

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.02.007

110 kV 模块化变电站电气设备发热建模特性分析及 布点现场测试方案

石 慧¹, 钱宇昊¹, 李雨菲¹, 陈 磊¹, 孙应春², 田艳军³,
王艺霖³, 刘志坚³, 史亚鑫³

(1. 国网扬州供电公司, 江苏 扬州 225001; 2. 扬州浩辰电力设计有限公司, 江苏 扬州 225001; 3. 华北电力大学(保定)
河北 保定 071003)

摘要: 110 kV 模块化变电站采用模块化建设方式, 具备标准化、工厂化和集约化的特点, 成为智能变电站首选建设模式。110 kV 模块化变电站的运行过程中, 受不同地区气候环境差异的影响, 存在电气设备积热与凝露问题, 显著影响电气设备的寿命与安全稳定运行。文中以江苏域内, 110-A2-6 模块化变电站及其电气设备发热特性为研究对象, 对变压器、电容器、开关柜、GIS 等主要电气设备发热特性进行建模和分析, 得到了模块化变电站电气设备的发热规律。最后, 介绍了在 110 kV 模块化变电站环控传感器布点方法, 通过实测数据与发热模型进行匹配, 进而为模块化变电站的热、湿环境问题的改善提供参考依据。

关键词: 模块化变电站; 电气设备; 发热特性; 热湿环境

Modelling Characteristic Analysis and Layout/Field Testing Scheme for Heat Generation in Electrical Equipment of 110 kV Modular Substation

SHI Hui¹, QIAN Yuhao¹, LI Yufei¹, CHEN Lei¹, SUN Yingchun², TIAN Yanjun³,
WANG Yilin³, LIU Zhijian³, SHI Yaxin³

(1. State Grid Yangzhou Power Supply Company, Jiangsu Yangzhou 225001, China; 2. Yangzhou Haochen Electric Power Design
Company Limited, Jiangsu Yangzhou 225001, China; 3. North China Electric Power University (Baoding),
Hebei Baoding 071003, China)

Abstract: 110 kV modular substation adopts a modular construction approach, featuring standardization, factory pre-fabrication and intensive design, making it the preferred construction model for smart substations. 110 kV modular substation in operation is affected by the difference of climate environment in different regions, and the problem of heat accumulation and condensation of electrical equipment is existed, which affect seriously both life, safe and stable operation of the electrical equipment. In this paper, the heat generation characteristics of 110-A2-6 modular substations and their electrical equipment in Jiangsu province are taken as the research subject. The heat generation characteristics of such main electrical equipment as transformers, capacitors, switchgear, GIS are modelled and analyzed, and the heat generation patterns of the electrical equipment in modular substations are obtained. Finally, the method of placing loop control sensors is introduced in the 110 kV modular substation, and the measured data is matched with the heat generation model, thus providing a reference basis for the improvement of the heat and humidity environment in the modular substation.

Key words: modular substation; electrical equipment; heat generation characteristics; hot and humidity environment

收稿日期: 2025-07-28; 修回日期: 2025-10-02

基金项目: 国网江苏省电力有限公司标准成本项目(B71060212EXY)。

Project Supported by Standard Cost Project of State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd.(B71060212EXY).

0 引言

变电站建设对改善区域的电网结构,提高供电可靠性,保证用户负荷可持续增长等方面起着不可或缺的作用。相比于传统变电站而言,模块化变电站无论在结构、施工周期以及占地面积等方面都更具优势,在变电站建设中被广泛应用^[1-3]。

中国模块化变电站技术由高压母线的模块化开始发展,但早期造价昂贵^[4]。之后采用将变压器、隔离开关、断路器预制在箱体的方案,缩短了建设时间。但由于箱体内部存在散热、绝缘、噪声等问题,使模块化技术主要应用于 10 kV 设备^[5]。2005 年后,中国实现了 110 kV 及 220 kV 电压等级变电站模块化技术。随着变电站模块化技术的发展,模块化变电站应用愈加广泛,其中以 110 kV 等级模块化变电站增加数量最多。十三五期间 110 kV 智能模块化变电站新建数量最多达到了新增总量的近 1/3。

2016 年国家电网公司在 35~110 kV 电压等级全面推广应用变电站模块化建设技术方案,在国网公司现有模块化变电站通用标准基础上,国网江苏公司在 110 kV 及以上电压等级中,全面应用 110-A2-6 设计方案,作为全省统一的建设标准,指导模块化变电站建设,从而确保在设备接口、光电缆接口以及装配式建筑设计等方面的标准化。在 2018—2020 年间,国家电网江苏公司建设的模块化变电站数量分别为 55、54、70 座,2021 年建设 78 座。

110 kV 模块化变电站主要由主变压器模块、高压开关模块、无功补偿和消弧线圈模块等功能模块组成^[6]。随着模块化变电站技术不断发展,110 kV 变电站功能模块高度集成,但统一的建设标准在面临不同地区气候环境差异时也存在着一系列问题。

江苏地区 110 kV 模块化变电站建设时采用的是统一的 110-A2-6 建设标准,使得变电站的通风散热未能充分考虑运行工况与当地环境的交互作用,导致变电站设备箱体内部出现散热困难、凝露等现象^[7]。变电站电气设备在运行时,发热最严重的设备是主变压器,其主要采用油浸自冷式散热,在夏季主变压器的热量通过对流散热的方式传递到外界环境散热效率会降低,引起主变室积热。而开关柜、GIS 设备与二次屏柜则采用干式自冷的散热方式,由于设备置于密闭柜体中,施工方案未在其设备室设置空调设备,会造成柜内积热。积热严重后会导致电气设备温度升高,影响电气设备可靠性及寿命,同时也会导致电气设备出现凝露现象。

江苏地区地处沿海是典型的冬冷夏热气候条件,在夏季湿热的环境中,开关柜及电缆沟中易出现凝露现象。电缆沟凝露主要是由于电缆沟封堵不良,热湿空气进入电缆沟内,而电缆与周围环境存在温差,电缆表面就会凝结露珠,严重时会导致电缆沟内积水。开关柜内也极易出现凝露现象,文^[8]通过对开关柜内壁水滴进行照片图像处理,发现开关柜内壁边缘部分更易凝结露珠^[8]。这是由于开关柜与二次屏柜中积热导致了柜体内外温差,当柜内湿热空气接触到温度低于凝露温度的柜内壁时,会在柜内壁结露。设备结露、受潮会导致电闪络,裸露金属的加速氧化或锈蚀。因此 110 kV 变电站迫切需要改善变电站凝露等环控问题,改善环控问题必须了解变电站内各电气设备的产热、散热机理,分析电气设备的热特性,然后根据各器室内电气设备的发热情况优化暖通设计方案。

文中首先针对 110-A2-6 模块化变电站的建设方案进行阐述,之后分析了模块化变电站的特点以及在热湿环境方面存在的问题。后通过对主要电气设备发热机理和模型进行分析,得到设备的热点和温度分布情况,从机理上阐述了开关柜凝露、主变积热等环控问题。最后通过现场布点测试方案与数据,分析验证了模块化变电站电气设备运行发热特征。

1 模块化变电站 110-A2-6 方案

1.1 110-A2-6 方案简介

《国家电网公司输变电工程通用设计—35~110 kV 智能变电站模块化建设施工图设计》(2016 年版)是国家电网公司为统一智能化变电站模块化建设标准,实现标准化建设,在现行通用设计的基础上,结合不同地区工程需求和技术发展编制完成了智能变电站模块化建设通用设计方案,共有 16 种通用设计方案^[9-10]。110-A2-6 建设方案 110 kV 模块化变电站建设通用设计方案的其中之一。

110-A2-6 方案是全户内模块化 110 kV 智能变电站,建筑物主体是一幢单层生产综合楼,变电站整体布置简明清晰,紧凑合理,能够满足无人值班的要求。该方案适用于城市中心区域、腐蚀严重地区、重污秽地区、对噪声环境要求较高地区和人口密度高、土地昂贵地区以及进出线均为电缆的工程。

1.2 110-A2-6 建设特点

江苏地区 110-A2-6 变电站建设方案主要分为电容器室、主变室、主变散热室、配电装置室、二次

设备室以及GIS设备室。作为模块化智能变电站,其包括了3大基本模块:110 kV 配电装置模块、主变压器及10 kV 配电装置模块、配电装置楼。

高压开关模块通过气体绝缘封闭方式连接组合电器,包括了进出线模块、避雷器、互感器等设备。封闭式组合电器在连接时需要现场制作连接套管,这不仅会增加工作量,而且现场制作的连接套管很难达到工厂生产水平,存在一定的运行风险。而进线模块是将封闭组合电器之间的电缆连接套管用电缆套管以及可拔插式电缆附件代替,提高了变电站运行的稳定性。

主变模块为了降低变电站施工现场的接线量,主变模块是对变压器的进出线端进行改进,选择了可拔插式电缆套件、油气管与进线模块相连接。主变模块在变电站中具有重要意义,主要作用是电压等级的变换以及变电站内部供电等。

自动化模块主要由交直流电源、保护屏、交直流屏、图像监控、通讯系统组成,通过在工厂进行预装,减轻了安装时工作量。自动化模块在变电站中用于通讯、控制、监控、保护等方面。

无功补偿模块内置无功补偿并联电容器组,通过电容器对变电站进行无功补偿。消弧线圈用于灭弧。在小型变电站中,无功补偿和消弧线圈模块常与出线模块合并为一个模块,进一步简化变电站结构使安装更加简便。

江苏某110 kV 模块化变电站平面图见图1,图1中建筑物主体是一幢单层生产综合楼,变电站整体布置简明清晰,紧凑合理。

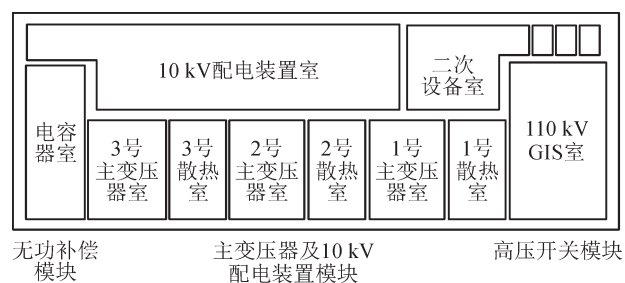


图1 江苏某110 kV 模块化变电站平面图

Fig. 1 Plan view of a 110 kV modular substation in Jiangsu

1)主变室与散热室。该变电站的主变模块采用50 MVA 分体式主变压器,变压器的散热器置于室外见图2,对主变室内环境要求较高,变压器运行最高环境温度限制为40℃。主变室采用建筑通风百叶从下部自然进风,侧墙轴流风机机械排风排除室内设备散热,散热器室采用自然通风散热。

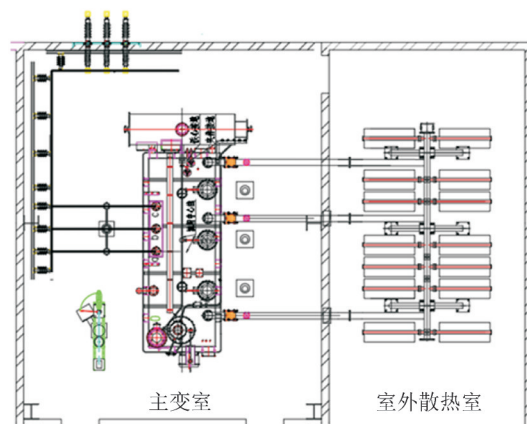


图2 主变与散热器室

Fig. 2 Main transformer and radiator room

2)电容器室。电容器室内部结构见图3,10 kV 电容器采用户内框架式成套装置,整套装置由统一标准的高压并联电容器、串联电抗器、开关、避雷器、放电线圈、结构件组成,安装时仅需进行简单的连接、调试。它相比于传统变电站而言减少了各类设备采购和组装环节安装更加简便。

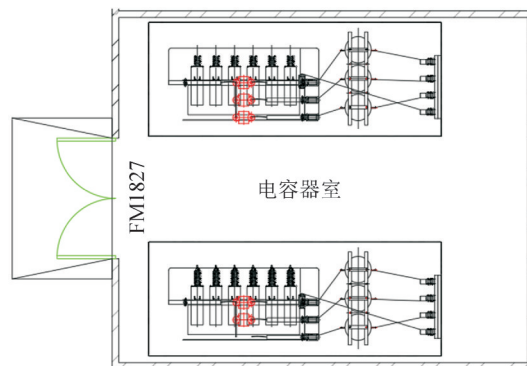
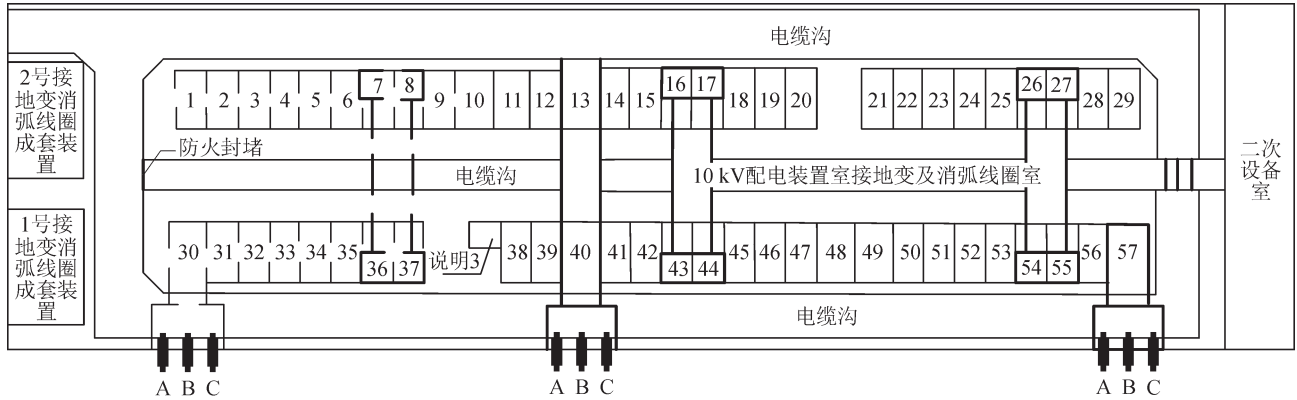


图3 电容器室

Fig. 3 Capacitor chamber

3)10 kV 配电装置室。配电装置室内10 kV 开关柜采用金属铠装中置式开关柜,在室内呈横向排列见图4。室内包括进线柜、计量柜、PT柜、出线柜、联络柜、隔离柜等,这些开关柜按照统一的标准生产,并进行组装、调试,构成10 kV 配电装置模块。但封闭的柜体散热性差,遇热湿空气易凝露损害柜内器件。

4)GIS室。GIS室内放置GIS全封闭组合电器见图5,它由断路器、隔离开关、接地开关、互感器、避雷器集成而来,这些开关均以统一标准进行生产并在工厂内进行组装。在现场安装时,仅需简单固定连接、调试。由于断路器等置于充有SF₆的封闭电器内,缩短了绝缘距离,减小了占地面积。



1—3-2号电容器; 2—4M母设; 3—3-1电容器; 4—30号出线; 5—29号出线; 6—28号出线; 7—27号出线; 8—26号出线; 9—25号出线; 10—2号分段隔离; 11—2号分段断路器; 12—3M母设; 13—2号主变; 14—2-2号电容器; 15—19号出线; 16—20号出线; 17—21号出线; 18—22号出线; 19—23号出线; 20—24号出线; 21—1-1号电容器; 22—1-2号电容器; 23—1号出线; 24—2号出线; 25—3号出线; 26—4号出线; 27—5号出线; 28—6号出线; 29—1M母设; 30—3号主变; 31—3号接地变; 32—31号出线; 33—32号出线; 34—33号出线; 35—34号出线; 36—35号出线; 37—36号出线; 38—2号接地变; 39—2M母设; 40—2号主变; 41—2-1号电容器; 42—18号出线; 43—17号出线; 44—16号出线; 45—15号出线; 46—14号出线; 47—13号出线; 48—1号分段隔离; 49—1号分段断路器; 50—1号接地变; 51—12号出线; 52—11号出线; 53—10号出线; 54—9号出线; 55—8号出线; 56—7号出线; 57—1号主变。

图4 10 kV 配电装置室

Fig. 4 10 kV distribution unit room

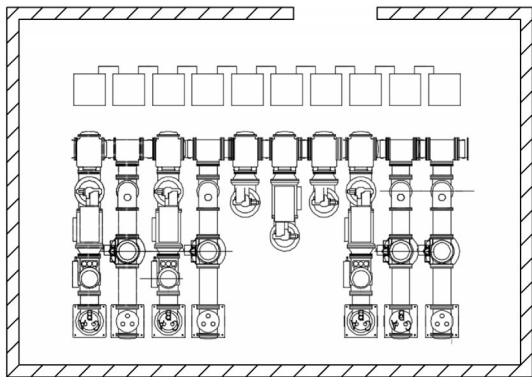


图5 GIS设备室

Fig. 5 GIS equipment room

2 主要电气设备发热分析

2.1 主变压器产热与散热机理

1)在变压器的运行过程中,油浸式变压器铁心的磁滞损耗、涡流损耗和绕组中的电阻损耗,将会以热量的形式存在,产生的热量都将在绕组、铁心和变压器油中传递,导致绕组和铁心温度升高;由于变压器油的作用,变压器油流会将热量代入变压器油箱壁,油箱壁与空气进行热量传递,降低变压器内部的温度。

变压器空载运行时,高压侧加上额定电压,低压绕组电流为零,在铁心中建立磁通。因此,在主磁通的影响下变压器铁心中会有损耗产生,其中包含磁滞损耗以及涡流损耗,铁心中的损耗以热能的形式在铁心中积存。

变压器负载时,高压侧和低压侧流过额定电流,在铁心、绕组中产生磁通和漏磁通。铁心中会有磁滞和涡流损耗的产生,而变压器的绕组则会有

电阻损耗、涡流损耗以及杂散损耗存在,损耗将以热能形式存在。

铜耗是由基本铜耗和附加铜耗组成,而基本铜耗计算式为

$$P = 3I_{1N\phi}^2 r_{1,75^\circ\text{C}} + 3I_{2N\phi}^2 r_{2,75^\circ\text{C}} \quad (1)$$

式(1)中: $I_{1N\phi}$ 为变压器高压绕组的相电流; $I_{2N\phi}$ 为变压器低压绕组的相电流; $r_{1,75^\circ\text{C}}$ 为折合为 75°C 时变压器高压绕组的电阻值; $r_{2,75^\circ\text{C}}$ 为折合为 75°C 时变压器低压绕组的电阻值。

绕组中的励磁电流在铁心中产生交变的磁场,交变的磁场会使得铁心产生损耗,即为磁滞损耗;由于变压器的铁心在交变的磁场中会产生感应电流,而感应电流的存在会使得铁心中产生涡流损耗。铁心损耗主要包括磁滞损耗和涡流损耗两部分。铁损计算的公式为:

$$P_0 = K_0 G_{\text{Fe}} P_c \quad (2)$$

$$P_c = P_{1/50} (F/50)^\beta B_m^2 \quad (3)$$

式(2)、(3)中: P_0 为基本铁损; K_0 为铁心损耗系数; G_{Fe} 为铁心重量; P_c 为单位质量铁耗; $P_{1/50}$ 为铁心损耗系数; F 为频率。

2)由于变压器的损耗会以热能的形式存在,致使变压器的铁心和绕组的温度将高于变压器油流的温度,温差产生后变压器绕组和铁心表面会发生热对流现象,导致铁心和绕组表面的热量会传递至油体中。当变压器油吸收热量后变压器油的温度会上升,变压器油体密度将跟随着温度的变化从而发生变化,温度高的油体密度将减小,密度小的油体会上升,密度大的油体会下降,形成自然对流。

油浸式变压器散热原理图见图6,图6中上升的流体到达油箱顶部后与油箱壁之间产生热对流现象,油体中的一部分热量将会在此散失;油体中大部分热将会进入散热器中,流入散热器中的变压器油将会与散热器内部发生热量交换,热量在散热片的内外壁之间将以热传导的方式传递,变压器油箱外壁与散热片外壁上的热量将通过热对流和热辐射的方式传递给周围空气,最终热量会到达大气中。

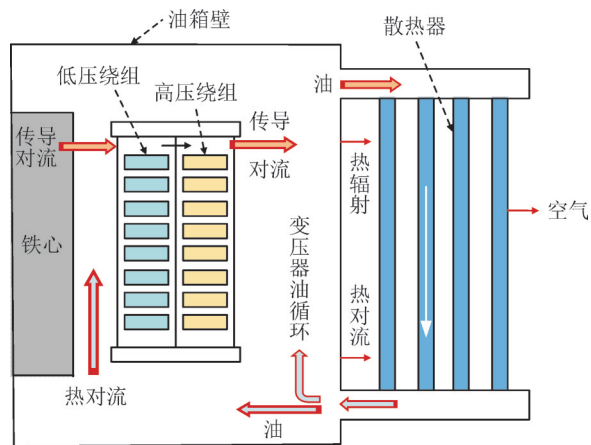


图6 油浸式变压器散热原理图

Fig. 6 Oil-immersed transformer heat dissipation principle diagram

2.2 电容器发热机理

模块化变电站中需无功补偿模块进行无功补偿,无功补偿模块单元主要由电容器构成,根据运行状态适时投切,提供补偿。电容器发热功率主要包括金属电极发热和介质发热。电容器在运行时,流通电流包括容性电流和介质损耗电流。容性电流在电容器中不会产生损耗,而介质损耗电流是由电容器的介质损耗引起的,介质损耗会以极化损耗、漏导损耗、局部放电损耗的形式存在^[11]。

电容器介质损耗计算式为

$$P_{CQ} = UI_R = Q \tan \delta = \omega C U_c^2 \tan \delta = I^2 \frac{\tan \delta}{\omega C} \quad (4)$$

式(4)中: Q 为电容器的无功输出容量; ω 为角频率; C 为电容器容值; U_c 为电容器端电压; δ 为电容器的介质损耗角; P_{CQ} 为损耗功率。电容器的介质损耗是由介质内部偶极子在交流电场的作用下转向而产生的,属于极化损耗^[12]。电容器绝缘介质损耗通过绝缘介质上承受的电压与介质上的电流计算,其中介质损耗因数 $\tan \delta$ 仅受到介质材料属性的影响。

电流经过电容器两极时,由于电极中电阻的作用会产生电极损耗。假设金属化膜方阻不变,对电

阻微元进行积分得到上下金属电极总发热功率计算式为

$$P_s = 2 \int_0^b i^2 dR_x = 2 \int_0^b \left(\frac{I \cdot x}{b} \right)^2 \frac{\beta}{L} dx = I^2 \cdot \left(\frac{2\beta b}{3L} \right) \quad (5)$$

式(5)中: I 为交流电流有效值; β 为金属化膜方阻; b 为金属化膜有效膜宽; L 为膜长。金属化膜方阻受到金属化膜表面的粗糙程度、致密程度、光滑程度以及膜厚的影响。电极两端电流沿电容器膜宽方向流动示意图见图7。



图7 电极中电流分布图

Fig. 7 Current distribution in the electrode

以江苏某变电站为例,变电站内采用自愈式高压并联电容器型号为BAM11/ $\sqrt{3}$ -334-1RF。该产品参数数值见表1。

表1 电容器参数表

Table 1 Capacitor parameter

结构参数	数值	结构参数	数值
型号	BAM11/ $\sqrt{3}$ -334-1RF	额定电压/kV	11/ $\sqrt{3}$
额定容量/var	334	额定电流/A	52.6
膜长/mm	75	额定电容/ μ F	26.4
膜厚/ μ m	7.5	额定频率/Hz	50
绝缘水平/kV	23/30	损耗角 $\tan \delta$	0.000 5

根据电容器的参数表计算电容器元件的绝缘介质损耗以及两电极金属损耗。其中介质损耗为

$$P_{CQ} = 2\pi f C U_c^2 \tan \delta = 138.16 \text{ W} \quad (6)$$

金属化膜方阻为

$$\beta = \frac{\rho}{d} \quad (7)$$

计算得电容器元件两极总损耗 P_s 为6 W,绝缘介质损耗是两电极损耗的23倍,即绝缘介质损耗率是电容器元件损耗的主要部分。

2.3 中压开关发热机理

在110 kV变电站中,中压开关柜是指10.5 kV开关柜。开关柜是变电站重要的电气设备,显著电网供电可靠性。开关柜在运行时,内部会产生热量会导致局部发热严重,严重时影响开关柜运行的稳定。因此,探究中压开关柜的发热机理、建立发热模型是必要的。

中压开关柜在运行时,其热源由电阻损耗、金属柜体在交变磁场中产生的涡流损耗与磁滞损耗、

绝缘材料的介质损耗3部分组成^[13]。

其中导体电阻损耗和接触电阻损耗经验公式为:

$$P = I_e^2 R \quad (8)$$

$$R = R_d + R_c \quad (9)$$

$$R_d = \rho \frac{L}{S} \quad (10)$$

$$R_c = K_c / (F_k / 9.8)^m \quad (11)$$

式(8)-(11)中: P 为电阻损耗功率; I_e 为额定电流; R_d 为导电的电阻。

交变的电流产生交变的磁场, 磁场在金属壳体中会产生电动势, 电动势在封闭的回路中会产生电流使柜体发热, 从而形成涡流。涡流损耗的计算式为

$$\begin{cases} P = \int_v \frac{J_y^2}{\gamma} dv \\ J = \delta_1 E \\ \nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \end{cases} \quad (12)$$

式(12)中: P 为涡流电流消耗的平均功率; J_y 为电流密度; γ 为材料的电导率; δ_1 为电导率; E 为电场强度; B 为磁场强度。

此外, 绝缘材料在电场中会产生极化损耗与电导损耗, 电导损耗是由绝缘材料中漏电流引起的, 极化损耗是电介质中带电粒子经过反复极化损耗的电量。

其介质损耗计算式为

$$P_1 = U_1^2 \omega C_1 \tan \sigma \quad (13)$$

式(13)中: P_1 为材料的介质损耗功率; U_1 为绝缘材料所受的电压; ω 为角频率; C_1 为材料的电容。

2.4 GIS设备发热机理与散热分析

气体绝缘金属封闭开关设备(GIS)将变电站内断路器、隔离开关、接地开关、电压互感器、电流互感器、避雷器、母线等一次设备, 通过优化设计组合为一个有机的整体, 密封于充满高绝缘性与灭弧性气体(SF₆)的容器中。由于其具有占地面积小、使用寿命长、噪音小、运行安全稳定等特点, 被广泛应用于变电站建设中。

GIS在运行时由于母线连接处和隔离开关触头的发热, 而引起的发热故障最多^[14]。发热故障会使线路发生短路烧毁, 引起变电站火灾, 严重影响用电安全, 造成巨大的经济损失。因此变电站GIS设备发热机理极为重要, 依据其发热机理, 合理布置温度监测系统, 及时发现故障隐患, 保障变电站安全稳定的运行。

GIS长期载流运行时, 会产生电阻损耗、绝缘件介质损耗以及外壳与屏蔽层的磁滞损耗^[15], 其损耗功率为

$$P_f = P_r + P_g + P_{Fe} \quad (14)$$

式(14)中: P_f 为总发热功率; P_r 为电阻损耗; P_g 为绝缘介质损耗; P_{Fe} 为铁耗。

由于在交变的磁场和交流电中, 母线中的电流分布不均匀, 集中于母线表面流动。计算电阻损耗时, 需要考虑集肤效应的影响。GIS设备电阻损耗为:

$$P_r = \frac{K_j K J m \rho}{\gamma} \quad (15)$$

式(15)中: K_j 为集肤效应系数; K 为临近效应系数; ρ 为导体的电阻率, 受导体温度影响; J 为导体中流过的电流密度; m 为质量; γ 为导体的密度。

其中集肤效应计算式为

$$K_j = \frac{A}{P \cdot b} = \frac{A}{P} \sqrt{\frac{2\pi f \mu}{\rho}} \quad (16)$$

式(16)中: A 为截面积; P 为截面的周长; b 为集肤效应的深度; μ 为磁导率; f 为电流频率。

两导体之间距离过小时, 导体中通过的电流会受到磁场的影响, 使得导体内电流分布不均匀称为临近效应。导体内电流频率越高, 导体之间距离越短, 导体中临近效应越强。

GIS设备中绝缘子、穿墙套管等绝缘器件, 在交流电的作用下会产生损耗即绝缘介质损耗, 其损耗功率为

$$P_g = U^2 C_2 \omega_1 \tan \delta \quad (17)$$

式(17)中: U 为交流电电压; ω_1 为交变电压的角频率; C_2 为介质等值电容; $\tan \delta$ 为介质损耗角正切值即(损耗因数)。

金属外壳与屏蔽罩在交变的磁场中, 会产生磁滞损耗和涡流损耗, 铁耗由涡流损耗和磁滞损耗组成。其表达式为:

$$P_{Fe} = P_h + P_e \quad (18)$$

$$P_h = K_h f B_m^\eta V \quad (19)$$

$$P_e = K_e f^2 B_m^2 V \quad (20)$$

式(18)-(20)中: P_h 为磁滞损耗; P_e 为涡流损耗; f 为频率; B_m 为最大磁感应强度; V 为金属外壳体积; η 为施泰因梅茨系数。

GIS设备内部热量会以热辐射、热传导、热对流的形式传递, 最终散失到设备周围的空气中。GIS隔离开关热量传递示意图见图8。

动静触头产生的热量通过热辐射、热对流的方式传递给屏蔽罩, 屏蔽罩的热量以同样的方式传递给

SF₆ 气体, SF₆ 气体将热量传递给外壳,最终外壳以热对流和热辐射的方式将热量传递至周围空气中。

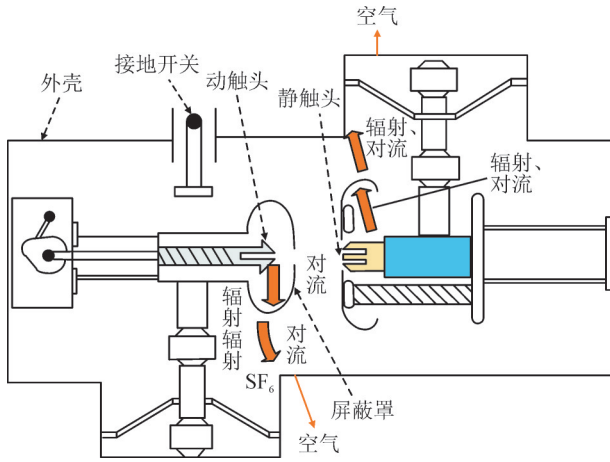


图8 GIS隔离开关热量传递

Fig. 8 GIS disconnector heat transfer

3 110-A2-6 模块化变电站电气设备发热特性分析与检测数据验证

电气设备的温升在限制范围内,电气设备才能正常运行,若超出温升限值电气设备的寿命会受到严重影响。

3.1 主变压器热点分析

1)主变压器热点温度分布。变压器绕组和铁心中的热量以热对流的方式,传递至变压器箱底的变压器油。底部的变压器油受热后温度升高,密度降低,油体在到达顶层后此时密度最小,温度最高。变压器运行稳定后,箱体的温度最高点出现在顶部^[6]。

为了进一步验证变压器热点位置分布推导的正确性,变压器在自然对流的情况下以额定负荷运行时,待变压器稳定运行后,使用红外成像仪采集变压器箱体表面区域红外热图像见图9。从图9中可以看出变压器外表面热点区域温度随轴向高度递增,且最热点温度集中分布于变压器箱体顶部达到49.3℃。

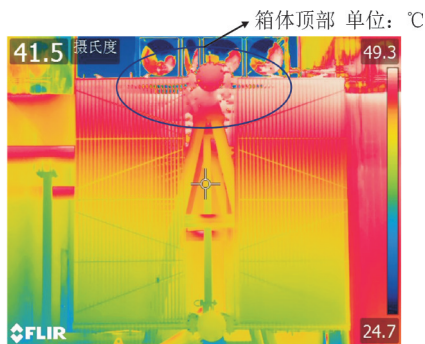


图9 变压器局部红外热成像图

Fig. 9 Transformer local infrared thermography

2)变压器有功与温度变化。在江苏某110 kV

变电站2号主变压器侧面距地面高1.3 m处,记录2号主变压器一个月内(07-13—08-12)温度数据并收集7月20日的气温数据。依据变电站收集温度与有功数据,分别绘制出一天与一月内变压器有功变化与温度的关系曲线见图10、11。

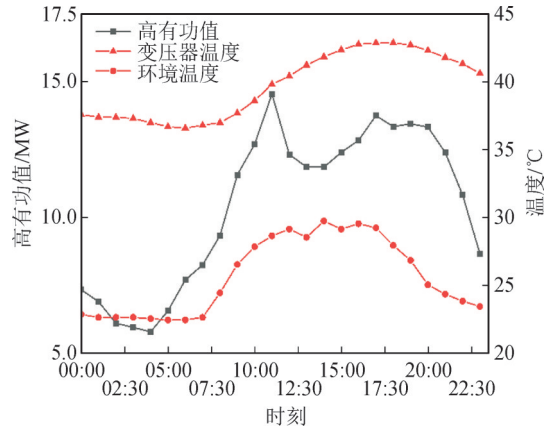


图10 一天内变压器有功与温度变化趋势

Fig. 10 Trend of transformer active power and

temperature during a day

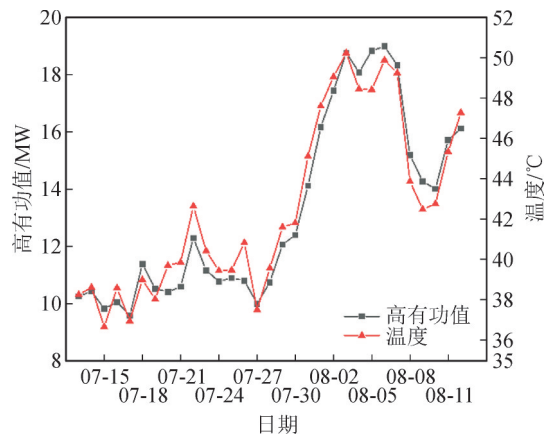


图11 一个月内有功与温度变化趋势

Fig. 11 Trend of active power and temperature

within one month

根据图10,可以看出温度与有功功率的变化趋势呈强相关特性。在10:00-18:00期间,变压器的有功功率呈下降趋势但其外表面温度随气温升高而增大,此时变压器外表温度主要受环境温度的影响。

图11中2号变压器在一个月中的有功与温度变化趋势相同,变压器的温度变化受到有功功率的影响。这是由于有功功率增加会使变压器中的电流值增大,根据式(1)可知,电流增加会使变压器绕组上的损耗增加,变压器的温度也会上升。

3.2 电容器热点分析

电容器热点温度分布。总功率损耗计算式为

$$P = I^2 \left(\frac{\tan \delta}{\omega c} + \frac{2}{3} \frac{\beta b}{L} \right) \quad (21)$$

以金属化膜的有效膜宽的中点为坐标原点建立坐标系, 见图 12。

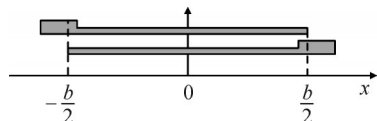


图 12 金属化膜截面展开图

Fig. 12 Metallized film cross-sectional expansion diagram

在坐标轴上沿 x 正方向的损耗密度公式为

$$p(x) = \frac{\frac{I^2 \beta}{b^2 L} (x - \frac{b}{2})^2 + \frac{I^2 \beta}{b^2 L} (x + \frac{b}{2})^2 + \frac{I^2 \cdot \tan \delta}{\omega C b}}{S} = \frac{I^2 \beta}{b^2 L S} (2x^2 + \frac{b^2}{2}) + \frac{I^2 \cdot \tan \delta}{S \cdot \omega C b} \quad (22)$$

由该分布式可知, 电容器功率损耗最高点分布在金属化膜两端, 见图 13。

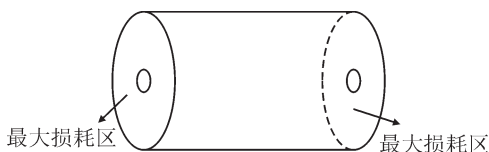


图 13 电容器元件

Fig. 13 Capacitor components

由于电容器装置内部电容器元件采用喷金端对外壳大面的排列方式, 此时热点温度应在电容器装置外壳侧面(大面)。利用热成像仪拍摄变电站电容器装置的图像, 得到电容器的热成像图, 见图 14。

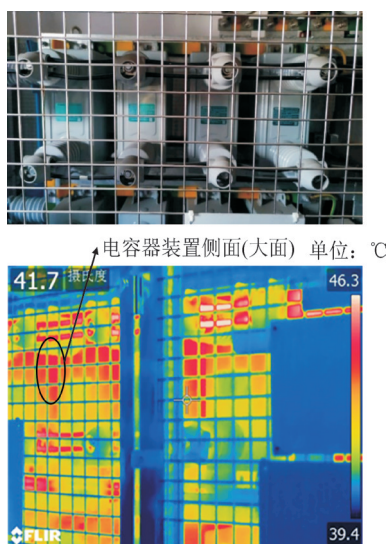


图 14 电容器装置实物图及热成像图

Fig. 14 Capacitor device physical diagram and thermal imaging

图 14 时拍摄的电容器装置实物图以及热成像图, 根据电容器热成像图可以看出电容器装置的侧面(大面)温度最高达到了 $46.3\text{ }^{\circ}\text{C}$, 在电容器装置连

接导线由于电阻的影响也导致其温度较高。

3.3 开关柜热点特性分析及实测验证

开关柜温升过高会使母线接头和开关触头处氧化腐蚀, 导致接触电阻增加, 出现恶性循环, 断路器回路、触头(接头)成为柜内发热最严重的部位^[17-18]。由于接触电阻对发热会产生严重影响, 发现断路器模块在开关柜中温度较高, 上动触头处温度最高^[19]。利用热成像仪拍摄开关柜得到其热成像图见图 15, 柜内热点温度为 $34.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

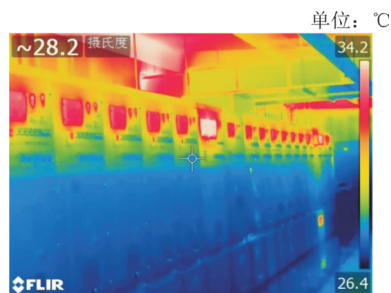


图 15 开关柜热成像图

Fig. 15 Thermal imaging of switchgear

开关柜温度特性分布不合理在正常运行工况下会引起凝露。在电力系统中, 凝露主要发生在高压设备的柜体内壁如机构箱、配电柜以及开关柜以及电流互感器表面等^[20-22]。当开关柜内空气中的相对湿度高, 而开关柜内壁温度低于露点温度时, 柜内热湿空气遇开关柜内壁会凝结露珠^[23]。

在江苏某 110 kV 变电站南墙上距离西墙 5.15 m 、地面 2.5 m 处设置温湿度记录仪, 记录配电装置室一个月内(07-13—08-12)温湿度数据, 一天和一个月中变电站配电装置室的温湿度变化趋势, 见图 16、17。

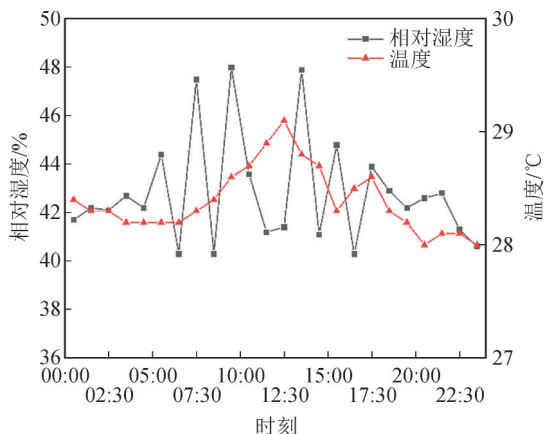


图 16 一天中温度与湿度变化

Fig. 16 Temperature and humidity variation during the day

开关柜外在一天或一月中温度都在 $25\sim 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 内波动, 变化趋势平稳。图 16 在 $7:30$ 、 $9:30$ 、 $13:30$ 时湿度达到最大值, 其余时间湿度变化较为平稳。图 17 中开关柜外湿度随温度升高而呈缓慢下降的趋势,

开关柜外的环境湿度受到环境温度的影响。

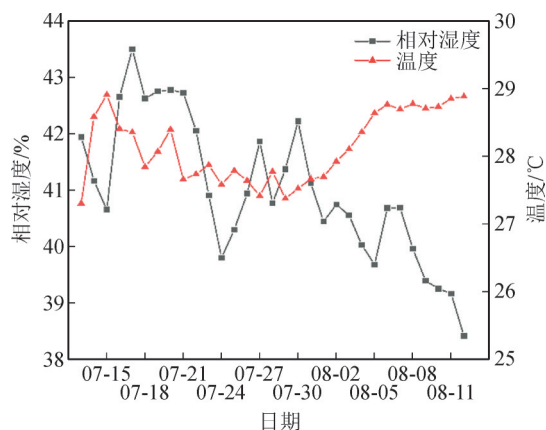


图 17 一个月内温度与湿度变化

Fig. 17 Temperature and humidity variation within one month

图 15 为开关柜热成像图,由图 15 可知柜内外存在温度差,开关柜内壁会发生凝露现象,但由于季节的影响环境中的温湿度会不同,在春秋两季环境中湿度大,凝露发生的概率大,夏冬两季环境湿度小且夏季柜内外温差小,凝露发生概率小。

3.4 GIS 设备热点分析

GIS 母线是承担电流的主体,隔离开关存在接触电阻,因此 GIS 设备中发热源主要为母线、母线外壳以及隔离开关。文[24]运用热路法计算 GIS 设备中母线与母线外壳的温升,并用数值模拟验证了热路模型的准确性,其中母线导体温升高于母线外壳。然而隔离开关导体的损耗密度要高于断路器导体,GIS 内部的接触电阻会产生显著的损耗值,因此接触电阻是发热最严重的地方^[25]。使用热成像仪拍摄 GIS 设备的热成像图,见图 18。



母线型隔离接地组合开关

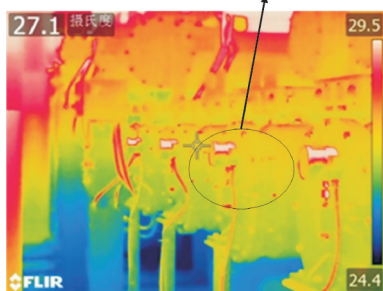


图 18 GIS 设备实物及热成像图

Fig. 18 GIS equipment physical and thermal imaging map

图 18 中为 110 kV 变电站 GIS 设备实物及热成像图,在 GIS 设备外壳热成像图中可以看出隔离开关处由于受到母线以及隔离开关触头发热的影响,其外壳的温度最高,达到了 29.5 °C。

4 结论

模块化变电站是采用统一标准制造的各类模块建造而成,与传统变电站建设相比具有安装简便、运输便捷、占地面积小、建造成本低的特点。模块化变电站具有诸多优点的同时,也存在电气设备散热难、开关柜凝露等问题。

1) 变电站中主要的发热设备有主变压器、电容器、开关柜以及 GIS 设备,其中变压器发热最严重。主变压器的热点温度分布于变压器箱体顶部,电容器元件的热点温度分布于元件两端,开关柜内断路器模块、上动触头处温度最高,GIS 设备的母线发热最严重。

2) 变压器的发热功率会受到负荷的影响,电容器元件的发热功率主要受到绝缘介质材料属性的影响,而在开关柜和电容器的发热功率主要与流经导体的电流即负荷有关。在开关柜中由于散热条件差存在内外温差,会导致其出现凝露现象,但由于环境湿度的影响凝露出现概率与季节相关。

3) 文中对 110 kV 变电站主要电气设备进行了发热建模及分析并通过实测数据验证了热点分布推导的正确性,为变电站通风散热提供依据。但不同等级的变电站的主要电气设备有所区别,因此变电站内电气设备的发热分析不够完善,未来可以增加或优化对各类电气设备的发热特性建模及分析。

参考文献:

- [1] 林文静. 基于模块化技术的智能变电站设计[D]. 济南:山东大学,2021.
LIN Wenjing. Design of intelligent substation based on modular technology[D]. Jinan: Shandong University, 2021.
- [2] 颜 艳,江永生. 基于模块化设计的城市智能变电站整体优化研究[J]. 山西建筑,2020,46(1):57-59.
YAN Yan, JIANG Yongsheng. Research on the overall optimization of urban intelligent substation based on modular design[J]. Shanxi Architecture, 2020, 46(1): 57-59.
- [3] 郭 嘉,谢景海,孙 密,等. 一种变电站数字孪生体的轻量化构建方法[J]. 电测与仪表,2025,62(4):130-140.
GUO Jia, XIE Jinghai, SUN Mi, et al. A lightweight construction method for substation digital twin[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2025, 62(4): 130-140.
- [4] 柳国良,张新育,胡兆明. 变电站模块化建设研究综述[J]. 电网技术,2008,32(14):36-38.
LIU Guoliang, ZHANG Xinyu, HU Zhaoming. A survey on modularized construction of power substations[J]. Power System

- Technology, 2008, 32(14): 36-38.
- [5] 莫素敏. 海南中部地区模块化智能变电站方案研究与设计[D]. 广州: 华南理工大学, 2020.
MO Sumin. Research and design of modular intelligent substation in central Hainan province[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020.
- [6] 胡劲松, 石改萍, 孔祥玉, 等. 新技术对模块化智能变电站设计的影响分析和建议[J]. 电力系统及其自动化学报, 2020, 32(3): 107-112.
HU Jinsong, SHI Gaiping, KONG Xiangyu, et al. Analysis of influences of new technology on modular intelligent substation design and suggestions[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2020, 32(3): 107-112.
- [7] 王流火, 孙 帅, 王增彬, 等. 变电站设备箱体温度、湿度场及凝露的数值模拟[J]. 高压电器, 2020, 56(1): 24-29.
WANG Liuhuo, SUN Shuai, WANG Zengbin, et al. Numerical simulation of temperature/humidity field and condensation in substation equipment cabinet[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(1): 24-29.
- [8] 董文坚, 赵 法. 开关柜凝露因素试验分析[J]. 电工技术, 2020(22): 147-148.
DONG Wenjian, ZHAO Fa. Test analysis of condensation factors in switchgear[J]. Electric Engineering, 2020(22): 147-148.
- [9] 门 强, 刘 涛, 张 俊, 等. 基于自主可控技术的智能变电站继电保护远程智能测试方法与应用[J]. 电测与仪表, 2025, 62(5): 185-192.
MEN Qiang, LIU Tao, ZHANG Jun, et al. Remote intelligent test method and application of relay protection of smart substation based on autonomous controllable technology[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2025, 62(5): 185-192.
- [10] 纪 鹏, 李迎华, 李 洋, 等. 基于模糊学习的智能变电站二次安措票生成研究[J]. 电测与仪表, 2025, 62(6): 186-193.
JI Peng, LI Yinghua, LI Yang, et al. Research on generating secondary safety measure ticket for intelligent substation based on fuzzy learning[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2025, 62(6): 186-193.
- [11] 岳国华, 杜志叶, 孟圣淳, 等. 基于电热耦合的干式直流电容器温升分布不均匀特性分析及优化[J]. 高电压技术, 2022, 48(12): 4915-4924.
YUE Guohua, DU Zhiye, MENG Shengchun, et al. Analysis and optimization of non-uniform temperature rise distribution of dry-type DC capacitor based on electro-thermal coupling[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(12): 4915-4924.
- [12] 许庆超, 徐强超, 张 敏, 等. STATCOM 直流侧电容器元件损耗分析及优化设计[J]. 电力电子技术, 2021, 55(3): 39-43.
XU Qingchao, XU Qiangchao, ZHANG Min, et al. Analysis and optimal design of the internal loss of STATCOM DC-side capacitor[J]. Power Electronics, 2021, 55(3): 39-43.
- [13] 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.
- [14] 刘宇明, 崔 晨, 孙严智, 等. 基于改进 EEUC 算法的智能变电站无线传感器网络路由策略研究[J]. 电测与仪表, 2025, 62(7): 99-105.
LIU Yuming, CUI Chen, SUN Yanzhi, et al. Research on routing strategy of wireless sensor network in intelligent substation based on improved EEUC algorithm[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2025, 62(7): 99-105.
- [15] 黄孟丹, 肖 纯, 杨芷宁, 等. GIS 设备发热研究进展[J]. 高压电器, 2020, 56(12): 24-33.
HUANG Mengdan, XIAO Chun, YANG Zhining, et al. Research progress of GIS equipment heating[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(12): 24-33.
- [16] 殷浩洋. 应用石墨烯复合材料的油浸式变压器温度场数值研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2020.
YIN Haoyang. Numerical research on temperature field of oil-impregnated transformer using graphite composite materials[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2020.
- [17] 王辰旭, 李永华, 彭志敏. 高压开关柜温度场仿真研究[J]. 电工电能新技术, 2021, 40(11): 64-71.
WANG Chenxu, LI Yonghua, PENG Zhimin. Simulation of temperature flow field in high voltage switchgear[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2021, 40(11): 64-71.
- [18] 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.
JI Lipeng, ZHEN Li, LIU Hongliang, et al. Finite element numerical calculation of butt contact in high voltage switchgear based on magnetic-temperature field coupling[J]. China Measurement & Testing Technology, 2022, 48(6): 8-12.
- [19] 龚 凯, 肖晃庆, 张 展, 等. 新能源并网换流器的自适应混合同步控制及其小信号稳定性分析[J]. 浙江电力, 2024, 43(11): 3-14.
GONG Kai, XIAO Huangqing, ZHANG Zhan, et al. Adaptive hybrid synchronization control of grid-connected converters in renewable power plants and its small-signal stability analysis[J]. Zhejiang Electric Power, 2024, 43(11): 3-14.
- [20] 刘若溪, 白宝军, 郭 沁, 等. 开关柜凝露现象机理分析研究[J]. 高压电器, 2018, 54(10): 80-84.
LIU Ruoxi, BAI Baojun, GUO Qin, et al. Analysis on condensation phenomenon mechanism of switchgear[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(10): 80-84.
- [21] 舒胜文, 许俊伟, 占兆璇, 等. 高湿环境下 40.5 kV 开关柜凝露发展特性与加热器布置方法[J]. 高电压技术, 2023, 49(2): 493-504.
SHU Shengwen, XU Junwei, ZHAN Zhaoxuan, et al. Condensation development characteristics and heater arrangement method of 40.5 kV switchgear under high humid environment[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(2): 493-504.
- [22] 唐 强, 杨 毅, 魏 森, 等. KYN61-40.5kV 高压开关柜多物理场分析及部件绝缘特性试验研究[J]. 高压电器, 2021, 57(12): 33-41.
TANG Qiang, YANG Yi, WEI Miao, et al. Multiphysics analysis on KYN61-40.5kV high voltage switchgear and study of insulation test of component[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(12): 33-41.
- [23] 顾泽波, 赵雪茹, 郭 力. 开关柜凝露问题研究的现状与进展[J]. 机电工程技术, 2022, 51(4): 25-29.
GU Zebo, ZHAO Xueru, GUO Li. Current situation and progress of research on condensation in switchgear[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2022, 51(4): 25-29.
- [24] 刘亚男, 舒乃秋, 李彦彰, 等. 基于等效热路模型的 GIS 隔离开关温升计算[J]. 电测与仪表, 2017, 54(19): 7-12.
LIU Yanan, SHU Naiqiu, LI Yanzhang, et al. Temperature-rise calculation of GIS disconnecting switch based on equivalent thermal-circuit model[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2017, 54(19): 7-12.
- [25] 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.
- 石 慧(1983—), 男, 本科, 高级工程师, 主要从事智能变电站模块化建造技术(通信作者)(E-mail: 39483412@qq.com)。