

## Application Note

## 5S スーパーキャパシタと昇降圧コンバータを用いた E ラッチ設計



Colin Chen, Mulin Yuan, Miya Zhang, Andrew Xiong, Lei Zhong

## 概要

このアプリケーション ノートでは、直列接続した 5 個のスーパーキャパシタ (5S) を使用した電子ドアロック (E ラッチ) 向けの、非常用バックアップ電源システムについて説明します。また、スーパーキャパシタ向けの定電流 / 定電圧 (CC/CV) 充電機能を搭載した昇降圧コンバータの設計と検討事項についても詳細に説明します。この設計では、衝突やメイン バッテリで故障が発生した場合でもドアが解錠できることを実証することで、車載用途において重要となる安全冗長性を実現しています。

## 目次

1 E ラッチ システムの概要	2
1.1 スーパーキャパシタの特性	2
1.2 E ラッチ システムの代表的なブロック図	2
2 CC/CV 制御に基づく昇降圧コンバータによるスーパーキャパシタ充電	3
2.1 スーパーキャパシタ充電用の CC/CV レギュレータの利点	3
2.2 CC/CV による昇降圧デュアルループ	4
2.3 出力電流の監視	5
3 設計プロセス	7
3.1 TPS5528x ファミリの部品選択	7
3.2 充電電圧と充電電流の設定	8
4 実験結果	9
5 まとめ	10
6 参考資料	10

## 図の一覧

図 1-1. E ラッチ システムの代表的なブロック図	2
図 2-1. 従来の電圧源のブロック図と充電曲線	3
図 2-2. CC/CV レギュレータのブロック図と充電曲線	4
図 2-3. TPS5528X の内部電圧制御ループ	4
図 2-4. TPS5528X の内部電流制御ループ	5
図 2-5. TPS5528x の CC-CV 性能特性	5
図 2-6. TPS5528X 出力電流監視回路	6
図 3-1. TPS5528X を用いた、スーパーキャパシタ充電用の代表的なアプリケーション回路	7
図 4-1. TPS552892: Vin = 9V、V_charge = 12V、I_charge = 2.5A、スーパーキャパシタ = 5.4F	9
図 4-2. TPS552892: Vin = 9V、V_charge = 12V、I_charge = 5A、スーパーキャパシタ = 5.4F	9
図 4-3. TPS55289: Vin = 9V、V_charge = 12V、I_charge = 5A、スーパーキャパシタ = 5.4F	10

## 表の一覧

表 3-1. TPS5528X の平均インダクタ電流	7
----------------------------	---

## 商標

すべての商標は、それぞれの所有者に帰属します。

## 1 E ラッチ システムの概要

E ラッチ システムは、車両のメイン バッテリが利用できなくなる緊急事態に対処するように設計された、車載用の重要な安全性コンポーネントです。現代の車両、特に格納式ドア ハンドルや電子ラッチ機構を採用している車両には、緊急時に乗員が確実に脱出できるように、信頼性の高いバックアップ電源が必要となります。

### 1.1 スーパーキャパシタの特性

スーパーキャパシタ (電気二重層コンデンサまたは EDLC と呼ばれる) は、バックアップ電源として従来のバッテリーに比べて大きな利点を提供します。それが E ラッチ バックアップ電源に使用される主要な設計になっている理由です。

- 高電力密度 (W/L): バッテリと比較して  $10^2 \sim 10^4$  倍
- 長寿命: 50 万 ~ 100 万サイクル (バッテリーでは 30 万 ~ 1 万サイクル)
- 広い動作温度範囲:  $-40^\circ\text{C} \sim +85^\circ\text{C}$  (バッテリーでは  $-20^\circ\text{C} \sim +60^\circ\text{C}$ )
- 高速な充放電性能
- 特別な要件なしのシンプルな CC/CV 充電

### 1.2 E ラッチ システムの代表的なブロック図

図 1-1 は、スーパーキャパシタシステムを搭載した E ラッチ システムの代表的な図です。一般的な 12V 車載バッテリーは、モーターに電力を供給し、スーパーキャパシタの充電も行います。衝突などの緊急事態が発生した場合、スーパーキャパシタはパワー ダイオード経由でモーターに電力を供給します。

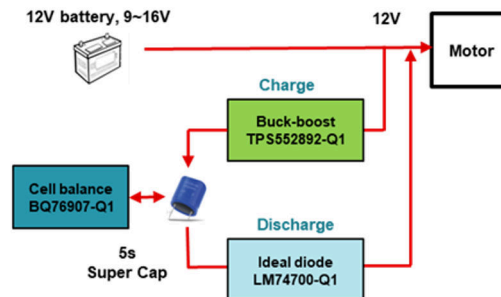


図 1-1. E ラッチ システムの代表的なブロック図

電気自動車において電動モーターへの集中型給電の需要が高まるにつれて、スーパーキャパシタに求められるエネルギー容量も増加しています。より広い動作電圧とより大きいエネルギーを得るために、5S のスーパーキャパシタが広く採用されています。1 個のスーパーキャパシタの標準電圧は 2.5V ~ 3V であるため、5S スーパーキャパシタの合計充電電圧は最大 12V に達します。この用途には、CC/CV 充電機能付きの昇降圧コンバータが適しています。

## 2 CC/CV 制御に基づく昇降圧コンバータによるスーパーキャパシタ充電

### 2.1 スーパーキャパシタ充電用の CC/CV レギュレータの利点

従来型の電圧源を使用してスーパーキャパシタを充電する場合、最初に大きな突入電流が発生する可能性があります。その後、[図 2-1](#) に示すように、充電電圧が高くなると充電電流は減少し、その結果充電時間が長くなります。

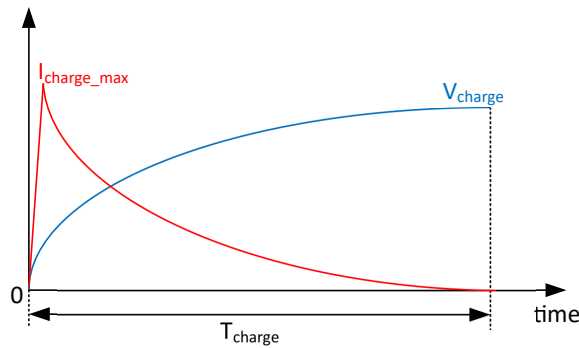
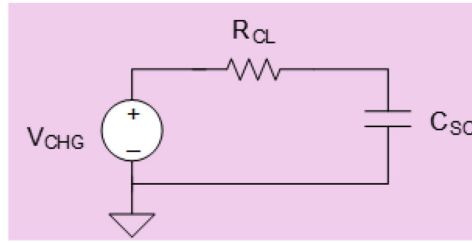


図 2-1. 従来の電圧源のブロック図と充電曲線

突入電流を制限するには、電流制限抵抗  $R_{CL}$  を使用します。突入電流の様子は、図に示すとおりです。最大充電電流は式 1 で計算できます。

$$I_{\text{chargemax}} = \frac{V_{\text{CHG}}}{R_{\text{CL}}} \quad (1)$$

また、充電時間は式 2 で計算できます。

$$T_{\text{CHG\_PASSIVE}} = 4.6 \times C_{\text{SC}} \times \frac{V_{\text{CHG}}}{I_{\text{chargemax}}} \quad (2)$$

これは、最終電圧の 99% に達するまでの充電時間の近似値に基づいています。CC/CV レギュレータを使用すると、標準的な電圧源でスーパーキャパシタを充電する際の問題を解決できます。[図 2-2](#) に CC/CV レギュレータのブロック図と充電曲線を示します。スーパーキャパシタには一定の充電電流が供給され、設定した充電電圧に達した後は、一定の電圧を維持します。

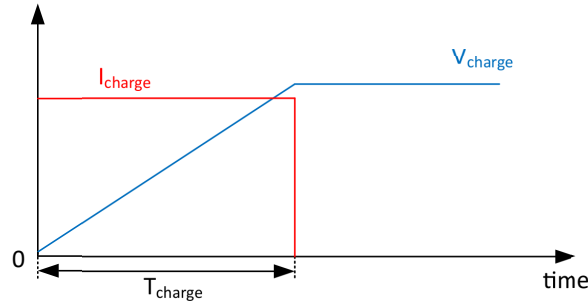
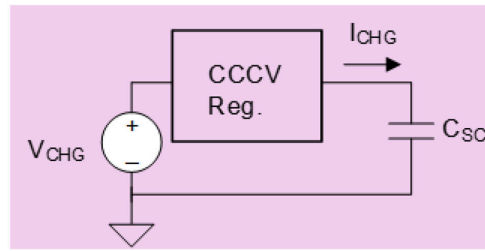


図 2-2. CC/CV レギュレータのブロック図と充電曲線

充電時間は式 3 で計算できます。

$$T_{\text{CHG\_CCCV}} = C_{\text{SC}} \times \frac{V_{\text{CHG}}}{I_{\text{charge}}} \quad (3)$$

式を比較すると、CC/CV 回路を使用した場合、定電圧源よりも充電時間が 4.6 倍高速になることが分かります。充電時間が短縮するということは、事故の発生時にスーパーキャパシタはモーターにエネルギーをより迅速に供給できるということであり、結果的に安全性が向上します。

## 2.2 CC/CV による昇降圧デュアルループ

TPS5528x-Q1 は車載用の 4 スイッチ昇降圧コンバータで、独立した CC/CV (定電流 / 定電圧) デュアルループ制御機能を搭載しており、高精度な出力電圧と出力電流の調整を行います。この高度な制御アーキテクチャにより、本デバイスは車載 E ラッチ システムのスーパーキャパシタ充電用途に適したものとなっています。

図 2-3 に、TPS5528X の内部電圧制御ループを示します。通常動作時は、出力パス内の抵抗  $R_{\text{sense}}$  によって出力電流が検出されます。検出抵抗両端の電圧が内部電流制限リファレンス電圧を下回ると、電流ループ誤差アンプ EA2 の出力がゼロになり、電流調整ループは実質的に無効化されます。この場合、電圧制御ループのみ作動を続けます。電圧ループ誤差アンプ EA1 は、出力帰還電圧 ( $V_{\text{FB}}$ ) を内部リファレンス電圧 ( $V_{\text{ref}}$ ) と比較して補償電圧 (COMP) を生成します。その後、コンバータのデューティサイクルを変調して、安定した正確な出力電圧調整を維持します。

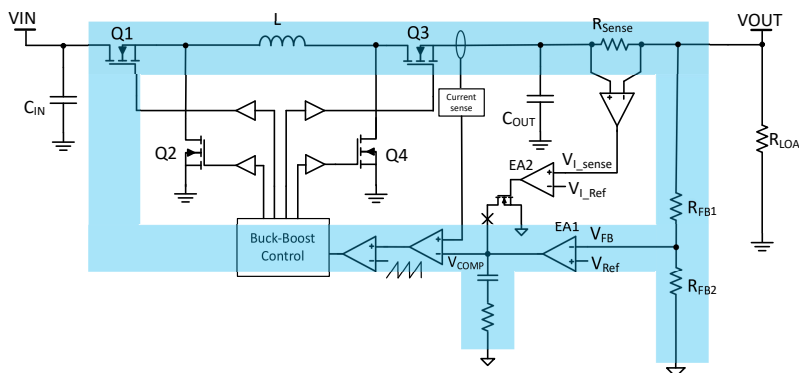


図 2-3. TPS5528X の内部電圧制御ループ

図 2-4 に、TPS5528X の内部電流制御ループを示します。電流検出抵抗の両端でサンプリングされた電圧 ( $V_{sense}$ ) が内部電流制限リファレンス電圧 ( $V_{Iref}$ ) を超えると、電流ループ誤差アンプ EA2 が動作を開始し、補償ネットワークの電流を吸収します。これで COMP 電圧が低下し、それに応じて出力電圧が低下し、電圧ループ誤差アンプ EA1 が次第に飽和します。したがって、電圧調整ループは実質的に無効化されます。この時点で電流制御ループが制御を引き継ぎ、補償電圧 (COMP) を決定します。この電圧によってデューティサイクルが変調され、安定した正確な出力電流調整が維持されます。

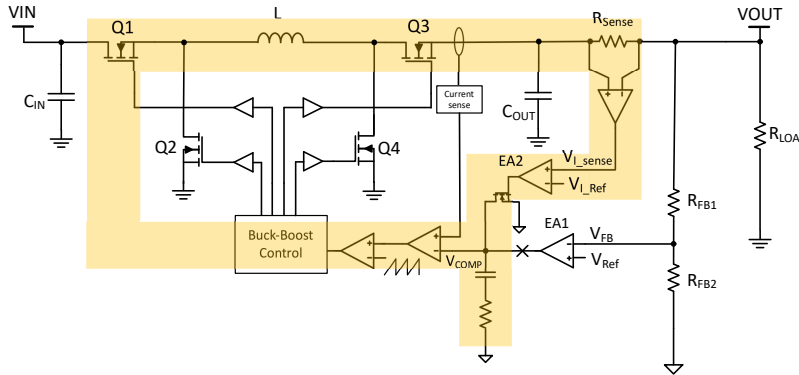


図 2-4. TPS5528X の内部電流制御ループ

図 2-5 は TPS5528X の CC-CV 性能特性を示しており、出力電圧と出力電流の間に顕著な「ブリックウォール」特性が見られることを示しています。この特性曲線は、相互干渉なしで出力電圧と出力電流の調整ループが独立して作動し、同時に CC と CV の各動作モード間でシームレスな遷移を実現していることを示しています。

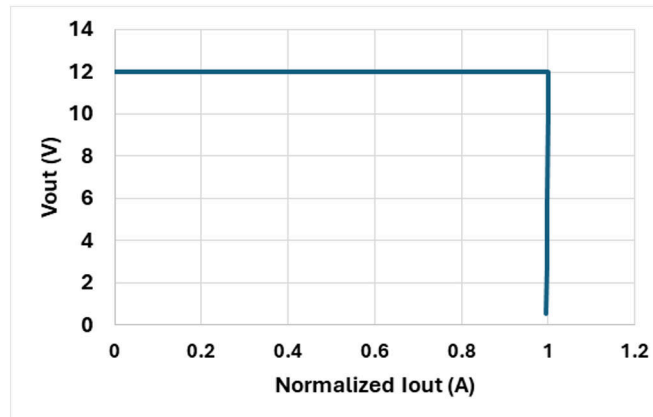


図 2-5. TPS5528x の CC-CV 性能特性

### 2.3 出力電流の監視

TPS5528x は CDC ピンに電圧を出力します。この電圧は、図 2-6 に示すように、ISP ピンと ISN ピンの間にある電流検出抵抗で検出された出力電流に比例します。これにより MCU は、CDC 出力電圧をサンプリングして出力電流をリアルタイムで監視でき、スーパーキャパシタの安全な充電を確保します。

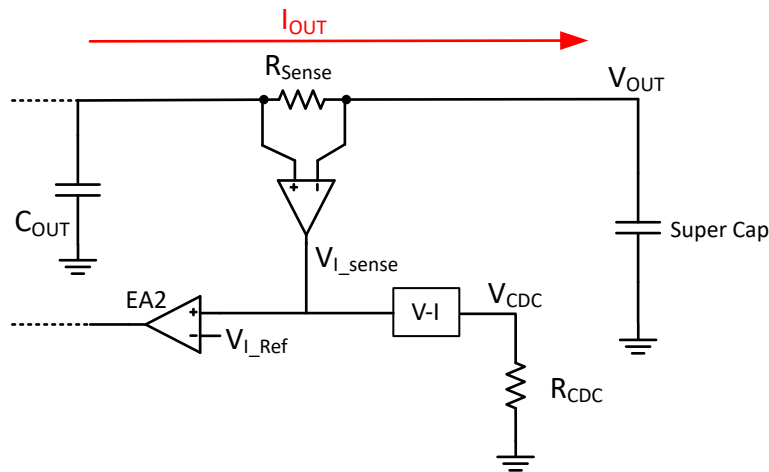


図 2-6. TPS5528X 出力電流監視回路

式 4 は、検出した出力電流、CDC ピンの抵抗、出力電圧帰還抵抗分圧のアップ抵抗に関連する出力電圧の上昇を示しています。

$$V_{OUT\_CDC} = 3 \times R_{FB\_UP} \times \left( \frac{V_{ISP} - V_{ISN}}{R_{CDC}} \right) \quad (4)$$

### 3 設計プロセス

この章では、回路のスーパーキャパシタ静電容量、設定出力電圧、目標の充電時間に基づいて、対応する昇降圧モデルの計算と選択を行う方法、および充電電圧と充電電流の設定方法を紹介します。

TPS5528X に基づくスーパーキャパシタ充電の代表的なアプリケーション回路を、[図 3-1](#) に示します。

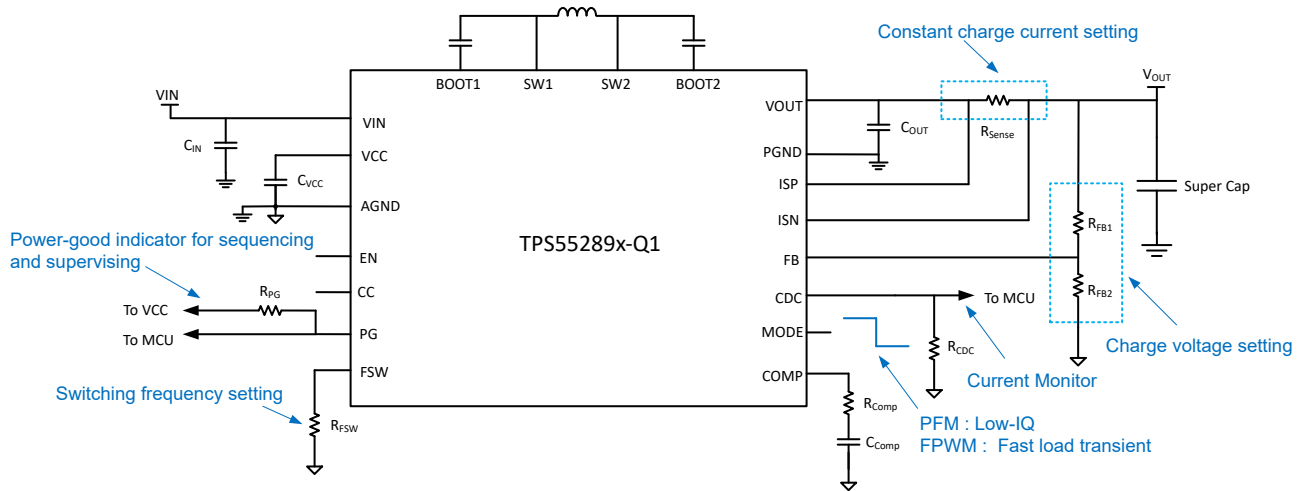


図 3-1. TPS5528X を用いた、スーパーキャパシタ充電用の代表的なアプリケーション回路

#### 3.1 TPS5528x ファミリの部品選択

##### 3.1.1 電流能力

TPS5528x は平均インダクタ電流保護機能を備えており、平均インダクタ電流が電流制限を超えないようにしています。

[表 3-1](#) に、型番 TPS55287/288/289 のインダクタ電流の違いを示します。

表 3-1. TPS5528X の平均インダクタ電流

部品番号	平均インダクタ電流制限
TPS55287x	4A
TPS55289x	8A
TPS55288x	16A

##### 3.1.2 I2C バージョンと非 I2C バージョン

スーパーキャパシタの充電電流は、昇降圧コンバータの出力電流と等しくなります。TPS5528x-Q1 ファミリーは、出力電流制限機能を使用して充電電流を設定します。

TPS5528x-Q1 ファミリーには、I2C バージョンと非 I2C バージョンがあります。非 I2C バージョンの場合、VISP-VISN 電圧は 50mV に固定されます。I2C バージョンの場合、VISP-VISN 制限値は 0mV ~ 63.5mV の範囲で調整できます。

非 I2C バージョンを使用する場合、利用可能な電流検出抵抗の値に基づいて出力電流制限を設定する必要があります。I2C バージョンでは、ISP-ISN の電圧制限を設定すれば、制限をシームレスに調整できます。

##### 3.1.3 パーツの選定

必要な充電電流を計算し、適切な IC を選択するには、スーパーキャパシタの静電容量 (C)、目標充電電圧 (U)、目標充電時間 (T)、最小入力電圧 (VIN<sub>min</sub>)、推定効率 (eff) のパラメータを提供する必要があります。充電電流は式 5 で決定できます。

$$I_{charge} = \frac{C \times U}{T} \quad (5)$$

次に、最大平均インダクタ電流  $I_{Lmax}$  は、式 6 で計算できます。

$$I_{Lmax} = \frac{U \times I_{charge}}{VIN_{min} \times eff} \quad (6)$$

$I_{Lmax}$  と表を比較して、該当する昇降圧モデルを選択します。例として以下を使用します。

最小入力電圧 ( $VIN_{min}$ ): 9V

目標充電電圧 (U): 12.5V

スーパーキャパシタ (C): 5.4F

- 充電時間 (C) = 10 秒

$$I_{charge} = \frac{5.4 \times 12.5}{10} = 6.75A \quad (7)$$

$$I_{Lmax} = \frac{12.5 \times 6.75}{9 \times 0.9} = 10.42A \quad (8)$$

TPS55288x-Q1 を選択します。

- 充電時間 (C) = 15 秒

$$I_{charge} = \frac{5.4 \times 12.5}{15} = 4.5A \quad (9)$$

$$I_{Lmax} = \frac{12.5 \times 4.5}{9 \times 0.9} = 6.9A \quad (10)$$

TPS55289x-Q1 を選択します。

- 充電時間 (C) = 60 秒

$$I_{charge} = \frac{5.4 \times 12.5}{60} = 1.125A \quad (11)$$

$$I_{Lmax} = \frac{12.5 \times 1.125}{9 \times 0.9} = 1.73A \quad (12)$$

TPS55287x-Q1 を選択します。

### 3.2 充電電圧と充電電流の設定

目標充電電圧 (U) が分かっている場合、式 13 を使用して IC 出力電圧を設定します。

$$U = V_{ref} \times \left(1 + \frac{R_{FB1}}{R_{FB2}}\right) \quad (13)$$

前の式で求めた充電電流より、センス抵抗の値は式 14 で計算できます。

$$R_{sense} = \frac{V_{ISP\_ISN}}{I_{charge}} \quad (14)$$

非 I2C バージョンでは、 $V_{ISP\_ISN} = 50mV$  です。I2C バージョンでは、 $0mV \sim 63.5mV$  の範囲で調整できます。

## 4 実験結果

この章では、スーパーキャパシタ用途における TPS55289(2)-Q1 の充電波形について説明します。また、ヒカップモードに入る非 I2C バージョンと、ヒカップモードが無効化された I2C バージョンの動作の違いにも着目しています。

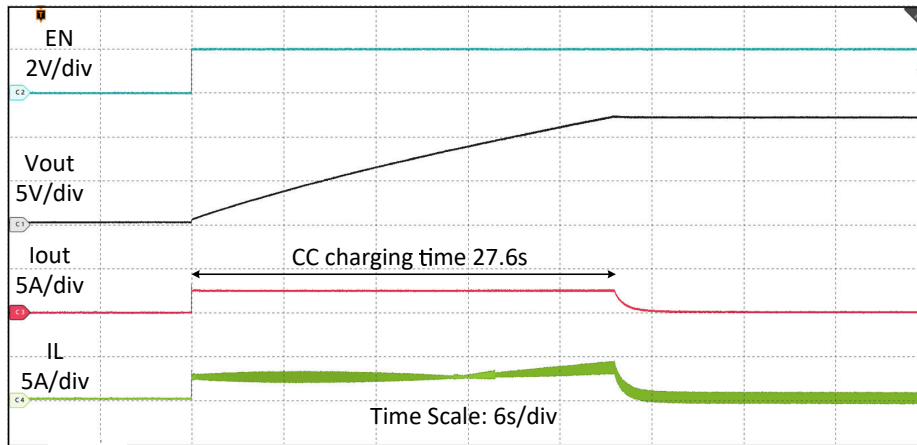


図 4-1. TPS552892:  $V_{in} = 9V$ 、 $V_{charge} = 12V$ 、 $I_{charge} = 2.5A$ 、スーパーキャパシタ = 5.4F

図 4-1 に、2.5A の出力電流に構成した TPS552892-Q1 によるスーパーキャパシタ充電波形を示します。電流制限を小さい値に設定しているため、このデバイスは充電の初期段階にはヒカップモードに移行しません。

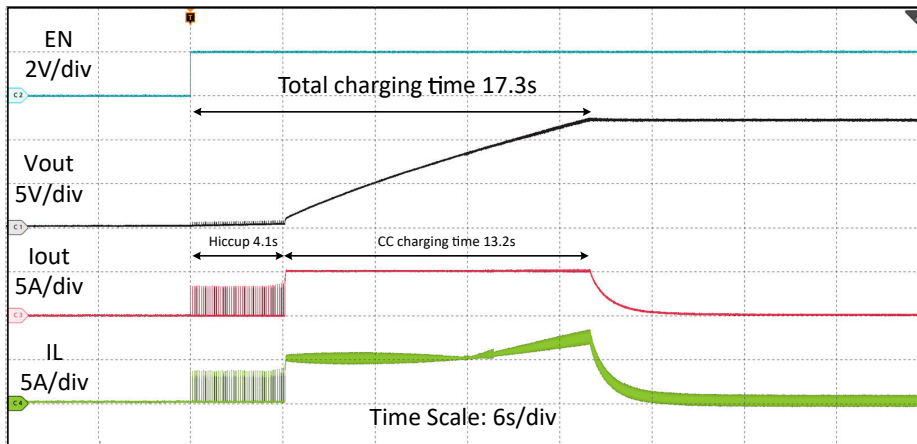


図 4-2. TPS552892:  $V_{in} = 9V$ 、 $V_{charge} = 12V$ 、 $I_{charge} = 5A$ 、スーパーキャパシタ = 5.4F

出力電流を 5A に設定すると、図 4-2 に示すように、初期の充電段階でヒカップモードがトリガされます。コンデンサ電圧が 0.8V を超えて充電されると、TPS552892-Q1 はヒカップモードを終了し、CCCV 充電を開始します。

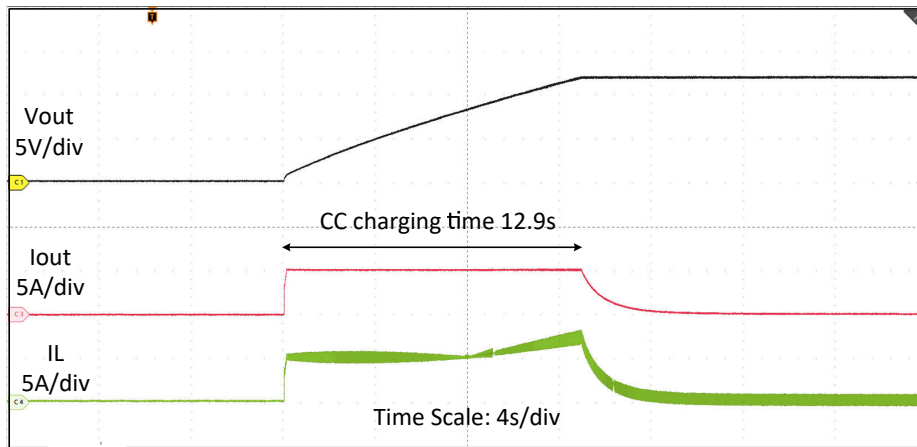


図 4-3. TPS55289:  $V_{in} = 9V$ 、 $V_{charge} = 12V$ 、 $I_{charge} = 5A$ 、スーパーキャパシタ = 5.4F

I2C インターフェイスを介してヒカップ モードを非アクティブ化した後、デバイスが有効化されると同時に、TPS55289-Q1 は 5A 定電流充電を直開始します (図 4-3 参照)。

## 5 まとめ

5S スーパーキャパシタを搭載した E ラッチ設計は、車載ドア メカニズムに対応した、堅牢で信頼性の高い非常用バックアップ電源システムを実現します。先進的な昇降圧コンバータ技術と CC/CV 制御機能と統合することで、効率的なスーパーキャパシタ充電を可能にすると同時に、システムを簡素に、かつコスト効率を高く維持できます。

この設計の主な利点を以下に挙げます。

- 車載安全性規格に準拠
- 迅速な緊急事態対応能力
- 長寿命、低メンテナンス性
- さまざまな車両構成に対応するスケーラブルなアーキテクチャ

## 6 参考資料

1. テキサス インストルメンツ、『クラッシュ パワー モジュールのグローバル市場の傾向とパワー マネージメント設計分析』、テクニカル ホワイト ペーパー。
2. テキサス インストルメンツ、『TPS552892-Q1、車載、36V、8A、完全統合型昇降圧コンバータ』、データシート。
3. テキサス インストルメンツ、『TPS552892EVM-111 評価基板ユーザー ガイド』、ユーザー ガイド

## 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