

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.191150

# 基于 HPLC 的智能抄表技术 在客户侧泛在电力物联网中的研究及应用

王鸿奎<sup>1</sup>, 唐如意<sup>2</sup>, 吴一敌<sup>2</sup>, 孙冲<sup>1</sup>, 李飞<sup>1</sup>, 高波<sup>1</sup>

(1. 国网河北省电力有限公司电力科学研究院, 河北 石家庄 050021;

2. 国网河北省电力有限公司, 河北 石家庄 050021)

**摘要:** 随着人工智能、物联网、通信技术的发展革新, 电网形态不断向着智能化、信息泛化的方向变革, 更能适应泛在电力物联网建设需求与客户侧实时互动性业务的 HPLC 通信技术应运而生。通过分析 HPLC 技术特点以及电网客户侧典型业务应用需求, 提出了基于 HPLC 的低压用电设备电压监测方法、停电事件类型研判方法、电能表错误接线识别方法。通过改进 HPLC 通信单元硬件电路、扩展相关通信协议, 实现了基于 HPLC 的智能抄表技术的深化应用。对高层居民小区和城乡结合部等典型应用场景下的测试实例进行了论述分析, 验证了方法的有效性和先进性, 为电网营销、调度、运检等专业提供广泛的业务支撑能力。

**关键词:** 电力物联网; HPLC; OFDM; 停电故障定位; 台区串扰; 相序判别

## Research and application of smart meter reading technology based on HPLC in customer side universal power internet of things

WANG Hongxi<sup>1</sup>, TANG Ruyi<sup>2</sup>, WU Yidi<sup>2</sup>, SUN Chong<sup>1</sup>, LI Fei<sup>1</sup>, GAO Bo<sup>1</sup>

(1. State Grid Hebei Electric Power Research Institute, Shijiazhuang 050021, China;

2. State Grid Hebei Electric Power Co., Ltd., Shijiazhuang 050021, China)

**Abstract:** With the development of artificial intelligence, internet of things and communication technology, the form of power grid is changing towards intelligence and information generalization. In order to better meet the needs of ubiquitous power internet of things construction and client-side real-time interactive business, HPLC communication technology comes into being. By analyzing the characteristics of HPLC and the typical application of client-side power grid, this paper provides the methods of low voltage user voltage real-time monitoring, power outage event classification active report and meter error connection identification. The hardware circuit of HPLC has improved. And the communication protocol has expanded. It realizes the deepening application of intelligent meter reading technology based on HPLC. Further, the test cases in typical residential areas such as high-rise apartment and urban-rural fringe are discussed and analyzed. The effectiveness and advancement of the methods are verified. It provides a wide range of business support for marketing, scheduling, operation and maintenance of power system.

This work is supported by Science and Technology Project of the Headquarter of State Grid Corporation of China (No. 5400-201925177A) "Research on the Key Technologies of Situational Awareness and Intelligent Warning of Electric Larceny on the Customer Side".

**Key words:** universal power internet of things; HPLC; OFDM; power failure fault location; station crosstalk; phase sequence discrimination

## 0 引言

随着人工智能、物联网、通信技术的飞速发展,

电网形态也随之变化, 建设能源互联网是顺应能源革命和数字革命融合发展趋势的根本途径<sup>[1]</sup>。国网公司提出了建设泛在电力物联网(SG-eIoT), 覆盖了能源电力的“云、网、端”, 结构上分为感知层、网络层、平台层、应用层<sup>[2]</sup>。

电力线是最普及、覆盖范围最为广阔的一种物

**基金项目:** 国家电网公司总部科技项目资助(5400-201925177A)  
“客户侧窃电态势感知及智能预警关键技术研究”

理媒体, 电力载波通信(PLC)采用电力线作为通信介质, 不需进行通信线路建设和通信线路维护, 具有其他通信无法比拟的优势, 是智能电网、智能用电抄表领域最理想的信息传输载体<sup>[3-4]</sup>。窄带载波通信作为曾经应用最广泛的本地通信技术, 在自动化抄表领域做出了不可磨灭的贡献<sup>[5-8]</sup>。但随着近几年智能电网建设的深入, AMI 架构的建立, 电力公司新业务不断演进, 需要实现高速、实时、双向快速通信, 方能满足新业务需求<sup>[9]</sup>。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, 应用的 HPLC(高速电力线载波通信)技术已经成为本地物联通讯的首选, 是泛在电力物联网重要的构成部分, 也是感知层和网络层中接入规模量最大的设备。

## 1 HPLC 技术概述

HPLC 是一种高速电力线载波通信技术, 具有实施简单、维护方便的特点, 且相较于窄带载波具有高速、互联的技术优势, 因而已成为智能电网、能源管理、智慧家庭、光伏发电、电动汽车充电等应用的主要通信手段<sup>[10]</sup>。HPLC 的总体特点与窄带载波类似, 但其通信频率范围为 0.5~12 MHz, 通信速率可达 1 Mbit/s 以上<sup>[11]</sup>, 特点是速率高、实时性强、抗干扰能力强、传输可靠率高、可实现芯片级互联互通<sup>[12]</sup>。随着用电信息数据量的逐渐增加和通信实时性要求的提高, HPLC 技术将更能适应现阶段数据采集和通信要求<sup>[13]</sup>。

### 1.1 信道访问和带宽管理技术

低压台区的规模在典型环境下一般为 300 个节点左右, 但用户规模较大的小区也不在少数, 最大甚至达 1 000 个节点以上。HPLC 通信信道为共享信道<sup>[14]</sup>, 其信道访问和带宽管理技术解决了大规模节点共享信道的宽带管理问题<sup>[15-17]</sup>, 有效提高了通信带宽利用率。

### 1.2 自动快速组网技术

针对各种台区典型环境特点和规模差异, 自动快速组网技术解决了自动组网、网络实时维护以及组网效率问题, 提升了载波通信的效率及可靠性<sup>[18-19]</sup>。

### 1.3 白名单技术

通过用户表档案定义白名单, 可支持台区稳定运行, 不跨台区交叉入网, 能够很好地解决多台区串扰严重影响集中器载波模块的通信质量, 导致抄表成功率低的问题。

### 1.4 并发抄读技术

并发抄读技术的核心思想是集中器一次性发起针对多个电表的抄读, 这些数据将同时到达这些电表, 这样每块电表消耗在通信模块接口上的时间,

就相当于均分在所有并发的电表上了。使用并发方式, 现场平均抄读延时为 100 ms, 换算成一个 300 户规模的台区, 每个电表以抄读 3 个数据量计算, 平均 180 s 即可完成抄读。

## 1.5 全网升级技术

随着业务的扩展, 可能会对现有系统提出新的应用需求。窄带方案下, 现场模块升级需要将模块摘除, 升级后再装回, 其繁杂的操作方式使得模块现场升级完全无法实施。HPLC 全网升级技术可有效提升模块程序升级效率, 升级命令及数据下发给集中器载波模块, 并由集中器载波模块来进行后续自动的操作, 无需人员干预和值守<sup>[20]</sup>。

## 2 基于 HPLC 的智能电能表非计量功能典型应用

随着泛在电力物联网建设的推进, 电网智能化水平不断提升、管理精益化要求日益凸显, 对于已经实现“全覆盖、全采集”的智能电能表提出了更高的应用要求。本文利用 HPLC 通信技术特点, 针对具体业务场景构建应用模型, 并扩展相关通信协议, 实现了低压用户电压实时监测、低压停电事件分类主动上报、电能表错误接线识别等丰富的智能电表非计量功能应用, 为电网营销、调度、运检等各专业提供了广泛的业务支撑能力<sup>[21]</sup>。

### 2.1 基于 HPLC 的低压用电设备电压监测方法

低压用户电压质量是供电服务“最后一公里”问题的矛盾核心<sup>[22]</sup>, 配变台区直接与用户相连, 是电力传输的关键节点。目前, 电压质量问题发生的主要区域基本都集中在台区及所属的用户端。加强对台区低压用户电压质量的监测和管理对于提高供电质量、改善用户体验、提升供电企业社会形象具有举足轻重的作用<sup>[23]</sup>。

#### 2.1.1 可反馈低压用电设备电压波动的过零点检测方法

电力线过零检测电路在电力载波通信、功率设备和家电接入切换等领域都有广泛应用。现有的过零点检测电路均只是检测交流市电的过零点, 提供了工频周期信息和相位信息。本文采用的过零检测电路芯片, 通过检测输入端电压得到电力线过零检测信号, 提供给应用控制系统, 当输入端电压大于阈值时, 输出端呈现高阻态。内部迟滞处理使芯片更容易地将电力线上的毛刺滤除, 有效防止电力线上噪声导致的错误过零检测信号, 并可以实现额外提供市电峰值变化信息特征, 从而可以进一步分析市电波动情况, 形成台区特征信息。系统硬件设计原理如图 1 所示。

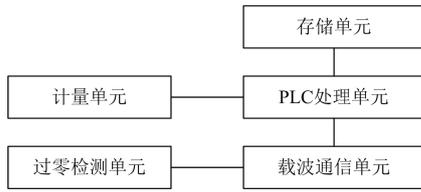


图 1 系统硬件设计原理框图

Fig. 1 Block diagram of system hardware design

系统硬件构成主要由 PLC 处理单元、载波通信单元、计量单元、数据存储单元、过零检测单元等部分组成。其 PLC 处理单元负责设备运行与数据处理等工作，HPLC 通信单元负责宽带载波 STA 与路

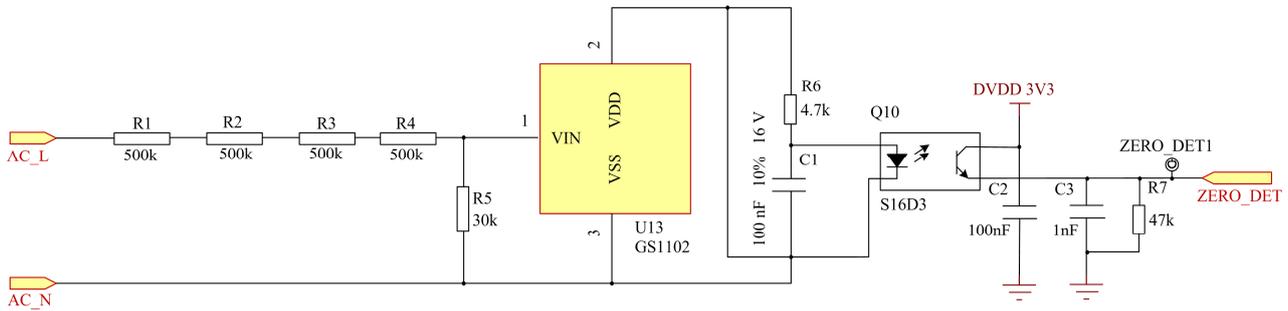


图 2 电力线过零检测电路原理框图

Fig. 2 Block diagram of power line zero-crossing detection circuit

通过调节 R5，可以在靠近过零点附近产生过零点信号，从而可以提供交流电的工频周期和相位信息。但由于 R1-R5 是分压关系，因此当交流电的某个周期电压峰值发生变化，可以在过零点上产生向左或者向右的偏移，当市电峰值变大，过零点会向右偏移，峰值电压变小，会向左偏移。通过计算前后过零点的相对位置，可以得到相邻两个工频周期内电压波动信息，从而可以用于电网用电质量、台区识别等应用。

### 2.2 基于 HPLC 的停电事件类型研判方法

传统低压配电网停电故障抢修，供电公司无法及时得知停电信息，只能在客户报修后开展抢修工作<sup>[24]</sup>，存在被动等待、处理效率低、客户投诉风险大和安全隐患多等问题。利用 HPLC 通信技术，实现低压停电事件主动上报，并自动研判台区停电、断相、分支停电、单户停电等类型，可有效支撑配电故障抢修，提高抢修响应效率，提升用电客户服务满意度<sup>[25]</sup>。

#### 2.2.1 停电事件上报原理

基于 HPLC 的高速通信机制，电能表断电后通过从节点模块(STA)在规定时间内上报停电信息。

在 HPLC 通信模块中增加超级电容，不需对电能表进行改动，超级电容可以实现在小体积下具备法拉级的电容量，解决了模块掉电情况下的供电问

由设备宽带载波 CCO 模块通信，计量单元负责数据测量与采集，数据存储单元负责计量数据、负荷记录数据、事件记录数据等数据的存储，过零检测单元可实现实取用电设备工频周期信息和相位信息，并额外提供市电峰值变化信息特征。

#### 2.1.2 电压波动获取方法

本方案芯片内部集成了芯片和光耦供电所需电源的整流二极管，输入端集成稳压二极管。只需外接一个电容即可由输入端为过零检测电路进行供电，整体解决方案所需外围器件较少。本文提出的电力线过零检测电路原理如图 2 所示。

题。集中器路由模块(CCO)和电能表通信模块(STA)均配备超级电容，超级电容给通信模块供电时切断充电回路。在停电故障发生第一时间，带有超级电容的 STA 进行放电，载波信号在开关处进行耦合，将信号传输到 CCO，再传输到集中器。当停电发生时，通信模块在待机状态下，能够维持供电时长不低于 60 s。集中器断电后，备用电池继续维持对远程通信模块供电，确保能够接收主节点模块上报的信息，并上报电能表的停电事件。

#### 2.2.2 停电事件分类判断功能

分类型停电事件上报功能支持以下停电事件类型的判断，并上报主站：整台区停电事件、台区分支停电、台区断相、单户停电。

##### 1) 停电事件类型研判规则

“检测是否有工频过零信号”是检测停电的主要条件，如果连续 3 个工频周期没有检测到过零信号和 12 V 跌落到 9.5 V 则判断为停电。判断是电表停电还是因误插拔引起的停电还需要对“检测模块是否插入”这一条件进行判断，只有当模块满足以上条件，才产生停电事件。

##### 2) 整台区停电事件

整台区停电事件定义：当集中器产生终端自身停电事件后，30 s 内接收到本台区上报的 5 条以上电能表停电事件，即生成整台区停电事件(正常且有

效的终端停电事件)。

实现对台区停电状况的监测, 需要以终端停电事件记录信息为基础, 结合台区内电能表掉电信息进行综合研判。台区停电综合研判, 实现流程图如图 3 所示。

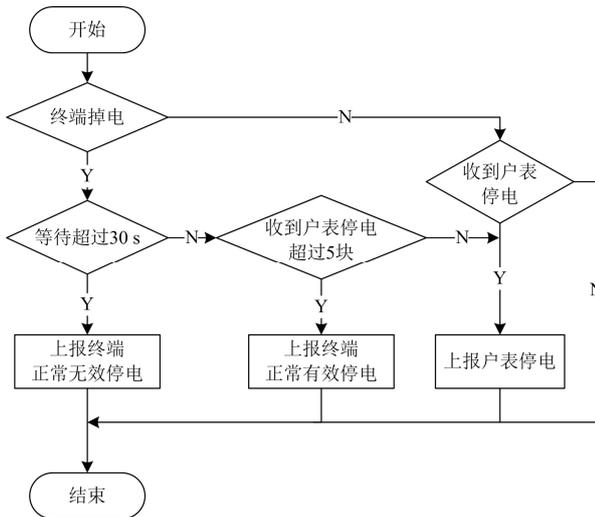


图 3 台区停电综合研判流程图

Fig. 3 Judgment flow diagram of transformer blackouts

### 3) 台区断相停电事件

在三相供电系统中, 当某相电压低于设定的断相事件电压触发上限, 同时该相电流小于设定的断相事件电流触发下限, 且持续时间大于设定的断相事件判定延时时间, 此种工况称为断相。

(1) 台区断相停电判断规则: 以台区为维度, 结合终端断相事件、户表停电信息及其相位信息综合研判。主站接收到台区上报的第一条户表停电信息后开始计时, 5 min 内若主站收到该台区同相位下 10 只以上(含 10 只)户表上报的停电事件, 且该时间范围内同时收到终端断相事件, 则主站判断该台区断相停电, 并记录断相信息。

(2) 终端断相判断规则: 当终端识别到断相后, 应具备产生电能表断相事件, 并上报主站的能力。

### 4) 台区分支停电事件

台区分支停电判断规则: 以台区为维度, 结合终端断相事件、户表停电信息及其相位信息综合研判。主站接收到台区上报的第一条户表停电信息后开始计时, 5 min 内若主站收到该台区同相位下 10 只以上(含 10 只)户表上报的停电事件, 且该时间范围内未收到终端断相事件, 则主站判断该台区分支停电, 并记录分支信息。

## 2.3 基于 HPLC 的电能表错误接线识别方法

造成电能计量装置计量错误的最重要原因之一

就是电能表错误接线<sup>[26]</sup>。利用 HPLC 技术识别电能表相序, 能及时发现现场表计错误接线, 指导电力计量专业人员开展现场消缺, 避免由于三相表错接线造成的电量损失。

### 2.3.1 技术方案

本方案采用过零同步传输技术以及三相并发技术。三相交流市电每个物理信道上的时间基准相隔 3.3 ms, 按照三相各自的时间基准并发载波信号, 三相信号在不同时间隙里进行传输, 载波模块根据各相过零时刻对比集中器命令下发时刻, 准确识别载波模块(电能表)的供电相位。

对于目前三相表模块硬件上只具备单相过零检测电路的设计方案, 通过软件识别的方式实现三相电能表相序识别, 以 A 相作为相位识别基准(A 相接零电路), 结合三相智能电能表正、逆相序信息, 可判断出三相表的六种接线类型。

### 2.3.2 通信协议扩展

扩展集中器本地通信模块接口协议内容, 增加查询相线信息, 其上行报文数据单元格式如表 1。

表 1 上行报文数据单元格式

Table 1 Data unit format of uplink message

数据内容	数据格式	字节数
节点总数量	BIN	2
节点起始序号	BIN	2
本次应答的节点数量 $n$	BIN	1
节点 1 地址	BIN	6
节点 1 相位信息	BIN	2
⋮	⋮	⋮
节点 $n$ 地址	BIN	6
节点 $n$ 相位信息	BIN	2

数据内容的含义说明如下:

a) 节点序号从 1 开始, 其中 1 为主节点, 后续为从节点。

b) 每次查询必须从序号 1 起始查询。

c) 节点相位信息如表 2 所示。

表 2 节点相位信息表

Table 2 Nodes phase information

D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
三相表相序类型		接线异常		电表类型		相位信息	
D15	D14	D13	D12	D11	D10	D09	D08
0-备用							

D2~D0: 相位信息, 按位依次表示电表实际相位 C 相、B 相、A 相; 置“1”有效, 置“0”无效。

D3: 电表类型, 0 表示单相表、1 表示三相表(主节点此项填 0)。

D4: 接线异常, 0 表示从节点线路无异常或不支持识别功能, 1H 表示从节点线路有异常。当电能表为单相供电时, 表示零火线反接; 当电能表为三相供电时, 表示三相表相序异常。

D7~D5: 三相表相序类型, 如表 3。

表 3 三相相序类型表

Table 3 Three-phase sequence type

D7	D6	D5	相序表示
0	0	0	ABC(正常相序)
0	0	1	ACB
0	1	0	BAC
0	1	1	BCA
1	0	0	CAB
1	0	1	CBA
1	1	0	保留
1	1	1	保留

注: 主节点相位 D0-D2 都置 1。

### 3 应用实例分析

国网公司经过多次实验室和现场测试论证, 发布了 HPLC 互联互通标准, 期间多次在河北地区开展现场试点验证。基于 HPLC 技术的智能电表深化应用, 为电网多业务部门的数据高频采集、反窃电、计量异常管理、用电异常管理、停电故障抢修、台区户变档案管理、三相不平衡管理、实时费控工作提供了强大支撑功能<sup>[27]</sup>。

#### 3.1 典型应用场景说明

HPLC 通信技术及智能电能表非计量功能推广应用阶段, 河北多个地区开展了现场应用试点工作, 本文就其中几个典型工况环境的试点验证结果进行总结和分析。

##### 3.1.1 高层居民小区工况

HPLC 技术在河北现场试点验证最典型的环境之一为新建高层、高密度小区, 本文选取石家庄某新建高层小区为例。

该现场试点为典型高层、多台区工况。每天峰谷用电明显, 高峰时用电负荷大, 低谷负荷轻载, 电梯、水泵是其载波通信的主要噪声源。每个配电箱到单元楼走的是埋地电缆, 单元楼侧有 1 个空开, 台区半径较小, 电缆长度约 200 m。整个小区有 2 个台区, 各近 500 支电表左右。在原通信方案下, 电量日冻结数据一次采集成功率为 80%。

##### 3.1.2 城乡结合部工况

本文选取的石家庄城郊某台区为典型的城乡结合部工况环境, 具有通信传输距离较长及包含显著

时变特性动力电等特点。

该台区装有 315 kVA 变压器一台, 集中器安装在变压器处。总表数 305 块, 其中单相表 268 块, 三相表 37 块, 三相动力户多(养殖场, 小工厂), 负载重。现场均为铝制架空线, 配电箱到台区边缘用户总体线路较长, 但相邻节点之间的距离没有超过 100 m 的, 而走线复杂, 分支节点较多。

### 3.2 测试结果分析

#### 3.2.1 高层居民小区案例

本文选取的石家庄某新建高层小区包含 2 个供电台区, 2 个台区共计安装 1 100 块智能电能表, 全部更换为 HPLC 通信模块, 数据采集通道均经由集中器 4G 模块连接到用电信息采集主站。现场测试数据如表 4 所示。

通过采集主站召测试点台区的日冻结数据, 一次采集成功率均达到 100%。测试过程中, 2 个台区相互之间串扰强烈, 在强串扰的环境下, 多台变方案运行正常, 每个台区在 2~3 min 内就可以完成 4 个数据量的一轮抄收, 抄表成功率达到 100%。电压监测、停电上报、相位识别等非计量功能应用效果良好。与原窄带载波通信方案下测试数据进行对比分析, 原窄带通信方案无法解决多台区间的串扰问题, 采集成功率受串扰影响较严重。而 HPLC 通信方案可通过多网络协调机制, 有效解决多台区串扰问题。

表 4 高层小区试点测试数据

Table 4 High-rise building test data

测试地点	功能点	子项	测试结果
石家庄 XXX 小区	抄表成功率	日冻结成功率	100%
		点抄成功率	100%
		费控成功率	100%
	抄表延时平均	点抄	370 ms
		并发抄表	75 ms
	组网性能	全网组网	660 s
		新模块入网	23 s
	升级	全网升级	100%(1200s)
		点对点升级	30 s
	稳定性	死机	无
	电压监测	电压监测率	100%
		异常上报准确率	100%
	停电上报	单户上报准确率	100%
		分支/断相上报准确率	测试期间未出现此种故障
		整台区上报准确率	100%
	相位识别	单相表相位识别率	100%
三相表相序识别率		100%	
错误接线识别率		100%	

### 3.2.2 城乡结合部案例

在此工况下选取的试点验证台区为石家庄城郊某台区, 现场试点测试数据如表 5 所示。

表 5 城郊台区试点测试数据

Table 5 Suburban pilot station test data

测试地点	功能点	子项	测试结果
城郊 XXX 台区	抄表成功率	日冻结成功率	100%
		点抄成功率	100%
		费控成功率	100%
	抄表延时平均	点抄	498 ms
		并发抄表	99 ms
	组网性能	全网组网	1 020 s
		新模块入网	25 s
	升级	全网升级	100%(2 700 s)
		点对点升级	32 s
	稳定性	死机	无
	电压监测	电压监测率	100%
		异常上报准确率	100%
	停电上报	单户上报准确率	100%
		分支/断相上报 准确率	测试期间未出 现此种故障
		整台区上报准确率	100%
相位识别	单相表相位识别率	100%	
	三相表相序识别率	100%	
	错误接线识别率	98%	

该台区共有 268 块单相表、37 块三相表, 全部入网成功。抄表成功率、抄表延时、组网测试和升级测试, 均满足现场验收指标。集中器上行通过 4G 模块成功连接到采集系统主站, 经统计, 电量日冻结成功率达到 100%。电压监测、停电上报、相位识别等非计量功能在本台区的应用效果良好。

## 4 结论

本文就 HPLC 技术在自动化智能抄表、低压用户电压质量实时监测、停电事件分类主动上报、三相错误接线识别等领域的应用场景及测试实例进行了论述分析。

HPLC 通信方案, 经过近 2~3 年在河北南部电网部署现场试点, 高频采集与非计量功能应用方面已初见成效。通过试点验证, HPLC 技术完全满足电力信息采集发展趋势, 抄收数据更快速、更便捷、更稳定, 支持双向高速互动, 为电力公司在业务拓展领域提供了良好的本地信道。同时, 由于抗扰性强、传输距离远、通信能力强、传输速度快等特点, 可以更好地支持用电采集系统智能电网新业务实施, 为提高供电可靠性、支撑配网主动抢修等相关

业务提供及时准确的数据信息, 提高服务客户的响应速度, 减少客户投诉, 进一步提升整体供电服务水平。

## 参考文献

- [1] 马钊, 周孝信, 尚宇炜, 等. 能源互联网概念、关键技术及发展模式探索[J]. 电网技术, 2015, 39(11): 3014-3022.  
MA Zhao, ZHOU Xiaoxin, SHANG Yuwei, et al. Exploring the concept, key technologies and development model of energy internet[J]. Power System Technology, 2015, 39(11): 3014-3022.
- [2] 吴朝阳. 基于宽带载波和物联网技术的低压集抄系统研究[J]. 电工技术, 2018(22): 63-64.  
WU Zhaoyang. Study of low voltage collection system based on broadband carrier and internet of things technology[J]. Electric Engineering, 2018(22): 63-64.
- [3] GONZÁLEZ-SOTRES L, MATEO C, FRÍAS P, et al. Replicability analysis of PLC PRIME networks for smart metering applications[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(2): 827-835.
- [4] 董建坡. 基于电力线宽带载波及用电信息采集系统的多能源表计采集的研究[J]. 供用电, 2016, 33(11): 11-16.  
DONG Jianpo. Research on the multi-energy meter based on broadband power line carrier and electricity consumption system[J]. Distribution & Utilization, 2016, 33(11): 11-16.
- [5] BEN-SHIMOL Y, GREENBERG S, DANILCHENKO K. Application-layer approach for efficient smart meter reading in low-voltage PLC networks[J]. IEEE Transactions on Communications, 2018, 66(9): 4249-4258.
- [6] 杜新纲. 用电信息采集通信技术及应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 2015.
- [7] 王斌, 姜元建. 低压电力线载波通信技术在用电信息采集系统中的应用[J]. 电测与仪表, 2010, 47(7): 44-46.  
WANG Bin, JIANG Yuanjian. Power line carrier communication technology and its applications in electric energy data acquisition[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2010, 47(7): 44-46.
- [8] 曹旺斌, 尹成群, 谢志远, 等. 宽带 MIMO-PLC 随机参数信道建模与特性[J]. 电网技术, 2017, 41(3): 1029-1034.  
CAO Wangbin, YIN Chengqun, XIE Zhiyuan, et al. Modeling and analysis of broadband MIMO-PLC random parameter channels[J]. Power System Technology, 2017, 41(3): 1029-1034.
- [9] 马钊, 周孝信, 尚宇炜, 等. 未来配电系统形态及发展趋势[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(6): 1289-1298.  
MA Zhao, ZHOU Xiaoxin, SHANG Yuwei, et al. Form and development trend of future distribution system[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(6): 1289-1298.
- [10] 陶鹏, 王鹏, 张艳. 不同通信方式对用电信息采集系

- 统采集成功率的影响分析[J]. 河北电力技术, 2017(1): 3-4.
- TAO Peng, WANG Peng, ZHANG Yan. Various communication methods influence on acquisition success rate about electric energy data acquisition system[J]. Hebei Electric Power, 2017(1): 3-4.
- [11] 迟海明. 宽带电力线载波通信系统的 FFT 实现[J]. 电子测量技术, 2018, 41(22): 5-9.
- CHI Haiming. Implementation of FFT for broadband power line communication system[J]. Electronic Measurement Technology, 2018, 41(22): 5-9.
- [12] 周春良. 电力专用宽带电力线载波通信芯片的设计与应用[J]. 信息技术与网络安全, 2017, 36(11): 34-36, 43.
- ZHOU Chunliang. Design and application of broadband PLC chip special for electric power[J]. Information Technology and Network Security, 2017, 36(11): 34-36, 43.
- [13] 薛晨. 中压配电网电力线载波通信系统自适应频点选择算法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(6): 24-29.
- XUE Chen. Adaptive frequency selection algorithm for power line carrier communication system in medium voltage distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(6): 24-29.
- [14] 李松浓. 低压电力线载波通信信道衰减特性测量与分析[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(4): 99-106.
- LI Songnong. Measurement and research on attenuation characteristics of low voltage power line communication channel[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(4): 99-106.
- [15] SIVANEASAN B, SO P. L., GUNAWAN E. A new routing protocol for PLC-based AMR systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(4): 2613-2620.
- [16] 陈宝靖. 基于正交频分复用技术的电力线通信网络研究[J]. 自动化技术与应用, 2019(3): 69-73.
- CHEN Baojing. Research on power line communication network based on OFDM transmission technology[J]. Techniques of Automation and Applications, 2019(3): 69-73.
- [17] 曹旺斌. 多输入多输出宽带电力线载波通信信道模型研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(4): 1136-1142.
- CAO Wangbin. Research on broadband MIMO power line communications model[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(4): 1136-1142.
- [18] 陈皓勇. 基于 LPWAN 的泛在电力物联网[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(8): 1-8.
- CHEN Haoyong. Ubiquitous power internet of things based on LPWAN[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(8): 1-8.
- [19] 曹旺斌, 杨蓉, 尹成群. 宽带电力线通信动态子载波分配算法研究[J]. 电测与仪表, 2018, 55(16): 47-50.
- CAO Wangbin, YANG Rong, YIN Chengqun. Research on dynamic subcarrier allocation in broadband power line communication[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2018, 55(16): 47-50.
- [20] 王洪勉, 孙慧, 郑利斌, 等. 泛在电力物联网智联单元设计与实现[J]. 供用电, 2019, 36(6): 5-9, 28.
- WANG Hongmian, SUN Hui, ZHENG Libin, et al. Design and implementation of wisdom unit in the ubiquitous internet of things in electricity[J]. Distribution & Utilization, 2019, 36(6): 5-9, 28.
- [21] 胡昌斌, 何威. 宽带电力载波技术在智能用电系统的应用[J]. 实验室研究与探索, 2016, 35(4): 47-51.
- HU Changbin, HE Wei. Research on broadband power line carrier in the application of smart power utilization system[J]. Research and Exploration in Laboratory, 2016, 35(4): 47-51.
- [22] 刘宣, 刘志康. 基于宽带载波技术的集抄系统中传输延时预测方法[J]. 现代电子技术, 2018, 41(6): 79-81, 86.
- LIU Xuan, LIU Zhikang. Method of transmission delay prediction for centralized meter reading system based on wideband carrier technology[J]. Modern Electronics Technique, 2018, 41(6): 79-81, 86.
- [23] 谭晨, 方恒福, 马群. 基于区间算法的配变台区电压质量评估方法研究[J]. 供用电, 2017, 34(11): 25-36.
- TAN Chen, FANG Hengfu, MA Qun. Study on voltage quality assessment of substation distribution system based on interval algorithm[J]. Distribution & Utilization, 2017, 34(11): 25-36.
- [24] 唐伟宁. 智能电能表停电信息主动上报技术研究[J]. 吉林电力, 2018, 46(5): 21-33.
- TANG Weining. Research on initiative reporting technology of power failure information of smart meter[J]. Jilin Electric Power, 2018, 46(5): 21-33.
- [25] 邵泽华. 水、电、燃气、热四表集抄的信息运行方式[J]. 煤气与热力, 2016(11): 136-138.
- SHAO Zehua. Information operation mode for centralized water, electricity, gas heat meters reading[J]. GAS & HEAT, 2016(11): 136-138.
- [26] 陈霄, 周玉. 新型三相三线电能表错接线快速判别方法研究[J]. 电测与仪表, 2014, 31(13): 5-8.
- CHEN Xiao, ZHOU Yu. Study on the rapid error connections discriminating method of the new three-phase and three-wire measuring device[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2014, 31(13): 5-8.
- [27] 邱志辉. 基于 HPLC 通信模块的智能电表深化应用研究[J]. 江西电力, 2018(10): 25-29.
- QIU Zhihui. Research on the application of intelligent meter based on HPLC communication module[J]. Jiangxi Electric Power, 2018(10): 25-29.

收稿日期: 2019-09-20; 修回日期: 2019-12-11

作者简介:

王鸿奎(1986—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 工程师, 研究方向为用电信息采集及智能量测。E-mail: down\_in\_river@163.com

(编辑 姜新丽)