

Technical Article

高電圧 DCM 反転チャージポンプコンバータの設計方法



John Betten

先進的な運転支援システムのセンサ、ソナー アプリケーション用の超音波トランスデューサ、通信機器にバイアスを与えるには、低電流と負の高電圧が必要です。ソリューションとしてはフライバック、Cuk、反転昇降圧コンバータのいずれも考えられますが、大型トランス (フライバックと Cuk) が必要となること、コントローラの入力電圧定格 (反転昇降圧) が原因で、負電圧の最大値が制限されることが不利な点です。この Power Tip では、単一のインダクタと、不連続導通モード (DCM) で動作する反転チャージポンプを組み合わせたコンバータの動作について詳しく説明します。グラウンドリファレンスの昇圧コントローラと組み合わせると、システムのコストを抑えながら大きな負の出力電圧を生成できます。

図 1 は、電力段の回路図を簡略化したものです。この回路図は従来の反転昇降圧コンバータとは異なっています。従来のコンバータでは V_{IN} と V_{OUT} の間でコントローラが「浮いた」状態になります。そのようなコンバータでは、到達可能な $-V_{OUT}$ の最大値は、コントローラの最大 V_{CC} から最大入力電圧をマイナスした値です。そのため、 $-100V$ 以上の出力電圧に対応できる N チャネル電界効果トランジスタ (FET) を駆動できるコントローラを見つけるのはほぼ不可能となります。

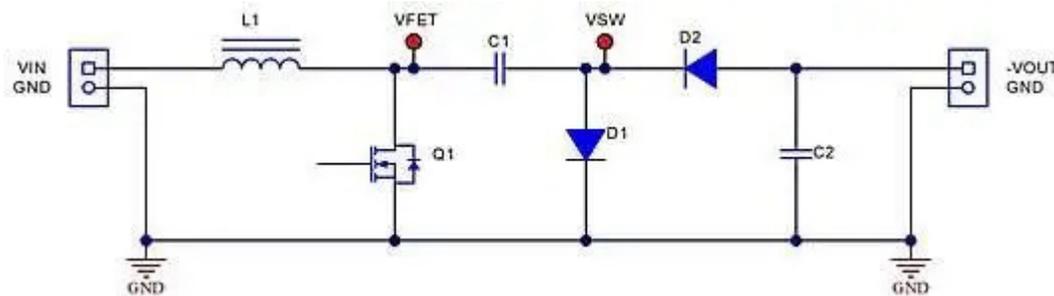


図 1. インダクタ駆動の反転チャージポンプの電力段 (簡略図)

この回路の動作は 3 つの区間に分けることができます (図 2)。最初の区間では、デューティ サイクル (d) 中に FET がオンになります。これにより、インダクタの両端に V_{IN} がかかり、電流がゼロから上昇し、エネルギーが蓄積されます。ただし、前のサイクルでは $C1$ (V_{OUT} にほぼ等しい電圧を維持) で蓄積された余分なエネルギーが枯渇し、 $D1$ と $D2$ が逆バイアス状態となっています。このため、この区間に $D1$ 、 $D2$ 、 $C1$ は表示されません。 $C2$ がすべての負荷電流を供給します。

次の区間 d' では、FET がオフになり、インダクタ電流が放電を開始して、その電圧の極性が反転します。これにより、ノード VFET にかかる電圧が大幅に上昇し、 $C1$ は $D1$ 経由で再充電されます。この区間では、電流は $D1$ がオフになるまで減少します。しかし、 $D1$ の逆流特性により、最終的にオフになる前に電流は負の方向に流れます。その時点でインダクタの電流の勾配が変化し、その電圧の極性が再度反転します。

3 番目の区間 d'' では、いよいよ $C1$ から $C2$ にエネルギー転送が行われます。 $D1$ が導通を停止すると、VFET ノードの電圧が FET のボディダイオードを流れる電流経路によって強制的に接地電位に落とされるため、インダクタの電圧が V_{IN} にクランプされます。電流は $C1$ と $C2$ の両端の電圧が等しくなるまで $D2$ を流れますが、FET のボディダイオードを流れる電流はインダクタの電流がゼロになるまで続きます。この時点でインダクタの両端間の電圧が低下し、FET が再度オンになるまで回路の寄生容量と共振します。

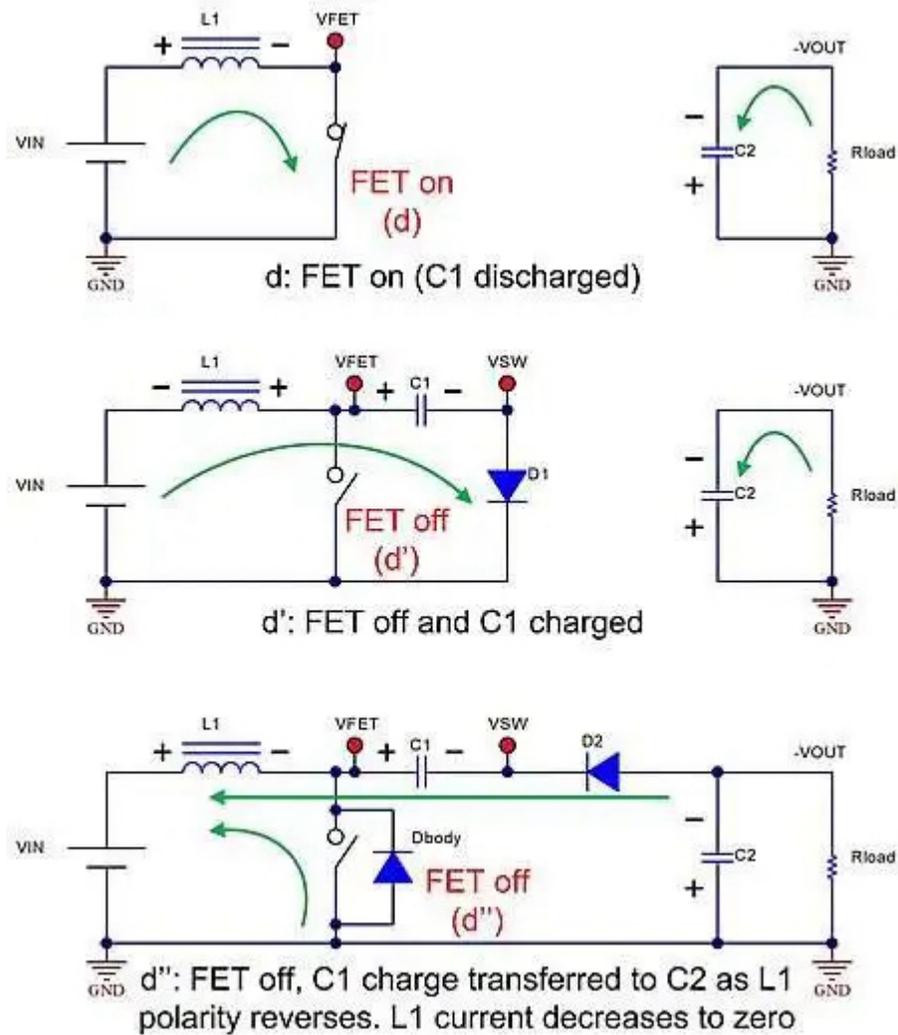


図 2. DCM 動作の 3 つのフェーズ

図 3 は主な電圧と電流の波形を示したものです。DCM の動作ではインダクタンスを可能な限り最小化できますが、ピーク電流は大きくなります。DCM の動作におけるインダクタンスは、最大デューティ サイクル、最小 V_{IN} 、全負荷によって決まります。最大デューティ サイクルは、コントローラのデータシートでよく確認してください。通常は 60% ~ 90% で選択できますが、それ以外の場合はパルススキッピングが発生する可能性があります。インダクタンスが大きすぎると、次のスイッチング サイクルの前に電流がゼロに戻らないため、動作は連続導通モード (CCM) に移行します。その結果、必要以上に大きなインダクタを使用することになり、分数調波振動を防止するために特別な注意が必要となります。

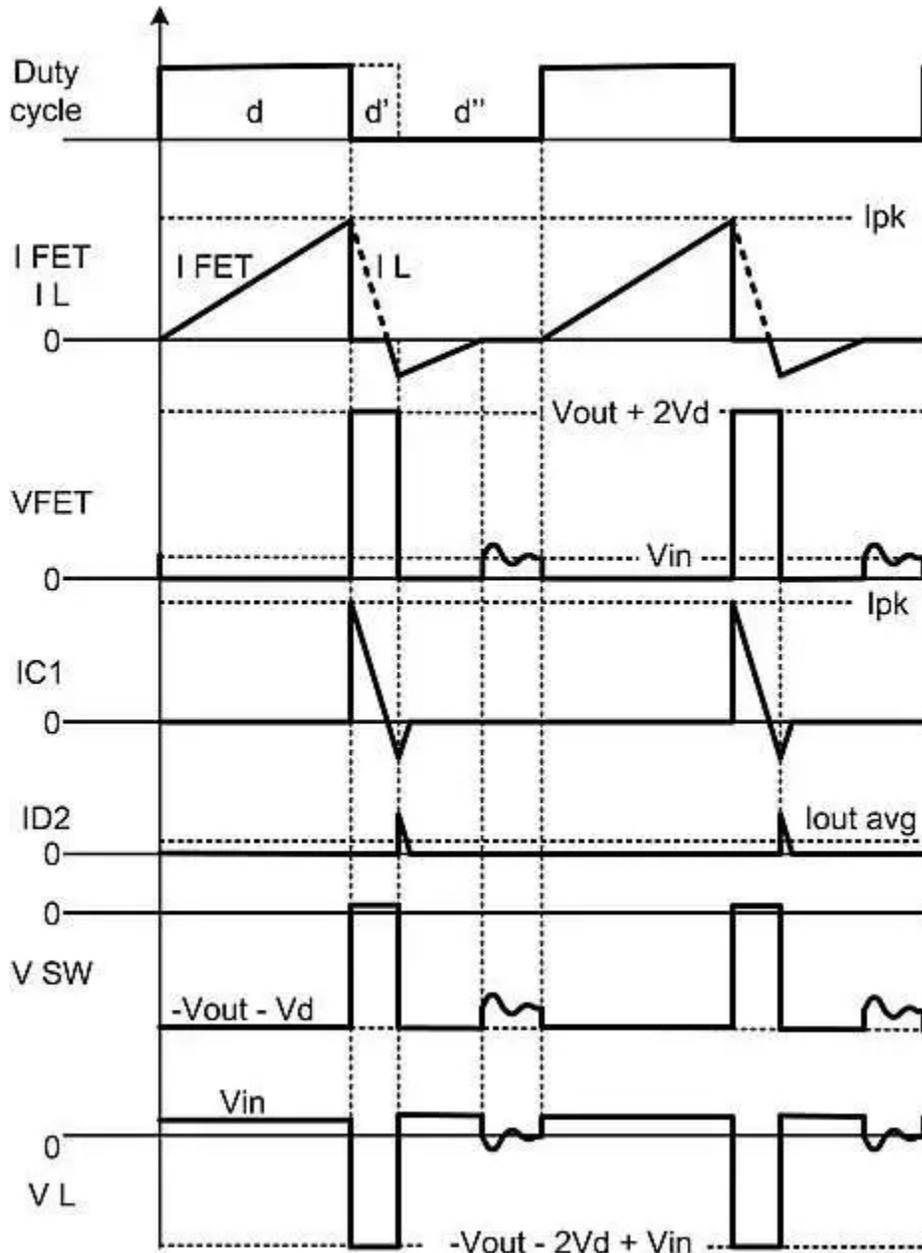


図 3. DCM の主な回路波形

設計の式

DCM 動作の場合、式 1 はインダクタの蓄積エネルギーの関係を満たしています。

$$\frac{1}{2} * L * i_{pk}^2 * f_{sw} = \frac{V_{out}^2}{R_{load} * \eta} \quad (1)$$

ここで、 i_{pk} はピーク インダクタ電流、 η はコンバータの効率です。ピーク インダクタ電流は次に、式 2 に等しくなります。

$$i_{pk} = \sqrt{\frac{2 * V_{out}^2}{R_{load} * L * f_{sw} * \eta}} \quad (2)$$

以下の 2 つの式から、式 3 はデューティ サイクル (d) を次のように表します。

$$V_L = L \frac{di}{dt} \text{ and } d = dt * f_{sw}, \text{ then, } d = \frac{di * L * f_{sw}}{V_L} \quad (3)$$

V_{IN} は FET がオンするときのインダクタの両端の電圧で、 I_{pk} はデューティ サイクル d の終了時のインダクタ電流であるため、式 2 を式 3 に代入すると、式 4 と式 5 が得られます。

$$d = \frac{V_{out}}{V_{in}} \sqrt{\frac{2 * L * f_{sw}}{R_{load} * \eta}} \quad (4)$$

$$\text{or, } L = \frac{V_{in}^2 * d^2 * R_{load} * \eta}{2 * V_{out}^2 * f_{sw}} \quad (5)$$

平均負荷電流は区間 d' の間の式 6 と式 7 の幾何学的関係によって決定されます。

$$\frac{V_{out}}{R_{load}} = \frac{I_{pk} + d r}{2} \quad (6)$$

$$\text{or, } d' = \frac{2 * V_{out}}{I_p * R_{load}} \quad (7)$$

式 2 を式 7 に代入すると、式 8 が得られます。

$$d' = \sqrt{\frac{2 + L * f_{sw} * \eta}{R_{load}}} \quad (8)$$

残りの区間は d'' として定義されます。このとき、エネルギーが $C2$ に転送され、残りのインダクタ電流がゼロに放電されま (式 9)。

$$d'' = 1 - d - d' = 1 - \frac{V_{out}}{V_{in}} \sqrt{\frac{2 * L * f_{sw}}{R_{load} * \eta}} - \sqrt{\frac{2 * L * f_{sw} * \eta}{R_{load}}} \quad (9)$$

図 4 は、電圧ダブルを使用したコンバータの回路の例です。この構成では、各電力段部品の電圧ストレスはフル出力電圧の半分に等しくなります。そのため、使用可能な部品の選択肢が広がります。この事例のインダクタンスの計算では、出力電圧が半分と仮定し、負荷電流は 2 倍として扱いました。

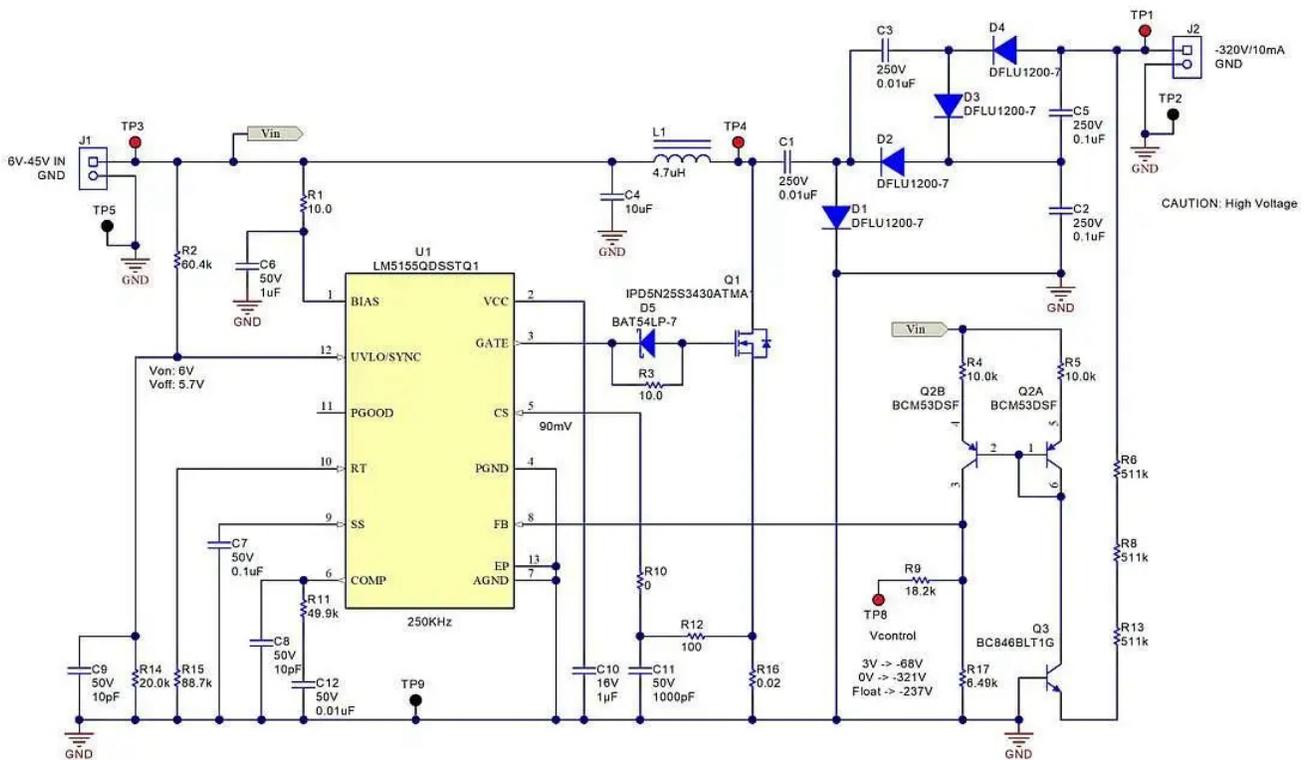


図 4. 電圧ダブラとレベル シフト電流ミラーを搭載した、インダクタ駆動の反転チャージ ポンプ回路図

このコンバータは、小型の単一インダクタソリューションで大きな負電圧の生成を実現します。また、低コストのグラウンドリファレンス昇圧コントローラを使用して、N チャネル FET を駆動できます。

その他の Power Tips については、Power House で TI の [Power Tips ブログ シリーズ](#) をご覧ください。

その他の資料

- [Power Tips: 電圧マルチプライヤと EETimes](#) を使用して出力電圧を上げる
- [TPS5430](#) を反転昇降圧コンバータとして使用する (Rev. A)、TI アプリケーション レポート

関連記事

- [チャージ ポンプ トポロジは電圧を 2 倍にし、DC パスを遮断](#)
- [改造したチャージ ポンプでデジタル信号から電力を抽出](#)
- [チャージ ポンプ コンバータ IC の IN と OUT](#)
- [SEPIC/Cuk コンバータで使用できる 2 つ目の出力](#)
- 『不連続導通が電流モード コンバータに問題をもたらす』

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、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](https://www.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

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、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](https://www.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