

内部補償付き アドバンスド電流モード(ACM)



Mingyue Zhao
System Engineer

Jiwei Fan
Design Engineer

Nguyen Huy
Application Engineer
Buck DC/DC Switching Regulators

テキサス・インスツルメンツ

新しいDC/DC制御トポロジは、 内部補償を備えたクロック同期の固定周波数変調方法で、 低ノイズ、高速過渡応答、高実装密度ソリューションを実現します。

DC/DC制御モードは、変調方式によって大きく2つのカテゴリに分類されます。

- コンスタント・オン・タイム (COT)：オン時間が V_{IN} 、 V_{OUT} およびスイッチング周波数の関数として決まる方式です。スイッチング周波数は負荷または入力ラインの過渡イベント時に変動することがあります。
- 固定周波数：プリセットしたクロック・オシレータによってスイッチング周波数が決まります。負荷または入力ラインの過渡イベントが発生すると、制御ループによってオン時間パルスが変動することがあります。電圧モードと電流モードがあります。

どちらのDC/DC制御モードにも一長一短があります。例えば、サーバ市場では過渡応答が高速で補償が不要なCOT方式が好まれますが、EMI (Electro-Magnetic Interference: 電磁妨害)/ノイズが大きいという短所があります。一方、電気通信市場では周波数が完全に固定されてEMI/ノイズの小さい電圧/電流モードが好まれますが、過渡応答は遅くなります。また、固定周波数の変調器を使用した電圧/電流モード制御では、安定動作のためにタイプII/III補償回路を使用して十分な帯域幅と位相マージンを確保する必要があるため、ソリューションが複雑になり、サイズやコストが増大します。

電圧/電流モードの外部補償についてはいくつものアプリケーション・ノートやデータシートで詳しく解説されており、制御ループの設計と最適化について非常に詳細な推奨事項が提示されていますが、外部補償を必要としない制御モードの方がよりシンプルで高密度かつ低コストのソリューションを実装できます。また、外部クロックに同期した完全な固定周波数変調と高速過渡応答を両立できれば、従来のCOTユーザーにも低EMI/ノイズ特性の利点をもたらすことができます。

本稿では、固定周波数の変調器を用いた新しい制御トポロジを紹介します。この方式では複雑な外部補償回路が不要で、なおかつ負荷過渡イベントに対して非常に高速なループ応答が得られます。この新しいトポロジはCOTと電圧/電流モードの長所を兼ね備えつつそれぞれの短所を最小限に抑えており、基板占有面積を節約できるほか、扱いやすいトポロジのため生産サイクルの短縮にもつながります。

従来の固定周波数制御モード

電圧モード制御では固定クロック・ランプ波形の電圧ループを1つ使用します。比較的複雑な2ポール2ゼロのタイプIIIネットワークでループを補償し、インダクター-コンデンサ(LC)周波数での位相マージンを 90° 以上に引き上げます。一方の電流モード制御では、電圧ループ以外に内部電流ループも使用してインダクタ電流情報をサンプリングし、パルス幅変調(PWM)コンパレータに入力します。

この内部電流ループによりインダクタを電圧制御電流源に変換し、LC共振周波数のダブルポールによる「ピーク」をDC/低周波数と高周波数の2つの異なるポールに分割します。2つのポールは間隔が十分に離れているため、高周波数のポールは無視できます。この特長により、電流モード制御は実質的に1ポール・システムとなります。外部電圧ループは、よりシンプルなタイプII補償ネットワークを使用して位相マージンを 90° まで引き上げます。

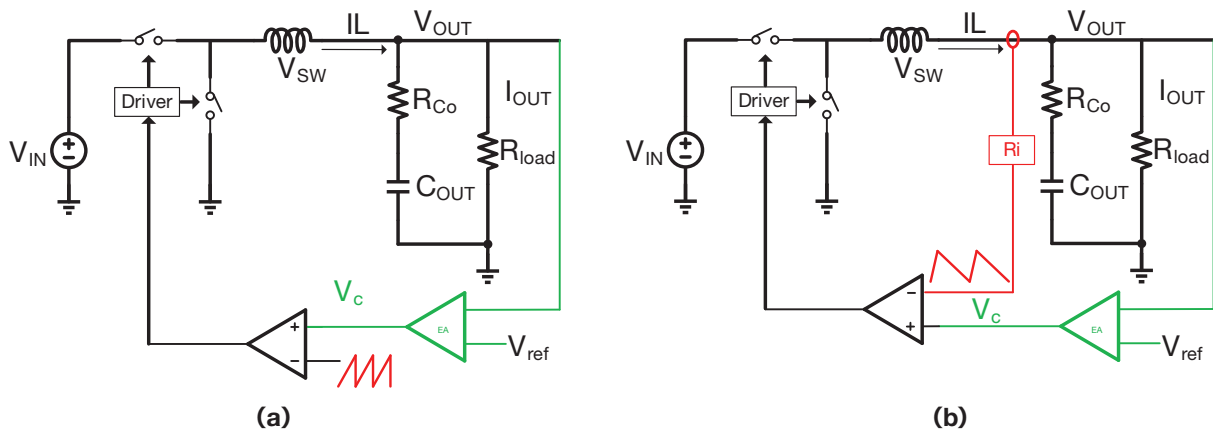


図1：制御構造。電圧モード制御 (a) と電流モード制御 (b)。

図1は、代表的な2つの固定周波数制御方式の基本的な制御構造を示しています。電圧モードには電圧ループが1つあり、電流モードには電圧ループと内部電流ループが1つずつあります。

図2は、タイプⅢおよびタイプⅡ補償ネットワークを示しています。ほとんどの電源回路設計エンジニアは複数の外付けのRとCを調整して補償ネットワークを設計することに慣れてし

まっていますが、その複雑さは無視できるものではありません。設計パラメータを変更する場合は、新しい仕様を満たすように補償回路を設計し直す必要があります。しかも、ただでさえ密集したシステム基板において電源レールの数が増え、電力密度の向上が要求されているため、部品点数を増やすという保守的なアプローチは通用しなくなっています。

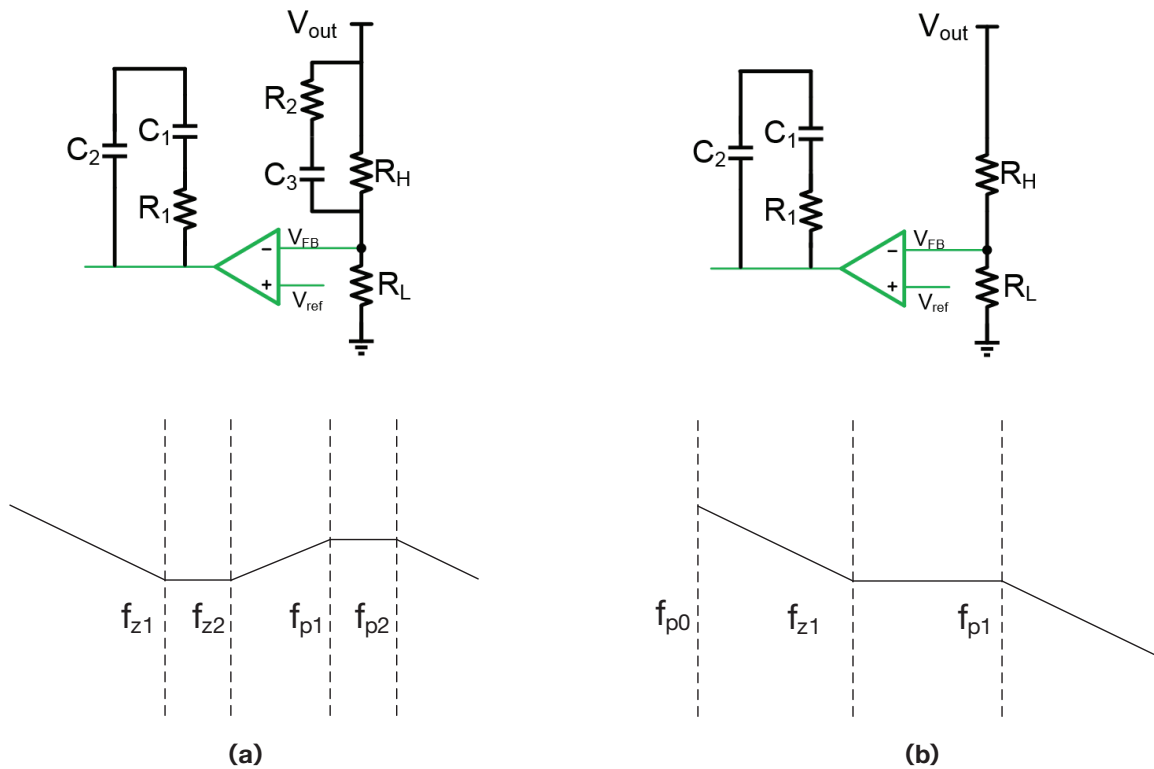


図2：電圧モード制御で使用するタイプⅢ補償と補償曲線 (a)、電流モード制御で使用するタイプⅡ補償と補償曲線 (b)。

電流モード制御の種類と疑似電流モード制御

従来の電流モード制御は、電流情報を検出する方法によってピーク電流モード(PCM)、バレー電流モード(VCM)、平均電流モードの3つに分類されます。この中で最も一般的に広く使用されているのが、図3aに示すPCMです。PCMはインダクタのピーク電流の情報と制御電圧を比較してレギュレーションを実行する方式で、デューティ・サイクルが50%より大きい場合はスロープ補償が必要です。これに対し、図3bに示すVCMはインダクタのバレー電流の情報と制御電圧を比較してレギュレーションを実行する方式で、デューティ・サイクルが50%より小さい場合にスロープ補償が必要です。PCMは平均電流モードに比べ過渡応答が高速で、原理上、サイクルごとの電流制限が可能です。

PCMの特に高周波数動作時における大きな課題の1つとして、検出する電流信号よりもノイズの方が大きいため、電流情報を正しく検出するためには最小オン時間が制約されることが挙げられます。しかも、検出した電流情報を処理してMHzレンジのスイッチング周波数をサポートするには、電流検出およびスロープ補償回路の帯域幅を非常に大きくする必要があります。

図3cに、疑似電流モードの1つであるCOTの変調方式を示します。COTは等価直列抵抗(ESR)とインダクタ電流リップルを使用して疑似インダクタ電流ランプを生成します。従

来的なPCMと比べると、ほぼ瞬時の過渡応答が得られます。COT制御は、定常状態では比較的一定のスイッチング周波数を維持できます。過渡イベントが発生すると、負荷ステップアップ時にスイッチング周波数が上昇し、負荷ステップダウン時に下降することにより、高速な過渡応答を実現しています。スイッチング周波数が変動しても入力および出力電圧によってオン時間は固定されます。ただし、過渡特性の向上にはトレードオフがあります。スイッチング周波数の変動が大きくジッタが比較的大きいため、EMIが発生します。このことは、電気通信市場など低EMIが要求されるアプリケーションで問題となります。

ACM制御

本稿で紹介する新しいACM制御トポロジは、PCM制御方式をベースにしています。ACMは従来のPCMおよびCOT制御の長所をすべて継承しつつ、短所を改善しています。

ACM制御の主な特長と利点は次のとおりです。

- 完全な固定周波数変調：ジッタ特性が改善し、周波数が予測可能なため、EMIフィルタ設計が容易。
- エミュレートしたピーク電流情報と適切なDC電流情報によってポール分割効果を得ることで、ループ帯域幅と位相マージンが改善し、安定性が向上。

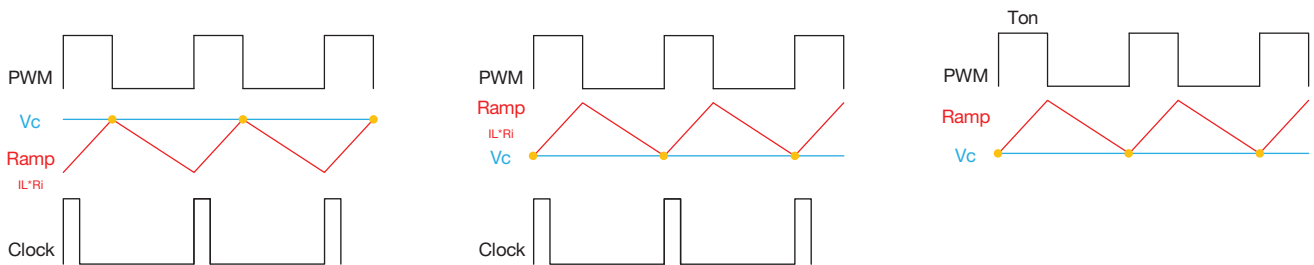


図3：各制御方式の波形。PCM (a)、VCM (b)、疑似電流モードのCOT (c)。

- 信号対ノイズ比 (SN比) が大きく、数MHzのスイッチング周波数が可能。また、エミュレートしたランプ電圧の振幅が大きく、非常に高いノイズ耐性が実現。
- 大電流アプリケーションに対して幅広い範囲の安定性 (FSW、負荷電流など) をカバーした内部補償回路を内蔵。外部補償ネットワークが不要になるため、回路設計が大幅に簡略化されて扱いやすさが向上し、部品点数と基板占有面積も削減。

図4aに、降圧型コンバータの簡略化したACMシステム構造を示します。これは従来の電流モードに似ています。出力帰還電圧と内部基準電圧の誤差がゲイン・ブロックを通過し、制御信号を生成します。図4bに示すように、ゲインは R_{n1} と R_{n2} によって明確に定義されます。制御電圧は式1で計算します。図4cは、 V_{FB} から V_{ctrl} への波形を示しています。

$$V_{ctrl} = \frac{R_{n2} + R_{n1}}{R_{n2}} (V_{REF-INT} - V_{FB}) + V_{COM} \quad (1)$$

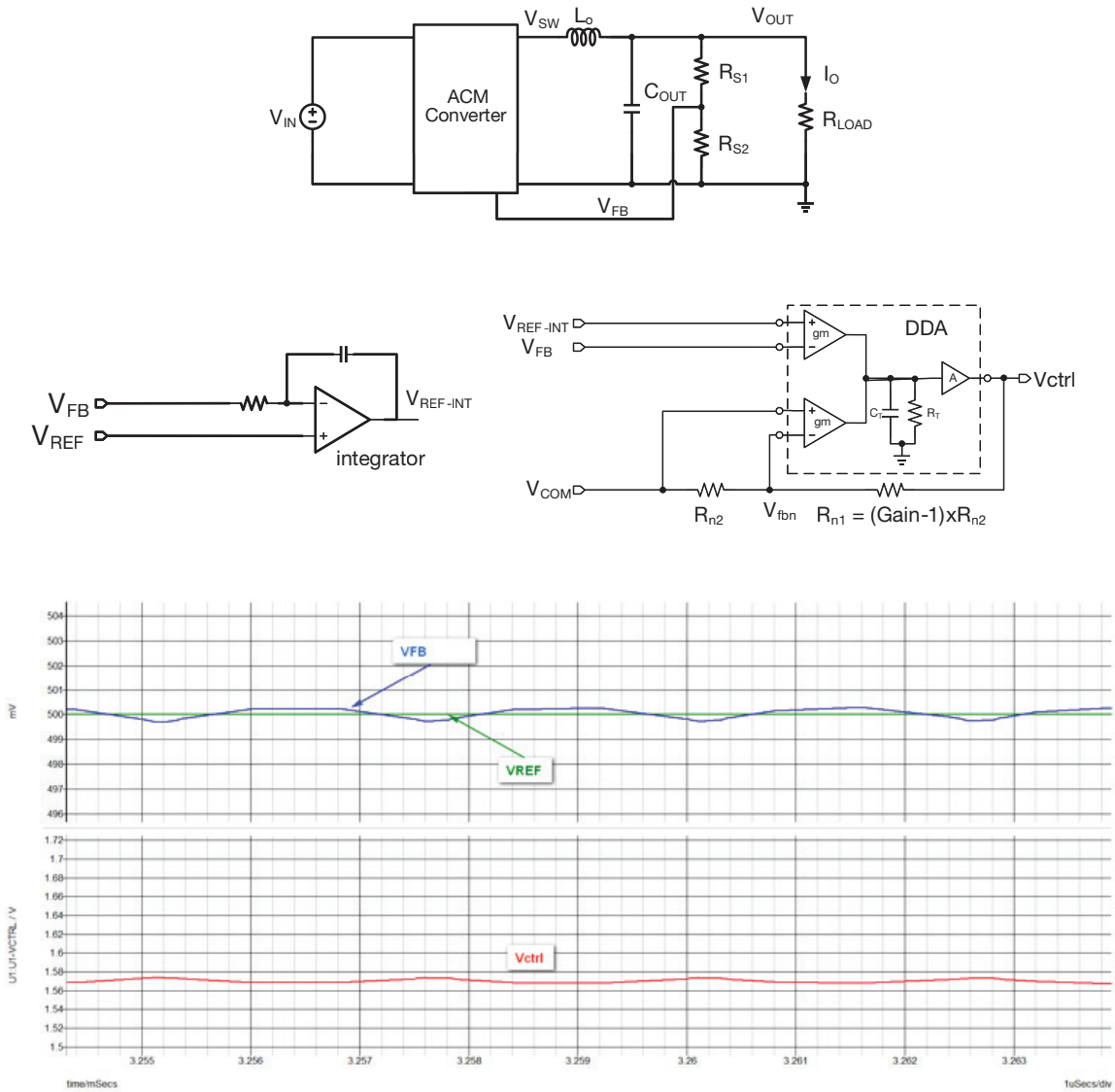


図4：ACMを使用した簡単な降圧型コンバータ (a)、制御電圧用の回路ブロック (b)、 V_{FB} から制御電圧へのシミュレーション波形 (c)。

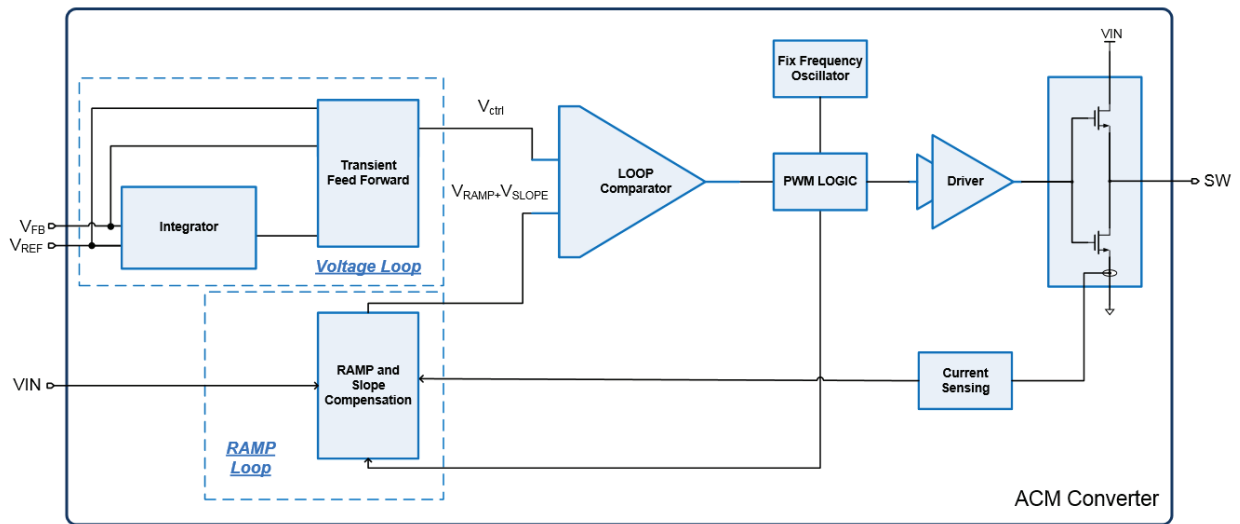


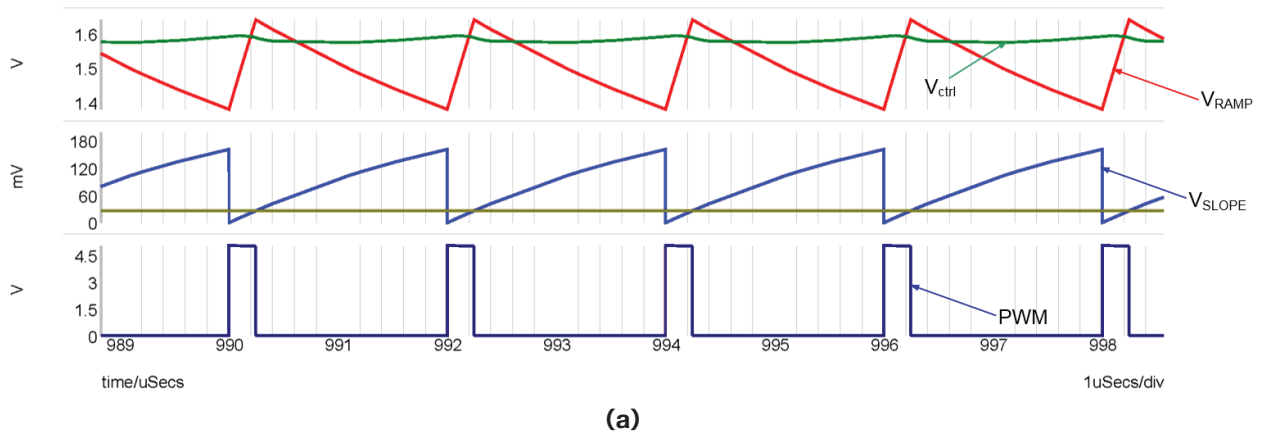
図 5 : ACM 制御のブロック図。

図5に、ACM制御の概略ブロック図を示します。制御コアは、実際の出力電圧誤差情報を用いて制御電圧を生成する電圧ループと、疑似インダクタ電流情報およびごく一部のDC電流情報を含むランプ・ループで構成されます。電圧ループでは、最初に積分器でDC誤差を除去した後、正確にプログラムされたゲインおよびレベル・シフトで信号を増幅し、制御信号を生成します。過渡フィードフォワード・ブロックを追加することで過渡応答を改善しています。ランプ・ループは入力電圧とPWM信号に対してスロープ補償を実行し、エミュレートしたピーク電流信号を生成します。ランプ電圧は十分に大きいため、ノイズの影響をあまり受けません。

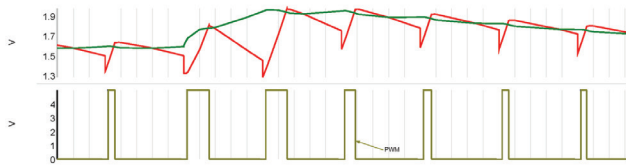
図5に示したループ・コンパレータに、電圧ループからの出力の合計とランプ・ループからの出力の合計を入力します。

正入力の合計が負入力の合計より大きくなると、1回のPWMサイクルが終了します。制御電圧に加え、ローサイドFETから検出したDC電流情報も保持してループ・コンパレータに帰還します。これによりインダクタのQ値の減衰を最適化し、ダブルポール・ピークを軽減します。PWMロジック・ブロックは、プリセットした固定周波数クロックおよびループ・コンパレータの出力に従ってPWM信号を生成します。

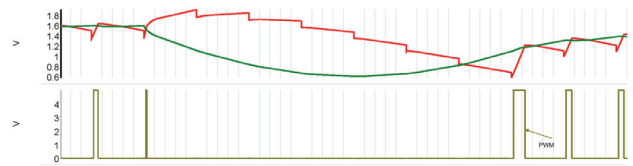
図6に制御信号の波形を示します。ランプ・ジェネレータとスロープ補償を適切にプログラムすると、 V_{SLOPE} は常にランプ電圧のダウンスロープの1/2となり、過渡特性をそれほど犠牲にせずに最適なスロープ補償が得られます。



(a)



(b)



(c)

図6：主要な制御信号の波形。定常状態 (a)、負荷ステップアップ時 (b)、負荷ステップダウン時 (c)。

内部でDC電流を帰還することにより、過渡応答時のループにはもう1つの利点をもたらされます。すなわち、必要十分なDC電流情報を利用することで、制御電圧を最適化できます。これにより低速な積分器による誤差訂正が可能になり、ダ

ブルポール・ピークを減衰させてLC共振周波数における位相の落ち込みを軽減できます。図7は、適切な量のDC情報を使用した場合のシリコン・テスト・データを示しています。DC情報が多すぎると過渡回復時間が長くなります。

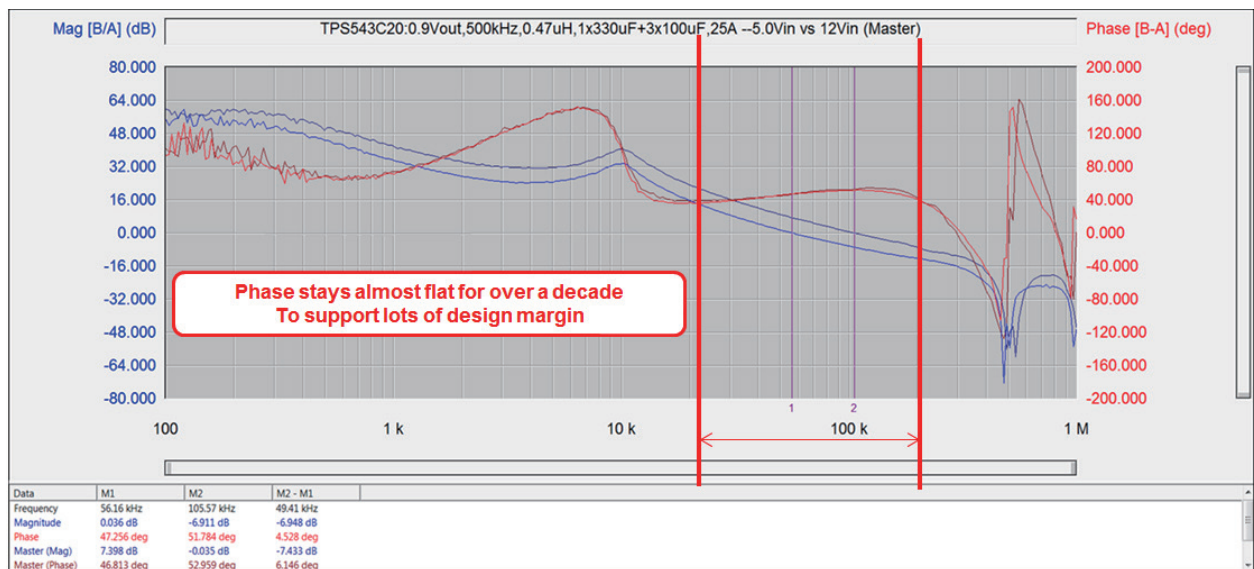


図7：DC電流情報を使用した場合のAC応答。

図8に、ACM制御を実装したTI TPS543C20の過渡応答を示します。負荷ステップアップ時(図8a)、固定周波数制御のためにループは負荷ステップアップ後の最初のパルスのオン時間を延長します。負荷ステップダウン時(図8b)、ループ

は負荷リリース後にパルスを終了します。非同期パルス挿入(API)(図8c)やボディ・ブレーキ(図8d)などの非直線手法を使用するとさらに過渡特性を改善できます。



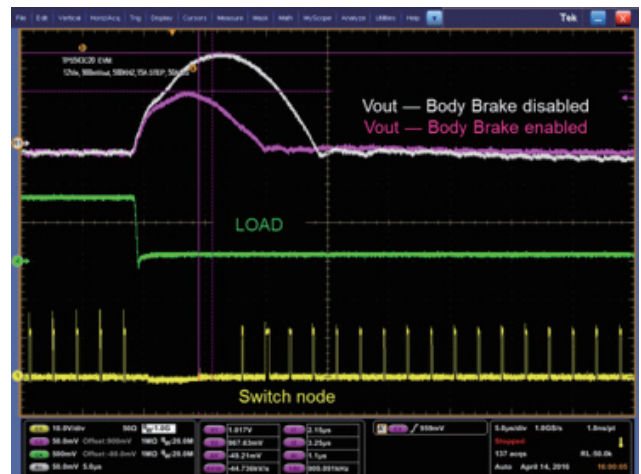
(a)



(b)



(c)



(d)

図8：負荷ステップアップ時の応答 (a)、負荷ステップダウン時の応答 (b)、非同期パルス挿入 (API) 有効/無効の比較 (c)、ボディ・ブレーキ有効/無効の比較 (d)。

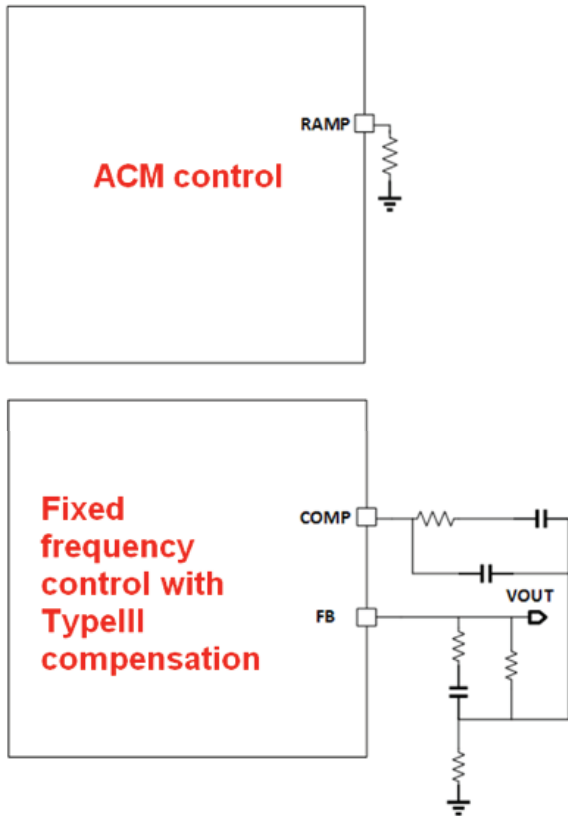


図9：ACM制御の補償と従来の制御に必要なタイプIII補償の例。

従来の電流/電圧モードでは高価なタイプIIまたはタイプIII補償ネットワークが必要なため、回路設計が複雑になり、基板占有面積も大きくなりますが、ACMはグラウンドへの抵抗を1つ使用するだけでLC、周波数および回路設計の変更に合わせて最適化が可能です。図9は、ACMと固定周波数制御方式のそれぞれに必要な補償回路を比較しています。

これまでも外部補償の不要な完全固定周波数コンバータは存在していましたが、これらのほとんどは従来のPCMをベースにして外部補償を回路内部に移動しただけのもので、内部補償は特定のアプリケーション条件 (F_{SW} など) をカバーするように設計および最適化されています。従来のPCMの内部補償ではアプリケーションに応じてさまざまな安定性範囲をカバーする必要があり、特に負荷電流ステップが大きく変化する際に高速な過渡応答を達成しようとすると、内部ループとスロープ補償の最適化が非常に困難になります。表1に、従来のPCMとACMの比較を示します。

	PCM	ACM
電流センシング	<ul style="list-style-type: none"> スイッチング周波数がMHzレンジのアプリケーションでは、150nsでハイサイドFETの電流を検出するのが困難。 抵抗を使って電流を直接検出するためのピンが必要。 	<ul style="list-style-type: none"> DC電流情報をローサイドFETから簡単に検出可能。
スロープ補償	<ul style="list-style-type: none"> インダクタ、V_{OUT} および F_{SW} のパラメータを変化させてスロープ補償を設計/最適化するのが困難。 スロープを大きくすると幅広いアプリケーションをカバーできる一方、ループ応答速度が低下。 	<ul style="list-style-type: none"> 内部ランプのダウンスロープが既知のため、スロープ補償を常にランプのダウンスロープの1/2となるように最適化可能。
ノイズ耐性	<ul style="list-style-type: none"> 実際の電流リップルおよび電流検出回路に直接関係。 	<ul style="list-style-type: none"> ランプ振幅を調整することで十分なノイズ・マージンと低ジッタを達成可能。
補償	<ul style="list-style-type: none"> 電流リップルおよびDC電流情報に直接関係。 システム・アプリケーションの条件に合わせて外部補償の再設計が必要。 	<ul style="list-style-type: none"> ランプ振幅およびDC値が個別に制御されるため、アプリケーションの種類に応じた最適化が容易。 DC電流情報を検出して保持することにより、非常に低速な積分動作による内部補償が可能。

表1：従来のPCMと内部補償付きACMの比較。

まとめ

ACM制御は外部補償の不要なランプ・ベースのPCM制御で、内部で生成したランプにより完全な固定周波数を達成します。電圧ループとランプ・ループのAC部とDC部を個別に最適化することにより、従来のPCMに比べ優れた過渡応答を実現します。

この制御モードは、外部補償なしで予測可能な周波数を必要とするアプリケーションに最適なソリューションを提供します。高性能な25A [TPS543B20](#)および40A [TPS543C20](#) 降圧型コンバータ・ファミリは、ACMを初めて実装した製品です。このファミリはスタックすることにより最大80Aのポイント・オブ・ロード (POL) をサポートでき、内部補償回路による扱いやすさ、固定周波数による低EMIノイズ、完全な差動センシングによる最高の V_{OUT} セットポイント精度などの利点を備えています。

参考文献

1. Nowakowski, Richard. "[Control-Mode Quick Reference Guide.](#)" 2017.

著者紹介

- Mingyue Zhao: 2012年にTI入社。降圧型DC/DCスイッチング・レギュレータ担当システム・エンジニア。テキサス大学ダラス校にて電気工学の修士号を取得。
- Jiwei Fan: 2009年にTI入社。降圧型DC/DCスイッチング・レギュレータ担当デザイン・エンジニア。ノースカロライナ州立大学にて電気工学の博士号を取得。
- Nguyen Huy: 2015年にTI入社。降圧型DC/DCスイッチング・レギュレータ担当アプリケーション・エンジニア。バージニア工科大学にて電気工学の修士号を取得。



TIの設計情報およびリソースに関する重要な注意事項

Texas Instruments Incorporated ("TI")の技術、アプリケーションその他設計に関する助言、サービスまたは情報は、TI製品を組み込んだアプリケーションを開発する設計者に役立つことを目的として提供するものです。これにはリファレンス設計や、評価モジュールに関する資料が含まれますが、これらに限られません。以下、これらを総称して「TIリソース」と呼びます。いかなる方法であっても、TIリソースのいずれかをダウンロード、アクセス、または使用した場合、お客様(個人、または会社を代表している場合にはお客様の会社)は、これらのリソースをここに記載された目的にのみ使用し、この注意事項の条項に従うことに合意したものとします。

TIによるTIリソースの提供は、TI製品に対する該当の発行済み保証事項または免責事項を拡張またはいかなる形でも変更するものではなく、これらのTIリソースを提供することによって、TIにはいかなる追加義務も責任も発生しないものとします。TIは、自社のTIリソースに訂正、拡張、改良、およびその他の変更を加える権利を留保します。

お客様は、自らのアプリケーションの設計において、ご自身が独自に分析、評価、判断を行う責任がお客様にあり、お客様のアプリケーション(および、お客様のアプリケーションに使用されるすべてのTI製品)の安全性、および該当するすべての規制、法、その他適用される要件への遵守を保証するすべての責任をお客様のみが負うことを理解し、合意するものとします。お客様は、自身のアプリケーションに関して、(1) 故障による危険な結果を予測し、(2) 障害とその結果を監視し、および、(3) 損害を引き起こす障害の可能性を減らし、適切な対策を行う目的で、安全策を開発し実装するために必要な、すべての技術を保持していることを表明するものとします。お客様は、TI製品を含むアプリケーションを使用または配布する前に、それらのアプリケーション、およびアプリケーションに使用されているTI製品の機能性を完全にテストすることに合意するものとします。TIは、特定のTIリソース用に発行されたドキュメントで明示的に記載されているもの以外のテストを実行していません。

お客様は、個別のTIリソースにつき、当該TIリソースに記載されているTI製品を含むアプリケーションの開発に関連する目的でのみ、使用、コピー、変更することが許可されています。明示的または黙示的を問わず、禁反言の法理その他どのような理由でも、他のTIの知的所有権に対するその他のライセンスは付与されません。また、TIまたは他のいかなる第三者のテクノロジーまたは知的所有権についても、いかなるライセンスも付与されるものではありません。付与されないものには、TI製品またはサービスが使用される組み合わせ、機械、プロセスに関連する特許権、著作権、回路配置利用権、その他の知的所有権が含まれますが、これらに限られません。第三者の製品やサービスに関する、またはそれらを参照する情報は、そのような製品またはサービスを利用するライセンスを構成するものではなく、それらに対する保証または推奨を意味するものでもありません。TIリソースを使用するため、第三者の特許または他の知的所有権に基づく第三者からのライセンス、あるいはTIの特許または他の知的所有権に基づくTIからのライセンスが必要な場合があります。

TIのリソースは、それに含まれるあらゆる欠陥も含めて、「現状のまま」提供されます。TIは、TIリソースまたはその仕様に関して、明示的か暗黙的にかかわらず、他のいかなる保証または表明も行いません。これには、正確性または完全性、権原、続発性の障害に関する保証、および商品性、特定目的への適合性、第三者の知的所有権の非侵害に対する黙示的保証が含まれますが、これらに限られません。

TIは、いかなる苦情に対しても、お客様への弁済または補償を行う義務はなく、行わないものとします。これには、任意の製品の組み合わせに関連する、またはそれらに基づく侵害の請求も含まれますが、これらに限られず、またその事実についてTIリソースまたは他の場所に記載されているか否かを問わないものとします。いかなる場合も、TIリソースまたはその使用に関連して、またはそれらにより発生した、実際の、直接的、特別、付随的、間接的、懲罰的、偶発的、または、結果的な損害について、そのような損害の可能性についてTIが知らされていたかどうかにかかわらず、TIは責任を負わないものとします。

お客様は、この注意事項の条件および条項に従わなかったために発生した、いかなる損害、コスト、損失、責任からも、TIおよびその代表者を完全に免責するものとします。

この注意事項はTIリソースに適用されます。特定の種類の資料、TI製品、およびサービスの使用および購入については、追加条項が適用されます。これには、半導体製品(<http://www.ti.com/sc/docs/stdterms.htm>)、評価モジュール、およびサンプル(<http://www.ti.com/sc/docs/sampterm.htm>)についてのTIの標準条項が含まれますが、これらに限られません。