



高電圧反転バックレギュレータによる簡素化と基板面積の削減

APPLICATION NOTE

はじめに

センサをベースにした設計からパワーアンプまで、エレクトロニクス業界のアプリケーションでは、負電圧レールを生成する要件が定期的発生しています。この要件を満たすために、トランスをベースとした設計、チャージポンプ、その他の方法が数多く使用されてきましたが、反転バックブーストトポロジは設計の容易さで際立っており、電力と基板スペースの削減も可能です。

多くの新製品に高度な機能が組み込まれた結果、多数のアプリケーションで電力バジェットが既に限界近くまで使用されている上、プリント基板面積も制限されているため、システム設計者にとって反転バックブーストトポロジを用いたパワーデバイスは、非常に貴重なものとなります。

バックレギュレータは、反転バックブーストトポロジを使用して、正の入力電圧から負の出力電圧を発生するように再構成できます。反転バックブーストは、バックレギュレータとは異なり、「オフ」タイム時に出力ダイオードを介して出力にエネルギーを伝達します。このため、平均出力電流は、常に平均インダクタ電流より小さいことに留意する必要があります。

また、このデバイスはグラウンドではなく負の出力電圧を基準としており、デバイスの実効入力電圧は $V_{IN} + |V_{OUT}|$ となるので注意が必要です。

テレコム事業者は、GaN PA ドライバ用の負電圧レール発生のために2ステージ設計を採用する傾向があります。つまり、第1ステージで入力電圧(標準 48~65 V)を12 Vに降圧し、第2ステージで-6.5 Vを発生させます。オン・セミコンダクターのNCP4060などのデバイスを使用することにより、これを1ステージに集約し、効率を良好に維持したまま、高電圧を入力して負の出力電圧に変換できるため、スペースに制約があるアプリケーション向けのソリューションを実現できます。

バックブーストトポロジを採用する際、考慮すべき重要な要素と課題がいくつかあります。オン・セミコンダクターのNCP4060は、パワーFETを集積した80 Vの同期バックレギュレータで、6 AまでのDC負荷に対応できます。この製品は、降圧において V_{OUT} とグラウンドを交換するだけで高い入力電圧から負の出力電圧にダウンコンバートできる柔軟性を備えたデバイスの一例です。

Table 1. POSITIVE INPUT TO NEGATIVE OUTPUT VOLTAGE CONVERSION USING THE NCP4060

Device	Application	V_{IN}	V_{OUT}	Topology	I/O Isolation
NCP4060	Power Supplies	Positive	Negative	Buck	N/A

アプリケーション・スペック

Table 2. APPLICATION SPECS.

V_{IN}	65 V
V_{OUT}	-6.5 V
I_{OUT}	5 A
f_{SW}	300 kHz
Efficiency %	Up to 85%

AND9785/D

アプリケーション回路図

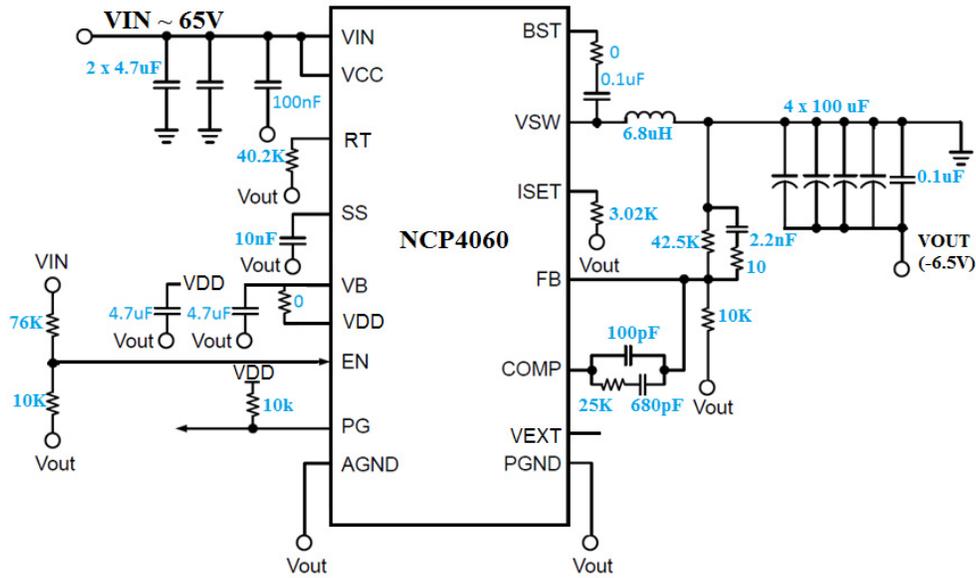


Figure 1. Implementing the NCP4060 in Buck-Boost Configuration

反転バックブーストトポロジは、NCP4060を用い、降圧回路に若干の変更を加えることで実現できます。すなわち、インダクタをグラウンドに接続し、NCP4060を V_{OUT} 基準とします。この設計の再構成によって、出力電圧が反転し常にグラウンドより低くすることができます。「オン」タイム時には、制御スイッチが閉状態になり、出力コンデンサが負荷に電流を供給している間、インダクタ両端に入力電圧が印加され、電流が流れてインダクタを充電します。「オフ」タイム時には、制御スイッチは開状態になり、インダクタは同期スイッチを介して負荷と出力コンデンサに放電します。下図に、「オン」と「オフ」タイム時の電圧と電流を示します。

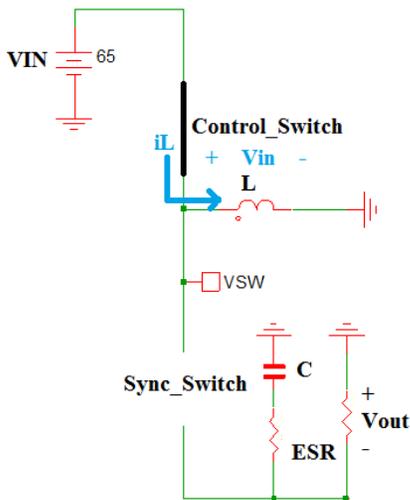


Figure 2. ON-Time

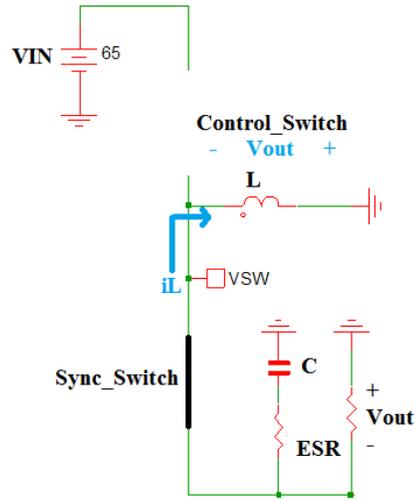


Figure 3. OFF-Time

「オン」タイム時には、インダクタ両端のDC電圧は一定で、次式で表されるように電流が直線的に増加します。

$$\frac{di}{dt} = \frac{V_{in}}{L} \quad (\text{eq. 1})$$

「オフ」タイム時には、磁束の連続性によりインダクタ電流は瞬間的には変化せず、インダクタ両端の電圧は極性が逆転し、電流は次式で表されるレートで連続的に流れます。

$$\frac{di}{dt} = \frac{-V_{out}}{L} \quad (\text{eq. 2})$$

バックブースト回路の平均インダクタ電流は次式で表されます。

$$I_L = \frac{I_{out}}{1-D} \quad (\text{eq. 3})$$

また、インダクタのピークトピーク電流は次式で表されます。

$$I_{Lpp} = \frac{V_{in} \cdot D}{f_{sw} \cdot L} \quad (\text{eq. 4})$$

デューティサイクルは次式で近似的に表されます。

$$D = \frac{V_{out}}{V_{out} + V_{in}} \quad (\text{eq. 5})$$

出力電圧の設定

グランドとV_{OUT}リファレンス間の外部抵抗分割回路によって出力電圧を設定します。抵抗値は次式を用いて計算できます。

$$R_{Top} = R_{Bottom} \cdot \left(\frac{V_{out} - 1.25}{1.25} \right) \quad (\text{eq. 6})$$

ここで、1.25は内部リファレンス電圧です。

V_{IN}とV_{OUT}の範囲

バックブーストコンバータICに印加できる最大入力電圧は、NCP4060が降圧タイプのアプリケーションに構成されている場合の最大入力電圧よりも低くなります。ICにかかる入力電圧はV_{IN}・V_{OUT}であり、これはV_{IN}+|V_{OUT}|に等しいことを理解していることが重要です。この場合、この電圧は65 + 6.5 ~ 71.5 Vとなります。

反転バックブーストの出力電圧は、グランドを正電圧レールとし、V_{OUT}を負電圧レールとして反転しています。

インダクタの選択

インダクタの値は、スイッチング周波数、リップル電流、および入力電圧によって決定します。インダクタ値が小さいと、過渡応答は高速になりますが、リップル電流が大きくなります(E = ½ IL2pk)。インダクタ値が大きいと、リップル電流は小さくなりますが、過渡応答が遅くなります。経験則としては、リップル電流のピークトピーク値が平均インダクタ電流の最大値の40%になるように設定します。インダクタ電流は次式で計算できます。

$$L = \frac{V_{in} \cdot D}{0.4 \cdot I_{avg} \cdot f_{sw}} \quad (\text{eq. 7})$$

入力コンデンサの選択

バックブースト構成の入力コンデンサには、制御スイッチが入力電圧に接続されているため、不連続な電流が流れます。CCM(連続導通モード)において、ゼロからILに至るまで、およびILからゼロに戻る際のdi/dtが高速な場合、入力レールに重畳する高周波ノイズを減衰させるために、適切なフィルタリングが必要です。低ESR(等価直列抵抗)のMLCC(積層セラミックコンデンサ)を、寄生インダクタンスの影響を最小限に抑えるために、IC近傍で適切に配置することが推奨されます。次式により、5%の許容範囲ウィンドウ内に入力電圧を維持するための入力コンデンサの最小値が得られます。

$$C_{in} = \frac{I_{outmax} \cdot D}{f_{sw} \cdot (0.05 \cdot V_{inmin} - I_{pk} \cdot C_{inESR})} \quad (\text{eq. 8})$$

入力コンデンサに流れる電流の実効値は次式で計算できます。

$$I_{rmsCin} = \sqrt{D \cdot \left(\frac{1-D+\Delta I_L^2}{12} \right) \cdot \frac{I_{outmax}}{1-D}} \quad (\text{eq. 9})$$

安定化のためにV_{IN}とV_{OUT}間にバイパスコンデンサを付加することが推奨されます。これは出力電圧のリップル低減に役立ちます。フィードバックループがRHPZ(右半平面ゼロ)を含む期間にDCMからCCMへ遷移する際の反転バックブーストの設計に影響を及ぼす重要な違いがあります。

出力コンデンサの選択

バックブースト回路の出力電圧には、「オフ」期間のスイッチング現象に起因するノイズが含まれます。出力電流の不連続性のために、バックレギュレータの場合よりも大きな出力コンデンサが必要になります。

出力電圧を許容範囲ウィンドウ内に維持するのに必要な最小容量値は、次式で見積もることができます。

$$C_{out} = \frac{I_{outmax} \cdot D}{f_{sw} \cdot (\Delta I_L - I_{pk} \cdot C_{outESR})} \quad (\text{eq. 10})$$

選択されたコンデンサに流れる電流の定格実効値は、次式で計算される値よりも大きくなるはずで

$$I_{rmsCout} = I_{outmax} \cdot \sqrt{\frac{D + \frac{\Delta I_L^2}{12}}{1-D}} \quad (\text{eq. 11})$$

典型的な波形とシミュレーション結果

本書で説明したトピックのいくつかを実証するために、テスト回路を作成し、前述の考え方を強固なものにするために、信号のいくつかをオシロスコープで撮影しました。出力電圧とスイッチノードの信号をFigure 4に示します。本書の前のセクションで説明したように、スイッチノードの電圧は、V_{IN}とV_{OUT}の間で変化していることが明らかです。出力電圧は-6.5 Vにレギュレートされており、リップル電圧のピークトピーク値は約50 mVです。

AND9785/D

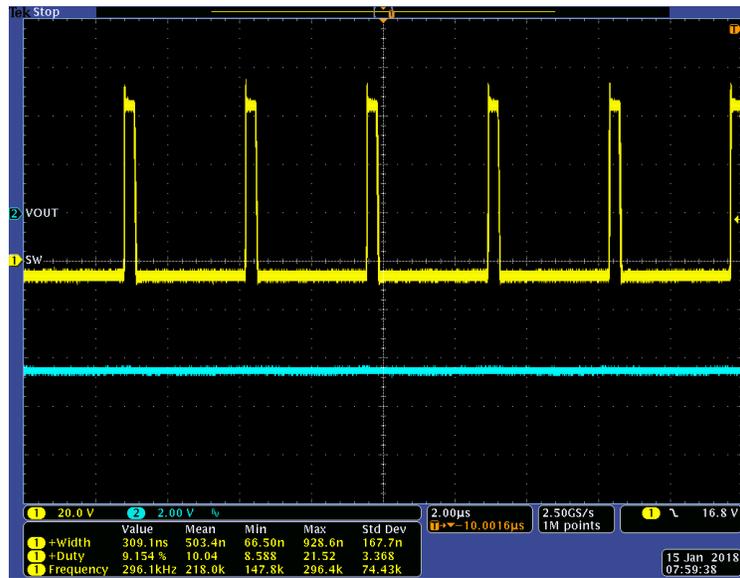


Figure 4.

また、Figure 5に示すように、この回路の軽負荷時の周波数応答を見るために、Simplisのモデルが設計

されました。クロスオーバー周波数は約13 kHzで、45度の位相余裕と-18 dBのゲイン余裕があります。

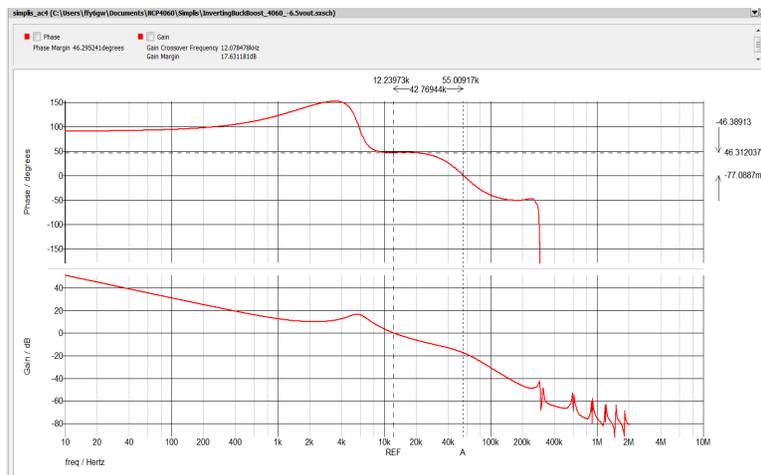


Figure 5.

PG用レベルシフト制御回路

NCP4060はVoを基準にしているため、PGをレシーバで使用する場合はPGピンにレベルシフト回路が必要です。以下に示す回路で、PG信号をレベルシフトすることにより実現できます。

PG_ReceiverノードはGNDを基準にしています。Q1がオフのとき、PG_Receiver信号は5 Vにプルアップされます。Q1がオンのとき、PG_Receiver信号はGNDにプルダウンされます。

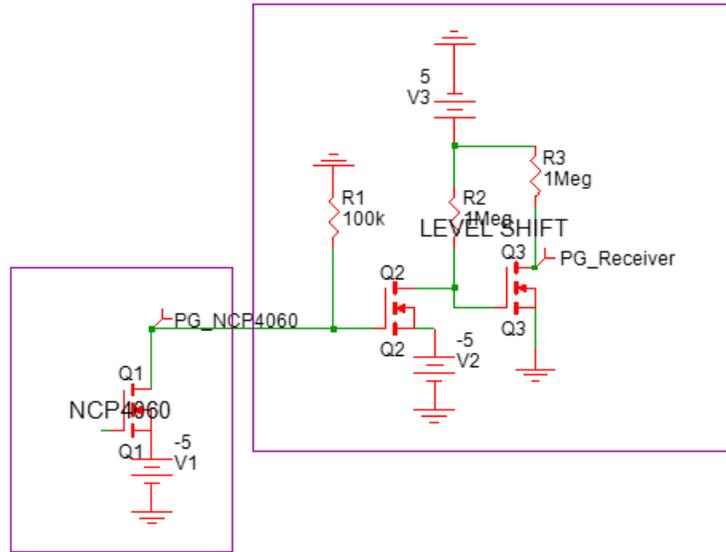


Figure 6.

結論

バックICは、反転バックブースト回路に再構成して正の入力電圧から負の出力電圧を発生できます。

導入ステップは簡単ですが、いくつかの設計上のヒントについて説明し、バックレギュレータと反転バックブーストの根本的な違いを強調しました。

ON Semiconductor及びON SemiconductorのロゴはON Semiconductorという商号を使うSemiconductor Components Industries, LLC 若しくはその子会社の米国及び/または他の国における商標です。ON Semiconductorは特許、商標、著作権、トレードシークレット(営業秘密)と他の知的所有権に対する権利を保有します。ON Semiconductorの製品/特許の適用対象リストについては、以下のリンクからご覧いただけます。www.onsemi.com/site/pdf/Patent-Marketing.pdf。ON Semiconductorは通告なしで、本書記載の製品の変更を行うことがあります。ON Semiconductorは、いかなる特定の目的での製品の適合性について保証しておらず、また、お客様の製品において回路の応用や使用から生じた責任、特に、直接的、間接的、偶発的な損害など一切の損害に対して、いかなる責任も負うことはできません。お客様は、ON Semiconductorによって提供されたサポートやアプリケーション情報の如何にかかわらず、すべての法令、規制、安全性の要求あるいは標準の遵守を含む、ON Semiconductor製品を使用したお客様の製品とアプリケーションについて一切の責任を負うものとします。ON Semiconductorデータシートや仕様書に示される可能性のある「標準的」パラメータは、アプリケーションによっては異なることもあり、実際の性能も時間の経過により変化する可能性があります。「標準的」パラメータを含むすべての動作パラメータは、ご使用になるアプリケーションに応じて、お客様の専門技術者において十分検証されるようお願い致します。ON Semiconductorは、その特許権やその他の権利の下、いかなるライセンスも許諾しません。ON Semiconductor製品は、生命維持装置や、いかなるFDA (米国食品医薬品局)クラス3の医療機器、FDAが管轄しない地域において同一もしくは類似のものと同様に分類される医療機器、あるいは、人体への移植を対象とした機器における重要部品などへの使用を意図した設計はされておらず、また、これらを使用対象としておりません。お客様が、このような意図されたものではない、許可されていないアプリケーション用にON Semiconductor製品を購入または使用した場合、たとえ、ON Semiconductorがその部品の設計または製造に関して過失があったと主張されたとしても、そのような意図せぬ使用、また未許可の使用に関連した死傷等から、直接、又は間接的に生じるすべてのクレーム、費用、損害、経費、および弁護士料などを、お客様の責任において補償をお願いいたします。また、ON Semiconductorとその役員、従業員、子会社、関連会社、代理店に対して、いかなる損害も与えないものとします。ON Semiconductorは雇用機会均等/差別撤廃雇用主です。この資料は適用されるあらゆる著作権法の対象となっており、いかなる方法によっても再販することはできません。

PUBLICATION ORDERING INFORMATION

LITERATURE FULFILLMENT:
Literature Distribution Center for ON Semiconductor
19521 E. 32nd Pkwy, Aurora, Colorado 80011 USA
Phone: 303-675-2175 or 800-344-3860 Toll Free USA/Canada
Fax: 303-675-2176 or 800-344-3867 Toll Free USA/Canada
Email: orderlit@onsemi.com

N. American Technical Support: 800-282-9855 Toll Free
USA/Canada
Europe, Middle East and Africa Technical Support:
Phone: 421 33 790 2910

ON Semiconductor Website: www.onsemi.com
Order Literature: <http://www.onsemi.com/orderlit>

For additional information, please contact your local Sales Representative