

[开关设备]

开关柜铜排故障电弧多物理场仿真分析

文/刘巧玲¹ 杨 凯^{1,2,3} 王 铮⁴ 孟 辉² 董毓利³ 涂 然¹

1. 华侨大学机电装备过程监测及系统优化福建省高校重点实验室；2. 厦门产业技术研究院；

3. 华侨大学土木工程学院；4. 亿兴电力工程建设有限公司鲤城自动化分公司

开关柜铜排因连接松动、接触不良等原因会产生故障电弧，易诱发电气火灾等安全事故。为研究铜排故障电弧特性，建立了铜排故障电弧的磁流体动力学数学模型，结合实际边界条件，耦合电磁场、流场和温度场，在多物理场仿真软件COMSOL中进行二维建模计算，为开关柜防弧结构及电弧检测方法的研究提供理论依据。

开关柜是电力系统中重要的电气设备，被广泛应用于工厂、住宅和商业楼宇等场所，具备分配电能、保护用电设备等功能。在现实生活中，开关柜容易受多种因素的影响而产生故障，其中由故障电弧引发的电气故障占相当大的比例，并有继续增大的趋势。开关柜会因柜内母线、触头等部位松动、氧化和过载等产生电弧；也会因为雷电过电压入侵、绝缘材料老化、内部进入小动物和遗忘工具等原因产生电弧故障；还会由于设计缺陷（例如电气间隙不足），触头对金属挡板放电而产生电弧。开关柜内部空间狭小，电气元件分布紧凑，电弧故障一旦发生，就会产生强光、强热、声波和电磁波等，还会产生各种铜、铁、铝等金属蒸汽。电弧高温会加热柜内空气，使得柜体压力增大，电弧能量会以气体爆炸及火焰喷放的形式释放，最终造成柜内元器件及相邻设备的烧毁、人员伤亡和停电等危害，造成严重的损失。因此，关于开关柜铜排故障电弧的检测与防治研究十分必要。

目前对开关柜内部具体某个元件可能引起的故障电弧的研究较少，比如柜内的铜排，作为一次回路的重要组成部分，在柜内布置紧凑，很多时候没

有有效的绝缘包封，同时它作为主要的连接部件，接头部位多，易引起异常发热，再加上我国铜排的生产标准化程度低，铜排质量参差不齐，由铜排引起的电弧故障时有发生。现已有的对铜排故障电弧的研究也主要是从宏观角度对特定事故进行分析，缺乏对铜排故障电弧内部物理过程的研究。例如，胡丁尹研究开关柜两相铜排电弧故障发展为三相铜排电弧故障的原因；龚炳林等对江西省某化工厂氯酸钠厂低压配电间突发配电柜电源母线铜排短路烧坏事故进行分析，发现事故由铜排单相对地放电引起三相铜排之间的相间短路；杨永等研究某变电站10 kV开关柜短路事故，发现紧固铜排的某一颗螺丝长期经受着由接触不良引起的热动力和电动力，经历由轻微发热变形、接触不良加剧到严重变形的恶性循环过程，最终导致铜排烧蚀，从而引发短路电弧事故。然而铜排在开关柜中有着广泛的应用，有必要对铜排故障电弧产生时引起的物理现象进行探究。对铜排故障电弧物理特性的研究可以获得电弧物理特性随电参数变化的规律，以此为基础，能够为开关柜铜排故障电弧检测方法的研究提供参考。

基金项目：国家自然科学基金（52175508）；中国博士后科学基金（2021M691861）；中央高校基本科研业务费专项资金（ZQN-1001）

尽管我国已颁布了GB/Z18859《封闭式低压成套开关设备和控制设备在内部故障引起电弧情况下的实验导则》，但是由于开展开关柜故障电弧实验需要一定的经济支持和严格的场地设备要求，受到一定的限制，因此仿真研究更加经济高效。而目前描述电弧的模型中，磁流体动力学理论（Magnetohydrodynamics, MHD）能够充分考虑等离子体燃烧过程中电、热、磁、流体间的多场耦合，更侧重研究电弧内在的物理变化。因此文中将基于MHD方程组搭建铜排故障电弧仿真模型。

仿真部位选取

在开关柜中，铜排一般用于一次线路，例如大电流的相线、地线和零线。其次，较大电流的一次元器件的连接都用到铜排，开关柜在柜与柜之间连接是主母线，主母线到每面电柜的开关电气（例如隔离开关、断路器等）上的是分支母线。铜排之间靠螺栓连接和紧固。在长期的生产工作中，由于环境、人为等因素的影响，连接铜排的螺栓会产生松动，当流过铜排的电流足够大时，松动的铜排之间就容易产生电弧。文中以某型号的低压综合配电柜中容易发生电弧故障的铜排处为例，对铜排进行故障电弧仿真建模，仿真部位如图1所示。

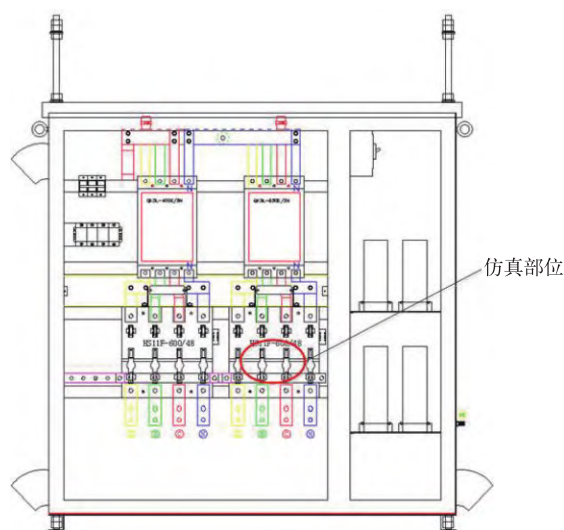


图1 铜排仿真部位示意图

铜排电弧仿真模型构建

1. 仿真模型

根据亿兴电力公司的反馈信息，选取连接松

动、电弧易产生处的铜排，搭建磁流体动力学电弧模型，并选取左视图进行几何建模，在COMSOL多物理场仿真软件中，搭建铜排仿真模型。仿真几何模型及其尺寸如图2所示，其中铜排宽度30 mm，铜排重叠部分长度50 mm，铜排间距3 mm。

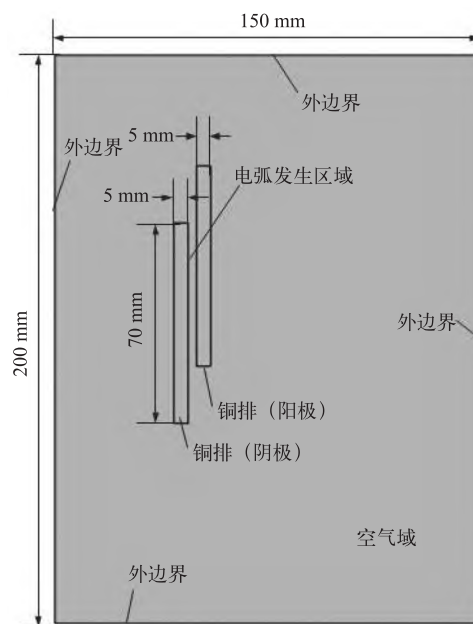


图2 开关柜铜排电弧仿真模型

2. 假设条件与控制方程

COMSOL内自嵌入磁流体动力学方程组来描述故障电弧，通过设置各实际的边界求解不同环境条件下的电弧状态。为了降低仿真的复杂性，对仿真过程提出以下假设：①电弧等离子体为平衡等离子体，满足热力学平衡状态；②电弧等离子体的流动为层流且为不可压缩流；③不考虑阴极复杂形态和微量元素蒸发对电弧的影响；④电弧等离子体的输运特性参数仅为温度的函数。

基于磁流体动力学（MHD）方程组，铜排故障电弧等离子体数学模型具体表达式如下。

(1) 质量守恒方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial (r \rho v_r)}{\partial r} + \frac{\partial (\rho v_z)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

(2) 径向动量守恒方程

$$\begin{aligned} \frac{\partial (\rho v_r)}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial (r \rho v_r^2)}{\partial r} + \frac{\partial (\rho v_r v_z)}{\partial z} = & -\frac{\partial P}{\partial r} - j_z B_\theta + \\ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(2r\eta \frac{\partial v_r}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left[\eta \left(\frac{\partial v_r}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) \right] - & 2\eta \frac{v_r}{r^2} \end{aligned} \quad (2)$$

(3) 轴向动量守恒方程

$$\frac{\partial(\rho v_z)}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho v_r v_z) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho v_z^2) = -\frac{\partial p}{\partial z} + j_r B_\theta + \frac{\partial}{\partial z}\left(2\eta \frac{\partial v_r}{\partial z}\right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}\left[r\eta \frac{\partial v_r}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial r}\right] \quad (3)$$

(4) 能量守恒方程

$$\frac{\partial(\rho c_p T)}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho h v_r) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho h v_z) = \frac{j_r^2 + j_z^2}{\sigma} + Q_{\text{rad}} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}\left(\frac{rk}{c_p} \frac{\partial h}{\partial r}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{k}{c_p} \frac{\partial h}{\partial z}\right) - \frac{5}{2} \frac{k_B}{e} \left(j_r \frac{\partial T}{\partial r} + j_z \frac{\partial T}{\partial z}\right) \quad (4)$$

(5) 电流连续性方程

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}\left(r \sigma \frac{\partial U}{\partial r}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\sigma \frac{\partial U}{\partial z}\right) = 0 \quad (5)$$

(6) 麦克斯韦方程

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r B_\theta) = \mu_0 j_z \quad (6)$$

(7) 欧姆定律

$$j_z = -\sigma \frac{\partial U}{\partial r} \quad j_r = -\sigma \frac{\partial U}{\partial z} \quad (7)$$

式中, ρ 为密度; v_r 为径向速度; v_z 为轴向速度; η 为动力黏度系数; P 为等离子体压力; c_p 为比定压热容; T 为温度; k 为导热系数; k_B 为玻尔兹曼常数; e 为基本电荷; σ 为电导率; U 为电压; μ_0 为真空磁导率; $j_r B_\theta$ 、 $j_z B_\theta$ 为洛伦兹力项。

上述控制方程可以求解等离子体的温度场、电场、磁场以及流场分布。具体计算结果与铜排材料、边界条件和等离子体参数有关。

2. 边界条件

根据铜排在开关柜内部所处的环境和位置,在COMSOL中进行材料参数、电场、磁场、传热场和流场的边界条件设置,具体如下。

电场边界条件设置铜排为固体,左侧铜排为阴极接地,右侧铜排为阳极接电路终端,计算区域边界为电绝缘边界,电场的初始电动势为零,整个计算域遵守电流守恒定律,给定整个计算域初始电动势为零。

磁场边界条件设置为整个计算域遵守安培定律,计算区域外侧为磁绝缘,初始磁动势为零。

流体传热的流体主要为空气,空气初始值设置为室温293.15 K,电弧发生区域只是一小块区域,与开关柜内部其他区域存在热量交换,因此计算域边界设置为开放边界。

视气体流动为层流,流体属性为不可压缩流动,温度初始值设置为室温。其中为了方便模型收敛,通过缩小计算域、设置计算域边界为开放边界来对应真实环境。考虑体积力的干扰主要为重力。

由于等离子体过程涉及物理场繁多,因此要添加多物理场的耦合设置。电磁场通过产生焦耳热来影响热场,热场通过电导率影响电场。磁场力影响带电粒子运动轨迹,从而改变电弧的形状,热场和气流场之间通过温度和压强来耦合。

仿真结果及分析

仿真的电压等级为400 V,实际电路中常用的电流等级为100 A、1600 A、2 000 A、2 500 A、3 150 A和4 000 A,因此仿真模型电路等级按上述情况来定,仿真时间步长设置为0.000 1 s,仿真时长为50 ms、100 ms、150 ms、200 ms、400 ms、600 ms、800 ms和1 s。

1. 温度仿真结果

仿真分析了电弧温度在不同时段内的发展情况。由图3可看出,随着电流等级增大,电弧中心点能达到的最高温度增大。在同种电流下,电弧能够达到的最高温度不随时间的延长而升高。上述情况可在图4中看得更清楚,在电弧发生一个周期20 ms内,电弧温度在前6 ms内就达到最大值,此后电弧中心最高温度随着电流的增大而增大,随着电流减小而减小,符合交流电正弦曲线变化规律,在不同的周期内,电弧高温能够达到的最大值在一个范围内波动。一个周期内,电弧温度在293~12 000 K之间波动。当铜排发生故障电弧时,由于尖端电荷密度聚集,导致电场畸变,相对于其他部位,电场强度更大。当尖端部位的场强达到临界值时,空气发生局部电离,产生电弧,电弧首先发生在铜排重合部分的分离处,随着时间的延长,电弧高温呈弧状不断向四周扩散。在以空气为介质的开关柜内,当燃烧条件具备时,电弧的产生最终会引起火灾并损毁相关电子器件。

2. 流场仿真结果

电弧的产生会带动周边气体的流动,常用开关柜中气体介质是空气。空气流速随电流等级和时间变化曲线如图5所示。由图5可知,每时刻最大气体流速随电流等级增加呈上升趋势,随故障电弧产生

时间的延长而增大,最大气体流速可达0.25 m/s。
由图6可知,在故障电弧产生过程中,气体流速是波动变化的,总体波动趋势随时间的延长而上升。空气流速在电弧中心处最快,速度等值线呈圆弧状,并向外层逐渐递减。电弧高温加热空气使空气局部温度上升,引起气流波动,在起弧初始时刻,由于空气温度还没有升高很多,局部空气受热缓慢,可以看见空气运动呈波浪状,并伴随气流的抖动,而随着电弧持续时间的延长,电弧温度对周围空气的影响扩大,温度高的空气向上升起,原本未受电弧影响的气体留在原处,引起空气流动。仿真选取左视图进行分析,故而图7中看出高处的气体流速明显高于低处。同时也可以看出铜排发生电弧故障时,空气流速会以喷射状向外发散,随着电弧持续时间的延长,这种现象越明显。同时随着电流幅值的增大,这一现象更剧烈。

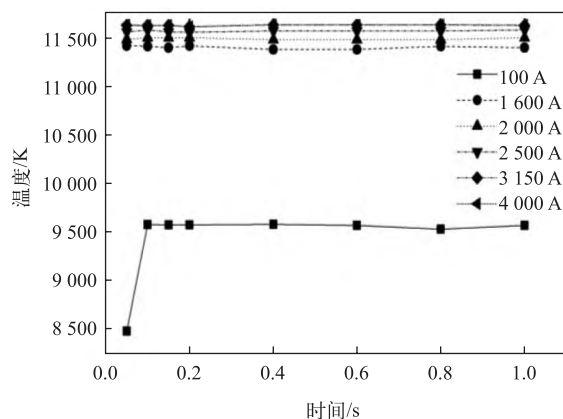


图3 电弧最高温度随电流及时间的变化趋势

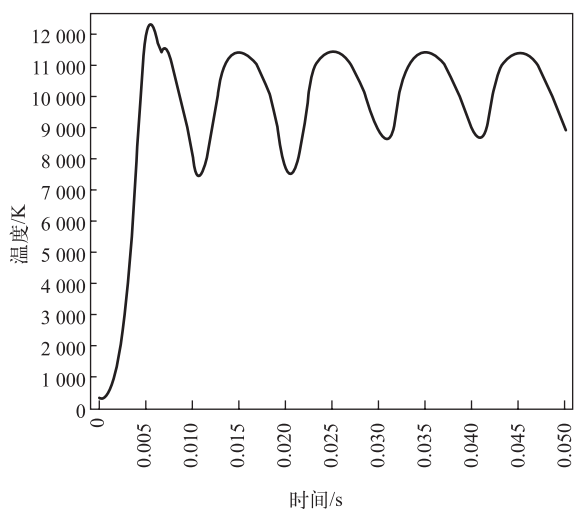


图4 1 600 A时电弧温度随时间变化曲线

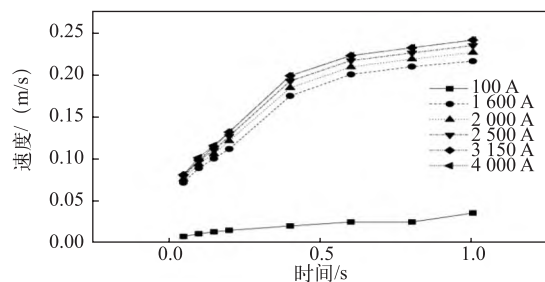


图5 空气流速随电流和时间变化情况

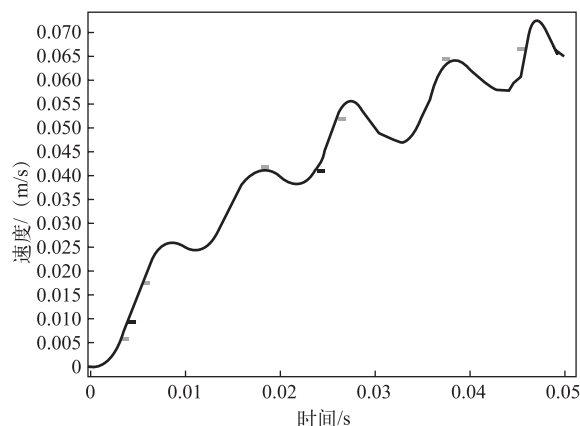


图6 1 600 A时空气流速随时间变化情况

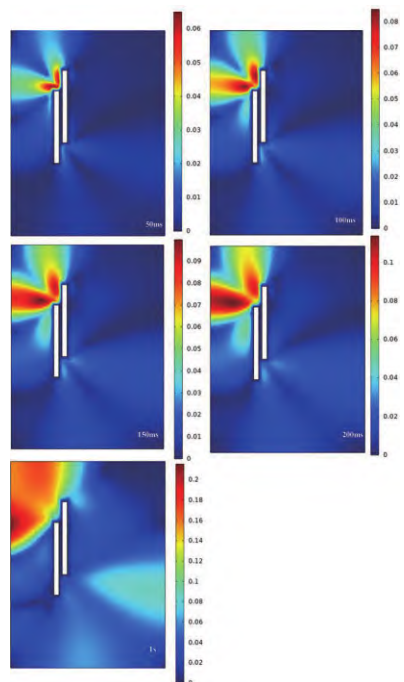


图7 1 600 A时不同时刻表面空气流速分布情况（单位：m/s）

3. 不同间距仿真结果

对不同电流等级、不同间距下的故障电弧进行仿真研究,如图8所示,发现铜排间距在3~8 mm区

间时,故障电弧具有最高温度数值,随后细化仿真间距范围,在3~8 mm区间内以0.1 mm为间隔进行仿真计算,如图9所示,得到铜排间距在3.7 mm左右时,铜排故障电弧产生的温度最高。6~8 mm间距处仿真温度均低于图9数值,故未全部列出。此后随着间距的扩大,故障电弧的最大温度呈下降趋势。仿真的6种电流等级均是如此。由图10可知,随着间距的扩大,弧光温度从铜排间隙通过,温度扩散范围更大,使铜排受热面积加大,增大铜排的损坏面积。

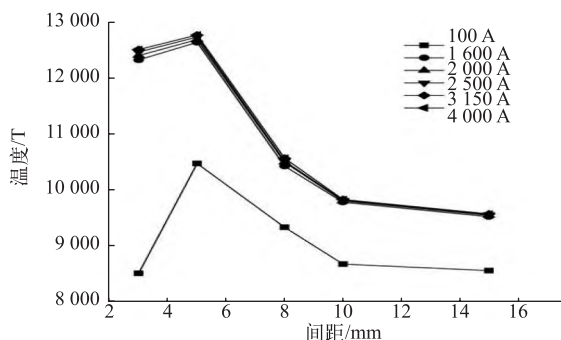


图8 不同间距、不同电流等级时电弧最高温度仿真结果

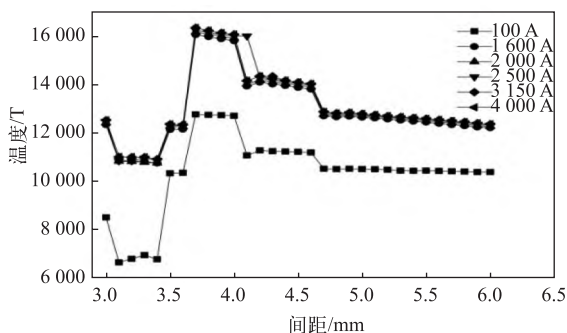


图9 细化间距后最高温度仿真结果

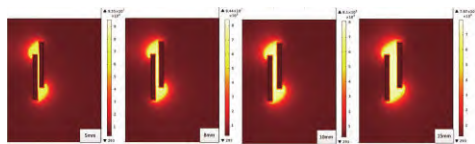


图10 1 600 A时不同间距下电弧表面温度分布情况 (单位: T)

结束语

1) 电弧高温受到电流影响,随电流增大,温度升高,故障电弧温度会在前6 ms达到最大值,此后在同种电流条件下,这一值不会随电弧持续时间延长而增加。铜排间距在3.7 mm左右时的故障电弧产生的温度最高,此后随着间距的增大,故障电弧能

够产生的最高温降低。

2) 气体流速随电流等级的增大、电弧持续时间的延长而加快。在起弧初始时刻,空气波动同时伴随气流的抖动,随着电弧持续时间的延长,空气波动范围会呈圆状向外扩散并不断增大,在前1 s时间内气体流速可达0.25 m/s,向外扩散半径超过50 mm。

上述对于开关柜铜排故障电弧温度场及流速场的仿真研究,有助于为铜排单相故障演变为多相电弧故障、铜排材料结构的优化、开关柜防弧结构及电弧检测方法的研究提供理论依据。EA

(收稿日期: 2022-11-03)

参考文献

- [1] 董爱华,孔林娟,杜静静,等.基于突变理论信息融合的故障电弧检测方法[J].电力系统及其自动化学报,2016,28(5):35-40.
- [2] 彭曼,盛健.试析开关柜内部故障电弧探测法的研究现状及趋势[J].民营科技,2015,(8):46.
- [3] 王国锋,王巨丰,唐佳雄,等.开关柜内部故障电弧切除方法与试验[J].广东电力,2020,33(8):95-102.
- [4] 李渊,淡淑恒.开关柜内部故障电弧危害及其防护综述[J].高压电器,2018,54(7):73-78.
- [5] 马骏.中压开关柜内部故障电弧防护措施[J].通讯世界,2017(14):188-189.
- [6] 沈狄龙,王鹏程,夔国凤,等.成套开关柜铜排智能制造系统研发与应用[J].电子技术与软件,2021(18):215-219.
- [7] 胡丁尹,宇文博,金庆滨,等.12 kV开关柜内部电弧故障两相试验研究与分析[J].电器与能效管理技术,2020(9):72-78.
- [8] 龚炳林,刘银河,黄龙林.一起低压铜排短路事故的原因分析及防范对策[J].盐业与化工,2012,41(12):48-50.
- [9] 杨永.一起变电站10 kV开关柜短路故障分析及处理[J].机电信息,2016(36):22-23.
- [10] 吴昊,韩浩江,柴俊,等.基于变电站开关柜的三相交流电相位核序方法[J].电气应用,2021,40(7):88-92,102.