

## Technical Article

## DC/DC コンバータのホットプラグを安全に行う



Josh Mandelcorn, Hrag Kasparian

パワーコンバータでは、入力コンデンサは電源からインダクタンスを持つ配線を通じて給電されます。寄生インダクタンスにより、システムに初めて接続(ホットプラグ)した際、入力電圧が DC 値のほぼ 2 倍まで振動(リンギング)することがあります。入力側の減衰が不十分で、かつラッシュ電流制御がない場合、コンバータを損傷する恐れがあります。

オフバッテリーのコンバータ入力電圧をバルク電解コンデンサで減衰させることで、バッテリー電源を初めて投入する際の過大な電圧リンギングを防ぎ、さらにコンバータを不安定化させる共振も防止できます。従来の 12V 自動車用バッテリーから、24V<sub>IN</sub> 入力や 48V<sub>IN</sub> 入力システムへ移行するにあたり、入力を適切に減衰させる必要性はさらに高まっています。12V バッテリーシステムでは、ロードダンプ条件下の短時間の電圧スパイクに耐えるため、通常 40V 以上の定格部品が使われます。これら 12V システムの最大 DC 電圧は 18V<sub>DC</sub> に達することがあります。ホットプラグによって入力リンギングが発生すると、電圧は入力値のほぼ 2 倍、例えば 36V に達することがあります。これは 40V 以上の定格部品であれば十分に耐えられる範囲です。しかし、48V システムでは定常状態の入力電圧が 54V に達するため、入力リンギングによって電圧が 100V を超える可能性があり、80V 定格の部品を損傷させる恐れがあります。

従来の 12V システムでは、減衰用コンデンサが十分な等価直列抵抗(ESR)を持ち、共振を抑制できるとしばしば仮定されています。しかし、低コストのアルミ電解コンデンサでは、実際の等価直列抵抗(ESR)は公称の最大値よりも一般的に低く、その結果として減衰効果は大幅に小さくなり、バッテリー電源を投入した際のリンギングはより大きくなります。12V システムの場合でも、ダウンストリーム DC/DC の不安定性を防止するのに十分な減衰量がある可能性があり、リンギングが損傷を引き起こすことはありません。しかし、リンギングの影響を受けやすい 48V システムでは、入力の減衰コンデンサに直列で個別の抵抗を追加することができます。定常状態のリップル電流に基づけば、0603 サイズ(1608 メートル法)で十分です。

ここでは図 1、既存の DC/DC コンバータの入力フィルタにおける L1 と C1 の値が共振を生じ、その共振は式 1 で表されます。

$$\frac{1}{2\pi\sqrt{L_1C_1}} = 8\text{kHz} \quad (1)$$

TI E2E™ 設計サポートフォーラムの技術記事「[ダンピング入力ビーズの共振を使用して発振を防止する](#)」に基づいて、ターゲットダンピングコンデンサ(C<sub>d</sub>)とダンピング抵抗(R<sub>d</sub>)を選択しました。C<sub>d</sub> は、理想的には、C<sub>1</sub> の少なくとも 3 倍にする必要があります。C<sub>d</sub> として 150 μF の標準値を選択しました。

式 2 に、目標減衰抵抗を示します。

$$Z_o = \sqrt{\frac{L_1}{C_1}} = 0.5\Omega \quad (2)$$

減衰抵抗(R<sub>d</sub>)として、C<sub>d</sub> と直列に 1Ω 抵抗を 2 本並列接続してください。

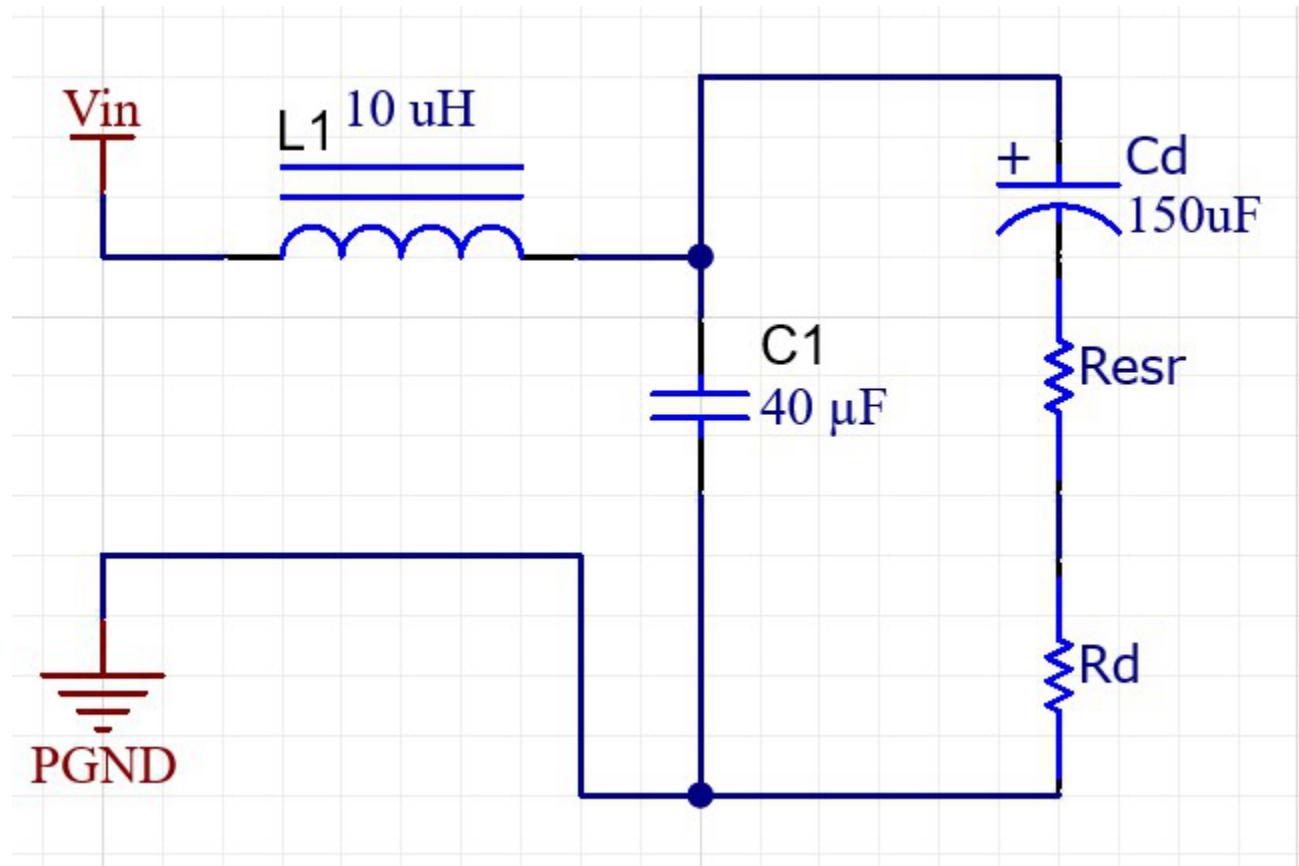
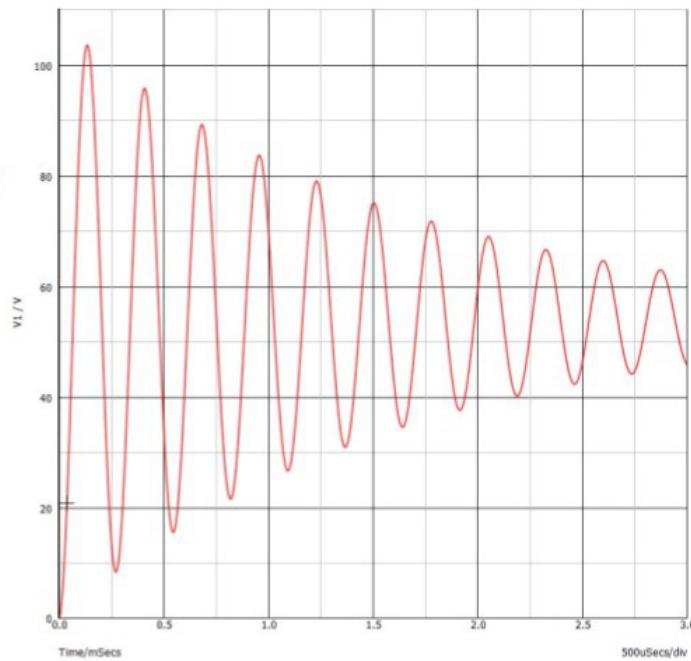
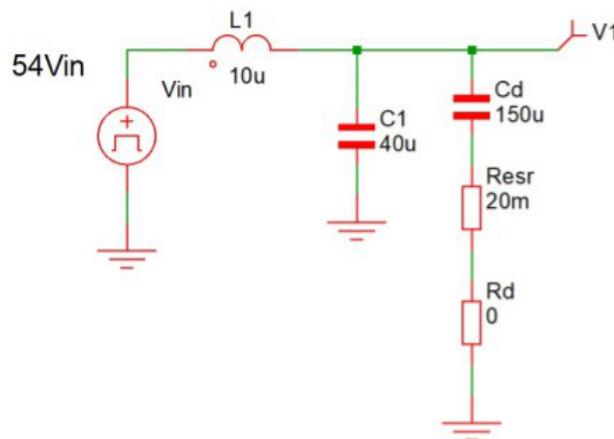


図 1. 簡略化された入力フィルタは、バッテリー電源を投入した際の過大な電圧リングを防ぐとともに、コンバータを不安定化させる共振も防止します。

図 2 は、 $C_d$  と直列に  $0.5 \Omega$  のダンピング抵抗を追加した場合としない場合の、ホットプラグ応答のシミュレーション結果を示しています。

### Under-damped



### Properly Damped

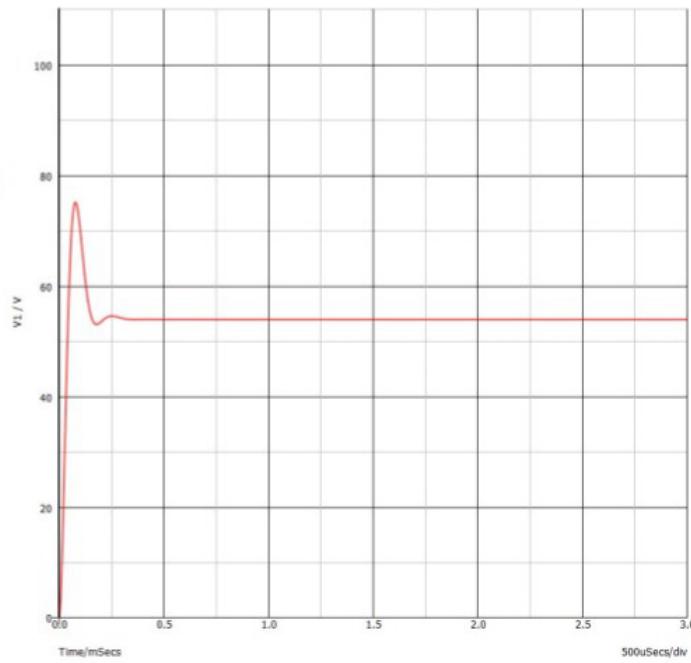
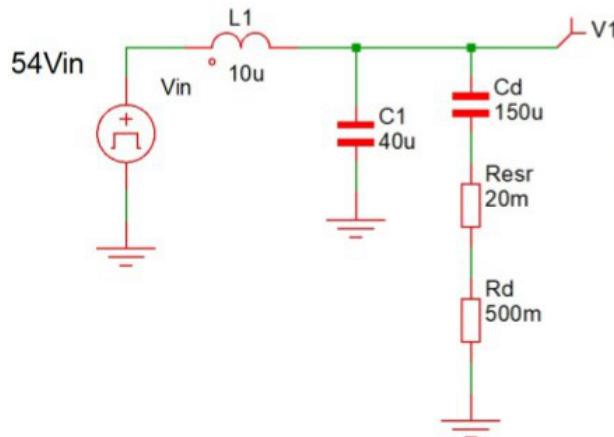


図 2.  $C_d$  と直列にダンピング  $0.5\Omega$  のダンピング抵抗を使用しない場合と使用した場合の、ホットプラグのシミュレーション。

適切な減衰抵抗とコンデンサの組み合わせを用いることで、入力フィルタの減衰を実現しました。ただし、見落としやすい側面が 1 つあります。ラボでは、電源にホットプラグを接続したときにダンピング抵抗 ( $R_d$ ) の破壊を発生させました。ここで確認したのは、減衰抵抗には式 3 で表されるピーク電力がかかるということです。

$$P_{pk} = \frac{V_{IN\_Max}^2}{R} \quad (3)$$

$1\Omega$  抵抗に 54V が印加された場合、それぞれの抵抗には約 2,900W のピークが発生します。さらに、この抵抗は非常に短い時間で、減衰コンデンサ ( $C_d$ ) に蓄積されたエネルギーとほぼ同じ量のエネルギーを消費します。減衰コンデンサに蓄積されるエネルギーは式 4 で表されます。

$$E_{C_d} = \frac{(C_d)(V_{in}^2)}{2} \quad (4)$$

この場合、そのエネルギーは2本の1Ω抵抗に均等に分配されます。150μFの容量に54V<sub>IN</sub>を印加した場合、総エネルギーは約220mJで、各1Ω抵抗には110mJがかかります。これはやや厳しい仮定であり、C<sub>d</sub>の内部ESRによって実際の抵抗にかかるピーク電圧は約4%低下します。

実際のラッシュ電流サージをサージ定格グラフに対応づけるのは容易ではありません。実際のサージ波形はおよそ減衰する指数関数形であり、一方で抵抗の定格は固定時間・一定電力での印加を前提としています。[図3](#)

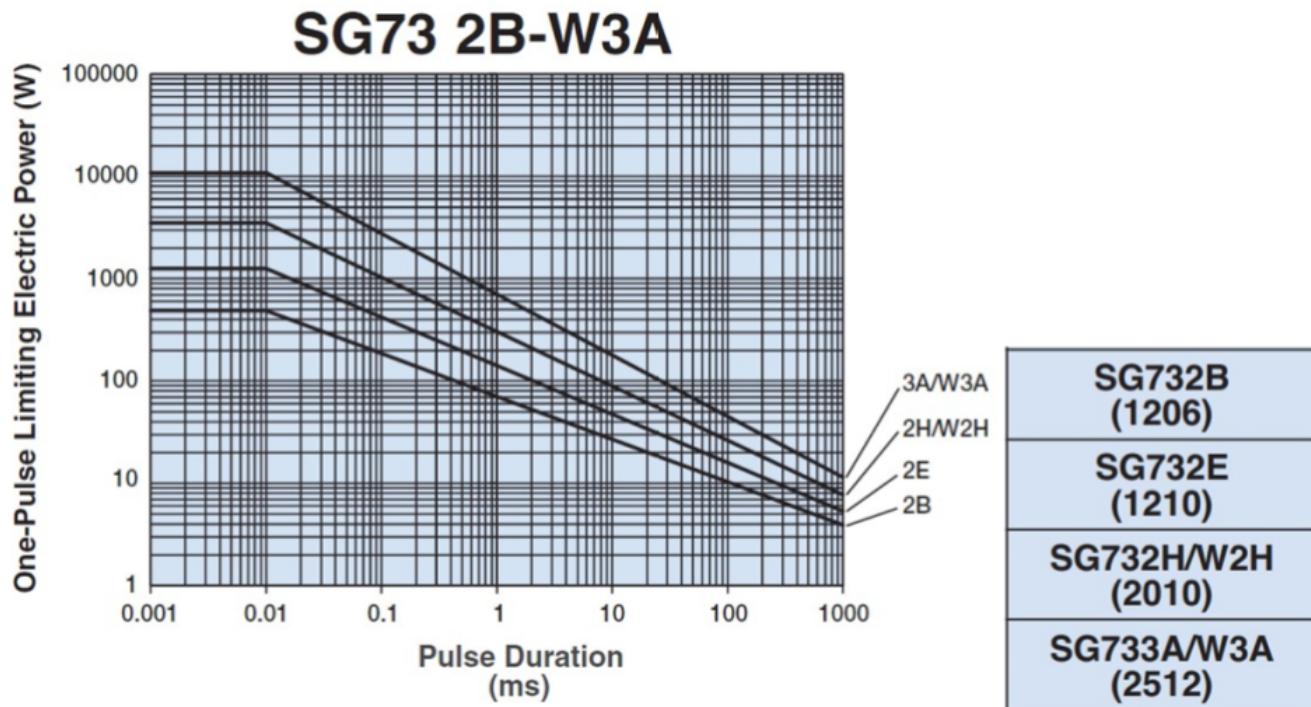


図3. よろ減衰する指数波形を示すサージ定格抵抗の例。

保守的な方法としては、抵抗で消費される総エネルギーをピーク電力で割ることが挙げられます。その結果得られるパルス幅を、抵抗のサージ定格グラフと照合することができます。この計算によるパルスは、実際のパルスよりも厳しい条件になります。なぜなら、実際のパルスでは同じ発熱エネルギーがより長い時間に分散されるためです。今回のケースでは、各抵抗において  $110\text{mJ} \div 2,900\text{W} = 38\mu\text{s}$  となります。サージ定格抵抗サイズ 2512 SG733A/W3A は、約 40μs で 4.5kW を処理できます。これは、このパッケージ抵抗がこのアプリケーションに適していることを意味します。同じ 2512 パッケージの汎用抵抗は、サージ定格抵抗に比べて 1 枠以上低い電力定格しか持っていません。

ただし、この計算では直列インダクタンスの影響を無視しています。インダクタは抵抗に流れ込む電流の立ち上がりを遅らせてピーク電力を低減しますが、同時にオーバーシュートによる総損失を増加させます。[図2](#) 10μH インダクタを含めたシミュレーション結果では、抵抗のピーク電力は計算値 2.9kW から 30% 低下しましたが、抵抗の総エネルギーは先ほどの 110mJ より 17% 多くなりました。定格曲線によれば、許容エネルギーはピーク電力比の  $-2/3$  乗に従います。したがって、ピーク電力が 30% 低下すると 27% 多い損失が許容されることになり、直列インダクタの有無にかかわらず今回の計算は保守的であるといえます。

### ホットプラグによる故障の回避

自動車での最良の設置や保守の実践においてはホットプラグを避けますが、実際には誤操作が発生する可能性があります。この記事で述べた手順に従うことで、システムの高額な損傷を防ぐことができます。TI は、電力管理のパートナーとして、電力の限界を押し広げることに常に取り組んでいます。

## 関連コンテンツ

- [Power Tips #125: フォトカプラーエミュレータを使用して絶縁型 DC/DC コンバータの信頼性と過渡応答を向上させる方法](#)
- [Power Tips #124: PFC の効率を改善する方法](#)
- [Power Tips #123: 二重昇圧コンバータを使用して、高変換比設計の電力範囲を拡張](#)
- [Power Tips #122: 1kW 高密度 LLC 電源モジュールに使用される平面トランジスタの概要](#)

## その他の資料

- [Power Stage Designer™ ソフトウェアツールをダウンロードします](#)

この記事は、以前 [EDN.com](#) で公開された記事です。

## 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

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默示保証、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、明示的または默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](http://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

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默示保証、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、明示的または默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、(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、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 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 © 2025, Texas Instruments Incorporated

最終更新日：2025 年 10 月