

Application Brief

データセンター向け **mCRPS** 規格に適した高速電流センシング

Rachel Scheller

はじめに

データセンターが高密度の人工知能 (AI) ワークロードへと移行するのに伴い、機能、電力レベル、効率、複雑なセンシングに関する要件は、ますます高い水準へと引き上げられ続けています。これは、M-CRPS (Modular Hardware System-Common Redundant Power Supply) や OCP ORv3 (Open Compute Project Open Rack v3) など、最新のサーバー電源要件仕様を通じて高度化され続けます。

サーバー電源ユニット (PSU) 機能を拡張する手段として、DC/DC 電力段内の絶縁トランスの一次側および二次側の双方を含む、サーバー PSU 内部の複数の箇所、新しい **SiC** (シリコン カーバイド) または **GaN** (窒化ガリウム) スイッチが配置されています。図 1 に、一般的な 12V 出力 PSU 内で実施される電圧変換を含む、主要なシステム機能の簡略化されたシグナルチェーンのブロック図を示します。

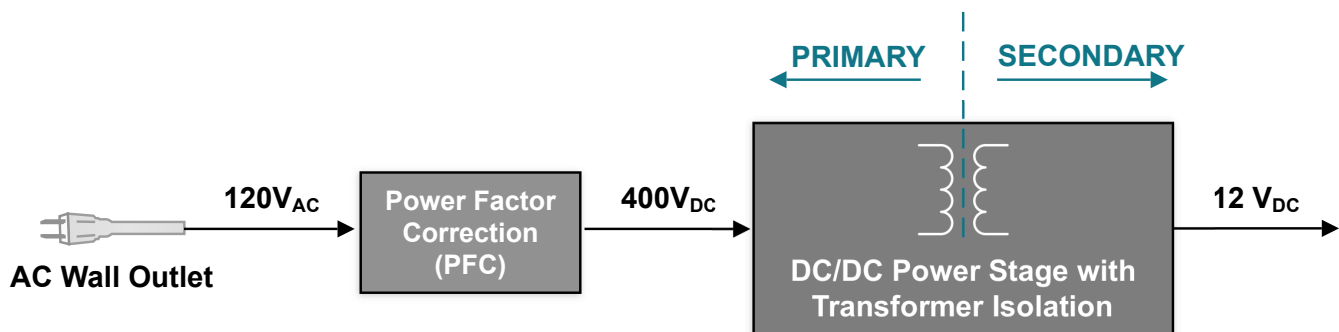


図 1. サーバー PSU のブロック図

SiC スイッチまたは GaN スイッチは、過電流事象に対して非常に敏感で、影響を受けやすいです。短絡の発生を極めて短時間のうちに検知し、パワー スイッチを流れる電流を低減させることでこれを解消しなければ、スイッチおよび周辺回路に恒久的な損傷をもたらすリスクがあります。標準的な PSU のスイッチング周波数は数百、数千ヘルツ (100 ~ 500kHz) で、全体の周期は 10 ~ 2 μ s になります。したがって、対策を講じるための十分な時間を確保するには、1 ~ 2 μ s という応答時間で過電流の発生を検出し、その間の極めて短い時間内にダウンストリームへ信号を送信する必要があります。この安全機能は過電流保護 (OCP) と呼ばれ、高感度な SiC または GaN スイッチが搭載されているあらゆる箇所で適用されます。最も一般的には**力率補正 (PFC)** 段とシステム出力レールにおいて用いられます。

「Open Compute Project」規格では、過電流保護について何が規定されていますか。

m-CPRS の「Open Compute Project」規格 (バージョン 1.05、セクション 9.5) によれば、主たる 12V 出力の電流ミラーとして機能する出力電流監視ピン (I_{MON}) が組み込まれていなければなりません。システム内の他の電源から出力される I_{MON} 信号を相互に接続することで、システム全体として、すべての電源の合計出力電流を測定するための仕組みを実現することができます (9)。表 1 に、規格で要求される後続の I_{MON} 信号特性を示します。

表 1. Open Compute Standard⁹ の I_{MON} 信号特性

信号のタイプ	電流源
感度	0 ~ 2mA (定格電流の 0 ~ 200% に相当)
最小帯域幅	40kHz
信号遅延	≤ 20μs (電源のメイン出力に外部コンデンサを接続せずに、5% ~ 105% からの負荷ステップと 8A/μs の di/dt を使用してテスト済み)

図 2 に示すシステム ブロック図に示すように、メイン システムからの直流電流値は、通常、直流シャント抵抗回路を介して検出されます。その後、様々な機能向けに分岐され、最終的な I_{MON} 出力向けにミラーリングされます。

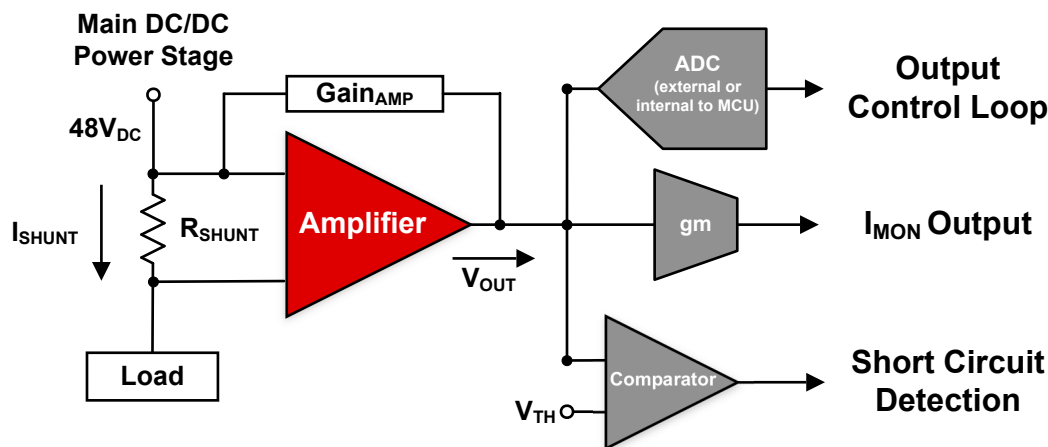


図 2. I_{MON} センシングのブロック図

この規格を電流検出回路の部品選定へと具体化するには、複数の計算を行う必要があります。48V レールを備えた 3.5kW AI サーバーの例を使用すると、100% 負荷時の標準出力電流は約 73A になります (式 1)。したがって、200% 負荷の場合、式 2 に示すように、出力は約 146A になります。

$$I_{OUT@100\%load} = \frac{P}{V} = \frac{3500W}{48V} = 73A \quad (1)$$

$$I_{OUT@200\%load} = 2 \times 73A = 146A \quad (2)$$

0.5mΩ のシャント抵抗を想定すると、シャント抵抗における電圧降下は、オームの法則を用いて、電流の関数として算出されます。

$$V_{SENSE@100\%} = I_{OUT@100\%} \times R_{SHUNT} = 73A \times 0.0005\Omega = 36.5mV \quad (3)$$

$$V_{SENSE@200\%} = I_{OUT@200\%} \times R_{SHUNT} = 146A \times 0.0005\Omega = 73mV \quad (4)$$

シャント抵抗の両端に生じる電圧降下が特定されれば、必要なピークツーピーク出力電圧を概算することで、検出された電圧変化 (電流に比例) を増幅するために必要なゲインを求めることができます。この電圧は、過電流検出におけるコンパレータや、出力制御ループ用の A/D コンバータ (ADC) など、後続の解析に利用することができます。使用可能な電圧範囲の例は、0.5V ~ 2V です。25V/V のゲインでは、最小値と最大値の両方に対応する出力電圧は以下に示す目標値の範囲内にあります。

$$V_{out@100\%} = Gain_{amplifier} \times V_{sense@100\%} = 25V/V \times 36.5mV = 0.913V \quad (5)$$

$$V_{out@200\%} = Gain_{amplifier} \times V_{sense@200\%} = 25V/V \times 73mV = 1.83V \quad (6)$$

シグナル チェーンの計算

同一アンプとシャント抵抗を使用して、検出された電流を過電流保護信号 (OCP) として使用できます。図 2 に、高速コンパレータを使用して過電流保護のために 12V または 48V レールでハイサイド電流センシングを使用するシグナル チェーンの例を示します。計算されたシステム パラメータを使用して、必要なアンプ帯域幅を計算できます。

$$T_{OCP} = T_{Amplifier} + T_{Comparator} \leq 1\mu s \quad (7)$$

$$T_{Amplifier} \leq 0.3\mu s, \text{ to leave sufficient time delay for other analysis components} \quad (8)$$

$$Bandwidth = \frac{0.35}{T_{Amplifier}} = \frac{0.35}{0.3\mu s} \cong 1MHz \quad (9)$$

$$Gain \text{ Bandwidth Product}(GBW) = Gain \times BW = 25V/V \times 1MHz = 25MHz \quad (10)$$

このシステム計算では、25MHz GBW アンプは、システム全体の性能に対して十分な許容誤差を確保できる、最低限の速度要件を満たすデバイスです。I_{MON} を使用して実装する場合、20μs の最大信号遅延を使用して同様の計算を行うことができます。

$$T_{I_{MON}} = T_{Amplifier} + T_{gm} + T_{other} \leq 20\mu s \quad (11)$$

$$T_{Amplifier} \leq 0.3\mu s, \text{ assuming using the same device from the OCP calculation} \quad (12)$$

$$Bandwidth = \frac{0.35}{T_{Amplifier}} = \frac{0.35}{0.3\mu s} \cong 1MHz \quad (13)$$

$$Gain \text{ Bandwidth Product}(GBW) = Gain \times BW = 25V/V \times 1MHz = 25MHz \quad (14)$$

表 2. 設計サマリ例

パラメータ	値
サーバーの電力定格	3.5kW
出力電圧	48V
シャント抵抗	0.5mΩ
アンプ ゲイン	25 V/V
必要な最小アンプのゲイン帯域幅積	25MHz

アンプの選択

式 10 と式 14 に示すように、過電流保護のシャットオフを検証し、さらにはシステム レベルでの監視やフィードバックを行うために必要なシステム全体の応答時間を確保するには、ゲイン帯域幅積の広いアンプを選択することが重要です。

帯域幅の要件に加え、アンプの精度性能は、電流検出全体の性能にとって重要です。オフセット電圧と入力バイアス電流が小さいほど、検出測定 of 誤差は小さくなります。この性能を実現するための一般的なアーキテクチャは、OPA488 などのゼロドリフト¹ アンプです。ゼロドリフト¹ アンプは、追加のトリミングや後処理キャリブレーションの必要なしに、オフセット電圧およびオフセット電圧ドリフト性能を大幅に低減する内部スイッチング アーキテクチャを採用しています。

または、パッケージ後のストレストリミングを可能にするテキサス インストルメンツの e-TrimTM 技術を搭載した OPA863A や OPA620 といったデバイスを使用することで、高速性能と高精度性能のバランスを実現できます。

まとめ

テキサス インストルメンツの高速、高精度アンプ製品ラインアップにより、将来のサーバー用 PSU 電流センシング設計が可能になり、AI データセンターの高まる需要に対応できます。

表 3. 推奨アンプ

部品番号	アーキテクチャ	GBW (MHz)	最大電源電圧 (V)	入力バイアス電流 (pA, 最大値)	オフセット電圧 (V _{OS}) (mA, 最大値)	CMRR (標準値, dB)
OPA488	ゼロドリフト ¹	14	48	0.35	0.0075	150
OPA620	CMOS	50	5.5	50	0.3	96
OPA863A	e-Trim™ ²	50	12.6	730	0.095	120
OPA810	FET 入力 ⁸	70	27	0.02	0.5	100

表 4. 推奨コンパレータ

部品番号	出力タイプ	伝搬遅延 (ns)	最大電源電圧 (V)	入力同相モード (V _{CM})	オフセット電圧 (V _{OS}) (mA, 最大値)	消費電力 (I _Q) (μA)
TLV3201	プッシュプル	40	5.5	レール ツー レール	1	40
TLV7021	オープンドレイン	260	5.5	レール ツー レール	0.5	5
TLV1805	プッシュプル	250	40	レール ツー レール	4.5	150

表 5. 推奨 A/D コンバータ

部品番号	アーキテクチャ	分解能 (ビット)	最大サンプリングレート (kSPS)	インターフェイスのタイプ	SNR (dB)
ADS7042	SAR	12	1000	SPI	70
ADS127L11	ΔΣ	24	1000	SPI	110
ADS7138	SAR	12	140	I2C	73

参考資料

1. テキサス インストルメンツ、『ゼロドリフト アンプ』:『特長と利点』アプリケーション ブリーフ。
2. テキサス・インストルメンツ、『オフセット補正方法』:『レーザー トリミング、e-Trim™、チョップ』、アプリケーション ブリーフ。
3. テキサス インストルメンツ、『リファレンス デザイン』:『高速電流シャント モニタ』、製品ページ。
4. テキサス インストルメンツ、『C2000™ リアルタイム マイコン使用、1kW、12V HHC LLC のリファレンス デザイン』、製品ページ。
5. テキサス インストルメンツ、『リファレンス デザイン』:『1/2/3 個のシャント FOC を搭載した 3 相インバータ向け、セリングが 1μs 未満の電流センシング』、製品ページ。
6. テキサス インストルメンツ、『SiC または GaN スイッチに必要なローサイド電流シャント測定による過電流故障の迅速な検出』、アプリケーション ブリーフ。
7. テキサス インストルメンツ、『高電圧システムにおける電力変換の簡素化』、マーケティング ホワイトペーパー。
8. テキサス インストルメンツ、『高速アプリケーションで JFET 入力アンプを使用する利点』、技術記事。
9. Open Compute Project、『サーバー /MHS』、Web ページ。

商標

すべての商標は、それぞれの所有者に帰属します。

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