

自适应单元转换器拓扑结构有助于实现高功率密度、带功率因数校正之通用输入AC-前端的恒定效率



作者：系统工程总监Maurizio Salato
2012年11月

引言

自适应单元 (Adaptive Cell™) 拓扑结构是一个独特的专有架构，是Vicor的高性能PFM™AC-DC产品的核心。在过去三十年中，功率因数校正的AC整流已经以多种方式得到解决，然而，全球通的要求对其输入接受85VRMS至264VRMS的前端转换器带来了严重的设计权衡问题。除了便携式电源适配器，绝大多数电子设备都安装在特定区域，并由一个特定的单相AC电源供电，它通常保证在最常见的三个标称值 (100、120和230V_{RMS}) ± 20%的范围以内。本文将三个不同层次的细节分析转换器的结构：以一个典型的自下而上的方法，将三种不同“放大系数”应用到相同的结构当中，解释为什么Vicor PFM转换器代表了AC前端功率因数校正方面的一次突破。这将有助于全面描述并解释如何实现最先进的性能。

“经典”功率因数校正和自适应单元的基本原理

传统上，功率因数校正控制的设计相当于升压转换器拓扑结构。形成类似线电压的转换器输入电流的最简单的方法是在级联控制环路中实现一个乘法器级，如图1所示。检测线电压并乘以外部电压环路提供的电流基准。将相同的线电压输入用在前馈方式，就可以保持线电压范围内的恒定环路带宽。其结果是，通过改变输入电流的幅值，输出电压得到了调节，该幅值紧紧跟随线电压的波形。

例如，图2所示的经改进的单周期控制 (OCC) 技术依靠改进的线电压检测机制。在这种情况下，电感器作为一个间接线电压检测组件，具有与线电压成正比的电流斜率。这样，加上可复位积分模块，可无需像基于乘法器的设计那样使用电流环路的前馈补偿。

显而易见的是，AC电压变化在两个非常重要的设计方面呈现出一种折衷关系：

- 1.控制环路稳定性：保持瞬时输入电压范围 (从0V至375V) 的稳定带宽，需要先进的控制技术。
- 2.功率半导体器件和磁性组件额定值：为负载提供相同的功率要求开关、二极管和磁性器件的设计满足最坏情况下的应用场景 (最大电压、最大电流)，它从来不会同时适用于任何给定条件。

同样的考虑也适用于任何隔离式拓扑结构 (即前馈或反激式转换器)，由于各种电压 (或电流) 源瞬间加起来并施加于特定器件的拓扑结构状态，带来了进一步降额 (de-rating) 的额外负担。

自适应单元双钳位ZVS转换器

为了克服上述限制，Vicor开发出一种称为双钳位ZVS的新型转换器拓扑结构，以及一个称为自适应单元新的动态转换器架构。让我们来分析它们是如何工作，以及如何全面解决了AC-DC电源转换的关键问题。

双钳位零电压开关转换器（DC-ZVS）由全桥初级和一个单端整流次级组成，如图3所示。就像一个升压型PFC，电感器的作用是作为主要能量存储组件；不过，在同一个磁芯上连接了不同匝数的两个绕组。这种特殊的结构在非连续导通模式下工作，并有三种拓扑结构状态，如图4所示。在第一种状态下，电感存储来自公用线路的能量。在第二种状态时，累积的能量由次级传送到负载。第三种状态允许电感存储一些无功电能。电容器CCL也是储能组件，可保持初级反射的输出电压。这两个储能组件（因此而得名“双钳”）加上适当的开关时序，使每一次转换都发生在零电压、零电流或两者兼有（故名“零电压开关”）的情况，从而避免了开关损耗，并可实现非常高的开关频率。更重要的是，这种拓扑结构使开关实现了低电压额定值，原因如下：

1. 谐振转换可保证不出现瞬态过电压
2. 施加到初级开关的反向电压是有限的，在大多数情况下，低于峰值输入电压

降低电源开关的电压要求容许选用有更高品质因数的硅技术：更低的传导损耗、更低的驱动电流（由于定期切换充电处理）和更高的密度。有些无源组件也有利于降低电压要求，同时提高工作频率。所有这些优势结合在一起使隔离式转换器功率密度超过了 $700\text{W}/\text{inch}^3$ （ $43\text{W}/\text{cm}^3$ ）。虽然这些属性建立了DC-DC转换器的高效功能，但宽输入电压变化仍然存在，需要在转换器拓扑结构级别加以解决。

尽管存在宽输入线电压变化，自适应单元都是一个动态架构，管理着两个DC-ZVS转换器，以其最高效率保持运行。图5是两个单元的方框图，显示了两个相同的转换器，其输出级永久并联连接，而初级可以通过开关 T_1 、 T_2 和 T_3 串联或并联配置连接到输入线路。两个耦合电感器共享同一个磁芯；而两个初级电源传送电路（powertrain）由相同的调制控制进行管理。这确保了单元之间的对称性，并保证了在任何给定条件下的电力分配（power sharing）。图6示出了一个完整扫描的整流线电压的输入电流和输出电压波形。在从 $85V_{\text{RMS}}$ 至 $145V_{\text{RMS}}$ 的下半部分范围期间， T_1 和 T_3 闭合，而 T_2 打开。初级为并联配置，它们分割总输入电流，同时共享相同的输入电压。采用有效占空比控制是为了按照功率因数校正的前端要求形成输入电流。但是请注意，还采用了有效调制角度（更多问题将在本文后面讨论）。

当输入电压超过 $145V_{\text{RMS}}$ 阈值（有一些滞后）并达到 $264V_{\text{RMS}}$ 的高极限时， T_1 和 T_3 打开，而 T_2 闭合。现在初级是串联连接的，它们有效地分割了线电压，同时共享输入电流。采用的占空比控制是为了获得像以往状态的功率因数校正；但是，由于是自适应单元，相对于两个转换器的每个初级，两个线电压范围是完全等效的。这为转换器的调制控制带来了几个不同的好处：占空比范围、电压范围、电流范围——两个单元配置有助于相同的转换器在各占一半的输入线电压范围内工作。由三个配置开关（ T_1 、 T_2 和 T_3 ）所代表的开销，很容易被两个单元转换器规模方面的优势所抵销，与单一单元架构相比，其中的输入电流和电压范围要求都降低了50%。配置开关可以进行传导优化，因为并不期望在现场不断地对它们重新配置，而且，相对于为转换器的电源传送电路和控制带来的显著优势，这是一个不大的代价。

Vicor PFM™模块的特点和优势

DC-ZVS引擎和自适应单元架构在产品和系统级有几个明显的优势。

1. 输入线电压对转换器效率的影响最小：这个电源传送电路设计最明显的优势也适用于散热设计，可以在通用AC范围内优化任何AC电源。散热系统要求不会随低输入电压而改变，因而能够节省大量成本。

2. 可使用降低额定值、较高优值的器件和组件：虽然这对整体效率有直接的影响，但它也意味着降低了热梯度，这反过来又意味着坚实性、更高的可靠性和最大的系统可用性。

3. 高频率、零电压开关：具有密度延伸到输出电压开关纹波的明显优势。在1MHz以上工作的PFM模块有助于实现低成本、高密度的滤波器。此外，零电压转换可减少集中于开关频率的谐波频谱噪声，有助于有效地调整滤波器。

4. 对称的线电流导通角：如图6所示，线电流始终处于有线电压和形状相应的相位。然而，对称调制角的引入可以避免在功率非常低时转换器工作。PFM模块能够有效地提供97%的可用功率（电压和电流峰值），避免在线路过零点（zero crossing）工作，在该点处理的功率本来就是浪费的损耗，并没有对提供给负载的功率有明显的贡献。

5. 优化线电流整形：通过专有技术，输入线电流形状减少了对瞬时输入线电压的依赖。因此，PFM模块的电流吸收不易受线电压的影响，从而减少了线路谐波的传播，改善了它所实现系统的整体电能质量。

6. 低电压输出：安全特低电压（SELV）输出标准得到满足，使PFM适用于关注安全（直接和间接与人接触）的应用。此外，高密度大容量电容可广泛用于这个电压水平。

7. 隔离式输出：通过磁耦合可在不使用光学组件的前提下保证绝缘，从而提高了随时间推移的设计可靠性。

8. 符合EMI和EMC标准：PFM模块符合所有适用的国际标准。PFM模块在各个层面融合了最先进的技术：拓扑结构、架构、高性能模拟控制、监管数字控制和纤薄、表面贴装封装。这些技术可以实现整个通用AC输入线路的高密度、优化的整流电源系统设计。

VI Brick AC-DC前端特点和优势

PFM为带功率因数校正的VI Brick隔离式AC前端提供电力，在纤薄（9.55mm）封装中集成了整流、滤波和瞬态保护功能。在高达100°C的基板温度条件下可提供330W的输出功率，100至120VRMS AC电源的满载效率超过90%，220至230V_{RMS} AC电源满载效率为92%。在85至264 VRMS范围内的输入电压，DC输出安全工作区不变。

尽管有滤波和瞬态抑制组件，模块仍实现了121W/in³（7.4W/cm³）的卓越密度，并提供3k_{VAC}，4.2k_{VDC}隔离的48V输出。整体效率和热增强型封装可将散热片需求降至最低。AC前端模块是一个最先进的转换器解决方案，可以用最少的电气和机械设计工作在任何系统中实现。

次级侧存储能量非常便利，不受线电压浪涌或干扰的影响。因此，可以实现具有良好可靠性的高密度63V额定保持电容器。

结论

由PFM模块供电的Vicor的AC前端模块可以实现高效率和高密度功率因数校正的整流和一致的通用输入电压范围；总谐波失真超过了EN61000-3-2的要求，同时高开关频率和谐振转换可简化外部滤波，并符合EMI标准。最先进的监管数字控制还可以减少AC线路谐波的传播，提高了系统和设施级的整体电能质量。纤薄、PCB安装VI Brick封装还包括一个符合EN55022 class B标准的高密度传导发射线路滤波器，使用很少的外部组件，而且符合EN61000-4-5标准的线路浪涌保护。

图1:
基于乘法器的经典
PFC整流控制

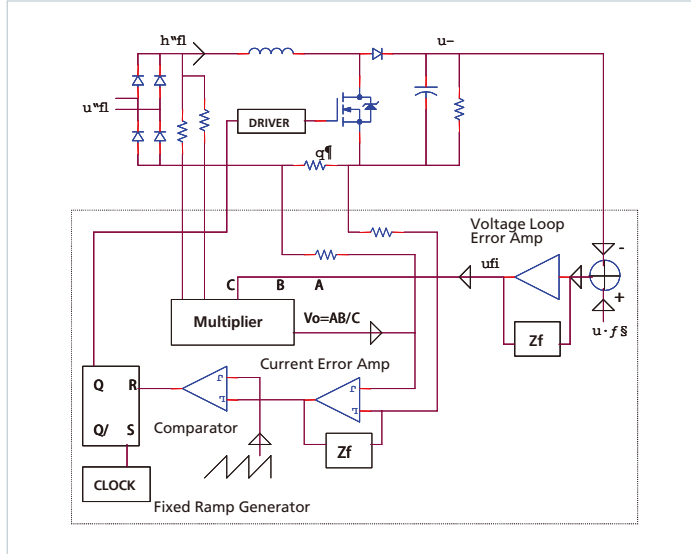


图2:
单周期控制 (可复位积
分器) PFC整流器控制

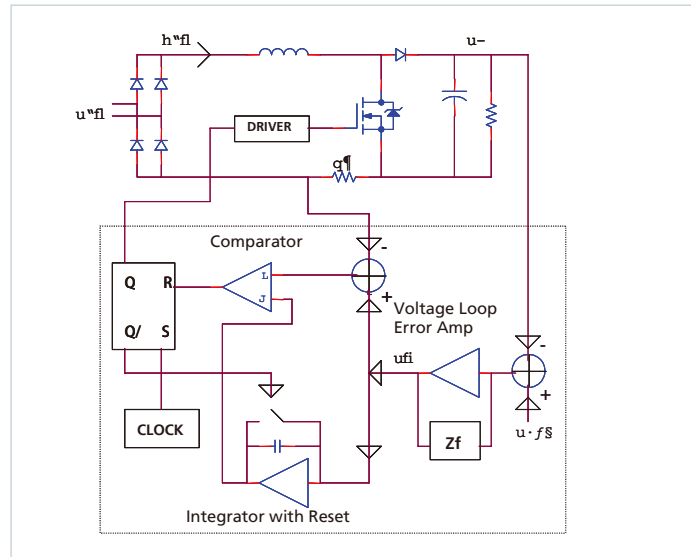


图3:
双钳位零电压
开关转换器原理图

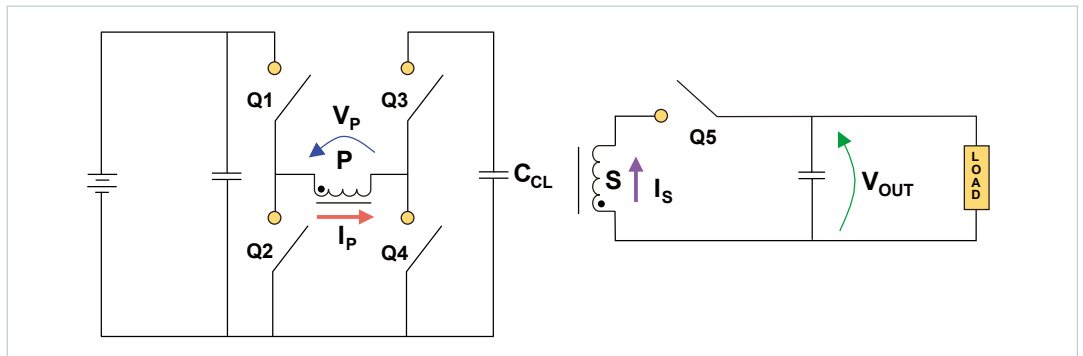


图4:
双钳位零电压开关
转换器拓扑结构波形

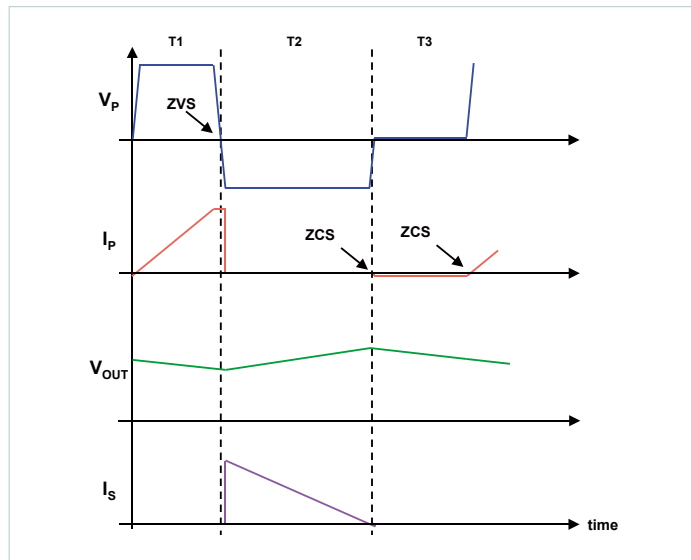


图5:
Adaptive Cell™动态
架构示意图

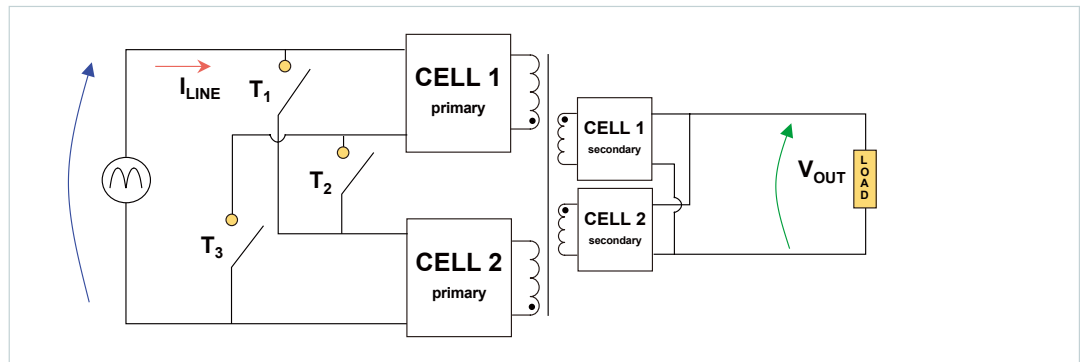
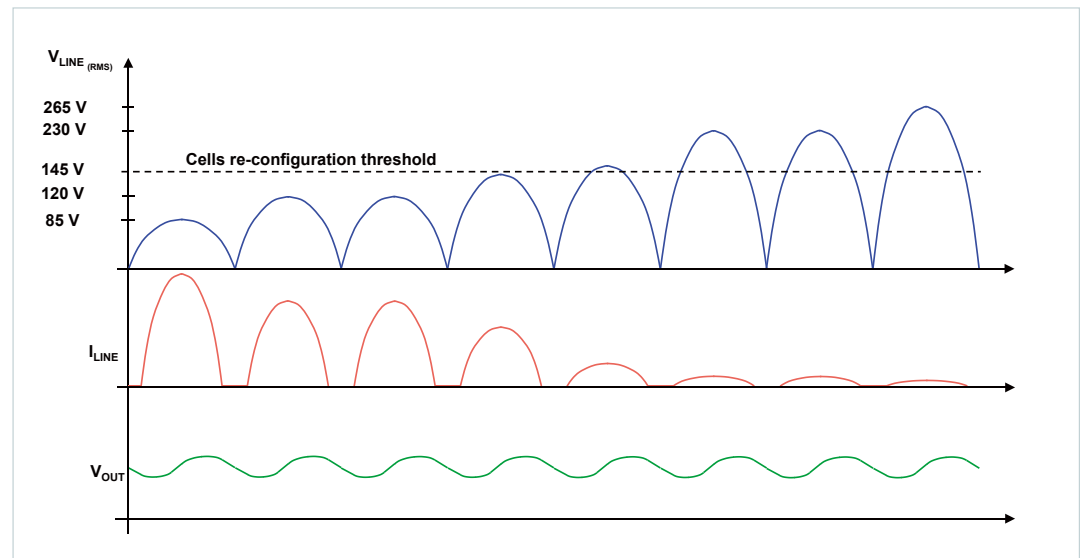


图6:
PFM™模块拓扑
结构波形



The Power Behind Performance