

基于 dsPIC 的工频通信系统装置研制

王智慧, 李建岐, 黄毕尧, 刘国军

(中国电力科学研究院, 北京 100192)

摘要: 针对我国配电网工频通信信道特性, 开发了一种基于数字信号控制器的工频通信系统装置, 包括子站装置和用户终端。对工频通信系统构成, 以及信号调制和信号解调原理进行了介绍。在此基础上, 设计了适合我国配电网信道特性的工频通信系统装置。装置由主控单元、过零检测电路、信号调制/解调电路等部分组成, 详细介绍了主控单元的选择和各功能电路的硬件实现及工作原理。采用模块化编程思想, 并以 C 语言和汇编语言混合编程的方式完成了装置软件设计, 给出了主程序和子程序的流程图。测试表明, 所研制的装置现场运行可靠。

关键词: 工频通信系统; 通信装置; 数字信号控制器; 信号调制; 信号解调

中图分类号: TN 913.6

文献标识码: B

文章编号: 1006-6047(2011)02-0138-05

0 引言

双向工频通信系统 TWACS (Two Way Automatic Communication System) 是 20 世纪 90 年代在美国出现的一种基于电力配电网的通信系统。它用 50 Hz 作为输入/输出信号的载波频率通道, 在电压波形的过零点附近加入调制信号, 在输出通道上调制电压波形, 在输入通道上调制电流波形, 以实现双向通信^[1-4]。TWACS 技术完全利用已有的电力网络作为传输载体, 无需增加中继环节, 可直接进行跨变压器台区的长距离传输, 成本低廉, 可以作为配电网通信手段的一种重要补充。我国中压配电线路多采用中性点不接地或非直接接地系统, 不具有零序通路, 而且电网噪声复杂多变, 对工频信号检测很不利。在对我国配电网工频通信信道特性研究和实际测试的基础上, 开发了一种适合我国配电网的实用化工频通信装置。

1 工频通信系统原理

基于配电网的双向工频通信系统组成如图 1 所示, 主要由子站装置和用户终端装置两大部分组成。

子站装置安装在变电站主控室, 由主控制器、信号调制、信号解调 3 部分组成, 负责向用户终端发送命令和接收用户终端信息。用户终端安装在用户侧, 负责接收控制命令并完成相应动作或发回用户信息。子站装置和用户终端都必须设置调制和解调单元, 以实现信号的双向传递。定义子站装置到用户终端的信号为下行信号, 用户终端到子站装置的信号为上行信号。下行信号的发送由子站装置的信号调制电路实现, 并通过调制变压器耦合到 10 kV 母线上,

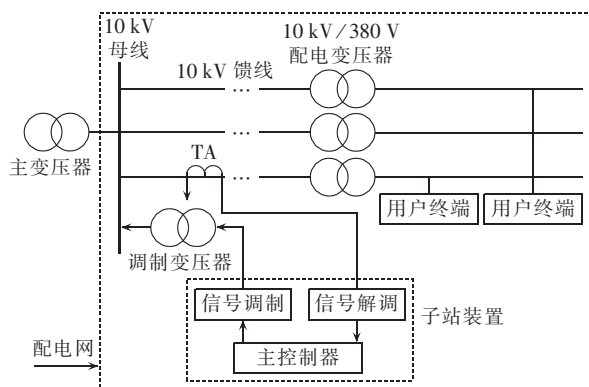


图 1 工频通信系统构成

变电站范围内的所有用户终端都能接收到该信号。上行信号的接收是由子站装置信号解调电路采集相应 10 kV 馈线出口处电流互感器(TA)中的电流信号来完成的。用户终端实现下行信号的接收和上行信号的调制, 主控制器用于数据存储和通信控制。

1.1 信号调制原理

下行信号的调制由子站装置在 220 V 低压侧实现, 通过调制变压器耦合到中压 10 kV 母线上, 下行信号调制等效电路如图 2 所示。

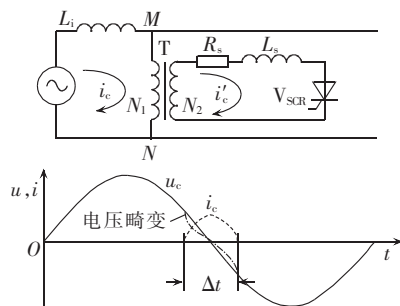


图 2 下行信号调制等效电路与信号波形

Fig.2 Downlink signal modulation circuit and signal waveform

图 2 中 T 为调制变压器,其作用是把控制电路和高压强电隔离, L_i 表示主变副边漏感, L_s 、 R_s 为调制电路参数。当在电压波形正过零点前 $\Delta t/2$ 处闭合晶闸管 V_{SCR} 时,产生的瞬间电流 i_c' 通过调制变压器耦合到主变副边产生电流 i_c , i_c 在 L_i 上引起一个畸变电压,从而使 10 kV 电压波形在过零处产生畸变,这个畸变可以往整个主变供电的配电网传播。畸变信号的频谱特征,能量大小可以通过调节 L_s 、 R_s 值得到^[5-6]。1 个数据位以 2 个电压周期为单位调制,“0”表示第 1 个周期调制、第 2 个周期不调制,“1”表示第 1 个周期不调制、第 2 个周期调制。

上行信号的调制在用户终端实现,等效电路和信号波形(U_m 和 I_m 为幅值)如图 3 所示。

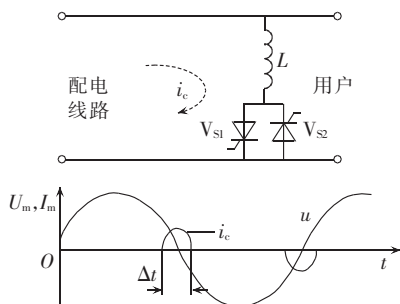


图 3 上行信号调制等效电路与信号波形

Fig.3 Uplink signal modulation and signal waveform

在电压接近过零点时,用户 220 V 侧回路中的晶闸管导通,产生瞬间电流 i_c , i_c 过零时晶闸管自动断开,调制电流 i_c 叠加在电压过零区域对应的电流波形上,并通过配电变压器耦合到 10 kV 馈线电流上,可在 10 kV 馈线的电流互感器中检测出来。与上行信号调制不同的是,此处的晶闸管是双向的,在正、负过零点处都可导通,即可以产生 2 个方向不同的脉冲信号,调制信号波形如图 3 下方所示。1 个数据位由 4 个相邻周期为单位进行调制,“0”表示在 8 个过零点中的 2、4、5、7 处调制,“1”表示在 1、3、6、8 处调制。

1.2 信号解调原理

工频信号解调的任务就是要检测出调制信号的存在,对调制信号的大小和形状并无过多要求,因此目前的工频通信系统主要采用时域方法解调信号。下行信号的检测有时间作差法和幅值作差法 2 种。时间作差法利用前后 2 个周期对应电压幅值相等时,其时刻的差别来检测调制信号,是一种模拟解调方法;幅值作差法利用前后 2 个周期对应时刻相等时,电压幅值的差别来检测调制信号,是一种数字解调方法^[6]。时间作差法原理如图 4 所示。

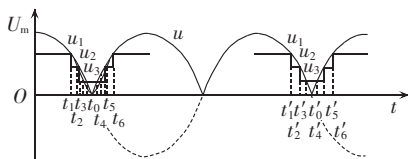


图 4 下行信号检测

Fig.4 Downlink signal detection

将以基准点开始的 2 个电压波形进行全波整流后,设置 3 个比较电平,配合微处理器的高速捕获计数器即可实现下行信号的检测。如图 4 所示,负过零点处附近的电压波形在经过不同电平比较后,可得到 $t_1 \sim t_6$ 的 6 个时间信息和负过零时间信息 t_0 ,令:
 $\Delta t_1 = t_0 - t_1, \Delta t_2 = t_0 - t_2, \Delta t_3 = t_0 - t_3, \Delta t_4 = t_0 - t_4, \Delta t_5 = t_0 - t_5, \Delta t_6 = t_0 - t_6$, 同理有:
 $\Delta t'_1 = t'_0 - t'_1, \Delta t'_2 = t'_0 - t'_2, \Delta t'_3 = t'_0 - t'_3, \Delta t'_4 = t'_0 - t'_4, \Delta t'_5 = t'_0 - t'_5, \Delta t'_6 = t'_0 - t'_6$ 。不考虑其他电网噪声,当有调制信号时, Δt 将增大;如果 2 个负过零点处都没有调制信号时,则 $\Delta t_i = \Delta t'_i$, 令

$$D = \sum_{i=1}^6 (\Delta t_i - \Delta t'_i) \quad (1)$$

当 $|D| < \lambda$ 时,无调制信号;当 $D > \lambda$ 时,表示信息位 1;当 $D < -\lambda$ 时,表示信息位 0, λ 为设定的阈值。该方法具有运算量小、简单易实现的优点,但是抗电压扰动的能力较弱。 $u_1 \sim u_3$ 确定后,由于电网电压往往有 $\pm 10\%$ 的波动,使得 $u_1 \sim u_3$ 不是最佳检测门限。随着信号处理技术和集成芯片的高速发展,使得利用现代数字信号处理技术进行信号解调变得可行。幅值作差法利用高速、高精度 A/D 对电压波形进行全周期采样存储,或局部采样足够的点数存储,采样数据与前一个周期的对应采样点作差,根据差值的大小及正负即可解调出下行信号。

上行信号的检测采用幅值作差方法,在电压过零附近设置检测窗口,利用相邻电流波形进行检测,如图 5 所示。

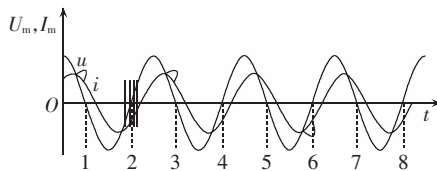


图 5 上行信号检测

Fig.5 Uplink signal detection

从基准点开始,在电压波形过零区域设置 8 个检测窗口,在每个窗口对应的电流区域采样 k 个点,分别为 $A_{11} \sim A_{1k}, B_{11} \sim B_{1k}, \dots, A_{41} \sim A_{4k}, B_{41} \sim B_{4k}$, 令:

$$D = \sum_{i=1}^6 [(A_{1i} - A_{3i}) + (A_{2i} - A_{4i}) + (B_{1i} - B_{3i}) + (B_{2i} - B_{4i})] \quad (2)$$

$D = 0$ 表示无信号; $D = +4\lambda$ 表示信息位 1; $D = -4\lambda$ 表示信息位 0, λ 为入站电流脉冲强度。

2 系统装置硬件设计

工频通信系统装置包括子站装置和用户终端。子站装置主要完成下行信号的调制、上行信号的解调及整个系统的控制功能,用户终端完成上行信号的调制和下行信号的解调,装置硬件结构如图 6 所示。

2.1 微处理器的选择

考虑到工频通信在信号调制时侧重处理器的控制功能,而在信号解调时侧重处理器的数字信号处理功能,因此系统主控单元选用数字信号控制器

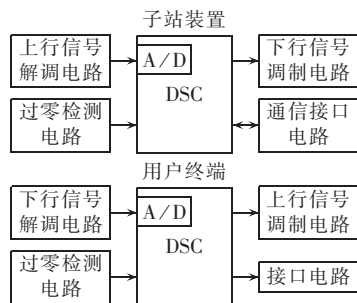


图 6 子站和用户终端装置硬件结构

Fig.6 Hardware structure of substation and user terminal

(DSC), 它集成了单片机(MCU)的控制功能以及数字信号处理器(DSP)的计算能力和数据吞吐能力。在 DSC 领域, 美国微芯公司(Microchip)推出的 dsPIC 系列具有很高的性价比, 采用改进的哈佛架构, 将 MCU 的控制特性与 DSP 的计算能力无缝地集成在一起。这种集成的功能对于需要高速、重复计算和控制的应用非常理想。以 16 位单片机为核心的 dsPIC 数字信号控制器, 提供了 MCU 所具有的所有功能: 大容量程序存取器(Flash)和数据存储器(RAM), 快速、复杂和灵活的中断处理, 丰富的模拟和数字外设, 电源管理, 可灵活选择的多种时钟模式, 上电复位, 欠压保护, 看门狗定时器, 代码加密, 全速实时仿真以及全速在线调试解决方案。同时, dsPIC 数字信号控制器还融合了可管理高速计算活动的数字信号处理功能, 具有专门的 DSP 引擎, 堪称嵌入式系统设计的最佳单芯片解决方案。

设计中选用 dsPIC33F 系列, 片内集成大容量 Flash 和 RAM, 无需外扩存储芯片。内部集成 12 位 A/D 转换模块, 该模块以逐次逼近(SAR)原理为基础, 提供最高 500 K 次采样/s(SPS)的转换速率。A/D 转换时钟、自动采样时间、A/D 转换时间、采样启动方式以及转换结果输出格式等都可通过设置相应的寄存器灵活选择, 满足信号解调时的采样要求。此外, 片内外设 UART、I2C、SPI、CAN 等能够满足各种通信需求。DSP 引擎、2 个 40 位累加器、支持除法运算的硬件、桶形移位寄存器、 17×17 位乘法器、16 位工作寄存器阵列和多种数据寻址模式, 共同为 dsPIC33F 提供了广泛的数学处理能力。此外, 直接存储器访问(DMA)允许数据在多个外设和专用 DMA RAM 之间进行无 CPU 开销的传输。可靠的现场可编程闪存程序存储器确保能对使用的 dsPIC33F 器件应用进行扩展^[7-8]。

2.2 过零检测电路

过零检测电路为信号调制和信号解调提供时间基准, 由电压互感器(TV)、前置放大电路、低通滤波电路、移相电路、电压比较电路组成, 如图 7 所示。

220 V 工频电压信号经 TV 取样后送至前置放大器放大, 并进行必要的相位补偿。滤波电路采用二阶有源低通滤波器, 防止高频噪声影响电压比较电

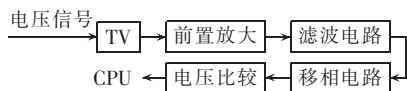


图 7 过零检测电路组成框图

Fig.7 Block diagram of zero-crossing detection circuit

路造成过零点不稳。移相电路将经过处理后的 50 Hz 正弦信号移相 90° , 然后经电压过零比较器处理后产生 50 Hz 方波信号, 送至 CPU 的外部中断引脚。

2.3 信号调制电路

信号调制电路完成上、下行信号的调制, 由晶闸管触发电路及其保护电路组成。当要进行信号调制时, CPU 的 2 个 I/O 口输出信号到与非门进行编码, 主要目的是为了防止晶闸管在 CPU 上电过程中的误触发。触发电路主要利用带光隔离的小功率晶闸管 MOC3052 驱动后面的大功率晶闸管, 其中还包括阻容滤波电路以防止电压上升过快引起晶闸管的误触发, 如图 8 所示。

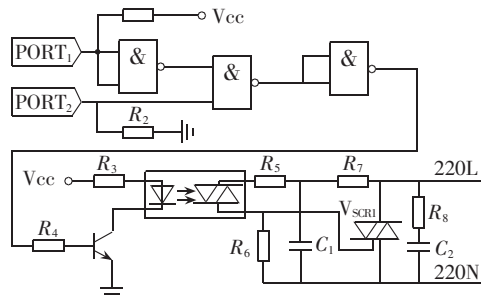


图 8 信号调制电路

Fig.8 Signal modulation circuit

2.4 信号解调电路

信号解调电路完成上、下行信号的检测, 原理框图如图 9 所示。

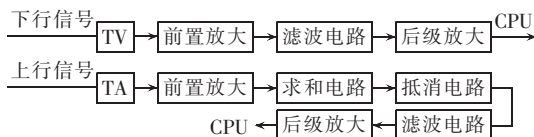


图 9 信号解调电路组成框图

Fig.9 Block diagram of signal demodulation circuit

其中下行信号的检测相对简单, 主要由 TV 取样、放大、滤波等电路组成, 其中滤波电路采用 4 阶 Bessel 有源带通滤波器, 具有最优的线性相频特性, 通带频率 200~800 Hz。由于带通滤波电路消除了 50 Hz 基波信号, 而调制信号和各次谐波幅值较小, 需要对经过滤波后的信号再进行后级放大, 将信号处理成 CPU 内部 A/D 容许的范围之内, 然后送至 CPU 进行 A/D 采样。

上行信号检测通过采集相应 10 kV 馈线出口处 A、B、C 三相电流互感器中的电流信号实现。考虑到实际应用中变电站一次测只有 A、C 两相 TA 的情况, 增加了求和电路, 利用三相平衡条件下的 A、C 相电流求出 B 相电流。三相背景抵消电路主要功能

是利用电网三相电流之间的相位关系,最大可能地抵消掉电网本身的负载电流,同时将其两相上的调制信号叠加到检测相,从而突出上行调制信号。由于负载电流很大,而调制信号十分微弱,抵消掉一部分背景信号相当于提高了信噪比和采样芯片的分辨率。如果没有抵消电路,由于受到采样 A/D 输入信号范围的限制,后级放大电路的放大倍数不可能很大,必将影响采样精度,因此背景抵消电路的作用十分重要。在三相负载平衡的条件下,A、B、C 三相背景电流大小相等,相位相差 120° 。当检测 A 相调制信号时,将 A 相电流与 B 相电流求差,将 C 相电流放大 $\sqrt{3}$ 倍并向后移相 90° ,然后将 A、B 相之差减去经移相和放大处理后的 C 相,即 $I_A - I_B - \sqrt{3} I_C \angle -90^\circ$,即可实现三相背景电流的抵消,同时将有用的调制信号加强。实际的硬件电路主要由运算放大器构成的求和、求差电路,以及放大和移相电路构成,原理如图 10 所示。

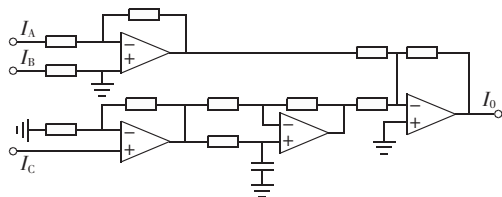


图 10 背景电流抵消电路

Fig.10 Background current counteraction circuit

3 系统软件设计

软件开发平台采用 MPLAB 集成开发环境 (IDE),内置组件包括项目管理器、编辑器、汇编器/链接器、调试器、软件模拟器等。此外,针对 dsPIC33F 系列数字信号控制器,Microchip 公司提供了专门的 C 语言开发工具 MPLAB C30,可无缝集成在 MPLAB IDE 中。系统软件设计采用了模块化编程思想,并以 C 语言和汇编语言混合编程的方式完成整个软件设计。主程序由 C 语言实现,完成数据处理、信息存储及系统的控制与管理,使得程序大为简化,便于移植;汇编语言主要用于关键算法的优化以及对底层硬件(如 DSP 引擎)的操作。系统主程序流程如图 11 所示。

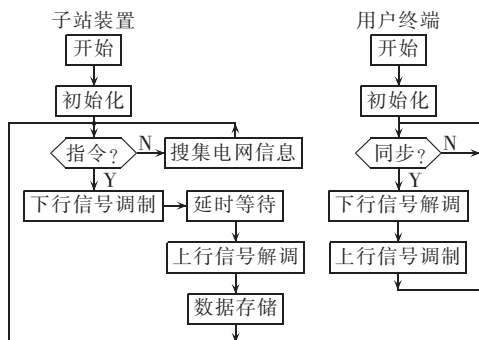


图 11 系统主程序流程

Fig.11 Flowchart of main program

装置上电后首先进行硬件初始化,包括 I/O 口、定时器、中断、A/D 转换器、通信接口等,然后等待控制器的指令。如果没有指令,说明系统工作在非通信时段,此时只对电网信息进行采集并存储,为系统通信提供有用信息;如果收到控制器的指令,系统工作在通信时段,开始进行下行信号的调制。终端检测到下行同步信号后进行下行信号解调和上行信号调制,然后由子站装置对上行信号解调后进行数据存储,数据通信等工作。

子程序主要包括过零检测、信号调制和信号解调等。过零检测主要是利用过零检测电路产生的方波触发外部中断,为信号调制和信号解调提供时间基准。信号调制子程序根据编码规则,在不同过零点位置控制晶闸管的导通,并可通过改变导通角调节调制信号的强度。信号解调子程序主要由数据采集、数字差分、数字滤波、信号检测算法等组成,如图 12 所示。其中数字差分是利用工频信号特有的调制特点,采样后对相邻周期进行幅值求差,从而消除大部分工频基波、整次谐波干扰,同时也增强了调制信号^[9-12]。数字滤波采用有限脉冲响应(FIR)滤波器,对数字差分后的信号进行滤波,截止频率 1 kHz^[13-14]。针对所选 DSC,采用提供有专业的数字滤波仿真和设计软件(dsPICworks & FD Lite),可以很方便地用软件实现。信号检测算法主要采用相关检测算法,关键代码由汇编语言实现^[15]。

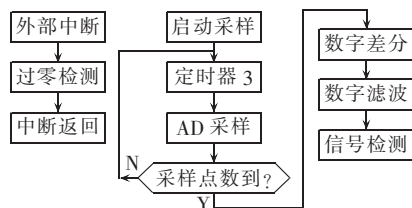


图 12 子程序流程

Fig.12 Flowchart of subroutine

4 结论

工频通信作为一种新型实用通信技术,其具体工作原理决定了它抗干扰能力强,能够适应复杂的电网环境。在速率要求不高的条件下与载波通信相比,工频通信具有很多优势,但我国配电网的复杂性对其可靠应用提出了很高的要求。本文根据我国配电网的实际情况,研制了实用化的工频通信装置,配合简单有效的信号处理和检测算法,现场测试验证了系统装置的有效性和正确性。

参考文献:

- [1] MAK S T. A new viable two way automatic communication system for distribution networks part II :inbound communication[J]. IEEE Transactions on Apparatus and Systems,1984,103(3):2141-2147.
- [2] XU Wilsun,ZHANG Guibing,WANG Wencong,et al. A power line signaling based technique for anti-islanding protection of distributed generators-part I:scheme and analysis[J]. IEEE Tran-

- sactions on Power Delivery, 2007, 22(3):1758-1766.
- [3] MAK S T. A power line communication technology for power distribution network control and monitoring[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1986, 1(1):66-74.
- [4] 周世炜, 张绍卿. 配电网络双应工频通信的原理与实现[J]. 电网技术, 1999, 23(10):37-38.
ZHOU Shiwei, ZHANG Shaoqing. Realization of two way fundamental frequency communication for power distribution networks[J]. Power System Technology, 1999, 23(10):37-38.
- [5] MAK S T, REED D L. A new viable two way automatic communication system for distribution networks part I: outbound communication[J]. IEEE Transactions on Apparatus and Systems, 1982, 101(8):2941-2949.
- [6] 李建岐, 黄毕尧, 王智慧. 配电网工频通信技术及其应用[J]. 电力系统通信, 2009, 30(10):74-76.
LI Jianqi, HUANG Biyao, WANG Zhihui. Application of power frequency communication technology in power distribution network[J]. Telecommunications for Electric Power System, 2009, 30(10):74-76.
- [7] 刘和平, 郑群英, 江渝, 等. dsPIC 通用数字信号控制器原理及应用[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2007:6-20.
- [8] 梁海浪. dsPIC 通用数字信号控制器 C 程序开发及应用[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2006:1-4.
- [9] MAK S T. Application of differential technique for characterization of waveform distortion[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2000, 22(3):975-980.
- [10] MAK S T. Power delivery infrastructure differences and their impact on different types of power line communications for automatic meterreading[C]//CIRED. Chesterfield, MO, USA:CIRED, 2001:18-22.
- [11] MAK S T, de la ROSA F. Waveform distortion issues based on field data recordings in MV and LV facilities[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 22(3):1-7.
- [12] SPENCER Q H. Short-block LDPRC codes for a low-frequency power-line communications system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 9(2):95-99.
- [13] WAKITEH G J. 电力系统谐波——基本原理、分析方法和滤波器设计[M]. 徐政, 译. 北京: 机械工业出版社, 2003:87-113.
- [14] 刘松强. 数字信号处理系统及其应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 1999:74-82.
- [15] 李锐, 何辅云, 夏玉宝. 相关检测原理及其应用[J]. 合肥工业大学学报: 自然科学版, 2008, 31(4):573-579.
LI Rui, HE Fuyun, XIA Yubao. Theory of correlation detection and its application[J]. Journal of Hefei University of Technology: Natural Science, 2008, 31(4):573-579.

(编辑: 汪仪珍)

作者简介:

王智慧(1981-), 男, 河南开封人, 工程师, 硕士, 主要从事配网通信及其自动化研究开发工作(E-mail: zhwang2003@126.com);

李建岐(1969-), 男, 陕西宝鸡人, 高级工程师, 硕士, 主要从事电力通信技术及相关标准管理工作;

黄毕尧(1982-), 男, 云南邵通人, 工程师, 硕士, 主要从事电力通信技术研究开发工作;

刘国军(1982-), 男, 江西南昌人, 工程师, 硕士, 主要从事通信算法研究开发工作。

Development of power frequency communication equipment based on dsPIC

WANG Zhihui, LI Jianqi, HUANG Biyao, LIU Guojun

(China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: The constitution of power frequency communication system and the principle of signal modulation and demodulation are introduced, based on which the practical power frequency communication equipment suitable for the channel characteristics of China distribution network is developed with the DSC (Digital Signal Controller), including sub-station equipment and user terminal. It mainly consists of DSC, zero-crossing detection circuit, signal modulation circuit and signal demodulation circuit. The selection of DSC and the hardware implementation of different functional circuits are detailed with the working principle. The modularized system software is programmed with C and the assemble language. The flowcharts of main program and subroutines are presented. Test results show its stable and reliable operation on site.

Key words: power frequency communication system; communication equipment; DSC; signal modulation; signal demodulation