

电力计量系统中低压载波通信抗干扰性能研究

张倩 田卓璐

呼和浩特供电公司 内蒙古呼和浩特 010000

【摘要】针对电力计量系统中低压载波通信输入阻抗、信号衰减及噪声干扰等特性，系统性研究其干扰机理，通过硬件结构、扩频通信、程序优化的设计，增强低压载波通信抗干扰性能，并对其性能仿真验证。结果表明，该方案通信成功率100%，误码率 $6.76 \times 10^{-7} \sim 2.40 \times 10^{-2}$ ，不同干扰源通信成功率 $\geq 95\%$ ，满足电力计量系统抗干扰要求，增强了系统可靠性。

【关键词】电力计量系统；低压载波通信；抗干扰性能

Research on Anti-Interference Performance of Low-Voltage Carrier Communication in Electric Power Metering System

Zhang Qian Tian Zhuolu

Hohhot Power Supply Company Hohhot, Inner Mongolia 010000

【Abstract】 Aiming at the characteristics such as input impedance, signal attenuation and noise interference of low-voltage carrier communication in the power metering system, the interference mechanism is systematically studied. Through the design of hardware structure, spread spectrum communication and program optimization, the anti-interference performance of low-voltage carrier communication is enhanced, and its performance is simulated and verified. The results show that the communication success rate of this scheme is 100%, the bit error rate is 6.76×10^{-7} to 2.40×10^{-2} , and the communication success rate of different interference sources is $\geq 95\%$. It meets the anti-interference requirements of the power metering system and enhances the reliability of the system.

【Key words】 Electric Power Metering system Low-voltage carrier communication Anti-interference performance

前言:

低压电力线载波通信(LVPLC, Low Voltage Power Line Carrier Communication)是以电力线为主要传输媒介,实现信息交换与数据传递,多用于电力计量系统中,形成电力网,准确采集各终端用户用电情况。但是, LVPLC 运行中,属于非规则信号传输,容易受各种因素干扰,存在噪声干扰强、负载多、信道衰减大等特性,难以保证计量系统数据准确性。因此,在电力计量系统中,应当深入研究 LVPLC 干扰机理,优化其抗干扰性能,从而提高系统传输可靠性。

1 低压载波通信干扰机理

1.1 输入阻抗

LVPLC 输入阻抗是通信重要参数,可影响信号耦合效率,特别是载波耦合电路、特性阻抗之间相匹配,能提高能量传输效率^[1]。但是,电力计量系统中,次级内阻随信号频率变化不断变化,或是受网络结构、导线特性影响,阻抗各有不同。

1.2 信号衰减

低压电力线自身阻抗较为稳定,主要是电力线并联负载,特别是调整系统功率的电容影响其衰减特性^[2]。电力计量系统通信中,衰减特性导致电力计量系统降低了接收信号电平,导致接收端难以接收信息,需增加发射功率,克服信号衰减。

1.3 噪声干扰

LVPLC 背景噪声属于高斯离散型,受通讯线路介质温度影响,伴随介质温度提高随之增大。以性质干扰而言,可将其分为周期性脉冲干扰、周期性连续干扰、突发性干扰与时不变连续干扰等,干扰强度与频率不同时刻均有差异,存在多变形,需提高其自适应力,对电力计量系统运行造成挑战^[3]。

2 电力计量系统中低压载波通信抗干扰设计

2.1 硬件结构设计

在 LVPLC 以调制、解调载波信号为核心,选用 PL3105 专用通信芯片,指令周期 1T,采取 PQFP 封装,9.6MHz 晶

振,内部集成载波通信模块,使得扩频、解扩时能够以内部电路直接实现。而载波收发电路,需考虑其抗干扰性,具体如下:

第一,功率放大与整形滤波。芯片管脚载波调制信号输出幅值较小,需采取功率放大器放大信号,进而与电力线耦合。考虑发射电压对发射功率具有直接影响,能够提高电源幅值,选用 12V 电压^[4]。并采取 PVP 复合管(Polyvinyl Chloride and Polyurethane Composite Pipe),增加晶体管电流放大系数,吸收低压尖峰干扰,减少电网谐波污染。

第二,接收电路。隔离发送、接收电路,需安装滤波器进行滤波,避免谐波对数据接收造成干扰,提高载波通信灵敏度。该系统采取无源滤波器,与谐振回路进行并联,围绕扩频信号对其设计,避免尖峰信号破坏接收电路。

第三,耦合电路。载波信号以耦合电路作为输入/出通路,能够发送信号至电力线,也能接收信号向通信板耦合^[5]。瞬态一致二极管使用 P6KE30CA,双向钳位最大 30V,需做好电路浪涌保护,以防电流突然增大影响后级电路。

2.2 扩频通信技术

扩频通信(SSC, Spread Spectrum Communication)是扩展频谱进而传输的方式,可对独立码序进行编码、调制,不破坏传输数据^[6]。该通信抗干扰性强,以香农信道容量对其描述。如下:

$$C = W \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) \quad (1)$$

其中, C 是信息传输速率, bit/s; N 是噪声功率, W; S 是信号功率, W; W 是信号带宽, Hz。信噪比 ≤ 0.1 时,需增加系统传输信息速率,或增加一定带宽,保证信息速率无差错传输。以直接序列扩频可准确将信源、扩频码序列等,采取恰当调制模式发送信号频谱,便于接收端按照相同扩频码还原信息,原理见图 2。DSSS 即便在高斯噪声干扰下,信号相关性也十分理想,满足通信抗干扰要求^[73]。

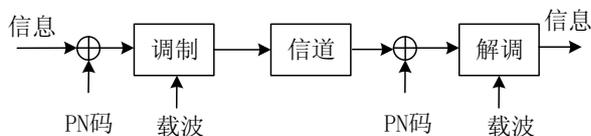


图 2 直接序列扩频原理

电力计量系统通信中,以扩频通信方式设置伪随机码,对传输数据进行调制。具体流程如下:

(1) 生成 m 序列。M 级线性反馈移位最长寄存器 2^m-1 周期,可产生码序列最长是 $N=2^m-1$ 。以此确定本源多项式,构造 m 序列移位寄存器,确定 m 序列码长度 15 位。

(2) 通信同步。发送、接收段采取同步技术,保证信号

相位、频率一致性,避免电力计量系统出现异常。以伪随机码同步,接收机同步扩频序列前,搜索接收信号,不断滑动本地序列码,确保发射机、接收机码序列处于相同扩频码内^[8]。

(3) 精确同步。同步跟踪根据 PL3105 芯片要求,采取数字信号处理技术进行同步,设置延迟锁定环电路,将接收伪码、超前伪码相关性相加,获得“S”曲线,过零点则是伪码同步点^[9]。

2.3 软件优化设计

在电力计量系统 LVPLC 运行中,将系统初始化,清理寄存器与串口缓冲区等,以此设置载波模式,使其能够准确接收指示灯、数据,上传数据至电脑。程序依次检查串口中断、载波接收中断等,如有载波数据,将其输入载波缓冲区;串口数据按照协议取出,完成数据发送。

在串口通信中,PC 机作为通信发起端、目的端等,利用 RS-232 串行口发送数据至载波通信模块,接收扩频信号对其解调,解调后数据向 PC 机传输。此时,PC 机、单片进串行通信,上位机为 PC 机,下位机为单片机,利用单片机对任务、数据等独立控制、处理、传输等,完成数据通信任务。此过程中,PC 机应设置串行参数,按照协议约定,发送数据,使其能够显示出来,可设置 2400bps 波特率。而端口设置参数后,打开串口,发送数据,自动发送至数据区。

在载波通信中,在 PL3105 初始化后,设置工作状态寄存器,准确控制接收门限、通信速率,注意读写时序之间的配合。还要设置其收发状态,适当开放终端,便于接收方工作,进而让发送方接收,否则容易丢失数据。同时,通讯程序设计中,明确载波收发模式,使得上位机数据接收后,采取透明转发方式传输数据至载波信道,数据量较大且程序运行稳定,可借助中断程序,转移部分数据至缓冲器内。在载波发送中,每隔 2ms 产生 1 次载波同步信号,由 CPU 检测,将发送数据传输至相应引脚;载波接收中,接扩有效数据存锁至引脚,生成载波同步信号,确定发送/接收时序图,完成通信传输。

3 电力计量系统中低压载波通信抗干扰性能分析

3.1 载波信号波形

该系统采取示波器测试 LVPLC 扩频载波信号波形,从 PL3105 芯片输出载波信号,波形是 0~5V 方波,涵盖丰富谐波,通过功率放大电路对其测试,确定输出波形保持不变。

通过带通滤波处理,可获得选频特性良好信号波形,对比芯片波形输出前后较为吻合,验证正常传输时,其抗干扰能力较强。

3.2 通讯可靠性

在载波通信模块测试时,需考虑其通信正常与否,设置实验板,插入 220V 电网,2 板连接时,火线接火线,零线接零线,上位机串口连接实验板,以串口对控制数据进行发送。并配置打印机、PC 机等,测试 1000 次通信情况,测试 5 次,失败次数为 0,成功率 100%。并开展误码率测试,衡量系统传输可靠性,确定不同距离误码情况,见表 1。可见,误码率随距离增大不断增加,需控制系统通信距离。

表 1 不同通信距离误码率

发送比特数/bytes	布线长度/m	接收失误比特数/bytes	误码率
3000000	50	2	6.76×10^{-7}
750000	100	4	5.23×10^{-6}
550000	150	5	9.18×10^{-6}
85000	200	3	3.35×10^{-5}
65000	300	5	7.96×10^{-5}
4500	400	4	8.89×10^{-4}
2000	500	3	1.50×10^{-3}
500	600	12	2.40×10^{-2}

此外,考察载波通信不同地点、不同时间传输距离,选择郊区、住宅区、商业区的白天(10:00~15:00)、夜晚(20:00~22:00)测试,连续测试 3 天,确定通信距离见表 2。

参考文献

[1]胡亮.基于电力载波通信的精确定位读卡器设计[J].化工自动化及仪表, 2025, 52(2): 283-288.

[2]佟文涛,葛威,殷敬伟,等.水声单载波通信中的块稀疏均衡器[J].声学学报, 2025, 50(2): 511-524.

[3]梁薇,王丹丹,陈亚天,等.低压电力线路载波通信干扰耦合抑制系统设计[J].电子设计工程, 2025, 33(5): 178-181+187.

[4]唐秋杭,李涛,陈华东.基于载波通信的电力终端数据采集检测技术研究[J].电网与清洁能源, 2022, 38(3): 74-79.

[5]谢志远,陈冠宇,胡正伟.一种基于电力线通信的高可靠自适应台区拓扑结构识别策略[J].电力信息与通信技术, 2025, 23(1): 10-17.

[6]徐辛昌,王慢丽.基于电力载波通信的电能计量数据远程传输方法[J].自动化应用, 2025, 66(2): 247-249+260.

[7]戴文骏,王康,夏凌,等.基于 PPDA 技术的电力线宽带载波抗扰通信方法[J].电子设计工程, 2025, 33(2): 86-89+96.

[8]李佳欣.基于 HPLC 的智能电能表通信模块状态监测技术研究[J].电子元器件与信息技术, 2024, 8(12): 84-87.

[9]王俊融,徐宏伟,熊莹,等.基于电力载波技术的电力计量通信终端远程控制方法[J].长江信息通信, 2024, 37(9): 92-94.

作者简介:张倩(1993.11),女,内蒙古呼和浩特,本科,助理工程师,主要研究方向电气自动化,智能化;
田卓璐(1988-01),女,内蒙古自治区,研究生,助理工程师,主要研究电力系统计量设备故障诊断与预警技术。

可见,相比夜晚白天衰减较大,郊区衰减最大,商业区衰减较小,合理利用规律可增强通信系统抗干扰性。

表 2 不同时间不同地点通信距离

区域类型	白天			夜晚		
	1	2	3	1	2	3
商业区	445	460	450	525	550	520
住宅区	320	345	330	390	360	370
郊区	280	290	260	260	230	250

3.3 人为干扰

低压电力线噪声干扰对通信质量具有直接影响,特别是电热器、甩干机等人为设备干扰,选择密集住宅开展测试,采取不同干扰源进行通信成功率测试,每个干扰源开展 500 次测试,明确电视机(工频异步周期噪声)通信成功率 99%;电热器(脉冲干扰)通信成功率 96%;甩干机(平滑功率谱噪声)通信成功率 97%,均超过 95%,满足电力计量系统通信要求。

结论:

综上所述,低压载波通信中,特性阻抗、噪声、信号衰减等影响。特别是智能电网发展下,光伏、风能等新能源引入,使得输电网更为庞大复杂,非稳定负载增加,用电负荷动态化。因此,电力计量系统中,应当从硬件、通信、软件等多方面出发对其进行优化,增强电力计量系统低压载波通信抗干扰性能,从而满足系统要求,提高计量效率与质量。