

# ノートPCアプリケーションにおける アダプティブオン時間 (D-CAP™) 制御方式

Chuan Ni and Tateishi Tetsuo

PMP - Systems Power

## 要約

電圧モード、電流モード、一定オン時間制御、およびアダプティブオン時間制御 (D-CAP™モード) を採用した降圧型コンバータについて、それぞれの制御方法および過渡特性を詳しく分析し、この分析に基づき、ポータブルアプリケーションに応用可能なD-CAP™モードの利点を紹介しま

す。また、D-CAP™モードのジッタのメカニズムとその改善方法を提案し、さらに、シリコンソリューションによるランプ補償を実装したTPS51124を用いて、ジッタ特性の比較結果を示します。

## はじめに

降圧型コンバータには、さまざまな制御手法が用いられます。これらの制御手法には、電圧モード、電流モード、ヒステリシス制御、一定オン時間モード、一定オフ時間モード、およびアダプティブオン時間モード (D-CAP™モード) があります。電圧モードと電流モードでは、幅広い範囲の入力電圧で安定した動作を実現するためのループ補償回路、および異なる電源段設計に基づいた再設計が必要となります。

また、図1および図2に示すように、どちらの制御モードも高性能な誤差増幅器を必要とし、それによってICの動作電流が増加します [1]。これは、軽負荷動作時の高効率を達成する際に障害となります。

現在のモバイルアプリケーション市場では、出力容量とコストを最小限に抑える一方で、高速な過渡応答が最も重要な設計パラメータの1つとなっています。

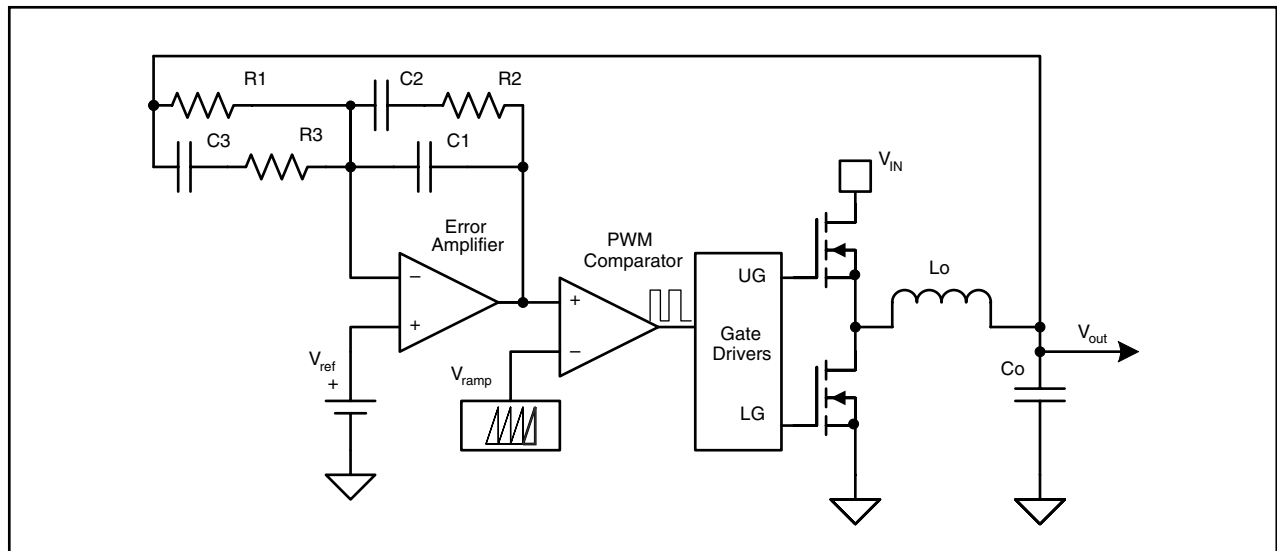


図1. 電圧モード

D-CAP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。

SLVA281b 翻訳版

最新の英語版資料

<http://focus.ti.com/lit/an/slva281b/slva281b.pdf>

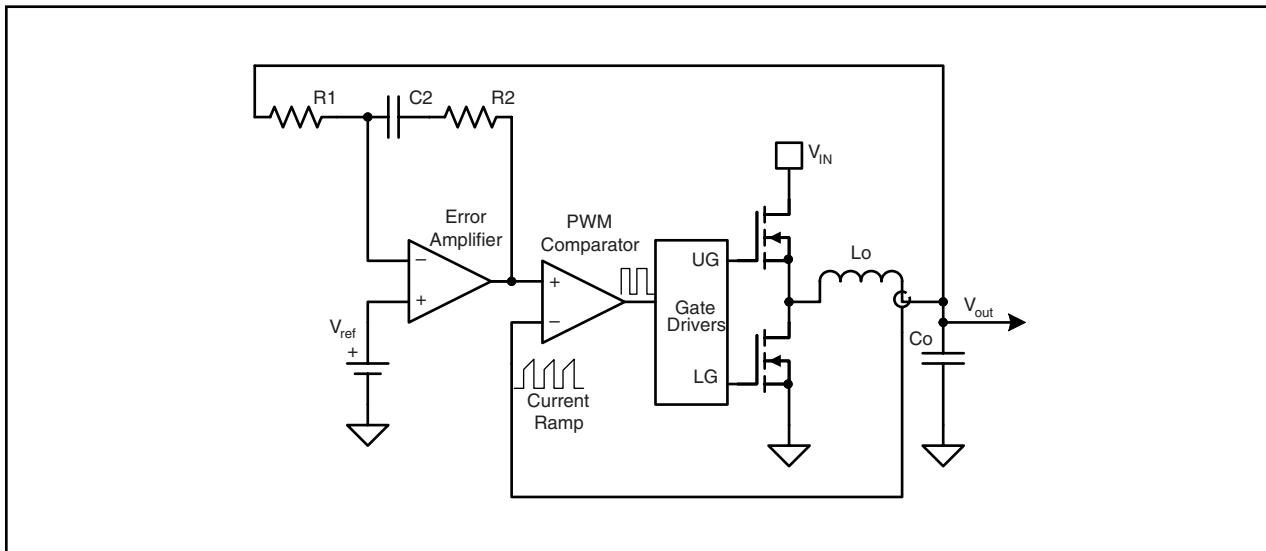


図2. ピーク電流モード

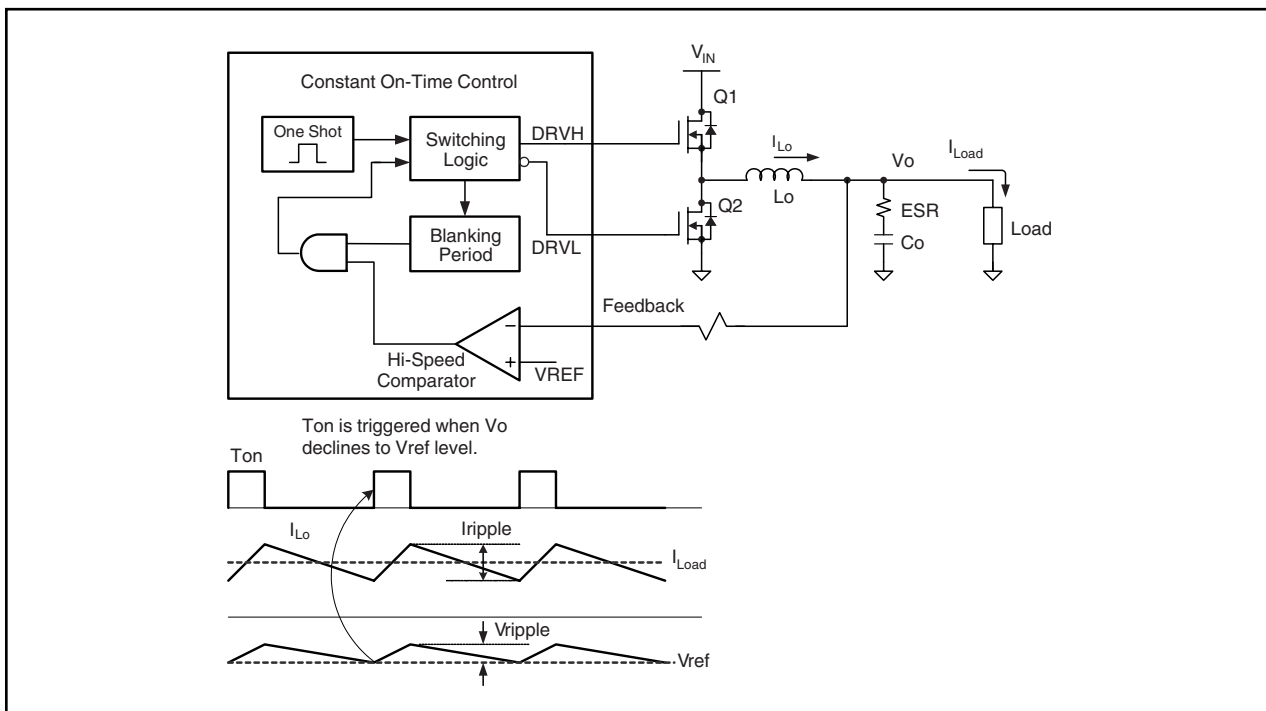


図3. 一定オン時間モード

もう1つの重要な要件は、バッテリー動作時間を延ばすための軽負荷効率です。電圧モードと電流モードのどちらについても、高い軽負荷効率を得るにはモード変更が必要です。固定スイッチング周波数の不連続導通モード (DCM) におけるダイオード・エミュレーション・モードは、スイッチング

損失が比較的高いため、軽負荷効率要件を満足しません。通常は、図4に示すように、DCMでヒステリシス制御モードまたはパルス周波数変調 (PFM) を使用することにより、スイッチング損失とゲート駆動損失を低減し軽負荷効率の向上を図ります。

このアーキテクチャには、PFMモードからPWMモードの遷移時に欠点があります。モード変更時にコンパレータから誤差増幅器へのスイッチングが行われるため、遷移がスムーズではありません。良好な軽負荷効率を得るために、誤差増幅器はスキップ・モード中にアイドル状態で動作します。そのため、モード遷移時に、誤差増幅器はモード変更に対して十分に高速な応答ができません。その結果、図5に示すように、回路のウェイクアップ遅延によって余分な電圧降下が生じます。

図3に、一定オン時間制御のブロック図を示します。この制御方法では、出力リップルを、リファレンス電圧と比較するPWMランプ信号として使用することにより、電圧のレギュレーションを行います。この方法には、電圧モードおよび電流モードと比べていくつかの利点があります。まず、ループ補償ネットワークが不要なため、設計が容易になります。また、電圧のレギュレーションに誤差増幅器を使用

しないため、過渡応答が高速になります。さらに、図6に示すように、軽負荷状態でのPFMモードから重負荷状態でのPWMモードへとシームレスに遷移します。ただし、スイッチング周波数が入力電圧および負荷条件により変化するため、この種類の制御モードはポータブル・アプリケーションには不向きです。アダプティブオン時間制御(D-CAP™モード)は、入力電圧、出力電圧、および負荷電流に基づいてオン時間の長さを動的に調整できるため、比較的一定な周波数の動作を実現できます。前に述べたリップル・モード制御方式の長所を継承するだけでなく、静的動作時に比較的安定したスイッチング周波数を維持するため、システム内で影響を受けやすい特定の周波数のいくつかの帯域で、EMI干渉を最小限に抑えることができます。図7に、D-CAP™モードを使用した降圧型コンバータの簡単なブロック図を示します。

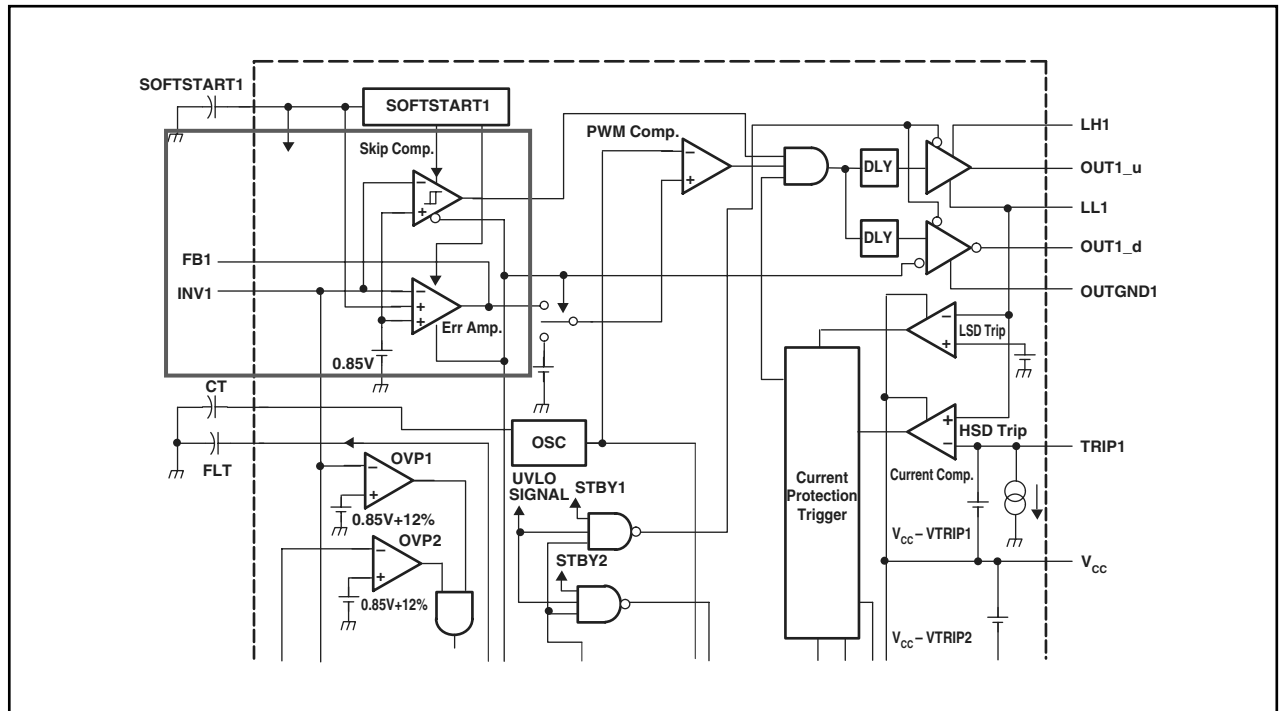


図4. 軽負荷時にヒステリシス制御モードで動作する電圧モード制御回路

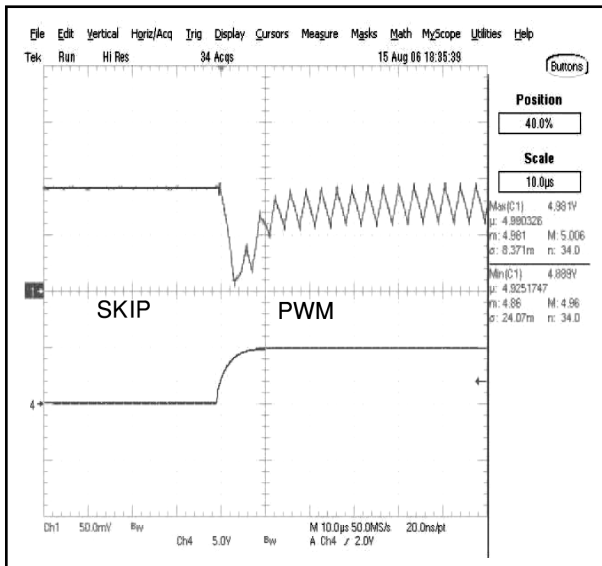


図5. 電圧モードIC

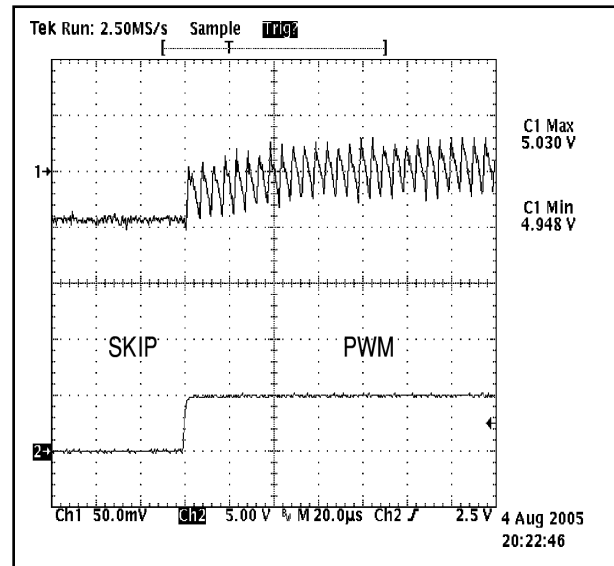


図6. アダプティブオン時間制御モードIC

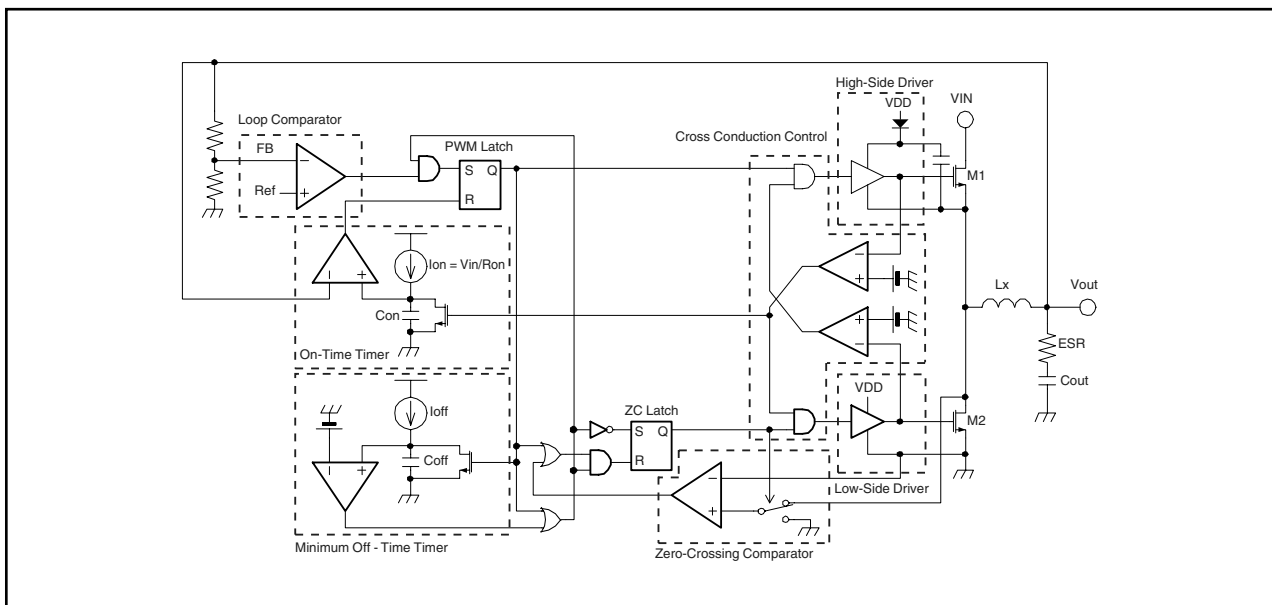


図7. D-CAP™モードのブロック図

### 1.1 D-CAP™モードの動作 [3]

D-CAP™モードとは、“Direct connection to the output CAPacitor” (出力コンデンサへの直接接続) を意味します。

#### 基本的な動作原理

各サイクルの開始時に、ハイサイドMOSFET (M1) がオンになります。内部のワンショット・タイマが終了すると、M1がオフになります。このワンショット・タイマの時間は、入力電圧範囲内で周波数を一定に維持するために、入力電

圧 (VIN) と出力電圧 (VOUT) をフィード・フォワードすることによって決定されます。そのため、これはアダプティブオン時間制御と呼ばれます。フィードバック電圧がリファレンス電圧を下回ると、M1は再度オンになります。導通損失を最小限に抑えるために、M1がオフ状態のときは同期整流MOSFET (M2) がオンになります。インダクタ電流がゼロに達すると、M2はオフになります。これにより、軽負荷状態で低周波数動作にシームレスに遷移することができ、幅広い範囲の負荷電流に対して高い効率が維持されます。

## 1.2 安定性の検討

一般に、ループ伝達関数は出力電圧の関数として得られます。D-CAP™モードでは、出力電圧がPWMコンパレータによって直接比較されます。理論的には、コンパレータのゲインと帯域幅は無限大です。その結果、出力ノードからのループ・ゲインは無限大になります。これは、出力ノード電圧を状態変数として使用するループ伝達関数を導出することはできず、測定可能でもないことを意味します。安定性分析のためのループ伝達関数としては、内部容量ノード電圧を状態変数として使用するループ伝達関数を導出できます。

図8に、D-CAP™モードを使用したDC/DCコンバータの簡単なブロック図を示します。定常状態では、出力電圧が次の式で与えられます。

$$V_o = V_c + I_c \times ESR = \text{定数} \quad (1)$$

図9に、電流モードを使用したDC/DCコンバータの簡単なブロック図を示します。定常状態では、センス抵抗の前の電圧が次の式で与えられます。

$$V_x = V_o + I_L \times R_s = \text{定数} \quad (2)$$

基本的には、負荷からの影響を除き、この2つの式はどちらも同じです。安定性の検討に関して言えば、D-CAP™モードは、電流モードでESRをセンス抵抗として使用した場合と同じということになります。

インダクタを含むパルス幅変調回路は、 $1/R_{ESR}$ のトランスコンダクタンスとして線形化されます。ループ伝達関数は、次の式で与えられます。

$$H(s) = \frac{1}{s \times R_{ESR} \times C_o} \quad (3)$$

状態平均化手法の制限により、この式を使用できるのはスイッチング周波数の半分までです。次のように0dB周波数をスイッチング制限より低く設定することで、十分な安定状態を実現できます。

$$\frac{f_{sw}}{K} > \frac{1}{2\pi \times R_{ESR} \times C_o} \quad (4)$$

Kの値は3~4が適切です。

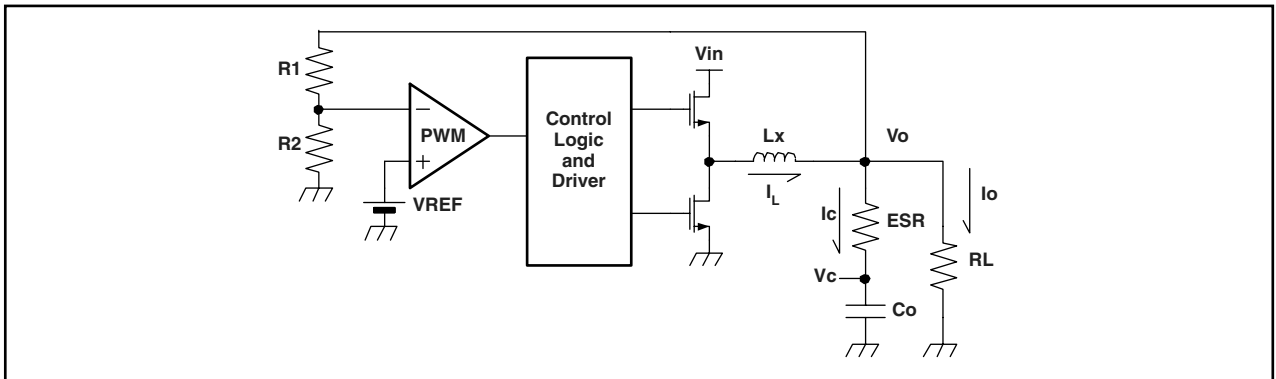


図8. D-CAP™モードを使用したコンバータの簡単なブロック図

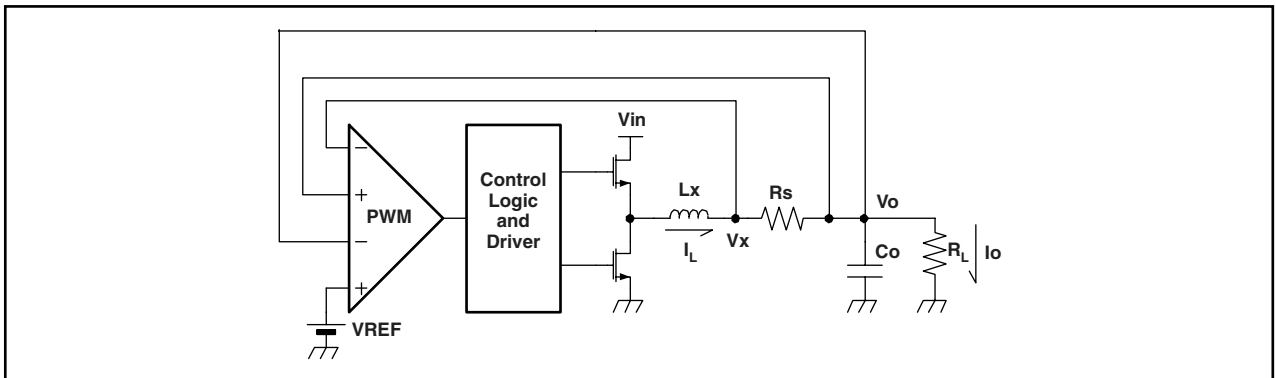


図9. 電流モードを使用したコンバータの簡単なブロック図

### 1.3 D-CAP™モードでのジッタ

他のトポロジと比較して、アダプティブオン時間制御では、負荷過渡特性において大きなメリットが得られます。ただし、ジッタ特性もやはり最適化する必要があります。安定のためには、ある値以上の最低出力リップルを必要とします。この要件は、ジッタの低減方法に関して誤解を生む場合があります。

ジッタ特性はリップルの大きさと直接関係があるので、この間に答えるために、出力電圧のレギュレーション方法を確認してみます。上側MOSFETは、スケールされた出力リップルがリファレンス電圧まで下がったときにオンになります。基本的に、出力リップルの下降中に加わったノイズは、上側MOSFETがいつオンになるかに影響を与えます。このノイズが大きい場合には、オン遷移エッジのジッタも大きくなる可能性があります。

図10に示すように、出力リップルの下降中のノイズによって、上側MOSFETのオン遷移エッジに $t_0$ の不確定期間が見られる場合があります。この不確定期間により、オン時間のジッタが生じます。この分析から、出力リップルの大きさはジッタに影響しないことが明らかです。それでは、競合他社のデータシートの多くに記載されているように、ほとんどのリップル・モード・コンバータで最低量のリップル電圧が要求されるのはなぜでしょうか。

図11で上側MOSFETのオン遷移エッジに注目してください。ここでは、出力リップルの下降勾配を大きくし、ジッタ時間が $t_0$ から $t_1$ に低減されています。フィードバック・ピンの出力リップルの下降勾配は、次の式で表されます。

$$L \times \frac{di}{dt} = -Vo \tag{5}$$

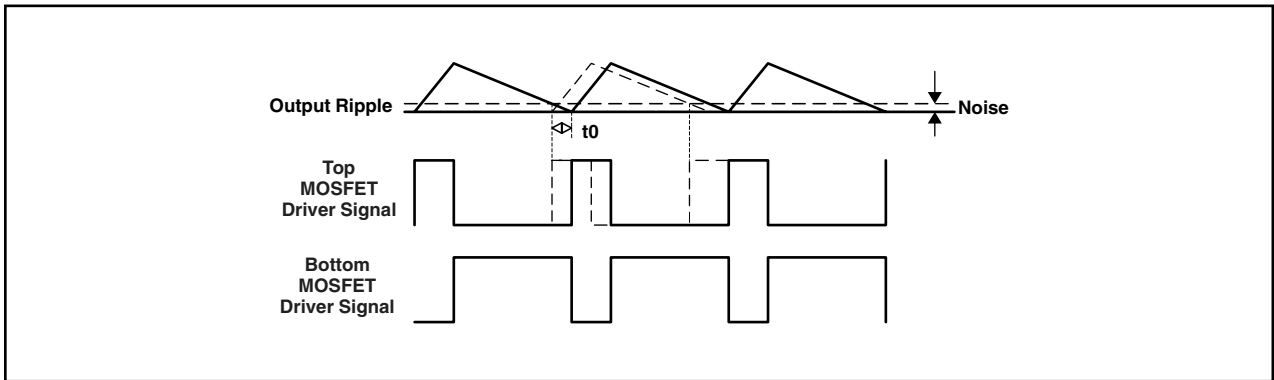


図10.

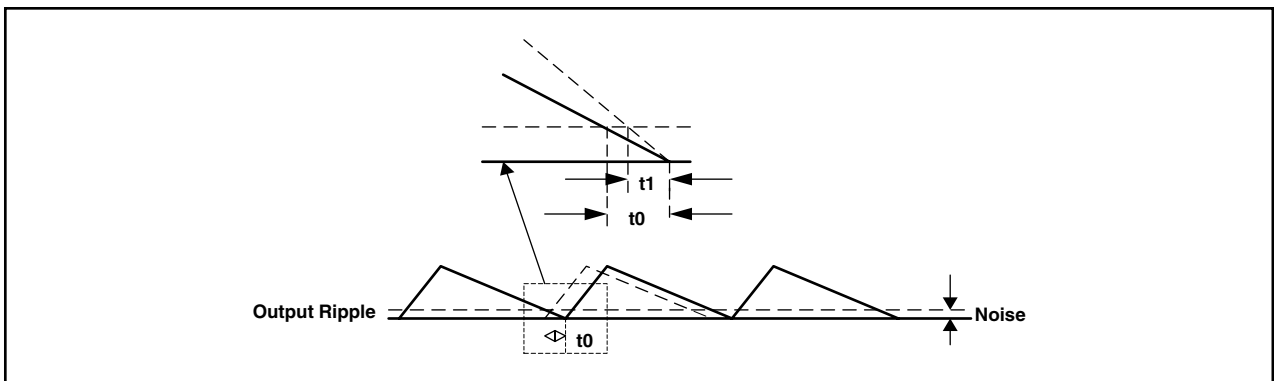


図11.

ここで、Lは出力フィルタのインダクタンス、Voは出力電圧です。式5は、オフ時間中の出力電圧とインダクタ電流変化率との関係を示しています。Lを式の右辺に移動し、両辺にEsrを掛けると（Esrは出力コンデンサのESR値）、次の式が得られます。

$$Esr \frac{di}{dt} = \frac{-Esr \times Vo}{L} \quad (6)$$

式6をさらに変形します。

$$Esr \times di = \frac{-Esr \times Vo \times dt}{L} \quad (7)$$

ここでは、出力容量が十分に大きく、出力リップルがリップル電流と出力コンデンサのESRだけで決定されると仮定しています。式7を変形して、両辺にR2 / (R1+R2)を掛けます（R1、R2は図8に示される分圧抵抗）。

$$Sr = \frac{-Esr \times Vo}{L} \times \frac{R2}{R1 + R2} \quad (8)$$

ここで、Srは、フィードバック・ピンのスケールリングされた出力リップルの下降勾配です。

$$Vref = Vo \times \frac{R2}{R1 + R2}$$

であるため、

$$Sr = \frac{-Esr \times Vref}{L} \quad (9)$$

となります。

式9および式7から、Srと、出力リップルの大きさが、ともにEsr/Lに比例することがわかります。ただし、リップル・モード・コンバータの安定性に影響を与えるのは、出力リップルの大きさではなく、フィードバック電圧の下降勾配です。

#### 1.4 D-CAP™モードでのランプ補償

D-CAP™モードでのジッタのメカニズムを分析した後は、ジッタ特性の改善のためにランプ補償について考えて見ます。

図12では、フィードバック・ピンに10mVのランプ補償が追加されています。フィードバック・ピンのスケールリングされた出力リップルの下降勾配が大きくなり、D-CAP™モードのジッタ特性が向上しています。図13に、ランプ補償ありの場合とランプ補償なしの場合の2つの波形を示します。ランプ補償ありの波形では、ジッタ特性が大きく改善されています。

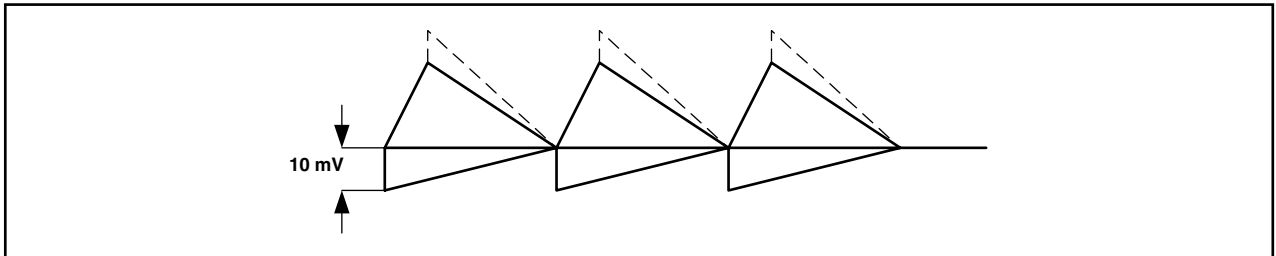


図12.

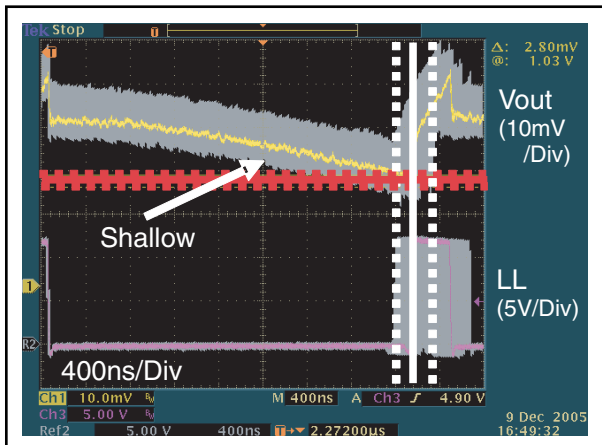


図13. ランプ補償なし

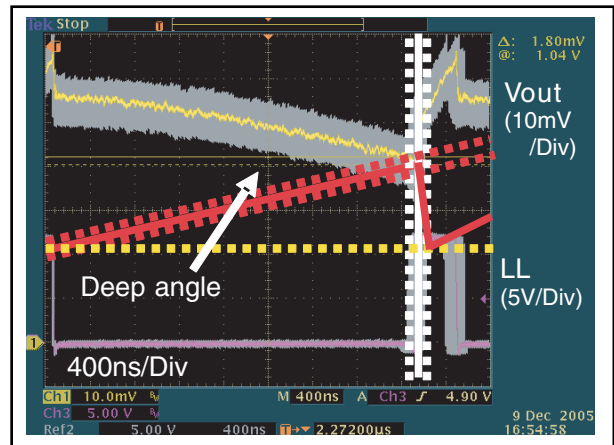


図14. Vout1にランプ補償あり (10mv/DIV、1.05Vオフセット)

## 2 結論

モバイル・アプリケーション用のTIのD-CAP™は、通常動作時の安定したスイッチング周波数、スキップ・モードからPWMモードへのスムーズな遷移、高速な過渡応答、使いやすさ、およびジッタ特性の改善といった利点を提供します。

## 3 参考文献

1. Dan Mitchell, Bob Mammano designing stable control loops Unitrode Power Supply Design Seminar 2001pp. 5-1,5-30
2. R. Redl and N.O.Sokal, Current-mode control, five different types, used with the three basic classes of power converters: Small-signal ac and large-signal dc characterization, stability requirements, and implementation of practical circuits, in IEEE Power Electron. Spec. Conf. Rec., 1985, pp.771-785
3. Tetsuo Tateishi The D-CAP™ mode operation and an implementation of the OOATM skip mode, TI's Integrated Power conference 2005



# 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。従ひまして、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。

TIは、そのハードウェア製品が、TIの標準保証条件に従ひ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ひ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ー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。

TI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。

TI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おりません。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ひません。

TIの製品もしくはサービスについてTIにより示された数値、特性、条件その他のパラメーターと異なる、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。TI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。

TI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TI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おられません。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おられません。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ひ基板実装すること。

### 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