

基于边缘计算的分布式能源电气自动化管理系统设计

Design of Distributed Energy Electrical Automation Management System Based on Edge Computing

山东嘉富能源科技有限公司 段海仑, 刘阳

摘要: 分布式能源系统因其靠近用户端、灵活可控的特点在现代电力体系中占据重要地位。传统控制方法在实时响应和稳定性方面存在不足, 难以满足复杂能源场景的管理需求。边缘计算在数据源附近进行处理, 为分布式能源的智能化控制提供了新方向。本文设计了一种基于边缘计算的分布式能源电气自动化管理系统, 并针对边缘计算节点的部署方案、分布式能源数据获取方法、电气自动化控制策略及系统安全容错机制进行了全面研究。实验结果表明, 本文方法显著提升了复杂场景下的实时性与稳定性, 充分验证了边缘计算在分布式能源管理中的应用价值, 为未来智能化能源系统的开发与部署奠定了技术基础。

关键词: 分布式能源; 边缘计算; 电气自动化; 能源管理

Abstract: The distributed energy system occupies an important position in the modern power system because of its proximity to the user, flexibility and controllability. Traditional control methods have shortcomings in real-time response and stability, making it difficult to meet the management needs of complex energy scenarios. Edge computing processes data near the data source, providing a new direction for intelligent control of distributed energy sources. In this paper, a distributed energy electrical automation management system based on edge computing is designed, and the deployment scheme of edge computing nodes, distributed energy data acquisition method, electrical automation control strategy and system security fault tolerance mechanism are comprehensively studied. The experimental results show that the proposed method significantly improves the real-time performance and stability in complex scenarios, fully verifies the application value of edge computing in distributed energy management, and lays a technical foundation for the development and deployment of future intelligent energy systems.

Key words: Distributed energy; Edge computing; Electrical automation; Energy management

随着全球能源结构的转型, 分布式能源系统在现代电力系统中占据了重要地位。分布式能源具有灵活性和可再生性, 但也带来能源管理和调度的复杂性。电气自动化管理系统在分布式能源的高效运行中发挥着关键作用^[1]。边缘计算作为新兴的计算架构, 它将数据处理推向网络的边缘节点, 显著降低了延迟, 减轻了中心服务器负担, 并提升了系统响应速度和可靠性。将边缘计算技术与分布式能源电气自动化管理系统相结合, 可实现更加实时、智能和高效的能源管理。本文提出了一种基于边缘计算的分布式能源电气自动化管理系统设计方案, 优化了系统架构, 实现了对分布式能源的智能控制和调度。

1 基于边缘计算的分布式能源电气自动化管理系统设计

1.1 边缘计算节点部署

边缘计算节点的部署基于分层次、区域化的设计原则, 依据分布式能源设备的分布密度和数据采集需求划定部署区域。如图1所示, 主节点作为区域的核心计算单元, 与从节点建立通信关系, 从节点则作为数据中继单元与区域内的传感器实时连接。主节点控制若干从节点, 从节点根据区域内传感器的分布情况均匀布置, 以形成稳定的网络拓扑结构^[2]。主节点配置高性能处理器和大容量存储模块, 用于处理数据聚合和复杂计算任务。从节点采用模块化设计, 加载标准化

通信接口，支持传感器数据的快速传输与初步处理。节点之间的通信协议选用轻量化标准，减少通信开销并适应低带宽特性。数据流向自下而上分阶段处理，传感器采集的环境和设备运行数据通过无线链路传输至从节点，从节点完成数据去噪与格式化后上传至主节点。主节点接收多个从节点的数据流，并对其进行进一步处理与聚合^[3]。

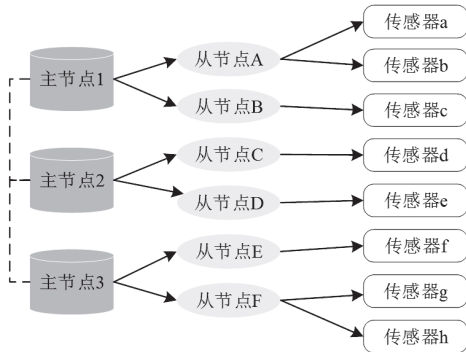


图1 边缘计算节点的网络拓扑图

在节点部署过程中，采用动态调整策略，根据传感器密集程度加密从节点的部署密度。在传感器密集区域，增加从节点数量减少数据传输路径长度，提升数据传输效率。主节点与从节点之间采用分布式控制策略，从节点在完成本地化处理后，将关键数据上传至主节点，实现分布式处理与集中管理的协同。为加强节点间的协作，主节点之间加载双向通信功能，主节点根据实时接收的数据动态调整任务分配策略并同步关键信息。主节点和从节点之间的任务分配机制基于节点负载状态和网络延迟。节点布设采用分布式均衡原则，根据区域内传感器的分布特征和设备的能量负荷特性优化节点数量与位置。从节点在特定条件下利用健康状态信号定期向主节点报告运行情况，主节点基于信号动态调整其控制策略。传感器的数据传输至从节点后采用时间戳对齐机制，以减小因通信延迟导致的偏差。主节点处理聚合数据后，将任务指令逐级下发至各从节点执行。

1.2 分布式能源数据获取

传感器依据设备类型和运行状态被分配不同的数据采集周期和精度要求，形成动态采样策略。对于实时性要求较高的关键变量，采用高频采样方式，采样频率由自适应算法调整以适应运行状态的变化。其他非关键变

量采用低频采样策略以减轻系统负载。在数据采集过程中，数据采用统一的JSON结构进行编码，以简化数据存储与传输^[4]。为提升采集数据的完整性和准确性，设计基于多变量线性回归的噪声消除算法，其数学模型为式（1）：

$$\hat{y} = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i x_i + \varepsilon \quad (1)$$

式中 $\hat{y}$ 为估计值， β_0 为偏置项， β_i 为变量的回归系数， x_i 为输入变量， ε 为随机误差项。训练模型对多维数据进行拟合，从而剔除噪声影响并重建关键变量数据。数据采集模块中加入时间戳对齐机制，传感器数据通过边缘节点缓存后，采用动态窗口对齐算法减少通信延迟带来的数据偏差。数据传输采用分离式策略，针对大数据量的设备状态记录和小数据量的实时告警数据进行区分处理。大数据记录存储于本地数据库，实时告警数据直接上传至主节点。对于异常数据的识别，采集模块设计监测模型以快速检测并标记偏差较大的数据样本，同时记录异常样本的具体时间与相关参数，便于进一步分析。

1.3 电气自动化控制策略

构建分布式、实时、高效的控制架构，结合边缘节点的实时计算能力实现分布式能源设备的精细化管理。在数据处理阶段，边缘计算节点接收传感器采集的数据并进行实时处理。每个边缘节点加载状态估计模块，基于卡尔曼滤波模型估计设备的运行状态，模型形式为式（2）：

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{x}}(k|k) &= \hat{\mathbf{x}}(k|k-1) + \mathbf{K}(k)[\mathbf{y}(k) - \mathbf{H}\hat{\mathbf{x}}(k|k-1)] \\ \hat{\mathbf{x}}(k+1|k) &= \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}}(k|k) + \mathbf{B}\mathbf{u}(k) \end{aligned} \quad (2)$$

式中 $\hat{\mathbf{x}}(k|k)$ 是状态估计值， $\mathbf{u}(k)$ 为k时刻的输入， $\mathbf{K}(k)$ 是卡尔曼增益， $\mathbf{A}$ 和 $\mathbf{B}$ 分别为状态转移矩阵和输入影响矩阵， $\mathbf{H}$ 为观测矩阵， $\mathbf{y}(k)$ 是观测值。状态估计完成后，数据被实时传递至控制优化模块。在控制优化阶段，每个边缘节点执行基于模型预测控制（MPC）的局部优化计算^[5]。以分布式能源设备的实时状态为输入，构建目标函数 J 如式（3）：

$$J = \sum_{k=0}^N [\mathbf{P}\mathbf{P}_{gen}(k) - \mathbf{P}_{load}(k)\mathbf{P}^2 + \alpha\mathbf{P}\mathbf{u}(k)\mathbf{P}^2] \quad (3)$$

式中 $\mathbf{P}_{gen}(k)$ 为设备发电功率， $\mathbf{P}_{load}(k)$ 为负荷需求， $\mathbf{u}(k)$ 为k时刻的输入， α 为控制成本权重。通过迭代求

解,计算出优化的控制输入序列,将局部控制方案与主节点进行数据同步,完成全局协调。在指令执行阶段,边缘节点根据优化结果下发控制指令,调整分布式能源设备的运行参数。控制指令分为实时动态调整指令和周期性优化指令两种类型,实时动态指令用于快速响应负荷波动,周期性优化指令针对长期运行趋势调整参数。每个节点加载事件驱动机制,根据采集到的异常状态事件触发动态调整,并实时记录控制效果,将误差反馈至优化模型中进行迭代。

1.4 系统安全容错机制

为应对分布式能源管理中潜在的风险,设计多层次的响应与防护策略。在通信安全方面,采用对称加密算法结合动态密钥更新技术,利用时间戳与节点标识生成唯一密钥对,以确保节点间通信的机密性和动态适应性。每个节点根据当前时间和任务需求定期更新密钥,动态生成并分配,避免因密钥重复使用导致的安全漏洞。在容错设计中,故障切换机制依托主从节点协作模型。主节点在正常运行期间通过健康信号向从节点周期性传输状态信息,从节点实时监测信号状态。当主节点信号中断或延迟超出设定范围时,从节点自动切换为主节点角色,接管对应任务,同时从任务缓存中提取最新状态数据,以实现故障切换的无缝衔接。动态任务重新分配算法优化了切换时间,使延迟保持在可控范围内。针对异常状态的监测与分析,设计基于无监督学习的多维度数据分析模型,结合实时数据流的协方差变化情况进行异常判断,计算公式为式(4):

$$C = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (z_i - \bar{z})(z_i - \bar{z})^T \quad (4)$$

式中 z_i 为第 i 个数据样本, $\bar{z}$ 为样本均值, C 为协方差矩阵。当协方差矩阵的特征值超出预设范围时,系统触发异常警报并记录相关数据流。在容错机制的执行过程中,系统采用分布式任务分解策略,由边缘节点根据剩余计算能力动态分配任务。任务调度优先级基于计算资源与网络延迟的加权函数动态确定,并通过事件驱动方式启动恢复进程。节点完成任务后,将修复结果反馈至全局控制模块进行更新与校验,以实现系统的全局协作与容错优化。

2 实验分析

2.1 实验设计

实验选取典型分布式能源场景,涵盖光伏发电、风力发电及储能系统,设置3个实验方法:方法1为集中式控制;方法2为未使用边缘计算的分布式控制;方法3为本文提出的基于边缘计算的分布式控制。实验分别在单一能源运行、混合能源并网和高负荷波动环境下进行,全面评估不同方法的表现。选取运行响应时间、系统稳定性系数以及能源利用率作为评价指标:运行响应时间衡量系统从接受控制指令到执行完成的时间间隔;系统稳定性系数利用设备运行功率波动的标准差计算;能源利用率表示单位时间内分布式能源的有效利用比例。每种方法在不同实验场景下进行多组测试,并记录各指标的平均值与波动情况,为性能分析提供充分的数据支持。

2.2 效果分析

根据上述实验设计得到表1所示结果。方法1在集中式控制模式下依赖中央服务器进行全局调度,其响应时间在单一能源运行场景中为124.47ms,在高负荷波动环境中延长至142.18ms,揭示出集中式架构在复杂环境中响应效率的局限性;方法2虽然引入分布式控制策略,但因缺乏边缘计算节点的本地化处理能力,响应时间改善有限。相比之下,方法3充分发挥边缘计算节点的实时处理特性,在单一能源运行场景中实现83.24ms的响应时间,在高负荷波动环境中保持在93.24ms,表明边缘计算设计通过数据本地化处理和分布式任务调度显著降低了系统响应延迟。

系统稳定性系数用于评价控制策略对负荷波动的适应能力。方法1在所有实验场景下的功率波动均较大,高负荷波动环境下稳定性系数达17.32;方法2通过分布式控制一定程度上缓解了波动问题,但在复杂场景中波动仍然显著;方法3基于边缘计算节点的实时监测与本地调节,在单一能源运行、混合能源并网和高负荷波动环境中的稳定性系数分别为5.32、5.78和6.21,显著优于其他方法。

能源利用率方面,方法3在所有场景中均表现出较高水平,从单一能源运行场景的91.48%到高负荷波

动环境的90.06%，展现出其对复杂场景的适应能力；方法1由于集中式调度的高延迟和优化能力的局限性，高负荷环境下能源利用率降至77.83%；方法2在分布式控制的作用下略有提升，在高负荷波动环境中达到82.56%，但仍低于方法3。方法3优化局部任务调度和减少数据传输损耗，在混合能源并网场景中实现了90.91%的能源利用率，进一步验证了基于边缘计算的分布式控制在复杂条件下的优越性。

表1 实验结果

实验场景	方法	运行响应时间 (ms)	系统稳定性系数	能源利用率 (%)
单一能源运行	方法1	124.47	14.63	79.92
	方法2	101.32	9.78	85.63
	方法3	83.24	5.32	91.48
混合能源并网	方法1	135.82	16.12	78.07
	方法2	117.36	11.48	84.39
	方法3	89.47	5.78	90.91
高负荷波动环境	方法1	142.18	17.32	77.83
	方法2	126.87	12.26	82.56
	方法3	93.24	6.21	90.06

3 结语

本文提出的基于边缘计算的分布式能源电气自动化管理系统设计方案，优化了系统架构，实现了对分布式能源的智能控制和调度。实验结果表明，该方案显著降低了系统响应延迟，提高了系统稳定性和能源利用率。随着边缘计算技术的不断发展，该系统有望为分布式能源的高效运行和智能化管理提供更加有力的支持。**AP**

作者简介：

段海仑（1986-），男，山东济南人，学士，现就职于山东嘉富能源科技有限公司，研究方向为电气工程及其自动化、气动。

刘 阳（1991-），男，山东济宁人，学士，现就职于山东嘉富能源科技有限公司，研究方向为机电一体化。

参考文献：

[1] 于传杰, 陈哲心, 尹宜超. 结合光伏系统的智能分布式能源管理系统设计与实现[J]. 智能物联技术, 2024, 56 (4) : 90 - 93.
[2] 邢汉, 熊光亚, 刘林兴, 等. 一种分布式PLC边缘计算系统及数据通信方法[J]. 水电与抽水蓄能, 2024, 10 (1) : 78 - 83.
[3] 杨凯, 陈中, 邓旭晖, 等. 考虑任务迁移的配电网边缘计算节点部署方法[J]. 电力工程技术, 2023, 42 (2) : 119 - 129 + 160.
[4] 颜琪, 焦化坤, 李泽群, 等. 船舶噪声干扰下基于LS线性回归的水声频率估计算法[J]. 计算机应用与软件, 2023, 40 (11) : 118 - 124.
[5] 张宇, 陈丰照. 基于动态密钥的光通信网络数据传输加密研究[J]. 激光杂志, 2023, 44 (10) : 148 - 152.