

电力终端通信接入网通信技术匹配

李沛哲,肖振锋,陈仲伟,王逸超,李达伟

(国网湖南省电力有限公司经济技术研究院规划评审中心,湖南长沙 410014)

摘要:终端通信接入网是电力骨干通信网向用户侧延伸的末梢神经网络。随着通信技术的飞速发展,适用于终端通信接入网的技术呈多样化趋势,为不同电力终端通信业务匹配最适应的通信接入技术是提高通信效率、保证通信服务质量的前提。对终端通信接入网可用的通信技术及其业务需求做深入分析,并基于主观偏好和客观数理分析设计了基于主客观因素的通信技术最优匹配算法,算法权衡业务对属性的偏好和各属性自身的重要程度,最终得出不同电力通信业务最适配的通信技术,从根本上提升终端通信接入网的效能。

关键词:电力终端通信接入网;终端通信业务;终端通信接入技术;主观偏好;客观数理分析;最优匹配

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2021.03.016 中图分类号:TM734 文章编号:1673-9140(2021)03-0125-10

Analysis of communication matching technology of power terminal communication access network

LI Peizhe, XIAO Zhenfeng, CHEN Zhongwei, WANG Yichao, LI Dawei

(Planning and Review Center, State Grid Hunan Electric Power Eco-Tech Research Institute, Changsha 410014, China)

Abstract: As an extension of the power backbone communication network to load terminal, the terminal communication access network is an important part of the power communication network. With the rapid development of communication technology, the technologies applicable to the terminal communication access network are diversified. The matching of the most suitable communication access technology for different power terminal communication services is the prerequisite to improve the communication efficiency and to ensure the communication service quality. This paper deeply analyzes the communication technology and service requirements of the terminal communication access network, and then designs the communication technology optimized matching algorithm based on the subjective preference and objective mathematical analysis. The algorithm weighs both the preference of the business to attributes and the importance of each attribute itself, and finally derives the most suitable communication technology for different power communication services, which fundamentally improves the performance of the terminal communication access network.

Key words: power terminal communication access network; terminal communication service; terminal communication access technology; subjective preference; objective mathematical analysis; optimal match

收稿日期:2019-02-26;修回日期:2019-09-02

基金项目:国网湖南省电力有限公司科技项目(5216A218000C)

通信作者:李沛哲(1990-),男,博士,工程师,主要从事电力通信与数字化建设相关研究;E-mail:lipeizhe424@126.com

终端通信接入网是国家电网有限公司在“十二五”通信网规划中首次提出的概念^[1],该规划将终端通信接入网定义为电力系统骨干通信网络的延伸,是电力通信网的重要组成部分^[2],为电网提供可靠通道支撑,有助于提升电网服务质量。电力终端通信接入网提供配电与用电业务终端同电力骨干通信网络的连接,实现配用电业务终端与系统间的信息交互,具有业务承载和信息传送功能^[3-5]。随着电力无线专网、高速电力线载波、低功率广域网等新兴技术的蓬勃发展,电力终端通信接入网可用的通信技术呈多样化发展态势,多种通信手段融合互补将是未来电力终端通信接入网的技术发展方向^[6-9]。

关于终端通信接入网已有大量的研究,文献^[10]提出针对终端通信接入网的新型管理模式,将建设和维护管理分工界面作出明确划分,并对各类人员作出定位分析;文献^[11-12]聚焦电力终端通信接入网安全技术方向,其中文献^[11]对 EPON、工业以太网、无线公网、无线专网存在的风险作出分析比对,并提出了 3 种手段融合以实现对安全技术的持续赋能;文献^[12]则对现行终端通信接入技术的安全技术作出分析;文献^[13-15]均从架构层面研究终端通信接入网,分析其复杂的通信环境和繁多的设备种类,业务差异化明显;文献^[16-17]在公共平台建设方面进行研究,给出了总体技术方案,并作出经济性比对分析,得出公共接入平台通过资源统筹能有效降低成本的结论;文献^[18]对终端通信接入网中的多种通信技术作出了技术应用设计,并分别提出了预算充足和预算不足前提下的技术选择方案。

虽然上述文献对终端通信接入网做了多方面研究,在终端通信接入网的通信技术之间已有不同方向的比对,但不同通信技术与电力通信业务之间的匹配仍基于主观认定,急需通过综合分析设计匹配算法,实现业务和技术之间的最优匹配,以实现数据的最优传输。

该文将从终端通信接入网可行通信技术分析、终端通信接入网业务需求等几个方面展开论述,并最终完成业务与通信技术匹配算法的构建,实现业务和技术的最优匹配。

1 终端通信接入网通信技术分析

终端通信接入网通信技术按电压等级划分可分为 10 kV 通信接入网和 0.4 kV 通信接入网两部分^[18],其中 10 kV 通信接入网的范围为变电站 10 kV 出线至开关站、充电站、环网单元、柱上开关、电缆分支箱、10 kV 变压器等;0.4 kV 通信接入网是指覆盖 10 kV 变压器的 0.4 kV 出线至低压用户表计、充电桩、营业网点、分布式电源、电力光纤到户室内终端等的通信网络^[1]。

1.1 10 kV 通信接入网技术

10 kV 范围内终端通信接入网可采用的通信技术主要有光纤专网、无线公网、无线专网、中压电力线载波等。

1) 光纤专网。

现行光纤通信接入网主要采用以太网无源光网络(ethernet passive optical network, EPON)和工业以太网 2 种技术。

EPON 系统由通信站侧的光线路终端、光分配网络和用户侧的光网络单元组成^[19],其网络结构以树形结构为主,在终端通信接入网中多采用手拉手主备冗余组网方式。

组网采用时分复用(time division multiplexing, TDM)的方式,分配的时隙内能独享带宽,同时能实现带宽动态分配,且产业链发展成熟,产品价格相对低廉。由于 EPON 系统需要在光纤线路中加入 POS,所以存在传输距离上受限,扩展性相对较差的技术缺陷。

工业以太网按《终端通信接入网工程典型设计规范》^[20]要求,其组网宜采用环形拓扑结构,同一环内节点数目不宜超过 20 个。

由于信号间传输距离较大,所以采用逐级传递模式,工业以太网还采用载波监听多路访问/冲突检测方法(carrier sense multiple access/collision detection, CSMA/CD),可以充分利用带宽;但受级联数和可靠性限制,扩展性较差。

光纤专网的投资成本主要包括工程建设费用和光缆材料费用,每公里约 50 万元,若采用光纤接入到每个终端,其造价将远高于其他通信技术。因此

从经济性角度分析推荐光纤专网用于连接像集中器或基站到主站之间的通信这种大数据量通信场景,或如视频监控等这种特殊的大带宽需求业务。

EPON 技术适用于网络规模大、终端节点众多、业务类型多样、通道容量较大的场景,大带宽需求应用场景主要有视频监控、基站或集中器上传通信骨干网的远程通信包括用电信息采集数据集中上传,无线专网基站数据上传等;工业以太网技术适用于具有较高可靠性需求的业务场景^[20],可靠性要求较高的应用场景有配电自动化“三遥”、分布式电源、精准负荷控制等。

2) 无线公网。

电力无线公网由电信运营商网络、电信运营商网络边界和电力网络边界三部分组成,通过安全接入平台与管理信息大区互联,通过安全接入区与生产大区互联^[21]。现有的电力无线公网主要应用于用电信息采集业务。

无线公网有通信回路独立;传输距离远,覆盖率高;无需基建投入,无需设施维护,终端改造简单的优点。技术缺陷为易与其他公网业务产生相互干扰,安全性和可靠性难以保证,数据采集成功率在50%~80%之间;公网传输环节多,数据延迟通常为1~5 s,有时候达到10 s,不能满足高实时性要求;建筑物屏蔽现象明显,容易出现通信覆盖盲区;天线易受到外力破坏,易干扰公共事业设备的使用;需常年租用公网设备,出现通信故障时,涉及到移动运营商部分的问题,难以定位,应用中存在移动运营商内部出现问题的现象等。

无线公网的投资成本主要为公网租赁费用,同时需购置公网 SIM 卡并对终端进行改造,无线公网4G 模块按照国网统招价格为224.14元/只,年通信费约60元/台;其成本在远程通信技术中最低,建议某些节点数量较少、数据对通信质量要求不高的业务可采用公网传输。

无线公网适用于配电自动化两遥业务、二段式接入网中作为集中器向主站传输的远程通信方式等场景,但后者只能传输时延、可靠性要求不高的数据。

3) 无线专网。

电力无线专网旨在建设电力行业专用的无线网络,为业务终端与业务主站之间的通信提供服

务,业务终端通过通信终端、基站、回传网、核心网、业务承载网与业务主站连接。电力无线专网目前可行的技术频段有230 MHz和1.8 GHz两类。

电力无线专网覆盖范围广,在平坦无遮挡地区最大覆盖半径可达30 km;其子帧长度为0.5 ms和0.675 ms,解决了向下兼容的问题并降低了网络时延;无线专网包含信令的加密和完整性保护、数据机密性和完整性保护,同时通过系统设计和严格的服务质量(quality of service, QoS)机制,保证实时业务的服务质量;且其完全符合电信级标准,设备可靠性高达99.999 99%。

电力无线专网不同于无限公网,需自建全套网络,终端节点均需更换,所以建设成本投入较多;信道同样受到地形、同频通信干扰,容易出现覆盖盲区,需后期补盲或对信号做技术处理。

对无线专网2个不同的技术频段作对比,230 MHz的专网传输带宽为7 M,离散频点较1.8 G资源少、传输速率低于1.8 G、传输时延较1.8 G高;而1.8 GHz频段非电力行业专用,无线专网覆盖半径小于230 MHz,单扇区接入终端数也少于230 MHz。

由于无线专网终端仍处于研发投用初期,其成本较高,预计现阶段采购价格为1 150元/台(技术成熟后逐步下降),基站单站综合造价约为73.1万元/个,造价成本较高,但一次性投入后仅需投入维护费用。专网的终端造价也较高,用于覆盖海量节点,其成本较本地通信技术高出太多,不建议采用。该文推荐将电力专网应用于集中器数据采集等节点少数据量大的应用场景。

配电自动化“三遥”业务已有试点应用,通过国网认证后可应用专网;电力无线专网还可以应用于如输变电状态监测、配电所综合监测、输配变机器巡检、电能质量监测等对安全性、可靠性、通信时延要求较高的业务,或者像智能家居,仓储管理覆盖范围大且单点数据量较少的业务。此外二段式接入网中作为集中器向主站传输的远程通信方式中,专网双平面构建,可传输时延、可靠性要求较高的业务。

4) 中压电力线载波。

中压电力线载波的拓扑为总线式,各分支、用电设备依次连接到中压线上。其噪声情况相对简单,设备固定,因此有较好的通信环境,但中压电力线载

波衰减较大,传输距离受到一定限制。

电力线载波不占用无线频道资源,可以直接使用现有的电力基础设施,无需重新架设网络,可以进行有效的维护;由于它的设备改造简单,因此可以降低成本资金的投入。

电力线载波主要面临以下技术难题:数据信号传输过程中会出现不同信号耦合方式、不同电力线负载情况对电力线载波信号造成不同程度的衰减;电力线上用电设备多样化,其频繁开关会给 PLC 通信系统带来各种噪声干扰;电力线的分布有较强的地域依赖性,PLC 的实际应用场景也与区域发展情况、气候地貌等息息相关。

窄带载波综合造价 44 元/户,从经济性角度分析,电力线载波较适用于海量终端节点接入。

电力线载波适用场景有电力线覆盖完善、终端数量多、单点数据量小、数据可靠性和时延要求不高的业务,比如用电信息采集过程中表计到集中器的本地通信;也适用于地下室等无线信号难以覆盖且不具备光缆敷设条件的应用场景。

1.2 0.4 kV 通信接入网技术

0.4 kV 的主要通信技术为低压电力线载波、微功率无线、RS-485 等,现行的通信方案以低压电力线载波为主。

1) 电力线载波。

现行低压电力线载波只适用于小范围的网络覆盖。国网信通产业集团新开发的高速电力线载波(high speed power line, HPLC)技术,将传输频率调整为 0.7~3 MHz, HPLC 方式传输频带宽、速率高、无需铺设单独通信线缆、支持互联互通和远程升级、可靠性强,为支撑电力本地通信的新型本地通信方式。

低压电力线载波的技术特点和技术缺陷如同中压电力线载波。

HPLC 载波综合造价 59 元/户,从经济性角度分析,电力线载波较适用于海量终端节点接入。

综合低压电力线载波的优缺点,其适合通信需求低且没有光缆而近期又没有光缆改造计划的应用场景。

2) 微功率无线。

微功率无线通信以低功耗、低成本、高数据速

率、近距离、自组网、双向实时通信、适合嵌入式安装等特点被广泛应用于智能电网高级量测体系业务中^[22]。

NB-IoT 与 LoRa 等低功耗广域网技术是新兴的微功率无线技术。低功耗广域网技术具有覆盖广、连接多、速率低、成本低、功耗少等特点^[23],均能在电力终端通信接入网中找到合适的应用场景。

微功率无线有传输功耗低、建设成本低、传输时延低、终端接入灵活等技术优势,但微功率无线的传输距离短,抗干扰能力较弱,易受有线电视同频信号干扰,传输速率仅 9.6 K/s。

分析微功率无线的投资成本:综合造价 44 元/户,新兴低功耗广域网技术终端造价不超过 35 元/台,从经济性角度分析其最适用于海量终端节点接入。

微功率无线适用于终端数量庞大、单点数据量小、分布较为集中、时延要求高的应用场景。像各类业务中计量表计或传感节点向集中器汇聚数据的本地通信。

3) RS-485 总线。

RS-485 总线采用双绞线差分传输方式,可连接成半双工和全双工 2 种通信方式,多用于用电信息采集业务。

RS-485 总线更新成本较低,维护简单,采用差分信号进行数据传输,抗干扰能力强,但是它传输速率不高,仅 9.6 K/s。还需增加采集器终端设备,独立布置通信线缆,现场施工困难,布线接线故障点多,一个节点出现故障会导致系统整体或局部的瘫痪,也易受到雷电损坏及外力破坏。

RS-485 总线综合造价为 115 元/户,在本地通信技术中造价最高,从经济性角度考虑不建议大量采用。

RS-485 总线适用于用户表计到集中器这种数据量小、可靠性和时延均要求不高的业务。

2 终端通信接入网业务需求

终端通信接入网的业务需求包括业务需求分析、容量需求预测等内容,包含基本业务和扩展类业务两大类,共计 17 项业务。将常见业务功能、数据和通信需求归纳,如表 1 所示。

表 1 电力终端通信网常见业务需求

Table 1 The business requirements of power terminal communication network

分类	业务名称	功能	数据	通信需求
基本业务	配电自动化	实现对配电网运行的自动化监视与控制	主要传输数据业务上行方向:遥测、遥信信息采集下行方向:常规总召、线路故障定位隔离、恢复时的遥控命令	上行流量大、下行流量小,对通信实时性、可靠性、安全性均要求高
基本业务	用电信息采集	用电信息的自动采集、计量异常监测、电能质量监测、用电分析和管理等	主要传输数据业务上行方向:状态量采集类业务下行方向:常规总召命令	上行流量大、下行流量小,数据采集点众多,汇聚节点处数据量大,对实时性有较高要求
基本业务	电动汽车充电桩/站	接入车联网平台,充电桩内置 TCU 装置,实现本地计费功能,充电桩设备状态信息采集	充电桩与车联网平台之间双向点对点通信,传输数据业务和多媒体业务上行方向:上传设备、计量等信息下行方向:下发召测、计费等命令	独立充电桩数量众多;集中式充电站具备视频监控业务,业务数据量大,计费信息安全性要求高,具有视频业务的充电站对通信带宽有较高要求
基本业务	分布式电源	数据采集和处理、有功功率调节、电压无功功率控制、孤岛检测、调度与协调控制及与相关业务系统互联等	分布式电源监控终端与主站点点对点通信,主要传输数据业务 35/10 kV:电能质量监测、测控和关口计量信息 380/220 V:关口计量信息	关口计量信息为用电信息采集的一部分,电能质量监测和测控等业务对通信实时性、可靠性有较高要求
基本业务	精准负荷控制	通信对象包括接入层电力用户配电室分路开关及计量装置,以及骨干汇聚层各级上联汇聚站点	传输控制指令	根据不同控制要求,分为实现快速负荷控制的毫秒级控制系统和更加友好互动的秒级及分钟级控制系统,对安全性、实时性、可靠性要求极高
扩展业务	输变电状态监测	输电和变电设备及线路的温度、气象、现场环境等信息的实时监测	输变电状态监测业务单个接入点的传输速率约为 2 Mbps,端到端传输时延小于 1 s	通信实时性要求高,通信环境较恶劣
扩展业务	配电设备/环境状态监测	站房(环网柜、配电室等)测温、带电检测等,以及少量的配电线路状态监测	单终端采集数据传输速率约 20 kbps 图像传输速率为 256 kbps 视频传输速率为 2 048 kbps	图片和视频传输对通信带宽有较高要求,告警信息等重要信息对实时性、可靠性要求高
扩展业务	输配变机器巡检	对电力各类场景进行机器巡检	无人机巡检业务:带宽 ≥ 2 M,图传延时 ≤ 300 ms,数传延时 ≤ 80 ms;机器人巡检业务:传输速率大于 2 Mbps,数传时延 ≤ 80 ms,误码率 $\leq 1 \times 10^{-6}$,图传时延 ≤ 300 ms	机器巡检移动作业,对通信的移动性要求高,实时性方面有较高要求,视频图像业务对带宽要求高
扩展业务	电力应急通信	保障突发事件场景和重要保电场景的通信	数据:传输速率 ≥ 22.5 kbps,丢包率 $\leq 1\%$,时延 ≤ 600 ms;语音、视频:传输速率 ≥ 512 kbps,丢包率 $\leq 1\%$,时延 ≤ 600 ms	通信场景恶劣,对通信可靠性有一定要求,语音、视频业务对通信带宽有较高要求
扩展业务	视频监控	现场视频监控和配电视频监控等	普清视频:传输速率 > 2 Mbps 高清视频:传输速率 > 4 Mbps 下行云台控制信息传输速率 < 10 kbps	上行流量大、下行流量小,对实时性要求较高,对通信带宽要求极高
扩展业务	移动作业	运检、营销、物资、安质等领域的现场巡检抢修、业务办理、物资盘点和安全监督等	语音业务 8~64 kbps;视频业务 384 kbps~2 Mbps;数据业务 64 kbps~2 Mbps	语音和视频类业务对实时性和可靠性要求较高

3 通信技术匹配算法构建

终端通信接入网通信技术与业务需求的匹配主

要从组网架构、实时性、安全性、可靠性、传输距离、传输带宽、成本、技术成熟度等性能指标展开,不同业务对通信性能指标的侧重呈现差异化,为给每一项业务匹配其最适合的通信技术,设计针对终端通

信接入网的业务匹配算法,算法分为主观部分和客观部分对属性集进行划分,最终实现通信技术的最优匹配,将其命名为基于主客观因素的通信技术最优匹配算法 (communication technology optical matching algorithm based on subjective and objective factors, CMSOF)。

3.1 主观因素

主观因素部分主要考虑偏好影响下通信技术的对比。设有业务集合 B , 属性集合 P , 通信技术集合 T , 某项通信技术定为 $T(j)$ 。针对某项业务 $B(i)$, 将业务偏好度较高的几项属性归入统一强集合(在业务角度需优先满足)记为 $P_{B(i)}^S$ ($P_{B(i)}^S \subseteq P$), 在强属性集中设置一项为该业务最看重的属性值, 定为 P_1 ($P_1 \in P_{B(i)}^S$); 将业务偏好度较低属性归入统一弱集合(在业务角度可一定程度降低要求)记为 $P_{B(i)}^W$ ($P_{B(i)}^W \subseteq P$), 且有 $P_{B(i)}^S \cap P_{B(i)}^W = \emptyset$ 。

通信技术 $T(j)$ 在任意属性 $p_1 \in P$ 上的归一化取值表示为 $nv_{B(i)}^j(p_1)$, 属性值的归一化是为保证不同单位和方向的电网通信属性的值均能转化为 $[0, 1]$ 区间内的取值, 由于电网通信属性中有正向属性和负向属性, 且各个属性值的度量单位不同, 需要通过归一化处理以便进行数据分析和业务等级度量。属性值归一化的具体方法:

$$nv_{B(i)}^j(p_1) = \begin{cases} \frac{v_{B(i)}^j(p_1) - v_{p_1}^{\min}}{v_{p_1}^{\max} - v_{p_1}^{\min}}, & v_{p_1}^{\max} \neq v_{p_1}^{\min} \\ 1, & v_{p_1}^{\max} = v_{p_1}^{\min} \end{cases} \quad (1)$$

$$nv_{B(i)}^j(p_1) = \begin{cases} \frac{v_{p_1}^{\max} - v_{B(i)}^j(p_1)}{v_{p_1}^{\max} - v_{p_1}^{\min}}, & v_{p_1}^{\max} \neq v_{p_1}^{\min} \\ 1, & v_{p_1}^{\max} = v_{p_1}^{\min} \end{cases} \quad (2)$$

其中, 式(1)用以求解正向属性, 式(2)用以求解负向属性, $v_{B(i)}^j(p_1)$ 为通信技术 $T(j)$ 在业务场景 $B(i)$ 背景下在属性 p_1 上的原始取值, 且有

$$v_{p_1}^{\max} = \max\{v_{B(i)}^j(p_1) \mid T(j) \in T\}$$

$$v_{p_1}^{\min} = \min\{v_{B(i)}^j(p_1) \mid T(j) \in T\}$$

对 $\forall p_1 \in P$, 令 $s_w(p_1)$ 为属性 p_1 的主观权重值, 对任意业务 $B(i)$ 主观权重值满足约束条件:

$$\begin{cases} \sum_{p_1 \in P} s_w(p_1) = 1 \\ \text{对 } \forall p_1 \in P_{B(i)}^S, \forall p_1' \in P_{B(i)}^W, \\ \text{有 } s_w(p_1) > s_w(p_1') \end{cases} \quad (3)$$

仅依靠式(3)的约束条件仍不足以确定每个属性的主观权重值, 为了简化计算, 假定强、弱属性分别具有同样的主观权重值, 而最偏好的属性 P_1 具有最高属性值, 则约束条件可扩展为

$$\sum_{p_1 \in P} s_w(p_1) = 1 \quad (4)$$

若 $p_1 = P_1, p_1' \in P_{B(i)}^S$, 且 $p_1 \neq p_1'$, 则有

$$s_w(p_1) = \alpha s_w(p_1'), \alpha > 1 \quad (5)$$

若 $p_1, p_1' \in P_{B(i)}^S$, 且 $p_1, p_1' \neq P_1$, 则有

$$s_w(p_1) = s_w(p_1') \quad (6)$$

若 $p_1, p_1' \in P_{B(i)}^W$, 则有

$$s_w(p_1) = s_w(p_1') \quad (7)$$

若 $p_1 \in P_{B(i)}^S, p_1' \in P_{B(i)}^W$, 且 $p_1 \neq P_1$, 则有

$$s_w(p_1) = \beta s_w(p_1'), \beta > 1 \quad (8)$$

式(4)~(8)中 p_1 和 p_1' 均为属性集中的某一属性值。

由式(5)~(8)可知, 若 $p_1 \in P_{B(i)}^W$, 则有

$$s_w(p_1) = \frac{1}{|P_{B(i)}^W| + \beta |P_{B(i)}^S - 1| + \alpha\beta} \quad (9)$$

若 $p_1 \in P_{B(i)}^S$ 且 $p_1 \neq P_1$, 则有

$$s_w(p_1) = \frac{\beta}{|P_{B(i)}^W| + \beta |P_{B(i)}^S - 1| + \alpha\beta} \quad (10)$$

若 $p_1 = P_1$, 则有

$$s_w(p_1) = \frac{\alpha\beta}{|P_{B(i)}^W| + \beta |P_{B(i)}^S - 1| + \alpha\beta} \quad (11)$$

式中 $|\cdot|$ 为集合内的元素个数; α 为该业务中最强偏好属性且相较于其他强偏好属性更重要的程度, α 越大, 则属性 P_1 对该业务的影响程度越显著; β 为强偏好属性比弱偏好属性更重要的程度, β 越大则强偏好属性集中的各项属性对该业务的影响程度越显著。参数 α 和 β 均可根据用户需求灵活调整。

得到所有属性的主观权重值 $s_w(p_1)$ 和通信技术 $T(j)$ 在任意属性 $p_1 \in P$ 上的归一化取值 $nv_{B(i)}^j(p_1)$ 后即可求得该项通信技术 $T(j)$ 在业务 $B(i)$ 中的主观度量值, 即

$$S_{ub_{B(i)}}^{T(j)} = \sum_{p_1 \in P} nv_{B(i)}^j(p_1) s_w(p_1) \quad (12)$$

3.2 客观因素

客观因素部分主要从数理统计的角度分析电网通信技术在电力应用场景中可充当角色的重要程度, 客观因素以不同属性对不同业务场景的划分能力为基础, 直观和准确地反映了不同通信技术本身

的可用性和适配性。基于不同通信属性的划分能力提出属性衡量度概念,引入粗糙集理论以计算其具体数值,最后将属性衡量度和不同通信技术在属性上的归一化取值可推导得出客观度量值。

为了对衡量度进行计算,引入粗糙理论集定义^[24],具体如下。

定义 1:信息系统 $I=(U,A,V,f)$,其中, U 为有限主体的非空集合, A 为属性的非空集合,对任意 $a \in A$, V_a 为属性 a 可供选择值的集合,且有 $V=\bigcup_{a \in A} V_a$, $f:U \times A \rightarrow V$ 为信息函数,对任意 $a \in A, u \in U$ 有 $f(u,a) \in V_a$ 。 $f(u,a)$ 可被简写为 $a(u)$,则信息系统 I 可被简写为 $I=(U,A)$ 。

定义 2:给定信息系统 $I=(U,A)$,对任意 $X \subseteq A$,定义不可分辨关系 I_X 如下:

$$I_X = \left\{ \begin{array}{l} (x,y) \in U \times U \mid \forall a \in X \\ f(x,a) = f(y,a) \end{array} \right.$$

其中,若 $(x,y) \in I_X$,则称 x 和 y 为 X 内的不可分辨对,即表示这 2 个值有相同属性值,关系 I_X 也可称为相关等价关系。而通过 X 形成的割集可表示为 U/I_X ,也可简写为 U/X ,即通过 I_X 划分的所有等价类。

定义 3:给定信息系统 $I=(U,A)$, $X \subseteq A$,定义相关等价关系 I_X 的颗粒尺寸为:

$$G(I_X) = |I_X| / |U^2| = |I_X| / |U|^2$$

其中, $G(I_X)$ 可简写为 $G(X)$,在一般情况有 $1/|U| \leq G(X) \leq 1$ 。 $G(X)$ 越小则表明其区分能力越强,即相关等价关系 I_X 可将集合 U 划分为更多的等价类。

定义 4:给定信息系统 $I=(U,A)$, $X \subseteq A$, $x \in A$, I_X 为集合 X 相关等价关系,定义 x 对 X 的重要性,即

$$S_X(x) = \frac{G(X) - G(X \cup \{x\})}{G(X)} = 1 - \frac{|I_{X \cup \{x\}}|}{|I_X|} \quad (13)$$

式(13)表明当 x 加入 X 后, I_X 可将集合 U 划分的等价类相交原 X 条件下的增加程度,一般情况有 $0 \leq S_X(x) \leq 1 - |I_{\{x\}}| / |U|^2$, $S_X(x)$ 的增加说明 x 对 X 的重要性增加。 $S_{\emptyset}(x)$ 为 x 区分论域 U 中不同主体的能力。

基于定义 1~4 可以推出属性衡量度的定义:在

信息系统 $I=(B,P)$ 中,对 $\forall p_1 \in P$ 有 p_1 的属性衡量度为其对业务集合 B 中不同业务的区分能力,即

$$M_{EAS}(p_1) = S_{\emptyset}(p_1) = 1 - |I_{\{p_1\}}| / |B|^2 \quad (14)$$

在信息系统 $I=(B,P)$ 中定义通信属性 $p_1(p_1 \in P)$ 的客观权重为

$$o_w(p_1) = M_{EAS}(p_1) / \sum_{p_1 \in P} M_{EAS}(p_1) \quad (15)$$

根据计算得到的所有客观权重值可求得通信技术 $T(j)$ 在业务 $B(i)$ 中的客观度量值,即

$$O_{bj_{B(i)}}^{T(j)} = \sum_{p_1 \in P} n v_{B(i)}^j(p_1) o_w(p_1) \quad (16)$$

3.3 通信技术定级函数

综合主观因素和客观因素,可通过综合效用函数对业务场景 $B(i)$ 下的不同通信技术进行定级排序,其排序函数:

$$S_{ort_{B(i)}}^{T(j)} = \delta S_{ub_{B(i)}}^{T(j)} + (1 - \delta) O_{bj_{B(i)}}^{T(j)} \quad (17)$$

其中,参数 $\delta \in [0,1]$ 是用于权衡主客观因素的偏好强度参数, δ 值越大则为该业务场景更看重主观偏好,反之则为更看重综合属性值的客观分布。通过对所有通信技术计算得到的 $S_{ort_{B(i)}}^{T(j)}$ 值进行排序,值最大的即为最适应业务场景 $B(i)$ 的通信技术。

3.4 业务通信技术匹配示例

以配电自动化三遥业务为例,用 CMSOF 算法对通信技术进行匹配排序。

3.4.1 主观因素

在计算主观因素时,配电自动化三遥业务以安全性为最高偏好属性,强属性集中包括实时性、可靠性、传输距离,弱属性集中包括带宽、组网架构、技术成熟度、成本。针对配电自动化三遥业务对业务的需求,得到几种技术的不同属性归一化属性值。

1)安全性。

安全性评估主要分析是否独立物理链路、是否采用多种安防机制、加密方式是否安全、是否存在被监听风险等,得到属性值如表 2 所示。

表 2 配自三遥安全性属性值

Table 2 The attribute value of security

技术	排序	属性值	技术	排序	属性值
EPON	1	1.00	1.8 G	4	0.75
工业以太网	2	1.00	230 M	3	0.75
中压 PLC	6	0.25	无线公网	5	0.50

2)实时性。

配电自动化三遥业务时延要求 ≤ 6 s(包括 2 次

主站到终端命令传输时间,2次终端到主站命令传输时间),得到属性值如表3所示。

表3 配自三遥实时性属性值

Table 3 The attribute value of real-time

技术	排序	属性值	技术	排序	属性值
EPON	1	1.0	1.8 G	4	0.75
工业以太网	2	0.9	230 M	3	0.70
中压 PLC	6	0.2	无线公网	5	0.50

3)可靠性。

配电自动化对终端月在线率、遥控成功率、遥信动作正确率等要求较高,均在95%以上,得到属性值如表4所示。

表4 配自三遥可靠性属性值

Table 4 The attribute value of reliability

技术	排序	属性值	技术	排序	属性值
EPON	1	1.00	1.8 G	4	0.75
工业以太网	2	1.00	230 M	3	0.75
中压 PLC	6	0.25	无线公网	5	0.50

4)传输距离。

主要考虑通信技术覆盖范围受电网公司自身把控的程度和传输的距离,得到属性值如表5所示。

表5 配自三遥传输距离属性值

Table 5 The attribute value of transmission distance

技术	排序	属性值	技术	排序	属性值
EPON	1	1.00	1.8 G	4	0.65
工业以太网	2	0.80	230 M	3	0.70
中压 PLC	6	0.25	无线公网	5	0.40

5)带宽。

按配电自动化单个终端的实时数据传输速率10.2 kbps进行匹配,得到属性值如表6所示。

表6 配自三遥带宽属性值

Table 6 The attribute value of bandwidth

技术	排序	属性值	技术	排序	属性值
EPON	6	0.125	1.8 G	4	0.500
工业以太网	5	0.250	230 M	3	0.625
中压 PLC	2	0.875	无线公网	1	1.000

6)组网架构。

配电自动化系统以地市为单位部署,主站位于地市调度中心,配电终端沿配电线路部署,终端与主站之间点对点双向通信。得到属性值如表7所示。

表7 配自三遥组网架构属性值

Table 7 The attribute value of networking architecture

技术	排序	属性值	技术	排序	属性值
EPON	2	0.75	1.8 G	3	0.50
工业以太网	2	0.75	230 M	3	0.50
中压 PLC	1	1.00	无线公网	4	0.25

7)技术成熟度。

技术成熟度分析产品是否成熟、是否有完整产业链、是否已部署使用,得出属性值如表8所示。

表8 配自三遥技术成熟度属性值

Table 8 The attribute value of technology maturity

技术	排序	属性值	技术	排序	属性值
EPON	2	0.83	1.8 G	5	0.33
工业以太网	3	0.70	230 M	6	0.17
中压 PLC	4	0.50	无线公网	1	1.00

8)成本。

通信系统总成本包括通信设备及配套材料费用、工程施工费用和运维费用3部分,测算得出的成本属性值如表9所示。

表9 配自三遥技术成本属性值

Table 9 The attribute value of technology cost

技术	排序	属性值	技术	排序	属性值
EPON	6	0.2	1.8 G	3	0.80
工业以太网	5	0.4	230 M	2	0.85
中压 PLC	4	0.6	无线公网	1	1.00

赋值 $\alpha=4, \beta=2$,求得 $s_w(p_1)=1/18$,进而求得不同通信技术在配电自动化三遥业务中的主观度量值 $S_{ub_{B(i)}}^{T(j)}$ 如表10所示。

表10 配自三遥通信技术主观度量值

Table 10 The subjective measure of communication technology

技术	排序	主观度量值	技术	排序	主观度量值
EPON	1	0.88	1.8 G	4	0.69
工业以太网	2	0.86	230 M	3	0.69
中压 PLC	6	0.35	无线公网	5	0.56

3.4.2 客观因素

计算不同属性的属性衡量度 $M_{EAS}(p_1)$ 如表11所示。

结合客观权重值和不同通信技术的归一化属性值可求得客观度量值 $O_{bj_{B(i)}}^{T(j)}$ 如表12所示。

表 11 配自三遥不同属性的属性衡量度及客观权重值

Table 11 The attribute measurement and objective weight of different attributes of distribution automation

属性	属性衡量度	客观权重值	属性	属性衡量度	客观权重值
安全	8.73	0.191	带宽	3.38	0.074
实时	7.67	0.168	组网	4.78	0.105
可靠	7.08	0.155	成熟	4.41	0.096
距离	6.55	0.143	成本	3.12	0.068

表 12 配自三遥通信技术客观度量值

Table 12 The objective measure of communication technology

技术	排序	客观度量值	技术	排序	客观度量值
EPON	1	0.84	1.8 G	3	0.65
工业以太网	2	0.80	230 M	4	0.65
中压 PLC	6	0.41	无线公网	5	0.58

3.4.3 定级排序

将前两步计算得到的主观度量值 $S_{ub}^{T(j)}$ 和客观度量值 $O_{bj}^{T(j)}$ 相结合,通过式(17)中的定级函数(赋值 $\delta = 0.5$)求得配电自动化三遥业务中的不同通信技术匹配排序,如表 13 所示。

表 13 配自三遥通信技术匹配排序

Table 13 Sort of the matching degree of communication technology

技术	排序	属性值	技术	排序	属性值
EPON	1	0.86	1.8 G	3	0.67
工业以太网	2	0.83	230 M	4	0.67
中压 PLC	6	0.38	无线公网	5	0.57

通过定级排序可知,综合考虑主客观因素最适合配电自动化三遥业务的通信技术是 EPON。

4 结语

该文对电力终端通信接入网的通信技术和业务做出对比分析,并设计了具有针对性的业务和技术的匹配算法,实现差异化需求的业务和通信技术的最优匹配,从而实现数据最优传输。CMSOF 算法的设计权衡了主观因素和客观因素的影响,全方位考虑了业务对通信性能的需求,为终端通信接入网通信技术的选择提供了科学依据。

参考文献:

[1] 曹惠彬. 国家电网公司“十二五”通信网规划综述[J]. 电力系统通信,2011,32(5):1-6.
CAO Bingzhen. The summary of "12th five-year" telecommunication network plan of SGCC[J]. Telecommunications for Electric Power System,2011,32(5):1-6.

[2] 赵丙镇,李伟良,王一蓉,等. 终端通信接入网建设[J]. 电力系统通信,2011,32(5):89-94.
ZHAO Bingzhen, LI Weiliang, WANG Yirong, et al. Brief analysis of the communication terminal access network construction[J]. Power System Communications, 2011,32(5): 89-94.

[3] 聂晓音,谢刚,李洋,等. 基于栈式相关性稀疏自编码的电力通信网故障诊断[J]. 电力系统保护与控制,2019,47(19):158-163.
NIE Xiaoyin, XIE Gang, LI Yang, et al. Fault diagnosis of power communication network based on stacked relational sparse autoencoder[J]. Power System Protection and Control,2019,47(19):158-163.

[4] 胡永红,张超,文一帆,等. 智能电网终端融合通信接入网切换策略[J]. 电测与仪表,2019,56(23):90-96.
HU Yonghong, ZHANG Chao, WEN Yifan, et al. Switching strategy of smart grid terminal fusion communication access network[J]. Electrical Measurement & Instrumentation,2019,56(23):90-96.

[5] 陆旭,李尧,张海全,等. 基于 SDN 架构的电力通信网络能耗动态调节[J]. 电网与清洁能源,2019,35(12):31-36+42.
LU Xu, LI Yao, ZHANG Haiquan, et al. Research on dynamic energy consumption regulation of power communication network based on SDN architecture [J]. Power System and Clean Energy,2019,35(12):31-36+42.

[6] 李岩,齐磊杰,刘云鹏. 具有公共屏蔽层的三芯中压电缆通信信道分析[J]. 高压电器,2020,56(9):101-106+113.
LI Yan, QI Leijie, LIU Yunpeng. Communication channel analysis of three-core medium-voltage cable with common shielding layer[J]. High Voltage Apparatus, 2020,56(9):101-106+113.

[7] 严鹏飞,李俊娥,周斌,等. 基于电力图形描述规范的智能变电站网络通信可视化方法研究[J]. 智慧电力,2020,48(8):91-97.
YAN Pengfei, Li June, ZHOU Bin, et al. Network communication visualization of smart substation based on graphic description specification for electric power system[J]. Smart Power,2020,48(8):91-97.

[8] 樊冰,郑陈熹,唐良瑞,等. 基于多属性决策的电力通信

- 网的节点重要度计算方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020,48(9):68-76.
- FAN Bing, ZHENG Chenxi, TANG Liangrui, et al. Node importance evaluation method of electric power communication network based on multi-attributes decision making[J]. Power System Protection and Control, 2020,48(9):68-76.
- [9] 余斌,尹项根,吴小忠,等. 输电线路在线监测的层次化通信网络规划模型[J]. 中国电力,2019,52(3):161-168.
- YU Bin, YIN Xianggen, WU Xiaozhong, et al. A planning model for hybrid hierarchical communication network of transmission line online monitoring[J]. Electric Power, 2019,52(3):161-168.
- [10] 马平,施晨霞,俞朝辉. 电力通信终端接入网建设和维护管理模式探讨[J]. 电力信息与通信技术, 2014, 12(5):132-135.
- MA Ping, SHI Chenxia, YU Zhaohui. Discussion on construction and maintenance management mode of electric power terminal communication access network[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2014,12(5):132-135.
- [11] 陆恣,周昊. 电力终端通信接入网风险分析与安全接入技术研究[J]. 通信技术, 2017,50(9):2067-2073.
- LU Wei, ZHOU Wei. Risk analysis and secure access technology of power terminal communication access network[J]. Communication Technology, 2017, 50(9):2067-2073.
- [12] 胡阳,丁晨阳,蒋苏明. 电力终端通信接入网通道安全技术分析[J]. 通讯世界, 2016(20):89.
- HU Yang, DING Chenyang, JIANG Suming. Analysis of channel security technology for power terminal communication access network[J]. Telecom World, 2016(20):89.
- [13] 权楠,雷煜卿,黄毕尧,等. 智能电网下的电力终端通信接入架构研究[J]. 电力系统通信, 2012,33(1):74-77.
- QUAN Nan, LEI Yiqing, HUANG Biyao, et al. Research on architecture of terminal communication access network in smart grid[J]. Telecommunications for Electric Power System, 2012,33(1):74-77.
- [14] 于希军,崔伟国,钟文涛. 智能电网下电力终端通信接入架构设计[J]. 中国新通信, 2015,17(21):124.
- YU Xijun, CUI Weiguo, ZHONG Wentao. Design of communication access architecture for power terminals under smart grid[J]. China New Telecommunications, 2015,17(21):124.
- [15] 孟凡博,赵宏昊,王杰. 电力终端通信接入网建设研究[J]. 电力系统通信, 2012,33(6):19-22.
- MENG Fanbo, ZHAO Hongwei, WANG Jie. Research on construction of electric power terminal communication access network[J]. Telecommunications for Electric Power System, 2012,33(6):19-22.
- [16] 江璟. 终端通信公共接入平台建设研究[J]. 智能电网, 2017,5(4):402-406.
- JIANG Jing. Research on the construction of common access platform of terminal communication access network[J]. Smart Grid, 2017,5(4):402-406.
- [17] 廖勤武. 终端通信接入网公共接入平台研究[J]. 电力信息与通信技术, 2016,14(11):93-97.
- LIAO Qinwu. Research on public platform for terminal communication access network[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2016, 14(11):93-97.
- [18] 孙圆圆. 智能电网中通信接入网技术的研究与应用[D]. 北京:华北电力大学, 2016.
- [19] 刘峰. 无源光网络技术在配电自动化系统中的应用[J]. 中国新通信, 2013,15(16):53-54.
- LIU Feng. Application of passive optical network technology in distribution automation system[J]. China New Telecommunications, 2013,15(16):53-54.
- [20] Q/GDW 1807—2012. 终端通信接入网工程典型设计规范[S].
- [21] 吴锴,宋兴旺,冯兆飞,等. 城市能源互联网中的无线技术应用研究[J]. 电力信息与通信技术, 2018, 16(2):89-96.
- WU Kai, SONG Xingwang, FENG Zhaofei, et al. Application research on the wireless technology in urban energy internet[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2018,16(2):89-96.
- [22] 李波,曹敏,胡万层,等. AMI通信网络中微功率无线通信的性能测试技术及系统研究[J]. 计算机测量与控制, 2015,23(2):385-388+391.
- LI Bo, CAO Min, HU Wanceng, et al. Research for micro-power wireless communication performance testing technology and system of AMI communication network[J]. Computer Measurement & Control, 2015, 23(2):385-388+391.
- [23] 赵静,苏光添. LoRa无线网络技术分析[J]. 移动通信, 2016,40(21):50-57.
- ZHAO Jing, SU Guangtian. Analysis on LoRa wireless network technology[J]. Mobile Communications, 2016, 40(21):50-57.
- [24] 李沛哲. 面向智能电网的无线通信技术研究[D]. 北京:北京邮电大学, 2018.