

用于三电平逆变器的 IGBT

提高 DC/AC 转换的效率

Marco Di Lella and Riccardo Ramin, SEMIKRON 意大利公司产品经理

电能是一种极其宝贵的商品，许多市场研究表明，电能的需求正在按指数级不断地增长。2001 至 2006 年，能源消费增加了 16.1%（数据来源：英国石油公司世界能源统计回顾，2007 年 6 月）。然而，由于电能的有限以及日益高涨的石油价格，一个新的技术时代经开始了——一个以降低电能消耗和促进替代能源研究为目标的时期。因此，迫切需要在所有的工业和消费类应用中持续不断地提高效率。

当我们谈论效率时，我们主要指的是电力效率。然而，这种用法并不是效率一次本身的完整含义。在电力电子应用中，工程师在开发新产品过程中的追求的主要目标是以最大限度地发挥不同类型的效率，如电效率和热效率，以及优化谐波失真和产品整体的尺寸。

上述目标必须与其他越来越严格的目标一起实现：满足经济效率和开发时间的要求。这就产生了一个问题：具有更高效率的更为强大的模块是否能够满足所有重要的效率目标。

SEMITOP®功率模块拥有卓越的热性能，集成了最新的芯片技术和高度创新的电路拓扑结构，从而最大限度地提高效率和成本效益。绝缘的功率模块是用于 PCB 焊接。单螺钉安装和无铜基板的设计确保了良好的热性能，从而带来了无与伦比的应用可靠性。超过 10000 小时，基于 17 种不同测试的大量质量评定也验证了可靠性。

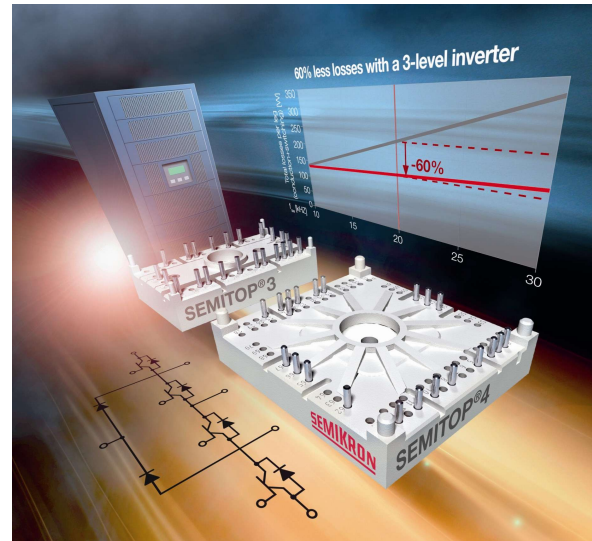
SEMITOP®的产品范围已经扩展，增加了一款专为三电平逆变器开发的新模块。

三电平逆变器拓扑结构正越来越多地用于 UPS，包括那些中低额定功率（5-40 kVA）的产品。

多电平逆变技术是基于一个相当简单的概念：多个 IGBT 模块串联起来，使得额定电压远远高于单个 IGBT 的反向阻断电压。这一概念首次是在高压和大功率转换器应用中引入，以便能够在数以万计的额定电压范围内使用标准的 IGBT。

在 DC / AC 转换器中使用多电平逆变器是一种简单的提高效率的方法。该转换器产生一个非常接近正弦波且谐波失真极小的输出波形。这样有两个好处：开关频率比典型的两电平应用要低，从而减少了硅损耗；省去了输出滤波器，使得整体尺寸变小，成本降低。

一个典型的半桥式三相逆变器（图 1a）允许输出电压波形只能在两个电平间切换。相比之下，图 1b 所示的拓扑结构允许输出电压波形在三个电平间切换，这就是为什么这种结构也被称为三电平逆变器拓扑结构的原因。



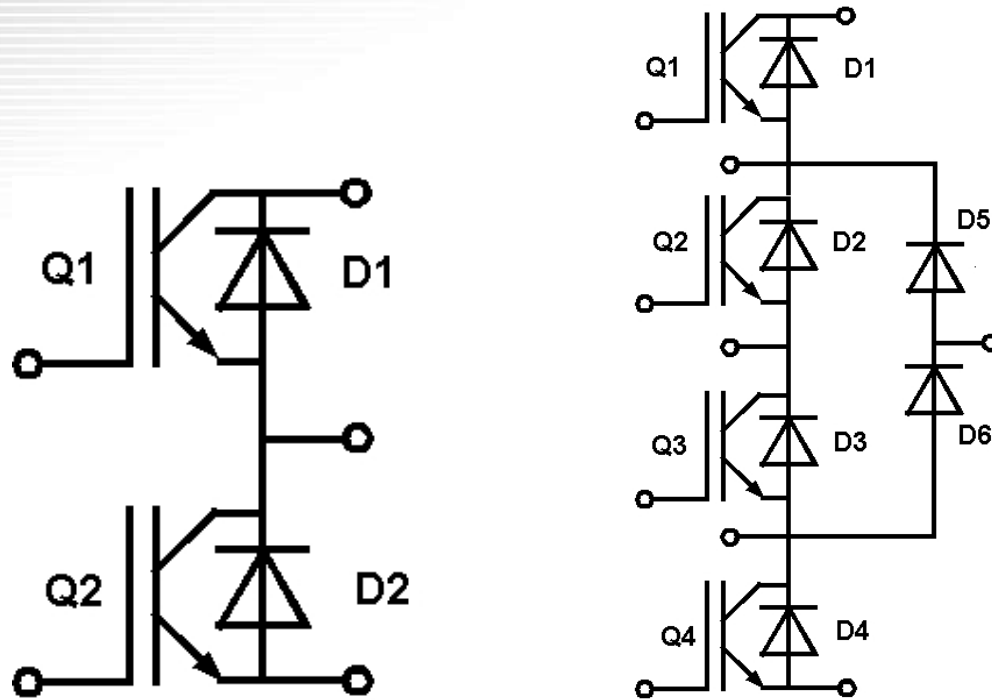


图 1 – 二电平逆变器 (2L) 和三电平逆变器 (3L) 的典型桥臂

为了确定三电平逆变器与常规二电平逆变器之间的区别，现在我们将分析三电平逆变器背后所隐藏的原理[1]。对于三相三电平逆变器，需要一个采用 12 个电子元件 (IGBT) 的类似结构 (参阅图 2)。每一相都将在三个电平 ($+V_{dc}/2$, 0 , $-V_{dc}/2$) 间切换。在像这样的一个结构中，IGBT 上的最大电压被限定为最大直流环节电压 ($V_{dc}/2$) 的一半。这是因为这些 IGBT 通过两个被称为箝位二极管的快速二极管连接到了中性点 (MP)。

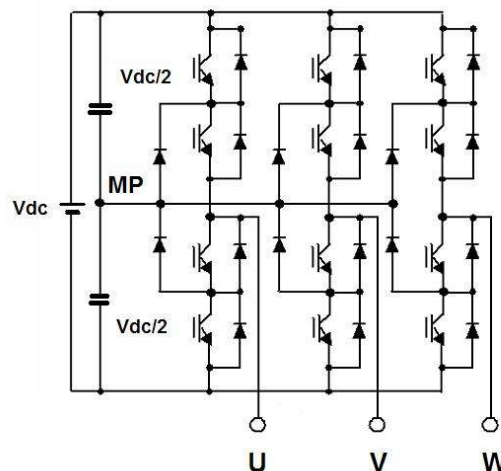


图 2 – 三相三电平逆变器的拓扑结构

三相两电平逆变器加上脉宽调制产生算法[2]也可以应用于多电平逆变器。该算法配合三角载波在减少谐波失真方面效果最好，即三电平逆变器既需要载波，也需要参考波。

在这种情况下，三角载波的数量等于 $L-1$ ， L 表示电平数。对于三相三电平逆变器来说，这意味着需要两个三角载波和一个正弦参考波。

三种具有不同相位关系的 PWM 方式可用于三电平逆变器：

- 交替反相层叠式（APOD），这种方式中所有相邻载波的相位都相反。
- 正负反相层叠式（POD），这种方式中使零值以上的载波相位和零值以下的载波相位相反
- 同相层叠式（PD）的，即所有载波以相同的相位上下排列叠加

PD 方式是最常用，因为它的线输出电压的谐波失真最小。三角载波和正弦参考波，以及 IGBT 和 NCD 的电流波形如图 3 所示。

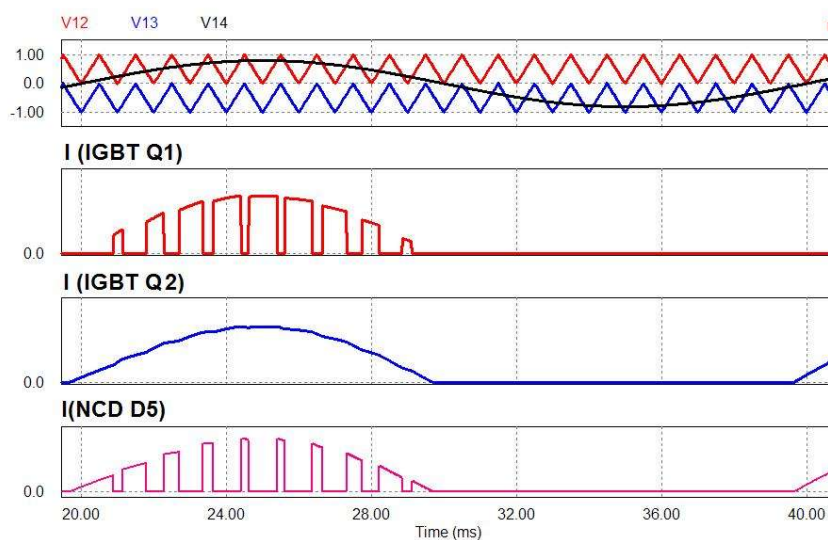


图 3 – 三电平逆变器原理

与两电平逆变器相比，三电平逆变器的电路似乎更为复杂。然而，其所带来的技术和经济上的优势，成了强烈建议使用三电平逆变器的理由。

在这里，在具有相同边界条件的同种应用下对两个标准模块进行了对比，详见附表 1 ([3],[4])。IGBT 和二极管的导通和开关损耗按表 2 中所给的公式计算[5],[6]。

S = 20 kVA	cos (φ) = 0,85	f _{sw} = 20 kHz
M = 1	V _{l,ms} = 400V	I _{o,ms} = 29 A
i _{pk} = 40,8 A	T _s = 80°C	

	IGBT Blocking Voltage	I _c @ T _s =80°C	V _{ce,sat} typ @ 50A chip level	E _{on} +E _{off} @ I _c =50A,R _g =33Ω	IGBT R _{thj,s}
SK 30 MLJ 066	600V	31A	1,65 V	4,2mJ @ V _{cc} =300V, T _f = 150°C	1,8 [KW]
SK 60 GB 128	1200V	44A	1,9 V	12,5mJ @ V _{cc} =600V, T _f =125°C	0,6 [KW]

表 1 –模拟条件和主要的 IGBT 参数

三电平逆变器的 IGBT 具有较低的反向阻断电压——600V 而不是 1200V。600V 芯片通常比 1200V 芯片更快、更薄。因此三电平逆变器中的硅片具有更低的开关损耗和正向压降。

3 Level inverter (3 L)	
Conduction losses IGBT Q1/Q4	$P_{con} = U_s \cdot I_{avg} + r_f \cdot I_{ms}^2$ $I_{avg} = \frac{M \cdot I}{4\pi} \cdot [\sin \phi + (\pi - \phi) \cos\phi]$ $I_{ms}^2 = \frac{M \cdot I}{4\pi} \left[1 + \frac{4}{3} \cos\phi + \frac{1}{3} \cos(2\phi) \right]$
Conduction losses IGBT Q2/Q3	$P_{con} = U_s \cdot I_{avg} + r_f \cdot I_{ms}^2$ $I_{avg} = \frac{I^2}{\pi} - \frac{M \cdot I}{4\pi} \cdot [\sin \phi - \phi \cos\phi]$ $I_{ms}^2 = \frac{I^2}{4} - \frac{M \cdot I}{4\pi} \left[1 - \frac{4}{3} \cos\phi + \frac{1}{3} \cos(2\phi) \right]$
Switching losses IGBT Q1/Q4	$P_{sw} = \frac{1}{\pi} \cdot (E_{on} + E_{off}) \cdot f_{sw}$

2 Level inverter (2L)	
Conduction losses Q1/Q2	$P_{con} = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{V_{CE,sat}}{\pi} \cdot \hat{i} + \frac{r_{CE}}{4} \cdot \hat{i}^2 \right) + m \cdot \cos\phi \cdot \left(\frac{V_{CE,sat}}{8} \cdot \hat{i} + \frac{r_{CE}}{3 \cdot \pi} \cdot \hat{i}^2 \right)$
Switching losses IGBT Q1/Q2	$P_{sw} = f_{sw} \cdot E_{sw} \cdot \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{I_1}{I_{ref}} \cdot \left(\frac{V_{ce}}{V_{ref}} \right)^K$

表 2 – 用于计算三电平逆变器[5]和二电平逆变器[6]开关和导通损耗的公式

如表 3 所示，三电平逆变器单个桥臂的总损耗比二电平逆变器低 60%。Q2 和 Q3 的开关损耗可以忽略不计。

由于 Q1 的电流流入 D5，因此 D1 和 D4 二极管的电流非常小；Q4 的电流流入 D6，而 Q2 的电流流入 Q3。钳位二极管承载整个负载电流。

SK 30 MLI 066		SK 60 GB 128	
IGBT: total losses per arm	118 W	IGBT: total losses per arm	176,1 W
Neutral clamp diode total losses (D5/D6)	28 W	Diodes total losses	53 W
Total losses per arm	146 W	Total losses per arm	229 W

表 3 – 损耗分析：三电平逆变器 vs. 二电平逆变器

图 4 显示了作为开关频率函数的逆变器单桥臂整体损耗（三电平 vs.二电平）。为了减少噪声污染，20KVA 的 UPS 的开关频率在人的听觉频率范围之上。在此开关频率范围内，三电平逆变器的总桥臂损耗明显低于二电平逆变器的总桥臂损耗。

此外，三电平逆变器中的输出电压波形是非常近似于正弦波，这就是为什么三电平逆变器只需要非常小的输出滤波器。从而减小三电平 IGBT 和二极管上的应力，提高了长期的可靠性和应用的整体效率。

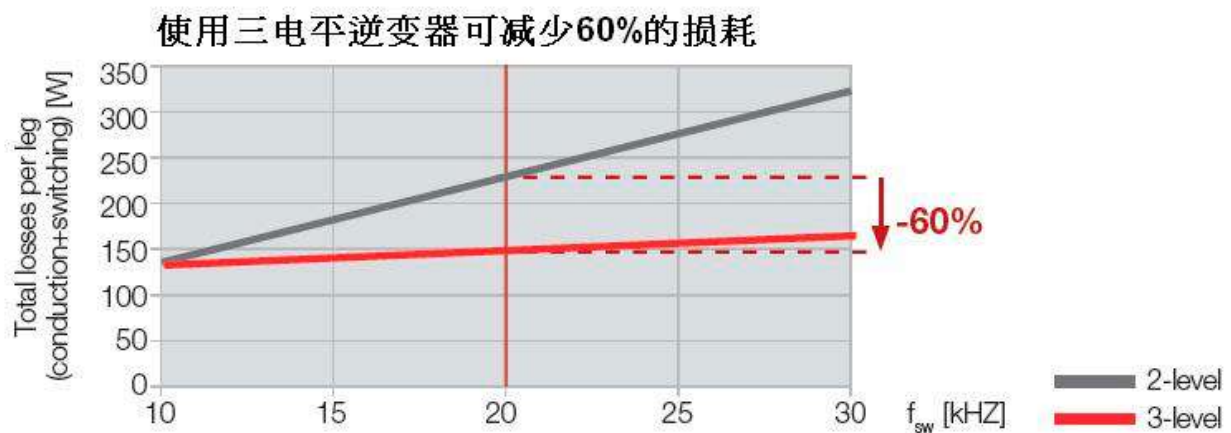


图 4 – 每个桥臂与频率的总损耗对比

从经济角度来看，在这一具体分析，基于 600V 硅片的三电平逆变器桥臂比基于 1200V 硅片的二电平逆变器桥臂便宜 25 %。

由于损耗较低以及输出电压在三个电平间切换这样一个事实，三电平逆变器的真正优势在于减少了电源开关的应力。由此产生的输出电压波形几乎是正弦波，谐波失真小，从而只需使用更小的输出滤波器。总体损耗减小也意味着可以使用更小的散热器。更小的散热器和输出滤波器可以减少 UPS 的整体尺寸，从而降低整体应用成本。

由于上述原因，在用于 USP 的三电平逆变器中使用标准 SEMITOP® 模块可以最大限度地提高电效率及热效率，缩短产品的上市时间，更重要的是，可以降低 UPS 的整体成本。

SEMİTOP 概览

SEMİTOP® 模块的特性:

- DCB直接与散热器接触: 无需基板

- 一个陶瓷绝缘层
- 用于PCB焊接的引脚
- 简便的单螺丝钉安装
- 电流等级
 - 最大 200A 的600V IGBT
 - 最大100A 的1200V IGBT
 - 最大300A的Mosfet

SEMITOP® 模块具有:

- 减少了装配成本
- 最佳的热阻
 - 与绝缘TO相比, 最大减小30%
 - 与IMS相比, 最大减小18%
- 结合了多种拓扑结构和芯片技术: 输入桥、逆变器、交流开关、半桥、整流器-逆变器-制动器、制动斩波器
- 紧凑型设计, 节省成本和空间
- 使用串联电阻极小的引脚: 与竞争者的技术相比, 最多能减少14%的传导损耗

所有模块均符合 RoHS 标准

参考文献:

- [1] Grahame Holmes, Lipo - Pulse width modulation for power converters: principle and practice. Pages 42-49
- [2] Grahame Holmes, Lipo - Pulse width modulation for power converters: principle and practice. Pages 467-469
- [3] SK60GB128 datasheet. <http://www.semikron.com/internet/ds.jsp?file=2469.html> (referenced 13.02.2007)
- [4] SK30MLI066 datasheet. <http://www.semikron.com/internet/ds.jsp?file=2782.html> (referenced 17.01.2008)
- [5] Gjermund Tomta, Roy Nielsen. "Analytical Equations for Three Level NPC Converters". 9th European Conference on Power Electronics and Applications, EPE 2001. Graz, 27 – 29 August, 7 pages.
- [6] Semikron application manual. Web-document. <http://www.semikron.com/internet/index.jsp?sekId=13> (referenced 14.9.2005)