

## Technical White Paper

# 数据中心服务器中电源单元的演变和支持 800V 直流架构的关键技术



Desheng Guo

### 摘要

随着 AI 服务器的功率要求呈指数级增长，数据中心的配电电压正在从 400V 交流电源转向 800V 直流电源。服务器中电源单元 (PSU) 是数据中心电源系统的核心组件。这些 PSU 负责将电网交流电 (AC) 转换为稳定的直流电 (DC)，为 IT 设备供电。本报告分析了服务器中 PSU 在从 400V 交流架构过渡到 800V 直流架构时的特性，并探讨了应对 AI 服务器行业新兴挑战的关键技术。

### 内容

<b>1 数据中心服务器中电源设备的发展</b> .....	<b>2</b>
<b>2 数据中心服务器中 PSU 的要求</b> .....	<b>2</b>
2.1 更高效率的需求.....	2
2.2 由 GPU 驱动的快速瞬态响应.....	2
2.3 智能及安全.....	2
<b>3 800V 直流架构中的 PSU 变化</b> .....	<b>3</b>
<b>4 塑造下一代 PSU 的关键技术</b> .....	<b>4</b>
4.1 氮化镓 (GaN) 可以降低开关能量损耗并提高效率.....	4
4.2 双向 GaN 成本降低的 Vienna PFC 解决方案.....	6
4.3 混合迟滞控制 LLC 可以帮助加快瞬态响应.....	6
4.4 高电压 ORing 控制支持 800V 热插拔.....	7
<b>5 结语</b> .....	<b>8</b>
<b>6 参考资料</b> .....	<b>8</b>

### 商标

C2000™ is a trademark of Texas Instruments.

80 PLUS® is a registered trademark of Clearesult Consulting Inc.

NVIDIA® is a registered trademark of NVIDIA Corporation.

EtherCAT® is a registered trademark of Beckhoff Automation GmbH.

所有商标均为其各自所有者的财产。

## 1 数据中心服务器中电源设备的发展

数据中心的电源架构正从交流配电转向直流配电；长期目标是开发与固态变压器 (SST) 集成的直流微电网。在最终愿景中，机架级 PSU 被 IT 托盘中的超紧凑型 IBC (中间总线转换器) 所取代。该转换器不需要直流输入下的功率因数校正 (PFC) 级，仅需要处理隔离和电压转换。但目前，更改数据中心的整个电源基础设施既困难又有风险，因为大多数传统设备仍然不支持 800V 直流架构。

功率侧板非常适合平稳且易管理地过渡至 800V 直流电源架构。如技术文章 [数据中心不断发展以满足 AI 的大规模功率需求](#) 所述 [请参阅参考文献 5]，图 1-1 展示了侧板将传统的 480V 交流电转换为 800V 直流电，因此具有 800V 直流输入的新计算机架可以在传统配电下继续使用 480V 交流电。此外，侧板中的 PSU 还包括传统机架级 PSU 的所有功能。因此，本技术白皮书重点介绍了侧板中的 PSU。

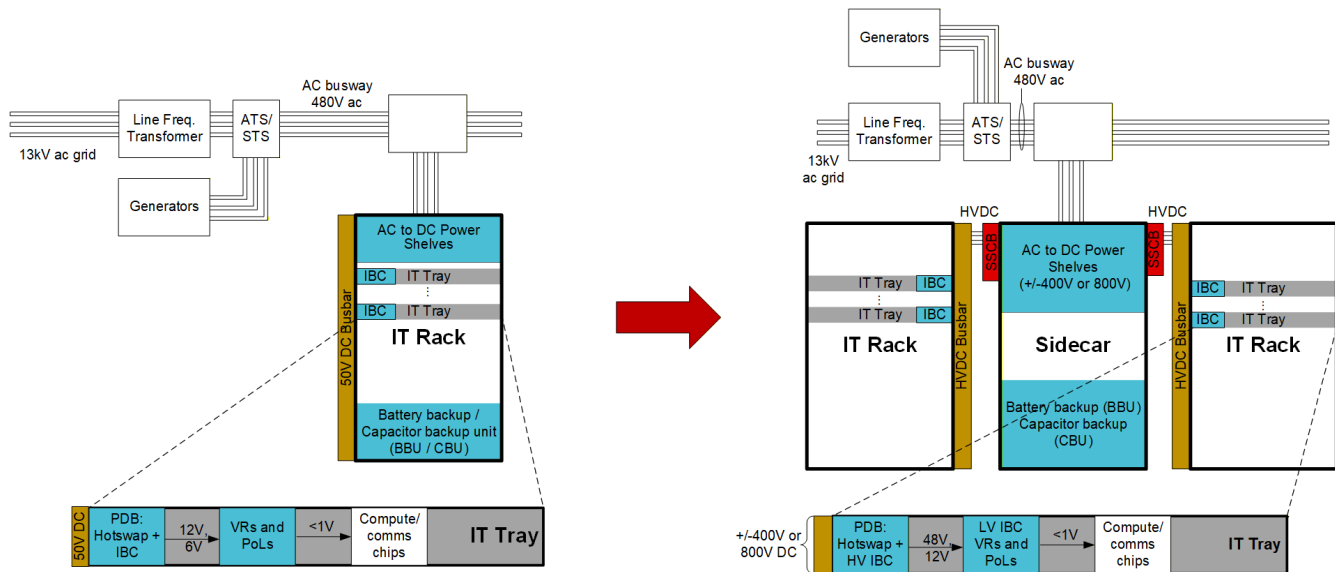


图 1-1. 数据中心电源架构发展

## 2 数据中心服务器中 PSU 的要求

PSU 作为电源转换系统的基础构建块，必须适应必要的电源架构转换并满足整个系统的所有需求。PSU 的核心要求是效率、稳定性及安全性。

### 2.1 更高效率的需求

与传统的 80 PLUS® 认证相比，现代数据中心对 PSU 规定的效率标准要严格得多。对于传统服务器中的 PSU，80 PLUS 认证中的最高标准是 *Ruby* 类，该类要求在半负载下的效率为 96.5%。在现代数据中心，PSU 使用随附的冷却风扇电源实现 98% 以上的峰值效率。

### 2.2 由 GPU 驱动的快速瞬态响应

在现代数据中心中，图形处理单元 (GPU) 是电力基础设施的主要负载。所有 GPU 都相互协同工作，这些 GPU 的功耗随着同步操作快速波动，在毫秒内在空闲和峰值负载之间切换 [请参阅参考文献 2]。

这些瞬态负载特性给 PSU 带来重大挑战。PSU 必须快速响应负载瞬态 (以保持输出电压)，并在瞬态期间保持所有并联 PSU 之间的电流共享 (以避免各个电源过载)。同时，PSU 必须通过内部储能对交流输入侧的这种功率波动进行水平调节。Mt. Diablo 400 规范中规定，负载瞬态期间的电压偏差必须严格控制 在输出电压的  $\pm 3\%$  范围内。此外，NVIDIA® 对巨大负载瞬变期间的交流波动提出了明确的要求。

### 2.3 智能及安全

现代 PSU 不再是独立组件。PSU 正在发展为智能的互联设备，实现实时的监控、管理和调整。这种转变将通信端口驱动到 CAN、EtherCAT® 或者以太网等快速端口。

至关重要的是，必须通过可靠的安全方法来保护这种智能，以保护电力系统免受恶意攻击。关键安全防护包括加密通信协议、带有数字签名的安全固件更新（以防止篡改）以及用来限制未经授权的配置修改的访问控制机制。

### 3 800V 直流架构中的 PSU 变化

侧板 PSU 设计与 800V 直流架构下的传统电源架 PSU 基本相同，但具有机架电源。也就是说，侧板 PSU 设计保留功率因数校正 (PFC) 输入级、隔离式直流/直流输出级，并使用反激级产生控制功率和待机功耗。然而，由于电源容量巨大以及输入和输出电压发生变化，侧板 PSU 的结构也存在一些变化。这两种结构如图 3-1 和图 3-2 所示，下面列出了这些结构之间的详细比较。

在传统电源架 PSU 中：

- 该 PFC 拓扑是采用 SiC 或者 GaN 的单个交流图腾柱 PFC。
- 直流/直流级主要使用 600V 或 650V 电源开关。
- 辅助电源使用 400V 直流链路。通常，这是一种单开关反激拓扑。
- ORing 电路采用 48V 电压额定值。
- 通信接口不需要隔离。
- 冷却风扇可以由 48V 主输出供电。

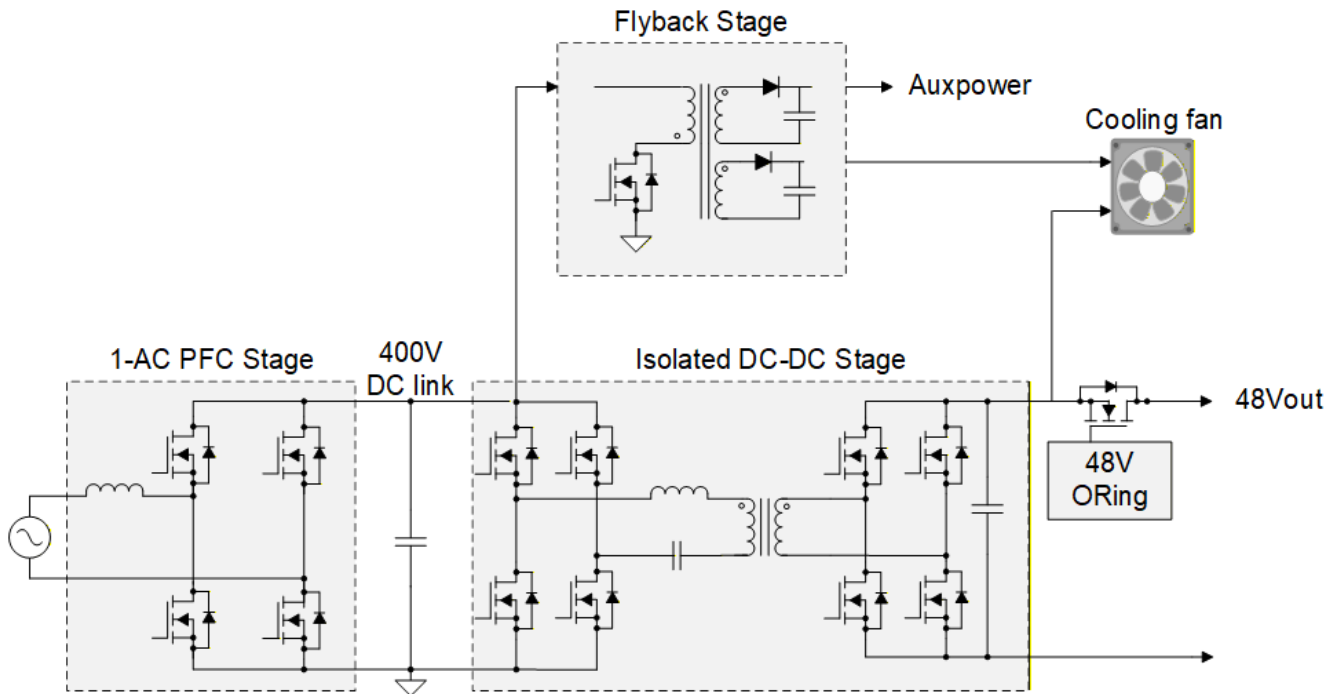


图 3-1. 传统电源架 PSU 方框图

在 800V 侧板 PSU 中：

- PFC 级主要使用 3 相交流 Vienna PFC，因此电源开关主要是背对背或双向的。
- 直流/直流级需要 1200V SiC 或者 650V 串行拓扑来处理 800V 直流链路电压。
- 辅助电源主要需要 1200V 器件或者串行反激式电源。
- ORing 电路必须使用专用偏置电源来处理 800V 额定值。
- 通信接口可能需要同 800V 汇流条隔离。
- 由于 800V 电压过高，冷却风扇无法使用主输出。

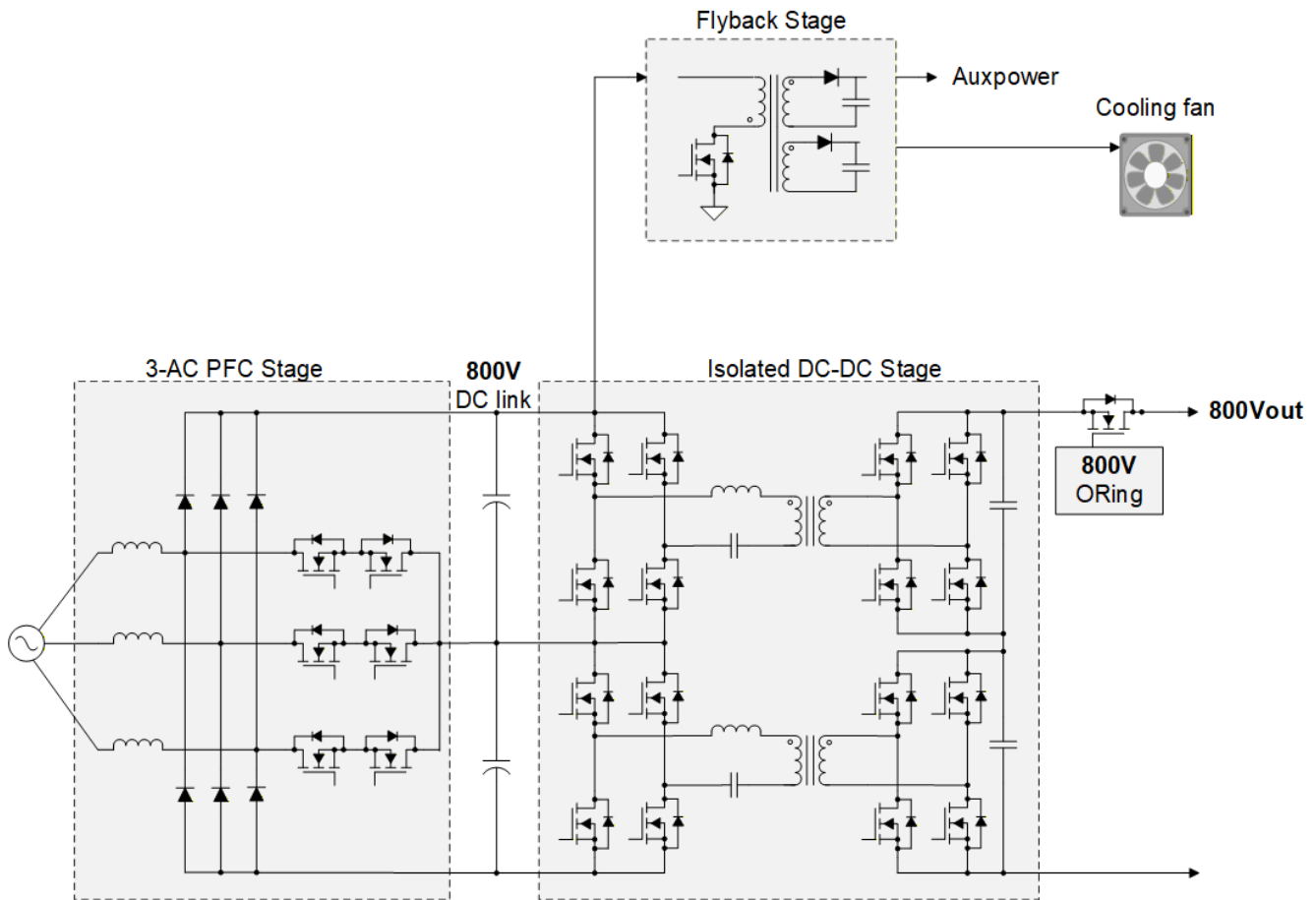


图 3-2. 800V 直流侧板 PSU 方框图

## 4 塑造下一代 PSU 的关键技术

### 4.1 氮化镓 (GaN) 可以降低开关能量损耗并提高效率

与传统硅 (Si) 器件相比，GaN 和碳化硅 (SiC) 均通过提供更高的效率来变革 PSU 设计。与 SiC 相比，GaN 可以进一步降低开关能量损耗，而 GaN 适用于高开关频率。

图 4-1 比较了德州仪器 (TI) GaN 技术与业界先进的 SiC 和超结 Si 器件。比较结果表明，TI 的 GaN 可大幅降低开关能量损耗，并实现更高的工作频率 [请参阅参考文献 6]。

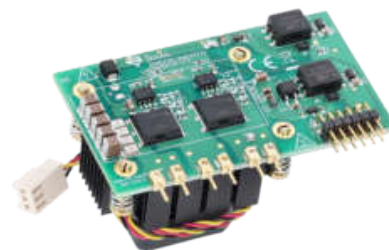
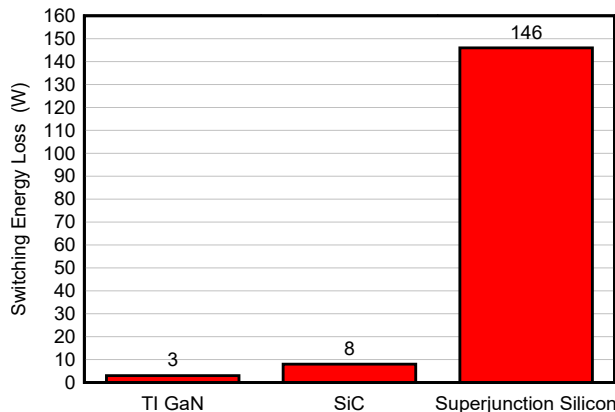


图 4-1. 开关能量损耗比较

这种效率的提高在转换导通模式 (TCM) 图腾柱 PFC 参考设计 (图 4-2 中的 PMP40988) 中得到了证明, 该设计利用了 LMG3526 GaN 器件的零电压检测 (ZVD) 功能, 而另一种设计 (PMP23475) 利用了零电流检测 (ZCD)。这两种设计的峰值效率均超过 99.0% [请参阅参考文献 8 和 10]。

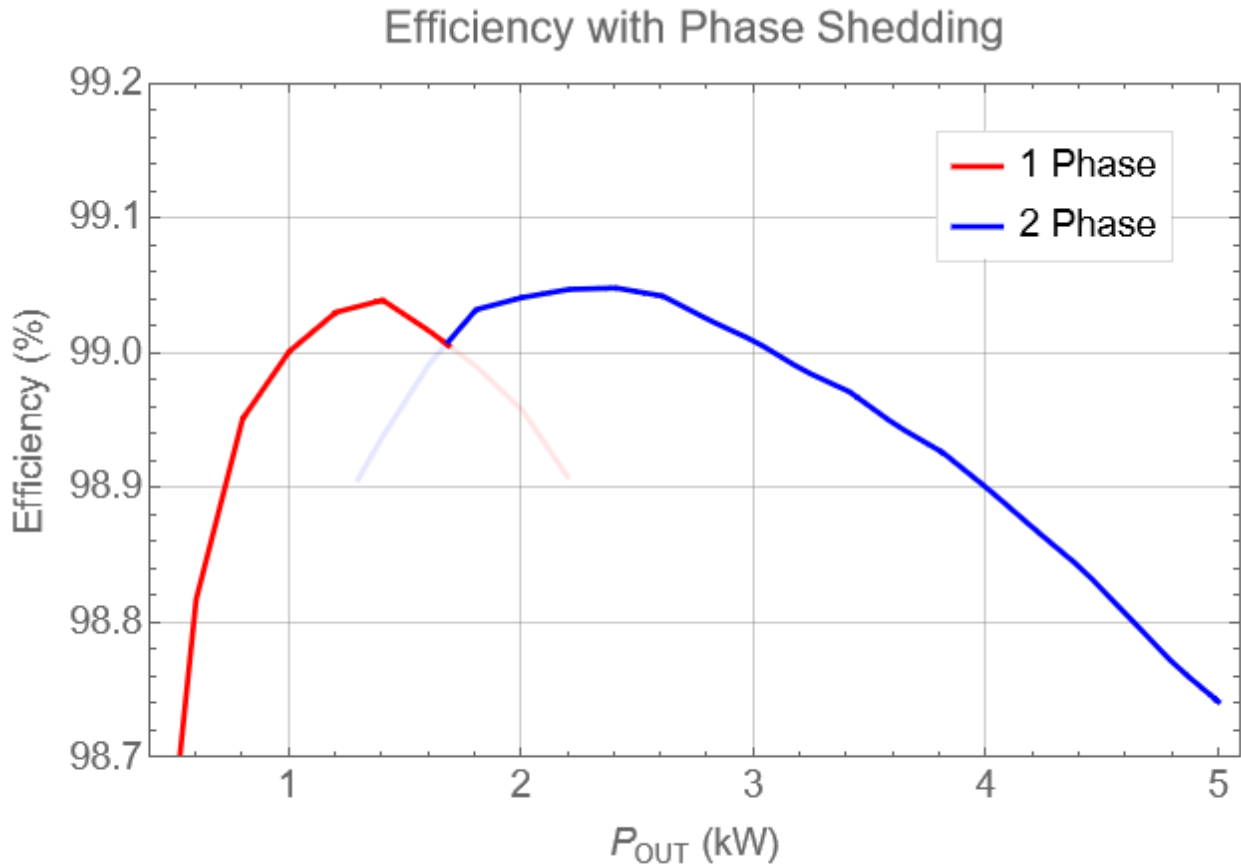


图 4-2. PMP40988 的效率

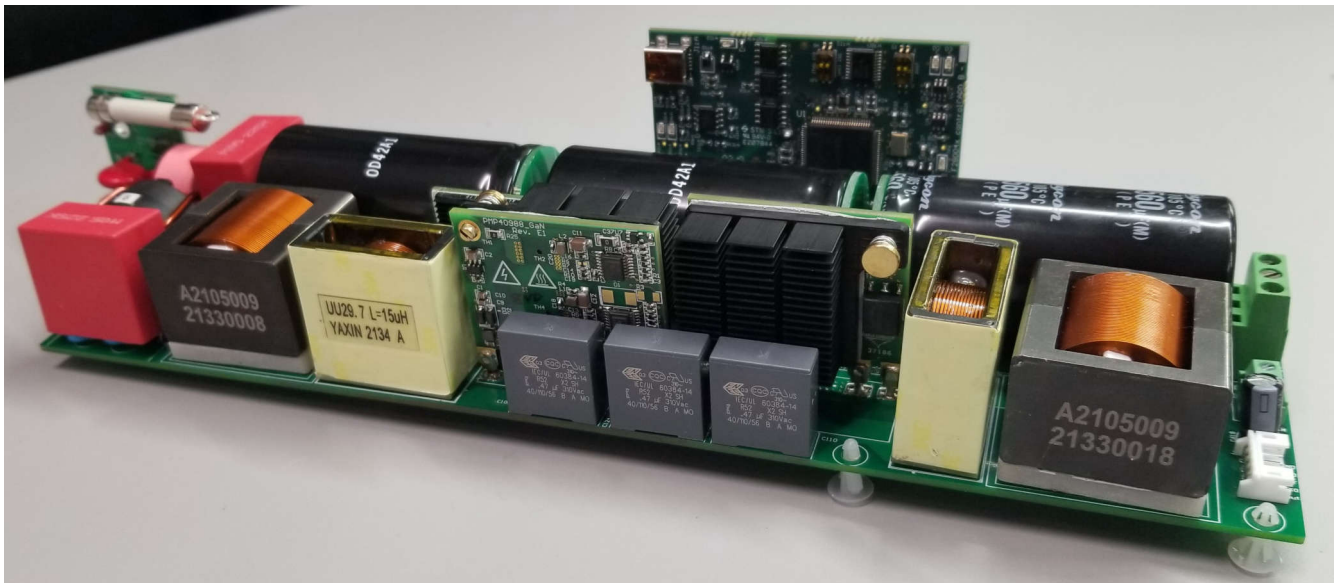


图 4-3. PMP40988 采用 ZVD GaN 的 TCM 图腾柱 PFC

## 4.2 双向 GaN 成本降低的 Vienna PFC 解决方案

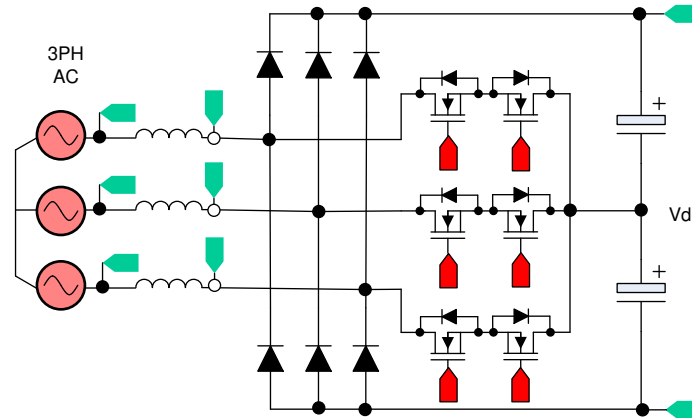


图 4-4. TIDM-1000 3 相 Vienna PFC 整流器

在 800V 直流架构中，3 相 Vienna PFC 拓扑广泛应用于 PFC 级（请参阅图 4-4），因为这种拓扑将功率器件上的电压应力降至直流链路电压的一半，因此可使用成熟的 650V MOSFET，并且与两级转换器相比，开关损耗更低 [请参阅参考文献 7 和 12]。

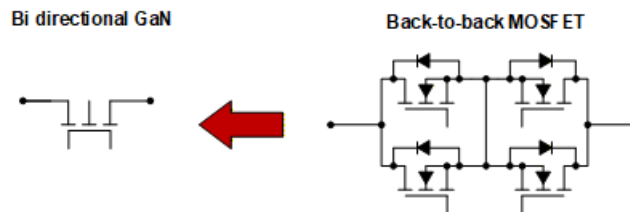


图 4-5. 一个 BDG 等同四个背对背 Si MOSFET

在 Vienna PFC 电路中，电源开关与背对背配置串联使用，以在两个方向上处理交流电。但是，双向 GaN (BDG) 是真正的常关单片双向开关，可以直接在两个方向上处理电流，因此 BDG 可以等于四个具有相同导通电阻的 Si 或 SiC MOSFET，如图 4-5 所示。这一创新具有巨大的潜力，但需要进一步的市场验证。TIDA-01606 参考设计演示了 BDG 在 T 型转换器中的应用，并提供支持此应用潜力的初步数据 [请参阅参考文献 3]。

## 4.3 混合迟滞控制 LLC 可以帮助加快瞬态响应

在直流/直流级，电感器-电感器-电容器 (LLC) 的谐振拓扑通常是实现高效率和高功率密度的首选。但是，由于控制环路中存在可变双极点，传统直接频率控制 (DFC) 很难增强控制带宽。混合迟滞控制 (HHC) 通过调节每个开关周期的能量传输，解决了这一限制，同时使用简单的比例积分微分 (PID) 补偿器实现快速的动态性能。

如图 4-6 所示，HHC 环路将充电模式控制和直接频率控制与内部谐振电容器电压 (VCR) 环路上的补偿斜率相结合。图 4-7 比较了本设计中使用 DFC 和使用 HHC 的波特图。测试结果表明，混合迟滞控制 LLC 在宽输入电压范围内保持更好的负载瞬态响应，而由于双极点的影响，采用 DFC 的环路带宽很难进行补偿。PMP41081 的参考设计展示了 HHC 方法，更多细节见参考文献 1、4 和 11。

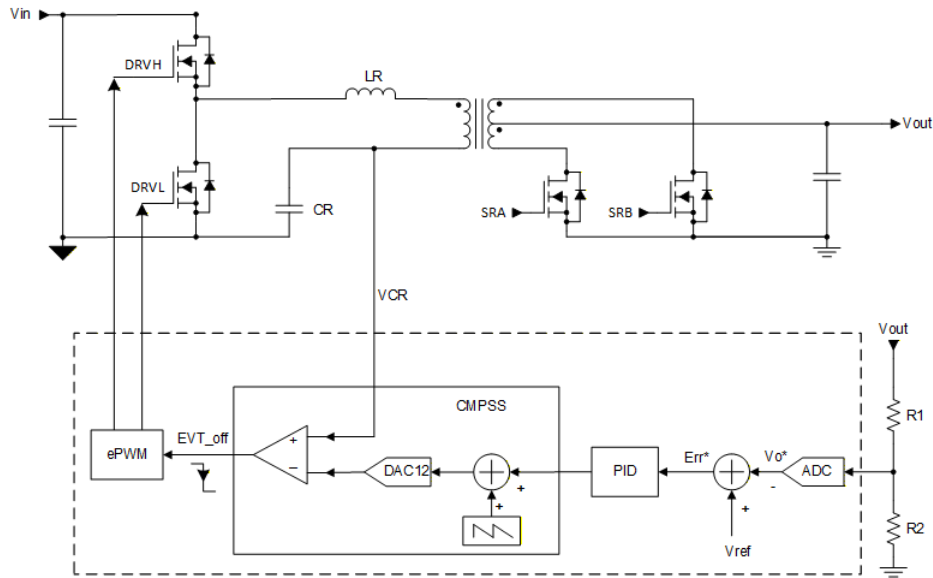
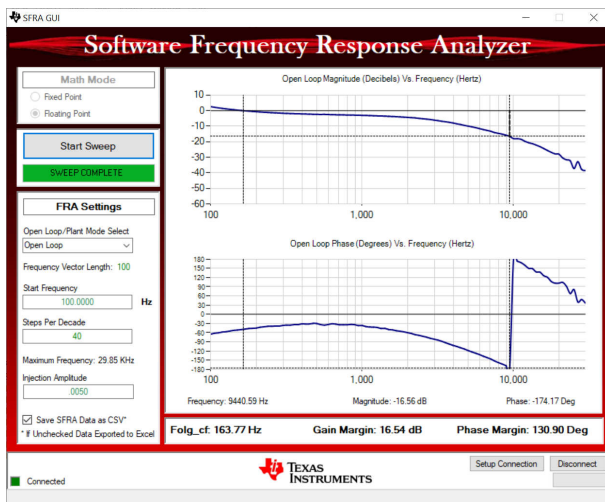
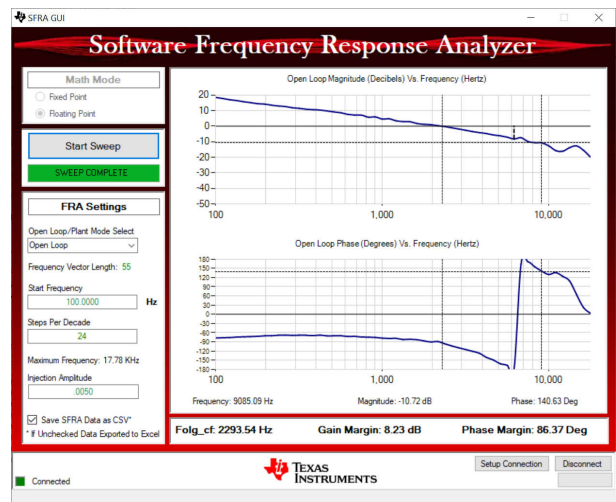


图 4-6. 具有 HHC 环路的 LLC



A. 采用 DFC 的波特图。



B. 采用 HHC 的波特图。

图 4-7. DFC 与 LLC 之间的波特图比较

#### 4.4 高电压 ORing 控制支持 800V 热插拔

从 48V 汇流条迁移到  $\pm 400V$  或  $\pm 800V$  汇流条可以通过降低电流来减少铜损耗。然而，这种迁移也给 ORing 电路带来了挑战，该电路必须能够检测和承受更高的电压。图 4-8 展示了采用低压 ORing 控制器的 400V 直流高侧 ORing 设计。在此设计中，电压检测由电压钳位电路处理，控制器的偏置电源由隔离式电源供电，从而可更大程度地降低静态功耗。



## 重要通知和免责声明

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、与某特定用途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安全、安保法规或其他要求。

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 产品的相关应用。严禁以其他方式对这些资源进行复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。对于因您对这些资源的使用而对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，您将全额赔偿，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 销售条款](#)、[TI 通用质量指南](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款或 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。除非德州仪器 (TI) 明确将某产品指定为定制产品或客户特定产品，否则其产品均为按确定价格收入目录的标准通用器件。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

版权所有 © 2026，德州仪器 (TI) 公司

最后更新日期：2025 年 10 月