爆炸辅助开断速度相当。设计了包含电流回路、强迫换流回路以及高压回路的强迫换流型介质恢复试验电路, 完成了 21.6、37.2 m/s 这 2 种开断速度条件下的介质恢复性能分析试验, 并将试验结果进行对比。另外, 对介质恢复过程进行了高速摄像。试验示波图和照片说明, 所提电磁斥力高速开断器斥力仿真模型是正确的, 提升开断速度可以有效优化电磁斥力高速开断器的介质恢复特性。

关键词: 电磁斥力高速开断器; 介质恢复特性; 开断速度; 高速摄像; 模型

中图分类号: TM 56

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2015.07.022

0 引言

电磁斥力高速开断器是一种适用于混合型限流熔断器的线路开断装置^[1-3], 主要功能是实现线路由通流状态向燃弧状态的快速转换。它的基本工作原理是在斥力线圈中通以脉冲电流, 在斥力盘中感应出涡流; 在 2 种电流的相互作用下, 产生电磁斥力, 进而推动斥力盘撞击开断器动子, 实现通流金属桥体的快速开断^[4]。与爆炸辅助开断器^[5-7]相比, 电磁斥力高速开断器最大的优势在于避免了炸药的存在导致的对于温升的苛刻限制, 同时具有安全性更好、经济性更强等优点^[8-10]。

介质恢复特性是电磁斥力高速开断器的关键性能指标之一, 良好的介质恢复特性是成功分断故障短路电流的基本保障。介质恢复强度不足将使得开断器无法承受灭弧熔断器起弧后产生的过电压, 进而导致分断失败^[11-14]。由于介质恢复特性的重要性, 国内外许多学者针对开断器介质恢复特性开展了大量的研究工作, 这些工作的热点主要集中在空气环境、真空环境以及 SF₆ 下开关电弧介质恢复特性的研究。

空气环境中的介质恢复特性研究热点主要集中在对于电弧、气流以及电磁场三者之间相互作用的讨论上, 耦合计算电弧流场与电磁场, 研究剩余弧柱等离子体衰减过程中的电场畸变与热场变化。在满足工程误差允许的前提下, 该类研究通常建立在电

弧轴对称以及局部热力学平衡的前提假设之下, 而在更为复杂的工程背景下, 也有关于引入紊流效应的介质恢复特性的研究^[15-17]。

真空环境中的介质恢复特性研究热点主要集中在恢复电压峰值与介质恢复强度上升速度的讨论上, 研究对象主要是双断口及多断口的动态介质恢复过程, 重点考察弧后电荷鞘层的发展规律, 主要解决的工程难题是多断口恢复电压分布不均匀的问题, 现阶段已完成针对双断口及多断口真空开关的静态击穿统计分布模型和弧后重击穿统计分布模型^[18-20]的建立。

SF₆ 环境中的介质恢复特性研究热点主要集中在对于气体流动的讨论上, 湍流发展越充分, 越有利于介质强度的恢复。由于喷口的机械形状结构对于湍流的形成以及发展有着直接的影响, 因此对于 SF₆ 环境中介质恢复特性的数值模拟的工程落脚点都在于如何优化喷口的设计, 计算方法耦合了气流场、电磁场以及动力场, 不仅关注开关触头分闸运动特性对于介质恢复特性的影响, 而且重点分析了气流密度、气流压力等参数对于介质恢复特性的规律性影响^[21-22]。

上述对于不同环境下的开关电弧介质恢复的研究极大地提高了开关承受弧后介质恢复能力, 进而使得开关的极限分断能力得到了极大的提升^[23]。目前, 就开断速度对于开关电弧介质恢复特性影响的研究还未见报道, 关于开断速度对于开关特性影响的研究主要还集中在如何更好地实现机械结构工程一致性的讨论上^[4]。

为了优化电磁斥力高速开断器的介质恢复特性, 本文在建立的电磁斥力高速开断器斥力仿真模型的基础上, 优化了外部驱动电路的电气参数, 获取了可以将开断速度提升至 37.2 m/s 的参数方案, 达

收稿日期: 2014-05-01; 修回日期: 2015-02-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50877078, 51177169, 51307179, 51207166); 海军工程大学自然科学基金资助项目(435517F21)

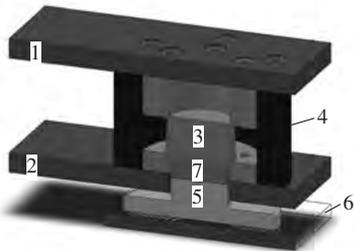
Project supported by the National Natural Science Foundation of China(50877078, 51177169, 51307179, 51207166) and the Natural Science Foundation of Naval University of Engineering(435517F21)

到了与爆炸辅助开断相当的速度水平^[6]。设计了包含电流回路、强迫换流回路以及高压回路的强迫换流型介质恢复试验电路,完成了2种不同开断速度条件下的介质恢复性能对比试验,试验示波图和高速摄像照片不仅说明了电磁斥力高速开断器斥力仿真模型的正确性,同时也佐证了提升开断速度对于优化电磁斥力高速开断器介质恢复特性的有效性。通过高速摄像得到的开断器运动轨迹测量结果以及试验获取的开断速度对于介质恢复特性的影响规律,可用于指导电磁斥力高速开断器的优化设计。

1 电磁斥力高速开断器电磁斥力数学模型

1.1 电磁斥力高速开断器工作原理

电磁斥力高速开断器剖面如图1所示。在斥力回路晶闸管接收到触发导通信号后,斥力线圈中流过脉冲电流在斥力盘中感应出方向相反的涡流,2种电流的相互作用将产生幅值巨大电磁斥力。经过固有机械延时之后,斥力盘推动活塞,在斥力的作用下迅速向上撞击,撞断桥体中间的柱体,推动其进入上部空腔,实现通流金属桥体的快速开断^[1]。



1,2—通流铜排, 3—桥体, 4—绝缘套筒
5—斥力盘, 6—斥力线圈, 7—绝缘活塞

图1 电磁斥力高速开断器剖面示意图

Fig.1 Section plane of high-speed electro-magnetic repulsion isolator

1.2 电磁斥力高速开断器电磁斥力计算数学模型

文献^[25]详细分析了某电磁斥力机构的数学模型:斥力机构动作时,根据能量守恒定律,电源提供的能量 dA_s 应等于机构所做的功 dA 、磁场中能量的变化 dw 和热损耗 dQ 之和,即:

$$dA_s = dA + dw + dQ \quad (1)$$

如果斥力线圈与斥力金属盘之间有磁耦合,可以写出它们的能量平衡关系式为:

$$e_1 i_1 dt + e_2 i_2 dt = dA + dw + i_1^2 R_1 dt + i_2^2 R_2 dt \quad (2)$$

其中, e_1 和 e_2 、 i_1 和 i_2 、 R_1 和 R_2 分别为斥力线圈和斥力金属盘的电压、电流和电阻。

斥力线圈与斥力金属盘总的磁能 w 决定于式(3):

$$w = \frac{1}{2} i_1^2 L_1 + \frac{1}{2} i_2^2 L_2 + i_1 i_2 M \quad (3)$$

其中, L_1 为斥力线圈的电感; L_2 为斥力金属盘的电感; M 为斥力线圈和斥力金属盘之间的互感。

联立式(1)—(3)可得该电磁斥力机构所做的功为:

$$dA = \frac{1}{2} i_1^2 dL_1 + \frac{1}{2} i_2^2 dL_2 + i_1 i_2 dM \quad (4)$$

由于 L_1 、 L_2 都为常数,则该电磁斥力机构的电磁斥力的大小为:

$$F = \frac{dA}{dz} = i_1 i_2 \frac{dM}{dz} \quad (5)$$

由式(5)知电磁斥力与斥力线圈中的放电电流和斥力盘感应电流的乘积成正比,与斥力线圈回路等值电感对位移 z 的导数成正比。电磁斥力垂直斥力盘向上。电磁斥力高速开断器斥力机构的斥力计算涉及到外部驱动电路脉冲电流、斥力盘感应涡流以及斥力线圈回路等值电感对位移的时变导数,是一个复杂的动态过程^[25]。

1.3 外部驱动电路对开断速度的影响

电磁斥力高速开断器斥力机构如图2所示,图中 B 为磁感应强度。文献^[4]对电磁斥力机构的机械部件组成、受力分析以及动作特性均进行了详细的阐述。斥力线圈由通流截面积相同、半径不同的同轴圆环线圈串联而成,脉冲电流由斥力线圈外接线路中的电容放电产生;为了延长力的作用时间,斥力线圈两端并联一个二极管,构成续流回路^[4]。

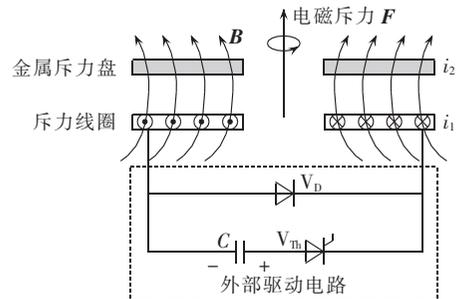


图2 斥力机构的工作示意图

Fig.2 Schematic diagram of repulsion agency

本文基于大型商用软件 ansoft,建立了电磁斥力高速开断器斥力仿真模型。通过对比由仿真模型计算得到的与试验实测的斥力电流波形,对仿真模型进行校准。

在驱动电容为 $300 \mu\text{F}$ 和 $600 \mu\text{F}$ (驱动电容的预充电电压均为 1500V)时,分别由仿真模型计算得到和试验实测得到一组斥力电流 $i_{\text{rp},300}^s$ 、 $i_{\text{rp},300}^l$ 和 $i_{\text{rp},600}^s$ 、 $i_{\text{rp},600}^l$,如图3所示。表1为2组电流具体参数的对比,由表1可见,仿真模型与试验实测得到的斥力电流峰值间误差 e_m 最大为 2.0% ,对应的续流电流最小值的误差 e_{fw} 最大为 8.6% 。误差满足工程需求,说明了电磁斥力高速开断器斥力仿真模型的正确性。

图4、5分别对应外部驱动电容 $C=300 \mu\text{F}$ 与 $C=600 \mu\text{F}$ (预充电电压均为 1500V)时,通过已校准的仿真模型获取的斥力盘受力 F 、斥力电流 i_{rp} 与开断速

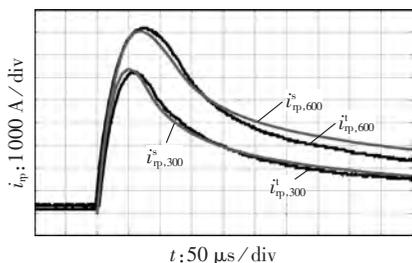


图 3 斥力电流的仿真和实测结果对比

Fig.3 Comparison of repulsion current waveform between simulation and experiment

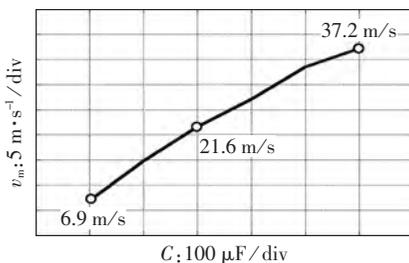


图 6 开断速度峰值与驱动电容容量的关系曲线

Fig.6 Relation between peak value of breaking speed and drive capacitor capacity

表 1 不同驱动电容条件下仿真与试验斥力电流对比

Table 1 Comparison of repulsion current between simulation and experiment for different drive capacitors

电流	驱动电容容量/ μF	电流峰值/A	$e_m/\%$	续流电流最小值/A	$e_{fw}/\%$
$i_{p,300}^s$	300	6369	2.0	1573	3.3
$i_{p,300}^e$	300	6240		1520	
$i_{p,600}^s$	600	8045	1.4	2802	8.6
$i_{p,600}^e$	600	8160		2560	

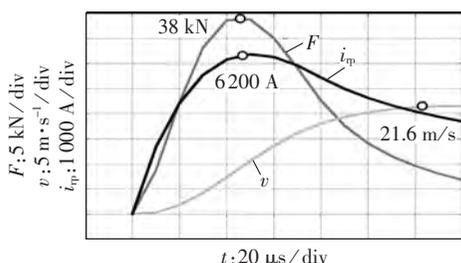


图 4 驱动电容为 300 μF 时,驱动机构电气参数

Fig.4 Electrical parameters of drive circuit with 300 μF drive capacitor

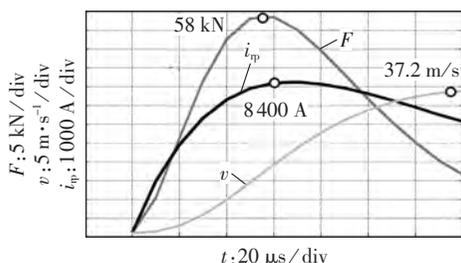


图 5 驱动电容为 600 μF 时,驱动机构电气参数

Fig.5 Electrical parameters of drive circuit with 600 μF drive capacitor

度 v 。从图 4 中可知,在 300 μF 的外部驱动电容预充电压 1500 V 的条件下,斥力电流在 45 μs 时达到峰值 6200 A,此时斥力盘受力 38 kN,这个过程中开断速度一直在增加,达到了 21.6 m/s。从图 5 中可知,在 600 μF 的外部驱动电容预充电压 1500 V 的条件下,斥力电流在 63 μs 时达到峰值 8400 A,此时斥力盘受力 58 kN,这个过程中开断速度一直在增加,达到了 37.2 m/s。

图 6 是在预充电压均为 1500 V 的前提下,随着电容容量的增加,开断速度峰值的变化曲线。

从图 6 中可以观察到,随着驱动电容容量的增加,开断速度峰值也随之线性增大。在驱动电容容量为 100 μF 时,对应的开断速度峰值为 6.9 m/s;在电容容量增大至 600 μF 时,开断速度峰值增大至 37.2 m/s。

本文旨在分析爆炸分断速度^[6]幅值之内的开断速度对于电磁斥力高速开断器介质恢复特性的影响,因此没有进行更大电容容量的论述。此外,电容容量的增加会带来刚分时间增长的不利影响,这也是不再考虑进行更大电容容量研究的另一个原因^[4]。

2 强迫换流型介质恢复试验系统

高速开断器对于试验系统有 3 个特殊要求:为试品制造人工电流零点,且在所要求的介质恢复时间内一直维持该电流零点;电压源需要模拟灭弧熔断器的弧压;介质恢复开始后,经过指定的延时后再投入电压源^[26]。本文建立满足上述 3 点要求的电磁斥力高速开断器强迫换流型介质恢复试验系统如图 7 所示。试验系统主要由电流回路、强迫关断回路、高电压回路及电磁斥力高速开断器(含斥力驱动回路)组成。各回路具体电气参数如下:电流回路电容 C_1 为 8 mF,预充电压 U_1 为 500 V,回路电感 L_1 为 15 μH ;强迫关断回路电容 C_2 为 8 mF,预充电压 U_2 为 350 V,电感 L_2 为 3 μH ,电感 L_3 为 2 μH 。斥力电容 C_0 为 600 μF ,预充电压 U_0 为 1500 V;试品并联电容 C_4

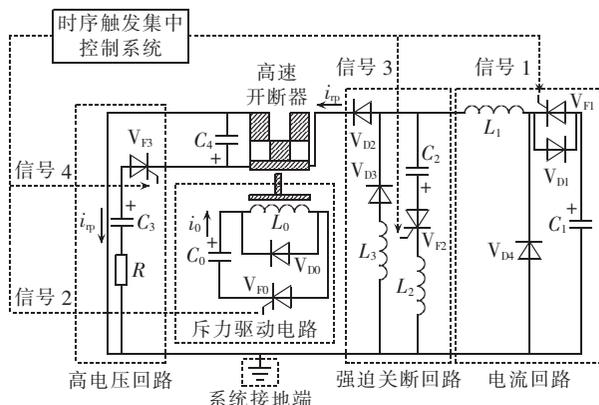


图 7 强迫换流型介质恢复试验电路

Fig.7 Forced commutation dielectric recovery circuit

容量 3 nF ; 高压回路电容 C_3 容量 $10 \text{ }\mu\text{F}$, 预充电压 U_3 为 1300 V ; 电阻 R ($10 \text{ }\Omega$) 的作用是限制高压回路的最大击穿电流。强迫关断回路中二极管 V_{D5} 的作用是防止高电压回路的高电压对低压侧的电流回路和强迫关断回路中器件造成击穿损坏。

试验中晶闸管的触发是由时序触发集中控制系统完成的, 时序控制策略如下。

a. 在介质恢复试验系统的零时刻, 时序触发集中控制系统将触发信号 1 发送至电流回路的晶闸管 V_{F1} , 在晶闸管 V_{F1} 导通后, 电容 C_1 通过电感 L_1 和电磁斥力高速开断器放电。

b. 经过指定的延时后, 时序触发集中控制系统将触发信号 2 发送至斥力驱动回路的晶闸管 V_{F0} , 在电磁斥力高速开断器的固有机械延时结束后, 开断器开始分断动作, 电弧产生。在强迫关断回路作用前, 电流会继续保持上升的趋势。

c. 再经过指定的延时后, 时序触发集中控制系统将触发信号 3 发送至强迫关断回路晶闸管 V_{F2} , 在晶闸管 V_{F2} 导通后, 流经电磁斥力高速开断器的电流开始下降。流经电磁斥力高速开断器的电流降为 0 后, 电流转移至 $V_{D3}-L_3$ 支路, 开始续流, 此时, 电磁斥力开断器开始进入介质恢复阶段。

d. 再经过指定的延时后, 时序触发集中控制系统将触发信号 4 发送至高电压回路晶闸管 V_{F3} , 电容 C_3 上的预充电压通过电阻 R 加载在电磁斥力高速开断器的断口两端, 测试电磁斥力开断器的介质恢复状态。

3 不同开断速度下的介质恢复特性分析

3.1 21.6 m/s 的开断速度下介质恢复性能分析

在第 1.2 节中已阐述了不同外部驱动电路电气参数对应的开断速度。本文在驱动电容容量 $300 \text{ }\mu\text{F}$ 、预充电压 1500 V 的基础上, 利用第 2 节所述试验系统进行了电磁斥力高速开断器的强迫换流型介质恢复试验。图 8 反映了 21.6 m/s 开断速度对应的介质恢复结果。

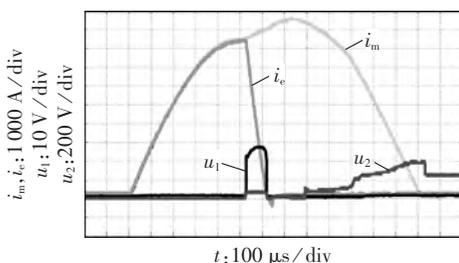


图 8 21.6 m/s 开断速度下的试验波形
Fig.8 Experimental waveforms at 21.6 m/s breaking speed

由图 8 可见: $t=0 \text{ ms}$ 时刻主回路导通, 电流 i_m 开始上升。 $t=0.41 \text{ ms}$ 时刻斥力驱动回路导通, 经过

$100 \text{ }\mu\text{s}$ 的固有机械延时后, 在 $t=0.51 \text{ ms}$ 时刻电磁斥力高速开断器开始分断工作, 建立 28 V 的电弧电压 u_1 ; 与此同时, 强迫换流回路晶闸管导通, 流经电磁斥力高速开断器的电流 i_e 开始下降, 在 $110 \text{ }\mu\text{s}$ 的时间内将峰值为 8400 A 的电流换流完毕; 在 $t=0.62 \text{ ms}$ 时刻, 电磁斥力高速开断器进入介质恢复阶段, 介质恢复持续了 $170 \text{ }\mu\text{s}$; 在 $t=0.79 \text{ ms}$ 时刻, 高电压回路晶闸管导通, 高电压加载在电磁斥力高速开断器两端。由电压波形 u_2 可见, 高电压回路预充的 1300 V 没有完全加载在试品两端。试品在两端起始阶段仅承受了 100 V 的电压, 随着时间的推移, 承受的最大的电压幅值也仅为 400 V , 这说明了电磁斥力高速开断器没有彻底完成介质恢复, 而是处于介质恢复的临界状态。

采用 Photron 型号 FASTCAM SA4 高速摄像机进行了高速摄像, 捕获电磁斥力高速开断器的运动轨迹。摄像机参数设置为: 摄像速度 $100\,000 \text{ fps}$ (每秒传输 $100\,000$ 帧), 快门速度 $1/177\,000 \text{ s}$, 分辨率 192×128 。通过高速摄像得到的开断器运动轨迹测量结果如图 9 所示。

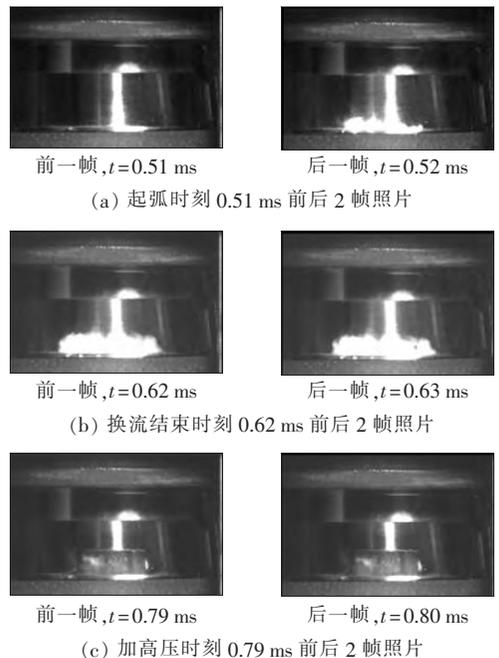


图 9 21.6 m/s 开断速度下介质恢复过程的高速摄像结果

Fig.9 High-speed photography of dielectric recovery process at 21.6 m/s breaking speed

图 9(a) 中, 前一帧照片为开断器动作之前的内部照片。高压加载时刻的开断器有效开距为 5.6 mm , 完成该行程耗时 $280 \text{ }\mu\text{s}$, 对应分断速度为 20.0 m/s , 与理论分析得到的分断速度 21.6 m/s 对比, 误差为 7.4% , 在工程允许误差范围之内。这个结果佐证了第 1.2 节的理论分析结果, 说明了电磁斥力高速开断器斥力仿真模型的有效性。

$t = 0.51 \text{ ms}$ 时刻,电磁斥力高速开断器被顶断,产生电弧,此后一帧(间隔 $10 \mu\text{s}$)捕捉到的图像中,可以观察到明显的燃弧现象。 $t = 0.62 \text{ ms}$ 时刻换流结束。 $t = 0.79 \text{ ms}$ 时高压加载至电磁斥力高速开断器断口两端,从图像中可以观察到明显的电弧,这说明了 1300 V 预充电压没有能够完全加载在试品两端的原因;由于介质恢复没有彻底完成,在加载高电压时刻依然存在高温等离子体,试品无法承受较大幅值的恢复电压。

3.2 37.2 m/s 的开断速度下介质恢复性能分析

在第 1.2 节中已阐述了不同外部驱动电路电气参数对应的开断速度。本文在驱动电容容量 $600 \mu\text{F}$ 、预充电压 1500 V 的条件下,利用第 3 节所述试验系统进行了电磁斥力高速开断器的强迫换流型介质恢复试验。图 10 反映了 37.2 m/s 的开断速度对应的介质恢复结果。

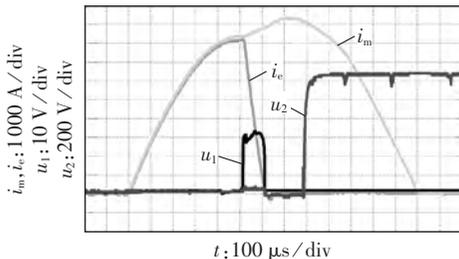


图 10 37.2 m/s 开断速度下的试验波形
Fig.10 Experiment waveforms at 37.2 m/s breaking speed

由图 10 可见: $t = 0 \text{ ms}$ 时刻主回路导通,电流 i_m 开始上升。 $t = 0.41 \text{ ms}$ 时刻斥力驱动回路导通,经过 $90 \mu\text{s}$ 的固有机电延时后,在 $t = 0.50 \text{ ms}$ 时刻电磁斥力高速开断器开始分断工作,建立 31 V 的电弧电压 u_1 ;与此同时,强迫换流回路晶闸管导通,流经电磁斥力高速开断器的电流 i_e 开始下降,在 $110 \mu\text{s}$ 的时间内将峰值为 8400 A 的电流换流完毕;在 $t = 0.61 \text{ ms}$ 时刻,电磁斥力高速开断器进入介质恢复阶段,介质恢复持续了 $170 \mu\text{s}$;在 $t = 0.78 \text{ ms}$ 时刻,高电压回路晶闸管导通,高电压加载在电磁斥力高速开断器两端。由电压波形 u_2 可见,高电压回路的 1300 V 预充电压完全加载到了试品两端,这说明电磁斥力高速开断器彻底完成了介质恢复。

通过高速摄像(摄像机参数同第 3.1 节)捕获电磁斥力高速开断器运动轨迹如图 11 所示。图 11(a)的前一帧图片为开断器动作之前的内部照片。高压加载时刻的开断器有效开距为 10.4 mm ,完成该行程耗时 $280 \mu\text{s}$,对应分断速度为 37.2 m/s ,达到了与爆炸辅助开断速度相当的水平,与理论分析的分断速度 37.2 m/s 间的误差为 0.5% ,在工程允许误差范围之内。这个结果佐证了第 1.2 节的理论分析结果,说

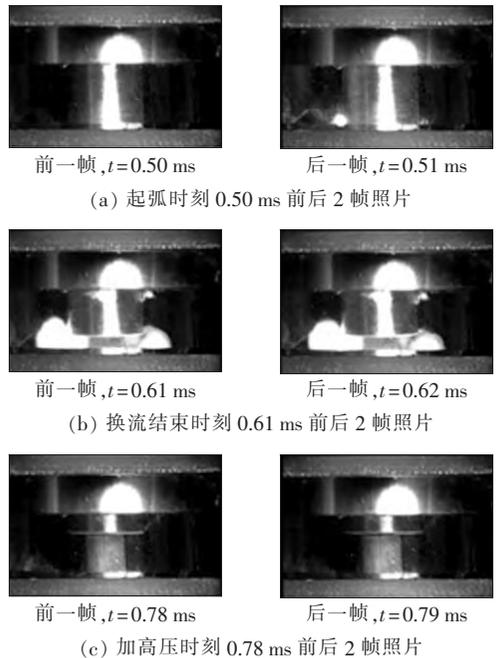


图 11 37.2 m/s 开断速度下介质恢复过程的高速摄像结果

Fig.11 High-speed photography of dielectric recovery process at 37.2 m/s breaking speed

明了电磁斥力高速开断器斥力仿真模型的有效性。

$t = 0.50 \text{ ms}$ 时刻,电磁斥力高速开断器被顶断,产生电弧,此后一帧(间隔 $10 \mu\text{s}$)捕捉到的图像中,可以观察到明显的燃弧现象。 $t = 0.61 \text{ ms}$ 时刻换流结束。 $t = 0.78 \text{ ms}$ 时高压加载至电磁斥力高速开断器断口两端,从图像中观察不到电弧,这说明了 1300 V 预充电压能够完全加载在试品两端的原因;由于介质恢复彻底完成,在加载高电压时刻,高温等离子体已经完成冷却,可以承受较大幅值的恢复电压。

4 结论

本文在建立的电磁斥力高速开断器斥力仿真模型的基础上,分析了不同驱动电容容量参数与开断速度峰值之间的关系曲线,设计了包含电流回路、强迫换流回路以及高压回路的强迫换流型介质恢复试验电路,完成了 2 种不同开断速度条件下的介质恢复性能对比试验,主要结论如下。

a. 随着驱动电容容量的增加,斥力盘速度峰值也随着线性增大。在驱动电容容量为 $100 \mu\text{F}$ 时,对应的开断速度峰值为 6.9 m/s ;在电容容量增大至 $600 \mu\text{F}$ 时,开断速度峰值增大至 37.2 m/s ,这个速度达到了与爆炸辅助开断速度相当的水平。

b. 采用电磁斥力高速开断器强迫换流型介质恢复试验系统,在换流电流峰值 8400 A 、介质恢复时间 $170 \mu\text{s}$ 、加载高电压 1300 V 的电气参数条件下,对比不同开断速度的介质恢复试验结果,结果显示开断速度为 37.2 m/s 的介质恢复性能要优于开断速

度为 21.6 m/s 的介质恢复性能。

试验示波图和高速摄像不仅仅说明了电磁斥力高速开断器斥力仿真模型的正确性,同时也佐证了提升开断速度对于优化电磁斥力高速开断器介质恢复特性的有效性。

通过高速摄像得到的开断器运动轨迹测量结果以及试验获取的开断速度对于介质恢复特性的影响规律,可用于指导电磁斥力高速开断器的优化设计。

参考文献:

- [1] 袁志方,庄劲武,王晨,等. 窄缝灭弧法提升电磁斥力高速开断器电弧电压的分析与试验[J]. 中国电机工程学报,2013,33(33):139-144.
YUAN Zhifang,ZHUANG Jinwu,WANG Chen,et al. Analysis and experimentation of increasing arc voltage in high-speed electromagnetic repulsion isolators based on arc extinguishing with a narrow slit[J]. Proceedings of the CSEE,2013,33(33):139-144.
- [2] 袁志方,庄劲武,王晨,等. 石英砂对于电磁斥力高速开断器介质恢复特性的影响[J]. 高电压技术,2014,40(1):294-299.
YUAN Zhifang,ZHUANG Jinwu,WANG Chen,et al. Influence of silica sand on dielectric recovery characteristic of high speed electro-magnetic repulsion isolators[J]. High Voltage Engineering,2014,40(1):294-299.
- [3] YUAN Zhifang,ZHUANG Jinwu,WANG Chen. Media recovering ability analysis of torus grid high-speed repulsive force switch [C]//Third IEEE International Conference on Information Science and Technology (ICIST). [S.l.]:IEEE,2013:117-119.
- [4] 武瑾. 基于电磁耦合双线圈模型电磁斥力机构的研究[D]. 武汉:海军工程大学,2012.
WU Jin. The electromagnetic repulsion mechanism research based on double electromagnetic coupling coil model[D]. Wuhan:Naval Engineering University,2012.
- [5] 袁志方. 直流感流熔断器合成试验的研究[D]. 武汉:海军工程大学,2011.
YUAN Zhifang. Research on synthetic circuit of direct current-limiting fuse[D]. Wuhan:Naval Engineering University,2011.
- [6] 戴超. 舰船低压大电流电弧触发式混合型限流熔断器研究[D]. 武汉:海军工程大学,2010.
DAI Chao. Research on shipboard low-voltage high-current arc-triggering hybrid current-limiting fuse[D]. Wuhan:Naval Engineering University,2010.
- [7] 陈搏. 高压大电流电弧触发式混合型限流熔断器研究[D]. 武汉:海军工程大学,2012.
CHEN Bo. Research on high voltage current arc triggering hybrid current limiting fuse[D]. Wuhan:Naval Engineering University,2012.
- [8] 庄劲武,张晓峰,杨锋,等. 船舶直流电网短路限流装置的设计与分析[J]. 中国电机工程学报,2005,25(20):26-30.
ZHUANG Jinwu,ZHANG Xiaofeng,YANG Feng,et al. Design and analysis of shipboard dc network short circuit limited device[J]. Proceedings of the CSEE,2005,25(20):26-30.
- [9] 陈搏,庄劲武,肖翼洋,等. 10 kV/2 kA 混合型限流熔断器用电弧触发器的分析与设计[J]. 高电压技术,2012,38(8):1948-1955.
CHEN Bo,ZHUANG Jinwu,XIAO Yiyang,et al. Analysis and design of arc trigger of 10 kV/2 kA hybrid current limiting fuse [J]. High Voltage Engineering,2012,38(8):1948-1955.
- [10] 王晨. 高温超导限流器在舰船电力系统中的应用研究[D]. 武汉:华中科技大学,2006.
WANG Chen. Application research on high-temperature superconduction current limiter in shipboard system[D]. Wuhan:Huazhong Science University,2006.
- [11] 戴超,庄劲武,杨锋,等. 直流混合型限流开关分析与设计[J]. 电机与控制学报,2011,15(1):68-73.
DAI Chao,ZHUANG Jinwu,YANG Feng,et al. Analysis and design of current-limiting process for DC hybrid current-limiting switch[J]. Electric Machines and Control,2011,15(1):68-73.
- [12] 杨峰,张晓峰,戴超,等. 爆炸活塞式大电流高速开断装置的设计与分析[J]. 电力自动化设备,2010,30(4):109-114.
YANG Feng,ZHANG Xiaofeng,DAI Chao,et al. Design and analysis of large-current high-speed interrupter based on explosive piston[J]. Electric Power Automation Equipment,2010,30(4):109-114.
- [13] MORI T. An advanced interruption method for low-voltage medium-capacity air-break contactors[J]. IEEE Trans on Industry Applications,1990,26(5):818-823.
- [14] BOMPA L,SCHUELLER P,SABONNADIÈRE J C. Analysis and synthesis of an electromagnet used for circuit breaker operation [J]. IEEE Trans on Magnetics,1985,21(6):2464-2467.
- [15] LI R,LI X,JIA S,et al. Study of different models of the wall ablation process in capillary discharge[J]. IEEE Trans on Plasma Science,2010,38(4):1033-1041.
- [16] WU Y,RONG M,YANG F,et al. Numerical modeling of arc root transfer during contact opening in a low-voltage air circuit breaker[J]. IEEE Transactions on Plasma Science,2008,36(4):1074-1075.
- [17] YANG F,RONG M,SUN Z,et al. A numerical study of arc-splitting processes with eddy-current effects [C]//17th International Conference on Gas Discharges and Their Applications,2008. GD 2008. [S.l.]:IEEE,2008:197-200.
- [18] BETZ T,KOENIG D. Influence of grading capacitors on the breaking capacity of two vacuum interrupters in series [J]. IEEE Trans on Dielectrics and Electrical Insulation,1999,6(4):405-409.
- [19] GIERE S,KARNER H C. Dielectric strength of double and single-break vacuum interrupters[J]. IEEE Trans on Dielectrics and Electrical Insulation,2001,8(1):43-47.
- [20] 程显,廖敏夫,段雄英,等. 采用电网高压母线负载电流供能的光控真空开关模块操动机构电源设计[J]. 高电压技术,2011,37(8):2073-2080.
CHENG Xian,LIAO Minfu,DUAN Xiongying,et al. Designment of operation mechanism power supply with fiber-controlled vacuum switch module applying energy supply provided by high voltage bus current[J]. High Voltage Engineering,2011,37(8):2073-2080.
- [21] BLUNDELL R E,FANG M T C. A simplified turbulent arc model for the current-zero period of a SF₆ gasblast circuit breakers[J]. Journal of Physics D:Applied Physics,1998,31:561-568.
- [22] LIU Xiaoming,CAO Yundong,WANG Erzhi. Numerical analyses on the interaction of arc and flow field for SF₆ circuit breaker

- [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2006(42):1047-1050.
- [23] 王晨, 庄劲武, 张晓锋, 等. 基于 IGBT 的新型直流电力系统限流装置的工作原理与实验研究[J]. 电工技术学报, 2006, 21(9): 57-61.
WANG Chen, ZHUANG Jinwu, ZHANG Xiaofeng, et al. Theory and testing research based on new IGBT DC current-limit device[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2006, 21(9):57-61.
- [24] 戴超, 庄劲武, 杨锋, 等. 大容量爆炸活塞式高速断路器分析与优化设计[J]. 高电压技术, 2011, 37(1):221-226.
DAI Chao, ZHUANG Jinwu, YANG Feng, et al. Analysis and optimum design of high-capacity high-speed interrupter [J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(1):221-226.
- [25] 江壮贤. 新型强迫换流型真空直流限流断路器研究[D]. 武汉: 海军工程大学, 2011.
JIANG Zhuangxian. Research on a new type DC current limiting circuit breaker based on artificial current zero of vacuum switch[D]. Wuhan: Naval Engineering University, 2011.
- [26] 袁志方, 庄劲武, 王晨, 等. 高速断路器的 10 kV/10 kA 介质恢复试验系统关键技术研究[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(6): 168-173.
YUAN Zhifang, ZHUANG Jinwu, WANG Chen, et al. 10 kV/10 kA dielectric recovery test system for high-speed isolators [J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(6):168-173.

作者简介:



袁志方

袁志方(1987—),男,湖南长沙人,博士研究生,主要从事混合型限流熔断器设计及开关电弧介质恢复理论研究(E-mail:yuanzhifang@sohu.com);

庄劲武(1967—),男,浙江宁波人,教授,博士研究生导师,博士,主要从事电力系统自动化与安全运行方面的研究工作。

Influence of breaking speed on dielectric recovery characteristic of high-speed electro-magnetic repulsion isolator

YUAN Zhifang¹, ZHUANG Jinwu¹, CHEN Qian¹, JIANG Zhuangxian¹, CHEN Bo²

(1. College of Electrical Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China;

2. Naval Military Representative Office in Dalian No.426, Dalian 116005, China)

Abstract: In order to improve the dielectric recovery characteristic of high-speed electro-magnetic repulsion isolator, the electrical parameters of external drive circuit are optimized based on its simulation model to obtain the parameter scheme for increasing the breaking speed to 37.2 m/s, which is nearly equal to the explosion assist breaking speed. A forced commutation dielectric recovery circuit composed of current loop, forced commutation loop and high-voltage loop is designed, based on which, the analytical experiments of dielectric recovery performance under the breaking speed of 21.6 m/s and 37.2 m/s are carried out and the results are compared. In addition, the photos of dielectric recovery process are shot by high-speed camera with these two speeds. Both experimental results and photos illustrate that, the simulation model is correct and the higher breaking speed can effectively optimize the dielectric recovery characteristic of high-speed electro-magnetic repulsion isolator.

Key words: high-speed electro-magnetic repulsion isolator; dielectric recovery characteristic; breaking speed; high-speed photography; models