

走向更清洁的未来



设计挑战和解决方案

Andrew Smith, Product Marketing Manager,
Vincotech GmbH Unterhaching

Matthias Tauer, Technical Marketing Manager,
Vincotech GmbH Unterhaching

可再生能源是实现更清洁未来的关键，而太阳能正在引领可再生能源的潮流。为确保太阳能继续满足对清洁能源日益增长的需求，太阳能逆变器的设计者面临着多维度挑战。为探讨这些挑战，本文对最新解决方案的效率、重量、成本和可靠性方面进行了比较，并表明飞跨电容拓扑结构可以为系统优化提供独特机会。

气候变化是当今社会面临的主要挑战之一。为应对不断上升的碳排放水平和污染的全球需求，以及减少我们对化石燃料的依赖，政府不得不向清洁能源的未来发展。研究机构和工业界正在努力发掘和探索新的方法，以满足对清洁能源日益增长的需求。

可再生能源是未来清洁能源的关键，目前能提供的可再生能源占全球能源总需求的比例大约为 25%，而太阳能在可再生能源领域增长最快。近年来，新增的太阳能发电量比化石燃料和核电的总和还要多，几乎是风力发电的两倍。在 2019-2020 年期间，太阳能发电占新增装机量的 48%，而德国、意大利、希腊和智利等国家的太阳能发电量已经占到其国家需求的近 10%。太阳能市场各领域的巨额投资仍在增多，包括消费者、工业和公用事业部门。



图 1：太阳能光伏发电总装机容量



图 2：2019 年电力装机容量

太阳能发电总装机超过 700GW，2020 年全年装机超 100GW。预计在未来 5 年内，累计和年度装机量都将翻番，主要是地面电站（大于 100kW），但近年来，工商业市场出现了显著增长，尤其是光储系统。地面电站被划分成集中式逆变器系统和组串式逆变器系统。集中式逆变器系统在过去获得了大部分的投资。然而，由于组串式逆变器系统具有低成本、高灵活性和易于维护的特点，预计其将在未来 5 年成为主导类型。集中式逆变器系统基于多个光伏电池板向一个大型逆变器枢纽供电。相比之下，组串式逆变器系统是将逆变器与较小的光伏组件放在一起。然后在输出前将这些子系统合并起来。因此，随着需求增加，增加额外的组串式逆变器子系统非常容易。由于组串式逆变器通常采用模块化设计，在维护时，通常只需简单更换故障的逆变器模块。就地存放备件意味着问题可以得到快速解决。这有助于确保电力供应的安全性，从而最大限度地减少电力供应不足或停电的情况。

为支持这些关键的组串式逆变器系统特性，设计者需要考虑高效率、最大化功率容量、轻量化和高可靠性等一些关键需求。为了最大限度地提高光伏电池板的发电量并降低功率损耗，需要高系统效率。这有助于降低对散热器的要求和减少系统重量。最大限度地提高每个逆变器的输出功率，可以减少特定功率输出所需的模块子系统数量，这还可以减少整个子系统的占地面积。系统重量低可以确保轻松安装和更换逆变器，而无需特殊的起重设备。这样一来，相关人员可以快速完成系统安装和快速应对系统故障，特别是在难以到达的地方。系统的高可靠性有助于降低维护要求，即使系统在恶劣的环境中工作，也能进一步提高供电寿命。

Vincotech 面向太阳能市场的新一代功率模块引入了全新设计理念，以专门满足这些设计要求：高效率、高功率密度、轻量化和高可靠性。精心选择的创新拓扑结构和最新一代半导体，能够显著提高系统效益。下文对逆变器系统中的能量转化步骤进行了详细分析，并表明 Vincotech 的最新模块如何以及在哪些方面满足这些设计要求并实现所提供的系统优势。

用于 1500V 多组串逆变器系统的电力电子设备

光伏逆变器系统需要使用 DC/DC 升压转换器作为最大功率点跟踪器（MPPT）的一部分，以调整光伏电池板输出电压至所需的直流母线电压水平。然后输入到 DC/AC 转换器，将太阳能输送到公共电网。

各种拓扑结构可用于升压器和逆变器级，在接下来的两节中，本文将从效率、成本和系统效益方面对各种拓扑结构进行比较。

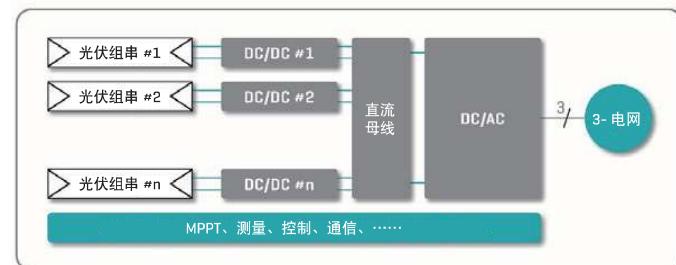


图 3：光伏逆变器的系统简图

升压拓扑结构的成本和性能对比

两电平和三电平对称升压通常用于逆变器的输入级，而三电平飞跨电容升压器正开始在最新系统中投入使用了。

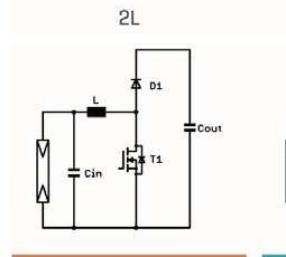


图 4:
两电平升压电路

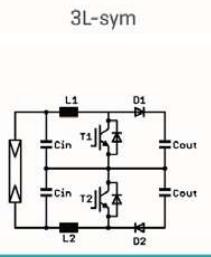


图 5:
三电平对称升压电路

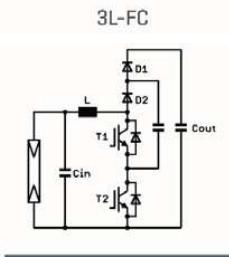


图 6:
三电平飞跨电容升压电路

三电平拓扑结构引入一个额外的第三个电平，降低了升压电感两端的电压，升压开关和升压二极管的电压是两电平拓扑的一半。因此，对于一个给定的纹波电流，与两电平拓扑相比，电感量可以降低一半。这样一来，整个电感的体积、重量和成本都相应减少。请记住，这是额外的系统效益，在后续的功率模块成本分析中，没有考虑这部分系统效益。

在对称升压拓扑结构中，第三级电平是通过将升压电路分成“对称”的正负两部分而产生的。额外的第三级电平是通过拆分输入和输出电容器 (C_{in} 、 C_{out}) 并将其连接到中性点而产生的。通过调整脉宽调制 (PWM) 脉宽以确保中性点对称。

在飞跨电容升压拓扑结构中，第三级电平是由浮动或飞跨电容器 (C-FC) 产生的，正如该拓扑结构名称所示。飞跨电容充电到输出电压的一半。飞跨电容拓扑结构的一个关键优势是“人为的”增加电感电流频率。在三电平飞跨电容的情况下，与半导体开关频率相比，电感电流频率增加了一倍。因此，电感可以变得更大、更轻和更便宜。此外，三电平飞跨电容只需要一个升压电感，而三电平对称升压器需要两个。

以下分析比较了两电平、三电平对称和三电平飞跨电容拓扑结构的成本和性能，这些拓扑结构适用于 1500V 多组串太阳能逆变器的 40-45 千瓦升压通道。

芯片组	两电平	三电平对称	三电平飞跨电容升
Si/SiC 混合	未检查，因为效率不符合要求	950V 快速 Si IGBT 1200V SiC 二极管	
全 SiC	1700V SiC MOSFET 1700V SiC 二极管	1200V SiC MOSFET 1200V SiC 二极管	

效率和成本的比较结果（图 7 和图 8）表明，全 SiC 两电平升压器的效率最低且价格最高。混合芯片方案没有受到评估，因为其在该频率范围内的效率会更低。此外，如果考虑到宇宙辐射要求，1700V 的阻断电压对于 1500V 的系统来说可能过低，且使用 2200V 的元件会进一步降低效率，增加模块成本。

对比结果还表明，三电平飞跨电容（FC）升压器比对称升压器的效率更高。由于这两种拓扑结构使用相同的元件，它们的模块成本也相同。

混合 Si/SiC 器件的飞跨电容升压器的效率最高，电感电流频率可达 50kHz。超过 50kHz 时，全 SiC 器件的飞跨电容升压器的效率最高，但价格也比混合电路高。

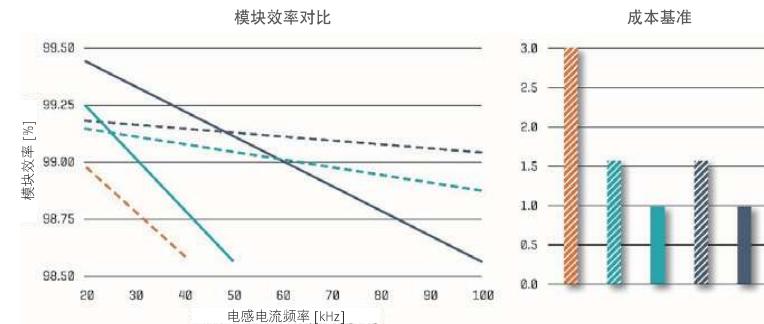


图 7: 模块效率基准——条件：
 $V_{in} = 750\text{ V}$ 、 $V_{out} = 1200\text{ V}$ 、 $P_{out} = 42\text{ kW}$

因此，与两电平和三电平对称拓扑结构相比，飞跨电容拓扑结构显然性价比最高。对于电感电流频率不超过 50kHz 的系统，混合三电平飞跨电容拓扑结构的性价比最高，而超过 50kHz 时，全 SiC 方案的效率最高。

逆变器拓扑结构的成本和性能对比

过去，人们提出了许多不同的逆变器拓扑结构。NPC 和 ANPC 广泛用于 1500V 的多组串逆变器。混合电压 NPC (MNPC) 至今仍用于住宅和商业的 1000V 系统，但正在逐渐被 NPC 所取代。三电平和四电平飞跨电容逆变器开始在最新系统中投入使用。

NPC、ANPC 和飞跨电容拓扑结构能提供比单个元件更高的系统阻断电压。例如，一个使用 950V 元件的 NPC 能提供 1900V 的阻断电压。如果在 1500V 的光伏逆变器中使用四电平飞跨电容拓扑结构，器件的阻断电压只需达到 650V。通常情况下，阻断电压较低的元件速度更快，开关损耗更低，往往成本也更低。

NPC 和 ANPC 拓扑结构在驱动主要是非无功负载系统中时（功率因数近似为 1），损耗基本相同，因此效率也基本相同。然而，对于 $\cos\theta < 1$ 的情况，为了确保完整性和双向操作，ANPC 有明显的效率优势。NPC 和 ANPC 的损耗集中在以高频 PWM 模式运行的半导体中，这些器件要承受导通损耗和开关损耗。在大多数情况下，快速开关半导体的温度限制了模块的最大输出功率。

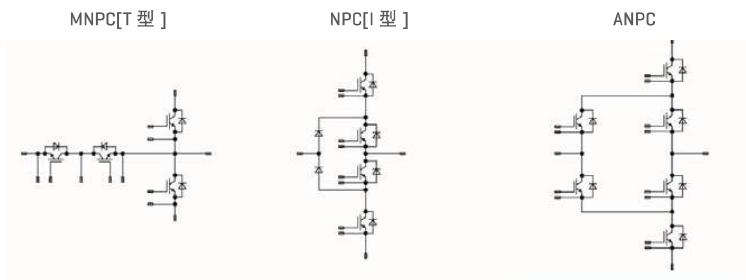


图 9:
MNPC 逆变器拓扑结构
图 10:
NPC 逆变器拓扑结构
图 11:
ANPC 逆变器拓扑结构

一般来说，飞跨电容逆变器的损耗均匀分布于所有器件。这意味着在相同的输出功率下，飞跨电容逆变器的器件结温比 NPC 或 ANPC 更低。另外，在与 NPC 和 ANPC 器件相同的情况下，飞跨电容逆变器可实现更高的输出功率。

该飞跨电容逆变器还支持全无功功率和双向操作功能。参考文献^[2]对飞跨电容逆变器拓扑结构的操作进行了更详细的描述。

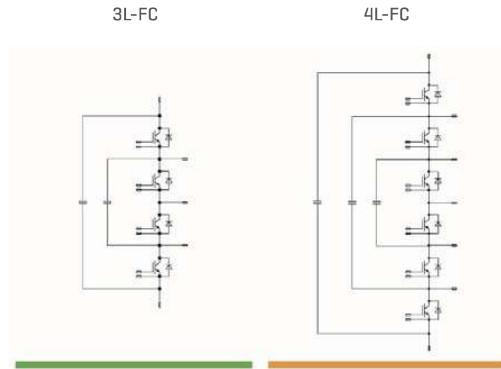


图 12:
三电平飞跨电容逆变器拓扑结构
图 13:
四电平飞跨电容逆变器拓扑结构

与飞跨电容升压器一样，飞跨电容拓扑结构的一个关键优势也是“人为的”增加电感电流频率。对于三电平飞跨电容拓扑结构来说，电感电流频率是半导体开关频率的两倍，对于四电平飞跨电容拓扑结构来说，则是半导体开关频率的三倍。电感的尺寸可以大幅减少，或者通过保持相同的电感电流频率，半导体开关频率可以分别减少 2 或 3 倍。这样一来，不仅减少了开关损耗，还能够比 NPC 和 ANPC 的效率更高。

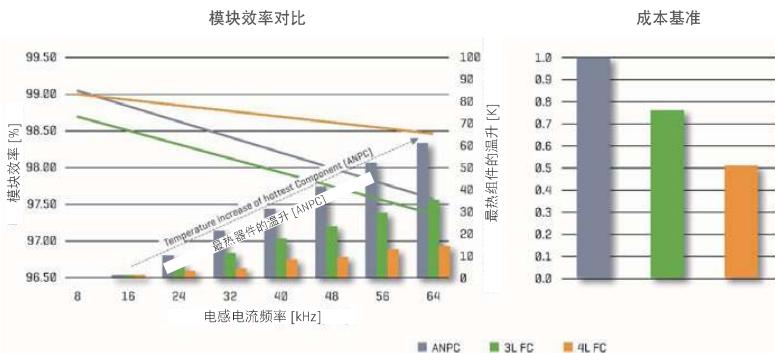


图 14: 模块效率基准——条件：
 $V_{dc} = 1350\text{ V}$, $V_{ac} = 460\text{ V}$, $P_{ac} = 117\text{ kW}/\text{相}$, $\cos\phi = 1$

图 15: 模块成本基准

效率对比结果（图 14）表明，在 16kHz 电感电流频率下运行的 ANPC 与 32kHz 的四电平飞跨电容逆变器具有相同的效率。从 ANPC 到四电平飞跨电容，电感电流频率可以增加一倍。因此，据初步估计，电感的体积和成本可以减少 40%。此外，如成本对比结果（图 15）所示，四电平飞跨电容的功率模块成本是 ANPC 的 50%，这大大降低了系统成本。

高可靠性是光伏逆变器的另一项关键设计要求。在 32kHz 电感电流频率下运行的四电平飞跨电容拓扑中最热的器件的温度仅比在 16kHz 下运行的 ANPC 高 4K。然而，任何温升都会对模块的使用寿命产生影响。Vincotech 最近推出的先进的新型芯片焊接技术解决了这一问题，并提高了更高结温下的可靠性。寿命加速试验证实，新技术在 150° C 结温下的模块寿命至少增加 10 倍。



图 16: 标准和先进芯片焊接技术的寿命加速试验结果

大功率多组串逆变器的总结和解决方案

性能和成本对比结果明确表明，在升压器和逆变器中，飞跨电容拓扑结构显著提高了效率，节约了模块和系统成本，并减少了电感和散热器的重量要求。这些新的拓扑结构为下一代光伏逆变器系统的设计者提供了解决方案，以满足高效率、最大功率密度、轻量化和高可靠性等关键设计要求。

Vincotech 提供广泛的、为太阳能市场优化的功率模块。将对称升压器 (LR6x 系列) 或飞跨电容升压器 (LS6x 系列) 与 ANPC 逆变器 (LQx9 系列) 或飞跨电容逆变器 (LMx9 系列) 相结合，Vincotech 为 1500V 系统提供了完全优化和定制化的解决方案。

凭借这些创新技术，Vincotech 正在提供能够助我们走向更清洁未来的解决方案。

< 参考文献 >

- [1] "Symmetrical Boost Concept for Solar Applications up to 1000V", Temesi, Frisch, 01/2009
- [2] "Flying Capacitor Topology for Ultra Efficient Inverter Applications", Frisch, Temesi, 01/2021
- [3] "The Advantages and Operation of Flying-Capacitor Boosters", Antoni, 10/2020
- [4] 图 1: 统计数据来自 IEA PVPS 报告“2020 年光伏应用趋势”
(国际能源署, 光伏发电系统, 技术合作计划)
- [5] 图 2: 统计数据来自 SolarPower Europe 2020 报告