

低压电力线载波通信传输特性

李亚钦

日海恒联通信技术有限公司 河南 郑州 450048

摘要: 低压电力线载波通信技术利用现有低压电力线作为传输介质, 实现数据通信, 文章主要研究了低压电力线载波通信技术的传输特性, 包括输入阻抗、高频信号衰减及传输干扰等方面, 通过对低压电力线载波通信系统的基本原理和组成进行详细分析, 采用频率扫描法和时域反射法测量输入阻抗, 并探讨了随机性和周期性干扰对系统性能的影响, 研究表明, 低压电力线的输入阻抗和高频信号衰减具有显著的频率依赖性和时变性, 干扰特性复杂多样, 为低压电力线载波通信系统的设计和优化提供了参考。

关键词: 低压电力线载波通信; 输入阻抗; 高频信号衰减; 传输干扰

引言

随着智能电网和现代电力系统的发展, 低压电力线载波通信技术因其经济性和广泛的覆盖能力, 成为实现电力线数据传输的重要手段。通过分析低压电力线的输入阻抗、高频信号衰减及传输干扰特性, 可以为系统优化设计提供理论依据和技术支持, 确保通信系统在复杂电力环境中的稳定性和可靠性。因此, 对低压电力线载波通信传输特性的研究具有重要的理论意义和实用价值。

1 低压电力线载波通信基本原理

低压电力线载波通信是利用现有的低压电力线作为传输介质, 实现数据通信的技术, 其基本原理是通过在电力线上注入高频载波信号, 将电力线从单纯的电能传输介质转变为数据传输通道, 在电力线上传输数据信息, 使其在不改变现有电力系统结构的前提下, 承担通信任务^[1]。

载波信号的调制与解调是实现数据传输的重要技术, 常见的调制方式包括幅移键控 (ASK)、频移键控 (FSK) 和相移键控 (PSK) 等^[2]。其中, ASK通过改变载波信号的幅度来表示数据信号的0和1, FSK通过改变载波信号的频率来表示数据信号的不同状态, PSK则通过改变载波信号的相位来进行数据传输。解调是调制的逆过程, 即从接收到的载波信号中提取出原始数据信号。在接收端, 接收装置首先接收到含有数据信息的载波信号, 通过解调器将其还原为原始的数据信号, 然后交由通信终端进行处理和显示。

电力线载波通信的优势在于无需重新铺设通信线路, 利用现有的电力网络即可实现数据传输, 具有成本

低、覆盖范围广、易于部署等优点。然而, 电力线作为传输介质存在诸多挑战, 如信号衰减、噪声干扰和阻抗不匹配等问题, 需要通过优化设计和抗干扰技术加以解决。

2 低压电力线载波通信系统组成

低压电力线载波通信系统由控制中心、传输电网及接收端三部分组成, 共同构成通信链路, 通过信号阻波器、载波机、耦合电容器及结合滤波器等组件实现通信功能, 确保数据在电力线上稳定、可靠地传输^[3]。

(1) 控制中心是整个系统的核心, 负责生成、调制和管理通信信号, 包含信号发生器、调制器和主控计算机等设备。信号发生器用于生成高频载波信号, 调制器则将数据信号加载到载波上, 实现数据的传输。主控计算机负责管理和协调整个通信过程, 包括信号的发送、接收、处理以及系统的监控和故障检测。控制中心通常设在电力系统的管理部门或通信调度中心, 通过电力线将控制信号和数据信息传输到各个接收端, 从而实现远程数据通信和控制功能。

(2) 传输电网是信号传输的介质, 由低压电力线组成。传输电网不仅承担电能输送, 还兼具数据传输的功能。电力线的物理特性对信号传输有重要影响, 包括阻抗、衰减和噪声等参数。为了保证通信质量, 需要对传输电网进行优化设计, 例如使用高质量的导线材料、合理规划线路路径以及采取必要的防护措施。电力线上的各种负载和环境噪声会对信号传输产生干扰, 需要通过技术手段进行抑制和补偿。

(3) 接收端负责接收并解调从传输电网传来的载波信号, 将其还原为原始数据信号并进行处理和显示。接收端包括解调器、信号处理器和显示终端等设备。解调器将接收到的载波信号解调还原为数据信号, 信号处理器对数据信号进行进一步处理, 如纠错、滤波和解码,

作者简介: 李亚钦 (1987.08-), 男, 汉族, 籍贯: 河南省延津县, 本科, 工程师, 研究方向: 有线传输与接入

最终将处理后的数据信号传输给显示终端或控制设备进行显示和操作。接收端通常安装在用户端，如智能电表、家用电器和工业控制设备等，通过接收端可以实现远程抄表、设备监控和自动控制等功能。

(4) 信号阻波器是传输链路中的重要组件，主要用于阻止高频载波信号向电力系统中的不必要部分传播，从而减少信号损失和干扰。信号阻波器一般安装在电力线的分支点或重要节点上，通过高阻抗特性阻止高频信号通过，而对工频电流则表现为低阻抗，以确保电力系统的正常运行。

(5) 载波机是控制中心和接收端的核心设备，负责完成载波信号的调制和解调功能。载波机包含调制器和解调器两个部分，调制器将数据信号调制到载波上，实现数据的发送；解调器则从载波信号中提取出数据信号，实现数据的接收。载波机的性能直接影响通信系统的传输速率、信号质量和抗干扰能力。

(6) 耦合电容器用于将高频载波信号耦合到电力线上，并防止工频电压进入载波机和其他通信设备。耦合电容器具有高频低阻抗和工频高阻抗的特点，使得高频信号能够有效传输，而工频电压不会对通信设备造成影响。常用的耦合方式包括电容耦合、变压器耦合和天线耦合，其中电容耦合方式因其高效和可靠性广泛应用于低压电力线载波通信系统中。

(7) 结合滤波器用于滤除载波信号中的杂波和干扰，提高信号的传输质量。结合滤波器通常由电感、电容和电阻等元件组成，通过调试，使其在特定频率范围内表现出低阻抗特性，从而有效地滤除干扰信号。结合滤波器不仅能提高信号的信噪比，还能增强系统的抗干扰能力和稳定性。

3 低压电力线载波通信的传输特性

3.1 输入阻抗特性

低压电力线的输入阻抗是电力线在特定频率下，对输入信号表现出的阻抗值，是衡量其传输特性的重要参数。输入阻抗直接影响信号传输的效率和稳定性，因为它决定了电力线对信号的反射和传输特性^[4]。合适的输入阻抗能够最大程度地减少信号的反射和损耗，从而提高通信质量和传输效率。

输入阻抗的大小与电力线的结构和负载密切相关。电力线的物理特性如导线材质、长度和直径等都会影响其输入阻抗，例如，较长的电力线和较细的导线会增加阻抗。不同的电器设备和其开关状态会导致负载阻抗的动态变化，从而影响电力线的总输入阻抗。环境因素如温度和湿度变化也会对电力线的电气特性产生影响，进

而影响输入阻抗。

输入阻抗的测量方法通常采用阻抗分析仪或网络分析仪。在测量过程中，需要将测试信号注入电力线，并通过测量反射信号和传输信号来计算输入阻抗值，具体方法包括频率扫描法和时域反射法。频率扫描法通过改变信号频率，测量电力线在不同频率下的输入阻抗，以获得其频率响应特性。时域反射法是通过发送脉冲信号，分析其反射波形来确定阻抗变化。

低压电力线的输入阻抗呈现出频率依赖性，通常在低频段（几十千赫兹以下）表现为高阻抗，而在高频段（几百千赫兹以上）则表现为低阻抗，这主要是由于电力线的电感和电容效应随频率变化所致。测量还能够显示输入阻抗的时变性，受负载开关状态和环境变化的影响，输入阻抗会在不同时间和条件下发生显著变化，增加了低压电力线载波通信系统设计的复杂性，需要采用自适应技术和动态调整策略以确保通信的稳定性和可靠性。

3.2 高频信号衰减特性

高频信号衰减是指信号在传输过程中由于介质特性和环境因素导致其幅度逐渐减弱的现象。根据电磁波传播理论，信号衰减主要由电阻、电感、电容和导电损耗等因素引起。导体的电阻导致能量损耗，电感和电容的分布影响信号的相位和幅度，导电损耗是由于电导的存在导致信号能量转化为热能。高频信号的衰减随着频率的增加而增大，这是因为高频信号在导体中传输时，电流趋向于表面，形成集肤效应，导致有效电阻增加，从而增加了信号的衰减。

低压电力线高频信号的衰减特性具有显著的频率依赖性。通过在不同频率下测量低压电力线的衰减，可以得到其频率响应曲线。在较低频率范围内（如几十千赫兹以下），信号的衰减较小，而在较高频率范围内（如几百千赫兹及以上），衰减显著增加。例如，在50kHz频率下，信号衰减约为10dB，而在300kHz频率下，衰减可高达30dB以上。低压电力线的衰减特性具有时变性，即在不同时间和条件下，衰减值会有所不同，影响低压电力线高频信号衰减的因素主要包括以下几个方面^[5]：

(1) 导线特性：导线的材质、直径和长度对信号衰减有直接影响，铜和铝等高导电性材料的电阻较低，衰减较小；较细的导线和较长的传输距离会增加电阻，导致更高的衰减。

(2) 负载特性：低压电力线上连接的负载类型和分布会显著影响信号的衰减，不同负载对信号的反射和吸收不同，尤其是感性负载和容性负载，会导致信号的相位和幅度变化，从而影响衰减特性。

(3) 频率: 高频信号在低压电力线上传输时, 衰减随频率增加而增大, 高频信号的集肤效应使得电流集中在导体表面, 有效电阻增加, 导致衰减增大。

(4) 环境因素: 温度、湿度和电磁干扰等环境因素也会影响信号的衰减, 温度变化会改变导线的电阻特性, 湿度增加会影响绝缘性能, 电磁干扰则会引起信号的附加衰减和噪声。

3.3 传输干扰特性

(1) 随机性干扰

随机性干扰通常是不可预测且变化无常, 其来源主要包括高压开关操作、雷电袭击、负荷波动、电力设备故障等。高压开关操作时产生的电磁脉冲干扰(EMP)会对电力线上的信号产生瞬时影响, 导致信号失真和误码增加。雷电袭击不仅会直接破坏电力设备, 还会在电力线中感应出高强度的电磁脉冲, 使通信信号严重失真甚至中断。负荷波动, 例如大型电机的启动和停止, 也会在电力线上产生瞬时的电流和电压波动, 进而影响信号传输的稳定性。电力设备故障, 如变压器故障或线路短路, 会产生异常的电磁干扰, 导致通信信号的严重失真。随机性干扰因素对低压电力线载波通信系统的影响主要表现在信号的瞬时失真、误码率增加和通信中断等方面, 随机性干扰的突发性和不可预测性, 使得通信系统在设计 and 运行中必须考虑多种抗干扰措施, 如增加滤波器、采用抗干扰编码技术、设计自适应调制方案等, 以提高系统的抗干扰能力和通信稳定性。

(2) 周期性干扰

周期性干扰的特点是干扰信号具有固定的周期性, 通常与电力系统的工频(50Hz或60Hz)及其谐波相关, 主要来源于电力系统中的谐波分量和周期性负荷的切换。谐波干扰是由于非线性负载(如整流器、变频器等)在电力系统中运行时产生的, 这些设备会在电力线上引入基频的整数倍频率的谐波分量。周期性负荷切换, 例如电机的周期性启动和停止、电力电容器的投切等, 会引起电流和电压的周期性波动, 从而对通信信号产生干扰。

周期性干扰的特点是频率固定且幅度较为稳定, 其频谱特性通常在工频及其谐波频率上表现为显著的尖

峰。由于这些干扰频率与电力线载波通信系统的工作频率范围(通常在几十千赫兹至几百千赫兹之间)可能重叠, 导致通信信号在这些频率上受到严重干扰。例如, 50Hz及其谐波(如100Hz、150Hz等)会在通信频带内产生显著的干扰尖峰, 使信号在这些频率上的传输质量大幅下降。周期性干扰对通信质量的影响主要表现在以下几个方面:

(1) 信号失真: 周期性干扰会引起信号的幅度和相位失真, 导致解调后的信号无法准确还原原始数据, 增加误码率。

(2) 噪声增加: 谐波干扰会增加信号的噪声水平, 使信噪比下降, 影响信号的可靠接收。

(3) 通信中断: 在干扰强度较大的情况下, 周期性干扰可能导致信号完全被淹没, 通信链路中断。

(4) 频谱污染: 周期性干扰会在频谱上产生多个谐波分量, 造成频谱污染, 使得通信系统难以找到干净的频带进行信号传输。

4 结语

综上, 本文对低压电力线载波通信的传输特性进行了研究和分析, 探讨了输入阻抗、高频信号衰减及传输干扰的基本特性和影响因素。结果表明, 低压电力线的输入阻抗和高频信号衰减具有显著的频率依赖性和时变性, 传输干扰包括随机性干扰和周期性干扰, 严重影响通信质量, 下一步研究可结合实际应用, 探索更多有效的抗干扰策略和优化方案, 为智能电网和现代电力系统的发展提供有力支持。

参考文献

- [1]刘占华,孟媛.低压电力线载波通信中信号传输特性分析[J].科学与财富,2020,12(29):76.
- [2]刘威.低压电力线载波通信的信道噪声建模仿真研究[D].黑龙江:东北农业大学,2023.
- [3]李宁,董亮,王新刚,等.低压电力线载波通信的用电管理系统设计[J].自动化仪表,2021,42(6):77-81.
- [4]商亚新.电力线与无线双模融合传输系统研究[D].重庆:重庆邮电大学,2022.
- [5]刘玉新.低压电力线载波通信系统建模和分析[D].辽宁:辽宁工程技术大学,2019.