

新一代智能化变电站中电能质量监测装置的设计

熊慕文, 王文龙, 朱何荣, 程立, 陈桂友, 刘永钢

(南京南瑞继保电气有限公司, 江苏 南京 211102)

摘要: 新一代智能化变电站中要求实现“电力流、信息流、业务流”的高度一体化融合, 现有的电能质量监测装置普遍存在着通用性差、兼容性差以及需独立组网等问题。本文设计了新一代智能化电能质量监测装置。装置可兼容数字采样和模拟采样; 功能采用模块化、标准化以及可重用化设计; 功能模块基于 IEC61850 标准, 可直接接入变电站站控层 MMS 网络, 实现数据共享。该装置满足了新一代智能化变电站对电能质量监测装置的新需求。

关键词: 智能化; 模块化; 标准化; 可重用; IEC61850; 数据共享

0 引言

随着新一代智能化变电站中智能电网新技术的不断发展及广泛应用, 网络化、信息化、标准化^[1]以及智能化成为电能质量监测装置发展的必然趋势。现有的电能质量监测装置, 一方面, 实时处理大规模数据的能力差, 测量设备的通用性差、升级困难^[2]; 另一方面, 在实现数据通信的时候, 广泛采用自定义通信规约, 导致一个站内不同厂家的装置之间互不兼容、无法实现资源共享; 即便部分厂家采用了 PQDIF^[3,4]规范作为电能质量数据交换格式, 但仍需要独立组网, 无法与变电站中的监控网互联, 导致了监测平台运行效率低、系统监测成本较高^[3]。这些局限性使得现有的电能质量监测设备明显不能满足新一代智能电网发展的需求。基于此, 本文设计了可满足新一代智能化变电站需求的电能质量监测装置。该装置以高性能 CPU 及高速浮点 DSP 为硬件基础, 可实时处理和分析大规模数据; 功能采用模块化、标准化、可重用化设计; 可兼容模拟采样以及数字采样; 具有良好的通用性和扩展性, 升级简单。同时, 基于 IEC61850 标准定义的数据格式, 严格遵照数据传输相关通信接口及其服务模型。从设备层面解决了数据兼容问题, 实现了不同监测设备间的信息共享, 可直接接入变电站站控层 MMS 数据网, 实现了监控平台的统一, 降低系统监测成本的同时, 可以为电网的电能质量优化控制提供一体化参考依据。

1 系统设计

1.1 硬件架构设计

电能质量监测装置要求能够对大规模数据进行实时处理。如果采取单一处理器的解决方案, 对处理器的运算能力、存储器资源、外围接口设备提出了非常苛刻的要求, 一般很难找到合适的芯片, 即便有合适芯片, 系统的扩展性有限, 不能满足未来应用的发展。因此, 将计算任务分布在多个处理器中完成, 处理器之间通过内部总线进行高速数据交换, 这种分布式系统具有良好的扩展性, 提高了系统的生命周期。

基于此, 新一代智能化电能质量监测装置由管理 CPU 板、DSP 板、交流板、数字采样板以及电源板五大部分组成。

硬件整体结构如图 1 所示。

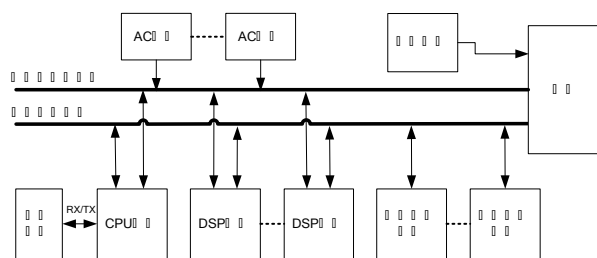


图 1 系统结构框架图

CPU 板采用主频为 400MHz 的高性能 CPU, 主要负责管理和协调装置的各项功能有序进行。

交流板负责常规交流模拟量输入采集, 并通过模拟量总线传输给 DSP 板及 CPU 板的 AD 前端。

DSP 板主要负责电能质量指标的计算与分析。采用最高主频为 450MHz 的高性能浮点 DSP 作为处

理器。前端采用 16 位高精度并行 AD，保证装置对交流采样的高精度要求。

数字采样板主要负责接收网络上 IEC61850-9-2^[5] 的 SV 采样，并进行解码、同步等预处理。最多可接收 32 路数字量输入，支持采样值的 IEEE 1588、IRIG-B、PPS 脉冲三种同步方式。该插件应用于数字化变电站场合。

电源板用于装置的供电，支持 220/110/48/24V DC/AC 多种供电方式。

装置除了 CPU 板和电源板外，其余均可以根据实际应用需要灵活配置。各个板卡各司其职，众多板卡协同配合完成目标应用功能。

为解决多块高性能板卡间大量数据实时可靠交换，设计了高速数据总线技术，有效解决了装置内各板卡间大容量高速数据的传输问题。

1.2 系统软件设计

智能化电能质量监测装置为了做到分布式、智能化、易扩展，将软件分为“系统软件”和“应用软件”两大块。应用软件基于系统软件的支持，完成具体目标功能的实现。系统软件作为应用软件与硬件之间的联系桥梁，负责为应用软件实现 I/O 通信，以及完成应用软件执行的调度和管理。

CPU 板基于嵌入式 Linux 操作系统，包含了完成装置管理任务的管理程序和装置的各种应用功能模块。

其他各板卡的程序由各种应用功能模块和系统程序模块组成。系统程序模块完成硬件驱动、板卡管理、以及应用功能模块的应用任务调度、管理等功能。

装置包含多个板卡，这些板卡必须协调、配合才能一起完成应用任务。因此在装置的系统软件中，使用管理程序来负责管理、协调多个板卡高效、有序地工作。

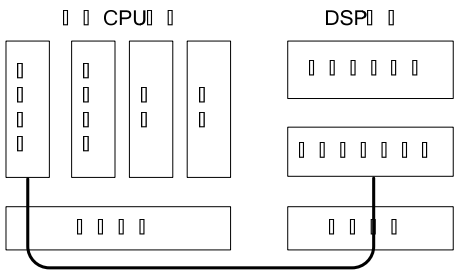


图 2 管理程序示意图

2 电能质量监测功能实现

智能化电能质量监测装置将各项功能在不同的板卡上进行了分布式实现，并可根据实际的需要进行扩展。

为了做到装置的功能易于扩展、软硬件升级方便。电能质量监测功能的设计做到了模块化、标准化、可重用。装置将电能质量监测各项子功能严格按照 IEC61850 标准中规定的功能模块进行划分。每个功能模块独立完成一个特定的应用功能，有明确的输入输出以及参数定义，并且基于系统软件的支持，可以根据实际的应用需求，生成多个功能实例，以实现功能模块的重用。

装置主要的功能如下：

- a) 各项电能质量指标的计算；
- b) SOE 事件的实时上送及记录；
- c) 暂态事件的分析及录波；
- d) 实时数据及定时数据以及波形数据的存储；
- e) 各项电能质量指标的统计；
- f) IEC61850 通信模块的实现。

2.1 电能质量指标计算功能实现

电能质量指标计算功能主要由 DSP 板卡完成，每块 DSP 板卡计算一个间隔三相电压、三相电流的电能质量指标，所有的采样和计算模块均根据 IEC 61000-4-30 以及 GBT19862-2005 标准要求，在不同时间间隔的定时中断中进行。DSP 板卡数量可根据实际计算间隔数量的需要进行扩展。

2.1.1 功能模块划分

电能质量指标计算功能模块的划分考虑按照两个原则进行划分：a) 按 IEC61850 逻辑节点^[6-8] 功能进行划分；b) 模块便于维护，一个程序模块完成所有子功能。

基于以上两个原则，每块 DSP 板卡上的应用程序按照功能可以主要划分为表 1 中的几个功能模块。

表 1 电能质量指标计算主要功能模块

功能模块	作用
SAMPLE	采样及预处理
MMXU	基本测量
MHAI	谐波与间谐波
MFLK	电压波动和闪变
MSQI	序分量和不平衡
QVVR	电压 EMS 变动
QVTR	电压瞬变
...	...

表中各个主要功能模块之间联系关系由它们

的输入输出关系来确定。

2.1.2 指标计算流程

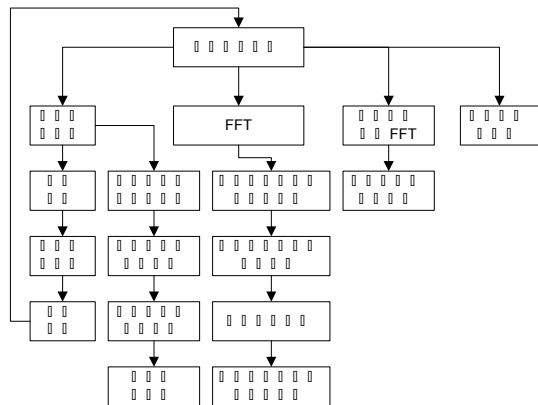


图3 指标计算主流程图

根据各主要功能模块之间的联系关系，指标计算的主要流程如图3所示。各项指标的具体计算方法可参照相关标准，本文就不再一一赘述。

2.1.3 关键算法实现

(1) 小波去噪算法

对电能质量指标的计算而言，如何有效去处原始信号中的噪声干扰、保留有效信号，是一个非常重要且很难有效解决的问题。

装置中将把均值滤波和迭代的方法和基于小波变换域内系数相关性的去噪算法结合起来，考虑了每一点周围的辅助信息，削弱了小波系数偏移带来的影响。该算法易于重构，且去噪效果明显。具体算法步骤如下：

第一步：调用小波分解函数对原始采样信号进行分解，得到逼近系数和细节系数。

第二步：初始化所有的相关系数和正规化相关系数。

第三步：估计噪声域值，并对每一层提取边缘信息

第四步：对一系列高频细节信号和低频逼近信号在小波窗口进行均值滤波

第五步：调用小波重构函数对信号进行重构，得到去噪信号。

第六步：进行迭代，重复步骤 1-5，得到去噪后的信号。

(2) FFT 优化算法

FFT 是电能质量指标计算中应用最为广泛的算法，是谐波等相关指标计算的基础，是传统电能质量监测装置指标计算中最耗资源的部分，也是传统

电能质量监测装置无法处理大规模实时数据的瓶颈所在。FFT 的计算速度和精度决定了谐波等相关电能质量指标测量的性能。装置采用最高主频达450MHz 的高性能浮点 DSP 进行 FFT 的运算，所有数据均为浮点型数据，消除了采用定点 DSP 使用整型数计算过程中数据移位带来的误差。同时，基于 DSP 硬件加速器的 FFT 优化算法，可以大大提升 FFT 的运算速度。

具体算法步骤如下：

第一步：将进行 FFT 的 N 点数据 $x(N)$ 分解为 $K \times M$ 的矩阵，其中 K 为行数， M 为列数；

第二步：矩阵在纵向上乘以特定的蝶形旋转因子 $[e^{-2\pi i k m / N}]_{0 \leq k \leq K-1, 0 \leq m \leq M-1}$ ，对矩阵进行纵向FFT运算；

第三步：将第二步的计算结果在横向上乘以蝶形旋转因子 $[e^{-2\pi i k m / N}]_{0 \leq k \leq K-1, 0 \leq m \leq M-1}$ ，对矩阵进行横向FFT运算，得到最终的“ N 点实部+ N 点虚部”的FFT计算结果。该结果中实部和虚部后 $N/2$ 与前 $N/2$ 呈现对称关系。前 $N/2$ 的结果，即为谐波指标计算所需的值。

表2中给出了该计算方法对不同点数数据进行FFT运算的计算周期以及计算时间。其中，时钟周期数为外围时钟周期数，外围时钟主频为225MHz。

表2 FFT 计算耗时指标

计算点数 ($N=K \times M$)	时钟周期数	计算时间/ μs
2048 (64*32)	80256	366.10
4096 (64*64)	164352	730.05
8192 (128*64)	336640	1496.20

由表2可以看出，该FFT优化算法，充分利用了DSP的资源，可以将FFT计算时间在谐波指标计算周期（200ms）中所占比例降至可以忽略。保证了装置在进行大规模数据处理时的实时性。

2.2 电能质量数据处理功能实现

电能质量数据处理及分析功能主要由CPU板卡完成。

2.2.1 SOE 事件记录功能

该功能由CPU板卡的SOE事件记录模块完成。该模块封装后，应用开发人员将需要进行事件记录的变量加入事件记录模块的事件引用表中，装置管理模块将自动形成事件记录模块的信号连接关系。系统程序将自动将各个SOE事件记录的变量通过高速数据总线发送给事件记录模块。通讯、液晶显示等模块通过查询SRAM记录取得最新的事件并

转发。

2.2.2 录波功能

该功能由 CPU 板卡的录波模块实现。一台装置可以同时运行多个录波模块，它们能相互独立的工作。录波触发变量可以配置多个变量，只要有一个满足条件就可以启动录波，另外触发前录波点数也是可以配置的，最多可以录触发前 3 秒的波形，这样可以将暂态或者瞬态电能质量事件发生前后的波形完整地记录下来，提供给相关人员进行分析。

2.2.3 存储功能

该功能由 CPU 板卡的存储功能模块实现。电能质量监测装置中需要存储的数据包括：定时记录数据、SOE 事件记录数据以及波形数据等，不同数据的存储机制是不同的。

IEC61850 标准提供了报告和日志这两种机制用于满足对数据的不同交换格式的要求，两者均可以实现一定程度的数据存储。两者的区别在于：日志相对于报告而言是非易失性的，可保证数据在装置掉电后不丢失；日志是以主从应答方式将数据送至客户端，而报告则是主动将数据送至客户端。

基于两者的区别，定时记录数据使用日志来存储，保证装置掉电后数据不会丢失。SOE 事件记录数据实时性要求较高，可以先存储到报告中实现实时上送，再存储到日志中长期保存。录波文件以 COMTRADE 格式保存，一般存储在本地文件存储器中的“COMTRADE”文件目录下。

2.2.4 电能质量指标统计功能

该功能由管理 CPU 插件的 MSTA 功能模块实现。通过存储下来的电能质量定时记录数据，计算某个指标在预定义时间间隔内的合格率、平均值、最大值、最小值以及 95% 概率大值等等。时间间隔等参数可通过定值进行整定，并可根据需要，设定越限门槛，给出相应的告警信号。

2.3 通讯功能实现

通讯功能由 CPU 板卡上 IEC61850 模块实现。通过对监测数据的建模，在监测装置和 MMS（制造商报文协议）对象之间建立对应关系，从而实现基于 MMS 服务的 IEC61850 服务，进而实现电能质量指标的数据传输及远方监测功能。

IEC61850 协议的服务分为两类：基于客户端—服务器模型的服务和主动上送服务。因此，从用户使用角度来看，IEC61850 标准的实现主要分为客户端（后台）、服务器端（装置）、配置工具三个部分。

配置文件是联系三者的纽带。

IEC61850 模块通过解析配置文件建立装置模型数据结构，并在其中保存监测数据跟模型之间的对应关系，进而在此基础上实现 IEC61850 服务。

3 结论

本文以高速发展的新一代智能变电站的新需求为背景，采用了面向对象的设计思想，充分考虑了程序的开放性、通用性以及可重用性，采用模块化、标准化、分布式设计，设计了基于 IEC61850 标准的适用于新一代智能变电站的智能化电能质量监测装置，该装置具有良好的通用性和扩展性，可直接接入智能变电站站控层 MMS 网络，实现数据共享。该装置满足了新一代数字化、智能化变电站中对电能质量监测装置的新需求。

参考文献：

- [1] 杨进, 肖湘宁. 电能质量监测技术发展新趋势: 网络化、信息化、标准化[J]. 电力自动化设备, 2004, 24(11): 82-86.
- [2] 王丽颖, 赵春宇. 基于 DSP 和 ARM 的电能质量监测系统[J]. 电子测量技术, 2008, 31(10): 64-67.
- [3] 徐遐龄, 查晓明. 电能质量监测评估系统的研究[J]. 高压技术, 2008, 34(1): 158-162.
- [4] 丁屹峰, 程浩忠, 占勇, 等. 基于 PQDIF 格式压缩的电能质量数据模型[J]. 继电器, 2005, 33(7): 55-58.
- [5] IEC.Communication Networks and Systems in Substations Part 9: Specific communication service mapping (SCSM)[S].
- [6] IEC.Communication Networks and Systems in Substations Part 7: Basic Communication Structure for Substations and Feeder Equipment[S].
- [7] IEC.Communication Networks and Systems in Substations Part 5: Communication Requirements for Functions and Device Models[S].
- [8] IEC.Communication Networks and Systems in Substations Power Quality Amendments to IEC61850-5 and IEC61850-7-4[S].

作者简介：

熊慕文（1981-），男，江西南昌人，工程师，主要从事变电站自动化系统、数字化变电站系统、IEC61850 及支撑协议研发工作；

王文龙（1972-），男，河北保定人，教授级高级工程师，主

要从事变电站自动化系统、智能变电站系统、IEC61850
及支撑协议等研发管理工作；

朱何荣（1985-），男，江苏盐城人，工程师，主要从事智能
变电站自动化系统、电能质量监测与分析装置研发工
作，E-mail: zhuhr@nari-relays.com；

程立（1977-），男，陕西咸阳人，工程师，主要从事变电
站自动化系统、配电自动化系统研发工作；

陈桂友（1978-），男，江苏扬州人，工程师，从事变电站自
动化系统、数字化变电站系统研发工作；

刘永钢（1983-），男，山西平遥人，工程师，从事变电站自
动化系统、数字化变电站系统研发工作。