

Application Note

针对太阳能串式逆变器和储能系统的电源拓扑注意事项



Vedatroyee Ghosh, Harald Parzhuber

摘要

随着光伏太阳能装置在过去十年中的快速普及，人们越来越需要具有高效率、更高功率密度和更高电源处理能力的光伏逆变器。如今，这些系统中已集成了用于电池存储的功率转换系统 (PCS)，这是目前极为先进的技术。

该应用手册概述了设计光伏逆变器和储能系统 (ESS) 常用功率级时最相关的电源拓扑注意事项。

内容

1 引言.....	2
2 太阳能串式逆变器.....	2
2.1 直流/直流 MPPT 的功率级.....	2
2.2 电池端口直流/直流的功率级.....	3
2.3 用于单相直流/交流的功率级.....	5
2.4 三相直流/交流功率级.....	7
3 未来技术和趋势.....	8
4 总结.....	9
5 参考资料.....	9
6 修订历史记录.....	10

插图清单

图 2-1. 太阳能串式逆变器方框图.....	2
图 2-2. 直流/直流 MPPT 级方框图.....	3
图 2-3. 电池直流/直流级方框图.....	4
图 2-4. 单相直流/交流级方框图.....	5
图 2-5. 三相直流/交流拓扑的原理图表示.....	7

表格清单

表 2-1. 单相直流/交流拓扑的优势和挑战.....	5
表 2-2. 三相直流/交流拓扑的优势和挑战.....	7

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 引言

太阳能串式逆变器用于将一串太阳能板的直流电源输出转换为交流电源。串式逆变器通常用于住宅和较小的商业安装。碳化硅 (SiC) 和氮化镓 (GaN) 等宽带隙半导体使转换器能够以更高的开关频率运行，从而可以使用更小的磁性元件，进而提高这些系统的功率密度。为了经常提高功率级别，此类系统采用模块化方式构建，从十分之一千瓦到百分之一千瓦不等。

为了应对光伏 (PV) 系统在太阳光线减弱时停止发电的事实，这些系统通常会在电池储能系统 (BESS) 中包含一个电源转换端口。白天产生的多余能量将存储到电池中，可在 PV 串的能量不足时使用。

2 太阳能串式逆变器

图 2-1 展示了太阳能串式逆变器的典型架构。

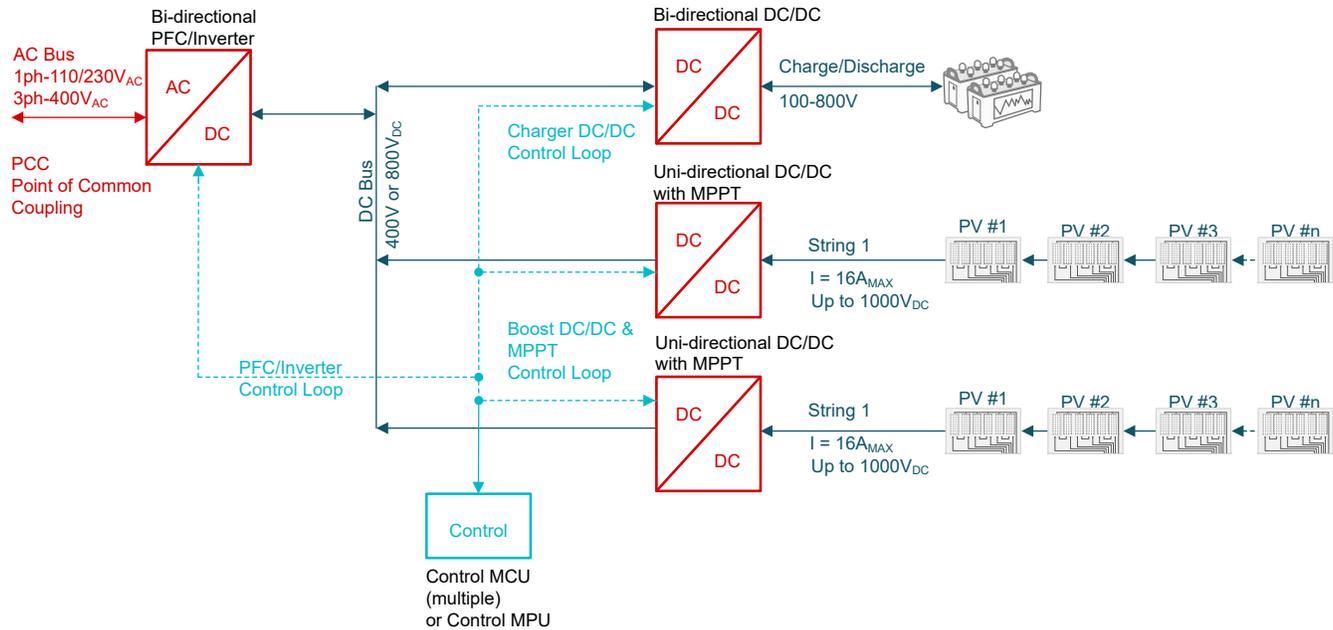


图 2-1. 太阳能串式逆变器方框图

如图 2-1 所示，串式逆变器中有三个主要电源块。第一级是单向直流/直流功率级，用于将可变串输出转换为适合后续级的稳定高压直流链路。第二级是双向直流/直流功率级，第三级是双向直流/交流功率级。对于单相系统，直流总线电压通常为 400V_{DC}。对于三相系统，直流总线电压约为 800V_{DC}，甚至高达 1500V_{DC}。第一个直流/直流级还能够为一个完整串执行最大功率点跟踪 (MPPT)。它只需通过更改整个串上的电压和电流来搜索最大功率。然后，该直流总线电压通过直流/交流功率级转换为电网电压电平的交流电压。在当今的系统中，交流/直流被构建为双向 PFC/逆变器，可以运行连接到电池储能系统的直流/直流功率级，并允许对 ESS 进行双向充放电。

更详细的太阳能串式逆变器方框图可在 TI 的 [串式逆变器](#) 应用页面上找到。

2.1 直流/直流 MPPT 的功率级

MPPT 直流/直流功率级执行以下功能：将电池板的 MPPT 电压的倍数（取决于串中的电池板数量）转换为适合逆变器或用于电池输入的直流/直流级的稳定电压电平。输入电压由 MPPT 调节，MPPT 通过软件或电源优化器等外部附加装置执行。PV 电池板充当电流源，其短路电流与可用的辐照大致成正比。PV 电池板上的开路电压取决于环境温度条件。对于住宅用例，400W PV 电池板的输出 MPPT 电压通常为 33V，500W 或 600W 额定值电池板为 40V 或更高。

串式逆变器是成本敏感型应用，因此在将输入串电压转换为稳定的直流链路电压时，非隔离式升压转换器是优选拓扑。图 2-2 展示了 TIDA-010938 中存在的此类示例。该输入电压为 33V 或 40V 的倍数，具体取决于所用电池板的类型和功率。直流链路电压取决于单相应用还是三相应用。对于单相应用，总线的额定电压最高可达 500V

至 550V；而对于三相应用，通常最高可达 1200V。由于较低的直流链路电压支持较高的电流，降压或降压/升压级的效率将降低。为了增加这个功率级的功率等级，可添加多个逆变器串作为独立输入。每个输入可独立且对称地设计。通常，此处不采用 CLLC 级或同步升压，因为这种方法会降低成本效益。

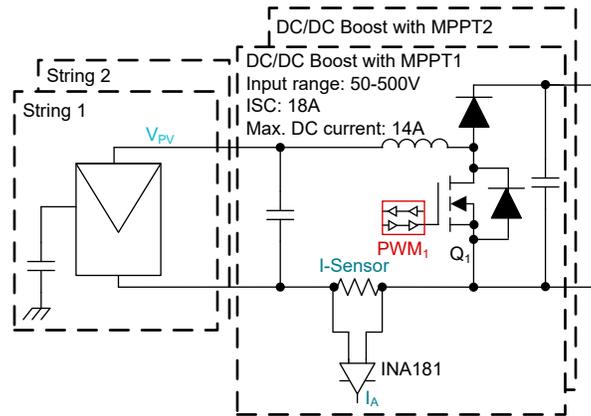


图 2-2. 直流/直流 MPPT 级方框图

升压转换器需要一个受控开关（MOSFET、IGBT 等）与一个不受控制的开关（二极管）和一个电感器结合才能实现。这种拓扑具有多种优势，例如元件数量较少、效率高、实现方式简单等。在较高的功率等级下，二极管被另一个受控开关（用作同步开关）取代，以降低传导损耗。因此，它成为同步升压转换器。

在更高的功率级别（在串式逆变器中会遇到），我们最终会并联功率器件以减少传导损耗。同步升压转换器的多个级与用于驱动每个转换器的相位交错 PWM 配合使用。如果交错级数为“n”，各个 PWM 之间的相位差为 $360^\circ/n$ 这样可以显著降低纹波电流，并有助于减小整体尺寸。

请务必记住，需要根据应用类型适当地确定开关晶体管的额定值。这意味着单相应用的漏源电压额定值为 650V，三相应用的漏源电压额定值可高达 1200V（直流总线电压更高的系统需要更高的漏源电压额定值）。通过将直流链路电压升高到 1000V 以上将减少系统中的功率损耗，并允许串联更多电池板。然而，所选器件需要具有适当的额定值。

2.2 电池端口直流/直流的功率级

对于非隔离式应用，双向直流/直流转换器可用于实现电池储能系统（BESS）。双向性对于直流/直流转换器来说非常重要，它可以像电池充电器一样（降压模式）为电池充电，也可以像电池放电一样（升压模式）为直流链路提供更高、更稳定的输出电压。然后，在低辐照度或夜间条件下，可通过直流/交流转换器向电网输送交流电。

太阳能每天、每季和每年都有波动，因此不是最可靠的来源。在并网系统中，最大电力在中午时分输送到电网，而早晚的电力更小。在全球许多地区，电力的价格取决于需求，当需求高时（如晚上和早晨），电力的价格（每瓦成本）较高，而当需求低时（中午、深夜），电力的价格较低。因此，安装太阳能装置的消费者中午使用的是自己产生的电力，价格较低，而晚上使用的是电网的电力，价格较高。此外，如果由于电网故障而无法接入电网，所有产生的电力都会白白浪费。由于存在这些问题，现在的趋势是在本地进行一些储能，以便在需求低时将能量储存起来，然后在需求高时释放到电网中供人们使用。

为了提高该级的功率等级并降低电流纹波，可以进行分支交错。交错技术有助于减小输出电流纹波和输出噪声，减小 EMI 滤波器尺寸并增加功率密度。实现和控制方式相对简单，但为了获得出色的性能，建议使交错半桥尽可能对称，以便在它们之间实现平衡电流。此类多相设计还支持在输出 EMI 滤波器上实现多个开关频率，从而减小设计尺寸。此类非隔离式拓扑的典型应用如图 2-3 中的 TIDA-010938 所示。这里，我们可以看到两个交错级彼此之间施加了 180° 的相位差。

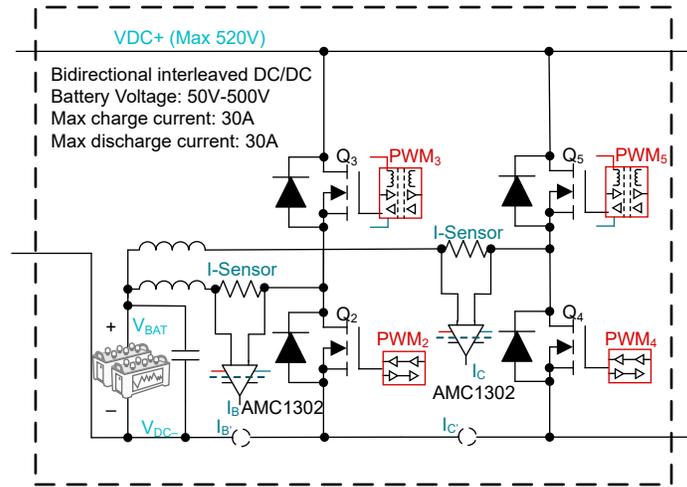


图 2-3. 电池直流/直流级方框图

当我们谈论与汽车应用或额定电压较低的电池有关的系统时，隔离就会派上用场。在这方面很常见的拓扑包括具有扩展相移的双有源电桥（例如在 [TIDA-010054](#) 中），它可处理 700V 至 800V 直流初级电压、350V 至 500V 直流次级电压（单相移 SPS）或 250V 至 500V（扩展相移 EPS），功率高达 10kW；移相全桥（例如在 [PMP22951](#) 中），它可处理从 400V 降至 54V 的电压，功率等级为 3kW；或 CLLLC 双有源电桥（例如在 [TIDM-02002](#) 中），它可处理 380V 至 600V 的初级电压、280V 至 450V 的次级电压，功率等级高达 6.6kW。根据是三相应用还是单相应用，器件的漏源电压额定值会发生变化。这相当于单相的 650V 漏源电压额定值，三相应用的漏源电压额定值最高可达 1200V（直流总线电压更高的系统需要更高的漏源电压额定值）。

尽管铅酸电池在储能系统中非常流行，但较新的系统越来越多地转向各种类型的锂电池。电池电压取决于系统功率级别。较低功耗的单相系统通常使用 48V 电池，而较高功耗的三相系统使用 400V 电池。具有更高功率范围串式逆变器的系统可以使用 800V 电池进行存储。这可能会因应用和用例而异。

有关能量存储功率转换系统的更详细方框图，请参阅 TI 的 [能量存储功率转换系统 \(PCS\)](#) 应用页面。

2.3 用于单相直流/交流的功率级

逆变器功率级保持双向，以实现从直流链路到电网兼容交流电源的功率转换，反之亦然。先进的串式逆变器往往通过锁相环 (PLL) 随时与电网连接并与电网同步。逆变器或 PFC 级可分为两大类，即电网是单相还是三相。单相进一步决定了器件是分相 (日本、美国等地区为 110V_{RMS}) 还是 230V_{RMS} (欧洲、ROA 等地区) 的额定值。

并网逆变器的额外任务是将振幅、频率和相位与由多个源和负载组成的现有电网同步。它还需要解决在电网出现任何故障 (如停电、断电、过压等) 时检测并将自身与电网隔离的问题。这称为防孤岛保护。

当今的串式逆变器在成本和功率密度方面都具有竞争力，一般都不需要变压器。无变压器的串式逆变器为返回电流提供了低阻抗路径。由于 PV 表面暴露在接地屋顶或附近的其他表面上方，因此这种漏电流是 PV 应用中众所周知的挑战。表面积较大导致 PV 电池板与接地之间的杂散电容值较高，在潮湿环境或雨天，杂散电容可能高达 200nF/kWp。当转换器的共模电压没有得到很好的缓解时，这种寄生电容会导致高共模电流流入系统，并可能导致 EMI 和电网电流失真等问题。可以发现，需要通过所用拓扑来解决安全和残余电流检测 (RCD) 方面的问题。因此，所选的相应拓扑需要解决该问题。

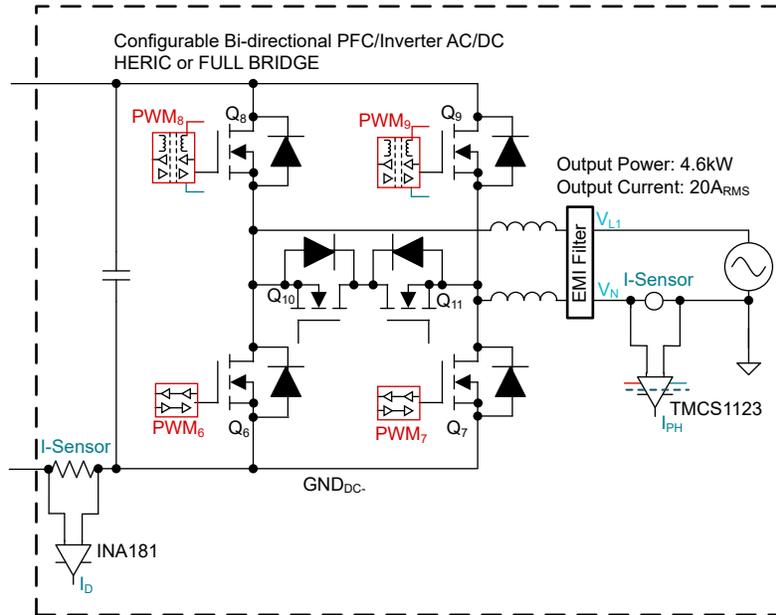


图 2-4. 单相直流/交流级方框图

图 2-4 表示 TIDA-010938 中存在的基于 HERIC 的直流/交流转换器拓扑。当仅 FET Q6、Q7、Q8、Q9 运行且不使用 Q10 和 Q11 时，也可以将其配置为 H 桥模式。对于逆变器级，可使用各种由正弦 PWM 调制的降压衍生非隔离式拓扑。其中包括适用于单相的拓扑，例如支持双极调制的两级 H 桥、支持单极调制的三级 H 桥、HERIC 和图腾柱 (TIDA-010933，它是额定功率为 1.6kW 的逆变器级)。TIDA-010938 展示了额定功率高达 4.6kW 的逆变器级，可配置为单极、双极和基于 HERIC 的转换器。表 2-1 列出了每个系统的优势和挑战。

表 2-1. 单相直流/交流拓扑的优势和挑战

	3L H 桥单极	2L H 桥双极	3L 图腾柱	3L HERIC
优势	<ul style="list-style-type: none"> 控制方案简单 4 个开关 2 PWM 更小的无源器件 低 THD 均匀的损耗分布 $f_{\text{ripple}} = 2 \times f_{\text{pwm}}$ 	<ul style="list-style-type: none"> 控制方案简单 4 个开关 1 PWM 均匀的损耗分布 低共模噪声 $f_{\text{ripple}} = f_{\text{pwm}}$ 	<ul style="list-style-type: none"> 4 个开关 可通过 1 个 PWM 实现 $f_{\text{ripple}} = f_{\text{pwm}}$ 	<ul style="list-style-type: none"> 低 THD 低 EMI 小型无源器件 低共模噪声 $f_{\text{ripple}} = f_{\text{pwm}}$

表 2-1. 单相直流/交流拓扑的优势和挑战 (续)

	3L H 桥单极	2L H 桥双极	3L 图腾柱	3L HERIC
挑战	<ul style="list-style-type: none"> • 高共模抑制比 (EMI) • 高共模噪声 	<ul style="list-style-type: none"> • 最大的无源器件 • 效率更低 	<ul style="list-style-type: none"> • 过零时的复杂控制 • 高共模抑制比 (THD) • 高共模噪声 • 损耗分布不均匀 	<ul style="list-style-type: none"> • 复杂控制方案 • 6 个开关 • 损耗分布不均匀 • 3 PWM

2.4 三相直流/交流功率级

三相拓扑包括两电平转换器、三电平 NPC 和三电平 ANPC (TIDA-010210)、T 型 (TIDA-01606) 和飞跨电容。对于三相系统，可以在 [三相工业系统的交流/直流电源转换拓扑比较](#) 中找到详细的比较。表 2-2 列出了每个系统的优势和挑战。

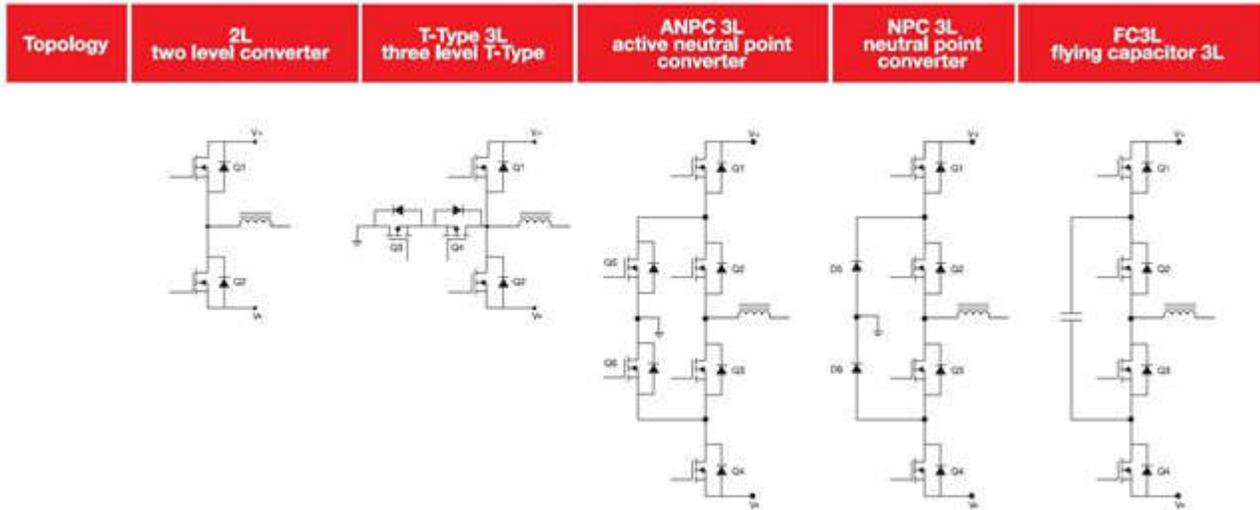


图 2-5. 三相直流/交流拓扑的原理图表示

表 2-2. 三相直流/交流拓扑的优势和挑战

	2L	T 型 3L	ANPC	NPC 3L 源自 ANPC	飞跨电容器 3L
优势	<ul style="list-style-type: none"> 控制方案简单 仅 2 个开关 2 PWM 	<ul style="list-style-type: none"> 控制方案简单 Q3/Q4 承受 1/2 VDC EMI 优于 2L $f_{\text{ripple}}=f_{\text{pwm}}$ 	<ul style="list-style-type: none"> 效率高 所有开关承受 1/2 VDC EMI 优于 2L 	<ul style="list-style-type: none"> 成本低于 ANPC 所有开关承受 1/2 VDC EMI 优于 2L $f_{\text{ripple}}=f_{\text{pwm}}$ 4 PWM 	<ul style="list-style-type: none"> 效率很高 仅 4 个 HF FET 和 1 个电容器 $f_{\text{ripple}}=2 \times f_{\text{pwm}}$ 磁性元件最小 EMI 最低
挑战	<ul style="list-style-type: none"> Q1/Q2 承受全部 VDC 在更高的 f_{pwm} 下具有高 EMI 最大的无源器件 	<ul style="list-style-type: none"> Q1/Q2 承受全部 VDC 4 PWM 	<ul style="list-style-type: none"> 控制方案更复杂 关断时序至关重要 6 PWM 	<ul style="list-style-type: none"> 效率低于 ANPC 控制方案更复杂 关断时序至关重要 	<ul style="list-style-type: none"> 飞跨电容器初次充电 关断时序至关重要

3 未来技术和趋势

面向储能系统的串式逆变器和功率转换系统正在推动脱碳过程的发展。成本、设计尺寸和效率是将这些终端设备提升到新水平的重要指标。通过引入 SiC 和 GaN 等宽带隙技术，可以在更高的开关频率下运行，从而提高功率密度和减小外形尺寸，缩小无源器件的尺寸，从而降低系统成本。凭借丰富的 GaN 器件产品系列，TI 已准备好通过先进的产品来支持这一趋势。如需了解更多相关信息，请访问 TI 的[氮化镓 \(GaN\) 功率级](#) 应用页面。

可以观察到的另一个趋势是将直流总线额定值增加到 1500V 至 2000V。通过做到这一点，能够以更低的电流实现更高的功率等级，从而影响系统中的损耗。不过，这要求对系统元件的隔离要求和器件额定值进行适当的选择。

从两电平转换器迁移到多级转换器有助于增加直流总线电压，并有效改善共模抑制，从而使 EMI 滤波器设计变得更小。实现飞跨电容拓扑会与升压电感器看到的每个级别的纹波频率相乘，而升压电感器可以采用更小的值来确定尺寸。

上述所有特性都有助于减小太阳能和电池储能系统中电源转换器的设计尺寸并降低成本，甚至提高效率。

4 总结

对于特定的应用和用例，所有拓扑都各有优缺点。电源拓扑的最终选择归结为特定电源转换器模块的预期用例，即输入和输出参数、目标功率级别、效率和功率密度目标等等。大功率三相商用逆变器可以采用复杂的多级三相 PFC 级和直流/直流级来提供越来越多的电力，但单相住宅逆变器可采用更简单的非隔离式拓扑。储能型逆变器是非常先进的技术，因此双向性成为电池端口的直流/直流转换器和电网转换器的关键。宽带隙器件和高性能微控制器的使用使元件尺寸更小、功率密度更高、效率更高、功能更强，从而为产品带来更多优势。

5 参考资料

1. 德州仪器 (TI)，[与电池储能系统配合使用、基于 GaN 的 110kW 单相串式逆变器参考设计](#) 设计指南。
2. 德州仪器 (TI)，[基于 GaN 的 1.6kW 双向微型逆变器参考设计](#) 设计指南。
3. 德州仪器 (TI)，[针对 3 级电动汽车充电站的双向双有源电桥参考设计](#) 设计指南。
4. 德州仪器 (TI)，[具有有源钳位的 54V、3kW 相移全桥参考设计](#) 设计指南。
5. 德州仪器 (TI)，[适用于混合动力汽车/电动汽车车载充电器的双向 CLLLC 谐振双有源电桥 \(DAB\) 参考设计](#) 设计指南。
6. 德州仪器 (TI)，[10kW 双向三相三级 \(T 型\) 逆变器和 PFC 参考设计](#)
7. 德州仪器 (TI)，[基于 GaN 的 11kW 双向三相 ANPC 参考设计](#)
8. 德州仪器 (TI)，[三相工业系统的交流/直流电源转换拓扑比较](#)

6 修订历史记录

Changes from Revision * (October 2018) to Revision A (December 2024)	Page
• 更新了整个文档中的表格、图和交叉参考的编号格式.....	1
• 添加了 太阳能串式逆变器 一节.....	2
• 经过更新，以纳入升压转换器的常用拓扑并添加了方框图.....	2
• 经过更新，以纳入此应用中的常用拓扑，添加了指向设计指南的超链接，并添加了方框图.....	3
• 经过更新，以纳入此功率转换级中主要使用的拓扑，添加了指向设计指南的超链接，并添加了方框图.....	5

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