

## Application Note

## 溶断ヒューズの TI スマート eFuse ハイサイド スイッチへの置き換え



## 概要

車載と産業用の各システムで一般的に使用されている溶断ヒューズには、過負荷および短絡保護という重要な目的があります。しかし、溶断ヒューズを使用する保護方式の設計は困難であり、ヒューズの本質的なバラツキ、熱デレーティングの不正確さが原因で、多くの場合は制限があり、そのためワイヤ ゲージやコネクタのサイズを大きくする必要が生じます。TI スマート eFuse ハイサイド スイッチは、高精度の定格電流スレッシュホールドや  $I^2T$  スレッシュホールド、リセット可能な動作、詳細な故障報告機能により、シンプルで高機能な過負荷および短絡保護を実現します。この資料では、溶断ヒューズの代わりに TI スマート eFuse ハイサイド スイッチを使用する利点について詳しく説明し、指定の溶断ヒューズを TI スマート eFuse ハイサイド スイッチに置き換える方法の設計例を掲載しています。

## 目次

1 概要.....	2
2 溶断ヒューズの性能.....	4
2.1 電流定格.....	4
2.2 曲線の再レーティング.....	4
2.3 $I^2T$ 値.....	5
2.4 開放時間.....	6
2.5 定格電圧.....	6
3 TI スマート eFuse ハイサイド スイッチの性能.....	7
3.1 プロセス / 電圧 / 温度の検討事項.....	7
3.2 $I^2T$ 曲線.....	8
3.3 追加の保護および診断機能.....	9
4 溶断ヒューズから TI のスマート eFuse ハイサイド スイッチへの切り換え.....	11
4.1 溶断ヒューズ設計.....	11
4.2 電流定格.....	11
4.3 $I^2T$ トリップ時間.....	13
5 まとめ.....	15
6 参考資料.....	16

## 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

自動車とそのシステムがますます複雑化し、クラウドベースに移行している現状で、包括的で協調的な過負荷および短絡保護方式のニーズも、複雑さと重要性の両方の面で高まっています。ゾーンアーキテクチャは機能および電力分配のための高度なプラットフォームを提供しますが、そのプラットフォームと配線は、バッテリー直結部、ゾーン入力レベル、出力レベルといったすべてのステージで保護される必要があります。保護されない場合、ステアバイワイヤやドアロックなどの安全上重要な機能が損なわれる可能性があります。歴史的に、溶断ヒューズがこのような保護を提供してきましたが、専用のヒューズボックスが必要であること、診断フィードバックの利用が限られていること、さらにヒューズの広い公差を考慮した配線の過剰設計により、現代の車両では制約要因となっています。そのため、電源ツリーを保護するために溶断ヒューズから **eFuse** ハイサイドスイッチへの切り換えが必要となりました。TI スマート **eFuse** ハイサイドスイッチは主要な機能すべてで溶断ヒューズを上回る性能を備えており、動作中のプログラマビリティ、詳細な異常検出出力、負荷スイッチング、電流制限に加え、高精度の電流センスと  $I^2T$  保護を備えています。これらの利点により、協調的な保護方式を大幅に簡素化し、システムの安全性と性能を強化できます。さらに、高精度の  $I^2T$  保護により、ワイヤゲージやコネクタサイズの縮小、車両重量の軽減、コストおよびエネルギー効率の向上を実現できます。

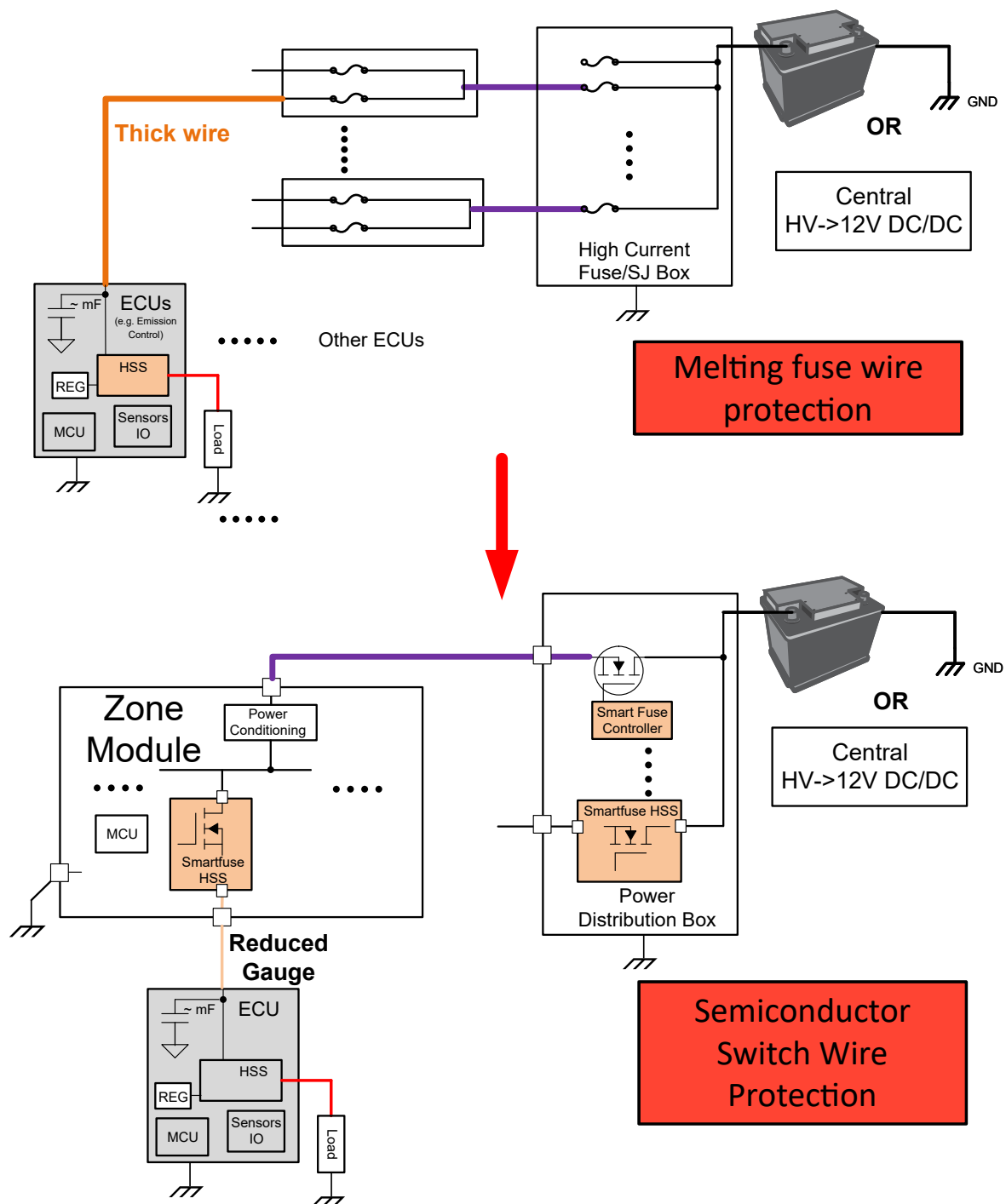


図 1-1. ゾーン アーキテクチャの電力分配

## 2 溶断ヒューズの性能

1880 年代以降、電信ケーブルを悪天候や短絡状態から保護するために使用された溶断ヒューズは、長きにわたり十分に研究されてきた歴史を持つ技術です。溶断ヒューズは理論上、単に融点が高い導線から成るため、短絡保護回路を実装するための簡単で安価な方法ですが、原始的な方法でもあります。溶断ヒューズは、回路のフェイルセーフ過電流保護メカニズムとしての役割を保持してきましたが、過去 100 年間の技術開発に伴い、ヒューズには性能や特性の面で、さらに多くの要件が求められるようになりました。たとえば、1900 年代の工場用モーターは、1980 年代のコンピュータプロセッサボードと比べて、ヒューズがトリップするまでの相対的な過渡過電流を確実に多く処理できます。したがって、ヒューズの設計は、過電流または短絡の状態では常に開路になるという同じ原理の動作理論を維持しながら、より高度で精密なものとなりました。その結果、物理的に決められた次のような検討事項と動作があります。

### 2.1 電流定格

これはヒューズのメインパラメータであり、ヒューズが室温で継続的に流すことができる最大電流を表します。したがって、最良のケースでは、10A のヒューズはトリップすることなく無制限に 10A を流すことができます。ただし、ヒューズは精密部品ではないため、目安としては、ヒューズの電流定格を 25% ディレーティングして、電流定格を下回る通常動作中の偶発的なトリップを防止することをお勧めします。そのため、室温で 7.5A を超える公称電流に対して 10A のヒューズは推奨されません。

### 2.2 曲線の再レーティング

ヒューズのトリップポイントはその瞬間温度に基づいているため、周囲温度がデータシートの定格値と異なる場合、電流定格に影響を及ぼします。周囲温度が低いほど、内部配線を溶断させるにはより大きな温度差 (電流) が必要になります。また、周囲温度が高いほど、内部配線を溶断させるために必要な温度差 (電流) は小さくなります。ヒューズのデータシートには通常、さまざまな周囲温度でのヒューズの性能を推定できるように、電流再レーティング曲線が含まれています。

たとえば、代表的なヒューズの再レーティング曲線は、85°C の周囲温度での再レーティング係数が約 91% であることを示しています。したがって、式 1 に基づくと、10A ヒューズの定格電流は 85°C で 6.825A になります。

$$\text{Rated Operating Current} = \text{Current Rating} * 0.75 * \text{Derating Factor} \quad (1)$$

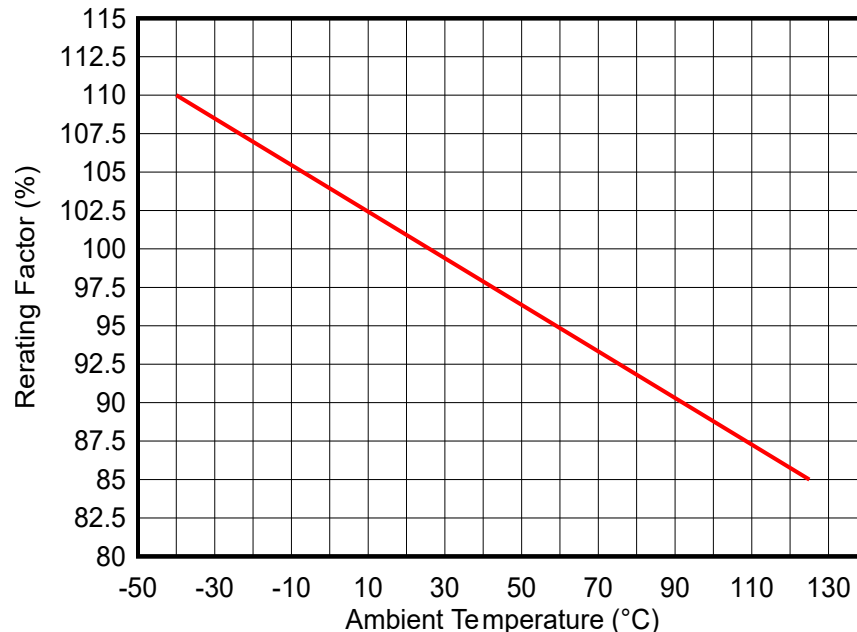


図 2-1. 溶断ヒューズの再レーティング曲線の例

## 2.3 I<sup>2</sup>T 値

I<sup>2</sup>T は、ヒューズがトリップする前の熱容量の表現で、アンペア 2 乗秒 (A<sup>2</sup>s) 単位で示されます。過渡過電流イベント中、I<sup>2</sup>T 値を使用してヒューズのトリップポイントが推定されます。与えられた電流パルスの I<sup>2</sup>T 値がヒューズの定格を上回っている場合、そのパルスが加わるとヒューズは溶断すると予想されます。

パルスの I<sup>2</sup>T 値を計算するため、瞬間電流の 2 乗 (I<sup>2</sup>) の値をパルスの持続時間 (T) にわたって積分します。これは、5A の矩形電流パルスが 50ms 継続すると仮定すれば、簡単に算出できます。式 3 を使用すると、このパルスの I<sup>2</sup>T 値は 1.25A<sup>2</sup> s です。

$$I^2T_{\text{Threshold}} = \int I(t)^2 dt \quad (2)$$

$$I^2T_{\text{Threshold for Rectangular Current Pulse}} = I^2 \cdot t_{\text{pulse}} \quad (3)$$

### 2.3.1 溶断 I<sup>2</sup>T

溶断 I<sup>2</sup>T は、ヒューズの内部配線を溶断させるために必要な熱エネルギーです。この値は、ヒューズが特定の過渡電流パルスを許容できるかどうかを判定する際に使用されます。

### 2.3.2 アーク放電 I<sup>2</sup>T

溶断ヒューズのワイヤが溶断した後、溶断した金属とヒューズ内のイオン化された空気により、ヒューズ内の導電路を短時間開放状態に保持します。これはアーク放電時間と呼ばれ、対応する I<sup>2</sup>T 値によって特性化できます。

一部のヒューズは、アーク放電時間が非常に短く、I<sup>2</sup>T 値が低くなるように設計されています。

### 2.3.3 総クリアリング I<sup>2</sup>T

これは、負荷が受ける合計の I<sup>2</sup>T 値であり、この値は負荷および電源の短絡耐久能力と配線の I<sup>2</sup>T スレッシュホールドを下回っている必要があります。ご覧のように、システム配線が受ける総 I<sup>2</sup>T 値は溶断 I<sup>2</sup>T 値よりも大きいため、多くの場合、配線はアーク放電 I<sup>2</sup>T によって損傷しないように過剰設計されています。

### 2.3.4 ヒューズの I<sup>2</sup>T に関する検討事項

ヒューズは精密部品ではないため、I<sup>2</sup>T 値は、ユニット間の変動、周囲温度、電圧降下、過去の過渡電流パルスの回数、さらにヒューズを流れる過渡電流の条件など、多次元的に依存します。したがって、ヒューズの I<sup>2</sup>T パラメータは保証されたものではなく、このパラメータの値や時間電流グラフは代表例にすぎません。許容される電流過渡に対応し、配線を適切に保護するには、ヒューズの変動を考慮した広い安全マージンを設計する必要があります。

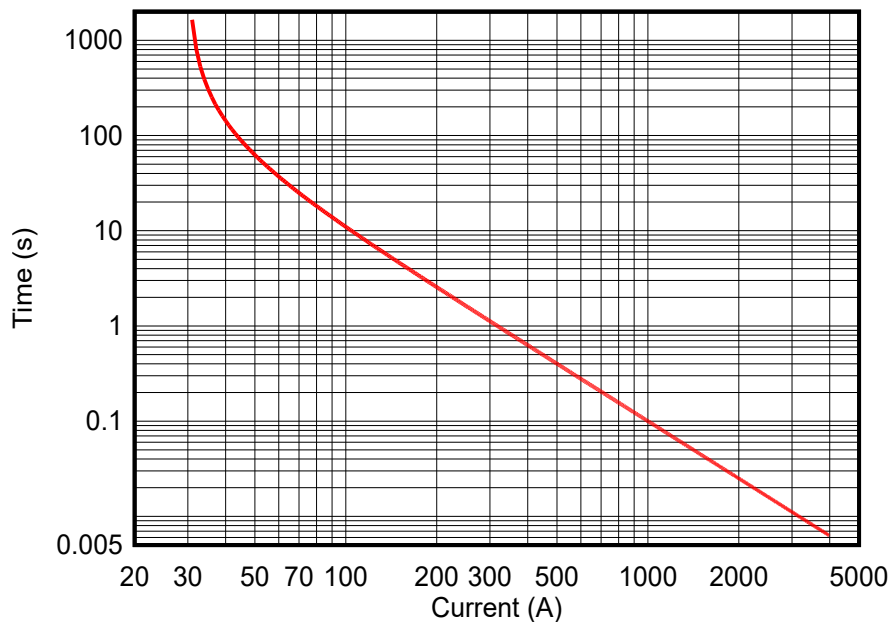


図 2-2. 溶断ヒューズの時間電流グラフの例

## 2.4 開放時間

ヒューズは一般的に、相対電流ごとに保証された開放時間が設定されています。たとえば、業界標準のヒューズは、表 2-1 に従って相対電流ごとに開放時間が設定されています。

**表 2-1. 溶断ヒューズの開放時間の例**

%電流定格の割合 (%)	開放時間 (最小 / 最大) (s)
110	360000 / ∞
135	0.75 / 600
160	0.25 / 50
200	0.15 / 5
350	0.08 / 0.5
600	0 / 0.15

ご覧のように、各相対電流値において、開放時間の変動は 2 ～ 3 桁であり、ヒューズは電流定格の約 130% に達するまでトリップが保証されていません。

## 2.5 定格電圧

ヒューズの溶断後に発生するアーク放電を抑制するため、ヒューズの電圧定格はシステムの電圧定格を上回っている必要があります。

### 3 TI スマート eFuse ハイサイド スイッチの性能

現代の配線保護システムの厳しいニーズに対応するために、TPS2HCS08-Q1 や TPS2HCS10-Q1 などの TI スマート eFuse ハイサイド スイッチは、ハイサイド スイッチの強力な機能を内蔵しながら、高度にプログラマブルで高性能かつ高精度のヒューズ機能を備えています。この要件を実現するために、TI スマート eFuse ハイサイド スイッチは、ADC、高度なデジタル コア、SPI 通信をハイサイド スイッチに統合しています。TI スマート eFuse ハイサイド スイッチを使用してヒューズ機能を設計する場合、以下の動作パラメータが関連します。

#### 3.1 プロセス / 電圧 / 温度の検討事項

TI スマート eFuse ハイサイド スイッチの内部アナログ回路は温度補償されているため、電流センス、I<sub>2T</sub> スレッショルド、過電流スレッショルドなどの機能は、温度範囲全体にわたって正確です。

電流センスに基づくスレッショルドについては、データシートに記載されている次の 3 つの精度を考慮する必要があります。K<sub>SNS</sub> 精度、I<sub>SNS</sub><sub>ADC,ACC</sub> 精度、V<sub>ADCREFH</sub> 精度。

##### 3.1.1 最大動作温度

TI スマート eFuse ハイサイド スイッチには、サーマル シャットダウンと呼ばれる過熱保護機能が搭載されています。デバイスの内部温度が約 180°C を超えると、デバイスはサーマル シャットダウンをトリガして、出力をオフにします。

通常動作中にサーマル シャットダウンが発生しないようにするため、選択したデバイスは最大周囲温度においてサーマル シャットダウンをトリガすることなく最大定常状態負荷電流を通過できる必要があります。これは、式 4 を使って推定できます。

$$T_J = T_{amb} + (R_{\theta JA} * (I_{OUT}^2 * R_{ON, max})) \quad (4)$$

## 3.2 I<sup>2</sup>T 曲線

TI スマート eFuse ハイサイド スイッチは、図 3-1 と図 3-2 に示すように、完全にプログラマブルな 4 段過電流保護方式を採用しています。各スレッシュホールドは、起動時および動作中に SPI レジスタ空間を使用して設定できます。より多くのスレッシュホールド オプションが必要な場合は、外部電流センス (SNS) 抵抗を動的に調整することで、データシートに規定されていないスレッシュホールドを実現できます。

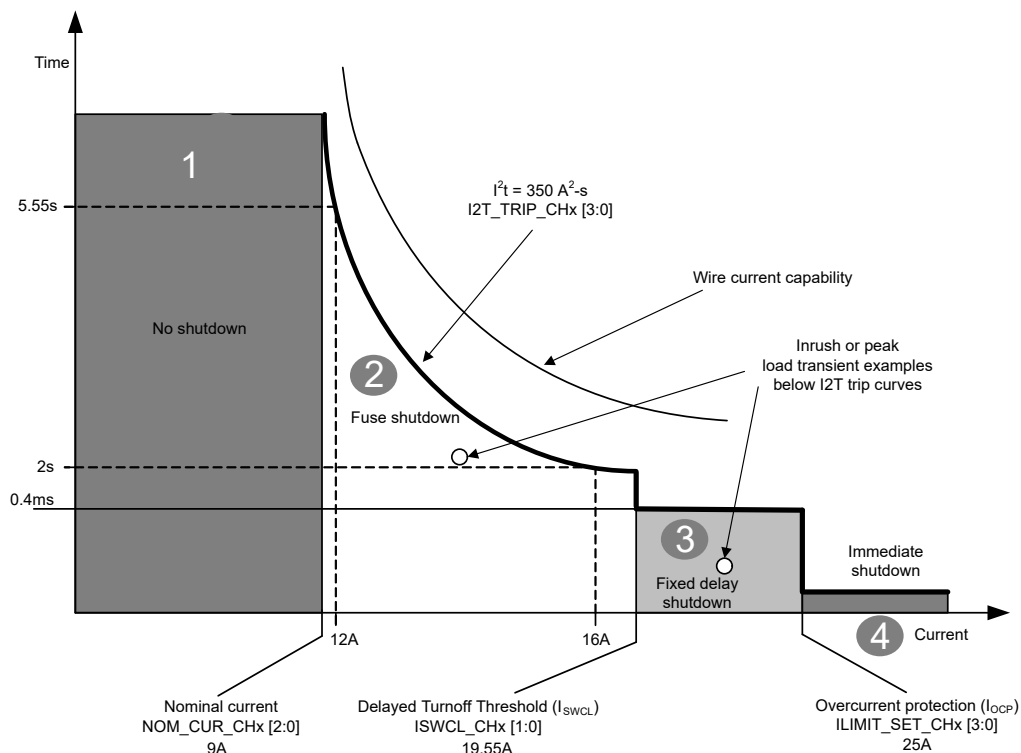


図 3-1. TI スマート eFuse ハイサイド スイッチ過電流保護方式

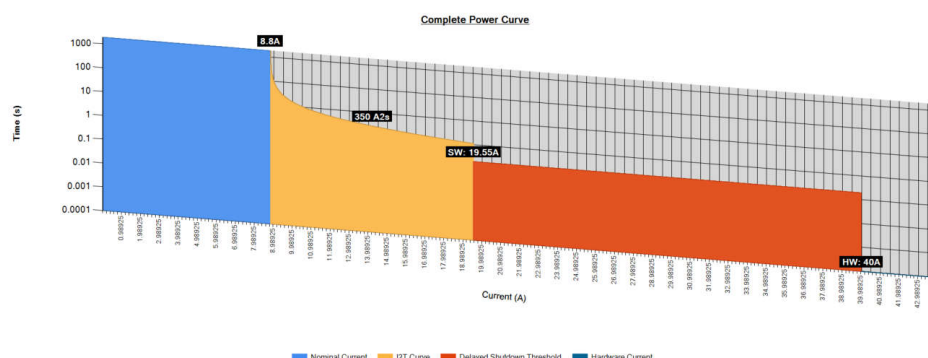


図 3-2. 過電流保護設定の例

### 3.2.1 公称電流スレッシュホールド (I<sub>NOM</sub>)

このスレッシュホールドはヒューズの電流定格に類似しています。この電流を下回ると、I<sup>2</sup>T 過電流によりヒューズは決してトリップしません。この電流を上回ると、I<sup>2</sup>T 積分が開始されます。このスレッシュホールドは温度による変動が非常に小さいため、溶断ヒューズのようにディレーティングする必要はありません。



### 3.2.2 $I^2T$ ヒューズのスレッショルド

出力電流が  $INOM$  を超えると、デバイスは式 5 に従って  $I^2T$  累積を開始します ( $dt = 50\mu s$ )。プログラムされた  $I^2T$  スレッショルドに達すると、出力がシャットオフし、 $I^2T$  フォルトが通知されます。 $I^2T$  スレッショルドに達する前に出力電流が  $INOM$  を下回ると、式 5 に従って  $I^2T$  カウンタはデクリメントします。

$I^2T$  精度は定量化できるため、最小値と最大値の曲線を持つ  $I^2T$  または時間電流グラフをプロットできます。そのため、ワイヤや部品が受ける最大エネルギーをより厳密に制御できます。

$$I^2T_{count} = \int_0^t (I_{out}^2 - INOM^2) dt \quad (5)$$

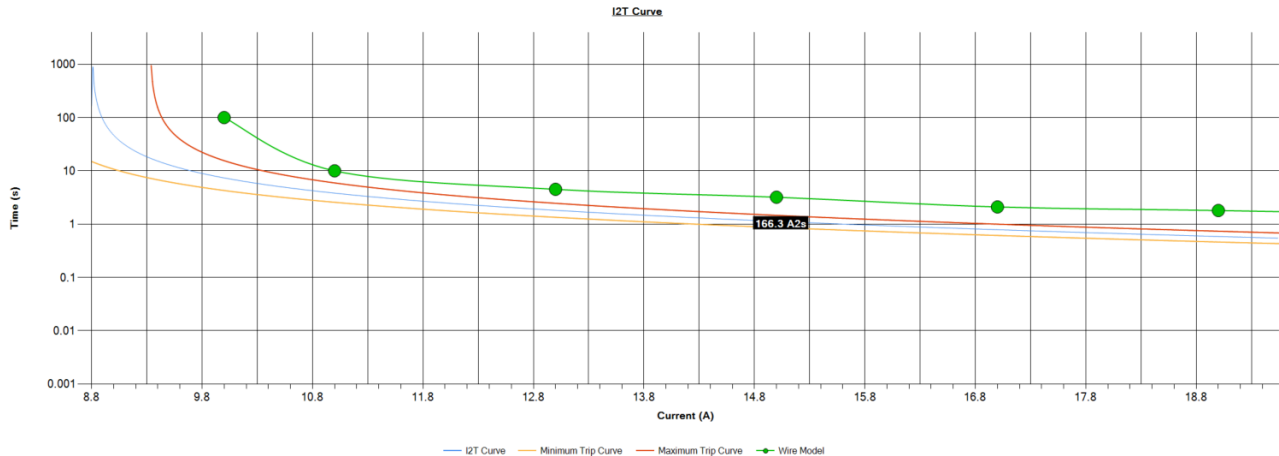


図 3-3.  $I^2T$  トリップ時間の例

### 3.2.3 固定遅延シャットダウン スレッショルド

このスレッショルドを超える電流がプログラム可能な時間にわたって持続すると、デバイスはシャットオフされます。この時間の長さにより、非常に短いブランキング時間で過渡的な過電流イベントが可能になりますが、溶断ヒューズがトリップするよりもはるかに速くオフになります。

### 3.2.4 即時過電流保護スレッショルド ( $I_{OCP}$ )

負荷電流がこの値を超えると、出力はマイクロ秒以内に直ちにシャットオフされます。この保護は常にアクティブであり、固定遅延シャットダウン スレッショルドより上、 $I^2T$  領域内、または  $INOM$  未満になるよう、いつでもプログラムできます。

ご覧のように、この保護機能は溶断ヒューズよりもはるかに迅速に出力をオフにできます。これは下流の高感度電子機器にとって重要です。

## 3.3 追加の保護および診断機能

### 3.3.1 追加の保護機能

#### 3.3.1.1 グランド短絡保護

TI スマート eFuse ハイサイド スイッチは、次の 2 つの保護機能を組み合わせて、堅牢なグランド短絡保護を実現します。その保護機能は、上記で説明した  $I_{OCP}$  と、相対的なサーマル シャットダウンです。相対的なサーマル シャットダウンを実装するため、デバイスは FET とコントローラの間の温度差を監視します。この差が  $60^\circ C$  を超えると、温度差が均等になるまでデバイスはシャットオフされます。

#### 3.3.1.2 容量性充電

プログラマブル定電流制限静電容量充電モードを使用することで、最小限の入力外乱で、大きなシステム容量を簡単に充電できます。

#### 3.3.1.3 リンプ ホーム モード / ウォッチドッグ / CRC

TI スマート eFuse ハイサイド スイッチには、致命的な事態を招く前にシステム障害を検出し保護するのに役立つ安全重視の機能が複数搭載されています。その例として、リンプ ホーム モード検出、内蔵ウォッチドッグ、および CRC がありま

す。LHI ピンのデジタル値が予測どおりでない場合、接続されているマイコンが SPI フレームを送信しない場合、またはデバイスの計算された CRC チェックサムがマイコンの追加チェックサムと一致しない場合、スマート eFuse ハイサイド スイッチはフォルトを出力して対処します。

#### 3.3.1.4 バッテリ逆極性保護

バッテリー逆極性状態では、ボディ ダイオードを介して電流が流れないように FET がオンになり、デバイスの消費電力が低減されます。バッテリー逆極性保護の詳細については、TI スマート eFuse ハイサイド スイッチのデータシートを参照してください。

#### 3.3.1.5 バッテリ / グランド喪失の保護

動作中にいずれかの時点で VBB または GND が接続解除された場合、出力は即座に遮断され、フォルト状態時にデバイスとシステムを保護します。

#### 3.3.1.6 誘導性放電機能を内蔵

TI スマート eFuse ハイサイド スイッチはドレインとソースの間にクランプ機能を内蔵しており、誘導性負荷や配線インダクタンスに蓄積されたエネルギーを迅速に放電できます。これにより、ヒューズ出力に TVS やフライバック ダイオードを接続する必要がありません。

#### 3.3.2 追加の診断機能

TI スマート eFuse ハイサイド スイッチの高度なデジタル コアを使用すれば、入出力障害、負荷電流、入出力電圧、ドレイン ソース間電圧、FET 温度、デバイスの状態を SPI インターフェイス経由で読み取ることができるため、システムの安全性と情報出力を強化できます。

## 4 溶断ヒューズから TI のスマート eFuse ハイサイド スイッチへの切り換え

### 4.1 溶断ヒューズ設計

たとえば、5A の公称電流負荷に対応する保護方式を設計することを検討します。式 1 から、不要なトリップを防ぐには、7.5A 定格のヒューズを選択する必要があると算出できます。表 1 のデータを使用して、表 2 を作成し、さまざまな出力電流に対するトリップ時間を評価することができます。

表 4-1. 公称電流負荷 5A に対する溶断ヒューズの開放時間

電流 (A)	開放時間 (最小 / 最大) (s)
8.25	360000 / ∞
10.125	0.75 / 600
12	0.25 / 50
15	0.15 / 5
26.25	0.08 / 0.5
45	0 / 0.15

ご覧のように、溶断ヒューズは、ヒューズ電流が 10A を超えるまで開放が保証されていません。この値は公称電流の 2 倍以上に相当します。負荷、上流電源、または接続配線が最長 10 分間にわたって 10.125A を処理する能力を備えていない場合は、溶断ヒューズの許容誤差に対応するため、各システムに追加のヘッドルームを設計する必要があります。同様に、負荷、上流電源、および接続配線は最大 150ms にわたって 45A を処理する能力を備えている必要があります。これにより、電源ツリー全体で回路が大幅に複雑になり、過剰設計につながる可能性があります。

### 4.2 電流定格

溶断ヒューズの代わりに、TPS2HCS10-Q1 などの TI スマート eFuse ハイサイド スイッチを使用することで、このレールの制御、保護、および拡張された診断機能を提供できます。TPS2HCS10-Q1 データシートの表 8-33 の NOM\_CUR\_CH1 ビットに基づき、このデバイスは RSNS = 700Ω で 4A ~ 15A の公称 INOM スレッシュホールドをプログラム可能です。

表 4-2. TPS2HCS10-Q1 - I2T\_CONFIG\_CH1 レジスタのフィールドの説明

ビット	フィールド	タイプ	リセット	説明
15-14	TCLDN_CH1	R/W	0h	これらのビットは、チャンネル 1 の I2T シャットダウン後のクールダウン時間 (またはリトライ時間) を設定します。  注: 0x0 の設定を使用する場合、チャンネルは I2T のシャットダウン後、リトライなしでオフのままになります。この設定でリトライするには、ビットを 0.8s、2.0s、4.0s のオプションに変更し、デバイスが I2T シャットダウン後に再試行できるようにします。  0h = 無制限のクールダウン 1h = 0.8s 2h = 2.0s 3h = 4.0s
13-11	予約済み	R/W	0h	予約済み
10-9	SWCL_DLY_TMR_CH1	R/W	0h	これらのビットは、IOUT 電流が設定された時間にわたって ISWCL レベルを連続的に超過すると、チャンネル 1 がシャットダウンするタイマを設定します。  0h = 0.2ms 1h = 0.4ms 2h = 1.0ms 3h = 2.0ms

**表 4-2. TPS2HCS10-Q1 - I2T\_CONFIG\_CH1 レジスタのフィールドの説明 (続き)**

ビット	フィールド	タイプ	リセット	説明
8-7	ISWCL_CH1	R/W	0h	<p>これらのビットは、チャネル 1 の遅延ターンオフ電流センス値 (<math>I_{SWCL,700}</math>) を設定します。IOUT 電流が <math>I_{SWCL,700}</math> の値を超えるとタイマがスタートし、電流が SWCL_DLY_TMR_CH1 の期間中 <math>I_{SWCL,700}</math> スレッショルドを超えるとチャネルをオフにします。</p> <p>このスレッショルドは、電流センス飽和値 (<math>I_{OUT\_SAT} = K_{SNS1} * I_{SNS\_SAT}</math>) よりも低く設定する必要があります。以下の電流スレッショルドでは、<math>R_{SNS} = 700\Omega</math> と仮定しています。異なる <math>R_{SNS}</math> 値に基づいて新しい <math>I_{SWCL,700}</math> スレッショルドを計算する場合、次の式を使用できます。</p> $I_{SWCL,ADJ} = I_{SWCL,700} * (700 / R_{SNS})$ <p>0h = 19.55A 1h = 17.6A 2h = 16.05A 3h = 13.3A</p>
6-3	I2T_TRIP_CH1	R/W	0h	<p>これらのビットは、チャネル 1 の I2T トリップ値を設定します。</p> <p>注: 参考として、I2T トリップ値の式を以下に示します。</p> $I2T = (I_{OUT1}^2 - NOM\_CUR\_CH1^2) * t$ <p>以下の値は、<math>R_{SNS} = 700\Omega</math> と想定しています。異なる <math>R_{SNS}</math> 値に基づいて新しい I2T トリップ値を計算する場合、次の式を使用できます。</p> $I2T_{ADJ} = I2T_{700} * (700 / R_{SNS})^2$ <p>注: デバイスがクール ダウン期間中の場合、I2T_TRIP_CH1 の値は変更できません。</p> <p>0h = 8.8 A2s 1h = 13.1 A2s 2h = 26.3 A2s 3h = 39.4 A2s 4h = 52.5 A2s 5h = 65.6 A2s 6h = 78.8 A2s 7h = 91.9 A2s 8h = 109.4 A2s 9h = 126.9 A2s Ah = 144.4 A2s Bh = 166.3 A2s Ch = 192.5 A2s Dh = 218.8 A2s Eh = 262.5 A2s Fh = 350 A2s</p>
2-0	NOM_CUR_CH1	R/W	0h	<p>これらのビットは、I2T 機能のチャネル 1 の電流の公称値を設定します。チャネル 1 で I2T 機能が有効の場合、この値を上回ると、デバイスは I2T 累積モードに移行します。</p> <p>以下の公称電流値では、<math>R_{SNS} = 700\Omega</math> と想定しています。異なる <math>R_{SNS}</math> 値に基づいて新しい I2T トリップ値を計算する場合、次の式を使用できます。</p> $NOM\_CUR\_CH1_{ADJ} = NOM\_CUR\_CH1_{700} * (700 / R_{SNS})$ <p>注: デバイスがクール ダウン期間中の場合、NOM_CUR_CH1 の値は変更できません。</p> <p>0h = 4.0A 1h = 5.0A 2h = 5.7A 3h = 6.5A 4h = 7.5A 5h = 9.0A 6h = 12.0A 7h = 15.0A</p>

使用する INOM スレッショルドを決定するときは、INOM スレッショルド精度を定量的に分析し、常に公称負荷電流を上回るスレッショルドを見つける必要があります。式 6-9 を使用して、INOM スレッショルドの精度と最小値 / 最大値を計算できます。

$$INOM_{accuracy, min} = ((1 + K_{SNS1, accuracy, min}) * (1 + ISNS_{ADC, ACC, min}) / (1 + V_{ADCREFH1, accuracy, max})) - 1 \quad (6)$$

$$INOM_{min} = INOM_{typ} * (1 + INOM_{accuracy, min}) \quad (7)$$

$$INOM_{accuracy, max} = ((1 + K_{SNS1, accuracy, max}) * (1 + ISNS_{ADC, ACC, max}) / (1 + V_{ADCREFH1, accuracy, min})) - 1 \quad (8)$$

$$INOM_{max} = INOM_{typ} * (1 + INOM_{accuracy, max}) \quad (9)$$

式 6-9 と関連するデータシートの仕様を使用すると、INOM = 5.7A の INOM スレッショルド精度は最小 -11.63 %、最大 11.18% であることがわかります。したがって、デバイスの変動全体にわたる最小 INOM スレッショルドは 5.04A、最大 INOM スレッショルドは 6.34A になり、INOM = 5.7A は不要なトリップなしに確実に使用できます。

### 4.3 I<sup>2</sup>T トリップ時間

式 10 ~ 12 を使用して、I<sup>2</sup>T トリップ時間の最小値、標準値、最大値を計算できます。

$$I^2T_{trip, typ} = \frac{I^2T_{TRIP}}{(I_{OUT})^2 - INOM_{max}^2} \quad (10)$$

$$I^2T_{trip, min} = \frac{I^2T_{TRIP}}{((I_{OUT} * (1 + INOM_{accuracy, max}))^2 - INOM_{max}^2)} \quad (11)$$

$$I^2T_{trip, max} = \frac{I^2T_{TRIP}}{((I_{OUT} * (1 + INOM_{accuracy, min}))^2 - INOM_{min}^2)} \quad (12)$$

式 10 ~ 12 および I<sup>2</sup>T<sub>TRIP</sub> = 8.8A<sup>2</sup> s を使用して、異なる相対電流レベルでの I<sup>2</sup>T トリップ時間の最小値と最大値を比較するために、表 3 を生成できます。

**表 4-3. TI スマート eFuse ハイサイド スイッチの I<sup>2</sup>T / 過電流保護トリップ時間 (公称電流負荷 5A)**

電流 (A)	開放時間最小 / 標準 / 最大 (s)
6.27	1.043 / 1.29 / 1.65
7.695	0.266 / 0.329 / 0.422
9.12	0.140 / 0.174 / 0.222
11.4	0.0744 / 0.0903 / 0.113
19.95	.0000075 または SWCL_DLY_TMR
34.2	.0000075 または SWCL_DLY_TMR
45	.0000075 または SWCL_DLY_TMR

表 4-3 を検証すると、いくつかの注目すべき点が明らかになります。

第 1 に、TI スマート eFuse ハイサイド スイッチの最小および最大開放時間は、溶断ヒューズよりも桁違いに変動が少ないという点です。

第 2 に、電流が増加すると、開放時間は I<sup>2</sup>T アルゴリズムで決定された値から SWCL\_DLY\_TMR に切り換わるという点です。これは、動作電流が固定遅延シャットダウン領域に入るため、開放時間がソフトウェアでプログラム可能な固定時間になるためです。この動作が望ましくない場合は、即時過電流保護スレッショルドを固定遅延シャットダウン スレッショルドよりも低くプログラムするか、または RSNS を低減して、固定遅延シャットダウン スレッショルドを含むすべての I<sup>2</sup>T ベースのスレッショルドを相対的に高くシフトできます。

第 3 に、電流が即時過電流保護スレッショルドを超えた場合、TI スマート eFuse ハイサイド スイッチは非常に迅速に (最大 7.5us) 開放できます。これは、溶断ヒューズよりも 4 桁以上高速です。

TPS2HCS10-Q1 は、 $8.8\text{A}^2\text{s} \sim 350\text{A}^2\text{s}$  の  $I^2\text{T}_{\text{TRIP}}$  スレッショルドを備えているため、1 つのデバイスでシステムレベルのほぼすべての過渡電流要件を満たすことができます。

## 5 まとめ

TI スマート eFuse ハイサイド スイッチの直感的な I<sup>2</sup>T 保護方式、強力な機能、および拡張された機能セットにより、溶断ヒューズからの切り換えはシンプルかつ高速で、コスト効率に優れ、競争力の高いシステムにとっては不可避のものとなります。これにより、性能とリアルタイムのフィードバックが向上すると同時に、車両重量、コスト、効率が改善されます。

## 6 参考資料

1. 『[Fuseology](#)』、littlefuse.com
2. 『[MICRO2 Blade Fuses - Aftermarket](#)』、littlefuse.com



## 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