

## 基于提高太阳能逆变器的转换效率的解决方案

### I. 引言/摘要

由于对可再生能源的需求，太阳能逆变器（光电逆变器）的市场正在不断增长。而这些逆变器需要极高的效率和可靠性。本文对这些逆变器中采用的功率电路进行了考察，并推荐了针对开关和整流器件的最佳选择。

光电逆变器的一般结构如图 1 所示，有三种不同的逆变器可供选择。太阳光照射在通过串联方式连接的太阳能模块上，每一个模块都包含了一组串联的太阳能电池（Solar Cell）单元。太阳能模块产生的直流（DC）电压在几百伏的数量级，具体数值根据模块阵列的光照条件、电池的温度及串联模块的数量而定。

这类逆变器的首要功能是把输入的 DC 电压转换为一稳定的值。该功能通过升压转换器来实现，并需要升压开关和升压二极管。

在第一种结构中，升压级之后是一个隔离的全桥变换器。全桥变压器的作用是提供隔离。输出上的第二个全桥变换器是用来从第一级的全桥变换器的直流 DC 变换成交流（AC）电压。其输出再经由额外的双触点继电器开关连接到 AC 电网网络之前被滤波，目的是在故障事件中提供安全隔离及在夜间与供电电网隔离。第二种结构是非隔离方案。其中，AC 交流电压由升压级输出的 DC 电压直接产生。

第三种结构利用功率开关和功率二极管的创新型拓扑结构，把升压和 AC 交流产生部分的功能整合在一个专用拓扑中。

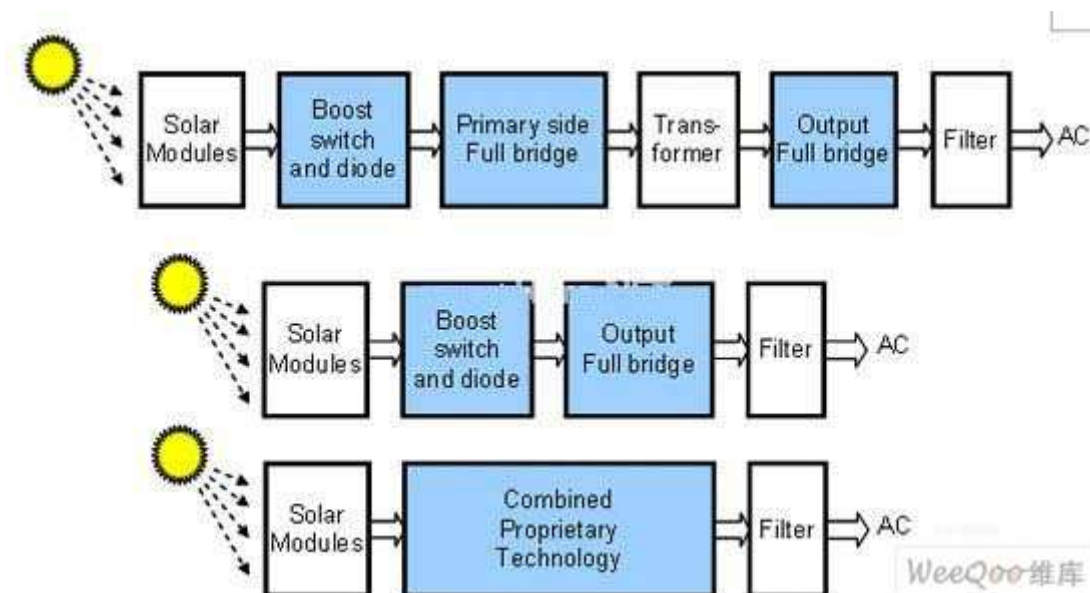


图 1：太阳能逆变器系统原理示意图

尽管太阳能电池板的转换效率非常低，让逆变器的效率尽可能接近 100% 却非常重要。在德国，安装在朝南屋顶上的 3kW 串联模块预计每年可发电 2550 kWh。若逆变器效率从 95% 增加到 96%，每年便可以多发电 25kWh。而利用额外的太阳能模块产生这 25kWh 的费用与增加一个逆变器相当。由于效率从 95% 提高到 96% 不会使到逆变器的成本加倍，故对更高效的逆变器进行投资是必然的选择。对新兴设计而言，以最具成本效益地提高逆变器效率是关键的设计准则。

至于逆变器的可靠性和成本则是另外两个设计准则。更高的效率可以降低负载周期上的温度波动，从而提高可靠性，因此，这些准则实际上是相关联的。模块的使用也会提高可靠性。

图 1 所示的所有拓扑都需要快速转换的功率开关。升压级和全桥变换级需要快速转换二极管。此外，专门为低频（100Hz）转换而优化的开关对这些拓扑也很有用处。对于任何特定的硅技术，针对快速转换优化的开关比针对低频转换应用优化的开关具有更高的导通损耗。

## II. 用于升压级的开关和二极管

升压级一般设计为连续电流模式转换器。根据逆变器所采用的阵列中太阳能模块的数量，来选者使用 600V 还是 1200V 的器件。

功率开关的两个选择是 MOSFET 和 IGBT。一般而言，MOSFET 比 IGBT 可以工作在更高的开关频率下。此外，还必须始终考虑体二极管的影响：在升压级的情况下并没有什么问题，因为正常工作模式下体二极管不导通。MOSFET 的导通损耗可根据导通阻抗  $R_{DS(ON)}$  来计算，对于给定的 MOSFET 系列，这与有效裸片面积成比例关系。当额定电压从 600V 变化到 1200V 时，MOSFET 的传导损耗会大大增加，因此，即使额定  $R_{DS(ON)}$  相当，1200V 的 MOSFET 也不可用或是价格太高。

对于额定 600V 的升压开关，可采用超结 MOSFET。对高频开关应用，这种技术具有最佳的导通损耗。目前市面上有采用 TO-220 封装、 $R_{DS(ON)}$  值低于 100 毫欧的 MOSFET 和采用 TO-247 封装、 $R_{DS(ON)}$  值低于 50 毫欧的 MOSFET。

对于需要 1200V 功率开关的太阳能逆变器，IGBT 是适当的选择。较先进的 IGBT 技术，比如 NPT Trench 和 NPT Field Stop，都针对降低导通损耗做了优化，但代价是较高的开关损耗，这使得它们不太适合于高频下的升压应用。

飞兆半导体在旧有 NPT 平面技术的基础上开发了一种可以提高高开关频率的升压电路效率的器件 FGL40N120AND，具有  $43\mu\text{J}/\text{A}$  的  $E_{OFF}$ ，比较采用更先进技术器件的  $E_{OFF}$  为  $80\mu\text{J}/\text{A}$ ，但要获得这种性能却非常困难。FGL40N120AND 器件的缺点在于饱和压降  $V_{CE(SAT)}$  (3.0V 相对于 125°C 的 2.1V) 较高，不过它的高升压开关频率下开关损耗很低的优点已足以弥补这一切。该器件还集成了反并联二极管。在正常升压工作下，该二极管不会导通。然而，在启动期间或瞬变情况下，升压电路有可能被驱使进入工作模式，这时该反并联二极管就会导通。由于 IGBT 本身没有固有的体二极管，故需要这种共封装的二极管来保证可靠的工作。

对升压二极管，需要 Stealth? 或碳硅二极管这样的快速恢复二极管。碳硅二极管具有很低正向电压和损耗。不过目前它们的价格都很高昂。

在选择升压二极管时,必须考虑到反向恢复电流(或碳化硅二极管的结电容)对升压开关的影响,因为这会导致额外的损耗。在这里,新推出的 Stealth II 二极管 [FFP08S60S](#) 可以提供更高的性能。当  $V_{DD}=390V$ 、 $I_D=8A$ 、 $di/dt=200A/\mu s$ ,且外壳温度为  $100^{\circ}C$  时,计算得出的开关损耗低于 FFP08S60S 的参数  $205mJ$ 。而采用 [ISL9R860P2](#) Stealth 二极管,这个值则达  $225mJ$ 。故此举也提高了逆变器在高开关频率下的效率。

### III. 用于桥接和专用级的开关和二极管

滤波之后,输出桥产生一个  $50Hz$  的正弦电压及电流信号。一种常见的实现方案是采用标准全桥结构(图 2)。图中若左上方和右下方的开关导通,则在左右终端之间加载一个正电压;右上方和左下方的开关导通,则在左右终端之间加载一个负电压。

对于这种应用,在某一时段只有一个开关导通。一个开关可被切换到 PWM 高频下,另一开关则在  $50Hz$  低频下。由于自举电路依赖于低端器件的转换,故低端器件被切换到 PWM 高频下,而高端器件被切换到  $50Hz$  低频下。

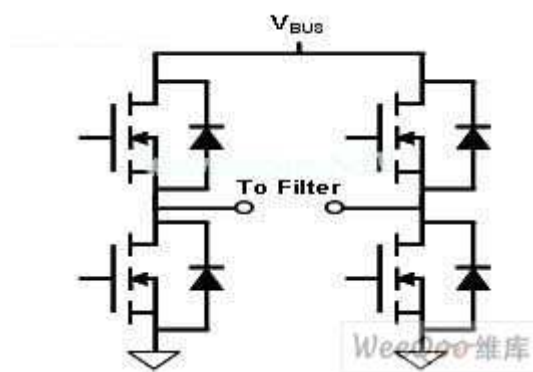


图 2: MOSFET 全桥

这应用采用了  $600V$  的功率开关,故  $600V$  超结 MOSFET 非常适合这个高速的开关器件。由于这些开关器件在开关导通时会承受其它器件的全部反向恢复电流,因此快速恢复超结器件如  $600V$  [FCH47N60F](#) 是十分理想的选择。它的  $R_{DS(ON)}$  为  $73$  毫欧,相比其它同类的快速恢复器件其导通损耗很低。当这种器件在  $50Hz$  下进行转换时,无需使用快速恢复特性。这些器件具有出色的  $dv/dt$  和  $di/dt$  特性,比较标准超结 MOSFET 可提高系统的可靠性。

另一个值得探讨的选择是采用 [FGH30N60LSD](#) 器件。它是一颗饱和电压  $V_{CE(SAT)}$  只有  $1.1V$  的  $30A/600V$  IGBT。其关断损耗  $E_{OFF}$  非常高,达  $10mJ$ ,故只适合于低频转换。一个  $50$  毫欧的 MOSFET 在工作温度下导通阻抗  $R_{DS(ON)}$  为  $100$  毫欧。因此在  $11A$  时,具有和 IGBT 的  $V_{CE(SAT)}$  相同的  $V_{DS}$ 。由于这种 IGBT 基于较旧的击穿技术, $V_{CE(SAT)}$  随温度的变化不大。因此,这种 IGBT 可降低输出桥中的总体损耗,从而提高逆变器的总体效率。

[FGH30N60LSD](#) IGBT 在每半周期从一种功率转换技术切换到另一种专用拓扑的做法也十分有用。IGBT 在这里被用作拓扑开关。在较快速的转换时则使用常规及快速恢复超结器件。

对于 1200V 的专用拓扑及全桥结构，前面提到的 FGL40N120AND 是非常适合于新型高频太阳能逆变器的开关。当专用技术需要二极管时，Stealth II、Hyperfast? II 二极管及碳硅二极管是很好的解决方案。