

三电平逆变器 – 便利的在线尺寸计算

3-level inverter – easy online dimensioning

赛米控产品经理Alexander Langenbucher和应用工程师Ingo Staudt

在逆变器开发中- 无论是二电平拓扑结构或三电平拓扑结构- 开始阶段一个重要的步骤是为模块电源、冷却系统和驱动板设计正确的尺寸。由于电流路径中有大量的开关元件，三电平电路整流的次数更多，使得计算其功耗非常困难。许多制造商为三电平电路提供的热尺寸，甚至没有提及数值计算的精度。就赛米控而言，已将三电平拓扑结构 **3L NPC**（中点钳位）增加到其热计算工具 **SemiSel** 中，使用该软件可以正确选择 **10-300kVA** 的三电平模块（图 1）。

第一种三电平拓扑结构大约是 30 年前出现的[1]。目前，该方向的技术发展已经有点停滞了。由于其效率高，这种类型的配置最初是用于高压应用的。但就目前而言，三电平拓扑结构已用于不间断电源系统（UPS）和太阳能逆变器市场，这是因为这些市场对高效的功率因数和质量电网的要求不断增长。要求高开关频率的应用可通过采用 3 电平模块优化。通过降低输出电流 THD（总谐波失真），可以减少昂贵的电网侧滤波器。另外可减少永久噪音，尤其是在办公环境中。有了电流路径中的四个半导体，三电平逆变器的正向损耗比传统两电平逆变器的解决方案高。然而，得益于更低的开关损耗，总损耗可减少多达 44% [2]，特别是在高开关频率下。

对于这类采用三电平技术能够带来显著效益的应用，赛米控已建立了广泛的产品系列。为了使客户能够根据功耗和运行温度，选择最佳的拓扑结构和正确的模块，赛米控已在其仿真工具 **SemiSel** 中添加了三电平拓扑结构。

广泛的三电平产品范围

三电平技术已扩展到包括更高的功率等级。赛米控提供了采用不同连接技术的 **10-300kVA** 三电平模块。每个模块有一个三电平逆变器桥臂（图 1）

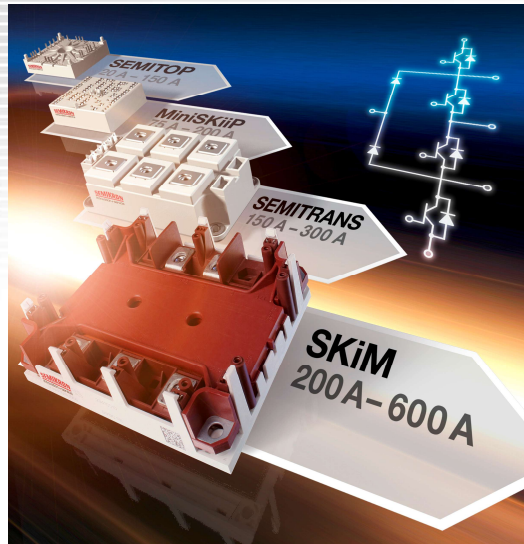


图 1: 该系列包括 10-300 kVA 的 600V 三电平模块，如焊接模块 (SEMITOP)、弹簧连接模块 (MiniSKiiP) 和采用螺丝连接的有铜底板模块 (SEMITRANS) 及无铜底板模块 (SKiM)。

典型的焊接型 10 - 80 kVA 三电平模块

对于输出功率额定值高达 100kVA 的模块，赛米控有两种采用不同的连接技术的三电平模块。由于其结构紧凑且低电感的设计，这些模块与分立解决方案或半桥模块解决方案相比有相当大的优势。传统的焊接模块 Semitop 的电压等级为 600V， $I_{c,nom}=20-150A$

低感应弹簧连接模块，使变流器的制造快速而方便

得益于使用了弹簧连接技术，MiniSKiiP 模块可用单螺丝或双螺丝快速地组装，便于快速且可靠地制造变流器。在该领域拥有超过 14 年经验和 1200 多万个模块，这个用于三电平拓扑结构的模块平台已经在每一个标准应用中被证明是成功的。

在 MiniSKiiP 中，三电平模块布局在一些方面进行了优化。DBC 陶瓷基板的布局被设计成四路不同的整流通道减小了空间，并且它们的连接尽可能地靠近以减少模块电感和由此产生的过压。对 DBC 陶瓷基板上的传导路径和半导体芯片周围的敷铜区进行了优化，改善了其与散热器的热接触并优化了热扩散能力。

IGBT 和二极管的最大阻断电压 V_{CES} 增大至 650V，这意味着可处理最高达 900V 的直流回路电压，该电压是北美 3x480V 电网所需要的。

适用于额定功率 100kVA 及以上系统的紧凑结构

对于更高的功率等级，赛米控提供了采用螺丝连接的、 $V_{CES} = 600V$ 、 $I_{c,nom} = 150-600 A$ 的 SKiM 和 SEMITRANS 模块。对于直流回路电压最高可达 1500V 的大功率光伏逆变器系统，现有 $V_{CES}=1200V$ 、 $I_{c,nom} = 200 A$ 的 SKiM 模块可提供。

计算三电平模块的功率损耗

SemiSel 是一款用于计算半导体模块工作温度的软件程序。该程序 2001 年[3]可在线使用，并已经更新了三次，包含了赛米控的每一种新模块，用于计算通用的不可控和半控整流器拓扑结构，H 桥和六组件逆变器拓扑结构，升压和降压变流器以及用于系统和驱动器选择的解决方案。

不同于复杂的迭代模拟程序，SemiSel 使用数值方法和线性化的半导体特性。这样做的优点是计算时间更短，即使是对于复杂的负载循环。

经验表明，SemiSel 对于标准拓扑结构的计算结果与功率模块的实际测量值非常接近。对于三电平 NPC 拓扑结构，已经开发了数值计算公式为变流器制造商提供了一个快速且精确的三电平尺寸计算工具。此功能将在 2011 年初投入使用（图 2）。

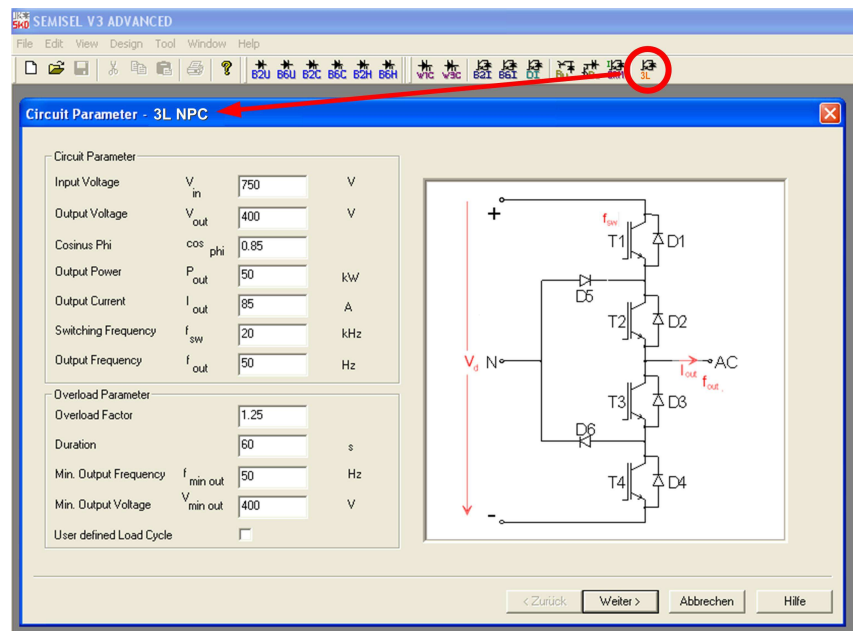


图 2: 在 SemiSel 中，逆变器的操作值可在三电平用户界面中输入。该程序使用此数据来计算芯片的工作温度。

为了从诸如电压和电流这样的基准值确定芯片的运行温度，需要采取若干步骤。首先，必须计算出三电平模块中流经每个 IGBT 和二极管的电流平均值和有效值。有了这些电流值，就可以确定传导和开关损耗了。最后，模块的损耗和热性能可被用于计算温度循环。

虽然二电平和三电平模块的功率损耗计算和温度循环计算具有可比性，但在计算芯片电流时还是有区别的：在三电平模块中，每个桥臂部有 10 个半导体（4 个串联的 IGBT 加上反并联二极管和两个钳位二极管），而二电平模块有 4 个半导体。对于每个独立的开关，这产生了更多的开关状态，更复杂的开关模式。

确定 IGBT 开关模式最简单的方法是比较两个带正弦信号的三角波信号（见图 3），确定各个开关的占空比。当外部 IGBT（T1 和 T4）记录导通的 IGBT 相的电流，根据相角，内部开关（T2 和 T3）可永久开启，甚至到一个完整的半波。

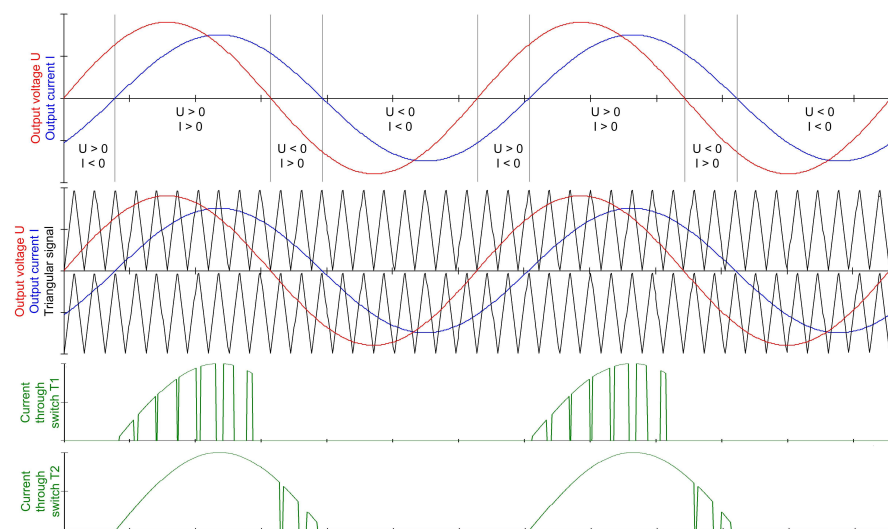


图 3: 此图以一个感性负载为例显示了输出电压 U 和输出电流 I 通过相位角进行转换。 U 和 I 前面的算术符号确定了哪些开关被激活。开关 T1 和 T2 的占空比是通过比较带三角波信号的参考电压确定的。

计算电流的一般方法如下：

$$\text{公式 1: } I_{avg} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} DC(\omega t) \cdot I_{pk} \cdot \sin(\omega t - \varphi) d(\omega t)$$

$$\text{公式 2: } I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} DC(\omega t) \cdot I_{pk}^2 \cdot \sin^2(\omega t - \varphi) d(\omega t)}$$

必须对 10 个开关中的每一个都可以应用和求解这两个公式。这是通过使用相应的占空比和积分限实现的，与相角无关。积分的解可被用于确定半导体中的传导和开关损耗。只有在确定内部 IGBT 开关损耗的情况下才有必要使用其他上下限重新确定积分：这两个开关在整个半波内并不是一直开关，实际上在一个给定周期内完全导通。在此期间，不产生开关损耗。这就是为什么必须设置积分限，使得计算只在开关时间内进行，并为这一时间确定开关损耗。

电流平均值初始可信性测试是通过在图 4 所示的三个节点上应用基尔霍夫第一定律。最终的验证是通过对比仿真数值方法和测量结果。

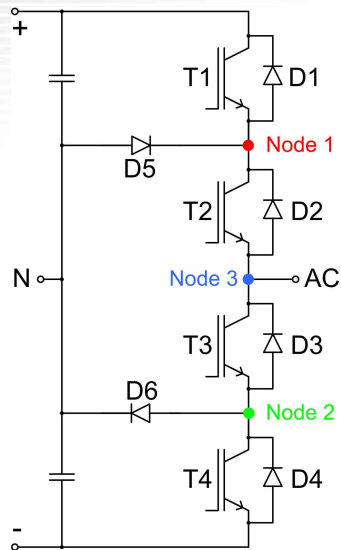


图 4：一个赛米控三电平模块中包含这十个半导体。一个 NPC（中点钳位）三电平逆变器包含三个这样的桥臂。

为了从电流平均值和有效电流值来计算传导损耗，半导体的正向特征被线性化，使得它尽可能精确地描述额定电流的范围。这就是为什么在这个范围内 SemiSel 会产生非常准确的结果。对于非常低的功率，即小于额定电流 20% 的小电流幅值，计算得到的静态功耗比实际值稍大。由于逆变器的冷却系统被设计用于额定工作点和过载条件下，因此精确确定额定工作点的功耗是重要的。在低功率情况下，偏差可以忽略不计。

结论

赛米控拥有各种连接和组装技术的三电平模块系列，用于额定输出为 10-300kVA 的三电平逆变器中。新的 SemiSel 程序对半导体芯片工作温度的数值计算快速且可靠。通过这种方式，逆变器制造商可以迅速确定哪个模块和哪种拓扑结构对于他们的应用来说是最有效和最省钱的解决方案。

参考文献

- [1] A. Nabae, I. Takahashi, and H. Akagi, "A new neutral-point clamped PWM inverter," IEEE Trans. Ind. Applicat., vol. IA-17, pp. 518–523, Sept./Oct. 1981.
- [2] M. Ikonen, O. Laakkonen, and M. Kettunen, "Two-Level and Three-Level Converter Comparison in Wind Power Application", www.elkraft.ntnu.no/smola2005/Topics/15.pdf
- [3] SemiSel Software: www.semikron.com/?mode=semisel