

Application Note

使用理想二极管控制器 LM746x0-Q1 在太阳能 MLPE 应用中实现旁路功能



摘要

模块级电力电子器件 (MLPE) 是可以集成到太阳能光伏 (PV) 系统中的器件, 用于提高某些条件下 (尤其在有遮光的情况下) 的发电性能, 并实现其他一些系统优势。MLPE 曾经是昂贵的专业产品, 但在过去十年中取得了长足的进步, 并已成为太阳能行业中增长最快的市场细分之一。太阳能电源优化器是一种可优化功率输出并提高效率的 MLPE, 它要求 MLPE 具有高功率转换效率和低自发热。

传统太阳能电源优化器使用 P-N 结二极管或肖特基二极管作为旁路电路。当高电流流过二极管时, 由于二极管的正向压降相对较高, 产生的高功率耗散会导致严重的热问题。这种改进的方法使用压降比二极管更低的 MOSFET, 以克服二极管的高功率损耗缺点。但是, MOSFET 需要额外控制来导通或关断, 并且控制电路有发生控制失效的可能。这增加了电路复杂性, 并降低了模块的可靠性。本应用手册提供了一种全新的旁路电路设计, 使用 TI 的理想二极管控制器 LM746x0-Q1 来解决这些难题。此外, 还详细讨论了一个使用耗尽型 MOSFET 扩展 LM746x0-Q1 的反向电压范围, 以支持具有更宽输出电压的 PV 电池板的绝妙想法。此外, 这种旁路电路设计也可用于快速关断 (RSD), 也被视为一种 MLPE, 以及传统上使用二极管的 PV 接线盒。

内容

1 简介.....	2
1.1 什么是 MLPE.....	2
1.2 为何、何时、何地需要 MLPE.....	2
1.3 什么是太阳能电源优化器.....	5
1.4 太阳能电源优化器工作原理.....	5
1.5 太阳能电源优化器的输出旁路功能.....	6
2 旁路电路的传统设计.....	8
2.1 设计 1 - P-N 结二极管或肖特基二极管.....	8
2.2 设计 2 - 使用 MOSFET.....	8
3 旁路电路的新设计.....	9
3.1 旁路电路的要求.....	9
3.2 使用理想二极管控制器 LM746x0-Q1.....	9
3.3 使用理想二极管控制器的挑战.....	10
3.4 LM746x0-Q1 反向电压范围扩展的工作原理.....	10
4 基准测试和结果.....	13
5 总结.....	15
6 参考资料.....	16

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 简介

根据光辐射强度和环境温度，太阳能光伏 (PV) 电池的输出特性会有很大的差异。PV 系统的一项基本要求是使 PV 电池始终提供最大功率，以更高效地使用太阳能。因此，最大功率点跟踪 (MPPT) 电路和算法用于太阳能优化，以便在 PV 电池板环境发生变化时，动态地将 PV 电池板的输出电压和输出电流保持在此预期最大功率点。

广泛使用的传统太阳能优化方法在 PV 电池板串级执行。事实上，每个 PV 电池板串通常由多个串联的 PV 模块（也称为 PV 电池板，每个 PV 模块由多个 PV 电池组成）组成。在 PV 电池板串级执行的太阳能优化只能实现全局串式 MPPT，而非模块级 MPPT。此外，每个 PV 模块也许不能在 MPP 中运行，并且即使 PV 电池板串在 MPP 中工作，仍然有能量损耗。为了解决此问题，模块级电力电子 (MLPE) 技术已推行并商业化多年。

1.1 什么是 MLPE

MLPE 是可以集成到 PV 系统中的器件，用于提高某些条件下（尤其在有遮光的情况下）的发电性能，并实现其他一些系统优势。

MLPE 曾经是昂贵的专业产品，但在过去十年中取得了长足的进步，已成为太阳能行业中增长最快的市场细分之一。

MLPE 包括微型逆变器和太阳能电源优化器。微型逆变器和太阳能优化器执行一些与串式逆变器或中央逆变器一样的功能（诸如 MPPT），但是通常只耦合一个（或者几个）PV 电池板，而不是很多（PV 电池板串），并且提供额外的特性。

例如，MLPE 是每电池板级别的额外 MPPT 层。这与串式逆变器中以多块电池板组串为单位进行连接的 MPPT 相反。

1.2 为何、何时、何地需要 MLPE

图 1-1 至图 1-4 显示了 PV 电池的 I-V 曲线，用于比较遮光和无遮光条件。如果没有遮光，可以将整体电池板串特性曲线视为每个电池曲线的总和，MPP 也是如此。如果电池 1（红色）出现遮光，则允许通过的最大电流会快速下降，并且对于串式电流也是如此，因为各个电池单元串联了相同的电流。整体电池板串特性曲线受遮光电池的影响而下降，其 MPP 也随之降低。

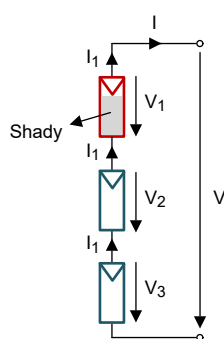


图 1-1. 电路遮光

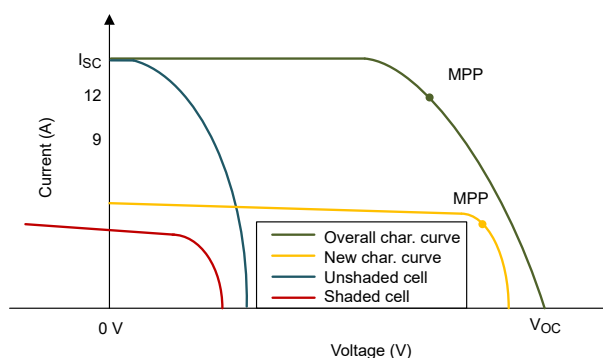


图 1-2. 图形遮光

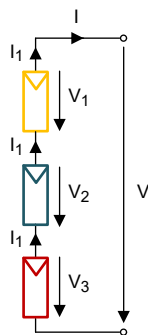


图 1-3. 电路无遮光

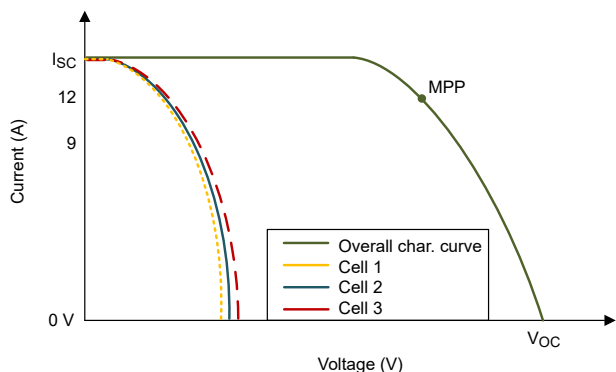


图 1-4. 图形无遮光

图 1-5 显示了一个屋顶 PV 应用场景示例。有一些 PV 电池板处于从没有遮光到几乎完全遮光的不同遮光条件下。这意味着各个电池板对应的 I-V 曲线以及 MPP 也会彼此不同。可以看到，随着遮光逐渐加重，PV 电池板的发电能力也逐渐下降。

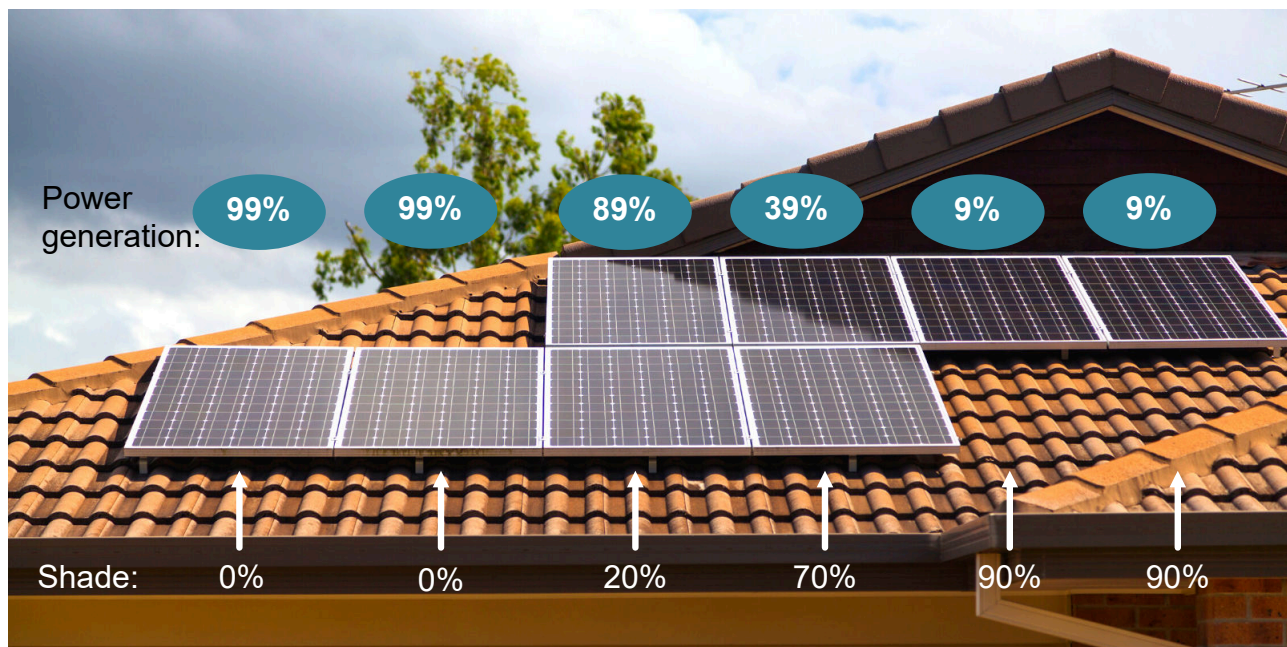


图 1-5. 屋顶 PV 应用场景示例

然而，对于串式逆变器，由于 PV 电池板串联以形成一个具有同样串式电流的电池板串，所有 PV 电池板的发电能力受到性能最差电池板的限制。此外，所有 PV 电池板必须具有与性能最差电池板相同的电流，这就是所说的“木桶效应”。

图 1-6 至 图 1-9 显示了处于或不处于任何遮光条件下的 PV 系统的发电效应演示。

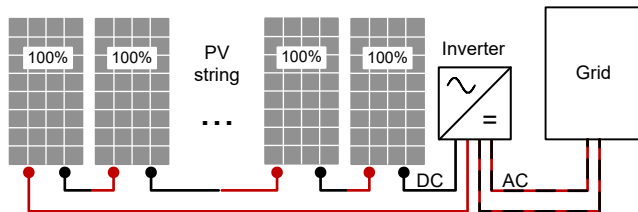


图 1-6. 非遮光条件下的无 MLPE 的 PV 系统

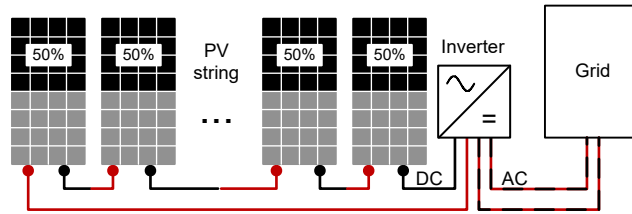


图 1-7. 遮光条件下的无 MLPE 的 PV 系统

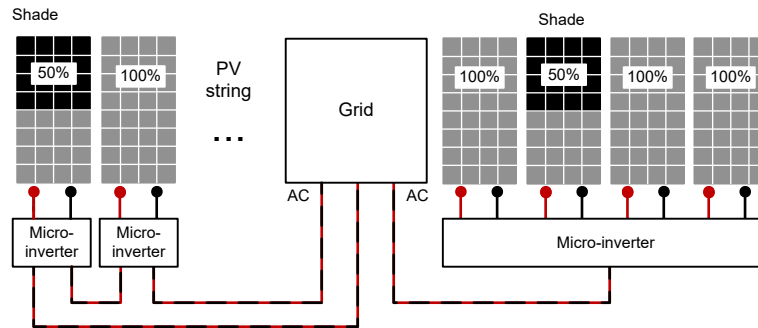


图 1-8. 遮光条件下装有微型逆变器的 PV 系统

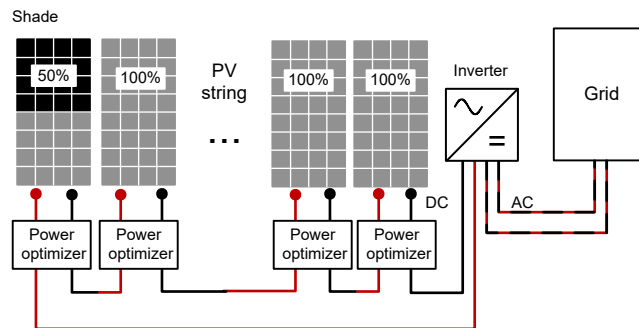


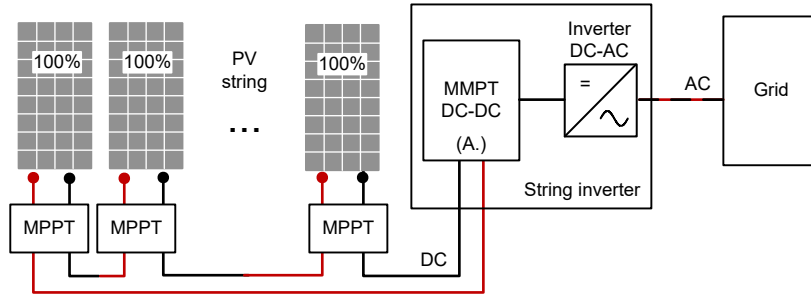
图 1-9. 遮光条件下装有太阳能优化器的 PV 系统

总之，传统串式光伏逆变器的功率效率受很多因素影响，比如有遮光（周围的建筑物、树、云、落叶和鸟粪等），PV 模块失配损耗，以及 PV 电池板方向不匹配损耗（部署在屋顶上不同方向的 PV 电池板）。

需要 MLPE 的原因是，由于串式逆变器只能实现全局 MPPT，因此 MLPE 可以实现模块级 MPPT，以提高能源生产。此外，MLPE 自然可以满足美国国家电气法规 (NEC) 下的模块级快速关断 (RSD) 要求，以及模块级监控和诊断功能。因此，当用户遇到低能效或地方法律要求 RSD 的情况时，用户需要考虑在光伏系统中使用 MLPE 产品。通常，这种设计主要针对住宅和小型商业 PV 系统。另请注意，RSD 可以是独立于微型逆变器和太阳能电源优化器的产品。因此，有时 RSD 也被认为是一种 MLPE 产品，虽然它并不像微型逆变器和太阳能电源优化器那样提升发电性能，仅提供关断功能。

1.3 什么是太阳能电源优化器

图 1-10 显示了装有具有太阳能电源优化器的 PV 系统。



A. 太阳能系统根据实际需求来部署优化器。并非每个 PV 电池板都需要优化器。

图 1-10. 装有太阳能电源优化器的 PV 系统

可以根据实际需求，将可选的太阳能电源优化器添加到太阳能系统中。可选太阳能电源优化器不是一种逆变器。这有助于通过模块级 MPPT 更大限度地利用太阳能系统，使其成为现有串式逆变器（全局 MPPT）的兼容补充。因此，装有优化器的太阳能电源系统可能具有比没有优化器的太阳能系统更高效的直流输出。这可视为微型逆变器和串式逆变器之间的折衷。太阳能电源优化器可以像微型逆变器一样安装在单个太阳能电池板上，但该功能与将直流转换为交流无关。

1.4 太阳能电源优化器工作原理

图 1-11 至 图 1-14 介绍了太阳能电源优化器的工作原理。假设 PV 电池板在没有遮光时（蓝色 I-V 曲线上的 MPP）可以输出最大 420 瓦（35V，12A）的功率。

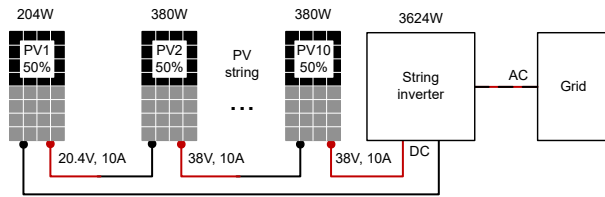


图 1-11. 未装有太阳能电源优化器的 PV 系统

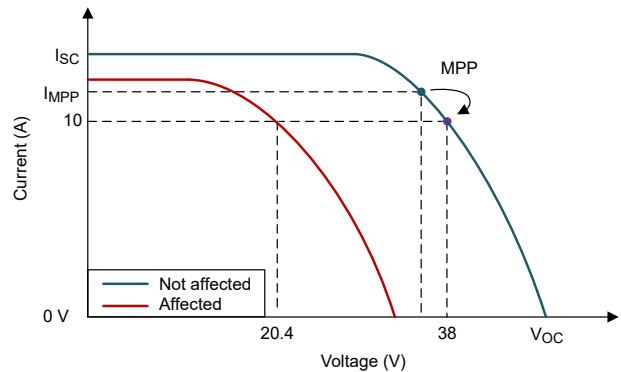


图 1-12. 未装有太阳能电源优化器的 PV 曲线表征

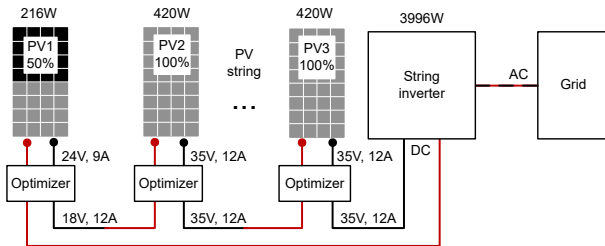


图 1-13. 装有太阳能电源优化器的 PV 系统

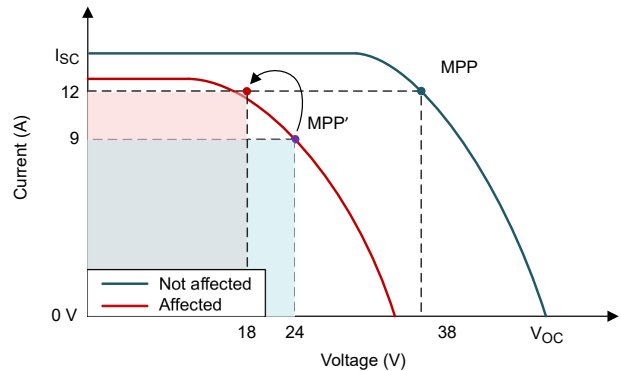


图 1-14. 装有太阳能电源优化器的 PV 曲线表征

功率平衡：两个共享区域相等。

上半部分是未装有优化器的 PV 系统。示例显示，当 PV 1 被叶片部分遮挡时，I-V 曲线为绿色。PV 2 到 PV 10 上没有遮光，I-V 曲线呈浅蓝色。现在，串式逆变器发现，在 10A 电池板串电流的条件下可实现最大输出功率。我们可以看到，尽管 PV 2 到 PV 10 上没有遮光，但 PV 2 到 PV 10 的 MPP 从浅蓝色点变为紫色点。串式逆变器的总功率为 3624 瓦。

下半部分是装有带有优化器的 PV 系统。示例显示，当 PV 1 被叶片部分遮挡时，I-V 曲线为绿色。PV 2 到 PV 10 上没有遮光，I-V 曲线呈浅蓝色。使用太阳能电源优化器，现在串式逆变器发现最大输出功率处于 12A 电池板串电流的条件下，该电流与 PV 2 至 PV 10 的 MPP 电流一致。因此，PV 2 到 PV 10 在 MPP 上运行。对于 PV 1，MPP 为 24V 9A (深蓝色点)。根据电源优化器的简单功率平衡原理 (理想情况下忽略损耗)，输出在这之后更改为 18V 12A (紫色点)。串式逆变器的总功率为 3996 瓦。如图所示，使用电源优化器时，串式逆变器的总功耗增加 10.2%。

简而言之，电源优化器实时跟踪每个电池板的最大功率，并在将输出发送到逆变器之前调节输出电压，逆变器可以处理更多的电力。从而使每个电池板的发电性能得以优化，不论电池板面向太阳的角度和遮光情况如何，亦或是一个或多个电池板损坏，也不受影响。

1.5 太阳能电源优化器的输出旁路功能

图 1-15 显示了优化器并行部署到相应的 PV 电池板。现在，PV 电池板串实际上通过优化器的输出端相互连接。假设电池板或优化器的功率级 (MPPT DC-DC) 受损，该电池板串如何仍然正常工作？图 1-15 显示了优化器的简化方框图。有一个旁路电路，该电路提供了另一条路径，使得电池板串电流能够绕过受损电池板或优化器的功率级。

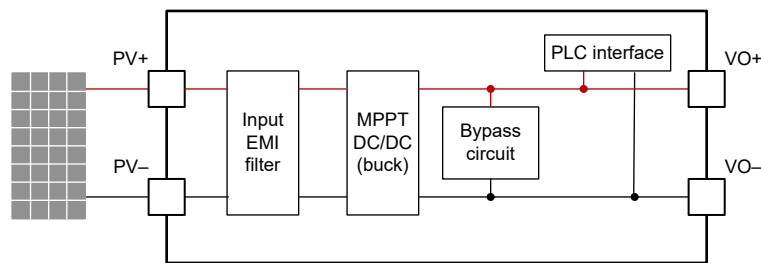


图 1-15. 太阳能电源优化器的简化方框图

图 1-16 显示了旁路功能的工作原理。在这个示例中，第二个 PV 电池板断开，现在串式电流不会通过这个 PV 电池板，串式电流将流经优化器内部的旁路电路。

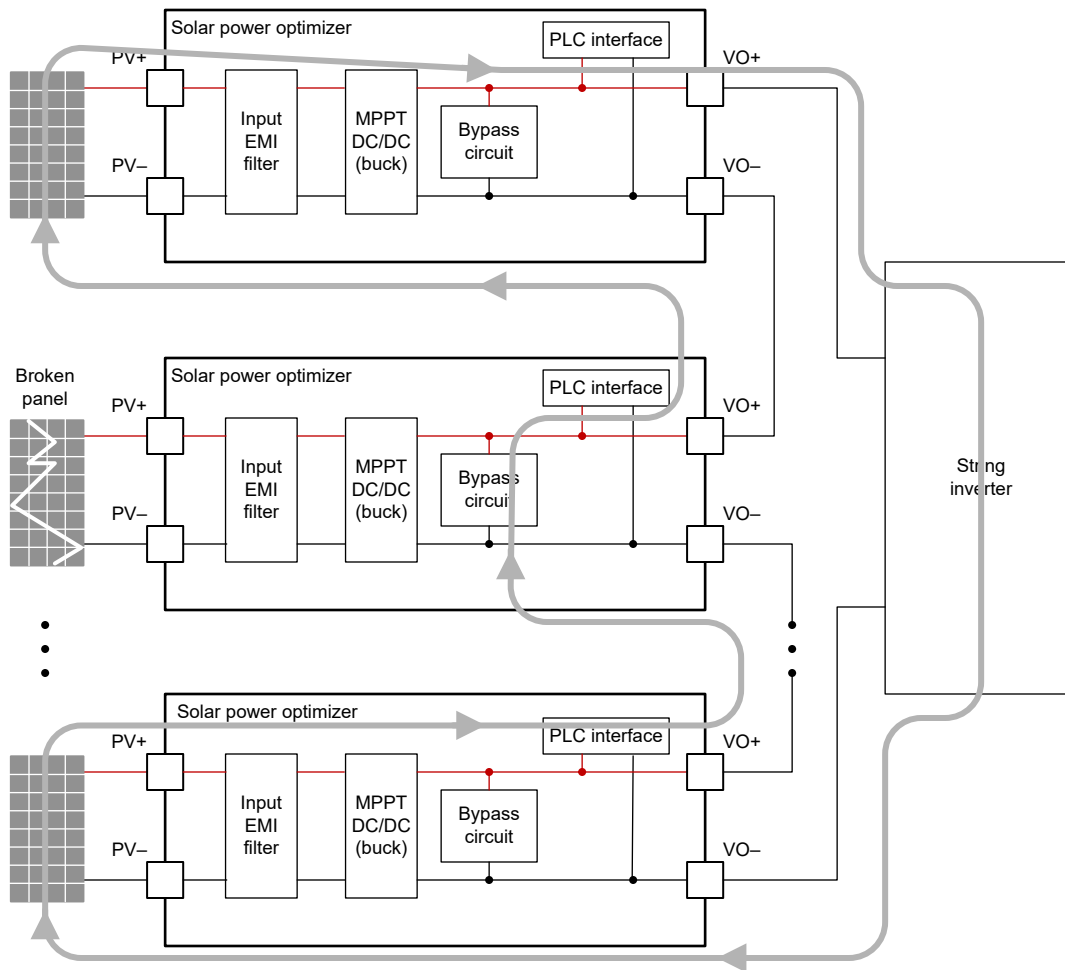


图 1-16. 太阳能电源优化器的输出旁路功能

2 旁路电路的传统设计

旁路电流可高达几十安培（例如 20A），旁路电路通常有两种传统设计。

2.1 设计 1 - P-N 结二极管或肖特基二极管

图 2-1 显示了使用 P-N 结二极管或肖特基二极管实现旁路功能的常见且最简单的方法。这种方法成本低、易于使用，并且可根据所选二极管实现非常高的反向电压。不过，这些缺点仍然存在：

- 高功率损耗 ($0.7V/0.4V \times 20A = 8$ 至 14 瓦损耗)
- 严重的散热问题
- 较低的太阳能发电效率
- 占用大 PCB 尺寸，因为需要高电流二极管

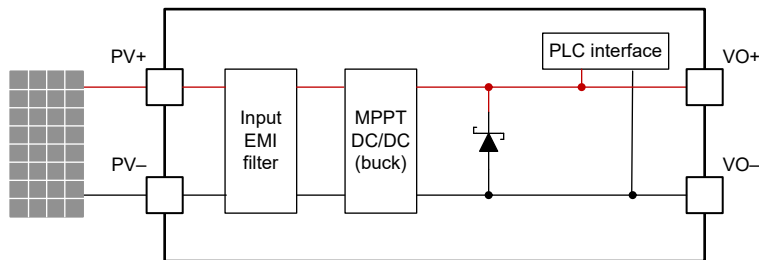


图 2-1. 旁路电路的二极管方法

备注

使用 P-N 结二极管或肖特基二极管的旁路电路。

2.2 设计 2 - 使用 MOSFET

如 图 2-2 所示，为了克服二极管设计中的高功率损耗的缺点，另外可以选择使用压降或功率损耗（由于 R_{dson} 较低）要低得多的 MOSFET。不过，仍然有一些缺点，

- MOSFET 不是独立的设计，开启或关闭需要 MCU 控制。
- MCU 控制需要 PV 电池板供电，如果 PV 电池板严重损坏或完全被遮光覆盖，则 MCU 无法工作，然后 MOSFET 无法正确导通。
- 在 MCU 无法工作或失控的情况下，MOSFET 不会导通，现在旁路路径是寄生二极管。但是，寄生二极管不能承受大电流，而且会累积大量热量，最终存在火灾隐患。

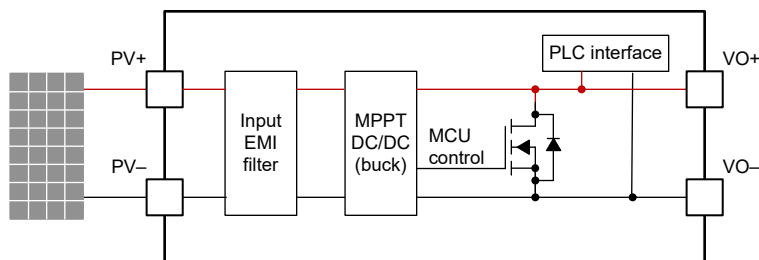


图 2-2. 旁路电路的 MOSFET 设计

3 旁路电路的新设计

如何解决传统旁路电路设计的难题？本次会议讨论使用 TI 低电压理想二极管控制器 **LM746x0-Q1** 的新旁路电路设计。

3.1 旁路电路的要求

为了让旁路电路优于传统设计，旁路电路有三个要求。

- **高输入电压**：最小 100V 额定电压的设计，适用于额定输入电压高达 80V (另加 20V 裕量) 的通用单太阳能电池板。额定电压最低为 150V 的设计，可以覆盖两个串联的太阳能电池板，额定输入电压高达 125V (另加 25V 裕量)。
- **低损耗**：需要使用功率损耗较低的 MOSFET，而不是 P-N 结二极管或肖特基二极管。
- **独立**：旁路电路需要独立于其他电路，这意味着即使其他电路发生故障，不会影响旁路电路。

3.2 使用理想二极管控制器 LM746x0-Q1

新旁路电路设计使用具有浮动栅极驱动架构的理想二极管控制器 (例如 **LM74610-Q1**) 来驱动外部 MOSFET，以模拟理想二极管作为旁路电路，使此电路独立于其他电路。浮动栅极驱动架构可以实现通用输入范围，原因在于栅极驱动不以地 (GND) 为基准。此外，该机制的独特优势在于不以地为基准，因此具有零 IQ。

工作原理如 **图 3-1** 和 **图 3-2** 所示。当 PV 电池板或太阳能设备发生故障时，旁路电路会工作。在周期中，外部 MOSFET 的体二极管传导负载电流，体二极管两端的电压用于通过占空比 D 在内部构建电荷泵，然后通过占空比 $1-D$ 导通 VO 。当太阳能电池板和太阳能设备正常运行时，旁路电路不会导通，反向电压 ($VO+$ 至 $VO-$) 通过理想二极管控制器的阴极到阳极出现。

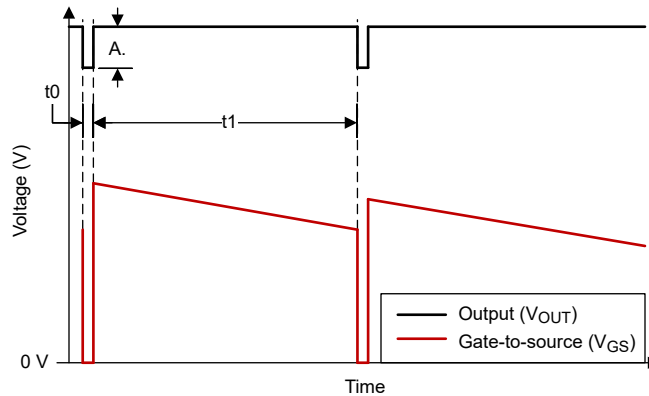


图 3-1. LM746x0-Q1 的输出电压和 VGS 运行示例

LM746x0-Q1

t_0 : FET 关断, 占空比 = D

A : 体二极管压降

t_1 : FET 导通, 占空比 = $1-D$

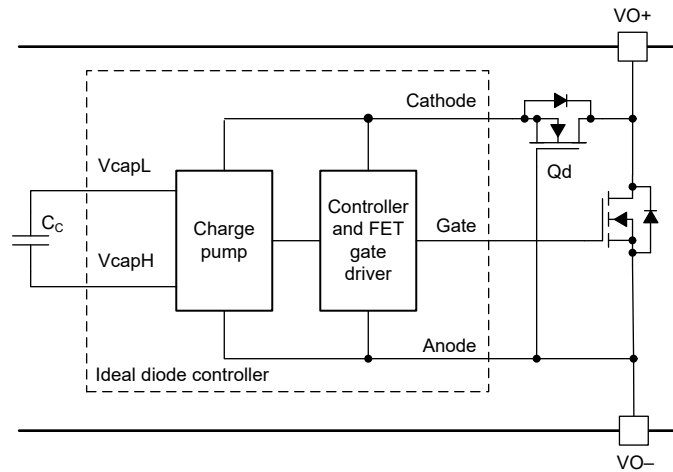


图 3-2. 旁路电路的理想二极管控制器设计

3.3 使用理想二极管控制器的挑战

不过，从理想二极管控制器的阴极到阳极的反向电压（ $VO+$ 至 $VO-$ ）可能非常高，可达到 PV 电池板或电池板串的瞬态电压。尤其在某些情况下，在串联使用多个具有较大输入电压范围的 PV 电池板时，为旁路电路设计最大输入电压范围可能极具挑战性。

LM74610-Q1 的最大反向电压限制为 $45V_{max}$ （瞬态）。因此，目前可用的理想二极管控制器器件不适用于额定输入电压高达 $80V$ 或 $125V$ 的太阳能电池板。

为了在任何低压理想二极管控制器范围内维持这种高电压，使用耗尽型 MOSFET Q_d （如图 3-2 所示）来增大理想二极管控制器的反向电压范围。 Q_d 的漏极连接到输出 $VO+$ ，源极连接到阴极，栅极连接到理想二极管控制器的阳极。现在，阴极到阳极的反向电压由耗尽型 MOS 决定，而不受 LM74610-Q1 限制。

3.4 LM746x0-Q1 反向电压范围扩展的工作原理

首先，了解什么是耗尽型 MOSFET。与通常通过向栅极施加一些电压（即，对于 N 沟道 MOSFET， $V_{GS} > V_{GS(th)}$ ）而导通的常用增强型 MOSFET 不同，耗尽模式 MOSFET 通常在不施加任何栅极电压的情况下导通，这意味着 MOSFET 可以在 $V_{GS} > 0$ ， $V_{GS} = 0$ 或 $V_{GS} < 0$ 时导通。这是因为耗尽型 MOSFET 基于增强型 MOSFET，正离子会注入 FET 的绝缘层。因此，自然会存在一条导电通道。

对于耗尽的 N 沟道 MOSFET，仅当 V_{GS} （负值）进一步负升以达到 $V_{GS(OFF)}$ 的夹断模式，或称为 $V_{GS(th)}$ 时，原始正离子场才能偏移。然后关闭导电通道。

图 3-3 展示了向现有理想二极管控制器电路添加耗尽型 MOSFET Q_d 时的运行模式。

当 $V_{CATHODE} \leq V_{ANODE}$ 时， $V_{IN} \geq V_{OUT}$ 的正常操作。此时，太阳能电源优化器的旁路电路会工作。MOSFET Q_1 和 Q_d 导通， $V_{CATHODE} \cong V_{ANODE}$ 。

在 $V_{IN} < V_{OUT}$ 的反极性或非反向电流保护操作期间， $V_{CATHODE} > V_{ANODE}$ 。此时，太阳能电源优化器的旁路电路不运行。MOSFET Q_1 关闭，MOSFET Q_d 作为源极跟随器处于调节模式，维持 $V_{CATHODE}$ 高于 V_{ANODE} ，且 $V_{CATHODE} = V_{IN(VANODE)} + Abs(V_{GS(th)})$ 。因此， $V_{CATHODE}$ 至 V_{ANODE} 之间的电压处于 Q_d 的绝对最大额定值 $V_{GS(th)}$ 范围内（小于 $5V$ ，典型值），远小于 LM74610-Q1 的 $45V_{MAX}$ （瞬态）最大反向电压。现在，高反向电压（ $V_{OUT} - V_{IN}$ ）由 Q_d 的漏源电压（ V_{DS} ）维持。

如何选择合适的耗尽型 MOSFET 主要取决于两个因素。

- 选择 $Q_d \geq V_{IN(max)}$ （最大峰值输入电压）的 V_{DS} 额定值。
- $R_{DS(on)}$ 可以在数百欧姆范围选择（LM746x0-Q1 采用浮动栅极驱动架构，具有很大的阴极引脚对地阻抗，并且控制器的 $I_{CATHODE}$ 在微安范围内）。

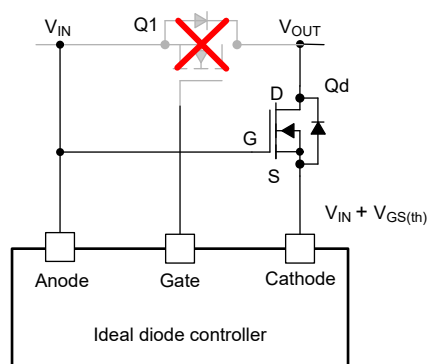


图 3-4. 添加耗尽型 MOSFET 的运行模式 ($V_{\text{CATHODE}} > V_{\text{ANODE}}$)

通过该设计,太阳能电源优化器系统还具有以下系统优势。

- 解决极低功率损耗导致的热点问题。
- 使太阳能设备更安全，降低火灾风险。
- 提高太阳能发电效率。

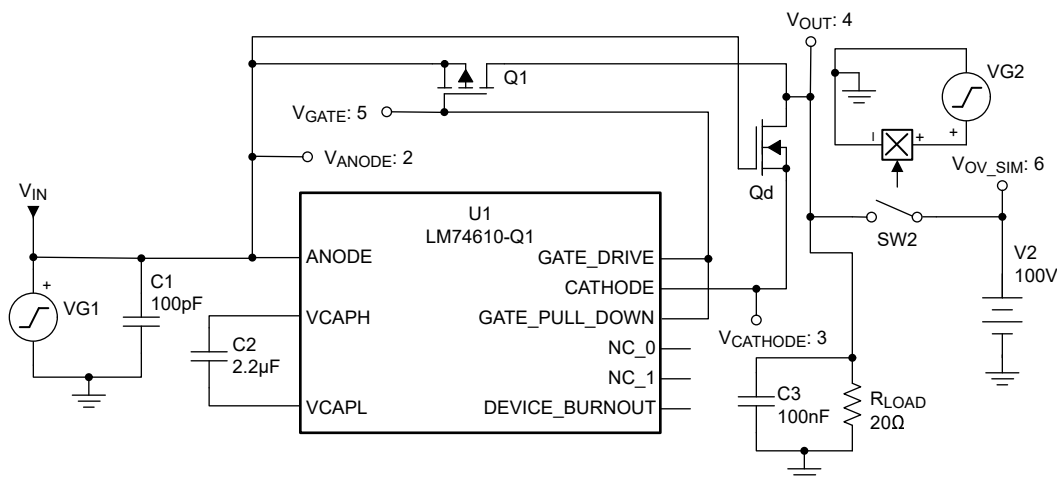


图 3-5. 具有 LM74610-Q1 和耗尽型 MOSFET 的旁路电路的仿真电路

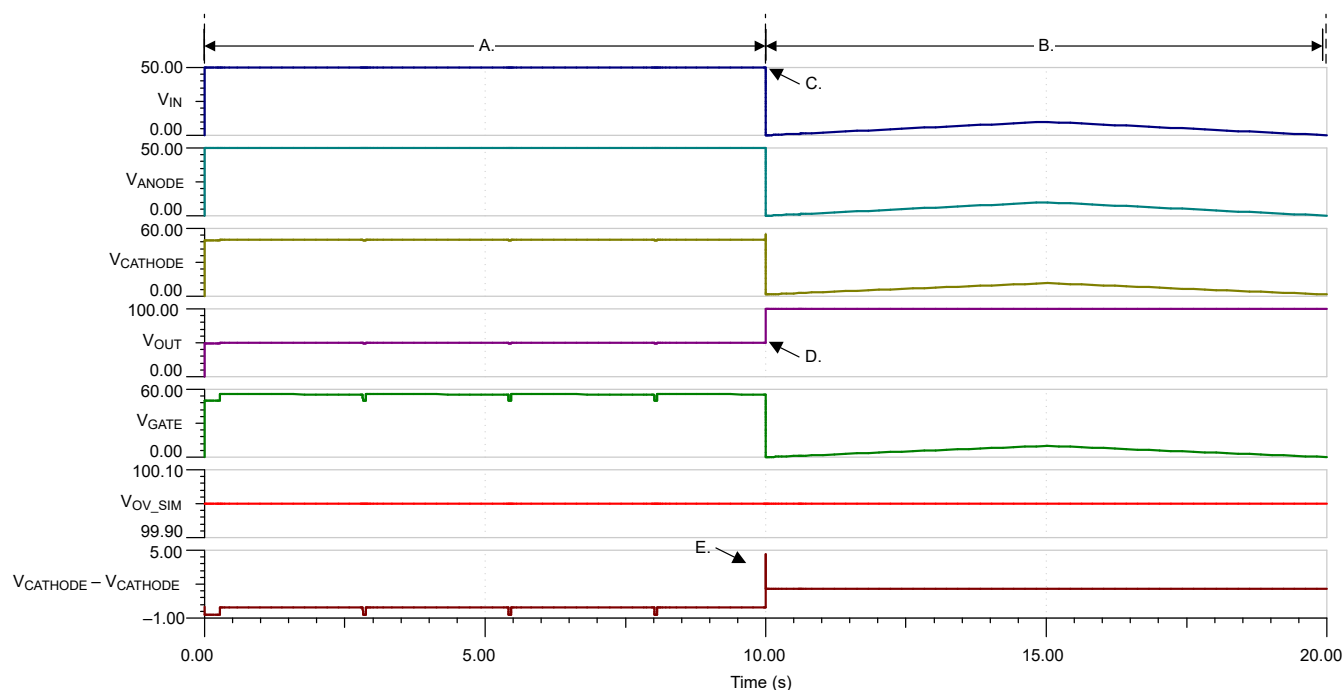


图 3-6. 具有 LM74610-Q1 和耗尽型 MOSFET 的旁路电路的仿真结果

备注

- $V_{IN} \geq V_{OUT}$ 时，旁路电路会工作
- $V_{IN} < V_{OUT}$ 时，旁路电路不工作
- 模拟输入电压变化
- 模拟由 V_{OV_SIM} 源极产生的 V_{OUT} 上出现的高瞬态电压
- QD 作为源极跟随器运行，保持 $V_{CATHODE} - V_{ANODE} = |V_{GS(th)}| \approx 1.6V$

4 基准测试和结果

图 4-1 显示了具有耗尽型 MOSFET 的 LM74610-Q1 旁路功能应用原理图，图 4-2 显示了演示板顶视图，其中包含测试修改和设置。

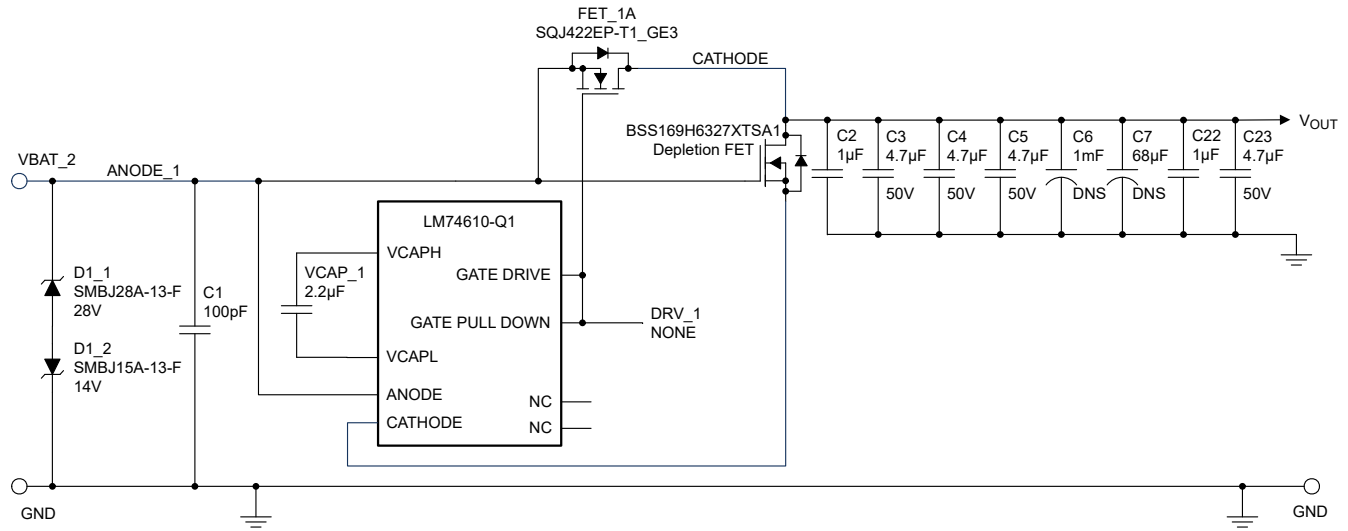


图 4-1. 具有耗尽型 MOSFET 的 LM74610-Q1 旁路功能应用原理图

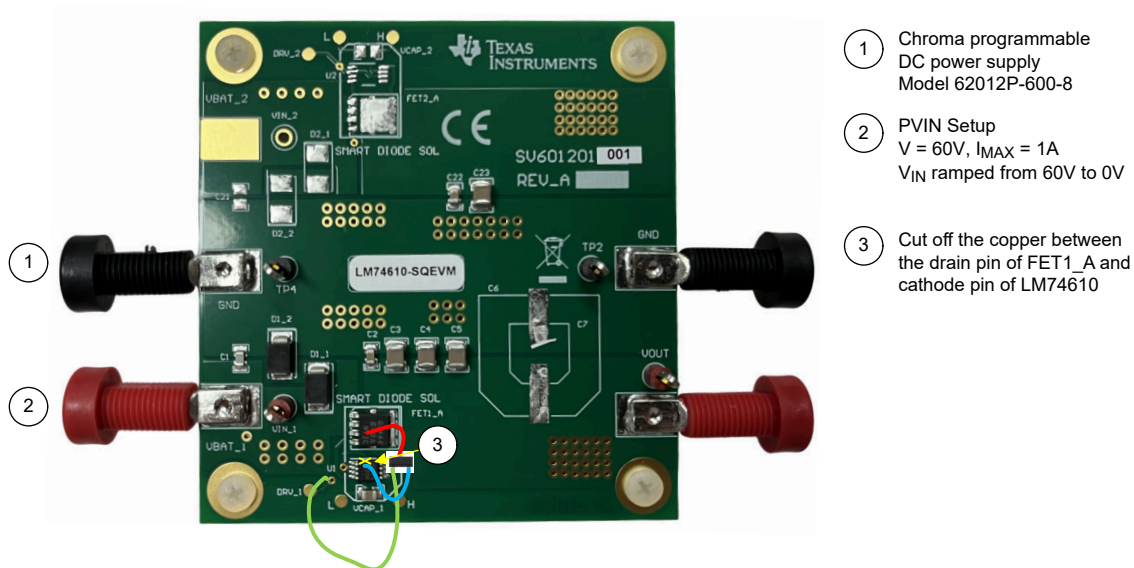


图 4-2. 具有耗尽型 MOSFET 的 LM74610-Q1 旁路功能演示板

图 4-3 展示了采用 40V LM74610-Q1 控制器的 60V 旁路开关设计的测试结果。使用合适规格 MOSFET (Q1 和 QD)，输入电压范围可以扩展至 FET 的 VDS 额定值。这样可以使用同一低压控制器实现高压设计。此外，扩展输入电压范围在企业、通信、电动工具和高压电池管理应用中也非常有用。

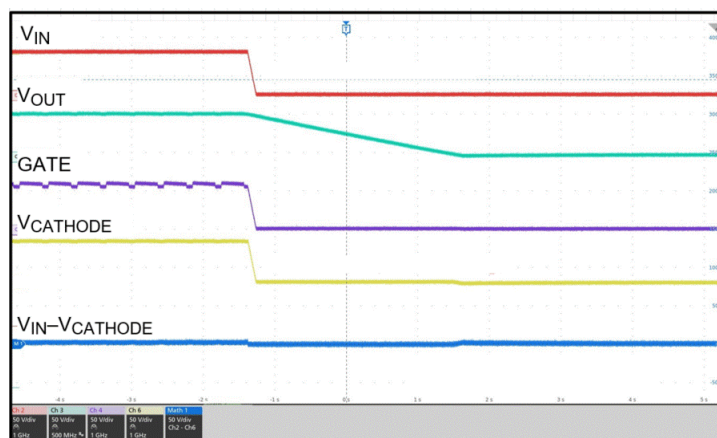


图 4-3. 使用 LM74610 和耗尽型 MOSFET 的 60V 旁路电路的测试结果

60V 旁路

具有耗尽型 MOSFET 的 LM74610-Q1

V_{IN} 从 60V 斜升至 0V

器件阴极引脚后跟 ($V_{IN} + V_{T_QD}$)

有效 $V_{ANODE} - V_{CATHODE}$ 钳位至 FET QD 的 V_T

5 总结

如果以串联方式连接的 PV 电池板或太阳能设备出现损坏或故障，必须采用适当的设计来避免出现热点和/或电压供应中断。这一责任通常由太阳能电源优化器或快速关断装置承担。尽管使用标准整流二极管或肖特基二极管是绕过损坏电池板的最简单设计，但鉴于热效率低下，二极管并非优选方案。本应用手册讨论了一个浮动栅极理想二极管控制器和一个 N 沟道 MOSFET，与旁路开关设计相比，可降低独立损耗；另外还讨论了一个具有耗尽型 MOSFET 的额外系统权变措施，该 MOSFET 可提供完全可扩展的设计来解决 PV 电池板的宽输入电压范围（从几伏到 150V），从而使这种即插即用设计适用于旁路开关应用。

6 参考资料

- 德州仪器 (TI) [LM74610-Q1 零 IQ 反极性保护智能二极管控制器](#)数据表。
- 索诺玛县许可证索诺玛 [宅屋顶系统太阳能许可证](#)
- EL-Pro-Cus [什么是耗尽模式 MOSFET：工作原理及其应用](#)

重要通知和免责声明

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 产品的相关应用。严禁以其他方式对这些资源进行复制或展示。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
版权所有 © 2025，德州仪器 (TI) 公司