

飞兆半导体特稿
2009年3月

100% 高效电源的时代来临

作者：飞兆半导体公司技术主管 Laszlo Balogh

在1980年代中期，电源行业开始出现重大变革，离线式电源的设计方式和制造方式方发生了变化。电源设计人员没有充分了解到后续影响，就针对离线开关模式功率转换推出了功率因数校正(PFC)，这些新开发的PFC前端器件把电源的输入特性从高度非线性峰值整流变为仿真电阻性输入阻抗，而这种变革(电源如何看待其输入源)的重要意义，对于电网的利用和效率产生了深远的影响。

随着家庭和办公场所需要插入墙壁电源使用的电子设备不断增加，对电能的需求也前所未有的庞大。更重要的是，我们的现代科技改变了120V或230V AC电网供电的负载特性。虽然白炽灯泡和其它旧式电子设备看起来更像是电阻性负载，但电脑、所有遥控装置的备用电源，以及电池充电器等新设备给电力公司带来了一个大问题，而这些新设备已成为我们日常生活不可或缺的部分。由于这些新设备的尺寸比传统技术装置更小，因此都采用开关模式功率转换器。它们的输入级为峰值整流器电路，把AC源转换为DC电压，并提供能量存储。峰值整流器只在AC线路电压在峰值附近时消耗电流。

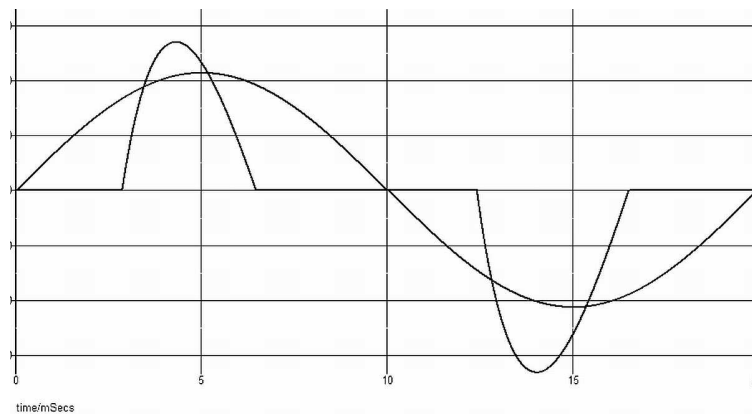


图1 采用峰值整流输入的典型线路电压和电流波形

结果是输入电流的导通角很小，而奇数倍线路频率的谐波幅度却很大。采用峰值整流的离线电源的功率因数 (PF) 一般在 0.5 到 0.7 之间。功率因数是输入电源使用效率的一个重要指标，其定义是负载消耗的有功功率 (单位：瓦特) 和视在功率 (单位：伏安 VA) 之比，后者是由电厂产生并供给负载的功率。

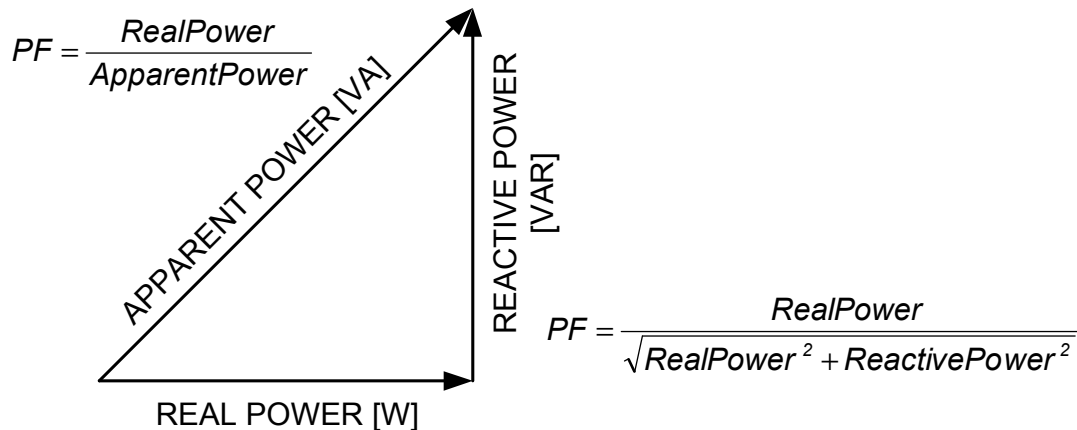


图 2 有功功率、无功功率和视在功率

一个功率因数是 0.7 的负载意味着为了使用 100W 的有功功率，发电机必需另外提供 100VAR 的无功功率。无功功率不但没有用，而且还给配电网带来额外的压力和损耗。低功率因数会逐步加大对发电量的需求，这早已是公认的事实，而电力公司也一直致力于解决这一问题。电网中电容性或电感性负载经常切入切出，以校正低功率因数。此外，有些供电商对功率因数低至 0.95 以下的用户征收罚款。

提高 PF 的另一个实际好处是可以从普通装置中汲取更多的能量，这是由于功率因数校正大大降低了输入电流的 RMS 值之故。一般采用 15A 断路器保护的普通 120V AC 的家庭能够为经功率因数校正的负载提供 1.8kW 功率，而在相同供电的情况下，采用峰值整流输入级的设备根据不同的负载电流波形和 PF，只能提供 1.3kW 到 1.5KW 的功率。

1980 年代中期，在几项因素的共同推动之下，富有才干的电源工程师着手解决电源本身的功率因数问题。其中最重要的因素是，众多采用尺寸更小、效率更高的开关模式电源的应用领域对于电能的需求暴涨。这种趋势主要见于电信和计算行业，随之又向工业、照明以及稍后的消费应用领域迅速蔓延。设备数量的庞大造

成供电方的功率因数显著下降，并给电网引入大量 3 阶和 7 阶谐波电流，这些问题都亟待解决。

这一领域的先锋们利用无源组件构建了首个功率因数校正电源，以期改进入电流波形的特性。然而，相比开关模式功率转换技术对尺寸的大幅减小，这些无源电路显得过于笨重，因此业界有待进一步创新，而开关模式功率因数校正器也即将问世。

从这一趋势伊始，升压转换器就是常见任务中最流行的转换器拓扑。升压拓扑如图 3 所示，是一种非常简单的功率级。它只需要一个电感、一个合适的开关晶体管和一个整流器二极管，很容易安置在整流器桥的输出与存储能量的电容之间，现在已为电源所采用，实现只需对现有设计做极少的改动即可。

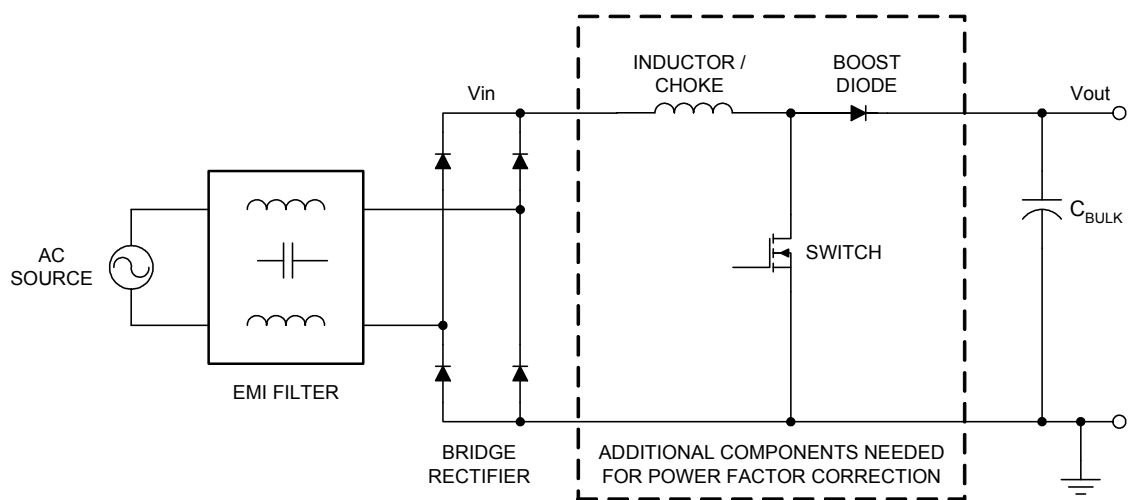


图 3 带升压功率因数校正器的电源输入原理简图

升压转换器之所以在功率因数校正中占主导地位，是因为它能够从任何低于它的稳定输出电压水平的输入电压中获取受控电流。这种特性尤其适合于仿真电阻性输入阻抗，从而产生理想的整功率因数 (unity power factor)。

为了获得趋近于一的功率因数，必须对升压转换器进行适当的控制。其输入电流应该完全跟踪输入电压的波形，就好像有一个电阻与干线相连一样，这时需要一个还没见于市场上的专用控制器。

和许多新兴技术一样，第一个 PFC 控制器也是采用分立式组件，一个振荡器、运算放大器和比较器来实现的。不过，该电路似乎相当复杂，而且也仍旧无法解决最佳控制算法的所有问题。直到 1990 年首款专用于功率因数校正应用的集成式 PWM 控制器 UC3854 推出，这种控制方面的瓶颈问题才终于得到满意的解决。UC3854 堪称拼图的关键之片，一举促使 PFC 转换器成为主流。

这种控制器让升压转换器在连续电流模式(CCM)下工作，并采用平均电流控制模式来实现输入电流与输入电压波形的一致性。电流环路的参考数值可通过瞬时输入电压和误差放大器输出相乘得到，这确保了转换器的电阻性输入阻抗和高功率因数。为了避免转换器在高输入电压时处理过多的输出功率，UC3854 还具有平方器电路和除法器电路，这种方法可保证电压环路增益保持恒定，不受输入电压变化的影响。UC3854 集成了这些主要功能，再加上常用保护和管理电路，为 PFC 控制器创建了行业标准。1990 年代后期，数种类似的控制器被推向市场，它们对 UC3854 的基本控制算法做了少许改进和变动。多家供应商提供优质控制器让 PFC 市场繁荣壮大起来。

随着市场不断成熟并向众多应用领域扩展，对更简单的实现方案的需求日益增长。在 UC3854 “复制”大战之后，新的控制技术和新的 IC 开始出现。低功耗、具成本效益的应用需要不同类型的控制器。为了以低功率水平获得满意的效率，升压转换器工作在连续和不连续电流模式的边缘，该技术消除了 CCM 模式中的主要损耗机制，即升压整流二极管因被迫转换而产生的反向恢复损耗。全新临界传导模式 (boundary conduction mode, BCM) 功率因数控制 IC 系列因应电源行业的新要求而面市。

一般而言，BCM PFC 控制器是最基本的 8 脚器件，往往只能以低成本提供极少的功能性。临界传导工作模式只需采用最简单的控制方法之一“恒定导通时间电压模式控制”即可运作良好，而这些器件正好利用这一原理，无需额外的电流环路，甚至也不必对输入电压进行频繁的监控。

近来，在提高功率因数校正器电路的效率方面，业界取得了显著成果，给功率级设计带来了各种变化。PFC 领域最引人注目的两大发展是采用了交错式 (interleaving) 方法，以及长久以来颇受关注但极少运用的无桥升压拓扑。

交错式技术的工作原理正好说明了它为什么能够在低压处理器电源中广获运用。而且，它也是一个同样可用于任何功率转换任务的普遍原理。交错技术让设计人员得以利用更小、更高效的相位相差 180 度的模块并联工作来获得更高的功率

级。这种技术的好处是消除了升压电感的纹波电流，使 PFC 电源中的 EMI 滤波器更小、更高效，而且由于功耗分散在更多的器件上，因此也更便于进行热管理。工作温度的降低还有益于效率的提高，这是因为电源中众多电阻性组件的温度系数为正。无桥升压功率因数校正器则通过减少转换器大电流路径上的串联半导体器件的数目来解决效率问题。

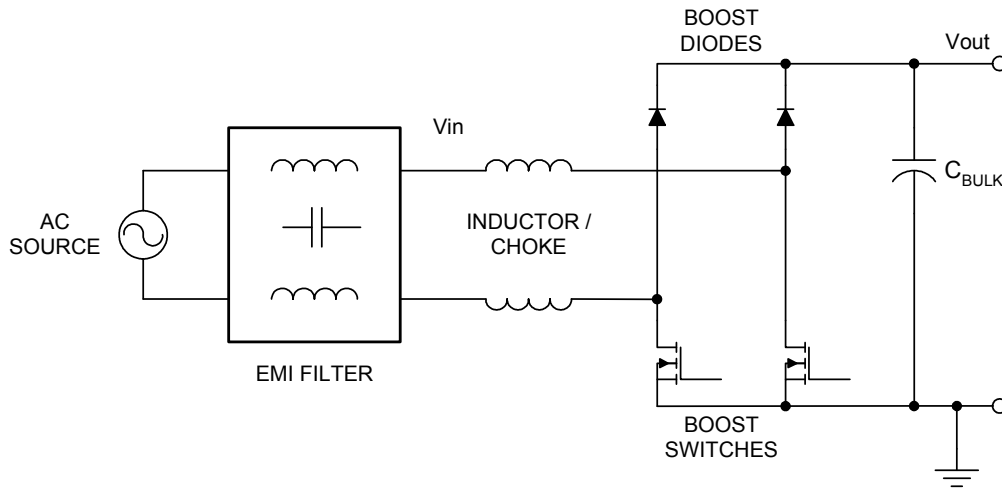


图 4 颇具潜力的无桥 PFC 实现方案 (简化)

传统上，输入整流桥中的二极管和升压功率级的 MOSFET 开关或整流器二极管在任何时候都是二者共同传输电感电流。如图 4 所示，顾名思义，无桥 PFC 中没有输入桥。它的功能与升压电路的开关及整流器功能相结合，在这种解决方案中，大电感电流只流经功率因数校正器的输入 AC 源和 DC 输出电压之间的两个半导体器件。其明显优势是大电流路径上的压降减小，从而效率得以提高。但由于这样一来半导体器件会更容易受到工业和乡村环境中常见的有害线路瞬变现象的影响，因此该拓扑也给设计人员带了一些挑战。另外，从控制点的角度来看，输入或输出电压的采样十分棘手，因为在无桥升压转换器中，这些电压不是以相同的接地面为参考的。在这种拓扑的某些变体结构中，升压开关的栅极驱动与控制器的输出信号之间连接时也会遇到类似的困难。在撰写本文时尚无专用于这种克服上述控制电路障碍之无桥 PFC 转换器的控制器。

所有电源工程师都明白，在提高效率方面，控制器能够做的就只有这么多。最终，转换器的效率取决于它的功率级设计，尤其是功率组件的特性。今天，PFC 拥有 5 亿美元的市场潜力，年增长率预计达 16%，超过了总体电源行业的平均增

长率。因此，分立式半导体器件供应商对功率因数应用中的功率 MOSFET 及其匹配的整流器二极管如此热衷关注，也是很顺理成章的事情。

类似于拓扑和控制器的发展历程，目前的解决方案中所用的功率半导体器件也远比 20 年前的产品优化程度更高。对功率 MOSFET 技术进行探研，可以发现这些器件在继续发展，致力于提供更低 $R_{DS(on)}$ 值和更好的品质因数 (Figure of Merit, FOM)。更高的单元密度可降低阻抗，使功率转换器的效率得以提高。经由减小 MOSFET 的电容，可以获得更快的开关速度和更低的开关损耗，而进一步的改进则集中在通过增强抗雪崩能力和防止 dv/dt 寄生感应导通来提高器件可靠性。

高压功率因数应用的升压整流器二极管也在经历相似的进步，设计人员可以在若干高性能超快速二极管系列中选择，最后使用 SiC 器件来获得最佳结果。对于这些器件，正向电压降和反向恢复特性是需要针对特定应用进行精心优化的主要参数。

自第一个功率因数校正器面世以来，器件技术和拓扑开发方面不断取得进步，使得 PFC 解决方案的效率稳定提高。今天，节能正在成为全社会的关注焦点，为了减少家庭和办公环境的“碳足迹”，采用功率因数校正技术已势在必行。先进 PFC 转换器的典型效率高达 98% 以上，可提供接近整功率因数的 PF，消除与配电网和电厂中的谐波电流及无功功率有关的额外损耗。

估算电力网中无功功率的真正成本是相当困难的，但毫无疑问的是，更好的负载功率因数在很大程度上有助于推动对“更环保”、更高效电能使用的追求。在美国，配电系统的效率估计在 93% 左右。如果我们在功率因数校正方面的努力能够减少无功功率，提高电网效率，则有源功率因数校正的净影响可视为超过 100% 的“视在” (apparent) 效率。