

变电站消防安全现状评估与数值模拟分析研究

孟天畅¹, 刘睿², 过羿², 刘庆^{1*}

¹建研防火科技有限公司建材结构室, 北京

²国网安徽省电力有限公司电力科学研究院, 安徽 合肥

收稿日期: 2025年11月25日; 录用日期: 2025年12月16日; 发布日期: 2025年12月29日

摘要

本研究基于对多个变电站的实地调研与火灾安全现状分析, 系统梳理了不同类型变电站在消防设计与运行维护方面的共性问题, 并结合规范要求开展了统计比对与隐患评估。结果表明, 事故油池及卵石层铺设不规范是当前最突出的隐患问题(出现频次15次), 其次为火灾报警系统故障未能及时处理(出现频次12次)。基于上述调研结果, 为验证典型高风险情形下的火灾演化特征, 研究选取变压器起火的最不利工况作为典型场景, 采用FDS (Fire Dynamics Simulator)建立数值模型开展模拟分析。结果显示, 在11.57 MW火灾规模下, 火源温度最高超过520℃, 低层阀厅区域烟气温度约为30℃, 大堂上层烟气温度约为47℃。模拟揭示了变电站火灾中显著的温度与烟气分层特征, 并反映出火灾发展过程中的空间差异性, 为进一步优化变电站火灾风险评估与消防防控设计提供了科学依据。

关键词

变电站, 消防评估, 火灾安全隐患, 数值模拟

Research on Current Status Assessment and Numerical Simulation Analysis of Fire Safety in Substations

Tianchang Meng¹, Rui Liu², Yi Guo², Qing Liu^{1*}

¹Building Materials and Structure Department, CABR FIRE CO., LTD, Beijing

²Electric Power Research Institute, State Grid Anhui Electric Power Co., Ltd., Hefei Anhui

Received: November 25, 2025; accepted: December 16, 2025; published: December 29, 2025

Abstract

Based on on-site investigations and analysis of the current fire safety situation at multiple substations,

*通讯作者。

文章引用: 孟天畅, 刘睿, 过羿, 刘庆. 变电站消防安全现状评估与数值模拟分析研究[J]. 统计学与应用, 2025, 14(12): 363-370. DOI: 10.12677/sa.2025.1412371

this study systematically sorted out the common problems in fire protection design, operation and maintenance of different types of substations, and conducted statistical comparisons and hidden hazard assessments in combination with specification requirements. The results show that the non-standard layout of accident oil pools and pebble layers is the most prominent hidden hazard at present (occurring 15 times), followed by the failure to timely handle faults in the fire alarm system (occurring 12 times). Based on the above research results, to verify the fire evolution characteristics under typical high-risk scenarios, this study selected the most unfavorable working condition of transformer fire as a typical scenario, and established a numerical model using FDS (Fire Dynamics Simulator) for simulation analysis. The results indicate that under a fire scale of 11.57 MW, the maximum temperature of the fire source exceeds 520°C, the flue gas temperature in the lower valve hall area is approximately 30°C, and the flue gas temperature in the upper part of the main hall is about 47°C. The simulation reveals the significant temperature and flue gas stratification characteristics in substation fires, as well as the spatial differences during the fire development process. This provides a scientific basis for further optimizing substation fire risk assessment and fire protection and prevention design.

Keywords

Substation, Fire Protection Assessment, Fire Safety Hazard, Numerical Simulation

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 火灾特点分析

变电站一旦发生火灾事故，轻则造成关键电气设备损毁，重则可能引发大范围停电甚至人员伤亡，造成严重的经济损失与社会影响。变电站内关键设备普遍含有大量绝缘油及润滑油等高可燃性物质，且运行环境复杂、负载波动频繁，存在一定的不稳定因素。当变压器处于故障状态时，其内部绝缘油温度可升至 400°C 以上，进而分解产生甲烷、乙烷、乙烯等可燃性气体[1]。若此类气体未能及时排放或在局部区域聚集，极易在电气放电或高温表面作用下发生燃烧甚至爆炸。

引发变电站火灾的原因多样，包括电气故障、人为操作失误、电力线路接触不良、设备设计不合理、产品质量问题以及运行管理不善等。王斌[2]指出，随着智能化、自动化水平的提高，变电站正逐步向“无人值守”方向发展，这在提升运行效率的同时，也使消防安全面临新的挑战。若消防设施维护不到位、运行人员缺乏消防专业知识，或监控系统出现故障，将导致火灾早期发现和处置能力显著下降，从而造成严重财产损失。夏奎[3]结合国内部分城市地下变电站的特点指出，电缆井及管道防火封堵不严密，会为火势蔓延提供通道，加剧火灾后果的不可控性。近年来，国内外已发生多起典型变电站火灾事故。针对新疆某电网 110 kV 变电站低压侧开关柜烧毁的故障事件[4]，某 220 kV 变电站主变压器起火，事故导致全站停运，事故中变压器油燃烧剧烈，现场烟气弥漫；此外，2022 年国外一座±800 kV 换流站火灾造成电力传输中断和重大经济损失。这些事故表明，一旦火灾发生，变电站内部的高能设备、高油量及密闭结构特征极易导致火势迅速扩大，并产生大范围热辐射和烟气危害。

为系统评估此类火灾的危险性，开展基于实际现场调研与数值模拟相结合的研究尤为必要。通过对不同电压等级变电站的消防安全隐患排查，可识别影响火灾发展的关键风险因素；另一方面借助 FDS (Fire Dynamics Simulator) 等火灾动力学数值工具，可以模拟变电站典型火灾场景下的温度场、烟气流动及有毒气体浓度分布，为火灾发展规律、烟气控制及防护措施优化提供科学依据。本文基于典型变电站现场

调研数据与 FDS 数值模拟结果，对变电站火灾危险性进行了系统性分析与定量化评估，以期为变电站消防设计、运行维护及安全管理提供可操作的技术支撑和改进方向。

2. 变电站火灾风险评估

2.1. 安全评估依据

为全面了解多等级变电站的消防安全现状并提升整体防控水平，以我国北方某省辖区内 11 个供电公司共计 43 座变电站开展了系统性的调研、分析与评估工作。研究对象中，最早一批变电站建于 1972 年，运行至今已超过 50 年。由于建设与改造时间跨度较大，各变电站在消防设计及改造阶段执行的国家标准、行业规范和地方标准存在显著差异，导致消防安全水平呈现出年代性差别。为紧跟行业发展趋势、提升建筑物(或构筑物)及重要露天电气设备的整体消防安全性能，本次调研和评估工作严格依据现行最新标准开展，包括《火力发电厂与变电站设计防火标准》(GB 50229-2019)和《建筑设计防火规范》(GB 50016-2014，2018 年版)等国家及地方规范。通过现场踏勘、资料审查与功能测试等手段，对各变电站的消防设施配置、运行状态及安全管理情况进行了系统分析，识别并梳理出当前存在的主要消防安全隐患，并据此提出了针对性的整改与优化建议，为后续提升变电站消防安全水平提供了技术支撑和决策依据。

2.2. 评估内容

评估工作采用现场问询、资料审查及消防功能性测试等多种方法，基于变电站实际调研的方式，对变电站的建筑防火性能、消防安全管理水平及消防设备设施功能三个维度开展综合性评估。评估内容主要包括以下方面包括评估内容主要涵盖建筑消防合法性、消防安全管理体系及应急预案落实情况；防火巡查、隐患整改与人员培训机制；消防设施运行与控制室管理；电气与燃气用具安全；建筑防火设计与日常管理措施；专职及志愿消防队建设运行，以及消防安全能力的定期检查与综合评估。

2.3. 评估对象

本次主要针对变电站开展安全评估，为了保证多样性，共选取 43 个变电站开展了调研。其中包含本次主要针对变电站开展安全评估，为了保证多样性，共选取 43 个变电站开展了调研。其中包含 11 个 110 kV、22 个 330 kV、8 个 750 kV、1 个换流站和 1 个 1000 kV 开关站进行调研。各类型变电站占比见图 1 所示。

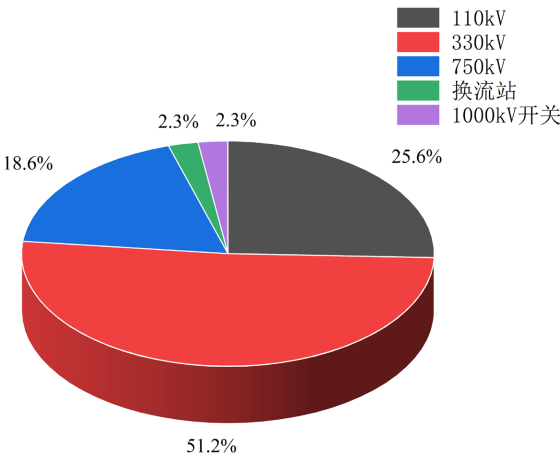


Figure 1. Distribution map of research categories for substations in a certain region of China
图 1. 我国某区域变电站调研类别分布图

3. 主要存在的消防安全隐患

针对某省辖区内共计 43 座变电站开展消防安全隐患排查, 共发现 8 类高频问题, 共计 78 项(如图 2 所示), 各项内容情况如下:

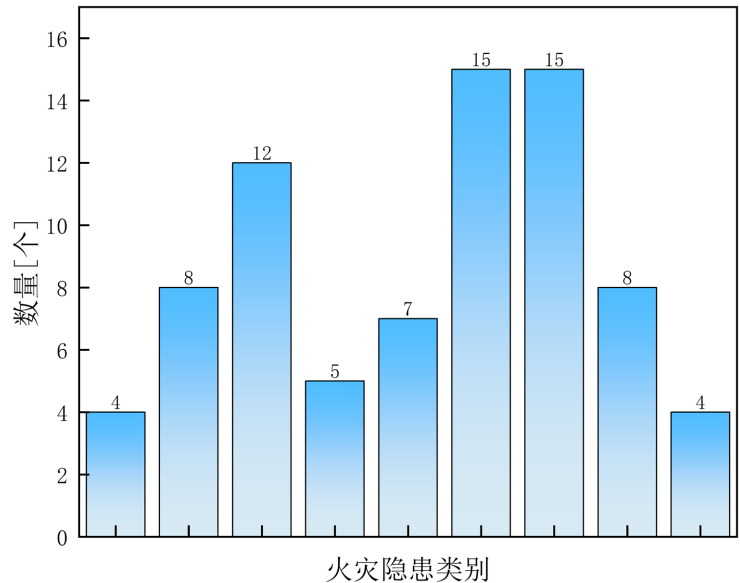


Figure 2. Distribution of fire hazard categories of substations in a certain region of China
图 2. 我国某区域变电站火灾隐患类别分布

- 1) 消防合法性不完善。早期投运的部分变电站未取得建设工程消防设计审核(备案)及消防验收(备案)等法定文件, 个别变电站的消防主管单位备案名称与实际使用名称不一致。
- 2) 检测维保资料缺失。部分变电站无法提供年度检测与维保报告, 个别维保单位出具的报告未加盖合格印章, 影响消防系统运行可靠性验证。
- 3) 报警系统故障处置滞后。110 kV 及 330 kV 变电站均为无人值守站点, 消防主控室内报警主机出现故障后, 无法实现及时有效的排查与处理。
- 4) 火灾隐患管理台账不完善。部分变电站未建立火灾隐患自查及整改记录台账, 缺乏闭环管理机制。
- 5) 排油充氮装置运行异常。调研发现, 4 座 330 kV 变电站的排油充氮装置处于改造或升级状态, 主变设备未设置替代防护措施; 部分 330 kV 变电站排油充氮系统低压压力表存在欠压问题。
- 6) 事故油池管理不到位。共发现 4 座 110 kV、6 座 330 kV 及 2 座 750 kV 变电站的事故油池标识不清晰, 难以直观确认有效容积; 另有 2 座 330 kV 变电站因扩建导致事故油池容积不足, 1 座 110 kV 变电站未设事故油池。
- 7) 卵石层铺设不规范。在 3 座 110 kV、9 座 330 kV 及 3 座 750 kV 变电站中, 主变区域卵石粒径不均、厚度不足, 部分区域存在淤泥堆积或杂草丛生, 个别主变下方甚至缺少卵石层, 影响防火隔热及排油效果。
- 8) 电池室通风系统设置不当。调研发现, 2 座 330 kV 及 3 座 750 kV 变电站的电池室排风口设置位置偏低, 难以有效排除顶部积聚的氢气; 另有 2 座 330 kV 及 1 座 750 kV 变电站的电池未设置于独立专用房间, 存在潜在爆炸风险。
- 9) 消防水源系统可靠性不足。多数 330 kV 变电站的消防水池及水泵房设置于地下, 通过垂直爬梯连通, 受潮湿环境影响, 部分现场已无法正常启动测试消防水泵, 严重影响系统可靠性。

整改对策

基于变电站实际调研情况并结合国内相关阶段规范条文,针对各级别变电站、换流站、开关站主要存在的消防共性问题,提出了以下整体性消防安全整改对策。

1) 参照当地消防救援总队发布的“关于印发《建设工程消防设计审查验收过渡期工作方案》的通知”文件要求,未取得消防主管部门消防合法性文书的变电站应进行审核与验收申请。若变电站名称发生更改,应及时到相关部门更新备案资料名称,保证备案名称和实际名称一致。

2) 选择专业技能较好的维保单位。现有部分维保单位对变电站消防系统较为陌生,要求维保单位需了解变电站消防设备设施原理及操作规程,能够完成变电站排油注氮、水喷淋系统等相关变电站消防的日常维保工作,维保单位应对消防设备设施进行联动测试,以保障建筑物消防系统的安全可靠性。

3) 完善无人职守 110 kV 及 330 kV 变电站远程数据监控管理。变电站内实时画面及中控室消防信号数据应统一上传至调控中心或运维班,保障相关人员能够远程掌握无人值守变电站实时现场画面和消防信号动态。

4) 建议增设变电站火灾隐患自查整改记录台账,台账要求明确现有变电站消防安全隐患问题,制定整改计划,明确整改措施、整改时限,并采取防范措施,确保整改期间变电站的安全。

5) 变电站内排油充氮装置正在改造或升级,应考虑替代性的防范或消防保护措施;排油充氮系统低压压力表欠压的,应及时进行排查整改。

6) 建议各变电站明确事故油池体积参数并更新标识牌,方便直观计算事故油池的有效容积。对现有事故油池有效容积偏小的油池,建议按需要适当扩大事故油池有效容积或采取其他符合要求的等效措施,对于暂无事故油池的变电站应及时改造补设。变电站事故油池有效容积应满足《火力发电厂与变电站设计防火标准》(GB50229-2019)第 11.3.5 条:地下变电站的变压器应设置能贮存最大一台变压器油量的事故贮油池。

7) 建议对现有变电站变内不满足要求的卵石进行更换,使其满足《火力发电厂与变电站设计防火标准》(GB50229-2019)第 6.7.9 贮油设施内应铺设卵石层,其厚度不应小于 250 mm,卵石直径宜为 50 mm~80 mm。建议日常防火巡查工作中增设贮油设施卵石巡查工作,保证卵石层无淤泥堆积,无杂草。

8) 对变电站内疏散标志、应急照明不符合规范处进行整改,整改后应满足《火力发电厂与变电站设计防火标准》(GB50229-2019)第 11.7.2 的相关要求:户内变电站、户外变电站的控制室、通信机房、配电装置室、消防水泵房和建筑疏散通道应设置应急照明;地下变电站的控制室、通信机房、配电装置室、变压器室、继电器室、消防水泵房、建筑疏散通道和楼梯间应设置应急照明;地下变电站的疏散通道和安全出口应设灯光疏散指示标志;人员疏散通道应急照明的地面最低水平照度不应低于 1.0 lx,楼梯间的地面最低水平照度不应低于 5.0 lx,继续工作应急照明应保证正常照明的照度;疏散通道上灯光疏散指示标志间距不应大于 20 m,高度宜安装在距地坪 1.0 m 以下处;疏散照明灯具应设置在出入口的顶部或侧墙面的上部。

4. FDS 火灾模拟分析研究

在对典型变电站进行实地调研的基础上,鉴于调研结果表明部分消防设备设施在布置与功能方面仍存在优化空间,本文以变压器起火作为最不利火灾工况假设,采用 FDS 进行真实场景下的火灾数值模拟分析,以揭示火灾发展过程中的温度分布与烟气流动特征,为后续的火灾风险评估与防控策略优化提供量化依据。

4.1. 变电站火灾风险分析

变电站各部件常见的可燃材料有绝缘油、纸板、绝缘成型件、层压木、环氧树脂、尼龙拉带等。助燃

物包括氧气等,换流变本体为密封结构,油箱内部不含氧化物,也不会分解氧化物,因此,为换流变火灾提供助燃物的是空气中的氧气。着火源包括高温、电弧、火花或明火。

根据燃烧三要素原理及换流变内部结构,产生换流变火灾条件可总结为两种情况。第一种情况为换流变绝缘油温度高于自燃点,外壳破损,绝缘油外泄发生自燃,产生火灾。除此之外,换流变绝缘油温度高于闪点,外壳破损,绝缘油外泄,同时在电弧火花的作用下,发生引燃也会产生火灾。换流变绝缘油要接触到空气需泄漏至换流变充油壳体外,充油壳体需出现破损口;同时,绝缘油在其温度高于自燃点时泄漏至换流变充油壳体外,方可产生火灾。根据绝缘油故障温升膨胀后导致充油壳体出现破损口的位置不同,换流变火灾隐患源可总结为5种,即网侧高压套管火灾、网侧高压套管与升高座连接处火灾、油箱本体火灾、阀侧套管火灾、阀侧套管与升高座连接处火灾。

4.2. 模拟参数设置

本研究首先利用 Prosim 搭建变电站物理模型,随后采用 FDS 对变压器主体火灾的典型场景进行数值模拟分析,以探讨火灾发展特性[4]。火灾假设条件设定如下。火灾增长系数取 0.178 kW/s^2 ,火灾规模设定为 11.57 MW ,并假定变压器防火保护系统处于有效工作状态。在 FDS 数值模拟中,soot 采样率设置为 0.015 ,环境初始温度为 25°C ,总模拟时长为 1800 s 。计算域采用规则立方网格划分,网格尺寸为 $0.5\text{ m} \times 0.5\text{ m} \times 0.5\text{ m}$,总网格数量为 $1,030,320$ 个,以保证对火灾区热流场及烟气扩散过程的精确描述[5]。

4.3. 火灾典型特征数据分析

下图 3 展示了典型时刻环流变压器主体火灾发展的温度分布切片,可清晰反映火源热羽流的上升、辐射热影响范围以及防护系统作用下的温度场演变特征。

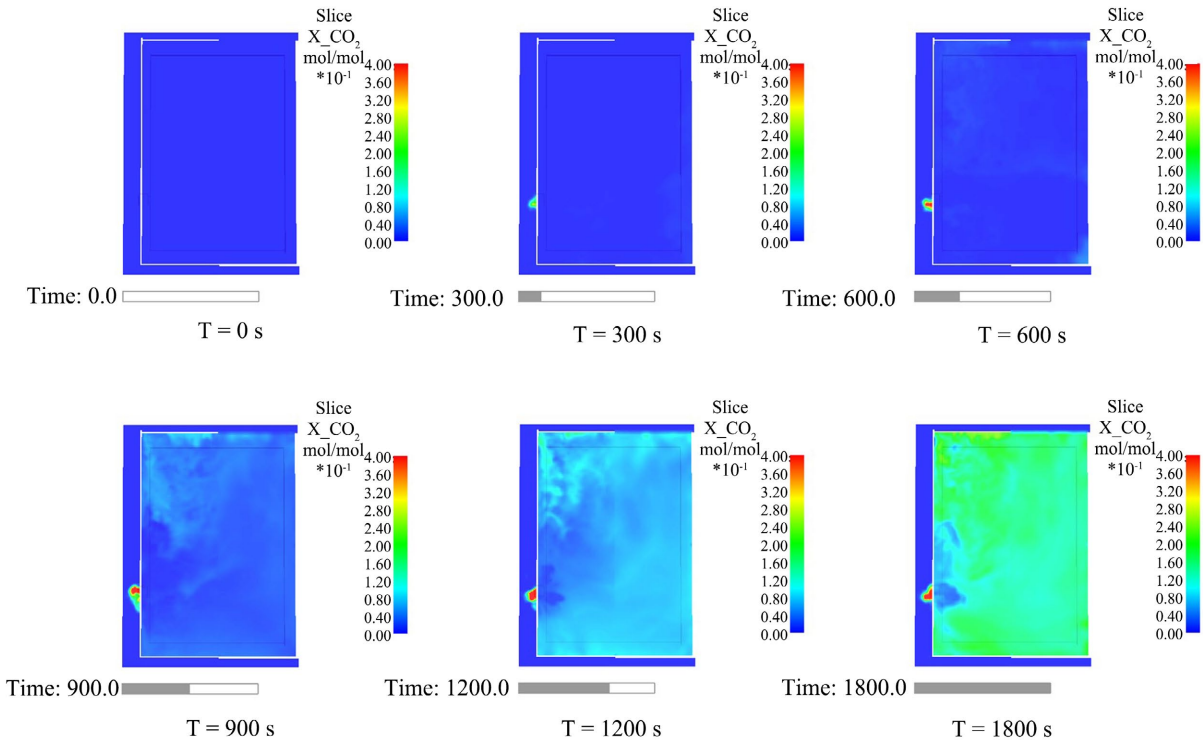


Figure 3. Slice diagram of temperature variation in substations under typical fire conditions
图 3. 变电站典型火灾工况下温度变化情况切片图

火灾初期,火源区整体温度逐渐升高,尚未形成明显的对流运动。随着燃烧强度的增加,在 $T = 300$ s 时,火源上方开始出现初步的热羽流现象,热空气携带烟气沿垂直方向上升,至 $T = 600$ s 火源区燃烧趋于稳定并进入快速增长阶段,形成明显的高温羽流通道,火源中心温度超过 450°C 。此时,热羽流穿透局部空间层流结构,迅速到达上部顶棚区域,促使热烟气在顶部空间形成温度反转层。当模拟时间达到 $T = 900$ s,火源温度进一步上升至 520°C 以上,热羽流在顶棚处产生射流效应,并沿水平方向向两侧扩散,导致火场顶部温度分布更加均匀但整体升高。模拟至 $T = 1800$ s 时,系统逐渐趋于稳定状态。结果显示,低层阀厅区域烟气温度约为 30°C ,而大堂上层烟气温度达到 47°C 左右。整体温度分布呈明显的垂向梯度,表明火源受防火保护系统作用后得到有效控制,热烟气主要滞留于上部空间,未对下部设备区形成显著的热辐射危害。

除温度分布外,模拟至 $T = 1800$ s 时气体组分与能见度亦表现出显著变化。结果表明,低端阀厅上方 17 m 处的 CO_2 浓度约为 0.03%, 22 m 处上升至 0.14% (见图 4), 在 25 m 处进一步增至 0.23%, 呈现随高度增加而累积的特征。与此同时, CO 浓度亦随高度上升逐步增大,分别为 30 ppm (17 m)、110 ppm (22 m) 与 160 ppm (25 m), 表明燃烧产物在上部空间的富集效应明显。能见度方面 7 m、12 m、17 m 等相对较低区域未出现显著变化,整体保持良好视距;而上部空间受烟气积聚影响,22 m 处能见度降至 18 m, 25 m 处进一步降低至 12 m。这一现象显示火灾烟气主要滞留于顶棚及其以上空间,防火保护系统对下层人员疏散及设备运行环境具有一定保护作用。

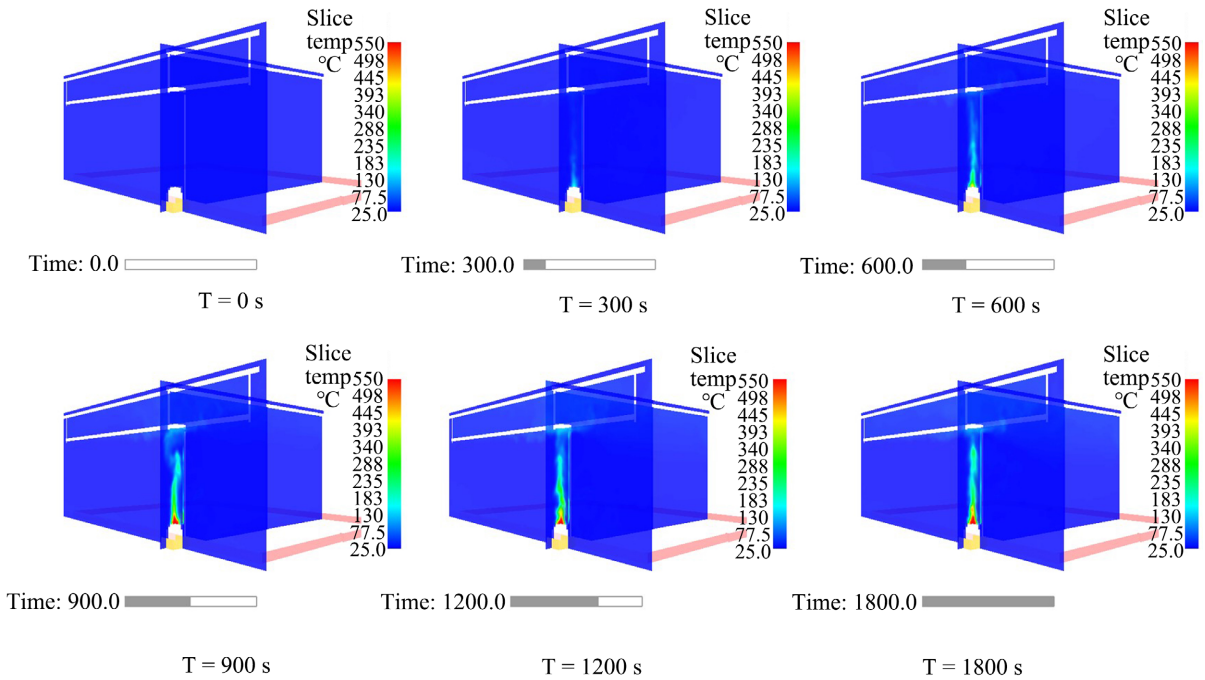


Figure 4. Slice diagram of CO_2 concentration variation at a horizontal height of 22 meters at typical moments
图 4. 水平高度 22 m 处 CO_2 在典型时刻浓度变化情况切片图

5. 结论

本研究基于实际调研结果,对变电站的火灾危险性进行了系统统计与比对分析,并提出了具有针对性的改进建议。同时,利用 FDS 对典型火灾工况进行了数值模拟与结果对比。综合研究结果,可得出以下结论:

1) 通过对比现行规范并结合现场调研,可较为全面地掌握变电站的实际消防安全状况,为风险识别与评估提供可靠依据,事故油池、和卵石层铺设不规范是目前调研存在最大的问题均为 15 次,其次是变电站火灾报警系统故障未能处理,为 12 次。

2) 应该将油浸变压器作为变电站(换流站)的消防重点。设有水喷雾消防的变电站,一定要完善消防给水系统,确保其处于可用状态,并应加强对其巡视、检查及维护,建立定期试运行的操作制度。设有泡沫喷雾系统的变电站,宜加大泡沫喷雾的强度,使其接近水喷雾的强度,确保其灭火的有效性。有条件的变电站,宜考虑将泡沫喷雾系统、充氮灭火系统更换为水喷雾灭火系统。无论泡沫喷雾还是水喷雾,应该设专用喷头保护变压器的高压套管升高座,这将有助于快速有效灭火。

3) 基于变电站起火的分析,利用 FDS 可以完成典型火灾情况下温度分布与烟气蔓延规律的研究。11.57 MW 的火灾规模下,在 1800 s 的模拟过程中,火源温度超过 520℃,低层阀厅区域烟气温度约为 30℃,而大堂上层烟气温度达到 47℃左右。

4) FDS 模拟结果揭示了火灾发展过程中显著的温度与烟气分层特征,热烟层高度稳定在距地面约 4~5 m 处,与现场调研中部分探测器报警延迟现象相一致。针对层高较大的变电站空间,建议采用多高度布置或温度-烟气复合型探测系统,以提升早期火灾探测效率。

基金项目

国家电网有限公司科技项目资助(项目编号: 5200-202456099A-1-1-ZN)。

参考文献

- [1] 李殿臣, 梁戈, 陈雪峰, 等. 变电站灭火系统应用探讨[J]. 消防科学与技术, 2011, 30(7): 612-615.
- [2] 王彬. 变电站消防安全管理问题与分析[J]. 电力系统装备, 2021(15): 180-181.
- [3] 贾奎. 浅谈地下变电站的消防设计[J]. 消防科学与技术, 2004, 23(B05): 2.
- [4] 何龙, 陈新, 王清彬, 等. 一起变电站手车断路器导致的故障事件分析及对策研究[J]. 电气技术与经济, 2025(8): 8-11.
- [5] Chen, H., Shu, Y., Luo, S., Zhang, C., Huang, X. and Jiang, C. (2025) Experimental and Simulation-Based Study on the Effectiveness of Column-Free Fire-Resistant Roller Shutters for Fire Separation at Underground Train Stations. *Tunneling and Underground Space Technology*, **159**, 106493. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2025.106493>