

基于磁热耦合的 12kV 开关柜的设计仿真与试验

刘 振¹, 杜宝乐², 郑继周², 张开兴^{2*}

(1. 泰安市兰山电气有限公司, 山东 泰安 271000 2. 山东农业大学机械与电子工程学院, 山东 泰安 271018)

摘要: 针对 12kV 开关柜发热严重、故障率高等问题, 本文基于磁热耦合技术对 12kV 开关柜进行了设计分析和温升试验。首先, 通过开关柜的工作原理和设计要求对 12kV 开关柜整机进行整体结构的设计, 并通过 SolidWorks 软件对开关柜进行了模型建立; 然后通过 Ansys Workbench 仿真平台对开关柜模型进行模拟温升试验, 获取开关柜主要温升部位; 最后对这些部位进行开关柜样机的温升试验, 验证了设计的合理性和仿真的有效性。

关键词: 高压开关柜; 优化设计; 温度场; 仿真计算; 样机试验

中图分类号: TM591 **文献标志码:** A

1 引言

开关柜作为电力系统中重要组成部分, 承担了电能的保护、控制和分配等重要功能。随着科技的不断进步和电力需求的增长, 对开关柜的设计和优化需求也日益迫切, 开关柜的合理设计不仅能够有效地保护电力设备免受损坏, 还能对电力系统的稳定性和运行效率进行改善, 降低能源消耗和维护成本。国内外有很多研究者对电力设备的发热进行过大量研究。曾国伟^[1]等通过优化高压开关柜接线方式, 将高压开关柜各零部件系统模块化, 加强其维护、整修工作的灵活性、可操作性与安全

性能; Yao^[2]等采用了模块化设计的思路针对现有高压开关柜普遍存在的温升、绝缘损坏及维护停电时间长等问题进行优化设计。徐建源^[3]等通过建立了 40.5 kV、SF6 充气式开关柜的三维有限元电场模型, 分析了断路器室和隔离开关室的电场分布情况。

由于很多研究都停留在理论, 并不能直接解决企业的产品温升问题。因此, 本文以 12kV 开关柜为研究对象, 对 12kV 开关柜进行设计, 通过系统研究提出了一系列有效的解决方案, 以满足电力系统的要求, 确保其安全、稳定和高效运行。

基金项目: 山东省科技型中小企业创新能力提升工程项目 (2022TSGC2441)

* 通信作者: 张开兴

2 工作原理与整机结构

2.1 工作原理

开关柜是一种用于配电系统的关键设备，其工作原理是通过断路器实现对电路的控制和保护。当电路中出现故障或需要切断电流时，断路器会迅速动作，切断电路，防止电流继续流动^[4]。同时，隔离开关用于在正常情况下隔离电路，继电器等设备则监测电流和电压等参数，当检测到异常情况时，触发保护动作，保护电力系统的安全运行^[5]。此外，接地开关用于确保设备的安全接地。通过这些组件的协调工作，12kV 开关柜能够实现对电力系统的灵活控制和可靠保护，确保电力系统的安全稳定运行。

2.2 整机结构

12kV 开关柜的结构分为四个部分，由母线室、断路器室、电缆室和继电器室构成。母线室位于开关柜的顶

部，用于连接高压母线，其设计考虑了母线连接的安全可靠性和电气性能^[6]。断路器室包含主断路器和分断路器，用于实现对电路的控制和保护，其设计需满足高压设备的操作和安全要求。电缆室用于引出电缆连接到外部电力系统，其设计需要考虑电缆连接的灵活性和绝缘性能。继电器室则包含辅助电气设备，如控制电器和继电器，用于实现对开关柜的控制和保护，其设计需满足高压设备的电气性能和安全要求^[7-8]。整体而言，开关柜的各个隔室相互配合，实现了对电力系统的灵活控制和可靠保护。

根据对 12kV 开关柜的整机结构设计，绘制了 12kV 开关柜的结构图，如图 1 所示。之后的小节将根据 A 母线室、B 断路器室、C 电缆室和 D 继电器仪表室，分别对各室的结构与零部件进行设计。并根据开关柜的额定结构设计图，构建 12kV 开关柜的三维模型，如图 2 所示。

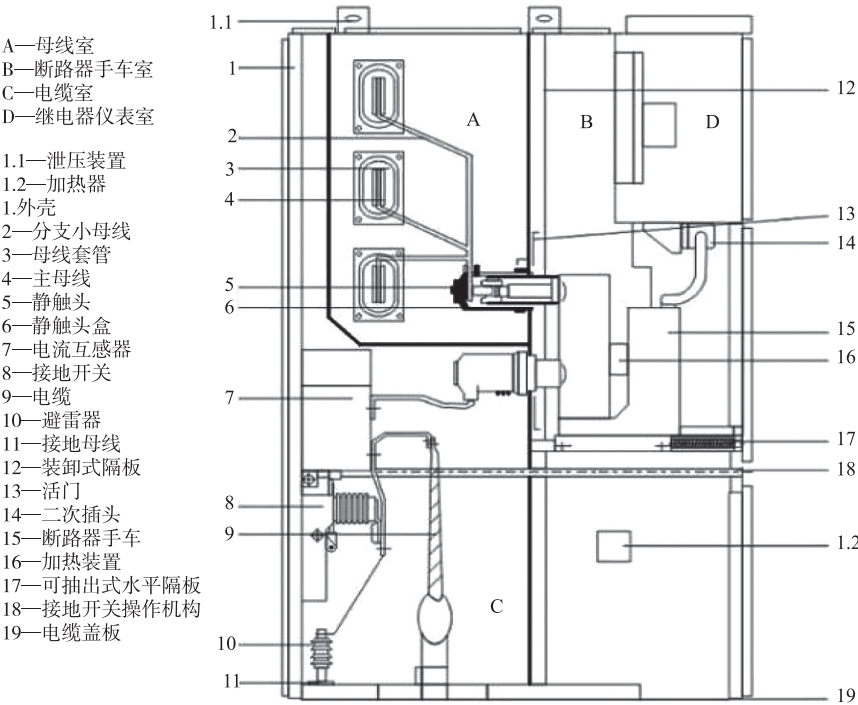


图 1 12kV 开关柜整机结构图

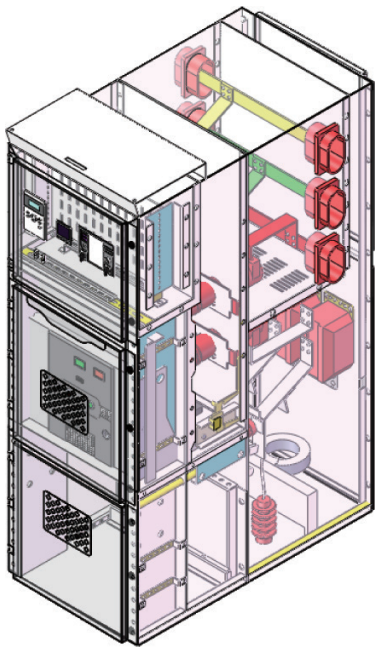


图 2 12kV 开关柜三维结构图

本文设计的 12kV 开关柜的技术参数见表 1。

表 1 12kV 型开关柜主要技术参数

参数名称	数值
额定电压 /kV	12
额定电流 /A	1 250
额定频率 /Hz	50
额定短时耐受电流 /kA	31.5
额定短路持续时间 /s	4

3 开关柜磁热耦合仿真计算分析

根据设计的 12kV 开关柜结构，构建开关柜有限元仿真模型，并在 Ansys Workbench 仿真平台对开关柜进行磁热耦合仿真分析，在温升层面验证开关柜设计的合理性。

3.1 磁热耦合模型简化处理

由于开关柜模型复杂，直接导入到仿真平台将耗费大量的运算时间，所以首先需要对开关柜模型进行简化

处理,如图3所示,主要对开关柜的母线套筒、断路器手车、零序电流互感器等部件和钻孔、螺丝等细小零部件进行了简化,这些零部件不参与开关柜的发热,对开关柜的散热也影响甚微,故对这些部件进行了删除处理^[9],为保证仿真的精准度和计算效率,对开关柜模型只保留了一次回路,即上下分支母线、上下静触头臂、上下静触头和梅花触头。

3.2 开关柜电磁场仿真分析

将开关柜简化模型导入 Ansys 软件的 Maxwell 模块,求得开关柜的欧姆损耗^[10]。通过电磁场仿真获得开关柜电流密度分布图,以 A、B、C 三相电流峰值时的电流为例,如图4所示^[11]。

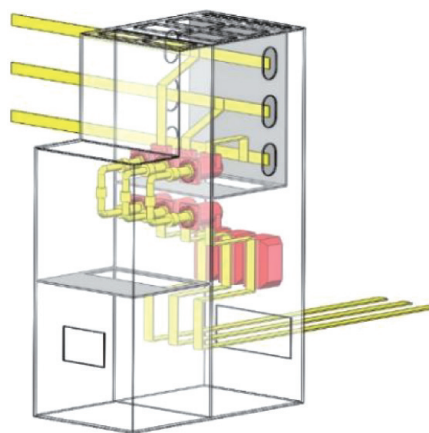


图3 开关柜简化模型图

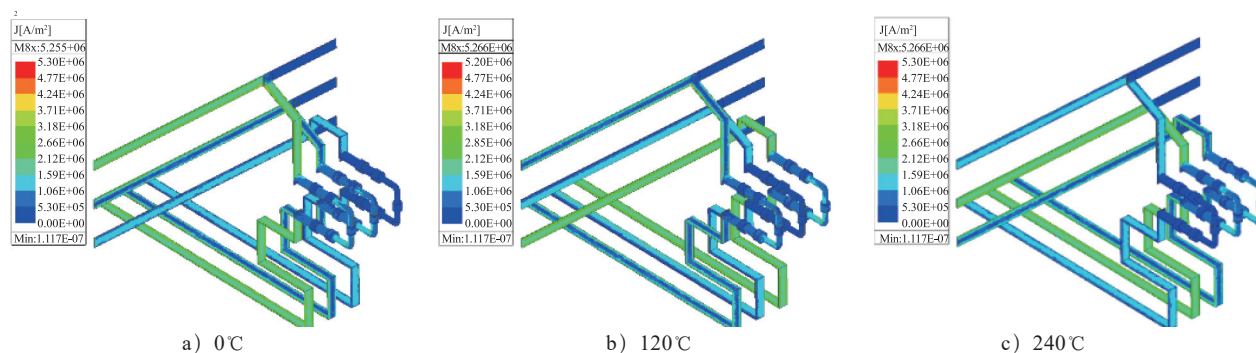


图4 开关柜电流密度分布图

为了能够更加直观地观测导体上电流密度的分布情况,以 A 相母线为例,通过 Ansys Maxwell 的 Marker 功能^[12],母线的电流回路进行取点,采集点分布如图5所示。

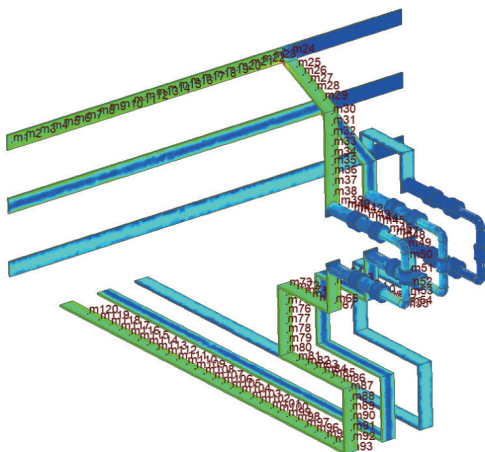


图5 A相电流密度采集点

由图可以看出,开关柜导体的电流密度主要集中在

主母线排与分支母线之间的连接处、断路器触臂处、断路器动触头与开关柜静触头连接处,可以预测在接下来的温度场仿真时这些位置将会是开关柜温升较为明显的部位。

3.3 开关柜温度场仿真分析

将 Maxwell 计算的欧姆损耗通过 Electro Magnetic 映射功能导入到 fluent 模块里^[13-14],进行开关柜的温度场分析,在模型中选取 Plane1、Plane2、Plane3 三个截面,分别截取开关柜 A、B、C 三相母排的 YZ 横截面。通过截面建立开关柜 A、B、C 三相的流场温度分布云图,如图6所示。由图可以看出,开关柜流场内空气的整体温度不超过 80℃,且流场空气内的高温只分布载流导体附近,流场空气温度随着载流导体向开关柜外壳的方向呈阶梯状分布。其中断路器处载流导体的温度要比上下母线排载流导体的温度高 20℃左右。

由于开关柜温度云图中载流导体之间的温度差异较小,导致难以从温度云图中获悉导体电流回路中的导体

温升变化,故采用CFD-Post的Point Cloud功能,在三相母排的YZ截面上按等间距生成了100个点,采集其温度数据^[15]。在这100个点中,以导体电流回路为方向,

采集其中30个点的温度,构建沿电流方向的开关柜导体温升折线图。如图7所示。其横坐标为导体沿电流方向与开关柜母线室进线孔的距离。

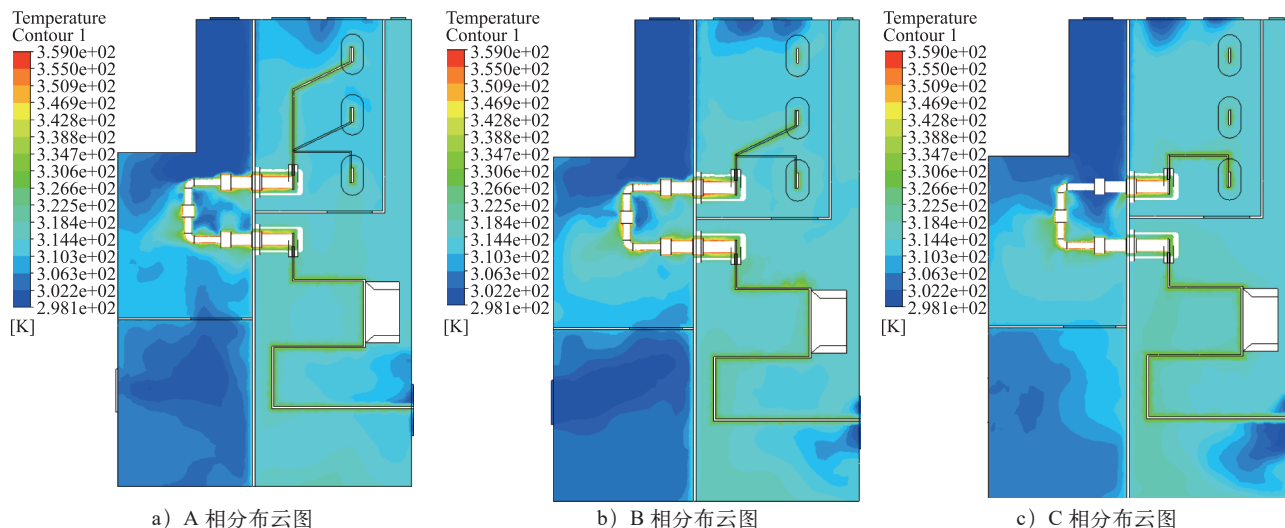


图6 开关柜三相温度分布云图

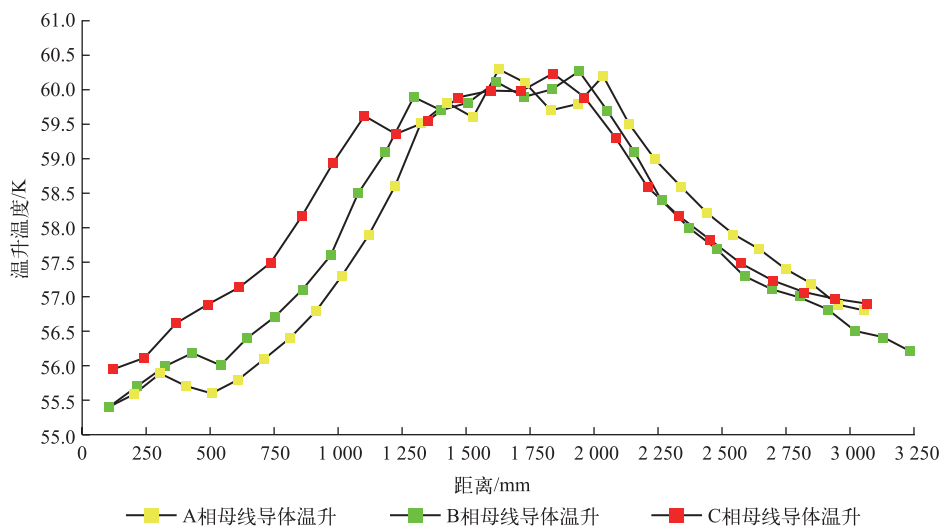


图7 A、B、C三相导电回路导体温升图

通过建立三相导电回路导体温升图,可以看出A、B、C三相的导体温升曲线基本相似。三个相位的导体均在距离为250mm到500mm间有一个小峰值,该位置对应开关柜母线排与分支母线的连接处,可以推断该温升小峰值是由连接处螺栓产生的接触电阻导致的^[16]。在经过母线室的接触电阻后,导体温升速度逐渐加快,并在对应断路器静触头的位置达到一个峰值。随后在约长为520mm的长度内,其温升曲线呈现波浪状,其对应开关

柜上下梅花触头之间的区域,在该区域内断路器温升达到了顶峰^[17]。之后的曲线代表着导体从断路器静触头盒接出,由于与电缆室内的空气接触,散热增加,其导体温度逐渐降低。

4 开关柜样机温升试验

为了检验开关柜的质量,验证其是否能够满足长时间的运行要求,同时为了验证仿真结果的准确性,必须对开

关柜进行相应的温升试验。通过温升试验，得到开关柜样机实际的温升情况^[18]，并以此为基础进行相应的优化改进。

本次温升试验开关柜的额定电流为 1 250A，通入的电流为额定电流的 1.1 倍 1 375A，导入的电流由大电流发生器产生^[19]。对于开关柜各个部位温升值通过埋设热电偶片测量获得。根据温升实验要求，选取母线室主母线铜排、上下静触头、上下梅花触头、上下触臂及电缆室下分支母线 8 个测量点，在试验开始之前先对开关柜各个被测部位进行测量，以便于之后计算其温升值。开关柜温升试验照片与温升测量点的分布位置分别如图 8、图 9 所示。



图 8 开关柜温升试验图

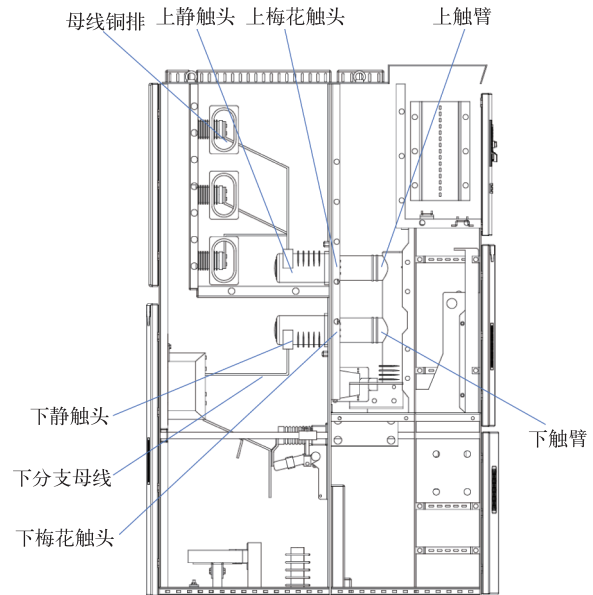


图 9 开关柜温升测量点分布图

根据国家标准《高压交流开关设备和控制设备标准的共用技术要求》(GB/T 11022—2020) 温升试验要求，温升试验进行了 8h^[20]，且所测的温升数据在试验的最后 1h 内的温升增加不超过 1K，开关柜温升已经达到稳定状态。此时测量观测点相关数据见表 2。

表 2 开关柜温升试验数据

测温位置	A 相温升值 /K			B 相温升值 /K			C 相温升值 /K			部位允许温升值
	仿真	实测	相对误差	仿真	实测	相对误差	仿真	实测	相对误差	
主母线铜排	55.3	53.7	2.9%	56.6	54.3	4.2%	56.1	55.4	1.3%	75
上静触头	57.3	55.7	2.8%	58.7	56.2	4.4%	58.0	55.7	4.1%	75
上梅花触头	59.8	56.8	5.3%	60.8	57.2	6.3%	60.3	57.1	5.6%	65
上触臂	59.5	58.9	1.0%	60.7	59.0	3.1%	60.3	58.1	3.8%	65
下触臂	60.1	57.8	4.0%	60.9	58.5	4.1%	60.8	57.1	6.5%	65
下梅花触头	60.2	57.7	4.3%	61.0	58.1	5.0%	60.9	57.9	5.2%	65
下静触头	58.8	56.1	4.8%	59.1	56.8	4.1%	59.4	56.4	5.3%	75
下分支母线	55.9	55.2	1.2%	56.8	55.6	2.2%	56.4	54.5	3.5%	75

由表可以看出仿真值与试验值相差不大，其最大误差值为 6.5%，并且由表可以看出，仿真结果的温升数值总是要比试验值略高，对于产生这些误差的可能性有两点：①对开关柜的简化处理会对仿真结果产生略微影响，导致温升偏高；②仿真反映的是开关柜被测部位内部的温升，而样机试验测温只能测量被测部位表面温升，导致仿真数据

比样机试验略高。整体而言，仿真计算结果与温升试验结果基本拟合，仿真试验能在存在一定误差的前提下有效反映开关柜温升的实际情况。由试验可以看出，开关柜整体在 1.1 倍额定电流的作用下，温升都处于允许温升温度数值之下，满足 12kV 开关柜的运行使用要求。

5 结论

通过 Ansys 软件采用磁热耦合的方法对 12kV 开关柜进行了温升仿真, 获取了开关柜运行时内部温度场和气流场的情况, 并通过样机的温升试验, 进一步验证了仿真分析方法的准确性, 并验证了 12kV 开关柜的设计合理性, 能够满足日常运行要求。虽然开关柜满足运行要求, 但仍有一些地方需要改进, 根据仿真和实测数据可知, 梅花触头和触臂处温升满足运行要求, 但该部位温升达到 60K, 接近开关柜最大温升的允许温度, 有一定的发热风险, 该部位可以通过安装风机进行降温。

参考文献

- [1] 曾国伟. 10kV 新型高压开关柜设计及仿真研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2018.
- [2] YAO Y, OUYANG X, ZENG G, et al. A novel modularizing design method of 10 kV high voltage switchgear for live maintenance[J]. 能源与动力工程 (英文), 2020.
- [3] 徐建源, 任春为, 司秉娥, 等. 40.5kV SF₆ 充气式开关柜三维电场分析 [J]. 中国电机工程学报, 2008 (15): 136-140.
- [4] 钟建英, 孙广雷, 杨葆鑫, 等. 高电压等级真空断路器研究现状及展望 [J]. 高电压技术, 2024, 50 (2): 451-466.
- [5] 张任, 姚灿江, 孙龙勇, 等. 高低温条件下 GW16 型隔离开关机械特性研究 [J]. 高压电器, 2023, 59 (10): 104-109.
- [6] 李信, 张锐, 洪海程, 等. 支撑式母线安装温度对其安全温变范围影响研究 [J]. 电力工程技术, 2020, 39 (4): 143-149.
- [7] 叶露, 李婷婷, 王晓智, 等. 新型手车式大电流真空断路器动静触头电场分析与仿真 [J]. 电工技术, 2020 (11): 71-73.
- [8] 冯英, 祁海洋, 兰剑, 等. 两种不同结构梅花触头的电接触性能分析 [J]. 高压电器, 2022, 58 (7): 177-182.
- [9] 莫易敏, 余波, 彭承荣, 等. 结构参数对电连接器接触性能的影响及优化 [J]. 机械设计与制造, 2024 (6): 287-293.
- [10] 孙韬, 赵莉华, 龙辰, 等. 中压开关柜梅花触头接触故障下的温升特性研究 [J]. 高压电器, 2023, 59 (5): 130-138.
- [11] 董华军, 温超阳, 刘林林, 等. 触头系统结构对真空灭弧室温度场影响仿真 [J]. 电机与控制学报, 2023, 27 (8): 164-172.
- [12] 车赛, 迟长春, 左少林. 基于 ANSYS 的磁保持继电器电磁机构仿真分析 [J]. 机电信息, 2019 (3): 66-67.
- [13] 陈裕明, 陈鹏满, 王柱, 等. KX-ZM01 涵道风扇无刷直流电机磁热耦合仿真分析 [J]. 机电工程技术, 2022, 51 (9): 165-169.
- [14] 张新生, 肖飞, 王瑞田, 等. 考虑涡流的中频变压器箔式绕组电磁振动数值计算与分析 [J]. 电工技术学报, 2018, 33 (S2): 434-443.
- [15] 端和平, 姜婷婷, 罗勇水, 等. 基于 CFD 的风电机组塔筒通风散热数值模拟及优化分析 [J]. 电气工程学报, 2022, 17 (1): 122-128.
- [16] 苗宇, 陈志勇, 李月文, 等. 110 kV 变压器箱沿连接螺栓发热原因分析及处理 [J]. 内蒙古电力技术, 2021, 39 (5): 97-100.
- [17] 冀立鹏, 甄利, 刘宏亮, 等. 基于磁场-温度场耦合的高压开关柜梅花触头有限元数值计算 [J]. 中国测试, 2022, 48 (6): 8-12.
- [18] IDERUS S, PETER G, GANJI A. An innovative method to conduct temperature rise test on medium voltage switchgear assembly based on IEC standards in a power grid [J]. The Journal of Engineering, 2022 (7): 1-23.
- [19] 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.
- [20] 戴建卓, 贾勇勇, 张思聪, 等. 开关设备快速温升试验方法研究 [J]. 电器与能效管理技术, 2022 (3): 81-85, 89.

收稿日期: 2024-05-17