

# 低压电力线载波通信组网路由的设计与实现

## Design and Implementation of Network Routing for Low Voltage Power Line Carrier Communication

潘莹月 姜明明 吴修权 高丽娜

Yingyue Pan Mingming Jiang Xiuquan Wu Lina Gao

山东农业工程学院 中国·山东 济南 250100

Shandong Agriculture and Engineering University, Jinan, Shandong, 250100, China

**摘要:** 近年来,中国低压电力线载波通信技术进入了迅速发展期,这一技术的广泛应用,带来了较高的社会效益和经济效益。目前,使用低压电力线网络进行通信仍存在很多亟须解决的问题,如噪声高、接入点阻抗特性复杂及信号传输过程中存在较大衰减等。论文介绍了低压电力载波通信组网路由的相关概述,阐述了低压电力线载波通信特点,设计并实现了低压电力线载波通信组网路由,以期为相关人员提供一定参考。

**Abstract:** In recent years, China's low-voltage power line carrier communication technology has entered a rapid development period. The widespread application of this technology has brought high social and economic benefits. At present, there are still many urgent problems to be solved when using low-voltage power line networks for communication, such as high noise, complex impedance characteristics of access points, and significant attenuation during signal transmission. This paper introduces the relevant overview of low-voltage power line carrier communication network routing, elaborates on the characteristics of low-voltage power line carrier communication, designs and implements low-voltage power line carrier communication network routing, in order to provide some reference for relevant personnel.

**关键词:** 低压; 电力线载波通信; 组网路由; 设计与实现

**Keywords:** low voltage; power line carrier communication; networking routing; design and implementation

**DOI:** 10.12346/peti.v5i2.7996

## 1 引言

中国低压电力线载波网络环境复杂,具有很强的时变性和很大的不确定性,相较于中压电力线载波网络而言,低压电力线载波按照一定物理拓扑图进行组网路由具有很大的挑战性。论文在深入分析了低压电力线载波通信特点后,对低压电力线载波通信组网路由的设计和实现进行了实验,结果表明可以满足当下电力线载波通信的需要。

## 2 低压电力线载波通信组网路由相关概述

### 2.1 低压电力线载波通信背景及意义

电力线载波通信是通过电力线传输信息,由于其充分利用现成的电力网络资源,有成本低、建设周期短、速度快的

特点,在电力通信领域得到了广泛应用。如今,信息技术日新月异,改变了人们的生活方式,提高了人们的生活水平。居民用电需求日益剧增,电力行业迅猛发展以满足社会的需要。现代电网的规模越来越大、结构愈加复杂,因此目前面临最主要的问题是如何实现按需配电、按需发电,为了实现这一目标如何对网络结构进行优化和调整,在此背景下出现了智能电网技术。

然而,智能电网的基础和核心是通信技术。近年来,电力线载波通信技术不断发展,较其他通信技术而言有明显的技术优势,得到了广泛应用。电力线网络是我国覆盖面积最广的网络,存在于所有有电的地方,利用普遍且现成的电力线网络进行通信,不用再建设新的通信网络,降低了企业成

【作者简介】潘莹月(1986-),女,中国山东曹县人,硕士,讲师,从事电气工程及其自动化研究。

本,同时也不同面对通信网络不易维护的问题。

## 2.2 低压电力线载波通信研究现状

### 2.2.1 国外低压电力线载波通信的发展概况

最先开始研究电力线载波通信技术的是欧美等发达国家,当时为了远程调度和生产监控,采用 PSK 和 FSK 等窄带载波通信技术通过高压电力线网络来传输控制信号,由于通信协议还不够完善,也没有统一的通信标准,因此这一技术仅限于小范围应用,直到 20 世纪 50 年代通信标准相继制定、通信协议不断完善,电力线载波通信技术被广泛应用于各行业和领域。

### 2.2.2 国内低压电力线载波通信的发展概况

中国对低压电力线载波通信技术的研究相较于欧美等发达国家,虽然起步较晚,但最近几年因国家的大力支持,中国低压电力线载波通信技术发展迅速。中国低压电力线网络的特点是覆盖面积广、线路严重老化、接入电器种类繁多和用户数量大,电力线网络结构和环境相对复杂<sup>[1]</sup>,从国外引进的通信产品不能很好地适用于中国的低压电力线网络,因此中国还要加大对电力线载波通信技术的研究,通过自主研发生产适用于中国特有的电力线网络的通信产品。

## 3 低压电力线载波通信特点

### 3.1 信道环境

中国低压电力线通信环境:

①衰减大,通信效果不佳。中国电力线设计的最初目的是传输电力,并非作为通信介质,因此电力线通信效果没有专门用于通信的光纤、同轴电缆和双绞线的通信效果好,并且因为电力线自身特性在传输信息时会有较大的衰减。

②不同的电力线材质,通信效果差别也很大。中国电力网络建设存在较大的时间跨度,使用铜制电缆、铝制电缆等多种物理介质,而不同的物理介质,传输信号能力存在较大差别。

③网络建设形式多样化。中国跨经纬度范围广,地形复杂,国土面积大,经济发展不平衡,因此多种网络建设形式并存,在人口密度小的农村区域多使用铝制架空线,在人口密度大的城市小区多采用铜制电缆,对于不同的布网方式,需要采用相对有效的方案以保证低压电力线通信的效果和可靠性。

④用户数量庞大,接网设备种类繁多。我国电网是个开放的网络,由于使用者数量庞大,网络中接入了各种各样的用电设备,而这些用电设备都是干扰源,在一定程度上会影响低压电力线载波通信效果及可靠性。

从通信信道的衰减性、信道的阻抗特性和信道的干扰程度三个评价依据方面分析我国低压电力通信环境有以下特点:

①输入阻抗特性复杂。依据传输理论和通信原理,低压电力线载波通信效果最佳的条件是所装电力线网的负载阻

抗和电力线载波通信设备内部阻抗相互匹配。通常情况下,输入阻抗是设备在电力线接入点的阻抗,其中阻抗会受接入负载的影响,由于用电设备的开启和断开的确定性导致配电网的阻抗特性相对复杂。一般来说,白天具有较小的电力线网络阻抗特性,下午 5 点后到晚上 11 点,随着居民用电增加,电力线网络阻抗特性会发生剧烈的变动。因此在电力线网络任一位置都做到阻抗和载波通信设备的内部阻抗相匹配是一件非常不容易的事情,复杂的输入阻抗特性增加了载波通信设备电路设计的难度。

②信号衰减大。在低压电力线传输信号过程中,信号的传输效果会受到电力线物理结构和信号传输距离两方面的影响。有研究表明,同一信号在不同的传输距离下有不同的衰减程度,且距离越短,衰减程度越轻<sup>[2]</sup>;受用电负载接入的影响,同一电力线不同位置和同一电力线同一位置的不同时间的衰减情况不同,造成衰减情况不均匀的因素还有湿度、温度等因素;造成信号在传输过程中衰减最主要的原因还是信号的自身频率,当传输信号的频率越高,衰减情况越严重。

③噪声干扰强。低压电力线网络具有较强的开放性,范围广且结构复杂,任何一个位置都可以作为用电负载接入点,这些负载的接入都会产生一定程度的噪声干扰,从而影响通信效果和质量。另外,部分厂家的一些电器设备不符合相关规范,这些不合规设备一旦接入电网会产生噪声进而严重污染电力线载波通信的通信质量,以上这些噪声都属于人工噪声,一般影响电力线载波通信质量的主要因素大多是人工噪声,除此之外,也有极小概率的自然噪声。

### 3.2 电力线通信标准

电力线通信标准覆盖多个层次,侧重点各不相同且不同标准之间互相交叉,错综复杂。很多组织和学者对相关标准化展开了研究,但因通信标准采用了多种底层技术且这些技术存在较大差异,将多个规范整合成一个通用且兼容的标准并非易事。下面介绍几个常用的通信标准:

① HomePlug, 2000 年,索尼等十几家公司共同发起,正式成立“家庭插电联盟组织”,该组织的主要工作是制定互联互通的通信标准和规范,成为首个电力线载波通信标准组织。在 2001 年该组织发布了第一个电力线通信标准: HomePlug 1.0, 后续十年间,不断制定并发布了覆盖全部电力通信领域和适用于各种需求、场景的标准、规范,逐渐形成了一套完整的通信技术标准体系,其中 HomePlug 规范的主要内容见表 1。

表 1 HomePlug 规范

| 版本                  | 规范内容           |
|---------------------|----------------|
| HomePlug 1.0/AV/AV2 | 规范家庭内的宽带连接     |
| HomePlug BPL        | 规范宽带电力线接入      |
| HomePlug C&C        | 规范窄带控制应用的家庭自动化 |

② PRIME, 该标准的主要工作是规范 MAC 层和 PHY 层,用于解决电网的计量系统问题。PRIME 规范使用了树形的

组网结构,以根节点设备作为中心控制设备,叶子节点或中继节点是终端设备,终端设备需要主动发起请求,经由中心控制设备注册成功后才能成为连接状态。

③ IEEE P1901,该标准解决了不同标准不兼容的问题,实现了不同通信设备之间的互通互联,具有频谱利用率高、抗窄带噪声能力强、外泄漏低等优点。

## 4 组网路由方案设计

### 4.1 总体思路

结合当下实际需求,随着居民用电量日益增加,电网集抄系统对通信的可靠性和实时性提出了更高的要求,这使组网路由方案面临新的挑战,本系统使用分布式路由机制,实现每个节点自动维护、寻找通信路径。方案的主要思路是:集中器模块和终端节点之间的通信路径需要每一个终端节点自动寻找并建立与集中器模块的通信路径。终端节点通过向邻居节点发送探测帧,掌握附近节点详细情况,如果不能直接和集中器通信,则依据预设准则和邻居节点信息,选择上级中继节点,终端节点可能需要经过多个中继节点转发数据才能和集中器建立一条完成通信路径,本方案最大深度为15级。

### 4.2 方案详述

#### 4.2.1 初始化组网

初始组网由集中器统一控制,每个终端节点自动发起,由远到近,逐级收敛,从而实现组网。同时,使用了空分复用策略和DISCOVERY消息机制来提升组网的效率。首先终端节点开启后,每隔一定时间向邻居节点发送DISCOVERY帧,通过发送多次消息帧,每个节点都获得了邻居节点信息并计算和记录接受频率和通道质量;其次集中器启动,发送包含应答门限的BEACON消息,符合条件的终端节点向集中器发送包含邻居信息的BEACON RESPONSE应答消息,集中器受到应答返回确认消息,经过一段时间,集中器收不到应答,进入下个步骤;再次划定冲突域,为冲突的节点和不同的节点分别分配不同的和相同的时隙;最后集中器通过第一层组网消息,为第二层所有节点分配时隙,不断重复这个过程,直到组网成功。

#### 4.2.2 新节点入网

网络组建结束后,集中器会每隔一段时间发送一次BEACON消息用来检测是否有新节点入网,如果检测到有新节点入网,向合适节点发送BEACON\_RESPONSE消息,收到该消息的所有节点向集中器发送REQUEST消息,集中器发送CONFIRM消息,所有转发该消息的节点进行路由表更新,当目的节点和新节点关联成功后,新节点顺利接入网络。

#### 4.2.3 动态路由维护

由于通信质量会受到很多外界因素的影响,网络组建完成后需要一直对其进行维护。因此,网络中每个节点都会定

期评估路由,始终使用最优中继以确保通信质量。每个终端节点选择最优中继的依据是已记录的所有邻居节点的通信情况,其中主要考虑两点:第一是总的路由跳数,节点层级越高,跳数增加,相应会增加延时;第二是通信路径节点之间最小通信成功率,因为通信最差的那一跳直接决定了整个通信质量。当节点发现更优中继,向集中器发送消息实现路由表、网络拓扑结构的更新。考虑突发性因素致使通信中断的情况,补充了多路径机制来确保通信的实时性。

## 5 组网路由方案测试

### 5.1 测试环境介绍

为了更贴近现实情况,在实验室搭建测试环境拥有满规格节点且这些节点分布在不同的表架上,电力线长度衰减效果通过衰减器来模拟<sup>[1]</sup>,同时接入相关设备来模拟外界噪声因素,可验证受外界因素影响的路由的适应能力,从而验证方案的可行性。

### 5.2 硬件设计

在硬件设计上,分别使用3.3V和12V电源供电,中央控制单元用于运行整个软件系统。集中器、电表和本模块之间使用UART进行数据交互,以头端节点作为网络核心,完成认证节点、管理网络的任务,使用以太网口连接调试工具和头端模块,实现配置参数下发、抄表相关数据信息和网络拓扑结构获取,进而维护全部网络。

### 5.3 实验室测试结果

经过组网测试,对网络通信质量和业务性能进行了验证,足以满足电网的实际需要,进而也验证了组网路由方案的可行性。对于现网测试运行需要尽可能覆盖所有使用场景,在多种工况条件、多样的信道情况下,现有的运行情况都满足国网的相关标准和要求。

## 6 总结

一般来说,低压电力线载波通信大多数的应用场景对实时性要求不高,但这些场景的结构相对复杂且没有统一的物理拓扑结构,论文通过仿真实验对loral和电力载波进行了组网通信,实现了数据采集、控制、显示及客户端与中台之间的数据传输,进而实现了中台对客户端的数据检测、控制及预警等功能。未来的研究重点是组网和网络匹配的优化,以期为中国低压电力线载波通信技术的发展提供相关参考。

## 参考文献

- [1] 强亚倩.适配社会延伸业务的宽带电力线通信组网研究[D].北京:华北电力大学(北京),2021.
- [2] 陈子璇.配电网电力线载波通信组网方法研究[D].保定:华北电力大学,2021.
- [3] 陈浩.配电网电力线载波通信网络匹配优化与组网方法[D].保定:华北电力大学,2021.