

Application Brief

适用于太阳能微型逆变器和跟踪器的无线技术



人们对可再生能源的需求正在不断增长。为了减少碳足迹和降低成本，公用事业、企业和业主正在考虑替代能源。太阳能电池板迅速成为一个备受青睐的选择。本文档讨论了不同的逆变器架构及其对用户的影响。

太阳能逆变器类型

串式逆变器

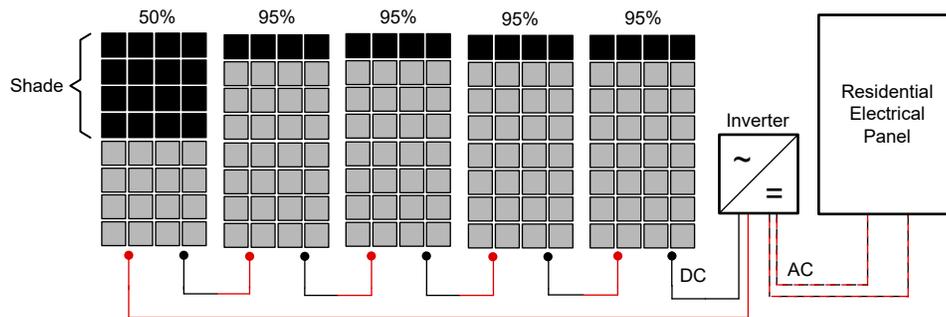


图 1. 串式逆变器

如图 1 所示，串式逆变器由于降低了硬件复杂性和安装人工成本，因此可提供超低的系统成本。然而，串式逆变器不支持用户单独监控每个太阳能电池板的性能。由于这些太阳能电池板都是串联连接的，因此不容易确定需要维护或更换的电池板。单一逆变器拓扑采用一个针对特定功率等级进行优化的逆变器，其功率等级与电池板数量成正比，这限制了扩展或升级电池板的灵活性。该架构的另一个缺点是，一个电池板上出现遮光阴影时，会影响其他电池板的性能。电池板产生的直流电压被送到一个集中式逆变器，该逆变器并未安装在屋顶上。这产生了一个安全问题，即屋顶上存在高直流电压线路（每个电池板约 48V）。逆变器随后会将直流转换为交流电压，为楼宇中的电子设备供电。串式逆变器可快速安装，并具有低成本，但需要人工排除故障，而且安全风险更高、稳健性和可扩展性更低。

具有电源优化器的串式逆变器

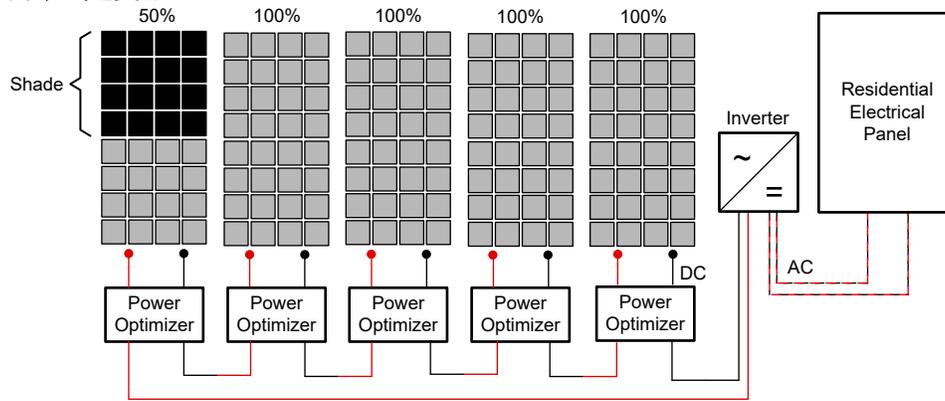


图 2. 具有电源优化器的串式逆变器

为了解决这些缺点，可以在串式逆变器上添加电源优化器。如图 2 所示，借助电源优化器，逆变器可以控制每个电池板的输出，并单独断开电池板与该串的连接。断开电池板会降低直流线路电压并消除安全问题。在发生遮光和其他导致某电池板发电功率降低的干扰时，电池板输出控制可提供稳健性。借助电源优化器，其他电池板仍可继续产生全功率。该架构还允许用户更好地监控每个电池板的性能，但仍然受到单一逆变器拓扑可扩展性限制的影响。与只使用串式逆变器相比，电源优化器可提高系统效率、稳健性、安全性和遥测性能。

微型逆变器

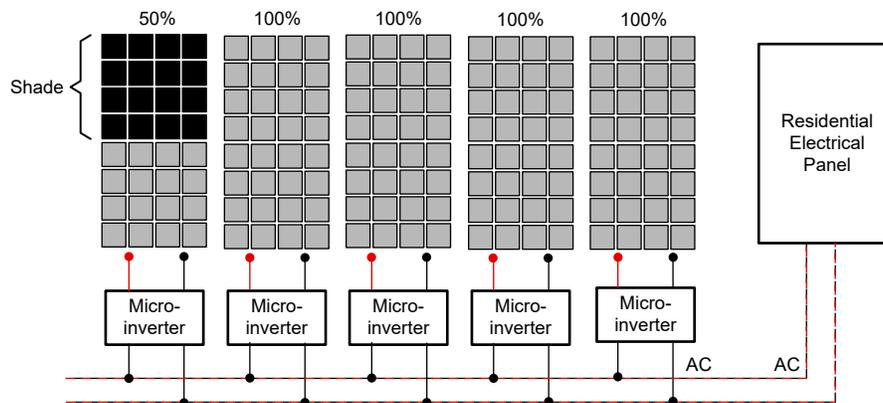


图 3. 太阳能微型逆变器

太阳能微型逆变器旨在为用户提供高效率和便利的维护。每个电池板都有一个微型逆变器，可对每个电池板进行全面的遥测。用户可以监测许多不同的条件，包括温度、电压和电流。任何电池板有缺陷，都可直接被识别出来，无需人工排除故障即可进行有针对性的维修或更换。此外，当一个或多个电池板产生的功率较少时，系统性能不受影响，从而大大增加了系统产生的功率。微型逆变器解决了可扩展性问题，支持添加或升级电池板。如果逆变器安装在靠近电池板的位置，则不存在与高压直流线路相关的安全问题。相对于单一逆变器拓扑，微型逆变器优化了效率、稳健性、可扩展性和遥测性能。

为什么无线连接技术适合太阳能电池板？

图 3 展示了电力如何从太阳能电池板流向断路器，以及不同架构之间的权衡。下一节将讨论用户如何监控太阳能电池板系统和系统要求。

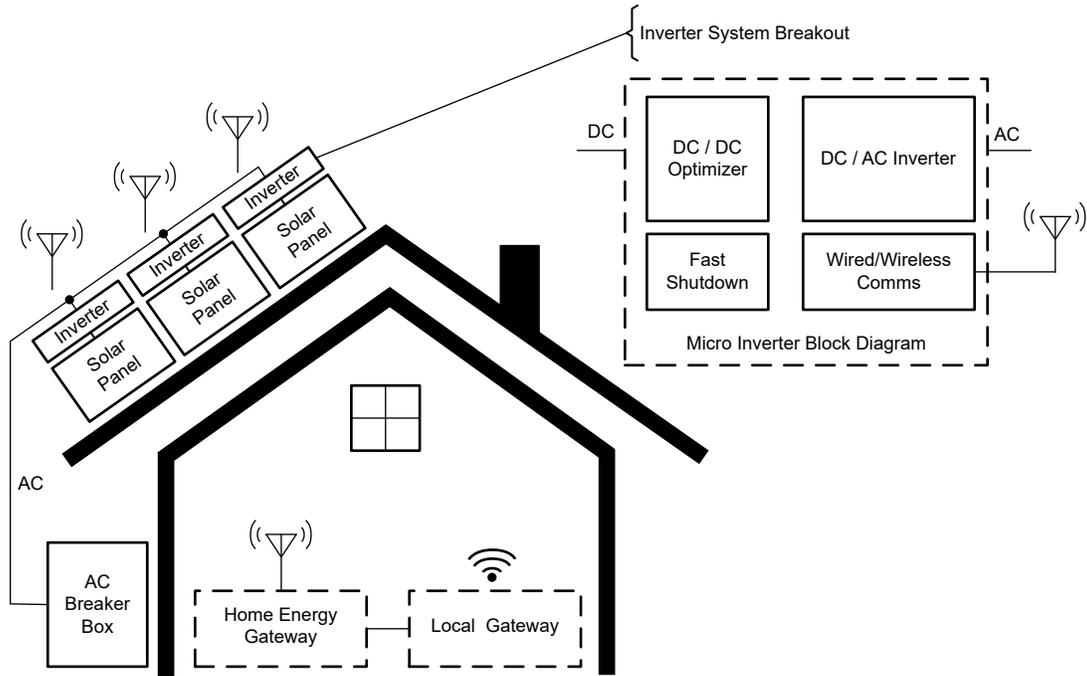


图 4. 无线技术与太阳能电池板

为了实现远程监控，需要将每个电池板收集的信息发送到云端，以使用户通过智能手机或其他互联设备访问该信息。首先，来自电池板的数据被发送至家庭能源网关。然后，该网关通过 Wi-Fi® 将数据传输到连接到云端的本地网关。然后，用户可以从任何位置查看相关数据。

有多种技术可实现电池板到家用能源网关之间的通信。下一节将讨论太阳能电池板要求以及每种技术之间的权衡。

太阳能电池板要求

表 1 按优先级列出了太阳能电池板要求。

表 1. 按优先级列出的太阳能电池板要求

要求	PLC ⁽¹⁾	TI WSMS ⁽²⁾ -Star	TI WSMS ⁽²⁾ -Mesh	Zigbee® 2.4GHz	Wi-Fi®
快速关断	是	是	是	是	是
数据速率	低成本 PLC : < 1kbps OFDM ⁽³⁾ PLC : 31kbps	5kbps 至 200kbps	50kbps 至 300kbps	250kbps	> 1Mbps
干扰	低成本 PLC : 受影响较大 OFDM PLC : 稳健	通过跳频避免干扰	通过跳频和网状路由避免干扰	仅通过网状路由避免干扰	无网状路由且无跳频
范围 链路预算	低成本 PLC : 短距离 OFDM PLC : 1000m	1000m 125dB	1000m 125dB	50m 105dB	50m 105dB
安全	是 (AES ⁽⁴⁾ MAC ⁽⁵⁾)	是 (AES MAC + 预共享网络密钥)	是 (AES MAC + 证书交换 + 预共享网络密钥)	是 (AES MAC + 预共享密钥)	是 (AES MAC + 预共享密钥)
设置和维护	共享面板的问题	无问题且调试过程简单	无问题且调试过程简单	无问题且调试过程简单	无问题且调试过程简单
组网时间	< 5 分钟	< 5 分钟	100 个节点 5 分钟	< 5 分钟	< 5 分钟
生产测试支持	取决于供应商	集成射频 ⁽⁶⁾ 诊断和传播测试模式	集成射频诊断和传播测试模式	不可用, 可以实施	不可用, 可以实施
家庭能源网关	必需	必需	必需	必需	可选 (阳台安装)
额外的中继器	不需要	不需要	不需要	可选	可选
实际限制	20 (低成本 PLC) > 20 (OFDM PLC)	< 50	100+	< 50	< 10
无线协议	非基于 IP	非基于 IP	IPV6	非基于 IP	IPV4 和 IPV6

- (1) 电力线通信 (PLC)
- (2) 德州仪器 (TI) 无线太阳能管理系统 (WSMS)
- (3) 正交 (OFDM)
- (4) 高级加密标准 (AES)
- (5) 消息身份验证代码 (MAC)
- (6) 射频 (RF)

快速关断

快速关断是一项关键的安全功能, 旨在保护救援人员和居用者。美国的安全标准 (即美国国家电气规范 (NEC)) 在第 690.12 条中规定了以下参数: “在开始快速关断后的 10 秒内, 受控导体的电压不得超过 30V, 功率不得超过 240 伏安。”

表 1 表明所有现有技术都满足这一关键的安全要求。无线技术通过向所有微型逆变器发送带有关断命令的广播包来实现这一点。

数据速率

与快速关断不同, 数据速率要求确实会因选择的 PLC 选项而异。例如, 对于一座拥有 60 块电池板的中型房屋, 来自每个电池板的信息通常包括收集电压 (V)、电流 (C)、温度 (T)、电池板识别 (ID) 和状态 (S) 数据。据太阳能微型逆变器制造商称, 数据需要每 15 秒传输一次。根据方程式 1 和方程式 2 中的计算, 此示例的数据速率要求为每秒 736 位。

计算

$$60 \text{ panels} \times (3V + 2C + 4T + 2ID + S) \times \left(\frac{16 \text{ bits}}{\text{field}} \right) = 60 \times 184 \text{ bits} = 11,040 \text{ bits} \quad (1)$$

$$\frac{11,040 \text{ bits}}{15 \text{ seconds}} = 736 \text{ bps} \quad (2)$$

为了满足这一要求, 太阳能电池板制造商考虑了不同类型的连接选项。过去, 有两种类型的有线电力线通信 (PLC) 选项: 正交 (OFDM) 和移频键控 (FSK)。OFDM PLC 是基于标准的, 具有足够高的数据速率 (> 1Mbps) 来支持太阳能电池板和家庭能源网关之间的通信。FSK PLC 通常是专有的, 常用于对成本敏感的设计。FSK PLC 提供大约 100bps 的数据速率, 这对于许多用例 (包括中型房屋示例) 而言吞吐量不足。

无线技术为设计人员提供了一种经济高效的高数据速率选项。TI 提供 Sub-1GHz、2.4GHz 和 Wi-Fi 无线电，它们具有高数据速率 (> 100Kbps)，可以支持必要的的数据速率通信。此外，无线技术允许在无需技术人员的情况下进行远程现场固件更新。

干扰

不同通信选项之间的另一个权衡是干扰。楼宇中电器内的电机会产生大量噪声。如果来自电池板的数据通过有线通信 (如低成本 PLC) 进行传输，则噪声可能会干扰数据。如果干扰足够高，则可能无法读取来自电池板的数据。要避免有线系统中发生干扰，常见方法包括增加环形铁氧体环形滤波器或为太阳能电池板提供专用插座或电路，但这会增加系统成本。

在无线设计中，跳频和网状路由技术都有助于避免干扰。TI WSMS-Mesh 同时使用这两种技术。TI WSMS-Star 仅使用跳频，而 Zigbee 仅使用网状路由来避免噪声干扰。大多数无线选项都内置了干扰保护技术，而 PLC 干扰缓解可能会带来额外的成本。

范围

对于太阳能电池板制造商而言，范围并不仅仅是一项与电池板和家庭能源网关之间距离相关的简单要求。该规格决定了产品与哪些市场和楼宇兼容。低成本 PLC、Wi-Fi 和 Zigbee 是近距离通信技术，仅限于阳台和单户住宅安装。Sub-1GHz 选项、TI WSMS-Mesh 和 TI WSMS-Star 支持 20 倍传输距离，并针对多户家庭、公寓和商业安装进行了优化。

安全

安全性是太阳能电池板开发的一个重要考虑因素。低成本 PLC 不提供或几乎不提供加密，而是依靠物理屏障来阻止访问。无线选项将电池板连接到互联网，并必须应对系统受到恶意攻击的额外路径。安全系统可以从相对简单的预共享密钥架构到更复杂的系统。这些复杂的系统包括安全密钥交换、密钥管理、安全可靠的固件更新和防篡改传感器等配置。所有安全措施都会增加开发时间和产品成本。因此，每个供应商都需要完成威胁模型评估并为产品选择正确的安全级别。

设置和维护

设置和维护是无线选项具有优势的另一个领域。

例如，考虑一个复式公寓，其中两个家庭共享同一个配电板。一户人家已经安装了太阳能电池板系统，另一户人家想要安装太阳能电池板系统。复式公寓场景带来了在多户住宅楼宇中分离数据的挑战。

如果现有和新的太阳能电池板系统都基于 PLC 并连接到一个配电板，则数据将无法分离，并且两个家庭能源网关无法区分太阳能电池板系统。因此，无法单独监控每户住宅的发电和用电情况。

无线技术通过为每个节点分配一个唯一的标识符，为解决此问题提供了一个巧妙的选项。安装人员会在调试过程中将每个太阳能电池板的唯一标识符分配给特定的家庭能源网关。因此，每个用户只能访问单个太阳能电池板系统的信息。回到复式公寓场景，如果太阳能电池板系统依赖于无线技术，那么将数据路由到正确的家居客户就没有问题。这使得作为邻居的每个业主都可以监控发电情况，并轻松识别需要维护的电池板。

组网时间

夜间，每个电池板都会失去电力并关断。随着太阳每天早上升起，整个太阳能电池板系统会重新启动并重新连接。有线和无线技术都符合 5 分钟的组网要求 (5 分钟是用户启动和运行系统时可接受的任意数字)。

生产测试支持

无线选项设计人员在 Microsoft® Windows® PC 上使用 SmartRF™ Studio 进行原型开发和测试。然而，当设计进入生产流程时，制造商需要一个无需 PC 或调试端口的不同工具套件来进行测试。例如，BLE 和 Wi-Fi 标准需要全自动测试套件来实现内联自动化测试。Sub-1GHz 有一个类似的选项，称为“射频诊断”。该嵌入式工具帮助制造商在 TI Sub-1GHz IC 上创建自动化内联测试系统。特别是对于 TI WSMS-Mesh，我们 7.40 版之后的 SDK 直接在协议栈中实现了太阳能电池板制造商所需的特殊测试功能。

家庭能源网关

为了让用户能够进行远程访问，需要将来自电池板的信息发送到本地网关（请参阅图 4）。如果微型逆变器采用 Wi-Fi，则可以直接连接到现有的本地网关，而无需单独的家庭能源网关。所有其他技术都需要单独的家庭能源网关，因为本地网关通常不支持除 Wi-Fi 之外的技术。

额外的中继器

使用有线或 Sub-1GHz 技术（如 TI WSMS-Star 或 TI WSMS-Mesh）的微型逆变器不需要额外的中继器。与 2.4GHz 相比，Sub-1GHz 的工作频率更低，波长更长，传播距离更远，可以穿透混凝土墙等物理屏障，并且受到的干扰更少。相比之下，2.4GHz 和 Wi-Fi 技术需要中继器才能达到相同的范围。

如何选择合适的 Sub-1Hz 协议？

在利用 Sub-1GHz 技术为太阳能电池板系统带来益处时，有两个可选方案。对于规模较大的安装（50 个以上的微型逆变器），建议使用 TI WSMS-Mesh 选项；对于规模较小的安装（少于 50 个微型逆变器），建议使用 TI WSMS-Star。

为什么将 TI WSMS-Mesh 用于太阳能微型逆变器？

TI WSMS-Mesh 基于开放式标准协议（IEEE 802.15.4 和 Wi-SUN），可推动市场统一。德州仪器 (TI) 是 Wi-SUN Alliance® 的活跃成员，提供可互操作选项、免专利费的软件和基于标准的多层安全。Wi-SUN 协议适用于需要长距离射频传输、高节点数和具有自愈网状网络的强大网络性能的应用，例如互联智能仪表、电动汽车充电、街道照明和太阳能微型逆变器。

TI WSMS-Mesh 协议栈中提供了特定选项，可更好地满足微型逆变器和跟踪器市场的要求：

- **仅加入特定边界路由器** - 制造商可以扫描电池板的二维码，确保电池板加入特定的边界路由器，从而在周围存在其他太阳能电池板网络时简化安装过程。通过允许使用无头设备（无需显示器），这还降低了边界路由器的成本。
- **预配置的 MAC 密钥** - 此功能减小了代码大小，从而允许使用具有较小闪存存储器的微控制器，从而显著提高了电池板加入网络的速度并缩短了安装时间。
- **小型网络的快速加入** - 对于由 1 个边界路由器和多达 100 个电池板组成的网络，此功能可将组网时间缩短到 5 分钟以内。可以使用 SysConfig 实用程序选择此功能。
- **生产测试模式** - 此功能支持生产线测试，并可在生产期间用于在 3 至 10 秒内验证 TI WSMS-Mesh 应用，从而提高生产的信心，确保产品能够在现场正常工作，同时允许多条生产线并行运行。另一个好处是简单。生产测试和部署期间可以使用相同的图像。
- **小型网络的低延迟广播** - 此功能实现了低延迟广播，使网络能够符合快速关断等要求。经过测试，此功能在最多 3 个跳数的网络中表现良好。
- **性能指标监控功能** - 客户可以访问实时监控（加入时间、断开连接次数），使现场支持人员能够从节点检索相关信息。

为什么使用 TI WSMS-Star 协议栈？

对于不需要网状网络的小规模安装，TI 提供了称为 TI WSMS-Star 的星形网络协议栈。该产品提供了低成本选项，具有与 TI WSMS-Mesh 安全性和板载调试类似的功能，但不支持网状配置。TI WSMS-Star 协议栈专为微控制器具有较小闪存存储器的应用而设计。该协议栈开销低，占用空间更小，从而降低了该选项的成本。

这款免专利费的 WSMS-Star 协议栈是一个完整的软件平台，用于开发需要基于星形拓扑的超低功耗、远距离、可靠、稳健和安全无线网络选项的应用。802.15.4 标准是支持 Zigbee、Thread 和 Wi-SUN 等多种协议的底层技术。MAC 层进行了扩展，并添加了更多更高层的功能，例如调试和寻址。

图 5 展示了 TI 用于测试产品的台架装置示例，包括硬件和软件，以确保客户能够放心使用 TI 产品。



图 5. 开发过程中测试的 Sub-1GHz 产品示例

要开始使用 WSMS-Mesh 或 WSMS-Star，请下载 [SimpleLink™ 低功耗软件开发套件 \(SDK\)](#)。

如需了解更多信息，请参阅 TI 的 [太阳能应用](#) 页面并查找无线连接选项。

重要声明和免责声明

TI“按原样”提供技术和可靠性数据（包括数据表）、设计资源（包括参考设计）、应用或其他设计建议、网络工具、安全信息和其他资源，不保证没有瑕疵且不做任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、某特定用途方面的适用性或不侵犯任何第三方知识产权的暗示担保。

这些资源可供使用 TI 产品进行设计的熟练开发人员使用。您将自行承担以下全部责任：(1) 针对您的应用选择合适的 TI 产品，(2) 设计、验证并测试您的应用，(3) 确保您的应用满足相应标准以及任何其他功能安全、信息安全、监管或其他要求。

这些资源如有变更，恕不另行通知。TI 授权您仅可将这些资源用于研发本资源所述的 TI 产品的应用。严禁对这些资源进行其他复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。您应全额赔偿因在这些资源的使用中对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 的销售条款](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款/TI 产品随附的其他适用条款的约束。TI 提供这些资源并不会扩展或以其他方式更改 TI 针对 TI 产品发布的适用的担保或担保免责声明。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

邮寄地址：Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265

Copyright © 2024，德州仪器 (TI) 公司