

# 一种基于 DSP 技术的配电网实时监测与故障诊断装置

李宏刚,全玉生,焦邵麟,李平

(华北电力大学,北京 102206)

摘要: 基于 TI 公司生产的 TMS320VC33 数字信号处理芯片,利用其强大的浮点运算能力和灵活的接口技术,研制出新型配电网实时监测与故障诊断装置;该装置一方面可实时地测量配电网中的三相电压、电流、功率、功率因数、谐波等基本电参数,另一方面可实时监测系统状况,当系统发生故障时,可靠地记录故障动态过程,并准确地计算出故障线路(故障选线)。此外本装置还可作为配电自动化系统中的 RTU 装置。

关键词: 故障录波; 数字信号处理器; 配电自动化

中图分类号: TM711 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2004)09-0048-05

## 0 引言

配电网实时监测与故障诊断对于确保配电网的安全可靠运行、了解配电网实时运行的状况具有十分重要的意义。但是,目前我国配电网的实时监测和故障诊断装置功能还不够完善,直接影响着配电网系统的安全可靠运行。

随着 DSP 技术的不断发展,其在电力系统中得到了广泛的推广运用。本文将 TI 公司的 TMS320VC33 用于配电网的实时监测与故障诊断装置中,充分利用 DSP 强大的浮点运算能力和灵活的接口技术,采用成熟先进的软件编程技术,成功地研制出了配电网实时监测与故障诊断装置。该装置一方面可以实时监测配电网系统中的三相电压、电流、功率、功率因数、谐波、谐波畸变率(THD)等基本电量参数,另一方面实时分析配电网系统的运行状态。当系统发生故障时,迅速可靠地保存故障前后的电压电流数据,并能正确及时地选出故障线路。此外,由于该装置集电量实时监测、系统故障诊断、数据通信等功能于一体,满足了配电网综合性的微机化自动装置对配电自动化远方终端的新要求<sup>[1]</sup>,可作为配电自动化系统中的 RTU 装置。

## 1 装置的硬件设计

配电网实时监测与故障诊断装置硬件构成如图 1 所示,主要由数据处理单元(DSP)、数据采集单元(A/D 转换器)、人机接口单元(MMI 模块)、输入输出开关量单元以及上层监控单元(工业控制机)等部件组成。

### 1.1 数据处理单元

数据处理单元采用了 TMS320VC33 芯片,外围

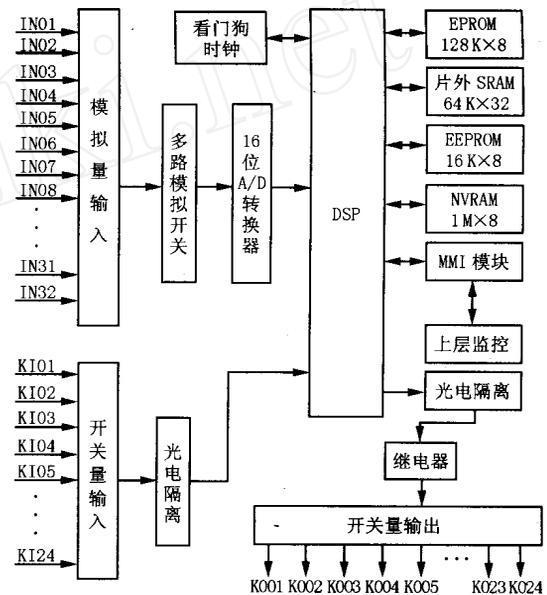


图 1 配电网实时监测与故障诊断装置硬件构成

Fig. 1 Hardware constitution of the real-time monitoring and fault diagnosis device in the distribution network

扩展了 128 K 的 8 位 EPROM、64 K 的 32 位高速 RAM、1 M 的 8 位 NVRAM 及 16 K 的 8 位 EEPROM。TMS320VC33 芯片工作频率为 60 MHz,指令周期为 17 ns,可以在单周期内对数据进行并行的乘法和 ALU 操作,具有 120 ~ 150 MFLOPS,60 ~ 75 MIPS 超高速的浮点运算能力,片内有 34 K x 32 位 RAM 存储器;程序固化在片外的 EPROM 中,上电后自动引导装载到快速片内 RAM 中;故障录波数据存储在片外 NVRAM 中,可连续记录故障前 4 个周波,故障后 20 个周波。

### 1.2 数据采集单元

数据采集单元中 A/D 芯片采用了 LTC1608 芯

片,其片内自带采样/保持器、分辨率为 16 位、转换率为 500 kSPS。数据采样时,模拟信号首先经过一阶 RC 低通滤波器及采样保持器,再经多路模拟开关和运放比例衰减,传送到数据缓存区。数据转换采用同时采样分时转换的方式,用定时器定时触发信号启动多路同时采样,由软件以最高速率对设定回路数进行扫描,分时段进行转换(即查询方式)或采用中断方式在 A/D 转换结束时响应中断,通过设定通道选择寄存器逐次采样多路模拟量值。

### 1.3 人机接口(MMI 模块)单元

人机接口单元是配电网实时监测与故障诊断装置和操作人员信息交流的重要环节。本装置的 MMI 单元是基于 RCM2000 芯片开发的。RCM2000 是 Rabbit 半导体公司所生产的 8 位微处理器,工作频率为 22.1 MHz,有 40 个并行 I/O 口,4 个 CMOS 兼容串行端口,13 个地址通道,8 个数据通道,片内具有 256 K Flash RAM 和 512 K SRAM,内建日历、时钟、看门狗、定时器、多级中断、双 DMA 通道。MMI 单元主要功能有液晶显示、键盘响应和通信处理,其硬件组成如图 2 所示。

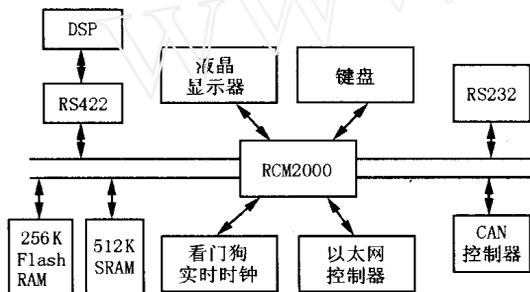


图 2 MMI 硬件组成图

Fig. 2 Hardware constitution of MMI

## 2 装置的软件设计

系统软件设计由 DSP 软件、MMI 软件和上层监控软件 3 部分组成。各部分的软件设计相对独立,彼此间通过数据通信进行联系。

### 2.1 DSP 软件设计

DSP 软件设计采用标准 C 语言编程,其软件流程图如图 3 所示。软件设计采用模块化、结构化的编程思想,使整个装置可以根据用户的需求方便地添加或删除一定功能。

### 2.2 MMI 软件设计

Rabbit2000 微处理器的软件设计使用了 Dynamic C 语言。Dynamic C 集成 C 编译器、编辑器、链接

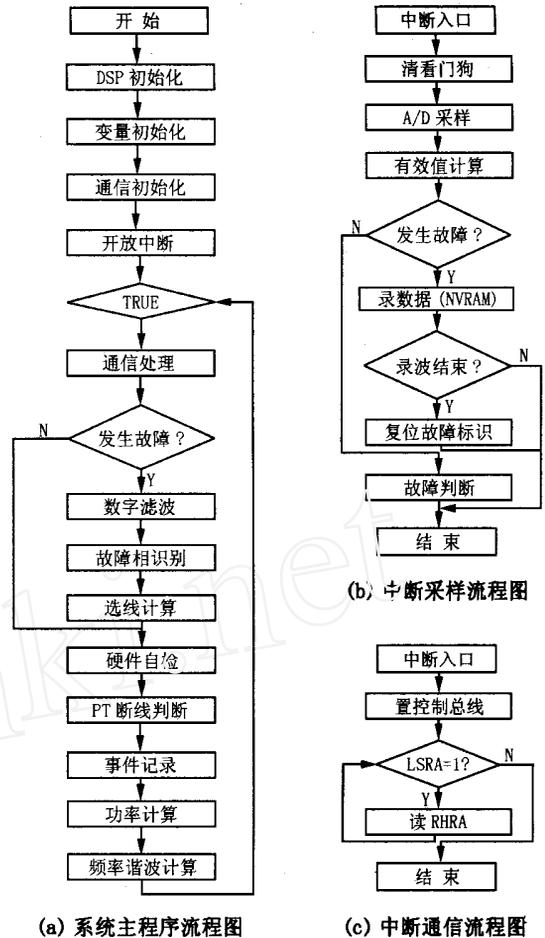


图 3 DSP 软件设计流程图

Fig. 3 Flow chart of DSP software design

器、装载器和调试器,包含大量标准 C 函数库和特定板外围驱动及芯片外围设备源代码,支持简单高效易于使用的 MicroC/ OS - II 实时操作系统,支持以太网芯片的 TCP/ IP 协议栈。人机交换嵌入了 MicroC/ OS - II 实时操作系统,使液晶显示、数据通信、键盘响应等功能独立安全运行。

### 2.3 上层监控软件设计

上层监控机采用工业控制机,软件设计基于 Windows 2000 操作平台和面向对象的集成开发系统 Visual Basic 编程语言。VB 编程语言融入了面向对象、设计过程可视化、事件驱动、动态数据驱动等先进的软件开发技术。

上层监控软件分为 3 部分:数据通信、用户界面、数据库。通信程序主要处理与 MMI 单元的数据交换,装置调试或测试时通过 RS232 通信口进行数据交换,正常运行时监控中心或远方数据中心可通过以太网或 RS232 加 Modem 拨号进行数据通信。

### 3 装置主要功能

#### 3.1 常规“四通”功能

装置基于 DSP 强大的浮点运算能力,在系统正常运行时,实时监测电压、电流、有功、无功、视在功率、功率因数及频率等基本电量,实现调度自动化 RTU 的遥测、遥信、遥控、遥调功能。

##### 3.1.1 电压电流计算

装置中电压电流均采用交流采样,离散傅里叶计算:

$$X_{\text{Im}}(n) = \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{n-1} X_k \sin \frac{2nk}{N}$$

$$X_{\text{Re}}(n) = \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{n-1} X_k \cos \frac{2nk}{N}$$

基波及谐波电压、电流有效值:

$$X(n) = \sqrt{\frac{X_{\text{Im}}(n)^2 + X_{\text{Re}}(n)^2}{2}}$$

##### 3.1.2 功率计算

$$\text{有功功率计算: } P = \frac{1}{N-1} \sum_{k=0}^{N-1} U_k I_k$$

$$\text{视在功率: } S = U \cdot I$$

$$\text{无功功率: } Q = \sqrt{S^2 - P^2}$$

$$\text{功率因数: } = P/S$$

##### 3.1.3 频率计算

装置采用基于正、余弦 FIR 滤波器的输出来测量电力系统频率的方法。该方法首先从滤波结果获得  $\sin(2Ts)$ , 然后从  $\sin(2Ts)$  的泰勒级数展开式中计算频率。

根据文献[3], 滤波器的系数为:

$$H_s(k) = \sin\left(\frac{2-k}{N} + \frac{1}{N}\right)$$

$$H_c(k) = \cos\left(\frac{2-k}{N} + \frac{1}{N}\right)$$

$x(n)$  的两个正交分量为:

$$X_1(n) = \sum_{k=0}^{N-1} U_{(n-k)} H_s(k) \quad X_2(n) = \sum_{k=0}^{N-1} U_{(n-k)} H_c(k)$$

推理可得:

$$2\sin(2fTs) =$$

$$\frac{|X_1(n) - X_1(n-2)| + |X_2(n) - X_2(n-2)|}{|X_1(n-1)| + |X_2(n-1)|}$$

装置采样频率  $f_s$  为 1.8kHz,  $N = 36$ 。令  $f = f_0(1+a)$ ,  $a$  为频率偏离额定值的大小。 $2\sin(2fTs) = 2\sin\left(\frac{1}{18} + \frac{1}{18}a\right)$ , 将其在 18 附近展开成泰勒级数, 取前两项可得:

$$2\sin(2fTs) = 2\sin\frac{1}{18} + \frac{1}{9}\cos\frac{1}{18}a$$

$$\text{令 } b = 2\sin\frac{1}{18}, c = \frac{1}{9}\cos\frac{1}{18}$$

$$K =$$

$$\frac{|X_1(n) - X_1(n-2)| + |X_2(n) - X_2(n-2)|}{|X_1(n-1)| + |X_2(n-1)|}$$

$$\text{故得: } a = \frac{K-b}{c}, \text{ 测量频率 } f = f_0(1+a)。$$

#### 3.2 故障录波

故障发生后及时记录故障的动态过程以及继电保护装置和其它自动化设备的动作行为,有利于分析故障的原因,减少故障发生的概率,确保配电网安全可靠运行。

##### 3.2.1 故障记录时间

本装置一般自动记录故障前 4 个周波,故障后 20 个周波数据。装置正常运行时,数据贮存在片内的快速 RAM 中,故障后,故障数据直接存贮在片外 NVRAM 中。

##### 3.2.2 故障启动方式

###### 1) 正序电压越限启动

系统母线电压主要是用来监视系统电压的波动情况,当正序电压大于高电压越限定值或小于低电压越限定值,且越限持续时间大于设定的屏蔽时间时,启动录波。

###### 2) 零序电压突变启动

配电网系统中,发生单相接地故障时,由于中性点电位发生偏移,非故障相对地电压升高,三相对地电压出现不平衡,从而产生零序电压  $3U_0$ 。当零序电压突变量大于突变定值时,启动录波。

###### 3) 零序电流突变启动

系统发生相间短路或低电阻接地系统发生单相接地时,引起零序电流的突变。当零序电流突变值大于设置值时,启动录波。

###### 4) 电流越限启动

根据实时测量的相电流有效值大小判断,当其值大于设定的越限定值时,启动录波。

###### 5) 开关量启动

本装置可与继电保护装置或其它自动化装置配合使用。当继电保护装置或其它自动化装置动作,通过开关量变位启动录波。

#### 3.3 故障诊断

配电网系统由于中性点接地方式不同,其故障特征会有较大的区别。对于不直接接地系统(小电流接地系统),由于等效零序阻抗比较大,故障后零

序电流变化小,故障选线难以有效地解决;对于低电阻接地系统,由于等效零序阻抗较小,故障后零序电流发生较大的变化,继电保护装置或其它自动化设备能可靠动作,快速切除故障线路,避免事故的扩大。因此本装置主要研究配电网小电流接地系统的单相接地选线问题。

### 3.3.1 配电网小电流系统单相接地主要特征

1) 系统发生单相接地后,相电压失去平衡,中性点电压偏移,出现了较大的零序电压。

2) 系统发生单相接地后,整个系统出现零序电流。非接地线路的零序电流等效于该线路对地的容性电流,其相位超前零序电压  $90^\circ$ 。

3) 对于中性点不接地系统,故障线路的零序电流为非故障线路及母线上各种设备的零序电流之和,其相位滞后零序电压  $90^\circ$ 。

4) 对于中性点经消弧线圈接地系统,由于消弧线圈容量一般选择为过补偿容性电流的  $5\% \sim 10\%$ ,因此故障线路电流不再与非故障线路零序电流相位相反,故障的相位特征消失。

5) 小电流接地系统故障后零序电流五次谐波总是存在的。对于经消弧线圈接地系统的五次谐波,由于容性阻抗缩小 5 倍,感性阻抗增大了 5 倍,因此零序电流五次谐波的故障特征与零序电流基波相似。

### 3.3.2 装置主要故障选线判据

#### 1) 智能化比幅比相法

传统的比幅比相方法是通过离散傅里叶变换,选出零序电流基波或五次谐波幅值最大的 3 条线路的故障电流,比较其相位,电流相位与另两个电流相位反相者为故障线路,若三者都同相,则为母线故障。

由于传统的分析法在信号处理、幅值比较、有效域等方面存在一些不足。本装置吸取了传统方法的优点,结合新的思路,形成了智能化比幅比相法。

(a) 利用故障前数据,采用叠加原理,消除负荷不平衡造成的零序电流的不良影响。

(b) 采用差分傅里叶变换,替代传统的离散傅里叶变换,消除系统故障时衰减直流分量的影响。

(c) 采用零序电压作为参考量,拿比幅线路零序电流基波或五次谐波与其比相。

(d) 充分利用线路  $3I_0$ ,快速粗选线。

(e) 充分利用录波数据,在有效的数据窗内进行连续比较,增强方法的抗干扰能力。

(f) 提取比幅比相方法的故障特征,建立了相应的控制约束条件。

#### 2) 有功功率法

系统发生单相接地故障,非故障线路零序电流为线路对地的容性电流,故障线路零序电流为非故障线路零序电流和母线上所有设备(对于消弧线圈接地系统包括流过消弧线圈的支路电流)的零序电流之和,这样故障线路零序电流的有功功率分量最大。因此可根据零序电流的有功功率分量进行选线判断。

零序电流有功功率计算:

$$P_0 = \frac{1}{N-1} \sum_{k=0}^{N-1} U_{0k} I_{0k}$$

当线路零序电流有功功率大于整定值时,此线路发生故障,反之则未发生故障。

#### 3) 小波分析法

配电网小电流接地系统发生单相接地故障时,在线路上产生较大的突跃暂态电流。小波分析法利用小波奇异性检测理论,对突跃故障暂态电流信号进行小波变换,确定模极大值点,并比较各条线路零序电流模极大值的大小和极性,确定故障线路。

### 3.3.3 智能化的协调控制综合判据

大量的理论和实践表明,现有的选线判据都有各自的有效域。当故障在空间构成的区域重叠于判据有效域时,该判据选线结果可靠准确,否则,结果可能出现误选。本装置充分利用故障数据,及时提取故障后暂态和稳态典型数据,构造故障空间信息,对比各种选线判据的有效域,动态生成判据加权系数,形成选线综合信息。

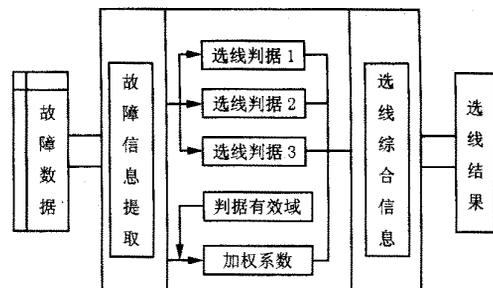


图4 智能化协调控制综合判据示意图

Fig. 4 Sketch of intelligent concerted control criterion

## 4 结语

目前,DSP 已经广泛地运用到继电保护、电能质量、电磁测量等电力领域。本文基于 TI 公司 TMS320VC33 芯片开发的新型配电网实时监测与故障诊断装置,进行了大量的仿真实验和动态模拟实验,实验表明装置在系统正常运行时,能准确地测量系统电压、电流、功率等基本电量;故障时,可靠故障

录波,并迅速有效地选出故障线路。此外,此装置可多台并行运行,以满足不同变电站的要求。

### 参考文献:

- [1] 徐丙垠 (XU Bing-yin). 配电自动化远方终端技术 (Distribution Automation Remote Terminal Unit) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 1999, 23 (5): 41-44.
- [2] 吴宇斌,夏彬,刘承洲 (WU Yu-bin, XIA Bin, LIU Cheng-zhou). 基于 16 位单片机的小电流接地监控终端机的研制 (Development of the 16 Bits Single-chip-microprocessor Based Supervisory Control Terminal for Power System with Neutral Unearthed) [J]. 继电器 (Relay), 1999, 27 (5): 62-64.
- [3] 周大敏 (ZHOU Da-min). 一种基于富氏滤波原理的电力系统频率测量方法 (A Measuring Method of Power System Frequency Based on the Fourier Filtering Principle) [J]. 继电器 (Relay), 1997, 25 (6): 10-15.
- [4] 郝玉山,杨以涵,任元恒,等 (HAO Yu-shan, YANG Yi-han, REN Yuan-heng, et al). 小电流接地微机选线的群体比幅比相原理 (Principle of Magnitude & Phase Comparison for Microcomputer Based Small Current Fault Line Selection) [J]. 电力情报 (Information on Electric Power), 1994, (2): 15-19.
- [5] 贾清泉,刘连光,杨以涵,等 (JIA Qing-quan, LIU Lian-guang, YANG Yi-han, et al). 应用小波检测故障突变特性实现配电网小电流故障选线保护 (Abrupt Change Detection with Wavelet for Small Current Fault Relaying) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2001, 21 (10): 78-82.
- [6] 朱兰,杨奇逊,等 (ZHU Lan, YANG Qi-xun, et al). 小电流接地系统单相接地故障选线防止误判的有效方法探讨 (Study of Effective Measures for Avoiding Misjudgement in Detecting Phase-to-ground Fault in the Ineffectively Grounded System) [J]. 现代电力 (Modern Electric Power), 2002, 19 (6): 48-53.
- [7] 王念旭,等 (WANG Niann-xu, et al). DSP 基础与应用系统设计 (Foundation and Application System Design of DSP) [M]. 北京:北京航空航天大学出版社 (Beijing: Press of Beijing University of Aeronautics and Astronautics), 2001.
- [8] 邵贝贝,等译 (SHAO Bei-bei, et al Trans). 嵌入式实时操作系统—— $\mu$ C/OS-2 (Micro $\mu$ C/OS-2—The Real-time Kernel) [M]. 北京:北京航空航天大学出版社 (Beijing: Press of Beijing University of Aeronautics and Astronautics), 2003.
- [9] Texas Instruments. TMS320C3x User's Guide [M], 1994.
- [10] 范逸之,陈立元,等 (FAN Yi-zhi, CHEN Li-yuan, et al). 利用 Visual Basic 实现串并行通信技术 (Implementation of Serial and Parallel Communication Technique Using Visual Basic) [M]. 北京:清华大学出版社 (Beijing: Tsinghua University Press), 2001.

收稿日期: 2003-08-19; 修回日期: 2003-09-27

### 作者简介:

李宏刚 (1974 - ), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统故障分析与诊断;

全玉生 (1953 - ), 男, 博士研究生, 教授, 研究方向为电力系统故障分析与诊断;

焦邵麟 (1976 - ), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统故障分析与诊断。

## A real-time monitoring and fault diagnosis device based on DSP in the distribution network

LI Hong-gang, QUAN Yi-sheng, JIAO Shao-lin, LI Ping

(North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

**Abstract:** A new real-time monitoring and fault diagnosis device based on TMS320VC33, which is made by Texas Instruments is developed. The device possesses strong float-point calculation and flexible interface technique. On the one hand, it can measure some elementary power parameters, such as three-phase voltages, currents, power, frequency harmonic, etc; on the other hand, it can really monitor system status, reliably record the fault process, and accurately select fault line. In addition, the proposed device can be employed as RTU device in the distribution automation system.

**Key words:** fault record; DSP; distribution automation

**培训信息** 国家电力公司电化教育中心培训基地联合《继电器》杂志社定于 2004 年 5 月 16 日至 23 日、10 月 17 日至 24 日相继举办第二、第三期“继电保护定值整定与计算”研修班,诚邀各网省公司和各发电公司从事继电保护定值整定的相关技术人员参加研讨。

联系人:刘晓森 冯谨涛 李卓

联系电话:(0374)3212155 3212363