

# 4.5A、500kHz 降圧スイッチング・レギュレータ

## 特長

- 500kHz固定スイッチング周波数
- 同期が容易
- 最小4Vの入力で動作
- **すべて表面実装型部品を使用可能**
- **最小1.8μHのインダクタ・サイズ**
- 飽和スイッチ設計：0.07
- シャットダウン電流：20μA
- サイクル単位の電流制限

## アプリケーション

- ポータブル・コンピュータ
- バッテリ電源機器
- バッテリ・チャージャ
- 分配電源

## 概要

LT<sup>®</sup>1506は、500kHzのモノリシック・バック(降圧)スイッチング・レギュレータで、機能的にはLT1374と同じですが、LT1374よりも低い入力電圧アプリケーション用に最適化されています。LT1374の5.5V～25Vに対し、4V～15Vの入力電圧範囲で動作します。4.5Aのスイッチがレギュレータに必要なすべての発振器、制御、およびロジック回路とともにチップに内蔵されています。スイッチング周波数が高いため、外部部品サイズをかなり小さくできます。高速過渡応答および優れたループ安定性を実現するため、電流モードのトポロジを採用しています。固定電圧出力と可変出力を用意しております。

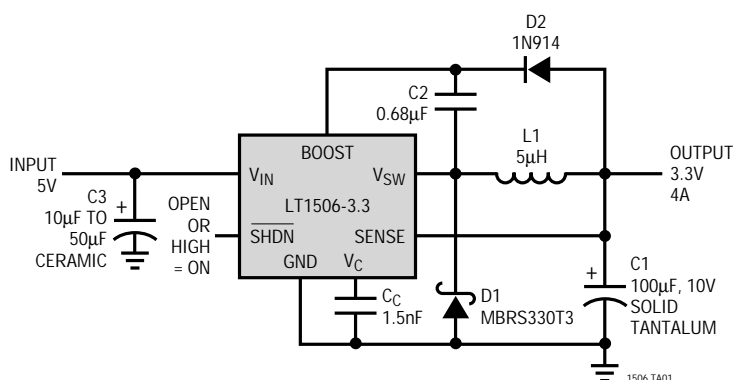
特別な高速バイポーラ・プロセスと新しい設計技術を駆使し、高いスイッチング周波数で高効率を達成しています。消費電流を4mAに維持し、ブースト・コンデンサを利用してパワー・スイッチを飽和できるようにしているため、広い出力電流範囲にわたって効率が維持されます。

LT1506は標準7ピンDDパッケージおよびヒューズド・リードSO-8パッケージで供給されます。完全なサイクル単位の短絡保護、およびサーマル・シャットダウン機能を備えています。インダクタやコンデンサなど外付け部品は、標準表面実装型のものが使用できます。シャットダウンまたは同期のオプション機能があります。シャットダウン信号により、消費電流は20μAに減少します。同期機能を使用して、外部ロジック・レベル信号により内部発振器を580 kHzから1MHzに高めることができます。

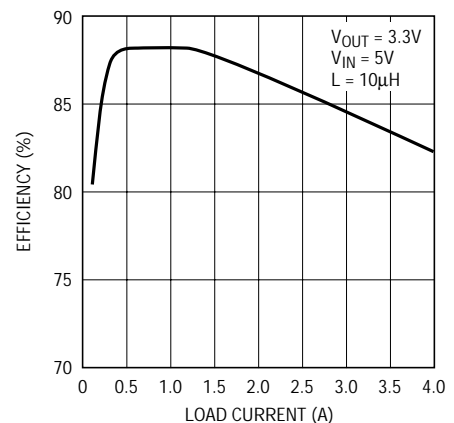
△、LTC、LTはリニアテクノロジー社の登録商標です。

## 標準的応用例

5Vから3.3Vの降圧コンバータ



効率と負荷電流



## 絶対最大定格 (Note 1)

入力電圧 .....	16V	SYNCピン電圧 .....	7V
BOOSTピン電圧 (入力電圧基準) .....	15V	動作接合部温度範囲	
SHDNピン電圧 .....	7V	LT1506C .....	0 ~ 125
FBピン電圧 (可変出力) .....	3.5V	LT1506I .....	- 40 ~ 125
FBピン電流 (可変出力) .....	1mA	保存温度範囲 .....	- 65 ~ 150
センス電圧 (3.3V固定デバイス) .....	5V	リード温度 (半田付け、10秒) .....	300

## パッケージ/発注情報

<div><div><div>FRONT VIEW</div><div><div><div>TAB</div><div>IS</div><div>GND</div></div><div><div><div>7</div><div>6</div><div>5</div><div>4</div><div>3</div><div>2</div><div>1</div></div><div><div>FB OR SENSE*</div><div>BOOST</div><div>V<sub>IN</sub></div><div>GND</div><div>V<sub>SW</sub></div><div>SYNC OR SHDN*</div><div>V<sub>C</sub></div></div></div></div><div><div>R PACKAGE</div><div>7-LEAD PLASTIC DD PAK</div><div>T<sub>JMAX</sub> = 125°C, θ<sub>JA</sub> = 30°C/W</div><div>WITH PACKAGE SOLDERED TO 0.5 SQUARE INCH COPPER AREA OVER BACKSIDE GROUND PLANE OR INTERNAL POWER PLANE. θ<sub>JA</sub> CAN VARY FROM 20°C/W TO &gt; 40°C/W DEPENDING ON MOUNTING TECHNIQUES</div></div></div></div>	<div><div>ORDER PART NUMBER</div><div>LT1506CR</div><div>LT1506CR-3.3</div><div>LT1506CR-SYNC</div><div>LT1506CR-3.3 SYNC</div><div>LT1506IR</div><div>LT1506IR-3.3</div><div>LT1506IR-SYNC</div><div>LT1506IR-3.3 SYNC</div></div>
<div><div><div>TOP VIEW</div><div><div><div>V<sub>IN</sub></div><div>BOOST</div><div>FB OR SENSE*</div><div>GND**</div></div><div><div>1</div><div>2</div><div>3</div><div>4</div></div><div><div>8</div><div>7</div><div>6</div><div>5</div></div><div><div>V<sub>SW</sub></div><div>SYNC</div><div>SHDN</div><div>V<sub>C</sub></div></div></div></div><div><div>S8 PACKAGE</div><div>8-LEAD PLASTIC SO</div><div>θ<sub>JA</sub> = 80°C/W</div><div>**WITH FUSED (GND) GROUND PIN CONNECTED TO GROUND PLANE OR LARGE LANDS</div></div></div>	<div><div>ORDER PART NUMBER</div><div>LT1506CS8</div><div>LT1506CS8-3.3</div><div>LT1506IS8</div><div>LT1506IS8-3.3</div></div> <div><div>S8 PART MARKING</div><div>15061506I</div><div>150633506I33</div></div>

\* デフォルトはFBピンおよびシャットダウン機能付き可変出力電圧デバイスです。3.3Vの固定出力電圧アプリケーション用のオプション - 3.3では、FBがSENSEピンに置き換わります。同期が必要なアプリケーション用の - SYNCはSHDNがSYNCピンに置き換わります。ミリタリ・グレードに関してはお問い合わせください。

## 電気的特性

注記がない限り、 $T_J = 25$ 、 $V_{IN} = 5V$ 、 $V_C = 1.5V$ 、 $V_{BOOST} = V_{IN} + 5V$ 、スイッチ・オープン

PARAMETER	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
Feedback Voltage (Adjustable)		2.39	2.42	2.45	V
	All Conditions	2.36		2.48	V
Sense Voltage (Fixed 3.3V)		3.25	3.3	3.35	V
	All Conditions	3.23		3.37	V
SENSE Pin Resistance		4	6.6	9.5	k $\Omega$
Reference Voltage Line Regulation	$4.3V \leq V_{IN} \leq 15V$		0.01	0.03	%/V
Feedback Input Bias Current			0.5	2	$\mu\text{A}$
Error Amplifier Voltage Gain	(Notes 2, 8)	200	400		
Error Amplifier Transconductance	$\Delta I (V_C) = \pm 10\mu\text{A}$ (Note 8)	1500	2000	2700	$\mu\text{Mho}$
		1000		3100	$\mu\text{Mho}$
$V_C$ Pin to Switch Current Transconductance			5.3		A/V
Error Amplifier Source Current	$V_{FB} = 2.1V$ or $V_{SENSE} = 2.9V$	140	225	320	$\mu\text{A}$
Error Amplifier Sink Current	$V_{FB} = 2.7V$ or $V_{SENSE} = 3.7V$	140	225	320	$\mu\text{A}$
$V_C$ Pin Switching Threshold	Duty Cycle = 0		0.9		V
$V_C$ Pin High Clamp			2.1		V
Switch Current Limit	$V_C$ Open, $V_{FB} = 2.1V$ or $V_{SENSE} = 2.9V$ , DC $\leq 50\%$	4.5	6	8.5	A
Slope Compensation	DC = 80%		0.8		A

## 電気的特性

注記がない限り、 $T_J = 25$ 、 $V_{IN} = 5V$ 、 $V_C = 1.5V$ 、 $V_{BOOST} = V_{IN} + 5V$ 、スイッチ・オープン

PARAMETER	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
Switch On Resistance (Note 7)	$I_{SW} = 4.5A$		0.07	0.1 0.13	$\Omega$ $\Omega$
Maximum Switch Duty Cycle	$V_{FB} = 2.1V$ or $V_{SENSE} = 2.9V$	90 86	93 93		% %
Switch Frequency	$V_C$ Set to Give 50% Duty Cycle	460 440	500	540 560	kHz kHz
Switch Frequency Line Regulation	$4.3V \leq V_{IN} \leq 15V$		0	0.15	%/V
Frequency Shifting Threshold on FB Pin	$\Delta f = 10kHz$	0.8	1.0	1.3	V
Minimum Input Voltage (Note 3)			4.0	4.3	V
Minimum Boost Voltage (Note 4)	$I_{SW} \leq 4.5A$		2.3	3.0	V
Boost Current (Note 5)	$I_{SW} = 1A$ $I_{SW} = 4.5A$		20 90	35 140	mA mA
Input Supply Current (Note 6)			3.8	5.4	mA
Shutdown Supply Current	$V_{SHDN} = 0V$ , $V_{SW} = 0V$ , $V_C$ Open		15	50 75	$\mu A$ $\mu A$
Lockout Threshold	$V_C$ Open	2.3	2.38	2.46	V
Shutdown Thresholds	$V_C$ Open Device Shutting Down Device Starting Up	0.13 0.25	0.37 0.45	0.60 0.7	V V
Synchronization Threshold			1.5	2.2	V
Synchronizing Range		580		1000	kHz
SYNC Pin Input Resistance			40		k $\Omega$

● は全動作温度範囲の規格値を意味する。

Note 1: 絶対最大定格はそれを超えるとデバイスの寿命が損なわれる可能性がある値。

Note 2: 利得は、スイッチング・スレッショルド・レベルより200mV上から、上側クランプ・レベルより200mV下までの $V_C$ 振幅で測定される。

Note 3: 最小入力電圧は直接測定されていないが、他のテストで保証されている。最小入力電圧は、リファレンス電圧と発振器周波数が一定のまま維持されるよう、内部バイアス・ラインが安定化されている場合の電圧として定義されている。安定化出力を維持するための実際の最小入力電圧は、出力電圧と負荷電流に依存する。アプリケーション情報を参照。

Note 4: これは、内部パワー・スイッチの完全な飽和を保証するために必要なブースト・コンデンサ両端の最小電圧である。

Note 5: ブースト電流は、ブースト・ピンを入力電圧より5V高く保持したときピンに流入する電流である。ブースト電流はスイッチ・オン時間中しか流れない。

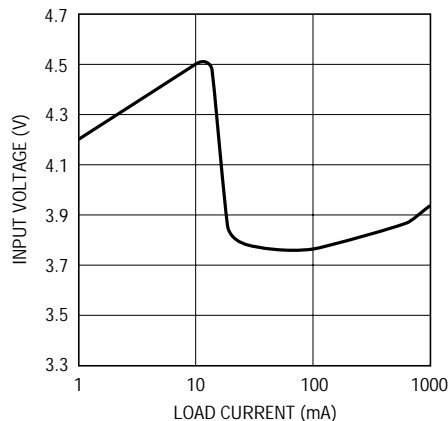
Note 6: 入力電源電流は、スイッチングをディセーブルしたときに、入力ピンにより供給されるバイアス電流である。

Note 7: スイッチ・オン抵抗は、 $V_{IN} - V_{SW}$ 電圧を強制電流(4.5A)で除算して計算される。他の電流でのスイッチ電圧のグラフについては、標準的性能特性を参照。

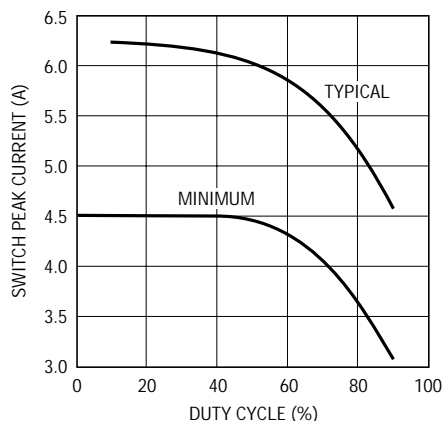
Note 8: 相互コンダクタンスと電圧利得は、電圧分割器を除く内部アンプに関係する。固定電圧デバイスに関して、利得と相互コンダクタンスを計算するには、SENSEピンを参照する。上記の除算値は $V_{OUT}/2.42$ の比率による。

# 標準的性能特性

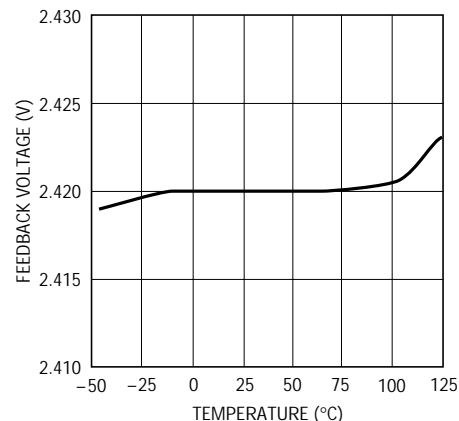
出力が3.3Vの最小入力電圧



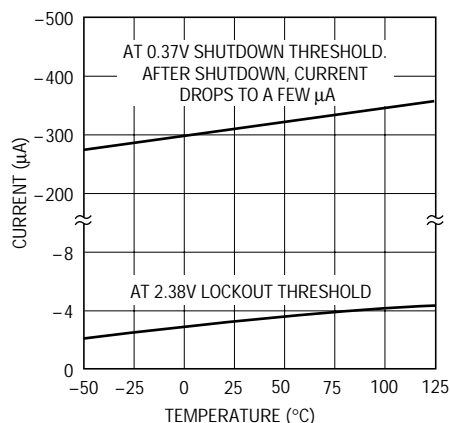
スイッチ・ピーク電流制限



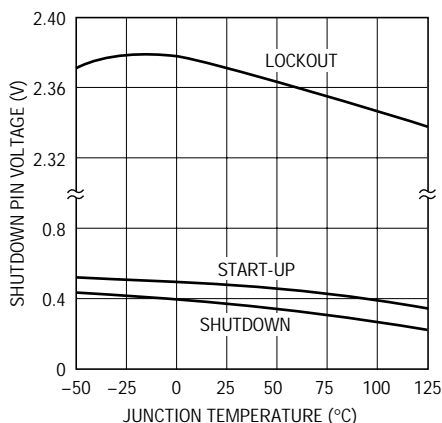
帰還ピン電圧



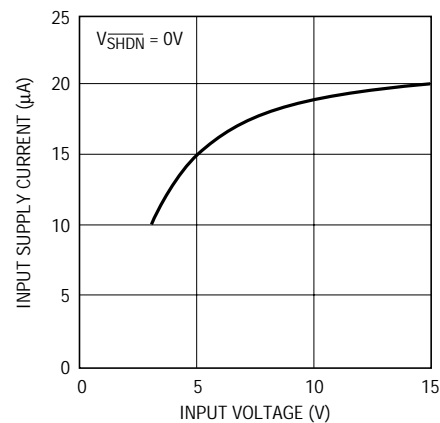
シャットダウン・ピン・バイアス電流



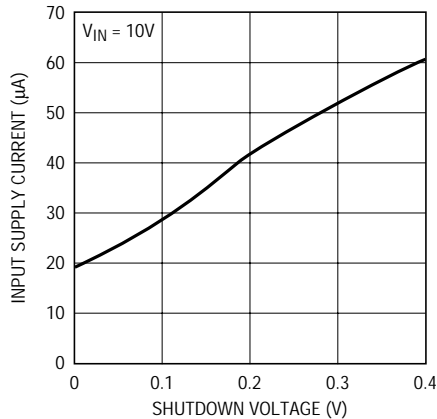
ロックアウトおよびシャットダウン・スレッシュホールド



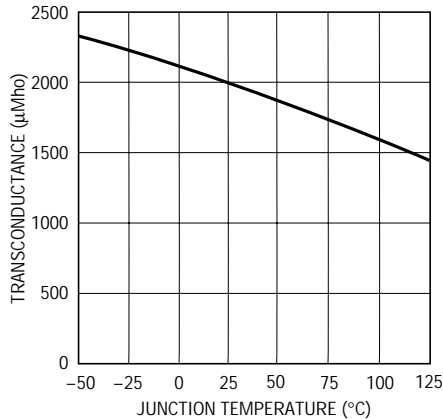
シャットダウン消費電流



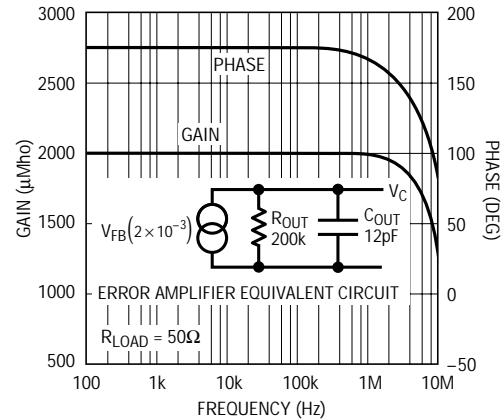
シャットダウン消費電流



誤差アンプの相互コンダクタンス

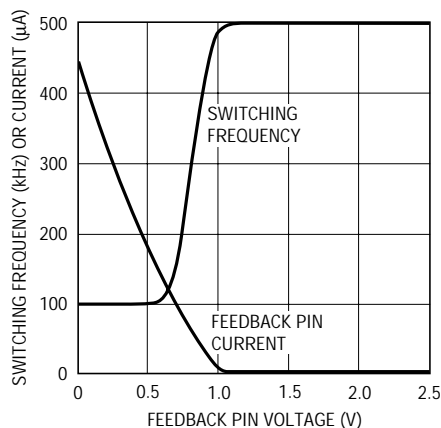


誤差アンプの相互コンダクタンス

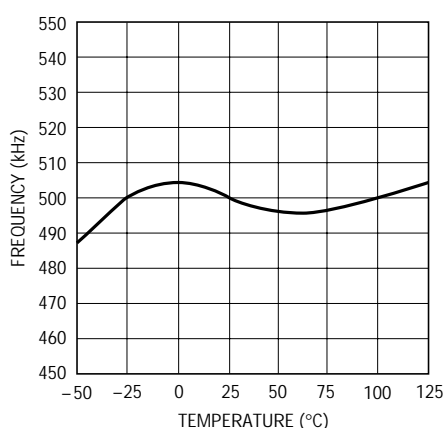


## 標準的性能特性

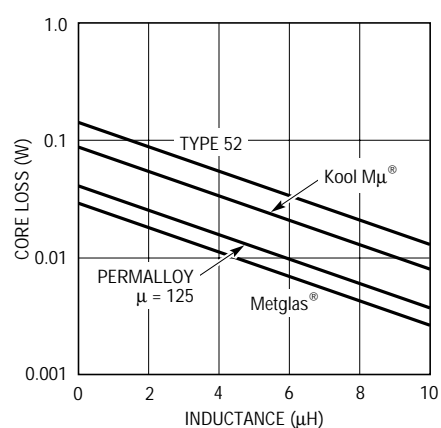
周波数フォードバック



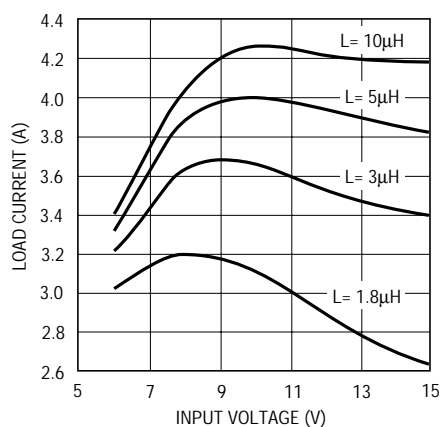
スイッチング周波数



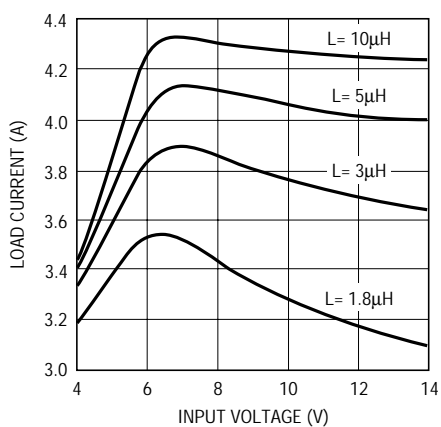
3.3V出力に対する  
インダクタコア損失



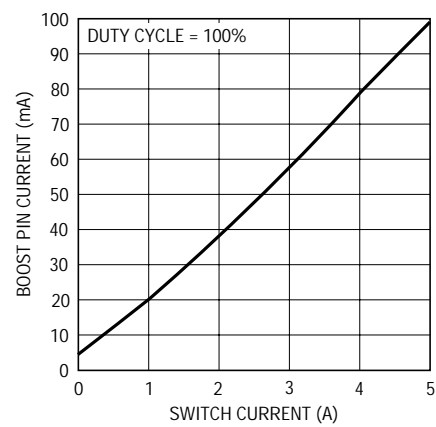
$V_{OUT} = 5V$ での最大負荷電流



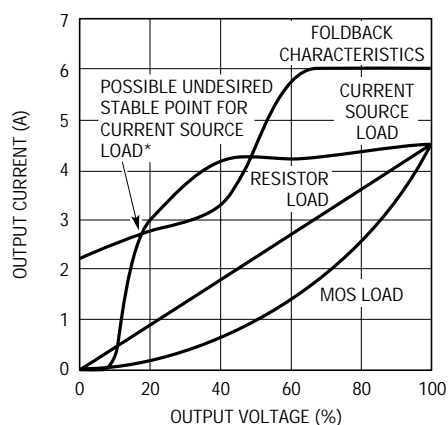
$V_{OUT} = 3.3V$ での最大負荷電流



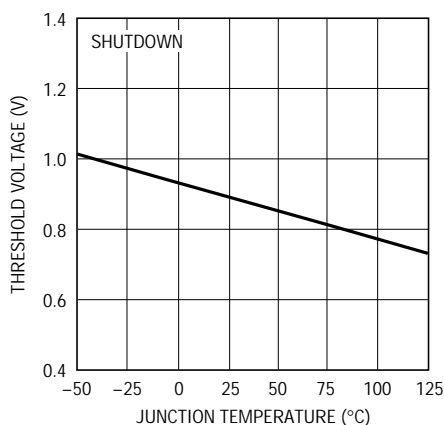
BOOSTピン電流



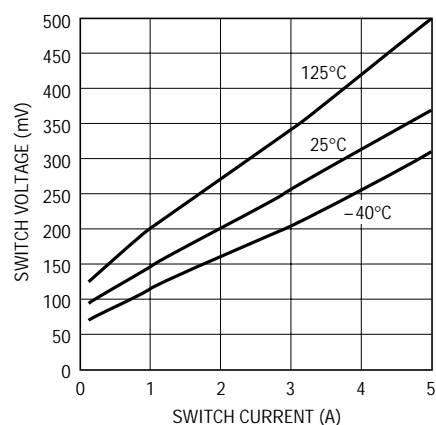
電流制限フォードバック



$V_C$ ピン・シャットダウン・  
スレッシュホールド



スイッチ電圧の降下



Kool M $\mu$  is a registered trademark of Magnetics, Inc.

Metglas is a registered trademark of AlliedSignal Inc.

\*See "More Than Just Voltage Feedback" in the Applications Information section.

## ピン機能

FB/SENSE：帰還ピンは、このピンに希望の出力電圧において2.42Vを生成する外付け分割器を使用して出力電圧を設定するために使用します。固定電圧デバイス(-3.3オプション)は分割器をチップに内蔵しているため、FBピンをセンス・ピンとして使用し3.3V出力に直接接続します。FBピンにはそのほかに3つの機能があります。ピンの電圧が1.7V以下に低下すると、スイッチ電流制限が低下します。1.5V以下になると、外部同期機能がディスエーブルされます。1V以下になると、スイッチング周波数も低下します。詳細については、アプリケーション情報の帰還ピンの機能のセクションを参照してください。

BOOST：BOOSTピンを使用して、入力電圧より高いドライブ電圧を内部バイポーラNPNパワー・スイッチに供給します。この電圧の追加がない場合、標準スイッチ電圧損失は約1.5Vになります。追加ブースト電圧により、スイッチを飽和させることができ、電圧損失はFET構造上0.07のそれに匹敵しますが、ダイ面積ははるかに小さくて済みます。効率は従来のバイポーラ設計では75%であったのに対し、これら新しいデバイスでは89%以上に向上します。

$V_{IN}$ ：これは内蔵パワーNPNスイッチのコレクタです。このピンは内部回路と内部レギュレータに電源を供給します。NPNスイッチがオン、オフすると、このピンに高い $di/dt$ エッジが発生します。外付けのバイパスとキャッチ・ダイオードをこのピンの近くに接続してください。このパスのすべてのトレース・インダクタンスは、スイッチ・オフで電圧スパイクを生成し、内部NPN両端の $V_{CE}$ 電圧を上昇させます。

GND：GNDピンの接続は、2つの理由から熟考する必要があります。まず、GNDピンは安定化出力の基準であるため、負荷の「グラウンド」エンドがICのGNDピンと同じ電圧でない場合はロード・レギュレーションに問題が生じます。この状態は、GNDピンと負荷グラウンド点の間の金属パスを負荷電流またはそのほかの電流が流れるときに発生します。GNDピンと負荷の間のグラウンド・パスを短くし、可能であればグラウンド・プレーンを使用します。もう1つの考慮事項は、GNDピン電流スパイクにより生じるEMIです。 $V_{SW}$ ピンとGNDピン間の内部容量によって、GNDピンに非常に幅の狭い(10ns以下)電流スパイクが発生します。GNDピンが長い金属トレースでシステム・グラウンドに接続されている場合は、このト

レースが過度なEMIを放射することがあります。入力バイパスとGNDピンの間のパスを短くしてください。SO-8パッケージのGNDピンは、直接内部タブに接続されています。このピンは広い面積の銅に接続し、熱抵抗を改善しなければなりません。

$V_{SW}$ ：このスイッチ・ピンは、内蔵パワーNPNスイッチのエミッタです。スイッチ・オン時間に、入力ピン電圧までドライブされます。スイッチ・オフ時には、インダクタ電流がスイッチ・ピンを負にドライブします。負電圧は外部キャッチ・ダイオードによってクランプされます。許容される最大スイッチ負電圧は-0.8Vです。

SYNC：SYNCピンは内部発振器を外部信号に同期させるのに使用します。このピンはロジックレベル・コンパチブルで、デューティ・サイクルが10%から90%の信号でドライブできます。同期範囲は初期動作周波数から最大1MHzまでです。このピンは、-SYNCオプションのデバイスではSHDNからの置き換えになっています。詳細については、アプリケーション情報の同期のセクションを参照してください。このピンを使用しないときは、グラウンドに接続してください。

SHDN：シャットダウン・ピンは、レギュレータをターンオフして、入力ドレイン電流を数 $\mu A$ まで低減するのに使用します。実際には、このピンには2つの別々のスレッシュホールドがあり、1つはスイッチングを停止させるための2.38Vのスレッシュホールド、もう1つは完全なマイクロパワー・シャットダウンを実行するための0.4Vのスレッシュホールドです。2.38Vスレッシュホールドは、高精度の低電圧ロックアウト(UVLO)として機能します。低電圧ロックアウトは、入力電圧があらかじめ決められたレベルに達するまで、レギュレータの動作をさせない目的で使用される場合もあります。

$V_C$ ： $V_C$ ピンは誤差アンプの出力であり、ピーク・スイッチ電流コンパレータの入力でもあります。このピンは通常周波数補償に使用されますが、電流クランプや制御ループのオーバーライドなど、2つの機能を実行することができます。このピンは非常に軽い負荷では約1Vに留まりますが、最大負荷時には2Vになります。グラウンド電位にすれば、レギュレータを停止できますが、“H”にドライブした場合は電流を4mAに制限しなければなりません。

## ブロック図

LT1506は定周波数、電流モード・バック・コンバータです。つまり、パワー・スイッチのデューティ・サイクルを制御するための内部クロックと2つの帰還ループがあります。通常の誤差アンプのほかに、サイクル単位でスイッチ電流をモニタする電流センス・アンプがあります。スイッチ・サイクルは、発振器パルスが $R_S$ フリップ・フロップをセットすると、スイッチがターンオンして開始します。スイッチ電流がコンパレータの反転入力で設定されるレベルに達すると、フリップ・フロップがリセットされ、スイッチがターンオフします。出力電圧は誤差アンプの出力を使用して、スイッチの電流トリップ点を設定することにより制御されます。この手法では誤差アンプは、電圧ではなく出力に供給すべき電流を指示します。電圧供給システムでは、インダクタと出力コンデンサの共振周波数までは位相シフトは小さく、共振周波数を超えると急

激に180°の位相シフトが発生します。電流供給システムでは、共振周波数よりかなり低い周波数でも90°の位相シフトがありますが、LC共振周波数よりはるかに高い周波数まで、位相シフトがさらに90°追加されることはありません。このため、帰還ループの周波数補償ははるかに簡単になり、過渡応答を迅速に行うことができます。

BOOSTピンを使用して、スイッチ・ドライバに入力電圧より高い電圧を供給すると、スイッチを飽和させることができ、高いスイッチ効率が達成できます。このブースト電圧は、外部コンデンサとダイオードで生成されます。2つのコンパレータがシャットダウン・ピンに接続されています。1つは低電圧ロックアウト用の2.38Vスレッシュホールドを持ち、もう1つは完全なシャットダウン用の0.4Vスレッシュホールドを持っています。

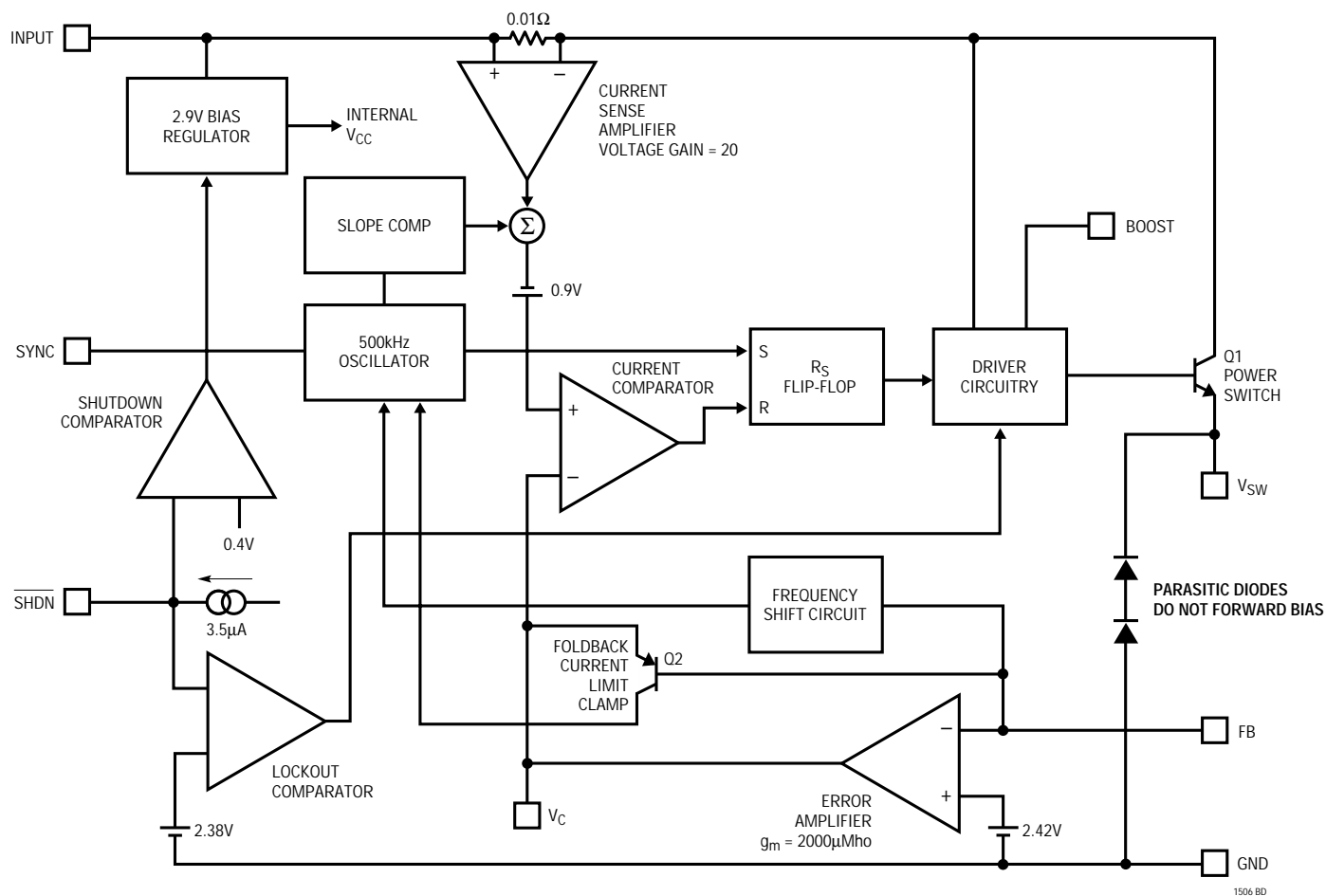


図1. ブロック図

## アプリケーション情報

### 帰還ピンの機能

LT1506の帰還(FB)ピンは出力電圧の設定と、いくつかの過負荷保護機能に使用します。このセクションの最初の部分では出力電圧を設定するための抵抗選択について説明し、次にフォルドバック周波数およびFBピンによる電流制限について説明します。最終設計に入る前に両方の説明を読んでください。3.3V固定出力のLT1506-3.3は分割器抵抗を内蔵しており、FBピンにはSENSEという名前が付けられ、出力に直接接続されています。

FBからグランドへの出力分割抵抗(R2)の推奨値(図2参照)は5k以下で、R1を求める式を以下に示します。FBピンの入力バイアス電流によって生じる出力電圧誤差は、R2 = 5kの場合には0.25%以下です。これらの推奨値より分割器抵抗値が大きくなる場合は以下の説明を読んでください。

$$R1 = \frac{R2(V_{OUT} - 2.42)}{2.42}$$

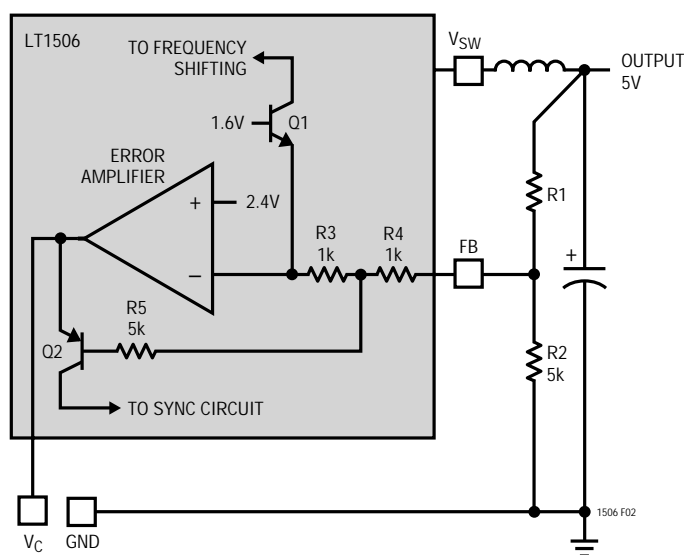


図2. 周波数および電流制限フォールド・バック

### 電圧帰還以外の機能

帰還ピンは出力電圧の検出以外にも使用できます。すなわち出力電圧が非常に低い場合に、スイッチング周波数や電流制限を低減します(標準的性能特性のフォルドバック・グラフを参照)。これにより短絡状態では、ICと外部ダイオード、およびインダクタの電力消費を抑えます。出力が短絡するとスイッチング・レギュレータは非常に低いデューティ・サイクルで動作する必要があり、ダイオードとインダクタを流れる平均電流は、スイッチの短絡制限電流(3A以下でフォルドバックするときには、LT1506では標準6A)と等しくなります。スイッチング周波数が500kHzに維持されたままだと、最小スイッチ・オン時間が制限されているためスイッチャのデューティ・サイクルを十分低くすることが妨げられるでしょう。したがって、周波数は帰還ピンの電圧が1V以下に低下すると約1/5まで減少します(周波数フォルドバック・グラフ参照)。これは通常の負荷条件での動作には影響を与えません。出力電圧が上昇すると、起動時のスイッチング周波数にギア・シフトが観察されるだけです。

LT1506は低スイッチング周波数に加えて、帰還ピンの電圧が1.7Vより下になると、より低いスイッチ電流制限で動作します。図2のQ2はV<sub>C</sub>ピンを、標準2.1Vの上位クランプ・レベル以下の電圧にクランプして、この機能を実行します。このフォルドバック電流制限機能は、短絡状態でのIC、ダイオード、およびインダクタの消費電力を大幅に低減します。フォルドバック動作を妨害しないように、外部同期もディスエーブルされます。前述したように、通常の負荷条件ではユーザがこの存在を意識することはありません。影響を受ける可能性のある負荷は、出力電圧が最終値の50%以下の状態で全負荷電流を維持しようとする電流源負荷だけです。このような希な状況では、外部ダイオードを用いて帰還ピンを1.5Vより高くクランプして、フォルドバック電流制限を無効にすることができます。**注意：**帰還ピンをクランプすると、周波数シフトも無効になるため、高い入力電圧で出力を完全に短絡すると、LT1506は電流制限を制御できなくなる可能性があります。



## アプリケーション情報

出力電圧が低い場合、スイッチング周波数を低下させる内部回路によって帰還ピンから電流が流れ出すようになります。この等価回路を図2に示します。Q1は通常動作中は完全にオフになっています。FBピンが1V以下に低下すると、Q1が電流を流し始め、約5kHz/μAの割合で周波数を低下させます。適切な周波数フォールドバックを確保するには(ワーストケース短絡条件で)、外部分割器のテブナン抵抗は、FBピンを0.6Vにして、FBピンから150μAを引き出せるだけ低い値でなければなりません( $R_{DIV} \leq 4k$ )。その結果、周波数および電流制限の低下は、出力電圧分割器のインピーダンスに影響されます。分割器のインピーダンスはクリティカルではありませんが、抵抗値が推奨値より高く、入力電圧が高いときに短絡状態が発生するときは注意してください。高周波ピックアップが増加し、周波数および電流フォールドバックによる保護機能が低下します。

### 最大出力負荷電流

バック・コンバータの最大負荷電流は、LT1506の最大スイッチ電流定格( $I_P$ )によって制限されます。この電流定格は50%のデューティ・サイクル(DC)まで4.5Aで、80%のデューティ・サイクルでは3.7Aに減少します。これを標準的性能特性に図示し、以下の式で示します。

$I_P = 4.5A$  (DC ≤ 50%の場合)

$I_P = 3.21 + 5.95(DC) - 6.75(DC)^2$  (50% < DC < 90%の場合)

DC = デューティ・サイクル =  $V_{OUT}/V_{IN}$

例:  $V_{OUT} = 5V$ 、 $V_{IN} = 8V$ 、したがってDC =  $5/8 = 0.625$ の場合、

$$I_{SW(MAX)} = 3.21 + 5.95(0.625) - 6.75(0.625)^2 = 4.3A$$

LT1506は、電流モードの低調波スイッチングを防止するためにスロープ補償回路を内蔵しているため、デューティ・サイクルに応じて電流定格が低下します。詳細についてはアプリケーション・ノート19を参照してください。LT1506はこの点に関しては多少異なり、非直線スロープ補償を採用しているため、電流制限がわずかに低下するだけで優れた補償を実現できます。

最大負荷電流は、無限に大きなインダクタに対しては最大スイッチ電流と等しくなりますが、有限のインダク

タ・サイズでは、最大負荷電流はピーク・ツー・ピークのインダクタ電流の1/2だけ減少します。以下の式では連続モード動作を仮定しており、右の項が $I_P$ の1/2以下になります。

$$I_{OUT(MAX)} = I_P - \frac{(V_{OUT})(V_{IN} - V_{OUT})}{2(L)(f)(V_{IN})}$$

連続モード

上記の条件でL = 3.3μHの場合、

$$I_{OUT(MAX)} = 4.3 - \frac{(5)(8-5)}{2(3.3 \cdot 10^{-6})(500 \cdot 10^3)(8)} = 4.3 - 0.57 = 3.73A$$

$V_{IN} = 15V$ では、デューティ・サイクルが33%であるため、 $I_P$ は4.5Aで一定であり、 $I_{OUT(MAX)}$ は以下になります。

$$4.5 - \frac{(5)(15-5)}{2(3.3 \cdot 10^{-6})(500 \cdot 10^3)(15)} = 4.5 - 1.01 = 3.49A$$

入力電圧が高いとインダクタのリプル電流が増加するため、引き出せる負荷電流が少なくなることにご注意ください。ただし常にそうであるとは限りません。インダクタ値と入力電圧範囲の特定の組合せでは、デューティ・サイクルが高いとピーク・スイッチ電流が減少するため、最低入力電圧で得られる負荷電流が減少する場合があります。負荷電流が利用可能な最大値に近い場合は、入力電圧範囲の最大値、最小値で利用可能な最大電流を調べてください。ある条件における実際のピーク・スイッチ電流を計算するには、以下の式を使用します。

$$I_{SW(PEAK)} = I_{OUT} + \frac{V_{OUT}(V_{IN} - V_{OUT})}{2(L)(f)(V_{IN})}$$

## アプリケーション情報

### インダクタと出力コンデンサの選択

ほとんどのアプリケーションでは、出力インダクタは  $3\mu\text{H}$  から  $20\mu\text{H}$  の範囲になります。インダクタの物理的サイズを小さくするには、低い値を選びます。値が大きいと、LT1506のスイッチ(電流制限値が4.5A)に現れるピーク電流が低下するため、流せる出力電流が大きくなります。インダクタンスが大きいと、出力リップル電圧も低下し、コア損失が低減されます。標準的性能特性セクションのグラフに、最大出力負荷電流対インダクタ・サイズ、および入力電圧を示します。別のグラフに、各種コア材料におけるコア損失対インダクタ・サイズを示します。

インダクタを選択する際は、最大負荷電流、コア損失および銅損失、許容される部品の高さ、電圧リップル、EMI、インダクタのフォールト電流、飽和、そしていうまでもなくコストを検討しなければなりません。多少複雑で矛盾するこれらの要求条件に対処する方法として、以下の手順が推奨されます。

1. 最大負荷電流およびコア損失のグラフから  $\mu\text{H}$  単位で値を選択します。軽負荷時に小さなインダクタを選択すると、不連続動作モードになる場合がありますが、LT1506はいずれの動作モードでも十分動作するように設計されています。少なくともトロイダルコアなどクローズド・コア形状の場合、低コア損失はコストが高くなることを覚えておいてください。コア損失のグラフに3.3V出力に対する絶対損失を示します。実際のパーセント損失は、それぞれの状況に応じて計算する必要があります。

平均インダクタ電流が負荷電流と等しいと仮定し、インダクタが連続フォールト条件に耐えなければならないかどうかを決定します。たとえば最大負荷電流が0.5Aの場合、0.5Aインダクタは4.5Aの過負荷条件で破損することがあります。LT1506はフォールドバック電流制限機能を備えているため、完全短絡は実際にはより穏やかなものになります。

2. インダクタが飽和しないよう保証するために、全負荷電流でのピーク・インダクタ電流を計算してください。ピーク電流は、特にインダクタが小さく負荷が軽いときには、出力電流より大幅に高くなる可能性があるため、この手順を省略してはなりません。

鉄粉コアはソフトに飽和するため許容され、他方、フェライト・コアは急激に飽和します。その他のコア材の飽和はこれらの中間になります。以下の式は連続モード動作を想定したものです。不連続モードの場合はハイサイドでわずかに誤差が生じるだけなので、あらゆる条件に使用できます。

$$I_{\text{PEAK}} = I_{\text{OUT}} + \frac{V_{\text{OUT}}(V_{\text{IN}} - V_{\text{OUT}})}{2(f)(L)(V_{\text{IN}})}$$

$V_{\text{IN}}$  = 最大入力電圧

$f$  = スイッチング周波数、500kHz

3. 高い磁界を放射するロッドやバレルなどの「オープン」コア形状の設定でよい、あるいはトロイダルコアのようにEMI問題を防止するためにクローズド・コアが必要かどうか判断してください。たとえば、誰でも磁気記憶媒体の隣にオープン・コアを置きたくはありません！ ロッドやバレルは、安価で小形なため魅力的ですが、磁界放射が問題となる状況での計算方法のガイドラインがなく判断に迷います。
4. コア形状、ピーク電流(飽和を回避するため)、平均電流(温度上昇を制限するため)、および故障電流(インダクタが過熱した場合、ワイヤの絶縁が溶けて巻線間が短絡します)の要件を満足するインダクタを購入してください(表2の代表的な表面実装部品を参照)。高効率、ロープロファイル、高温動作などの優れた特質は、場合によっては大幅なコスト増になることを忘れないでください。価格に目安を付けるため最初に最も安い部品の価格を調べ、次に実際には何が欲しいかを追及してください。
5. 最初の選択を行った後、出力電圧リップル、セカンド・ソースなど、第二の事項を検討してください。最終的な選択に不安があるときは、リニアテクノロジーのエンジニアにご相談ください。広範なインダクタ・タイプを扱った経験のあるエンジニアが、ロープロファイル、表面実装部品などの最新の開発状況をご説明します。

## アプリケーション情報

表2.

VENDOR/ PART NO.	VALUE ( $\mu$ H)	DC (Amps)	CORE TYPE	SERIES RESIS- TANCE( $\Omega$ )	CORE MATER- IAL	HEIGHT (mm)
<b>Coiltronics</b>						
CTX2-1	2	4.1	Tor	0.011	KM $\mu$	4.2
CTX5-4	5	4.4	Tor	0.019	KM $\mu$	6.4
CTX8-4	8	3.5	Tor	0.020	KM $\mu$	6.4
CTX2-1P	2	3.4	Tor	0.014	52	4.2
CTX2-3P	2	4.6	Tor	0.012	52	4.8
CTX5-4P	5	3.3	Tor	0.027	52	6.4
<b>Sumida</b>						
CDRH125	10	4.0	SC	0.025	Fer	6
CDRH125	12	3.5	SC	0.027	Fer	6
CDRH125	15	3.3	SC	0.030	Fer	6
CDRH125	18	3.0	SC	0.034	Fer	6
<b>Coilcraft</b>						
DT3316-222	2.2	5	SC	0.035	Fer	5.1
DT3316-332	3.3	5	SC	0.040	Fer	5.1
DT3316-472	4.7	3	SC	0.045	Fer	5.1
<b>Pulse</b>						
PE-53650	4	4.8	Tor	0.017	Fer	9.1
PE-53651	5	5.4	Tor	0.018	Fer	9.1
PE-53652	9	5.5	Tor	0.022	Fer	10
PE-53653	16	5.1	Tor	0.032	Fer	10
<b>Dale</b>						
IHSM-4825	2.7	5.1	Open	0.034	Fer	5.6
IHSM-4825	4.7	4.0	Open	0.047	Fer	5.6
IHSM-5832	10	4.3	Open	0.053	Fer	7.1
IHSM-5832	15	3.5	Open	0.078	Fer	7.1
IHSM-7832	22	3.8	Open	0.054	Fer	7.1

Tor = Toroid

SC = Semiclosed geometry

Fer = Ferrite core material

52 = Type 52 powdered iron core material

KM $\mu$  = Kool M $\mu$

### 出力コンデンサ

出力コンデンサは通常、等価直列抵抗 (ESR) の値をもとに選択します。これはESRの値によって出力リップル電圧が決まるためです。500kHzでは、有極性コンデンサは本質的に抵抗性です。ESRを低くすると体積が大きくなるため、物理的に小形のコンデンサはESRが高くなっ

ています。標準的なLT1506アプリケーションに必要なESRの範囲は、0.05 ~ 0.2 です。標準的な出力コンデンサは、0.1 以下のESRを保証しているAVX社のTPSタイプ(100 $\mu$ F@10V)です。これは「D」サイズの表面実装型固体タンタル・コンデンサです。TPSコンデンサは、低ESRを実現するために特別に製造され試験されており、単位体積当たり最小のESRを実現しています。容量値( $\mu$ F)はそれほど重要ではなく、22 $\mu$ Fから500 $\mu$ F以上の容量でも十分に動作しますが、ESRの特徴は顕著に現れます。小型の22 $\mu$ F固形タンタル・コンデンサの場合はESRが高く、大きな出力リップル電圧が現れます。表3に代表的な固体タンタル表面実装型コンデンサを示します。

表3. 表面実装型固体タンタル・コンデンサのESRとリップル電流

E Case Size	ESR (Max., $\Omega$ )	Ripple Current (A)
AVX TPS, Sprague 593D	0.1 to 0.3	0.7 to 1.1
AVX TAJ	0.7 to 0.9	0.4
<b>D Case Size</b>		
AVX TPS, Sprague 593D	0.1 to 0.3	0.7 to 1.1
<b>C Case Size</b>		
AVX TPS	0.2 (typ)	0.5 (typ)

多くのエンジニアは、固体タンタル・コンデンサは高いサージ電流が加わると故障しやすいということを聞いたことがあると思います。これは歴史的な事実です。TPSタイプのコンデンサはサージ能力が特別に試験されていますが、サージ耐久性は出力コンデンサでは重大な問題ではありません。固体タンタル・コンデンサはターンオン・サージが高すぎると故障しますが、レギュレータ出力ではこのようなサージは発生しません。レギュレータ出力が完全に短絡するような高い放電サージがあっても、コンデンサには影響はありません。

入力コンデンサとは異なり、出力コンデンサのRMSリップル電流は通常は非常に低いため、リップル電流定格が問題になることはありません。電流波形は200mA<sub>RMS</sub>(標準値)の三角波です。これを計算する式は以下のとおりです。

出力コンデンサ・リップル電流 (RMS):

$$I_{\text{RIPPLE(RMS)}} = \frac{0.29(V_{\text{OUT}})(V_{\text{IN}} - V_{\text{OUT}})}{(L)(f)(V_{\text{IN}})}$$

## アプリケーション情報

### セラミック・コンデンサ

容量値が高く、低コストのセラミック・コンデンサが、より小型のケース・サイズで供給されるようになりました。これらはリップル電流定格が高く、ターンオン・サージ耐久性に優れているため、入力のパイパスに適しています。出力コンデンサとして使用する場合は注意が必要です。固体タンタル・コンデンサのESRは、5kHzから50kHzで「ゼロ」を生じますが、妥当なループ位相マーゲンを与える点で有益です。セラミック・コンデンサは300kHzを超す周波数まで容量性を維持し、通常ESRが効果を発揮する前に自己のESLとの間で共振します。セラミックの出力コンデンサを使用する場合、ループ補償ポール周波数を $1/10$ (標準)に低減する必要があります。

### 出力リップル電圧

図3にLT1506の標準的な出力リップル電圧波形を示します。リップル電圧は、出力コンデンサの高周波数領域でのインピーダンスと、インダクタを流れるリップル電流で決定されます。インダクタを通して出力コンデンサに流れるピーク・ツー・ピーク・リップル電流は以下のとおりです。

$$I_{P-P} = \frac{(V_{OUT})(V_{IN} - V_{OUT})}{(V_{IN})(L)(f)}$$

高周波数スイッチャーの場合、リップル電流のスルーレートの和も関係する場合があります、次式から計算することができます。

$$\Sigma \frac{dl}{dt} = \frac{V_{IN}}{L}$$

ピーク・ツー・ピーク出力リップル電圧は、ピーク・ツー・ピーク・リップル電流とESRの積で形成される三角波と、寄生インダクタンス(ESL)およびリップル電流スルーレートによって形成される方形波の和です。容量性リアクタンスは、ESRまたはESLと比較して小さいものと仮定しています。

$$V_{RIPPLE} = (I_{P-P})(ESR) + (ESL) \Sigma \frac{dl}{dt}$$

例： $V_{IN} = 10V$ 、 $V_{OUT} = 5V$ 、 $L = 10\mu H$ 、 $ESR = 0.1$ 、 $ESL = 10nH$ の場合、

$$I_{P-P} = \frac{(5)(10-5)}{(10)(10 \cdot 10^{-6})(500 \cdot 10^3)} = 0.5A$$

$$\Sigma \frac{dl}{dt} = \frac{10}{10 \cdot 10^{-6}} = 10^6$$

$$V_{RIPPLE} = (0.5A)(0.1) + (10 \cdot 10^{-9})(10^6)$$

$$= 0.05 + 0.01 = 60mV_{P-P}$$

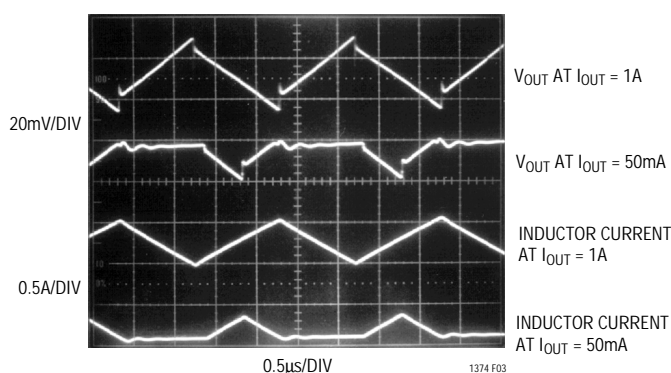


図3. LT1506のリップル電圧波形

### キャッチ・ダイオード

推奨されるキャッチ・ダイオード(D1)は、1N5821 ショットキ、またはそれと同等なモトローラ製MBR330です。このダイオードの定格は、平均順方向電流が3Aで逆電圧が30Vです。また、標準順方向電圧は3Aで0.5Vです。このダイオードはスイッチ・オフ時間中のみ導通します。ピーク逆電圧はレギュレータの入力電圧と等しくなります。また、通常動作時の平均順方向電流は次式から計算できます。

$$I_{D(平均)} = \frac{I_{OUT}(V_{IN} - V_{OUT})}{V_{IN}}$$

入力電圧対出力電圧の比が3.4:1を超えない限り、この式では最大負荷電流を4.25Aにしても、3Aより大きな値にはなりません。大容量ダイオードを検討する唯一の理由は、入力電圧が高く、出力が過負荷(短絡ではない)になったワーストケース条件です。短絡状態では、フォールドバック電流制限によってダイオード電流は2.6A以下に低減されますが、出力が過負荷になっても公称出力電圧

## アプリケーション情報

の1/3以下に低下しないときには、フォールドバックは機能しません。過負荷状態では、出力電流は6Aのピーク・スイッチ電流制限によって決定される5.7Aの標準値まで増加します。 $V_{IN} = 15V$ 、 $V_{OUT} = 4V$  (過負荷時は5V)、および $I_{OUT} = 5.7A$ の場合、

$$I_{D(平均)} = \frac{5.7(15-4)}{15} = 4.18A$$

これは短時間は安全ですが、これらの条件下で連続動作に耐えなければならない場合は、ダイオード・メーカに問い合わせてください。

### BOOSTピンの検討事項

大部分のアプリケーションでは、ブースト用部品として0.27 $\mu F$ コンデンサと1N914または1N4148ダイオードを使用します。アノードは安定化出力電圧に接続され、ブースト・コンデンサの両端に安定化出力とほぼ同じ電圧を発生します。特定のアプリケーションでは、アノードを非安定化入力電圧に接続する場合もあります。これは安定化出力電圧が非常に低い(3V以下)か、あるいは入力電圧が5V以下のときに必要になる場合があります。効率はコンデンサ値には影響されませんが、最小入力電圧のワーストケース条件下でも、十分再充電できるようにESRは1以下でなければなりません。どのタイプのフィルムまたはセラミック・コンデンサでも十分に機能します。

ほとんどのアプリケーションにおいて、0.27 $\mu F$ のブースト・コンデンサが十分効果的に働きますが、念のためここで詳細を説明しておきます。ブースト・コンデンサの容量は、スイッチ・ドライブ電流条件によって決定します。スイッチ・オン時間中にコンデンサに流れる電流は約 $I_{OUT}/50$ です。したがって、4.25Aのピーク負荷電流では、全電流は85mAになります。コンデンサのリプル電圧は、オン時間 $\times$ (電流/容量値)になります。つまり、 $\Delta V = t_{ON} \times 85mA/C$ です。ワーストケース条件( $t_{ON} = 1.8\mu s$ )でリプル電圧を0.6V以下(やや任意の値)に維持するためには、コンデンサは0.27 $\mu F$ でなければなりません。ブースト・コンデンサのリプル電圧は重要なパラメータではないものの、コンデンサ両端の最小電圧が3V以下に低下すれば、パワー・スイッチが完全に飽和しないため、効率が低下します。絶対最小コンデンサ値を求める近似式は以下のとおりです。

$$C_{MIN} = \frac{(I_{OUT}/50)(V_{OUT}/V_{IN})}{(f)(V_{OUT} - 2.8V)}$$

$f$  = スイッチング周波数

$V_{OUT}$  = 安定化出力電圧

$V_{IN}$  = 最小入力電圧

この式からは0.27 $\mu F$ よりかなり小さいコンデンサ値が得られますが、コンデンサの直列抵抗、温度による容量変動、出力過負荷などの二次的要素を考慮していないため注意が必要です。

### シャットダウン機能と低電圧ロックアウト

図4に、低電圧ロックアウト(UVLO)をLT1506に付加する方法を示します。一般にUVLOは入力電源が電流制限されているか、または比較的高い信号源抵抗をもつ状況で使用されます。スイッチング・レギュレータはソースから一定の電力を取り出すため、ソース電圧が低下するとソース電流は増加します。これはソースに対して負の抵抗負荷のように見え、ソースが電流制限されるか、または低ソース電圧状態で“L”にラッチされる可能性があります。UVLOはレギュレータが、問題の発生する可能性があるソース電圧で動作するのを防止します。

ロックアウトに対するスレッシュホールド電圧は約2.38Vで、内部2.42V基準電圧よりわずかに低くなっています。スレッシュホールド電圧時にはピンからは、3.5 $\mu A$ のバイアス電流が流れ出します。シャットダウン・ピンが開放されている場合は、内部で生成されたこのバイアス電流を使用してシャットダウン・ピンをデフォルトの“H”状態にします。低シャットダウン電流が問題にならないときは、 $R_{LO}$ を10k以下にすれば、この電流による誤差を最小限にすることができます。シャットダウン電流が問題になる場合は、 $R_{LO}$ を100kまで高くすることができますが、このバイアス電流による誤差と温度変化を考慮しなければなりません。

$$R_{LO} = 10k \sim 100k \text{ (推奨25k)}$$

$$R_{HI} = \frac{R_{LO}(V_{IN} - 2.38V)}{2.38V - R_{LO}(3.5\mu A)}$$

$V_{IN}$  = 最小入力電圧

## アプリケーション情報

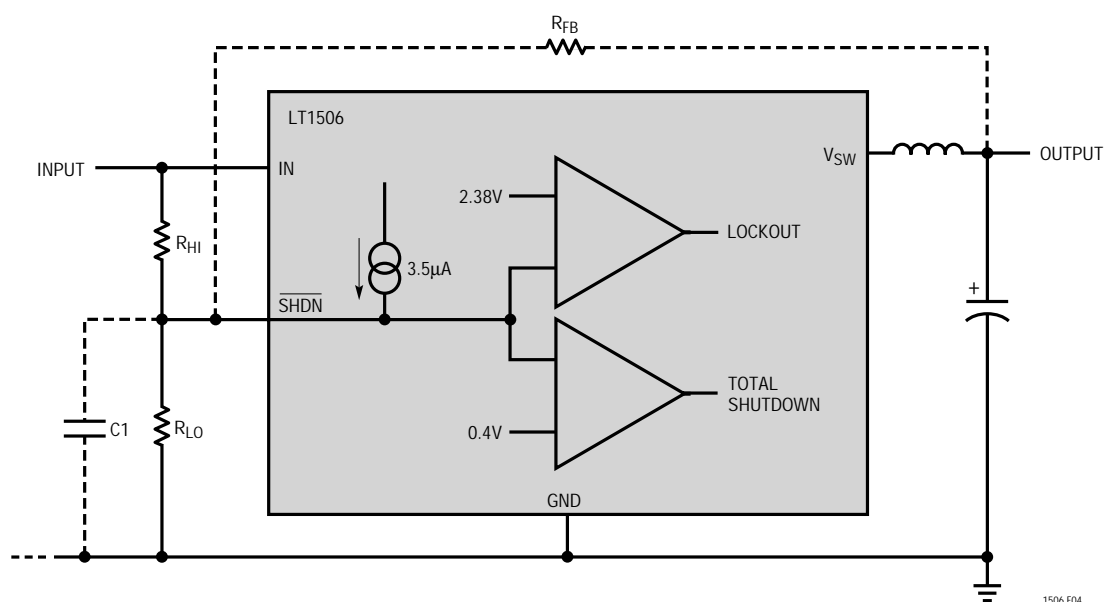


図4. 低電圧ロックアウト

抵抗からシャットダウン・ピンまでの接続を短くし、プレーン間またはスイッチング・ノードまでの表面容量が最小になるようにしてください。高抵抗値を使用する場合は、スイッチング・ノードとの結合問題を回避するために、1000pFコンデンサを使用して、シャットダウン・ピンをバイパスしなければなりません。低電圧ロックアウト点にヒステリシスをもたせたい場合は、出力ノードに抵抗 $R_{FB}$ を追加することができます。抵抗値は次式から計算できます。

$$R_{HI} = \frac{R_{LO} \left[ V_{IN} - 2.38 \left( \Delta V / V_{OUT} + 1 \right) + \Delta V \right]}{2.38 - R_2 (3.5 \mu A)}$$

$$R_{FB} = (R_{HI}) (V_{OUT} / \Delta V)$$

$R_{LO}$ には25k を推奨します。

$V_{IN}$  = 入力電圧がトリップ・レベルまで低下したときに、スイッチングが停止する入力電圧

$\Delta V$  = 入力電圧レベルでのヒステリシス

例：出力電圧が5Vのとき、入力電圧が6V以下に低下するとスイッチングが停止し、入力が7.5Vまで上昇しない限り再開しないようにします。したがって、 $\Delta V$ は1.5Vであり、 $V_{IN} = 6V$ になります。 $R_{LO}$ は25k にします。次式により、 $R_{HI}$ と $R_{FB}$ を求めます。

$$R_{HI} = \frac{25k \left[ 6 - 2.38 \left( 1.5 / 5 + 1 \right) + 1.5 \right]}{2.38 - 25k (3.5 \mu A)}$$

$$= \frac{25k (5.2)}{2.29} = 48k$$

$$R_{FB} = 48k (5 / 1.5) = 160k$$

## スイッチ・ノードの検討事項

最大効率を実現するには、スイッチの立上り時間と立下り時間を可能な限り短くします。放射と高周波での共振の問題を防止するために、スイッチ・ノードに接続される部品のレイアウトを適切に行うことが不可欠です。B (磁界)放射はキャッチ・ダイオード、スイッチ・ピン、および入力バイパス・コンデンサのリードをできるだけ短くすれば小さくなります。スイッチ・ピンとBOOSTピンに接続されるすべてのトレース長および面積を小さくすれば、E (電界)放射が低くなります。スイッチング回路の下に必ずグランド・プレーンを使用して、プレーン間の結合を防止する必要があります。重要部品の推奨レイアウトを図5に示します。帰還抵抗と補償部品は、スイッチ・ノードからできるだけ離してください。

## アプリケーション情報

また、キャッチ・ダイオードや入力コンデンサの大電流グランド・パスは短くし、アナログ・グランド・ラインから離します。

図6に高速スイッチング電流パスを図解します。クリーンなスイッチングと低EMIを保証するために、このパスのリード長はできる限り短くする必要があります。スイッチ、キャッチ・ダイオード、および入力コンデンサ

を含むパスだけが、立上りおよび立下り時間がnsのパスです。レイアウト上でこのパスを辿ってみると、それ以上ないほど短いことが理解できます。LT1506からダイオードや入力コンデンサを移動する場合は、履歴書を準備してから行ってください。その他のパスには直流と500kHzの三角波の組合せが一部含まれているだけなので、それほど重要ではありません。

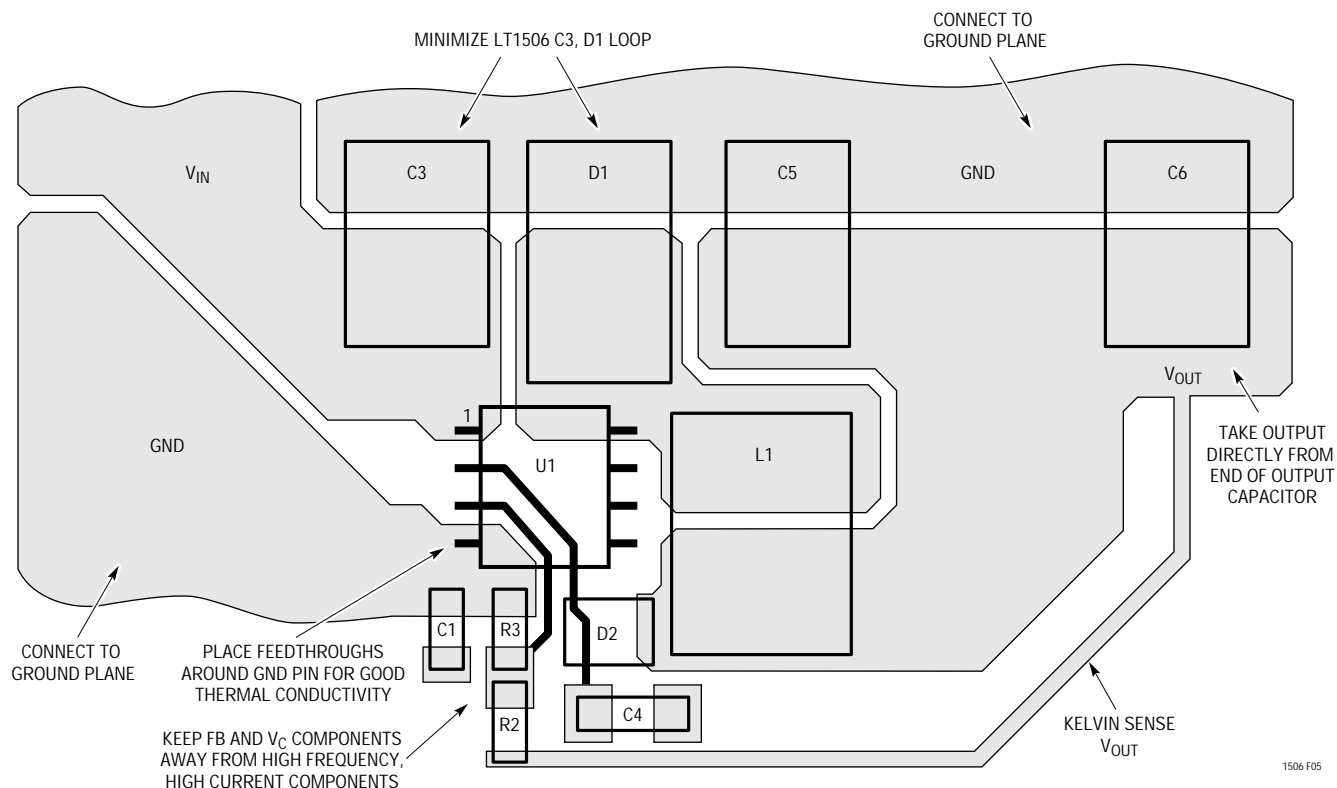


図5. 推奨レイアウト(トップサイドのみ表示)

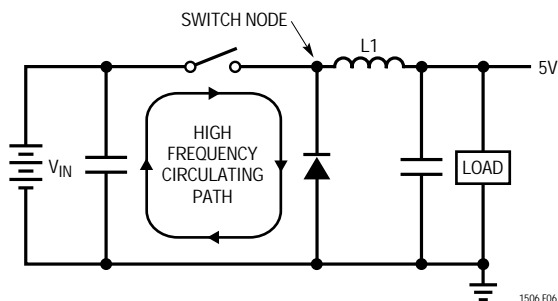


図6. 高速スイッチング・パス

## アプリケーション情報

### 寄生共振

スイッチ・ノードではときどき、共振すなわち「リングング」がみられます(図7参照)。スイッチ、ダイオード、入力コンデンサのリード・インダクタンスとダイオードの容量によって、スイッチ立上り時間に続いて非常に高い周波数のリングングが発生します。ショットキ・ダイオードはきわめて「Q」の高い接合容量をもっており、高周波数で励振されると何サイクルもリングングが続く可能性があります。入力コンデンサ、ダイオード、およびスイッチ・パスの全リード長が2.54cmであれば、そのインダクタンスは約25nHになります。スイッチ・オフでは、これは入力電圧に加えてNPN出力デバイス両端でスパイクを発生します。電流が大きい場合、レイアウトが適切でないとこのスパイクが10V~20Vまたはそれ以上になることがあり、潜在的に絶対最大スイッチ電圧を超えます。高信頼性動作を保証するには、スイッチ、キャッチ・ダイオード、および入力コンデンサのパスを可能な限り短くする必要があります。これを調べるときは、100MHz以上のオシロスコープを使用し、波形はパッケージのリードで観察しなければなりません。

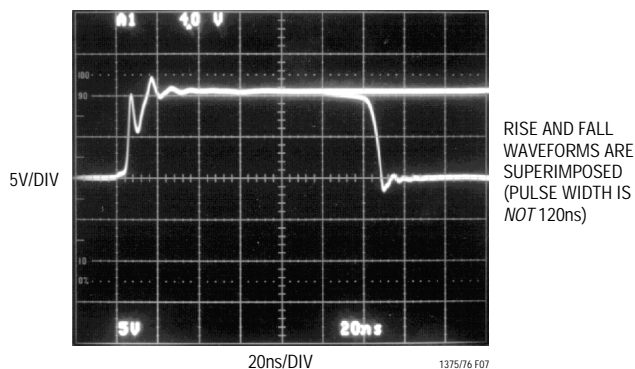


図7. スイッチ・ノード共振

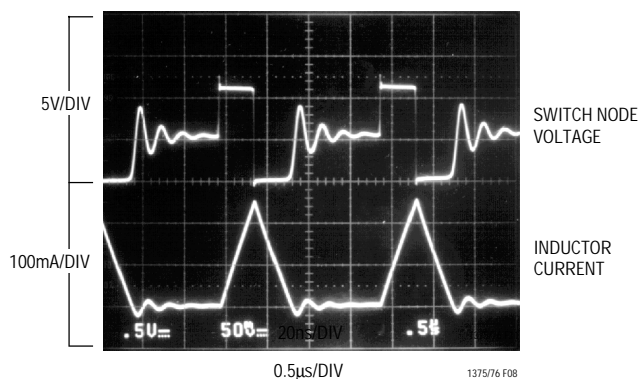


図8. 不連続モード・リングング

せん。また、このスイッチ・オフ・スパイクによって、SWノードがグランド以下になります。LT1506はこの問題を緩和する特殊回路を内蔵していますが、1Vを超える負電圧が10ns以上続かないようにしなければなりません。図7の立下りエッジのオーバーシュートの詳細を観察するには、100MHz以上のオシロスコープでないと使えないことに注意してください。

また、スイッチ・オフ時間中にインダクタ電流がゼロになるほど負荷電流が低い場合は、スイッチ・オフ時間中にさらに低い周波数のリングングがみられます(図8参照)。スイッチおよびダイオード容量がインダクタと共振して、1MHzから10MHzで減衰リングングを生じます。このリングングはレギュレータに影響はなく、EMIの大きな要因になるようなことも考えられません。それを抵抗スナバで減衰させようとするとも効率が低下します。

### 入力のバイパスと電圧範囲

#### 入力バイパス・コンデンサ

降圧コンバータには入力電源からパルス状の電流が流れます。これらパルスの平均高さは負荷電流と等しく、デューティ・サイクルは $V_{OUT}/V_{IN}$ になります。この電流の立上りと立下りは非常に高速です。入力電源のローカル・バイパス・コンデンサは、レギュレータを適切に動作させ、入力電源に帰還するリップル電流を少なくするために必要です。このコンデンサは、タイトなローカル・ループにスイッチング電流を流してEMIを抑えます。

入力バイパス・コンデンサのリップル定格を低く見積もったり $\mu F$ の値に固執しないでください。入力コンデンサはすべてのスイッチング電流リップルを吸収するためのものであり、そのRMS値は負荷電流の1/2になる可能性があります。信頼性の高い動作を保証するために、コンデンサのリップル電流定格を遵守しなければなりません。多くの場合、必要なリップル定格を得るために、2個のコンデンサを並列に接続する必要があります。電力の分担を確実にするため、両方のコンデンサは容量値とメーカが同じものでなければなりません。コンデンサの実際値( $\mu F$ )は、500kHzでは $5\mu F$ 以上は基本的に抵抗となるため、特に重要ではありません。RMSリップル電流定格が重要なパラメータです。実際のRMS電流は次式で計算できます。

$$I_{RIPPLE(RMS)} = I_{OUT} \sqrt{V_{OUT}(V_{IN} - V_{OUT})/V_{IN}^2}$$



## アプリケーション情報

平方根内の項は、入力電圧が出力の2倍のときに最大値の0.5になり、比較的広い入力電圧範囲で0.5付近の値に留まります。したがって、単にワーストケース値を使用し、RMSリップル電流を負荷電流の1/2と仮定するのが一般的な方法です。LT1506の場合は4.5Aの最大出力電流では、入力バイパス・コンデンサは2.25Aのリップル電流で規定しなければなりません。しかし、最終リップル電流定格を選択する場合は、二次的な検討事項が多数あることに注意してください。これらには、周囲温度、平均対ピーク負荷電流、装置の動作スケジュール、および所要製品寿命期間などが含まれます。詳細については、アプリケーション・ノート19および46、そしてデザイン・ノート95を参照してください。

### 入力コンデンサの種類

レギュレータの入力で使用するコンデンサの種類を選択する場合、いくつかの注意事項があります。アルミニウム電解コンデンサは低コストですが、必要なリップル電流定格を満足させるには物理的形狀が大きく、サイズの制約(特に高さ)のため使用できない場合があります。現在、大きな容量のセラミック・コンデンサが入手可能になりました。セラミック・コンデンサはリップル電流と電圧定格が高いため入力のバイパスには最適です。ただし、コストはかなり高く実装面積も大きくなる可能性があります。固体タンタル・コンデンサも、起動時に大きなサージ電流が発生すると時に故障することを除いては、良い選択といえます。固体タンタル・コンデンサは短絡すると、明るい白色光を発生しながら多量の不快な煙を出して燃え上がる可能性があります。この現象が発生するのは全部のユニットのうちのごく少数ですが、一部のOEMメーカは高サージ・アプリケーションでの使用を禁じています。レギュレータの入力バイパス・コンデンサには、バッテリーや大容量ソースが接続されていると、高サージが加わる可能性があります。一部のメーカがサージ能力を特別に試験したタンタル・コンデンサ・ライン(AVX TPSシリーズなど、表3参照)を開発しましたが、これらのユニットでも入力電圧サージがコンデンサの最大電圧定格に接近した場合は、故障する可能性があります。AVXは、高サージ・アプリケーションの場合はコンデンサ電圧を2:1にディレーティングすることを推奨しています。

入力電圧がデータシートで規定される最小値に非常に近い場合は、大きなコンデンサが必要になることがあります。スイッチ・オン時間でのわずかな電圧降下は通常問

題になることはありませんが、入力電圧が非常に低い場合は入力電圧が最小仕様以下に低下するため、動作が不安定になるおそれがあります。入出力電圧差が最小値に近くなると問題が発生する可能性があります。容量性リアクタンスがこれらの項と比較して小さいため、これらの電圧降下の振幅は、通常コンデンサのESRとESLに関係します。ESRが支配項となる傾向があり、あるコンデンサ・タイプにおいて、コンデンサの物理的サイズに反比例します。

### 同期(DDパッケージ用-SYNCオプション)

SYNCピンは内部発振器を外部信号に同期させるのに使用します。SYNC入力は、10%から90%のデューティ・サイクルで、ロジックレベル“L”から最大同期スレッシュホールドを通過しなければなりません。この入力は、ロジック・レベル出力から直接ドライブできます。同期範囲は初期動作周波数から最大1MHzまでです。つまり、実用最小同期周波数は標準動作周波数(500kHz)ではなく、ワーストケースの場合の高い方の自己発振周波数(560kHz)に一致することを意味します。700kHz以上で同期させるときには、同期周波数が高くなるほど、低調波スイッチングを防止するのに使用した内部スロープ補償の振幅が小さくなるため、注意が必要です。この種の低調波スイッチングは、入力電圧が出力電圧の2倍より低いときに発生します。インダクタ値が高いほど、この問題が解消される傾向があります。この原因をスロープ補償が不十分と考える前に、まず周波数補償のセクションに記載されている別の低調波スイッチングの原因についての説明を参照してください。アプリケーション・ノート19に、スロープ補償に関する詳細が記載されています。

起動時に、 $V_C$ がFBピンでクランプされているとき(図2、Q2参照)、同期機能はディスエーブルされます。これによって、周波数フォールドバックが短絡出力状態でも動作することができます。通常動作中、FBピンが1.5Vに達するまで、スイッチング周波数は内部発振器によって制御され、その後でSYNCピンが機能するようになります。

### 熱に関する計算

LT1506チップの消費電力は、スイッチDC損失、スイッチAC損失、ブースト回路電流、入力消費電流の4種類の要素で構成されます。以下にこれら各損失の計算方法を

## アプリケーション情報

示します。これらの式は連続モード動作を仮定していますので、軽負荷電流時の効率を計算するのに使用してはなりません。

スイッチ損失：

$$P_{SW} = \frac{R_{SW}(I_{OUT})^2(V_{OUT})}{V_{IN}} + 24ns(I_{OUT})(V_{IN})(f)$$

ブースト電流損失：

$$P_{BOOST} = \frac{V_{OUT}^2(I_{OUT}/50)}{V_{IN}}$$

消費電流損失：

$$P_Q = V_{IN}(0.001) + V_{OUT}(0.005) + \frac{(V_{OUT})^2(0.002)}{V_{IN}}$$

$R_{SW}$  = スイッチ抵抗 (およそ0.07)

24ns = 等価スイッチ電流/電圧オーバーラップ時間

f = スイッチ周波数

例： $V_{IN} = 10V$ 、 $V_{OUT} = 5V$ 、および $I_{OUT} = 3A$ の場合、

$$P_{SW} = \frac{(0.07)(3)^2(5)}{10} + (24 \cdot 10^{-9})(3)(10)(500 \cdot 10^3) \\ = 0.32 + 0.36 = 0.68W$$

$$P_{BOOST} = \frac{(5)^2(3/50)}{10} = 0.15W$$

$$P_Q = 10(0.001) + 5(0.005) + \frac{(5)^2(0.002)}{10} = 0.04W$$

全消費電力は $0.68 + 0.15 + 0.04 = 0.87W$ です。

LT1506のパッケージの熱抵抗は内部、または裏面プレーンの存在に影響されます。SOパッケージの下側をすべてプレーンにした場合、熱抵抗は約80 /Wになります。プレーンを使用しない場合、熱抵抗は約120 /Wまで増加します。ダイ温度を計算するには、以下のとおり希望のパッケージに対する適切な熱抵抗値を使用し、ワーストケースの周囲温度を加算してください。

$$T_J = T_A + \theta_{JA}(P_{TOT})$$

50 の周囲温度で、SO-8パッケージ( $\theta_{JA} = 80$  /W)を使用する場合は、以下ようになります。

$$T_J = 50 + 80(0.87) = 120$$

ダイ温度は低入力電圧で最も高くなるため、熱計算には連続最低入力動作電圧を使用してください。

### 周波数補償

スイッチング・レギュレータのループ周波数補償は、高効率を実現するために使用されるリアクティブ部品が帰還ループ内に複数のポールを形成するため、複雑な問題になる可能性があります。従来の降圧コンバータに使用されるインダクタと出力コンデンサは、実際に共振タンク回路を形成し、共振周波数においてピーキングや急激な180°位相シフトを生じることがあります。対照的に、LT1506は「電流モード」アーキテクチャを使用して、インダクタによって形成される位相シフトを軽減しています。この基本接続を図9に示します。図10に、 $V_C$ ピンから出力を測定したLT1506の電力部の位相と利得のボード・プロットを示します。利得はLT1506のパワー部の5.3A/V相互コンダクタンスと、出力からグランドまでの実効複素インピーダンスで設定されます。利得は100μFの出力コンデンサで設定される600Hzのポール周波数より高い周波数で、なめらかにロールオフします。位相の低下は約70°に制限されています。コンデンサのESR(0.1 )で設定されるゼロ周波数(およそ16kHz)で位相が回復し、利得は安定します。

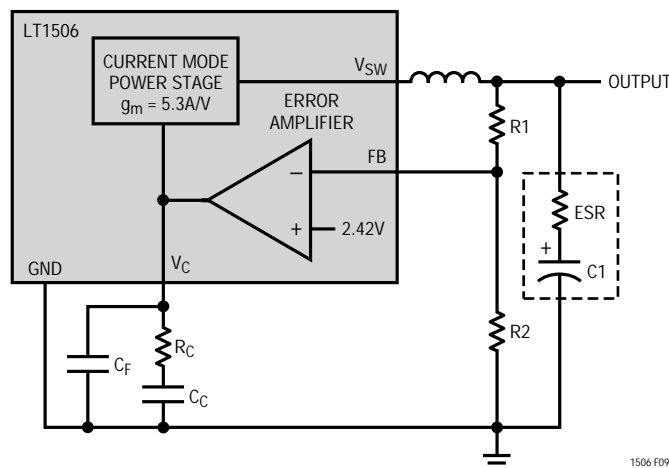


図9. ループ応答のモデル

1506 F09

# アプリケーション情報

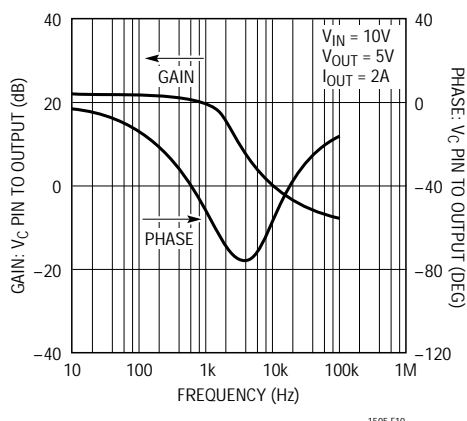


図10.  $V_C$ ピンから出力への応答

誤差アンプの相互コンダクタンスの位相と利得を図11に示します。誤差アンプは、200k の出力インピーダンスに12pFを並列に接続した2000μモの相互コンダクタンスとしてモデル化することができます。すべての実用アプリケーションでは、 $V_C$ ピンからグランドへの補償回路のインピーダンスは、500Hz以上の周波数では、アンプの出力インピーダンスよりはるかに低くなります。つまり、誤差アンプの特性自体はループに過剰な位相変化を与えないことを意味し、誤差アンプ部の位相 / 利得特性は外部補償回路によって完全に制御されます。

図12に、1.5nFの補償コンデンサを使用した場合の全ループ位相/利得特性を示します。誤差アンプは530Hzにポールをもち、位相は90°までロールオフしそこで停滞します。全ループは低周波数において74dBの利得をもち、100kHzでユニティ・ゲインにロールオフします。位相は出力コンデンサのESRによって位相が10kHzより高くなるまで、2ポール特性を示します。位相マージンはユニティゲインで約60°です。

アナログに詳しい人は4.4kHz周辺で、位相がゼロ位相マージンラインに非常に接近していることに気付くはずです。これはスイッチング・レギュレータに典型的なものであり、広範な負荷で動作するレギュレータでは特に顕著です。この低位相領域はユニティゲイン付近に発生しない限り問題になることはありません。実際には出力コンデンサのESRの可変性が、ループ応答に関する他のすべての効果を支配する傾向があります。ESRが変化するとユニティ・ゲインが変化しますが、同時に位相も変化します。したがって、ESRのきわめて広い範囲(±3:1)で十分な位相マージンが維持されます。

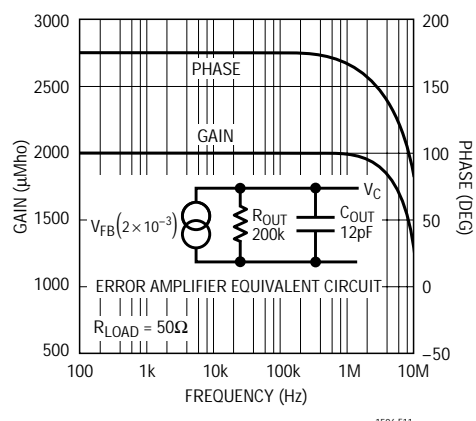


図11. 誤差アンプ利得と位相

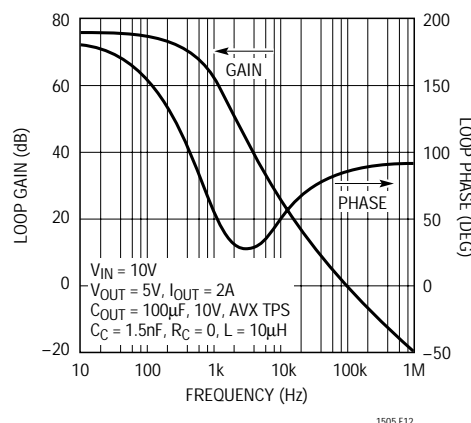


図12. 全ループ特性

## 補償回路の抵抗について

誤差アンプの補償に「ゼロ」を追加してループの位相マージンを増大させることは、スイッチング・レギュレータの設計では一般に行われていることです。このゼロは補償コンデンサと直列の抵抗( $R_C$ )という形で外部回路に形成されます。一般に、この抵抗のサイズを増やすほどループの安定性が向上しますが、この値には2つの限界があります。1つは、出力コンデンサのESRと大きな値の $R_C$ の組合せによっては、利得余裕が完全にロールオフを停止するため利得余裕の問題が発生する場合があります。利得余裕がゼロになる $R_C$ の近似式は以下のとおりです。

$$R_C (\text{ループ利得} = 1) = \frac{V_{OUT}}{(G_{MP})(G_{MA})(ESR)(2.42)}$$

## アプリケーション情報

$G_{MP}$  = 電力段の相互コンダクタンス = 5.3A/V  
 $G_{MA}$  = 誤差アンプの相互コンダクタンス =  $2(10^{-3})$   
 ESR = 出力コンデンサのESR  
 2.42 = 基準電圧

$V_{OUT} = 5V$ および $ESR = 0.03$  の場合、 $R_C$ を6.5k にすると利得余裕がゼロになり、これが上限です。第二の制限は、理論的な小信号動作には何も関係ありません。この抵抗は、スイッチング周波数での利得を含む誤差アンプの高周波数利得を設定します。スイッチング周波数利得が必要以上に高いと、出力リップル電圧が大きな振幅で $V_C$ ピンに現れてレギュレータの適切な動作が乱されます。極端な場合には低調波スイッチングが発生しますが、これはスイッチ・ノードのパルス幅が変化することによって確認できます。さらにひどい場合には、出力電圧がほぼ適切であってもレギュレータから異常な音が聞こえることがあります。ボード・プロットは振幅とは無関係な解析であるため、これが理論的なボード・プロットに現れることはありません。テストにより、 $V_C$ のリップル電圧を100mV<sub>P-P</sub>以下に保持すれば、LT1506は正常に動作することが分かっています。以下の式は、ループに $R_C$ が追加されたときの $V_C$ リップル電圧を推定するものです。ただし、 $R_C$ は500kHzにおける $C_C$ のリアクタンスと比較して大きいと仮定します。

$$V_{C(RIPPLE)} = \frac{(R_C)(G_{MA})(V_{IN} - V_{OUT})(ESR)(2.4)}{(V_{IN})(L)(f)}$$

$G_{MA}$  = 誤差アンプの相互コンダクタンス(2000 $\mu$ モ-)

LT1506のコンピュータ・シミュレーションが、3k の直列補償抵抗により、十分な利得余裕をもつ最良の全ループ応答が得られることを示した場合は、 $V_{IN} = 10V$ 、 $V_{OUT} = 5V$ 、 $ESR = 0.1$ 、 $L = 10\mu H$ での $V_C$ ピンのリップル電圧は、次のようになります。

$$V_{C(RIPPLE)} = \frac{(3k)(2 \cdot 10^{-3})(10-5)(0.1)(2.4)}{(10)(10 \cdot 10^{-6})(500 \cdot 10^3)} = 0.144V$$

この高いリップル電圧は、低調波スイッチングを発生させる可能性があります。ほとんどの状況では、抵抗値を妥当な値(この場合は2k 以下)にすれば十分な位相マージンが得られ、低調波問題は起こりません。また、抵抗を大きくしないと許容できる位相応答が得られない場合

もあり、その際は何らかの手段を講じて $V_C$ ピンのリップル電圧を制御する必要があります。推奨方法は、 $V_C$ ピンの $R_C/C_C$ 回路と並列にコンデンサ( $C_F$ )を追加することです。このコンデンサのポール周波数は一般にスイッチング周波数の1/5に設定されているため、スイッチング・リップルを大幅に減衰しますが、ループのユニティゲイン周波数で許容できない位相シフトが追加されることはありません。 $R_C = 3k$ の場合、

$$C_F = \frac{5}{(2\pi)(f)(R_C)} = \frac{5}{2\pi(500 \cdot 10^3)(3k)} = 531pF$$

### ループ安定性のテスト方法

LT1506の「標準的」な補償は、 $R_C = 0$ の場合は $C_C$ に1.5nFコンデンサを使用して行います。ほとんどのアプリケーションはこの補償で対応できますが、ループ補償部品の「最適」値は、さまざまな面で十分に制御されないパラメータに依存します。これらには、インダクタ値(製造公差、負荷電流、およびリップル電流変動により $\pm 30\%$ )、出力容量(製造公差、温度、経年劣化、および負荷変動により $\pm 20\%$ から $\pm 50\%$ )、出力コンデンサのESR(製造公差、温度、および経年劣化により $\pm 200\%$ )、そしてDC入力電流および出力負荷電流などがあります。したがって、設計者は最終設計をチェックして、これらすべての偏差に対応でき「耐久性」も高いことを確認することが重要です。

図13の回路を使用し、出力で過渡応答を観測しながら、レギュレータ出力にパルス負荷を与えてスイッチング・レギュレータのループ安定性をチェックします。レギュレータ・ループは、50Hz ~ 1kHzの比較的低い周波数において小さな過渡AC負荷電流で「ヒット」されます。これにより、図14に示すように出力が数mVジャンプしてから元の値にセトリングします。動作特性が優れたループはきちんとセトリングしますが、位相マージンや利得余裕が小さなループはセトリング時に「リングング」が発生します。リングングの数は安定度を表し、このリングング周波数はループの概略のユニティゲイン周波数を示します。ループが非直線動作になるほど振幅が高くなければ、信号の振幅は特に重要ではありません。

## アプリケーション情報

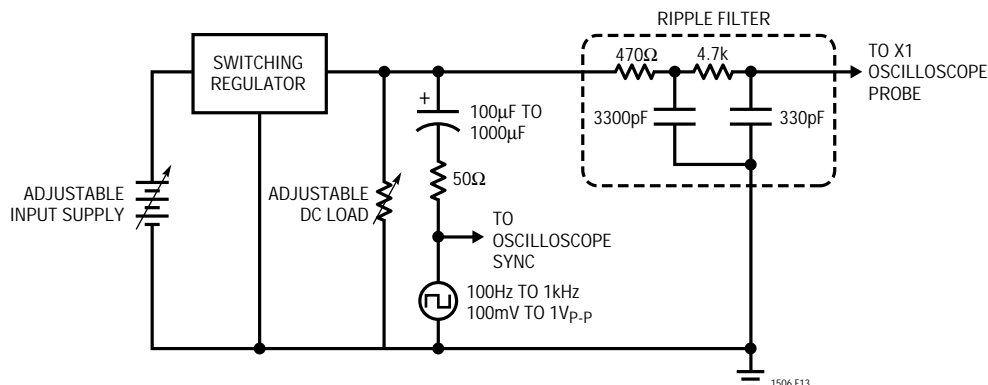


図13. ループ安定性のテスト回路

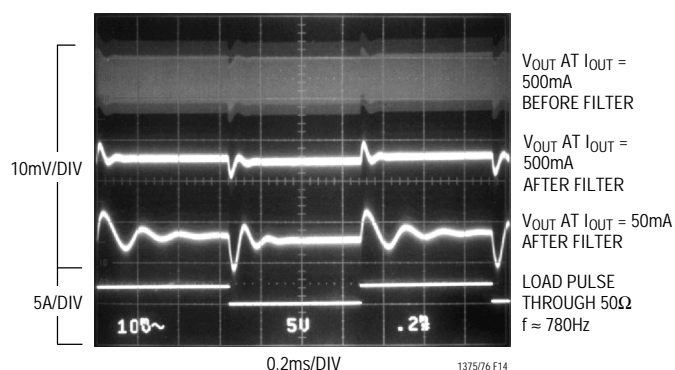


図14. ループ安定性のチェック

レギュレータの出力には、必要な低周波数過渡情報と適度な高周波(500kHz)リップルの両方が含まれています。リップルがあると小さな過渡信号の観測が困難なため、2ポール、100kHzフィルタを追加します。このフィルタは特に重要なものではなく、過渡信号を多少減衰させたとしても、振幅は重要でないため、これが問題になることはありません。

この回路構成が正しく動作していることを確認してから、負荷電流と入力電圧を変化させて、過渡応答が「リングング」すると思われる組合せがみつかるかどうか試します。この手順により、最良のループ安定性または高速ループ過渡応答を実現するために調整が必要になる場合があります。 $R_C$ として数kの抵抗を追加すれば、ほとんどの場合はループ応答が改善されるはずです。ただし、前にも説明したように、1k以上の $R_C$ を使用すると $V_C$ ピンのリップルを制御するために、さらに $C_F$ を追加しなければならない場合があるため必要なときにだけ実施してください。すべて順調であれば、温度特性を明確にするため回路(特に出力コンデンサ)にヒートガンと冷却スプレーを使用します。この手順では部品の初期許容差は考慮していないことを覚えておいてください。

部品値のバラツキによって問題が発生しないようにするために、すべての負荷およびライン条件で、かなりクリーンな応答が観察できなければなりません。注記事項：マーフィーによれば、製造工程で変更される可能性の高い部品は出力コンデンサです。これは、メーカー間での(ESRの)偏差が大きく、問題が生じるおそれがあるためです。製造時の出力コンデンサの供給元は固定するほうが賢明です。

図14の $I_{LOAD} = 50mA$ で明かなように、「クリーンな応答」規則の例外は負荷が非常に軽い場合です。スイッチング・レギュレータは、負荷が非常に軽いときにループ応答が極端に変化する傾向があります。これはほとんどの場合インダクタ電流が不連続になるためです。結果的に、非常に低速ながら安定した特性が得られます。もう1つの可能性としては位相マージンが小さいことで、これは過渡状態の出力にリングングが生じることによって確認されます。幸い軽負荷時の低位相マージンは、特に部品のバラツキに敏感ではないため、過渡応答テストで妥当な結果が得られれば製造時にも問題になりません。軽負荷時のリングングの周波数は部品許容差に応じて変動しますが、位相マージンは通常一定です。

## 電流分担マルチフェーズ電源

図15に示す回路は、複数のLT1506を使用し、5V/12A電源を生成します。大型のスイッチャ1つに比べ、複数のスイッチャを使用する方法には利点があります。インダクタ・サイズは、かなり低減されます。また、4Aのインダクタ3つは、12Aのコイル1つよりもはるかに少ないエネルギー( $LI^2/2$ )を蓄え、サイズもはるかに小さくなります。さらに、3つのコンバータが位相差

## アプリケーション情報

120°で同期するので、入力および出力のリプル電流は低減され、フィルタ・コンデンサのリプル定格、サイズ、コストも低減されます。

### 電流分担/スプリット入力電源

電流分担は、 $V_C$ ピンを共通の補償コンデンサに接続することによって達成できます。誤差アンプ出力はgm段なので、デバイスはいくつでも一緒に接続することができます。この合成誤差アンプの有効gmは、個々のデバイスを並列接続したものとなります。図15の補償コンデンサC4は3倍に増加されています。基準電圧の許容差により、 $V_C$ ピン間に小さなオフセット電流が流れます。総合的な結果として、ループは使用するデバイスの最小基準電圧と最大基準電圧の間の電圧に出力を安定化します。デバイス間のスイッチ電流マッチングは、一般に300mAより良好です。 $V_C$ からスイッチ電流の相互コンダクタンスの温度係数は負であるため、過大な電流消費を防ぐことができます。

$V_C$ 電圧は共通なので、各LT1506は同じスイッチ電流（デューティ・サイクルではない）で動作することを強制されます。各デバイスはそれぞれの入力電圧によって決まるデューティ・サイクルで動作します。図15において、入力を分割して各デバイスを異なる電圧で動作させることもできます。 $V_C$ が共通であるため、負荷は入力間で確実に分配されます。

### 同期リプル電流

リング・カウンタは位相が120°ずつ離れた3つの同期信号を、600kHz、デューティ・サイクル33%で生成します。同期入力には広範囲にわたるデューティ・サイクルで動作するので、これ以上のパルス条件は不要です。各デバイスの最大入力リプル電流は4A、600kHzの方形波です。各デバイスを入力リプル電流を同期させて加算すると、リプルは4Aのままですが、周波数は1.8MHzまで増加します。また、出力リプル電流は1.8MHzの三角形の波形となり、 $V_{IN}$ が10Vのときの最大振幅は350mAです。興味深いことに、 $V_{IN}$ が7.6Vおよび15Vのとき、各デバイスの出力リプル電流を加算すると理論的には完全にキャンセルします。ボード・スペースとリプル電圧を低減するために、C1とC3にはセラミック・コンデンサを使用します。セラミック出力コンデンサを使用する場合、有効な直列抵抗が不足するので、ループ補償コンデンサC4を調整する必要があります。セラミック出力コンデンサを使用する場合、1.5nFの標準的なタンタル補償コンデンサを22nF (×3)に増加してください。同期を行わず、内部発振器が自走するならば、回路は正常に動作しますが、リプルはキャンセルされません。入力および出力コンデンサのリプル定格は、全出力電流に対して定めなければなりません。

4

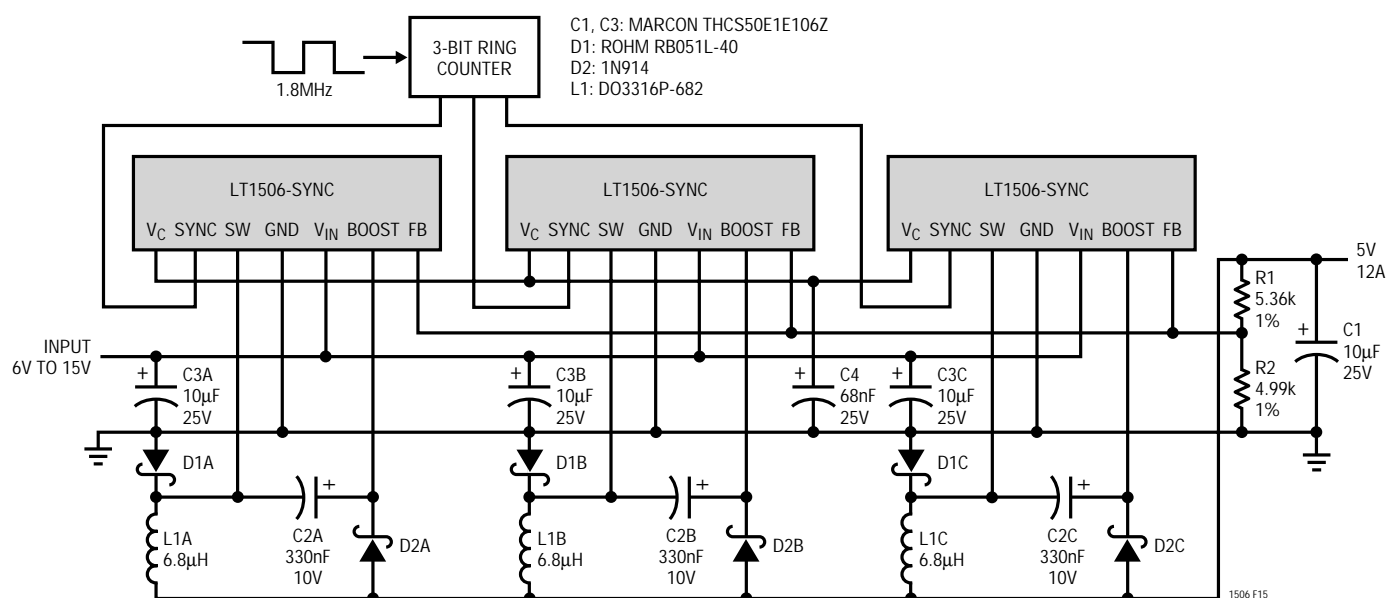


図15. 12A電源の電流分担

## アプリケーション情報

### 重複動作

図15に示す回路は、出力電流が8A未満での動作時においてもフォールト・トレラントです。1つのデバイスが故障しても、出力は安定化されたままです。帰還ループはV<sub>C</sub>ピンの電圧を上昇させ、残り2つのデバイスのスイッチ電流を増やすことによって補償します。

### 可変ソフト・スタート付きバック・コンバータ

大容量の負荷により、起動時に高い入力電流が発生することがあります。図16に示す回路は、起動時に出力のdv/dtを制限し、コンデンサの充電速度を制御します。バック・コンバータは標準的な構成をしており、R3、R4、C<sub>SS</sub>、Q1が追加されています。出力が立ち上がり始めると、Q1はターンオンし、V<sub>C</sub>ピンを介して出力電流を安定化することにより、出力のdv/dtを一定に維持します。出力の立ち上がり時間は、C<sub>SS</sub>を流れる電流によって制御されます。この電流値はR4とQ1のV<sub>BE</sub>によって決まります。出力が安定化されると、Q1はターンオフし、回路は正常に動作します。R3はQ1のベースの過渡保護に使用されます。

$$\text{立ち上がり時間} = \frac{(R4)(C_{SS})(V_{OUT})}{(V_{BE})}$$

図16での値を用いると、

$$\text{立ち上がり時間} = \frac{(47 \cdot 10^3)(15 \cdot 10^{-9})(5)}{0.7} = 5\text{ms}$$

ランプは直線的であり、100msのオーダーの立ち上がり時間が可能です。回路は電圧制御されるので、ランプ・レートは負荷特性に影響されず、最大出力電流も変化しませ

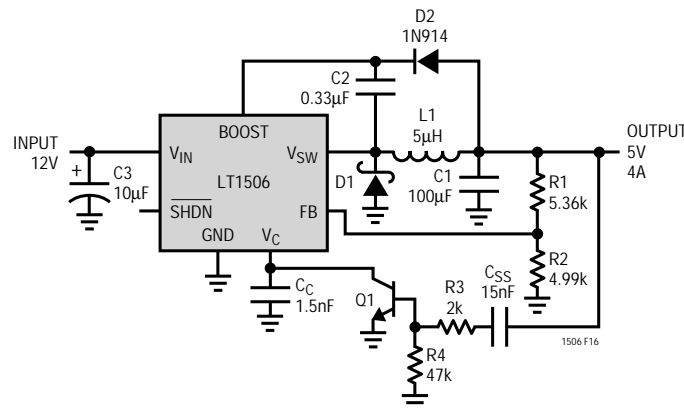


図16. 可変ソフト・スタート付きバック・コンバータ

ん。この回路は、複数のレギュレータ出力のシーケンス用に変形して使用することができます。

### デュアル出力SEPICコンバータ

図17の回路は、1つの磁気素子で正、負両方の5V出力を発生します。図に示す2つのインダクタは、実際には標準的なBH Electronicsインダクタにコイルを2つ巻いたものです。5V出力のトポロジは標準バック・コンバータです。-5Vトポロジは、C4がない場合は単にバック・コンバータにフライバック巻線を結合したものです。C4はSEPIC (Single-Ended Primary Inductance Converter) トポロジを形成しており、レギュレーションを改善し、L1のリップル電流を低減します。C4がない場合、相対ローディングとカップリング損失のために、L1Bの電圧振幅はL1Aと異なります。C4はL1Bで等しい電圧振幅を維持するために、低インピーダンス・パスを供給し、レギュレーションを改善します。フライバック・コンバータでは、スイッチ・オン時間中、L1Bには電流が流れないため、コンバータの全エネルギーはL1Aだけに蓄えられます。スイッチ・オフ時に、エネルギーは磁気結合によってL1Bに受け渡され、-5Vレールに電源を供給します。C4はスイッチ・オン時間中に、L1Bを正にし、電流が流れるようにして、L1BとC4にエネルギーを蓄積します。スイッチ・オフで、L1BとC4の両方に蓄えられているエネルギーが-5Vレールに電源を供給します。これによってL1Aの電流が減少し、L1B電流波形は方形波から三角波に変化します。この回路の詳細については、デザイン・ノート100を参照してください。

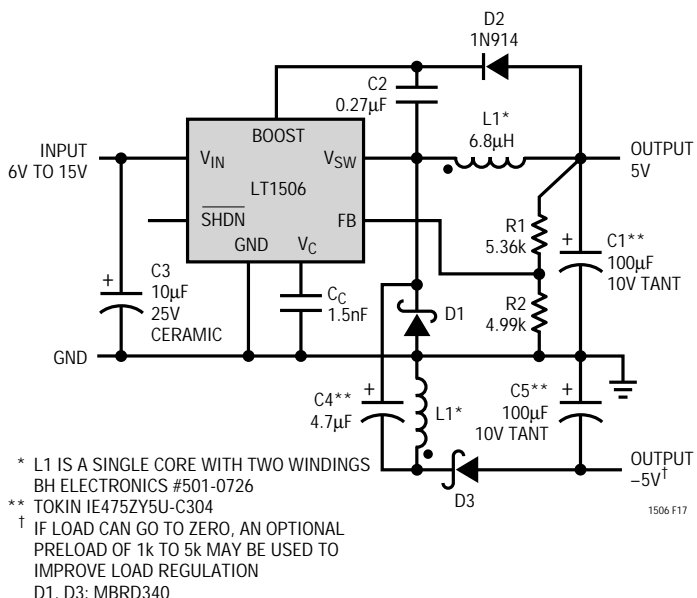


図17. デュアル出力SEPICコンバータ

## 関連製品

製品番号	説明	注釈
LT1074/LT1076	降圧スイッチング・レギュレータ	入力40V、100kHz、5Aおよび2A
LTC <sup>®</sup> 1148	高効率同期整流式降圧スイッチング・レギュレータ	外付けFETスイッチ
LTC1149	高効率同期整流式降圧スイッチング・レギュレータ	外付けFETスイッチ
LTC1174	高効率降圧および反転DC/DCコンバータ	0.5A、150kHzバースト・モード <sup>™</sup> 動作
LT1176	降圧スイッチング・レギュレータ	PDIP LT1076
LT1370	高効率DC/DCコンバータ	42V、6A、500kHzスイッチ
LT1371	高効率DC/DCコンバータ	35V、3A、500kHzスイッチ
LT1372/LT1377	500kHz/1MHz高効率1.5Aスイッチング・レギュレータ	ブースト・トポロジ
LT1374	高効率降圧スイッチング・レギュレータ	25V、4.5A、500kHzスイッチ
LT1435/LT1436	高効率降圧コンバータ	外付けスイッチ、低ノイズ

Burst Modeはリニアテクノロジー社の商標です。