基于数字功率变换技术在新能源多种逆变器及其在电网电能监控中的应用

Based on digital power transformation technology in new energy variety of inverter and its application in power grid electricity monitoring

鲁思慧

摘　要：本文将从二个方面对数字功率变换器在新能源多种逆变器及其在电网电能监控中的应用作分析：其一是在商用太阳能逆变器、离网发电太阳能逆变器、家用太阳能逆变器及开关电源中的应用；其二是基于 ADSP-CM403 芯片的 HAE（谐波分析引擎）技术在太阳能电网电能监控中的应用作分析。

关键词：数字功率变换，逆变器，电网电能，谐波分析引擎

Abstract: this article from two aspects of digital power converter in a variety of new energy inverter and its application in power grid electricity monitoring analysis: one is the commercial solar inverters, off-grid power generation solar inverters, household solar power inverter and the application of switching power supply; Secondly, based on ADSP - HAE CM403 chips (harmonic analysis engine) technology in the application of solar power grid electricity monitoring analysis.

Keywords: digital power transformation, nverter, power grid Electricity ,Harmonic analysis engine

中图分类号：TN86　　文献标识码：A　　文章编号：1606-7517(2014)06-6-143

数字功率变换是一种由数字电路控制的供电系统，该系统采用与模拟电路大致相同的方式，提供回路监控、监测、通信和控制功能。一个全数控供电系统包括数字控制和数字电源管理功能。控制回路提供调整电源输出的机制，通常借由电源开关的脉宽调制实现。电源管理技术提供温度监控、过流保护和电源排序功能。数字信号控制器是面向数字功率变换应用的理想解决方案。其 DSC 可通过单个平台，同时提供控制回路和电源管理功能。DSC 可提供卓越的数字信号处理功能、高速 PWM 和超高精度 ADC，最大限度地提高系统性能和可靠性。另外对最新的 ADSP-CM403 16 位高精度模数转换器的 ARM® Cortex-M4TM 混合信号控制处理，本文将从二个方面对数字功率变换在新能源多种逆变器及电网电能监控中的应用作分析：其一是在商用太阳能逆变器、离网发电太阳能逆变器、家用太阳能逆变器及开关电源中的应用；其二是基于 ADSP-CM403 芯片的 HAE（谐波分析引擎）技术在太阳能电网电能监控中的应用作分析。

1 数字功率变换器类型特征与在太阳能各类逆变器中的应用

1.1 多种数字功率变换器 -- 控制器（MCU 和 DSC）类型特征与优点

MC56F84xxx: 数字信号控制器：100MHz/100 MIPS，256KB 闪存，320ps PWM，2x12 位 ADC，其优点是精密 PWM 模块和高速转换 ADC 使 56F8xxx 产品系列成为商用太阳能系统的最佳选择；56F824X_825X 数字信号控制器：60MHz DSC，64K 闪存，NanoEdge 技术，超高速 ADC，嵌入式 PGA，模块间交叉连接，其优点是高度集成的特性使数字信号控制器成为适合功率变换应用的经济型灵活解决方案；MC56F800x：MC56F8006 和 MCF56F8002 数字信号控制器 32MHz DSC，16K 闪存，经济型，高控制能力，其优点是 56F82xx 产品系列提供精密、高速而强大的外设，可实现更顺畅、更理想的功率变换；56F803X：带 CAN 的数字信号控制器：32 MHz DSC，64K 闪存，用于连接独立太阳能转换模块的 CAN 接口，其优点是数字信号控制器

受到 CodeWarrior 和 Processor Expert 的支持，简化了项目开发与调试；MC56F83xx：56F83xx DSC 系列，高达 512K 闪存，外置程序与数据存储器。

1.2 基于数字功率变换 -- 控制器（MCU 和 DSC）在商用太阳能逆变器中的应用（见图 1 所示）

大型商用发电站与集中式公用事业发电站系统是当今光伏行业中发展最快的领域。光伏电能价格的持续下降和政府的优惠政策（包括上网电价补贴、税负优惠以及要求公用事业部门提供的电能必须有一定的最低百分比来自可再生能源）都推动了此类系统的发展。这些系统的规模小到几十千瓦的商用屋顶系统，大到 100 兆瓦以上、覆盖数英亩面积的公用事业级集中式发电站。这些系统的逆变器是集中式逆变器，不过也可以采用一组并联的串式逆变器。除了向电网供应交流电以外，集中式逆变器还可用于功率因数校正。图 1 为基于 MC56F84xxx 数字信号控制器为例构建的商用太阳能逆变器框图。

1.3 数字功率变换在离网发电太阳能逆变器中的应用

离网发电系统用于驱动本地负载。它们通常需要一个电池组和一个电池充电 / 管理系统。它们可以提供直流和交流两种输出电源，但不连接到公用电网。典型的输出功率为数百瓦到数千瓦单相电源。这些系统的控制解决方案包括 MC56F8013 和 MC56F8036。56F8013 在初级端使用，用于控制最大功率点和电池充电。其图 2 为以基于 MC56F8013 和 MC56F8036 数字信号控制器为例构建的离网发电太阳能逆变器框图。

1.4 基于 MC56F8023 的太阳能电池板逆变器的典例

太阳能电池板逆变器参考设计显示了 16 位数字信号控制器 (DSC)MC56F8023 控制整个逆变器功能的能力。该逆变器将太阳能电池板的输入电压转换为隔离的单相 AC 输出电压。该应用可作为开发最终解决方案的快速入门。它包括所有用于功率转换、控制和测量的电路。主电源板提供标准的 64 引脚 PCI Express® 连接器，作为子卡控制板的接口。该选项也可通过其他数字信号控制器控制该逆变器。其典型特性为：从太阳能电池板流入的 DC 输入电压额定值为 36V；可串联使用一个 36V 或两个 18V 太阳能电池板；所采用的控制软件内具有最大功率点跟踪特性；包括用于 3 个串联在一起的 12V 铅酸累加器的电池充电器；Galvanic 隔离输出电压 230V，频率 50Hz，高达 400W 的输出功率；真正的正弦波形输出电压；用于外部通信的 RS-485 隔离接口；内部低功率 DC 电源可保持适当的功能，无需连接电池；实施过压、过电流和过温保护及提供离网嵌入式软件实例。图 3 为基于 MC56F8023 的太阳能电池板逆变器构建框图。

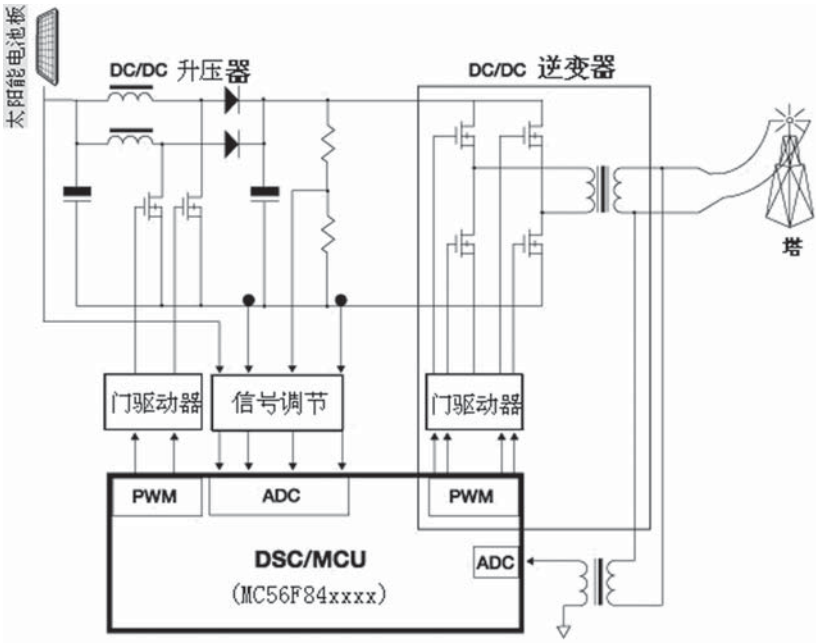

图 1 基于数字功率变换 - - 控制器 (MCU 和 DSC) 在商用太阳能逆变器中的应用方案框图

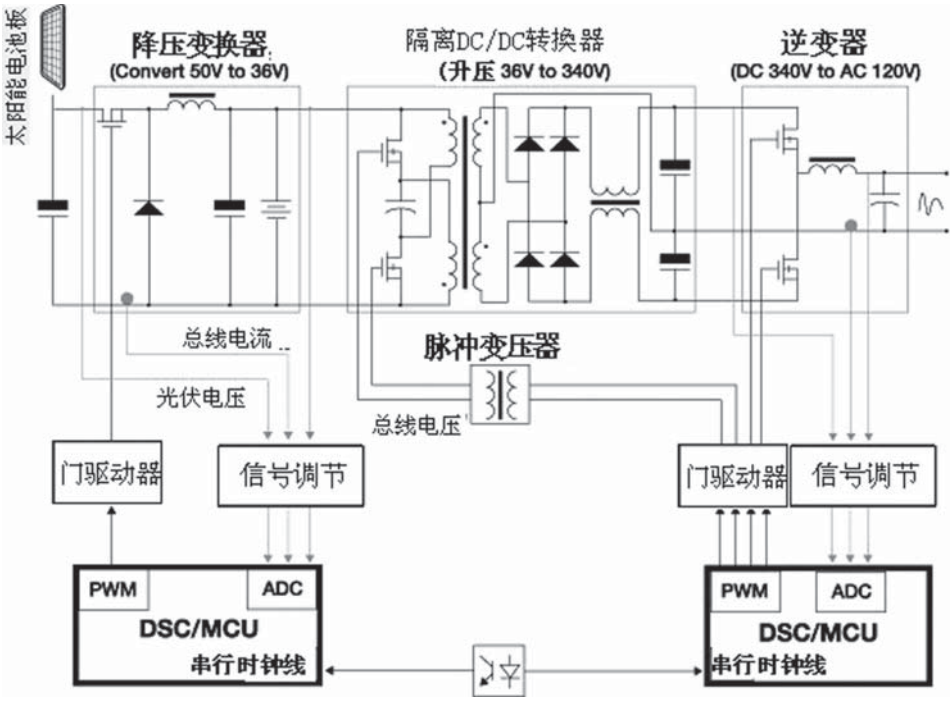

图 2 以基于 MC56F8013 和 MC56F8036 数字信号控制器为例构建的离网发电太阳能逆变器框图。

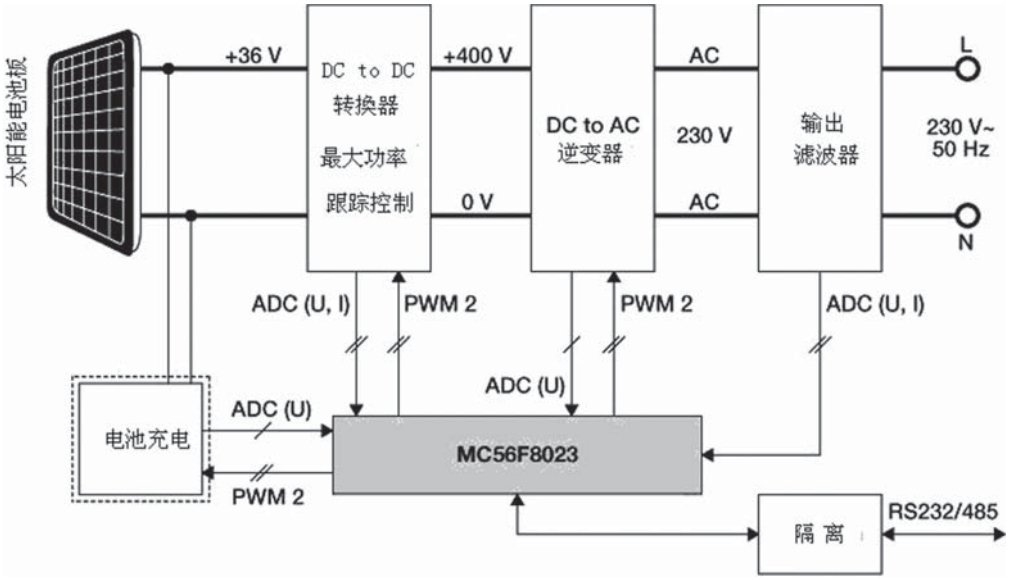

图 3 基于 MC56F8023 的太阳能电池板逆变器构建框图

1.5 家用太阳能逆变器典例（见图 4 框图）

家用并网系统是当今最为常见的光伏 (PV) 系统。它们通常可以提供 500 瓦至 10 千瓦的输出功率，并且一般不附带备用电池。最常见的 PV 架构分为集中式和分布式两种。集中式 PV 架构使用单个逆变器来支持一系列 PV 模块。分布式架构可按照分布拓扑进一步划分。主流的分布技术采用微型逆变器，其中每个 PV 模块都有自身的 AC 输出。另一种分布技术在每个 PV 模块上采用 DC/DC 升压，向集中式逆变器提供高电压 DC 总线。所有架构的输出 AC 电源必须在相位、频率和电压方面与电网同步，并且必须具有较低的总谐波失真。

数字信号控制器 (DSC) 提供单芯片解决方案，可在各

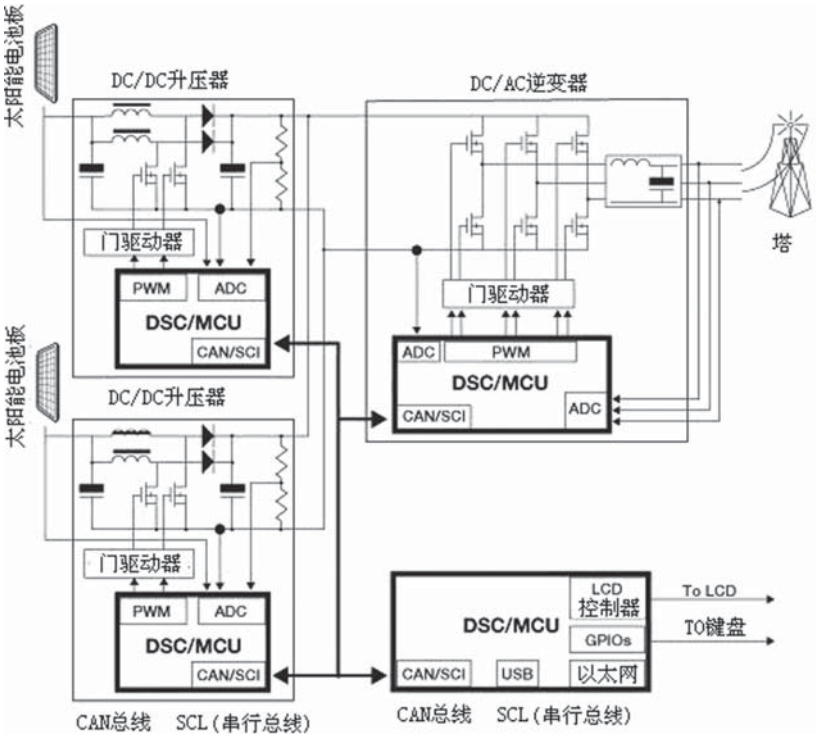

图 4 基于数字信号控制器 (DSC) 构建的家用太阳能逆变器框图

种 PV 架构中以最高效的方法执行功率变换。该类产品组合涵盖广泛，从低复杂度的单相微型逆变器直到高功率的集中式逆变器。图 4 为基于数字信号控制器 (DSC) 构建的家用太阳能逆变器典例的框图。

1.6 基于 DSC 构建的新型开关电源是能源系统的基础

数字信号控制器提供的解决方案可减少物料清单，从而最大限度提升效率、降低系统成本，其解决方案能够动态、高效地补偿负载条件变化，从而克服因负载条件变化而造成的系统弊端，例如，组件老化和运行不稳定。如图 5 所示，数字信号控制器 DSC 集成在系统中，能够全面提供系统级的开关电源 (SMPS) 控制和管理。

此类开关电源目标应用是能源系统的基础，如不间断电源与电信电源等典例。

一种采用56F8300数字信号控制器的数字AC/DC开关

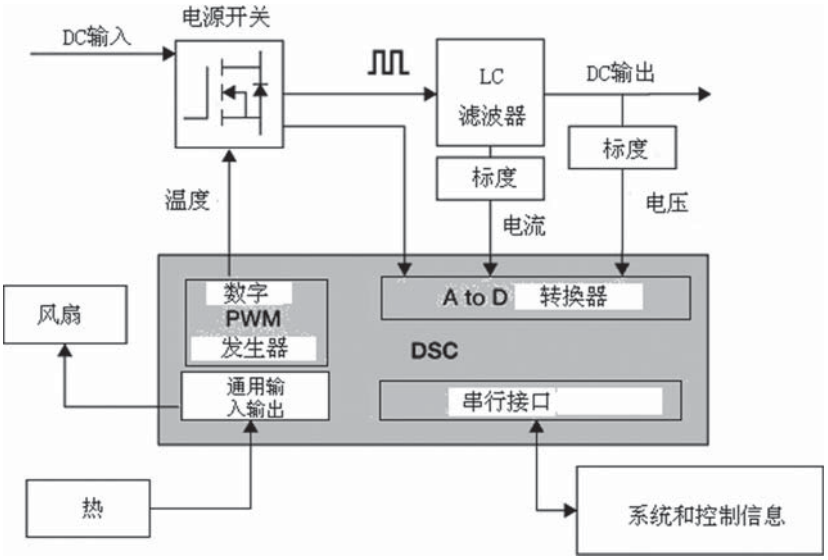

图 5 基于 DSC 构建的开关电源框图

电源的设计典例

完整的 AC-DC 数字开关电源 (SMPS) 系统包括数字电源控制与数字电源管理功能。在数字电源控制中，调节电源系统输出的控制反馈或前馈环路直接由 56800/E 数字信号控制器 (DSC) 控制，该控制器使用脉宽调制技术驱动电源开关占空比。DSC 还提供数字电源管理功能，从而实现配置、跟踪、监控、保护、引导上电顺序和通信功能。在比较传统的设计中，通常使用模拟电路执行电源控制功能，同时使用微控制器执行电源管理。

与采用模拟电路和微控制器混合的实施方案相比，完全由 DSC 上运行的软件进行数字化控制的 SMPS 具有许多优势。改用数字功率变换的好处包括 ：电源应用的灵活性和通用性将会提高 ；有利于改进控制算法，具有智能模式管理和故障监控与实时监视和控制运行状态 ；可降低系统成本、维护成本与隔离成本 ；又能改进效率、性能和增强知识产权保护。

该设计典例是一款基于 56F8323 器件的完全数字化控制的高频开关电源。它由两个子系统组成。初级端为一个带功率因数校正 (PFC) 功能的 AC-DC 转换器，次级端为一个全桥 DC-DC 转换器。AC-DC 部分使用交错式 PFC 升压控制结构，其中包括一个全桥整流器，以及两个辅助开关，用于在主开关上实现零电压开关 (ZVS)。实施 ZVS 开关方案可以降低组件压力和开关损耗，同时可以提高效率。DC-DC 转换器部分使用移相全桥 (PSFB) 的控制结构。片上 PWM 模块上集成的功能将执行移相。次级端实施了一个电流倍增器整流电路。该结构消除了昂贵的模拟隔离，减小了 PCB 和散热器的尺寸，同时还增大了功率密度，提高了效率。其特性为 ：500W 全数字开关电源，由带功率因数校正功能的 56F8323 与 56F8323，次级端采用移相技术器件控制。其优势在于电源应用的灵活性和通用性将会提高，高输入功率因数降低了电网中的电力污染，具有智能模式管理、故障监控、实时监视和控制运行状态及降低系统成本与维护成本。该采用 56F8300 数字信号控制器的数字 AC/DC 开关电源指标为 ：输入电压 ：85 ~265VAC，输入频率 ：45~65Hz，额定输出电压 ：48VDC，额定输出功率 ：500W，开关频率 ：>100K，功率因数 ：>95%，效率 ：>90% ；具有 RS232 端口用来与光隔离器件通信与可视界面（多段 LED 指示灯、输入电压、输入电流、输出电压和输出电流）接口。

2 基于 ADSP-CM403 芯片的 HAE（谐波分析引擎）技术在太阳能电网电能监控中的应用

2.1 问题的引出

太阳能光伏逆变器转换来自太阳能面板的电能并高效地将其部署到公用电网中。早期太阳能 PV 逆变器只是将电能转储到公用电网的模块。但是，新设计要求太阳能光伏逆变器对电网的稳定性作出贡献。为此将最新的 ADSP-CM403 技术如何以 HAE（谐波分析引擎）的方式改善智能电网的集成度，并监控电网上的电源质量，从而极大地增强电网稳定等问题作研讨。从叙述思路出发，先对智能电网的理念作说明。

电网电能的谐波分析理念

对基于太阳能光伏逆变器技术的智能电网而言，所谓智能电网，是一种自身能够高效匹配和管理发电和用电并可最大程度地利用各种可用资源的公用供电基础设施。若要将新一代太阳能光伏逆变器接入智能电网，则逆变器需要越来越高的智能程度才能实现。这本身就是一个难题，主要是因为当电力需求在别处时，此处却连接了过多的电网，从而发

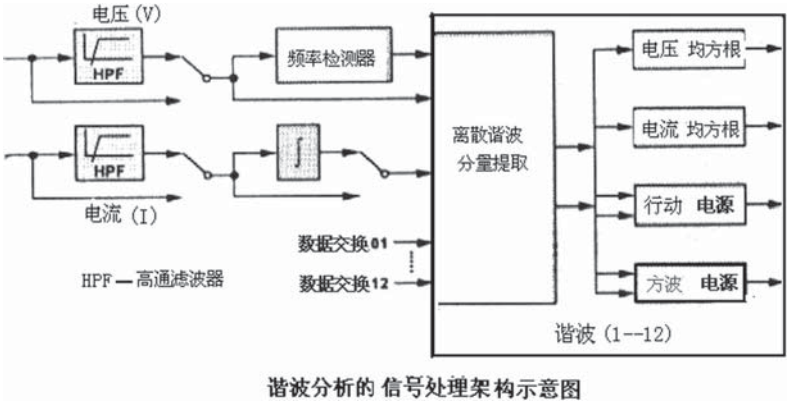

图 6 电网电能的谐波分析框图

生不平衡。基于这个原因，太阳能光伏逆变器需要具备更高的智能程度，并且这种智能应侧重于电网集成，其中系统需协助稳定电网，而非作为电网的一个简单电源使用，这要求更好地对注入电网的电能进行测量、控制和质量分析，从而引出电网电能的谐波分析的理念（见图 6 所示电网电能的谐波分析框图）。也就是说对太阳能电网电能的监控实质上是应用混合信号控制器所具的谐波分析引擎 (HAE) 对太阳能应用中的谐波幅值作分析，而太阳能应用中的谐波幅值关系到电网电能的质量监控。据此，会促成新指令的发布以及更高的技术要求，进而直接导致新技术的产生。

2.2 关于电网电能的谐波分析的 HAE（谐波分析引擎）技术

HAE 模块本质上是一个数字 PLL（锁相环路），其简化原理技术（或称模块）框图如下图 7 所示。锁相环路是一种反馈控制电路，简称锁相环 (PLL)。因许多电子设备要正常工作，通常需要外部的输入信号与内部的振荡信号同步，利用锁相环路就可以实现这个目的。

从图 7 可知，HAE 连续接收 V 和 I 数据，并且数个周期后将锁定至输入波形的基波。其 HAE 模块的输入范围为 45Hz 至 66Hz。最多可分析 40 个谐波，每次 12 个。对于每个谐波，PLL 会试图锁定至所需的信号频率。

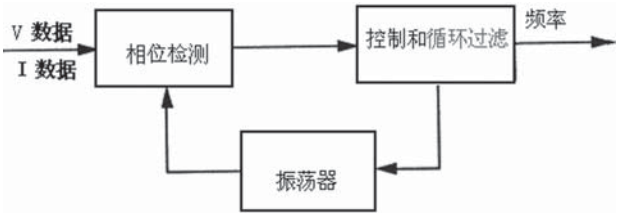

图 7 HEA 简化了的数字 PLL 框图

2.2 ADSP-CM403 芯片的应用

谐波引擎硬件模块与谐波分析仪共同处理结果。由于谐波引擎产生的结果为最终格式，这些结果数据保存在结果存储器中。HAE 引擎在无衰减的 2.8kHz 通带内计算谐波信息（相当于 3.3kHz 的 -3dB 带宽），用于 45Hz 至 66Hz 范围内的线路频率。同时可使用相电流和来分析零线电流。在新采样周期的最初时刻，谐波引擎在含有数据 RAM 内的预定义位置循环，该数据 RAM 含有分析仪处理结果。若有需要，内容可进一步处理。电压 (V) 和电流 (I) 数据可来自 Sinc 模块或 ADC（两者均存储在 SRAM 中），并输入至 HAE 模块（见图 7 左面输入端），速率为 8kHz。该速率下可产生一个中断，提示太阳能光伏逆变器输入可用数据。进行数据分析并执行下列计算时，HAE 模块将产生另一次中断，提示太阳能光伏系统准备显示谐波分析数据。而要实现上述运行，则需应用 ADSP-CM403 混合信号控制处理器芯片，由它还可将 HAE 至 DMA 的全部结果数据直接传输至 SRAM，之后系统代码便可显示结果。这会导致整个 HAE 系统的少许代码开销。

关于 ADSP-CM408F 技术特性 ：采用 16 位高精度模数转换器的 ARM® Cortex-M4TM 混合信号控制处理器 ；双 16 位逐次逼近型模数转换器，380ns 的转换速度有利于降低转动波动，提供更精确的速度控制 ；带浮点运算单元的 240MHz ARM Cortex-M4 内核，可实现更快的环路控制；正弦滤波器可无缝连接至 AD740x 隔离转换器，进行电流检测 ；384kB SRAM 和 2MB 闪存，从容应对大程序 ；高级 PWM 和定时器功能，可有效提升电机驱动和伺服性能

2.3 基于 ADSP-CM403XY 谐波分析引擎（HAE）在太阳能应用中的谐波分析的结果

从图 8 中的 HAE 结果清楚表明观察电压均方根数据时，系统中存在的有哪些谐波分图。图中 50Hz 基波（谐波 1）幅值最大清晰可见，但 250Hz 和 350Hz 处的较低谐波（如谐波 5 和谐波 7）幅值亦可在本示例结果中看到，而谐波 5 和谐波 7 以后的 8、9、10、11、12 次谐波幅值就显示不出了。则图 8 就是 HAE 的 Vrms（Virtual Reality Motion Sensing 虚拟现实动作感应技术）其谐波 (1-12) 有效值，输出电压值结果示意图，即 ADSP-CM403XY 谐波分析引擎 (HAE) 技术在太阳能应用中的谐波分析示意图。

图 8 为 HAE 的 Vrms 谐波 (1-12) 有效值、输出电压值结果示意图，即 ADSP-CM403XY 谐波分析引擎 (HAE) 技术在太阳能应用中的谐波分析示意图。

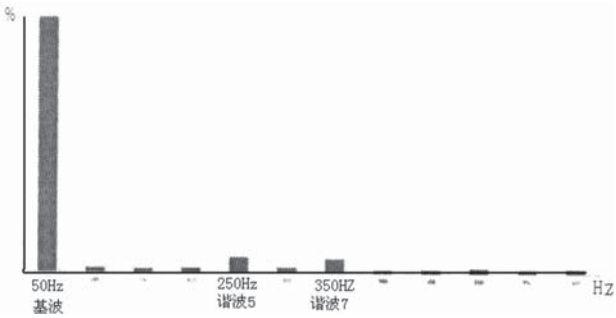

图8