

三电平光伏逆变器方案优势分析

一背景

对于传统电力电子装置的设计，我们通常是通过每千瓦多少钱来衡量其性价比的。但是对于光伏逆变器的设计而言，对最大功率的追求仅仅是处于第二位的，欧洲效率的最大化才是最重要的。因为对于光伏逆变器而言，不仅最大输出功率的增加可以转化为经济效益，欧洲效率的提高同样可以，而且更加明显。欧洲效率的定义不同于我们通常所说的平均效率或者最高效率。它充分考虑了太阳光强度的变化，更加准确地描述了光伏逆变器的性能。欧洲效率是由不同负载情况下的效率按照不同比重累加得到的，其中半载的效率占其最大组成部分（图 1）。

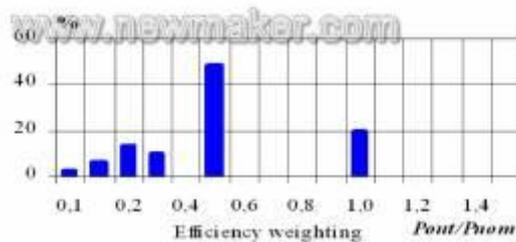


图 1: 欧洲效率计算比重

因此为了提高光伏逆变器的欧洲效率，仅仅降低额定负载时的损耗是不够的，必须同时提高不同负载情况下的效率。欧效的改善所带来的经济效益也很容易通过计算得到。例如以一个额定功率 3kw 的光伏逆变器为例，根据现在市场上的成本估算，光伏发电每千瓦安装成本大约需要 4000 欧元[2]，那也就意味着光伏逆变器每提高欧效 1%就可以节省 120 欧元。提高光伏逆变器的欧洲效率带来的经济效益是显而易见的，“不惜成本”追求更高的欧效也成为现在光伏逆变器发展的趋势。

NPC 逆变桥模块的技术参数（图 10）：

中间换向环节由 75A/600V 的 IGBT 和快恢复二极管组成

上下高频切换环节由 MOSFET(600V/45 mΩ)组成

中心点钳位二极管由 SiC 二极管组成

模块内部集成温度检测电阻



图 10: flowSOL-NPI - NPC 逆变桥

针对 1000v 直流母线电压的光伏逆变器，npc 拓扑结构逆变器是目前市场上效率最高的。图 12 比较了 npc 模块(mosfet+igbt)和使用 1200v 的 igbt 半桥模块的效率。

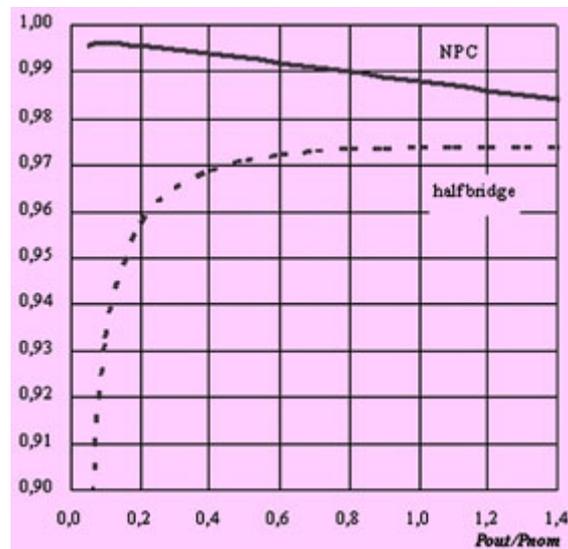


图 12 npc 逆变桥输出效率(实线)和半桥逆变效率(虚线)比较

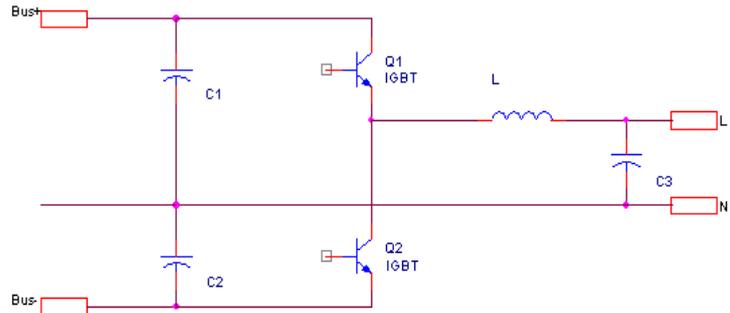
根据仿真结果，npc 逆变器的欧效可以达到 99.2%，而后者的效率只有 96.4%。npc 拓扑结构的优势是显而易见的。

下面是实际测量的一些典型数据：

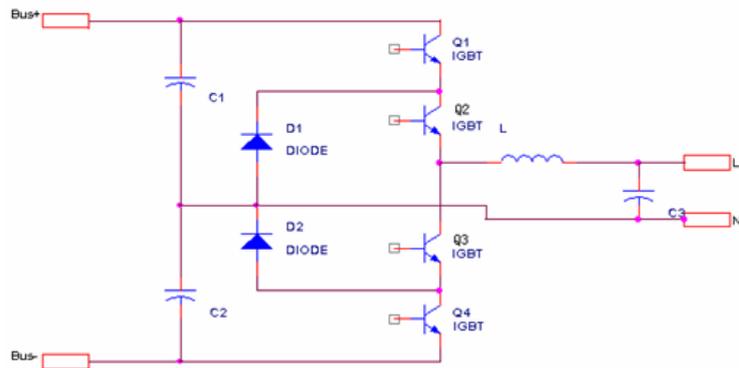
In/Out condition	Load	Phase	Three-level UPS			Two-level UPS		
			P _{in} (kW)	P _{out} (kW)	Efficiency	P _{in} (kW)	P _{out} (kW)	Efficiency
220V/50Hz System	30kW	A	10.56	9.44	91.40%	11.13	9.5	84.34%
		B	10.37	9.65		11.11	9.15	
		C	10.26	9.41		11.1	9.47	
	60kW	A	20.93	18.81	93.02%	21.68	19	90.16%
		B	20.76	19.81		21.68	20.12	
		C	20.65	19.37		21.69	19.53	
30kW	A	10.32	9.24	91.25%	10.78	9.32	86.17%	
	B	10.16	9.42		10.99	9.52		
	C	10.04	9.19		10.83	9.25		

二 可用的 3 种拓扑

1 半桥，两电平工作方式；电路简单、控制简单；2) 但是器件应力大，要 1200V，不好选择器件，电感电流相对三电平的纹波大,效率难以提高。

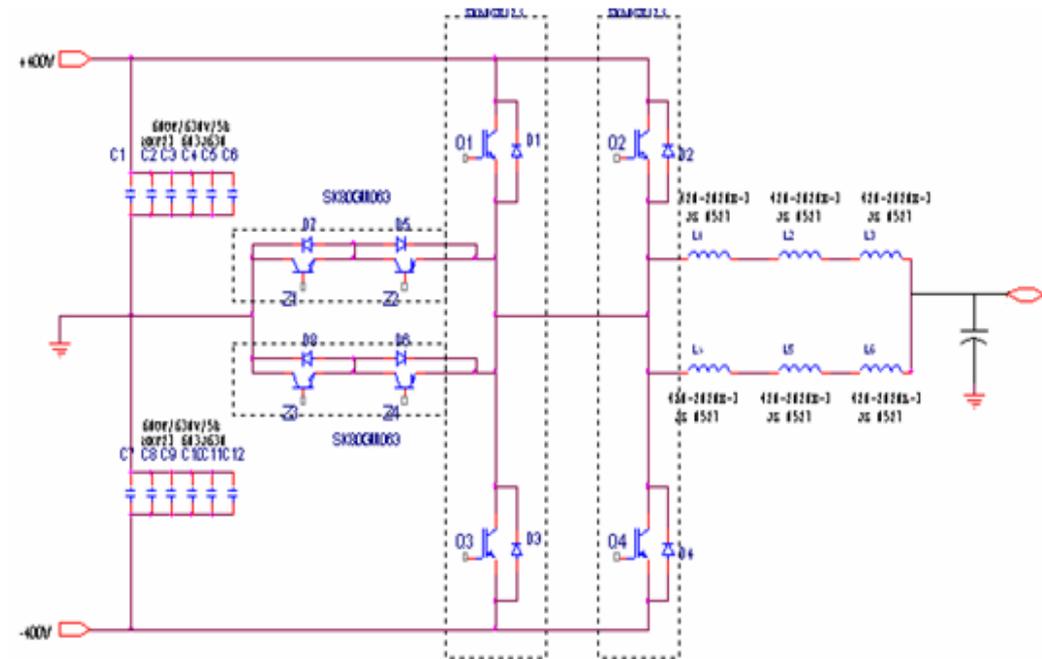


2 三电平之一：二极管箝位，工作在三电平方式，器件应力小，600V 即可。有利于提高效率。但是实现需要考虑逐波限流应力问题。输出纹波小。



三电平之二：解剖的APC的10KVA拓扑：逆变部分

- 1) 这是另外一种三电平拓扑。续流管为 600V 管子。
- 2) 工作管为 1200V 管子，续流管为双向电子开关。
- 3) 不用太考虑逐波限流应力问题。



三 三电平的逐波限流应力问题产生原因以及解决方案。

产生原因

主要在于可能由于驱动时间不一致导致的单个管子承担整个母线的电压,此时 600V 管子 <800V 母线. 具体在逐波限流恢复的时候,比如实际可能出现的一种情况,逐波限流过程中 Q3,Q4 体二极管续流的时候,一旦逐波限流放开,如果 Q1 先导通,则 Q2 承受总母线电压.

1 硬件解决方案, 其他团队已经有成熟方案可以借鉴, 采用逻辑电路避免应力问题。.

2 用 cpld 代替硬件实现的解决方案,此方案需要采用 cpld, 并需要代码工作量以及维护, 所以并不划算.

逆变逐波限流信号到来时, 先关断逆变的外管, 再关断逆变内管。在逆变逐波限流信号消失后, 再先强制触发逆变桥臂的两个内管, 过 1us 后, 再根据逆变电压强制关断一个内管, 再过 1us 后再按照 DSP 发出的信号正常发波。在逆变逐波限流时的逆变各管子的发波时序图如下图 3 所示 (下图为输出电压为正的情况, 当输出电压为负时, 1 管和四管对换, 2 管和 3 管对换)

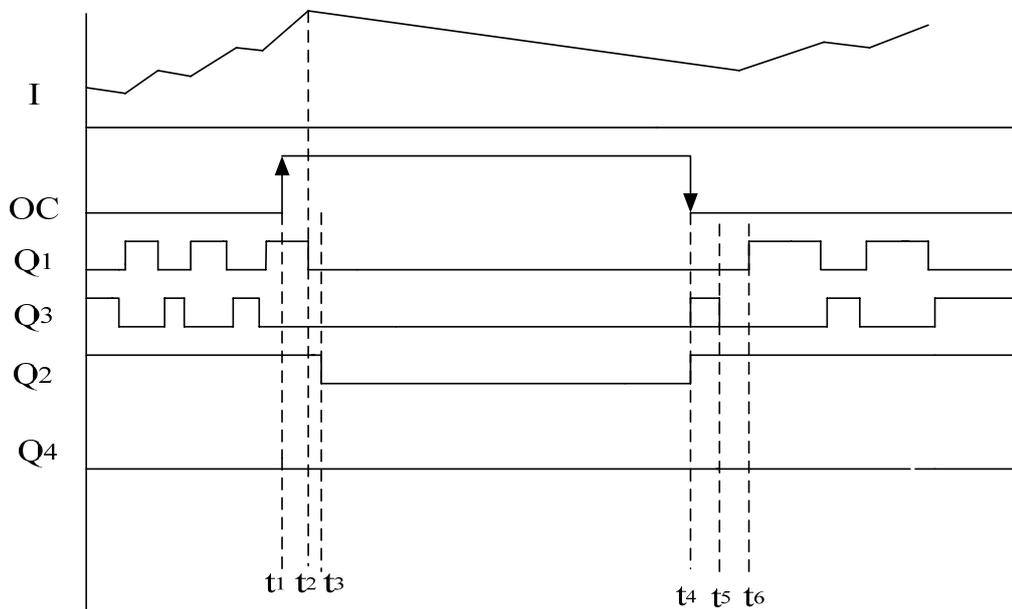


图: 电压为正逐波限流时 CPLD 发波顺序

其中 t1~t2: 0.5us; t2~t3: 1us; t4~t5: 3us t5~t6: 1us

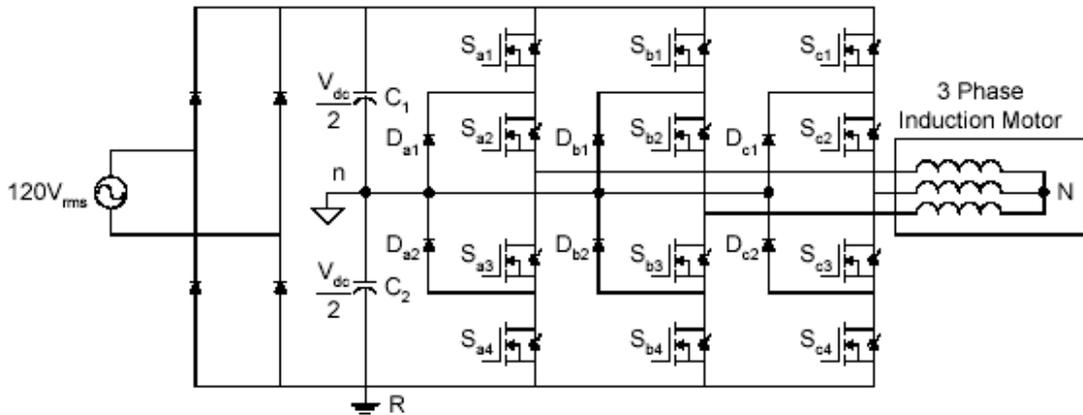
当使能信号传到 CPLD, 0.5us 延时后, 关断外管, 即在 t2 之前, Q1 和 Q3 正常交替发波 (DSP 发波), t2 时刻关断 Q1。再延时 1us 后, 关断 Q2 和 Q3。当逆变电流变小, 在逐波限流使能信号下降沿同时强制触发 Q2 和 Q3, 3us 后强制关断 Q3, 在正半周, Q2 一直导通。再延时 1us 后, 按照 DSP 发出的触发信号触发各管。

四 结论:

1. 三相光伏逆变器采用三电平效率比采用两电平效率可以提高 3%左右, 是三相光伏逆变器主流发展方向。
2. 采用其他团队硬件逻辑电路可以省略 CPLD, 彻底解决已知的应力风险。
3. 软件已经有三电平设计经验, 没有风险。
4. 由两电平改成三电平方案整体进度不会有影响, 整体对比相差 1 个月左右。

五 附录（三电平工作原理）

三电平逆变器拓扑如下：

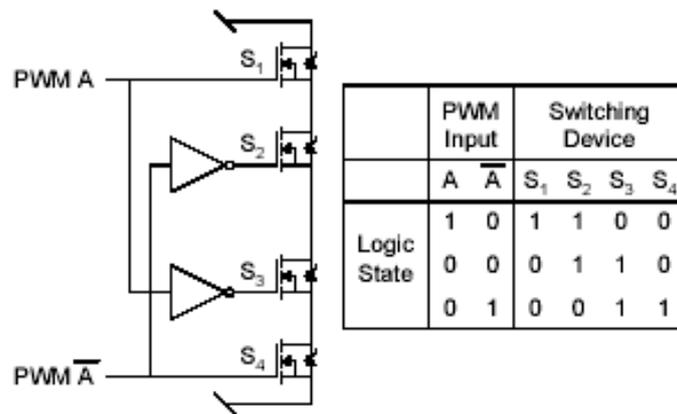


其中每一相桥臂有 4 个开关元件有三种正常的开关模式，以 X 相为例， S_{x1} 和 S_{x2} 导通时，X 相输出正电平， S_{x3} 和 S_{x4} 导通时，X 输出负电平， S_{x2} 和 S_{x3} 导通时，X 输出零电平，故称之为三电平逆变器。三电平变频器 X 相 4 个功率元件的驱动信号 S_{x1} ， S_{x2} ， S_{x3} ， S_{x4} 应该满足以下条件：

$$S_{x1} = \overline{S_{x3}}$$

$$S_{x2} = \overline{S_{x4}}$$

即：



在具体的实现时，可能有两种方案：

方案一：：如下图，正半周开关 S_{x4} 一直关断， S_{x2} 一直开通，而开关 S_{x1} 和 S_{x3} 受 PWM 脉冲控制，当 S_{x1} 导通时，桥臂中点输出高电平；当 S_{x1} 关闭时，那么 S_{x2} 和 S_{x3} 都是导通的，在这段时间里，电感电流通过 D_{x1} 或 D_{x2} 续流，续流的通路由电感电流的方向决定，且这段时间内桥臂中点输出零电平。负半周工作原理类似。这样，每半周中桥臂中点会输出两种电平，整个周期中有三种电平，且每半周里有两个开关没有动作。

开关 S_{x1} 和 S_{x3} 以及 S_{x2} 和 S_{x4} 的驱动信号必须有死区，以避免母线和 N 线的直通。由于 DSP 每个事件管理器只有三对互补的 PWM 信号，可以利将这三对 PWM 信号接到上图的 $PWMA$ 和 $PWMA\bar{}$ ，在软件中通过正半周封锁 $PWMA$ 脉冲、负半周封锁 $PWMA\bar{}$ 脉

冲来达到方案一的控制方法，驱动信号的死区必须由硬件来生成。

