

Application Note

LM5177 4 スイッチ昇降圧コントローラによる動的な電流トラッキング



Stefan Schimonsky, Hassan Jamal

概要

LM5177 は、入力電圧範囲が広い、同期、非反転型の昇降圧コントローラです。入力電源が調整された出力電圧よりも高い、低い、または等しい場合に、調整された出力電圧を必要とするアプリケーションに適しています。このデバイスに搭載されている機能により、動的な電流トラッキングも実装でき、システムによる電流の制御や、外部入力に基づく電流の調整が可能になります。

目次

1 はじめに.....	2
2 デジタル・フィルタの設計.....	3
3 ATRK 機能のプラント伝達関数.....	3
4 ATRK プラント用アナログ・コントローラ.....	4
5 Z 変換と差分方程式.....	6
6 アプリケーションと実装.....	7
6.1 ソフトウェアのフローチャート.....	7
6.2 アプリケーションのデモ.....	7
6.3 DTRK を使用した実装.....	8
7 まとめ.....	9
8 関連資料.....	10

図の一覧

図 1-1. アナログ電圧トラッキング機能を使用した動的電流制御.....	2
図 2-1. アナログ電圧トラッキングの閉ループ.....	3
図 3-1. プラント伝達関数.....	3
図 4-1. ATRK プラント用アナログ・コントローラ.....	4
図 4-2. 設計したアナログ・コントローラの周波数解析.....	5
図 4-3. ATRK ループ・ゲインの周波数解析.....	5
図 6-1. ソフトウェアのフローチャート.....	7
図 6-2. 設計したハードウェアによる動的な電流調整の結果.....	8

商標

すべての商標は、それぞれの所有者に帰属します。

1 はじめに

LM5177 昇降圧コントローラは、幅広い入出力電圧に対応してカスタマイズ可能な DC 電源の設計に使用され、さらに、入力 / 出力電流制限機能を備えています。この昇降圧コントローラには、平均電流制限、ピーク電流制限、動的な電流制限など、DC 電源電流を制御するための多くの機能が組み込まれています。本アプリケーション・ノートでは、アナログ電圧トラッキング機能を使用した LM5177 による動的な電流制限機能の実装について説明します。コントローラの動的な電流制限機能によって、電源の動作やハードウェアの変更に関係なく、電源が出力電流を動的に調整できるようになります。コントローラの他の電流制限機能は、電源動作中は静的であり、部品の選択によって異なります。したがって、動的な電流制限機能は、可変電流制限を持つ定電流源を必要とする多くのアプリケーションにとって重要な機能です。たとえば、動作制限が広範に及ぶローパワー LED モジュールの輝度を調整することが可能です。さらに、動的な電流制限は、ワイヤレスの誘導チャージャや、温度補償が必要な家電製品の定電流源として重要な役割を果たします。

アナログ電圧トラッキングを使用したコンバータの出力電流に対する動的制御は、電圧制御電流源に似ています。アナログ電圧トラッキングの場合、昇降圧コントローラの ATRK ピンに外部アナログ信号が印加され、このピンに印加される電圧レベルに応じて出力電圧が変化します。出力電圧の変化は、出力電流制限の変化に反映されます。この機能を使用可能にするには、ATRK ピンに印加されるアナログ信号が LM5177 の V_{ref} よりも小さい必要があります。ATRK 信号によってエラー・アンプのリファレンス値が変化し、これによって電力段 PWM のデューティ・サイクルが変化します。アナログ電圧トラッキングを使用した動的な電流制限のブロック図を 図 1-1 に示します。

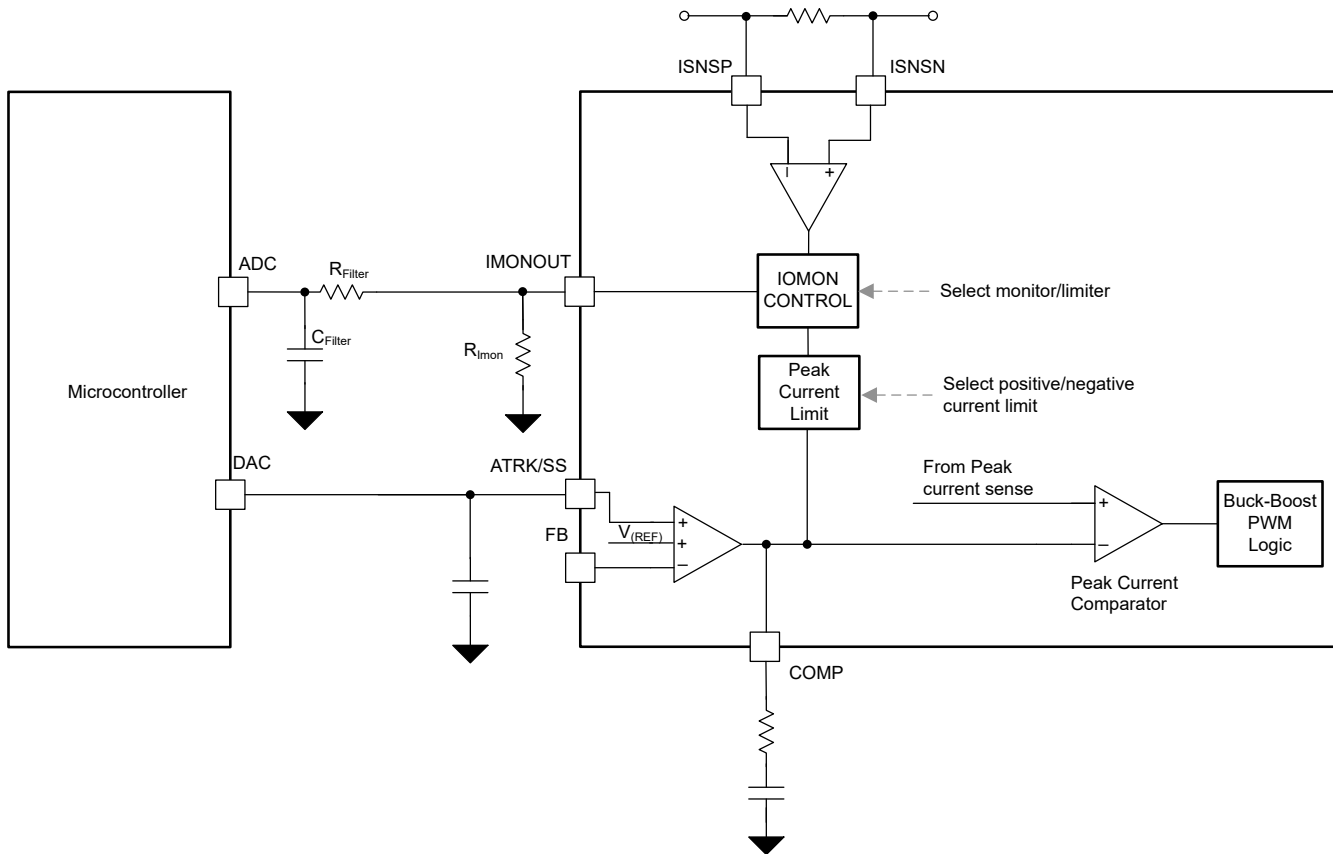


図 1-1. アナログ電圧トラッキング機能を使用した動的電流制御

多くのアプリケーションでは、負荷電流を変化させる必要があるため、出力電流を調整するコントローラが必要になります。このため、図 1-1 では、ATRK ピンのアナログ・トラッキング信号を生成するためにマイコンが使用されています。出力電流の変化を検出するために、電力段の出力にシャント抵抗が使用されます。抵抗値により、最大測定電圧 50mV まで電流検出制限を調整できます。センス電圧がトランスコンダクタンス・アンプに供給され、対応する電流は、プルダウン抵抗を使用して昇降圧コントローラの IMONOUT ピンの出力で電圧レベルとして測定されます。この値は、マイコン ADC の最大リファレンス電圧に従って選択されます。本アプリケーション・ノートでは、抵抗値はそれぞれ 18mΩ と 12kΩ に設定されています。これらの値は、最大測定出力電流 2.77A とそれに対応する値 1.5V に相当します。

これらの値は、選択したマイコンの要件に応じて適用できます。この場合、MSP-EXP430FR2355 開発キットを使用します。次に、IMONOUT ピンで生成されたアナログ電圧がマイコン ADC に接続され、アナログ信号がデジタル値に変換されます。マイコンはデジタル・フィルタを使用して、デジタル・エラー信号を生成します。このデジタル・エラー信号は、マイコン DAC を使用して、アナログ・エラー信号として供給されます。マイコンのデジタル・フィルタの設計手順については、次節で説明します。

2 デジタル・フィルタの設計

デジタル・フィルタは、アナログ・フィルタのデジタル化バージョンから導出された差分方程式です。マイコンのデジタル・フィルタを評価するには、最初にアナログ・フィルタを設計する方が簡単です。アナログ・フィルタの設計は、プラント伝達関数に依存するものです。プラント伝達関数は、マイコン内のフィルタで補償される必要のある、非制御システムの動的特性を示しています。これに対して、アナログ電圧トラッキング機能のプラント伝達関数は、ATRK 回路と電力段を備えた昇降圧コントローラで構成されています。アナログ電圧トラッキングの制御ループを 図 2-1 に示します。V_{ref} はコントローラのリファレンス値であり、この値を変更すると、出力電圧が調整されてコンバータの新しい出力電流制限が設定されます。

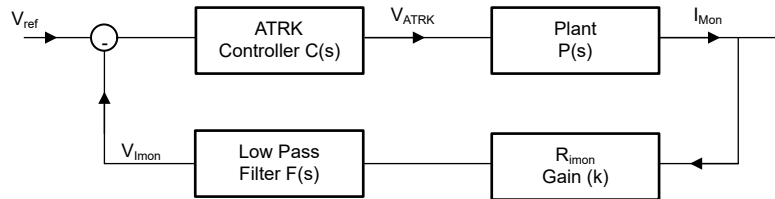


図 2-1. アナログ電圧トラッキングの閉ループ

3 ATRK 機能のプラント伝達関数

アナログ電圧トラッキングのプラント伝達関数は、ATRK ピンと IMONOUT ピンの間のシステムのステップ応答によって駆動されます。図 3-1 の応答は、プラントが二次システムであることを示しています。図 3-1 の応答グラフから導かれるプラント伝達関数は、式 1 で表されます。式は、プラント、ゲイン、ローパス・フィルタの組み合わせで、応答グラフから二次システムの伝達関数が導出できます。

$$PL(s) = \frac{V_{Imon}}{V_{ATRK}} = K \times F(s) \times P(s) = \frac{2.188 \times 10^8}{s^2 + 1.447 \times 10^4 s + 2.73 \times 10^8} \quad (1)$$

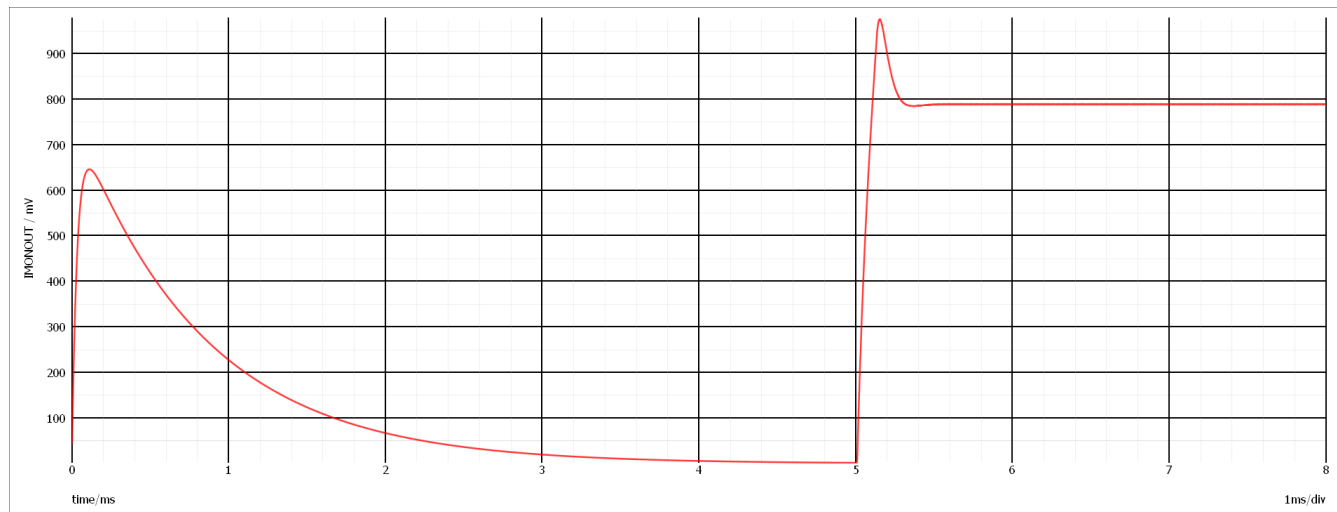


図 3-1. プラント伝達関数

4 ATRK プラント用アナログ・コントローラ

ATRK プラントの応答を改善し、出力電流を調整するには、最適なコントローラを使用して閉ループ・システムを設計する必要があります。プラント極の影響を補償するには、オペレーショナル・トランスコンダクタンス・アンプ (OTA) タイプ 2 コントローラを選択します (『DC/DC コンバータ用オペアンプと OTA を使用したタイプ II とタイプ III 補償器の説明』を参照してください)。このコントローラには 2 つの極と 1 つの零点があります。アナログ電圧トラッキングプラント用に設計したアナログ・コントローラを、[図 4-1](#) に示します。ATRK プラント用コントローラを設計する際は、コントローラの帯域幅を COMP ピンの補償の帯域幅よりも小さくする必要がありますことに注意してください。

さらに、コントローラはナイキスト基準 (コントローラの帯域幅がマイコン ADC サンプル周波数の半分未満であること) を満たす必要があります。したがって、マイコン ADC からのサンプル周波数が 10kHz に設定されている場合、3.7kHz のフィルタ帯域幅が選択されています (COMP ピンの補償の帯域幅は 135kHz)。コントローラの伝達関数は、[式 2](#) で表されます。開発されたアナログ・コントローラは、0Hz と 3.6923kHz に極があり、1.0256kHz に零点があります。コントローラの周波数解析を [図 4-2](#) に示します。

$$C(s) = g_m \frac{R_{19}C_{13}s + 1}{R_{19}C_{13}C_{14}s^2 + (C_{14} + C_{13})s} \quad (2)$$

$R_{19} = 15\text{k}\Omega$ 、 $C_{13} = 65\text{nF}$ 、 $C_{14} = 20\text{nF}$ 、 $g_m = 600\mu\text{S}$ の場合

$$C(s) = \frac{V_{ATRK}}{V_{Error}} = \frac{585s + 600000}{0.02437s^2 + 90s} \quad (3)$$

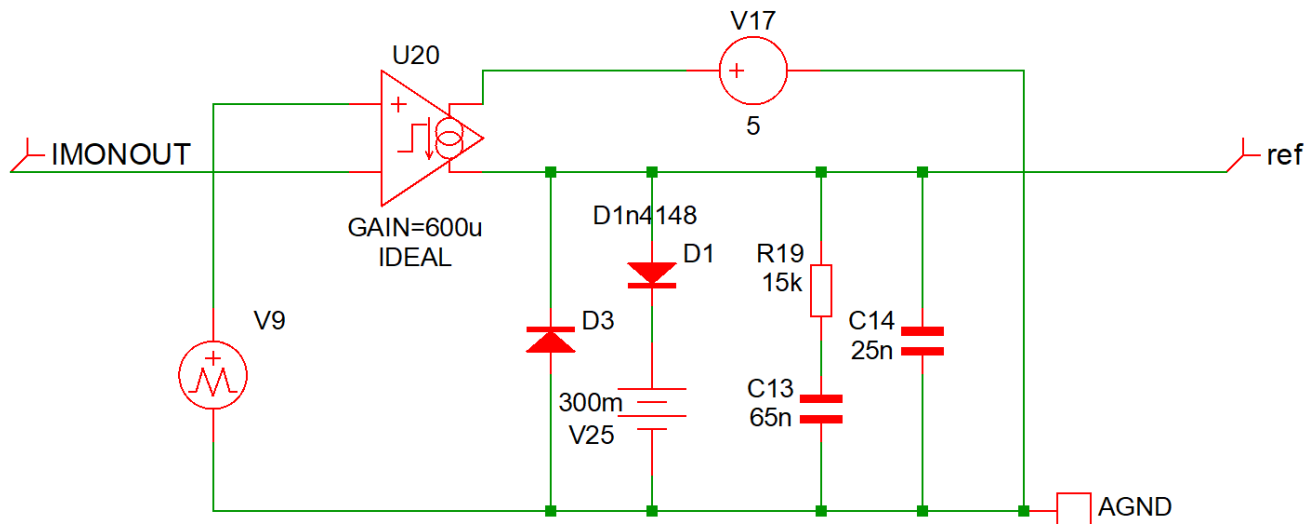


図 4-1. ATRK プラント用アナログ・コントローラ

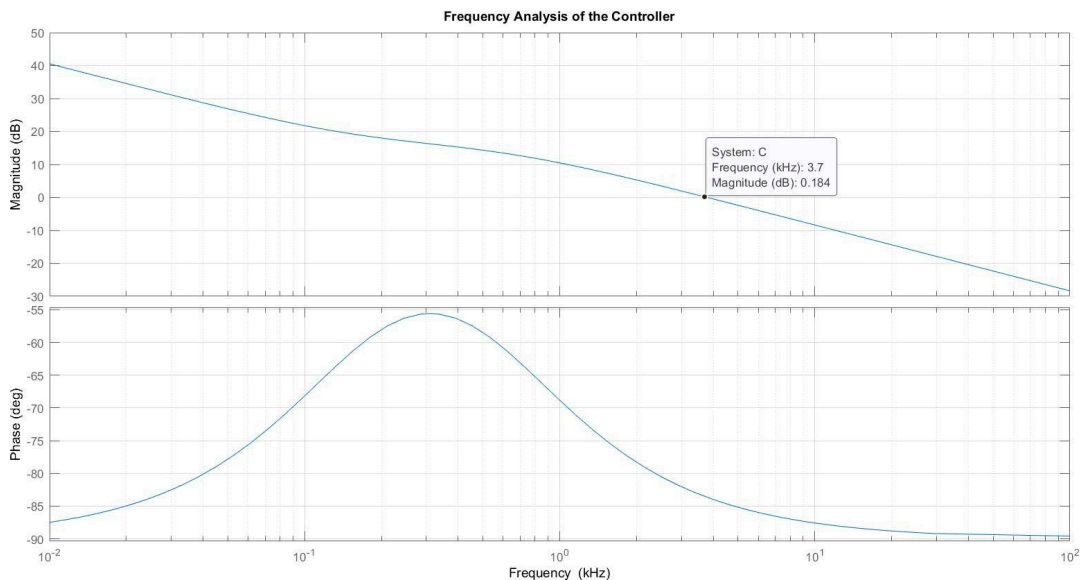


図 4-2. 設計したアナログ・コントローラの周波数解析

設計したコントローラを使用したアナログ電圧トラッキング・システムのループ・ゲイン $O(s) = C(s) \times P(s) \times K$ は式 4 で表されます。ループ・ゲインの周波数解析を 図 4-3 に示します。

$$O(s) = \frac{V_{I\text{mon}}}{V_{\text{ref}}} = \frac{1.28 \times 10^{11}s + 1.313 \times 10^{14}}{0.02437s^4 + 442.7s^3 + 7.957 \times 10^6s^2 + 2.457 \times 10^{10}s} \quad (4)$$

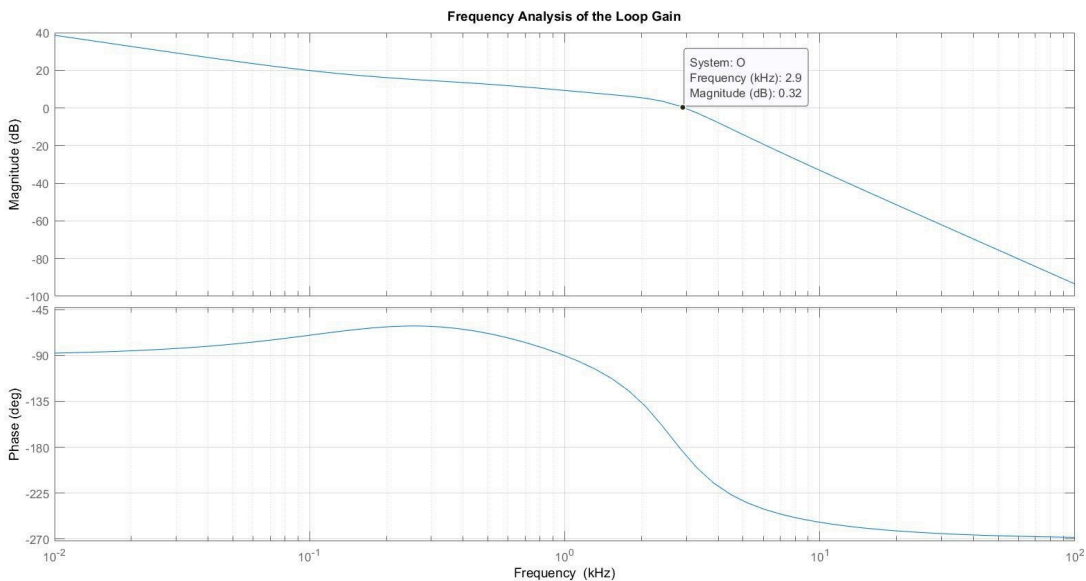


図 4-3. ATRK ループ・ゲインの周波数解析

5 Z 変換と差分方程式

前セクションで定式化したコントローラの伝達関数は連続時間ドメインにあります。ただ、実際のマイコンはサンプリングに限界があるため、離散時間ドメインでしか動作しません。したがって、デジタル制御コードの場合、既存の連続時間ドメイン・モデルを離散時間ドメインに変換する必要があります。このため、双一次変換が使用されます。双一次変換は s ドメインの伝達関数を離散時間 z ドメインに変換し、z ドメインは離散時間数列を複素周波数 z 平面で表現します。コントローラの等価 z ドメイン伝達関数は **式 5** で表されます。双一次変換のサンプリング周期は、ADC サンプリング周波数 10kHz に基づいて、100 マイクロ秒です。

$$H(z) = \frac{2.116z - 1.91}{z^2 - 1.691z + 0.6913} \quad (5)$$

コントローラの z ドメイン伝達関数をデジタル・フィルタの式 (差分方程式) に変換するために、H (z) で逆 z 変換が実行されます。逆 z 変換から算出されるデジタル・フィルタの式は、**式 6** で表されます。この場合、k は離散時間、X はセンサ値、Y はコントローラの出力値になります。

$$Y(k) = 1.691 \times Y(k-1) - 0.6913 \times Y(k-2) + 2.116 \times X(k-1) - 1.91 \times X(k-2) \quad (6)$$

6 アプリケーションと実装

6.1 ソフトウェアのフローチャート

図 6-1 に、ソフトウェアの全体的な動作のフローチャートを示します。デモ・ソフトウェアは新しい ADC 値が利用可能になった後、ウェークアップしてフィルタ計算を実行します。ADC 変換は RTC イベントによってトリガされます。残りの時間中、MSP430 はローパワー・モード 3 でスリープ状態になります。

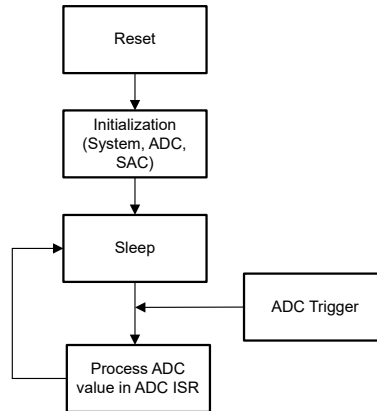


図 6-1. ソフトウェアのフローチャート

6.2 アプリケーションのデモ

設計したデジタル・コントローラで ATRK 閉ループの応答を検証するために、IQmath を使用してフィルタをマイコンに実装しています。図 6-2 の結果は、コンバータの出力負荷電流が動的な電流制限でスムーズに遷移していることを示しています。このテストでは、動的な電流制限の目標値として、0.5A、1A、1.5A、2A を選択しています。V_{Imon} には昇降圧のスイッチング周波数の高調波が含まれているため、IMONOUT ピンの出力にはローパス・フィルタの使用が推奨されます。この例のスイッチング周波数は 395kHz です。ローパス・フィルタの静電容量の値は、コントローラの応答に大きな影響を及ぼすため、小さい値にすることが推奨されます。このテストでは、ローパス・フィルタの値は C_f = 5 pF、R_f = 3 MΩ としています。このフィルタのカットオフ周波数は 10kHz です。この解析では、式 1 で定義されたプラント伝達関数にローパス・フィルタの伝達関数が含まれています。

テストのスコープ・プロットを 図 6-2 に示します。設計したデジタル・コントローラによる昇降圧コントローラの ATRK 機能の動作が実証されています。スコープ・プロットに示されているように、電流制限は 500ms ごとに上述の選択された目標値に変化し、その遷移に対する応答が ATRK 波形と負荷電流 (I_{Load}) 波形に示されます。

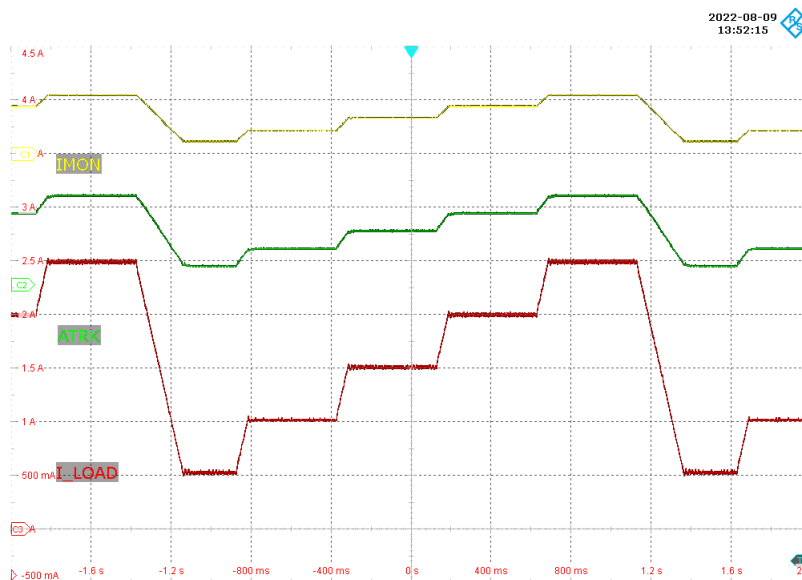


図 6-2. 設計したハードウェアによる動的な電流調整の結果

6.3 DTRK を使用した実装

本アプリケーションは、ATRK 入力の代わりに DTRK を使用して実装することもできます。この場合、高分解能を実現するために高速 PWM が必要になります。高分解能タイマを搭載した MSP430F5172 を使用することで、最大 256MHz の PWM クロック・タイマ分解能を実現できます。最小周波数が 100kHz の場合でも、2560 ステップとなり、約 11 ビットに相当します。

7 まとめ

ここまでの結果を考慮すると、アナログ電圧トラッキングを使用する動的な電流制限は、昇降圧コントローラの効率的で信頼性の高い機能であるということになります。ATRK 機能が昇降圧コントローラの動作から独立しているため、電源設計者はコンバータの出力負荷電流を非同期的に制御できます。ATRK ループ用に設計したデジタル・コントローラの応答は、ADC サンプルング周波数と分解能が高いマイコンを使用することで改善できます。さらに、マイコン DAC の分解能は ATRK 閉ループの安定性において重要な役割を果たすため、高分解能 DAC が推奨されます。これとは別に、COMP ピンの補償の帯域幅を広げることで、デジタル・コントローラの応答性を向上させることができます。これによって、デジタル・コントローラの帯域幅の選択範囲を拡大できます。

8 関連資料

- テキサス・インスツルメンツ、『[LM5177 80V、広い VIN 双方向 4 スイッチ昇降圧コントローラ](#)』データシート
- テキサス・インスツルメンツ、『[MSP430FR235x、MSP430FR215x ミクスト・シグナル・マイクロコントローラ](#)』データシート
- テキサス・インスツルメンツ、『[32KB フラッシュ、2KB SRAM、10 ビット ADC、コンパレータ、DMA、16 ビット高分解能タイマ搭載、25MHz マイコン \(MCU\)](#)』データシート
- テキサス・インスツルメンツ、『[MSP430FR2355 LaunchPad™](#)』開発キット
- テキサス・インスツルメンツ、『[DC/DC コンバータ用オペアンプと OTA を使用したタイプ II とタイプ III 補償器の説明](#)』アプリケーション・ノート
- 『[このステップ応答図から二次の伝達関数を求めるには？](#)』
- テキサス・インスツルメンツ、『[PWM 制御ループの設計に対するデジタル・テクノロジーの適用](#)』
- テキサス・インスツルメンツ、『[MSP-IQMATHLIB 固定小数点 Math ライブラリ、MSP 用](#)』

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](https://www.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 © 2023, Texas Instruments Incorporated