

Application Note

スピーカとハプティクス コイルの高インダクタンス負荷を駆動する
Class-D アンプ

Aditya Sundar, Ivan Salazar

概要

Class-D オーディオ アンプは、家電製品のオーディオ用途で広く使用されている高効率のスイッチング コンバータです。テキサス インストルメンツは、[TAS2120](#)、[TAS2572](#)、[TAS2563](#) のような昇圧コンバータ内蔵デバイスや、[TAS2320](#)、[TAS2780](#)、[TAS2781](#) のような外部 PVDD 電源で駆動するデバイスなど、Class-D デバイスの包括的なポートフォリオを提供しています。これらのアンプは、マイクロスピーカ、ウーファー、サブウーファー、ツイーター、骨伝導アクチュエータ、LRA、ERM、ハプティクス コイル、ピエゾ / MEMS スピーカなど、それぞれ異なる電気的特性を備えている多様なアクチュエータに対応しています。誘導性の高い負荷を駆動すると、アンプが、逆誘導性キックバック電流に起因する昇圧過電圧 (OV) 故障や、Y ブリッジのスイッチング ヒステリシス不足による過電流シャットダウンに陥る可能性があります。過電流シナリオは、Class-D 出力に大きな LC (EMI) フィルタがある Y ブリッジを使用する場合にも発生する可能性があります。このアプリケーション ノートでは、これらのモードの根本原因を特定し、それを緩和するための実用的な定量設計ソリューションを提供します。

目次

1 概要.....	2
2 詳細説明.....	3
2.1 高誘導性スピーカの昇圧過電圧故障に関する検討事項.....	3
2.2 過電流シャットダウンを防止するための Class-D Y ブリッジ ヒステリシスの最低要件.....	7
2.3 Class-D 出力で EMI フィルタを使用した場合の Class-D Y ブリッジ過電流シャットダウン.....	8
3 まとめ.....	9
4 参考資料.....	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 概要

Class-D オーディオ アンプは、高効率というその特長からオーディオに使用されるスイッチング コンバータです。TI の **Class-D** アンプ デバイスには、低電圧バッテリー電源から **Class-D** スwitching電源レール (例: 11V/13V) を生成するための昇圧コンバータを内蔵しているものと、低電圧バッテリー電源: (例: 2.5V ~ 5.5V) から生成することも、外部電源レールによって **Class-D** を直接駆動することもできます。

さらに、テキサス インストルメンツの **Class-D** アンプ デバイスの中には、内蔵の Y ブリッジを使用して電源レールを動的に変化させるものもあります。この電源レールは、オーディオに基づいて **Class-D** が動的にオンにします。たとえば、**TAS2572** と **TAS2780** は Y ブリッジを内蔵しており、アンプが、低電力時には 1.8V と 3.8V のレールのいずれかをオンにし、高電力時には昇圧 / 外部 PVDD レール上で動作します。

この **Class-D** アンプは、さまざまな種類のアクチュエータの駆動に使用できます。具体的には、マイクロスピーカ (スマートフォン用、ウェアラブル デバイス用、PC 用など)、大型のラウドスピーカ (ウーファー / ツイータ / ミッドレンジ スピーカ)、骨伝導アクチュエータ、LRA/ERM、コイル、ピエゾ / MEMS スピーカなどがあり、これらを用いて音声を再生することができます。これらのアクチュエータはそれぞれ、異なるレベルの電氣的インダクタンス / インピーダンスを提供します。電氣的には、マイクロスピーカは通常、インダクタンスが比較的低い抵抗性負荷であるのに対し、大型のラウドスピーカ、ウーファー / サブウーファー、ハプティクス コイル (LRA、ERM) は、中・低抵抗と高インダクタンスを組み合わせたものです。電氣的ツイータは容量結合スピーカ負荷であり、ピエゾ / MEMS スピーカはほぼ純粋な容量性負荷です。

次の表は、さまざまなタイプのアクチュエータに対するスピーカの抵抗 (R) とインダクタンス (L) と静電容量 (C) のおおよその範囲と、アクチュエータの電氣的特性を示しています。

表 1-1. オーディオ アプリケーション別のアクチュエータの種類と範囲

アクチュエータ タイプ	代表的なアプリケーション	直列 (DC 抵抗)	アクチュエータの電氣的特性	直列インダクタンス / 静電容量
マイクロスピーカ	モバイル & PC スピーカ	4Ω-32Ω	R	≤ 200uH
ウーファー & ミッドレンジ スピーカ	Bluetooth スピーカ & テレビ、サウンドバー、パーティ ボックス	3Ω-8Ω	R + L (多少の誘導性あり)	≤ 500uH (ミッドレンジ) ≤ 1.5mH (ウーファー)
サブウーファー	Bluetooth スピーカ、サウンドバー、テレビ、パーティ ボックス	2Ω-8Ω	R + L (誘導性が高い)	≤ 50mH
ツイータ	サウンドバー、パーティ ボックス	4Ω-15Ω	R + L + C (コンデンサ結合)	≤ 1.5mH 10μF ~ 80μF (直列コンデンサ)
骨伝導アクチュエータ	ヘッドホン、聴覚検査機器、補聴器	4Ω-50Ω	R + L (多少の誘導性あり)	≤ 3mH
LRA/ERM / ハプティクス コイル	ゲーム コントローラ、トラックパッド、スマート ウェアラブル	LRA: 10Ω-30Ω ERM: 25Ω-60Ω ハプティクス コイル: 4Ω-12Ω	R + L (多少の誘導性あり)	≤ 1.5mH
ピエゾ スピーカ / プザー	アラーム、サイレン、ドアベル、GPSトラッカー、家電製品 (ビープ音が鳴る機器)	非常に高い (> 1MΩ)	容量性 (C)	≤ 1.5uF
MEMS スピーカ	ヘッドホン、スマート ウェアラブル (AR/VR ヘッドセット、メガネ)、補聴器	非常に高い (> 1MΩ)	容量性 (C)	≤ 150nF

自然誘導性の強い負荷がある(LRA/ERM / ハプティクス コイル、ウーファー / サブウーファー、一部のミッドレンジ スピーカなど) ため、昇圧過電圧故障や **Class-D** 過電流故障をトリガせずにアンプをスムーズに動作させるには、設計上の検討事項がいくつかあります。

2 詳細説明

2.1 高誘導性スピーカの昇圧過電圧故障に関する検討事項

高誘導性オーディオアクチュエータにおける主な問題は、アクチュエータにかかる電圧の極性が変化した場合であっても、アクチュエータを流れる電流の急激な変化にアクチュエータが抵抗してしまう点ですにある。これにより、高誘導性のスピーカ / ハプティクス アクチュエータを駆動する際に、電圧と電流の間に大きな位相遅れが生じます。たとえば、下図に示すように、Class-D アンプの出力 OUT_P と OUT_N は、下記の式に示すように PVDD 電源電圧 = 13V で $R = 4\Omega$ かつ $L = 1\text{mH}$ のスピーカ コイルに向かって、フルスケール入力差動 PWM を駆動するために使用されます。



図 2-1. 誘導性スピーカに接続されている Class-D 出力

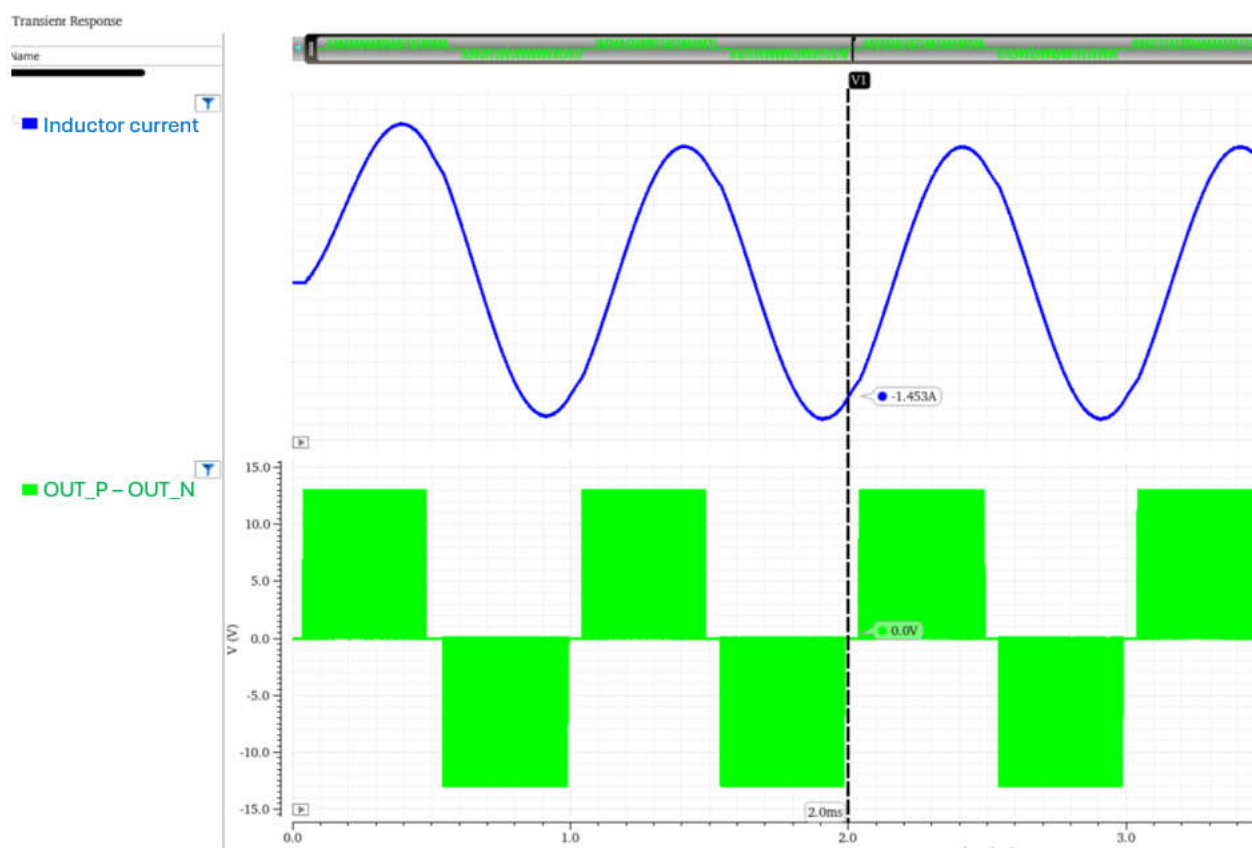
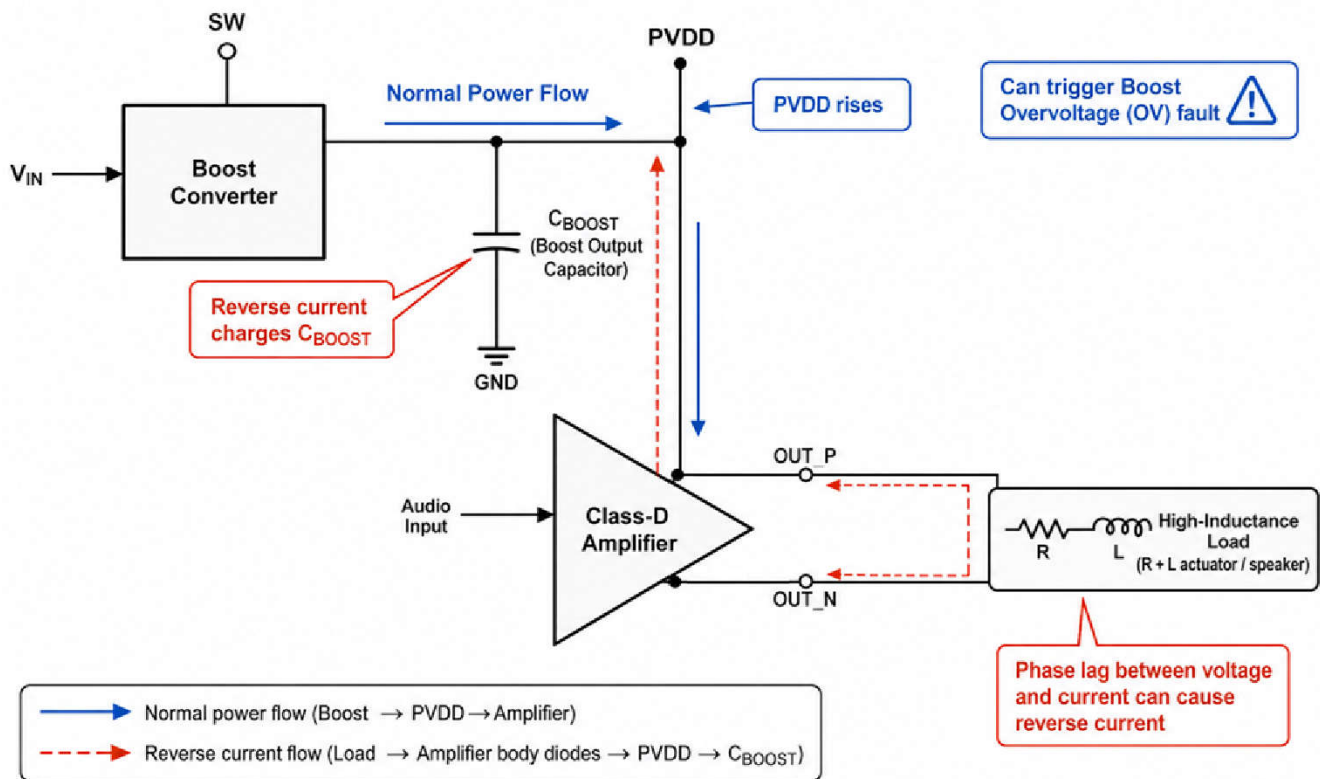


図 2-2. 差動 PWM 駆動時のアクチュエータ電流の波形例 (アクチュエータ両端の電圧と電流の間の位相遅れが示されている)

図からわかるように、Class-D 出力 OUT_P-OUT_N がゼロを超えるというシナリオが考えられます。ただし、インダクタンスが大きいと、電圧の変化にตอบสนองするために電流が遅れ、 -1.45A という大きな負電流が発生しています。

この位相遅れにより、特定の種類の入力オーディオファイルに関して考えられるシナリオがあります。アンプが高いピーク電流で動作しており、Class-D 出力の位相が急激に変化した場合、アクチュエータからの逆電流が Class-D FET 経路でブースト出力にプッシュされます。図 2-3 の図にこの現象が示されています。昇圧コンバータは通常、出力電流のみをソースするように設計されており、電流をシンクするようには設計されていません。そのため、この逆電流によって昇圧出力コンデンサがより高い電圧に過充電されて昇圧過電圧故障が発生し、最終的にデバイスがトリガされてシャットダウンします。



Note: Reverse current occurs during high peak current and phase lag conditions in certain audio content.

図 2-3. 昇圧コンバータ内蔵 Class-D アンプ (逆電流パスが示されている)

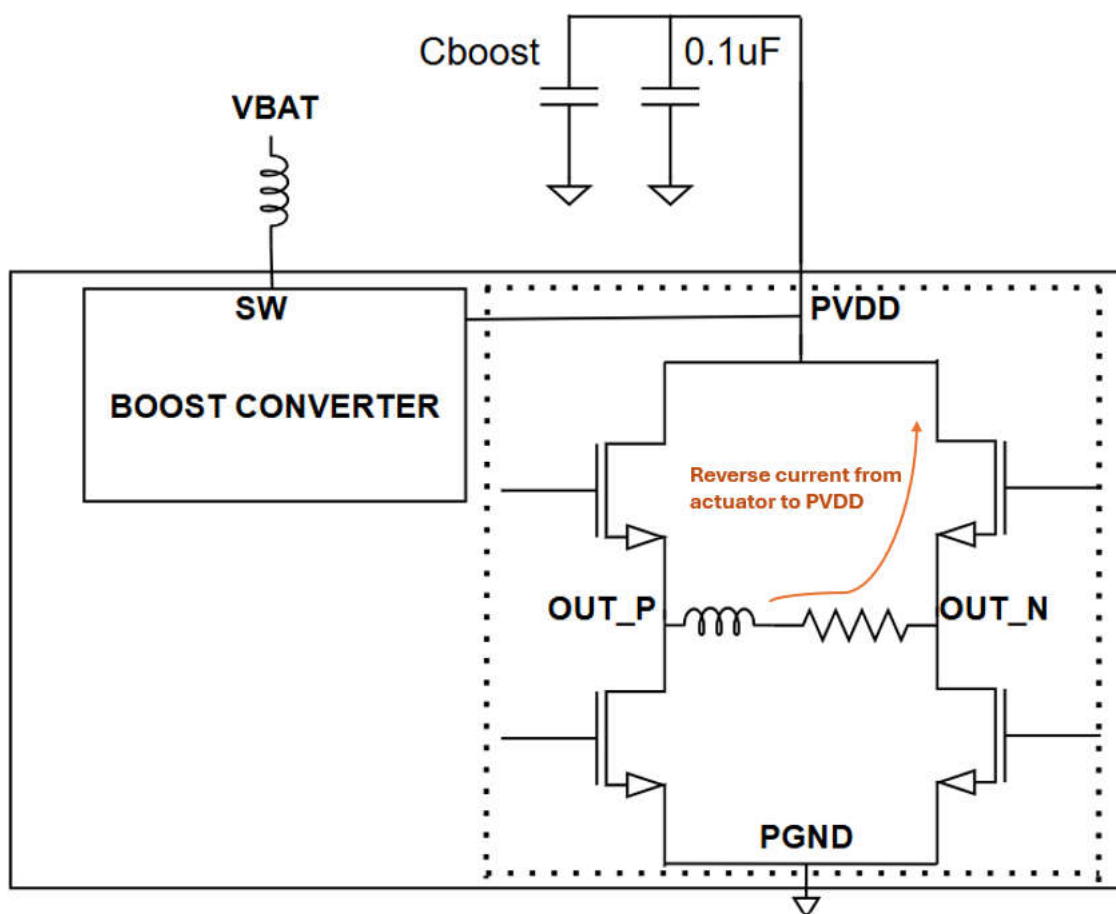


図 2-4. 昇圧コンバータ内蔵 Class-D アンプ (内部 FET 電流パスが示されている)

このような事態の最悪のシナリオとして、大電流が発生し、突然、信号の振幅が非常に小さい値まで低下することが想定されますが、逆電流が大きいと、昇圧回路の充電と過電圧トリップが発生します。このシナリオを模倣するために、方形波入力信号をアンプに供給し、負の電流と OV をトリガするために、 -9dB から -6dB までの振幅で掃引しました。図 2-5 に、アクチュエータ負荷が $6\Omega + 500\mu\text{H}$ のインダクタンスであるデバイスに対するこの種のオーディオ入力に起因して OV がトリガされたときの昇圧電圧とスピーカ電流のスクープ キャプチャを示します。

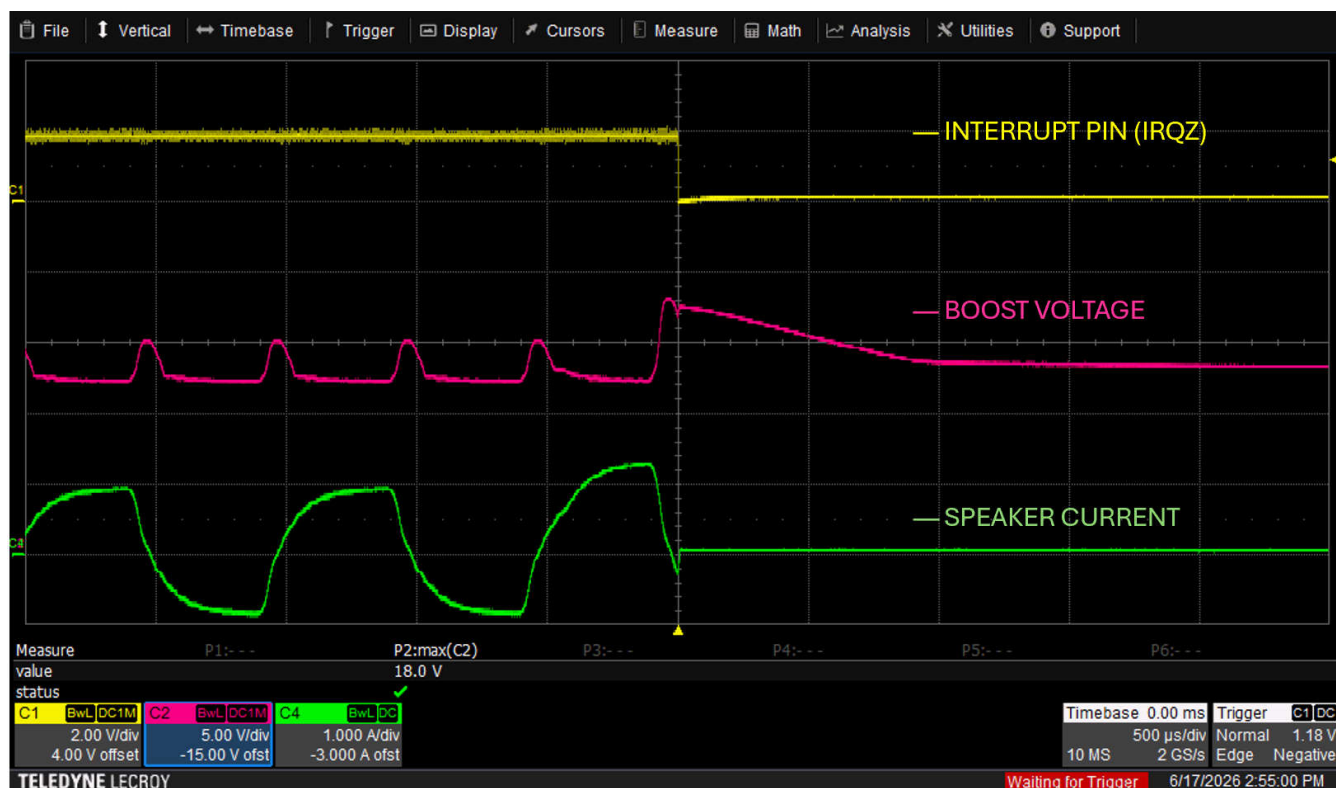


図 2-5. 負荷が $6\Omega + 500\mu\text{H}$ である $20\mu\text{F}$ デフォルト コンデンサを搭載した TAS2572 評価基板における昇圧過電圧故障

解決策は次の 2 つで、そのいずれかを利用すると、誘導性負荷の高い内蔵昇圧 Class-D アンプ デバイスの昇圧過電圧故障を回避できます。

1. **解決策 1:** 昇圧インダクタ電流によって昇圧コンデンサが OV スレッショルドを超えて過充電されるのを防ぐため、十分な昇圧容量を確保します。必要な昇圧容量を計算するには、ワーストケースのピーク負荷電流でインダクタに蓄積されたエネルギーによって昇圧コンデンサが過充電されないことを確認する必要があります。

ユーザーがプログラムしたチャンネル ゲインを「CH」dBV、スピーカ抵抗を「Rspk」、インダクタンスを「Lspk」、昇圧電圧を「Vbst」、最大昇圧電圧 OV スレッショルドを「Vov」と仮定します。アンプに R_{dson} の r_{dson} が存在すると仮定します。昇圧 OV 防止に必要な最小昇圧容量 C_{min} を計算する際には、次の式を適用できます。

- 負荷にかかるピーク電圧 $(V_{\text{pk}}) = \text{Min} (V_{\text{bst}} * R_{\text{spk}} / (R_{\text{spk}} + R_{\text{dson}}), 10^{((\text{CH} + 3)/20)})$
- スピーカを流れるピーク電流 $I_{\text{pk}} = V_{\text{pk}} / R_{\text{spk}}$
- インダクタに蓄積されたエネルギー $= \frac{1}{2} * L_{\text{spk}} * I_{\text{pk}}^2$
- 昇圧 OV 故障をトリガすることなく、インダクタ内のエネルギーがコンデンサを通して消費されるようにするために、 $\frac{1}{2} * C * (V_{\text{ov}}^2 - V_{\text{bst}}^2) > \frac{1}{2} * L_{\text{spk}} * I_{\text{pk}}^2$
- $C_{\text{min}} (\text{derated}) \geq L_{\text{spk}} * I_{\text{pk}}^2 / (V_{\text{ov}}^2 - V_{\text{bst}}^2)$

データシートに従って、「Vov」の DC バイアスにおけるコンデンサの適切なディレーティングを確認する必要があります。

ディレーティングした静電容量が最小要件を満たすのに十分であることを確認してください。

複雑さを緩和するために、この [TI-E2E 関連記事](#)に掲載されている Excel シート カリキュレータを使用することもできます。

Parameter	Value	Units	Comment
Load inductor	5.00E-04	H	For worst case scenario use highest load inductance value expected
Rload	8	ohm	Typical value
Channel Gain	21	dBV	As per PPC3 setting
Rload (min including variations)6.40		ohm	R-load minimum value including variations
Vpeak	12.45509	V	Audio peak voltage
Boost voltage (max)	13	V	As per PPC3 setting
Ipeak	1.95	A	
Boost OV threshold	16	V	For worst case scenario use minimum Boost OV threshold
Cmin required (post-derating)	2.18E-05	uF	

図 2-6. Excel カリキュレータのスナップショット

黄色で強調表示されている **Cmin** (ポストディレーティング) と **Ipeak** は、ユーザーが入力した情報を使用して直接計算を行う Excel シートベースの計算機の出力値です。黄色でマークされていない項目はすべて、ユーザーがシートに入力する必要がある数値です。

たとえば、図 6 に示す上記のシナリオでは、最大負荷インダクタンスの前提値は **500μH**、最小負荷インピーダンスの前提値は **6.4Ω** で、ユーザーはチャンネル ゲインを **21dBV** にプログラムしています。出力として計算した **Ipeak** は **1.95A** であり、昇圧 OV トリップを防止するためにポストディレーティングに必要な最小静電容量は **≥ 21.8uF** です。

25V のセラミック コンデンサでは **16V DC** バイアスにおいて非常に大きくディレーティングされるため、**≥ 21.8μF** の容量を実現できます。これにより、**≥ 181uF** のセラミック コンデンサのプレディレーティングが必要になりますが、これはコスト / フットプリントについては最適ではありません。

この静電容量を実現するために、コストとフットプリントの観点から考えると、以下を利用する方が合理的な場合があります。

- **47μF** アルミ電解コンデンサ (ソリューションに高さの制約がない場合は、型番例:UCM1V470MCL1GS)/**50μF** スタック セラミック コンデンサ (型番例:ST125C506MAJ10)

または

- **5 x 10μF** コンデンサ **50V** セラミック コンデンサ (ソリューションに高さの制約がある場合。たとえば、型番: GRM21BR61H106ME43L)
2. **解決策 2:** 昇圧電源にツェナー ダイオード電圧クランプを追加して、**Class-D FET** からのフローバック電流をシンクし、昇圧が **OV** をトリガしないようにします。このツェナー ダイオードの電圧許容誤差は、通常の昇圧動作条件時にトリガされないように比較的低くする必要がありますが、同時に、最大クランプ電圧が最小昇圧 **OV** スレッシュホールドよりも低くなるようにする必要があります。TAS2572 の場合、内部昇圧モード (デフォルトは **16V** に設定) のデータシートに記載されているように、昇圧 **OV** スレッシュホールドは **pvdv_ovlo_th_sel[1:0]** を使用してプログラムすることができます。**±2%** の変動を考慮して、最小スレッシュホールドは **15.68V** になっています。そのため、ツェナー ダイオードが必ず **13V** 超と **15.86V** 未満のみで動作するようにしなければなりません。したがって、公差 **±5%** で **14V** または **15V** のいずれかのツェナー ダイオードを使用できます。(型番例:4878-SZ3C15)。ツェナー ダイオードの電力定格が、短時間の電流を許容できるものであることを確認してください。

2.2 過電流シャットダウンを防止するための Class-D Y ブリッジ ヒステリシスの最低要件

TAS2120、TAS2780、TAS2781 などのデバイスには Y ブリッジが内蔵されており、Class-D アンプはオーディオに基づいて、低電力レベル時に VBAT 電源 (3.8V) をオンに切り替え、高電力時には PVDD 電源 (18V) に動的に切り替えることができます。同様に、TAS2572 デバイスには AVDD Y ブリッジが内蔵されており、アンプが、電力レベル 100mW 未満の時に低電圧 (1.8V) 電源をオフにし、電力レベルがより高い時には昇圧レール PVDD (2.5V ~ 13V) に切り替えます。低電圧 AVDD Y ブリッジ出力 FET 回路は、ピーク電流 0.95A 未満に対応するように設計されており、例えば TAS2572 では、PVDD レールから AVDD レールへの切り替えが一定のヒステリシスを伴って行われます (例:500us)。

したがって、Class-D が PVDD ブリッジを高いピーク電流でオンにするオーディオ プロファイルがあり、かつ、放電に長い時間 (500μs 以上で 0.7A 未満) を要する高インダクタンスが存在する場合、AVDD ブリッジの過電流トリガーが発生し、デバイスがシャットダウンする可能性があります。これを防止するには、次のことを確認する必要があります。

- Y ブリッジ時間ヒステリシス $> 2 * L_{spkr}/R_{spkr}$

これは、ブリッジが切り替わる前にピーク電流が十分に低い値に低下して、AVDD ブリッジの過電流エラーがトリガされないようにするためです。たとえば、 $L_{spk} = 10\text{mH}$ かつ $R = 4\Omega$ の場合、Y ブリッジの時間ヒステリシスを $> 5\text{ms}$ に設定することが推奨されます。

同様に、[TAS2764](#)、[TAS2780](#)、[TAS2781](#) では、VBAT Y ブリッジが最大 2A の電流を処理できるように設計されており、PVDD ブリッジが 4.9A を超える電流を処理できます。したがって、上記のように、高インダクタンス負荷を使用する場合、過電流に関連するシャットダウンを回避するため、ヒステリシスの最小要件を満たすように LVS_HYS[3:0] レジスタを設定することが推奨されます。あるいは、効率性能を犠牲にして Y ブリッジ機能を無効にすることもできますが、すべてのデバイスが Y ブリッジに対して最大 50ms のヒステリシス設定に対応しており、これは上記これらの問題を回避するのに十分な大きさです。

2.3 Class-D 出力で EMI フィルタを使用した場合の Class-D Y ブリッジ過電流シャットダウン

Class-D 出力において、低周波数 (Class-D アンプ出力のスイッチング周波数をはるかに下回る) の LC フィルタを接続する場合も、シナリオが発生することがあります。これは、Class-D FET 経由で伝搬するリップル電流が生成されるためです。このような場合、AVDD Y ブリッジ過電流誤差のトリガを避けるために、LC フィルタを流れるリップル電流の量に応じて、AVDD Y ブリッジを無効化するか、AVDD Y ブリッジ スレッシュホールドを下げる必要があります。

OC 誤差を防止するため、LC フィルタを流れるピーク オーディオ電流 + リップル電流 $<$ AVDD ブリッジ過電流スレッシュホールドを発生させる必要があります。アンプが PVDD ブリッジをオンにしていたと仮定すると、

[TAS2572](#) の LC フィルタに流れるリップル電流は、次のように計算できます。

- $\Delta I = PVDD / (4 * L * F_{sw})$ (PVDD ブリッジで動作)

ここで、PVDD = PVDD 電源電圧、L = インダクタ値、Fsw = Class-D アンプのスイッチング周波数です。

たとえば、 $L = 1\mu\text{H}$ かつ $C = 0.68\mu\text{F}$ 、 $F_{sw} = 384\text{KHz}$ 、 $PVDD = 13\text{V}$ の場合、Class-D が PVDD レールから AVDD ブリッジに切り替わると、リップル電流は $\pm 0.84\text{A}$ になり、AVDD Y ブリッジ スレッシュホールドに関係なく、過電流誤差がトリガされます。これにより、AVDD ブリッジは常に無効化されます。

ただし、昇圧電圧が 9V 未満と十分に低い場合でも、AVDD Y ブリッジを利用すれば低電力レベルで効率を節約できる場合があります。別の方法として、ユーザーはインダクタンス値を大きくし、静電容量を減らすことで、同じ LC フィルタのカットオフ周波数を達成し、高いリップル電流を抑えることもできます (インダクタの BOM サイズとコストが犠牲になります)。

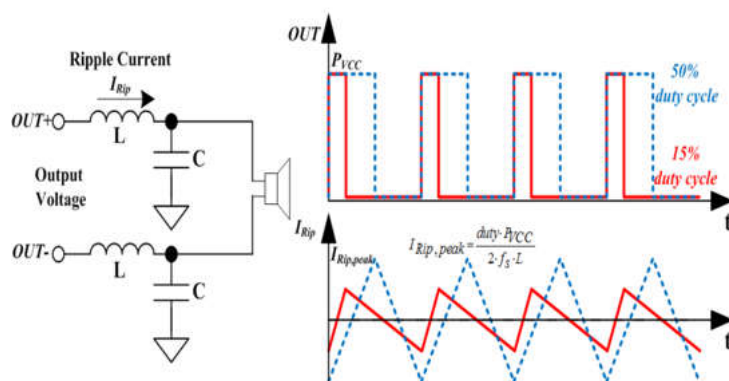


図 2-7. LC フィルタを使用した Class-D 出力リップル電流を示す画像

3 まとめ

このアプリケーション ノートは、サブウーファー、LRA、ハプティクス コイルなどの高誘導性負荷を駆動する場合や、アンプ出力で LC-EMI フィルタを使用する場合に検討すべき、Class-D アンプ設計に関する重要事項について説明します。高誘導性アクチュエータは、電圧と電流間に大きな位相遅れを生じさせ、それが次の 2 つの主な故障条件につながります。逆誘導性キックバック電流に起因する昇圧過電圧 (OV) 故障と、Y ブリッジのスイッチング ヒステリシス不足による過電流 (OC) シャットダウン。

このアプリケーション ノートでは、昇圧コンバータを内蔵したテキサス インストルメンツの Class-D デバイス ([TAS2572](#)、[TAS2574](#)、[TAS2562](#)、[TAS2563](#)、[TAS2564](#) など)、および外部 PVDD 電源を搭載したもの ([TAS2764](#)、[TAS2770](#)、[TAS2780](#)、[TAS2781](#) など) について説明します。本デバイスは、マイクロスピーカ ($\leq 200\mu\text{H}$) から高誘導性サブウーファー ($\leq 50\text{mH}$)、ハプティクス コイルまで、さまざまな種類のアクチュエータの電気的特性評価を発揮させます。

昇圧 OV 低減に関しては、実用的な解決策を 2 つ提示しています。それは、(1) 提供された設計計算ツールを使用し、OV スレッショルドを超えることなく誘導エネルギーを吸収するのに十分な昇圧容量を算出して実装すること、および (2) 逆電流を吸収するためにツェナー ダイオードによる電圧クランプを追加することです。Y ブリッジの OC 防止のため、本ノートでは、ブリッジ遷移前に適切な電流減衰を確保するためのヒステリシス最小要件を規定しています。

また、Class-D 出力で LC-EMI フィルタを使用する際の OC 問題についても説明しており、リップル電流の計算方法、および、Y ブリッジ動作とフィルタ成分値とシステム効率との間における設計上のトレードオフを示しています。これらの定量設計ガイドラインにより、保護違反を発生させることなく、さまざまな誘導性負荷においてアンプを安定して動作させることができます。

4 参考資料

1. [TAS2572 - DSP 搭載 6.5W Class-D 昇圧オーディオ アンプ、データシート](#)
2. [TAS2574 - IV センス搭載 10.5W Class-D 昇圧ステレオ オーディオ アンプ、データシート](#)
3. [TAS2562 - 5.7W Class-D 昇圧オーディオ アンプ、データシート](#)
4. [TAS2563 - DSP 搭載 5.7W Class-D 昇圧オーディオ アンプ、データシート](#)
5. [TAS2564 - IV センス搭載 5.7W Class-D 昇圧オーディオ アンプ、データシート](#)
6. [TAS2764 - 4.5W Class-D 昇圧オーディオ アンプ、データシート](#)
7. [TAS2770 - 5.6W Class-D モノラル オーディオ アンプ、データシート](#)
8. [TAS2780 - 5W Class-D 昇圧オーディオ アンプ、データシート](#)
9. [TAS2781 - DSP 搭載 5W Class-D 昇圧オーディオ アンプ、データシート](#)
10. [TAS2x20、TAS257x 内の Y ブリッジ採用による効率向上](#)
11. [TAS278x Class-D アンプの Y ブリッジで効率の向上に寄与](#)

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](#) 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