

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2023.02.004

新型72.5 kV真空断路器的研发设计

姚灿江, 孙龙勇, 刘英英

(河南平高电气股份有限公司, 河南 平顶山 467001)

摘要: 为了适应国家“碳达峰、碳中和”的发展需求,研制具有结构简单、环境适用范围广、免维护和可靠性高等优点的开关设备是发展第三代环保智能变电站的产品基础。文中以72.5 kV真空断路器为研究对象,通过有限元仿真分析确定了真空灭弧室关键零部件的具体尺寸、动静触头开距和动静触头类型,并对断路器主回路进行温升仿真校核,计算结果表明,新设计的72.5 kV真空断路器具有额定通流3 150 A和开断40 kA故障电流的能力,各项型式试验的顺利通过验证了72.5 kV真空断路器结构设计的合理性。

关键词: 真空灭弧室; 绝缘特性; 磁场强度; 温升; 型式试验

Development and Design of New 72.5 kV Vacuum Circuit Breaker

YAO Canjiang, SUN Longyong, LIU Yingying

(Henan Pinggao Electric Co., Ltd., Henan Pingdingshan 467001, China)

Abstract: In order to meet the development needs of “carbon peaking and carbon neutrality” in China, the development of switchgear with such advantages as simple structure, wide range of environmental applications, maintenance-free and high reliability is the base for the development of the third generation of environmentally friendly intelligent substations. 72.5 kV vacuum circuit breaker is taken as the research object in this paper, the specific dimensions of the key parts of the vacuum interrupter, the clearance and type of dynamic and static contacts are determined through finite element simulation analysis, and the temperature rise simulation verification of the main circuit of the circuit breaker is carried out. The calculation results show that the newly designed 72.5 kV vacuum circuit breaker has the ability of rated current at 3 150 A and the breaking fault current at 40 kA. The various positive type tests verify the rationality of the structural design of the 72.5 kV vacuum circuit breaker.

Key words: vacuum interrupter; insulation properties; magnetic field strength; temperature rise; type test

0 引言

目前,中国电力系统处于高度发展阶段,电力开关设备中使用的SF₆气体总量呈现高速增长态势,而新增及改造的72.5 kV及以上开关设备几乎全部使用SF₆型高压电器,另外,电力开关设备中使用的SF₆气体在电弧作用下的分解物有强烈的腐蚀性和剧毒性,如SF₄, S₂F₂, SF₂, SOF₂, SO₂F₂, SOF₄和HF等^[1-3]。在SF₆开关设备损坏时,如内部电弧故障使压力释放装置动作或者外壳烧穿,会有大量SF₆气

体及其分解物向外排放到大气中,直接威胁到人身生命安全并污染大气环境。

SF₆气体为温室效应气体,世界各国都在积极采取措施来减少温室气体排放,对环境友好型开关设备的需求日益增加,市场潜力巨大。且SF₆气体在高寒地区存在液化现象,严重影响开关设备的可靠性,威胁电网安全^[3-5]。

而真空作为绝缘和灭弧介质具有绝缘性能优良、开断能力强的特点,且不会产生环境污染。真空断路器体积小、重量轻、结构简单、使用寿命长,

收稿日期:2022-08-24; 修回日期:2022-10-27

基金项目:平高集团有限公司科技项目资助(72.5 kV环保型柱式断路器的研制)。

Project Supported by Technology Projects of Pinggao Group Co., Ltd.(Development of 72.5 kV Environmental Protection Column-type Circuit Breaker).

适合频繁操作和快速开断,相对于SF₆气体断路器而言,真空断路器有以下几个方面的优势^[6-8]:

1)熄弧过程在密封的真空容器中完成,电弧和炽热气体不会向外界喷溅,不会污染周围环境。

2)真空的绝缘强度高,熄弧能力强,触头的行程短,一般均在几个厘米以内,因此操作功率小,整个断路器体积小、重量轻,使得真空断路器在箱式变电站、开关柜等装置中成为首选。

3)熄弧时间短,电弧电压低,电弧能量小,触头的电磨损小,因而分断次数多,电寿命长,适合于频繁操作和快速切断。

4)灭弧介质为真空,因而与海拔高度无关,同时没有火灾和爆炸的危险。

5)真空断路器结构简单,维修和维护工作量小。

真空灭弧室的性能决定了真空开关的综合性能,只有灭弧室技术的重大突破,才可带来真空开关技术水平的大幅提高,因此,针对真空断路器的绝缘性能、通流能力及小型化发展等突出问题,对真空灭弧室绝缘、通流和开断技术进行研究,并基于真空灭弧室绝缘、开断关键技术的研究成果研制72.5 kV单断口真空灭弧室,及以真空灭弧室作为断路器开断单元的72.5 kV的真空断路器产品,制造试验样机,研制出满足智能电网完善提升需求的新一代高压开关产品。

1 72.5 kV 真空断路器的结构特点

72.5 kV 真空断路器具有结构紧凑、体积小、操作功小、可靠性高和安装方便等优点。该产品主要包括真空灭弧室、支柱和弹簧机构等基本元件。72.5 kV 真空断路器三维结构示意图1,主要技术参数见表1。

2 72.5 kV 真空灭弧室绝缘性能优化研究

真空灭弧室的绝缘性能决定了真空断路器的整体绝缘性能,因此,对真空灭弧室绝缘特性进行优化研究,提高真空灭弧室内部零部件设计的合理性。真空灭弧室内部的绝缘性能会随着开距的增加而逐渐趋于饱和,仅增加动静触头开距,不仅会增大真空灭弧室的整体尺寸,而且真空灭弧室内部绝缘性能依旧不能达到相关的要求,同时,极大地增加了真空灭弧室动端运动质量^[9-13]。真空灭弧室结构设计见图2。在真空灭弧室中,其绝缘特性与内部关键零部件(动静触头、端部屏蔽罩、主屏蔽罩和瓷壳)的结构存在密切关系,关键零部件的优化设

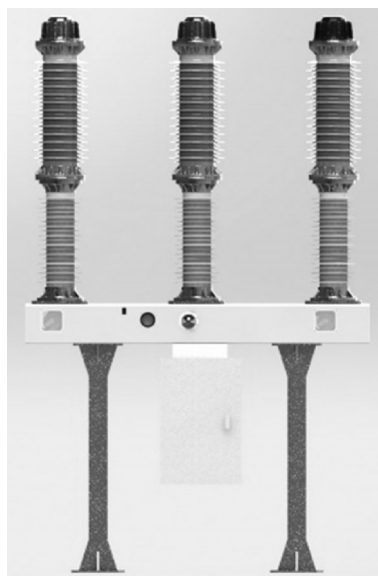


图1 72.5 kV 真空断路器三维结构示意图

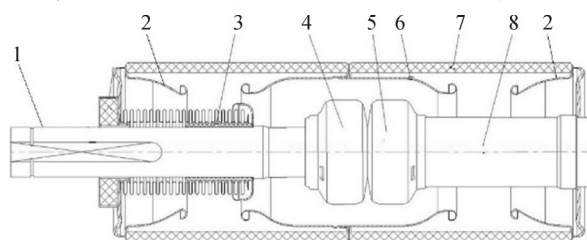
Fig. 1 3D structure diagram of 72.5 kV vacuum circuit breaker

表1 72.5 kV 真空断路器主要技术参数

Table 1 Main technical parameters of 72.5 kV vacuum circuit breaker

主要参数	数值
额定电压/kV	72.5
额定电流/A	3 150
额定短时/峰值耐受电流/kA	40/100
额定短路持续时间/s	4
1 min 额定短时工频耐受电压(相间/断口)/kV	160/160(+42)
额定雷电冲击耐受电压(相间/断口)/kV	380/380(+59)
端子静负载(纵向/横向/垂直)/N	1 250/750/1 000

计,不仅可以有效提高真空灭弧室内部绝缘裕度,而且有利于真空灭弧室的小型化和轻量化,因此,借助有限元仿真分析,研究端部屏蔽罩和主屏蔽罩长度及喉部直径、动静触头开距对内部电场分布的影响,从而设计出最优的真空灭弧室内部结构。



1—动触头棒; 2—端部屏蔽罩; 3—波纹管; 4—动触头;
5—静触头; 6—主屏蔽罩; 7—瓷壳; 8—静触头棒。

图2 真空灭弧室结构设计图

Fig. 2 Structure design diagram of empty arc interrupter

有限元仿真分析时,72.5 kV 真空灭弧室静触头施加电压为0 kV,动触头施加雷电冲击电压为439 kV,主屏蔽罩为悬浮电位。

2.1 端部屏蔽罩对绝缘特性的影响分析

当 72.5 kV 真空灭弧室动静触头开距、主屏蔽罩长度及喉部直径和端部屏蔽罩喉部直径固定为某一个值时,调整端部屏蔽罩长度,得到灭弧室内部电场强度随屏蔽罩长度变化的关系曲线见图 3。

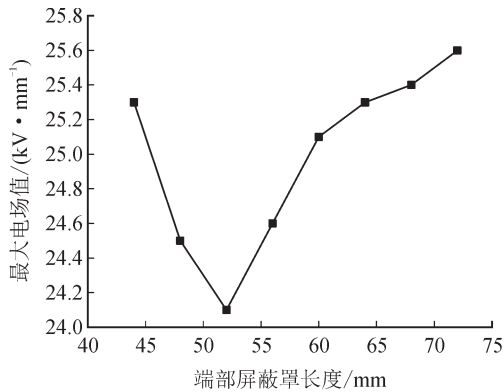


图 3 端部屏蔽罩长度与最大电场强度的关系曲线

Fig. 3 The relationship between the length of the end shield and the maximum electric field strength

由图 3 可知,真空灭弧室内部最大电场强度值随着端部屏蔽罩的长度先减小后增大,当端部屏蔽罩长度为 52 mm 时,灭弧室内部最大电场强度值最小,当端部屏蔽罩长度小于 52 mm 时,无法有效屏蔽端部焊接面,当端部屏蔽罩大于 52 mm 时,端部屏蔽罩与主屏蔽罩的间距会变小,会导致外瓷壳区域局部电场畸变,影响真空灭弧室内部绝缘性能,因此,端部屏蔽罩长度最优值为 52 mm,灭弧室内部电场强度最大值为 24.1 kV/mm。

当 72.5 kV 真空灭弧室动静触头开距、主屏蔽罩长度及喉部直径为某一固定值时,端部屏蔽罩长度为 52 mm 时,调整端部屏蔽罩喉部直径尺寸时,灭弧室内部电场强度随端部屏蔽罩喉部直径变化的曲线见图 4。

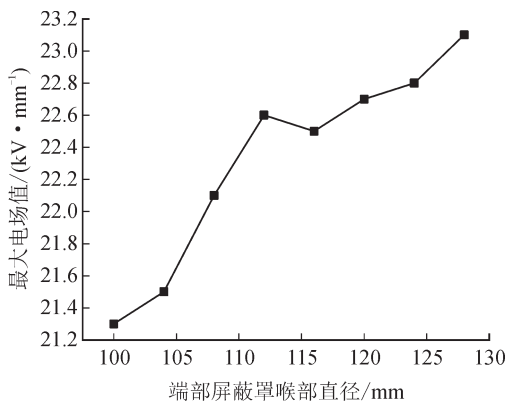


图 4 端部屏蔽罩喉部直径与最大电场强度的关系曲线

Fig. 4 The relationship between the throat diameter of the end shield and the maximum electric field strength

由图 4 可知,随着端部屏蔽罩喉部直径变大,灭弧室最大电场强度值逐渐增大,因此,适当减小端

部屏蔽罩喉部直径,可以提高真空灭弧室内部绝缘性能,但端部屏蔽罩喉部直径变小,会增大端部屏蔽罩加工难度,因此,综合考虑其加工工艺和绝缘特性,端部屏蔽罩喉部直径设计为 104 mm,此时真空灭弧室内部电场强度最大值为 21.5 kV/mm。

2.2 主屏蔽罩对绝缘特性的影响分析

当 72.5 kV 真空灭弧室动静触头开距、主屏蔽罩喉部直径固定为某一个值时,端部屏蔽罩长度为 52 mm,喉部直径为 104 mm 时,调整主屏蔽罩长度,得到灭弧室内部最大电场强度随主屏蔽罩长度变化的曲线见图 5。

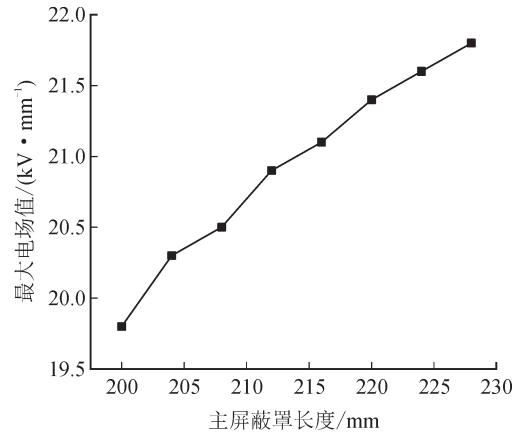


图 5 主屏蔽罩长度与最大电场强度的关系曲线

Fig. 5 The relationship between the length of the main shield and the maximum electric field strength

由图 5 可知,当主屏蔽罩长度增加时,真空灭弧室内部最大电场强度逐渐增大,因此,在确保完全屏蔽动静触头燃弧区间的前提下,主屏蔽长度设计的越短越好,综合考虑各方面的因素,主屏蔽长度设计为 208 mm,真空灭弧室内部电场强度最大值为 20.5 kV/mm。

当 72.5 kV 真空灭弧室动静触头开距固定为某一个值时,端部屏蔽罩长度为 52 mm,喉部直径为 104 mm,主屏蔽罩长度为 208 mm 时,调整主屏蔽罩喉部直径尺寸,得到灭弧室内部最大电场强度随主屏蔽罩喉部直径变化的曲线见图 6。

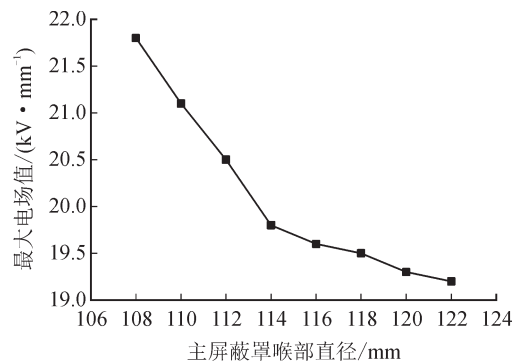


图 6 主屏蔽罩喉部直径与最大电场强度的关系曲线

Fig. 6 The relationship between the throat diameter of the main shield and the maximum electric field strength

由图6可知,当主屏蔽罩喉部直径尺寸逐渐增大时,灭弧室内部最大电场强度逐渐减小,当主屏蔽罩喉部直径大于114 mm时,最大电场强度减小的速率变小,但随着主屏蔽罩喉部直径增大,主屏蔽罩与瓷壳的间距越来越小,使瓷壳表面的沿面场强逐渐增大,容易发生瓷壳表面放电击穿现象,从而影响灭弧室内部绝缘特性,当选择主屏蔽罩喉部直径较小时,会增大主屏蔽罩的变径比,从而导致零部件加工难度增大,因此,主屏蔽罩喉部直径选择114 mm时,真空灭弧室内部电场强度最大值为19.8 kV/mm。

2.3 动静触头开距对绝缘特性的影响分析

当72.5 kV真空灭弧室主屏蔽罩和端部屏蔽罩尺寸均为上述最优值时,调整动静触头开距,得到真空灭弧室内部最大电场强度随开距变化的曲线见图7。

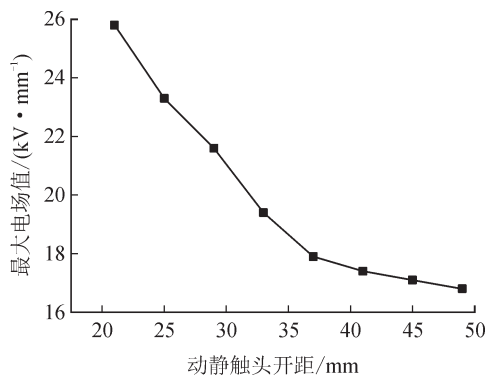


图7 动静触头开距与最大电场强度的关系曲线

Fig. 7 Curve of the relationship between the distance between the dynamic and static contacts and the maximum electric field strength

由图7可知,当动静触头开距小于35 mm时,随着动静触头开距的增大,灭弧室内部电场强度值迅速减小,而当动静触头开距大于35 mm时,灭弧室内部电场强度值随开距的增大而缓慢减小,因此,72.5 kV真空灭弧室动静触头开距选择应大于35 mm,但随着开距的增加,灭弧室内部零部件的复杂程度会增加,且对应的真空断路器机械性能要求也越来越高,综合考虑灭弧室内部绝缘性能、零部件复杂程度和断路器机械特性,选定灭弧室动静触头开距为37 mm,此时对应的真空灭弧室内部电场强度最大值为17.9 kV/mm,电场强度分布云图见图8。

3 72.5 kV真空灭弧室触头磁场研究

真空灭弧室能够开断大的电流和触头结构密切相关,不同的触头结构在空间中形成两种类型的

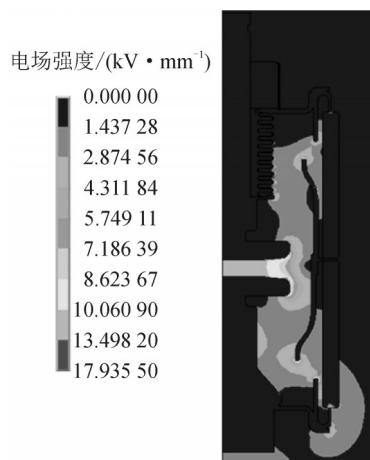


图8 动静触头开距为37 mm时,真空灭弧室电场强度分布云图

Fig. 8 When the distance between the dynamic and static contacts is 37 mm, the electric field distribution cloud diagram of the vacuum interrupter

磁场使得大电流可以被开断。在高电压等级的真空灭弧室中,一般选择纵磁布置的触头结构,常用的纵磁触头分为线圈式和马蹄铁式触头结构^[14-16]。对于线圈式触头而言,为了提高其增强磁场强度,经常采用增加线圈匝数的方式,使电流路径增加,但同样会带来触头电阻加大,影响其通流性能的问题^[16-19]。马蹄铁式触头结构是将触头里面的铁磁材按照一定规律排列成马蹄铁形状,并使其构成磁阻小的磁回路,且通流模块与导磁结构为两套独立的系统,从而使马蹄铁式触头结构具备较强的通流和开断能力^[19-23]。

磁场强度和磁滞性时间是影响真空灭弧室触头开断性能的重要因素,通过有限元仿真分析来研究两种触头的磁场强度和磁滞性时间,并对触头结构进行优化设计。

通过三维软件简化电弧模型直径为80 mm,长度为37 mm,在动触头施加电流1 kA,静触头流出。

通过仿真分析可知,线圈式和马蹄铁式触头在1 kA峰值电流时开距中心平面上沿A-A'轴方向的纵向磁场对比情况见图9,线圈式和马蹄铁式触头的磁滞性时间在开距中心平面上沿A-A'轴方向的对比情况见图10。

由图9可知,线圈式触头结构中心位置处磁场强度最大,沿着中心位置向电弧边缘磁场强度越来越小,线圈式触头磁场强度约为3.2~5.4 mT。马蹄铁式触头中心位置磁场强度最小,沿着中心位置向电弧边缘磁场强度越来越大,马蹄铁式触头磁场强度约为0.8~10 mT,马蹄铁式触头在开距中心平面

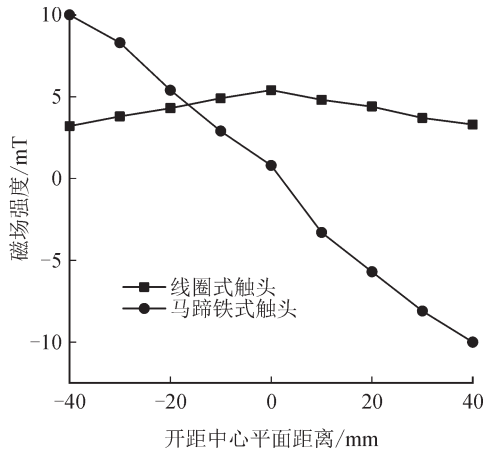


图9 沿A-A'轴方向的纵向磁场强度对比曲线

Fig. 9 Contrast curve of longitudinal magnetic field along the A-A' axis

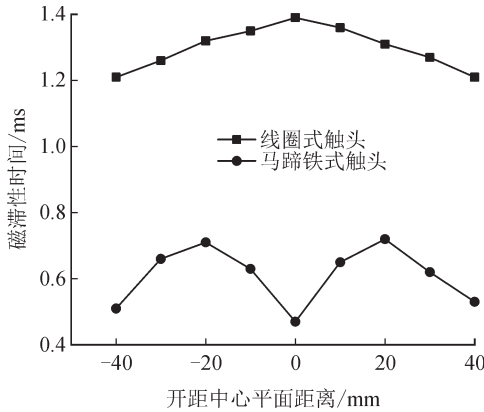


图10 沿A-A'轴方向的磁滞性时间对比曲线

Fig. 10 Comparison curve of hysteresis time along the A-A' axis

的纵向磁场强度分布情况见图 11。线圈式触头磁场强度两个极值之间相差不大,说明线圈触头磁场强度分布相对均匀,有利于开断过程中电弧的均压扩散。马蹄铁式触头结构磁场强度最大值约为线圈式触头的 2 倍,更加有利于真空灭弧室的大容量开断。

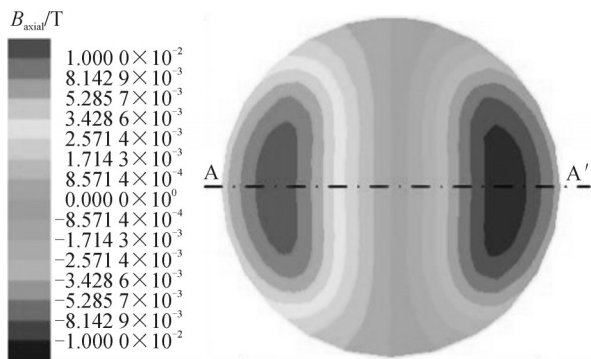


图11 马蹄铁式触头开距中心平面纵向磁场强度分布图

Fig. 11 Distribution of longitudinal magnetic field in the center plane of the horseshoe contact

由图 10 可知,线圈式触头磁滞性时间中间位置变化缓慢,在电弧边缘位置相对减小,其总体趋势变化平缓,线圈式触头磁滞性时间约为 1.21 ~ 1.39 ms。马蹄铁式触头结构磁滞性时间中间位置最小,在靠近边缘 1/2 的位置,出现了最大磁滞性时间位置,马蹄铁式触头磁滞性时间约为 0.47 ~ 0.72 ms。马蹄铁式触头磁滞性时间小于线圈式触头磁滞性时间,使真空灭弧室在开断故障电流时,触头间磁场强度迅速降为 0,有利于带电粒子的扩散。

4 72.5 kV 真空断路器温升特性优化研究

通过上述真空灭弧室绝缘和开断性能的优化研究,设计出 72.5 kV 真空灭弧室结构,并进行结构选配,完成 72.5 kV 真空断路器结构设计。针对 72.5 kV 真空断路器温升特性问题,通常采用有限元仿真分析的方法,简化其内部结构,节省计算资源,提升计算效率^[24-25]。在完成模型简化后,设置通流电流为 3 465 A,仿真结果见图 12。

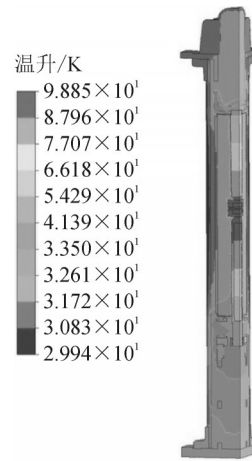


图12 72.5 kV 真空断路器温升仿真云图

Fig. 12 Simulation cloud diagram of temperature rise of 72.5 kV vacuum circuit breaker

由图 12 可知,真空灭弧室动静触头温升值高达 98.8 K,而动静触头棒与动静支座对接区域温升值为 65 K 左右,满足 IEC 标准规定的不高于 75 K 的要求。

为验证仿真结果的准确性,设计 72.5 kV 真空断路器温升试验,布置的温升测量点见图 13,温升试验状态见图 14。通过对 72.5 kV 真空断路器施加 3 465 A 的电流,并使之达到热平衡,各个测量点的温升测量值见表 2。

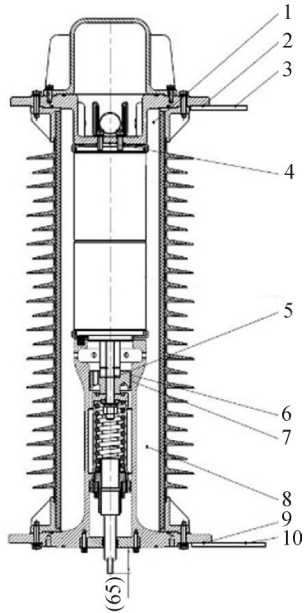


图13 72.5 kV真空断路器温升测量布点图

Fig. 13 Layout of temperature rise of 72.5 kV vacuum circuit breaker

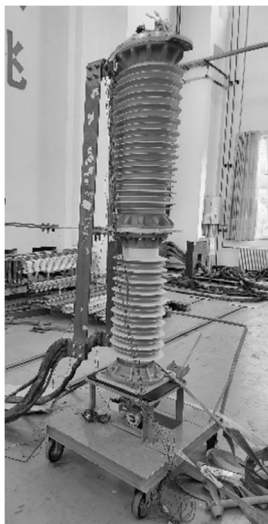


图14 72.5 kV真空断路器温升试验状态图

Fig. 14 State diagram of temperature rise test of 72.5 kV vacuum circuit breaker

表2 各个测量点的温升测量值

Table 2 Temperature rise measurement at each measuring point

序号	接触类型	实测值/K	允许值/K
1	N ₂	41.0	50.0
2	连接母线与接线端子	43.8	65.0
3	进线导流排	43.0	—
4	静触头棒与静支座	65.6	75.0
5	动触头棒与触指座	68.8	75.0
6	表带触指	66.5	75.0
7	表带触指	65.2	75.0
8	N ₂	38.0	50.0
9	连接母线与接线端子	42.7	65.0
10	进线导流排	41.2	—

由表2可知,72.5 kV真空断路器各个温升测量点的温升均满足IEC标准要求,其中动触头棒与触指座对接面温升值最大,未来在提升断路器通流能力时,可以考虑在动触头棒安装散热器,提高动触头棒的散热能力。

通过仿真结果与试验数据对比分析可知,试验温升值略高于仿真结果,其主要原因是试验过程中,样机未安装散热帽,致使样机在试验过程中,达到热平衡耗时较长,其次,温升仿真过程中,简化了部分结构,从而引入了一定的误差。

5 72.5 kV真空断路器型式试验验证

根据上述计算结果,新研制的72.5 kV真空断路器在国家高压电器质量监督检验中心(河南)顺利进行了IEC标准要求的全部型式试验^[26-30],并顺利通过。

5.1 绝缘试验

72.5 kV真空断路器顺利通过了IEC标准要求的全部绝缘试验,包括:1 min工频耐受电压(干试和湿试)相间和对地为160 kV,断口为160(+42) kV;额定雷电冲击耐受电压(全波1.2/50 μs峰值)相间和对地为380 kV,断口380(+59) kV。72.5 kV真空断路器绝缘试验状态见图15。

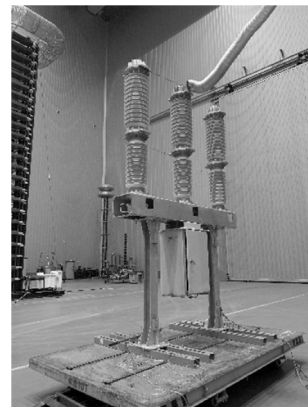


图15 72.5 kV真空断路器绝缘试验状态图

Fig. 15 State diagram of insulation test of 72.5 kV vacuum circuit breaker

5.2 基本短路和近区故障试验

72.5 kV真空断路器顺利通过了T10、T30、T60、T100s、T100a、L75和L90等开断性能试验,试验后真空灭弧室未见异常,试验状态见图16。

5.3 额定短路耐受电流试验

72.5 kV真空断路器通过4 s的额定短时耐受电流40 kA的试验,额定峰值耐受电流100 kA的试验。试验后真空断路器未见异常,试验状态见图17。

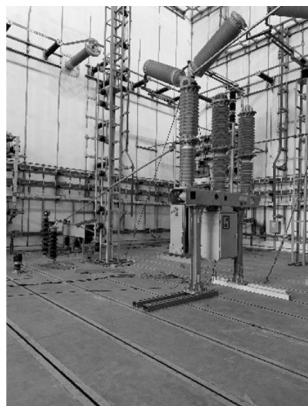


图16 72.5 kV真空断路器开断试验状态图

Fig. 16 State diagram of 72.5 kV vacuum circuit breaker breaking test



图17 72.5 kV真空断路器额定短时耐受电流试验、额定峰值耐受电流试验状态图

Fig. 17 State diagram of rated short-time withstand current and peak withstand current test of 72.5 kV vacuum circuit breaker

6 结论

通过72.5 kV真空断路器的研发设计及样机型式试验,得到以下结论:

1)72.5 kV真空灭弧室端部屏蔽罩长度设计为52 mm,喉部直径为104 mm;主屏蔽罩长度设计为208 mm,喉部直径为114 mm,动静触头开距设计为37 mm,此时真空灭弧室内部电场强度最大值为17.9 kV/mm。

2)马蹄铁式动静触头结构在开断过程中,磁场强度更大,磁滞性时间更短,有利于断路器大容量开断,且马蹄铁式触头结构通流模块与导磁结构为两套独立的系统,从而使马蹄铁式触头结构具备较强的通流能力。

3)温升仿真结果和试验中各个测量点的温升均满足IEC标准要求。

4)72.5 kV真空断路器各项型式试验的顺利通过验证了结构设计的合理性,为新时代环保型变电站提供了产品基础。

参考文献:

- [1] 徐国政,张节容.高压断路器原理和应用[M].北京:清华大学出版社,2006.
XU Guozheng, ZHANG Jierong. The theory and application of high voltage circuit breaker[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006.
- [2] 兰剑,冯英,李向阳.中压环保气体绝缘开关柜研究现状[J].供用电,2018,35(11):72-77.
LAN Jian, FENG Ying, LI Xiangyang. Review of medium voltage environment-friendly gas-insulated metal-enclosed switchgears[J]. Distribution & Utilization, 2018, 35(11): 72-77.
- [3] 孙竹森,兰剑.环保型开关柜的技术特点与发展趋势[J].中国电业(技术版),2014(6):53-56.
SUN Zhusen, LAN Jian. Technical characteristics and development tendencies of environment friendly switchgear [J]. China Electric Power (Technology Edition), 2014(6): 53-56.
- [4] 艾绍贵,衣立东,姚晓飞.126 kV真空断路器操动机构机械可靠性研究[J].高压电器,2020,56(7):77-85.
AI Shaogui, YI Lidong, YAO Xiaofei. Research on mechanical reliability of operating mechanisms of 126 kV vacuum circuit breakers[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(7):77-85.
- [5] 王志轩.“一带一路”电力企业的机遇与挑战[J].中国能源,2015,37(10):9-12.
WANG Zhixuan. Opportunities and challenges of “The Belt and Road” power group[J]. China Energy, 2015, 37(10): 9-12.
- [6] 林莘.现代高压电器技术[M].北京:机械工业出版社,2011.
LIN Xin. High voltage electric appliance design[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2011.
- [7] 张朝科,陈丽安,游一民.高原型12 kV真空断路器结构改进[J].广东电力,2017,30(7):101-105.
ZHANG Chaoke, CHEN Li'an, YOU Yimin. Improvement on structure of plateau 12 kV vacuum breaker[J]. Guangdong Electric Power, 2017, 30(7):101-105.
- [8] 马慧,刘志远,耿英三.高电压等级真空灭弧室绝缘设计研究[J].真空电子技术,2019(5):7-13.
MA Hui, LIU Zhiyuan, GENG Yingsan. Investigation on insulation design of high voltage vacuum interrupters[J]. Vacuum Electronics, 2019(5):7-13.
- [9] 郭黎黎,王平,韩辰光.12 kV氮绝缘开关柜中真空灭弧室外绝缘结构的电场优化设计[J].高压电器,2020,56(11):152-159.
GUO Lili, WANG Ping, HAN Chenguang. Optimal design of electrical field for external insulation of vacuum interrupter in 12 kV nitrogen insulated switchgears[J]. High

- Voltage Apparatus, 2020, 56(11):152-159.
- [10] 邓 虎. 12 kV 环保型开关柜与中置柜关键部件绝缘特性的研究[D]. 厦门: 厦门理工大学, 2016.
DENG Hu. The key component insulating properties research on environment friendly RMU and medium voltage metalclad switchgear[J]. Xiamen: Xiamen University of Technology, 2016.
- [11] 戈庆长. 从节能减排角度看配网中开关柜绝缘介质技术的发展[J]. 高压电器, 2017, 53(11): 219-224.
GE Qingchang. Reviewing the technology developing of insulating medium in ring network cabinets from the energy saving and emission reduction standpoint[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(11): 219-224.
- [12] 徐建源, 任春为, 王 博. 户外真空断路器绝缘强度的分析[J]. 高压电器, 2006, 42(5): 324-327.
XU Jianyuan, REN Chunwei, WANG Bo. Analysis of insulation strength of 12 kV outdoor circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2006, 42(5): 324-327.
- [13] 周立娟, 常玉斌, 刘玉兰. 浅谈 Ansoft Maxwell 软件在小型化真空灭弧室绝缘优化设计中的应用[J]. 真空电子技术, 2010(4): 77-80.
ZHOU Lijuan, CHANG Yubin, LIU Yulan. Study on Ansoft Maxwell software in the small vacuum interrupter insulate optimum design[J]. Vacuum Electronics, 2010(4): 77-80.
- [14] 王立军, 贾申利, 杨 泽. 纵磁作用下真空电弧的建模与仿真研究进展[J]. 高压电器, 2017, 53(3): 17-28.
WANG Lijun, JIA Shenli, YANG Ze. Research progress in modeling and simulation of vacuum arc under longitudinal magnetic field[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(3): 17-28.
- [15] 舒胜文, 阮江军, 黄道春. 双断口真空断路器开断特性的试验与仿真研究[J]. 高电压技术, 2014, 40(8): 2381-2388.
SHU Shengwen, RUAN Jiangjun, HUANG Daochun. Experimental and simulation research on breaking property of double-break vacuum circuit breakers[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(8): 2381-2388.
- [16] 司 红. 涡流对真空灭弧室开断电流的影响[J]. 真空电子技术, 2011(1): 53-55.
SI Hong. Eddy current influence on breaking current of vacuum interrupter[J]. Vacuum Electronics, 2011(1): 53-55.
- [17] GE Guowei, CHENG Xian, DUAN Xiongying. A review of the synergy effect in multi-break VCBs[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2019, 47(1): 671-679.
- [18] 董华军, 杨海军, 郭英杰. 一种具有横纵磁场的新型真空灭弧室触头三维磁场仿真[J]. 电工技术学报, 2015, 30(5): 111-118.
DONG Huajun, YANG Haijun, GUO Yingjie. 3D magnetic field simulation of a new-type contact with TMF-AMF for vacuum interrupters[J]. Transactions of China Electro-technical Society, 2015, 30(5): 111-118.
- [19] 孙 巍, 刘 洋, 张洪达. 基于 Ansys 的中压真空灭弧室内部磁场的仿真分析[J]. 黑龙江电力, 2014, 36(4): 299-304.
SUN Wei, LIU Yang, ZHANG Hongda. Simulation analysis of magnetic field inside medium voltage vacuum chamber based on Ansys[J]. Heilongjiang Electric Power, 2014, 36(4): 299-304.
- [20] LIN Renjie, WANG Lijun, SHI Weixin. Experiment investigation on triggered vacuum arc and erosion behavior under different contact materials[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2018, 46(8): 3047-3056.
- [21] SHI Zongqian, ZHANG Yingkui, WANG Qiaosen, et al. Numerical investigation on residual axial magnetic field in vacuum interrupter in DC interruption based on artificial current zero[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(4): 1915-1923.
- [22] 查鲲鹏, 杨岳峰, 詹 婷. 535 kV 混合式高压直流断路器绝缘结构设计及试验[J]. 南方电网技术, 2020, 14(2): 91-97.
CHA Kunpeng, YANG Yuefeng, ZHAN Ting. Insulation structure design and tests of 535 kV hybrid HVDC breaker[J]. Southern Power System Technology, 2020, 14(2): 91-97.
- [23] 曹 炜, 王永生, 张文青, 等. 电力系统短路电流直流分量及其对断路器开断能力的影响[J]. 电网技术, 2012, 36(3): 288-293.
CAO Wei, WANG Yongsheng, ZHANG Wenqing. Analysis on DC component in short-circuit current of power grid and its influence on breaking ability of circuit breakers[J]. Power System Technology, 2012, 36(3): 288-293.
- [24] 孙永恒, 张 铎, 赵云学. 800 kV 罐式 SF₆ 断路器的研制开发[J]. 高压电器, 2009, 45(6): 1-4.
SUN Yongheng, ZHANG Duo, ZHAO Yunxue. Research and development of 800 kV tank SF₆ circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(6): 1-4.
- [25] 秦涛涛, 董恩源, 刘贵新. 真空直流开断固有介质恢复强度研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(5): 1453-1459.
QIN Taotao, DONG Enyuan, LIU Guixin. Free recovery of dielectric strength after DC interruption in vacuum[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(5): 1453-1459.
- [26] 葛国伟, 廖敏夫, 黄金强. 双断口真空断路器配合特性仿真与试验[J]. 电工技术学报, 2016, 31(22): 57-65.
GE Guowei, LIAO Minfu, HUANG Jinqiang. Simulation and experimental of matching characteristics of vacuum circuit breakers with double-break[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(22): 57-65.
- [27] 田 宇, 许家源, 王永兴. 配 126 kV 单断口选相真空断路器长行程磁力机构设计及性能试验[J]. 电网技术, 2020, 44(11): 4445-4453.
TIAN Yu, XU Jiayuan, WANG Yongxing. Design and performance test of electro-magnetic force actuator for

- vacuum switch[C]//Annual Meeting of Power Transmission and Transformation.Nanjing, China: Chinese Society for Electrical Engineering, 2010:26-30.
- [10] 孙广生,王永荣,冯荣琼,等.高压直流开断与自激振荡[J].中国电机工程学报,1993,13(s1):96-99.
SUN Guangsheng, WANG Yongrong, FENG Rongqiong, et al. Self-excited oscillation in HVDC interruption[J]. Proceedings of the CSEE, 1993, 13(s1):96-99.
- [11] 张明锐,金鑫,刘金辉,等.基于IGBT的固态断路器开断策略研究[J].电力系统保护与控制,2012,40(18):123-126.
ZHANG Mingrui, JIN Xin, LIU Jinhui, et al. Study on breaking strategy of solid-state circuit breaker based on IGBT[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(18):123-126.
- [12] 史宗谦,贾申利.高压直流断路器研究综述[J].高压电器,2015,51(11):1-9.
SHI Zongqian JIA Shenli.Research on high-voltage direct current circuit breaker: A review[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(11):1-9.
- [13] FRANCK C M.HVDC circuit breakers: A review identifying future research needs[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(2):998-1007.
- [14] 何俊佳,袁召,赵文婷,等.直流断路器技术发展综述[J].南方电网技术,2015,8(2):9-15.
HE Junjia, YUAN Zhao, ZHAO Wenting, et al. Review of DC circuit breaker technology development[J]. Southern Power System Technology, 2015, 9(2):9-15.
- [15] 郑占峰,邹积岩,董恩源,等.直流开断与直流断路器[J].高压电器,2006,33(4):445-449.
ZHENG Zhanfeng, ZHOU Jiyan, DONG Enyuan, et al. DC Interruption and DC circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2006, 33(4):445-449.
- [16] 周猛,左文平,林卫星,等.电容换流型直流断路器及其在直流电网的应用[J].中国电机工程学报,2017,37(4):1045-1052.
ZHOU Meng, ZUO Wenping, LIN Weixing, et al. Capacitor commutated DC circuit breaker and its application in DC grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(4):1045-1052.
- [17] 严萍,王永荣,孙广生,等.自激振荡直流开断过程数学模型的研究[J].电工电能新技术,1992(3):43-50.
YAN Ping, WANG Yongrong, SUN Guangsheng, et al. A study of mathematical model of self-excited oscillation for HVDC interrupted[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 1992(3):43-50.
- [18] 穆建国,王莉,胡杰.直流固态断路器拓扑结构的设计与分析[J].中国电机工程学报,2010,30(18):109-114.
MU Jianguo, WANG Li, HU Jie. Analysis and design of topological structure for DC solid-state circuit breaker[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(18):109-114.
- [19] 胡杰,王莉,穆建国.直流固态断路器现状及应用前景[J].电力系统保护与控制,2009,39(19):145-150.
HU Jie, WANG Li, MU Jianguo. Present status of DC solid-state circuit breaker and its potential application[J]. Power System Protection and Control, 2009, 39(19):145-150.
- [20] 朱童,余占清,曾嵘,等.混合式直流断路器模型及其操作暂态特性研究[J].中国电机工程学报,2016,36(1):18-30.
ZHU Tong, YU Zhanqing, ZENG Rong, et al. Transient model and operation characteristics researches of hybrid DC circuit breaker[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(1):18-30.

谭喆(1974—),男,高级工程师,主要从事智能电网技术与电力系统分析方面的研究工作。

史宗谦(1975—),男,博士,教授,博导,主要从事真空放电等离子体理论及其应用方面的研究工作(E-mail: zqshi@mail.xjtu.edu.cn)。

(上接第30页)

- 126 kV single break vacuum circuit[J]. Power System Technology, 2020, 44(11):51-55.
- [28] 王建华,耿英三,刘志远.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. High voltage level vacuum switching technology[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(3):1-11.
- [29] HUANG Daochun, WU Gaobo, RUAN Jiangjun. Study on static and dynamic voltage distribution characteristics and voltage sharing design of a 126 kV modular triple-break vacuum circuit breaker[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2015, 43(8):2694-2702.
- [30] 葛国伟,张众,程显.双断口真空断路器的动态介质恢复协同特性[J].高电压技术,2018,44(9):2963-2969.
GE Guowei, ZHANG Zhong, CHENG Xian. Dynamic dielectric recovery synergy characteristic of vacuum circuit breaker with double-break[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(9):2963-2969.
- 姚灿江(1990—),男,工程师,硕士,主要从事高压开关设备的研发设计工作(E-mail:962860830@qq.com)。