

# 以 INT51X1 为核心的低压电力网 载波调制解调器及其实现技术

彭为国, 别碧勇

(武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072)

**摘要:** 根据中国接入网的现状, 提出了一个以电力线通信(PLC)作为接入方式的拓扑结构。在对电力线信道模型分析的基础上, 介绍了基于低压电力网数字通信的几种常见方式。最后以正交频分复用的原理与应用为例, 具体阐述了以 INT51X1 芯片为核心的高速电力线接入设备的设计方案。

**关键词:** 电力线宽带接入; 正交频分复用; INT51X1 芯片; MII 接口

**中图分类号:** TM73      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1003-4897(2004)09-0035-05

## 0 引言

现代社会信息交流已成为人们生活的一部分。目前, 以光纤为主的主干网建设已基本完成, 但接入网是目前通信网的瓶颈。目前一些主流并且比较成熟的宽带接入技术主要包括 xDSL、HFC、PON、无线接入等等<sup>[1]</sup>。针对我国接入网的现状, 可以采用因地制宜策略, 综合采纳各种接入方式, 而老百姓身边四通八达的电力网就提供了一个较为理想的宽带接入解决方案。

低压电力网分布最广, 网络结构灵活。一种比较容易实现的网络结构可以参考光纤到户 (FTTH) 模式, 局端连接采用点对点结构, 用户端采用一对多点的形式。这里的“一点”就是业务节点接口 (SNI), 从物理上来说是一个星形的拓扑结构, 可以从小区变压器端引出, 耦合在电力线上的数据流随着电力线进入小区内的每一户家庭。从用户节点来看, 每个用户都能从电力线上传或下载数据包, 在逻辑上仍是一个总线网, 各用户仍然共享逻辑上的总线, 可以使用 CSMA/CD 协议<sup>[2]</sup>。这实际上是局域网的网络体系, 用户终端都遵循以太网的协议, 原来在局域网上运行的协议 (IPX 或 IP) 和各种应用程序可以不加改动或稍加改动在电力线局域网上运行。

与通常的数据通信不同, 由于电力线信道十分恶劣, 数据传输比较适合 OFDM 形式: 将高速数据流分成若干低速数据流, 同时将可用的频谱划分为许多窄带, 分别传输这些低速数据信号, 并通过某些措施使频谱效率最高。这与以太网中的 802.11 协议比较类似, 容易移植。但数据链路上 MAC 包形式可能与通常的以太网不同, 为了消除 PLC 信道衰减, 它可能需要额外的字节开销, 如 INTELON 公司的数据包就是

其中的一种, 它被称为电力包 (PowerPacket)<sup>[3]</sup>。

图 1 是电力线宽带接入的一种拓扑结构, 图中 PNT 指电力线网络终端, 通过它可以连接电脑、电话、打印机等终端。变压器端的电力线网络单元 (PNU) 负责控制电力线网络并从单元配电网集成话务, 实现低压配电网的数据通信, 通过适当的电信接口连至 Internet。

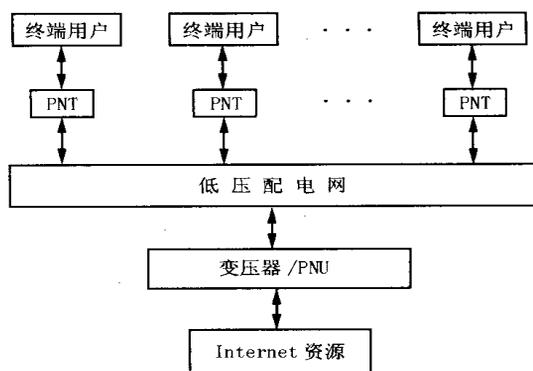


图 1 电力线接入的拓扑结构

Fig. 1 Topology of powerline access to network

依据这个模型, 未来的智能家电可以很方便地移植现有的各种局域网通信协议及网络管理软件, 形成基于电力线通信的嵌入式终端, 这无疑将大大促进未来智能家居的实现。用户通过一个电力线调制解调器, 一端接终端, 另一头插上电源插座, 就能免去布线的麻烦, 充分体验“不添线”(No New Wires) 的乐趣。

## 1 电力线通信的信道分析及对策

对于所有的通信信道, 阻抗、信号衰减和干扰是决定其性能的基本参数。因此, 在使用低压电力线作为信号传输媒介之前, 需要对它的信道特性进行

分析。

美国科学家的研究表明,低压电力线上的输入阻抗与所传输的信号频率密切相关。总体上,阻抗随着频率增加而增加,但可能局部出现所谓的阻抗低谷区,其原因是电力线连接有各种复杂的负载,这些负载及电力线本身组合成许多谐振回路,在谐振频率及其附近频率上形成低阻抗区,从而造成了在局部频率段内阻抗随着频率增加而减小的现象。

在实际情况中,由于大量的用电设备同时释放出干扰,而这些干扰的瞬时功率、周期、相位等又变化很大,各不相同,因此最终会在电力线上产生时变的连续干扰,这种干扰平均功率较小,但是频谱很宽,且持续存在。因此,在通信过程中的信噪比可能会变得很低,通信误码率增加。

一般说来,对一个网络的各种组件(如电缆连接、设备级联)的系统精确阐述都需要在复数域进行,但通常不可能得到足够精度的必需参数。目前存在的一些衰减及噪声模型基本上是基于测量而得到的,由于这个原因它们一般被限制在 150 kHz 以下的频带内。但从最基本的信号多径传输模型分析,不难得出公式(1)所示的一个简单的电力线通信(FLC)模型<sup>[4]</sup>,该模型的频带范围可以从 500 kHz 到 20 MHz:

$$H(f) = \prod_{i=1}^N \underbrace{|g_i(f)|}_{\text{额外因子}} \underbrace{e^{-g_i(f)}}_{\text{衰减环节}} \underbrace{e^{-(a_0+a_1 f^k) d_i}}_{\text{衰减环节}} \underbrace{e^{-j2\pi f t_i}}_{\text{延时环节}} \quad (1)$$

该模型描述了信号在电力线上传播时的传输时延及低通特性。不难得出,随着传输距离及信号频率的增加,信号的衰减也会增大。额外因子  $g_i$  反映了信号沿传播路径传输时的反射情况,它的值很复杂,与反射点、频率都有关系。实际测量表明,在大多数情况下由于多径传输时延几乎相等,  $g_i$  可以近似为一个与频率无关的量 ( $g_i = 1$ )。在存在  $N$  条反射路径的情况下,接收点收到的将是一个叠加的结果。

表 1 FLC 模型参数

Tab.1 Powerline communication parameters of the model

$i$	信号传播的径数
$a_0, a_1$	衰减参数
$k$	衰减因子指数(典型值在 0.5 和 1 之间)
$d_i$	路径长度
$t_i$	路径延迟

图 2、图 3 是根据此模型和实测得出的一个频

率衰减曲线<sup>[4]</sup>:

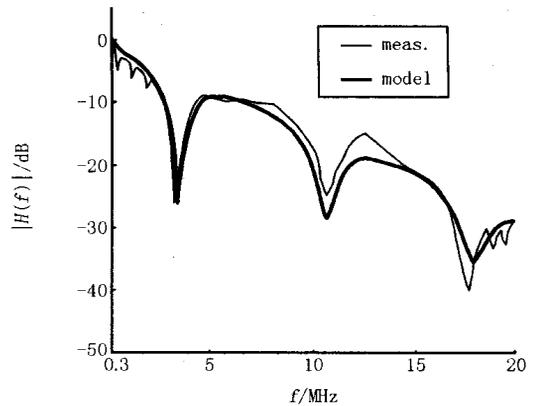


图 2 多径下 ( $N=4$ ) 的 FLC 网络幅度响应  
Fig. 2 Amplitude response in FLC test network when simulation with  $N=4$  paths

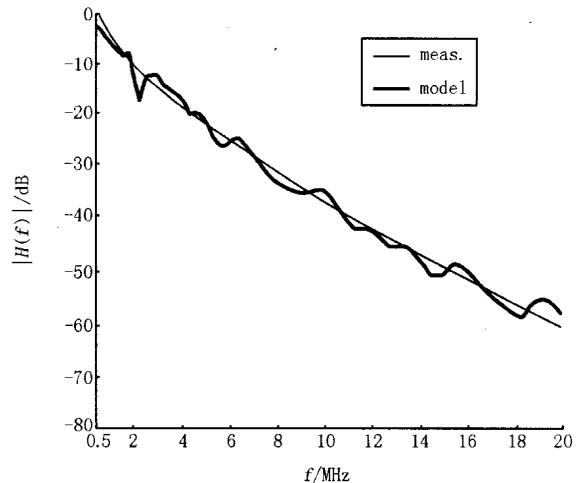


图 3 0.5~20 Hz 频段下的一条 150 m 电力线频率衰减曲线

Fig. 3 Attenuation profile of a 150 m powerline link from 0.5MHz to 20MHz

由图可见,除了一些陡度特别大的峰谷区域,模型与实测曲线非常吻合。这些峰谷区域主要是由于电力网负载的急剧变化所致,即由低压电力网衰减的时变特性引起,它的进一步描述可以采纳统计方法进行计算分析。但对于一般的场合,只要负载变化不是十分大,该模型还是能够准确拟合电力线信道的。

早期的电力线通信主要采用传统的模拟单载波通信,由于模拟系统本身缺陷使得它不可能成为主流的通信方式。现今的 FLC 通信将数字信号信道与低压电力网结合,借助现行的 FLC 模型及数字信号处理(DSP)技术的进步及特殊的调制解调技术,

比较好地克服电力线上的噪声和干扰,大大改善了低压电力线的通信质量,提高其服务质量(QoS)。目前 PLC 采用最多的是扩频通信和正交频分复用(OFDM)。

根据信息论香农定理<sup>[5]</sup>,信道容量定义:

$$C = B \log_2(1 + s/n) \quad (2)$$

给定带宽和信噪比时,信道的容量是一定的。而在一定信道容量下,如果带宽  $B$  扩充到一定程度,那么就能在较低信噪比要求下得到很高的传输质量。而扩频通信就是通过编码及调制的方法将信号所占有的频带扩展得远大于所传信息必需的最小带宽,即使一小部份的频谱受干扰或衰减也不会使信号产生严重的畸变,因此能比较好的克服电力线上的噪声和干扰,实现有效的 PLC 通信。目前采用扩频方式通信的芯片有 Intellon 公司的 SSC P200/P300, Adaptive network 公司生产的 AN192 - 1000 系列,以及国内研制的 SC1128 等。由于速率限制,它们往往用在电力抄表(水、电、气表)、载波电话、电力线载波通信等数据量不是很大的场合。

正交频分复用(OFDM)的基本思想是把输入信息转换成多路并行信号,利用快速傅立叶变换对相互完全正交的一组载波进行调制形成子载波信号,同时将可用的频谱划分为许多窄带,分别传输这些子载波信号。为了获得高的频谱效率,子载波的幅频响应相互重叠和正交。当 OFDM 所有子载波信号叠加到一起时,其信号频谱接近于矩形频谱,因而其频谱利用率在理论上可以达到香农信息论的极限。而且每个子载波可以使用不同的调制方式,比较常用的有 BPSK、QPSK 和 QAM 等。也就是说,OFDM 是将高速的串行数据变成低速并行数据进行传输,虽然每个子载波的速率不高,但所有子信道加起来将会获得很高的数据速率。OFDM 将高速串行数据分割为  $N$  个子信号,等价于将码元周期延长了  $N$  倍,它远大于一般典型多径反射的时延,有效地克服了由多径效应引起的码间干扰(ISI)。并且 OFDM 与纠错编码相结合,可以克服多径衰落问题,特别适宜于电力线这种非常恶劣的信道环境。OFDM 存在的问题在于电力网使用的大多是非屏蔽线,在进行高速数据传输时不可避免地会形成电磁辐射,若对其功率控制不当,有可能对其它无线通信造成干扰。Intellon 公司的 INT51X1 系列产品,就是采用 OFDM 技术,在 4.3 ~ 20.9 M 的频带范围内共用 84 个载

波,采用 DBPSK/DQPSK 调制原理,使其最高传输速率可达 14 Mbps。

## 2 系统方案

如前所述,在接入网络结构确定的情况下,本次设计的重点实际上是对电力线网络单元(PNU)即电力线 MODEM 的设计。考虑到接入网的带宽量级需要,拟采用正交频分复用(OFDM)方式。芯片实现则有通用微处理器(如 DSP)或专用电力线调制/解调芯片两种选择。前者实现 OFDM 需要 DSP 完成数据编解码、FFT/IFFT、同步提取、导频跟踪,若要进一步提高可靠性还要加上滤波、AGC、纠错编码等算法。若采用专用电力线调制/解调芯片则主要是接口设计,无须考虑 OFDM 算法,无需导频就可以在低信噪比的信道获得同步。从设计灵活性及开发成本综合考虑,我们采用美国 INTELLON 公司的专用 PLC 通信芯片 INT51X1 作为主接入芯片。

INT51X1 是一块理想的基于 PLC 宽带接入的调制/解调芯片,它采用了 INTELLON 公司专利注册的电力数据包(PowerPacket)正交频分复用(OFDM)技术,在 84 个载波上利用 DBPSK/DQPSK 调制原理使其传输速率最高可达 14 Mbps。它的媒质访问控制(MAC)采用的是载波多路侦听/冲突检测(CSMA/CD),并有 56 位的密钥管理以保证 PLC 通信安全。协议栈中还内置了自适应频率选择使得能自动调整信道,再加上前向纠错、优先权限设计及自清除重发(ARQ)等措施,即使在恶劣的环境下,仍能保证很高的信噪比。片内含有低功耗 10 位 A/D、D/A 转换器、自定增益控制电路(AGC),采样率可达 50 Mbps,大大简化了设计过程。芯片内核电压是 1.5 V,输入输出电压为 3.3 V,但提供了 5 V 电压的容限。芯片有 144 个管脚,采用 uPGA 封装<sup>[3]</sup>。

INT51X1 功能框图如图 4 所示。

通过对 INT51X1 管脚 MODE0、MODE1 高低电平搭配,INT51X1 共有三种工作模式选择。一种是 USB 模式(USB Option),用于 USB 网络设备与 USB 主机之间的通信;一种是主机/数据终端模式(Hbst/DTE Option),用于主机或数据终端与以太网物理层之间的通信;还有一种是物理层模式(PHY Option),微处理器利用 MII 或 GPST 接口与以太网控制器(可以带 PCI 桥)之间进行通信。而本次设计是以第三种工作模式为例,设计一种以 INT51X1 为核心的带 PCI 总线接口的电力线 MODEM 设计方案。

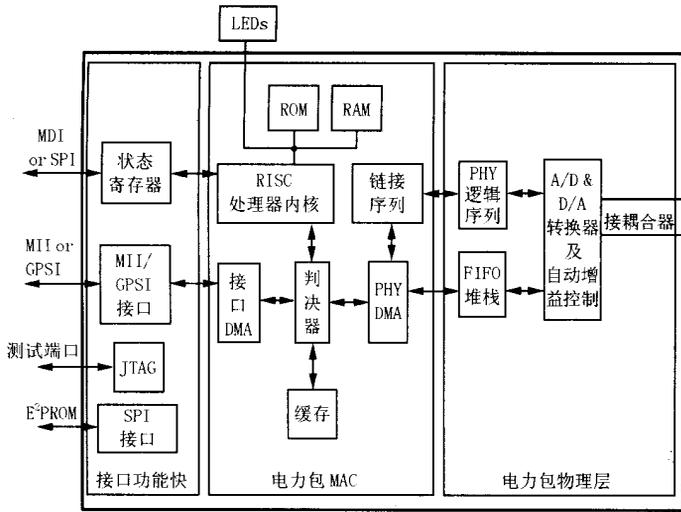


图 4 INT51X1 芯片框图

Fig. 4 INT51X1 Functional block diagram

这种电力线 MODEM 支持 PCI 总线,核心处理芯片是 INT51X1,与之通信的以太网控制器可以选用 Realtek 的 8130<sup>[6]</sup>或 AMD 的 Am79C972 以太网控制芯片。整个系统的框图如图 5 所示:

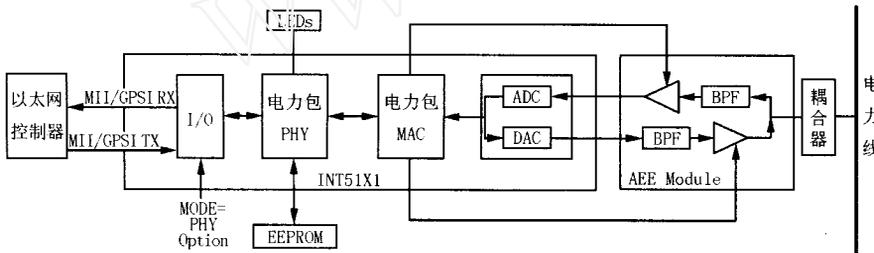


图 5 电力线 MODEM 设计框图

Fig. 5 Diagram of PLC MODEM design

图中系统组成主要由模拟前端模块 (AFE)、INT51X1、及以太网控制器 RTL8130 三个部分组成。而耦合器通常与电源适配器设计在一起,用于从电力线上耦合数据并向系统提供所需的各级电压。模拟前端模块 (AFE) 包括带通滤波 (BPF)、线性驱动及 AGC 控制引脚,数据经 AFE 后交 INT51X1 处理。从成本考虑,滤波电路可由运放自己搭建,线驱可以直接用三极管,但这样的模拟电路稳定性难以保证,推荐使用 INTELON 自己的 5 伏 AFE SIP 模块。RTL8130 是台湾瑞昱的一个网卡芯片,它本身也是个 PCI 总线控制器,与经典的 RTL8139 相比,它最大不同是有一个媒质无关接口 (MII),其驱程亦可参照 RTL8139。

INT51X1 自己有一个精简指令集 (RISC) 的处理器内核,实现 OFDM、加解密、自适应信道调整等计

算。标准的 JTAG 端口方便在线调试及程序下载升级。另外还提供了一个 LED 端口,通过发光二极管的显示指示,使用户对系统的运行状态一目了然。INT51X1 还有一个用 SPI 端口控制的 EEPROM 接口,用作初始配置 INT51X1,除采用 EEPROM 方式外,还可以通过媒质访问控制 (MAC) 管理入口的特定帧序列来初始配置 INT51X1。若 INT51X1 工作在物理层 (PHY) 模式下,这两种方式都可以初始化;但若工作在主机/数据终端或 USB 模式下,则只能用 EEPROM 了。EEPROM 中的内容已经被 INT51X1 的用户协议接口 (User Protocol Interface) 所定义,主要放固件和一些产品信息。

INT51X1 的外在主机接口用于它与其它控制器通信。具体来说,当选择管脚 MII- GP-SFN 的不同状态时,INT51X1 以复用的形式提供了两种此类型的接口:通用目的的外设接口 (GPSI) 和媒质无关接口 (MII)。(GPSI) 是一种灵活的双向串行接口,它通过一个同步时钟提供了一个与控制器联系的前向接口,用以发送接收数据。而 MII 则更常见,它是一种标准工业接口,主要为数据链路层中的 MAC 子层与物理层的上层之间提供接口。它的发射、接收以及同步信号都是以四位总线的形式进行,并带有 CSMA/CD 协议。

INT51X1 与以太网控制器 RTL8130 通信可以利用 MII 媒质无关接口。由于 RTL8130 与 INT51X1 都支持 MII 接口,它们之间的互连比较简单,一一对应即可。再后就是对 RTL8130 编程实现 MODEM 的 PCI 接口,具体就是以太网控制器与 PC 之间的握手了。

如图 6 所示,MII 除了传送数据外,还有一些链路状态,如 CRS 载波侦听信号、COL 冲突检测信号。载波侦听信号用来侦听信道是否空闲,而冲突检测信号则是在半双工模式下检查信号是否因为同时传输而引起冲突。

应该说,电力线通信 (PLC) 的重点难点在于它的软件设计。采用 OFDM 方式的 PLC 通信,将高速数据流分成多路低速支路以降低多径效应的敏感性。点与点之间的通信是通过分解一个个数据包进行的,这与无线局域网的 802.11 协议是十分相似

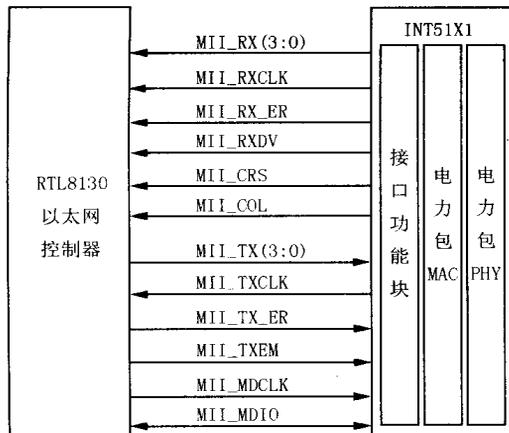


图 6 RTL8130 与 INT51X1 之间的接口连接

Fig. 6 Interface between RTL8130 and INT51X1

的,在具体协议栈设计时可以参考 802.11 体系。为了产生大量的子载波要在发射端对数据进行 IFFT,相应的,在接收端还要用 FFT 还原。为保证子载波的严格正交,要在码元间插入保护间隙使多径信号不致影响下一码元。此外,软件设计中还要包括卷

积编码、交织、同步提取等算法。若要进一步提高数据传输的服务质量特性(QoS)和安全性,还必须加上前项纠错编码(FEC)、信道自适应调整、加密算法等等。

所幸的是 INT51X1 的协议栈已经帮我们完成了这些工作,这些协议对用户来说都是透明传输的。这使得我们有更多时间去开发整个系统的底层协议。这方面重点是对 INT51X1 的控制寄存器、状态寄存器进行读写,还有一部分是参照其用户协议接口对其进行初始化。相当的一部分工作则是对标准设备驱动的编写,如 PCI 桥、USB 主机等。而这方面的工作已经很成熟了,此处不再赘述。

INT51X1 通过数据管理接口(MDI)对其状态寄存器、控制寄存器进行读写。MDI 接口有一个串行时钟,一个双向的串行数据线,在时钟的上跳沿读写数据。通过 MDI 接口可以随时了解 INT51X1 的运行状态以便实时控制。MDI 的读写有自己的帧结构,主要由操作码、物理地址码、数据码组成,其中操作码 10 代表读,01 代表写。

	帧同步	帧起始	操作码	物理层地址	寄存器地址	调整码	数据场	空闲码
读	1...1	01	10	AAAAA	RRRRR	Z0	DDDDDDDDDDDDDDDD	Z
写	1...1	01	10	AAAAA	RRRRR	10	DDDDDDDDDDDDDDDD	Z

图 7 MDI 帧结构

Fig. 7 MDI frame structure

### 3 结束语

电力线接入设备设计时主要考虑以下几个方面:

1) 模式选择问题。INT51X1 是采用 Host/DTE 模式还是 PHY 模式;是用 USB 接口还是 PCI 接口。基于本次设计的专用性及软件开发周期性方面的考虑,我们采用了 PHY 模式 PCI 总线板卡形式。但 USB 口的即插即用、Host/DTE 模式的易于携带等优点都是今后 MODEM 的发展方向。

2) 若配以高速处理器,再设计一个普通数字流与以太网数据流协议转换的处理程序,则完全可以省掉 PC,作为局域网的一个智能终端使用,则大大地扩大了其应用范围。

3) INT51X1 丰富的接口资源,出色的网络处理能力,较低的功耗,加上其 OFDM 处理的天然优势,很容易设计成 802.11b 的嵌入式无线终端,实现室内建筑间的无缝连接。

4) 若以电力线接入方案设计智能家居,由于线

路噪声对通信线路的影响很大,建议在室内的每个插座都备有一个电源滤波的设计,这无疑将提高电力线的通信环境。

5) 今后若能提出一个基于低压电力线信道环境的更准确模型,则电力线通信(PLC)的接入范围将进一步扩大。

### 参考文献:

[1] 孙辛茹,吴云峰,齐淑清(SUN Xin-ru, WU Yun-feng, QI Shu-qing). 电力线通信(PLC)接入技术及各种接入方式的比较(The Comparison Between Power Line Communication Access Technology and Other Access Modes)[J]. 电力系统通信(Electric Power Systems Communication), 2002, (6): 14-17.

[2] 杨心强,邵军力(YANG Xin-qiang, SHAO Jun-li). 数据通信与计算机网络(Data Communication and Computer Networks)[M]. 北京:电子工业出版社(Beijing: Publishing House of Electronics Industry), 1998. 346-350.

(下转第 73 页 continued on page 73)

七里沟两侧电压变化不大,但零序电压变化很大。

因为上述原因,当神大 线发生接地故障时,铺七 线铺上、七里沟两侧  $3I_0$  与  $3U_0$  相位相反,两侧零序方向元件都判断是正方向区内发生故障。七里沟侧 283 开关 LFP-901A、LFP-902A 保护装置中零序正方向元件  $F_{0+}$ 、方向比较过流元件  $I_{0F}$  同时动作,且反方向元件  $F_{0-}$  不动作,同时收到通道信号 10 ms,所以方向保护停讯。同时对侧保护停讯,且相电流差突变量元件选出故障相为 A 相,所以保护动作出口,跳 283 开关 A 相。重合后,又有相同的故障,所以保护不经选相直接出口跳三相。

由于铺上侧 LFP-901A、LFP-902A 保护装置相电流差突变量元件没有选出故障相,所以保护装置没有动作出口。

#### 4 结论及解决措施

在方向纵联保护中采用零序方向元件,必须注

意相邻平行线路中零序电流产生互感的问题。为保证比较线路两端零序功率方向的纵联保护不误动,可以提高方向比较过流元件  $I_{0F}$  的定值,使其躲过可能出现的最大零序不平衡电流。延伸来看,在并行线路设计建设过程中,也应考虑到互感的相互作用,特别是在日益精尖的微机保护性能配置及整定计算过程中,也应就本课题引出的一些问题进行分析参考,以便进一步完善。

收稿日期: 2003-12-23

作者简介:

郭润生(1969-),男,工程师,从事电力系统继电保护运行管理;

何彩虹(1970-),女,工程师,从事电力系统调度管理;

鄧建杰(1972-),男,工程师,从事电力系统运行管理工作。

### Influence of zero-sequence mutual inductance to pilot protection in parallel lines

GUO Run sheng<sup>1</sup>, HE Cai-hong<sup>1</sup>, ZHI Jian-jie<sup>2</sup>

(1. Shuozhou Branch of Electric Power Company, Shuozhou 036002, China;

2. Shanxi Electric Power Corporation, Taiyuan 030001, China)

**Abstract:** The maloperation of pilot protection caused by zero-sequence mutual inductance when earth fault occurring in parallel lines is analyzed. Through the accident, the paper presents that zero-sequence mutual inductance will influence directional components. And the relevant countermeasures are put forward to enhance the fault diagnosing ability of relay protection engineers.

**Key words:** parallel lines; zero-sequence mutual inductance; pilot protection

(上接第 39 页 continued from page 39)

- [3] Intellon Corporation. INT51X1 Integrated Powerline MAC/PHY Transceiver with USB and ETH Integrated Bridges [EB/OL]. <http://www.intellon.com>. 2002.
- [4] Manfred Z, Klouse D. A Multipath Model for the Powerline Channel [J]. IEEE Trans on Communications, 2002, 50 (4): 553-559.
- [5] 王秉钧,孙学军,沈保锁(WANG Bing-jun, SUN Xue-jun, SHEN Bao-suo). 现代通信系统原理(Modern Communication System Method) [M]. 天津:天津大学出版社(Tian-

jin: Tianjin University Press), 1991. 5-6.

- [6] Realtek Corporation. Realtek Single Chip Fast Ethernet Controller with MII&AUI Interface RTL8130 [EB/OL]. <http://www.realtek.com.tw>. 1999.

收稿日期: 2003-08-06; 修回日期: 2003-09-30

作者简介:

彭为国(1979-),男,硕士,研究方向为通信网络技术;

别碧勇(1978-),男,硕士,研究方向为通信网络技术。

### INT51X1-based MODEM and its realization in low-voltage power network

PENG Wei-guo, BIE Bi-yong

(School of Electric Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

**Abstract:** This paper summarizes the situation of access networks in China and proposes a topology taking powerline communication as a method to access network. In addition, it introduces several effective ways to realize the high-speed-low-voltage powerline communication by analyzing a powerline channel model. According to the orthogonal frequency division multiplexing principle, it details how to design a high speed access device based on INT51X1.

**Key words:** powerline broadband access network; OFDM; INT51X1 chip; MII interface