

在 PFC 电路中使用小型升压转换器提高功率密度

Sheng-Yang Yu

Systems Applications Engineer

Benjamin Genereaux

Systems Applications Engineer

LiehChung Yin

Systems Applications Engineer

引言

在 2000 年，服务器前端电源管理单元 (PSU) (通过交流输入产生 12V/48V 直流轨) 达到了约 10W/in³ 的功率密度，峰值效率 [1] 约为 85%。现在，许多服务器 PSU 都能够符合 80 Plus Platinum (94% 峰值) 和 80 Plus Titanium (96% 峰值) 的要求 [2]，后者和超高功率密度 (>90W/in³) 现已成为最低要求。

服务器 PSU 之所以能实现较高的功率密度水平，原因之一是半导体行业的技术创新。新的半导体制造工艺减少了器件的寄生效应并改善了品质因数 [3]，大大改进了功率耗散并帮助提高了功率密度。

拓扑和架构创新也是 PSU 实现高功率密度的原因。在新服务器 PSU 的交流/直流整流器级 (图 1) 应用图腾柱无桥功率因数校正 (PFC) 电路以及氮化镓 (GaN) 和碳化硅 (SiC) 等宽带隙器件，可实现优于其他桥式或无桥 PFC 拓扑的出色转换器效率 [4] [5]。虽然较高效率确实能够尽可能减少散热所需的面积，但仍需要大容量电容器 (图 1 中的 C_{BULK})，以便在交流压降后保持输出电压的稳定。要使稳压持续 10mS 以上，一个 3kW 服务器 PSU 需要 1.3mF 以上的总电容，这会占用至少 30% 的总体空间。为进一步提高功率密度，必须减小大容量电容。

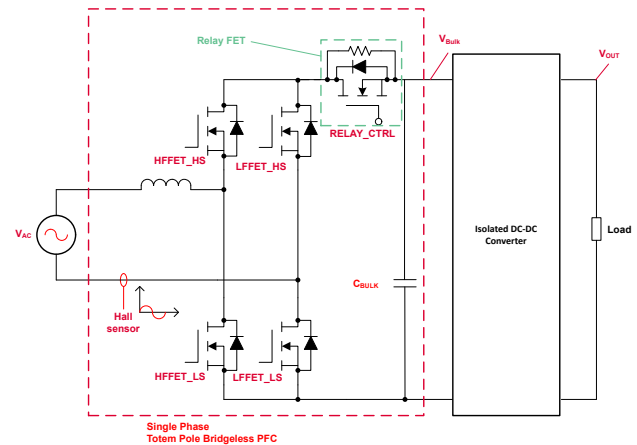


图 1. 服务器 PSU 方框图。

本文介绍了“小型”升压转换器 (仅在交流压降事件期间工作的紧凑型升压转换器) 的概念和工作原理，从而帮助减小大容量电容。采用小型升压转换器的 PFC 参考设计 [6] 的测试结果表明，910 μ F 大容量电容器 (相对于 1.3mF 电容器) 足以在交流压降后，在 3kW 的负载下将输出电压保持在 320V 以上超过 10 mS。

选择 C_{Bulk} 电容

如图 1 所示，服务器前端 PSU 一般由两级组成：交流/直流整流器级和隔离式直流/直流转换器级，峰值效率目标分别为 98.5% 以上和 97.5% 以上。为了使隔离式直流/直流级实现效率目标为 97.5% 以上，隔离式直流/直流转换器的工作输入电压范围 (V_{Bulk}) 通常必须限制在 320V 至 410V (V_{Bulk,max}) 以内。假定标称大容量电容器电压 (V_{Bulk,nom}) 为 390V，**方程式 1** 计算将 3kW 保持 10mS 所需的电容为：

$$C_{Bulk} = \frac{2P_{OUT} \times t_{holdup}}{V_{Bulk,nom}^2 - V_{Bulk,min}^2} = \frac{2 \times 3 \text{ kW} \times 10 \text{ mS}}{(390 \text{ V})^2 - (320 \text{ V})^2} \quad (1)$$

$$= 1.207 \text{ mF}$$

考虑到 V_{Bulk} 电压纹波和电容容差，如图 1 所示，系统需要一个电容超过 1.3mF 的电容器。请注意，在交流压降后，用于保持输出电压的电容器能量仅占正常工作期间存储在大容量电容器中的总能量的 32.6%。

在交流/直流整流器级与隔离式直流/直流转换器级之间放入小型升压转换器级（如图 2 所示）可以关闭旁路场效应晶体管 (FET) 并启用小型升压转换器，从而允许在交流压降后将 C_{BB} 从 C_{BULK} 充电至 320V 以上。V_{Bulk} 随后可大大低于 320V，因此在大容量电容器上将输出电压保持相同时间所需的电容更少。

假定在交流压降期间，V_{Bulk} 可通过小型升压转换器降至 240V (V_{Bulk,min})，使用**方程式 1** 得出所需的 C_{BULK} 为 635μF，占总电容器能量的 62%。

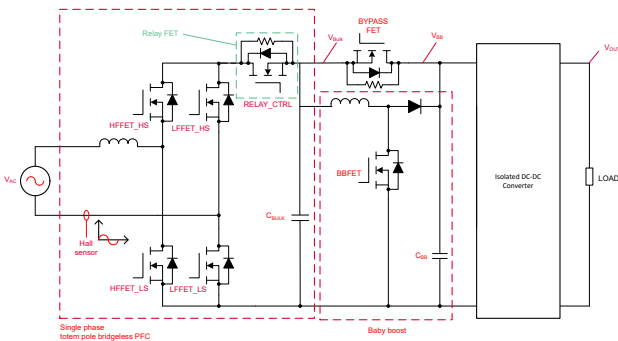


图 2. 采用小型升压转换器的服务器 PSU 方框图。

小型升压转换器设计注意事项

虽然小型升压转换器会减小大容量电容器的尺寸和电容，但尽可能减少转换器所占的空间有助于保持原有的高功率

密度目标。由于小型升压转换器的工作时间非常短（在交流压降事件期间），峰值工作电流和电压应力（而不是持续功率耗散）将决定功率级元件的选择。在 V_{Bulk,min} 下，电流应力应最大。选择升压二极管和金属氧化物半导体 FET (MOSFET)，用于在 V_{Bulk,min}（额定条件为 V_{Bulk,max}）下处理电流应力。小型升压电感器需要处理 V_{Bulk,min} 下的峰值电流。

方程式 2 确定小型升压电感器的电感：

$$L_{BB} = \frac{V_{Bulk,min} \times (V_{BB} - V_{Bulk,min})}{\Delta i_{LBB} \times F_{s, BB} \times V_{BB}} \quad (2)$$

其中 V_{BB} 是 C_{BB} 的电压，Δi_{LBB} 是小型升压电感器峰峰值纹波电流，F_{s, BB} 是小型升压转换器的开关频率。

由于目标是尽可能减小电感器的占用空间，因此**方程式 3** 假定峰峰值纹波电流等于 V_{Bulk,min} 和最大输出功率下的输入电流的两倍：

$$\Delta i_{LBB} = \frac{2P_{OUT}}{V_{Bulk,min}} = \frac{2 \times 3 \text{ kW}}{240 \text{ V}} = 25 \text{ A} \quad (3)$$

将 V_{BB} 稳定到 390V，并假定 F_{s, BB} = 500kHz，**方程式 2** 计算 L_{BB} 为 7.385μH。

由于封装的设计优先级高于功率耗散，因此最好使用饱和点较高的电感器磁芯；对于小型升压转换器，铁粉芯优于铁氧体磁芯。不过，铁粉芯的软饱和特性 [7] 会使小型升压电感器的设计有些困难。随着电流的增加，磁芯磁导率会下降（电感下降），因此必须确保在**方程式 2** 中计算的 L_{BB} 是 i_{LBB} 峰值下的电感。**方程式 4** 估算给定磁场下的电感：

$$L = A_L \times \mu_i \% \times N^2 \quad (4)$$

其中 A_L 是电感系数（亨利/匝数²），μ_i% 是给定磁场下初始磁导率的剩余百分比，N 是应用于电感器的匝数。

根据磁芯制造商，**方程式 5** 表示 μ_i% 与磁场之间的关系：

$$\mu_i \% = \frac{1}{(a + bH^c)} \quad (5)$$

其中 a、b 和 c 是常系数，H 是磁场。

假定小型升压电感器使用了磁性元件 0076381A7 [8] (Kool M μ Hf 磁芯 [9])，则常数 a、b 和 c 分别为 0.01、4.064 \cdot 10 $^{-7}$ 和 2.131。

根据安培定律，**方程式 6** 表示 H 与 N 之间的关系：

$$H = \frac{N \times I}{l_e} \quad (6)$$

其中 I 是穿过绕组的电流， l_e 是有效磁路长度（厘米）。

方程式 2 和 **方程式 3** 计算 L_{BB} ，**方程式 4**、**方程式 5** 和 **方程式 6** 将确定在给定磁场下达到电感所需的 N。

还可以通过迭代方式估算 N。假定给定电感器的电感在特定 H 和给定电流下工作，您可以使用 **方程式 4**、**方程式 5** 和 **方程式 6** 评估计算出的 H 是否接近于假定的 H_0 。

例如，如果您最初猜测当 $I = 25A$ 时， $H = 140Oe$ ，电感器电感为 $7.385\mu H$ ，**方程式 4** 计算得出的 $\mu_i\%$ 为 39.65%。然后，将 **方程式 2** 和 **方程式 3** 计算出的 L_{BB} 以及计算出的 $\mu_i\%$ 放入 **方程式 4**，然后得出 N 等于 20.8。

使用 **方程式 6** 和计算出的 N 验证 H，会得到 $H = 125.67Oe$ 。猜测的 H 和计算的 H 之间仍有误差，因此您可以再次猜测 H 并重新计算 H，直至误差可忽略不计。经过几次迭代后，您将找到正确的匝数（工作点）。使用迭代方法，当 $N = 18.009$ 时，H 等于 $108.75Oe$ 。电感在 25A 下为 $7.385\mu H$ 。

设计实施和测试结果

图 3 显示了德州仪器 (TI) 3.6kW 单相图腾柱无桥 PFC 参考设计，功率密度大于 $180W/in^3$ ，它使用了小型升压转换器 [6]。TI 的 **LMG3522R030** GaN 器件具有零反向恢复电荷，可尽可能减少图腾柱无桥 PFC 中的开关损耗。所有元件放置在小于 $68mm \times 121mm$ 封装尺寸中，最大元件高度为 32mm。该参考设计可实现大于 $180W/in^3$ 的功率密度和 98.7% 的峰值效率。所选 C_{BULK} 是 $910\mu F$ 450V 铝电容器。

虽然所需电容仅为 $635\mu F$ ，但电容低于 $910\mu F$ 的可用电容器的额定纹波电流不足以处理单相 3kW PFC 生成的纹波电流。两个 $1\mu F$ 450V 陶瓷电容器用作 C_{BB} ，很好地利用了大容量电容器下的空间。

此设计将磁性元件 0076381A7 磁芯应用于小型升压电感器，电感器上的线圈匝数为 23。0A 和 25A 下的电感分别为 $22.75\mu H$ 和 $9.1\mu H$ 。 $9.1\mu H$ 电感允许低于 25A 目标的峰值电流。

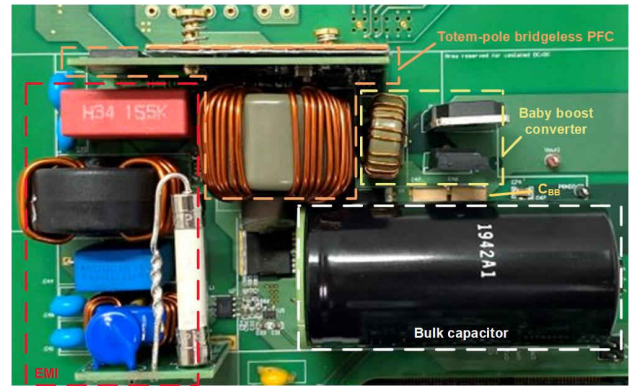


图 3. 功率密度大于 $180W/in^3$ 的 3.6kW 单相图腾柱无桥 PFC 参考设计。

图 4 显示了对 3kW PFC 参考设计中交流压降事件的测量。当交流电压下降至 0V（与交流电流一样）时， C_{BULK} 和 C_{BB} 持续向负载提供存储的能量。当 V_{BULK} 下降到 340V 时，旁路 FET 关闭，小型升压转换器开始工作，将 V_{BB} 提高至 380V。小型升压转换器持续工作，直至 V_{BULK} 下降至 240V。 V_{BB} 保持在目标隔离式直流/直流最小工作输入电压 320V 以上 14mS。

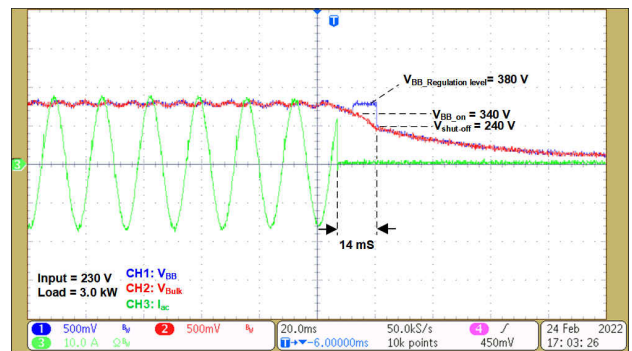


图 4. 交流压降事件中的波形。

参考文献

1. Jovanovic, Milan M. **Power Supply Technology – Past, Present, and Future**. Published in Power Conversion and Intelligent Motion China Conference for Power Electronics (PCIM China), Shanghai, China, March 21-23, 2007.
2. CLEARResult.com. **What is 80 Plus Certified?** 2022 年 5 月 6 日访问。
3. 德州仪器 (TI): **基于 GaN FET 的 CCM 图腾柱无桥 PFC**
4. L. Huber, Y. Jang and M. M. Jovanovic, "Performance Evaluation of Bridgeless PFC Boost Rectifiers," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 23, no. 3, pp. 1381-1390, May 2008.
5. 德州仪器 (TI) (日期不详) “**采用 C2000™ 和 GaN 的 4kW 单相图腾柱 PFC 参考设计。**” 德州仪器 (TI) 参考设计编号 TIDA-010203。2022 年 5 月 6 日访问。
6. 德州仪器 (TI) (日期不详) “**功率密度大于 180W/in³ 的 3.6kW 单相图腾柱无桥 PFC 参考设计。**” 德州仪器 (TI) 参考设计编号 PMP23069。2022 年 5 月 6 日访问。
7. Magnetics. “**Learn More about High Flux Cores.**” 2022 年 5 月 6 日访问。
8. “**0076381A7 Kool Mu Hf core.**” Magnetics data sheet. 2022 年 5 月 6 日访问。
9. Magnetics. “**Kool Mu Hf Material Curves.**” 2022 年 5 月 6 日访问。

重要声明: 本文所提及德州仪器 (TI) 及其子公司的产品和服务均依照 TI 标准销售条款和条件进行销售。建议客户在订购之前获取有关 TI 产品和服务的最新和完整信息。TI 对应用帮助、客户的应用或产品设计、软件性能或侵犯专利不负任何责任。有关任何其它公司产品或服务的发布信息均不构成 TI 因此对其的认可、保证或授权。

所有商标均为其各自所有者的财产。

© 2022 Texas Instruments Incorporated



ZHCT374

重要声明和免责声明

TI“按原样”提供技术和可靠性数据（包括数据表）、设计资源（包括参考设计）、应用或其他设计建议、网络工具、安全信息和其他资源，不保证没有瑕疵且不做任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、某特定用途方面的适用性或不侵犯任何第三方知识产权的暗示担保。

这些资源可供使用 TI 产品进行设计的熟练开发人员使用。您将自行承担以下全部责任：(1) 针对您的应用选择合适的 TI 产品，(2) 设计、验证并测试您的应用，(3) 确保您的应用满足相应标准以及任何其他功能安全、信息安全、监管或其他要求。

这些资源如有变更，恕不另行通知。TI 授权您仅可将这些资源用于研发本资源所述的 TI 产品的应用。严禁对这些资源进行其他复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。您应全额赔偿因在这些资源的使用中对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 的销售条款](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款/TI 产品随附的其他适用条款的约束。TI 提供这些资源并不会扩展或以其他方式更改 TI 针对 TI 产品发布的适用的担保或担保免责声明。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

邮寄地址：Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265

Copyright © 2022，德州仪器 (TI) 公司