

Technical White Paper

高電圧 DC 駆動 AI サーバー向けのホットスワップ ソリューション



Rakesh Panguloori
Dilip Jain

概要

サーバ、ネットワーク スイッチ、通信システムなどの高可用性システムは、耐用年数を通じてダウンタイムをほぼゼロにするように設計されています。このような高可用性システムでは、多くの場合、システム全体の電源をオフにせずに、回路基板を挿入または取り外しする必要があります。

トレイの入力における電源の最初のエントリポイントであるホットスワップ回路は、システム診断と効率的な負荷管理のための包括的なテレメトリを提供します。この回路の信頼性は動作時の稼働時間に影響を及ぼします。したがって、予期しないシステム停止を防止するために、システムの過渡電圧に対処する能力が非常に重要です。

AI (人工知能) データ センターのサーバー電源の指数関数的な増加に伴い、IT ラック内の分配電圧は $48V_{DC}$ から $800V_{DC}$ に移行しつつあります。このホワイト ペーパーでは、 $800V_{DC}$ アーキテクチャへの移行をサポートするホットスワップ アーキテクチャの進化と、新しいシステム レベルの課題に関する重要な検討事項について説明します。

目次

1 ホットスワップ アーキテクチャの進化.....	2
2 考慮事項次世代ホットスワップの形成.....	8
3 ホットスワップ FET の駆動.....	8
4 安全性と絶縁.....	9
5 まとめ.....	9
6 参考資料.....	9

商標

すべての商標は、それぞれの所有者に帰属します。

1 ホットスワップ アーキテクチャの進化

[1] で説明したように、データ センターの電源アーキテクチャは、IT ラック内の従来型の電源シェルフから、AI の電力需要を満たす電力サイドカーへと移行しています。ホットスワップ テクノロジー (システムをシャットダウンせずにハードウェア コンポーネントを交換または追加する機能) は、基本的な特殊な周辺機器のサポートから、最新のデータ センターおよびコンピューティング向けの重要で高性能な機能へと進化しました。この技術の進化は、シンプルなコネクタ規格から、最大の稼働時間と効率に対するニーズによる高度な電源管理に至るまで、多岐にわたります。

早期 (USB 前)

当初、ホットスワップはメインフレーム コンピュータのような高可用性システムに限定されており、専用の高価なハードウェアでシャットダウンせずにモジュールを削除できました。小型コンピュータ システム インタフェースは周辺機器のホットスワップを導入したが、今日の標準ほど信頼性は高くなかった。

USB の革新

家電機器向けの USB 規格化されたホットスワップの導入により、システムがアクティブな間にキーボード、マウス、プリンタ、カメラ、フラッシュドライブを安全に追加および取り外しできるようになりました。進化は、単純な電源をオフにする (パッシブ) ことから、パワーオン シーケンスを安全に管理するアクティブ MOSFET コントローラを使用することへと移行し、コンポーネントとバックプレーンの両方を保護するようになりました。

データ センターの増加 (12V 時代)

データ センターのダウンタイムが高すぎるため、高可用性を実現するにはホットスワップ機能が不可欠になりました。ホットスワップ コントローラは、突入電流の管理に役立ち、12V バックプレーン上でサーバー ブレードを活線挿入する際のメインバスの保護に貢献しました。

図 1-1 に示す第 1 世代のホットスワップ コントローラは、シンプルな電力制限アーキテクチャを使用して、起動時および障害回復時に、MOSFET が安全動作領域 (SOA) 内に維持されるようにしています。コントローラは、検出抵抗の両端の電圧を監視して電流情報を取得する電流検出アンプと、FET 両端の電圧を測定する電圧検出回路から構成されています。

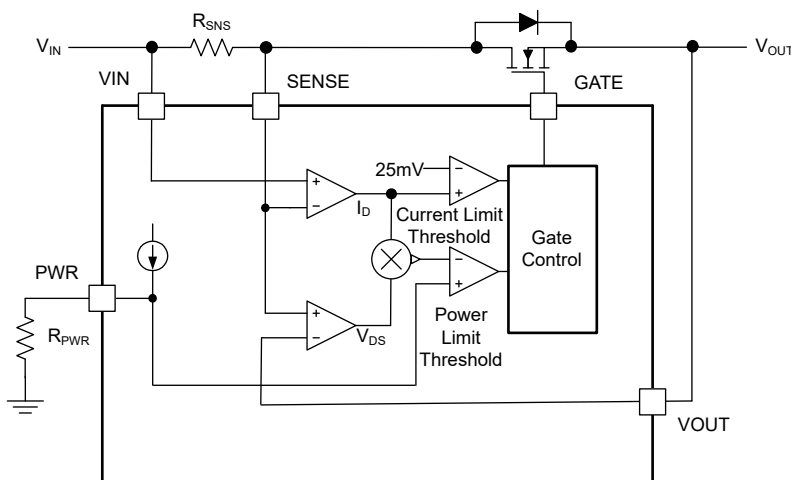


図 1-1. 電力制限型ホットスワップ アーキテクチャ

電流センス アンプの出力と電圧センス回路を乗算すると FET 内の電力損失が得られます。この損失は、システムの突入電流や障害電流を管理しながらホットスワップ FET を保護するために制限する必要があります。

図 1-1 に示す第 2 世代のホットスワップ コントローラは、過熱保護、システム診断に使用するテレメトリ、ラック サーバー内のトレイ間のデータトラフィック管理などの高度な機能を提供しました。ただし、ラックトレイの電力レベルが増加するにつれて、出力キャパシタンスも増加します。これにより、商用 FET では処理できない起動時の深刻な SOA ストレスを考慮すると、電力制限ベースのコントローラを使用した設計は実用的ではありません。別のアプローチ [2] として、図 1-1 に示す出力電圧スルー レート (dv/dt) 制御回路を用いて突入電流を制限する方法があります。これにより、起動時の電力損失を低減し、その損失をより長い時間に分散させることで、FET が安全に電力を処理できるようになります。

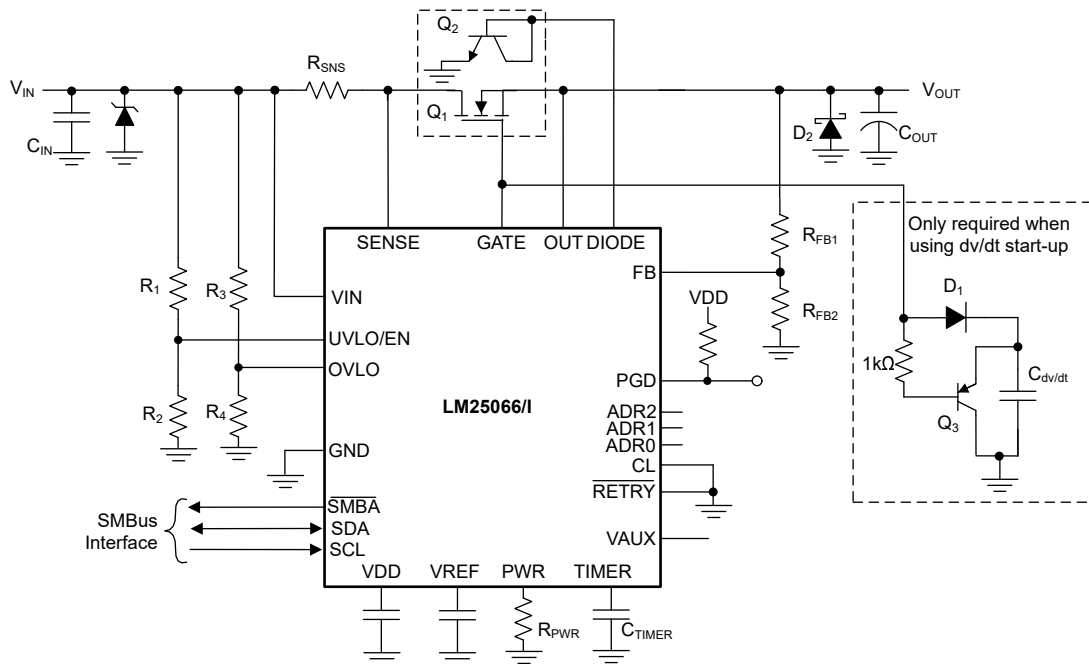


図 1-2. 12V レール向け出力 dv/dt 制御機能付きホットスワップ ソリューション

大量のデータトラフィックに対応するため、データ センター事業者は、より高速で消費電力の多い CPU とメモリを採用し、データ処理能力を向上させました。そのため、同じフォーム ファクタで、トレイあたり 4kW までの電力要件が課され、[図 1-3](#) に示すように、FET (eFuse と呼ばれます) を内蔵した高密度保護ソリューションが必要になりました。TI の 12V 大電流 eFuse は、調整可能な過電流ブランキングなどの差別化された機能 [\[3\]](#) を実現しており、ダウンストリーム コンピューティング負荷からの過渡要求、ブラックボックス故障記録、アクティブ同期、スタートアップ時や定常状態時の負荷共有を通じてスケーラビリティを大幅に向上します。これらを 4.5mm x-5 mm のフットプリントで実現すると同時に、60A の実効値 (RMS) 電流に対応しています。

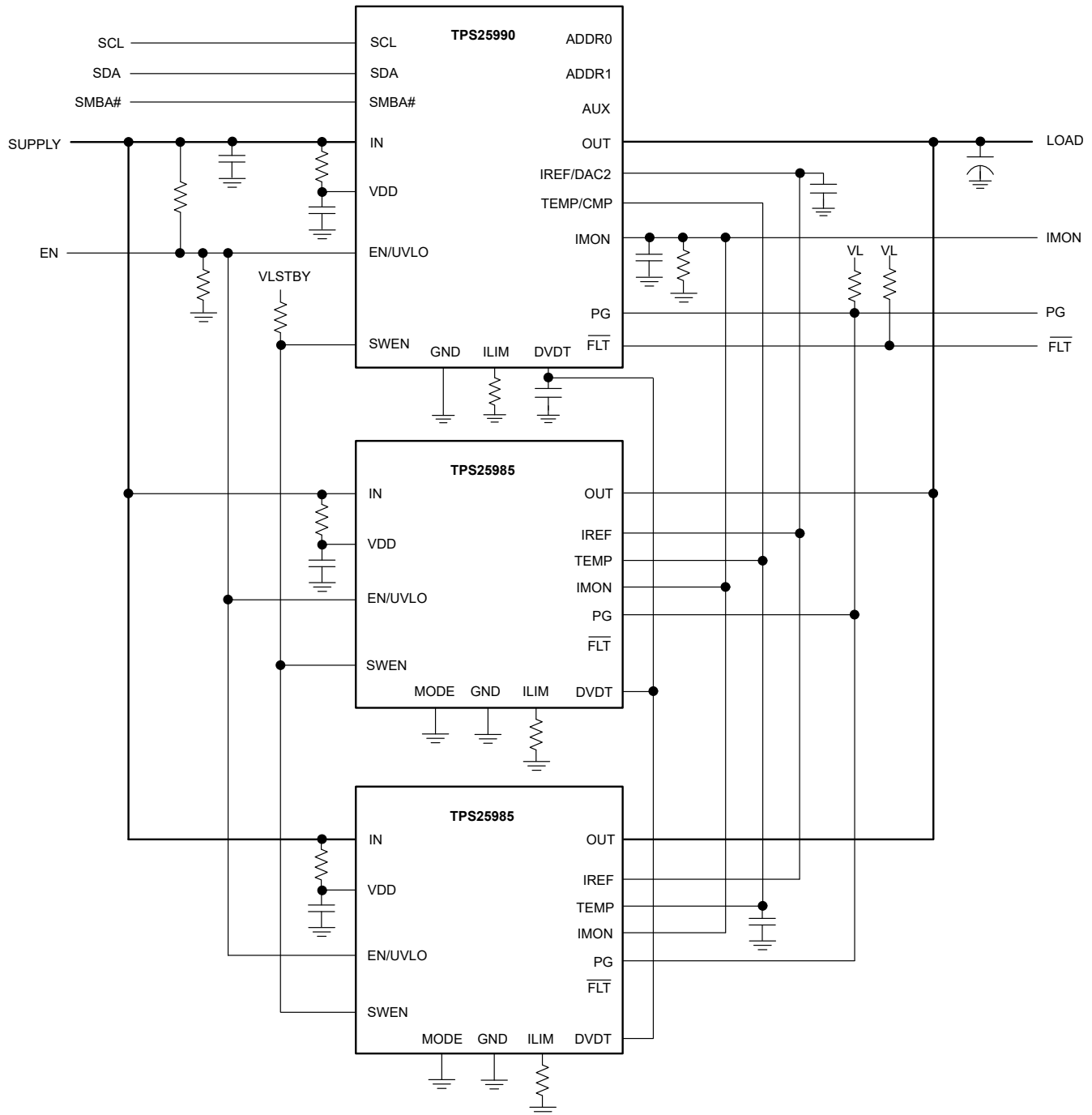


図 1-3. 12V レール向けのスタックابل大電流 eFuse ソリューション

クラウド コンピューティング (48V Era)

クラウド コンピューティング アプリケーションの需要が高まるにつれ、エンタープライズ サーバーは、大量のデータとストレージを同時に処理するため、消費電力が非常に高くなっています。各サーバー マザーボードの定常状態の電力定格は、5kW ~ 6kW になります。そのため、12V レールでの電力分配は無効になります。12V から 48V に移行すると、同じ電力で電流が 75% 低減されます。この削減により、抵抗性電力損失 (I^2R) が 1/16 に下がり、銅製のバスバーおよびケーブル要件が最大 90% 縮小され、ラックの放熱が大幅に削減されます。

48V サーバー システムの主な負荷は、GPU (グラフィックス処理ユニット) です。一般的なサーバーに比べて、負荷の振幅、スルー レート、過渡的な負荷の周波数が 3 ~ 4 倍に達しています。そのため、TI の第 1 世代 [LM50661](#) ホットスワップ

プ コントローラを使用して高出力の 48V 設計をサポートする場合、[4] で論じられているように、いくつかの回路改良が必要となります。

TI の次世代ホットスワップ コントローラ LM5066H2 はデュアル ゲートドライブ アーキテクチャを採用し (図 1-4)、1 個の SOA FET でスタートアップ時と障害条件時に電力ストレスに対処することができます。LM5066H2 は、通常負荷電流動作の複数の低ドレイン ソース間オン抵抗 ($R_{DS(on)}$) FET との組み合わせにより、4kW を超える設計においてソリューション全体のサイズを 40% 縮小することができます。

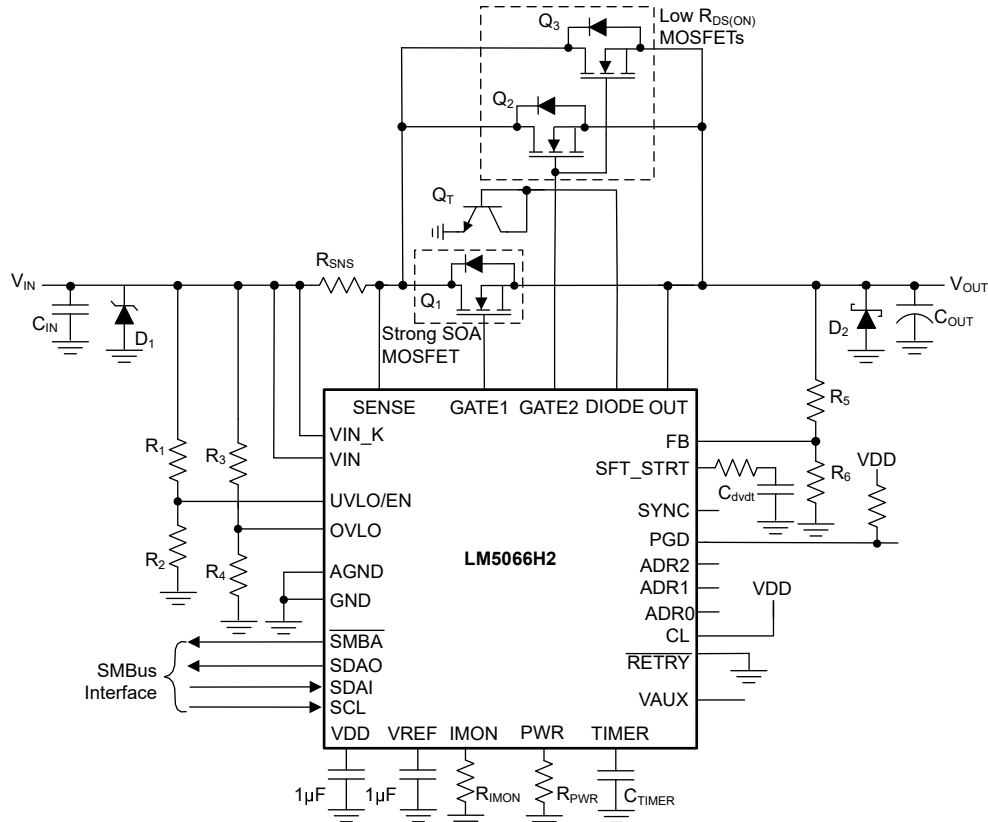


図 1-4. 48V ラック サーバー パワー ディストリビューション向けのホットスワップ ソリューション。

業界初の 48V eFuse である TI の TPS1685 は、FET 保護機能の強化とスケーラビリティの容易さを実現し、高密度の高電力設計を実現します。図 1-5 に、48V eFuse を使用した回路構成を示します。

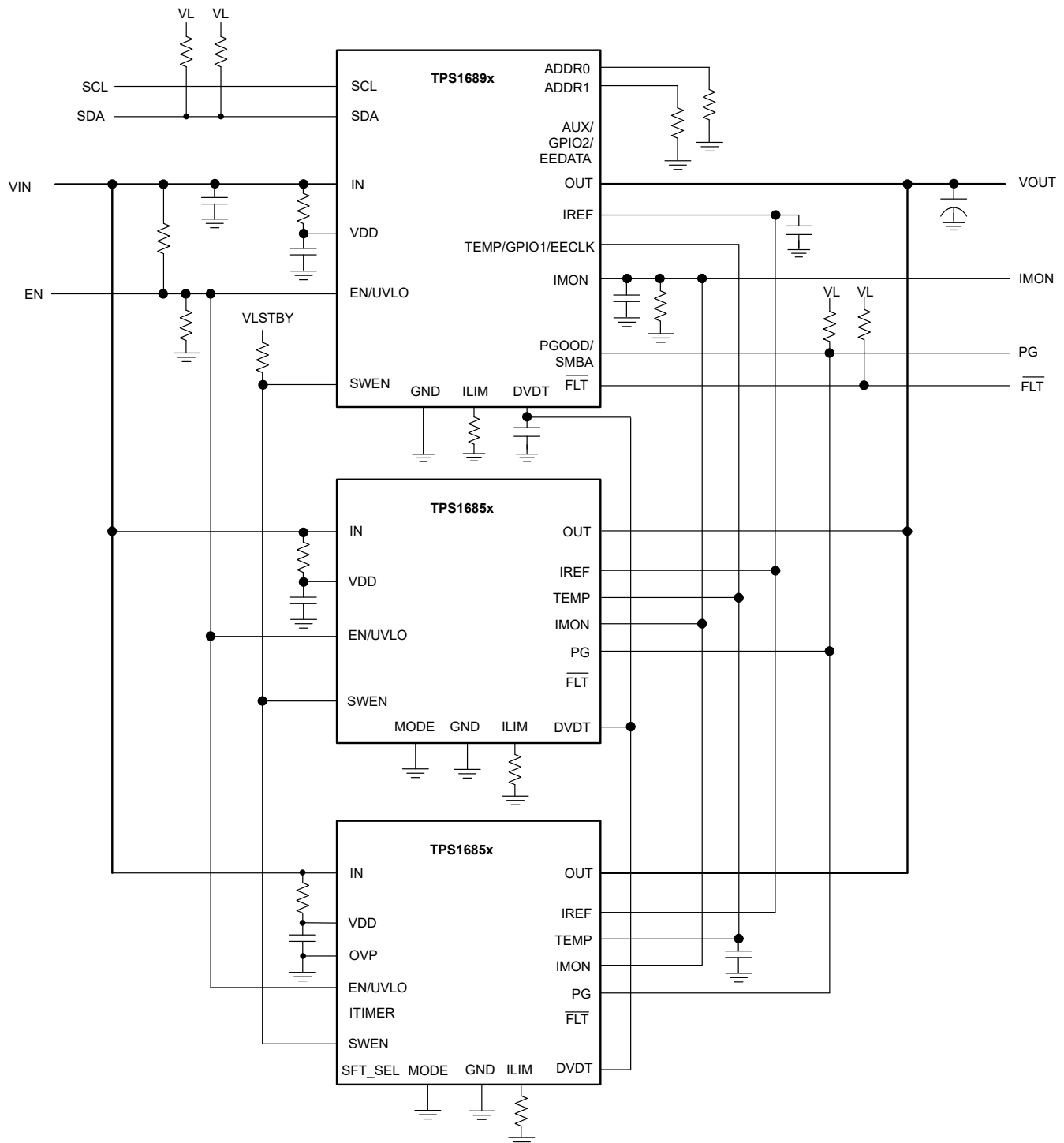


図 1-5. 48V レール向けのスタックابل大電流 eFuse ソリューション。

AI コンピューティング ($\pm 400V_{DC}$ または $800V_{DC}$ 消去)

AI 処理電源の急増により、サーバー ラック内の 12V から 48V へのアーキテクチャへの移行が進み、電力損失を低減して効率を向上させています。AI ベースの IT ラックは、AI が最善の機能を果たすために必要な計算量を迅速に処理するために、数百個のプロセッサを使用しています。そのため、近い将来、100kW ~ 1MW の範囲のラック電力が要求されます [5]。この量の電力を 48V レールに分配すると、電流は 20kA を超えます。このため、実装のための実用的ではなく、AI IT サーバー ラック内のパワー ディストリビューションのために、より高い $\pm 400V_{DC}$ または $800V_{DC}$ バス電圧を必要とし、重く高価なバスバーが必要になります。低電圧 DC アーキテクチャには、高度なホットスワップ コントローラが必要であ

り、高電圧の突入電流を処理して高精度の遠隔測定を行うと同時に、適切な安全性と絶縁対策を実施することができます。

主要なハイパースケーラとクラウド サービス プロバイダは、現在、 $\pm 400\text{V}_{\text{DC}}$ (2 線式)、 $\pm 400\text{V}_{\text{DC}}$ (3 線式)、 800V_{DC} など、いくつかの施設レベル アーキテクチャを評価しています。これらのアーキテクチャは、ホットスワップ保護要件に直接影響を及ぼします。

図 1-6、図 1-7、図 1-8 および 図 1-9 に、各種アーキテクチャ [6] と IT ラック側のホットスワップ保護ソケットを示します。

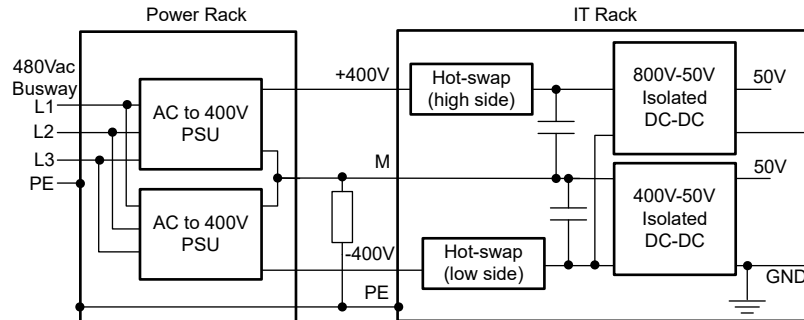


図 1-6. 3 線式 $\pm 400\text{V}_{\text{DC}}$ パワー ディストリビューション システム

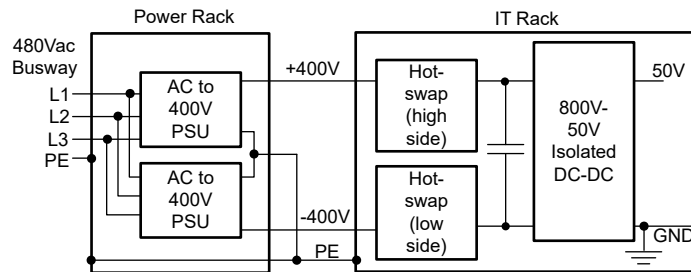


図 1-7. 2 線式 $\pm 400\text{V}_{\text{DC}}$ パワー ディストリビューション システム

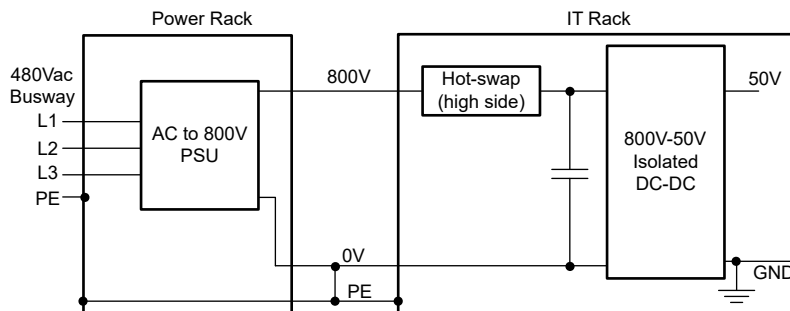


図 1-8. 2 線式 800V_{DC} ディストリビューション システム

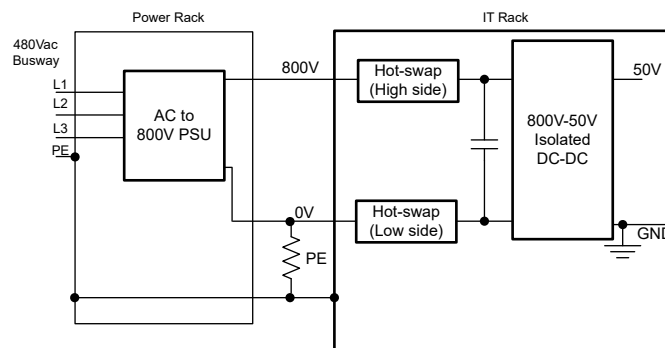


図 1-9. 2 線式 800V_{DC} ディストリビューション システム、高抵抗接地保護アース付き

2 考慮事項次世代ホットスワップの形成

AI モデルや科学シミュレーションが複雑化するにつれ、多くの場合、単一のプロセッサでは十分ではありません。IT トレイには、複数の大電力 CPU および GPU を収容する必要があります。これはラック内で最も価値の高い不動産であるため、ホットスワップ回路や中間バスコンバータに対応できる限られたスペースには、コンパクトな 800V ホットスワップソリューションが必要です。ディスクリート実装 [7] は、絶縁型ゲートドライバ、電流/電圧センサンプ、デジタルアイソレータ、マルチ巻線補助電源、マイコンで構成されています。

TI の 800V LMI800PS ホットスワップコントローラは、従来型のホットスワップコントローラ素子すべてを採用しているほか、電力と信号の絶縁機能を内蔵しており、より電力密度の高いホットスワップソリューションを実現できます。

図 2-1 に、 $\pm 400\text{V}_{\text{DC}}$ の 2 線式システムアーキテクチャ用の、LMI800PS ベースのホットスワップソリューションを示します。

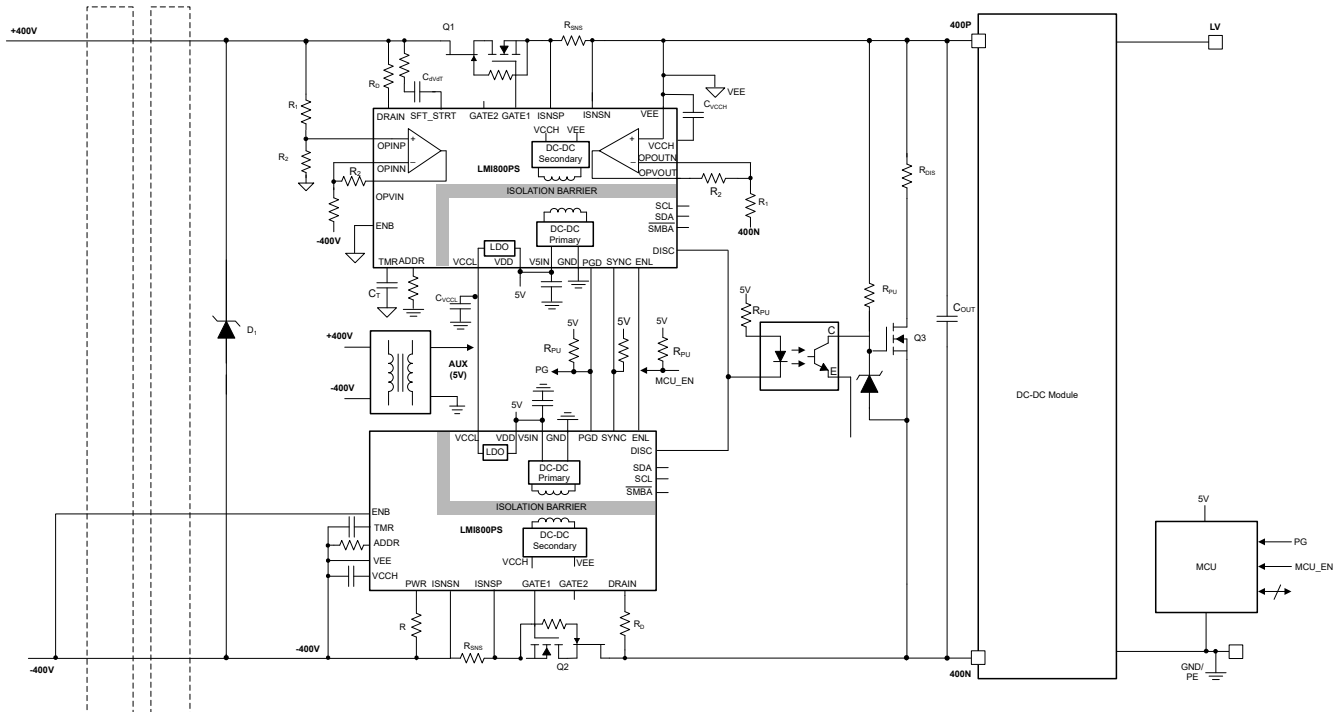


図 2-1. LMI800PS ホットスワップソリューション

ユニバーサル絶縁型ホットスワップコントローラアーキテクチャ

図 1-6、図 1-7、図 1-8、および図 1-9 に示すように、ホットスワップ回路は、システムアーキテクチャとグランド方式によって、入力電源レールのハイサイドとローサイドの両方に存在する可能性があります。LMI800PS コントローラは、ローカルチップの GND をフローティングにし、絶縁バリア越しに必要な信号とバイアス電力を供給することで、両方のレールで使用できます。

3 ホットスワップ FET の駆動

800V_{DC} システムの場合、パワー FET の主な選択肢は、ドレイン-ソース間電圧 (V_{DS}) 定格の 1.2kV SiC (シリコンカーバイド) または SiC カスコード接続接合 FET です。SiC FET は、最小のオン抵抗を実現するために FET を完全に強化するために 18V のゲートドライブを必要とします。一方、SiC カスコード化された接合部 FET は、12V のゲートドライブが必要です。ホットスワップアプリケーションでは、突入電流制限フェーズ中は、通常、FET はリニアモードで動作します。突入フェーズ中の SOA ストレスを FET の SOA 制限内に維持するために、ホットスワップ回路を適切に設計することが重要です。また、出力短絡時のパワーアップなどのフォルトシナリオ時に FET を保護するには、保護方式も必要です。過負荷保護では、急速な過熱につながるため、スイッチをアクティブモードにすることはできません。

LMI800PS の設定可能なゲートドライブ機能と、構成可能なタイマを備えた低い電力制限スレッショルド (最小 200W) により、システム設計者は信頼性の高いホットスワップソリューションを柔軟に開発できます。

4 安全性と絶縁

制御信号と表示信号 (管理信号) を高電圧セクションから絶縁し、システムがホットスワップ コントローラと通信できるようにすることが重要です。これらの信号の絶縁は、汚染度 2 の強化絶縁、10% ~ 90% 湿度非結露 (安全規格、国際電気標準会議 [IEC] 62368-1 に準拠)、および高度 3、050m (5、000m をできれば) の空間距離および沿面距離に準拠する必要があります。

LMI800PS デバイス パッケージは、高電圧ドメインと低電圧ドメインの間の $\geq 8\text{mm}$ の沿面距離を持ち、 5kVrms 絶縁耐圧 (V_{ISO}) 定格と 10kV のサージ能力を備えており、全体的な安全性要件を満たします。

これらの安全要件の 1 つは、ITトレイがラックから切断されたとき、または出力が切断されたときに、2 秒以内に出力バルクコンデンサを 120V 未満に放電することです。出力コンデンサと並列に直列放電抵抗を持つ FET を配置することで、この機能をイネーブルにできます。LMI800PS には放電 FET 制御出力信号があり、出力放電設計が簡単になります。

5 まとめ

AI 処理能力のサージが原因で、高度な AI プロセッサの電力要件が増大し、高い計算密度に対応できるように、AI サーバー ラックの 800V_{DC} 電力供給への重要な移行が進んでいます。この変化により、特にホットスワップ イベント時に、システムの保護および監視に新しい課題が生じます。

TI は、LMI800PS 高電圧ホットスワップ コントローラの開発をリードしています。このコントローラは、突入電流を効果的に管理し、システム診断や安全性を高めるための包括的な遠隔測定 (テレメトリ) 機能を実現するほか、信頼性の高い動作を維持します。

6 参考資料

1. [Diablo 400 Project: Rack and Power](#) (Version 0.5.2). (2025, May 30). Open Compute Project: Austin, Texas.
2. Huntington, J., and Tu, M. (n.d.). [800VDC Architecture for Next Generation AI Infrastructure](#). Nvidia white paper. 2026 年 9 月 28 日アクセス。
3. McDonald, B. (2025 年 11 月)。AI の膨大な電力需要に合わせて進化するデータ センター (資料番号 SSZTDB4)。テキサス インストルメンツの技術記事。
4. Pal, A. および Panguloori, R. (2026 年 3 月)。800V または $\pm 400\text{V}$ DC 配電において、堅牢な保護を実現するフローティング グランド ホットスワップ アーキテクチャ (資料番号 STDA029)。テキサス インストルメンツ。
5. Pal, A. および Panguloori, R. (2025 年第 2 四半期)。ホットスワップ コントローラを使用した 48V AI サーバーの保護に関する課題への対処 (資料番号 SLYT863)テキサス インストルメンツの Analog Design Journal。
6. Pal, A. および Sagar, S. (2025 年 1 月)。TI のスマート eFuse の高度な機能を活用してサーバー電源設計を強化 (資料番号 SLVAFR8)テキサス インストルメンツ。
7. Rogachev, A. (2014 年 11 月)。堅牢なホットスワップ設計 (資料番号 .SLVA673 リビジョン A)テキサス インストルメンツ。

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みいかなる保証も、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、TI は一切の責任を拒否します。

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](https://www.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