

# TPS5430を使用した反転型昇降圧コンバータ

John Tucker

PMP Systems Power

## 要約

入力電圧範囲の広いSWIFT™ (FET内蔵スイッチャ) DC/DCコンバータは一般に、入力電圧源よりも低い正電圧を出力する降圧型コンバータとして使用されています。アプリケーションによっては、入力電圧源から負電圧を生成

することが必要な場合もあります。そのような場合には、TPS5430/20/10デバイスを反転昇降圧トポロジに構成することで、グラウンドに対して負電圧を出力させることが可能です。

## 目次

1 基本的な降圧トポロジ .....	2
2 反転昇降圧トポロジ .....	2
3 設計上の考慮事項 .....	3
4 回路特性 .....	4
5 結論 .....	6

## 図目次

1 降圧トポロジ .....	2
2 反転昇降圧トポロジ .....	2
3 TPS5430の昇降圧アプリケーション .....	3
4 閉ループ応答 .....	4
5 過渡応答 .....	5
6 出力電圧リップルおよびPHノード電圧 .....	5
7 効率 .....	6
8 ロードレギュレーション .....	6

SWIFTおよびPowerPADは、Texas Instrumentsの商標です。

この資料は、Texas Instruments Incorporated (TI) が英文で記述した資料を、皆様のご理解の一助として頂くために日本テキサス・インスツルメンツ (日本TI) が英文から和文へ翻訳して作成したものです。資料によっては正規英語版資料の更新に対応していないものがあります。日本TIによる和文資料は、あくまでもTI正規英語版をご理解頂くための補助的参考資料としてご使用下さい。製品のご検討およびご採用にあたりましては必ず正規英語版の最新資料をご確認下さい。TIおよび日本TIは、正規英語版にて更新の情報を提供しているにもかかわらず、更新以前の情報に基づいて発生した問題や障害等につきましては如何なる責任も負いません。

SLVA257A 翻訳版

最新の英語版資料

<http://focus.ti.com/lit/an/slva257a/slva257a.pdf>

## 1 基本的な降圧トポロジ

回路動作を理解するために、図1に示すような降圧型コンバータの基本的なトポロジを考えます。

FETスイッチがオンのとき、インダクタ両端の電圧は $V_{in} - V_{out}$ であり、インダクタを流れる電流は $di/dt = (V_{in} - V_{out})/L$ の割合で増加します。スイッチがオフになると、インダクタ電圧は反転してインダクタ電流の連続を維持します。ダイオードでの電圧降下が小さいと仮定すると、インダクタ電流は $di/dt = (V_{out})/L$ の割合で減少します。FETスイッチがオンおよびオフのいずれの場合も、定常状態の負荷電流がインダクタで常に伝達されます。平均インダクタ電流は負荷電流に等しく、ピーク・ツー・ピークのインダクタ・リップル電流は $\Delta I_{p-p} = ((V_{in} - V_{out}) D) / (f_{sw} \times L)$ です。ここで、 $V_{in}$ は入力電圧、 $V_{out}$ は出力電圧、デューティ・サイクル $D = V_{out}/V_{in}$ 、 $f_{sw}$ はスイッチング周波数、 $L$ はインダクタ値です。

## 2 反転昇降圧トポロジ

上記の動作を、図2に示される昇降圧トポロジと比較してみます。

図1の降圧型コンバータと比較して、インダクタとキャッチ・ダイオードの位置が入れ替わっています。また、出力電圧が負であるため、出力コンデンサの極性が逆になっています。動作中、FETスイッチがオンのとき、インダクタ両端の電圧は $V_{in}$ であり、電流は $di/dt = V_{in}/L$ の割合で増加します。FETスイッチがオンの間、負荷電流はすべて、出力コンデンサに蓄えられたエネルギーによって供給されます。FETスイッチがオフになると、インダクタは極性を反転し、インダクタ電流の連続を維持します。インダクタ両端の電圧はほぼ $V_{out}$ に等しく、インダクタ電流は $di/dt = -V_{out}/L$ の割合で減少します。オフの間、インダクタは負荷への電流を供給するとともに、オン時にコンデンサから失われたエネルギーを補充するための電流も供給します。したがって、昇降圧型回路の場合、平均インダクタ電流は $I_L = I_{out} / (1 - D)$ 、ピーク・ツー・ピークのインダクタ電流は $\Delta I_{p-p} = (V_{in} \times D) / (F_{sw} \times L)$ です。デューティ・サイクル $D$ は、ほぼ $D = V_{out} / (V_{out} - V_{in})$ です。回路動作におけるこれらの基本的な違いは、TPS5430を昇降圧型コンバータとして使用する際に重要となります。

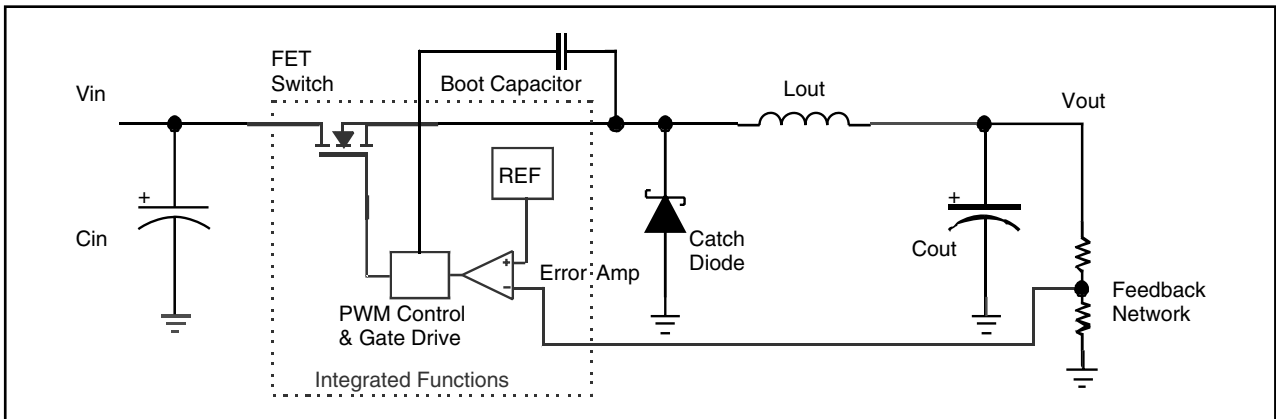


図1. 降圧トポロジ

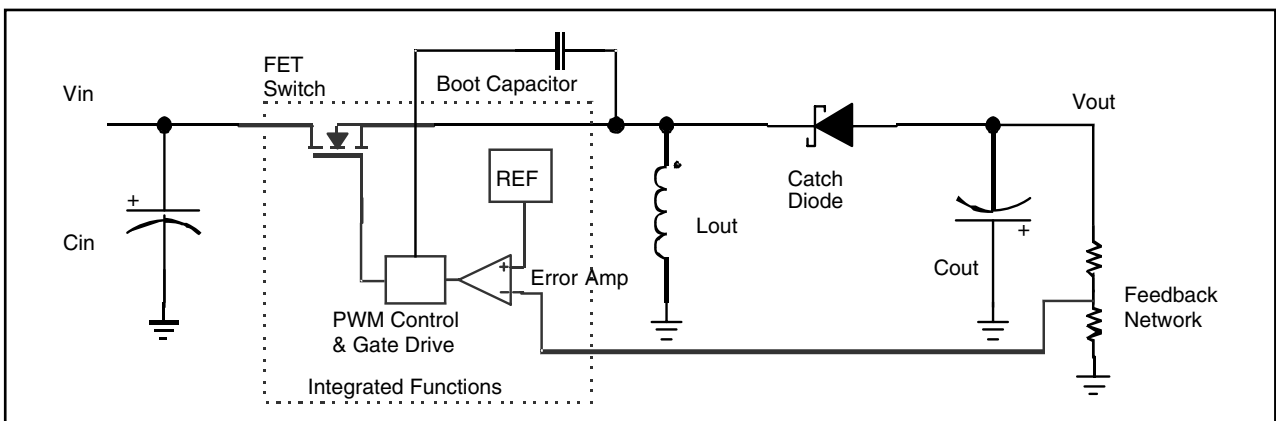


図2. 反転昇降圧トポロジ

### 3 設計上の考慮事項

図3の回路を考えます。この回路では、TPS5430は、入力電圧15V、出力電圧-5Vの反転昇降圧コンバータとして設計されています。設計式は単純化した形で示してあり、半導体は理想化され、他の部品の損失は無視しています。図2の昇降圧トポロジを実装するために、TPS5430のGNDピンをVoutに接続し、出力コンデンサの正端子をVoutリターン(回路のグラウンド)に接続します。

デバイスのVINピンとGND間の入力電圧は、 $V_{in} - V_{out} = 15 - (-5) = 20V$ です。

動作デューティ・サイクルは次のようになります。

$$D = V_{out} / (V_{out} - V_{in}) = -5 / (-5 - 15) = 0.25$$

平均インダクタ電流は次のようになります。

$$I_{l\ avg} = I_{out} / (1 - D)$$

平均出力電流がTPS5430の定格出力3Aを超えてはならないため、使用可能な負荷電流を(1-D)の係数で低減しています。この設計の場合、可能な最大DC負荷電流は次のようになります。

$$3 \times (1 - D) = 2.25\ A$$

また、いくつかの理由により、インダクタのACリップル電流は小さく保つ必要があります。ピーク・インダクタ電流は、平均インダクタ電流に、ピーク・ツー・ピークAC電流の1/2を加えたものです。これは、4Aの内部電流制限よりも小さい必要があります。また、インダクタACリップル電流は、回路が不連続導通モードで動作を開始するDC出力電流を決定します(その電流を下回ると不連続導通モードで動作開始)。これは、DC出力電流がピーク・ツー・ピークAC電流の1/2に等しくなったときです。この回路は連続モードで動作するように設計されているため、インダクタ・リップル電流は最小出力電流の2倍未満である必要があります。一般に、これは電流制限よりも厳しい制約です。また、リップル電流は出力電圧リップルにも大きく寄与します。インダクタ・

リップル電流が低いほど、出力電圧リップルが小さくなります。

反転昇降圧コンバータでは、不連続モードと連続モードの動作に大きな違いがあります。不連続動作モードで安定な設計の多くは、負荷電流が増加して連続モードで動作すると、帰還ループに右半平面のゼロが含まれるため不安定になります。この例は、連続導通モードで安定するように設計されているため、連続モードで動作する必要があります。インダクタ値は、コンバータが0.25A以上の任意の出力で連続導通モードで動作するように選択されています。この設計では、負荷電流が0.25A未満に低下した場合、出力はレギュレーションが維持され、引き続き安定に保たれます。

この設計のインダクタ値は、最小負荷250mAで連続導通を維持することに基づいて計算されています。最大スイッチ電流は $3 + (0.500 / 2) = 3.25A$ であり、TPS5430の最小電流制限である4Aを下回っています。最小インダクタ・サイズは次の式で求められます。

$$L_{min} = (V_{in} \times D) / (F_{sw} \times 2 \times I_{omin}) = (15 \times 0.25) / (500000 \times 2 \times 0.25) = 15\ \mu H$$

インダクタは、RMSと飽和電流の定格を超えないように選択します。ピーク電流3.25Aは飽和電流より低くなります。RMS電流は次の式で求められます。

$$I_{l\ rms} = \sqrt{I_{l\ avg}^2 + (1/12 \times (I_{l\ p}^2))} = 3.003\ A$$

出力コンデンサは、回路がTPS5430の内部補償に対して適切に動作するように選択します。TPS5430の内部補償では、原点に積分の極があり、さらに2つの極およびゼロがあります。これらの周波数は次のとおりです。

$$\begin{aligned} F_{int} &= 2165\ Hz \\ F_{z1} &= 2170\ Hz \\ F_{z2} &= 2590\ Hz \\ F_{p1} &= 24\ kHz \\ F_{p2} &= 54\ kHz \end{aligned}$$

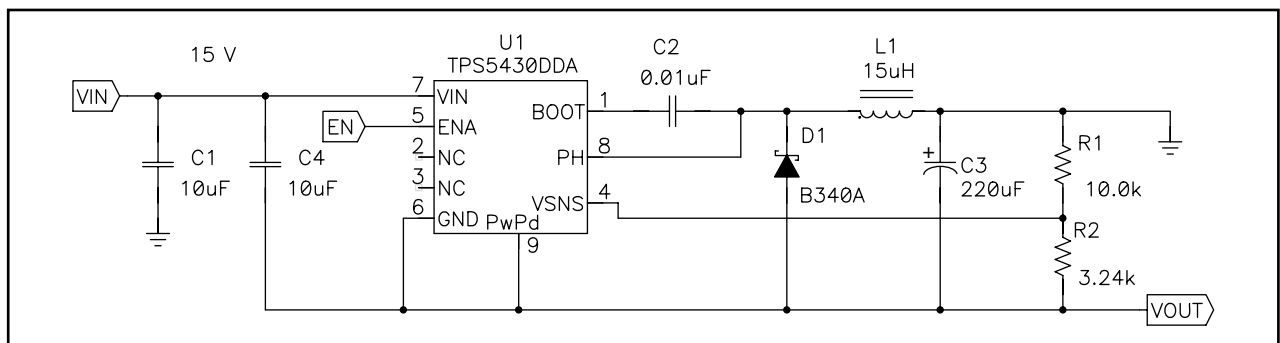


図3. TPS5430の昇降圧アプリケーション

コンデンサ値は、出力インダクタに基づいて、LC共振周波数が内部補償の内部ゼロ付近に位置するように選択します。LC共振周波数は、Fz2周波数に等しいか、そのすぐ上となる必要があります。出力コンデンサのESRは、ESRのゼロが補償ネットワークの最初の内部極の近く (+/-10kHz) に位置するように選択します。この回路の場合、出力コンデンサは220μFのPOSCAPで、ESRは40mΩです。その結果、LC共振周波数およびESRのゼロは次のようになります。

$$f_{lc} = 1 / (2 \times \pi \times \sqrt{L \times C}) = 2770 \text{ Hz}$$

$$f_{esr} = 1 / (2 \times \pi \times C \times Resr) = 18 \text{ kHz}$$

これにより、最適な閉ループ・クロスオーバー周波数で安定な動作が得られます。

入力では、Vinとグラウンドの間 (C1)、およびVinとVoutの間 (C4) に必ずバイパス・コンデンサを使用してください。VinからVoutへのバイパスは、デバイスの電圧入力のバイパスとなります。これらには同じ値を使用でき、回路のリップル電流および電圧定格を満足する必要があります。

図3に示される昇降圧回路は、評価モジュールとして提供されています。評価モジュールをご希望の場合は、TPS5430の製品フォルダを参照するか、またはtps5430buckboost@ti.comまで電子メールでご連絡ください。

## 4 回路特性

図4～図8に、回路の特性を示します。すべての性能データは周囲温度25℃でのものです。図4は、閉ループ応答の測定結果です。閉ループ・クロスオーバー周波数は約20kHzで、位相余裕は59度です。

図5は、負荷過渡事象に対する出力電圧応答です。出力電流ステップは、最小電流の0.25Aから2Aへ、そして0.25Aに戻ります。負荷のステップ変化に対するピーク・ツー・ピーク電圧偏差は、±50mVです。

図6は、出力電圧リップルおよびPHノード波形です。PHノードのスイッチング波形はVinからVoutまで、つまり15Vから-5Vの間で変動することに注意してください。図にはグラウンド基準線が示されています。また、出力電圧リップルは、降圧型コンバータで一般的に見られる直線的な上昇特性を示していないことにも注目してください。降圧型コンバータでは、平均インダクタ電流が負荷に供給される一方で、AC成分は出力フィルタ・コンデンサを通してグラウンドに流れます。リップル電圧の主成分はACリップル電流と出力コンデンサのESRとの積であり、その結果、波形は、FETのオン期間に上昇してスイッチオフ期間に下降する形に近くなります。反転昇降圧コンバータの場合、出力コンデンサはスイッチオン期間に負荷電流を供給し、スイッチオフ期間に再充電されます。この充電および放電サイクルにACリップル電流が重畳されて、図6に示すような複雑なリップル電流となります。出力電圧は負であるため、波形の正の部分は、出力がゼロに近づく部分 (サイクルの放電部分) を示しています。

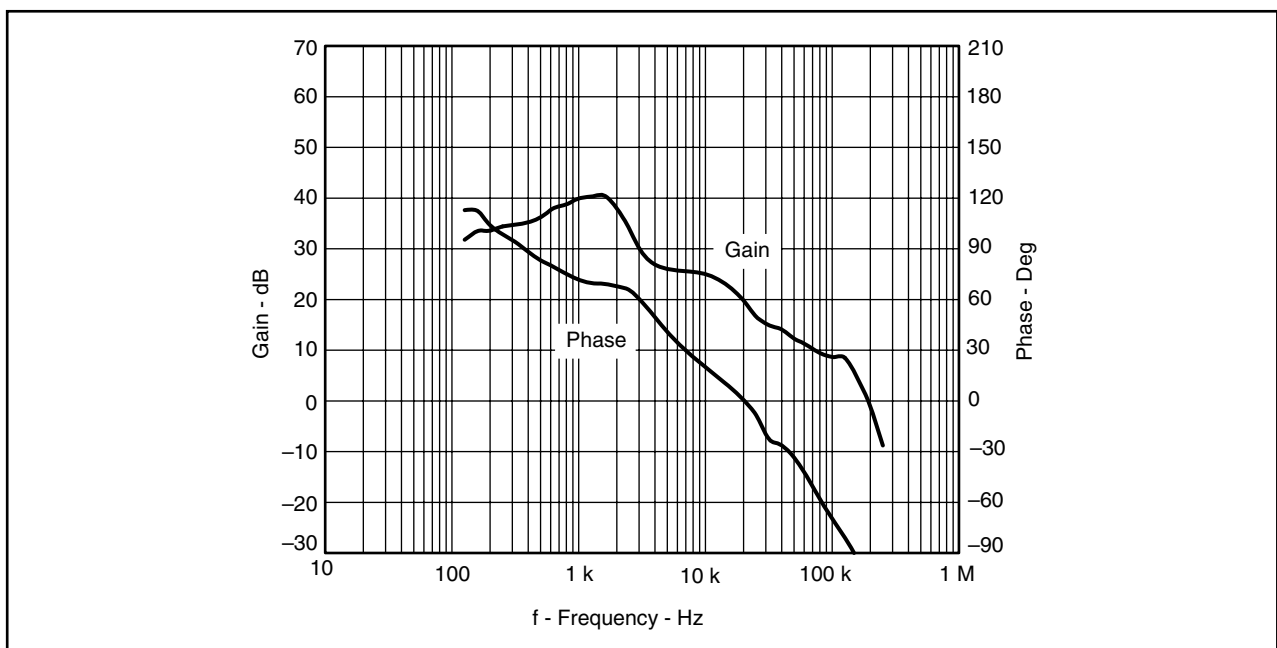


図4. 閉ループ応答

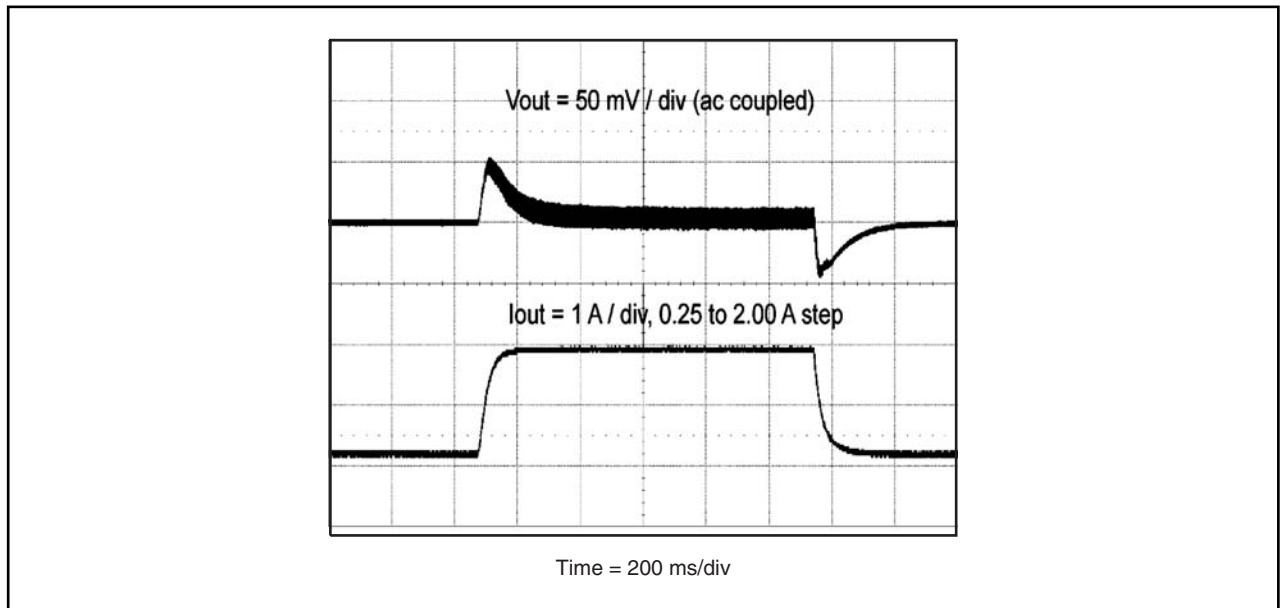


図5. 過渡応答

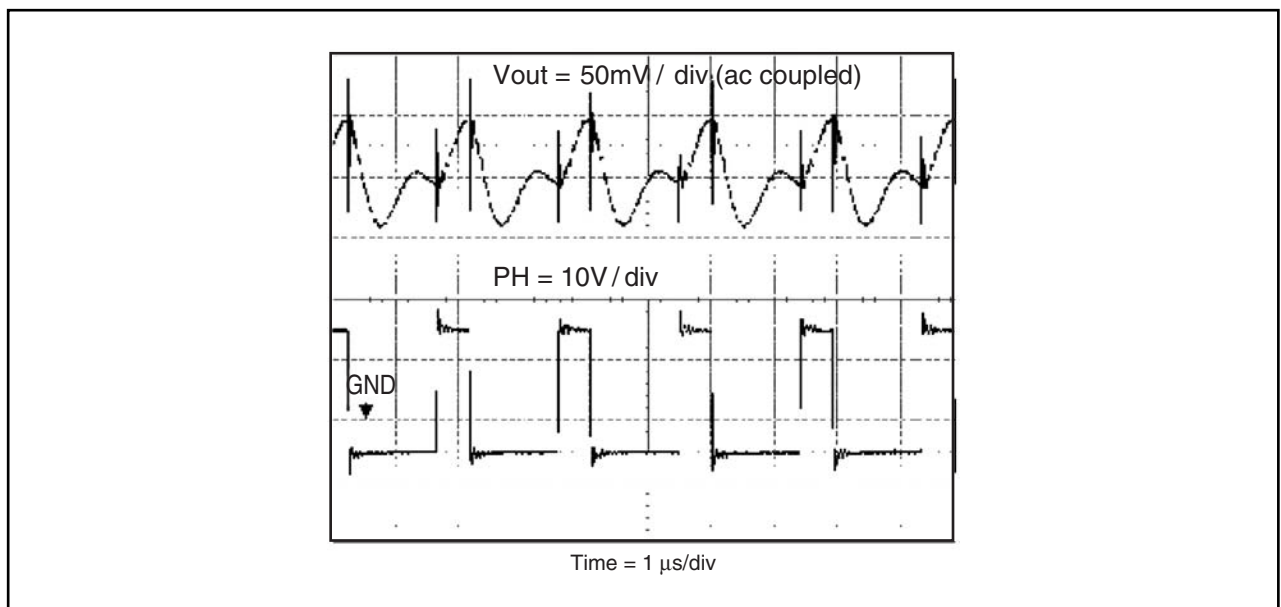


図6. 出力電圧リップルおよびPHノード電圧

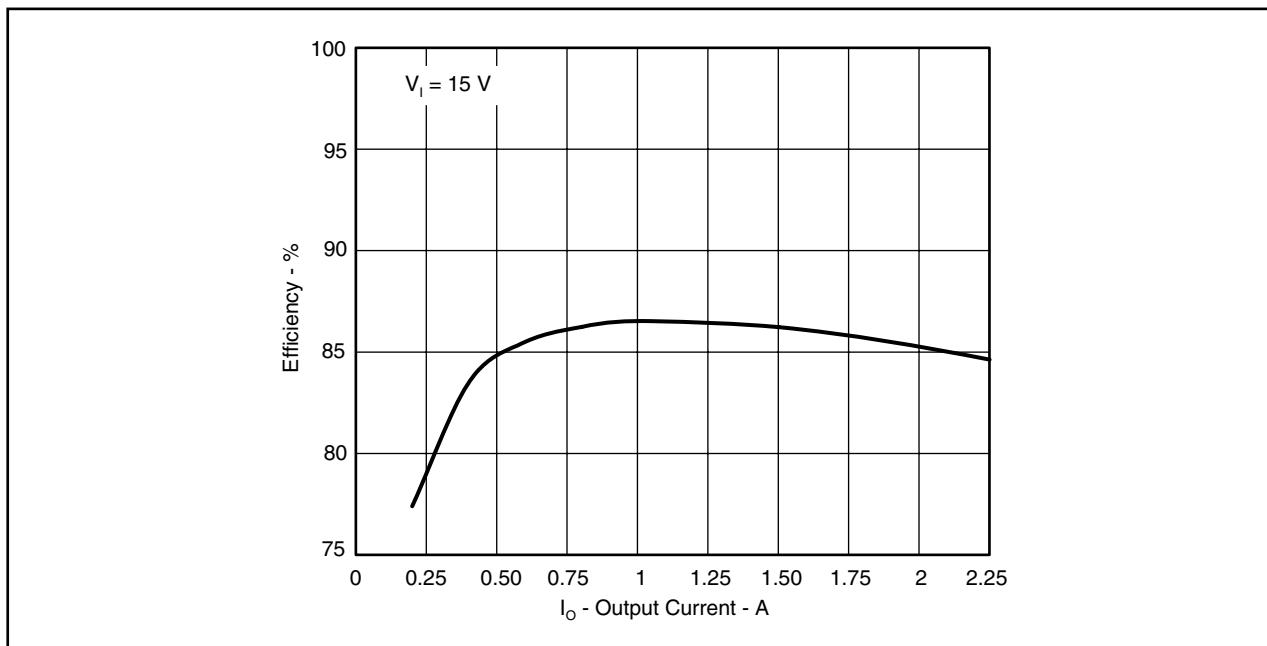


図7. 効率

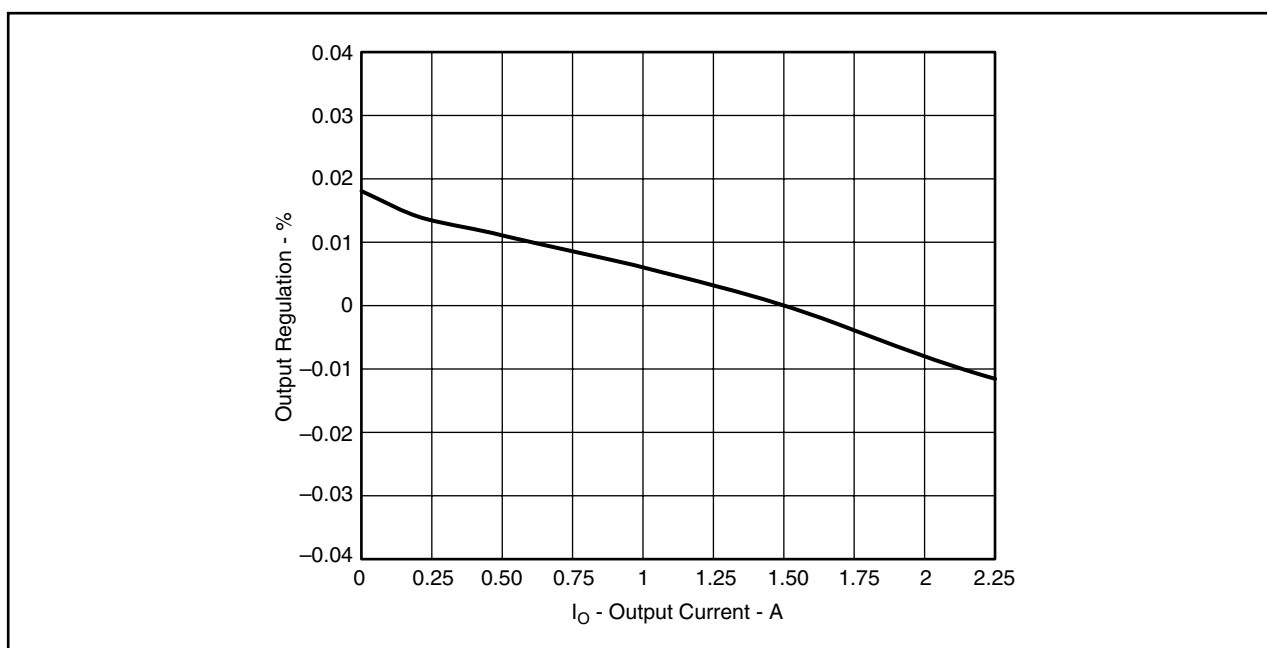


図8. 負荷レギュレーション

図7に、効率曲線を示します。内部FETスイッチのオン抵抗が低いため、この設計では最大87%という高い効率が可能になっています。負荷電流に対する出力電圧変動を図8に示します。この回路が動作できる負荷電流範囲全体にわたって厳密な電圧レギュレーションが維持されることに注意してください。

## 5 結論

TPS5430を使用し、回路を昇降圧設計として構成することにより、正の入力電圧から負の出力電圧を生成できます。回路設計は単純明快ですが、いくつかの重要な点に注意してください。出力電流が平均インダクタ電流の(1-D)になるため、使用可能な出力電流はデバイス定格よりも小さくなります。出力電圧は負であり、デバイスのグランド・ピンに出力されるため、デバイス入力での実効電圧は $V_{in} - V_{out}$ です。この差がデバイスの入力電圧定格を超えてはなりません。デバイスまたは露出したPowerPAD™ パッケージのグランドを、システム・グランドに接続しないようにしてください。



# ご注意

日本テキサス・インスツルメンツ株式会社(以下TIJといひます)及びTexas Instruments Incorporated(TIJの親会社、以下TIJないしTexas Instruments Incorporatedを総称してTIといひます)は、その製品及びサービスを任意に修正し、改善、改良、その他の変更をし、もしくは製品の製造中止またはサービスの提供を中止する権利を留保します。従いまして、お客様は、発注される前に、関連する最新の情報を取得して頂き、その情報が現在有効かつ完全なものであるかどうかをご確認下さい。全ての製品は、お客様とTIJとの間に取引契約が締結されている場合は、当該契約条件に基づき、また当該取引契約が締結されていない場合は、ご注文の受諾の際に提示されるTIJの標準販売契約約款に従って販売されます。

TIJは、そのハードウェア製品が、TIの標準保証条件に従い販売時の仕様に対応した性能を有していること、またはお客様とTIJとの間で合意された保証条件に従い合意された仕様に対応した性能を有していることを保証します。検査およびその他の品質管理技法は、TIが当該保証を支援するのに必要とみなす範囲で行なわれております。各デバイスの全てのパラメータに関する固有の検査は、政府がそれ等の実行を義務づけている場合を除き、必ずしも行なわれておりません。

TIJは、製品のアプリケーションに関する支援もしくはお客様の製品の設計について責任を負うことはありません。TI製部品を使用しているお客様の製品及びそのアプリケーションについての責任はお客様にあります。TI製部品を使用したお客様の製品及びアプリケーションについて想定される危険を最小のものとするため、適切な設計上および操作上の安全対策は、必ずお客様にてお取り下さい。

TIJは、TIの製品もしくはサービスが使用されている組み合わせ、機械装置、もしくは方法に関連しているTIの特許権、著作権、回路配置利用権、その他のTIの知的財産権に基づいて何らかのライセンスを許諾するということは明示的にも黙示的にも保証も表明もしていません。TIが第三者の製品もしくはサービスについて情報を提供することは、TIが当該製品もしくはサービスを使用することについてライセンスを与えるとか、保証もしくは承認をすることを意味しません。そのような情報を使用するには第三者の特許その他の知的財産権に基づき当該第三者からライセンスを得なければならない場合もあり、またTIの特許その他の知的財産権に基づきTIからライセンスを得て頂かなければならない場合もあります。

TIのデータ・ブックもしくはデータ・シートの中にある情報を複製することは、その情報に一切の変更を加えること無く、かつその情報と結び付けられた全ての保証、条件、制限及び通知と共に複製がなされる限りにおいて許されるものとします。当該情報に変更を加えて複製することは不正で誤認を生じさせる行為です。TIは、そのような変更された情報や複製については何の義務も責任も負いません。

TIの製品もしくはサービスについてTIJにより示された数値、特性、条件その他のパラメータと異なる、あるいは、それを超えてなされた説明で当該TI製品もしくはサービスを再販売することは、当該TI製品もしくはサービスに対する全ての明示的保証、及び何らかの黙示的保証を無効にし、かつ不正で誤認を生じさせる行為です。TIJは、そのような説明については何の義務も責任もありません。

TIJは、TIの製品が、安全でないことが致命的となる用途ないしアプリケーション(例えば、生命維持装置のように、TI製品に不良があった場合に、その不良により相当な確率で死傷等の重篤な事故が発生するようなもの)に使用されることを認めておりません。但し、お客様とTIの双方の権限有る役員が書面でそのような使用について明確に合意した場合は除きます。たとえTIJがアプリケーションに関連した情報やサポートを提供したとしても、お客様は、そのようなアプリケーションの安全面及び規制面から見た諸問題を解決するために必要とされる専門的知識及び技術を持ち、かつ、お客様の製品について、またTI製品をそのような安全でないことが致命的となる用途に使用することについて、お客様が全ての法的責任、規制を遵守する責任、及び安全に関する要求事項を満足させる責任を負っていることを認め、かつそのことに同意します。さらに、もし万一、TIの製品がそのような安全でないことが致命的となる用途に使用されたことによって損害が発生し、TIないしその代表者がその損害を賠償した場合は、お客様がTIないしその代表者にその全額の補償をするものとします。

TI製品は、軍事的用途もしくは宇宙航空アプリケーションないし軍事的環境、航空宇宙環境にて使用されるようには設計もされていませんし、使用されることを意図されていません。但し、当該TI製品が、軍需対応グレード品、若しくは「強化プラスチック」製品としてTIが特別に指定した製品である場合は除きます。TIが軍需対応グレード品として指定した製品のみが軍需品の仕様書に合致いたします。お客様は、TIが軍需対応グレード品として指定していない製品を、軍事的用途もしくは軍事的環境下で使用することは、もっぱらお客様の危険負担においてなされるということ、及び、お客様がもっぱら責任をもって、そのような使用に関して必要とされる全ての法的要求事項及び規制上の要求事項を満足させなければならないことを認め、かつ同意します。

TI製品は、自動車用アプリケーションないし自動車の環境において使用されるようには設計されていませんし、また使用されることを意図されていません。但し、TIがISO/TS 16949の要求事項を満たしていると特別に指定したTI製品は除きます。お客様は、お客様が当該TI指定品以外のTI製品を自動車用アプリケーションに使用しても、TIは当該要求事項を満たしていなかったことについて、いかなる責任も負わないことを認め、かつ同意します。

Copyright © 2009, Texas Instruments Incorporated  
日本語版 日本テキサス・インスツルメンツ株式会社

## 弊社半導体製品の取り扱い・保管について

半導体製品は、取り扱い、保管・輸送環境、基板実装条件によっては、お客様での実装前後に破壊/劣化、または故障を起こすことがあります。

弊社半導体製品のお取り扱い、ご使用にあたっては下記の点を遵守して下さい。

### 1. 静電気

素手で半導体製品単体を触らないこと。どうしても触る必要がある場合は、リストストラップ等で人体からアースをとり、導電性手袋等をして取り扱うこと。

弊社出荷梱包単位(外装から取り出された内装及び個装)又は製品単品で取り扱いを行う場合は、接地された導電性のテーブル上で(導電性マットにアースをとったもの等)、アースをした作業者が行うこと。また、コンテナ等も、導電性のものを使うこと。

マウンタやはんだ付け設備等、半導体の実装に関わる全ての装置類は、静電気の帯電を防止する措置を施すこと。

前記のリストストラップ・導電性手袋・テーブル表面及び実装装置類の接地等の静電気帯電防止措置は、常に管理されその機能が確認されていること。

### 2. 温・湿度環境

温度: 0 ~ 40 °C、相対湿度: 40 ~ 85%で保管・輸送及び取り扱いを行うこと。(但し、結露しないこと。)

直射日光があたる状態で保管・輸送しないこと。

### 3. 防湿梱包

防湿梱包品は、開封後は個別推奨保管環境及び期間に従い基板実装すること。

### 4. 機械的衝撃

梱包品(外装、内装、個装)及び製品単品を落下させたり、衝撃を与えないこと。

### 5. 熱衝撃

はんだ付け時は、最低限260 °C以上の高温状態に、10秒以上さらさないこと。(個別推奨条件がある時はそれに従うこと。)

### 6. 汚染

はんだ付け性を損なう、又はアルミ配線腐食の原因となるような汚染物質(硫黄、塩素等ハロゲン)のある環境で保管・輸送しないこと。はんだ付け後は十分にフラックスの洗浄を行うこと。(不純物含有率が一定以下に保証された無洗浄タイプのフラックスは除く。)

以上