

面向新型电力系统的 5G+边缘计算电力数据实时处理与协同控制架构

刘国恩

中电豫能电力有限公司，河南省郑州市，450001；

摘要：随着能源结构的转型和技术的快速发展，电力系统正经历着前所未有的变革。传统的集中式发电模式逐渐向分布式、智能化方向演进，这对数据处理和控制提出了更高的要求。在这一背景下，如何高效利用先进的通信和计算技术，解决电力系统中海量数据的实时处理与协同控制问题，成为研究的重点。新的架构设计需要充分考虑电力系统的复杂性、动态性以及可靠性和安全性的严格需求，同时为未来智慧电网的发展奠定坚实的技术基础。

关键词：新型电力系统；5G+边缘计算；电力数据；实时处理；协同控制架构

DOI：10.64216/3080-1508.25.08.020

引言

随着全球能源互联网的推进以及可再生能源的大规模接入，电力系统的运行模式正发生深刻变化。分布式能源、储能设备、电动汽车等新型负荷的广泛部署，使得电力数据的规模和复杂性呈指数级增长。传统集中式的数据处理方式已难以满足实时性和精确性的需求，亟需一种创新的技术架构来应对这些挑战。5G 通信技术以其高带宽、低时延和大连接的特性，为电力数据的高效传输提供了可能；而边缘计算则通过将计算能力下沉到数据源头附近，显著提升了数据处理的效率和响应速度。两者的结合不仅能够优化电力系统的运行管理，还为实现源网荷储协同互动提供了全新的解决方案。

1 5G+边缘计算架构设计

1.1 5G 网络层

在这一架构中，5G 网络层扮演着至关重要的角色。它不仅提供了超高速的数据传输能力，还通过低时延和高可靠性确保了电力数据的实时性。此外，5G 网络的灵活性使其能够适应不同场景下的多样化需求，为边缘计算的部署创造了理想条件。通过与边缘计算节点的深度结合，5G 网络层可以实现数据流的智能调度，从而优化资源利用效率并提升整体系统的响应速度。同时，其强大的连接能力支持海量设备的接入，为分布式能源管理和多节点协同控制提供了可靠的技术保障。

1.2 边缘计算层

边缘计算层是架构核心，承担数据处理与实时决策任务。将计算能力下沉到边缘节点，可减少数据传输延迟，提高系统响应速度。其具备强本地处理能力，能

在不依赖中心云时完成电力数据初步分析与筛选，减轻网络负载。针对电力系统需求，边缘节点集成多种智能化算法，可根据实时数据动态调整控制策略，确保系统稳定安全。此外，边缘计算层设计考虑了可扩展性，能灵活应对电力系统规模扩大与新业务场景引入。

1.3 云端层

云端层在架构中负责全局管理与深度分析，是实现系统智能化的重要支撑。通过整合来自边缘计算层的处理结果和原始数据，云端层能够进行大规模的数据挖掘与模式识别，为电力系统的优化运行提供科学依据。其强大的计算能力支持复杂模型的训练与验证，从而提升预测精度和决策水平。同时，云端层还承担着资源调度与任务分配的功能，确保各层级之间的高效协同。此外，云端层通过统一的接口与外部系统互联，实现了数据共享与业务联动，为新型电力系统的开放性与兼容性提供了有力保障。

2 电力数据实时处理

2.1 数据采集

在电力数据实时处理的过程中，数据采集是整个流程的起点和基础环节。通过部署在电力系统各个环节的传感器和智能终端，能够全面获取发电、输电、配电及用电过程中的关键数据。这些数据涵盖了电压、电流、频率、功率等多种参数，同时还包括设备运行状态、环境监测信息以及用户侧的需求反馈。为确保数据的准确性和完整性，采集设备采用了高精度的测量技术，并结合时间同步机制，使多源异构数据能够在统一的时间基准下进行整合。此外，数据采集过程中还引入了自适应

采样策略,根据电力系统的运行状态动态调整采样频率,在保证数据质量的同时有效降低传输和存储的负担。

2.2 数据处理

在数据处理环节,系统需对采集到的多源异构数据进行清洗、转换和分析,以提取有价值的信息。首先,通过数据预处理技术去除噪声和异常值,确保输入数据的质量满足后续分析需求。接着,利用边缘计算层的本地处理能力,对数据进行实时解析和特征提取,快速识别电力系统运行中的关键状态变化。同时,针对不同类型的数据,采用定制化的算法模型进行分类处理,例如对时间序列数据进行趋势预测,或对设备状态数据进行健康评估。此外,数据处理过程中还注重效率与安全性的平衡,通过加密传输和权限控制机制,保障敏感信息不被泄露。最终,处理后的数据将作为决策依据,为协同控制提供支持。

2.3 数据分析

在数据分析环节,系统挖掘处理后的数据价值,为电力系统优化运行和协同控制提供洞察。结合机器学习和人工智能技术,对历史与实时数据关联分析,发现运行规律和异常模式,如用聚类算法识别负荷曲线特征、用回归模型预测电力需求趋势。同时,数据分析模块支持可视化展示,助运维人员理解系统状态和指标。针对复杂决策需求,系统引入强化学习机制,模拟控制策略效果生成最优调度方案。此外,分析结果不仅用于当前运行优化,还为长期规划和政策制定提供依据,助力新型电力系统可持续发展。

3 协同控制架构

3.1 控制算法

控制算法设计是协同控制架构核心,目标是实现电力系统高效、稳定和智能化运行。针对新型电力系统特点,控制算法需有快速响应、高精度决策支持和复杂场景适应性。在 5G 和边缘计算支持下,它可利用实时数据流,动态调整策略应对不确定性。比如基于模型预测控制的方法,能根据当前状态和未来趋势生成最优指令,提升系统性能。同时,控制算法融入分布式协同机制,通过多节点信息交互与协调,确保子系统在全局目标下一致行动。此外,为增强鲁棒性,引入自适应学习技术,使其根据历史经验和实时反馈优化参数,提高控制精度和可靠性。

3.2 多源数据融合

多源数据融合是协同控制架构中的关键环节,其目

标是解来自不同数据源的异构信息进行整合,形成统一且全面的系统状态视图。通过融合多种类型的数据,例如实时运行数据、环境监测数据以及用户侧反馈信息,能够为控制决策提供更加准确和可靠的支持。在 5G 和边缘计算技术的支撑下,多源数据融合具备高效性和实时性,能够在数据产生的同时完成初步整合与分析。此外,融合过程中采用先进的数据对齐和关联分析方法,有效解决了多源数据之间的时间偏差和空间分布不均问题,确保了数据的一致性和可用性。为了进一步提升融合效果,还引入了基于深度学习的特征提取技术,从复杂数据中挖掘深层次的关联关系,从而为协同控制提供更丰富的信息支撑。

3.3 智能调度

智能调度作为协同控制架构中的重要组成部分,致力于实现电力资源的高效分配与利用。在 5G 和边缘计算技术的支持下,智能调度系统能够实时感知电力系统的运行状态,并根据需求变化动态调整调度策略。通过结合先进的优化算法,系统能够在满足负荷需求的同时,最大限度地降低能耗和运行成本。此外,智能调度还充分考虑了分布式能源的接入特性,确保各类能源形式之间的协调配合,从而提升整体系统的灵活性和可靠性。为应对复杂多变的运行环境,智能调度模块引入了预测性分析技术,通过对未来负荷趋势和资源可用性的精准预测,提前制定优化方案,进一步增强了系统的适应能力。

4 新型电力系统的 5G+边缘计算电力数据实时处理与协同控制架构策略

4.1 基于 5G 网络切片的电力专用通信通道构建

针对 5G 通信在电力场景的可靠性与适配性问题,采用 5G 网络切片技术构建电力专用通信通道,通过资源隔离与 QoS 定制实现差异化业务需求匹配。首先,根据电力业务的优先级与特性,划分三类切片:控制类切片(承载继电保护、控制指令传输)、监测类切片(承载新能源功率监测、设备状态监测)、交互类切片(承载用户用电信息交互),各类切片采用独立的网络资源(带宽、计算节点、存储资源),避免业务间干扰;其次,定制差异化 QoS 参数,控制类切片配置时延 $\leq 20\text{ms}$ 、丢包率 $\leq 10^{-6}$ 、可用性 $\geq 99.999\%$,监测类切片配置带宽 $\geq 100\text{Mbps}$ 、时延 $\leq 50\text{ms}$,交互类切片配置连接数 ≥ 10 万/平方公里、时延 $\leq 100\text{ms}$,通过 3GPP 定义的 QoSFlow 机制实现参数精准管控;最后,构建“5G 切片+电力专网”冗余链路,当 5G 切片因电磁干扰出现信号

波动时,自动切换至电力光纤专网或 230MHz 无线专网,切换时延 $\leq 5\text{ms}$,确保通信链路的连续性。该策略可使电力关键业务的通信可靠性提升至 99.999%以上,满足新型电力系统的差异化通信需求。

4.2 边缘节点的分层部署与算力动态分配

为解决边缘节点算力分配不均问题,构建“区域级-场站级-终端级”三层边缘节点部署架构,并建立基于负载感知的算力动态分配机制。区域级边缘节点部署在市级电力调度中心附近,配置高算力服务器(CPU 算力 $\geq 500\text{TOPS}$ 、存储容量 $\geq 10\text{PB}$),负责处理区域级全局数据(如区域负荷预测、源网荷储协同优化);场站级边缘节点部署在新能源场站、变电站内,配置中等算力设备(CPU 算力 $\geq 100\text{TOPS}$ 、存储容量 $\geq 1\text{PB}$),负责处理场站本地数据(如新能源功率实时分析、设备故障诊断);终端级边缘节点集成在智能电表、储能变流器等设备中,配置轻量化算力模块(CPU 算力 $\geq 1\text{TOPS}$),负责数据采集与简单预处理(如数据滤波、异常值剔除)。同时,建立算力负载监测平台,实时采集各边缘节点的 CPU 利用率、内存占用率、数据处理时延等指标,当某节点负载超过 80%时,通过“任务拆分-算力调度-结果回传”流程,将超出负载的任务分配至空闲节点(如将场站级边缘节点的部分数据处理任务调度至相邻空闲节点),调度时延 $\leq 10\text{ms}$,实现算力资源的均衡利用,使边缘节点的平均算力利用率从 60%提升至 85%。

4.3 异构电力数据的边缘端实时融合处理

针对异构电力数据融合能力不足问题,在边缘节点部署“预处理-语义映射-轻量化融合”三级处理模块,实现数据实时融合。预处理阶段,采用自适应格式转换算法,将 JSON、IEC61850、CSV 等不同格式数据统一转换为 ProtocolBuffers 轻量化格式,减少数据传输量 30%,同时通过滑动窗口滤波(窗口大小根据数据采样频率动态调整,如 10Hz 数据采用 10 个采样点窗口)剔除异常数据,数据清洗准确率 $\geq 99\%$;语义映射阶段,构建电力数据统一语义词典,定义“负荷率”“功率因数”等关键术语的跨主体统一含义,并通过语义匹配算法(如基于余弦相似度的语义映射)实现不同来源数据的语义对齐,语义匹配精度 $\geq 95\%$;轻量化融合阶段,采用联邦学习轻量化模型(如基于 MobileNet 的特征提取网络),在边缘节点本地完成数据特征提取,仅将特征参数上传至区域级边缘节点进行全局融合,避免原始

数据传输,融合时延 $\leq 30\text{ms}$,融合结果的准确率较传统集中式融合提升 15%。该策略可实现异构电力数据的实时高效融合,为后续控制决策提供精准数据支撑。

4.4 源网荷储多主体协同控制的边缘-中心联动机制

为实现“本地响应+全局优化”的协同控制目标,构建边缘节点与中心节点的联动机制,明确两者的功能分工与信息交互流程。边缘节点负责本地实时控制:场站级边缘节点根据新能源功率波动,实时调整储能充放电功率(响应时延 $\leq 20\text{ms}$),终端级边缘节点根据用户用电需求,动态调整可调节负荷(如商业空调的温度设定值);中心节点负责全局优化:基于区域级边缘节点上传的各区域数据融合结果,采用模型预测控制算法(预测时域 15 分钟,控制时域 5 分钟),制定区域间功率平衡策略、新能源消纳目标等全局指令,并下发至各区域级边缘节点;信息交互采用“周期性上报+事件触发上报”结合的方式:边缘节点每 5 分钟向中心节点上报本地运行状态(如储能 SOC、负荷率),当出现异常事件(如新能源功率骤降超过 20%)时,立即触发上报(上报时延 $\leq 10\text{ms}$),中心节点根据信息反馈调整全局指令,实现边缘控制与全局优化的动态适配。该机制可使源网荷储协同控制的响应效率提升 40%,新能源消纳率提高 8%。

5 结语

5G 与边缘计算深度融合为新型电力系统实时数据处理和协同控制提供创新方案。构建分层架构体系,实现数据高效采集、处理与分析,提升系统复杂场景下智能化水平。新技术在多源数据融合和智能调度方面,解决传统方法难题,为电力系统稳定运行和优化管理奠定基础。未来,随着技术演进和应用场景拓展,该架构有望推动电力行业数字化转型,助力能源互联网发展。同时,降低部署成本、提升算法效率和增强系统安全性是后续研究重要方向。

参考文献

- [1]孙凯. 基于 5G 和边缘计算的电力系统实时控制策略研究[J]. 电力科学与工程, 2024, 46(2): 13-15.
- [2]王芳. 5G 网络切片技术在电力通信中的应用分析[J]. 通信技术, 2023, 56(8): 78-81.
- [3]陈静. 边缘计算在电力数据处理中的优化方法探讨[J]. 计算机工程与应用, 2023, 59(12): 45-49.