

## Technical White Paper

# データセンターサーバーの電源ユニットの進化と、800V DC アーキテクチャをサポートする主要技術



Desheng Guo

### 概要

AI サーバーの電力要件が指数関数的に増加するのに伴い、データセンターの分配電圧は 400V AC 電力から 800V DC 電力に移行しています。サーバー内の電源ユニット (PSU) は、データセンターの電源システムのコア コンポーネントです。これらの PSU は、送電網の交流 (AC) を、IT 機器に電力を供給する安定した直流 (DC) に変換する役割を果たします。このレポートでは、400V AC アーキテクチャから 800V DC アーキテクチャへの移行過程でサーバーが進化する中で、サーバー内の PSU の特性を分析し、AI サーバー業界で新たに登場した課題に対処する主要なテクノロジーについて説明します。

### 目次

1 データセンターサーバーにおける電源ユニットの進化.....	2
2 データセンターサーバー内の PSU の要件.....	2
2.1 より高い効率性の要求.....	2
2.2 GPU による高速過渡応答.....	2
2.3 インテリジェンスとセキュリティ.....	3
3 800V DC アーキテクチャにおける PSU の変動.....	3
4 次世代 PSU を形作る重要なテクノロジー.....	4
4.1 GaN (窒化ガリウム) は、スイッチング エネルギーの損失低減と効率の向上に貢献します.....	4
4.2 双方向 GaN コストダウン Vienna PFC ソリューション.....	6
4.3 ハイブリッドヒステリシス制御の LLC により、迅速な過渡応答が可能.....	7
4.4 高電圧 ORing 制御により、800V ホットスワップをサポート.....	8
5 まとめ.....	8
6 参考資料.....	8

### 商標

C2000™ is a trademark of Texas Instruments.

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

NVIDIA® is a registered trademark of NVIDIA Corporation.

EtherCAT® is a registered trademark of Beckhoff Automation GmbH.

すべての商標は、それぞれの所有者に帰属します。

## 1 データセンター サーバーにおける電源ユニットの進化

データセンターの電源アーキテクチャは、AC 配電から DC 配電へと移行しています。長期的目標は、半導体トランス (SST) を内蔵した DC マイクログリッドを開発することです。最終的なビジョンでは、ラックレベルの PSU は IT トレイの超コンパクト IBC (中間バスコンバータ) に置き換えられます。このコンバータは、DC 入力の下に力率補正 (PFC) 段を必要とせず、絶縁と電圧変換の処理のみを必要とします。しかし、現時点では、従来の機器のほとんどがまだ 800V DC アーキテクチャをサポートしていないため、データセンター内の電力インフラ全体を変更することは困難でリスクが伴います。

このパワー サイドカーは、800V DC 電源アーキテクチャへのスムーズで管理しやすい移行に最適です。技術記事『データセンターは AI の大規模な電力ニーズに合わせて進化している』[参考資料 5 を参照] に記載されているように、図 1-1 は、サイドカーが従来の 480V AC を 800V DC に変換するため、800V DC 入力の新しいコンピューティング ラックは、従来の電力配分で 480V AC を引き続き使用できます。さらに、サイドカー内の PSU には、従来のラックレベル PSU のすべての機能が含まれています。したがって、このテクニカル ホワイト ペーパーでは、サイドカー内の PSU に焦点を当てています。

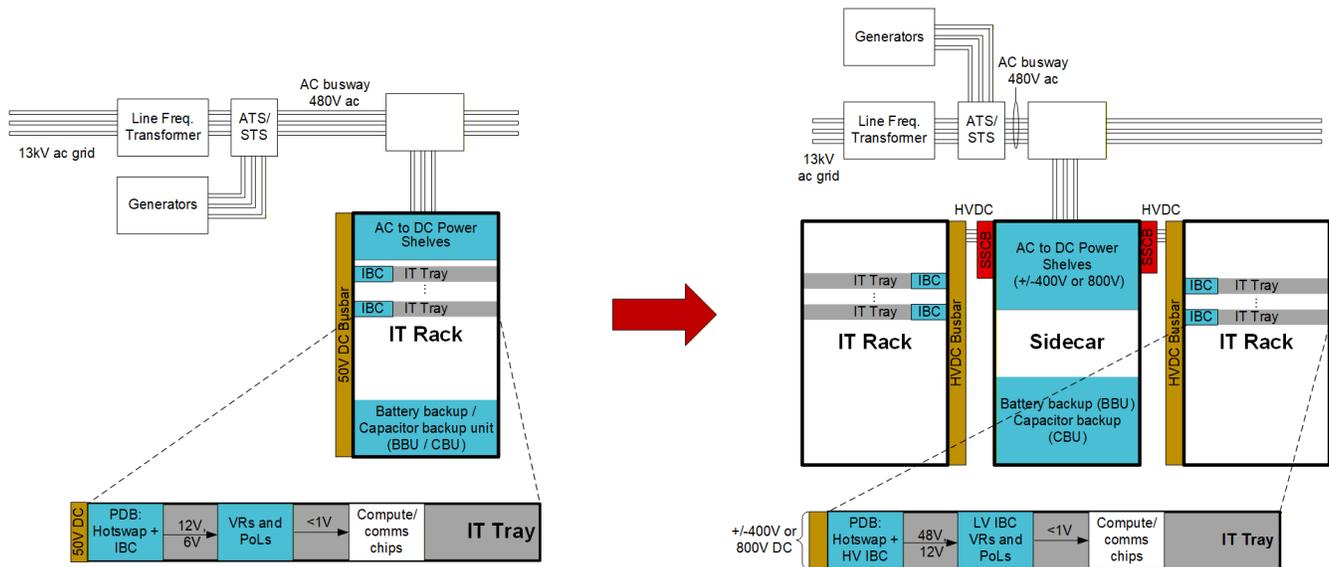


図 1-1. データセンターの電源アーキテクチャの進化

## 2 データセンター サーバー内の PSU の要件

PSU は、電力変換システムの基本的な構成要素であるため、必要な電源アーキテクチャの遷移に適合し、システム全体のすべての要求を満たす必要があります。PSU の中核的な要件は、効率、安定性、セキュリティです。

### 2.1 より高い効率性の要求

現代のデータセンターでは、従来の 80 PLUS® 認証に比べて、PSU に対してはるかに厳格な効率基準が課されています。従来型サーバーの PSU の場合、80 PLUS 認証の中で最高の標準は「Ruby」クラスであり、半負荷時に 96.5% の効率が求められます。最新のデータセンターでは、PSU は内蔵の冷却ファン電源を使用して、98% 以上のピーク効率を達成しています。

### 2.2 GPU による高速過渡応答

最新のデータセンターでは、グラフィックス処理ユニット (GPU) が電力インフラの主な負荷です。すべての GPU は互いに協調して動作しており、同期動作でこれらの GPU の消費電力は急速に変動し、アイドル負荷とピーク負荷をミリ秒以内に切り替えます (2 を参照)。

このような過渡負荷特性は、PSU に大きな課題をもたらします。PSU は負荷過渡時には迅速に応答して出力電圧を安定化させ、過渡時には並列接続したすべての PSU 間での電流共有を維持し、個別の電源の過負荷を防止する必要があります。同時に、PSU は内部エネルギー ストレージを使用して AC 入力側でこの電力変動を平準化する必要があります。

す。Mt. Diablo 400 仕様では、負荷過渡時の電圧偏差を出力電圧の  $\pm 3\%$  以内で厳密に制御する必要があります。さらに、NVIDIA® は、巨大な負荷過渡時の AC 変動に関する明確な要件を提示しています。

### 2.3 インテリジェンスとセキュリティ

最新の PSU は、もはやスタンドアロン コンポーネントではありません。PSU は、リアルタイムの監視、管理、調整を可能にする、インテリジェントなネットワーク接続型デバイスへと進化しています。この変換により、通信ポートは CAN、EtherCAT®、イーサネットなどの高速ポートへと移行しています。

重要なのは、このインテリジェンスは、悪意のある攻撃から電力システムを保護するための強力なセキュリティ手法によって保護される必要があるということです。主要なセキュリティ保護手段には、暗号化された通信プロトコル、デジタル署名による安全なファームウェア更新 (改ざん防止)、不正な構成変更を制限するアクセス制御メカニズムなどがあります。

## 3 800V DC アーキテクチャにおける PSU の変動

サイドカーの PSU 設計は、800V DC アーキテクチャの従来の電源シェルフ PSU とほぼ同じですが、ラック電源を採用しています。つまり、サイドカーの PSU 設計では、力率補正 (PFC) 入力段と絶縁型 DC/DC 出力段を維持しており、フライバック段を使用して制御電力とスタンバイ電力を生成します。ただし、サイドカーの PSU 構造にも、大電力容量や入出力電圧の変化によるいくつかの変動があります。これら 2 つの構造を図 3-1 と図 3-2 に示します。以下に、これらの構造の詳細な比較を示します。

従来型の電源シェルフ PSU の場合:

- PFC トポロジは、SiC または GaN を採用した単一の AC トーテム ポール PFC です。
- DC - DC 段は、ほとんどの場合 600V または 650V のパワー スイッチを使用します。
- 補助電源は 400V DC リンクを使用します。一般的に、これはシングル スイッチ フライバックです。
- ORing 回路は 48V 定格用です。
- 通信インターフェイスは絶縁は必要ありません。
- 冷却ファンには、48V メイン出力から給電することができます。

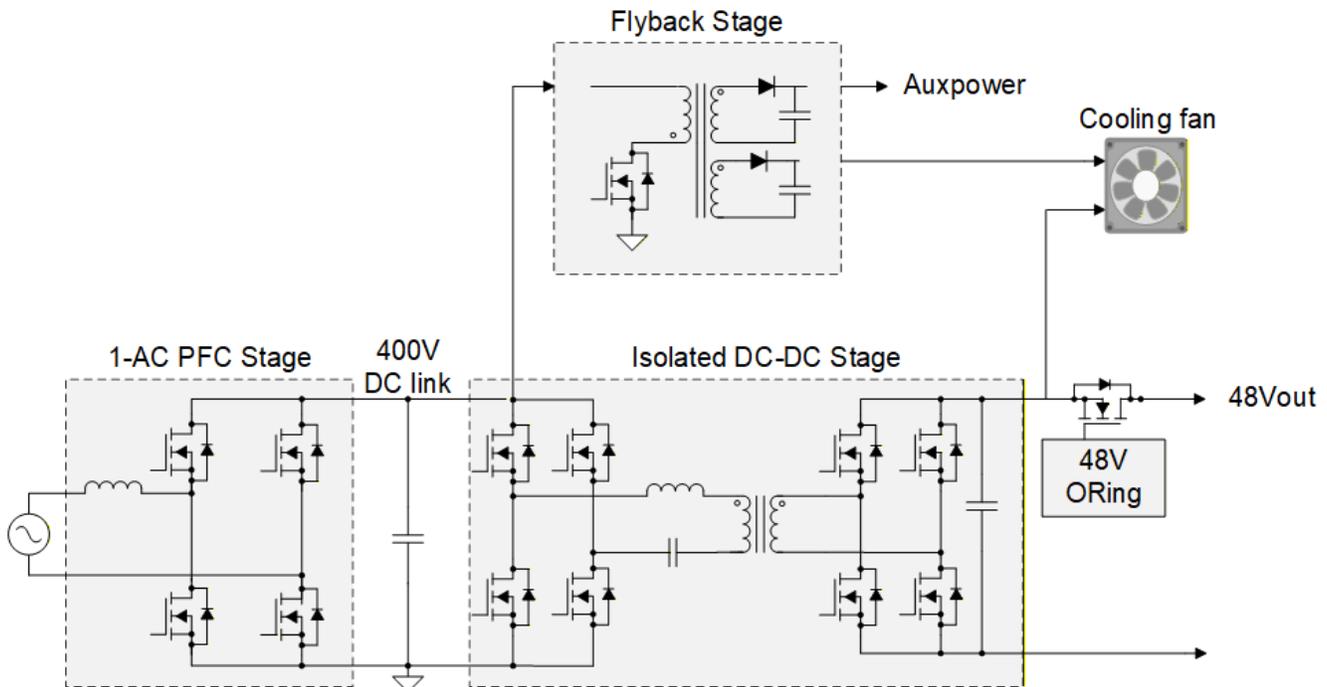


図 3-1. 従来型のパワーシェルフ PSU のブロック図

800V サイドカー PSU の場合:

- PFC 段は、主に 3 相 AC Vienna PFC を使用しているため、パワー スイッチのほとんどは双方向です。

- DC - DC 段は、800V の DC リンク電圧を処理するために、1200V の SiC または 650V のシリアルトポロジを必要とします。
- 補助電源には、ほとんどの場合、1200V デバイスまたはシリアル フライバックが必要です。
- ORing 回路は、専用のバイアス電源を使用して 800V の定格を取り扱う必要があります。
- 通信インターフェイスでは、800V バス バーによる絶縁が必要になる可能性があります。
- 800V は高すぎるため、冷却ファンはメイン出力を使用できません。

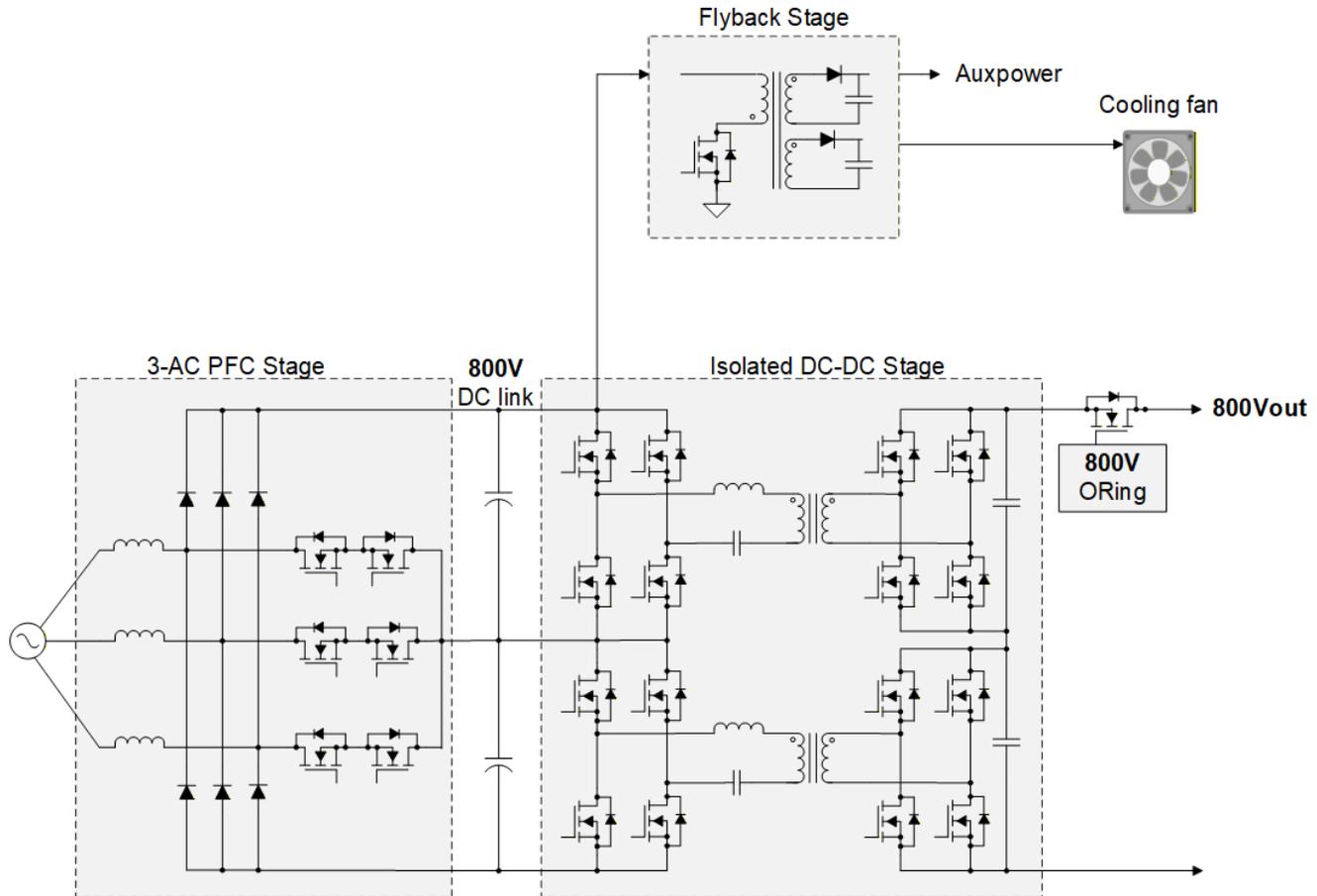


図 3-2. 800V DC サイドカー PSU のブロック図

## 4 次世代 PSU を形作る重要なテクノロジー

### 4.1 GaN (窒化ガリウム) は、スイッチング エネルギーの損失低減と効率の向上に貢献します

GaN とシリコン カーバイド (SiC) はどちらも、従来のシリコン (Si) デバイスに比べて効率が高くなり、PSU 設計に進化をもたらしています。GaN は、SiC よりもスイッチング エネルギー損失をさらに低減でき、GaN は高いスイッチング周波数に適しています。

図 4-1 は、テキサス インストルメンツ (TI) の GaN テクノロジーを、業界をリードする SiC およびスーパージャンクション Si デバイスと比較したものです。これらの比較から、テキサス インストルメンツ (TI) の GaN がスイッチング エネルギー損失を大幅に低減し、より高い動作周波数を実現できることが示されています (参考資料 6 を参照)。

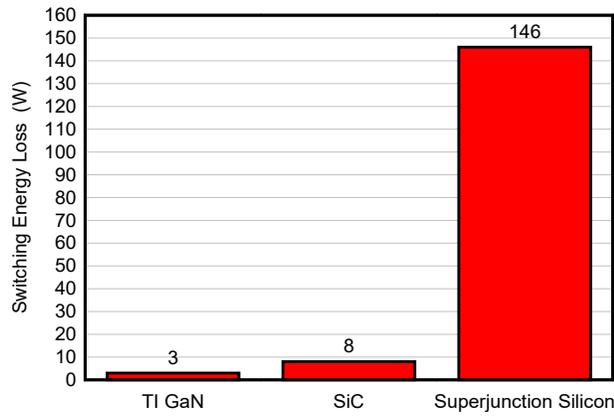


図 4-1. スイッチング エネルギー損失の比較

この効率向上は、LMG3526 GaN デバイスのゼロ電圧検出 (ZVD) 機能を活用する遷移モード (TCM) トーテム ポール PFC のリファレンス デザイン (図 4-2 の PMP40988) と、ゼロ電流検出 (ZCD) を活用した別のデザイン計 (PMP23475) で実証済みです。どちらのデザインも、99.0% を上回るピーク効率を達成しています [参考資料 8 および 10 を参照]。

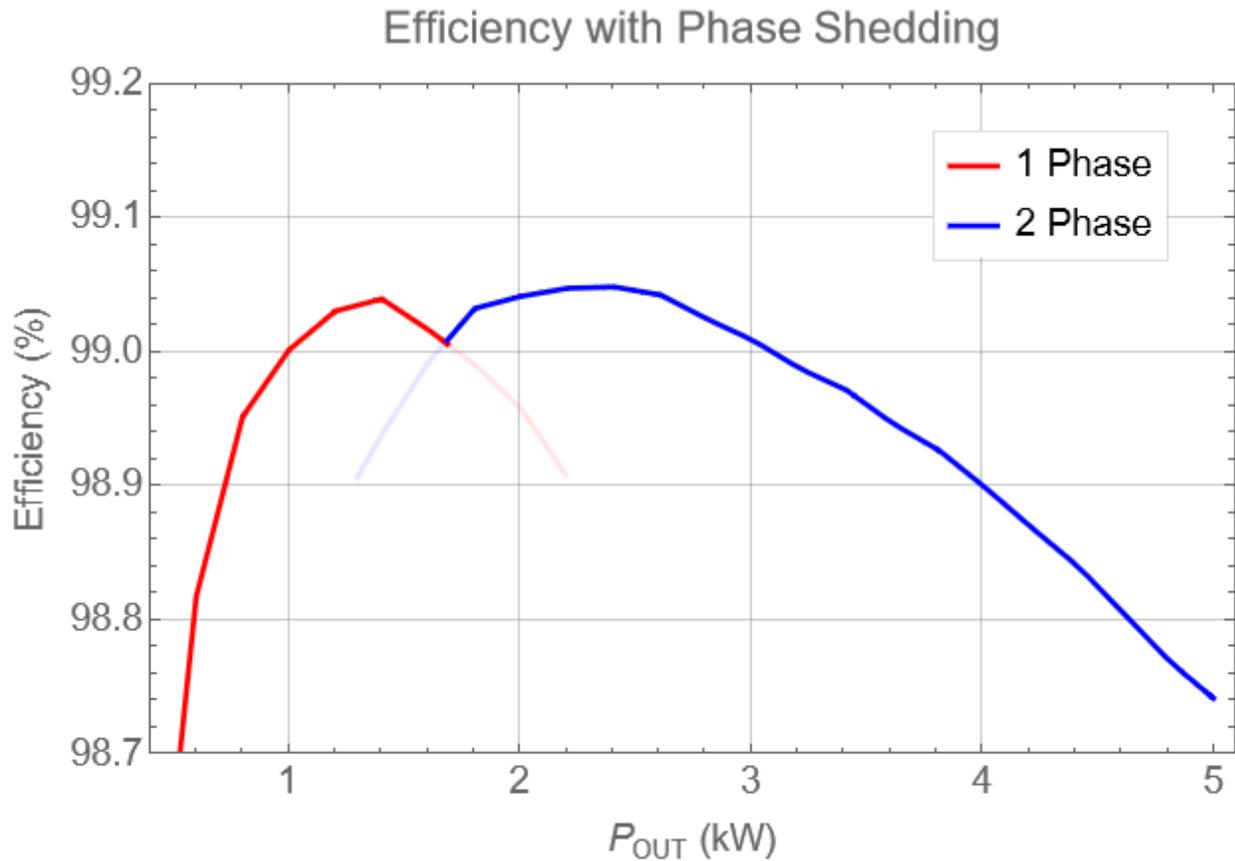


図 4-2. PMP40988 の効率

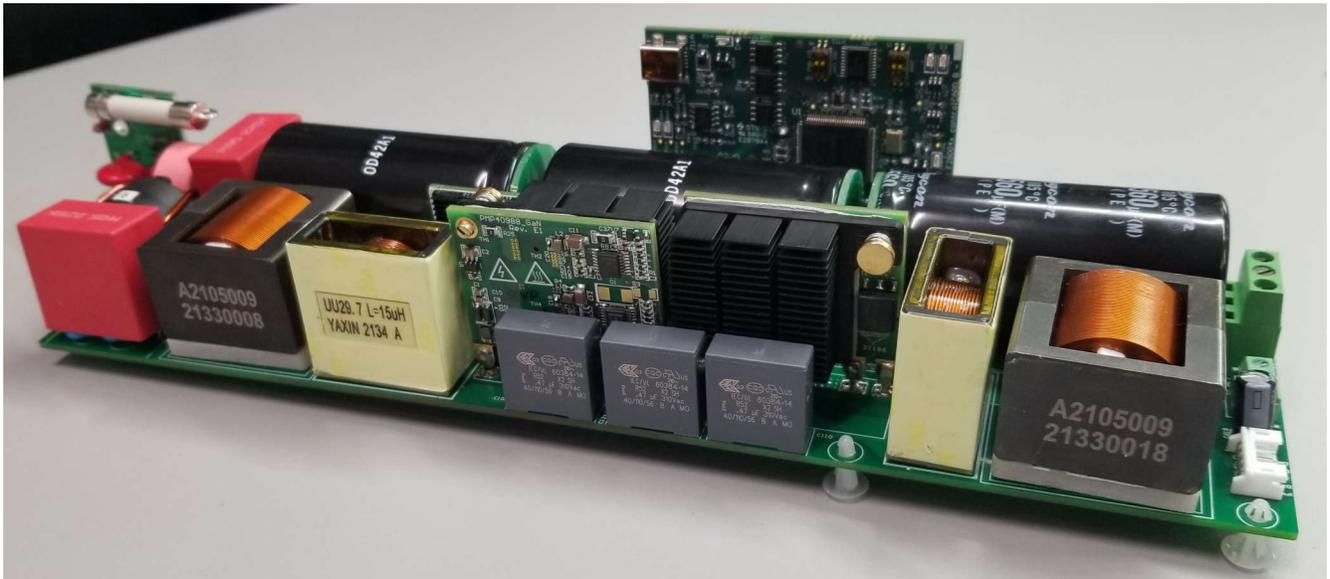


図 4-3. PMP40988 ZVD GaN を使用した TCM トーテム ポール PFC

#### 4.2 双方向 GaN コストダウン Vienna PFC ソリューション

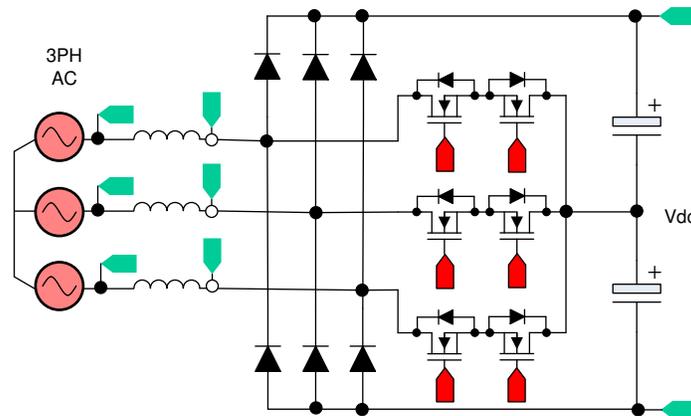


図 4-4. TIDM-1000 3 相 Vienna PFC 整流器

800V DC アーキテクチャでは、3 相 Vienna PFC トポロジが PFC 段に広く採用されています (図 4-4 を参照)。このトポロジによりパワーデバイスへの電圧ストレスが DC リンク電圧の半分に低減されるため、成熟した 650V MOSFET を使用でき、2 レベルコンバータに比べてスイッチング損失を低減できるためです (参考資料 7 および 12 を参照)。

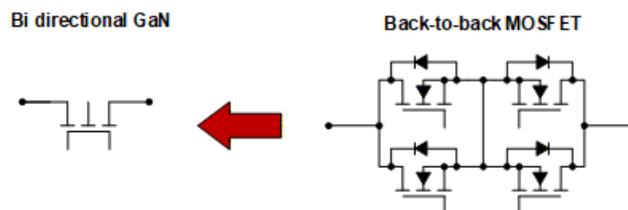


図 4-5. 1 つの BDG は 4 つの 双方向 Si MOSFET に相当

Vienna PFC 回路では、AC を双方向で処理するため、パワー スイッチをシリアル構成で使用します。ただし、双方向 GaN (BDG) は真の「ノーマリーオフ」のモノリシック双方向スイッチであり、2 方向で電流を直接処理できるため、図 4-5 に示すように、BDG は同じオン抵抗を持つ 4 つの Si または SiC MOSFET と等しくなります。このイノベーションには大きな将来性が秘められていますが、さらなる市場検証が必要です。TIDA-01606 リファレンス デザインは、T 型コンバータ

での BDG のアプリケーションを提示するほか、このアプリケーションの可能性をサポートする予備データを提供します (参考資料 3 を参照)。

### 4.3 ハイブリッド ヒステリシス制御の LLC により、迅速な過渡応答が可能

DC/DC 段では、一般に、高い効率と高い電力密度を実現するために、インダクタ - インダクタ - コンデンサ (LLC) の共振トポロジが推奨されます。ただし、従来の直接周波数制御 (DFC) では、制御ループ内の可変の二重極のために、制御帯域幅の拡張が困難です。ハイブリッドヒステリシスコントローラ制御 (HHC) は、スイッチング サイクルごとのエネルギー転送を制御することでこの制限に対処し、単純な比例積分微分 (PID) 補償器で高速動的性能を実現します。

図 4-6 に示すように、HHC ループは、充電モード制御と直接周波数制御を、内部共振コンデンサ電圧 (VCR) ループの補償勾配と組み合わせています。図 4-7 に、この設計で DFC を使用したボード線図と、HHC を使用したボード線図の比較を示します。テスト結果は、ハイブリッドヒステリシス制御 LLC が広い入力電圧範囲にわたってより優れた負荷過渡応答を維持するのに対し、DFC によるループ帯域幅は、二極の影響により補償が困難であることを示しています。

PMP41081 のリファレンスデザインは HHC 方式を示しています。詳細については、参考資料 1、4、11 を参照してください。

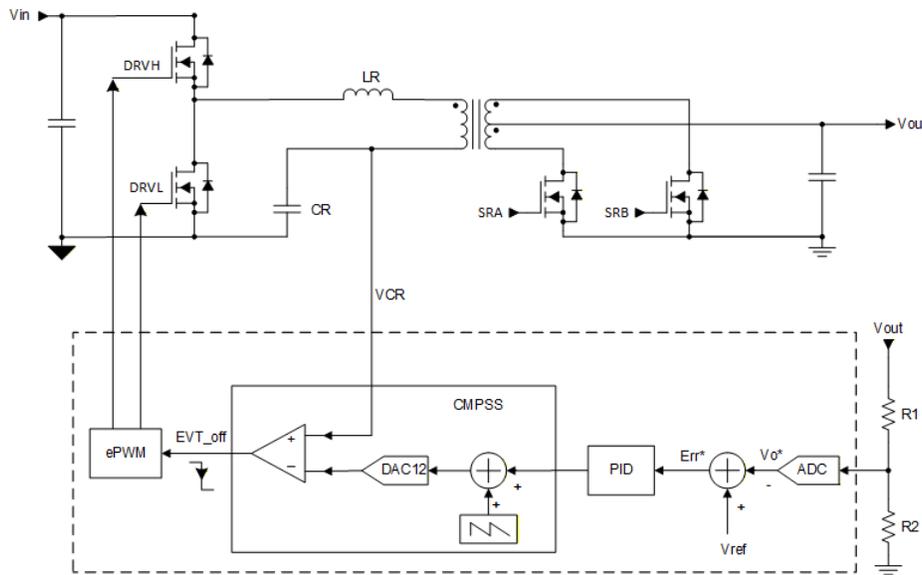
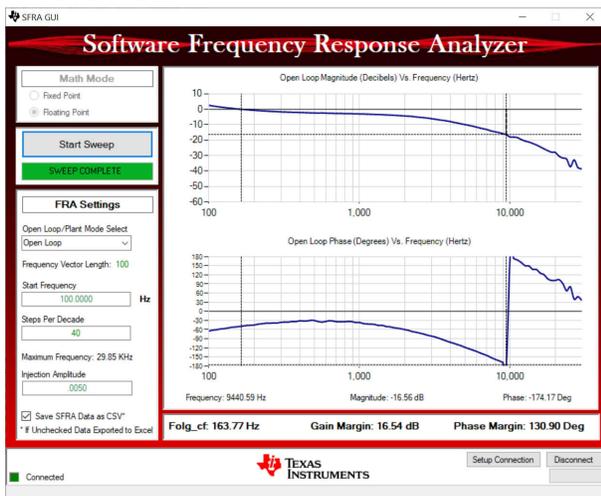
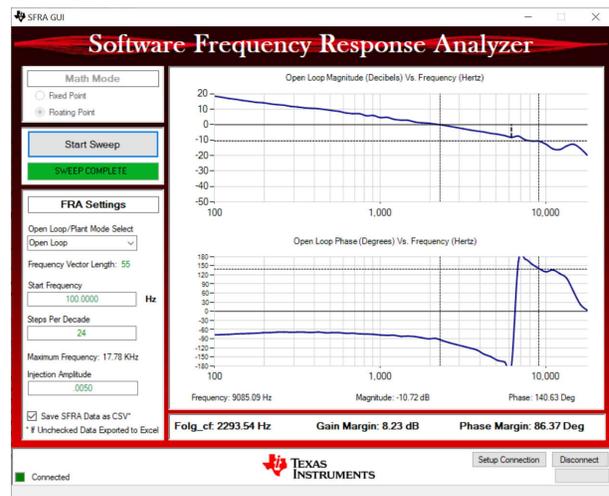


図 4-6. HHC ループを用いた LLC



A. DFC を用いたボード線図。



B. HHC を用いたボード線図。

図 4-7. DFC と LLC のボード線図の比較

#### 4.4 高電圧 ORing 制御により、800V ホット スワップをサポート

48V バスバーから  $\pm 400V$  または  $\pm 800V$  のバスバーに移行すると、電流を低減して銅箔の損失を低減できます。しかし、この移行は、より高い電圧を感知してそれに耐えなければならない ORing 回路にも課題をもたらします。図 4-8 に、低電圧 ORing コントローラを搭載した 400V DC ハイサイド ORing 設計を示します。このリファレンス デザインでは、電圧センシングを電圧クランプ回路によって処理し、コントローラのバイアス電力を絶縁型電源から供給して静的消費電力を最小化できます。

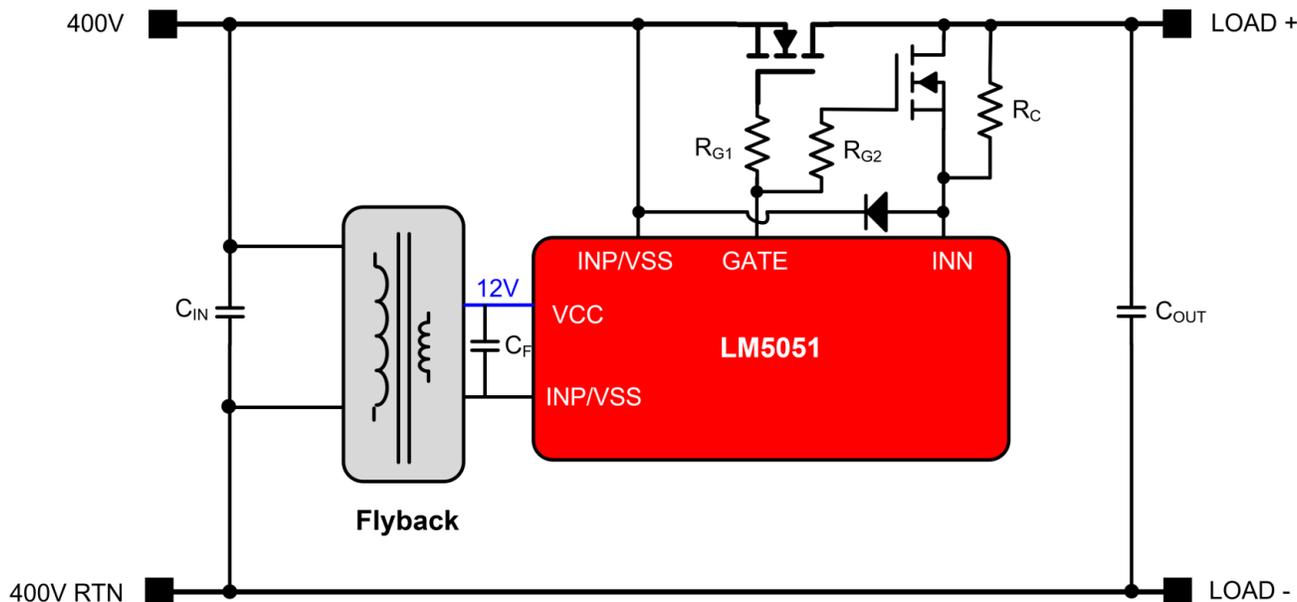


図 4-8. 400V ハイサイド ORing

## 5 まとめ

データセンターが AC 配電から DC 配電へと進化するにつれて、データセンター サーバーの PSU は IT トレイの前面で IBC の役割を果たしつつあり、パワー サイドカーによりこの進化がスムーズかつ管理しやすい移行になります。パワー サイドカーは、従来の AC 配電と将来の 800V DC 配電の間の接続を形成し、エネルギー ストレージと大量の電力を供給することで負荷過渡を平滑化します。

サイドカー内の PSU は、若干の変更を加えた従来型 PSU と同じ機能を備えており、GaN デバイス、HHC LLC、800V 定格のコントローラとコンバータなどの新しいテクノロジーにより、データセンターの PSU はより効率的で信頼性の高いものになっています。

## 6 参考資料

1. Desheng Guo (2025 年 7 月)。『Implementing LLC current-mode control on the secondary side with a digital controller』、テキサス インスツルメンツの技術記事。
2. Huntington, Jared, Tu, Mike (2025 年)。『800VDC Architecture for Next-Generation AI Infrastructure』、NVIDIA ホワイト ペーパー。
3. Le, Kelvin and Hou, Yuetao (2025 年 10 月)。『Application of TI Bidirectional GaN for a Three-Level T Type Converter』、テキサス インスツルメンツのアプリケーション概要。
4. Li Aki, Guo Desheng, Luong Peter, Jiang Chen (2024 年 8 月)。『Digital Control Implementation for Hybrid Hysteretic Control LLC Converter』、テキサス インスツルメンツのアプリケーション ノート。
5. Brent MacDonald (2025 年 11 月) 『Data Centers Evolve to Meet AI's Massive Power Needs』、テキサス インスツルメンツの技術記事。

6. Morroni, Jeffrey and Shenoy, Pradeep (2023 年 4 月)。『[Understanding the Trade-Offs and Technologies to Increase Power Density](#)』、テキサス インスツルメンツのマーケティング ホワイト ペーパー。
7. Ruffo, Riccardo, Le, Kelvin, Parzhuber Harald (2024 年)。『[Comparison of AC/DC Power Conversion Topologies for Three Phase Industrial Systems](#)』、テキサス インスツルメンツの電源設計セミナー SEM2600 トピック 7。
8. テキサス インスツルメンツ、『[PMP23475, GaN-Based 5kW Two-Phase Totem-Pole PFC Reference Design With Zero Current Detection](#)』、ツール。
9. テキサス インスツルメンツ、『[PMP23630, Datacenter Reference Design for HVDC 30kW PSU](#)』、ツール。
10. テキサス インスツルメンツ、『[PMP40988, Variable-Frequency, ZVS, 5kW, GaN-Based, Two-Phase Totem-Pole PFC Reference Design](#)』、ツール。
11. テキサス インスツルメンツ、『[PMP41081, 1kW, 12V HHC LLC Reference Design Using C2000™ Real-Time Microcontroller](#)』、ツール。
12. テキサス インスツルメンツ、『[TIDM-1000, Vienna Rectifier-Based Three Phase Power Factor Correction Reference Design Using C2000™マイコン](#)』、ツール。
13. Yin, Richard (2023 年 12 月)、『[Five Major Trends in Power-Supply Designs for Servers](#)』、テキサス インスツルメンツの技術記事。
  - [中国語版](#)。
14. Zhang, M. (2024 年 3 月)。PUE (電力使用効率): データ センターの最適化。 [デジタル インフラ](#)。

## 重要なお知らせと免責事項

TI は、技術データと信頼性データ (データシートを含みます)、設計リソース (リファレンス デザインを含みます)、アプリケーションや設計に関する各種アドバイス、Web ツール、安全性情報、その他のリソースを、欠陥が存在する可能性のある「現状のまま」提供しており、商品性および特定目的に対する適合性の黙示保証、第三者の知的財産権の非侵害保証を含むいかなる保証も、明示的または黙示的にかかわらず拒否します。

これらのリソースは、TI 製品を使用する設計の経験を積んだ開発者への提供を意図したものです。(1) お客様のアプリケーションに適した TI 製品の選定、(2) お客様のアプリケーションの設計、検証、試験、(3) お客様のアプリケーションに該当する各種規格や、その他のあらゆる安全性、セキュリティ、規制、または他の要件への確実な適合に関する責任を、お客様のみが単独で負うものとし、

上記の各種リソースは、予告なく変更される可能性があります。これらのリソースは、リソースで説明されている TI 製品を使用するアプリケーションの開発の目的でのみ、TI はその使用をお客様に許諾します。これらのリソースに関して、他の目的で複製することや掲載することは禁止されています。TI や第三者の知的財産権のライセンスが付与されている訳ではありません。お客様は、これらのリソースを自身で使用した結果発生するあらゆる申し立て、損害、費用、損失、責任について、TI およびその代理人を完全に補償するものとし、TI は一切の責任を拒否します。

TI の製品は、[TI の販売条件](#)、[TI の総合的な品質ガイドライン](#)、[ti.com](#) または TI 製品などに関連して提供される他の適用条件に従い提供されます。TI がこれらのリソースを提供することは、適用される TI の保証または他の保証の放棄の拡大や変更を意味するものではありません。TI がカスタム、またはカスタマー仕様として明示的に指定していない限り、TI の製品は標準的なカタログに掲載される汎用機器です。

お客様がいかなる追加条項または代替条項を提案する場合も、TI はそれらに異議を唱え、拒否します。

Copyright © 2026, Texas Instruments Incorporated

最終更新日 : 2025 年 10 月