

OFDM 信号在低压电力线上的传输及其时频分析

熊兰,程时杰, Joseph Nguimbis

(华中科技大学电气与电子工程学院,湖北 武汉 430074)

摘要: 提出了一种正交频分复用(OFDM)信号发送器的模型和设计方法,并用该装置在一个室内环境中进行实验测量,寻找合适的OFDM参数。为了研究OFDM信号在低压电力线上的传输情况,运用基于维格纳分布的时频分析方法对电力线上的信号进行分析。试验结果表明,就通信速率而言,低压电力线载波通信是一种很有潜力的通信方式。

关键词: 低压电力线载波通信; 正交频分复用; 时频分析; 维格纳分布

中图分类号: TM73 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2004)08-0030-06

0 引言

近十年来通信领域的飞速发展使人们逐渐改变了对低压电力线载波通信的看法。与早先广泛应用的ISDN和后来的ADSL等住宅通信方式相比,低压电力线载波通信将能够支持不同级别、不同速率和质量要求的通信服务,例如数字视频、数据交换或其它的系统通信。

为了建立通信速率达每秒几兆比特的高速通信系统,要求通信频率至少在1 MHz以上。研究人员建议通信频率在1~20 MHz之间^[1,2]。但是低压电力线作为通信信道存在很多缺陷^[3,4],除了传输特性差、噪声干扰强之外,导线规格迥异也是低压电力线信道传递函数复杂的重要原因。

OFDM是一种能有效克服这些问题的通信技术。然而,OFDM虽然能够以较低的误码率实现高速数据传输,但它对信号放大器和耦合器的带宽和线性度有很高的要求。OFDM与信道编码以及合适的耦合电路结合起来,就可以构成适合于低压电力线载波通信的通信技术。

本文致力于寻找适合于低压电力线载波通信的OFDM参数,如载波间隔、子载波数、保护间隙长度等等。为了比较仿真计算带宽与发送点和接收点测量的实际信号带宽的不同,使用了基于维格纳分布(Wigner-Ville Distribution)的时频分析方法对信号进行分析。实验结果表明,在低压电力线载波通信中应用OFDM技术,可以使通信速率达到与ADSL或无线局域网相当的水平。

基金项目: 中华电力教育基金会许继奖教金资助项目。

1 低压电力线载波通信的OFDM模型

1.1 低压电力线载波通信的OFDM典型系统

在OFDM系统中,信号被分成子信号,分别调制各个子载波,经由反傅立叶变换变成时域信号。反傅立叶变换的输出信号加上保护间隙(GI),循环扩充成为OFDM码元。在接收时则进行逆向操作以解调接收信号,即去除保护间隙,再进行傅立叶变换,恢复出原始信号,见图1。关于OFDM的完整理论论述见文献[5]。

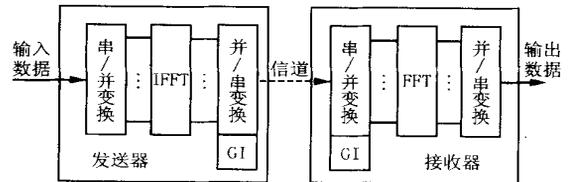


图1 OFDM原理图

Fig. 1 OFDM modulation and demodulation diagram

生成OFDM信号的软件算法和系统构成如图2所示,采用了一块嵌入PC机ISA总线上的任意波形发生器和一个耦合电路将OFDM信号送入电力线。软件算法在Windows平台上用VC++编程实现,其中IFFT函数使用了特殊的能随计算机硬件系统结构自行调整的模块以加速IFFT的计算过程。

1.2 低压电力线载波通信的OFDM参数计算

低压电力线上的信号受到各种噪声以及由不可预测事件所引起的脉冲干扰的影响。要将OFDM应用于这样一个网络环境,需要特别注意其参数的选取,如保护间隙宽度、子载波数、子载波间隔等。

OFDM的最大载波数应不大于IFFT点数:

$$N_{\text{carriers}} \leq \text{IFFT}_{\text{size}} \quad (1)$$

其他参数的计算表达式如下:

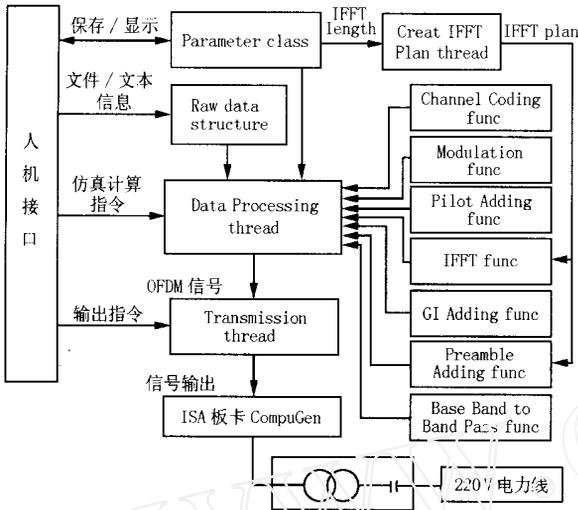


图2 OFDM 信号发送系统结构图

Fig.2 Structure of the OFDM signal transmitter

$$Coding-rate = 1 - 0.5 \times \frac{N_{carriers} + 4}{N_{carriers}} \times cc \quad (2)$$

式中的 $cc = 1$ 或 0 分别对应有信道编码和无信道编码的情况。

$$Carrier-Spacing = \frac{f_{sampling}}{N_{FFT}} \quad (3)$$

$$Data-Rate = \frac{f_{sampling}}{N_{FFT} + N_{guard}} \times N_{carriers} \times Coding-Rate \quad (4)$$

$$BandWidth = \frac{f_{sampling}}{N_{FFT}} (N_{carriers} + N_{pilot}) \quad (5)$$

OFDM 信号的频带下限和频带上限分别为:

$$BW_{min} = \frac{f_{sampling}}{N_{FFT}} \quad (6)$$

$$BW_{max} = \frac{f_{sampling}}{N_{FFT}} [f_i + (N_{carriers} + N_{pilot}) - 1] \quad (7)$$

$$= N_{FFT} \frac{f_i}{f_{sampling}} - \frac{N_{carriers} + N_{pilot}}{2} \quad (8)$$

式中: f_i 代表 OFDM 基带信号频率搬移后的中心频率。

1.3 OFDM 信号的计算仿真

OFDM 模型仿真计算中,设定保护间隙宽度为 $N_{guard} = 16$ 。其主要作用是抵消多径传输的影响。FFT 点数为 128,采样频率 10 MHz,子载波间隔为 78.125 kHz。本文后续讨论中的导频子载波个数都为 1,信道编码的编码率为 $1/2$ 。数字调制方法是 D-BPSK。子载波数在 5 ~ 45 之间变化。信号带宽和数据率随之相应变化。理论计算结果如图 3 所示。

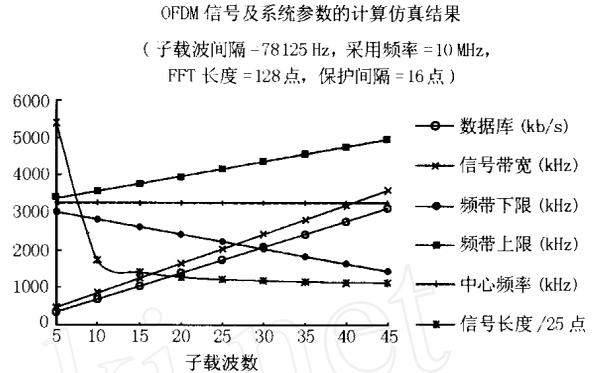


图3 OFDM 主要参数计算仿真结果

Fig.3 Simulation result of computerized OFDM main parameters

图3中由信号频带下限和频带上限所围成的三角形区域,以 3.25 MHz 频率为中心,且信号带宽随子载波数增加而增大。因为每一个载波通道上只传输少量数据,信号长度随子载波数增加而减小。这样可以大大减小符号间干扰(ISI)。试验时,如果在电力线上传输的信号频率具有如图3所示的动态范围,则通信的数据率将由 0.5 Mb/s 增大到 3 Mb/s,可以与 ADSL 相比。

2 OFDM 信号传输系统的设计

在信号从发送器到电力线,以及从电力线到接收器的耦合过程中,都会由于阻抗不匹配引起不同程度的信号失真。因此需要设计合适的耦合器。

2.1 耦合电路设计

电力线网络的输入阻抗是时变的且变化较大,因而很难满足阻抗匹配的要求,信号反射在所难免。图4是一个带有信号衰减器的耦合电路结构图。采用衰减器的好处是可以大大减小信号发射的驻波比(Standing Wave Ratio)。

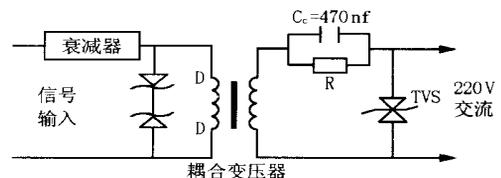


图4 OFDM 电力线耦合电路

Fig.4 OFDM power line coupling unit

耦合电路中使用了一个 470 nF 的耦合电容。通过耦合变压器的工频电流小于 $I = 2 f C_c V = 33 \text{ mA}$ 。变压器的漏抗与耦合电容组成了一个 LC 带通滤波器,其通频带与图 1 中的 ISA 卡的输出频带相适应。

2.2 试验电力线网络拓扑图

试验用电力线网络如图 5 所示。由于低压电力线载波通信目前主要以室内网络应用为目标,因而将试验网络选定在类似的环境中。

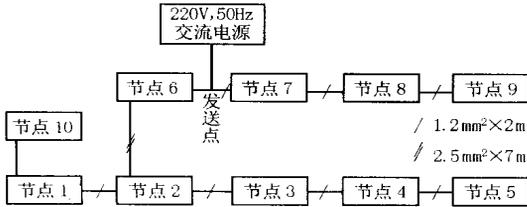


图 5 OFDM 评估试验网络拓扑图

Fig. 5 Network topology of OFDM power line evaluation test

图 5 中每个节点上都有一台计算机。节点 7 是信号发送点,节点 1、7、9 是信号接收点。信号发送部分包括一个 CompuGen 波形发生器、一个可以测量驻波比的功率表和一个耦合电路。接收部分由一个耦合电路和一个 100 MHz 的 FLUKE 示波器组成。该示波器配有与 PC 通信的接口和频谱分析软件。

图 6 给出了不同试验节点的信号衰减情况,其参考电压为信号发送器中衰减器的输出电压。

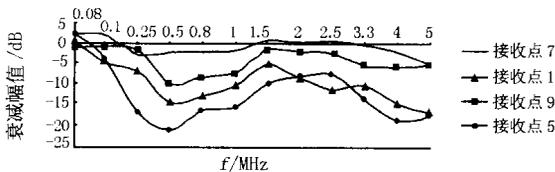


图 6 电力线上信号幅值衰减

Fig. 6 Power line voltage attenuation characteristics

由图 6 可以看出,如果以 -15 dB 作为信号幅值衰减的最高限制,则可将发送器的通信频带选在 0.5 ~ 4.5 MHz。发送器的最佳功率传输频带在 3 MHz 左右。由于网络上的负荷多,信号衰减程度随着接收点与发送点之间的距离增大而明显增强。同时负荷变化及其他干扰带来的噪声也对信号造成了不可忽视的影响。为了确定信号接收器收到信号的实际频率,以及所观察到的信号是否含有 OFDM 信息,本文使用时频分析法对信号进行分析。

3 应用于 OFDM 信号的时频分析

本文所指的时频能量分布是在维格纳 - 威利分布(WVD)的基础上发展起来的。WVD 将一维时域信号或频域信号映射成为时间 - 频率平面上的二维信号,信号的瞬时能量和功率谱可以清晰地表示在二维或三维图形上。频域信号 $X(f)$ 的 WVD 分

布定义如下:

$$W_x(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} X\left(f + \frac{d}{2}\right) X^*\left(f - \frac{d}{2}\right) e^{-j2\pi f d} dt \quad (9)$$

WVD 有许多良好的性质^[6,7],它对任何实数或复数信号都是实用的,且具有较高的时频分辨率。它的主要缺陷是,由于它是信号的双线性方程,其谱分布的正半部和负半部合起来生成信号各频率成分之间的交叉项。因而不适于分析多载波的 OFDM 信号^[3]。图 7 中对一段 OFDM 信号的 WVD 分析说明了这一点。

平滑的伪维格纳分布 (Smoothing Pseudo Wigner - Ville, 简称 SPWV) 是一种效果比较好的方法。它减少了交叉项的干扰。其分布用下式表示:

$$SPW_x(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h(s-t) g\left(s + \frac{d}{2}\right) x^*\left(s - \frac{d}{2}\right) e^{-j2\pi f d} ds dt \quad (10)$$

其中: g 和 h 分别代表时间和频率两个方向上的独立的滤波器。

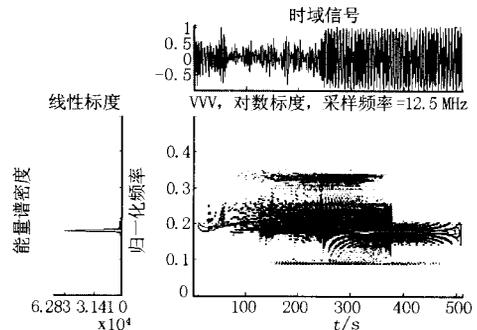


图 7 OFDM 信号的 WVD 交叉项干扰

Fig. 7 WVD interferences illustration for OFDM signal

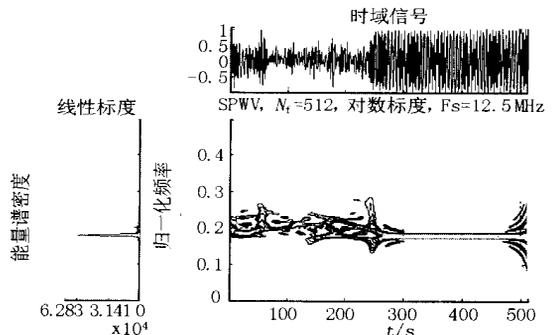


图 8 OFDM 信号的 SPWV

Fig. 8 SPWV illustration for OFDM signal

图 8 是对与图 7 相同的一段时域信号进行 SPWV 分析的结果。图 8 中各频率成分间的交叉项的影响明显减弱,可以很清晰地看到信号各频率成

分的能量随时间和频率变化的分布情况。

4 试验结果及分析

OFDM 信号具有多个频率成分,因而考虑其动态频率范围,即信号的频带上限与频带下限之间的范围,更有实际意义。

试验中,首先对用本文第 1 章的方法得到的 OFDM 仿真信号进行时频分析,再对发送点和接收点的实测信号进行时频分析,并将两者结果进行对照。时频分析由一段 Matlab 程序完成。

4.1 电力线信道的测试

试验电力线通道选择在图 5 的节点 7 和 9 之间。由于 OFDM 将信息分散到各个子载波中,因而 OFDM 信号的某一段(持续时间足够长)的动态频率范围与完整的信号的动态频率范围应该基本相同。图 9 和图 10 分别是对含有 20 个子载波的仿真 OFDM 信号的两个片段进行时频分析的结果。这两段信号的动态频率范围在 2.43 ~ 4 MHz 之间。

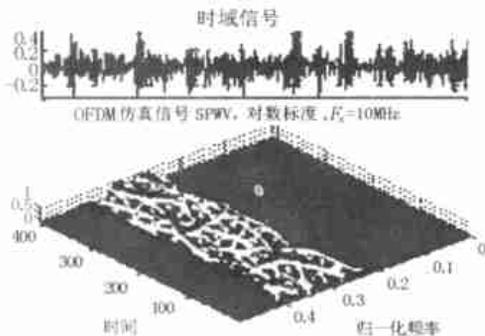


图 9 OFDM 仿真信号的 SPWV
(与发送点信号对应)

Fig. 9 SPWV of 20 carriers computerized OFDM signal

发送器不断地发送同一个 OFDM 信号。信号在发送点和接收点被记录下来。每次取一段 512 个采样点的信号进行时频分析。图 11 和图 12 分别是发送点和接收点记录的 OFDM 信号片断的时频分析结果。

图 11 为在发送点测得的信号,其动态频率范围在 2.4 ~ 3.9 MHz 之间,与图 9 中的结果相比损失了约 8%。图 12 为在接收点测得的信号,其动态频率范围在 2.4 ~ 3.75 MHz 之间,与图 10 的结果相比损失了约 17.7%。可见,OFDM 信号的某些频率成分在信号传输过程中逐渐衰减或被丢失。但是由图 12 看,OFDM 信号的功率仍足以满足通信的要求。

图 9 ~ 12 对 OFDM 信号的分析表明,电力线上

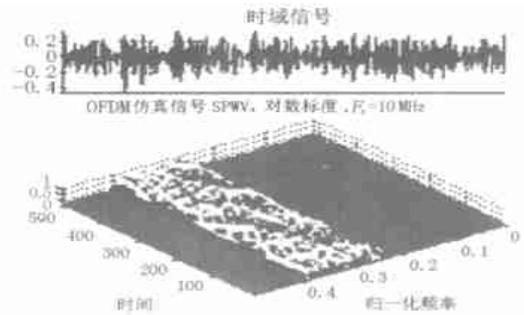


图 10 OFDM 仿真信号的 SPWV
(与接收点信号对应)

Fig. 10 SPWV of 20 carriers computerized OFDM signal
(corresponding to the receiver signals)

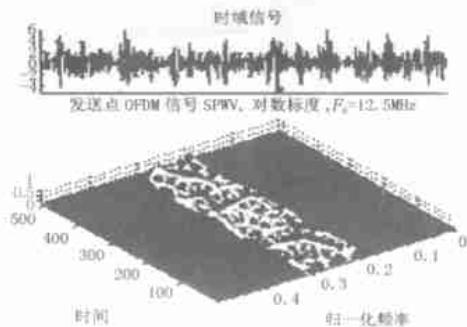


图 11 发送点 OFDM 信号的 SPWV

Fig. 11 SPWV of 20 carriers OFDM
signal at the transmitter

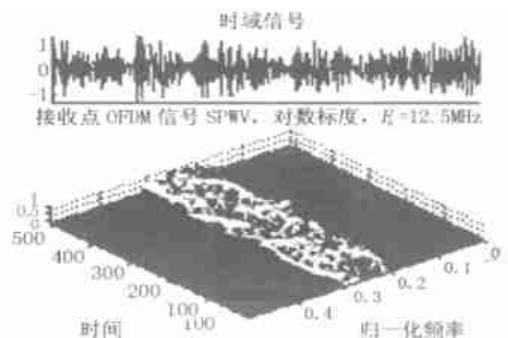


图 12 接收点 OFDM 信号的 SPWV

Fig. 12 SPWV of 20 carriers OFDM signal at the receiver

OFDM 信号的特性是,其能量谱分布随时间变化,有时会增加一些频率成分的噪声,因此简单的时域或者是频域分析并不能完全反映信号在信道上的传输情况。使用时频分析的方法有助于得到信号中的许多细节信息。

4.2 低压电力线上 OFDM 信号传输特性分析

试验分成两步进行:第一步,固定子载波数,寻找最佳子载波间隔;第二步,在第一步工作的基础

上考察 OFDM 信号在低压电力线上的传输性能。

固定子载波数为 10,变化子载波间隔,OFDM 信号在电力线上的传输情况如图 13、14 所示。

PLC OFDM 发送系统数据—子载波间隔的影响

子载波数 10, FFT 长度 128 点, 保护间隔 16 点

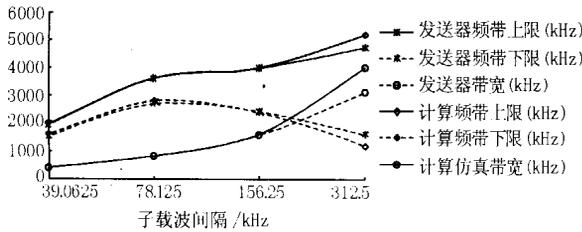


图 13 发送点 OFDM 子载波间隔的影响

Fig. 13 Influence of OFDM carriers spacing at the transmitter

PLC OFDM 接收系统数据—子载波间隔的影响

子载波数 10, FFT 长度 128 点, 保护间隔 16 点

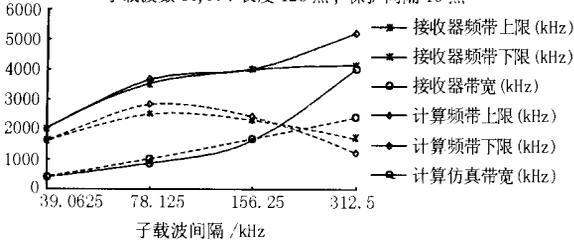


图 14 接收点 OFDM 子载波间隔的影响

Fig. 14 Influence of OFDM carriers spacing at the receiver

由图 13、14 可以看出,当子载波间隔小于 156 kHz 时,发送点信号的动态频率范围与计算仿真结果基本相同。接收点的信号动态频率范围与发送点之间的差别也不大,可以看作信号传输基本没有畸变。最佳子载波间隔选在 78.125 kHz 左右。

以这个数值大小作为子载波间隔,则 OFDM 信号传输性能随子载波数变化的情况如图 15、16 所示。

PLC OFDM 发送系统数据—子载波数的影响

子载波数间隔 78125Hz, 采样频率 10MHz, FFT 长度 128 点, 保护间隔 16 点

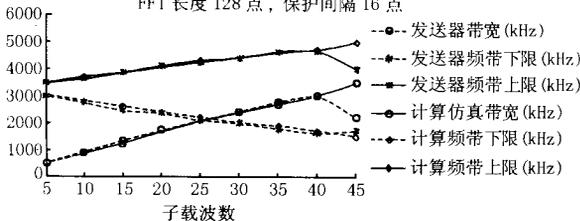


图 15 发送点 OFDM 子载波数的影响

Fig. 15 Influence of OFDM carriers number at the transmitter

图 15 中当子载波数小于 40 时,发送点实测信

PLC OFDM 接收系统数据—子载波数的影响

子载波数间隔 78125Hz, 采样频率 10MHz, FFT 长度 128 点, 保护间隔 16 点

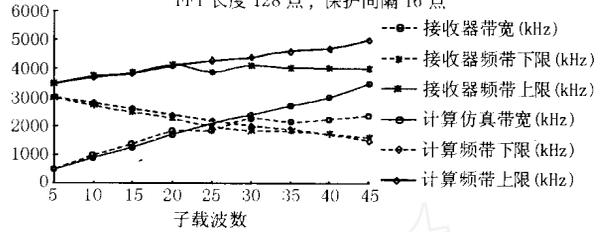


图 16 接收点 OFDM 子载波数的影响

Fig. 16 Influence of OFDM carriers number at the receiver

号的动态频率范围与仿真结果一致。在载波间隔固定的情况下,子载波数继续增加,意味着信号带宽增大,发送器的输出无法满足要求而性能下降。这也是 OFDM 的一个主要特点输出放大器既要满足宽带线性,又要能输出功率峰值对平均值之比很高的信号。这对 D/A 和放大器是一个严峻的考验。

图 16 表明在接收点处信号的一些高频成分丢失。其原因是高频信号在线路上衰减,尤其是传输路径上被某些负载吸收了,比如计算机。同时信号中还增加了一些低频成分,这可以看作噪声干扰。

尽管在接收点有较强的信号衰减,如果按照本文图 3 的结果选取 40 作为子载波数,仍能够达到约 3Mb/s 的数据率。

5 结论

将 OFDM 技术用于低压电力线载波通信是一个很有潜力的方法。本文提出了一个电力线通信 OFDM 模型及其设计方法,包括 OFDM 算法本身的软件实现和硬件系统构成。这个系统的耦合电路经过了精心设计以满足电力线的特殊要求。本文还利用平滑的伪维格纳分布对 OFDM 信号的动态频率范围进行时频分析。试验表明,当子载波数选为 10,则 78.125 kHz 是比较理想的子载波间隔。在此载波间隔中,若子载波数小于 40,则 OFDM 带宽损失很小。尽管有高频成分的衰减,在 40 个子载波的情况下,通信速率可以达到大约 3 Mb/s。

参考文献:

[1] Brown P. Directional Coupling of High Frequency Signals onto Power Networks[A]. Proc 1997 International Symposium on Power-line Communications and Its Applications. Essen (Germany):1997.

[2] Brown P A. Some Key Factors Influencing Data Transmission Rates in the Power Line Environment When Utilizing Carrier Frequencies Above 1 MHz[A].

- Proc 1998 International Symposium on Power-line Communications and its Applications. Tokyo (Japan) : 1998.
- [3] Nguimbis J, JIANG Xia, CHENG Shirjie. Noise Characteristics Investigation and Utilization in Low Voltage Power-line Communication[A]. IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Singapore :2000.
- [4] Liu D, Flint E, Gaucher B, et al. Wide Band AC Power Line Characterization[J]. IEEE Trans on Consumer Electronics, 1999, 45(4) : 1087-1097.
- [5] Ahmad R S, Bahai, Burton R S. Multicarrier Digital Communications Theory and Applications of OFDM[M]. New York:Kluwer Academic / Plenum Publishers,1999.
- [6] Jiang X, Nguimbis J, Cheng SJ, et al. A Novel Scheme for Low Voltage Power-line Communication Signal Processing[J]. ELSEVIER Electrical Power & Energy Systems,2003, 25 : 269-274.
- [7] Boashash B. Time Frequency Signal Analysis Methods and Applications[M]. Australia:Longman Cheshire,1992. 3-39.
- [8] Cohen L. Time-frequency Distribution[J]. Review Proceedings of IEEE, 1989, 77(7) : 941-980.

收稿日期: 2003-08-08; 修回日期: 2003-12-19

作者简介:

熊兰(1978-),女,硕士研究生,研究方向为电力系统载波通信;

程时杰(1945-),男,教授,博士生导师,主要从事电力系统稳定控制、人工智能在电力系统中的应用、电力系统载波通信等方面的教学和研究工作;

Joseph Nguimbis(1965-),男,博士研究生,研究方向为电力系统载波通信。

Transmission and time-frequency analysis of the OFDM signal over the low voltage power-line

XIONGLan, CHENG Shirjie, Joseph Nguimbis

(Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: A model and a complete design methodology of OFDM transmitter for power-line communication are proposed. Some experimental measurements have been performed in residential environments to find proper physical layer parameters of PLC OFDM. The Wigner-Ville time-frequency analysis in conjunction with properly selected OFDM parameters is applied to evaluate the signal dynamic range performance over the low voltage power-line network. The results indicate that PLC is a potential solution for high speed communications.

Key words: low voltage power-line carrier communication; OFDM; time-frequency analysis; wigner-ville distribution

(上接第 29 页 continued from page 29)

- [3] 卢盛和,冉龙明(LU Sheng-he, RAN Long-ming). 配电网电压互感器中性接地方式研究(A Study of Distribution Network Voltage Transformer Neutrium Grounding Method)[J]. 重庆大学学报(自然科学版)(Journal of Chongqing University, Natural Science Edition),1998,21(3):94-100.
- [4] Peterson H A. Transients in Power System[Z]. 1961.
- [5] Araujo A E A, Soudack A C. Ferroresonance in Power Systems: Chaotic Behaviour[J]. IEE Proceedings-C, 1993,140(3):237-240.
- [6] Emin Z, AlZahawi B A T. Ferroresonance in Electromagnetic Voltage Transformers: A Study Based on Nonlinear Dynamics[J]. IEE Proc—Gener Trans and Distrib,1997,144(4):383-387.

收稿日期: 2003-10-14; 修回日期: 2003-10-27

作者简介:

杜志叶(1974-),男,工程师,硕士研究生,主要从事电力系统过电压及电磁兼容方面的研究;

阮江军(1968-),男,教授,博士生导师,主要从事电磁场数值计算及电磁兼容方面的研究;

王伟刚(1978-),男,在读硕士研究生,主要从事电力系统电磁兼容方面的研究。

Improvements on simulation model of ferroresonance

DU Zhi-ye, RUAN Jiang-jun, WANG Wei-gang

(College of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: In the neutral point non-earthed complicated power system, ferroresonance overvoltage caused by single-phase earthed fault happens frequently. This paper employs MATLAB-based simulation to achieve digital calculation and simulation of the ferroresonance transient process due to matching of non-linear exciting inductance of PT and network to earth capacitance. Different ways about ferroresonance suppression and their effects are discussed and simulated as well.

Key words: ferroresonance; MATLAB-based simulation; resonance suppression