

基于5G通信的远程电能计量系统实时监测与控制

王登越 魏敏捷

内蒙古电力(集团)有限责任公司巴彦淖尔供电分公司 内蒙古 巴彦淖尔 015000

摘要: 本文聚焦基于5G通信的远程电能计量系统实时监测与控制。阐述“云-边-端”三级架构及关键技术选型,分析高频数据采集预处理、5G传输可靠性增强、边缘侧实时分析等技术。探讨实时监测机制、远程控制策略,如控制指令下发、数字孪生驱动闭环控制及多设备协同控制协议,为远程电能计量系统提供全面技术支持与解决方案。

关键词: 5G通信; 远程电能计量; 实时监测

引言: 随着电力行业对智能化、精准化监测控制的需求提升,传统电能计量系统面临挑战。5G通信凭借高速度、低时延、海量连接等特性,为远程电能计量系统带来新契机。本文旨在深入研究基于5G通信的远程电能计量系统,构建高效实时监测与控制体系,提升电能计量准确性、实时性与可靠性,推动电力行业智能化发展。

1 5G 远程电能计量系统架构设计

1.1 系统总体架构

5G远程电能计量系统总体架构采用“云-边-端”三级分布式架构,实现电能数据从采集到应用的全链路高效协同。终端层部署智能计量终端、传感器阵列及边缘网关,支持电压、电流、功率因数等多维度电能参数采集,终端设备具备5G双模通信能力,可自适应网络环境切换;边缘层部署边缘计算节点,承担数据预处理、实时分析及本地控制指令生成等任务,有效降低云端传输压力,满足毫秒级响应需求;云端层构建分布式云平台,集成数据存储、大数据分析、可视化管理及决策支持模块,采用微服务架构实现功能模块化部署,支持千万级终端接入与海量数据并发处理^[1]。架构设计遵循开放性、可扩展性原则,通过标准化接口实现与电力营销、调度管理等现有系统的无缝对接,同时具备设备接入管理、安全认证、权限控制等保障机制,确保系统稳定可靠运行,为远程电能计量提供全场景技术支持。

1.2 关键技术选型

关键技术选型围绕5G通信、边缘计算、智能传感及安全防护四大核心维度展开。通信技术选用5GSA独立组网模式,依托eMBB(增强移动宽带)、uRLLC(超高可靠超低时延通信)特性,保障数据传输速率达10Gbps以上,端到端时延控制在20ms以内,同时支持海量设备接入的mMTC场景需求;边缘计算技术采用轻量化边缘节点部署,集成边缘AI推理框架,支持实时数据过滤、特征提取及异常检测,算力配置满足本地模型推理需求,

降低对云端依赖;计量传感技术选用高精度霍尔传感器与ADC模数转换芯片,计量误差控制在 ± 0.2 级以内,支持1Hz-1kHz高频数据采集,适配不同电压等级电网场景;安全技术采用端到端加密传输协议,结合设备身份认证、数据脱敏及访问权限管控机制,抵御数据篡改、窃听等安全风险,同时引入区块链技术实现计量数据存证,保障数据不可篡改与可追溯,为远程计量的准确性与安全性提供技术保障。

2 基于5G的实时监测与数据传输优化

2.1 高频数据采集与预处理

高频数据采集与预处理是保障实时监测精度的核心环节。采集层面采用分布式采集架构,终端设备按1kHz采样频率获取电压、电流、功率等核心参数,通过多通道同步采集技术确保各参数时间戳一致性,采样数据经本地缓存后按帧格式封装,帧结构包含设备标识、时间戳、数据类型及校验码等字段,保障数据完整性;预处理环节在边缘节点部署多级数据处理流程,首先通过异常值检测算法(如 3σ 准则)剔除采集过程中的脉冲干扰与无效数据,再采用数字滤波技术(如卡尔曼滤波)平滑数据波动,降低噪声影响,随后通过数据压缩算法(如LZ77)对冗余数据进行压缩,压缩比达5:1以上,减少5G传输带宽占用,最后提取数据特征参数(如峰值、有效值、谐波含量),形成结构化数据用于后续传输与分析。预处理过程通过硬件加速模块提升处理效率,确保单帧数据处理时延不超过5ms,为实时监测提供高质量数据输入。

2.2 5G传输可靠性增强技术

针对电能计量数据传输的高可靠需求,基于5G网络特性设计多层次传输可靠性增强技术方案。网络层面采用网络切片技术,为电能计量业务分配独立的专用切片,隔离其他业务干扰,保障传输带宽与时延稳定性,切片带宽按需动态调整,满足高峰期数据传输需求;传

输协议层面优化UDP协议,引入重传机制与拥塞控制算法,通过超时重传与选择性确认机制解决5G网络中的数据丢包问题,结合自适应码率调整技术,根据网络信道质量动态调整数据传输速率,避免带宽浪费与传输阻塞;数据层面采用前向纠错编码(FEC)技术,在发送端对数据进行编码冗余处理,接收端通过解码恢复丢失数据,纠错能力达纠正3个错误比特/码组,同时采用数据分片传输策略,将大数据包拆分为小分片独立传输,降低单包丢失对整体数据的影响;终端层面采用双链路备份传输机制,终端设备同时接入两个不同基站的5G信号,通过链路质量评估算法实时监测链路状态,当主链路质量低于阈值时自动切换至备用链路,切换时延不超过10ms,确保传输链路连续性,整体传输可靠性提升至99.99%以上。

2.3 边缘侧实时分析模型

边缘侧实时分析模型聚焦本地快速响应需求,构建轻量化、高精度的AI分析模型。模型架构采用深度学习与传统算法融合方案,核心模型选用轻量化CNN-LSTM混合模型,通过CNN网络提取数据时空特征,LSTM网络捕捉数据时序依赖关系,模型经迁移学习训练优化,参数量控制在100万以内,适配边缘节点有限算力资源;模型训练过程基于历史计量数据与异常场景样本,涵盖过载、短路、窃电等典型异常类型,通过数据增强技术扩充样本量,提升模型泛化能力,模型推理时延控制在10ms以内,支持实时连续推理;分析流程采用流式推理模式,边缘节点接收预处理后的结构化数据后,实时输入模型进行推理,输出异常概率与异常类型,当异常概率超过设定阈值时触发本地告警,并将告警信息与关键数据优先上传至云端,同时模型支持在线增量学习,通过接收云端反馈的标注数据持续优化模型参数^[2]。

3 5G 通信的远程电能计量系统实时监测机制与关键技术

3.1 实时监测的核心指标与需求

实时监测的核心指标与需求围绕准确性、实时性、全面性及可操作性四大维度构建。准确性指标包括计量数据误差($\leq \pm 0.2$ 级)、异常检测准确率($\geq 98\%$)、数据传输正确率($\geq 99.99\%$),确保监测数据能够真实反映电网运行状态;实时性指标要求数据采集时延($\leq 1\text{ms}$)、传输时延($\leq 20\text{ms}$)、分析时延($\leq 10\text{ms}$)、告警响应时延($\leq 50\text{ms}$),满足电网故障快速处置与实时调控需求;全面性指标涵盖核心监测参数(电压、电流、功率、电能)、辅助监测参数(谐波含量、功率因数、设备温度)及设备状态参数(电池电

量、通信质量、运行状态),实现多维度、全场景监测覆盖;可操作性需求包括监测阈值可配置、监测规则可定制、告警方式可选择(短信、平台推送、声光告警),支持用户根据实际场景灵活调整监测策略,同时要求监测数据支持历史回溯与趋势分析,为电网运维与优化提供数据支撑,核心指标与需求的明确为实时监测机制设计提供量化依据。

3.2 5G赋能的实时数据采集机制

5G赋能的实时数据采集机制通过“终端-网络-边缘”协同实现高效数据采集。终端侧采用智能唤醒与自适应采集策略,终端设备根据电网运行状态动态调整采集频率,正常运行时按100Hz低频采集,负载波动较大或出现异常征兆时自动切换至1kHz高频采集,降低无效能耗与数据冗余;网络侧利用5G低时延特性,采用“终端直连边缘”传输模式,跳过核心网转发环节,缩短传输路径,端到端采集-传输总时延控制在25ms以内,同时通过5G网络的广覆盖特性,实现偏远地区与复杂环境下的设备接入,解决传统通信方式覆盖不足的问题^[3]。协同机制层面建立采集任务调度中心,根据电网运行负荷与监测重点,动态分配采集任务优先级,重要监测点数据赋予高优先级,优先传输与处理,非重要数据采用批量传输方式,平衡实时性与带宽资源。

3.3 基于边缘计算的实时异常监测技术

基于边缘计算的实时异常监测技术构建“本地快速检测+云端深度验证”的双层监测体系。边缘侧部署实时异常监测引擎,集成多维度异常检测算法,针对不同异常类型设计专属检测模型:过载异常通过实时功率与额定功率阈值比对检测,短路异常通过电流突变特征识别,窃电异常通过负荷曲线比对与电量平衡分析检测,谐波异常通过傅里叶变换提取谐波含量判断;监测引擎采用流式处理模式,对预处理后的实时数据进行连续监测,当检测到异常时,立即触发本地告警,并记录异常发生时间、异常参数及现场数据快照,同时将异常信息压缩后优先上传至云端;云端侧构建深度验证模型,结合历史数据、电网拓扑结构及其他关联设备数据,对边缘侧上报的异常信息进行交叉验证,排除误告警情况,提升异常识别准确性,验证结果反馈至边缘节点,用于优化本地监测阈值与算法参数,形成“检测-验证-优化”的闭环机制,边缘侧异常检测响应时延 $\leq 30\text{ms}$,云端验证时延 $\leq 100\text{ms}$,整体异常监测准确率 $\geq 98.5\%$ 。

4 远程控制策略与闭环优化

4.1 控制指令下发机制

控制指令下发机制设计遵循“安全、可靠、高效”

原则,构建“云端决策-边缘转发-终端执行”的三级指令传输体系。云端决策层根据监测数据与分析结果,结合预设控制策略生成控制指令,指令内容包含目标设备标识、控制类型(如负荷调节、开关操作)、控制参数、执行时限及校验码等信息,指令生成后经加密处理(采用AES-256加密算法)确保传输安全;边缘转发层承担指令缓存与转发功能,接收云端指令后进行完整性校验与权限验证,验证通过后缓存指令并向终端下发,同时实时监测指令传输状态,若终端未确认接收则触发重发机制,重发次数最多3次,每次间隔500ms,确保指令送达;终端执行层接收指令后,首先解密验证指令合法性,再根据指令类型执行相应操作,操作过程中实时反馈执行状态(如执行中、执行成功、执行失败),执行结果经加密后上传至边缘节点与云端,形成指令下发-执行-反馈的完整链路。机制设计同时支持紧急控制指令优先下发,紧急指令传输优先级高于普通数据,确保故障处置等紧急场景下的快速响应,指令下发端到端时延 $\leq 50\text{ms}$,执行反馈时延 $\leq 30\text{ms}$ 。

4.2 数字孪生驱动的闭环控制

数字孪生驱动的闭环控制构建“物理实体-数字孪生-控制决策”的协同控制体系,实现精准化、自适应远程控制。首先通过高精度建模技术构建电网与设备的数字孪生模型,模型涵盖设备物理参数、拓扑连接关系、运行特性及环境因素,通过实时采集的数据持续更新孪生模型状态,确保虚拟模型与物理实体的高度同步,同步误差控制在5%以内;基于孪生模型进行仿真分析,模拟不同控制策略下的电网运行状态,预测控制效果与潜在风险,控制决策层根据孪生模型仿真结果与实时监测数据,优化生成控制指令,指令下发至物理终端执行后,将执行结果反馈至孪生模型,模型根据实际运行数据修正仿真参数,优化控制算法,形成“监测-仿真-决策-执行-反馈”的闭环控制流程。闭环控制支持自适应调整,根据电网运行状态变化(如负荷波动、设备故障)动态优化控制参数,提升控制精度与鲁棒性。

4.3 多设备协同控制协议

为实现多设备协同工作的有序性与协调性,设计基于5G的多设备协同控制协议(MDCCP)。协议采用分层架构,分为应用层、控制层与传输层:应用层定义协同控制场景(如区域负荷均衡、故障隔离协同)、设备角色(主控制设备、从控制设备)及控制指令格式,支持控制策略的灵活配置;控制层设计协同调度算法,采用分布式协同决策机制,主控制设备根据全局运行状态分配控制任务,从控制设备按任务要求执行操作,同时通过协商机制解决设备间控制冲突,确保控制动作一致性,传输层基于5G网络切片实现协议数据的优先传输,采用面向连接的传输模式,保障数据传输的可靠性与顺序性,协议数据帧包含协同标识、设备角色、控制指令、状态反馈及校验字段,支持帧分片与重组,适配不同长度的控制数据^[4]。协议同时支持设备即插即用,新接入设备通过协议自动完成身份注册与角色分配,快速融入协同控制体系,协议兼容性强,可适配不同厂商、不同类型的电能计量与控制设备,为多设备协同控制提供标准化通信支撑。

结束语

基于5G通信的远程电能计量系统实时监测与控制研究,通过架构设计、关键技术突破及控制策略优化,实现了高效数据采集、可靠传输、精准监测与智能控制。该系统提升了电能计量水平与电网运行可靠性,为电力行业数字化转型提供有力支撑。未来,随着技术发展,系统将不断完善,为构建智能电网发挥更大作用。

参考文献

- [1]朱丽萍,刘子菡.电能计量信息采集中的通信技术分析[J].集成电路应用,2023,40(9):78-79.
- [2]吴瑶.电能计量信息采集中的通信技术分析[J].集成电路应用,2023,40(7):402-403.
- [3]王翔平.电能计量采集运维和故障处理分析[J].现代工业经济和信化,2022,12(10):223-224.
- [4]程云泽.电力系统中远程电能计量系统的安全可靠性研究[J].消费电子,2025(6):137-139.