

Technical White Paper

800V または $\pm 400V$ 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



Avishek Pal, Applications Engineer, Input Power Protection and Distribution

Rakesh Panguloori, Applications Manager, Input Power Protection and Distribution

概要

AI (人工知能) データ センターにより、前例のない電力需要の急増が生じており、その需要はラックあたり 100kW を超えます。このため、従来の 50V DC 配電から、800V または $\pm 400V$ の高電圧直流 (HVDC) アーキテクチャへの移行が求められています。こうした HVDC システムにおける保護上の課題を克服するために、本稿では、システム グランドではなく、負荷端子に基準を接続して構成した低電圧コントローラを用いる、フローティング グランド ホットスワップ アーキテクチャについて論じます。実験的検証によって、突入電流の制御およびマイクロ秒単位の故障検出を実現した良好な 800V 動作が実証され、銅使用量の 45% 削減、効率の 5% 向上が確認されました。

目次

1 概要.....	2
2 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.....	2
3 システム設計の検討事項.....	3
4 設計ガイドラインおよび部品選択.....	4
5 テスト結果.....	6
6 まとめ.....	8
7 参考資料.....	8

商標

すべての商標は、それぞれの所有者に帰属します。

1 概要

AI、高性能コンピューティング (HPC)、クラウド サービスの急速な成長により、データ センターの電力需要はかつてない勢いで増加しています。従来の 50V DC 配電アーキテクチャは、かつてはキロワット規模の IT ラックにとって十分なものでした。しかし、AI ワークロードによってラック密度が 10kW ~ 30kW から 100kW 超、ついには 1MW に向かっており、物理的および経済的な限界に急速に近づいています。参考資料 1 で説明しているように、データ センターの電源アーキテクチャは従来のパワー シェルフからパワー サイドカーへと移行しており、電力は 800V または $\pm 400V$ の HVDC バスで IT ラックに供給されます。800VDC システムでは、分配電圧を大幅に高くすることで、銅使用量を最大 45% 削減、I²R 損失を最小化し、エンド ツー エンドの効率を最大 5% 向上させることができます。

図 1-1 に示すように、HVDC 電源アーキテクチャでは、電力系統からの 3 相 480V AC 電力が、高効率の整流器によって 800V または $\pm 400V$ の DC バスに変換されます。ホットスワップ回路を通じて、HVDC バスからの電力が中間バスコンバータ (IBC) モジュールに供給されます。このモジュールにより、800V または $\pm 400V$ の DC は、サーバー ラック向けの中間電圧 (48V、12V、6V など) に変換されます。最後に、マルチフェーズ DC/DC パワー コンバータによって、この電力は 1V 未満の GPU 電源電圧に降圧されます。HVDC 領域では、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。こうした課題に対処するため、この記事ではフローティング グランド ホットスワップ アーキテクチャを提案します。この資料では、提案するソリューションの動作原理、システム設計、部品選択、実験結果について説明します。

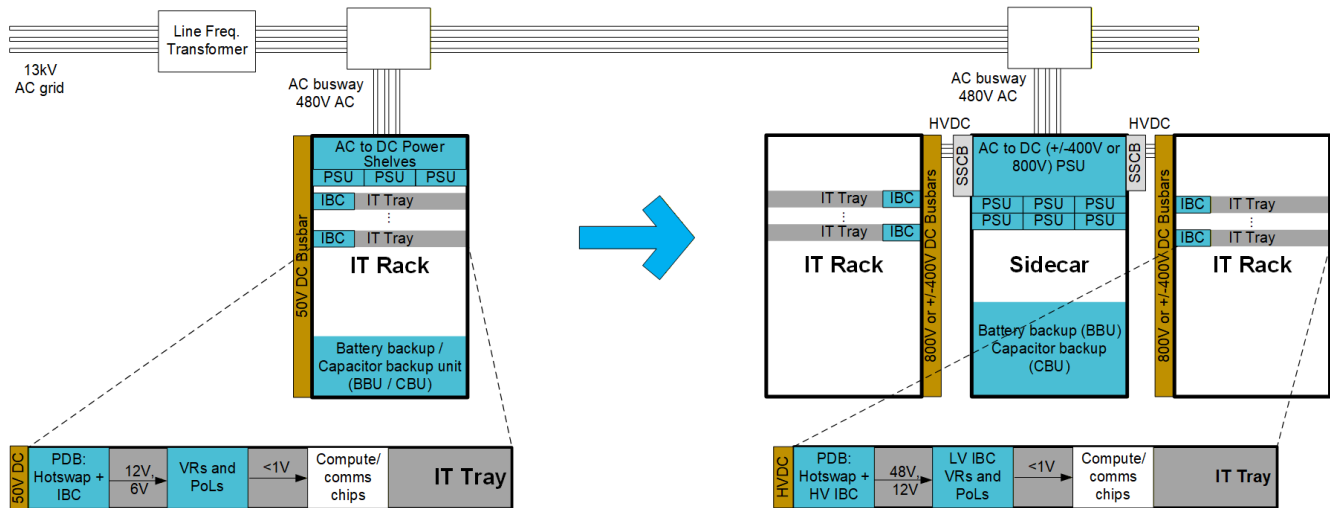


図 1-1. データセンターにおける配電アーキテクチャの進化

2 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

高電圧のホットスワップ アーキテクチャは、既存の低電圧、ローサイド ホットスワップ コントローラである TI の TPS23521 デバイスを使用し、フローティング グランドのコンセプトに基づいて設計されています。TPS23521 デバイスは、ホットプラグ、突入電流管理、低電圧、過電圧、過電流、短絡保護などの標準的なホットスワップ機能を提供します。

図 2-1 に示すように、TPS23521 デバイスは VEE を基準電位として使用し、VEE に対してホットスワップ FET の GATE を駆動します。標準的なホットスワップ構成とは異なり、コントローラの基準電位 VEE はフローティング状態のままとされ、システム グランド GND ではなく、負荷端子 VOUT に接続されます。絶縁型バイアス電源を介して VCC ピンと VEE ピン間で電力を供給することで、スケーラブルなフローティング グランド ホットスワップ アーキテクチャをエミュレートし、TPS23521 を $\pm 400V$ または 800V レールに適応させています。SS ピンと FET ドレインとの間に 1k Ω 抵抗を介して接続されたコンデンサ (CSS) によって、起動時の GATE 電圧のスルーレートが決まります。CSS は GATE ピンに内部的に接続されており、Q1 のゲートドレイン間コンデンサとして機能します。VCC が印加されると、TPS23521 デバイスは GATE の充電を開始し、Q1 をオンにします。ゲートソース間電圧が VTH を超えると、GATE 電流全体によって CSS コンデンサが放電され、Q1 のドレインソース間 (VDS) 電圧が直線的に低下します。FET Q1 はミラー プラトー領域で動作し、ソースフォロワとして動作します。このとき VOUT は、CSS コンデンサによって決まるスルーレートで GATE に追従します。Q1 の VDS がゼロに達すると、GATE VEE 間の電圧が VCC VEE 間までさらに上昇し、Q1 は完全導通モードで

動作できるようになります。ローサイド電流検出により、起動時および定常状態において、過電流保護と短絡保護が維持されます。

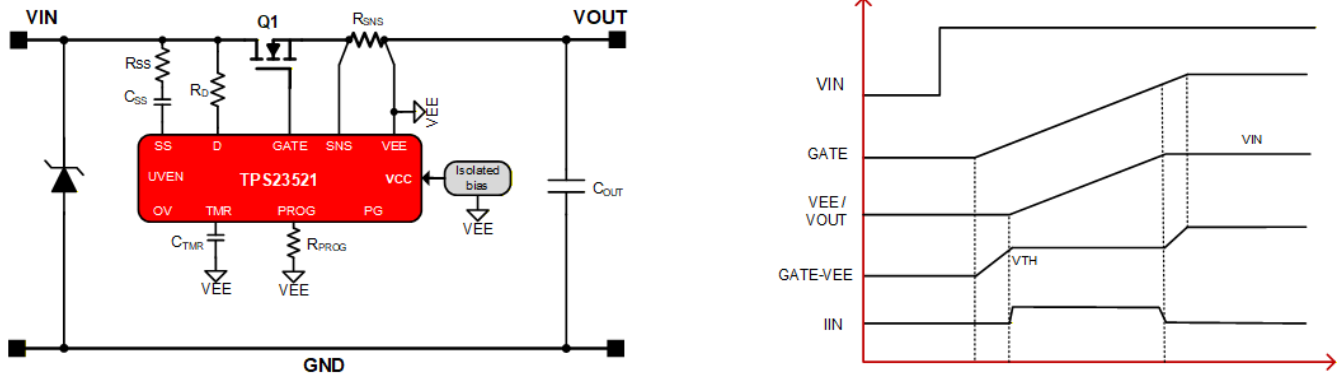


図 2-1. フローティング グランド ホットスワップ アーキテクチャと起動タイミング図

3 システム設計の検討事項

前のセクションで述べたフローティング グランド ホットスワップ アーキテクチャを活用し、以下に示す TI 製品と組み合わせることで、完全なホットスワップ ソリューションを構築できます。

- **TPS23521**: ローサイド、高性能、ホットスワップ コントローラを中核要素として使用し、ホットプラグ、突入電流管理、低電圧、過電圧、過電流、短絡保護を実現します。
- **UCC28704**: すべてのビルディング ブロック向けのバイアス電源を生成するフライバック コントローラ。
- **OPA210**: 800V の入力電源電圧をスケールダウンし、TPS23521 デバイスの UVEN ピンおよび OV ピンとインターフェイスするために、差動構成で使用されるオペアンプ。
- **INA238**: I2C を介して電流、電圧、電力を高精度で監視し、**ISO1644** (I2C アイソレータ) デバイスを使用したデジタル テレメトリを可能にすることで、インテリジェントなラック管理を実現。
- **ISOM8110**: 制御回路と出力放電回路の間に絶縁バリアを提供するフォトカプラ エミュレータ。

ブロック図 (図 3-1 を参照) に示すように、フローティング グランド ホットスワップ アーキテクチャにより、電力レベルや電源レール電圧 ($\pm 400V / 800V$) にかかわらず、真にスケラブルなソリューションを実現できます。そのため、このアーキテクチャは、2 線式または 3 線式 (シャーマシ グランドを含む) のいずれの設置にも対応できます。

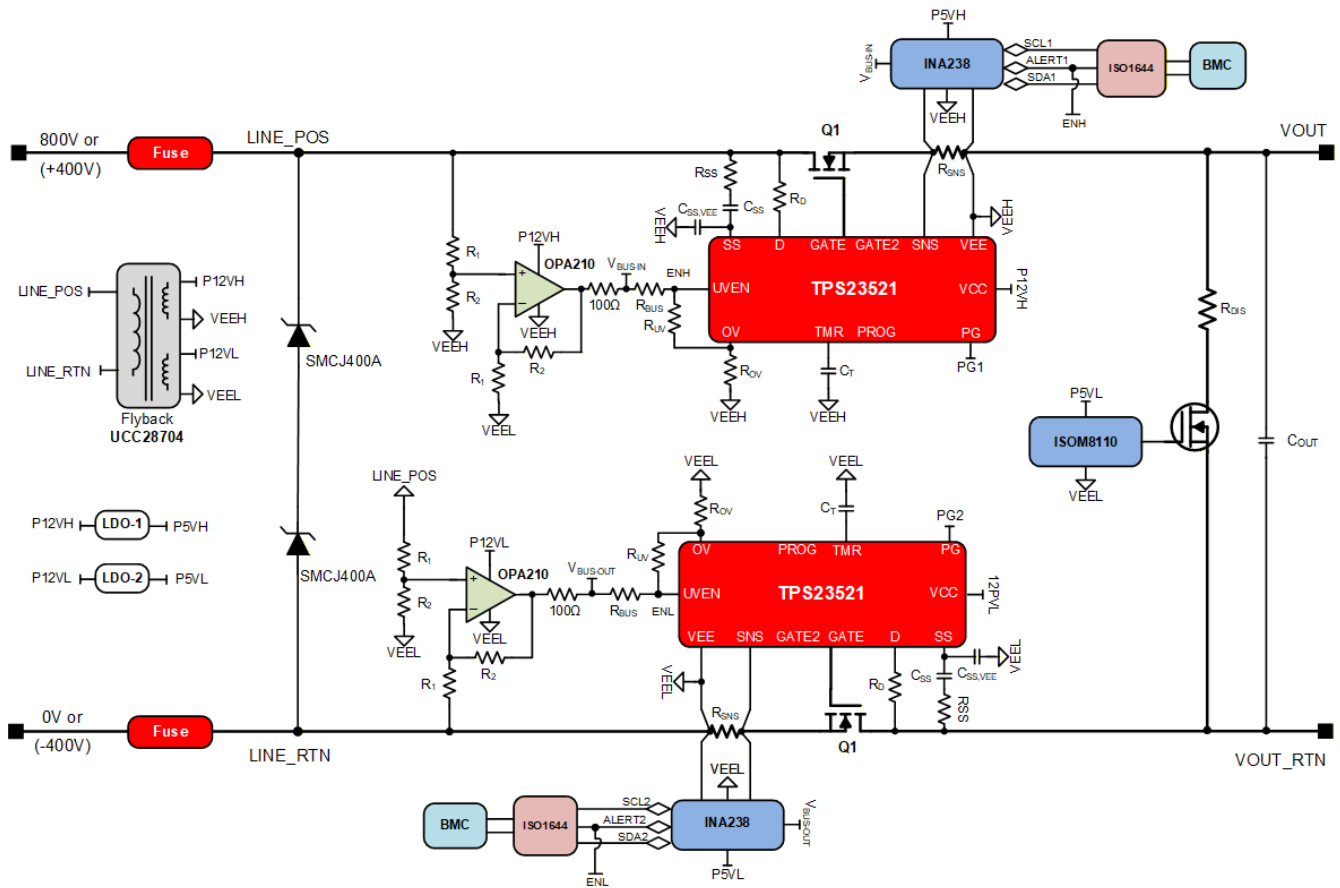


図 3-1. ハイサイドおよびローサイド パワーパスにおけるフローティング グランド ホットスワップ ソリューションのブロック図

4 設計ガイドラインおよび部品選択

このセクションでは、表 4-1 で概要を示したシステム仕様に適した部品選択について説明します。

表 4-1. 代表的なシステム仕様

設計パラメータ	値
入力電圧範囲	2 線式、±400V または 800V
出力容量	100μF
定常状態での熱設計電力 (TDP) 定格	17kW
過電流保護	25A
故障タイマ時間 (標準値)	200μs
最大周囲温度	60°C
低電圧誤動作防止のスレッシュホールド	720V
過電圧ロックアウト スレッシュホールド	880V

- 電流センス抵抗、 R_{SNS} の選択: 最大負荷電流は $17000W/720V = 23.6A$ です。多少のマージンを確保するため、ターゲットの電流制限を 25A に設定します。PROG ピンにより、検出電圧を 25mV または 40mV に選択できます。消費電力を低減するために 25mV を選択し、式 1 を使用して R_{SNS} を計算します。

$$R_{SNS} = \frac{V_{SNS,CL1}}{I_{CL1}} = \frac{25mV}{25A} = 1m\Omega \quad (1)$$

この設計では、1mΩ、3W (WSL39211L000FEA) の電流センス抵抗を使用しています。

- ソフトスタートコンデンサ C_{SS} および $C_{SS,VEE}$ の選択: 式 2 を使用して、起動時にタイマが動作する最小突入電流を計算します。

$$I_{INR, TMR, \min} = \frac{V_{SNS, TMR2, \min}}{R_{SNS}} = \frac{1.5\text{mV}}{1\text{m}\Omega} = 1.5\text{A} \quad (2)$$

突入時にタイマが動作しないようにするには、突入電流を 1.5A より十分に低くする必要があります。起動時の FET SOA マージンを拡大させるため、突入電流は 200mA をターゲットとします。式 3 を使用して、ターゲットの C_{SS} を計算します。

$$C_{SS} = \frac{C_{OUT} \times I_{GATE, SRS, START}}{I_{INR, TGT}} = \frac{100\mu\text{F} \times 20\mu\text{A}}{200\text{mA}} = 10\text{nF} \quad (3)$$

C_{SS} として、0.022 μF 、630VDC、C0G のマルチレイヤ セラミック コンデンサ (GRM32E5C2J223FWA3L) を、2 つ直列に使用しています。また、ソフトスタート時の過渡耐性を向上させるため、SS ピンと VEE の間に C_{SS} の 3 倍の容量を持つコンデンサ $C_{SS,VEE}$ の追加を TI は推奨します。

最後に、起動時間は 式 4 を使用して計算できます。

$$T_{START} = \frac{C_{SS} \times V_{IN}}{I_{GATE, SRS, START}} = \frac{11\text{nF} \times 800\text{V}}{20\mu\text{A}} = 440\text{ms} \quad (4)$$

- VDS スイッチオーバー スレッショルドの選択: TPS23521 デバイスが低い電流スレッショルド ($3\text{mV}/R_{SNS}$) から高い電流スレッショルド ($25\text{mV}/R_{SNS}$) に切り換わるスレッショルド電圧は、抵抗 R_D によって選択できます。VDS のスレッショルドが高いほど過渡耐性は向上しますが、FET が受ける SOA ストレスは増大します。まず VDS スイッチオーバー電圧を 100V とし、式 5 を使用して R_D を計算します。

$$R_D = 30\text{k}\Omega \times \left(\frac{V_{DS, SW}}{1.5\text{V}} - 1 \right) = 30\text{k}\Omega \times \left(\frac{100\text{V}}{1.5\text{V}} - 1 \right) = 1970\text{k}\Omega \quad (5)$$

680K Ω 、700V の 3 つの抵抗 (TNPV1206680KBEEN) を直列で使用しています。実効スイッチオーバー電圧は 103.5V となります。

- 故障タイマの選択: タイマは、ホットスワップがタイムアウトするまでに過負荷を許容できる時間を決定し、 C_T を使用してプログラムできます。200 μs に設定するには、式 6 を使用します。

$$C_T = \frac{T_{FLT} \times I_{TMR, SRS}}{V_{TMR}} = \frac{200\mu\text{s} \times 10\mu\text{A}}{1.5\text{V}} = 1.3\text{nF} \quad (6)$$

1.5nF のセラミック コンデンサ (CC0603JRX7R8BB152) を使用しています。

- 入力電圧監視: OPA210 デバイスは差動アンプとして使用され、入力バス電圧を (ゲイン R_2/R_1 で) スケールダウンして監視します。抵抗 R_1 および R_2 を選択し、1/10 のゲインとなるように設定します (式 7 を参照)。

$$V_{BUS-IN} = \{\text{INPUT}(+) - \text{INPUT}(-)\} \times \frac{R_2}{R_1} = 800\text{V} \times \frac{20.5\text{k}\Omega}{3 \times 680\text{k}\Omega} = 8\text{V} \quad (7)$$

スケールされたバス電圧 V_{BUS-IN} は、TPS23521 データシートの標準プロセスに従って、入力バスの低電圧および過電圧スレッショルドを設定するために使用されます。

- FET の選択および SOA 分析: この設計では、1200V、8.8m Ω のシリコン カーバイド (SiC) コンポ JFET (UG3SC120009K4S) を使用しています。参考資料 2 に記載されているように、起動、短絡状態での起動、過電流というストレスの大きい 3 つのイベントについて、FET の SOA を解析する必要があります。
 - 起動時、突入電流が 100mA の場合、100 μF 出力コンデンサを 0V から 800V まで充電するために、システムは約 440ms を要します。UG3SC120009K4S FET は、70 $^{\circ}\text{C}$ 、ドレインソース間電圧 800V において 300mA 超の電流をサポートできるため、50% を上回る SOA マージンを確保できます
 - 短絡状態での起動時には、SS ピンを介してゲートに大きい容量が存在するため、ゲートは非常に低速で立ち上がります。FET のストレスを評価するには、電流パルスを矩形パルスとして近似する必要があります。この設計で

は、FET ストレスは 500 μ s (電流波形の等価長方形パルス)、1.5A、880V のパルスで近似されます。

UG3SC120009K4S FET は、880V、接合部温度の 100°C において、500 μ s、2.2A の電流パルスに対処できるため、50% の SOA マージンが確保されます。

- 過負荷イベント中、TPS23521 デバイスは電流制限モードで動作し、これはホットスワップ FET にとってリスクとなります。このリスクを回避するため、INA238 デバイスは 22A で過電流アラートを出すように設定されており、INA238 デバイスのアラート出力を用いて、UVEN ピンを介して TPS23521 デバイスを無効化します。この機能は、FET にストレスをかけずにサーキットブレーカ イベントをエミュレートします。
- ダウンストリーム負荷とのパワー グッド インターフェイス:** TPS23521 デバイスは、TPS23521 デバイスのグランド VEEH と VEEL を基準として、パワー グッド (PG) 信号を生成します。これらの信号はデジタル アイソレータを通過した後、ダウンストリーム負荷を制御するためにまとめられます。その結果、起動時の負荷を回避し、ホットスワップ FET にかかる SOA ストレスを非常に低く抑えられます。
- 出力放電回路:** IEC 62368-1 規格の安全要件を満たすため、ホットスワップ ソリューションには、出力キャパシタンスを 2 秒未満で放電する回路が組み込まれています。ホットスワップ FET がオフになったとき、または入力切り離されたとき、放電抵抗 (R_{DIS}) が動作して COUT を放電します。100 μ F を 1.5 秒で放電するために、2k Ω 、10W の抵抗 (AC10AT0002001JAB00) を選択しています。
- TVS ダイオードの選択:** 過渡保護部品の TVS ダイオードは、参考資料 3 に記載されているガイドラインに従って選択できます。入力側には、2 つの SMCJ400A ダイオードを直列に接続して配置しています。

5 テスト結果

提案されたソリューションは検証済みであり、このセクションではストレスの大きいあらゆる事象に対する試験結果を示します。図 5-1 に、100 μ F 容量を 800V まで充電する際の、起動時の突入動作を示します。図 5-2 に、出力端子で短絡した場合の回路の起動動作を示します。ここで示されているように、電流が 3A (低い電流制限レベル) に達したところで、TPS23521 デバイスが故障経路を検出して遮断します。緩やかな過電流故障が発生した場合、INA238 デバイスは 22A でアラートを出し、TPS23521 デバイスの EN ピンをプルダウンします。これにより、ホットスワップ FET は 10 μ s で無効化されます (図 5-3 を参照)。

図 5-4 に、定常状態での出力短絡故障時の回路の動作を示します。INA238 と TPS23521 の両デバイスは、急速に立ち上がる短絡電流を検出し、数 μ s で FET を無効化します。

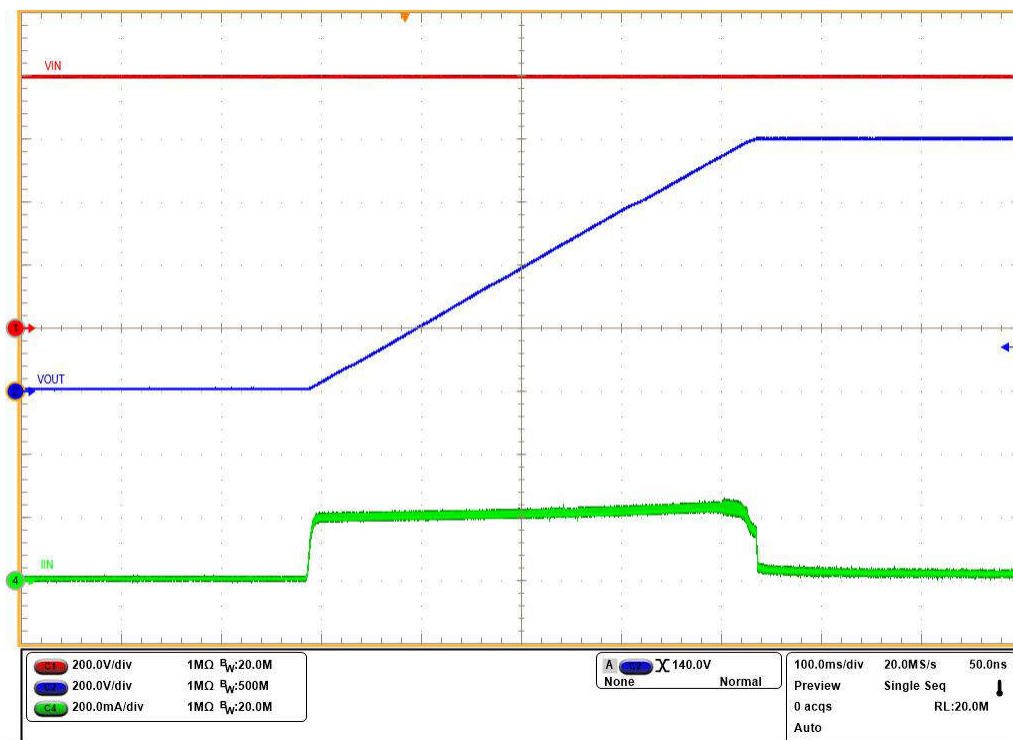


図 5-1. 100 μ F 容量を用いた 800V 起動

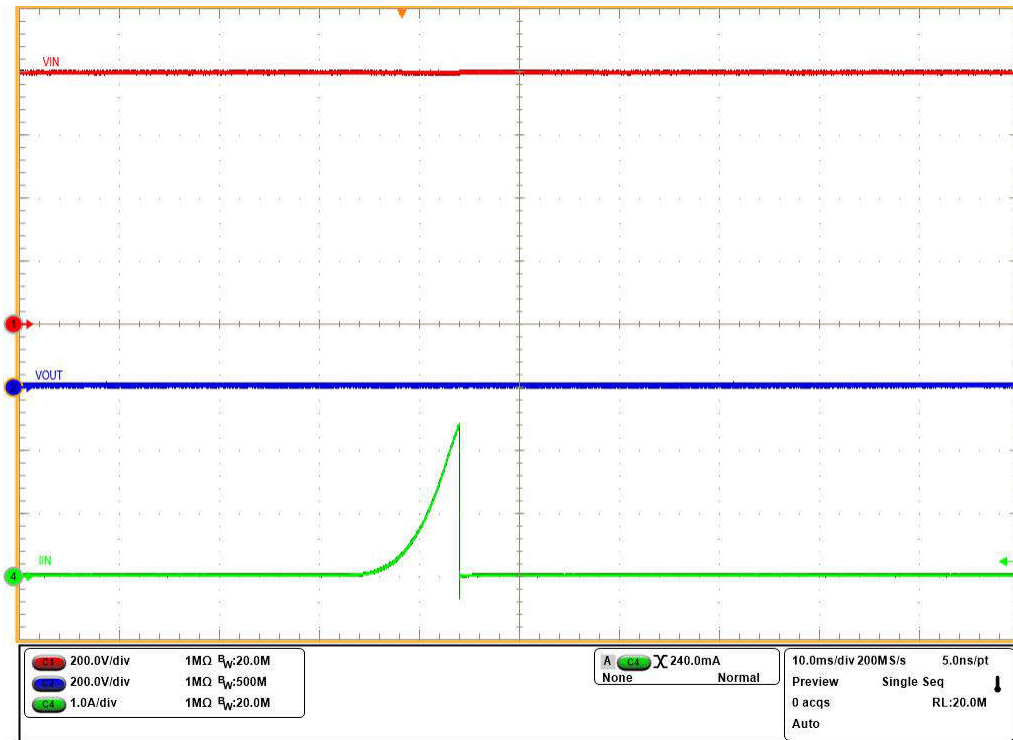


図 5-2. 800V VIN 時における短絡状態での起動

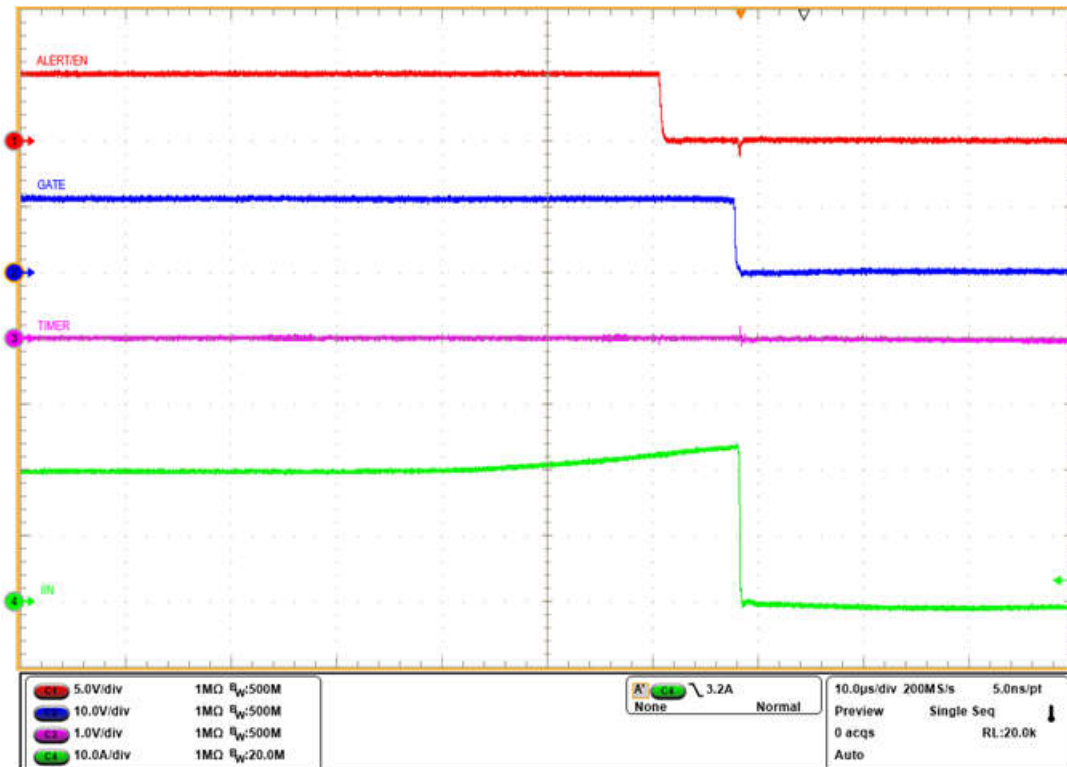


図 5-3. 緩やかな過電流時の回路応答

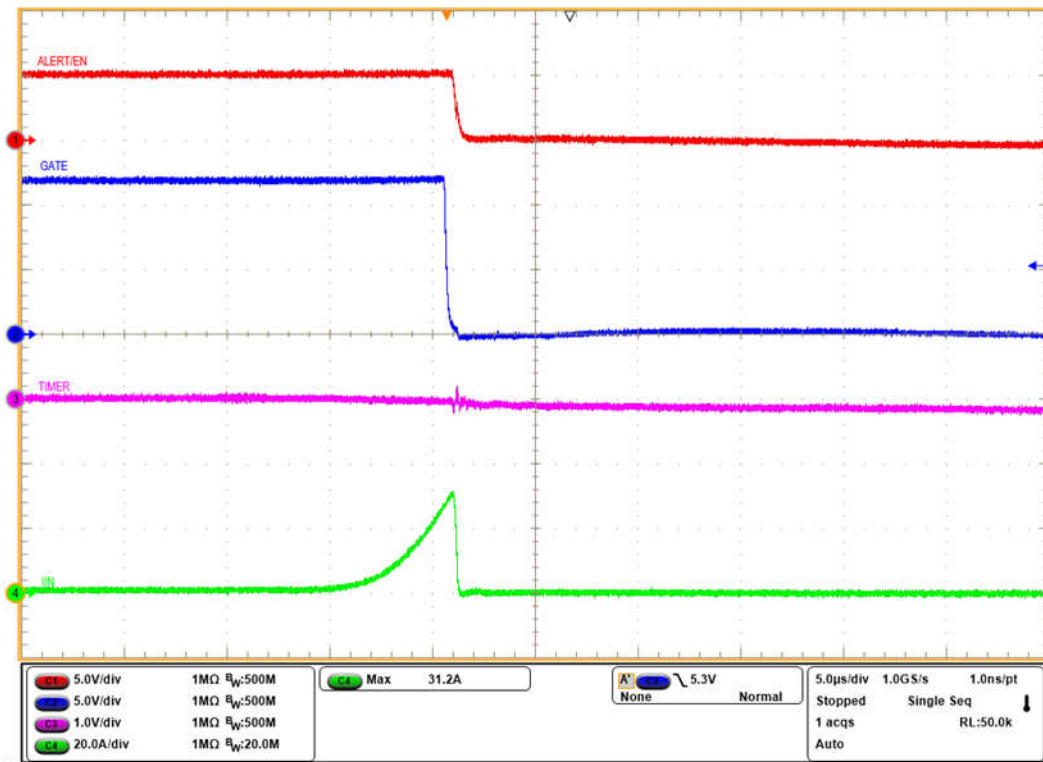


図 5-4. 出力短絡時の回路応答

6 まとめ

サーバー システムの電力レベルが増加し続けていることにより、データ センターでは従来の AC 配電から、HVDC バスによる配電への移行を迫られています。これにより、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ています。提案するフローティング グランド ホットスワップ アーキテクチャにより、スケーラブルで堅牢な保護ソリューションを実現し、現代のデータ センターにおける HVDC 配電の迅速な採用を後押しします。

7 参考資料

1. MacDonald, Brent, (2025 年)。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。テキサス インストルメンツの技術記事。
2. Panguloori, Rakesh, Goel, Kunal (2025 年)。堅牢で信頼性の高いパワー パス保護を実現するパワー スイッチの過渡保護設計。テキサス インストルメンツの Analog Design Journal。
3. Rogachev, Artem (2014 年)。『堅牢なホット スワップ設計』。テキサス インストルメンツのアプリケーション レポート。

関連ウェブサイト

- テキサス インストルメンツ、[TPS23521](#) データシート。
- テキサス インストルメンツ、[UCC28704](#) データシート。
- テキサス インストルメンツ、[OPA210](#) データシート。
- テキサス インストルメンツ、[INA238](#) データシート。
- テキサス インストルメンツ、[ISO1644](#) データシート。
- テキサス インストルメンツ、[ISOM8110](#) データシート。

キーワード: TPS23521、ホットスワップ、エンタープライズ システム、AI サーバー、入力 保護

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