

低压电力线载波通信研究与应用现状

何海波, 周拥华, 吴昕, 张有兵, J. NGUMBIS, 程时杰

(华中科技大学电力工程系, 湖北 武汉 430074)

摘要: 在分析低压电力线载波通信特征的基础上, 综述了低压电力线载波通信技术研究的发展状况, 比较了扩频通信(SSC)技术、多载波正交频分多址(OFDM)技术和传统低压载波通信技术的性能, 分析了 X-10、LonWorks、CEBus 等多种通信技术标准, 并提出了基于已有技术的低压电力载波通信网络的解决方案及试验研究, 同时, 展望了低压电力载波通信技术的发展前景并提出了有待进一步研究解决的问题。

关键词: 电力线; 载波通信; 扩频通信; 多载波正交频分多址

中图分类号: TM73; TN914.4

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897(2001)07-0012-05

1 引言

低压电力线载波通信(Power Line Communication)是指利用已有的低压配电网作为传输媒介, 实现数据传递和信息交换的一种技术^[1-2]。其诱人之处在于它利用已有的低压配电网作为信息传输的载体, 从而避免了新的通信网络的建设和投资。同时, 随着信息技术(Information Technology)的不断发展, 美、德、法等国家已提出家庭插座(Home Plug)计划, 旨在推动以电力线为传输媒介的数字化家庭(Digital Home)。可以预见, 低压电力线载波通信技术必将成为新的研究热点, 它已经引起了世界各国的广泛关注。

然而, 由于低压配电网自身固有的特点, 要在其上实现可靠、安全的数据传输是相当困难的。世界各国已就其进行了大量的研究, 如: 传统的频带传输技术, 扩频通信(SSC: Spread Spectrum Communication)技术和最近试验的多载波正交频分多址(OFDM: Orthogonal Frequency Division Multiplexing)技术。大量的研究表明, 随着通信方案的不断改进和数字信号处理技术的不断发展, 实现数据在低压电力线上

的优质传输是可能的。

本文在分析了低压电力线载波通信特点的基础上, 综述了低压电力线载波通信技术的发展研究状况, 从理论上阐述了扩频通信(SSC)技术、多载波正交频分多址(OFDM)技术和传统的低压载波通信技术的原理。同时, 综述了 X-10、LonWorks、CEBus 等多种通信技术标准, 并从应用的角度, 介绍了基于已有技术的通信网络的解决方案及其试验研究结果。最后, 作者展望了这一领域的发展前景并提出有待进一步研究解决的问题。

2 低压电力线载波通信的特点

与中、高压电力线的载波通信不同, 低压配电网由于直接面向用户, 这一固有的特点使其通信环境极其恶劣, 如: 负荷情况复杂, 噪声干扰强且具有时变性, 信号衰减大, 信道容量小等。因此, 要实现高性能的低压电力线载波通信有相当大的困难。

2.1 噪声干扰强

已有的研究表明, 噪声的大量存在是实现数据在低压电力线上优质传输的主要障碍之一。一般来说, 影响电力通信质量的噪声主要有以下3种:

研究方向为电力系统继电保护; 桑在中(1938), 男, 教授, 主要研究方向为电力系统继电保护。

A new approach of fault location based on "S injecting signal"

WANG Xin-chao, SANG Zai-zhong

(Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: According to the principle of "S injecting signal", the paper gives out the equivalent circuit and phase graph of the fault branch, analyzing that the feed current frequency to be chosen should be different from industrial frequency, pointing out the character which the feed current never passes through unfaulted branch, and only flows between the fault branch and the power system ground injection point. In view of the lower accuracy by simple impedance measurement method, the paper gives out a new improved way which is based on double angle theory, analysis of the way in theory and realized circuit

Key words: neutral indirectly grounded or ungrounded system; microprocessor based distance measurement; single phase-to-earth fault; fault location

背景噪声—分布在通信频带;周期性噪声—包括周期性的连续干扰和周期性的脉冲干扰;突发性噪声—用电设备的随机接入或断开而产生。研究表明,脉冲干扰对低压电力线载波通信的质量影响最大。有文献统计出,脉冲干扰的强度最大可达40dBm^[3],如此强的干扰将给通信带来致命的伤害,以致于在接收端根本无法识别出发送的信号。

2.2 信号衰减大

信号在电力线上传输过程中的衰减是低压载波通信遇到的另一难点。同时,由于低压配电网直接面向用户,负荷情况复杂,各节点阻抗不匹配,所以信号会产生反射、谐振等现象,使得信号的衰减变得极其复杂。

总的说来,信号的衰减随着传输距离的增加而增加,同时,有文献报导^[4],信号的衰减与频率、工频电源的相位有关,一般来说,随着频率的增加,信号的衰减也将增加,而在某些特殊的频段,由于反射、谐振及传输线效应等的影响,衰减会出现突然剧增。文献^[5]指出,在100~400kHz频带内,信号的平均衰减为40dB,标准偏差为20dB。

2.3 随机性和时变性

低压电力线直接面向用户的特点导致其干扰具有随机性和时变性,这是低压载波通信面临的又一挑战。由于用户负荷的随机接入和切除,网络结构的变化以及不可抗拒的自然因素,如雷电等的影响,使得其干扰表现出很强的随机性和时变性,从而难以找到一个准确的数学模型来加以描述。

从以上分析可见,低压电力线自身所具有的特点,大大限制了以其为传输媒介的低压载波通信技术的发展。科学工作者在研究有效的信号分析方法上进行了大量的工作,如用小波变换(Wavelet Transform)、维格纳分布(Wigner-Ville Distribution)等来解决这一问题。文献表明^[6~7],这些方法虽能在很大的程度上改善信号处理的结果,但并不是对所有的传输信号都能达到理想的效果。

3 低压电力线载波通信原理的研究发展

随着信息技术的不断发展和人们对通信质量要求的不断提高,通信技术正朝着高速率、宽频带、大容量方向发展。就理论研究而言,低压电力线载波通信已从传统的频带传输(幅移键控ASK:Amplitude-Shift Keying,频移键控FSK:Frequency-Shift Keying,相移键控PSK:Phase-Shift Keying)发展到了扩频通信(SSC)技术、多载波正交频分多址(OFDM)技

术以及使用高速光纤的光波分复用(WDM:Wavelength Division Multiplexing)技术等。

3.1 传统载波通信原理

传统的低压电力线载波通信一般采用频带传输,也就是用载波调制的方法将携带信息的数字信号的频谱搬移到较高的载波频率上。其基本的调制方式分为幅值键控(ASK),频率键控(FSK),相位键控(PSK)。在此基础上,又派生出了差分移相键控(DPSK),最小移频键控(MSK:Minimum Shift Keying)、四相移相键控(QPSK:Quadrature phase-shift Keying)、正交幅度调制(QAM:Quadrature amplitude modulation)等。

这里,将几种基本调制方式的性能进行了比较,比较结果如表1所示。(比较条件为:码元速率($f_b = 1/T_b$)、信号的平均功率($A_0^2/2$)和噪声功率(σ^2)均相同)。其中:

$$\text{输入信号噪声比: } = (A_0^2/2)/\sigma^2,$$

$$\text{误差函数: } \text{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt,$$

$$\text{互补误差函数: } \text{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^\infty e^{-t^2} dt.$$

由表1可见,PSK系统的综合性能最好,因此在载波通信技术中得到了广泛的应用。FSK系统的误码率指标比ASK系统好,但要求传输带宽比较大,一般用于低速数据传输,ASK系统由于误码率指标最差,实际中较少使用。

传统的载波通信原理的最大的弱点就是去噪能力不强,随着配电网结构的不断复杂和人们对低压载波通信质量要求的不断提高,传统的载波通信技术已越来越不适应现代高速率、大容量的要求。

表1 几种基本调制方式的性能比较

调制方式	传输带宽	误码率 P_e
非相干 ASK	$2f_b$	$1/2e^{-1/4}$
相干 ASK	$2f_b$	$1/2 \text{erfc}(\sqrt{1/2})$
非相干 FSK	$2f + 2f_b$	$1/2e^{-1/2}$
相干 FSK	$2f + 2f_b$	$1/2 \text{erfc}(\sqrt{1/2})$
相干 PSK	$2f_b$	$1/2 \text{erfc}(\sqrt{e})$
延迟 DPSK	$2f_b$	$1/2e^{-1}$
相干 DPSK	$2f_b$	$\text{erf}(\sqrt{e}) [1 - 1/2 \text{erfc}(\sqrt{e})]$

3.2 扩频载波通信(SSC)原理

简单地讲,扩频通信(Spread Spectrum Communication)是用伪随机编码(扩频序列:Spread Sequence)将待传的信息数据进行调制,实现频谱扩展后再

传输,在接收端则采用同样的编码进行解调及相关处理。其基本原理图如图1所示:

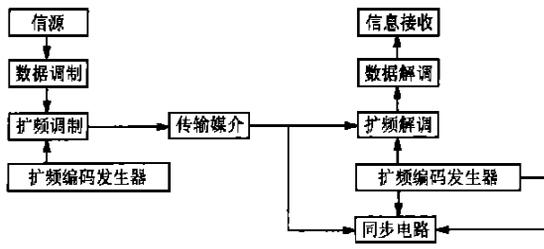


图1 扩频通信原理

香农公式 $C = W \log_2(1 + P/N)$ (其中: C 为信道容量, W 为频带宽度, P/N 为信噪比) 指出, 频带 W 和信噪比 P/N 是可以互换的, 这意味着如果增加频带的宽度, 就可以在较低的信噪比的情况下用相同的信息率以任意小的差错概率来传输信息。这就是用扩展频谱的方法获得的好处, 也是扩频通信的核心所在。

就低压电力载波通信而言, 应用扩频通信的主要优点如下:

(1) 抗干扰能力强, 适合在低压电力线这样的恶劣通信环境下实现可靠的数据通信。

(2) 可以实现码分多址 (CDMA: Code Division Multiple Access) 技术, 在低压配电网实现不同用户的同时通信。

(3) 信号的功率谱密度很低, 具有良好的隐蔽性, 不易被截获。

就扩展频谱方式的不同, 扩频通信系统可分为: 直接序列 (DS: Direct Sequence) 扩频, 跳频 (FH: Frequency Hopping), 跳时 (TH: Time Hopping), 线性调频 (Chirp) 以及上述各种基本方式的组合, 如: FH/DS, DS/TH 等。

就扩频技术的真正全面研究是从 50 年代美国麻省理工学院成功研制的 NOMAC 系统 (Noise Modulation and Correlation System) 开始的。1976 年, R. C Dixon 撰写了第一部关于扩频通信的概述性专著: Spread Spectrum System。1982 年 J. K. Holmes 撰写的 Coherent Spread Spectrum System 是第一部扩频通信的理论性专著。90 年代以来, 随着信息技术的不断发展, 扩频技术在理论上和应用中都取得了长足的进展。

3.3 多载波正交频分多址 (OFDM) 技术的原理

多载波正交频分多址 (OFDM: Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 技术是指将可用的频谱分解成一系列低速的窄带一次载波 (Subcarrier), 各

次载波相互正交重叠, 在发送端分别对其进行调制。OFDM 的基本原理如图 2 所示。

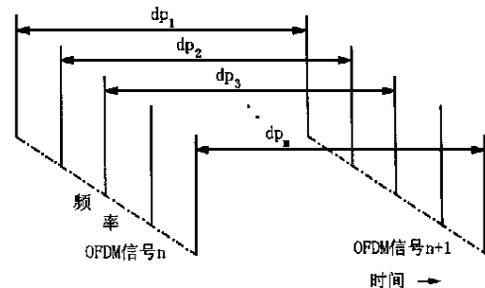


图2 OFDM 原理

从图 2 可以看出, 设原信号的带宽为 B , 码元速率为 R , OFDM 将原信号分解成 M 个子信号, 分解后码元的速率为 R/M , 然后用 M 个子信号分别调制 M 个相互正交的次载波进行信息传递。其优越性主要是:

(1) 由于多路次载波能互不干扰地同时传送信息, 因此可以从整体上极大地提高通信的速率。

(2) 由于每个子信号的传输速率是原信号的 $1/M$, 因此可以很好地抑制因延迟、多径干扰而带来的误码, 从而提高通信质量。

OFDM 的发展可追溯到 1966 年, R. W. Chang 首次提出多路传输的窄频带正交分解及合成的概念 (Bell System Technical Journal); 1971 年 S. B. Weinstein 和 P. M. Ebert 使用离散傅立叶变换 (DFT: discrete Fourier transform) 进行基带的调制和解调, 为 OFDM 的发展作出了巨大的贡献; 1980 年, A. Peled 和 A. Ruiz 提出利用循环前缀来保持正交性, 将 OFDM 向实用化推进了一大步。Intellon 等一批全球知名企业已将 OFDM 技术应用于实际系统, 其 PowerPacket 技术的传输速率已达 14Mbps (频带: 4.3MHz ~ 20.9MHz, 84 路载波)。

4 现有通信技术标准及其发展

目前, 低压电力线载波通信的技术标准主要有三种: X-10, LonWorks 和 CEBus。原有的低压电力线载波技术主要是基于 X-10 标准的, 但随着通信技术的不断发展, CEBus 以其自身的优越性, 已被越来越广泛地采用。

4.1 X-10 技术标准

X-10 技术标准于 1978 年首次提出, 由于其在家庭自动控制 (Home Automation) 领域的广泛应用而成为事实上的国际标准。其最初的设计只是用于单向通信, 后来增加了双向通信功能。就调制方式而

言,由于过零点通常含最少量的噪声和干扰,它使用过零调制技术,调制方式为幅值调制(AM:Amplitude Modulation),为减少误码,它需要两个过零点来传送一个“0”或“1”信息,因此,其主要缺点在于通信速率太低和容量太小,难以适应现代高速率、大容量通信的要求。

4.2 LonWorks 技术标准

LonWorks 技术标准由 Echelon 公司提出,它是点到点的对等网络通信(Peer-to-Peer Communication)方式,使用载波侦听多路访问(CSMA:Carrier sense multiple Access)技术。目前,Echelon 公司已研制开发出基于该技术标准的扩频通信(SSC)芯片(10 kbps)。

4.3 CEBus(Consumer Electronics Bus) 技术标准

1984年,电子工业协会(EIA:Electronic Industries Associatio)开始着手研究适用于家庭用户设备通信的标准,这就是后来的CEBus标准(1992年正式颁布)。CEBus是提供独立物理层连接规范的开放式通信标准,使用EIA-600协议。由于它使用对等网路通信方式,因此通信网上的任何一个节点都可随时接入。为避免数据冲突,它使用载波侦听多路访问/冲突检测(CSMA/CD:Carrier sense multiple Access/Collision Detection)技术,即在发送数据前监听信道上是否有数据正在传输,边发送边监听,一旦监听到冲突,则冲突双方停止发送。这样,信道很快进入空闲期,提高了信道的利用率。目前,以Intellon公司为代表的一批企业已开发出基于CEBus的系列产品。

于,不但简化了协议,使家庭智能网络易于实现,而且,LSM在维护各层之间的整体性和协调性、寻址和路由选择中都发挥了重要的作用。

5 基于已有技术的低压电力载波通信的解决方案及试验研究

低压电力线载波通信的研究,在美、德、英等国家已取得了突破性的进展。最早提出低压电力线载波通信概念并进行可行性研究的是英国曼彻斯特的一家地区性供电公司NORWEB^[9],文献^[5,10]报导,NORWEB公司在完成世界上首次配电网上的25个终端用户的电话与数据通信试验后(1992~1993),已开发出2MHz带宽内传输速率为1Mbps的系统。1993年,英国SWEB公司成功地在一地区性有限遥测系统(RMS)中采用中、低压配电网进行两路数字载波通信,将已有的水、电表计与电能表计连接起来,能提供包括水、天然气、电能的自动抄表等功能。文献^[10,11]指出,ABB公司已成功开发出基于跳频方式的低压电力载波通信系统DartNet(1999),其信号传输速率为1.2kbps。Intellon公司已研制开发出SSC P111/P200/P300/P485系列扩频芯片,并在实际中得到使用。

目前,在英、美等国,扩频技术的使用已有现场试验的报告^[5],至于扩频芯片,据Intellon公司2000年5月3日发布的最新报道,其PowerPacket Technology信号传输速率已达14Mbps。以此为背景,其OFDM技术也取得了突破性进展,2000年1月和4月进行的组网试验,可实现速率为14Mbps的数据传输^[10,12]。

在我国,清华大学已研制成功基于SSC技术的配电网通信实验平台,可在两台计算机之间通过220V低压电力线实现文件或数据的传输,速率为10kbps^[10,13]。

6 载波通信的发展趋势及有待进一步研究的课题

随着信息技术朝着大容量、高速率方向发展,同时,Intel、Compaq等13家全球知名企业正在大力推行智能家庭插座计划,可以预见,以低压电力线为传输媒介的载波通信技术必将得到更为广泛的关注和研究。

这一领域,目前主要存在以下两方面问题有待进一步深入研究:

- (1) 硬件平台:主要包括通信方式的合理选择,

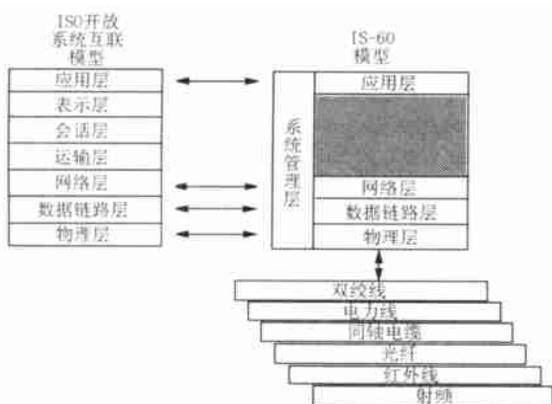


图3 OFDM与开放系统互联模型(OSI)的比较

图3给出的是OFDM与开放系统互联(OSI:Open Systems Interconnection)模型的比较。

由图3可见,CEBus减少了表示层、会话层和运输层,但增加了内部层次的管理LSM(Layer System Management)并扩展了所支持的物理媒介。其优点在

通信网络结构的优化选择等。

(2) 软件平台: 主要包括通信原理的进一步研究, 信号分析、处理技术的不断改进, 编码技术的发展等。

7 结语

本文在分析低压电力线载波通信特征的基础上, 综述了低压电力线载波通信技术的研究发展状况, 从理论研究与实际应用两方面较全面系统地介绍了该领域的研究历史、应用现状与发展前景, 同时, 提出了低压电力线载波通信技术中有待进一步解决的问题。

参考文献:

- [1] Dr John Newbury. Communication Requirements and Standards for Low Voltage Mains Signalling[J]. IEEE Transaction on Power Delivery, 1998, 13(1):46~53.
- [2] Adrian Patrick, Dr John Newbury, Sean Gargan. Two - Way Communications Systems in the Electricity Supply Industry [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1998, 13(1):53~59.
- [3] Chan M H L, Donaldson R W. Amplitude, Width and Interarrival Distributions for Noise Impulses on Intra-building Power Line Communication Network. IEEE Trans on EMC, 1989, 31(3):320-323.
- [4] 高锋, 董亚波. 低压电力线载波通信中信号传输特性分析, 电力系统自动化, 2000(7).
- [5] Radford D. Spread - Spectrum Data Leap Through AC Power Wiring. IEEE Spectrum, 1996, 33(11):48~53.
- [6] J NGUMBIS, Xia jiang, Shijie Cheng. Noise Characteristics Investigation and Utilization in Low Voltage Powerline Communication[C]. 2000, IEEE Winter Meeting. 0 - 7803 -

- 5938 - 0/00.
- [7] 姜霞. 基于时频分析方法的低压电力网载波通信研究[D]. 华中理工大学硕士学位论文, 2000. 612.
- [8] 张国山, 滕秀英, 孙德馨, 胡清兰. 波分复用技术在通信系统扩容中的应用. 电网技术, 1998, 22(8).
- [9] Dr John Newbury. Deregulation of the Electricity Supply Industry in the United Kingdom and the Effects on Communication Service. IEEE Transaction on Power Delivery, 1997, 12(2).
- [10] 王赞基, 郭静波. 电力线扩频载波通信技术及其应用. 电力系统自动化, 2000, 24(21).
- [11] Andreas Hauser, Stefan Ramseier. DartNet - The New HLC Communication System for MV and LV Networks. ABB Review, 1999(4):4~10.
- [12] Mainelli T. Power - Line Network Makes Progress. PC Word, 2000 - 06 - 06(1).
- [13] 赵洪山, 刘力丰, 杨奇逊. 低压电力线载波通信方案. 电力系统自动化, 2000, 24(12).
- [14] 丁道齐. 把握世界通信发展趋势 确立电力通信发展战略. 电力系统自动化, 1999, 23(12):1~7.
- [15] 潘莹玉. 电力线通信的现状分析. 电网技术, 1998, 22(2).
- [16] 辛耀中. 电力系统数据通信协议体系. 电力系统自动化, 1999, 23(1):40~44.
- [17] 张新政. 现代通信系统原理. 北京: 电子工业出版社, 1995.

收稿日期: 2001-01-18

基金项目: 中华电力教育基金会许继奖教金资助项目

作者简介: 何海波(1976-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力通信; 周拥华(1976-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力通信; 程时杰(1945-), 教授, 博导, 主要研究方向为电力系统分析、控制及人工智能应用。

The state of research and application of low voltage powerline communication

HE Hai-bo, ZHOU Yong-hua, WU Xin, ZHANG You-bing, J. NGUMBIS, CHENG Shi-jie
(Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: The low voltage powerline communication has become a hot research topic for electrical advancements in recent years. This paper summarizes the state of research and application of low voltage powerline communication on the base of the characteristics of the low voltage powerline. The paper also compares three fundamental low voltage powerline communication technologies: Spread Spectrum Communication (SSC), Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) and the traditional way (ASK: Amplitude - Shift Keying, FSK: Frequency - Shift Keying, PSK: Phase - Shift Keying). Some communication standards, such as X-10, LonWorks and CEBus, are analyzed. In addition, the paper proposes the latest solution and experiments and demonstrates the technology potential of the low voltage powerline communication.

Keywords: powerline; carrier communication; spread spectrum communication (SSC); orthogonal frequency division multiplexing (OFDM)