

固定周波数 DCS-Control: 高速過渡応答とクロック同期

Chris Glaser

Senior Member, Technical Staff

はじめに

コンスタント オンタイム (COT) 制御トポロジの一般的な欠点は、スイッチング周波数が変動することと、外部クロックとの同期が不可能なことです。パワー セーブ モードへのシームレスな移行が可能なテキサス・インスツルメンツの固定周波数直接制御 (固定周波数 DCS-Control) トポロジは、過渡応答が高速な COT DCS-Control トポロジをベースに構築されており、発振器を追加することにより固定周波数動作とオプションのクロック同期機能を実現します。この組み合わせにより、高速過渡応答と特定のノイズ要件または周波数要件の両方を必要とするアプリケーションが可能になります。

他にも差動リモート センシング、外部制御ループ補償、スタックカビリティなどの特長があり、車載インフォテインメントや先進運転支援システム (ADAS)、通信機器の光学モジュール、産業用試験 / 測定、医療、航空宇宙と防衛など、ノイズに敏感なアプリケーションで使用されている大電流プロセッサの厳しい過渡要件に対応できます。この記事では、固定周波数 DCS-Control トポロジの概要を紹介し、その優れた過渡応答、一定で同期可能なスイッチング周波数、低リップルのパワー セーブ モード、大電流向けのスタックカビリティについて説明します。

DCS-Control トポロジの概要

図 1 に、DCS-Control トポロジの基本ブロック図 [1] を示します。出力電圧センス (VOS) ピンと帰還 (FB) ピンの両方の信号を制御ループに入力することで、適切なレギュレーションを実現します。VOS ピンから出力電圧を直接供給してランプを生成し、それをコンパレータに入力することで、トポロジの高速過渡応答を実現します。このコンパレータの出力が、即座に動作点に影響を与えます。FB ピンは低帯域幅のパスで、高精度の DC 設定点レギュレーションを行います。VOS ピンの AC パスと FB ピンの DC パスを DCS-Control 内で組み

合わせることで、正確な出力電圧を供給し、負荷過渡にも迅速に応答します。

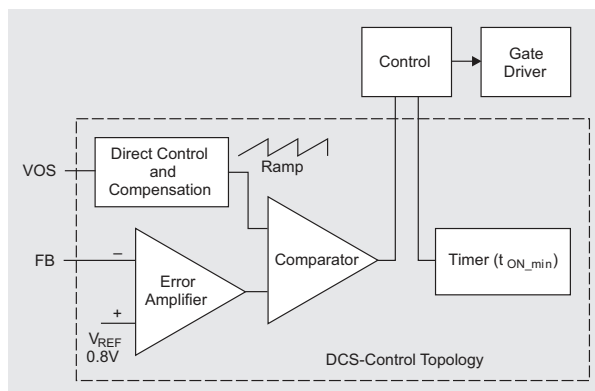


図 1. DCS-Control トポロジのブロック図

DCS-Control などの COT トポロジでは、オン時間はタイマで設定されます。タイマでこのオン時間を入力電圧と出力電圧に合わせて調整することで、パルス幅変調 (PWM) モードでほとんどのデューティ サイクルにおいて、適度に一定の周波数が得られます。式 1 に例を示します。ここで、416ns は 2.4MHz スwitching 周波数の周期です。

$$t_{ON} = \frac{V_{OUT}}{V_{IN}} \times 416ns \quad (1)$$

ただし、特定の周波数帯域内または帯域外での動作を必要とするアプリケーションには、このスイッチング周波数の精度では不十分です。これらのアプリケーションでは通常、電圧または電流モード制御などのように、発振器を使用してスイッチング周波数を設定する必要があり、場合によってはシステム クロック信号と同期できる機能も必要となります。リファレンス [2] に、DCS-Control の周波数変動の詳細な例が示されています。

固定周波数 DCS-Control トポロジの概要

図 2 に、15A の **TPS62873** 降圧コンバータに実装されている固定周波数 DCS-Control トポロジの基本的なブロック図を示します。発振器が追加されているため、電圧または電流モード制御と同様に、スイッチング周波数 (f_{SW}) を直接設定できます。発振器の入力を制御ループに供給することにより、スイッチング周波数をクロック信号に同期させることもできます。

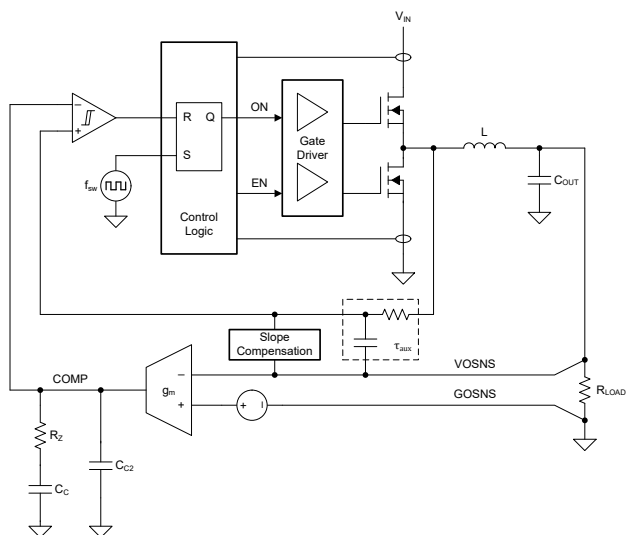


図 2. 発振器、差動リモートセンシング、トランスコンダクタンスアンプ、ヒステリシスコンパレータを搭載した **TPS62873** の固定周波数 DCS-Control トポロジのブロック図。

通常大電流デバイスに使用される固定周波数 DCS-Control は、差動リモートセンシングを使用します。このデバイスは VOSNS ピンと GOSNS ピンの間の電圧を調整します。これらのピンはプリント基板 (PCB) 上に配線され、出力電圧を負荷で直接検出します。負荷で検出することにより、PCB のプレーンとトレースによる DC 電圧降下だけでなく、デバイスと負荷の間のインダクタンスによる遅延も克服して補償します。これら両方の特性は、負荷範囲全体と負荷過渡時に厳密なレギュレーションを維持するために重要です。

差動リモートセンシング信号はトランスコンダクタンスアンプ (g_m) に入力され、この差が出力電圧の設定点と比較されます (簡略化のため、図 2 ではこの設定点を GOSNS 信号と直列の電圧源として示しています)。COMP ピン上のこのアンプの出力は、グラウンドとの間の Type II (1 つの極、1 つのゼロ) ネットワークで補償されます。

この外部補償機能を使用すると、出力容量が大きく負荷過渡が大きいシステムから、出力容量が非常に小さく負荷過渡が小さいか負荷過渡のない小型のシステムまで、あらゆるシステムのニーズに合わせて制御ループを最適化できます。DCS-Control とは異なり、高速帰還パスは、コンパレータに直ちに供給されるのではなくこのアンプを通過し、補償部品の選択によってゲインを増減できます。より強力な過渡応答が必要な場合は、ゲインを大きくし、出力容量を追加します。アプリケーションで大きな過渡電圧が発生しない場合は、サイズを最小にするため、ゲインを小さくして出力容量を最小限にします。

アプリケーションのニーズに応じて過渡応答を調整できるため、従来の DCS-Control トポロジに比べて、より厳しい過渡状況でも厳密なレギュレーションが可能になり、テキサス・インスツルメンツの Jacinto™ J7 [3] や MobileEye の EyeQ6 [4] のようなプロセッサコアの厳しい要件を満たすことができます。図 3 に、3 つの **TPS62876-Q1** 降圧コンバータをスタックした場合に、46A の負荷過渡を実現しながら、出力電圧が 0.875V 設定ポイントの $\pm 2\%$ 以内に維持されることを示します。

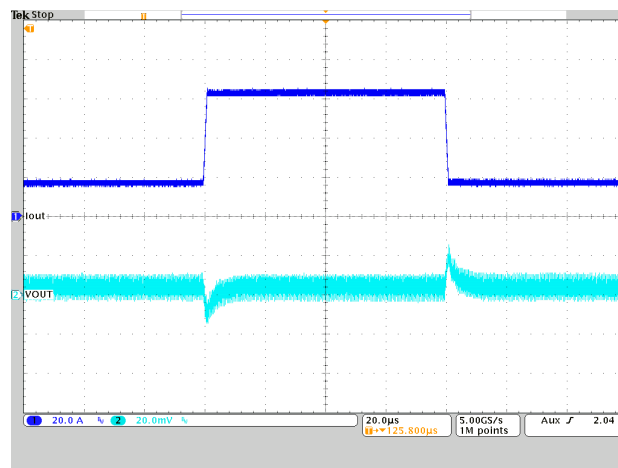


図 3. 固定周波数 DCS-Control の過渡応答は厳しい負荷過渡用に調整可能であり、優れたレギュレーションを実現。

ヒステリシスコンパレータは、COMP ピンの出力と、 τ_{aux} 部品によって生成されるインダクタ電流の複製を比較し、スロープ補償を追加して低調波発振を防ぎます。コンパレータの出力とクロックがセット / リセット (SR) ラッチ回路を駆動し、ゲートドライバとデバイスの動作を制御します。発振器は、スイッチ

ングが正確にスイッチング周波数で発生するように制御します。

セット / リセット ラッチは、制御ブロックの詳細な動作を単純化したもので、DCS-Control の高速のヒステリシス特性を維持するために実装されているため、負荷過渡に即座に 응답できます。たとえば、ロード ダンプの過渡時 (出力電圧が上昇) には、ヒステリシス コンパレータの出力がクロック信号よりも優先されます。このコンバータは、必要に応じてハイサイド MOSFET のオフ時間を延長し、最小のオーバーシュートで出力電圧を下げます。これは、標準的なピーク電流モード制御を本質的に改善します。標準的なピーク電流モード制御では、クロック サイクルごとにスイッチングが行われ、出力が大きすぎる場合でも出力にエネルギーが継続的に追加されます。このコンバータは、出力電圧のオーバーシュートを削減することで、電源のコストとサイズに大きく影響する出力容量を大幅に低減します。

スイッチング周波数の変動

高速過渡応答を維持し、それを COMP ピンの外部補償によってさらに改善および調整できることに加え、固定周波数 DCS-Control では、厳格な許容誤差仕様の固定スイッチング周波数が得られます。スイッチング周波数は、オン タイムで間接的に制御されるのではなく、発振器で直接設定されるため、周波数の許容誤差はデバイス固有のデータシートで規定されます。表 1 と表 2 に、固定周波数 DCS-Control トポロジを使用した TPS62876-Q1 のスイッチング周波数仕様と、DCS-Control を使用した TPS62869 降圧コンバータの標準周波数仕様の比較を示します。

パラメータ	テスト条件	最小値	代表値	最大値	単位	
f _{sw}	スイッチング周波数	f _{sw} = 1.5MHz, PWM 動作	1.35	1.5	1.65	MHz
		f _{sw} = 2.25MHz, PWM 動作	2.025	2.25	2.475	
		f _{sw} = 2.5MHz, PWM 動作	2.25	2.5	2.75	
		f _{sw} = 3MHz, PWM 動作	2.7	3	3.3	

表 1. TPS62876-Q1 は固定周波数 DCS-Control トポロジを使用し、全温度範囲と全入力電圧範囲にわたって、4 つのスイッチング周波数オプションで ±10% の許容誤差を規定。

パラメータ	テスト条件	最小値	代表値	最大値	単位
f _{sw}	PWM スwitchング周波数	I _{OUT} = 1A, V _{OUT} = 0.9V	2.4		MHz

表 2. TPS62869 は DCS-Control を使用し、標準スイッチング周波数のみを規定。

図 4 と図 5 に、アプリケーション内でのスイッチング周波数の実際の変動と負荷電流の関係を示します。どちらのデバイスもパワー セーブ モードをサポートしており、負荷電流が小さい場合に周波数を低下させます (両方のグラフの左側)。PWM モードの動作 (大電流時) においては、固定周波数 DCS-Control ではスイッチング周波数が正確に制御されますが、DCS-Control ではスイッチング周波数は負荷の増加に伴ってわずかに増加します。強制 PWM モード (図に表示なし) においては、固定周波数 DCS-Control では無負荷まで周波数が一定に維持されます。

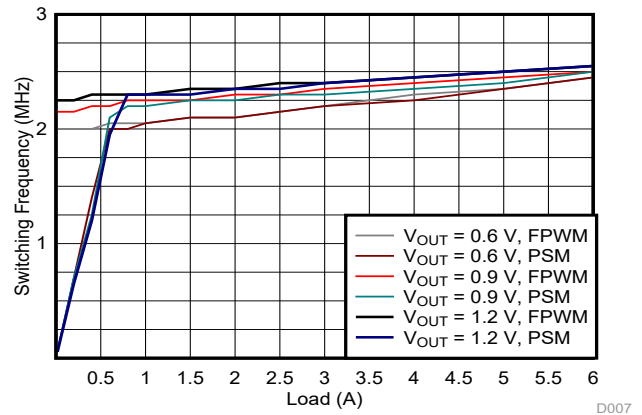


図 4. DCS-Control を使用する TPS62869 のスイッチング周波数の変動。

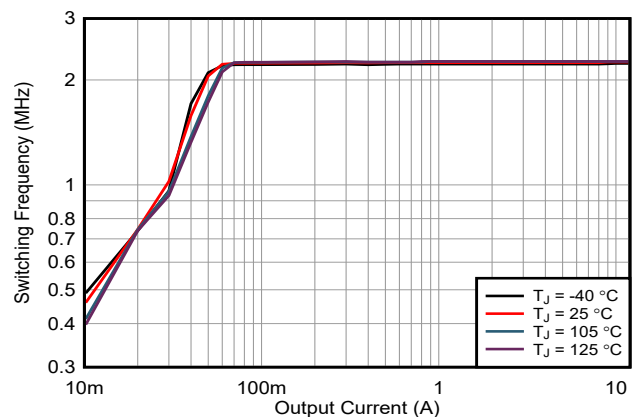


図 5. 固定周波数 DCS-Control を使用する TPS62876-Q1 パワーモジュールのスイッチング周波数の変動。

パワーセーブモード以外でも、負荷過渡が強い場合および最小オン時間に達した場合の2つの状況では、スイッチング周波数が発振器で設定された周波数から外れる可能性があります。重負荷を印加したときにハイサイド MOSFET がスイッチング周期よりも長時間オンになり、重負荷を除去したときにスイッチング周期よりも長時間オフになることがあります。どちらの場合でも、オン時間またはオフ時間が長くなったために、1つ以上のパルスが存在しなくなります。

ハイサイド MOSFET の最小オン時間に達した場合、固定周波数 DCS-Control と DCS-Control のどちらも、最小オン時間を満たし、出力電圧レギュレーションを維持するために、スイッチング周波数を低下させます。これは、必要な最小オン時間を満たすために周波数を維持しながら出力電圧を上昇させる一部の電流モードデバイスよりも優れた性能です。固定周波数 DCS-Control と DCS-Control はどちらも同じ方法でスイッチング周波数を低下させますが [2]、固定周波数 DCS-Control は最小オン時間が短いため、最小オン時間に達して周波数が低下する動作条件は少なくなります。たとえば、**TPS62876-Q1** では、5V 入力電圧での動作温度範囲全体における最小オン時間の最大値は 44ns と規定されています。このように最小オン時間が短いため、車載、航空宇宙、防衛などの低出力電圧アプリケーションにおいて、システム全体で必要とされる高周波数領域で動作できます。

低リップルのパワーセーブモード

ほとんどのアプリケーションでは、軽負荷時の出力電圧リップルを低減し、過渡応答を改善するため、固定周波数 DCS-Control デバイスを強制 PWM モードで動作させますが、このトポロジは軽負荷時の効率を高めるためにパワーセーブモードをサポートします。目標スイッチング周波数を維持し、低負荷電流まで低リップルを実現するため、固定周波数 DCS-Control ではパワーセーブモードでのオン時間が短縮されますが、DCS-Control ではオン時間は一定に保たれます。どちらのトポロジも、インダクタ電流が不連続になるとパワーセーブモードに移行し、PWM モードよりもリップルがわずかに高くなります。

固定周波数 DCS-Control のパワーセーブモードでは、同じオン時間で周波数を下げる代わりに、同じ周波数を維持しながらオン時間を短縮します。オン時間を短縮すると、出力への

エネルギーが少なくなるため、DCS-Control と比較してリップル電圧が低くなります。オン時間が最小値に達すると、パルスをスキップすることにより最軽負荷の出力電力をさらに減少させます。パルスをスキップすると、周波数も低下します。

図 4 および **図 5** に、パワーセーブモードでの周波数低減の違いが示されています。固定周波数 DCS-Control デバイスは負荷が約 60mA を下回ると周波数を低下させ、DCS-Control デバイスは約 500mA から周波数の低下を開始します。これらの電流値はデバイスや動作条件によって異なりますが、固定周波数 DCS-Control では低負荷電流までスイッチング周波数が維持されるので、リップルが低くなります。

スタッキング (並列接続) による負荷電流の増加 (または減少)

プロセッサの世代が変わると、多くの場合、プロセッサ コアはより大電流を必要とするようになります。その一方で、アプリケーションによっては、特定のプロセッサの機能をすべて使用しない場合や、同じプロセッサファミリ内の低性能プロセッサを使用する場合があるため、電流要件は低くなります。電源の電流能力を増加および減少の両方向にスケールするには、電流要件の変化に応じて電源相を追加または削除できるスタックブル (並列接続可能) ソリューションが必要です。

固定周波数 DCS-Control デバイスはスタッキングをサポートしています。具体的な実装の詳細はデバイスファミリによって多少異なりますが、カレントシェア (電流共有)、相インターリーブ、インターフェイスの簡素化などの機能が含まれます。

カレントシェアは、COMP ピンを使用して達成されます。COMP ピンは本質的に小信号の動作点であるため、スタッキングされたすべてのデバイスでこのピンの信号を共有すると、固定周波数 DCS-Control で通常 10% 未満のカレントシェア精度を達成できます。

相インターリーブは、専用の SYNC_OUT ピンによって達成されます。このピンは、スタック内の次のデバイスの MODE/ SYNC 入力ピンに接続されます。SYNC_OUT は、リップルを相殺するために自動的に位相シフトされます。このシンプルなデジタイズチェーン接続により、スタック内のすべてのデバイスが同じ周波数で動作し、単相設計よりもリップルが低くなります。多数のコンバータをスタッキングして良好な位相バランス

を実現でき、スタック内のデバイス数を指定する必要はありません。

I2C を介してスタックと接続する場合、出力電圧の調整、動作モードの変更、フォルトレジスタのリードバックを行うための通信は、スタック内の各デバイスに対してではなく、プライマリデバイスに対してのみ発生します。1 つのデバイスと接続することにより、読み取りおよび書き込みの数と配線が必要な PCB 信号の数の両方が削減されるため、通信オーバーヘッドと PCB 配線が大幅に簡素化されます。

まとめ

固定周波数 DCS-Control は、高速過渡応答とスタックビリティにより最新のプロセッサの厳しい負荷過渡要件と出力電流要件に対応でき、固定周波数動作と同期によりノイズに敏感なアプリケーションに最適です。車載用 ADAS とインフォテインメント、光学モジュール、産業用試験と測定、医療、航空宇宙と防衛のアプリケーションで有益です。調整可能な外部制御ループ補償により、最小の出力容量で高速過渡応答がサポートされるため、電源システムのサイズとコストを削減できます。

参考資料

1. テキサス・インスツルメンツ: 『[高効率、低リップルの DCS-Control で PWM / パワーセーブへのシームレスな遷移を実現](#)』
2. テキサス・インスツルメンツ: 『[DCS-Control トポロジにおける周波数変動の理解](#)』
3. テキサス・インスツルメンツ: 『[TPS6594133A-Q1 PMIC とデュアル HCPS コンバータを使用したテキサス・インスツルメンツ Jacinto SoC ファミリの絶縁電源グループへの電源供給](#)』
4. テキサス・インスツルメンツ: 『[MobileyeEyeQ6L – セミ ディスクリート パワー ツリー](#)』

5. Canan Priess 著『[ADAS プロセッサに 100A を超える電流を供給する方法](#)』TI E2E™ 設計サポート フォーラム 技術記事、2023 年 6 月 6 日

重要なお知らせ:ここに記載されているテキサス・インスツルメンツ社および子会社の製品およびサービスの購入には、TI の販売に関する標準の使用許諾契約への同意が必要です。お客様には、ご注文の前に、TI 製品とサービスに関する完全な最新情報のご入手をお勧め致します。TI は、アプリケーションに対する援助、お客様のアプリケーションまたは製品の設計、ソフトウェアのパフォーマンス、または特許の侵害に対して一切責任を負いません。ここに記載されている他の会社の製品またはサービスに関する情報は、TI による同意、保証、または承認を意図するものではありません。

すべての商標は、それぞれの所有者に帰属します。

重要なお知らせと免責事項

TI は、技術データと信頼性データ(データシートを含みます)、設計リソース(リファレンス・デザインを含みます)、アプリケーションや設計に関する各種アドバイス、Web ツール、安全性情報、その他のリソースを、欠陥が存在する可能性のある「現状のまま」提供しており、商品性および特定目的に対する適合性の黙示保証、第三者の知的財産権の非侵害保証を含むいかなる保証も、明示的または黙示的にかかわらず拒否します。

これらのリソースは、TI 製品を使用する設計の経験を積んだ開発者への提供を意図したものです。(1) お客様のアプリケーションに適した TI 製品の選定、(2) お客様のアプリケーションの設計、検証、試験、(3) お客様のアプリケーションに該当する各種規格や、その他のあらゆる安全性、セキュリティ、規制、または他の要件への確実な適合に関する責任を、お客様のみが単独で負うものとし、

上記の各種リソースは、予告なく変更される可能性があります。これらのリソースは、リソースで説明されている TI 製品を使用するアプリケーションの開発の目的でのみ、TI はその使用をお客様に許諾します。これらのリソースに関して、他の目的で複製することや掲載することは禁止されています。TI や第三者の知的財産権のライセンスが付与されている訳ではありません。お客様は、これらのリソースを自身で使用した結果発生するあらゆる申し立て、損害、費用、損失、責任について、TI およびその代理人を完全に補償するものとし、TI は一切の責任を拒否します。

TI の製品は、[TI の販売条件](#)、または [ti.com](#) やかかる TI 製品の関連資料などのいずれかを通じて提供する適用可能な条項の下で提供されています。TI がこれらのリソースを提供することは、適用される TI の保証または他の保証の放棄の拡大や変更を意味するものではありません。

お客様がいかなる追加条項または代替条項を提案した場合でも、TI はそれらに異議を唱え、拒否します。

郵送先住所 : Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265
Copyright © 2024, Texas Instruments Incorporated