

Application Note

アクティブ電流共有:TI のスマート eFuse に搭載された高度な電流分布機能



Amrit Jit, Harsh Singh, and Hameem Hamza

概要

eFuse は統合型の電力経路保護デバイスであり、様々な用途において離散型フロントエンド保護回路に代わるものとして採用が増えており、コンパクトかつ高効率な設計を実現しています。eFuse は最大 60A の電流および最大 80V の電圧に対応しています。しかし、サーバーや通信機器などの特定の用途では、数十アンペアから数百アンペアの非常に高い電流が要求される場合があります。これらの要求に対応するため、システム設計者は高電流要件に対応するためおよび熱管理の改善のために、eFuse を並列接続してシステムの拡張を検討することが多くあります。しかし、並列接続された eFuse 間での電流分布が均一にならないことが課題であり、その結果、誤ったシステム シャットダウンや信頼性の懸念を引き起こす可能性があります。本アプリケーション ノートでは、TI eFuse のアクティブ電流共有 (ACS) 機能を紹介し、80A の負荷電流に対応する 4 個の eFuse と 100A の負荷電流に対応する 6 個の eFuse を用いた事例を通じて、設計上および性能面での利点について説明します。

目次

1 はじめに.....	2
2 スタッカブルおよび並列動作における eFuse の課題.....	3
3 eFuse における電流分配技術.....	4
3.1 個別の eFuse 過電流制限による並列動作.....	4
3.2 並列動作時のシステム全体過電流制限.....	6
3.3 アクティブ電流共有 (ACS) による並列動作.....	7
4 まとめ.....	10
5 参考資料.....	10

図の一覧

図 1-1. 48V ラック サーバー アーキテクチャ.....	2
図 2-1. N 個の eFuse デバイスの並列接続数.....	3
図 3-1. 80A の負荷電流をサポートするために、個別の過電流制限を持って並列接続された eFuse デバイス.....	5
図 3-2. 共通の過電流制限を持ち、80A の負荷電流をサポートするために並列接続された eFuse デバイス.....	6
図 3-3. ACS 非使用時における 4 個の eFuse 間の電流分担.....	7
図 3-4. 共通の過電流制限と ACS を用いて、80A の負荷電流をサポートするために並列接続された eFuse デバイス.....	8
図 3-5. ACS を用いた 4 個の TPS1685 eFuse 間の電流分担.....	9
図 3-6. 起動時における 4 個の TPS1685 eFuse 間の電流分布.....	9

表の一覧

表 3-1. 設計パラメータ.....	4
表 3-2. 並列接続された 4 個の eFuse における電流分布.....	4
表 3-3. $R_{DS(on)}$ 変動を伴う 6 個の TPS1685 eFuse 間の電流分布.....	10
表 3-4. ACS による $R_{DS(on)}$ 補正を適用した 6 個の TPS1685 eFuse 間の電流分布.....	10

商標

すべての商標は、それぞれの所有者に帰属します。

1 はじめに

人工知能 (AI) の進展により、AI 搭載プロセッサおよびサーバーにおける電力および電流消費がかつてないほど急増しています。AI モデルがますます複雑化し、大規模な計算資源を必要とするにつれて、電力需要は急激に増加しています。最新の AI プロセッサ、例えば画像処理装置 (GPU) やテンソル プロセッシング ユニット (TPU) は、従来のものと比べて著しく多くの電力を消費しています。AI 駆動のデータセンターやサーバーでは電力消費が急激に増加しており、一部の推計では過去数年でエネルギー使用量が 20 ~ 30% 増加したとされています。この傾向は、計算性能とエネルギー効率、熱管理、環境持続可能性とのバランスを取らなければならないデータセンター運営者にとって大きな課題となっています。これらの課題を軽減するため、研究者たちは高度な冷却システム、低消費電力チップ設計、新しいメモリアーキテクチャなど、AI の変革的な可能性を地球資源を損なうことなく実現するための革新的な設計を模索しています。

図 1-1 は、48V ラック サーバー アーキテクチャと、データセンターやサーバー ルームで一般的に採用されている、サーバーおよびその他の機器に効率的に電力を供給するための電力分配設計を示しています。このアーキテクチャは、エネルギー損失を最小化し、電力密度を最大化し、システム全体の効率を最適化できることから、広く採用されています。TI の大電流 eFuse 製品群である TPS1685、TPS1689、TPS25984、TPS25985 は、突入電流管理、入力低電圧、入力過電圧、出力短絡時の電源投入、過電流、出力ホットショートなどの入力電力経路保護を提供し、PSU と電圧レギュレーター モジュール (VRM) やその他のエンド負荷の電力段との間に配置されます。

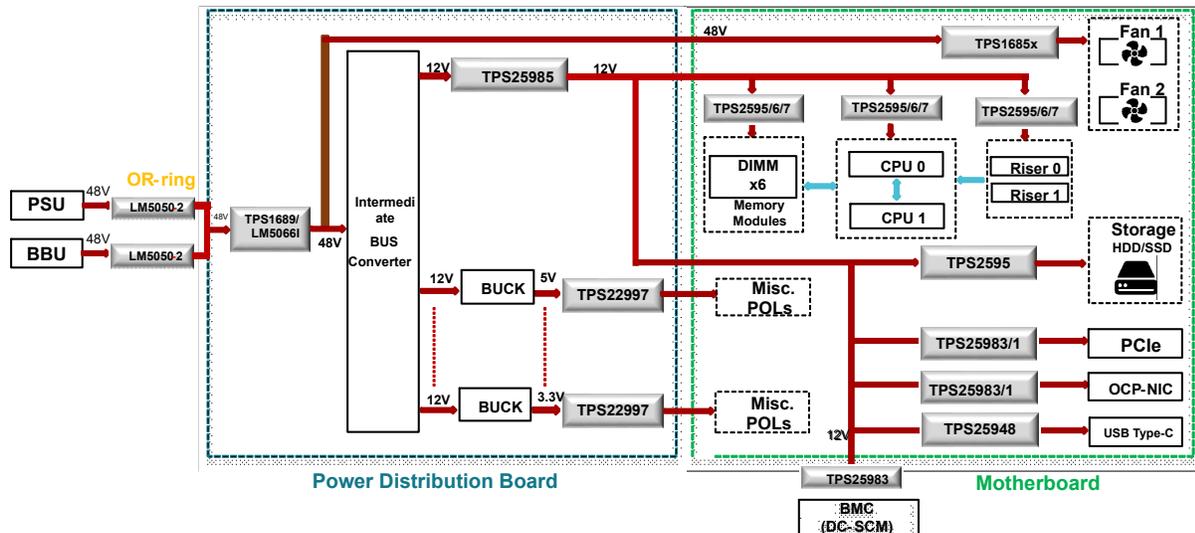


図 1-1. 48V ラック サーバー アーキテクチャ

2 スタックアップおよび並列動作における eFuse の課題

本アプリケーションでは、TPS1685 を並列動作の前提として検討しています。eFuse を並列構成で動作させる際、eFuse 間の電流バランスは大きな課題となります。並列動作を成功させるには、定常状態において並列接続されたデバイス間で電流が均等に分担されていることが重要です。図 2-1 は、 N 個の eFuse デバイスが並列接続された構成を示しています。入力端子および出力端子はそれぞれ接続されています。

従来のスタックアップ eFuse は独立して動作し、それぞれが図 1 に示すようにシステム全体のスレッシュホールドを eFuse の数で割って算出された定義済みのトリップ スレッシュホールドを持っています。この分散型アプローチでは、各 eFuse は他の eFuse の状態や動作を認識していないことを意味します。

$$I_{threshold} = \frac{I_{total}}{N} \quad (1)$$

仕様が完全に一致し、各 eFuse 経路の PCB トレース抵抗も均一である構成では、この設計は正常に機能し、システム目標のスレッシュホールドで正確にトリップします。しかし、eFuse の $R_{ds(on)}$ 、コンパレータのスレッシュホールドや基準電圧、および PCB トレース抵抗に不整合がある場合、個別の過電流スレッシュホールドを持つ eFuse は異なるスレッシュホールドでトリップする可能性があります。 $R_{ds(on)}$ 、経路抵抗、およびスレッシュホールドが低い eFuse は、システム全体の負荷電流が過電流スレッシュホールド以下であっても、より早くトリップします。これによりシステム全体の過電流スレッシュホールドが低下し、通常動作時に誤トリップを引き起こす原因となります。

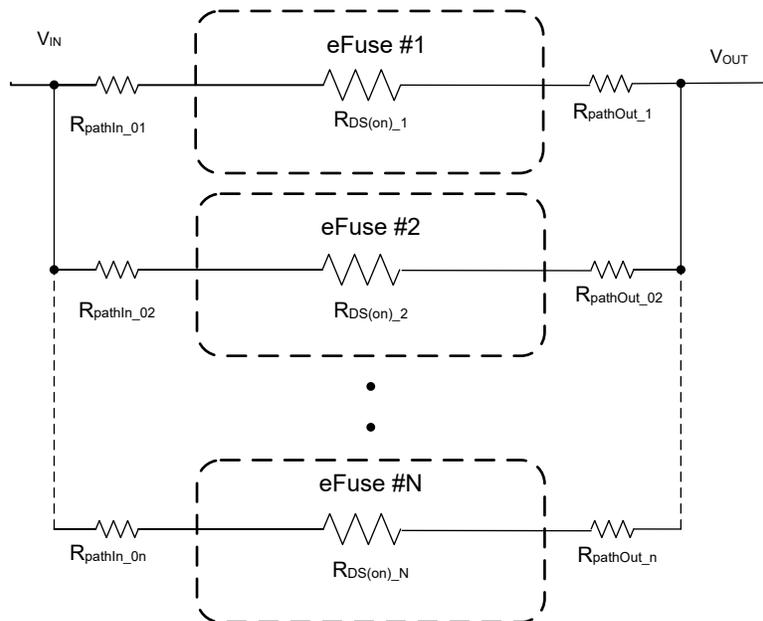


図 2-1. N 個の eFuse デバイスの並列接続数

3 eFuse における電流分配技術

本セクションでは、システム性能、長期的な信頼性、効果的な電流分配を評価するために、システム例とともにさまざまな電流分配技術について説明します。

図表 3-1 は、58V 電圧レール用途のシステム例を示しており、80A の負荷電流をサポートするために 4 個の TPS1685 eFuse が並列接続されています。各 eFuse 経路に異なる経路インピーダンスを導入し、トレース長の不整合による $R_{DS(on)}$ および経路インピーダンスの現実的な不均一性を再現しています。

表 3-1. 設計パラメータ

設計パラメータ	値の例
入力電圧範囲 (VIN)	58V
最大 DC 負荷電流 (IOUT(max))	80A
並列接続される eFuse の数	4
最大出力キャパシタンス (CLOAD)	3mF
$R_{DS(on)}$	3.65m Ω
経路インピーダンス_1	0 Ω
経路インピーダンス_2	0.5m Ω
経路インピーダンス_3	0.5m Ω
経路インピーダンス_4	1m Ω
周囲温度	25°C

3.1 個別の eFuse 過電流制限による並列動作

図 3-1 は、各 eFuse が 20A の個別過電流のスレッシュホールドを持つ 4 つの eFuse を並列接続し、58V サーバー電圧レール上で 80A の負荷電流を分担する構成を示しています。定常動作時における電流分担は、並列接続された eFuse デバイス間の $R_{DS(on)}$ の不整合によって決まります。最も低いドレイン-ソース間抵抗 ($R_{DS(on)_{min}}$) を持つデバイスが、他のデバイスよりも最大電流 (IMAX) を多く分担します。図表 3-1 に示すように、現実的な経路インピーダンスを導入して eFuse の電流分布を示しています。

各 eFuse を流れる電流は、式 2 を用いて計算できます。

$$I_{eFuse_N} = I_S \times \frac{R_{Total\ system}}{R_N} \quad (2)$$

表 3-2. 並列接続された 4 個の eFuse における電流分布

eFuse	実効抵抗 (RDS_ON + 経路抵抗)	電流分布
eFuse_1	3.65m Ω	22.57A
eFuse_2	4.15m Ω	19.85A
eFuse_3	4.15m Ω	19.85A
eFuse_4	4.65m Ω	17.72A

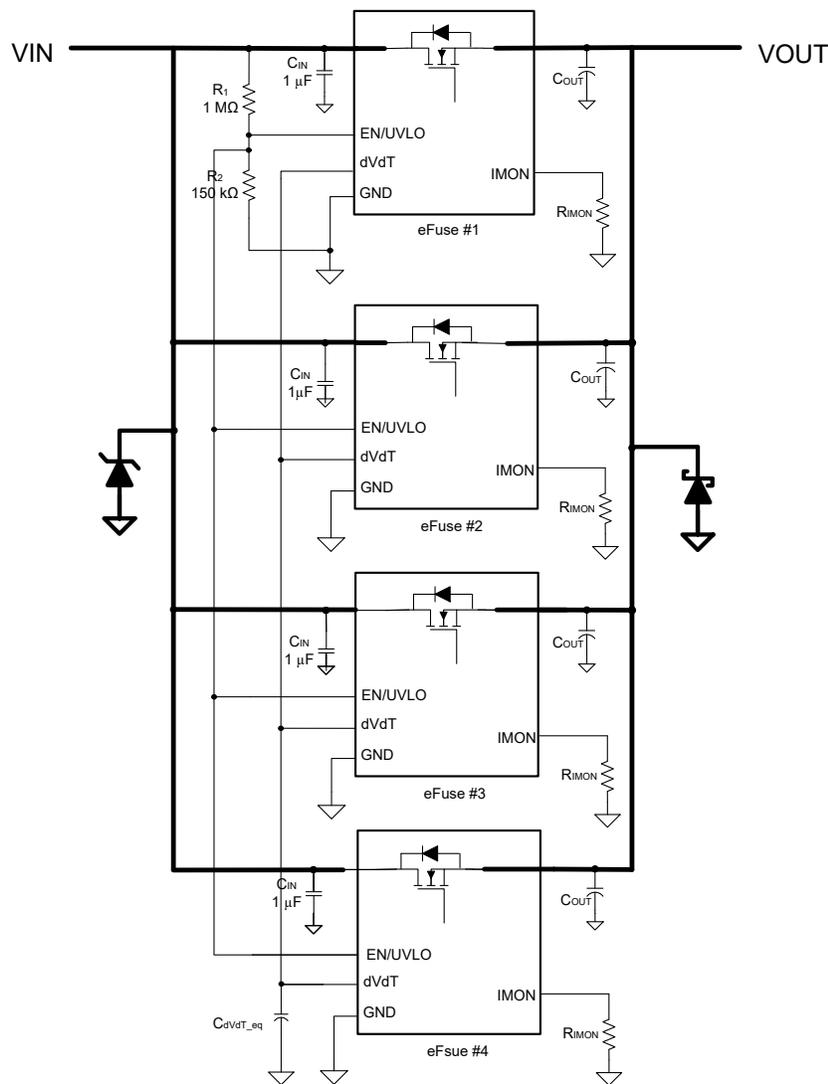


図 3-1. 80A の負荷電流をサポートするために、個別の過電流制限を持って並列接続された eFuse デバイス

図 表 3-2 に示された実効抵抗および電流分布に基づく、eFuse_1 は 20A を超える電流を流して最初にトリップし、その後並列接続された他の eFuse もトリップします。その結果、システムは 80A を大きく下回る電流でシャットダウンしてしまいます。

制約

eFuse の不正確さを軽減するために、システム設計者は以下の選択を迫られます：

1. 電源ユニット (PSU) の過剰設計

システムのトリップ スレッショルドを eFuse の誤差に対応するために引き上げると、過大な容量の電源ユニット (PSU) となり、資源の浪費、生産コストの増加、消費電力の増大、システム効率の低下を招きます。また、安全な動作を確保するために、さらに多くの eFuse を並列に追加する必要があります。

2. システム性能の制限

誤動作によるトリップを防ぐために、負荷をシステムのトリップ スレッショルド以下に制限します。eFuse の不正確さに対応するためにシステムの能力を人工的に制限することは、システムのスループット低下や性能劣化につながります。

3.2 並列動作時のシステム全体過電流制限

セクション 3.1 で述べた問題を回避するために、TI の eFuse デバイスは新しい過電流保護方式を採用しています。これらの eFuse デバイスは、個別デバイスの電流ではなく、システム全体の電流に基づいて動作します。すべての IMON ピンは図 3-2 に示すように R_{IMON_eq} に接続され、システム全体の電流を設定します。これにより、デバイスや経路間の不整合による過電流スレッショルドの低下という問題が解消されます。

システムのトリップ スレッショルドを最大システム電流より高く設定することで、不要な eFuse トリップを防止します。しかし、図 3-2 に示すように、eFuse 間の電流分布は不均一であり、eFuse_1 は動作電流よりも高い電流を流し続けます。

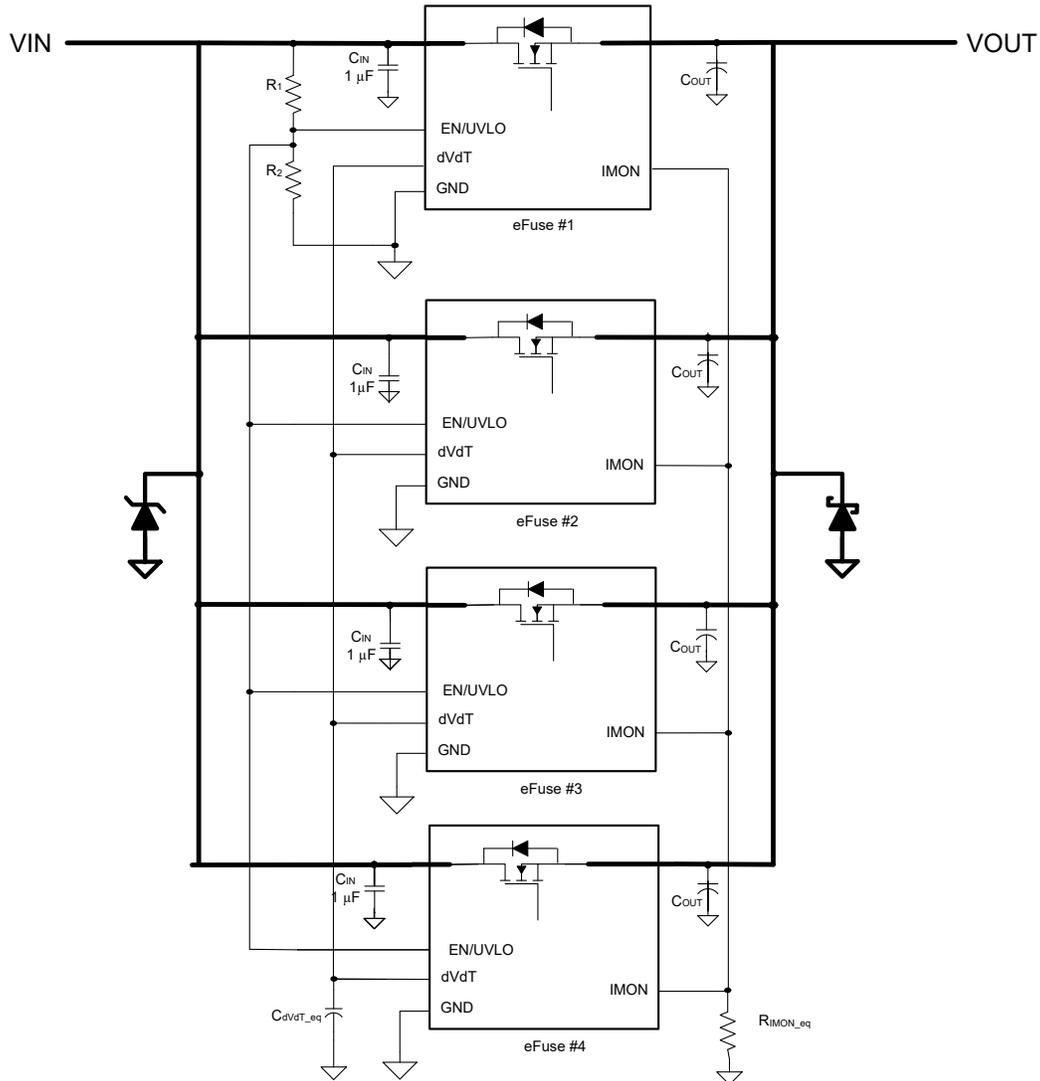


図 3-2. 共通の過電流制限を持ち、80A の負荷電流をサポートするために並列接続された eFuse デバイス

性能評価のために、図 3-3 に示すように負荷電流を 2A ずつ段階的に増加させます。経路抵抗の不整合により、eFuse が不均一な電流を分担している様子が確認できます。図 3-3 では、各 eFuse を流れる電流を高めに維持し、デバイスが ACS に移行しないようにしています。



図 3-3. ACS 非使用時における 4 個の eFuse 間の電流分担

注

TPS1685 の ACS は図 [セクション 3.3](#) に示されており、ACS のスレッシュホールドを各 eFuse の定格電流より十分に高く設定することで無効化できます。[TPS1685 設計計算ツール](#) を用いて R_{ILIM} の値を決定できます。

制約

eFuse 間の不均一な電流分担

eFuse デバイスが最大定格電流で動作している場合、個々の eFuse 間で電流分布が不均一になると、ストレスレベルに差が生じます。中でも高い電流を流す eFuse デバイスは、熱的および電氣的ストレスの増加にさらされます。これにより、早期故障、過熱、劣化が発生し、場合によっては PCB のトレースやビアの定格電流を超える可能性があります。その結果、システムの信頼性が低下し、保守コストの増加やシステムのダウンタイムの発生につながり、最終的には PCB の寿命を短縮することになります。

3.3 アクティブ電流共有 (ACS) による並列動作

[セクション 3.2](#) で述べられた問題を解決するために、TI の eFuse は ACS を実装しており、電流が一定のスレッシュホールドを超えた際に動作します。アクティブ電流共有ループは、FET の R_{dson} を制御することで動作します。より多くの電流を流している eFuse は、電流を抑制するために R_{dson} をわずかに上昇させ、他のデバイスがより多くの電流を流せるようにして、電流の再分配またはバランス調整を実現します。

ACS のスレッシュホールドを低く設定すると、経路全体の抵抗が増加し、低い電流時でも不要に電力損失や自己発熱が増大します。同時に、これにより長期的な信頼性の面で直接的な利得が得られるわけではありません。

アクティブ電流共有のスレッシュホールドは、各デバイスの最大定格直流電流に設定する必要があります。最適な設定値は、各デバイスの過電流保護スレッシュホールドに近い値とすることです。なお、この過電流スレッシュホールドはデバイス間の不整合の影響を受けません。ただし、システムの負荷電流が最大直流電流に近づき始めると、アクティブ電流共有が作動するようになっており、これにより長時間その領域で動作するシステムにとっては、長期的な信頼性の観点から非常に有効です。負荷電流がこのポイントをさらに超えて増加した場合（負荷トランジェントや障害時など）、アクティブ電流共有ループは無効化され、代わりにブランキング タイマー付きの過電流保護回路により保護が行われます。

デバイスがアクティブ電流共有に移行する電流スレッシュホールドは、 V_{REF} と R_{ILIM} の値に依存します。[TPS1685 設計計算ツール](#) を用いて R_{IREF} 、 V_{IREF} 、および R_{ILIM} の値を決定できます。

式 3 は ACS スレッシュホールドに基づいて R_{ILIM} 抵抗を決定するために使用されます。

$$R_{ILIM} = \frac{1.1 \times V_{IREF}}{3 \times G_{ILIM} \times I_{LIM}(ACS)} \quad (3)$$

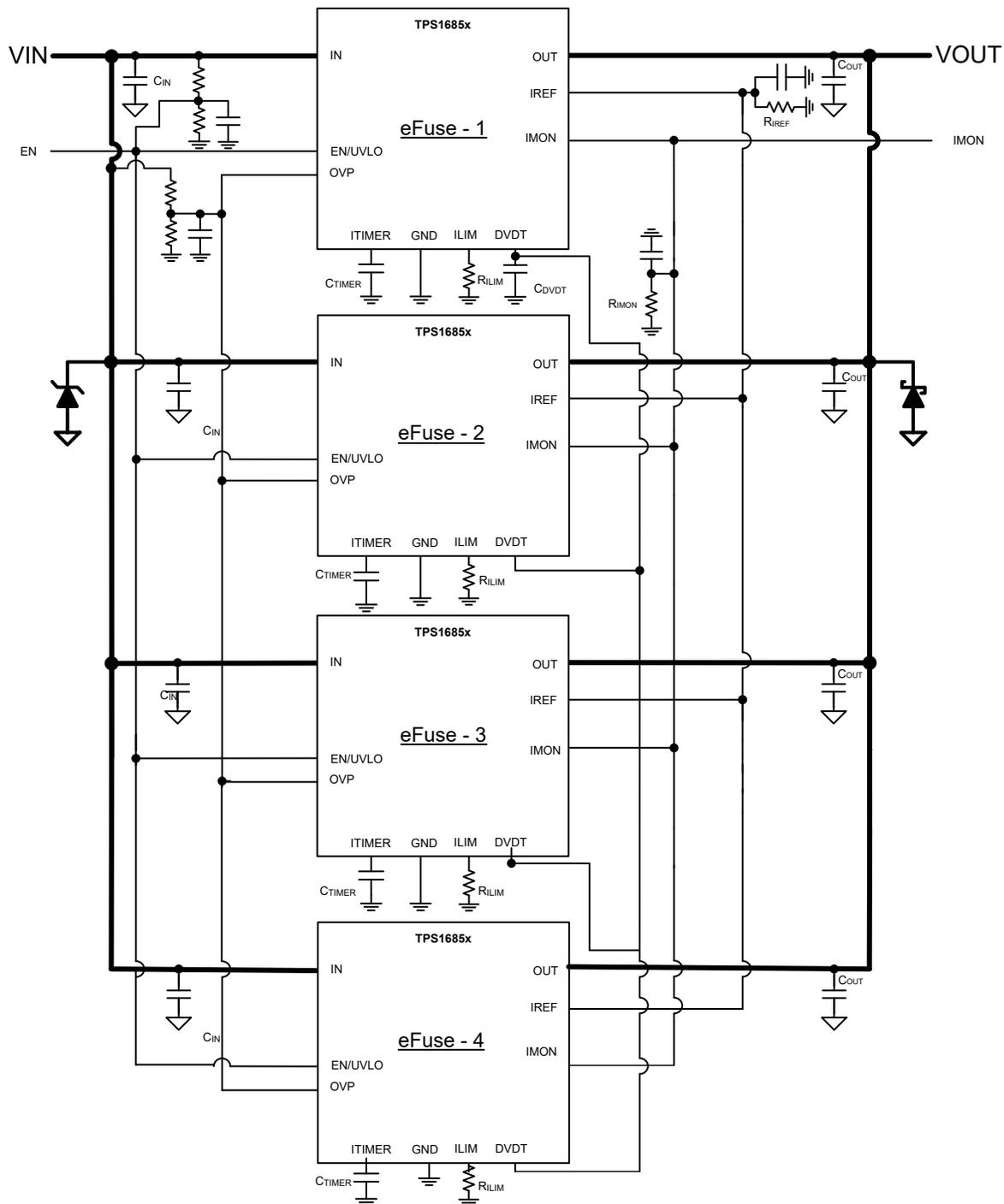


図 3-4. 共通の過電流制限と ACS を用いて、80A の負荷電流をサポートするために並列接続された eFuse デバイス

性能評価のために、図 3-5 に示すように負荷電流を 2A ずつ段階的に増加させます。電流ステップの初期段階では、eFuse が不均一な電流を分担している様子が確認できます。ACS により、各 eFuse を流れる電流が次第に収束していく様子が確認できます。

この波形は、図 3-1 に示されたシステム パラメータを用いて取得したものです。

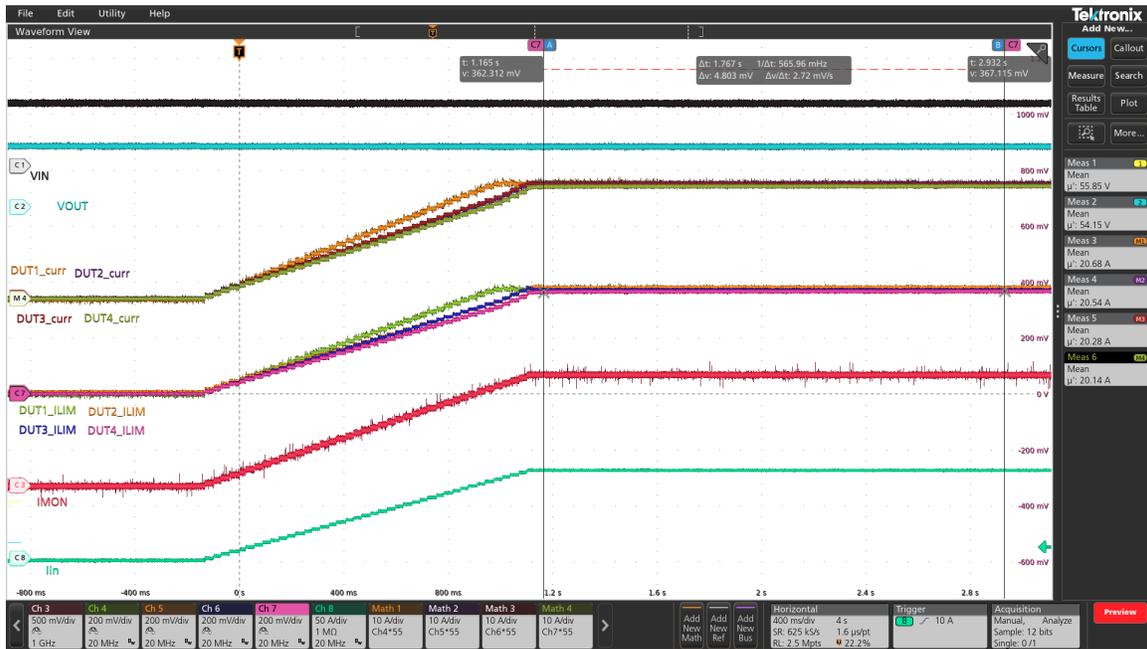


図 3-5. ACS を用いた 4 個の TPS1685 eFuse 間の電流分担

TPS1685x は、起動時に独自の電流バランシング機構を実装しており、並列に接続された複数の TPS1685x デバイスが突入電流を共有し、すべてのデバイスに熱ストレスを分散できるようにします。この機能は、すべてのデバイスで正常な起動を完了し、一部の eFuse が早期にサーマル シャットダウンに至るシナリオを回避するのに役立ちます。これは、並列チェーンの突入電流能力が実質的に向上します。突入性能の向上により、突入時間やシステムの信頼性を損なうことなく、大容量の負荷コンデンサを高電流プラットフォーム上でサポート可能になります。



図 3-6. 起動時における 4 個の TPS1685 eFuse 間の電流分布

ACS を用いた 6 個の eFuse デバイスの並列接続における電流分布

この例では、システム電流要件が 100A の構成において、6 個の TPS1685 eFuse が並列接続されています。TPS1685x 9V ~ 80V、3.65mΩ、20A スタックアップ統合ホットスワップ (eFuse) 高精度高速電流モニター搭載のデータシートによると、典型的な $R_{DS(on)}$ は 3mΩ であり、最大で 6mΩ に達することがあります。表 3-3 は、最大システム電流 100A の並列接続された 6 個の eFuse デバイス間の $R_{DS(on)}$ 変動の例を示しています。表 3-3 に示されるように、eFuse 間の電流分布を見ることができ、eFuse_1 の電流は最大で 23.07A に達し、これは推奨動作電流より 15% 高い値です。

ACS (アクティブ電流共有) は、高電流デバイスの $R_{DS(on)}$ を調整して電流を均等に分配します。この電流に対する ACS スレッシュホールドは TPS1685 設計計算ツール で設定可能です。ACS が有効で、デバイスの ACS スレッシュホールドが 20A に設定されている場合の各 eFuse の電流は以下の通りです。表 3-4 は、ACS 適用時の $R_{DS(on)}$ 変動および電流分布を示しています。eFuse_2、eFuse_3、eFuse_4、eFuse_5、および eFuse_6 の $R_{DS(on)}$ に変化はありませんが、eFuse_1 の $R_{DS(on)}$ は 30% 増加させられており、電流分布をより均等にする目的があります。ACS により、eFuse_1 の電流は 23.07A から 18.75A に低減され、ストレスが均等に再分配されることで、eFuse_1 の寿命は約 2 倍に向上します (ブラックの式を用いて算出可能)。これは、最初の故障点がシステムの信頼性を決定するという前提において、システム全体の有効寿命を約 2 倍に向上させる結果となります。

表 3-3. $R_{DS(on)}$ 変動を伴う 6 個の TPS1685 eFuse 間の電流分布

eFuse_N	eFuse_1	eFuse_2	eFuse_3	eFuse_4	eFuse_5	eFuse_6
$R_{DS(on)}$	0.0035Ω	0.0055Ω	0.005Ω	0.0045Ω	0.006Ω	0.0055Ω
最大電流	23.07A	14.7A	16.15A	17.9A	13.46A	14.7A

表 3-4. ACS による $R_{DS(on)}$ 補正を適用した 6 個の TPS1685 eFuse 間の電流分布

eFuse_N	eFuse_1	eFuse_2	eFuse_3	eFuse_4	eFuse_5	eFuse_6
$R_{DS(on)}$	0.00455Ω	0.0055Ω	0.005Ω	0.0045Ω	0.006Ω	0.0055Ω
最大電流	18.75A	14.7A	15.5A	17.06A	14.2A	15.5A

4 まとめ

並列 eFuse 構成は、電力損失が複数のデバイスに分散されるため、システム設計者がより優れた熱管理を行う上でも有効です。本アプリケーション ノートでは、80A および 100A の電流分配および保護を実現するために、アクティブ電流共有 (ACS) を用いた 4 個の TPS1685 および 6 個の TPS1685 デバイスの並列動作について説明しています。ただし、この手法は他の電流レベルにも容易に拡張可能です。

5 参考資料

1. テキサス・インスツルメンツ、[並列接続された eFuse を用いて 20A 回路保護と省スペースを実現する](#)、アプリケーションレポート
2. テキサス・インスツルメンツ、[TPS1685x 9V ~ 80V、3.65mΩ、20A スタックアップ統合ホットスワップ \(eFuse\) 高精度高速電流モニター搭載](#)、データシート
3. テキサス インスツルメンツ、[TPS25985x 4.5V ~ 16V、0.59mΩ、80A スタックアップ eFuse](#)、高精度で高速な電流監視機能搭載、データシート

重要なお知らせと免責事項

テキサス・インスツルメンツは、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、テキサス・インスツルメンツ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テキサス・インスツルメンツ製品の選定、(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テキサス・インスツルメンツ製品を使用するアプリケーションの開発の目的でのみ、テキサス・インスツルメンツ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。テキサス・インスツルメンツ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、テキサス・インスツルメンツおよびその代理人を完全に補償するものとし、テキサス・インスツルメンツは一切の責任を拒否します。

テキサス・インスツルメンツの製品は、[テキサス・インスツルメンツの販売条件](#)、または [ti.com](https://www.ti.com) やかかるテキサス・インスツルメンツ製品の関連資料などのいずれかを通じて提供する適用可能な条項の下で提供されています。テキサス・インスツルメンツがこれらのリソースを提供することは、適用されるテキサス・インスツルメンツ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。

お客様がいかなる追加条項または代替条項を提案した場合でも、テキサス・インスツルメンツはそれらに異議を唱え、拒否します。

郵送先住所: Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265
Copyright © 2025, Texas Instruments Incorporated

重要なお知らせと免責事項

テキサス・インスツルメンツは、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、テキサス・インスツルメンツ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テキサス・インスツルメンツ製品の選定、(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テキサス・インスツルメンツ製品を使用するアプリケーションの開発の目的でのみ、テキサス・インスツルメンツ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。テキサス・インスツルメンツ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、テキサス・インスツルメンツおよびその代理人を完全に補償するものとし、テキサス・インスツルメンツは一切の責任を拒否します。

テキサス・インスツルメンツの製品は、[テキサス・インスツルメンツの販売条件](#)、または [ti.com](https://www.ti.com) やかかるテキサス・インスツルメンツ製品の関連資料などのいずれかを通じて提供する適用可能な条項の下で提供されています。テキサス・インスツルメンツがこれらのリソースを提供することは、適用されるテキサス・インスツルメンツ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。

お客様がいかなる追加条項または代替条項を提案した場合でも、テキサス・インスツルメンツはそれらに異議を唱え、拒否します。

郵送先住所：Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265
Copyright © 2025, Texas Instruments Incorporated