

# 借助隔离技术将太阳能光伏发电系统整合于智能电网

作者：Martin Murnane

## 太阳能光伏逆变器

利用太阳辐射直接产生的电能绝大部分来自太阳能光伏(PV)电池，它将光子能量转换成电子流，进而形成电流。图 1 所示为大型光伏发电设备的航拍照片。



图 1. 亚利桑那州尤马县太阳能光伏发电设备<sup>1</sup>

太阳能光伏(PV)逆变器转换来自太阳能电池板的电能并高效地将其部署到公用电网中。来自太阳能电池板的直流电(类似于直流电源)会被转换成交流,并以正确的相位关系馈送到公用电网上,效率高达 98%。PV 逆变器转换过程可以分为一级或多级。

第 1 级通常为从构成太阳能电池板的低电压高电流太阳能电池到与电网交流电压兼容的高电压低电流水平的 DC/DC 转换。根据具体拓扑结构,如果直流端以串联方式连接有足够多的太阳能电池,那么可能无需该级,便可确保所有负载条件下均具有稳定的高电压。

在第 2 级中,通常利用 H 桥拓扑结构将直流转换成交流。PV 逆变器设计可能会使用中性点箝位(NPC)等 H 桥变体来提高功效,并降低系统无功功率。

早期太阳能 PV 逆变器只是将电能转储到公用电网的模块。较新设计则强调安全性、智能电网整合并削减成本。设计人员正在考虑采用现有太阳能逆变器模块中未使用的新技术来改善性能和降低成本。

一个关键因素是基于计算机的仪器仪表和控制,但必须使用隔离栅来保护测量和计算电路,使其不受功率处理电路以及开关所引起的瞬态信号影响。本文将讨论 iCoupler<sup>®</sup>隔离技术如何利用 ADI 公司的隔离式模数转换器(ADC)和栅极驱动器来降低太阳能 PV 逆变器的成本、增加智能电网整合度并提高其安全性。

## 智能电网

什么是智能电网? IMS Research 将智能电网定义为“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”。这意味着新一代太阳能 PV 逆变器需要更加智能,以便与智能电网连接,尤其是处理多个来源供电大于电网所需电能时出现的不平衡情况。因此,PV 系统智能需要重点关注电网整合,其中贡献系统电能的每个方面必须相互配合,以稳定电网,而不是简单地开环供电。电网整合要求更好地对馈入电网的电能进行测量、控制和质量分析。此外,新指令和更高的技术要求也需要新技术。

因此,智能电网整合的一项重要局部特性可能是储能,即通过将不需要的电能储存起来供高峰时段使用,从而减少电网中的湍流。本文余下部分将重点讨论电气隔离在保护仪器仪表电路(用于测量和控制来源、互连和储能元件)上的作用,并首要强调 iCoupler 技术的重要作用。具体而言,AD7401A 隔离式 ADC 和 ADuM4223 隔离式栅极驱动器可提供满足新型太阳能 PV 逆变器设计要求的性能。

## 隔离技术

在 iCoupler 技术中,变压器会在两个单独供电的电路之间耦合数据,同时避免这两个电路之间存在任何电流连接。变压器采用晶圆级工艺直接在片内制造。位于镀金层下方的高击穿电压聚酰亚胺层将上方线圈与下方线圈隔离开来。利用 1 ns 脉冲编码的输入逻辑转换送至变压器的原边。从一个变压器线圈耦合到另一个变压器线圈的脉冲由变压器副边上的电路来检测。

## 隔离式 ADC

图 2 显示的是一对与简介中所述类似的太阳能 PV 逆变器。它们接到与电网相连的电源总线,可以单独地进行测量和开关。每个太阳能电池板均连接到其 DC/DC 升压电路,然后连接到 DC/AC 逆变器。(使用时,储能电池的连接和开关均受控制。为了简便起见,本文忽略了关于储能的所有讨论内容。)

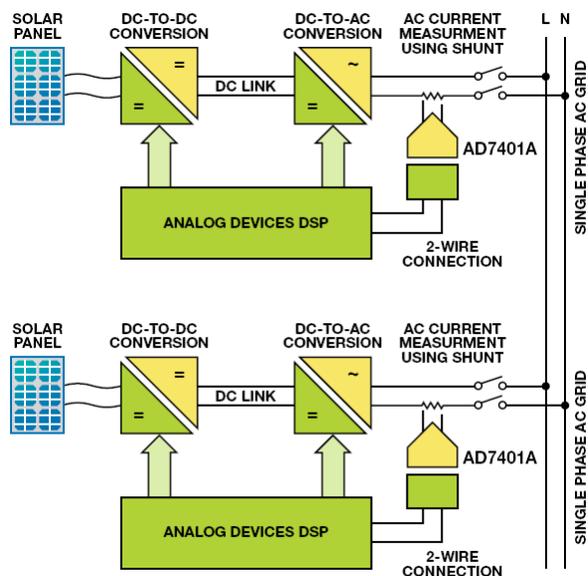


图 2. 太阳能 PV 系统示例

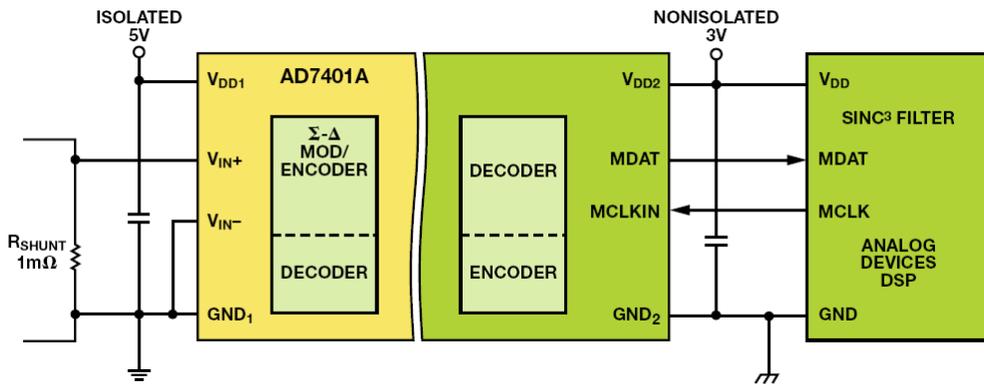


图 3. 隔离式 AD7401A ADC

数字信号处理器(DSP)负责控制该过程。AD7401A 隔离式 ADC 测量约为 25 A 的交流输出电流。太阳能 PV 逆变器系统可能在输出端连接有隔离变压器，也可能没有。如果为节省成本而省略该变压器，太阳能 PV 逆变器还必须测量输出电流的任何直流成分。该“直流注入”存在与否及其幅度是一个关键问题，因为如果注入电网的直流电流过多，则可能导致其路径上的所有变压器发生饱和。该值必须限制在很低的微安范围内；因此，AD7401A 必须测量 25 A 左右的交流电流和毫安范围内的低直流电流。

AD7401A iCoupler 隔离式  $\Sigma$ - $\Delta$  调制器 ADC 对分流电阻上的电压进行连续采样，如图 3 所示。其输出为 1 位数据流，该数据流会被隔离并直接馈入 DSP。输出流中 1 的密度代表输入幅度，可利用 DSP 中实现的数字滤波器来重构。

太阳能 PV 逆变器系统中需要隔离，主要原因是交流电网上的高电压。即使是在单相系统中，交流电压也可能高达 380 V。AD7401A 的隔离能力能够处理高达 561 V 的双极性电压，因此非常适合该应用。采用 AD7401A 的主要优势之一是其小型封装允许 ADC 非常靠近实际的交流分流电阻，而 DSP 可能相距较远，甚至可能位于系统的其它电路板上。这可以提高测量和控制系统中的数据精度和可靠性。ADC 输出数据通过单个位流以串行方式发送至 DSP，其中时钟速率为 16 MHz 并由 DSP 提供。

这个系统可以测量高达 25 A 的交流电流和较低微安范围内的直流注入。图 4 展示的是 AD7401A SMS 太阳能模块的失调和线性误差。这表明整个温度范围内分流电阻上的失调电流范围为  $\pm 20$  mA。因此，该模块可以利用单个解决方案测量低至 20 mA 的直流注入以及 25 A (或以上) 的系统电流。电流变压器及其它类型的测量系统可能需要两个器件，一个用于测量较大的交流电流 (25 A 左右)，一个用于测量较小的直流电流 (300 mA 左右)。这是显示 iCoupler 技术如何降低智能电网整合成本的一个例子。

为将分流电阻上的功率损耗 (以及因自热效应而导致的热误差) 降至最小，其电阻值必须尽可能小，典型值为 1 m $\Omega$ 。 $\Sigma$ - $\Delta$  型转换器的极高分辨率使得可将分流电阻损耗保持在与传统磁换能器解决方案同等水平，同时提高精度并降低失调，如图 4 所示。

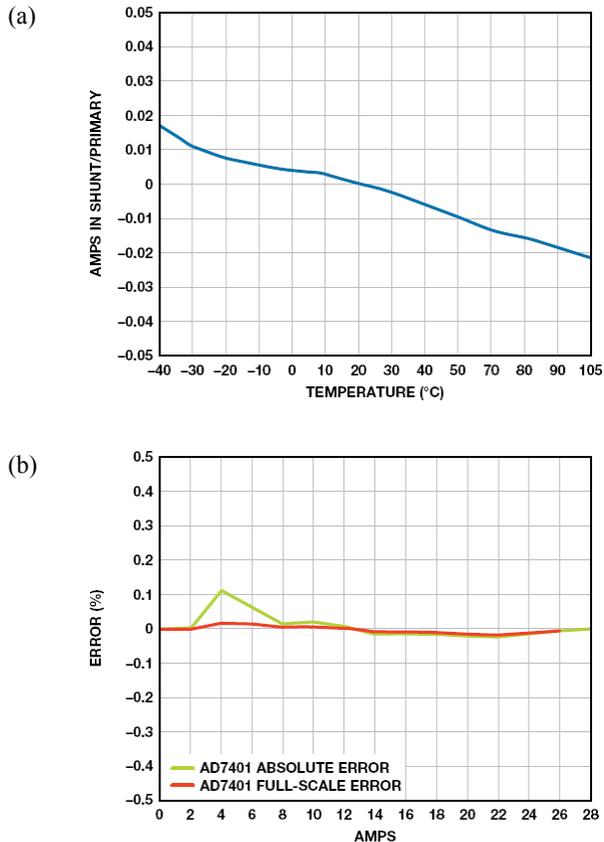


图 4. AD7401A SMS 太阳能模块的失调和线性度

- a. 失调与温度的关系
- b. 误差与输出电流的关系

虽然满量程精度非常好，但器件线性度的真正考验在于其绝对误差，尤其是低电平范围内。绝对误差是指与其值范围内测量相关的误差，而不只是满量程时的误差。有些电流变压器是按 0.1% 满量程范围来规定器件规格。虽然这看起来不错，但可能无法说明完整情况。

根据图 4 所示的数据，利用 AD7401A 测量电流时的绝对误差在整个范围内都相当小，这表明太阳能 PV 逆变器的输出波形具有低非线性度和更少的谐波失真。在与电网集成时，这样有助于降低谐波失真，这也是该新技术如何提高性能的一个例子。

## 隔离式栅极驱动器

对于给定太阳能输入，太阳能 PV 逆变器的效率越高，其每年发电量就越多，因而太阳能电厂的投资回报率也就越高。由于其成本较低，目前趋势是使用无变压器型电气系统来馈入公用电网。由于逆变器的效率水平相当高，因此需要更加注意其测量和控制电子设备的内部隔离，即逆变器 MOSFET 和/或栅极驱动器的电源部分和低压电路之间需要进行隔离。

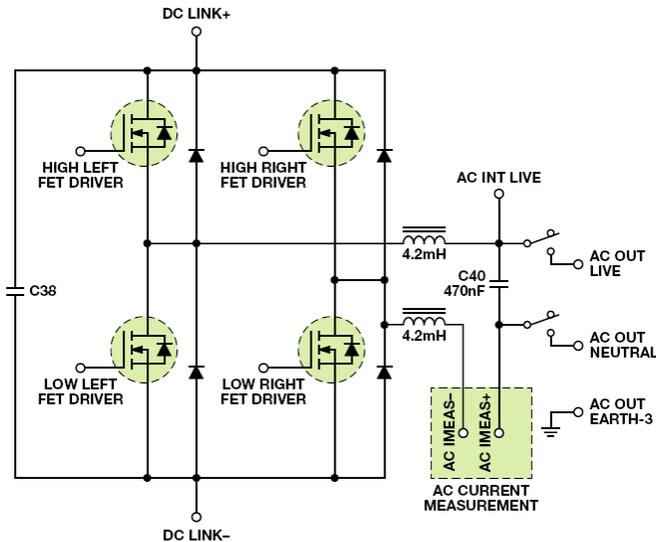


图 5. 太阳能 PV 逆变器的 H 桥电路示例

图 5 所示为典型太阳能 PV 逆变器中 DC/AC 转换器的一种可能的 H 桥配置实现方法。对于当今市场上的新型 SiC 型 JFETS，该电路的直流链路电压范围为 300 V 至 1000 V。H 桥的电流输出波形由电感和电容进行滤波。输出继电器将经过滤波的输出以受控方式连接到电网。在高压环境中，需要使用栅极驱动器来驱动 MOSFET 的栅极和源极——太阳能 PV 逆变器中又一个需要隔离的场合。

举例来说，图 6 所示的 ADuM4223 就是一款具有两个独立隔离通道的 4 A 隔离式、双通道栅极驱动器。其最大传播延迟为 60 ns，共模瞬变抗扰度大于 100 kV/μs（最大值）。该器件符合 DIN VDE0110、DIN VDE 088410 和 UL1577 等多种标准的相关部分要求，如数据手册中所述。

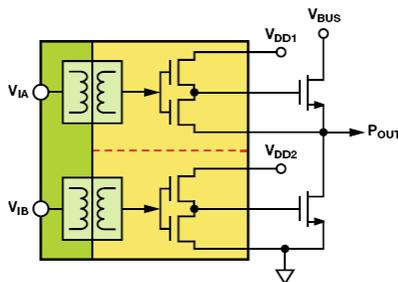


图 6. ADuM4223 栅极驱动器

下面是 ADuM4223 的一些最重要的隔离参数：

- 最大连续工作电压
  - 交流单极性和直流电压： 1131 V
  - 交流双极性电压： 565 V
- 浪涌隔离电压： 6 kV
- 额定电介质隔离电压： 5 k

该器件在单个封装中有两个通道，分别用于高端和低端 MOSFET。通过在单个封装内集成这两个通道，不仅可以节省成本，而且还可以节省 PCB 空间。

使用传统光耦合器时，要么需要一个隔离式栅极上具有电平转换功能的光耦合器，要么可能需要两个光耦合器（有关更多详情，请参考 MS-2318 技术文章）——这是该创新隔离技术如何降低成本的另一个例子。

太阳能 PV 逆变器的另一个重要问题是需要具有高共模瞬态抗扰度，以确保系统中的任何大瞬态 ( $dV/dt$ ) 不能以容性耦合或其他方式跨越隔离栅，因为这可能会使高端和低端 MOSFET 同时（突发）打开。ADuM4223 具有高共模瞬变抗扰度：>100 kV/μs（最大值），这是该创新技术如何提高系统安全性的另一个例子。

## 结论

电流隔离是实施智能电网来整合大量太阳能光伏逆变器时所需测量和控制系统的一项重要要求。ADI 公司的隔离式 ADC 能够利用单个解决方案测量大电流和直流注入电流，有助于构建高效而紧凑的智能电网整合电路。ADI 公司的隔离式栅极驱动器具有良好的共模瞬变抗扰度特性，有助于确保这些新型 PV 逆变器系统的安全性和可靠性。

新技术是促成智能电网整合和绿色能源安全高效生产的主要因素——在稳定电网和提高电网系统上所有工作人员的安全性方面扮演着重要角色。本文所述隔离产品是 ADI 公司针对工业测量和控制的丰富创新产品中当前和未来设计的突出例子。

## 参考文献

<sup>1</sup> 图片来源：First Solar。

“Defining Smart Grids and Smart Opportunities.”

“‘Smart’ PV Inverter Shipments to Grow to 27 GW by 2015—Grid Integration the Key Driving Factor.”

Technical Article MS-2318, *Design Fundamentals of Implementing an Isolated Half-Bridge Gate Driver.*

## 作者简介

Martin Murnane [martin.murnane@analog.com] 是工业和仪器仪表部太阳能 PV 系统工程师，专注于能源/太阳能 PV 应用。加入 ADI 公司之前，他曾从事过能源循环利用系统中电力电子技术 (Schaffner Systems)、基于 Windows 的应用软件/数据库开发 (Dell Computers) 以及采用应变计技术的 HW/FW 产品开发 (BMS) 等领域的工作。Martin 毕业于利默里克大学，获电子工程学士学位。

