

LM5032,LM5034



Literature Number: JAJA399

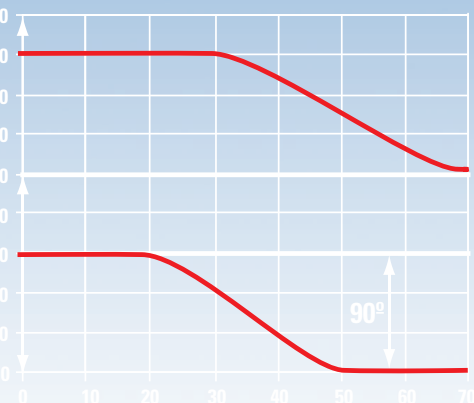
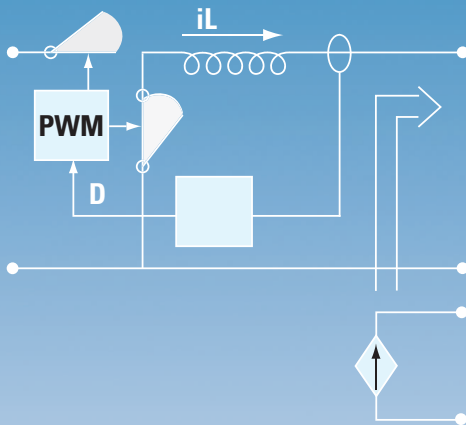
特集記事 1-7

シングルエンド電流モード
AC/DC PWM コントローラ 2

デュアル・インタリーブド・
アクティブ・クランプ
電流モード・コントローラ 4

広い入力範囲、電流モード、
デュアル出力降圧型
レギュレータ 6

電源回路設計ツール 8



電流モード制御の内側を探る

— Mark Hartman, Applications Engineer

電流モード制御は 1970 年代後半から電源回路で使用されてきました。この制御方式は 20 年以上にわたって実用に供されているにもかかわらず、その動作と特性はあまり理解されていません。ほとんどのエンジニアは、より親しみやすい電圧モード制御でスイッチング電源の動作を学ぶだけで、電流モード制御は後学の対象として残されたままです。これは残念なことで、電源のエンジニアは、それぞれの制御アーキテクチャを選択する条件を判断するためにも、少なくとも電圧モードと電流モードの基本的な違いを学ぶべきです。本稿では電流モードの内側を概説します。

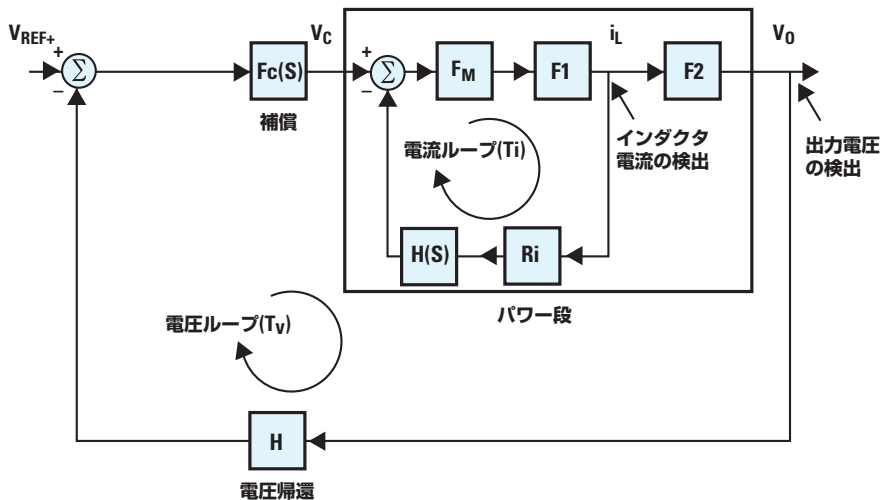


Figure 1: 電流モード・コントローラの制御ブロック図

電流モード制御では電圧帰還ループに加えてインダクタの電流帰還ループが用いられます。電流モード制御コンバータは、PWM 変調回路の入力としてインダクタ電流と出力電圧誤差信号の両方を使用します。Figure 1 に示すピーク電流モード制御の概念図のとおり、出力電圧と同時にピーク・インダクタ電流も制御されています。インダクタ電流を何らかの手段で検出して、出力電圧誤差から生成された制御電圧 V_C と比較を行います。

シングルエンド電流モード AC/DC PWM コントローラ

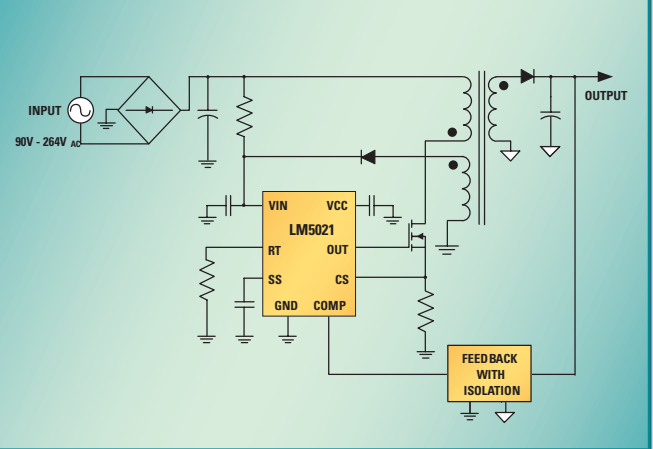
LM5021 は広範な負荷範囲にわたり電力効率の向上を実現

特長

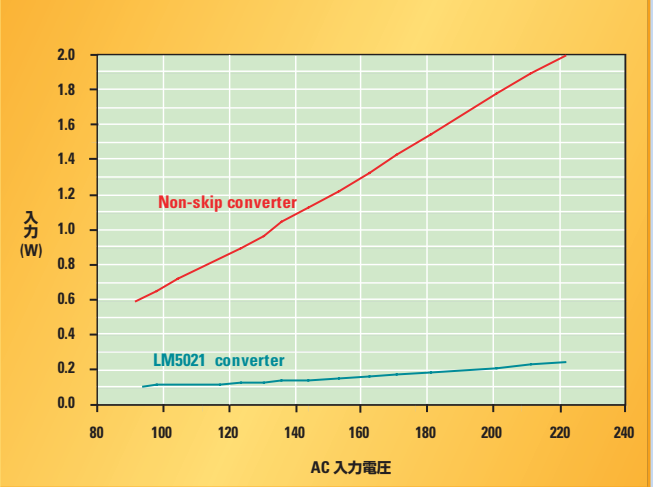
LM5021 は、高効率オフライン・シングルエンド・フライバック型とフォワード型の電源コンバータの実装に必要なすべての機能を電流モード制御を使用して搭載した、オフライン・パルス幅変調 (PWM) コントローラです。LM5021 はスタートアップ時の消費電流がきわめて低いこと (25 μ A) を特長の1つとしており、高耐圧起動回路の電力損失を最小限に抑えます。スキップ・サイクル・モードは、省電力アプリケーション (米国 ENERGY STAR[®]、中国 CECP など) で負荷が軽い場合に消費電力を削減します。このほか、0.7A の MOSFET ゲート・ドライバ内蔵、アンダーボルテージ・ロックアウト、サイクルごとの電流制限、Hiccup モード過負荷保護、スロープ補償、ソフトスタート、発振回路の外部同期機能などを備えています。8 ピン・パッケージに収められた高性能な LM5021 は、制御ピンの伝搬遅延は 100ns 未満と高速で、また単一の外付け抵抗で周波数を設定可能な最大 1MHz に対応した発振回路を内蔵しています。

通信およびネットワーク機器用電源、民生・工業用電源、フライバックおよびフォワード型 AC/DC コンバータに最適です。

LM5021 代表的なアプリケーション回路



LM5021 待機時消費電流を低減するスキップ・モード



電流モード制御の内側を探る

検出したインダクタ電流が制御電圧 V_C に等しくなるまで、PWM コンパレータは HIGH(電源スイッチ・オン)を出力します。両者が等しくなると PWM コンパレータは LOW を出力し、スイッチはオフになります。次のスイッチング周期は一定周波数クロック信号を用いた RS ラッチのセットによって開始されます。この方法でインダクタのピーク電流は、制御電圧 V_C によって正確に制御されます。インダクタは直感的には、電流ループによって、電流モード制御の多くの特性に関連する電流源として機能していると考えられます。

デューティ・サイクル D はインダクタ電流と出力電圧に依存することは Figure 2 の回路図から明らかですが、デューティ・サイクルがコンバータの性能に与える作用を把握することは簡単ではありません。電流モード制御の重要な特性を直感的に理解するには、小信号挙動を解析するのがいちばんです。

ピーク電流モード制御の小信号ブロック図を Figure 1 に示します。図から 2 つの帰還ループがあることがわかります。外側の帰還ループ (T_V) は電圧情報を帰還し、内側の帰還ループ (T_i) は電流情報を帰還しています。電圧ループは電圧モード制御と同じように構成されています(出力電圧誤差から補償制御電圧を生成)。

電流ループ T_i は電流モード制御アーキテクチャの特徴的な要素です。検出したインダクタ電流との比較によってデューティ・サイクルを決定する制御電圧 V_C が、電流ループに入力されています。デューティ・サイクルは、対応するインダクタ電流と出力電圧を生成するパワー段 (スイッチング手段、インダクタ、出力コンデンサで構成) に伝えられます。電流検出アンプ R_i を介して帰還されたインダクタ電流は V_C と比較されます。

電流ループが閉じている状態では、2 つのリアクティブな素子 (L と C_{OUT}) を備えた二次系が単一ポール系に変わってしまうという、矛盾した状況が発生しているようにも見受けられます。帰還理論によって合理的な解が与えられます。帰還ループがインダクタ電流を制御しているという事実は、電流源が出力コンデンサと負荷に電流を効率的に供給していることに似ています。そのため、電流ループ帯域よりも低い周波数において、電流モードのパワー段は、 $C_{OUT} || R_{LOAD}$ インピーダンスで支配される単一ポールのみを備えます。

ただし、電流ループがパワー段に与える作用は低い周波数域に限りません。電流ループの小信号電流の振動を解析すると、離散時間でサンプルされたデータ系に似ていることがわかります。そのようなサンプル/ホールド系では、サンプリング (スイッチング) 周波数の整数倍の周波数に、複雑なポール・ペアが存在します。

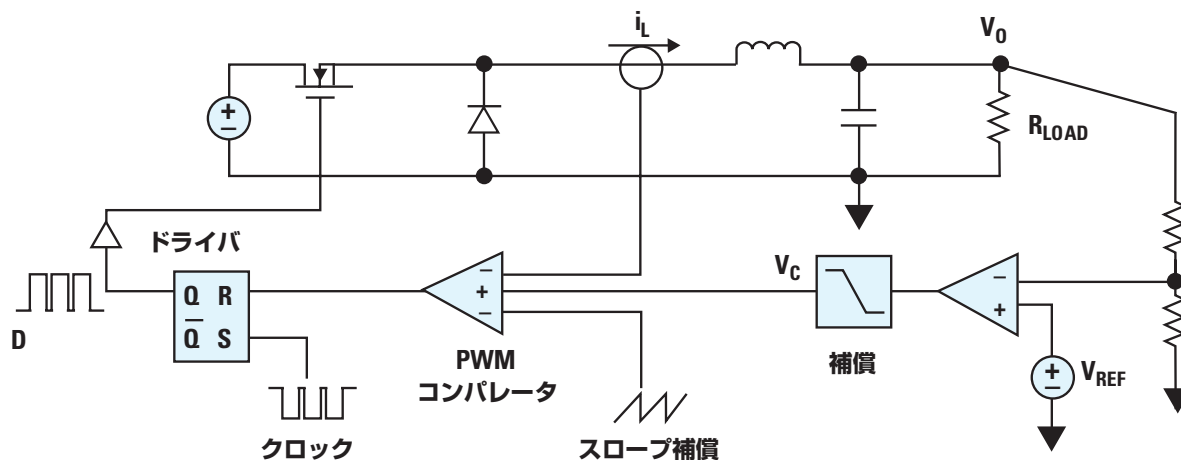


Figure 2: 電流モード制御を備えた降圧型 (バック型) コンバータ (出力電圧とインダクタ電流の両方を検出)

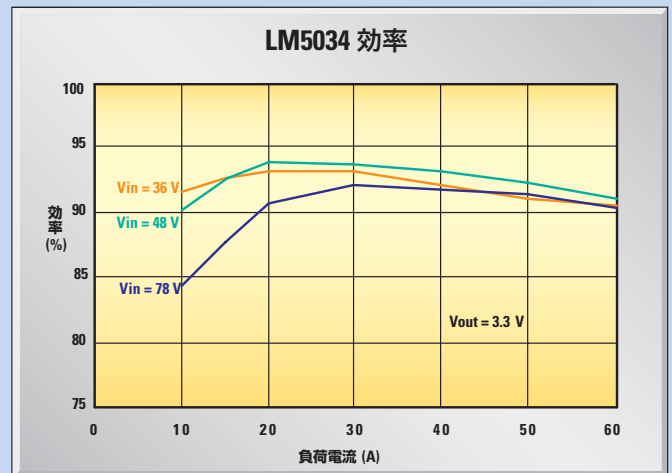
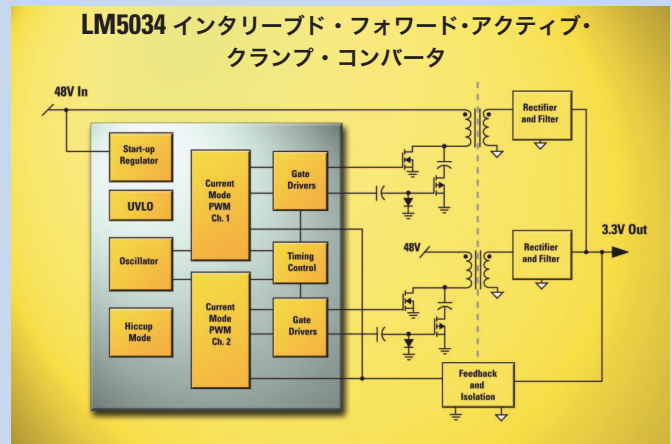
デュアル・インタリーブド・ アクティブ・クランプ電流モード・コントローラ

高集積、高耐圧 LM5034 コントローラ

概要

LM5034 は、独立した 2 系統のフォワード型アクティブ・クランプ DC/DC コンバータ、または 2 つのインタリーブド・パワー段で構成される単一の大電流コンバータのいずれかの制御に必要なすべての機能を搭載した、デュアル回路の電流モード PWM コントローラです。2 つのコントローラ・チャンネルの位相を 180° ずらすことによって入力リップル電流を抑えています。LM5034 は、最高 100V までの広い電圧範囲で動作するスタートアップ・レギュレータと、ピーク 2.5A の強力なシンク電流を供給する複合型ゲート・ドライバ (バイポーラ+CMOS) を内蔵しています。アクティブ・クランプ・ゲート・ドライバのデッド・タイムの調整と、最大 PWM デューティ・サイクルの調整によって、一次側 MOSFET スイッチのストレスを軽減しています。このほか、外部抵抗でスレッシュホールド電圧を設定できる入力アンダーボルテージ・ロックアウト、サイクルごとの電流制限、リスタート遅延時間を設定できる Hiccup モード障害動作、PWM スロープ補償、ソフトスタート、外部同期可能な 2MHz 対応発振回路などを備えています。

200W ~ 500W の DC/DC コンバータにおいて高い効率と電力密度を実現できます。



電流モード制御の内側を探る

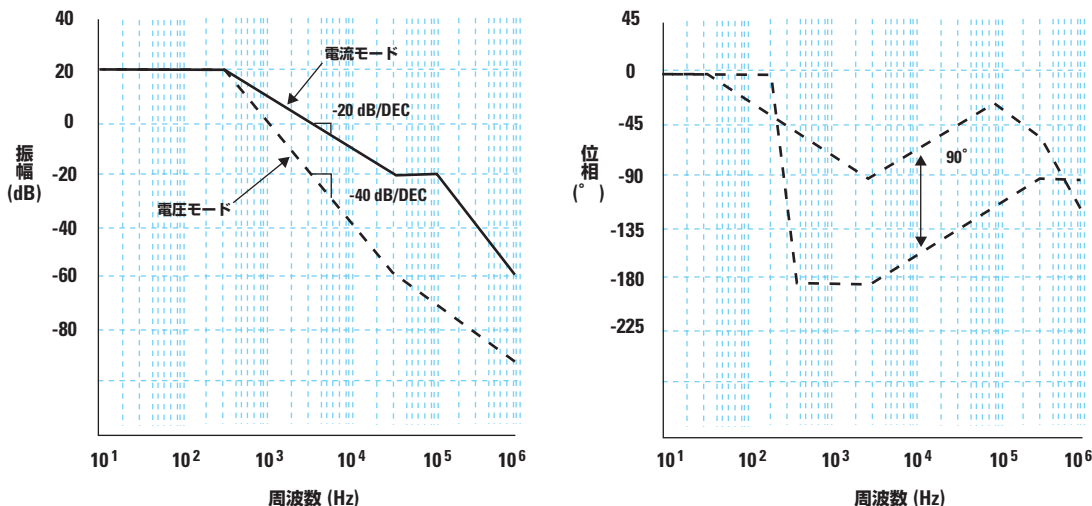


Figure 3: 電圧モード・コンバータと電流モード・コンバータの制御=出力関数を示すボード線図 (電流モード・コンバータは位相が 90°ずれている)

サンプル/ホールドの二次近似によって、電源帯域の理論的な上限であるスイッチング周波数の半分の周波数まで正確な結果が得られます。電流ループのサンプリング効果はあとのセクションで検証します。

ピーク電流モード制御はさまざまな性能向上をもたらします。電流モード制御の主な利点は、優れたライン・レギュレーション、単純な補償回路、大きな負荷変動に対する堅牢性、原理上得られるサイクルごとの電流制限です。ライン・レギュレーションとは入力電圧の変化に起因する出力電圧の変化のことで、出力制御の伝達関数の利得によって影響されます (Figure 1 のパワー段)。電流モード・アーキテクチャでは出力制御伝達関数の利得は V_{IN} とは独立しているため、ライン・レギュレーションはきわめて良好です。一方、電圧モード・アーキテクチャでの出力制御伝達関数の利得は、その特性を表わす式の中に V_{IN} が係数として含まれています。すなわち利得は V_{IN} に直接比例することを意味し、ライン・レギュレーションは良好とはいえません。

電流モード・アーキテクチャでは補償回路の構成はきわめて簡単です。その理由は、出力制御の伝達関数に 2 次のポールを持っている電圧モード・アーキテクチャとは異なり、電流モードは単一ポールを低い周波数にしか持っていないためです (Figure 3)。この性質によって電流モード・アーキテクチャでは 90° の位相シフトが得られます。簡単には、電流ループによってインダクタ電流がモニタおよび制御の対象となっている点が異なっていると説明付けられます。降圧 (バック) コンバータの場合、出力コンデンサと負荷の並列の組み合わせを電流源が供給しているものとしてパワー段を近似でき、単一の低周波ポールが生成されます。電圧モード制御ではインダクタ電流は制御されないため、 L_C フィルタに起因する 2 次のポールをパワー段は持つこととなります。低周波に単一ポールのみを備えた特性のパワー段の場合、補償は、DC 利得、単一ポールのロールオフ、位相進みの単一ゼロのみに必要です (タイプ I、すなわち遅れ補償)。このような補償回路はエラー・アンプと単一のコンデンサと抵抗を使用して簡単に実装可能です。単純な補償が必要であれば、パワー段ポールを打ち消すように補償ゼロを置いて、 T_V の開ループ応答で -20dB/dec ロールオフを達成しても構いません。

広い入力範囲、電流モード、デュアル出力降圧型レギュレータ

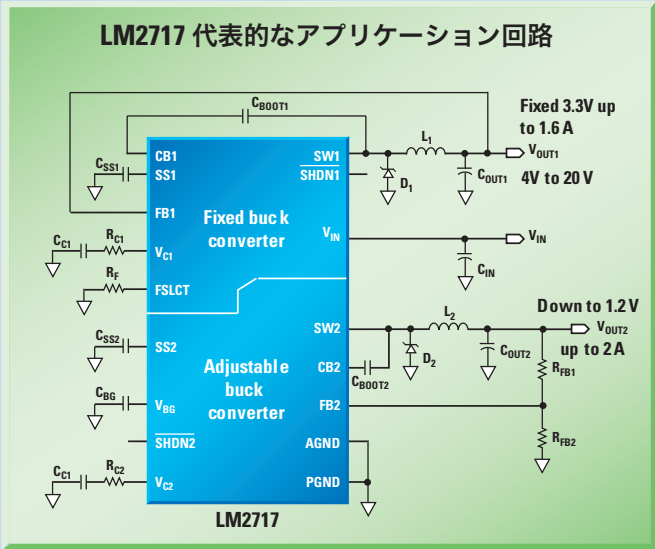
高集積 4V ~ 20V LM2717 デュアル降圧型 DC/DC コンバータ

特長

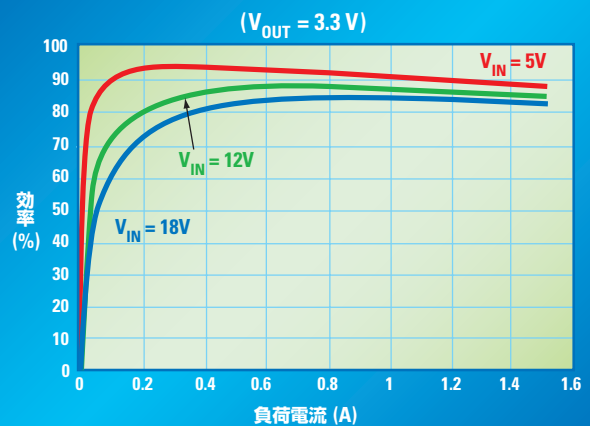
- 全負荷範囲にわたって高効率を実現 (90% typ. @ 1A、 $5V_{OUT}$)。スタンバイ・モード時の消費電流を低減し、バッテリー寿命を延長
- 600kHz までの範囲で設定可能なスイッチング周波数により小型の外付け部品を使用可能
- 高効率を可能にする極めて低い R_{DS-ON} (160m Ω)
- 外部位相補償回路により過渡応答を最適化
- 外部ソフトスタート機能によりアプリケーションに応じて設定可能
- シーケンスを容易にする独立したシャットダウン回路
- 薄型 TSSOP-24 パッケージ

ディスクドライブ、DSP 電源、分散電源レギュレーション、DSL およびケーブル・モデム、通信システムおよびノート PC など最適です。

LM2717 代表的なアプリケーション回路



固定電圧降圧型効率 vs 負荷電流



電流モード制御の内側を探る

補償回路は所望のダイナミック性能を発揮させるためにパワー段の周囲に配置します。ただし、コンバータが連続モード (CCM) と不連続モード (DCM) 動作間の切り替わり点で、パワー段の周波数応答が変化します。CCM ではインダクタ電流は連続していてゼロには到達しませんが、DCM ではインダクタ電流は不連続となりスイッチング周期内のある期間にわたってゼロになります。負荷電流が小さくなると、ある点でコンバータが CCM から DCM へと遷移します。電圧モード制御では、CCM/DCM の境界で、パワー段は 2 次のポール系と 1 次のポール系と遷移することになります。一次系と二次系とでは最適化すべき補償ネットワークはまったく異なります。電流モード・アーキテクチャの大きな利点は、パワー段の伝達関数が DCM と CCM とで似ていることです (低い周波数から中程度の周波数にある一次系)。そのため DCM と CCM で動作する広い負荷範囲にわたって、コンバータのダイナミック性能が劇的に変化することはありません。

電流ループのもう 1 つの利点は電流制限を原理的に備えている点です。インダクタ電流は電流帰還ループですでに検出されているため、回路を追加する必要はありません。

まとめ

電流モードで動作する電源の解析は、多重ループ・アーキテクチャを持っているため簡単ではありません。しかし、電流ループによってインダクタが電流源に変換されることを認識すれば、回路を単純化することが可能となり、電流モード・アーキテクチャのより直感的な理解を助けます。電流帰還ループは電圧モード・コントローラに比べて、いくつかのユニークな利点を備えています。優れたライン・レギュレーション、単純な補償ネットワーク、CCM 動作と DCM 動作との間で変化の少ないダイナミック性能、アーキテクチャ自体が持つ電流制限機能などです。電流モード制御を採用すると、多くの場合、電源の性能向上が図れます。■

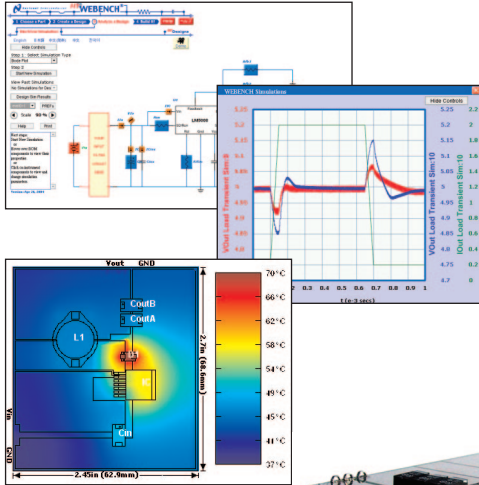
より詳細な情報：

1. **R. B. Ridley**, "A New Small-Signal Model for Current-Mode Control." Ph.D dissertation, November 27, 1990.
2. **D. M. Sable, R. B. Ridley, and B. H. Cho**, "Comparison of Performance of Single-Loop and Current-Injection-Control for PWM Converters which Operate in Both Continuous and Discontinuous Modes of Operation." Proceedings of the IEEE Power Electronics Specialists Conference and Exposition, June 1990.
3. **V. Vorpérian**, "Analysis of Current-Mode Controlled PWM Converters Using the Model of the Current-Controlled PWM Switch." Power Conversion and Intelligent Motion, October 1990.
4. **W. Tang, F. C. Lee, and R. B. Ridley**, "Small- Signal Modeling of Average Current-Mode Control." Applied Power Electronics Conference, February 1992.
5. **V. Vorpérian**, "Fast Analytical Techniques for Electrical and Electronic Circuits." Cambridge University Press, 2002.
6. **R. W. Erickson and D Maksimovi**, "Fundamentals of Power Electronics, second edition." Kluwer Academic Publishers, 2001.

電源回路設計ツール

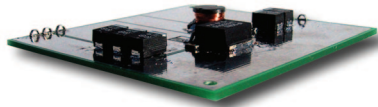
WEBENCH® オンライン設計支援ツール

回路設計からプロトタイプ入手までがオンラインで完了。
設計時間を大幅に短縮できます。



1. 選ぶ
2. 設計する
3. 電源回路を分析する
 - 電気特性シミュレーション
 - 熱特性シミュレーション
4. 製作する
 - カスタム・プロトタイプを注文

webench.national.com/jpn



Analog University®

オンラインで提供している無料のトレーニング・ツールを使用して、アナログの知識と理解を深めてください。

analogU.national.com

どの号もお見逃しなく！

ナショナルの
パワー製品サイト：
power.national.com/jpn

お問い合わせ：
JPN.feedback@nsc.com
0120-666-116



Power Designer のバックナンバーは
ナショナルのサイトでご覧いただけます。

power.national.com/jpndesigner

新しい Signal Path Designer もぜひご購入ください。
オンラインで提供しています。

signalpath.national.com/jpndesigner

ナショナル セミコンダクター ジャパン株式会社
〒135-0042 東京都江東区木場 2-17-16
TEL 03-5639-7300 (大代表) www.national.com/jpn/



ご注意

日本テキサス・インスツルメンツ株式会社（以下TIJといいます）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といいます）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たり、保証もしくは承認することを含みません。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 © 2011, 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℃、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。）

- 直射日光が当たる状態で保管・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℃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