

基于终端接入网的全时全域电力业务接入路由

孙晓辉

山东省邮电工程有限公司 山东 济南 250001

摘要: 针对传统电力路由算法难以适配电网异构接入、链路动态波动及多业务差异化传输的问题, 本文依托终端接入网三级架构, 剖析电力业务全时全域传输约束, 搭建精细化网络与流量模型。基于MAPPO多智能体强化学习算法构建动态路由优化机制, 融合故障重构、负载均衡与跨层抗干扰策略。仿真结果表明, 该算法可有效降低传输时延、提升组网可靠性与资源利用率, 相较传统算法综合性能显著提升, 适配复杂电网运行场景。

关键词: 终端接入网; 全时全域; 电力业务; 接入路由

引言: 随着智能电网与分布式能源的规模化部署, 电力终端接入网呈现异构化、分布式、高动态特征, 监测、控制、采集等多业务对传输的实时性与全域覆盖性提出严苛要求。传统路由算法收敛速度慢、抗干扰能力弱, 无法适配链路频繁通断与业务流量突变场景, 难以保障全时全域稳定传输。为此, 本文结合电力业务传输特性与网络约束, 构建智能路由优化模型, 探索适配复杂电网场景的高效路由传输方案。

1 全时全域电力业务接入路由基础理论与架构

1.1 电力终端接入网核心架构

(1) 终端接入网层级结构与设备组成。电力终端接入网采用“骨干汇聚层—边缘接入层—终端感知层”三级架构。骨干汇聚层部署多业务边缘网关, 边缘接入层设置工业以太网交换机与无线基站设备, 终端感知层涵盖配电监测、用电采集、视频巡检等各类终端单元。

(2) 电力终端接入通信传输模式分类。按传输介质划分为光纤有线模式与4G/5G、WiFi、LoRa等无线模式; 按拓扑结构划分为星型、网状及混合型传输模式, 以适应不同电压等级与场景下的差异化通信需求^[1]。(3) 接入网与骨干网的协同传输机制。通过跨层信息交互与动态带宽协商机制, 实现接入网业务流量与骨干网传输资源的智能匹配。接入网根据骨干网反馈的链路状态信息进行局部路由调整, 骨干网依据接入侧业务优先级实施差异化转发策略, 两者协同保障端到端传输性能。

1.2 全时全域电力业务特性分析

(1) 电力监测、控制、采集等典型业务分类。监测类业务涵盖设备状态在线监测与环境感知, 控制类业务包括远程开关操作与保护动作指令, 采集类业务涉及用户用电数据周期性上报与负荷预测采样。(2) 全时传输的实时性、可靠性、连续性要求。控制类业务要求毫秒级端到端时延与99.999%可靠性, 监测采集类业务容忍秒

级时延但要求数据完整性与连续不丢包, 全时传输需在各类业务间实现差异化保障。(3) 全域覆盖的广域、异构、分布式传输特征。覆盖范围跨越城市配电网与偏远农村电网, 传输介质涵盖光纤、4G/5G、卫星通信等多种制式, 分布式能源接入导致数据流向呈现多点到多点、动态变化的复杂特征。

1.3 电力业务路由核心理论与技术基础

(1) 传统网络路由算法原理及适配性分析。距离矢量与链路状态路由算法基于最短路径优先原则, 在静态拓扑中性能优良, 但面对电力链路频繁通断与负载突变时收敛速度不足, 需针对性改进。(2) 动态路由与智能路由决策基础理论。基于软件定义网络架构获取全局网络视图, 结合强化学习与深度神经网络实现路由策略的实时优化, 使路由决策具备自适应调整能力。(3) 电力通信路由的QoS保障机制。通过综合调度时延、带宽、抖动、丢包率等多维QoS指标, 建立业务优先级映射与队列调度策略, 实现高优先级控制业务在拥塞状态下的优先转发。

1.4 全时全域路由运行约束条件

(1) 网络链路负载与带宽资源约束。电力业务突发流量易造成局部链路拥塞, 路由决策需实时感知链路可用带宽与缓存占用率, 避免因资源竞争导致关键业务超时或丢弃。(2) 终端异构接入与信号传输约束。不同制式终端发射功率、调制编码方式及覆盖范围差异显著, 无线链路受地形与电磁干扰影响, 路由需综合考虑接入能力与链路质量动态变化。(3) 电网复杂工况下的传输稳定性约束。故障暂态、大功率设备启停等工况引发强电磁干扰与电压跌落, 导致通信设备工作异常, 路由机制需具备抗干扰容错能力与快速重路由恢复机制。

2 终端接入网电力业务路由模型构建与优化算法

2.1 全时全域路由网络模型搭建

(1) 网络拓扑结构抽象与节点、链路建模。将电力接入网抽象为无向图 $G(V,E)$, V 涵盖智能终端、集中器、基站及边缘网关等设备节点, E 包括光纤链路和无线信道。节点属性配置处理速率与缓存容量, 链路属性定义最大带宽、传播时延及误码率, 并针对无线链路引入路径损耗模型, 形成可计算的数字映射。(2) 电力业务流量特征建模与参数设定。根据监测、控制与采集业务的发包规律, 分别建立周期性确定性模型、突发事件驱动的泊松模型及连续流模型。设定各类业务的数据包长度分布、到达间隔均值及峰值速率系数, 为路由仿真提供贴近实际的多业务混合流量输入^[2]。(3) 全域接入网络资源状态量化模型。定义链路剩余带宽、节点队列深度和信道占用率为核心状态变量, 以固定时隙周期采样更新。采用指数加权移动平均法平滑状态波动, 构建维度可控的状态特征矩阵, 作为路由决策算法的环境输入基础。

2.2 电力业务路由评价指标体系建立

(1) 实时性指标: 传输时延、链路响应速度。传输时延包含排队、发送、传播与处理四部分累加值, 控制类要求端到端时延 $\leq 20\text{ms}$ 。链路响应速度以路由表收敛时间度量, 衡量网络对拓扑变化的快速反应能力, 需满足毫秒级更新需求。(2) 可靠性指标: 链路丢包率、传输容错率。丢包率统计单位时间丢失包占比, 关键业务容忍上限为 10^{-5} 。传输容错率表征系统在链路劣化条件下成功交付概率, 通过纠错编码与重传机制协同保障, 要求不低于99.999%。(3) 全域适配指标: 终端覆盖率、资源利用率。终端覆盖率反映实际在线终端占应接入总数的比例, 评估覆盖完整性。资源利用率综合带宽与处理资源的加权占用率, 衡量全网资源使用的均衡性与经济性, 避免局部过载与全局浪费。

2.3 基于多智能体强化学习的动态路由优化算法

(1) MAPPO算法核心原理与适配改进。MAPPO采用集中训练分布执行范式, 各智能体共享全局奖励并通过中心Critic评估联合动作价值。针对路由场景, 将每个网关定义为智能体, 改进输入层融合局部拓扑与流量特征, 动作空间裁剪为可行下一跳集合, 以加速收敛并提升策略稳定性。(2) 面向全时传输的路由动态调度策略。设计时延、吞吐与链路稳定性复合奖励函数, 引导智能体兼顾即时QoS与长期连续传输。引入长短时记忆网络提取历史状态时序信息, 使智能体具备链路劣化趋势预判能力, 提前切换规避中断风险^[3]。(3) 全域异构业务的路由自适应匹配机制。依据业务优先级分解为多子策略网络, 高优先级控制业务激活低时延偏好子策略,

采集业务激活高吞吐偏好子策略。通过共享底层特征提取层与专属输出层, 实现知识迁移与差异化决策协同, 提升混合业务并发时的整体性能。

2.4 路由算法容错与抗干扰优化设计

(1) 链路故障下的路由快速重构机制。采用本地故障检测与备用路径预计算相结合策略, 当链路质量低于阈值时, 立即触发预置旁路切换, 无需全网重收敛。同时将故障信息以邻居广播方式传递, 触发区域协同重规划, 将恢复时间压缩至百毫秒内。(2) 网络拥堵场景下的负载均衡优化策略。引入拥塞感知模块实时监控链路队列长度, 当检测到局部拥塞苗头, 智能体动态调整分流权重, 将部分非实时流量牵引至轻载链路。多智能体通过隐式协调避免同抢备用通道, 实现全网流量自均衡分布。(3) 全域复杂环境下的抗干扰传输优化。将信噪比与误码率实时反馈纳入状态空间, 使智能体学习主动规避强干扰区域。同时与物理层自适应调制编码联动, 在干扰升高时自动降阶提升抗误码能力, 干扰消退后恢复高阶调制以保障效率, 形成跨层闭环抗干扰机制。

3 仿真实验与结果分析

3.1 仿真实验环境与参数配置

(1) 仿真平台选型与网络拓扑搭建。选用Python3.9结合NS3网络仿真器作为基础平台, 集成OpenAIGym接口构建强化学习训练环境。网络拓扑参照典型城市配电网接入场景, 设置1个骨干汇聚节点、6个边缘接入网关及50个终端设备节点, 光纤链路带宽设定为100Mbps, 无线链路采用4G/5G混合组网模式, 信道模型配置城市微蜂窝传播损耗参数。(2) 电力业务场景与实验参数设置。设定三类典型业务: 控制类(指令周期10ms, 包长64Byte)、监测类(视频流码率2Mbps)、采集类(上报周期1min, 包长256Byte)。仿真时长设为7200s, 业务负载率按30%~90%梯度递增, 链路故障注入采用随机断连与周期性衰减两种模式。(3) 对比实验算法与评价标准设定。选定的对比基线包括: OSPF传统链路状态算法、基于QoS约束的最短路径算法、单智能体DQN路由算法, 以及本文提出的MAPPO多智能体路由算法。评价标准统一采用3.2节指标体系, 各指标取10次独立运行的平均值, 置信区间设定为95%。

3.2 单维度性能仿真结果分析

(1) 不同业务场景下传输时延性能对比。控制类业务在轻载条件下四种算法均满足20ms约束, 但在重载时OSPF时延恶化至85ms, DQN算法约为42ms, MAPPO算法维持在22ms以内。监测类业务端到端时延MAPPO较OSPF降低约58%, 主要得益于多智能体协同规避拥塞链

路的能力。(2)链路故障场景下路由可靠性测试分析。随机注入单链路故障时,OSPF收敛时间平均为3.2s,期间丢包率显著攀升;MAPPO算法通过本地备选路径预切换机制,收敛时间压缩至120ms,丢包率控制在0.08%以下。面对双链路并发故障,MAPPO仍保持92%的传输成功率,较DQN提升约25个百分点^[4]。(3)全域终端接入覆盖率与资源利用率分析。在50个终端并发接入场景下,MAPPO算法通过动态调整路由策略实现对弱信号终端的差异化转发保障,终端在线覆盖率达到98.2%。全网带宽资源利用率均值维持在65%~72%区间,资源分配方差较OSPF降低约41%,显著改善资源利用均衡性。

3.3 综合性能对比与优势验证

(1)与传统路由算法的综合性能差异对比。基于时延、丢包、覆盖率、资源利用率四项指标构建综合评分,MAPPO算法综合得分较OSPF提升约62%,较QoS约束最短路径算法提升约37%,较单智能体DQN提升约21%。增益主要源于多智能体协同决策带来的全局优化能力与对动态环境的快速适应特性。(2)全时连续传输工况下的稳定性验证。在持续72h仿真运行中,MAPPO算法的时延波动标准差控制在2.1ms以内,相较OSPF的18.7ms具备明显优势。即使在业务负载周期性突变节点,算法的QoS保障成功率始终维持在97.5%以上,证明其全时连续传输的稳定性。(3)全域异构终端接入的适配性优势分析。当终端类型涵盖光纤直连、4G、5G及LoRa混合接入时,各链路质量差异显著。MAPPO的子策略分解机制可自动识别终端接入方式并匹配合适转发路径,异构场景下综合性能衰减仅为7.3%,远低于DQN的19.6%与OSPF的34.2%,验证了全域异构适配的优越性^[5]。

3.4 实验问题与优化方向总结

(1)仿真实验暴露的技术短板。MAPPO算法的训练收敛速度较慢,完成稳定策略需约15000轮迭代,在拓扑

变动频繁场景下再训练开销较大。此外,多智能体间的通信交互在高动态环境下存在信息不同步风险,导致局部决策次优。上述问题限制了算法在快速重构场景中的即时响应能力。(2)工程落地适配的后续优化方向。一是引入迁移学习策略,将已有拓扑训练成果快速迁移至新拓扑结构,压缩重训练周期至原有1/3。二是设计分层决策架构,上层进行全局粗粒度路径规划,下层执行本地细粒度调整,降低智能体间通信依赖。三是推进轻量化模型剪枝与量化部署,适配边缘网关有限算力约束,提升工程实用化可行性。

结束语

本文构建的多智能体强化学习路由优化算法,有效解决了电力终端接入网全域异构传输、链路故障及网络拥塞等痛点,实现多业务差异化QoS保障,大幅提升电网通信传输的稳定性与资源利用率。仿真实验验证了算法的优越性,同时明确了模型收敛慢、多智能体信息不同步等短板。后续将通过迁移学习、分层决策与模型轻量化优化,提升算法工程落地性,适配复杂电力场景规模化应用。

参考文献

- [1]王忠钰,卢志鑫.基于终端接入网的全时全域电力业务接入路由[J].太赫兹科学与电子信息学报,2025,23(05):61-67.
- [2]尹喜阳,王林.基于时敏网络的全时全域通信网时延保障方法[J].太赫兹科学与电子信息学报,2025,23(05):98-104.
- [3]杨淑娜.基于链路失效模型的多级电力业务路由规划[J].电子与信息学报,2023,45(09):3120-3127.
- [4]张宁,刘世栋.电力终端接入网多业务自适应路由优化算法[J].电网技术,2024,48(07):2689-2696.
- [5]李建斌.面向全域覆盖的电力通信接入网动态路由重构技术[J].电力系统通信,2023,44(04):56-62.