

[智能电网]

基于HPLC载波技术的低压台区智能管理单元设计与应用

文/国网北京石景山供电公司 王 闯 杨 景 张 涵

提出一种低压台区智能管理单元设计，该单元基于HPLC宽带电力线载波技术和边缘计算，在现有采集系统的基础上，通过改进HPLC通信单元硬件、扩展相关通信协议，将集中器的本地通信单元升级成台区智能管理单元，通过大数据算法，实现低压台区的本地网络拓扑识别、台区异常诊断、分支线损分析和防窃电分析等功能。

供电公司辖内大量低压供电台区，承担着工商业及居民的供电服务，为了适应新时期智能电网发展的要求，亟需提升配电台区的精细化及智能化管理水平，保证低压电网供电质量及其可靠、安全运行，满足经济发展的需求。目前，配电台区智能化建设及运行仍存在两个问题：即无法准确识别“变-线-户”关系；无法进行分路、分支的精准线损分析，缺少廉价的手段实现防窃电管理。

国外早在20世纪80年代就对低压台区智能化技术进行了探索和研究，整体上更偏向对低压配电设备本身进行改良，使其向智能化、小型化和多功能化的方向发展。目前，国外的低压台区智能化的发展仍是以电力线载波通信为基础，发展用电信息采集系统为主，台区内具有边缘计算能力的智能管理终端也未得到广泛应用，台区的精益化管控水平在过去较长一段时间内也未有质的提升。

由此可看出无论国内外，传统的低压台区管理手段均已经不能适应新时期智能电网发展的要求，迫切需要在原有用电信息采集系统的基础上，推动低压台区管理向智能化、深入应用的方向发展。同时，由于台区数据量的剧增和多元化，单依靠主站集中式处理的方式已经无法满足对海量数据的分析计算，故需引入边缘计算，通过减轻主站压力来实现台区本地边缘

计算和任务处理，这是国内外低压智能电网发展的必然选择。根据新时期智能电网的发展需求，针对上述提到的问题，设计了一种基于HPLC载波通信单元，具备边缘计算、大数据分析功能的台区智能管理单元。运用大数据的理念，全面采集和分析台区用户电流、电压和电能量等各类数据，运用大数据分析方法实现台区拓扑有效识别；开展台区用户线损异常在线监测及智能诊断技术研究，实现线损分析智能化；构建基于机器学习技术的各类用户负荷模型，有效支撑异常用户识别、窃电的准确查处。

HPLC技术概述

HPLC是一种高速宽带电力线载波通信技术，频率范围为0.7~12 MHz，相比窄带载波通信速率提升了数十倍，最高速率超过1 Mbit/s，是目前智能电网、能源管理等应用的主要通信手段。宽阔的频域使得HPLC技术具备传输速率高、实时性强、抗干扰能力优异和传输可靠率高的优势。近十年的时间内国网公司完成了4.7亿客户与电网的信息互联，HPLC技术已经成为本地物联通信的首选。

台区智能管理单元设计

在现有低压配电台区用电信息采集系统中，集

中器、电能表和采集器初始化后建立电力线通信网络，所有设备在通信网络中成功组网，依托HPLC等先进的通信技术，由集中器上的载波主模块（CCO）对台区所有电能表数据进行采集，并且可根据需要进行分钟级或秒级全台区高频采集，并将采集到的数据进行存储上传到主站系统。低压网络中现存的集中器仅具备数据存储和转发功能，数据分析处理均放在主站端执行。由于现有的集中器数量庞大，全部更换成具有边缘计算能力的台区智能终端将造成不容小视的资源浪费，同时更换过程需安装调试，存在费用高、影响采集业务等问题。

基于此原因，提出智能管理单元的设计，在标准集中器的HPLC主载波模块（CCO）中创新性地内嵌人工智能（AI）模组，AI模组中具备计算单元和存储单元，AI模组通过独立UART口和HPLC信道建立通信，获得AI计算所需的计量数据，基于这些计量数据建立大数据分析模型，分析结果通过CCO模块上送给标准集中器，并且推送给主站展示。台区智能管理单元作为边缘计算节点，承担多种原本由主站运算的工作。

AI模组主要由微控制器单元（MCU）、电源接口、存储器、蓝牙模组和串口接口等构成，如图1所示，其中主控MCU是AI模组的关键部件，负责模组运行与数据处理等工作，电源接口负责从CCO电路获取模组工作的3.3 V直流电压，存储器用于计量数据、负荷记录数据和事件记录数据等的存储，串口接口负责模组与CCO模块双向数据通信；蓝牙模组负责与外部调试工具和现场展示平台（PAD）通信。AI模组安装嵌入式操作系统，内部运行本地网络拓扑识别、分支线损分析、计量异常诊断和防窃电预警等各类App。

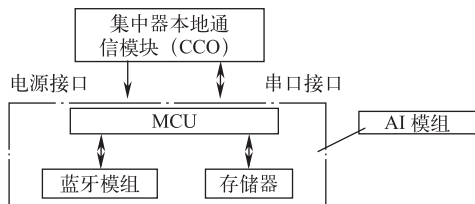


图1 硬件原理图

功能设计与实现方法

1. 高频同步数据采集方法

受制于低压台区载波通信网络复杂性，无法实

现电能表数据的实时同步采集传输，如采集电能表的冻结数据，又受限于电能表时钟准确性，无法保证采集数据同步，影响后续数据分析的正确性。因此，采用实时转冻结技术，由电能表中的HPLC载波模块定时采集实时数据。

在高速载波通信（HPLC）网络中，所有通信单元由网络协议要求已经同步到一个共用的网络基准时间（NTB），同时电能表通信模块具备存储内存，只需在通信模块增加存储曲线数据功能，即可使全网通信模块周期性同一时刻采集所属电能表实时数据，存储形成曲线数据，台区智能管理单元可直接从电能表端HPLC模块（STA）中获取历史曲线数据，该方式可有效提高曲线数据同步性和完整性，为后续业务应用提供可靠的数据支撑。15 min 负荷曲线数据采集的业务流程如图2所示。

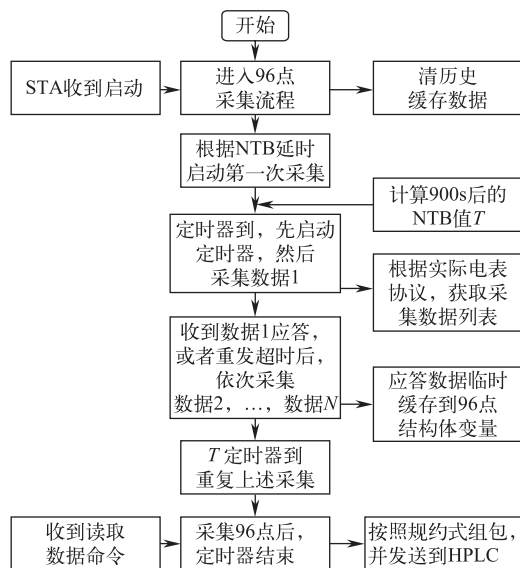


图2 数据采集运行流程

流程说明：

1) 高频实时数据采集。每天采集用户电能表96点实时用电数据，包括电压、电流和功率因数等信息；采集间隔为900 s；考虑现有HPLC模块的内存大小、信道条件，HPLC通信单元同时存储3天内的负荷曲线数据，之后清除最早一天的数据，腾出当天数据存储空间。

2) 同步数据采集由主站启动采集，台区智能管理单元收到采集命令后全网多次广播采集命令。电能表通信模块（STA）在收到采集命令后计算采集时间，在时间到后启动采集。台区智能管理单元

收到集中器的同步采集命令（不修改集中器，采集命令通过主站数据转发02F1中携带特殊645报文启动）后，获取当前的NTB时刻 T_1 ，根据 T_1 值来计算900 s后的NTB值 T_2 ，将 T_2 通过广播的方式发送给全网STA。为了保证广播的有效性，每间隔3 s，连续发送10次广播。为保证时钟的准确性，每次广播前都需要重新计算 T_2 。

3) STA接收到台区智能管理单元的HPLC同步广播采集报文后，获取当前的NTB时刻 T_1 和采集时刻 T_2 ，计算需要等待的时间 $T_3=T_2-T_1$ 。在等待 T_3 时间后，开始进行数据采集。

2. 本地网络拓扑识别

通过 HPLC 模块的台区识别和相位识别功能，可以判断用户电能表所在的台区和相位，尚需实现“分支-表箱-户表”关系的识别，才能完成供电台区网络全拓扑识别。根据低压供电负荷特征，采用K-means聚类算法，结合电量平衡、电压相关和阻抗分析等数据分析算法实现台区供电网络拓扑识别。

1) 实现原理。在同一个表箱下同一相上所有电能表共用同一段电线，因此从总表到这些户表形成的低压压降近似相等；不同表箱下由于电线长度有区别，且电线上的电流也不相同，因此在有负载的情况下，总表到不同表箱之间的压降存在差异。所以，在同一表箱下电压具备相关性，而不同表箱间电压差异较大。于是可以通过对不同表箱间电压数据进行聚类分析，从而达到区分表箱的目的。

2) 依照上述相同供电分支下电能表压降变化趋势一致的基本原理，迭代计算各个电能表之间的压降变化相关系数，聚类识别满足相关性阈值要求的电能表分组单元，获取基于HPLC高频同步采集数据计算识别的供电拓扑分支结构。如图3所示，根据电压曲线可识别出4个分支线路。

3) 结合低压台区基础档案信息、层级关联分析，通过对现有营销系统内的用户地址信息进行地址层级结构拆分，获取楼宇、单元、楼层和室号的层级信息，对获取的拆分结构建立物理地址的树形结构，即楼宇→单元→楼层→室号。

基于电能表通信地址建立物理层级结构与供电拓扑结构关联关系，匹配识别供电拓扑的层级关系，建立基于供电拓扑的层级结构，进而实现台区的全拓扑展示。

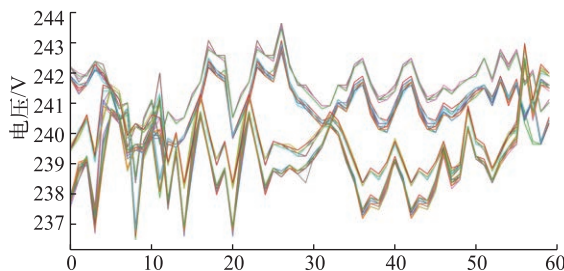


图3 电压时序曲线

3. 台区智能诊断

通过台区AI管理单元对数据的统计、分析以及数据挖掘等操作，从台区电能表时钟异常统计、疑似窃电统计、户变异常统计和计量异常统计四个维度对台区进行台区健康智能诊断。

(1) 电能表时钟异常统计

1) 时钟超差分布占比。根据用户设定的阈值，统计台区内超过时钟阈值的电能表数量以及台区整体的占比情况，方便用户了解当前台区内超差占比情况。

2) 时钟分布统计。通过实时招测台区内各个电能表时钟情况，与台区智能管理单元的时钟进行比较，判断各个电能表的时钟超差情况，并对时钟偏差进行超差分布统计，方便用户掌握各个台区内的电能表超差分布详情，优先处理超差严重的电能表，实现台区的精益化管理要求。

3) 时钟超差列表。对满足时钟超差判断结果的电能表进行超差详情展示，列表包括电能表通信地址、电能表类型和偏差时长（绝对值）。

(2) 疑似窃电统计

1) 疑似窃电列表。台区AI管理单元通过采集电能表的电压、电流和相位情况，辅助上报事件，构建模型识别疑似窃电行为，展示台区内疑似窃电的分析情况，主要为台区内疑似窃电电能表数量及其占比情况，分析目标电能表的通信地址、电能表类型、异常类型和最近异常时间等信息。

2) 疑似窃电详情。展现疑似窃电用户的档案信息及相关的信息，主要是电能表开表盖信息、用户异常日期的示值曲线信息以及电流曲线信息，比较直观地反映线路变更等方式导致电能表异常的用电异常情况。

(3) 户变异常统计

1) 户变异常列表。包括电能表地址、电能表类

型、异常类型、异常描述以及模块的最近分析日期。

2) 分类展示。统计当前台区内存在户变异常总数、各类户变异常小类的占比及其数量统计情况。包括错误台区电能表, 本台区低压智能管理单元内存在相邻台区内电能表的档案信息, 并不属于当前台区的电表; 未知电能表, 轮询本台区内发现了未在集中器内留存的电能表地址; 未识别电能表, 本台区内存在个别电能表地址, 未在本地及周围台区内轮询到。

(4) 计量异常统计

1) 计量异常分布。统计台区内的各类计量异常的统计数量及其台区电能表占比情况。计量异常主要包括错接线类、事件类、电压类、示值类、电流类和误差类共六大类。

2) 计量异常分析明细。展示台区内模块分析的疑似窃电异常明细结果, 包括电能表地址、电能表类型、异常类型和最近异常分析日期。

4. 台区线损分析

台区线损分析主要包含台区月线损曲线与用电量分析、台区日线损曲线与电量分析及台区功率线损曲线分析三部分。

(1) 月线损曲线与用电量分析

分析展示月线损统计状况, 当前分析周期内(月初1号至当前日期)线损统计结果, 包括月均日线损率、当月供电量、当月售电量、日供电量、日售电量、统计日线损率曲线和修正日线损率曲线等。其中统计日线损率, 按照规约招测结果计算原始日冻结的线损计算结果。通过台区智能管理单元的低延时招测功能, 招测同时间日冻结计算线损结果, 修正日线损率。

(2) 日线损曲线与用电量分析

分析展示台区的电能表96时刻点线损统计状况, 包含当前分析周期内(00:00至当前时刻)线损统计结果, 包括日均时刻线损率、当日供电量、当日售电量、时刻点供电量、时刻点售电量和统计时刻点线损率曲线等。

(3) 日功率线损曲线分析

分析展示台区的电能表96时刻点功率线损统计状况, 图例包含当前分析周期内(00:00至当前时刻)功率线损统计结果, 包括日均功率线损率、日均供电功率、日均用电总功率、时刻点供电功率和时刻点用电功率等。

(4) 台区精准线损分析

台区AI管理单元具备基于HPLC的微秒级时钟同步功能, 并同步全网所有STA高准确度定时采集数据, 解决了电能表时钟误差、电能表数据缺失对主站线损统计影响。

常规电量线损曲线因总表TA较大, 曲线电量统计会出现负损或者波动较大情况, 因此引入功率线损分析, 对全台区瞬时功率进行分析, 较准确分析台区线损波动规律。

采用供售电的电量线损和功率线损双维度同步分析, 更精确分析高线损时段, 为线损异常定位提供依据。实现全网电能表日线损96点的曲线, 并可实现更高密度监控曲线。

应用实践

低压台区智能管理单元在某供电分公司进行了应用实践。在高层和多层小区, 对基础数据进行高频采样及数据分析, 较准确识别出表箱分支拓扑关系。实现全台区供电拓扑识别后, 利用窃电模型, 实现了台区窃电用户、窃电行为时刻准确定位。结合分支监测装置(LTU), 实现了分支、分相线损和台区黑户稽查等。从该台区智能管理单元实际情况出发, 为线损的治理提供更优质的数据支撑, 为低压配电网的可视化、全量采集、精准研判、实时管控和智能决策提供更优手段, 提升电网的精益化管理水平。

结束语

利用低压台区智能管理单元的边缘计算功能, 结合HPLC采集特性, 实现本地拓扑计算识别、台区异常诊断和线损分析等功能。在多个试点应用之后, 台区用电情况也从原先的不可控趋于稳定, 效果得到了多方的认可。该设备不仅是技术的革新, 更是管理思维的提升和管理理念的创新, 使得低压电网运行更安全, 管理更精益, 服务更优质。

下一步的工作是多收集台区数据, 并进行多种典型台区数据分析和算法优化, 建立台区综合特征库, 为技术应用推广提供更好的数据支持。优化分支识别算法, 为台区的精细化管理、低压配电网的可视化、全量采集、精准研判、实时管控和智能决策提供更优手段。EA

(收稿日期: 2021-09-22)