微型逆变器可优化太阳能发电系统

对于优化太阳能系统的效率和可靠性而言，一种较新的手段是采用连接到每个太阳能板上的微型逆变器(micro-inverter)。为每块太阳能面板配备单独的微型逆变器使得系统可以适应不断变化的负荷和天气条件，从而能够为单块面板和整个系统提供最佳转换效率。

微型逆变器架构还可简化布线，这也就意味着更低的安装成本。通过使消费者的太阳能发电系统更有效率，系统“收回”采用太阳能技术的最初投资所需的时间会缩短。

电源逆变器是太阳能发电系统的关键电子组件。在商业应用中，这些组件连接光伏(PV)面板、储存电能的电池以及本地电力分配系统或公用事业电网。图 1 显示的是一个典型的太阳能逆变器，它把来自光伏阵列输出的极低的直流电压转换成电池直流电压、交流线路电压和配电网电压等若干种电压。

在一个典型的太阳能采集系统中，多个太阳能板并联到一个逆变器，该逆变器将来自多个光伏电池的可变直流输出转换成干净的 50Hz 或 60Hz 正弦波逆变电源。

此外，还应该指出的是，图 1 中的微控制器(MCU)模块 TMS320C2000 或 MSP430 通常包含诸如脉宽调制(PWM)模块和 A/D 转换器等关键的片上外设。

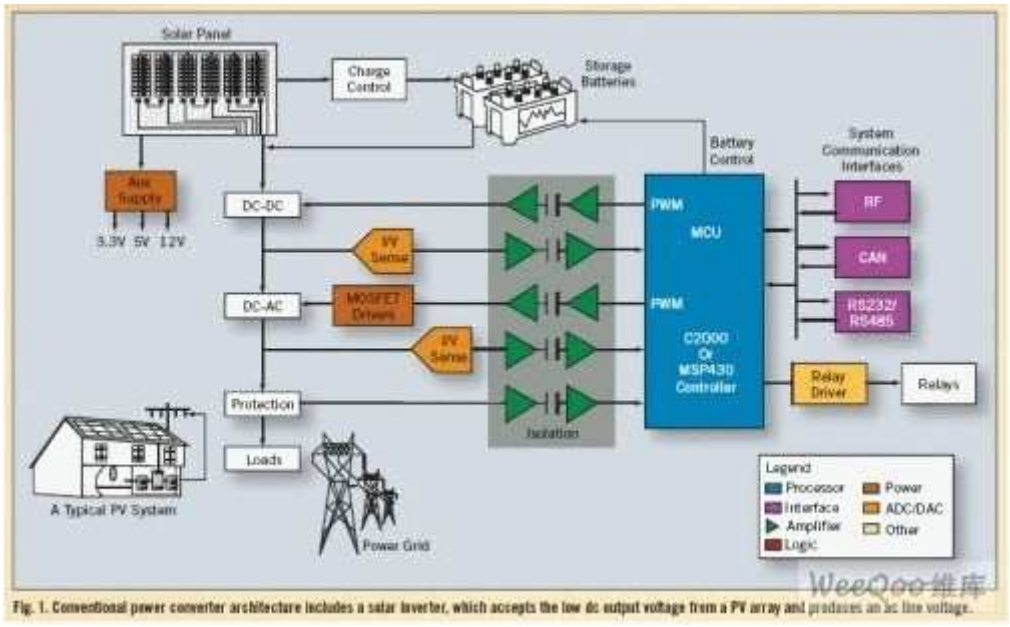

Fig. 1. Conventional power converter architecture includes a solar inverter, which accepts the low dc output voltage from a PV array and produces an ac line voltage.

图 1：传统电源转换架构包含一个太阳能逆变器，它从 PV 阵列接收低 DC 输出电压并产生 AC 线路电压。

设计的主要目标是尽可能提高转换效率。这是一个复杂且需反复的过程，它涉及最大功率点跟踪算法(MPPT)以及执行相关算法的实时控制器。

最大化电源转换效率

未采用 MPPT 算法的逆变器简单地将光伏模块与电池直接连接起来，迫使光伏模块工作在电池电压。几乎无一例外的是，电池电压不是采集最多可用太阳能的理想值。

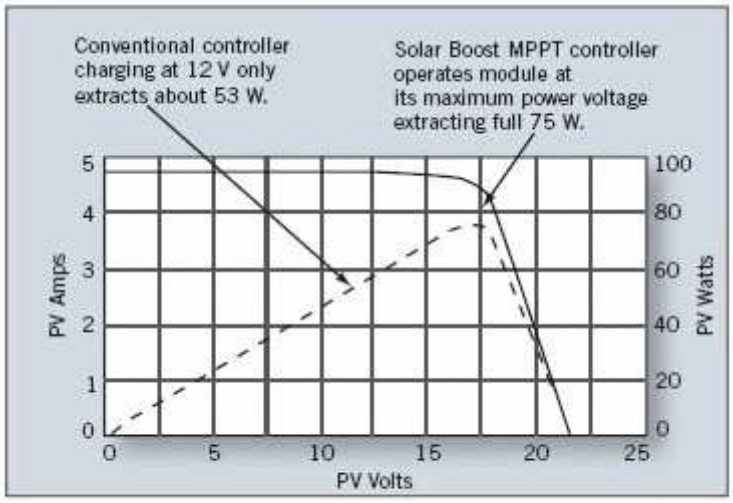

Fig. 2. Maximum power-point tracking (MPPT) algorithm enables a 75-W PV output compared with only 53 W for a non-MPPT system.

WeeQoo维库

图 2 说明了典型的 75W 光伏模块在 25℃电池温度下的传统电流/电压特性。虚线表示的是电压(PV VOLTS)与功率(PV WATTS)之比。

实线表示的是电压与电流(PV AMPS)之比。如图 2 所示，在 12V 时，输出功率大约为 53W。换句话说，通过将光伏模块强制工作在 12V，输出功率被限制在约 53W。

但采用 MPPT 算法后，情况发生了根本变化。在本例中，模块能实现最大输出功率的电压是 17V。因此，MPPT 算法的职责是使模块工作在 17V，这样一来，无论电池电压是多少，都能从模块获取全部 75W 的功率。

高效DC/DC 电源转换器将控制器输入端的17V 电压转换为输出端的电池电压。由于 DC/DC 转换器将电压从 17V 降至 12V，本例中，支持 MPPT 功能的系统内电池充电电流是：(VMODULE/VBATTERY)×IMODULE，或(17V/12V)×4.45A =6.30A。

假设 DC/DC 转换器的转换效率是 100%，则充电电流将增加 1.85A(或 42%)。

虽然本例假设逆变器处理的是来自单个太阳能面板的能量，但传统系统通常是一个逆变器连接多个面板。取决于应用的不同，这种拓扑既有优点又有缺点。

MPPT 算法

主要有三种类型的 MPPT 算法：扰动-观察法、电导增量法和恒定电压法。前两种方法通常称为“爬山”法，因为它们基于如下事实：在 MPP 的左侧，曲线呈上升趋势(dP/dV>0)，而在 MPP 右侧，曲线下降(dP/dV <0)。

扰动-观察(P＆O)法是最常用的。该算法按给定方向扰动工作电压并采样 dP/dV。如果 dP/dV 为正，算法就“明白”它刚才是在朝着 MPP 调整电压。然后，它将一直朝这个方向调整电压，直到 dP/dV 变负。

P＆O 算法很容易实现，但在稳态运行中，它们有时会在 MPP 附近产生振荡。而且它们的响应速度也慢，甚至在迅速变化的气候条件下还有可能把方向搞反。

电导增量(INC)法使用光伏阵列的电导增量 dI/dV 来计算 dP/dV 的正负。INC 能比 P＆O 更准确地跟踪迅速变化的光辐照状况。但与 P&O 一样，它也可能产生振荡并被迅速变化的大气条件所“蒙骗”。其另一个缺点是，增加的复杂性会延长计算时间并降低采样频率。

第三种方法“恒压法”则基于如下事实：一般来说，VMPP/VOC≈0.76。该方法的问题来源于它需要瞬间把光伏阵列的电流调为 0 以测量阵列的开路电压。然后，再将阵列的工作电压设置为该测定值的 76％。但在阵列断开期间，可用能量被浪费掉了。人们还发现，虽然开路电压的 76％是个很好的近似值，但也并非总是与 MPP 一致。

由于没有一个 MPPT 算法可以成功地满足所有常见的使用环境要求，许多设计工程师会让系统先*估环境条件再选择最适合当时环境条件的算法。事实上，有许多 MPPT 算法可用，太阳能面板制造商提供他们自己算法的情况也屡见不鲜。

对廉价控制器来说，除了 MCU 本份的正常控制功能外，执行 MPPT 算法绝非易事，该算法需要这些控制器具有高超的计算能力。诸如德州仪器 C2000 平台系列的先进 32 位实时微控制器就适合于各种太阳能应用。

电源逆变器

使用单个逆变器有许多好处，其中最突出的是简单和低成本。采用 MPPT 算法和其它技术提高了单逆变器系统的效率，但这只是在一定程度上。根据应用的不同，单个逆变器拓扑的缺点会很明显。最突出的是可靠性问题：只要这个逆变器发生故障，那么在该逆变器被修好或更换前，所有面板产生的能量都浪费掉了。

即使逆变器工作正常，单逆变器拓扑也可能对系统效率产生负面影响。在大多数情况下，为达到最高效率，每个太阳能电池板都有不同的控制要求。决定各面板效率的因素有：面板内所含光伏电池组件的制造差异、不同的环境温度、阴影和方位造成的不同光照强度(接收到的太阳原始能量)。

与整个系统使用一个逆变器相比，为系统内每个太阳能电池板都配备一个微型逆变器会再次提升整个系统的转换效率。微型逆变器拓扑的主要好处是，即便其中一个逆变器出现故障，能量转换仍能进行。

采用微型逆变器的其它好处包括能够利用高分辨率 PWM 调整每个太阳能板的转换参数。由于云朵、阴影和背阴会改变每个面板的输出，为每个面板配备独有的微型逆变器就允许系统适应不断变化的负载情况。这为各面板及整个系统都提供了最佳转换效率。

微型逆变器架构要求每个面板都有一个专用 MCU 来管理能源转换。不过，这些附加的 MCU 也可被用来改善系统和面板的监测。

例如，大型的太阳能发电场就受益于面板间的通信以帮助保持负载平衡并允许系统管理员事先计划有多少能量可用，以及用这些能量做什么。不过，为充分利用系统监测的好处，MCU 必须集成片上通信外围设备(CAN、SPI、UART 等)以便简化与太阳能阵列内其它微型逆变器的接口。

在许多应用中，使用微型逆变器拓扑可以显着提高系统整体效率。在面板级，效率有望提升 30％。但由于各应用差异很大，系统级改善的“平均”百分比并没多大意义。

应用分析

当评估微型变频器在具体应用中的价值时，应从几个方面考虑拓扑结构。

在小型应用中，各面板有可能面临基本相同的光照、温度和阴影等条件。因此，微型逆变器在提升效率方面作用有限。

为使各面板工作在不同电压以获得最高能效，要求采用 DC/DC 转换器使各面板的输出电压统一于储能蓄电池的工作电压。为尽可能降低制造成本，可把 DC/DC 转换器和逆变器设计成一个模块。用于本地电源线路或连接配电网的 DC/AC 转换器也可被整合进该模块。

太阳能面板必须要互相通信，这会增加导线和复杂性。这是对在模块中包含进逆变器、DC/DC 转换器和太阳能电池板的另一个争论点。

每个逆变器的 MCU 仍然必须有足够能力来运行多个 MPPT 算法以适应不同的操作环境。

采用多个 MCU 会加大整体系统的材料成本。

每当考虑改变架构时都会关注其成本。为满足系统的价格目标，为每个面板都配备一个控制器意味着该控制器的成本必须要有竞争力、外形较小，但仍能同时处理所有的控制、通信和计算任务。

片上集成恰当的控制外设以及高模拟集成度是保证系统低成本的两个基本要素。为执行针对优化转换、系统监控和能量存储各环节中的效率所开发出的算法，高性能也是必需的。

使用除可满足微型逆变器本身要求之外，还可处理包括 AC/DC 转换、DC/DC 转换以及面板间通讯等整个系统大部分要求的 MCU，可以减少因使用多个 MCU 所导致的成本增加。

MCU 特性

仔细权衡这些高层次要求是确定 MCU 需要哪些功能的最好方法。例如，当并联面板时需要负载平衡控制。所选 MCU 必须能检测负载电流以及能通过开/关输出 MOSFET 升高或降低输出电压。这需要一个高速片上 ADC 来采样电压和电流。

微型逆变器设计没有“一成不变”的模式。这意味着设计者必须有能力和创新精神采用新技巧、新技术，特别是在面板间和系统间的通信方面。最合适的 MCU 应支持各种协议，包括一些平常不会想到的如电力线通讯(PLC)和控制器局域网(CAN)等。特别是电力线通讯，因不再需专门的通信线路，所以可降低系统成本。但这需要 MCU 内置高性能 PWM、高速 ADC 和高性能 CPU。

对于针对太阳能逆变器应用所设计的 MCU，一个意想不到但极具价值的特性是双片上振荡器，它们可用于时钟故障检测以提高可靠性。能够同时运行两个系统时钟的能力也有助于减少太阳能电池板安装时出现的问题。

由于在太阳能微型逆变器设计中凝聚了如此多的创新，对 MCU 来说，其最重要的特性也许就是软件编程能力了。该特性使得在电源电路设计和控制中拥有最高的灵活性。

C2000 微控制器配备了可高效处理算法运算的先进数字运算处理内核以及用于能量转换控制的片上外设集，已广泛应用于传统的太阳能电池板逆变器拓扑中。新推出的 Piccolo 系列 C2000 系列微控制器是经济款，该系列的最小封装只有 38 个引脚，但其架构更先进、外设也得到增强，从而可把 32 位实时控制的好处带给要求低总体系统成本的微型逆变器等应用。

此外，Piccolo MCU 系列的各款产品都集成了两个用于时钟比较的片上 10MHz 振荡器，以及带上电复位和掉电保护的片上 VREG、多个高分辨率 150ps 的 PWM、一个 12 位 4.6 兆次采样/秒的 ADC 以及 I2C(PMBus)、CAN、SPI 和 UART 等通信协议接口。图 3 显示了一个与基于微型逆变器的光伏系统一起使用的计算机系统配置。

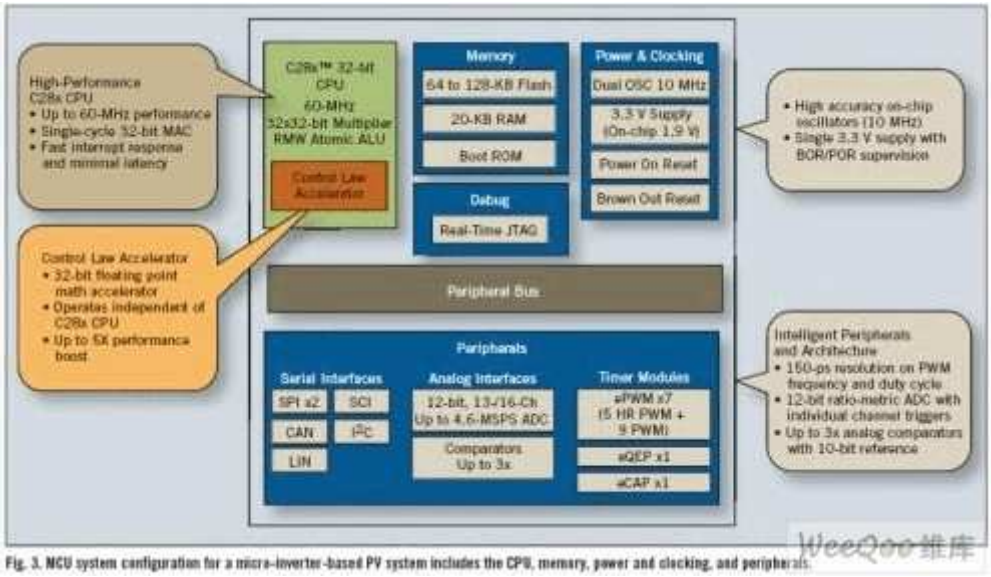

Fig. 3. MCU system configuration for a micro-inverter-based PV system includes the CPU, memory, power and clocking, and peripherals.

图 3：面向基于微逆变器 PV 的系统的 MCU 系统包含 CPU、存储器、电源及时钟、外设。

性能是微型逆变器的关键特性。尽管 Piccolo 系列器件相比其它 C2000 MCU 产品尺寸更小、价格更低，但其功能却有提升，例如它具有可为 CPU 分担处理复杂高速控制算法的可编程浮点控制律加速器(CLA)，从而使 CPU 无需处理 I/O 和反馈回路，在闭环应用中，可使性能提高 5 倍。

光伏电池的挑战

基于太阳能发电系统的缺点之一是转换效率。太阳能电池板能从每 100mm2 的光伏电池获取约 1mW 的平均电能。典型效率约为 10%。光伏电源的功率系数(即在阳光一直照射的条件下，太阳能电池实际产生的平均电能与理论上可产生的电能之比)约为 15%至 20%。有多种原因导致这一结果，包括阳光本身的变化，如夜间完全消失，以及即使在白天，阴影和天气条件也常常导致光照减少。

光电转换为效率计算引入了更多变数，包括太阳能电池板的温度及其理论峰值效率。对设计工程师来说，另一个问题是光伏电池产生的电压约有 0.5V 不规则变化。当选择能量转换拓扑时，这种变化会带来严重影响。例如，对低效的能量转换技术来说，它有可能消耗掉所采集到的很大一部分光伏电能。

为适应太阳不是全天 24 小时都照射这一事实，太阳能供电系统要包含电池以及给电池高效充电所需的复杂电子器件。当电池被集成到系统中时，电池充电需要额外的 DC/DC 转换电路，同时还需要电池管理和监控。

许多由太阳能供电的系统还与电网对接，从而要求相位同步和功率因数校正。还有许多需要复杂控制的使用环境。例如，必须内置故障预警机制以防范公共电网的停掉电等事件。这些仅仅是设计工程师必须要考虑的头等大事。