

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.07.011

接触故障条件下12 kV开关柜的温升实验与仿真研究

王立军, 吕文卿, 马信友, 王 聪, 张闻哲

(西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 西安 710049)

摘要: 中压开关柜是电力系统中的重要保护设备,而温升超标是开关柜运行过程中频发的故障之一。文中以12 kV中压开关柜为研究对象,进行温升实验与仿真,研究开关柜在梅花触头、真空灭弧室内的动静触头这两处发生接触故障时的温升特性。文中研究了风机开启对开关柜各个部位温升与接触压力、接触方式、接触材料对开关柜温升的影响。研究结果表明:风机降温效果显著,且上静触头温升受风机的影响较大;由于镀银层磨损、梅花触头两侧弹簧疲劳与有效触指数量减少导致的梅花触头接触故障,均会造成开关柜温升增大,温度最高点位于真空灭弧室触头位置,但各个部位的温升增长幅度不同,当接触压力减小时,不同接触方式和接触材料对接触电阻的影响不同,因此梅花触头断路器侧弹簧断裂相较于母排侧造成的温升增长幅度更大;当动静触头处接触压力减小时,故障处的温升增长最为显著,上述特性可为初步判断故障发生部位提供参考。文中可以为开关设备的优化设计以及电力系统的安全运行提供理论借鉴。

关键词: 中压开关柜; 温升; 梅花触头; 接触压力; 接触故障

Temperature Rise Experiment and Simulation Research on 12 kV Switchgear Cabinet Under Contact Fault Conditions

WANG Lijun, LYU Wenqing, MA Xinyou, WANG Cong, ZHANG Wenzhe

(State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Medium voltage switchgear cabinet is an important protection equipment in power system, and excessive temperature rise is one of the frequent faults during its operation. In this paper the 12 kV medium-voltage switchgear cabinet is taken as the research object to carry out temperature rise experiments and simulations, and study the temperature rise characteristics of the switchgear cabinet in the contact failure of the tulip contact, the moving and the fixed contact in the vacuum interrupter. Also, in this paper the influence of fan activation on temperature rise of various parts switchgear cabinet, as well as the influence of contact pressure, contact method and contact material on the temperature rise of the switchgear are analyzed. The research results show that the cooling effect of the fan is remarkable, and the temperature rise of the upper fixed contact is greatly affected by the fan. Due to the wear of the silver plating layer, the contact failure of tulip contact by spring fatigue on both sides of the tulip contact and the reduction of the effective contact finger can cause the temperature rise of the switchgear cabinet to increase. The highest temperature point is located in the the position of vacuum interrupter contact and, however, the temperature rise increase of each part is different. When the contact pressure is reduced, different contact methods and contact materials have different influence on the contact resistance, so the spring fracture on the tulip contact circuit breaker side is greater than the temperature rise increase caused by the busbar side. When the contact pressure at the moving and fixed contacts decreases, the temperature rise increase at the fault site increases most significantly and the above characteristics can provide a reference for preliminary judgment of the fault position. This research can provide theoretical reference for optimal design of switchgear cabinet and safe operation of power system.

Key words: medium voltage switchgear cabinet; temperature rises; tulip contact; contact resistance; contact fault

收稿日期:2025-12-11; 修回日期:2026-02-04

基金项目:电力设备电气绝缘国家重点实验室自主研究课题(EIPE22125)。

Project Supported by State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment Fund(EIPE22125).

0 引言

作为配电网中不可或缺的保护设备,中压开关柜确保了电网运行过程中故障的有效隔离,是电力系统的安全稳定运行的重要设备。因此,一旦开关柜发生故障,会造成相关设备损坏及线路停电,造成巨大的经济损失^[1]。开关柜常见的故障有电气元件故障、绝缘故障、发热故障等^[2-3]。其中因发热故障而引发的事故层出不穷,在开关柜事故中占有相当高的比例^[4]。因此,研究开关柜内温度场分布情况及其温升特性,有助于避免开关柜过热故障的出现,具有较强的现实意义。

近年来随着计算机性能的提升和相关仿真软件的不断进步,针对开关柜温升研究的仿真不断涌现。汪倩等人建立了配电开关柜的多物理场耦合仿真,并通过扩大出气口和进气口以及增添风扇提升开关柜散热效率^[5]。李江涛等人利用 Comsol 建立大电流开关柜温度场仿真模型,研究不同负荷、环境温度、接触电阻条件下开关柜温升规律^[6]。刘旭光等人利用硅钢片作为旁路板,运用磁旁路原理降低柜体涡流损耗,并用仿真验证其降温效果^[7]。苏毅等人通过建立多物理场耦合仿真,研究空气开关柜在不同热源功率下开关柜内部和外壳的温度场分布规律,以此来判断开关柜发生故障的大概位置^[8]。武兴坛等人通过仿真结果分析出提高触头盒内的对流换热系数能提高中压开关柜的散热效率,于是设计了一种可以通过压差优化触头盒内流场分布的装置来降低开关柜温升^[9]。Yuan Yao 等人通过仿真检验新型高压开关柜的温升性能,并提出在开关设备顶部使用不锈钢来提高新型开关设备的温升性能^[10]。彭涛等人通过建立温度和流体场耦合的仿真模型,研究 3 种典型接触故障造成的中压开关柜的温度变化规律^[11]。王增彬等人通过分析自然对流散热和强制对流散热条件下的仿真,研究不同风机位置和风机数对开关柜温升影响^[12]。王睿等人利用 Ansys Workbench 对大电流开关柜进行涡流场和温度场仿真,通过仿真结果检验了改变触头片材料、改进触头结构、更换壳体材料换热改善开关柜通风条件等方法,对于高效降低开关柜温升的可靠性,并通过实验验证了仿真结果的真实性^[13]。马信友等人通过建立中压开关柜电磁—流体—温度耦合场仿真模型,来研究真空灭弧室内和梅花触头处的接触压力对开关柜温升的影响^[14]。

上述针对开关柜温升研究的文献中,研究开关柜温升规律以及研究提高开关柜散热效率和减少开关

柜产热的文献占据相当高的比例,研究接触故障条件下开关柜的温升特性的相关文献很少,尤其是与开关柜接触故障相关的实际温升实验相对较少。文中通过对 12 kV 中压开关柜进行温升实验和建立基于电磁—气流—温度场耦合的仿真模型,来研究中压开关柜在梅花触头、真空灭弧室的动静触头这两处在发生接触故障时的温升特性。对于梅花触头,文中研究了梅花触头镀银层磨损、两侧弹簧疲劳、有效接触触指数量减少对开关柜温升分布特性的影响。

1 建模及仿真设置

1.1 模型建立

文中所研究的中压开关柜的型号为 KYN28A-12,该中压开关柜最高工作电压为 12 kV,额定电流为 3 150 A,主要的组成部件为外壳、断路器手车母排触头等。由图 1 可见,文中在确保仿真准确性的前提下,使用 UG NX 对开关柜实物进行等比例的建模,并在此基础上简化了部分非导流结构,只保留触头盒、壳体、极柱及电流互感器等对气流场有影响的结构。梅花触头作为开关柜中故障频发的部件,需重点关注,为此文中建立了精细的梅花触头模型,将 64 片两两紧贴的触指等效为 32 片梅花触指。见图 2。考虑到接触电阻对温升的影响,在梅花触头与静触头接触的部位、以及真空断路器中的动静触头接触处添加了接触电阻模型。

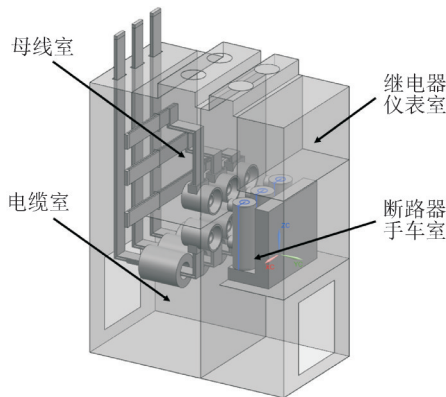


图 1 开关柜仿真模型

Fig. 1 Switchgear simulation model

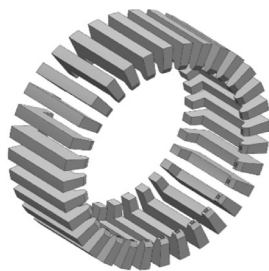


图 2 梅花触头几何模型

Fig. 2 Plum contact geometry

文中应用 Holm 公式^[15],对开关柜内的接触电阻进行计算。

$$R_j = K(0.102F)^{-m}$$

(1)

式(1)中: R_j 为接触电阻, $\mu\Omega$; F 为接触压力,N; K 为接触材料密度 ρ 和材料布氏硬度 H 的相关函数; m 为常数, m 的值与接触面类型有关,梅花触头与静触头和出线臂分别是线接触和面接触,对于面接触 m 为1,对于线接触 m 为0.5~1。

梅花触头与静触头,主体材料为Cu,由于两者表面均有镀银层,因此此处的接触电阻模型在材料的选择上为Ag,其布氏硬度为80 N/mm²。真空灭弧室内的动静触头的接触电阻模型设置的材料为CuCr50,其布氏硬度为128 N/mm²;在接触电阻模型的形状上,真空灭弧室内的采用传统工程上使用的圆柱体;而梅花触头处,由于圆柱体的使用不便,因此采用圆弧片的结构,圆弧片的截面积与圆柱体截面积相同,因此效果等效。

1.2 仿真设置

文中的中压开关柜多物理场耦合温升仿真基于 Ansys 平台,具体仿真流程见图3。为了模拟断路器隔室内部装配的断路器中的真空环境,文中将极柱内的气体设置为抑制。此外由于仪器仪表室与其他隔室互不连通,对开关柜的温升影响很小,可将其内部气体抑制,使仿真计算量有效减少,提高计算速度。

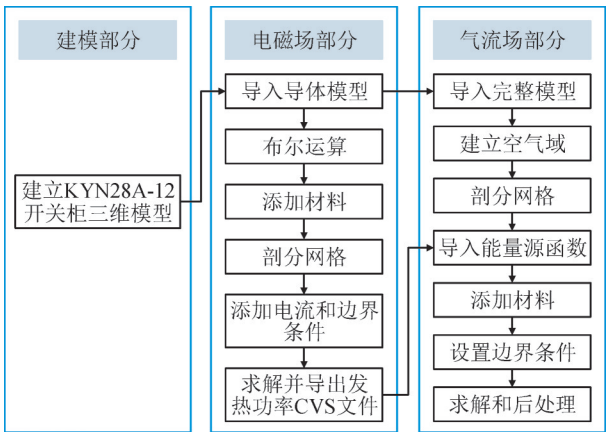


图3 电磁—气流—温度场耦合仿真流程

Fig. 3 Electromagnetic-airflow-temperature field coupling simulation process

文中通过斯蒂芬—波尔茨曼定律去计算并设置仿真的热辐射率,表达式为

$$P_{\text{is}} = \sigma \varepsilon_{\text{f}} (T_2^4 - T_1^4)$$

(2)

式(2)中: P_{is} 为单位面积因辐射的发散的功率,W; σ 为斯忒藩—玻耳兹曼常数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$; ε_{f} 为辐射率; T_2 为发热体表面温度,K; T_1 为接受辐射物体的温

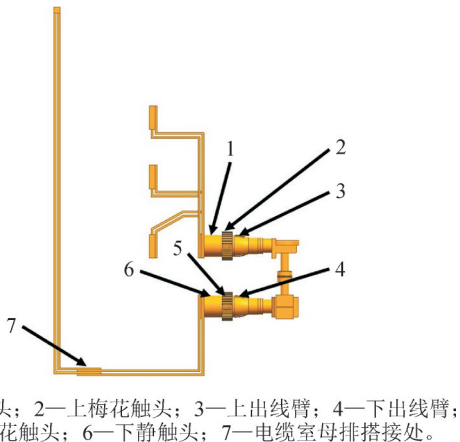
度,K。

开关柜的风机位于母线隔室和断路器隔室顶部,风机为轴流抽风机,通过抽出开关柜内高温气体来实现强制对流换热。文中通过添加空气流入和流出的边界条件来模拟开关柜风机运行时的强制对流环境,将风机流量—压力曲线等效为交界面压强曲线,通过交界面压强曲线设置空气流入和流出面的边界条件^[16]。网格剖分方式直接影响仿真结果的正确性以及仿真求解速度。文中在进行开关柜气流场仿真求解时,中压开关柜及空气域,均采用基于距离精度与曲率精度的网格剖分方式。

2 正常状态下开关柜温升仿真与实验验证

2.1 0.6倍额定电流下开关柜温升仿真与实验验证

在开关柜实际运行过程中,运行电流一般为0.6倍额定电流,即1 890 A,且风机关闭。因此本节中以正常状态下的12 kV 开关柜作为研究对象,研究其在上述条件下的仿真及实验的温升分布情况,温升检测点分布图见图4。



1—上静触头; 2—上梅花触头; 3—上出线臂; 4—下出线臂; 5—下梅花触头; 6—下静触头; 7—电缆室母排搭接处。

图4 温升检测点分布图

Fig. 4 Temperature rise detection point distribution map

设置开关柜环境温度为27℃,温升数据取ABC三相平均值。该条件下的温升仿真结果见图5。为了验证仿真结果的准确性,文中对正常状态下的中压开关柜进行温升实验。温升实验前,确认开关柜各部位正常运行。实验地点为实验室,其为相对密闭的环境,因此可利用控温装置来控制实验的环境温度。并通过更改大电流发生器电流输出设置来为开关柜提供不同大小的负载电流。温度巡检仪每10 min记录一次温度,当两次温度差距小于或等于0.1℃时,认为温升达到稳定,本实验开关柜温升在8 h左右达到稳定。

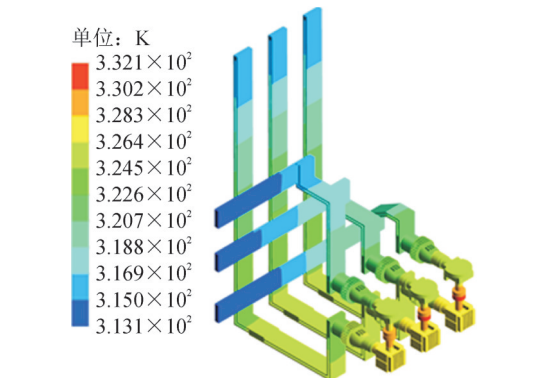


图 5 电流为 1 890 A 且正常运行时温升分布图

Fig. 5 Temperature rise distribution at 1 890 A and normal operation

温升实验时,关闭风机,测量并记录开关柜环境温度为 27 ℃,使用热电偶作为传感器。记录开关柜温升达到稳态时各个温升测试点的温升数据。将实验结果与仿真结果进行对比,见图 6。

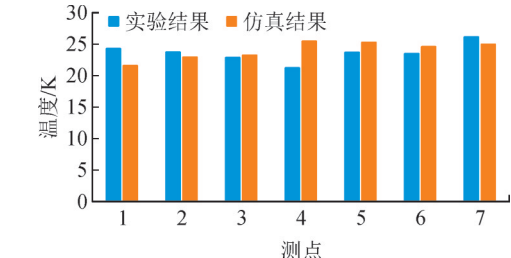


图 6 正常状态实验结果与仿真结果对比

Fig. 6 The results of the normal state experiment are compared with the simulation results

从图 5 中可知,即使风机未启动,在正常状态下运行的开关柜温升也符合国标^[17]。温升最大值为 32.1 K,位于真空灭弧室内,这是由于动静触头之间接触电阻约占真空灭弧室总电阻的十分之一,其欧姆损耗为 10.3 W,接触电阻较大,产热较多;其次真空环境导致外界气体与灭弧室内导体不能进行对流换热,灭弧室内的导体仅能通过热传导和热辐射进行热量交换;同时极柱的主要材料为环氧树脂,热导率低,导热能力差。综合以上因素,真空灭弧室内部散热能力较差。

2.2 不同负载电流下开关柜温升仿真

开关柜温升情况主要由开关柜产热量以及散热条件决定,而产热功率和散热条件主要受开关柜负载电流和内部气流状态影响。在实际工程应用中,风机一般只在开关柜运行电流较大时开启。因此本节中以正常状态下的 12 kV 中压开关柜为研究对象,设置环境温度为 27 ℃,开关柜负载电流为 630、1 260、2 520、3 150 A,再加上前文的 1 890 A,共计 5 组仿真,设置风机在大电流(2 520 A)及以上开启,记录中压开关柜各个测试点温升数据见图 7。

对比风机开启前后温升数据可知,随着负载电

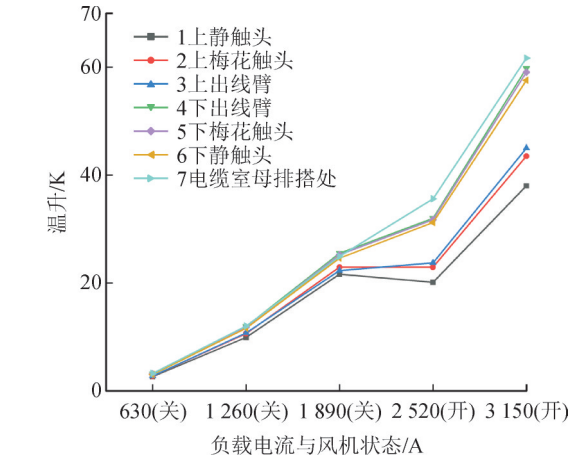


图 7 不同负载电流下的温升

Fig. 7 Temperature rise at different load currents

流的增大,开关柜温升涨幅显著降低。通过进一步对比分析可以发现,在风机开启之前,1、2、3 号检测点温升相差不大;4、5、6 号检测点温升相差不大。在风机开启后,1 号上静触头温升低于 2 号和 3 号检测点温升,说明上静触头相比上梅花触头和上出线臂这两处检测点,受风机的影响较为明显。而 4、5、6 号这 3 处检测点的温升在风机开启前后都相差不大,说明下静触头、下梅花触头、下出线臂这 3 处受风机的影响基本相同。

图 7 中温升和负载电流的拟合结果见表 1、2,在开关柜内部气流状态相同时,电流和温升呈平方关系,即温升正比于电流的平方,这一关系曾在相关文献中被提出^[18-20]。

表 1 风机关闭条件下温升与负载电流关系	
Table 1 The temperature rise is related to the load current under the condition of fan shutdown	
温升检测点	关系式
1 上静触头	$f(x)=6.342x^{1.925}$
2 上梅花触头	$f(x)=6.765x^{1.917}$
3 上出线臂	$f(x)=6.804x^{1.935}$
4 下出线臂	$f(x)=7.641x^{1.894}$
5 下梅花触头	$f(x)=7.595x^{1.885}$
6 下静触头	$f(x)=7.454x^{1.877}$
7 电缆室母排搭接处	$f(x)=7.792x^{1.827}$

表 2 风机开启条件下温升与负载电流关系	
Table 2 The relationship between the temperature rise and the load current under the condition of fan on	
温升检测点	关系式
1 上静触头	$f(x)=2.498x^{2.335}$
2 上梅花触头	$f(x)=2.847x^{2.336}$
3 上出线臂	$f(x)=2.942x^{2.338}$
4 下出线臂	$f(x)=4.225x^{2.269}$
5 下梅花触头	$f(x)=4.213x^{2.262}$
6 下静触头	$f(x)=4.238x^{2.235}$
7 电缆室母排搭接处	$f(x)=5.608x^{2.059}$

3 梅花触头接触故障下的温升特性研究

梅花触头作为连接真空断路器导电臂和静触头的关键部件。相关数据表明,因梅花触头故障导致的开关柜发热故障,占总发热故障的90%^[21]。而导致梅花触头接触故障的因素有梅花触头紧固弹簧疲劳、梅花触头镀银层磨损、梅花触头和静触头错位、梅花触头插入深度不足等^[22]。本节中分别探究梅花触头在镀银层磨损、梅花触头两侧弹簧疲劳、有效接触的触指数量减少,这3种接触故障下开关柜的温升特性。

3.1 镀银层磨损

在开关柜日常检修中需将断路器手车拉出开关柜,因此梅花触头需要反复插入,此过程中镀银层磨损是不可避免的。而随着开关柜运行年限增加,镀银层不断磨损,导致梅花触头的接触电阻增加,最终引起发热故障。梅花触头的镀银层有助于降低开关柜温升,通常镀银层厚度有12、8 μm等。

为了探究镀银层磨损对开关柜温升的影响,设置仿真负载电流为1 890 A,环境温度为27 ℃,风机关闭,6个梅花触头均发生镀银层磨损。梅花触头的银镀层磨损会导致Holm公式中的系数K增大,进而接触电阻增大,在仿真中,通过减小梅花触头处接触电阻模型的半径,来模拟梅花触头镀银层磨损的状态。而在实验中,通过用镀银层为8 μm的梅花触头代替原来的镀银层为12 μm的梅花触头,来模拟梅花触头镀银层磨损的状态。

两种不同镀银层厚度梅花触头的实物图、仿真结果、实验与仿真结果对比分别见图8-10。由图10可知,仿真结果的平均相对误差为7%,仿真结果较为准确。对比图9和图5,温度最高点均位于真空灭弧室触头位置,温度最低点均位于母排位置。当梅花触头发生接触故障时,开关柜的温度最高点与正常状态下相比升高8 K,温度最低点升高1 K,说明因梅花触头镀银层磨损导致的接触故障对真空灭弧室触头处的影响较大,对母排末端的影响较小。形成该结果的主要原因有:①两处与接触故障发生部位的距离,母排末端远离梅花触头,当热量从故障部位通过热传导向母排末端传递的同时不断和周围空气发生热对流,因此距离故障部位越远,由接触故障造成的温升越小;②两处散热条件不同,真空灭弧室内部散热条件较差(这一点在2.1节对图5的分析中已给出了具体解释),而母排与空气接触面积大,散热条件与真空灭弧室相比较为优越。

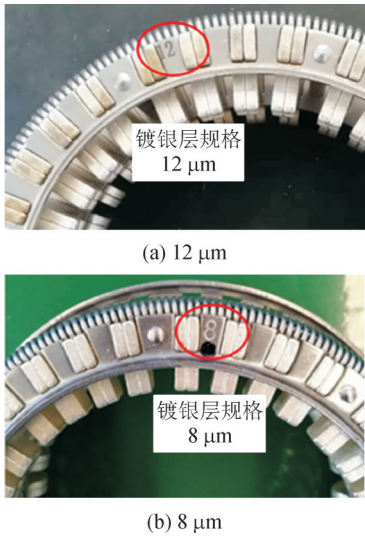


图8 不同镀银层厚度的梅花触头

Fig. 8 Plum contact with different silver plating thicknesses

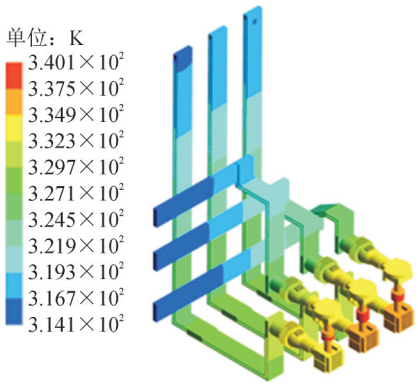


图9 电流为1 890 A时镀银层磨损仿真结果

Fig. 9 Simulation results of silver plating layer wear at 1 890 A

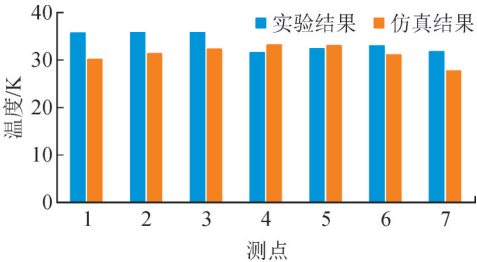


图10 镀银层磨损实验结果与仿真结果对比

Fig. 10 Silver plating wear experiment results compared with simulation results

前文用实际实验验证了梅花触头镀银层磨损状态下的开关柜仿真模型计算结果的准确性。在后续的工作中,继续使用该仿真模型,研究在梅花触头镀银层磨损,不同负载电流的条件下开关柜的温升特性,开关柜的环境温度设置为27 ℃,负载电流设置为630、1 260、2 520、3 150 A,风机设置与2.2节相同。仿真结果见图11。

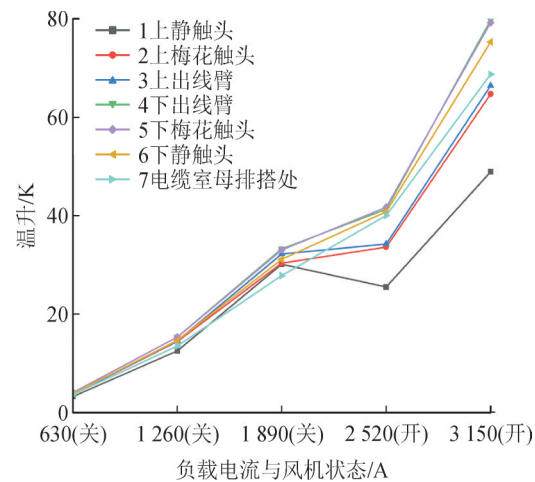


图 11 镀银层磨损下不同负载电流仿真结果

Fig. 11 Simulation results of different load currents under silver plating wear

对比图 11 和图 7 的温升数据可知,各个检测点的温升均高于正常状态下的温升。且当开关柜的负载电流为大电流(3 150 A),梅花触头镀银层磨损时,即使此时风机开启,开关柜温升仍超出了国家标准的要求。

表 3 与图 12 为数据处理结果,从表 3 与图 12 中可知,在镀银层磨损导致梅花触头处接触电阻增大的条件下,随着负载电流的增大,温升增长的绝对值和相对百分比均随之增大,说明负载电流越大,镀银层磨损导致的接触故障带来的影响越大,越容易造成开关柜发热故障。因此开关柜在日常工作时的负载电流为额定电流的 60%,一般会在额定电流或超过额定电流条件下运行。

表 3 上下梅花触头在镀银层磨损状态下的温升增长

Table 3 The temperature rise of the upper and lower plum contacts under the wear of the silver plating layer increases

负载电 流/A	风机状态	2 上梅花触头温升/K	5 下梅花触头温升/K
630	关	0.6	0.9
1 260	关	3.8	3.5
1 890	关	8.4	7.8
2 520	开	10.7	10.0
3 150	开	21.2	20.1

3.2 梅花触头两侧弹簧疲劳

文中研究的 12 kV 中压开关柜内部的梅花触头母排侧和断路器侧各有两根环状弹簧,该弹簧用于固定梅花触头,随着使用时间的增长,一直处于拉伸状态的弹簧极易出现疲劳失效甚至断裂的情况。

本节中通过探究梅花触头一侧有一根弹簧断裂这种较为极端的情况,来研究开关柜的温升特性。设置开关柜风机关闭,环境温度为 27 ℃,负载

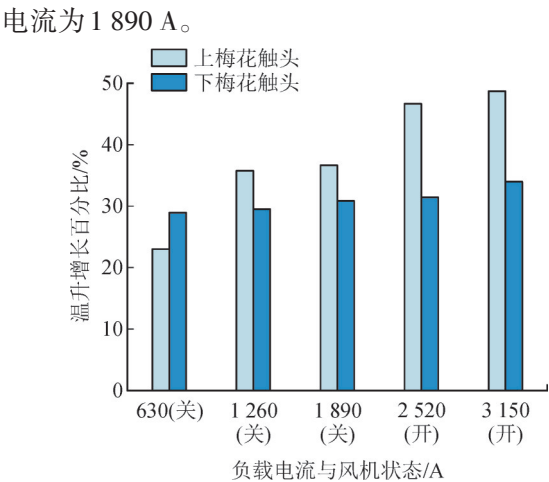


图 12 上下梅花触头在镀银层磨损状态下的温升增长比例

Fig. 12 The proportion of temperature rise of the upper and lower plum contact under the wear of the silver plating layer

1)梅花触头母排侧弹簧断裂。实验中将开关柜所有梅花触头的母排侧外侧的弹簧拆卸掉。梅花触头母排侧弹簧断裂会导致母排侧的接触压力 F 减小,由 Holm 公式可知,接触压力 F 减小会导致接触电阻 R_c 增大,仿真中通过调整接触电阻模型的横截面积来模拟梅花触头母排侧弹簧断裂的状态。所得仿真结果见图 13。各个检测点实验与仿真温升数据对比见图 14。

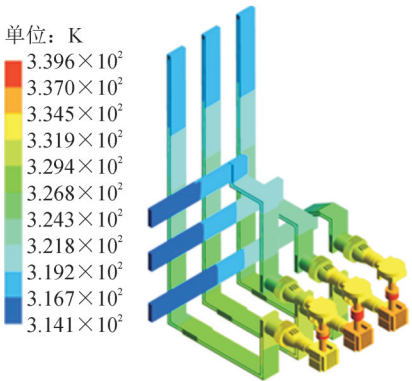


图 13 电流为 1 890 A 时缺少梅花触头母排侧外侧弹簧仿真结果

Fig. 13 The simulation results of the outside spring on the female side of the plum contact are missing at 1 890 A

对比图 14 与图 6 可知,静触头、梅花触头、出线臂 3 处温升增长约 6.9 K。由图 13 可知,开关柜温度最大值处仍在真空灭弧室动静触头处,此处温升增长约 7.5 K。由于缺失了一侧弹簧,梅花触头与静触头之间接触压力减小为原来的一半。通过 Holm 公式可知,接触压力与接触电阻是负指数次幂的关系,接触压力减小,会导致接触电阻增大,进而造成开关柜温升增长。

2)梅花触头断路器侧弹簧断裂。实验中把开关

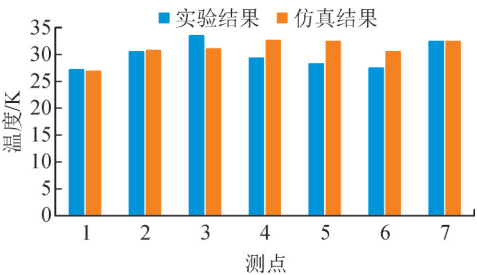


图 14 缺少梅花触头母排侧外侧弹簧的实验结果与仿真结果对比

Fig. 14 The experimental results of the absence of the external spring on the female side of the plum blossom contact are compared with the simulation results

柜所有梅花触头的断路器侧外侧的弹簧拆卸掉。由于正常状态下梅花触头较为牢固的固定在出线臂上,是断路器手车的一部分,因此在前面的工作中忽略了二者间的接触电阻。本节中,拆除弹簧后,断路器侧只剩一根弹簧的梅花触头出现晃动的现象,因此需要在出线臂与梅花触头之间添加接触电阻模型,从而实现这种情况的模拟。梅花触头断路器侧外侧弹簧断裂仿真结果见图 15。

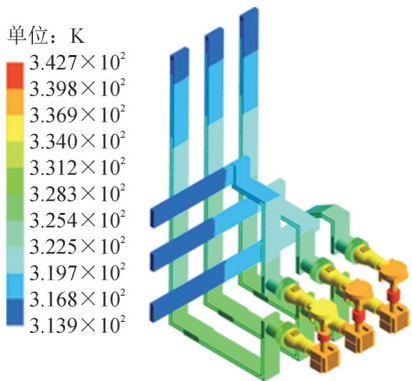


图 15 梅花触头断路器侧外侧弹簧断裂仿真结果

Fig. 15 Simulation results of spring breaker on the outside side of the plum blossom contact circuit breaker

实验与仿真结果对比见图 16,静触头、梅花触头、出线臂这3处温升增长约9.6 K。对比图 16与图 14可知,断路器侧弹簧断裂造成的温升增长幅度更大,带来的安全隐患更大,造成这种情况的因素有两个。

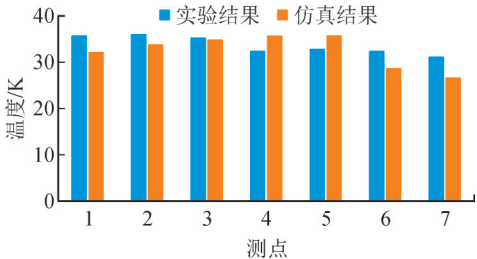


图 16 梅花触头断路器侧外侧弹簧断裂实验结果与仿真结果对比

Fig. 16 The experimental results of the spring breaking on the side of the plum blossom contact circuit breaker are compared with the simulation results

1)梅花触头与静触头和出线臂分别为线接触和面接触,是两种不同的接触方式。通过分析文中 1.1 节中的 Holm 公式可知,当接触方式为线接触时,公式中的指数常数 m 为 0.5~1;当接触方式为面接触时, m 为 1。当接触压力都减小为原来的一半时,面接触的接触电阻增长幅度比线接触要大,因此断路器侧弹簧断裂造成的温升增长幅度更大。

2)静触头接触面的材料为银,而出线臂接触面的材料为铜。通过查阅文献可知,银—铜材料接触时 K 值大于银—银材料接触时的 K 值。这里的 K 指的是 Holm 公式中的系数。

3.3 有效接触的触指数量减少

在安装开关柜断路器手车时,可能出现手车轨道变形、开关柜固定螺栓松动或安装工艺不佳等情况^[22],这会导致梅花触头没有完全插入或梅花触头与静触头错位、二者之间有效接触面积不足,最终造成梅花触头接触故障。本节中通过减少梅花触头有效接触的触指数量,即通过减少梅花触头触指与静触头间的接触电阻模型,来模拟因梅花触头有效接触面积不足导致的接触故障。文中所研究的开关柜,在正常运行的状态下梅花触头的有效接触触指为 32 片,本节中将开关柜仿真模型中的梅花触头触指设置为 24、16、8 片有效接触。只改变梅花触头有效接触的触指数量,其他仿真设置与 2.2 节相同。

仿真结果见图 17-19,从图 17-19 中可知,随着有效接触的触指片数变少,梅花触头处温升增长幅度较大,而开关柜整体温升增长幅度不大,开关柜温升最大值位于动静触头连接处。由于有效接触的触指数量减少,电流流通面积减小,电流密度增大,梅花触头内部的有效接触的触指的温升增大,因此此处易发生发热故障,且有效接触的触指片数减少的原因一般为梅花触头和静触头错位,这会造成静触头侧的弹簧受力不均,进而导致弹簧更容易疲劳甚至断裂,造成重大事故。

4 灭弧室内动静触头接触故障下的温升特性研究

真空灭弧室内的动静触头是研究开关柜温升时的重点关注部位之一,此处关合时是开关柜温升最高点。在开关柜实际运行过程中,在断路器合闸后,可能出现接触压力过小的状况。通过 1.1 节中的 Holm 公式可以发现,接触电阻会随着接触压力的减小而增大。因此本节中研究当动静触头接触压力过小造成接触故障时开关柜的温升分布。

本节中的实验和仿真的负载电流均设置为

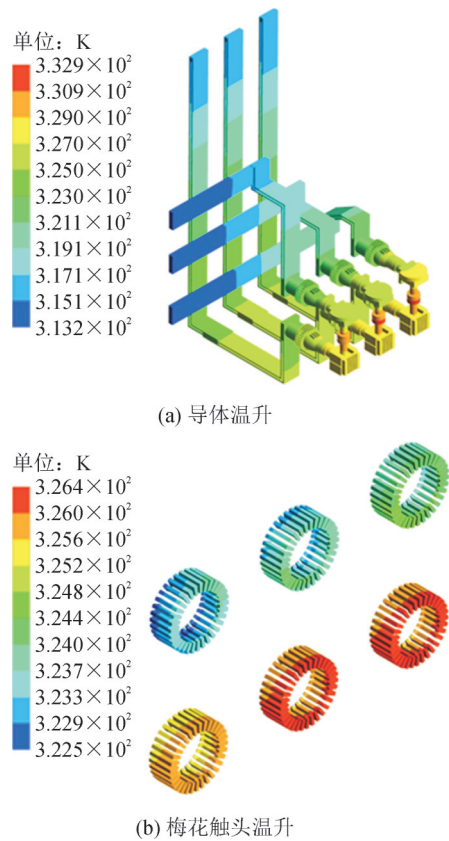


图 17 24片触指有效接触仿真结果
Fig. 17 Simulation results of 24-piece touch-to-active contact

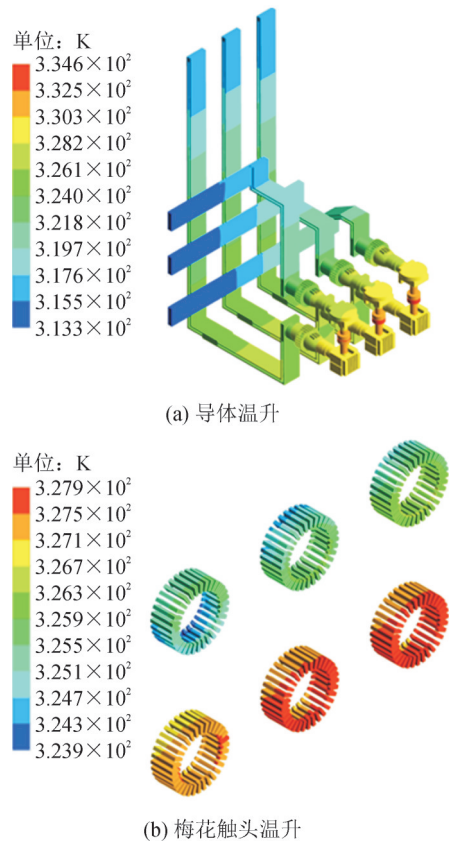


图 18 16片触指有效接触仿真结果
Fig. 18 Simulation results of 16-piece touch effective contact

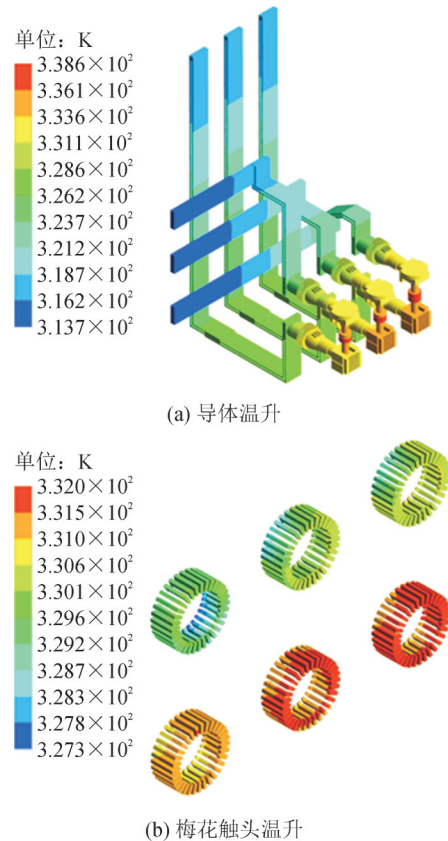


图 19 8片触指有效接触仿真结果
Fig. 19 Simulation results of 8-piece touch effective contact

1 890 A,开关柜风机关闭,处于自然对流状态,在仿真中,对接触电阻大小进行调整,在实验中,对真空断路器动触头的结构进行调整,达到减小接触压力的目的。得到的实验与仿真结果对比见图 20。

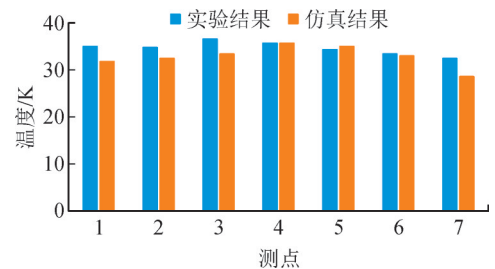


图 20 动静触头之间压力减小实验与仿真结果对比
Fig. 20 Pressure reduction experiment between dynamic and static contacts compared with simulation results

通过对比图 20 与图 6,可以发现温升增长与测温点和断路器之间的距离呈负相关,即测温点离断路器越近,温升增长越多。与正常状态相比,温升增长最大值为 23.9 K,其中断路器上侧 1、2、3 号温升检测点温升增长了 10.0 K,断路器下侧 4、5、6 号温升检测点温升上升了 10.0 K,7 号温升检测点温升上升了 3.8 K。通过分析以上结果可知,动静触头间的接触故障,对断路器上侧重点部位温升的影响近乎相同,对下侧重点部位温升的影响也是如此。与

第3节中梅花触头故障时动静触头的温升相比,动静触头间压力减小时动静触头温升增长幅度显著增大,这说明一般故障发生的部位温升增长最显著,上述特性可用来初步判断故障发生的部位。实验结果同样说明了母排受到故障的影响最小,是开关柜中温升较为稳定的部位。

上述温升实验验证了动静触头接触故障下的开关柜仿真模型的正确性,本节中利用该仿真模型深入探索在动静触头间接触故障时,改变负载电流大小对开关柜温升的影响并研究其规律。仿真中其余设置均与前文相同,仅改变负载电流为630 A及1 260 A。动静触头间接触故障状态与正常状态相比温升增长对比见表4。

表4 对比正常状态与动静触头间接触故障时温升最大值
Table 4 Compare the maximum temperature rise between normal state and contact fault between dynamic and static contacts

负载电流/A	风机 状态	温升最大值/K		温升增长百分 比/%
		正常状态	接触故障	
630	关	3.8	6.6	73.7
1 260	关	14.8	25.7	73.7
1 890	关	32.1	56.0	74.4

由表4可知,当动静触头间发生接触故障、开关柜负载电流大小相同的条件下,温升最大值(动静触头处温升)增长明显,与之不同的是其温升上升比例几乎不受电流大小的影响。

5 结论

文中以12 kV中压开关柜为研究对象,研究其在梅花触头与灭弧室内动静触头处发生接触故障时的温升特性。通过建模仿真研究,得到以下主要结论:

1)对于梅花触头处发生的接触故障,无论是镀银层磨损、梅花触头两侧弹簧疲劳或有效接触触指数量减少都会导致开关柜温升增大,温度最高点均位于真空灭弧室接触点位置。

2)当接触压力减小时,梅花触头断路器侧弹簧断裂相较于母排侧造成的温升增长幅度更大,因为梅花触头与静触头和出线臂的接触方式分别为线接触和面接触,接触面材料分别为银—银和银—铜,接触方式和接触面材料不同导致接触电阻不同,进而导致温升增长幅度不同。

3)在保持其他条件不变的情况下,开关柜负载电流越大,接触故障对开关柜温升造成的影响越大,越容易造成开关柜发热故障。其中梅花触头有

效接触触指数量减少一般是由梅花触头和静触头错位导致的,二者错位会导致静触头固定弹簧受力不均,同时,由于温升增长,弹簧容易出现断裂或失效。因此,梅花触头有效接触触指数量减少的危险性比梅花触头两侧弹簧疲劳的危险性更高。

4)动静触头处发生的接触故障会造成开关柜整体温升增长,且接触故障点的温升增长最为显著,上述特性可作为初步判断故障发生部位提供参考。

参考文献:

[1] 王浩,白张,吴劲松,等.高海拔地区中压充气式开关柜温升特性研究[J].电测与仪表,2025,62(11):88-94.
Wang Hao, Bai Zhang, Wu Jinsong, et al. Research on temperature rise characteristics of medium voltage gas-filled switchgear in high altitude areas[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2025, 62(11): 88-94.

[2] 杨浩,刘琦,吴泓潇.10 kV开关柜故障原因与应对措施分析[J].电子技术,2023,52(1):234-235.
Yang Hao, Liu Qi, Wu Hongxiao. Analysis of 10 kV switchgear fault causes and countermeasures[J]. Electronic Technology, 2023, 52(1): 234-235.

[3] 吴小忠,甘星,严亚兵,等.基于过热故障仿真的高压开关柜测温点优化方法[J].西安工程大学学报,2025,39(6):128-138.
Wu Xiaozhong, Gan Xing, Yan Yabing, et al. Optimization method of high-voltage switchgear temperature measurement points based on overheating fault simulation[J]. Journal of Xi'an Polytechnic University, 2025, 39(6): 128-138.

[4] 沈晨曦.10 kV开关柜的故障原因与对策分析[J].集成电路应用,2022,39(9):244-245.
Shen Chenxi. Analysis of fault causes and countermeasures of switchgear[J]. Integrated Circuit Application, 2022, 39(9): 244-245.

[5] 汪倩,屈建宇,吴刚,等.配电开关柜温升特性的多物理场仿真和实验[J].高电压技术,2016,42(6):1775-1780.
Wang Qian, Qu Jianyu, Wu Gang, et al. Multiphysics simulation and experiment of temperature rise characteristics of distribution switchgear[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(6): 1775-1780.

[6] 李江涛,孙义,李擎宇,等.大电流开关柜温度分布特性的影响因素分析[J].电气技术,2018,19(9):12-18.
Li Jiangtao, Sun Yi, Li Qingyu, et al. Analysis of influencing factors on temperature distribution characteristics of high current switchgear[J]. Electrical Engineering, 2018, 19(9): 12-18.

[7] 刘旭光,顾小虎,姜富修.基于磁旁路方法的开关柜温升优化[J].高压电器,2019,55(8):96-100.
Liu Xuguang, Gu Xiaohu, Jiang Fuxiu. Temperature rise optimization of switchgear based on magnetic bypass method[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(8): 96-100.

[8] 苏毅,谢植飏,李路,等.基于多物理场耦合的空气型开关柜发热故障温升仿真分析[J].高压电器,2020,56(11):1-7.
Su Yi, Xie Zhibiao, Li Lu, et al. Temperature rise simulation analysis of air switchgear heating fault based on coupling of multi-physical field[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(11): 1-7.

[9] 武兴坛,周鹏,刘少鹏,等.基于温升试验的中压开关柜温升控制探讨[J].高压电器,2020,56(10):93-97.

- Wu Xingtian, Zhou Peng, Liu Shaopeng, et al. Discussion on temperature rise control of medium-voltage switchgear based on temperature rise test[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(10): 93-97.
- [10] Yao Yuan, Ouyang Xudong, Zeng Guowei, et al. Research on modularizing design of 10 kV switchgear with line outlet for live maintenance[J]. Energy Reports, 2021, 7(s1): 10-16.
- [11] 彭涛, 唐炳南, 赵莉华, 等. 中压开关柜典型接触故障下的温升特性研究[J]. 高电压技术, 2021, 47(12): 4331-4340.
- Peng Tao, Tang Bingnan, Zhao Lihua, et al. Study on the temperature rise characteristics of medium-voltage switchgear under typical contact failure[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(12): 4331-4340.
- [12] 王增彬, 王睿, 姚聪伟, 等. 强制对流散热对开关柜温升影响规律的仿真研究[J]. 高电压技术, 2021, 47(3): 1064-1074.
- Wang Zengbin, Wang Rui, Yao Congwei, et al. Simulation study on the influence of forced convection heat dissipation on temperature rise of switchgear[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(3): 1064-1074.
- [13] 王睿, 王立军, 马信友, 等. 大电流开关柜温升及其影响因素的建模仿真研究[J]. 高压电器, 2022, 58(5): 31-40.
- Wang Rui, Wang Lijun, Ma Xinyou, et al. Modeling and simulation study of temperature rise and related influence factors of high current switch cabinet[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(5): 31-40.
- [14] 马信友, 王立军, 王睿, 等. 故障条件下中压开关柜温升特性的仿真研究[J]. 高电压技术, 2022, 48(6): 2276-2282.
- Ma Xinyou, Wang Lijun, Wang Rui, et al. Simulation study of temperature rise characteristics of medium voltage switchgear under fault conditions[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(6): 2276-2282.
- [15] Holm R. Electric contacts: theory and applications[M]. Berlin, Germany: Springer, 1967.
- [16] 任君鹏, 王栋, 杜志叶, 等. 强迫空气冷却高压开关柜三维气流—温升仿真分析[J]. 高压电器, 2017, 53(10): 12-18.
- Ren Junpeng, Wang Dong, Du Zhiye, et al. Simulation analysis of 3-D airflow-temperature rise for high-voltage switchgear under forced air cooling[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(10): 12-18.
- [17] GB/T 11022—2020 高压交流开关设备和控制设备标准的共用技术要求[S].
- GB/T 11022—2020 Common technical requirements for high voltage AC switchgear and control equipment standards[S].
- [18] 王睿. 基于多物理场耦合仿真的开关柜温升及潜伏性故障评估研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2020.
- Wang Rui. Research on temperature rise and latent fault evaluation of switchgear based on multiphysics coupled simulation[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2020.
- [19] 李晓林. 基于电磁流体温度多物理场耦合的充气柜温升建模仿真研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2018.
- Li Xiaolin. Simulation study on temperature rise of inflatable cabinet based on electromagnetic fluid temperature multiphysics coupling[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2018.
- [20] 王欣. 基于磁—热耦合的高压开关柜热分析及温升预测[D]. 南宁: 广西大学, 2021: 117-119.
- Wang Xin. Thermal analysis and temperature rise prediction of high-voltage switchgear based on magnetic-thermal coupling[D]. Nanning: Guangxi University, 2021: 117-119.
- [21] 杨次. 10 kV 移开式开关柜异常发热原因分析及整改措施[J]. 电工技术, 2020(5): 117-119.
- Yang Ci. Analysis of the causes of abnormal heat generation in 10 kV removable switchgear and rectification measures[J]. Electric Engineering, 2020(5): 117-119.
- [22] 马建鹏, 桑嘉荠, 张国梁. 手车断路器梅花触头部位发热原因与对策[J]. 电子技术, 2021, 50(3): 182-183.
- Ma Jianpeng, Sang Jiaji, Zhang Guoliang. Causes and countermeasures of heating in the contact parts of plum blossoms of handcart circuit breakers[J]. Electronic Technology, 2021, 50(3): 182-183.
- 王立军(1975—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为开关电器电弧理论及其应用、电力设备数字化设计及智能运维、放电等离子体技术及其应用(通信作者)(E-mail: lijunwang@mail.xjtu.edu.cn).
- 吕文卿(2000—), 女, 硕士, 主要研究方向为电力设备仿真。
- (上接第 111 页)
- [19] 张德明. 真空分接开关技术的论述(7)[J]. 变压器, 2012, 49(2): 52-56.
- Zhang Deming. Discussion on the technology of vacuum tap changer(7)[J]. Transformer, 2012, 49(2): 52-56.
- [20] 张长虹, 范广伟, 邓军, 等. 换流变真空有载分接开关谐波电流切换试验技术的研究与分析[J]. 高压电器, 2025, 61(2): 26-34.
- Zhang Changhong, Fan Guangwei, Deng Jun, et al. Research and analysis on harmonic current switching test technology of vacuum type on-load tap-changer for converter transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2025, 61(2): 26-34.
- [21] 王立军, 胡丽兰, 周鑫, 等. 大尺寸电极条件下大电流真空电弧特性的仿真[J]. 电工技术学报, 2013, 28(2): 163-170.
- Wang Lijun, Hu Lilan, Zhou Xin, et al. Simulation of high-current vacuum arc characteristics with big-size electrode conditions[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(2): 163-170.
- [22] Wang L, Jia S, Zhou X, et al. Three-dimensional model and simulation of vacuum arcs under axial magnetic fields[J]. Physics of Plasmas, 2012, 19(1): 013507.
- [23] Kutzner J, Miller H C. Integrated ion flux emitted from the cathode spot region of a diffuse vacuum arc[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1992, 25(4): 686-693.
- [24] Shang Wenkai, Dullni E, Fink H, et al. Optical investigations of dynamic vacuum arc mode changes with different axial magnetic field contacts[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2003, 31(5): 923-928.
- [25] Kutzner J, Miller H C. Ion flux from the cathode region of a vacuum arc[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 1989, 17(5): 688-694.
- 张长虹(1983—), 男, 教授级高工, 高级技师, 从事高电压技术研究工作(通信作者)(E-mail: 183048839@qq.com)。