

# 电力变电系统的智能化设计

苏 和

呼和浩特供电公司 内蒙古 呼和浩特 010100

**摘要:** 在新型电力系统建设与“双碳”目标驱动下,传统变电系统难以满足电网数字化转型需求,智能化设计成为提升电力供应可靠性与运维效率的核心。本文以电力变电系统智能化设计为研究对象,先阐述系统工程、智能控制等理论基础及应用逻辑,构建“感知-网络-数据-应用-决策”五层设计体系并细化各层要点,聚焦关键技术集成应用,提出适配变电系统需求的智能化方案,为解决人工依赖度高、故障响应滞后等问题提供支撑,助力变电系统高效、安全、智能运行。

**关键词:** 电力变电系统;智能化设计;状态监测;智能运维

引言:在能源转型与数字化浪潮的双重驱动下,新型电力系统建设正加速推进,“双碳”目标对电网运行效率与可靠性提出更高要求。传统变电系统长期面临人工巡检效率低、故障响应滞后、设备状态感知片面等痛点,难以满足电网数字化转型需求。本文立足电力变电系统智能化转型需求,系统梳理系统工程、智能控制等理论基础,构建覆盖感知、传输、处理、应用与决策的全链条设计体系,重点突破智能传感、数字孪生、边缘计算等关键技术集成应用,为提升变电系统智能化水平提供理论支撑与实践路径,助力构建安全、高效、绿色的现代电网。

## 1 电力变电系统智能化设计的理论基础

电力变电系统智能化设计的理论体系是支撑技术与系统运行的核心根基,融合多学科理论协同发力。系统工程理论提供全局视角,以全生命周期理念统筹设计环节,使设备选型、功能模块与运维需求协同优化,规避单一模块与整体脱节问题。状态监测与故障诊断理论是智能化核心逻辑支撑,构建“数据采集-特征提取-故障识别”路径,依托设备运行参数动态变化精准定位隐患,摆脱传统人工巡检被动模式。智能控制理论为系统调节提供方法,模糊控制、神经网络等算法可依据电网负荷波动、设备状态变化,动态调整运行参数,实现电压、电流精准调控。信息安全理论筑牢保障防线,借助数据加密、访问权限管控等技术,防范网络攻击与数据泄露风险,确保智能化系统兼顾效率与安全<sup>[1]</sup>。这些理论相互衔接,共同搭建起电力变电系统智能化设计的理论框架,为后续工作提供依据。

## 2 电力变电系统智能化设计体系构建

### 2.1 设计体系的总体架构

电力变电系统智能化设计体系以“数据为核心,业

务为导向”,构建层次清晰的五层架构,各层级功能独立又通过数据交互提升整体效能。感知层采集设备与环境原始数据,网络层保障数据高效流转,数据层整合资源提供支撑,应用层实现运维控制等业务,决策层依托数据实现全局优化。架构遵循可靠性优先原则,核心供电模块采用冗余设计;兼顾技术适配性与经济性,结合电压等级、运行环境选择适宜方案,避免成本浪费。各层级通过标准化接口互通,技术升级不影响架构稳定,为后续扩展预留空间,形成稳定且灵活的总体架构。

### 2.2 感知层设计:全面状态感知能力构建

感知层是电力变电系统智能化的“神经末梢”,其设计核心是实现了对设备、环境与电网运行状态的全面、精准感知。感知对象涵盖三类核心参数:设备状态参数包括变压器油温、GIS设备气压、断路器机械特性等关键指标;环境参数涉及变电站内温度、湿度、风速及气体浓度;电网运行参数包含电压、电流、功率因数等实时数据。传感设备选型需匹配监测需求,变压器状态监测选用光纤传感设备以耐受高温环境,环境监测采用无线传感节点降低布线成本,电网参数监测则采用高精度互感器保障数据准确性。设备布置遵循“无死角覆盖、关键区域加密”原则,在变压器、断路器等核心设备关键部位多维度布置传感器。数据采集环节采用100Hz以上采样频率保障实时性,同时嵌入异常数据过滤算法,通过阈值判断与趋势分析剔除干扰数据,经标准化处理后传输至上层系统,为后续分析提供高质量数据支撑。

### 2.3 网络层设计:高效数据传输通道搭建

网络层是感知层与数据层的关键纽带,以构建低延迟、高可靠、大带宽传输通道为目标。采用“5G+工业以太网”融合模式,5G以 $\leq 20\text{ms}$ 低延迟、广连接特性支撑分散传感节点传输;工业以太网承担站内核心设备与服

务器间高速交互,保障海量数据稳定传输。传输协议差异化设计,实时控制指令用IEC 61850协议保可靠,非实时数据用MQTT协议降开销。核心链路设双链路备份,主链路故障时50ms内自动切换至备用链路。部署流量控制机制,按优先级分配带宽,确保故障预警等核心数据优先传输,为系统快速响应护航。

#### 2.4 数据层设计:数据资源整合与管理

数据层是电力变电系统智能化的“数据中枢”,通过整合多源数据并建立规范管理机制,为上层应用提供稳定、高效的数据服务。数据库设计采用“三类库协同”模式,实时数据库采用InfluxDB存储秒级采样的设备运行数据,保障状态监测的实时性需求;历史数据库选用MySQL存储设备档案、运维记录等结构化数据,支持长期追溯与统计分析;知识库则整合故障案例、设备手册、行业标准等非结构化数据,为故障诊断与决策提供参考。数据融合环节采用多源数据关联算法,将同一设备的传感数据、检修记录、历史故障信息进行关联整合,构建完整的设备数据画像。存储设计采用分布式架构,将数据分散存储于多个节点,通过数据副本技术保障数据安全性,同时支持存储容量的横向扩展。数据安全设计贯穿全流程,传输过程采用AES加密算法,存储环节实施访问权限分级管控,仅授权人员可操作核心数据,定期进行数据备份与恢复演练,防范数据丢失风险。

#### 2.5 应用层设计:核心业务功能实现

应用层是智能化设计落地的核心载体,聚焦变电系统核心业务需求,构建功能明确、操作便捷的业务模块。设备状态监测模块实时展示变压器、GIS等核心设备的运行参数,通过可视化界面呈现数据变化趋势,当参数超出阈值时自动触发声光报警,同步推送异常信息至运维终端。故障诊断与预警模块基于设备数据特征,结合知识库中的故障案例,通过算法匹配实现故障类型识别与原因分析,提前预测潜在隐患并给出处理建议。智能控制与调节模块联动电网运行数据与设备状态,自动调整变压器分接头、无功补偿装置等设备运行状态,保障电压稳定与功率因数达标。智能运维管理模块实现运维流程的全数字化,自动生成巡检计划、记录检修过程、管理设备档案,支持运维人员移动端接收任务与反馈结果,大幅提升运维工作效率。各模块通过数据共享实现业务协同,例如故障诊断结果可直接触发运维任务生成,形成“监测-诊断-运维”的闭环管理。

#### 2.6 决策层设计:全局优化决策支持

决策层作为电力变电系统智能化的“大脑”,其核心功能是基于多源数据分析实现全局优化决策,为电网

安全稳定运行提供支撑。决策模型构建以人工智能算法为核心,融合BP神经网络与支持向量机算法,通过训练历史运行数据、故障案例与电网调度需求,建立多目标优化模型,实现供电可靠性、运行经济性与能耗控制的平衡。电网协同调度接口设计遵循电网调度标准化规范,实现与区域电网调度中心的数据互通,及时接收调度指令并反馈站内运行状态,保障变电系统与电网整体运行节奏同步。可视化决策平台采用三维建模与数据可视化技术,直观呈现站内设备布局、运行状态与电网潮流分布,支持运维人员通过拖拽、缩放等操作查看细节数据。当面临电网故障、负荷突变等突发情况时,平台可快速模拟不同决策方案的实施效果,为管理人员提供最优决策建议,提升应急处置的科学性与高效性<sup>[9]</sup>。

### 3 电力变电系统智能化设计的关键技术集成

#### 3.1 智能传感与状态监测技术集成

智能传感与状态监测技术的集成,是实现变电系统状态感知的核心支撑,其关键在于通过多技术融合提升监测精度与可靠性。核心技术选型需结合监测对象特性,变压器绕组温度监测采用光纤传感技术,利用其抗电磁干扰、耐高温的优势保障数据准确;GIS设备局部放电监测选用超声波与特高频传感技术,实现不同类型缺陷的精准识别;断路器机械特性监测则采用振动传感技术,捕捉操作过程中的机械振动特征。技术集成采用多传感器数据融合策略,通过卡尔曼滤波算法对同一监测参数的多源数据进行融合处理,剔除随机干扰与测量误差,提升数据可信度。以变压器状态监测为例,整合光纤感应的温度数据、油中溶解气体感应的成分数据与振动感应的运行数据,构建综合状态评估模型,实现从单一参数监测向多维度状态评估的转变,为设备故障预警与寿命预测提供精准数据支撑。

#### 3.2 数字孪生技术在设计中的应用

数字孪生技术在变电系统智能化设计中的应用,实现了物理实体与虚拟模型的实时映射,为设计优化与运维升级提供全新路径。数字孪生模型构建遵循“高精度、全要素”原则,基于三维激光扫描技术获取站内设备、建筑结构的几何数据,结合设备铭牌参数、设计图纸构建包含几何信息、物理属性与运行规则的虚拟模型。模型与物理实体的映射通过实时数据传输实现,感知层采集的设备运行参数、环境数据同步至虚拟模型,使虚拟模型能够动态模拟物理设备的运行状态与性能变化。在设计阶段,利用虚拟模型进行仿真分析,模拟不同运行工况下设备的受力情况、热量分布与电网潮流变化,提前发现设计缺陷并优化方案;在运维阶段,通过

虚拟模型进行故障模拟与检修推演，制定最优检修流程，避免盲目检修导致的停电损失，大幅提升运维工作的针对性与高效性。

### 3.3 人工智能算法集成设计

人工智能算法的集成设计，是提升变电系统智能化水平的核心技术支撑，其核心在于根据不同业务需求选择适配算法并实现协同运行。故障诊断环节集成BP神经网络与支持向量机算法，BP神经网络负责提取设备运行数据的深层特征，支持向量机则利用其小样本学习优势实现故障类型精准分类，通过两者结合提升小概率故障的识别能力。智能控制环节采用模糊PID控制算法，将模糊控制的非线性处理能力与PID控制的精准调节优势相结合，当电网负荷波动时，算法可自动调整PID参数，实现电压、电流的平稳控制<sup>[4]</sup>。算法优化通过样本扩充与参数调优实现，利用历史运行数据与模拟故障数据构建大规模训练样本集，采用梯度下降算法优化神经网络的权重参数，提升算法收敛速度与识别精度。

### 3.4 边缘计算与云计算协同设计

边缘计算与云计算的协同设计，解决了变电系统数据处理实时性与大规模分析需求之间的矛盾，构建高效的计算资源调度体系。计算任务分配基于业务需求差异化设计，实时性要求高的业务如设备故障预警、实时控制调节，由边缘计算节点本地处理，边缘节点部署于变电站内，可在50ms内完成数据处理与指令下发，避免数据传输至云端导致的延迟；非实时性业务如设备寿命预测、运维数据分析，由云端平台集中处理，利用云端强大的计算能力实现大规模数据的深度分析。协同架构采用标准化数据交互协议，边缘节点与云端平台通过5G网络实现数据同步，边缘节点将处理后的关键数据上传至云端，云端则将算法模型更新、调度指令下发至边缘节点。节能优化设计是协同架构的重要亮点，通过动态监测边缘节点与云端的计算负荷，智能调整任务分配方案，当边缘节点负荷较低时增加本地处理任务，减少数据传输能耗，实现计算资源的高效与节能利用。

### 3.5 安全防护技术集成设计

安全防护技术的集成设计，是保障变电系统智能化运行的底线要求，通过构建“设备-网络-数据”全维度防护体系防范安全风险。设备安全设计聚焦物理安全与运行安全，采用防侵入传感器实时监测设备柜门开关状态，当出现非法开启时立即触发报警；在设备控制系统中嵌入防误操作逻辑，避免人员误操作导致的设备故障。网络安全设计构建多层防护体系，在站内网络与外部网络之间部署防火墙与入侵检测系统，阻断非法访问与网络攻击；采用网络分段技术将设备控制网、办公网进行隔离，防止一处网络故障扩散至核心控制区域。数据安全设计贯穿全生命周期，数据采集阶段采用设备身份认证技术，确保数据来源可信；传输阶段采用VPN加密通道与AES加密算法，防止数据被窃取或篡改；存储阶段实施数据分类分级管理，核心运行数据采用加密存储，定期进行数据备份与恢复测试，确保在极端情况下数据不丢失、系统可恢复。

### 结束语

电力变电系统智能化设计是电网数字化转型的必然之选，能解决传统系统固有弊端。本文提出的五层设计体系与关键技术集成方案，为智能化设计指明路径：感知层全面采数，网络层高效传数，数据层夯实基础，应用层落地功能，决策层全局优化，各环节协同构建完整体系。未来要深化人工智能与数字孪生融合，优化算法提升自适应力，完善安全防护应对新风险，推动变电系统智能化迈向更高水平。

### 参考文献

- [1]赵心亮. 电力变电系统的智能化设计[J]. 通信电源技术,2023,40(13):13-15.
- [2]刘昊,丁岩,张泽银. 智能化变电设备状态实时感知微型化监测系统设计[J]. 电器工业,2024(9):27-31,46.
- [3]刘庆. 发电厂变压器与智能配电网协同运行的关键技术研究与应用[J]. 通信电源技术,2024,41(3):25-27.
- [4]扈裕雷,莫欣兰. 电厂智能化继电保护系统的设计与优化研究[J]. 中文科技期刊数据库(全文版)工程技术, 2023(10):0050-0053.