

TI *Live!* POWER SUPPLY DESIGN SEMINAR

2022年4月20日

スーパーキャパシタとバッテリーを使用する
バックアップ電源の設計

寺田 拓哉

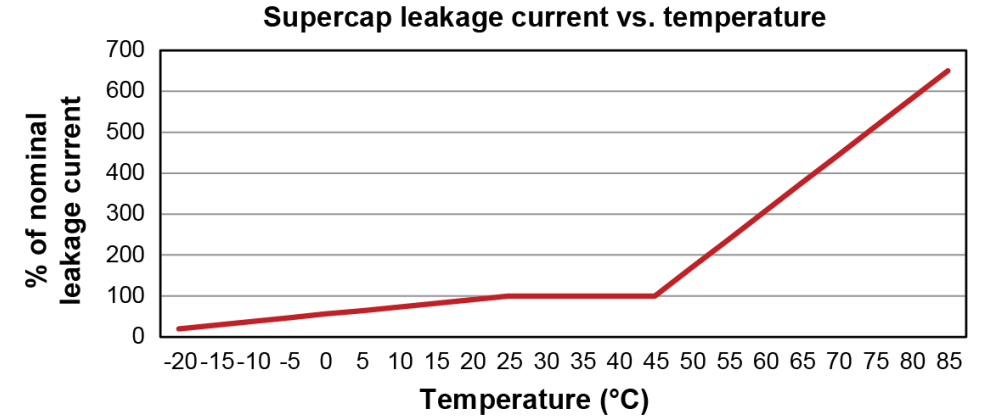
Agenda

- **Introduction:**
 - スーパーキャパシタ とバッテリーの比較
- **スーパーキャパシタを使用したバックアップ :**
 - 並列接続・直列接続
 - バランシング
 - 充電方式
 - バックアップ方式
 - リファレンス・デザイン
- **バッテリーを使用したバックアップ :**
 - バッテリーマネジメントの実装方法
 - 昇圧コンバータ・ベースのバックアップ設計のコンセプト
 - コールド・クランクに対応できる車載バッテリー・バックアップ・ソリューションの設計例

スーパーキャパシタとバッテリーの比較

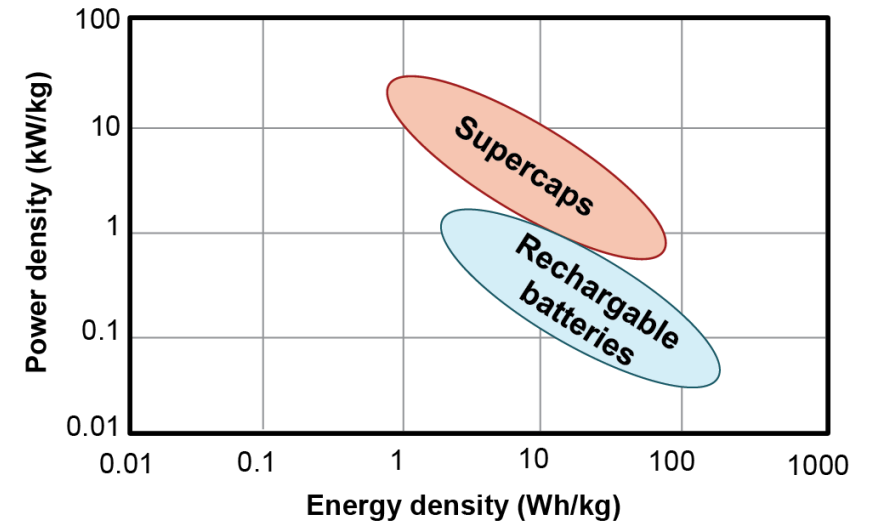
• リーク電流と自己放電

- スーパーキャパシタのリーク電流は温度上昇に伴って大幅に増加します。
- 動作電圧を低くすると、リーク電流は減少します。
- 一般的にバッテリーの自己放電は、温度範囲全体でほとんど変化しません。



• エネルギー密度と電力密度 :

- スーパーキャパシタに比べて、通常バッテリーは高いエネルギー密度を持ちます。
- スーパーキャパシタは、バッテリーより高い電力密度を実現します。(短時間の高電力供給向け)
- スーパーキャパシタは、より高速に充放電することができ、より長いライフ・サイクルを持ちます。500,000 サイクル (スーパーキャパシタ) vs 1,000 サイクル (バッテリー)



Supercapとバッテリーの比較

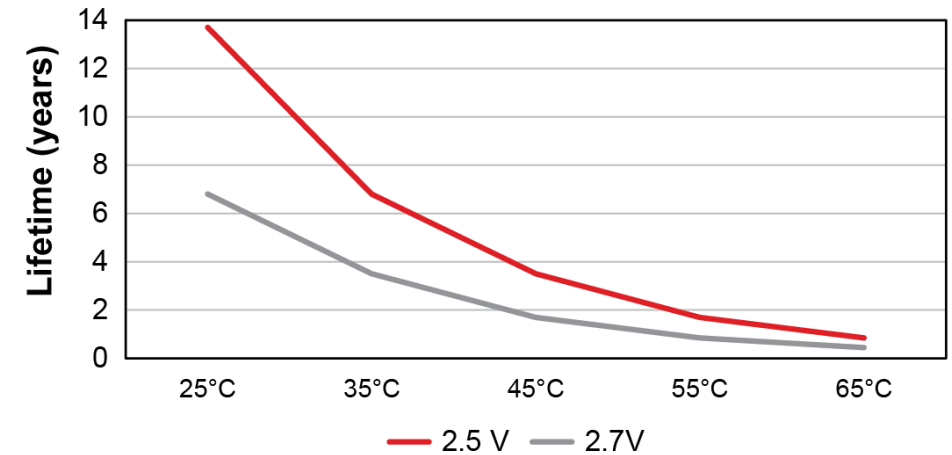
• Supercaps :

- 温度が 10°C 高くなるごとに、寿命は半分になります。(アレニウスの法則)
- スーパーキャパシタをその最大定格電圧まで充電すると、寿命が短くなります。
- 動作電圧を 0.2V 低くすると、スーパーキャパシタの寿命は 2 倍になることがあります。

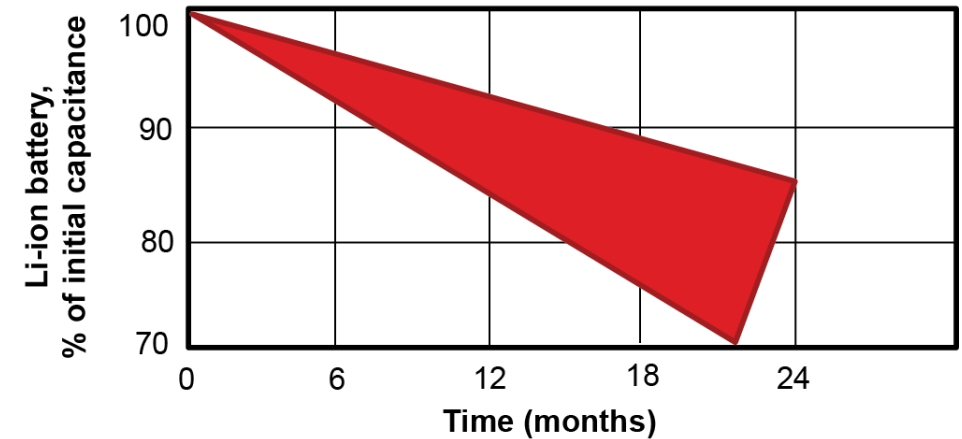
• バッテリー :

- リチウム・バッテリーに最大充電電圧まで充電すると、経年劣化が進行しますが、スーパーキャパシタほど顕著ではありません。
- NiMH バッテリーの経年劣化は、充電状態とは関係ありません。

2.7-V supercap lifetime vs. working voltage vs. temperature

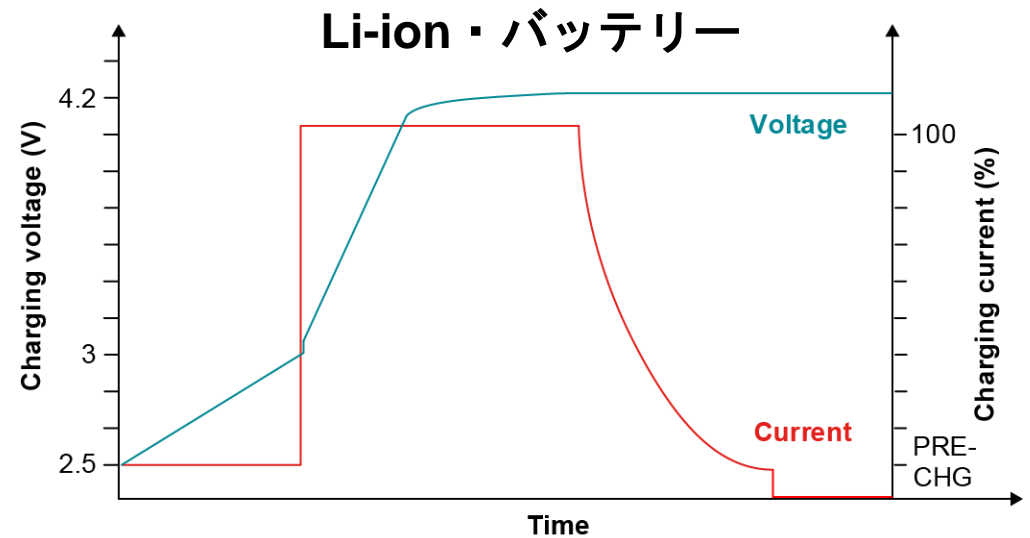
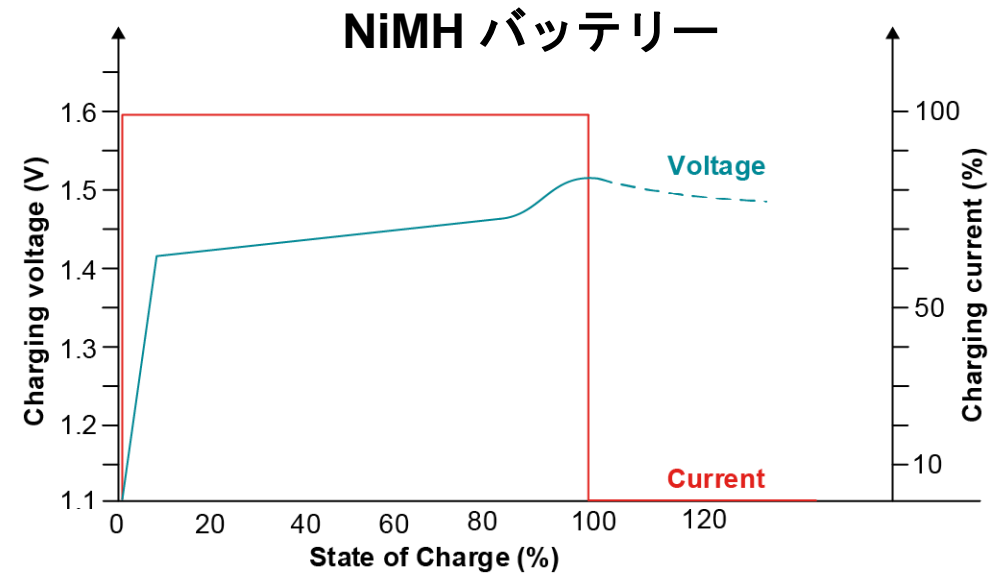
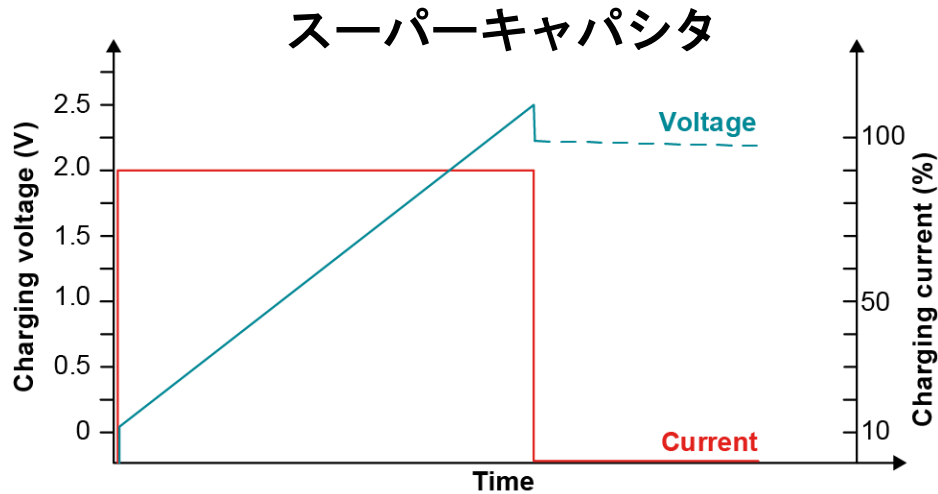


100% charged, 45°C



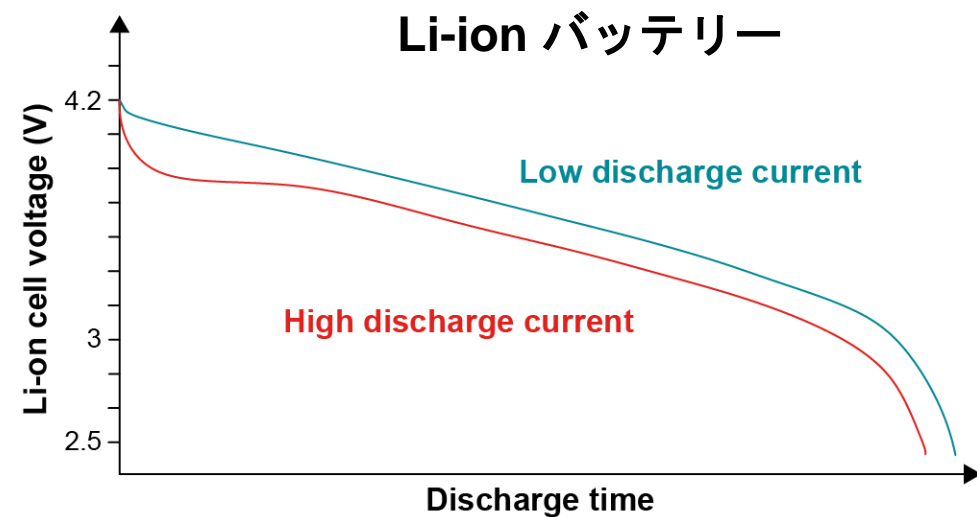
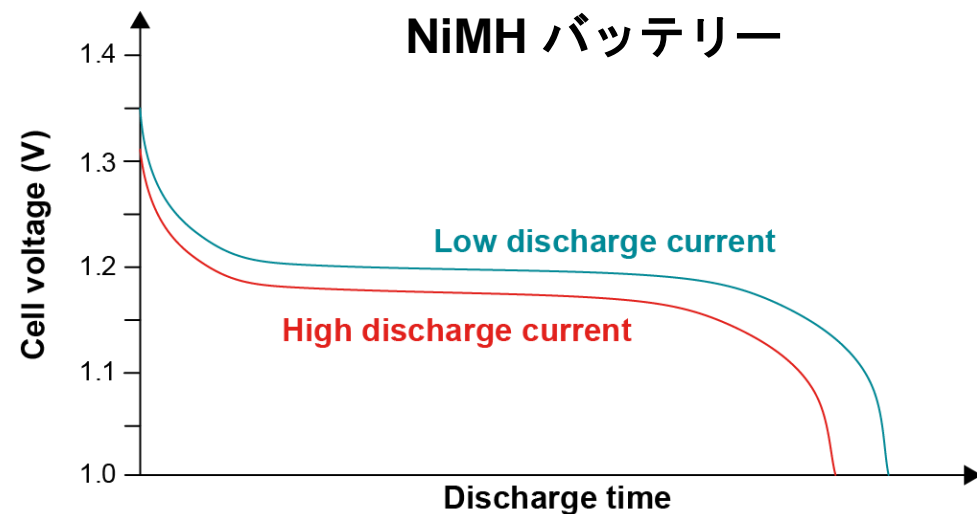
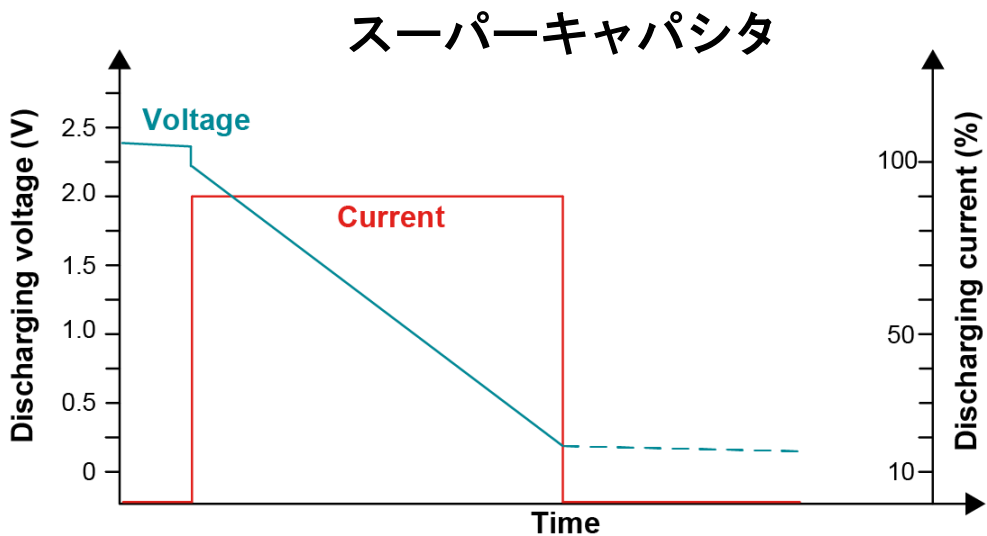
充電プロファイル

- スーパーキャパシタ :
 - 定電流もしくは定電圧の充電
- バッテリー :
 - 電池の種類に依存する充電方式



放電プロファイル

- スーパーキャパシタ :
 - 短時間で大電力、大放電電流、多くのサイクル数
- NiMH :
 - ユーザー交換可能なバッテリー・パック、厳格な安全規制が課される各種アプリケーション
- Li-ion :
 - 高エネルギー密度の各種アプリケーション



Part 1

スーパーキャパシタを使用した バックアップ電源

スーパーキャパシタのアプリケーション

- スマート・メーター
- 火災報知器
- メディカル・モニタ
- 体外徐細動器
- RAM バックアップ
- 車載ドア・ロック・システム



スーパーキャパシタ使用のバックアップに関連する式

last gasp (停電時などの最終動作) 70 秒のデータ送信の例 :

M-bus の送信電力 :

$$P_{M-BUS} = 3.9 \text{ V} \times 200 \text{ mA} = 0.78 \text{ W}$$

送信に必要なエネルギー (70 秒) :

$$E_{transmit} = P_{M-BUS} \times t_{backup} = 55 \text{ J}$$

必要なバックアップ・エネルギー (90% の効率) :

$$E_{backup} = \frac{E_{transmit}}{efficiency} = 61 \text{ J}$$

スーパーキャパシタの静電容量 (スーパーキャパシタの電圧は 0.5V 以上、2.7V 未満) :

$$C_{Supercap_min} = 2 \times \frac{E_{backup}}{V_{supercap_max}^2 - V_{supercap_min}^2} = 17 \text{ F}$$

実現可能なバックアップ時間 (20F のスーパーキャパシタ) :

$$t_{backup_act} = \frac{C_{Supercap}}{2 \times P_{M-BUS}} \times efficiency \times (V_{supercap_max}^2 - V_{supercap_min}^2) = 81 \text{ s}$$

スーパーキャパシタの接続

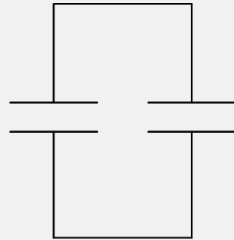
直列 :



$$\frac{1}{C_{total}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_1}$$

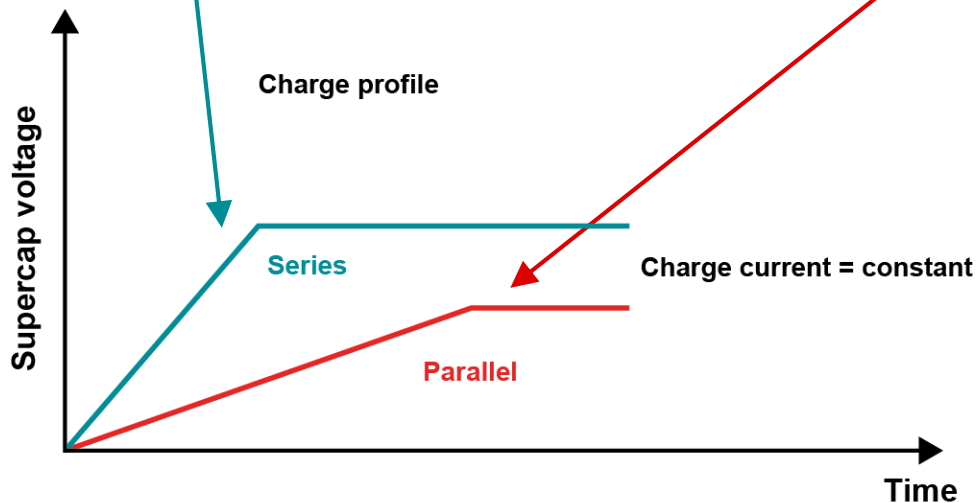
$$V_{total} = V_1 + V_2$$

並列 :



$$C_{total} = C_1 + C_2$$

$$V_{total} = V_1 = V_2$$



- 直列並列にかかわらずエネルギーは以下の式で表されます。

$$E = \frac{1}{2} \times C \times V^2$$

- 最大電圧は直列接続の方が高くなります。このことは負荷または後段のレギュレーターにとって長所になる可能性があります。

- 同じ電流量で定電流充電を行う場合、直列接続の方が充電時間が短くなります。

バランスングの方式

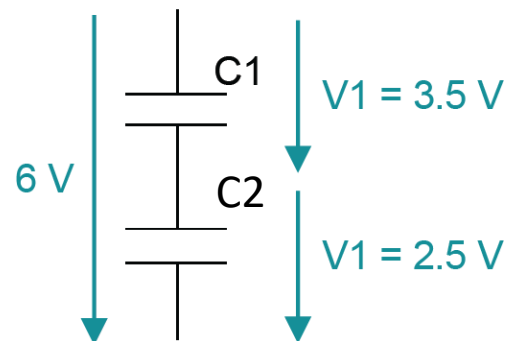
例：2 個の 10F (3V 定格) を直列接続：

コンデンサの公差許容誤差 = -10%、+30%

Worst-case：最小 9F、最大 13F

→ C1 = 9 F

→ C2 = 13 F



バランスング電流：

$$Q = I \times dt = C \times V$$

$$I_{balance} = \frac{C \times dV}{t_{balance}} = \frac{13 F \times 0.5 V}{1 s} = 6.5 A$$

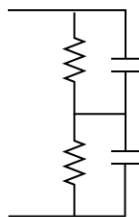
dV = ワーストケースの放電電圧

t_balance = 最大バランスング時間

バランスングの方式

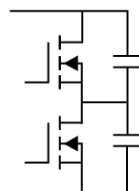
抵抗を使用するバランスング :

- 低速
- 低消費電力
- 低コスト



MOSFET を使用するバランスング :

- 中速
- 低消費電力



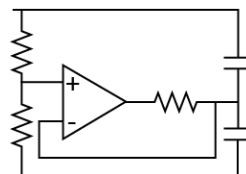
ダイオードを使用するバランスング :

- 中速
- 低消費電力
- 低コスト



オペアンプを使用するバランスング :

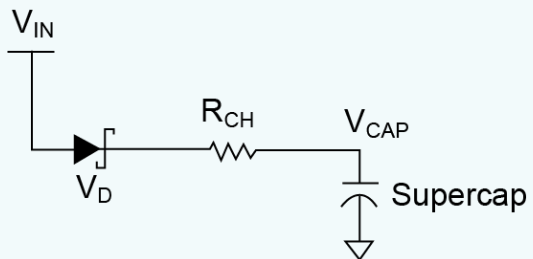
- 高速
- 消費電力が大きい



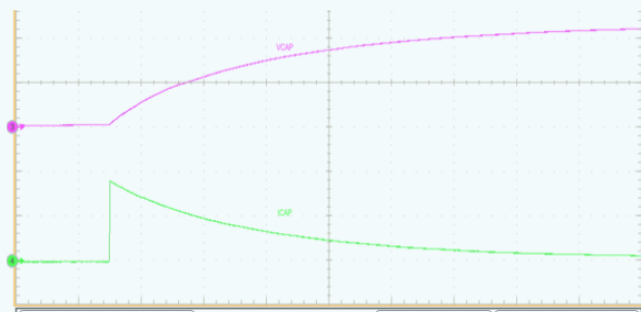
方式	コスト	バランスング時間
抵抗	低	600 分
MOSFET	中	300 分
ツェナー・ダイオード	低	60 分
オペアンプ	高	3 分

定電圧充電

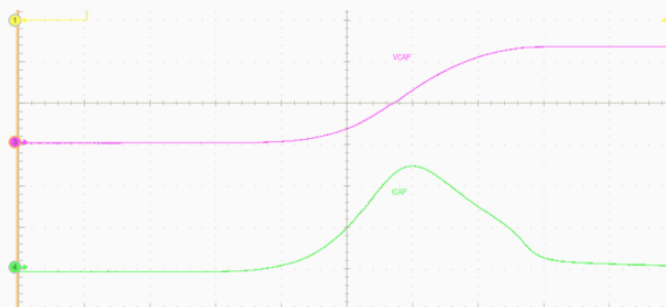
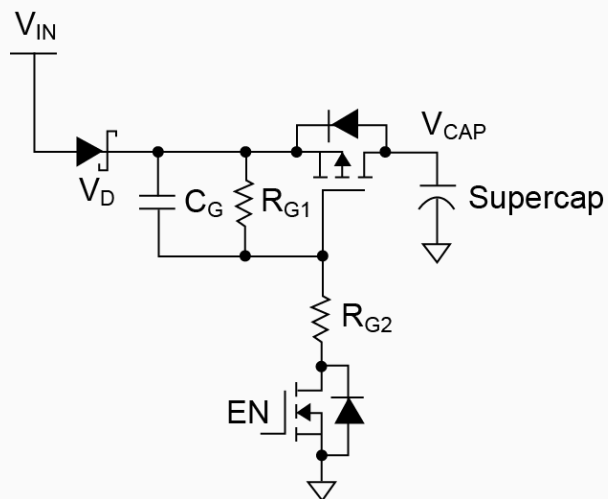
抵抗とダイオード



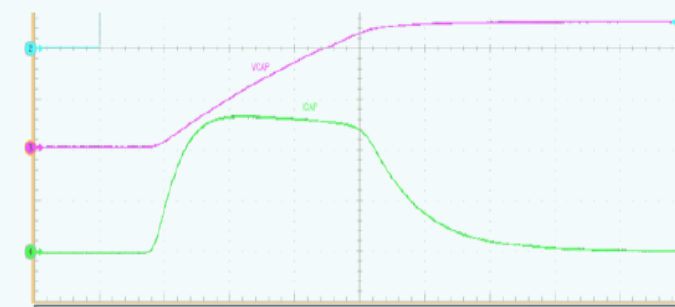
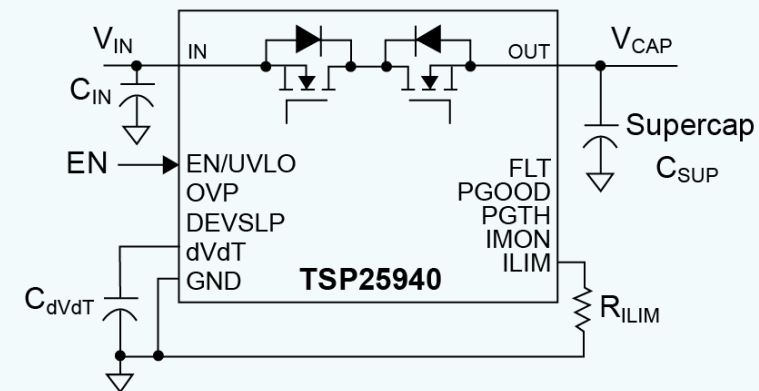
赤紫：スーパーキャパシタの電圧
緑：充電電流



FET

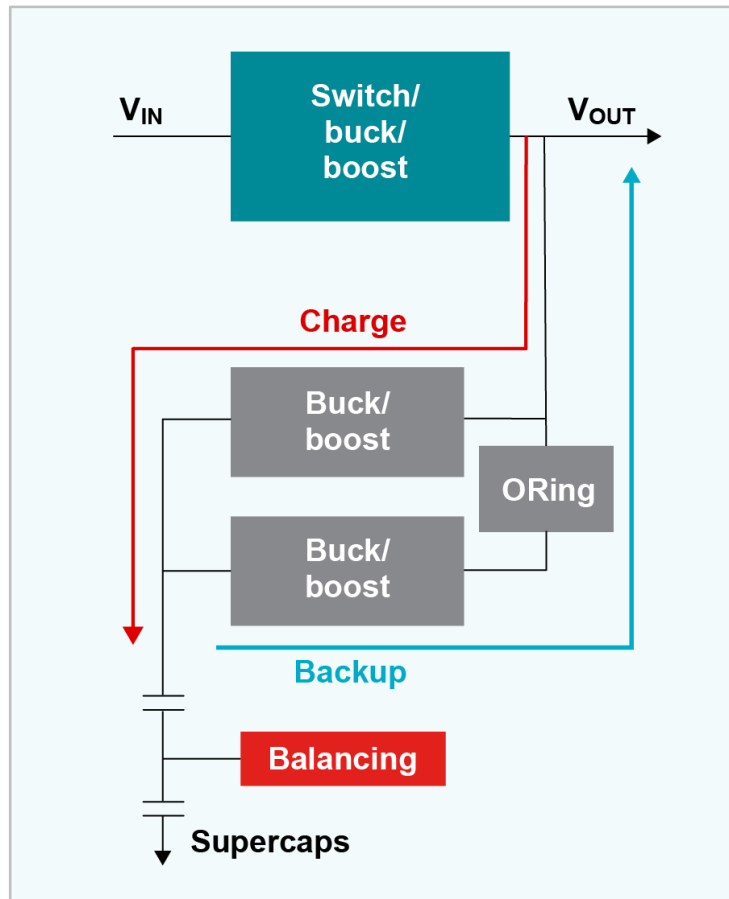


eFuse チャージャ

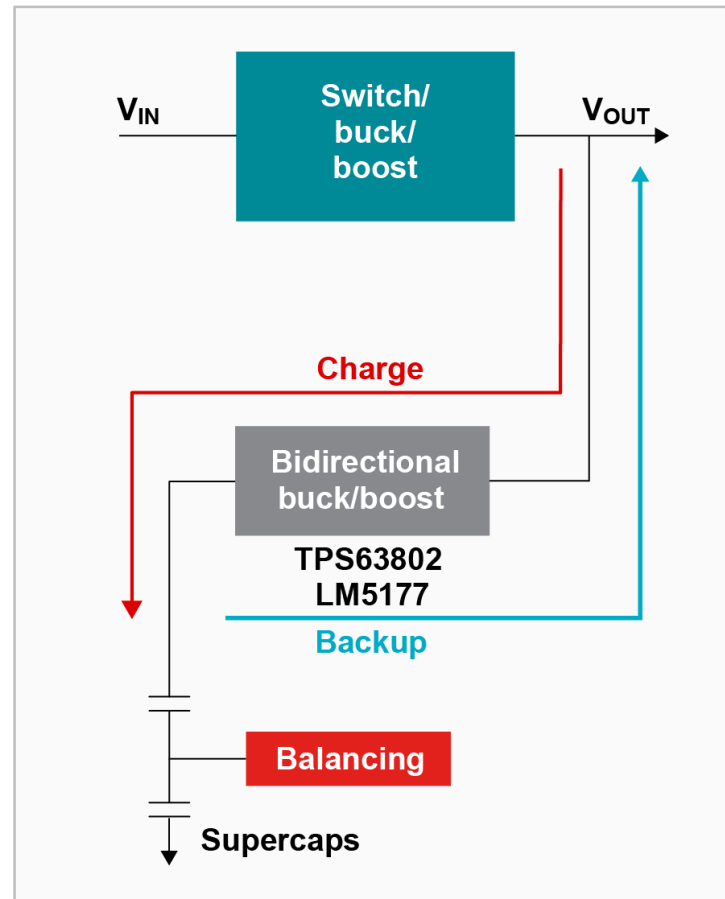


バックアップのアーキテクチャ

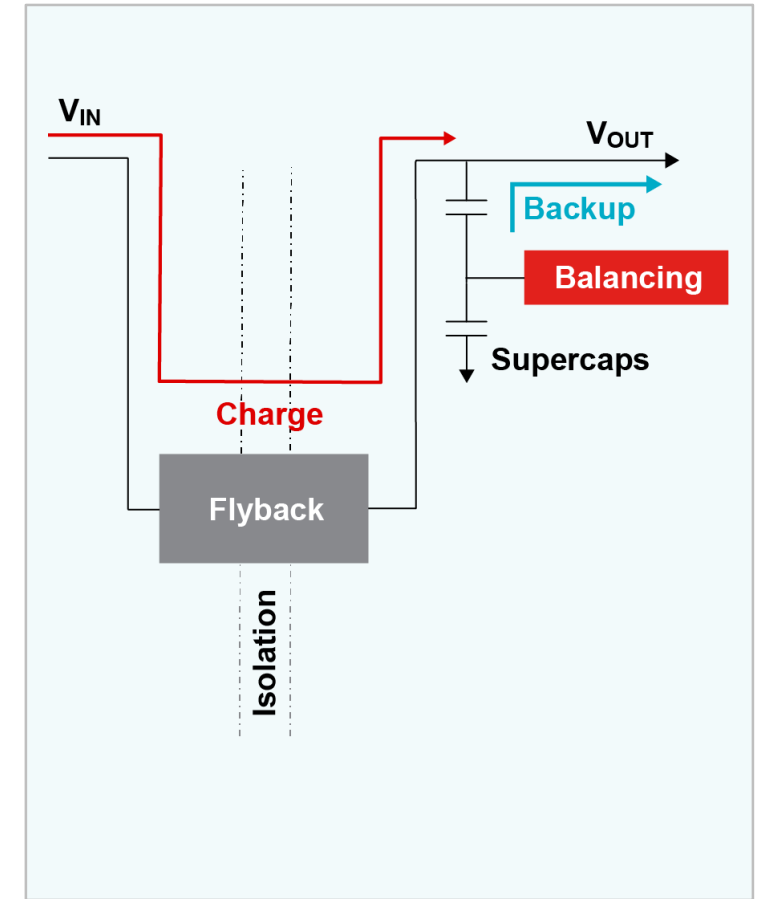
従来の昇降圧



双方向

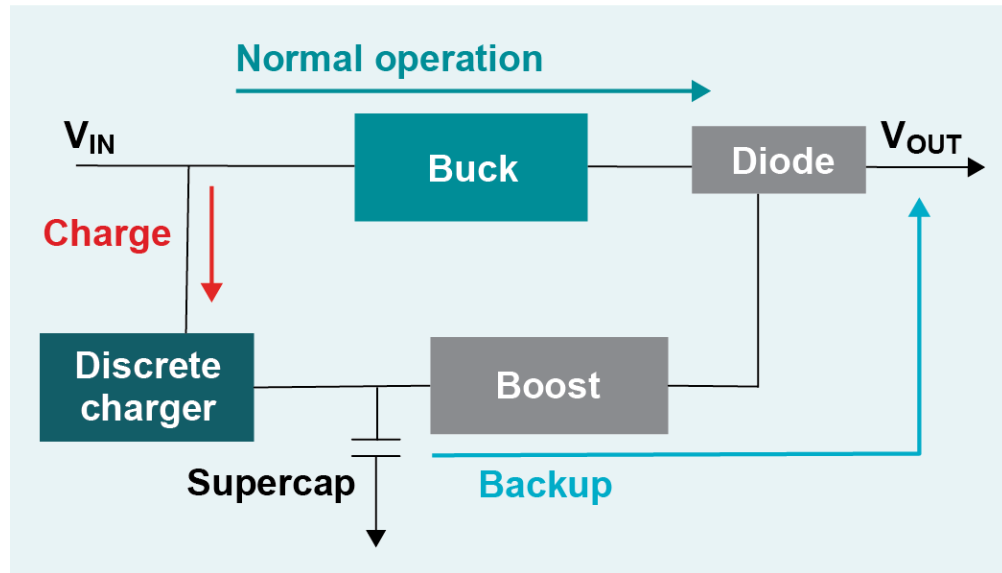


絶縁型シングル・ステージ

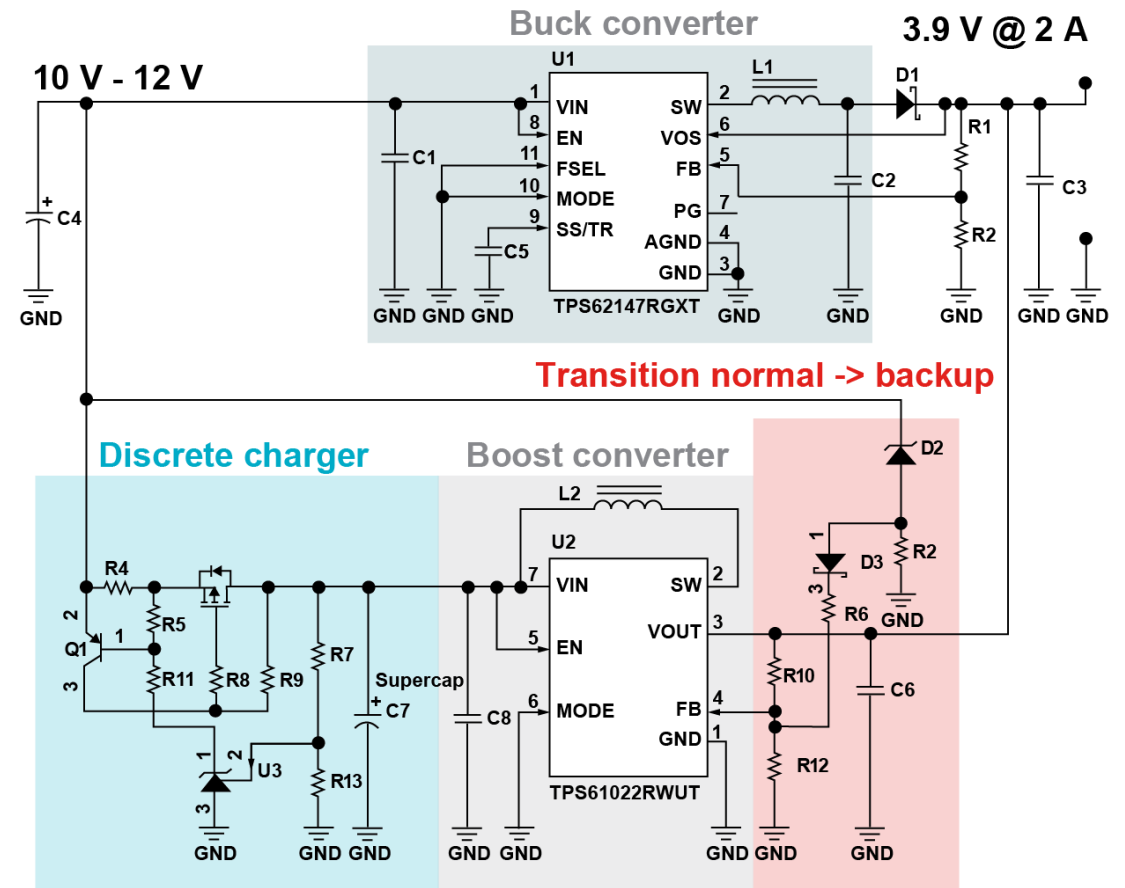


e メーターのリファレンス・デザイン、降圧と昇圧

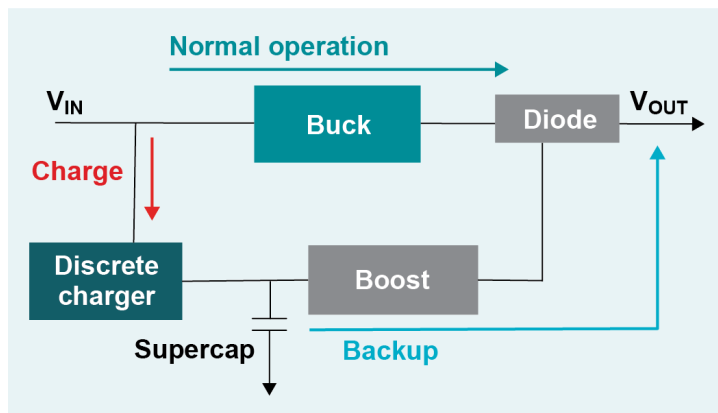
e メーター向けスーパーキャパシタ・バックアップ電源のリファレンス・デザイン



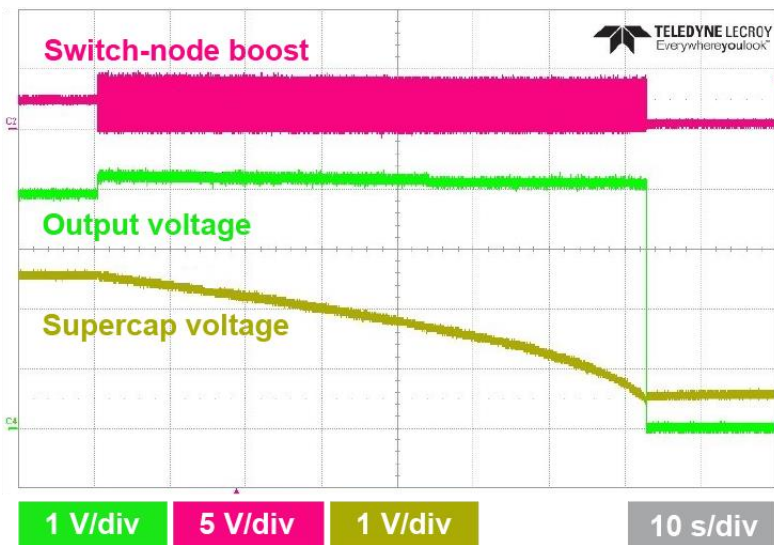
- 降圧+昇圧コンバーターを使用
- 電流と電圧が調整可能なディスクリートチャージャー
- 通常モードとバックアップモードのシームレスな切り替えが可能



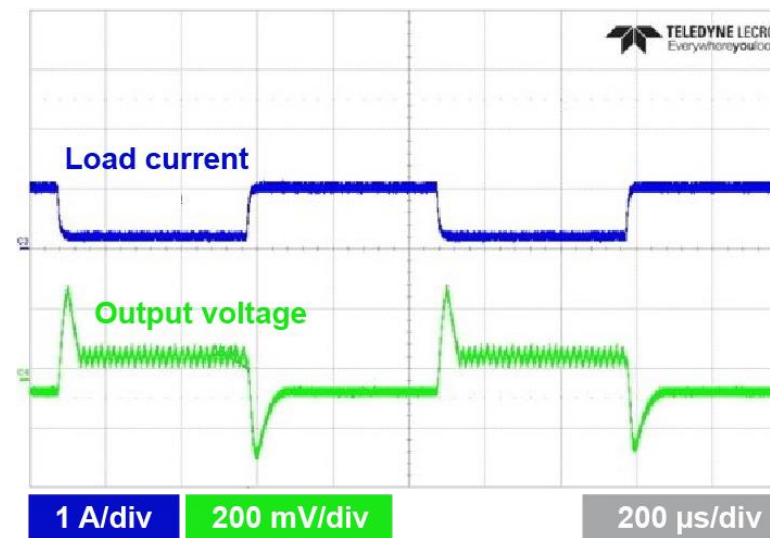
動作波形



通常時とバックアップ時の遷移 (Load:200mA)

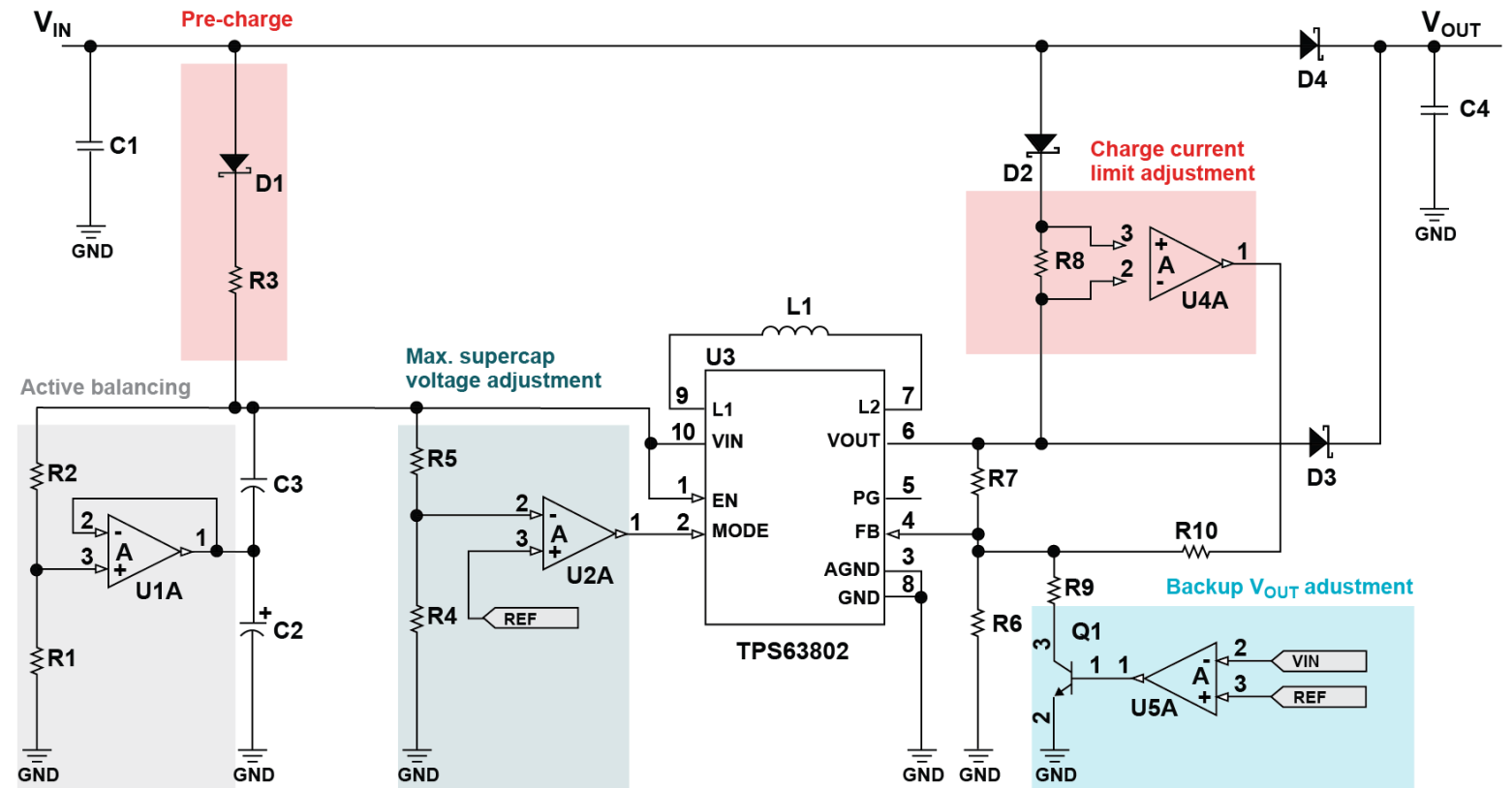
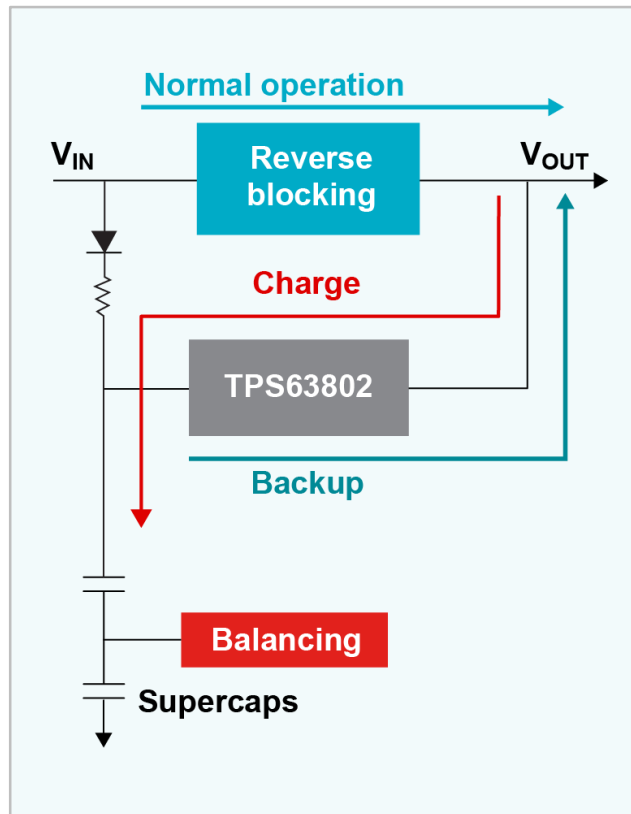


バックアップ時の負荷応答

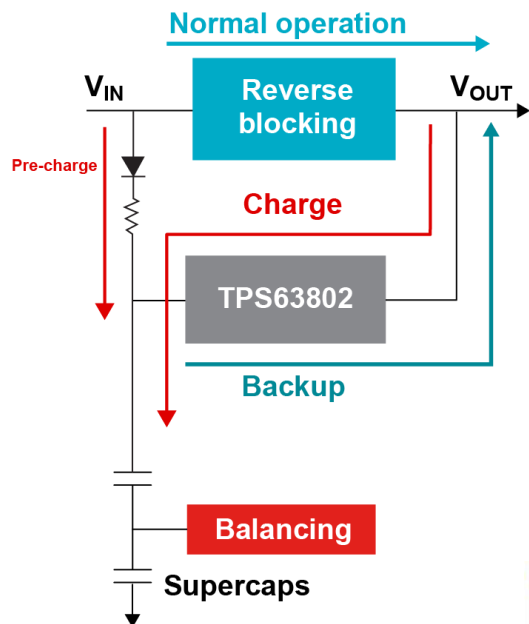


e メーターのリファレンスデザイン - 昇降圧

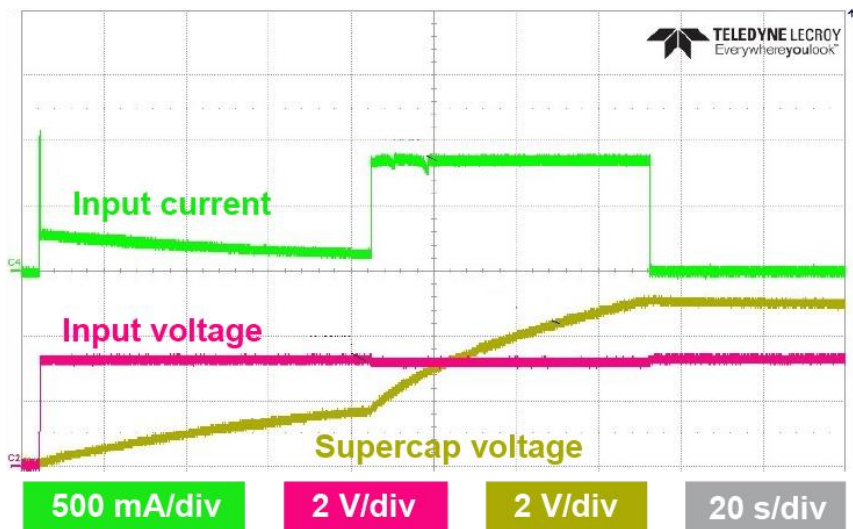
電流制限機能とアクティブ・セル・バランスを搭載したスーパーキャパシタ・バックアップ電源のリファレンス・デザイン



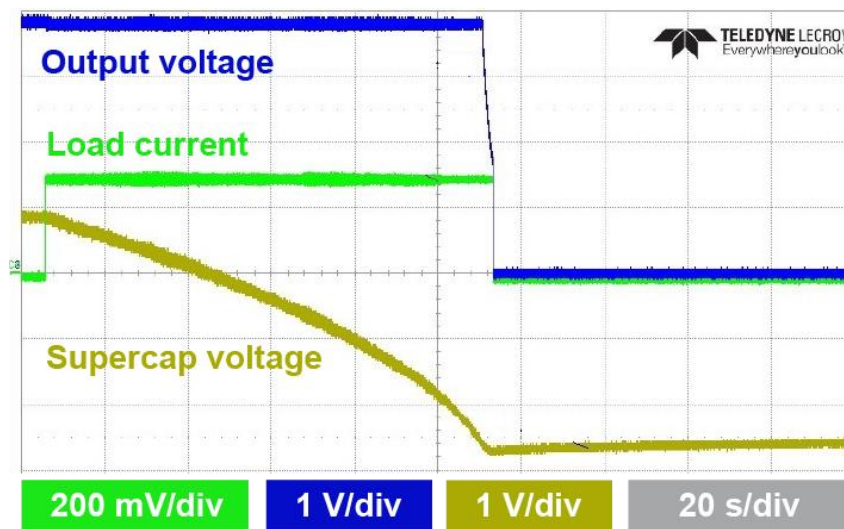
測定結果



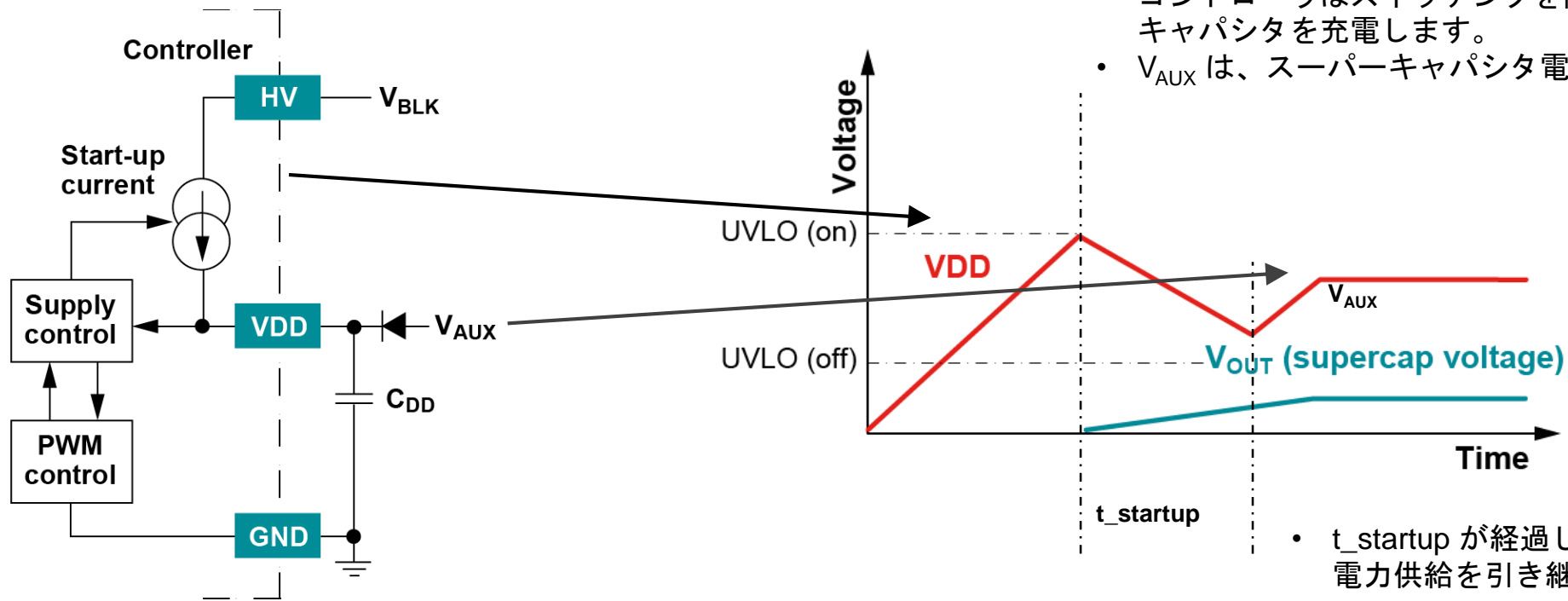
充電モード(充電電流 800mA)



バックアップ・モード (負荷 300mA)



スタートアップ動作



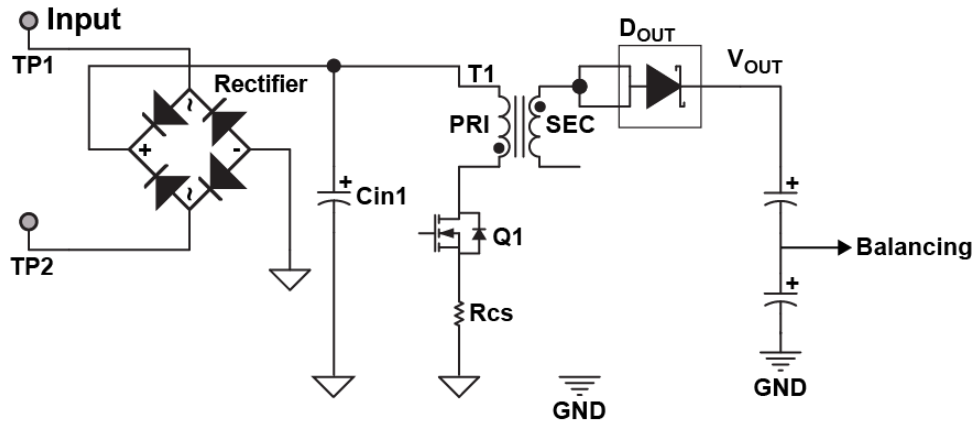
- VDD が UVLO (on) を上回るまで充電します。
- コントローラはスイッチングを開始し、スーパーキャパシタを充電します。
- V_{AUX} は、スーパーキャパシタ電圧に比例します。

設計上の課題：

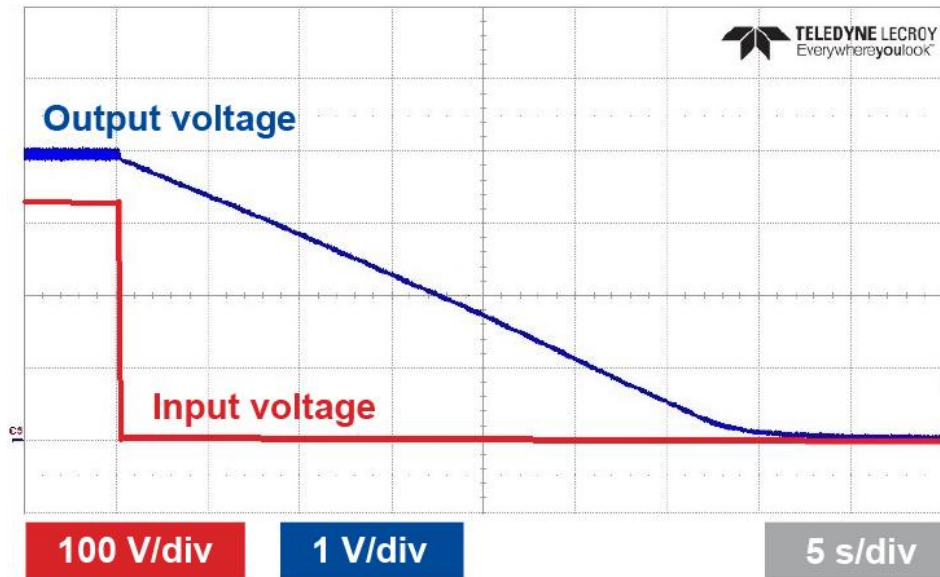
- VDD の静電容量は、 $t_{startup}$ とトランスの巻線比に依存します。
- 補助巻線比が高い場合、VDD クランプ回路 (過電圧対策) が必要になります。

- $t_{startup}$ が経過した後、 V_{AUX} はコントローラへの電力供給を引き継ぎます。

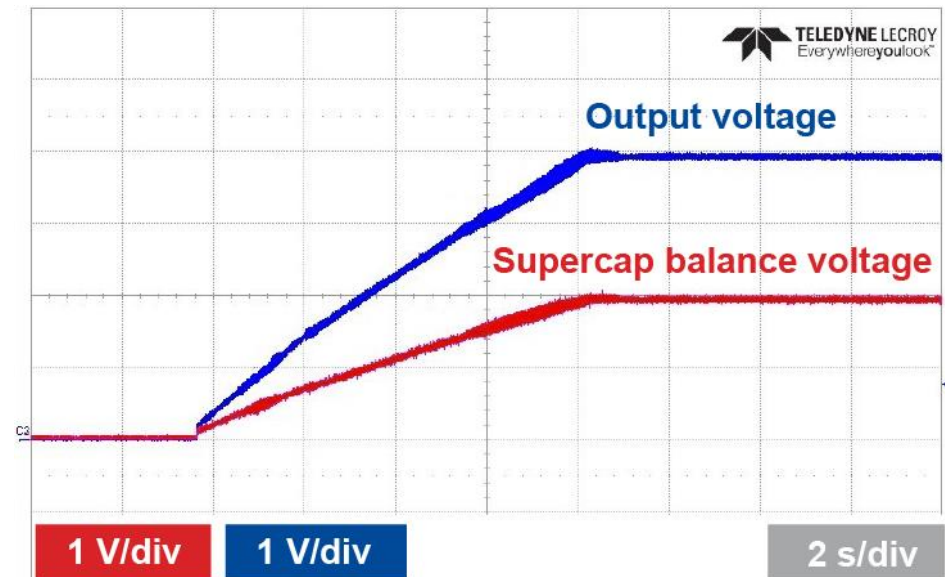
測定結果



750mA 負荷を使用するバックアップ・モード



balancingされた充電波形



Part 2

車載アプリケーション向けのバッテリーバックアップ電源

パート 2 : バックアップ・バッテリー

- 産業用と車載の各アプリケーションで、使用事例はますます増加しています。
 - 安全なシステム・シャットダウン
 - 警告灯
 - 緊急通話 システム
- アプリケーションによって、バックアップ電源と動作時間に求められる仕様が異なります。
 - 例：緊急通話システムの場合、バッテリー動作時間は数分ですが、出力電力は数ワットから数十ワットに上ります。



エネルギー要件

$$\text{Stored Energy (Wh)} = V_{\text{nom}} (V) \times C_{\text{nom}} (\text{Ah})$$

$$\text{Required Energy (Wh)} = \frac{\text{Nominal Power (W)} \times \text{Run time (h)}}{\text{Conversion efficiency}} + \text{Safety margin (Wh)}$$

- 必要なエネルギーは以下のものに依存します。
 - 電力量と動作時間
 - コンバータの効率
 - 安全マージン (容量の許容誤差、経年劣化への対処)
- 考慮する必要がある他のパラメータ：
 - バッテリーの占める物理的な体積
 - バッテリー交換の容易さ
 - 安全性に関する規制

昇圧コンバータ・ベースのバックアップ電源

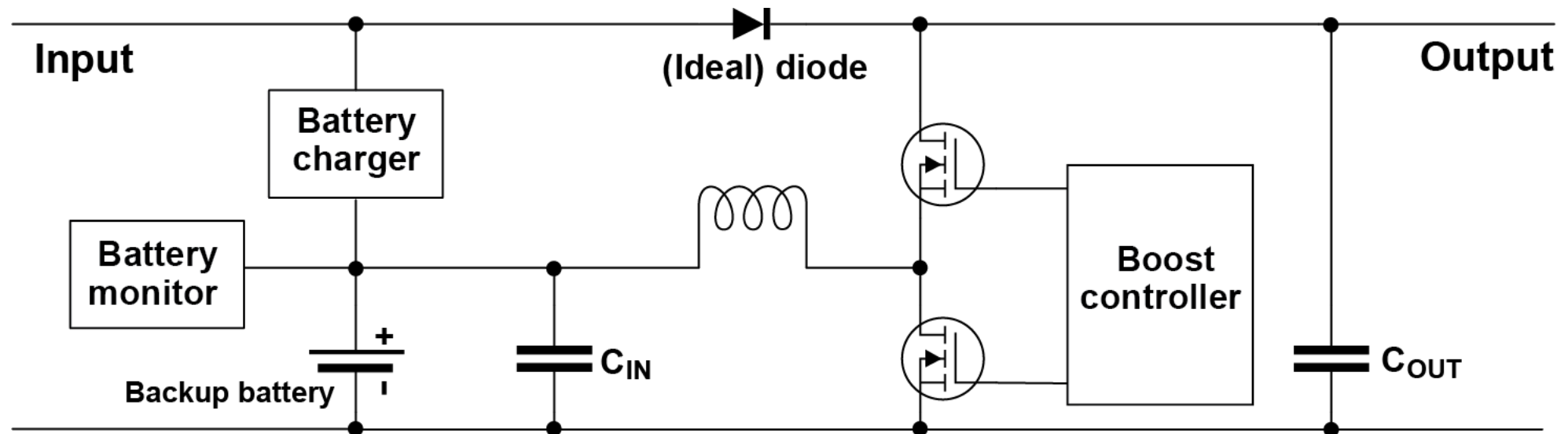
バックアップ専用昇圧コンバータの設計

• 利点:

- ORing コントローラが不要
- バイパス・モードが不要
- 緊急時の電力供給のみ必要

• 欠点:

- コールドクランクに対応できない
- 負荷を切り離せない



昇圧コンバータ・ベースのバックアップ電源

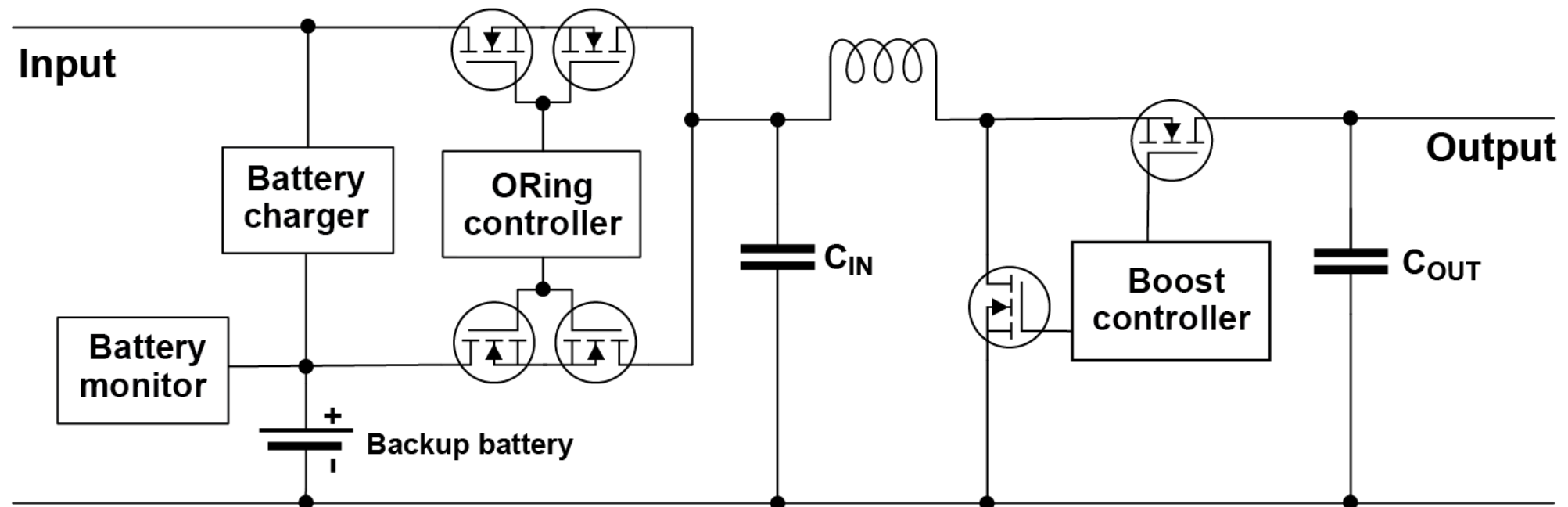
コールド・クランク対応の昇圧コンバータ設計

- 利点:

- バッテリーにストレスをかけず、コールド・クランクとスタート/ストップ動作を実現
- 負荷から切り離せる

- 欠点:

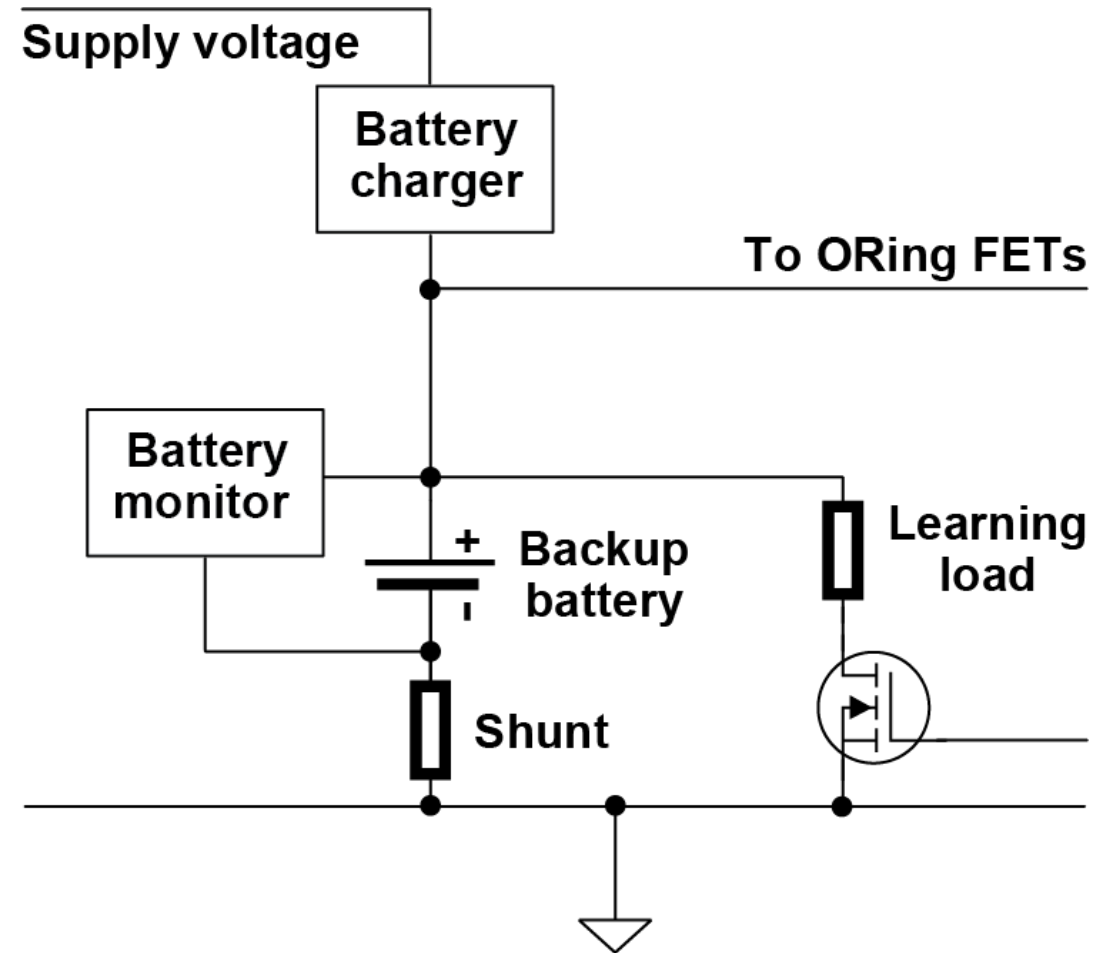
- 4 個の ORing FET が必要
- 追加の ORing 制御回路が必要
- バイパス・モードを搭載した昇圧コントローラが必要



緊急バックアップ・バッテリーの管理

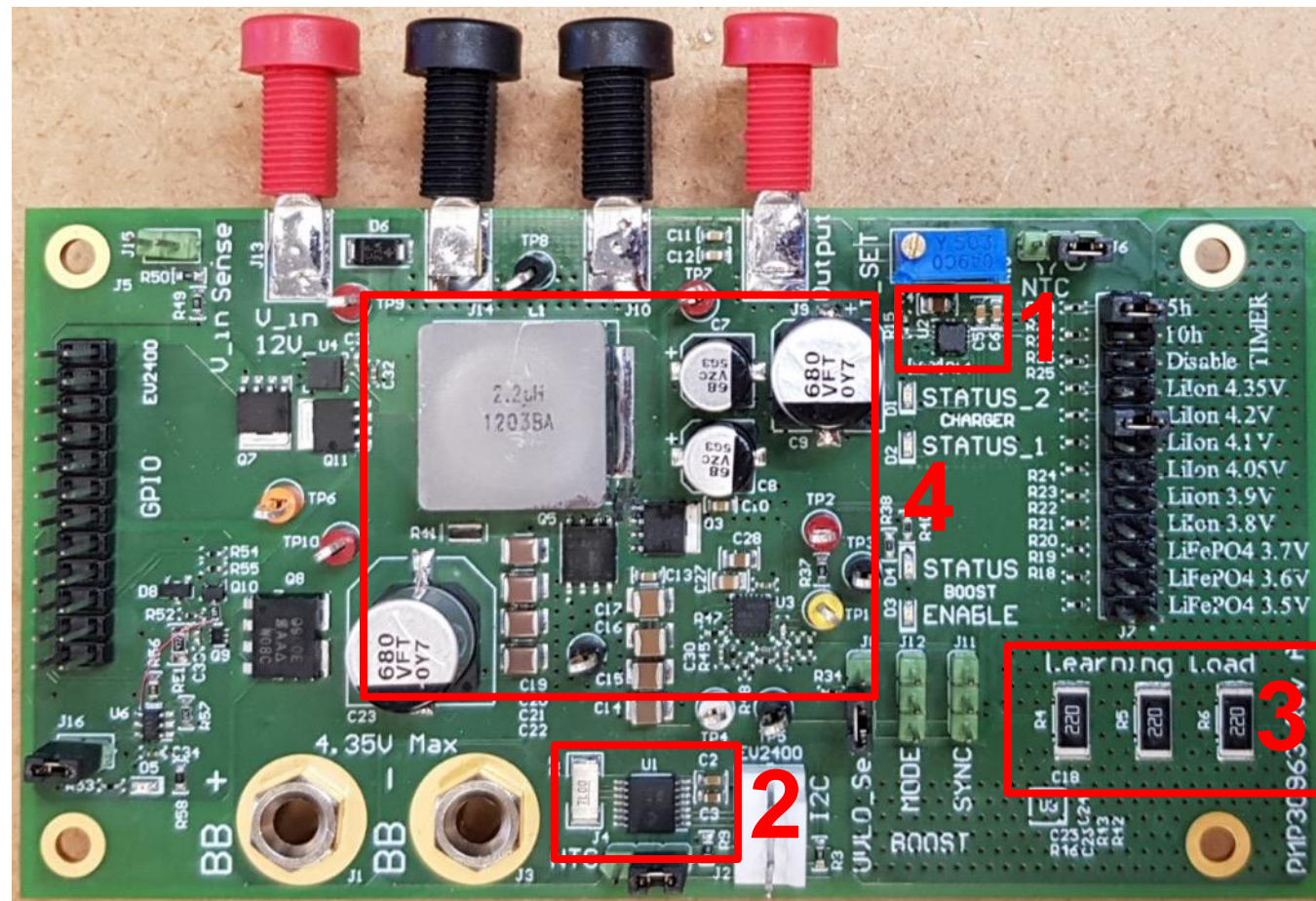
バッテリー・マネージメント

- リニアチャージャ :
 - 緊急事態でのみバッテリーを使用する場合、大電力での充電は不要なため。
- バッテリー残量計 :
 - バッテリーの各種パラメータを監視します。
超低消費電力 → スタンバイモード
- Learning Load :
 - バッテリーの内部抵抗測定を容易にする



設計例 – コールド・クランク対応のバックアップ・ソリューション

- 最小 3V のコールド・クランクに対応するバックアップ電源。
- 1S (1 個の直列) リチウム・バックアップ・バッテリー向けの設計。(コールド・クランク時このバッテリーは使用されません)
- リニア・バッテリー・チャージャ (1)
- バッテリー残量計 (2) Learning Load(3)
- 昇圧コンバータ (4) 22.5W の連続出力、電 30W のピーク出力電力に対応できる。
 $V_{out} = 8.5V$



(1) BQ25171-Q1

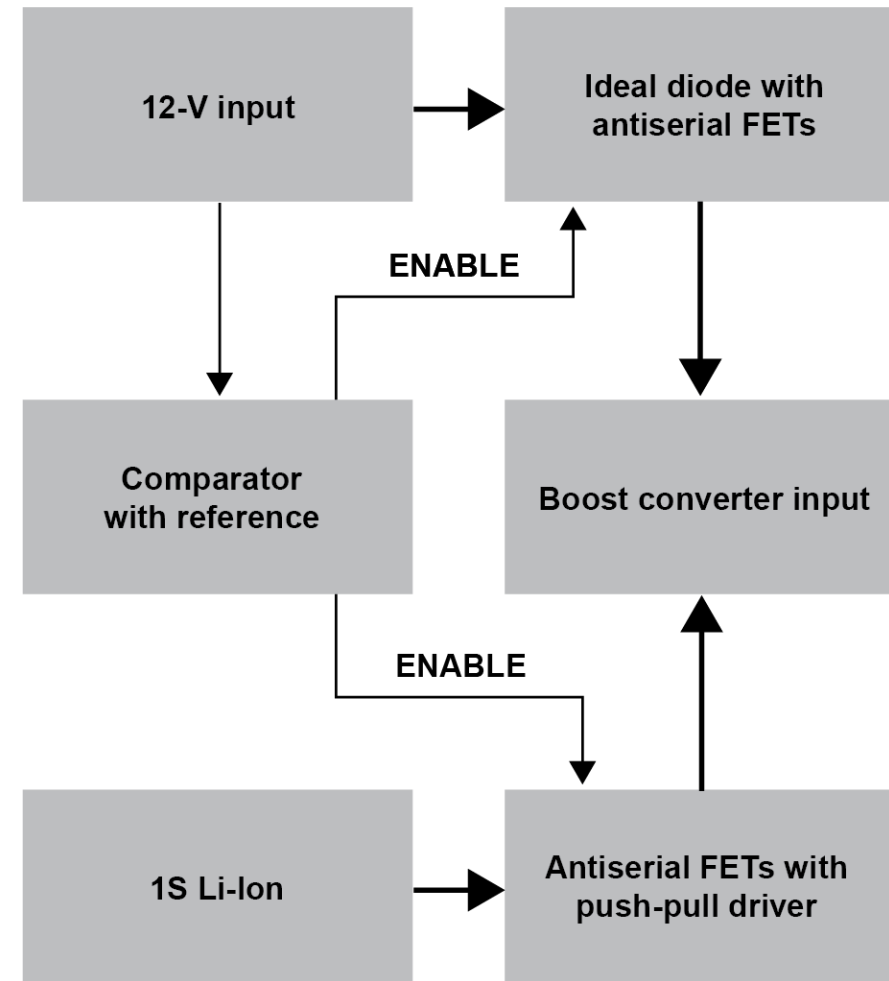
(2) BQ34210-Q1

(4) LM5152-Q1

設計例 – 入力 ORing

入力 ORing :

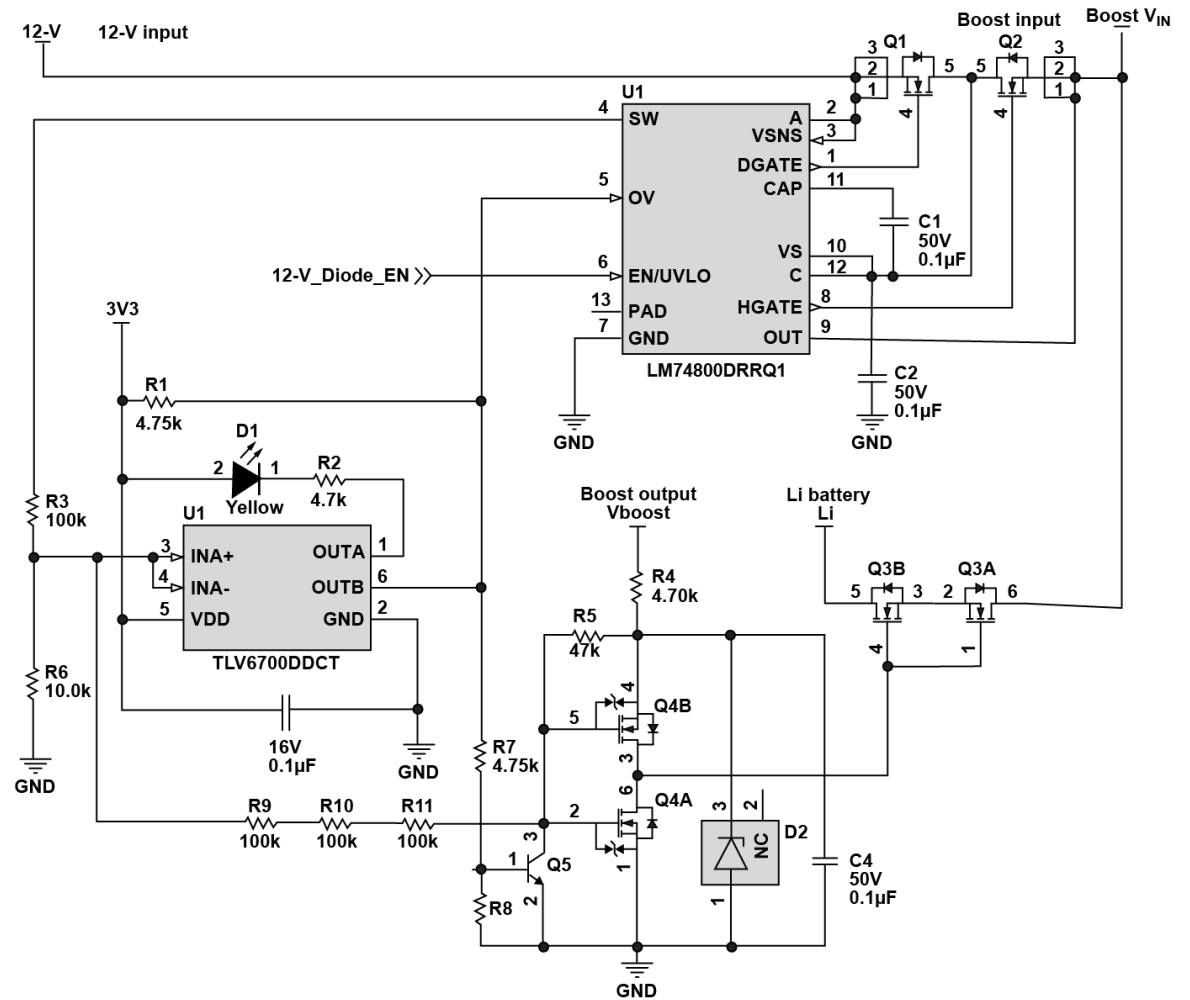
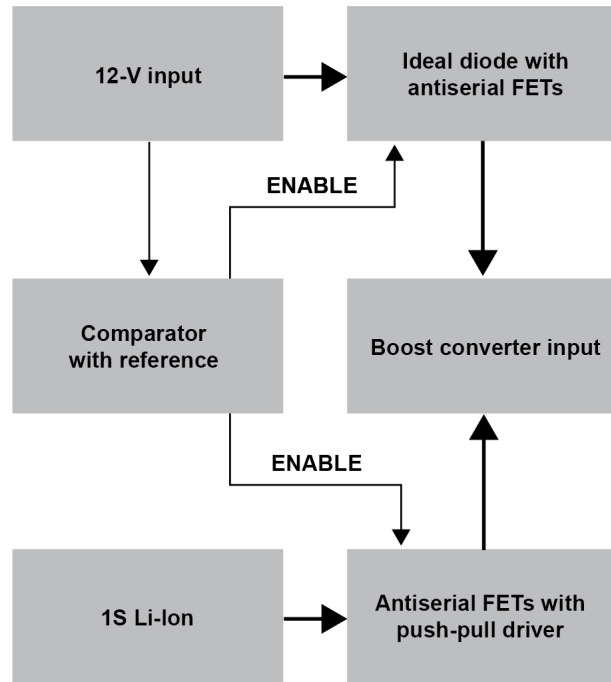
- コンパレータ・ベースのソリューション
- バックアップ・バッテリーから 12V 入力へ向かって電流が逆流するのを防ぐ(たとえば短絡)
- 12V からバックアップ・バッテリーの過充電を防止
- V_{IN} が 3V 未満の場合のみ、バックアップ・バッテリーに切り替えます (バッテリーからの電力供給なしで 3V までのコールドクランクに対応するため)



設計例 – 入力 ORing

入力 ORing :

- 低コストで低損失な N-チャネル FET
- チャージ・ポンプが不要



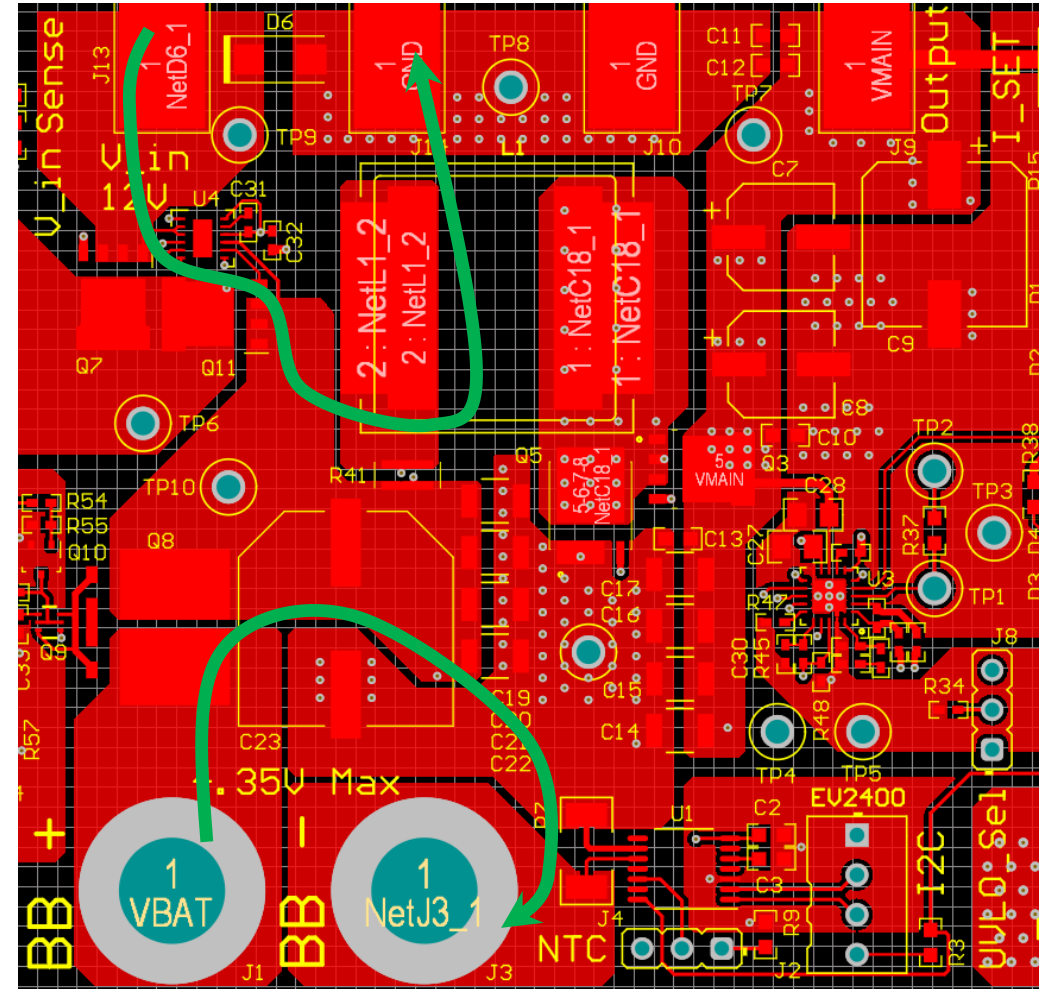
設計例 – レイアウトに関する検討事項

設計パラメータ :

- 30W の出力電力
- 入力電圧 3V のときに約 91% の効率 → 約 11A の入力電流
- 大電流と低入力電圧の組み合わせ

考慮する必要のある寄生成分 :

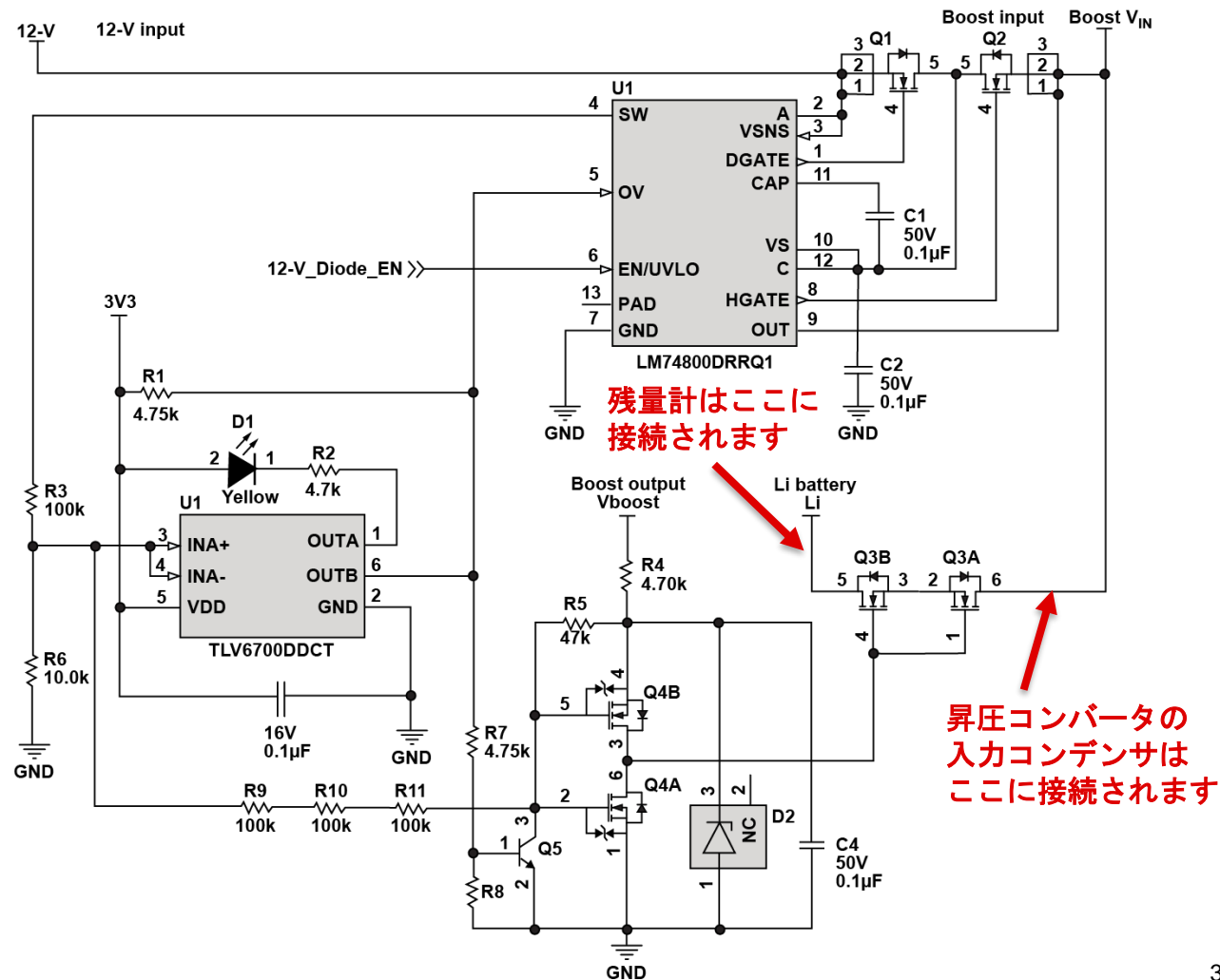
- PCB のパターン抵抗
- ショット抵抗
- バッテリーとの接続
- 複数の ORing FET の $R_{DS(on)}$



設計例 – 機能に関する注意事項

入力 ORing に関する注意事項 :

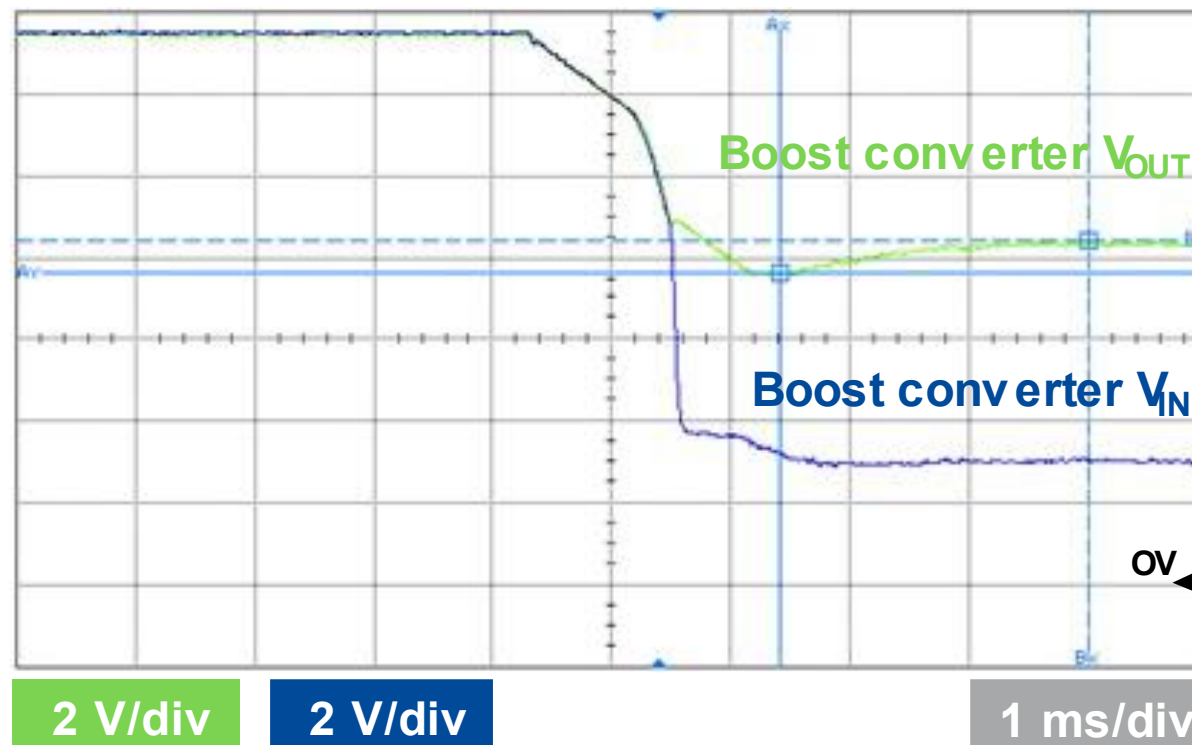
- 昇圧コンバータの入力コンデンサは、入力電圧 (たとえば、12V) と同じ値に充電される
- バックアップ・バッテリーに切り替える時点で、このコンデンサはバックアップ・バッテリーに接続される
- 切り替えが早すぎる場合、バックアップ・バッテリーで電圧スパイクが発生する
 - バッテリーまたは残量計の損傷が生じる可能性がある



設計例 – 測定結果

入力 ORing の測定結果：

- $V_{IN} > 8.5V$ の場合、 V_{OUT} は V_{IN} に従います。
- V_{IN} が印加されなくなった時点で、昇圧コンバータは動作を開始します。



まとめ

- **アプリケーションによって推奨される蓄電デバイスは異なる**
 - スーパーキャパシタは高い電力密度が特徴 (短時間の高電力供給向け)
 - バッテリーは高いエネルギー密度が特徴
 - バッテリーはより高い動作電圧を供給するので、電力が同じ場合、供給電流は小さくなります ($P = IV$)。
- **適切な充電と監視が重要**
 - スーパーキャパシタの場合、充電状態の監視や充電方法はバッテリーよりシンプルとなる
 - 直列接続する場合、バッテリーとスーパーキャパシタのどちらでもバランスが必須
- **低インピーダンスのレイアウトが重要**
 - 寄生成分は、損失とエネルギー浪費の増加につながる
 - アプリケーションの要件に応じて、ORing の方式を選択する必要がある

参考資料

- **PMP30528** www.tij.co.jp/tool/jp/PMP30528
 - ディスクリット・チャージャと組み合わせる 1S (1 個の直列) スーパーキャップ使用のバックアップ、 $V_{in} = 10 \sim 12V$
- **PMP30693** www.tij.co.jp/tool/jp/PMP30693
 - アクティブ・セル・balancing機能搭載、1 チップ・ソリューション、2S (2 個の直列) スーパーキャパシタ使用のバックアップ、 $V_{in} = 3.3V \sim 5.3V$
- **PMP30826** www.tij.co.jp/tool/jp/PMP30826
 - メイン電源から直接スーパーキャパシタに充電するフライバック・アーキテクチャ、 $V_{in} = 85VAC \sim 272VAC$
- **TPS61094EVM-066** <https://www.tij.co.jp/tool/jp/TPS61094EVM-066>
 - 1 チップ・ソリューション、1S/2S (1 個 / 2 個の直列) スーパーキャパシタ使用のバックアップ、 $V_{in} = 0.7V \sim 5.5V$
- **PMP30963** www.ti.com/tool/PMP30963
 - 車載アプリケーション向け、30W ピーク、1S Li-ion・バッテリー・バックアップ・ソリューション
- **TIDA050031** www.tij.co.jp/tool/jp/TIDA-050031
 - 車両緊急通報アプリケーション向けバックアップ・バッテリー電源のリファレンス・デザイン



©2022 Texas Instruments Incorporated. All rights reserved.

The material is provided strictly "as-is" for informational purposes only and without any warranty.
Use of this material is subject to TI's **Terms of Use**, viewable at [TI.com](https://www.ti.com)