

**LM1770,LM1771,LM3100,LM3150,LM3151,
LM3152,LM3153,LM5007,LM5008,LM5009,
LM5010**

*Application Note 1481 Controlling Output Ripple and Achieving ESR
Independence in Constant On-Time (COT) Regulator Designs*



Literature Number: JAJA296

コンスタント・オンタイム (COT) 方式のレギュレータにおける出力リップルの制御と ESR インピーダンスの確保

National Semiconductor
Application Note 1481
Craig Varga
2006 年 9 月



コンスタント・オンタイム (COT) 方式のレギュレータにおける出力リップルの制御と ESR インピーダンスの確保 AN-1481

設計のポイント

これまで発表されてきた電圧レギュレータの制御方式の中で、おそらくヒステリシス・レギュレータがもっともシンプルな回路です。出力電圧がリファレンス電圧を下回るとスイッチをオンにし、出力がリファレンスより先ずかくなるとスイッチをオフするという単純な制御で動作します。出力リップルは、ゆえに、上側リファレンス・スレッショルドと下側スレッショルドの差、つまりヒステリシス振幅の直接の関数になります。これ以上単純な構成は想像するのが難しいくらいですが、単純化は予想されるとおり性能面に問題をもたらします。

ヒステリシス方式の最大の欠点は、入力電圧の変化に伴ってスイッチング周波数が大きく変わる点です。この問題の改善を試みた方式がコンスタント・オンタイム制御 (COT) と呼ばれるもので、周波数制御が劇的に良くなる一方で、回路はそれほど複雑にはなりません。ワンショット・タイマをシグナルパスに挿入します。ワンショットの時間の長さを入力電圧の逆数に設定します。オンタイムの設定には V_{in} 側に抵抗をひとつ追加するだけです。結局のところ、ヒステリシス制御回路であることに変わりはありませんので、帰還ピンにはある程度のリップル電圧が必要です。上側スレッショルドは不要となり、設定されたオンタイムが代役を担います。ただ

し、下降する出力電圧からターンオン・ポイントを識別できるように、下側スレッショルドには十分な出力リップルが存在していなければなりません。

ただし、リップル成分は本来必要な量より多くなることがあり、また、出力コンデンサをすべてセラミックで構成した場合は、メイン・スイッチに必要なタイミングに対してリップルの位相が 90 ずれてしまいます。必要なのはこれら問題に対処できる回路です。回路にわずかな複雑さを与えるだけで、出力リップルを大幅に抑えるとともに、場合によっては十分な ESR インピーダンスを確保することができます。

以下の設計例では LM5010A を取り上げますが、同じ回路技法は、LM5007、LM5008、LM5009 などのナショナル セミコンダクターのあらゆる COT レギュレータでも効果があり、また、少なくとも原理的には、純粋なヒステリシス回路にも効果があるはずですが、LM3100 のような一部の新しいデバイスには、十分な ESR インピーダンスを確保するために、ここで概要を示すのと同様の回路方式を内蔵しています。例として示す回路は、入力電圧範囲を 15V から 75V として、公称 10V の 1.25A 出力を得るように構成されています。測定のほとんどは入力 30V で行っています。

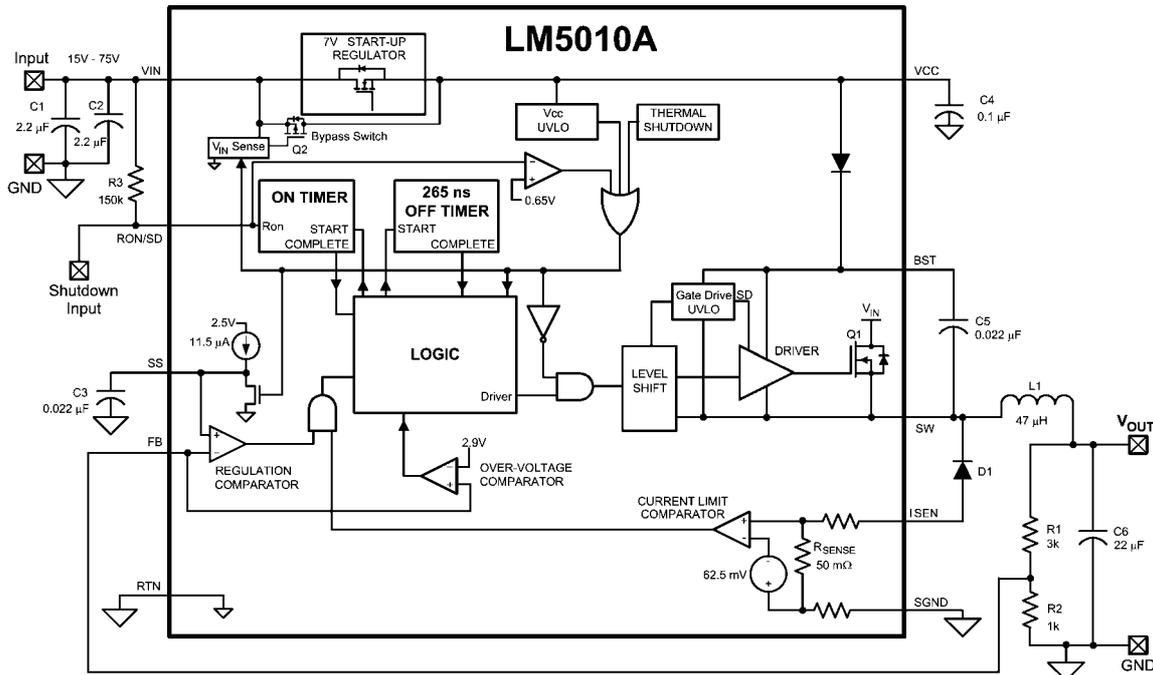


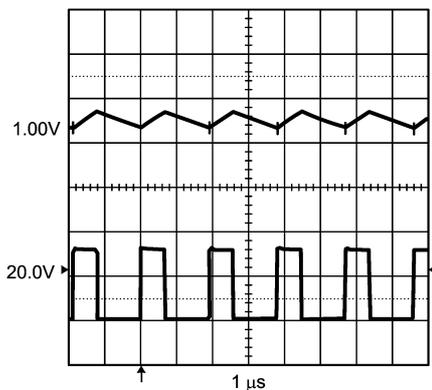
FIGURE 1. Typical LM5010A Application Circuit

設計のポイント (つづき)

Figure 1 に LM5010A のブロック図と代表的なアプリケーション回路を示します。まず、オンタイム・ブロックと設定抵抗 R3 に着目します。この抵抗によって入力電圧に対応したオンタイムが決まり、動作周波数が設定されます。レギュレーション・コンパレータは R1 と R2 で構成される帰還分圧回路を介して出力電圧をモニターします。この回路は、出力コンデンサ C6 の ESR がスイッチング周波数において十分な抵抗値を見せる限りは、適切に動作します。約 1.5 の ESR を持つアルミ電解コンデンサなら問題なく動作するでしょう。

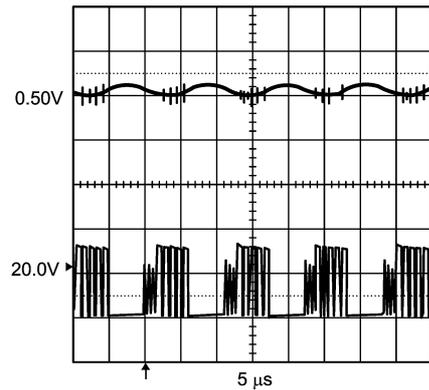
LM5010A は、帰還分圧回路の出力が公称 2.5V に見えるように、出力リップル三角波の下側をレギュレートします。Vout が低下すると設定済みのオンタイムがスタートし、出力電圧を高くめるとともに FB ピン電圧を 2.5V よりわずかに高くします。オンタイムを長めに設定するとスイッチング周波数は低くなり出力リップルは増加しますが、そのほかの動作は変わりません。出力コンデンサの容量を極端に大きくした場合、比例して ESR が小さくなると出力リップル波形に含まれる AC 信号は小さくなり、帰還信号の信号ノイズ比が悪化して、回路はノイズの影響を受けやすくなります。ESR がきわめて小さいセラミック・コンデンサを使用した場合も、帰還信号の AC 振幅が小さくなり、しかも必要な情報は位相が 90° ずれた状態で与えられるため、同様の問題が生じます。

下の波形は 22μF のセラミック・コンデンサに 1.5 の抵抗を直列に接続して取得したものです。このような RC 回路は、大きさが十分で、かつ、適切に把握できる ESR が得られます。スイッチャはきわめて安定して良好に動作していますが、10V 出力に対してピーク・ツー・ピークでおよそ 500mV の出力リップルが生じています。



Output Ripple and Switch Node Voltage with 22μF Output Cap and 1.5Ω ESR

多くの場合、このような結果は完全に許容範囲であり、回路はとくに問題がないと見なされます。しかし、リップルを抑えようとして 1.5 抵抗を削除したら何が起ころうでしょうか。対策が的外れとなった波形を次に示します。



Output Ripple and Switch Node Voltage with 22μF Output Cap and ZERO ESR

波形を見るとスイッチング・パルスが複数発生していて、リップルはほとんど正弦波になっています。リップルの振幅はおよそ半分小さくなっていますが、その代償として適切な動作が得られなくなっています。回路をよく見ると対策の糸口が得られます。レギュレータへの帰還ならびに所望出力電圧の設定に、R1/R2 による分圧回路を使用している点に着目します。このデバイスの場合レギュレータのリファレンス電圧は 2.5V ですから、10V 出力を得るために 4:1 の分圧回路が構成されています。この分圧回路によって DC レベルとともにリップル電圧も減衰してしまうため、制御経路に与えられる有効な AC 信号成分が減少します。仮に上側の分圧抵抗 R1 を、スイッチング周波数において R1 より先相対的に低インピーダンスなコンデンサを使ってバイパスすれば、DC レギュレーションに影響を与えることなく十分な AC 成分が得られます。スイッチング周波数が 500kHz なら RC のカットオフ周波数は 50kHz になり、したがって $C7 = 1/2 RF$ で求められます。R1 を 3k とすればコンデンサ容量はおおよそ 1000pF と計算されます。AC 帰還信号は 4 倍の大きさになるため、理論的には ESR を 1/4 にしても適切な動作が再び得られるはずですが、すなわち 375m の ESR に相当します。対策を行った回路を Figure 2 に示します。

設計のポイント (つづき)

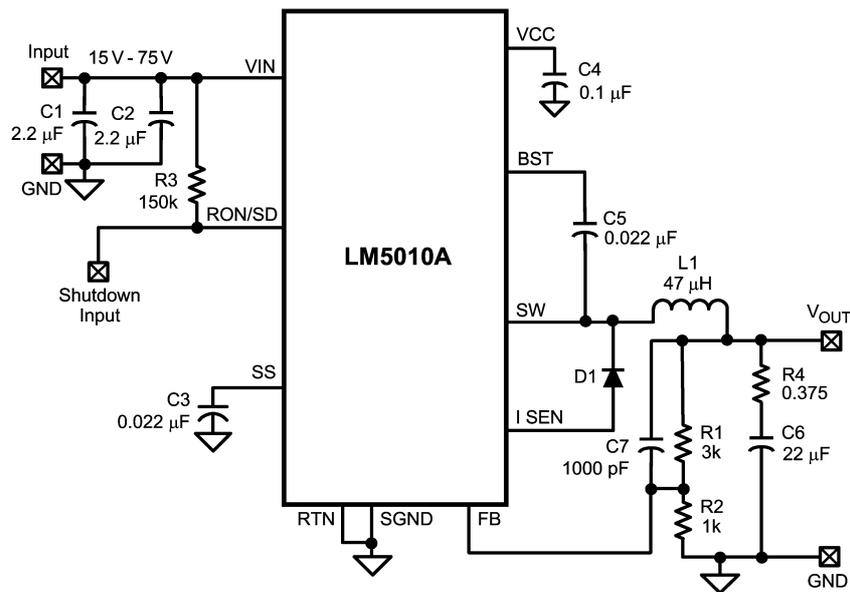
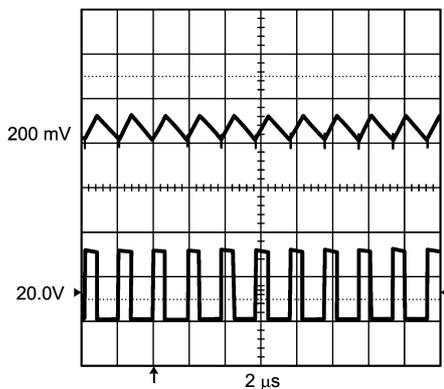


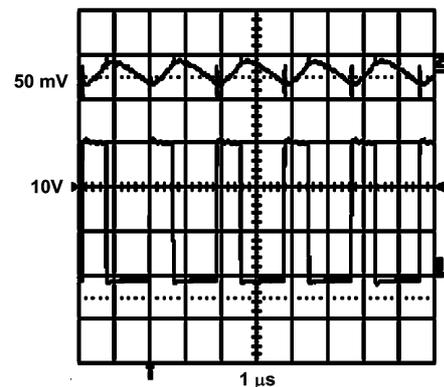
FIGURE 2. 375m ESR Design. Note the Addition of C7.

下の波形からわかるとおり期待したとりの結果が得られています。リップルはピーク・ツー・ピークでおよそ 150mV に減少し、スイッチング周波数は対策前とほぼ同じです。



Output Ripple and Switch Node with ESR = 375m and C7 Added

フィルタ・コンデンサの ESR に関連して、適切な動作を得るために注意すべきことは、負荷に追加される容量の影響です。一般に追加容量がレギュレータの出力コンデンサから数インチ離れていれば、二つの部品を隔てる十分なリード・インダクタンスが存在するため、動作に大きな影響を与えることはありません。ここでは、10µF、35V、ESR が 125m のタンタル・コンデンサを、主出力コンデンサから 25mm ほど離して配置しました。波形からわかるようにリップルはピーク・ツー・ピークで 35mV に減少しています。

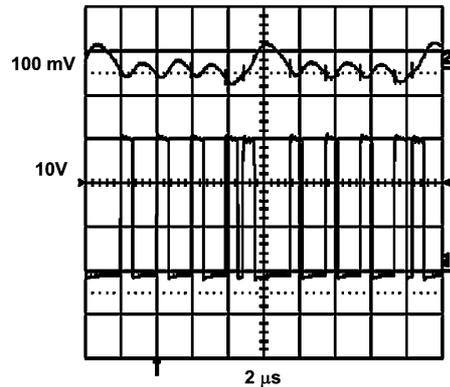


Adding a 10µF Tantalum Capacitor at the Load

比較的大容量のセラミック・コンデンサを出力コンデンサの近くに追加すると、問題が生じる可能性があります。出力の近くに 2.2µF のセラミックを接続した回路で何が起るかを次に説明します。

設計のポイント (つづき)

波形にスイッチング・パルスが再び多く発生しています。主出力コンデンサにフィルタ・コンデンサを並列に追加すると問題を生じませず。追加コンデンサと主出力コンデンサの ESR で構成されるコーナー周波数がレギュレータのスイッチング周波数に近いと実質的な ESR が下がり、制御回路からはリップルが減衰したように「見えます」。十分なトレース・インダクタンスを確保して追加容量を主出力コンデンサから実質的に切り離せた場合にのみ、正常動作が保証されるでしょう。もちろん、以上が実際に問題となるかどうかを判断することは困難です。リップルの問題に対する別の解決方法は、Figure 3 に示すような回路を採用することです。



Ripple Voltage and Switch Node with a 22 μ F Ceramic Capacitor at the Load

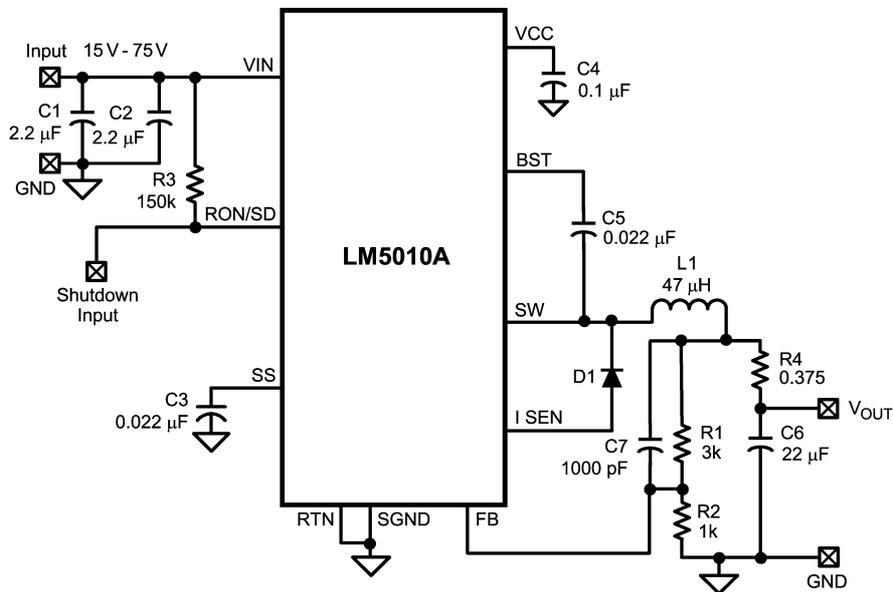


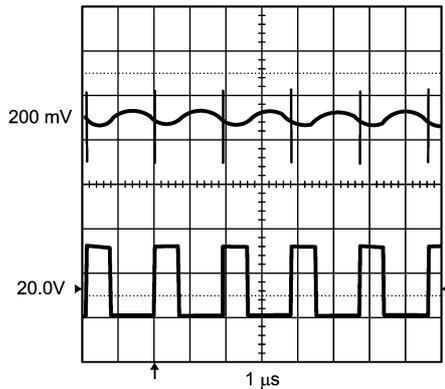
FIGURE 3. Adding 375m Ω in Series with the DC Current Path

この回路では 375m Ω の抵抗 R4 が DC 出力電流パスに直列に存在します。C6 のリップルはきわめて小さくなり、C6 の容量を必要に応じて増やせば、その分だけリップルをさらに小さくすることができます。欠点は、帰還が R4 を介するようになったことでレギュレーション性能が実質的に劣化する点と R4 で大きく電力が消費される点です。ただし C7 と組み合わせれば、出力電圧が比較

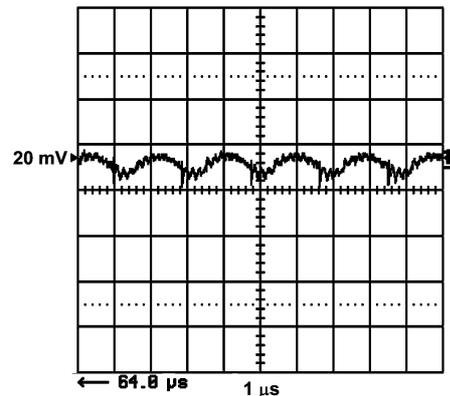
的高い回路の場合に、これら問題は現実的なレベルに収まります。ここで示している回路例で負荷がゼロから 1.0A に変化すると、出力電圧はおおよそ 400mV 低下します。しかし、リップルは 10mV ピーク・ツー・ピーク程度まで抑えられています。この回路は、基板のトレース・インダクタンスにかかわらず、フィルタ・コンデンサを負荷段に追加しても動作には影響ありません。

設計のポイント (つづき)

リップル波形の結果を以下に示します。



Ripple Voltage and Switch Node with 375m in series with the DC Current Path



Ripple Voltage with Feedback Ripple Synthetically Generated

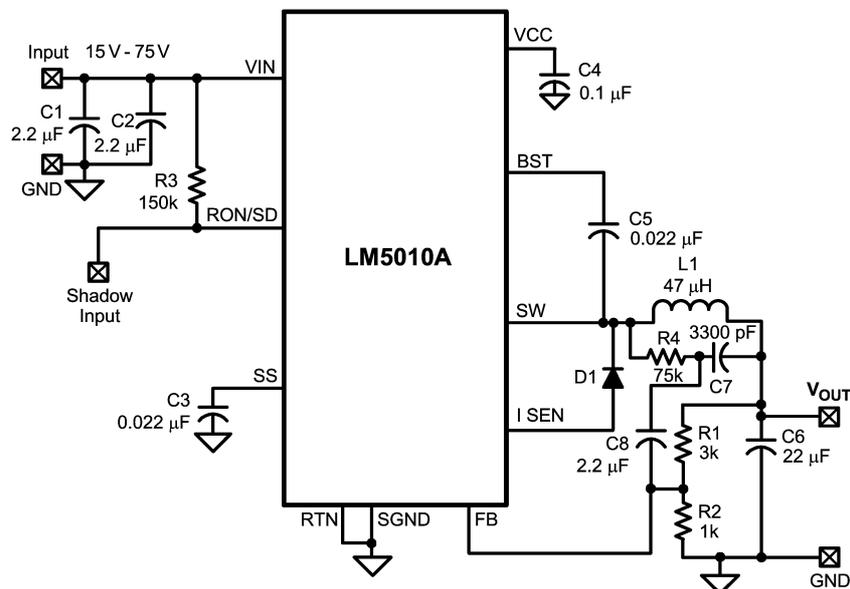


FIGURE 4. Artificial Ripple Generation

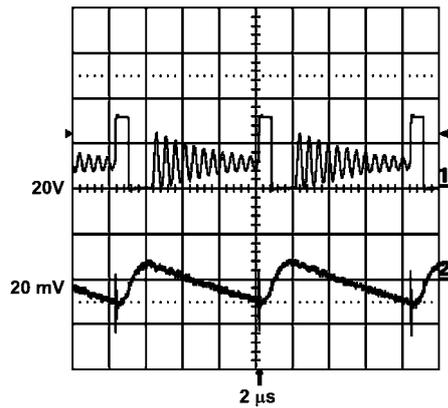
必要なリップル情報を人為的に生成しコントローラに与えて、コントローラが期待している信号に見せかける方法が、解決策としてはおそらく最善です。この方法では、出力リップルを小さくしても、回路の機能を適切に維持することができます。負荷レギュレーション性能が悪化することはない、電力パスに追加抵抗は必要ありません。Figure 4 に示す R4、C7、C8 ネットワークが、FB ピンに必要な情報を供給する三角波ジェネレータを形成しています。この回路は、インダクタ両端の電圧を R4 と C7 を使って積分し、C8 を介して帰還ピンに信号を AC 結合して構成しています。基本回路動作では、インダクタに流れる三角波形が ESR に流れることにより、三角波のリップル電圧が作られます。ここではコンデンサ C7 は、R4 の両端電圧に比例して R4 を流れる電流を積分します。R4 の両端電圧はインダクタの両端電圧と同じです。帰還回路から見ると両者はまったく同一です。前の回路では追加した ESR 抵抗は排除していますので、回路の ESR は 22μF セラミック・コンデンサが持つ ESR のみとなります。そのため総 ESR は 10m のオーダーになります。

この回路ではリップルのピーク・ツー・ピークは 15mV のオーダーです。測定されたスパイク・レベルが以前の測定に比べていくぶん小さい点にも着目してください。その理由はスイッチ・ノードの測定点が移動したという事実にしかな過ぎません。ノイズの多い信号源に接続された一方のプロブが放出したエネルギーを、リップル測定プロブが拾っています。きわめて正確なリップル測定を行いたいときはプロブは 1 つのみ使用したほうが良いでしょう。15V から 50V の入力電圧範囲に対するライン・レギュレーションを測定した結果はおおよそ 20mV でした。この回路は出力に大容量コンデンサを追加してもまったく問題ありません。ESR がゼロであっても常に良好な動作を維持します。ノイズの多い環境の場合、あるいは基板レイアウトが最適化されていない場合は、単純に積分回路の時定数を小さくして、信号を少しばかり多く生成させるようにしてください。コンスタント・オンタイム回路はリップルの三角波の平均ではなくて下側のみをレギュレートするため、公称出力電圧がわずかに異なる場合があります。必要に応じて帰還分圧比をわずかに変えて調整してください。

設計のポイント (つづき)

この手法の設計手順はきわめて単純です。積分回路のコンデンサのインピーダンスは、所望のスイッチング周波数において、帰還分圧回路のインピーダンスに比べて小さくなるように選択します。例示した回路では、分圧回路にインピーダンスは 1000 を少し下回る (1000 に 3000 が並列に接続) 程度となっているので、C7 のインピーダンスは 500kHz にておよそ 100 が得られるように設定しました。計算値はおおよそ 3300pF です。生成されるリップル電圧に比べて $V_{in}-V_{out}$ のほうがきわめて高いため、抵抗 R4 は電流源として見なすことができます。電流は単純に $(V_{in}-V_{out})/R4$ です。必要なリップル電圧はピーク・ツー・ピークで適当に 50mV に設定しました。充電コンデンサは $I/C = dV/dt$ に従います。入力が 30V のときにオン時間はおおよそ 650ns です。dV 項は 50mV のリップルで、C は 3300pF です。I について解くとおおよそ 250 μ A という答えが得られます。R = $(30V-10V)/250\mu A$ から、R = 75 k を選択します。AC 結合コンデンサ (C8) は積分回路のコンデンサに対し十分に大きな値を選択します。なお、以上の定数はいずれも厳密である必要はありません。

注意すべきポイントの 1 つが、負荷が不連続導通モード動作 (DCM) を引き起こすに十分なほど軽くなると、リップルは大きく振る大きくなるという点です。この回路例では、出力が 40mA のときにピーク・ツー・ピーク・リップルはおおよそ 2 倍になり、負荷がゼロのときはピーク・ツー・ピークでおよそ 25mV になります。上側の波形は DCM 時のスイッチ・ノードです。相対的に高周波のリングングは、スイッチ・ノードの寄生容量と組み合わせたインダクタの共振によるものです。この容量は、ダイオード容量、ハイサイド・スイッチ出力容量、および、PCB レイアウトに起因する寄生容量で構成されます。この波形はきわめて正常であり、DCM で動作するあらゆるレギュレータで観測が見込まれます。



DCM Operation

まとめ

コンスタント・オンタイム方式のレギュレータ回路が、出力リップルを抑えながら、元の単純さを維持できることを示してきました。出力コンデンサの ESR に要件を課さない COT 方式のレギュレータはきわめて実用的であり、大きな容量性負荷が存在しても安定性が問題となることがありません。帰還ループの安定化に関して設計面で大きな努力を払うことなく、クロックを使用した複雑な PWM システムと同様の性能が得られます。

このドキュメントの内容はナショナル セミコンダクター 社製品の関連情報として提供されます。ナショナル セミコンダクター 社は、この発行物の内容の正確性または完全性について、いかなる表明または保証もいたしません。また、仕様と製品説明を予告なく変更する権利を有します。このドキュメントはいかなる知的財産権に対するライセンスも、明示的、黙示的、禁反言による惹起、またはその他のものを問わず、付与するものではありません。

試験や品質管理は、ナショナル セミコンダクター 社が自社の製品保証を維持するために必要と考える範囲に用いられます。政府が課す要件によって指定される場合を除き、各製品のすべてのパラメータの試験を必ずしも実施するわけではありません。ナショナル セミコンダクター 社は製品適用の援助や購入者の製品設計に対する義務は負いかねます。ナショナル セミコンダクター 社の部品を使用した製品および製品適用の責任は購入者にあります。ナショナル セミコンダクター 社の製品を用いたいかなる製品の使用または供給に先立ち、購入者は、適切な設計、試験、および動作上の安全手段を講じなければなりません。

それら製品の販売に関するナショナル セミコンダクター 社との取引条件で規定される場合を除き、ナショナル セミコンダクター 社は一切の義務を負わないものとし、また、ナショナル セミコンダクター 社の製品の販売が使用、またはその両方に関連する特定目的への適合性、商品の機能性、ないしは特許、著作権、または他の知的財産権の侵害に関連した義務または保証を含むいかなる表明または黙示的保証も行いません。

生命維持装置への使用について

ナショナル セミコンダクター 社の製品は、ナショナル セミコンダクター 社の最高経営責任者 (CEO) および法務部門 (GENERAL COUNSEL) の事前の書面による承諾がない限り、生命維持装置または生命維持システム内のきわめて重要な部品に使用することは認められていません。

ここで、生命維持装置またはシステムとは (a) 体内に外科的に使用されることを意図されたもの、または (b) 生命を維持あるいは支持するものをいい、ラベルにより表示される使用方法に従って適切に使用された場合に、これの不具合が使用者に身体的障害を与えると予想されるものをいいます。重要な部品とは、生命維持にかかわる装置またはシステム内のすべての部品をいい、これの不具合が生命維持用の装置またはシステムの不具合の原因となりそれらの安全性や機能に影響を及ぼすことが予想されるものをいいます。

National Semiconductor とナショナル セミコンダクター のロゴはナショナル セミコンダクター コーポレーションの登録商標です。その他のブランドや製品名は各権利所有者の商標または登録商標です。

Copyright © 2007 National Semiconductor Corporation
製品の最新情報については www.national.com をご覧ください。

ナショナル セミコンダクター ジャパン株式会社

本社 / 〒 135-0042 東京都江東区木場 2-17-16 TEL.(03)5639-7300

技術資料 (日本語 / 英語) はホームページより入手可能です。

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、保証もしくは是認するという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もありません。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もありません。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℃、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