

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.07.016

频率对中压开关柜温升特性影响的试验与仿真研究

王 博¹, 张 敏¹, 黄锦麟², 李贤哲², 王 伟¹, 王立军²,
卢文建¹, 樊 琴¹

(1. 西安高压电器研究院股份有限公司, 西安 710077; 2. 西安交通大学电工材料电气绝缘国家重点实验室, 西安 710049)

摘要: 不同频率运行工况下, 频率显著影响了中压开关柜的电磁场分布与温升特性, 仅依据工频标准难以准确评估不同频率下的设备运行状态及载流能力。为探究频率变化对开关柜的电磁—热的影响规律并量化其载流能力, 文中以KYN44-12(Z)开关柜为研究对象, 搭建了基于交流—直流—交流的宽频域温升试验平台, 建立了电磁—流体—温度场耦合模型。在此基础上, 开展了16.7~60 Hz频率下的温升试验与仿真研究, 验证了模型的准确性。研究发现, 频率变化显著影响导体电流的趋肤效应与邻近效应强度, 导电回路的电磁损耗与频率呈线性正相关, 导致开关柜温升随频率呈现出低频降低、高频升高的特点。针对这一问题, 文中构建了频率—温升折算系数的经验公式, 为不同频率运行工况下开关柜的热特性评估提供了理论依据。测试人员在不具备宽频域试验设备的条件下, 可依靠工频50 Hz的温升试验数据预测开关柜在实际运行频率下的温升值。

关键词: 中压开关柜; 不同频率下的温升; 多物理场耦合; 趋肤效应; 载流能力

Experimental and Simulation Study on the Influence of Frequency on Temperature Rise Characteristics of Medium Voltage Switchgear Cabinet

WANG Bo¹, ZHANG Min¹, HUANG Jinlin², LI Xianzhe², WANG Wei¹, WANG Lijun²,
LU Wenjian¹, FAN Qin¹

(1. Xi'an High Voltage Apparatus Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710077, China; 2. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Under different frequency operating conditions, the frequency significantly affects the electromagnetic field distribution and temperature rise characteristics of medium voltage switchgear cabinet. It is difficult to accurately evaluate the equipment operating status and current-carrying capacity at different frequencies based solely on power frequency standards. To investigate the influence of frequency variation on the electromagnetic-thermal characteristics of the switchgear cabinet and to quantify its current-carrying capacity, in this paper type KYN44-12(Z) switchgear cabinet is taken as the research object, a wide-frequency-domain temperature rise test platform based on AC-DC-AC conversion, as well as an electromagnetic-fluid-thermal coupled model are set up. On this basis, the temperature test and simulation study are performed at frequency from 16.7 Hz to 60 Hz so to verify the accuracy of the model. It is found by the research that frequency variation significantly affects skin effect and proximity effect strength. The electromagnetic loss exhibits a positive linear correlation with frequency, causing temperature rise of the switchgear cabinet to decrease at low frequencies and increase at high frequencies. To address this issue, an empirical formula for the frequency-temperature rise conversion coefficient is set up in this paper, providing a theoretical basis for the thermal characteristic evaluation of switchgear cabinet under different frequency operating conditions. The test personnel, in the absence of frequency conversion testing equipment, can predict the temperature rise of switchgear cabinet at actual operating frequency based on 50 Hz temperature rise test data.

Key words: medium voltage switchgear cabinet; temperature rise under different frequency; multi-physics coupling; skin effect; current-carrying capacity

收稿日期: 2026-01-01; 修回日期: 2026-03-28

0 引言

电能是世界范围内应用最广泛、最清洁的能源,在输配电的过程中,开关设备发挥着极为重要的作用,其中,中压开关柜在电力系统中主要起到接收和分配电能、测量、控制和保护电路的作用,具有可靠性高、结构紧凑、适应性强的优点。开关柜在长期运行的过程中,触头等部位因老化、接触电阻过大等原因发热严重,容易导致运行故障、火灾事故。随着计算机仿真技术的发展,国内外有很多研究者通过建模仿真技术来探究开关柜运行状况。

王睿等人^[1]针对中压大电流开关柜小型化带来的温升问题,在相关平台开展建模仿真。古海良等人^[2]以630 A低压预制母线为对象,建立三维模型,采用多物理场耦合模型仿真,经型式试验验证准确性。王浩等人^[3]以12 kV充气式开关柜为对象,建立三维多物理场耦合模型,仿真探究不同海拔对不同负载下开关柜温升与流场的影响。孙园^[4]在温升试验的基础上,研究了中压开关柜的温升变化规律,得到了二次多项式表示的温升模型。杜丽^[5]针对不同环境温度、铜排规格、导体材料等因素,分别进行了开关柜仿真分析与试验研究。马信友等人^[6]建立电磁流体温度场耦合仿真模型并经实验验证,仿真分析真空灭弧室与梅花触头处接触压力单独及同时变化对中压开关柜温升的影响,拟合得到接触电阻与温升关系式。黄泽平等人^[7-10]围绕开关柜及相关设备温升问题,通过多物理场耦合仿真、试验验证,分析各类影响因素,构建数学模型与监测系统,优化设备结构与散热设计,实现温升快速预测、实时监测及故障预警。王立军等人^[11-12]针对不同电压等级的开关柜及GIS相关设备,采用电磁—热—流多物理场耦合等方法开展温升仿真研究,分析了填充气体、接触压力、通风条件等因素的影响,提出结构优化、材料改进、冷却系统优化等降温升方案,部分研究构建了降阶模型或数字孪生平台,实现温升快速预测与实时监测。

孙韬等人^[13]建立了具有完整梅花触头结构的温度场和流场耦合中压开关柜模型,运用有限元分析法,对正常情况和梅花触头接触故障下中压开关柜内温度场和流场分布进行了仿真分析。柯红海等人^[14]针对中压开关柜长期过热影响安全运行的问题,以UR4-10型开关柜为对象建立三维多物理场耦合模型,分析不同电流下温度场、流场分布及负荷电流对温升的影响;得到关键部件温升规律、稳定最高温度、流速范围及结构、电流对温升与流场的

影响规律,为开关柜温升研究与监测点选取提供理论依据。彭涛等人^[15]针对开关设备接触故障引发发热影响运行性能的问题,以KYN28-12型开关柜为对象,建立三维温度场—流场耦合模型,对比正常与3类典型接触故障下的温升及流场分布。李汉伟等人^[16-17]以12 kV开关柜为研究对象,通过Pro/E建立三维模型,利用Ansys进行电磁与温度场仿真,得到损耗及温度场分布;经温升试验对比,仿真误差在10%以内,满足工程精度要求。

在研究开关柜、GIS等电力设备的温升控制时,常常会聚焦于接触电阻、散热结构、材料特性等常见因素,但有关电流频率对温升影响分析较少^[18-20]。频率直接影响趋肤效应强度,频率越高电流越集中于导体表面,等效电阻增大,焦耳损耗上升,进而推高温升,这是高压、高频场景下不可忽视的关键因素。频率变化会改变电磁耦合特性,影响涡流损耗大小,尤其对开关柜内金属部件、互感器等,频率偏差可能导致损耗异常累积,引发局部过热。

针对以上问题,文中选取某中压大电流开关柜作为研究对象,首先根据开关柜的温升特性建立了电磁—流体—温度场耦合计算方程,在此基础上通过Ansys软件构建了开关柜16.7~60 Hz不同频率下的温升仿真模型,通过分析各个部位的涡流损耗和温升情况,仿真与试验相对误差在5%以内,验证了仿真模型的准确性。基于仿真模型和试验平台结果,进一步从电流密度分布和电磁损耗解释了频率对温升结果的影响机制,最后提出一种频率—温升等效预测方法,使得仅依据工频50 Hz的温升测试结果,即可预测开关柜在实际运行频率的温升,从而为评估产品的真实载流能力提供了有效手段。

1 宽频域温升试验平台与温升试验方案

1.1 试验柜型

本次试验对象选择为KYN44-12(Z)金属封闭开关柜,额定电压为12 kV、额定电流为1 250 A、额定频率为50 Hz。该开关柜包含母线室、继电器仪表室、断路器手车室、电缆室。其中主要的导电结构包含母排、梅花触头、触臂、断路器等,非导电结构包括柜体、触头盒等。开关柜依靠空气自然对流进行散热,该结构在中压配电网中应用广泛,其温升特性具有典型性。整体模型见图1。

1.2 宽频域温升试验平台搭建

为研究不同频率对中压开关柜温升特性的影响,文中搭建了一套多频率温升实验平台,该平台基于电力电子变换技术,能够模拟电流频率在15~

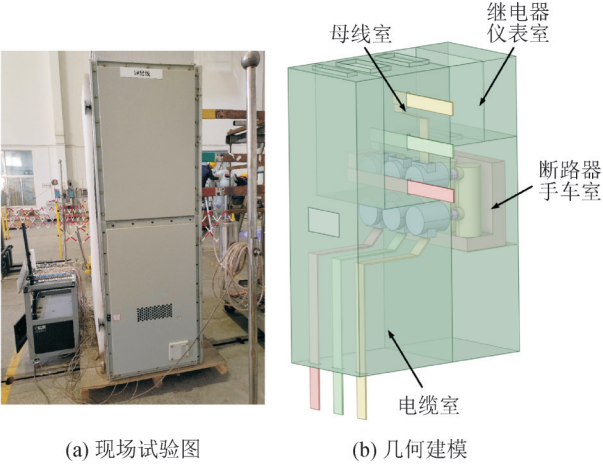


图1 KYN44-12(Z)开关柜

Fig. 1 KYN44-12(Z) switchgear

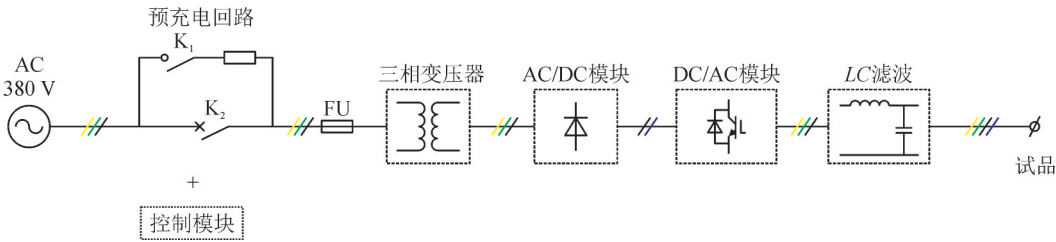


图2 宽频域温升试验回路原理图

Fig. 2 Principle diagram of the temperature rise test circuit for the variable frequency system

该温升试验平台系统的输出频率覆盖15~65 Hz,能够满足文中16.7、20、35、50、60 Hz的试验条件要求。

1.3 试验方案与测点布置

1.3.1 不同频率下的温升试验方案

本次试验依据国家标准 GB/T 3906—2020《3.6 kV~40.5 kV 交流金属封闭开关设备和控制设备》进行。试验在户内厂房进行,温升试品周围空气流速不超过0.5 m/s。使用1级允差T型热电偶进行温度测量。测量环温的油瓶布置在距离试品1 m处,并处于载流部件平均高度上,内装0.5 L以上变压器油,以避免温度快速变化造成的读数误差。

将试品与试验设备紧固连接。接到主回路的临时连接线应该使得试验时与实际运行时的连接相比较,其热量的散出和传入没有明显的差异。本次温升试验使用的母线尺寸为80 mm×10 mm×2 m的铜排一根。

1.3.2 测点布置

温升测量部位见图3,选取了接触电阻较大,散热条件较差的关键发热位置,各点代表位置:1为母线室螺栓联结;2为母线与上侧静触头联结;3为上梅花触指前端;4为上梅花触指尾端;5为上触臂尾端;6为下触臂尾端;7为下梅花触指尾端;8为下梅花触指前端;9为母线与下侧静触头联结;10为电缆室螺栓联结。国标允许的温升限值要求为:

65 Hz的宽频域下的实际运行工况。试验平台的主回路拓扑结构见图2,系统输入端输入交流380 V工频电流,采用交流—直流—交流两级变换架构,核心功率器件选用绝缘栅双极型晶体管(IGBT),配有预充电软启动电路,可有效抑制启动时的冲击电流。

系统包含输入与预充电、隔离与整流以及逆变与滤波环节。电流首先经过预充电回路,实现了系统的软启动,从而抑制了系统上电的瞬间冲击电流,待电容充电完成后闭合主回路,经三相变压器进行电压匹配后,通过AC/DC模块将工频交流电整流为直流电,最终在DC/AC模块的调制下将直流电逆变为目标频率值,并采用LC滤波器滤除了高频谐波。

触头的温升不超过65 K,螺栓联结点的温升不超过75 K。

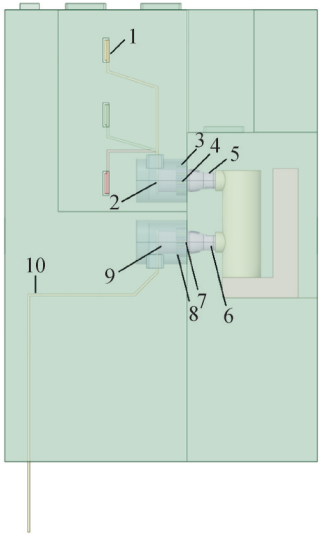


图3 测点布置图

Fig. 3 Measurement point layout diagram

试品三相通流,电源电流为正弦波,谐波的有效值满足不超过基波电流的5%的要求。频率的偏差满足-5%~+2%,试验电流波动设置在0%~2%以内。当最后四分之一的试验周期,周围环境温度的变化在1 h内不超过1 K,且各温升测量点1 h内温升增加不超过1 K时,判定温升达到稳定。

2 中压开关柜电磁—流体—温度场耦合仿真

2.1 电磁—流体—温度场耦合计算理论

中压开关柜的温升特性是电磁场、流体场与温度场多物理场相互作用的综合结果,其内部的热量产生、传递、散逸过程存在紧密的耦合关联:电磁场作用下产生的欧姆损耗、涡流损耗是开关柜温升的核心热源,而热量在导体、柜体间的热传导,以及柜内空气因温度差形成的自然对流体运动,又直接决定了温度场的分布与稳态温升水平,同时温度变化还会反向影响导体电导率、空气物性参数等,进一步改变电磁场与流体场的特性。单一物理场的仿真分析无法准确反映各场量间的耦合作用规律,难以精准还原开关柜实际运行中的温升过程。因此,为了真实、全面地模拟不同频率下的开关柜的温升特性,文中建立了电磁—流体—温度场耦合计算模型,通过多物理场的双向耦合求解,实现对开关柜温升过程的精准仿真,为后续分析频率对温升特性的影响提供可靠的模型基础。

2.1.1 电磁场控制方程

准静态电磁场也称为涡流场,在涡流场的情况下,可以忽略麦克斯韦方程中的通量密度和传导电流密度,其微分形式的方程组可表示为^[1,6]:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} \quad (1)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = j\omega \mathbf{B} \quad (2)$$

辅助方程

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (3)$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (4)$$

式(1)-(4)中: μ 为磁导率; σ 为电导率; $\mathbf{H}$ 为磁场强度矢量; $\mathbf{J}$ 为总电流密度矢量; $\mathbf{E}$ 为电场强度矢量; $\mathbf{B}$ 为磁感应强度矢; ω 为角频率。

在交流电路中,由于导体内部变化的磁场感应出反向电场抵消了中心电流,会导致电流和电场强度随频率升高而逐渐集中在导体表面薄层流动,也就是趋肤效应的体现,文中定义 δ 为描述场强衰减至表面值 $1/e$ 处的深度,其公式为^[18]

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \sigma}} = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad (5)$$

式(5)中: f 为频率; μ 为磁导率; σ 为电导率。

当频率越高,趋肤深度越小,电流越集中在导体表面,由于电流只在表面流动,导体的有效横截面积减小,这会导致交流电阻大于直流电阻,高频下传输电能会有更多的热损耗。

2.1.2 温度场控制方程

在开关柜中,热量传导、热量对流、热量辐射是3种主要的热量交换方式。稳态时中压开关柜三维热传导方程为^[2]

$$\lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = -q \quad (6)$$

式(6)中: T 为温度; λ 为导热系数; q 为单位体积内产生的能量。

计算在对流过程中,单位体积流体介质所耗散的功率的方程式为^[11]

$$P_{\text{all}} = \nabla \cdot (c\gamma v) \quad (7)$$

式(7)中, c 、 γ 、 v 分别为流体的比热容、密度、速度。

2.1.3 气流场控制方程

当开关柜正常运行时,其内部的气流场可由气流场控制方程组描述,该方程组包括:质量守恒方程、动量守恒方程和能量守恒方程^[6,11]:

$$\nabla \cdot (\rho v) = 0 \quad (8)$$

$$\rho v (\nabla \cdot v) = -\nabla p + \eta \nabla^2 v + \rho g \quad (9)$$

$$\nabla \cdot (\lambda \nabla T) + Q_c = \rho c_p v \cdot \nabla T \quad (10)$$

式(8)-(10)中: ρ 为流体密度; v 为流体速度; p 为流体压力; η 为粘度系数; g 为重力加速度; Q_c 为流体内热源项; c_p 为定压比热容。

2.2 仿真流程

仿真主要分为3个步骤:①根据实际模型进行1:1建立三维模型;②将开关柜模型导出为 x_t 格式的文件,再将其导入Ansys Workbench的maxwell模块,之后对模型进行布尔运算、添加材料与分配单元、剖分网格、设置边界条件、添加三相交流电作为激励源,最后进行求解,得到欧姆损耗结果;③将开关柜完整模型导出为 xt 格式文件,将其导入Ansys fluent模块,经过建立空气域、剖分网格、添加材料与能量源函数、设置边界条件,最终经过求解获得温升仿真等结果。仿真流程见图4。

2.3 工频下的温升仿真模型有效性验证

采用电磁热流耦合的仿真方法,本节对开关柜温升及气流进行了仿真研究。在本节中,主要对工频状态下的开关柜温升分布进行研究。通过建立模型设置边界条件等过程,本节仿真得到了开关柜正常运行时的温升及气流分布见图5。观察图5可以发现,温升较高值位于梅花触头和真空灭弧室的触头部分。梅花触头部分因弹簧松紧力的不同,会使得接触电阻发生不同程度的变化,接触电阻作为附加热源,使得此处温升较大;灭弧室被封在极柱内部,无空气自然对流散热,发热较为严重。整体

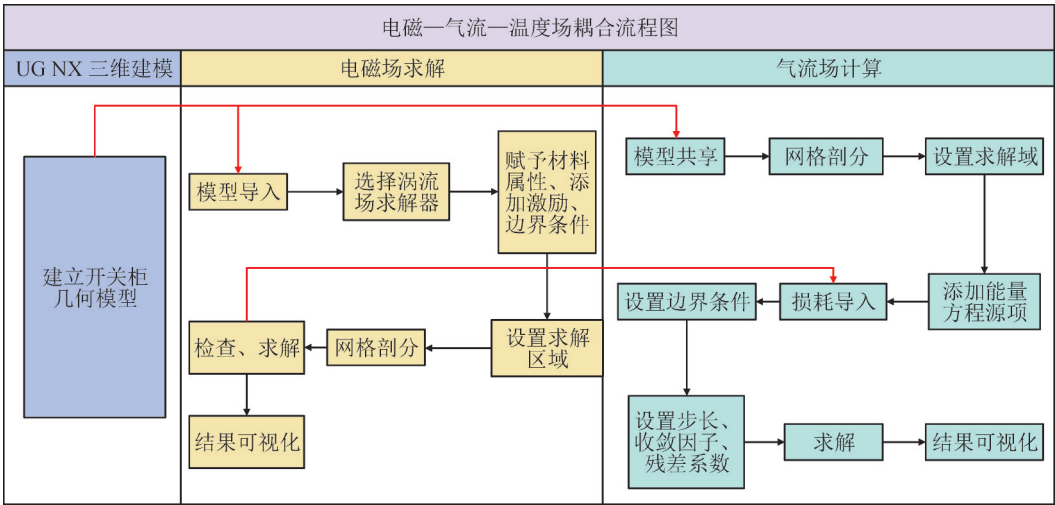


图4 电磁—流体—温度场耦合仿真流程

Fig. 4 Electromagnetic-fluid-temperature field coupling simulation process

来看,B相导体的温升会略高于A相和C相,这是因为B相位于A相和C相之间不利于散热,因此B相的温升会相对更高。基于工频下的仿真与试验对比,验证了仿真的有效性。

3 频率对中压开关柜温升特性的影响分析

3.1 频率对开关柜电磁场分布的影响规律

3.1.1 频率对电流密度分布的影响

开关柜的温升的主要热源一方面来自导电回路的欧姆损耗,另一方面来自柜体因回路产生的磁场所感应出的电场导致的损耗,其中导电回路的欧姆损耗占主导地位,而损耗的大小直接取决于电流密度在导体的分布情况。如前文所述,交变电流在导体中产生的趋肤效应影响电流密度的分布,且直接与频率相关,因此本节结合仿真模型分析频率对电流密度和电磁损耗功率的影响情况。

趋肤深度与频率的平方根成反比,在频率较低时,趋肤深度较大,电流在导体的截面分布更加均匀,电流的有效导电截面积更大,等效电阻相应地会更小;而随着频率升高,受导体自身和周围电磁场的影响,电流会向导体表面边缘集聚,导致电流的有效通流面积降低,等效电阻随之升高。

1.1 倍额定电流下开关柜B相母排的电流密度在16.7 Hz和60 Hz下的分布见图6,为展现出趋肤效应的影响,图6中将电流密度的上下限进行统一。如图6(a)所示,在16.7 Hz工况下B相母排处的电流密度均匀分布在母排导体中,未观察到有较为明显的梯度变化,这表明在频率较低时,趋肤效应较弱,电流的有效导电截面积较大。

如图6(b)所示,在60 Hz的工况下,电流密度主

要分布在导体的边缘处。高电流密度主要集中在导体的边缘,导体中心的电流密度显著低于导体边缘的电流密度,电流密度分布出现了不均匀性。此外,B相导体一方面受到自身电磁场的趋肤效应的影响,另一方面还受到邻近A相和C相导体的邻近效应的影响,使得导体边缘的电流密度进一步增大,导体内部电流密度进一步降低。

从图6可以发现,当频率发生变化后,电流密度的分布随之发生变化,频率越高,高电流密度更倾向于分布在导体边缘,这将使得有效通流密度降低,等效电阻增大,导致导体发热更为严重。

3.1.2 频率对电磁损耗功率的影响

电磁损耗是开关柜发热的主要热源,热源大小与电流密度的平方、回路电阻的大小正相关。为进一步量化频率对电磁损耗功率的影响,提取了仿真模型在16.7~60 Hz范围内的总电磁损耗值并进行了拟合,结果见图7。

从图7可以发现,当频率从16.7 Hz升至60 Hz时,总电磁损耗从610.4 W升高至889.8 W,增长约为45.8%,因此固定激励电流幅值,而把频率升高至60 Hz,将使得开关柜的发热更为严重,这验证了图6得到的结果,当频率升高后,等效电阻升高,增大了开关柜的热源强度。

拟合16.7 Hz至60 Hz的损耗值,发热损耗功率与频率之间存在线性相关性,其中拟合结果为

$$P=6.46f+506.21 \tag{11}$$

式(11)中: P 为电磁损耗功率; f 为频率。

这表明,随着频率的升高,电磁损耗线性增大,频率的持续升高加剧了趋肤效应和邻近效应,使得电流分布于导体边缘,导致电磁损耗功率变大,这

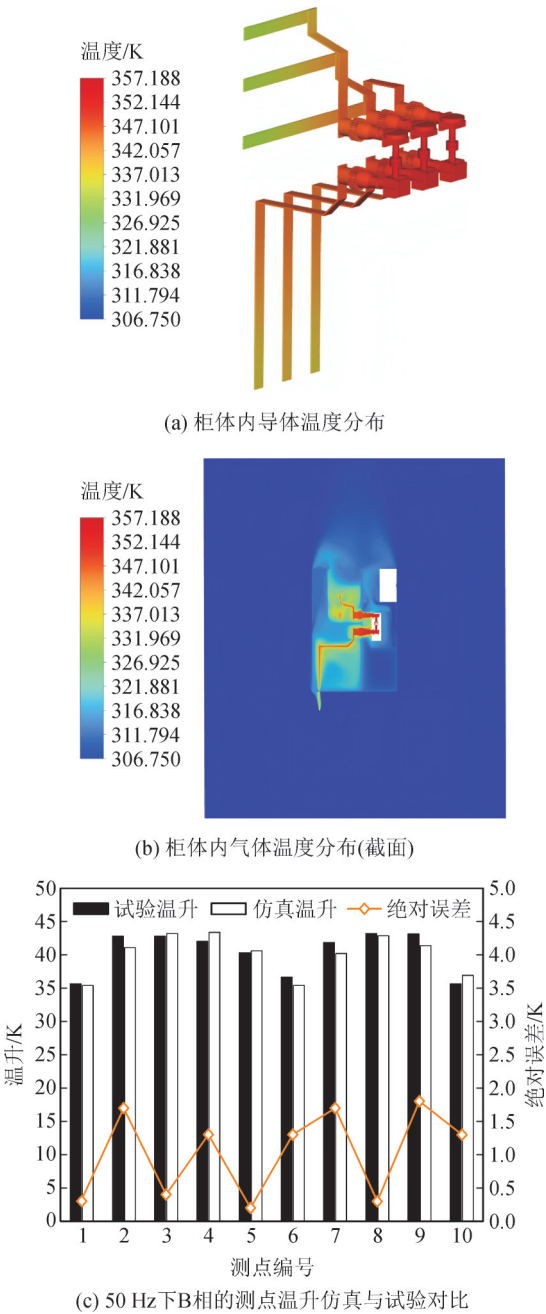


图5 50 Hz下开关柜仿真与试验结果对比

Fig. 5 Comparison between simulation and experimental results of the switchgear at 50 Hz

种热源的变化是开关柜在不同频率下温升变化的重要原因。

3.2 不同频率下温升仿真与试验结果分析

3.2.1 稳态温度场分布特性分析

基于2.2节的仿真流程和2.3节中工频下的仿真模型,本小节改变了仿真模型的激励电流频率,研究不同频率下的开关柜温升分布情况,具体选取了16.7、20、35、60 Hz。16.7~60 Hz下的导体的温升分布见图8。

观察图8可以发现,从频率变化的角度来看,当

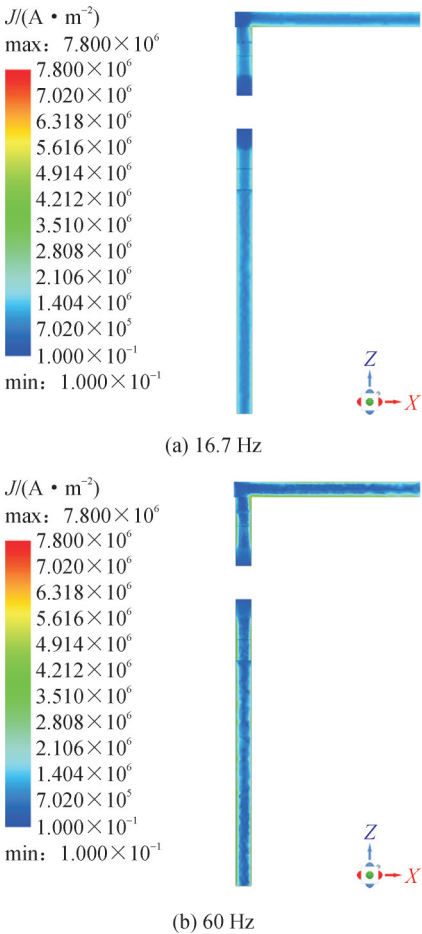


图6 16.7 Hz和60 Hz下B相母排的电流密度云图

Fig. 6 Current density contour map of the B-phase busbar at 16.7 Hz and 60 Hz

频率从2.2节的50 Hz工频下降为16.7、20、35 Hz后,温升发生了相应的下降,而当频率提高到60 Hz后,温升相应地升高。

3.2.2 仿真与试验结果分析

为进一步验证不同频率下的模型有效性,选择趋肤效应和邻近效应较为显著的B相作为观测对象,基于图2的宽频域温升试验平台,对比分析了3.2.1节的不同频率下的开关柜温升仿真结果,对比结果见图9。

仿真结果与试验数据在整体趋势上保持了一致性,绝对误差在2 K以内,相对误差小于5%,误差的主要来源于仿真模型对于导体圆角、螺栓、圆孔等对开关柜影响较小的模型进行了简化,且忽略了导轨、紧固件等对发热和散热影响极小的部件进行了删去。总体而言,误差属于工程允许的范围以内,证明了该仿真模型在不同频率下的计算准确性,能够准确反映研究对象的实际温升特性。

在16.7 Hz的低频工况下,B相上梅花触指最高温升约为36.2 K,相较于工频50 Hz的42.8 K,温升

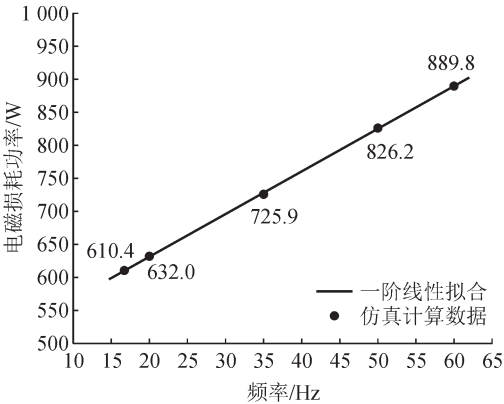


图7 导电回路电磁损耗随频率变化曲线图

Fig. 7 Variation of electromagnetic loss of the conductive circuit with frequency

降低了约6.6 K,这表明在频率下降后,仅从载流能力来看,设备的载流裕度得到了提高;而当频率提升到了60 Hz后,温升从42.8 K提升到了44.9 K。

采集图3中的测点温度,具体的结果见图10,

温升随着频率升高而升高,且可以量化得到测点最大温升和频率的拟合关系。

可以得到测点最大温升和频率之间为线性关系

$$T_{\max}=0.203f+32.72 \tag{12}$$

式(12)中: $T_{\max}$ 为测点最大温升; f 为频率。

3.3 不同频率下的温升等效方法

在实际的工程应用与设备测试中,受限于常规测试条件,大部分工厂实验室仅具备50 Hz电源,并不具备开展其他频率温升试验的能力。例如,使用50 Hz交流电流代替20 Hz电流的情况下,试验结果更加苛刻,当温升值超标时则试验无效,无法真实反映设备的载流能力。因此,准确获取实际运行频率下的温升特性仍是有必要的。为了解决设备资源限制与实际测试需求之间的矛盾,文中提出一种基于50 Hz温升数据的等效预测方法,用以推算实际运行频率下的温升能力。

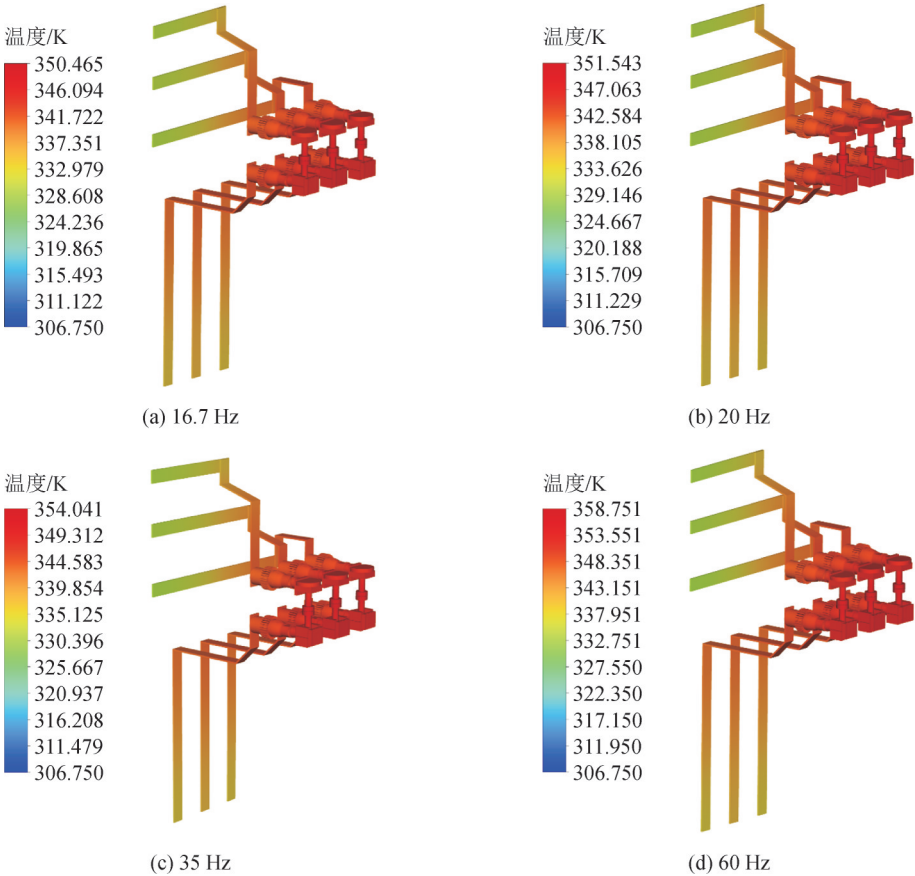


图8 不同频率下开关柜的导体主回路温度分布图

Fig. 8 Temperature distribution map of the main conductor circuit of the switch cabinet under variable frequency operation conditions

开关柜的导电回路涵盖母排、梅花触头等多种复杂结构,受安装位置、趋肤效应、邻近效应等因素的影响,各个结构的温升随频率变化程度存在一定程度上的差异。

但是在温升试验中,开关柜的载流能力主要受限于温度梯度变化较大、温升较高的部位,因此结合前文的研究,选择B相上梅花触头为基准值,建立温升预测模型。

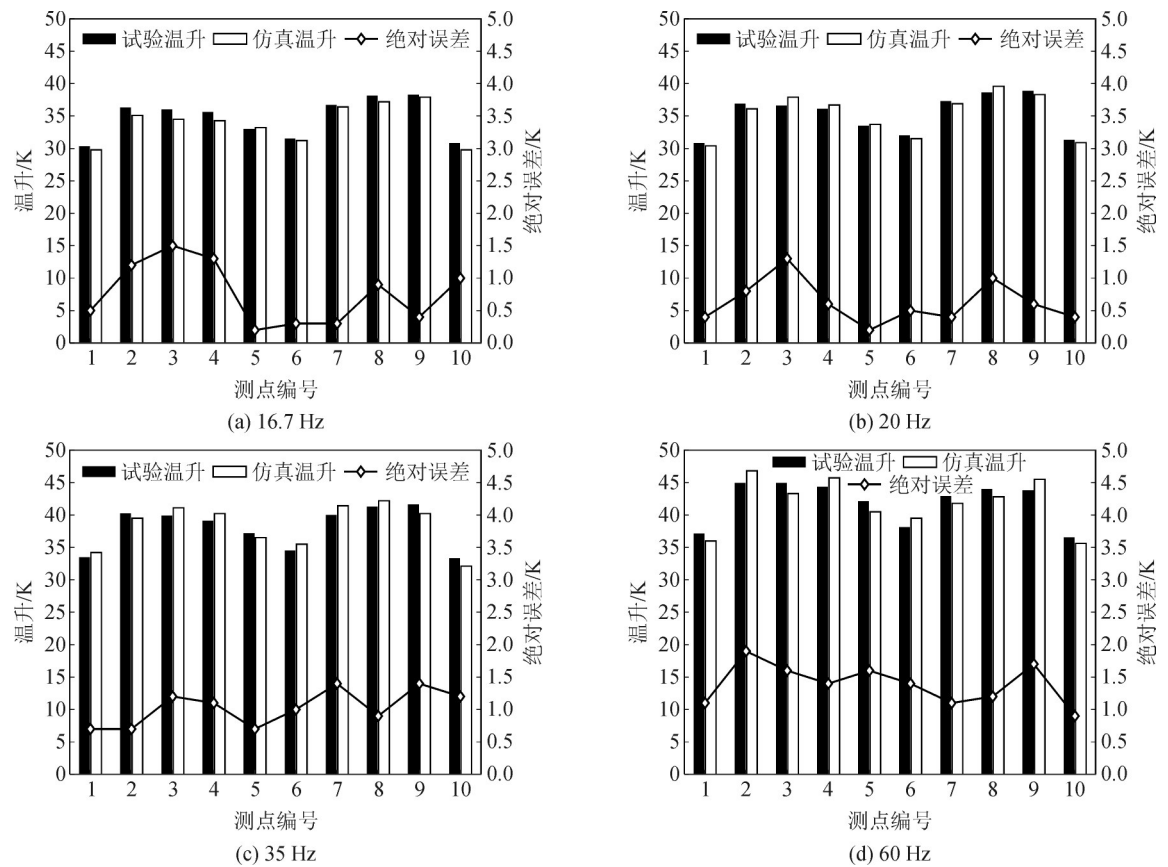


图 9 不同频率下B相测点温升仿真与试验对比

Fig. 9 Simulation and test comparison of temperature rise at phase B measurement point under variable frequency operating conditions

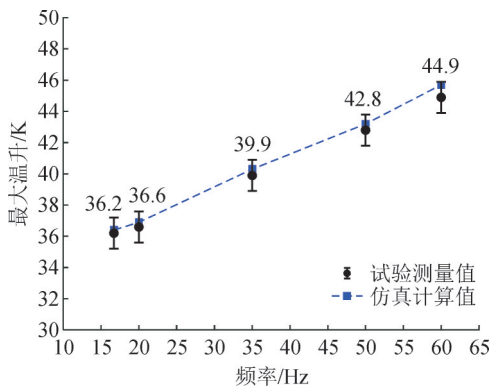


图 10 不同频率下开关柜最大温升仿真与实验对比

Fig. 10 Relationship between maximum temperature rise and frequency

为了直观量化频率对温升的影响规律,文中定义频率—温升折算系数 K_f ,其物理含义为:在保持试验电流幅值不变的条件下,目标频率 f 下的稳态温升 T_f 与工频 50 Hz 下的稳态温升 T_{50} 的比值

$$K_f = \frac{T_f}{T_{50}} \tag{13}$$

式(13)中: K_f 为频率和温升的折算系数; T_{50} 为工频下的稳态温升值; T_f 为研究频率下的稳态温升值。

将文中计算得到的 16.7~60 Hz 的计算结果代入到式(13)进行计算并拟合可以得到,不同频率下的折算系数,结果见图 11。

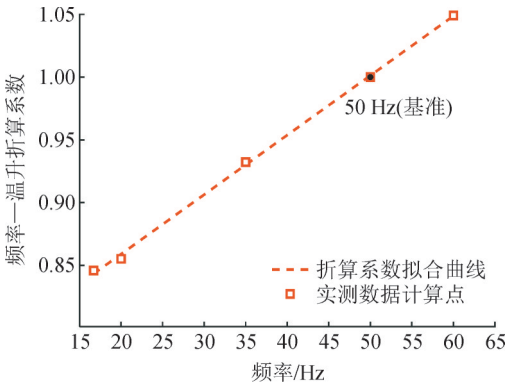


图 11 频率—温升折算系数关系

Fig. 11 Frequency-temperature rise conversion coefficient relationship

其折算关系为

$$K_f = 4.74 \times 10^{-3} f + 0.765 \tag{14}$$

基于该预测模型,测试人员仅需依据 50 Hz 试验结果,即可预测在实际运行频率下的温升值。例如,当设备实际运行在 60 Hz 下时,由式(14)可以得到折算系数为 1.05,这意味着相较于工频试验结果,

60 Hz下同电流运行的真实温升将相对升高约5%; 20 Hz下相同电流运行的温升将相对降低约14%。文中提出的频率—温升折算关系可以有效支撑测试人员对于开关柜在不同频率下的温升值的预测。

该折算模型具有特定的工程适用范围。对于频率适用性,建立的公式建议适用范围为16.7~60 Hz。在开关柜类型上,该关系主要针对空气自然对流冷却的中压开关柜,不适用于换热系数差异极大的强制风冷或SF₆气体绝缘设备。在发热测点方面,模型以梅花触头等关键发热点为基准,重点用于评估关键发热部位的温升折算,不适用于柜体表面等非关键区域。此外,文中经验公式的具体折算系数是基于KYN44-12(Z)型号、1 250 A额定电流的特定导电回路结构推导得出的。由于不同规格的开关柜在母排尺寸、相间距离及触头规格上存在差异,这些几何参数会显著影响不同频率下的交流电阻变化率。因此,对于结构尺寸差异较大的柜型以及相同柜型的不同部件,虽然频率—温升变化的线性规律依然存在,但其折算公式的具体系数需重新标定。

4 结论

文中针对不同频率下中压开关柜的温升特性进行了深入的研究,通过建立电磁—流体—温度场耦合仿真模型并搭建宽频域温升试验平台,分析了频率变化对开关柜电磁特性和温升分布的影响,提出了不同频率下温升值的等效折算方法,主要结论如下:

1)频率升高增强了趋肤效应和邻近效应,改变了开关柜导电回路的电磁分布特性,增大了电磁损耗。随着频率的升高,导体截面的电流密度分布呈现显著的不均匀性,电流主要在导体边缘聚集,使得有效导电面积减小,交流电阻增大,当频率从16.7 Hz升高到60 Hz,总损耗升高了约45.8%。

2)开关柜关键部位的温升与频率呈现正相关关系,存在低频降温、高频升温的特点。在稳态温度场的分布中,可以发现B相回路因散热受限且受到相邻相的邻近效应的影响而温升最高。试验的结果表明了,在16.7 Hz工况下B相最高温升相对工频下降了约6.6 K,而在60 Hz工况下,温升升高了约2.1 K,文中建立了测点最大温升与频率的拟合关系。

3)提出了频率—温升折算模型,为不同频率下开关柜的热特性评估提供了工程依据。基于仿真和试验结果,文中定义了不同频率下的温升折算系数,发现该系数随频率升高而线性增大。基于该折算关系,测试人员在不具备宽频域试验设备的条件

下,依靠工频50 Hz的温升试验数据可预测开关柜在实际运行频率下的温升值。该模型在方法论上具有普适性,但针对几何尺寸差异显著的柜型或相同柜型的不同部件应用时,需对其具体折算系数进行修正。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 古海良,周继贺,蒋文明,等.低压预制母线温升特性的建模仿真研究[J].高压电器,2022,58(7):214-222.
Gu Hailiang, Zhou Jihe, Jiang Wenming, et al. Modeling and simulation study on temperature rise characteristics of low-voltage prefabricated busbars[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(7): 214-222.
- [3] 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.
- [4] 孙园,陈晓东,陈天翔,等.中压开关柜温升分析与估算[J].厦门理工学院学报,2015,23(1):45-50.
Sun Yuan, Chen Xiaodong, Chen Tianxiang, et al. Analysis and estimation for the temperature rise of medium voltage switchgear based on the least-square method[J]. Journal of Xiamen University of Technology, 2015, 23(1):45-50.
- [5] 杜丽,丁永生,石维东,等.开关柜温升影响因素的仿真与试验研究[J].电气技术,2018,19(9):51-54.
Du Li, Ding Yongsheng, Shi Weidong, et al. Simulation and test researches on influence factors of temperature rise in switchgear[J]. Electrical Engineering, 2018, 19(9):51-54.
- [6] 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.
- [7] 黄泽平,陈丽安,王红艳,等.基于多物理场的大电流固体绝缘开关柜温升特性研究[J].高压电器,2025,61(3):71-79.
Huang Zeping, Chen Li'an, Wang Hongyan, et al. Research on temperature rise characteristics of high current solid insulated switchgear based on multi-physical field[J]. High Voltage Apparatus, 2025, 61(3):71-79.
- [8] 黄泽平,陈丽安,王红艳.强制对流条件下大电流固体绝缘开关柜的温升建模仿真与试验[J].高压电器,2026,62(1):1-9.
Huang Zeping, Chen Li'an, Wang Hongyan. Modeling simulation and test of temperature rise of high current solid insulated

- switchgear cabinet under forced convection conditions[J]. High Voltage Apparatus, 2026, 62(1): 1-9.
- [9] 兰 剑, 韩 冬, 冯 英, 等. 基于幂函数模型的高压开关柜温升预测与试验研究[J]. 高压电器, 2023, 59(10): 96-103.
- Lan Jian, Han Dong, Feng Ying, et al. Study on temperature rise prediction and test of high voltage switchgear cabinet based on power function model[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(10): 96-103.
- [10] 苏 斌. 基于声表面波传感的开关柜触头温升无线监测技术研究[J]. 电工技术, 2025(s1): 305-308.
- Su Bin. Research on wireless monitoring technology of contact temperature rise in switchgear based on surface acoustic wave sensing[J]. Electric Engineering, 2025(s1): 305-308.
- [11] 王立军, 黄锦麟, 吕文卿, 等. 基于数字孪生的GIS双断口隔离开关温升快速预测方法[J]. 高电压技术, 2026, 52(4): 1551-1562.
- Wang Lijun, Huang Jinlin, Lyu Wenqing, et al. Rapid prediction method for temperature rise of GIS double break isolation switch based on digital twin[J]. High Voltage Engineering, 2026, 52(4): 1551-1562.
- [12] Wang Lijun, Zheng Wensong, Wang Lihua, et al. Electromagnetic-thermal-flow field coupling simulation of 12 kV medium-voltage switchgear[J]. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, 2016, 6(8): 1208-1220.
- [13] 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.
- Sun Tao, Zhao Lihua, Long Chen, et al. Study on temperature rise characteristics of contact failure of tulip contacts of medium-voltage switchgear[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(5): 130-138.
- [14] 柯红海, 于志国, 袁 杰, 等. 中压开关柜温升特性的多物理场耦合仿真研究[J]. 广东电力, 2022, 35(10): 125-132.
- Ke Honghai, Yu Zhiguo, Yuan Jie, et al. Multi-physics coupling simulation research on temperature rise characteristics of medium voltage switchgear[J]. Guangdong Electric Power, 2022, 35(10): 125-132.
- [15] 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.
- [16] 李汉伟, 曾国辉, 刘 瑾. 基于Ansys的中压开关柜电磁-温度场耦合仿真分析[J]. 智能计算机与应用, 2020, 10(2): 250-254.
- Li Hanwei, Zeng Guohui, Liu Jin. Ansys-based coupling simulation analysis of electromagnetic-temperature field for medium-voltage switchgear[J]. Intelligent Computer and Applications, 2020, 10(2): 250-254.
- [17] 李汉伟. 基于Ansys的中压开关柜温度场建模及热分析[D]. 上海: 上海工程技术大学, 2020.
- Li Hanwei. Temperature field modeling and thermal analysis of medium-voltage switchgear based on Ansys[D]. Shanghai: Shanghai University of Engineering Science, 2020.
- [18] 王 伟, 王 博, 胡文歧, 等. 试验电源频率对高压开关设备温升影响研究[J]. 电工技术, 2024(19): 127-130.
- Wang Wei, Wang Bo, Hu Wenqi, et al. Study on effect of power source frequency to temperature-rise test of high-voltage switchgear and controlgear[J]. Electric Engineering, 2024(19): 127-130.
- [19] 李 昊, 赵文彬, 王 亚, 等. 基于高温绝缘系统的低频变压器轻量化设计方法[J/OL]. 高电压技术: 1-12[2026-01-01]. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20250472>.
- Li Hao, ZHAO Wenbin, WANG Ya, et al. Lightweight design method of low-frequency transformer based on high-temperature insulation system[J/OL]. High Voltage Engineering: 1-12[2026-01-01]. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20250472>.
- [20] 曾宏发. 复杂环境下低频风电变压器振动与温升特性研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2025.
- Zeng Hongfa. Research on vibration and temperature rise characteristics of low-frequency wind power transformer in complex environments[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2025.
- 王 博(1986—), 男, 高级工程师, 工程硕士, 研究方向为高压电器产品试验技术(通信作者)(E-mail: wangbo563@xihari.com)。
- ~~~~~
- (上接第 155 页)
- 3881-3891.
- [44] 班 建, 高享想, 黄 实, 等. 直流断路器电流开断试验技术与试验回路[J]. 高压电器, 2017, 53(6): 167-172.
- Ban Jian, Gao Xiangxiang, Huang Shi, et al. Current breaking test technology and circuit of DC circuit-breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(6): 167-172.
- [45] 姚 远, 刘 平, 刘 朴, 等. 高压直流断路器系统开断条件仿真研究[J]. 高压电器, 2015, 51(11): 64-72.
- Yao Yuan, Liu Ping, Liu Pu, et al. Simulation study on the breaking conditions of HVDC circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(11): 64-72.
- [46] CIGRE WG/A3.40 Technical brochure. Technical requirements and field experiences with MVDC switching equipment[R]. 2024.
- [47] CIGRE A3/B4 Technical brochure. Design, test and application of HVDC circuit breakers[R]. 2022.
- [48] CIGRE A3/B4 Technical brochure. Technical requirements and specifications of state-of-the-art HVDC switching equipment [R]. 2017.
- 陈家伟(1970—), 男, 工程师, 从事高压电器方面的研究工作(E-mail: chenjiawei@xihari.com)。
- 范广伟(1983—), 男, 正高级工程师, 研究方向为高压电器试验技术与标准化研究(通信作者)(E-mail: fanguangwei@xihari.com)。