



広入力電圧範囲 同期整流式バック・コントローラ

特長

- 動作入力電圧：10V～55V
- 入力電圧フィードフォワード補償
- 0.7V、誤差0.5%の内部基準電圧
- 最大1MHzまでプログラム可能な固定周波数の電圧モード・コントローラ
- ハイサイドPチャネルMOSFET及び同期式NチャネルMOSFET用ゲート駆動出力内蔵
- 16ピンPowerPAD™パッケージ($\theta_{JC} = 2^{\circ}\text{C/W}$)
- サーマル・シャットダウン機能
- 外部同期可能
- プログラマブルに設定できるハイサイド電流制限
- プログラマブルに設定できる閉ループのソフトスタート
- TPS40060はソースのみ/TPS40061はソース/シンク

概要

TPS40060及びTPS40061は、高電圧で広い入力電圧範囲(10V～55V)をもつ同期式降圧型コンバータです。

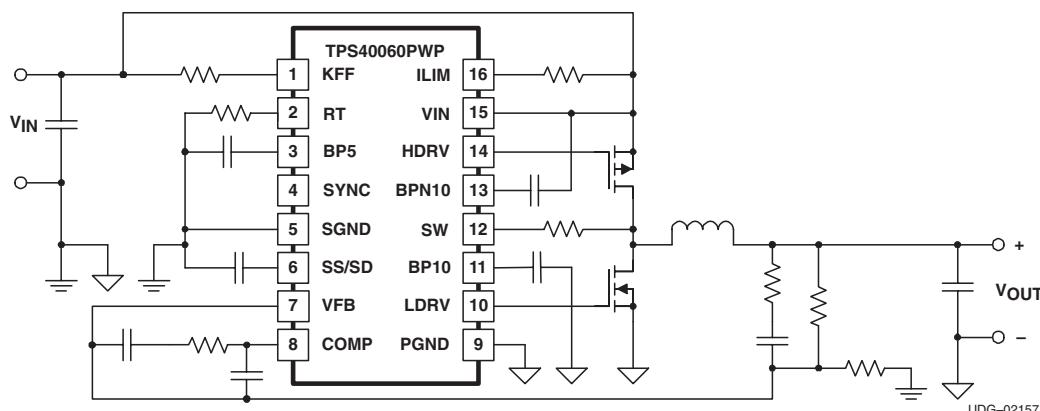
このデバイス・ファミリは、設計する上でのフレキシビリティを備えており、ソフトスタート、UVLO、動作周波数、電圧フィードフォワード、ハイサイド電流制限、ループ補償などのユーザーがプログラマブルに設定できる多種多様な機能をもっています。また、このデバイスは外部電源にも同期させることができます。

TPS40060及びTPS40061は外部のPチャネル・ハイサイドMOSFET及びNチャネル同期整流(SR)MOSFET用のMOSFETゲート・ドライバを内蔵しています。ゲート駆動のロジックにはハイサイドと同期整流器の導通が同時に起こるのを防ぐアンチクロス導通回路が含まれています。

アプリケーション

- ネットワーキング装置
- テレコム機器
- 基地局
- サーバー

SIMPLIFIED APPLICATION DIAGRAM



SWIFT、PowerPAD、SpActおよびBurr-Brownは、テキサス・インスツルメンツの商標です。

この資料は、Texas Instruments Incorporated (TI) が英文で記述した資料を、皆様のご理解の一助として頂くために日本テキサス・インスツルメンツ(日本TI)が英文から和文へ翻訳して作成したものです。
資料によっては正規英語版資料の更新に対応していないものがあります。
日本TIによる和文資料は、あくまでもTI正規英語版をご理解頂くための補助的参考資料としてご使用下さい。
製品のご検討およびご採用にあたりましては必ず正規英語版の最新資料をご確認下さい。
TIおよび日本TIは、正規英語版にて更新の情報を提供しているにもかかわらず、更新以前の情報に基づいて発生した問題や障害等につきましては如何なる責任も負いません。



静電気放電はわずかな性能の低下から完全なデバイスの故障に至るまで、様々な損傷を与えます。すべての集積回路は、適切なESD保護方法を用いて、取扱いと保存を行うようにして下さい。高精度の集積回路は、損傷に対して敏感であり、極めてわずかなパラメータの変化により、デバイスに規定された仕様に適合しなくなる場合があります。

ORDERING INFORMATION

T _A	LOAD CURRENT	PACKAGE ⁽¹⁾	PART NUMBER
-40°C to 85°C	SOURCE	Plastic HTSSOP (PWP)	TPS40060PWP
	SOURCE/SINK	Plastic HTSSOP (PWP)	TPS40061PWP

(1) PWPパッケージはテープ/リールでも供給できます。デバイス・タイプの末尾にRを付けてください(すなわち、TPS40060PWPR)。PowerPADの図面及びレイアウト情報についてはこのデータシートのアプリケーションの節を参照してください。

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

特に記述のない限り、動作周囲温度⁽¹⁾

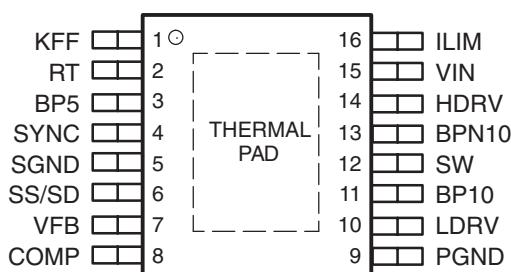
		TPS40060 TPS40061	UNIT
Input voltage range, V _I	VIN	60	V
	VFB, KFF, SS/SD, SYNC	-0.3 to 6	
	SW	-0.3 to 60V or VIN + 5V (whichever is less)	
	SW, transient < 50 ns	-2.5 V	
Output voltage range, V _O	COMP, RT, KFF, SS	-0.3 to 6	
Output current, I _{OUT}	RT	200	μA
Operating junction temperature, T _J		-40 to 125	°C
Storage temperature, T _{stg}		-55 to 150	
Lead temperature 1.6 mm (1/16 inch) from case for 10 seconds		260	

(1) 絶対最大定格以上のストレスは、致命的なダメージを製品に与えることがあります。これはストレスの定格のみについて示してあり、このデータシートの「推奨動作条件」に示された値を越える状態での本製品の機能動作は含まれていません。絶対最大定格の状態に長時間置くと、本製品の信頼性に影響を与えることがあります。

RECOMMENDED OPERATING CONDITIONS

	MIN	NOM	MAX	UNIT
Input voltage, V _I	10	55		V
Operating free-air temperature, T _A	-40	85		°C

PWP PACKAGE⁽³⁾⁽⁴⁾ (TOP VIEW)



(3) PWPパッケージの詳細な情報についてはTIテクニカル・ブリーフ文献番号SLMA002を参照してください。

(4) PowerPADTMのヒート・スラグはSGND(5ピン)に接続するか、または、他の全ピンと電気的に絶縁してください。

ELECTRICAL CHARACTERISTICS

$T_A = -40^\circ\text{C}$ to 85°C , $V_{IN} = 24 \text{ V}_{\text{dc}}$, $R_T = 165 \text{ k}\Omega$, $R_{KFF} = 182 \text{ k}\Omega$, $f_{SW} = 300 \text{ kHz}$ (unless otherwise noted)

PARAMETER	TEST CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNIT	
INPUT SUPPLY						
V_{IN}	Input voltage range, V_{IN}	10	55		V	
OPERATING CURRENT						
I_{DD}	Quiescent current Output drivers not switching		1.5	2.5	mA	
5-V REFERENCE						
V_{BP5}	Input voltage	4.5	5.0	5.5	V	
OSCILLATOR/RAMP GENERATOR						
f_{OSC}	Frequency	270	300	330	kHz	
V_{RAMP}	PWM ramp voltage ⁽¹⁾		2		V	
V_{IH}	High-level input voltage, SYNC	2				
V_{IL}	Low-level input voltage, SYNC		0.8			
I_{SYNC}	Input current, SYNC		5	10	μA	
	Pulse width, SYNC	Pulse amplitude = 5 V	50		ns	
V_{RT}	RT voltage	2.32	2.50	2.68	V	
	Maximum duty cycle	$V_{FB} = 0 \text{ V}$, $100 \text{ kHz} \leq f_{SW} \leq 1 \text{ MHz}$	85%	98%		
	Minimum duty cycle	$V_{FB} \geq 0.75 \text{ V}$		0%		
V_{KFF}	Feed-forward voltage	3.35	3.50	3.65	V	
I_{KFF}	Feed-forward current operating range ⁽¹⁾	20		1100	μA	
SOFT START						
I_{SS}	Soft-start source current	1.8	2.3	2.9	μA	
V_{SS}	Soft-start clamp voltage	3.1	3.7	4.0	V	
t_{DSCH}	Discharge time	1.8	2.2	2.8	μs	
t_{SS}	Soft-start time	120	155	190		
$V_{SS/SD}$	Shutdown outputs threshold voltage	90	120	145		
	Enable outputs threshold voltage	160	210	260	mV	
10-V REFERENCE						
V_{BP10}	Input voltage	9.0	9.7	10.7	V	
ERROR AMPLIFIER						
V_{FB}	Feedback regulation voltage	$T_A = 250^\circ\text{C}$	0.698	0.700	0.704	
		$0^\circ\text{C} \leq T_A \leq 85^\circ\text{C}$	0.690	0.700	0.707	
			0.690	0.700	0.715	
G_{BW}	Gain bandwidth		3	5	MHz	
A_{VOL}	Open loop gain		60	80	dB	
I_{OH}	High-level output source current	$V_{COMP} = 2.0 \text{ V}$, $V_{FB} = 0 \text{ V}$	1.5	4.0	mA	
I_{OL}	Low-level output sink current	$V_{COMP} = 2.0 \text{ V}$, $V_{FB} = 1 \text{ V}$	2.5	4.0		
I_{BIAS}	Input bias current	$V_{FB} = 0.7 \text{ V}$		100	300	
V_{OH}	High-level output voltage	$I_{OH} = 0.5 \text{ mA}$, $V_{FB} = 0 \text{ V}$	3.25	3.45	3.60	V
V_{OL}	Low-level output voltage	$I_{OL} = 0.5 \text{ mA}$, $V_{FB} = 1 \text{ V}$	0.050	0.215	0.350	

(1) 設計で保証されており、テストは行っていません。

(2) すべてのパラメータは消費電力ゼロで測定されています。

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (continued)

T A = -40°C to 85°C , V IN = 24 V dc, R T = 165 k Ω , R KFF = 182 k Ω , f SW = 300 kHz (unless otherwise noted)

PARAMETER	TEST CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNIT	
CURRENT LIMIT						
I _{SINK}	Current limit sink current	8.3	10.0	11.5	μA	
t _{DELAY}	V _{ILIM} = 23.7 V, V _{SW} = (V _{ILIM} - 0.5 V)	330	400		ns	
	V _{ILIM} = 23.7 V, V _{SW} = (V _{ILIM} - 2 V)	200	300			
t _{ON}	Switch leading-edge blanking pulse time ⁽¹⁾	100				
t _{OFF}	Off time during a fault		7		cycles	
V _{OS}	Overshoot comparator offset voltage	-175	-60	35	mV	
OUTPUT DRIVER						
t _{HFALL}	High-side driver fall time ⁽¹⁾	C _{HDRV} = 2200 pF, (V _{IN} - V _{BPN10})	48	96	ns	
t _{HRISE}	High-side driver rise time ⁽¹⁾	C _{HDRV} = 2200 pF, (V _{IN} - V _{BPN10})	36	72		
t _{LFALL}	Low-side driver fall time ⁽¹⁾	C _{LDRV} = 2200 pF, BP10	24	48		
t _{LRISE}	Low-side driver rise time ⁽¹⁾	C _{LDRV} = 2200 pF, BP10	48	96		
V _{OH}	High-level output voltage, HDRV	I _{HDRV} = 0.1 A, (V _{IN} - V _{HDRV})	1.0	1.4	V	
V _{OL}	Low-level output voltage, HDRV	I _{HDRV} = 0.1 A, (V _{HDRV} - V _{BPN10})		0.75		
V _{OH}	High-level output voltage, LDRV	I _{LDRV} = 0.1 A, (V _{BP10} - V _{LDRV})	1.0	1.5		
V _{OL}	Low-level output voltage, LDRV	I _{LDRV} = 0.1 A		0.5		
	Minimum controllable pulse width		100	150	ns	
BPN10 REGULATOR						
V _{BPN10}	Output voltage	Referenced to V IN	-7.5	-8.5	-9.5	V
RECTIFIER ZERO CURRENT COMPARATOR (TPS40060 ONLY)						
V _{SW}	Switch voltage	LDRV output OFF	-6	0	6	mV
SW NODE						
I _{LEAK}	Leakage current ⁽¹⁾			1	μA	
THERMAL SHUTDOWN						
T _{SD}	Shutdown temperature ⁽¹⁾		165		°C	
	Hysteresis ⁽¹⁾		25			
UNDERVOLTAGE LOCKOUT						
V _{UVLO}	Undervoltage lockout threshold voltage, BP10	R _{KFF} = 10 k Ω	6.25	6.5	7.5	V
	Undervoltage lockout hysteresis			0.4		
V _{KFF}	KFF programmable threshold voltage	R _{KFF} = 82.5 k Ω	9	10	11	

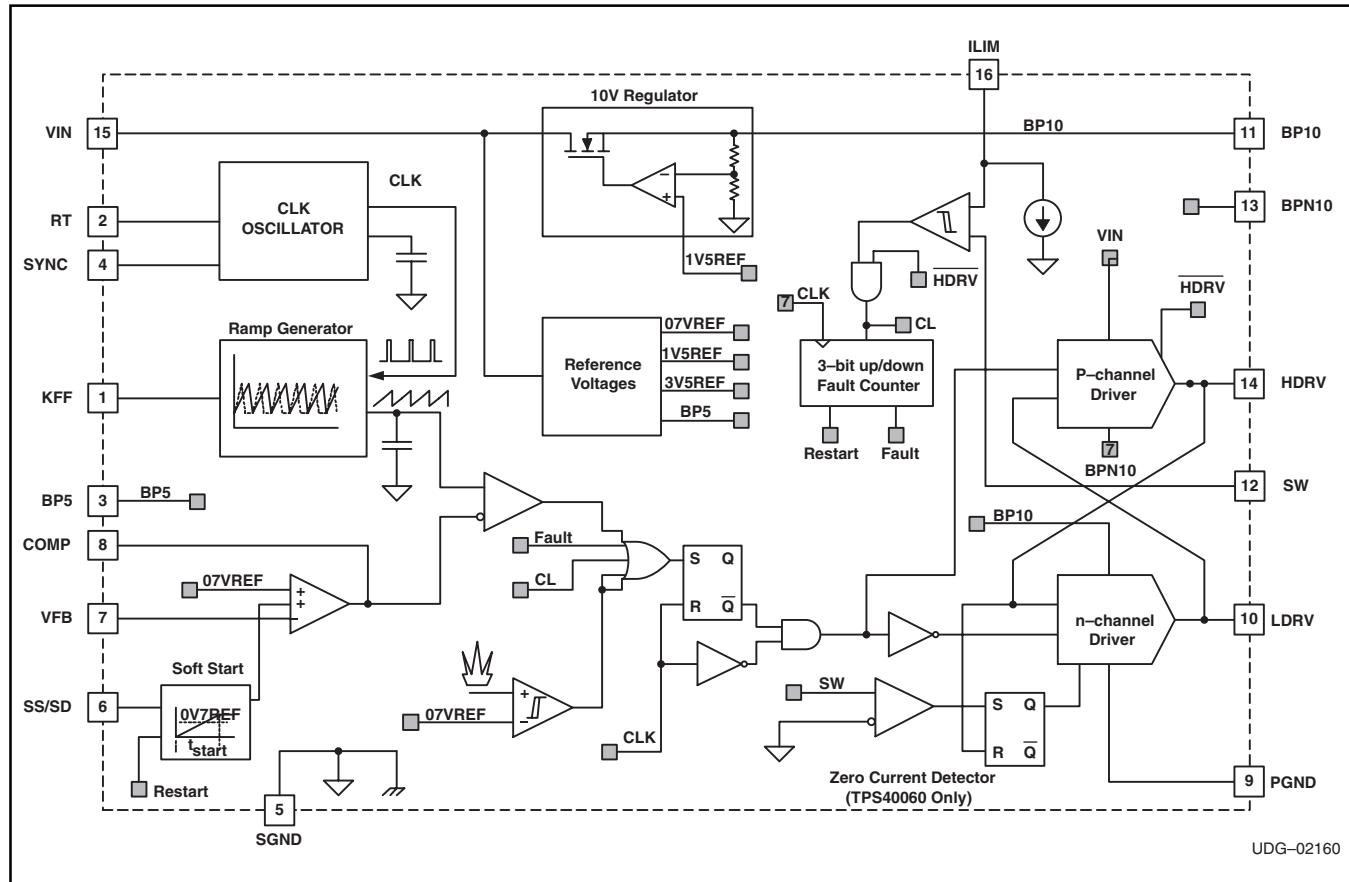
(1) 設計で保証されており、テストは行っていません。

(2) すべてのパラメータは消費電力ゼロで測定されています。

端子機能

TERMINAL NAME	NO.	I/O	DESCRIPTION
BP5	3	O	デバイス内部のロジックのみのための5V基準電圧。このピンは0.1μFのセラミック・キャパシタでグランドにバイパスしてください。このピンは外部使用のためのものではありません。
BP10	11	O	Nチャネル同期整流器のゲート駆動に使用される10V基準電圧。このピンは1μFのセラミック・キャパシタでバイパスしてください。このピンは外部使用のためのものではありません。
BPN10	13	O	VINを基準とした-8Vの基準電圧。この電圧はハイサイドPチャネルMOSFET用のゲートを駆動するのに使用されます。このピンは0.1μFのセラミック・キャパシタでVINにバイパスしてください。
COMP	8	I	誤差増幅器の出力で、PWMコンパレータの入力。ループ全体を補償するためフィードバック回路をこのピンからVFBピンに接続します。COMPピンは大信号の過渡応答を改善するため内部でランプのピークより上でクランプされます。
HDRV	14	O	ハイサイドPチャネルMOSFET用のフローティングのゲート駆動ピン。このピンの電圧はVIN(MOSFETオフ)とBPN10(MOSFETオン)間で切り換わります。
ILIM	16	I	電流制限ピンで、過電流スレッショールドを設定するのに使用されます。このピンからグランドへシンクする内部電流により、このピンとVIN間の外付け抵抗端の電圧降下が定まります。このピンの電圧は導通時ハイサイドMOSFET端の電圧降下(VIN - SW)と比較されます。
KFF	1	I	電圧フィードフォワード量をプログラムするためこのピンとVIN間に抵抗を接続します。このピンに流れ込む電流は内部で分割されPWMランプの勾配をコントロールするのに使用されます。
LDRV	10	I	Nチャネル同期整流器用ゲート駆動ピン。このピンの電圧はBP10(MOSFETオン)とグランド(MOSFETオフ)間で切り換わります。
PGND	9	-	デバイスの基準パワーグランド。このピンとパワーMOSFETのソースを低インピーダンスのラインで接続します。
RT	2	I	内部発振器のランプ充電電流とスイッチング周波数を設定するためこのピンからグランドに抵抗を接続します。
SGND	5	-	デバイスの基準信号グランド
SS/SD	6	I	ソフトスタートのプログラミング・ピン。このピンからグランドに接続するキャパシタによりソフトスタート時間がプログラムされます。キャパシタは2.3μAの内部電流源により充電されます。その結果として生じるSSピンの電圧ランプは誤差増幅器への2番目の非反転入力として使用されます。出力電圧のレギュレーションはSSピンの電圧が1.6VになるまでSSの電圧ランプによりコントロールされます。
SW	12	I	このピンはコンバータのスイッチ・ノードに接続され、過電流の検出に使用されます。このピンはTPS40060でゼロ電流の検出に使用されます。
SYNC	4	I	デバイスの同期入力ピン。このピンは発振器を外部のマスター周波数に同期させるのに使用することができます。
VFB	7	I	誤差増幅器の反転入力。通常動作ではこのピンの電圧は内部基準電圧0.7Vと同じです。
VIN	15	I	デバイスの電源電圧

SIMPLIFIED BLOCK DIAGRAM



アプリケーション情報

スイッチング周波数の設定

(クロック発振器のプログラミング)

TPS40060及びTPS40061は独立したクロック発振器とランプ・ジェネレータ回路を内蔵しています。クロック発振器はランプ・ジェネレータ回路へのマスター・クロックとして働きます。クロック発振器のスイッチング周波数 f_{SW} (単位はkHz)はグランドへの1つの抵抗(R_T)で設定されます。クロック周波数は式(1)により R_T (単位はkΩ)に関係しており、その相関関係を図2に示します。

$$R_T = \left(\frac{1}{f_{SW} \times 17.82 \times 10^{-6}} - 23 \right) \text{ (kΩ)} \quad (1)$$

ランプ・ジェネレータ回路のプログラミング

ランプ・ジェネレータ回路はPWMコンパレータにより使用される実際のランプを供給します。ランプ・ジェネレータは、ランプの振幅を一定に保ちながら、PWMランプの勾配をライン電圧により変えることで電圧フィードフォワード・コントロールを行な

います。PWMランプを直接ライン電圧により変えることで、PWMはループの遅れを待つことなしにデューティ・サイクルを変更することができるため、ラインの変動に対して優れた応答が実現します(図1参照)。

PWMランプの周期はマスター・クロック周波数の周期よりも短くなくてはならず、そうでなければPWMは起動が妨げられます。PWMランプの時間はVINにプルアップされている1つの抵抗(R_{KFF})によってプログラムされます。 R_{KFF} は以下のように R_T と最小入力電圧 $V_{IN(min)}$ に関係しています。

$$R_{KFF} = (V_{IN(min)} - 3.5) \times (65.27 \times R_T + 1502) \text{ (Ω)} \quad (2)$$

但し、

- V_{IN} は設定する起動(UVLO)入力電圧です。
- R_T はタイミング抵抗で単位はkΩです。

詳細な説明についてはUVLO動作の節を参照してください。

各種入力電圧での所定のスイッチング周波数 f_{SW} に要するフィードフォワード・インピーダンスを示す曲線を図3に示します。

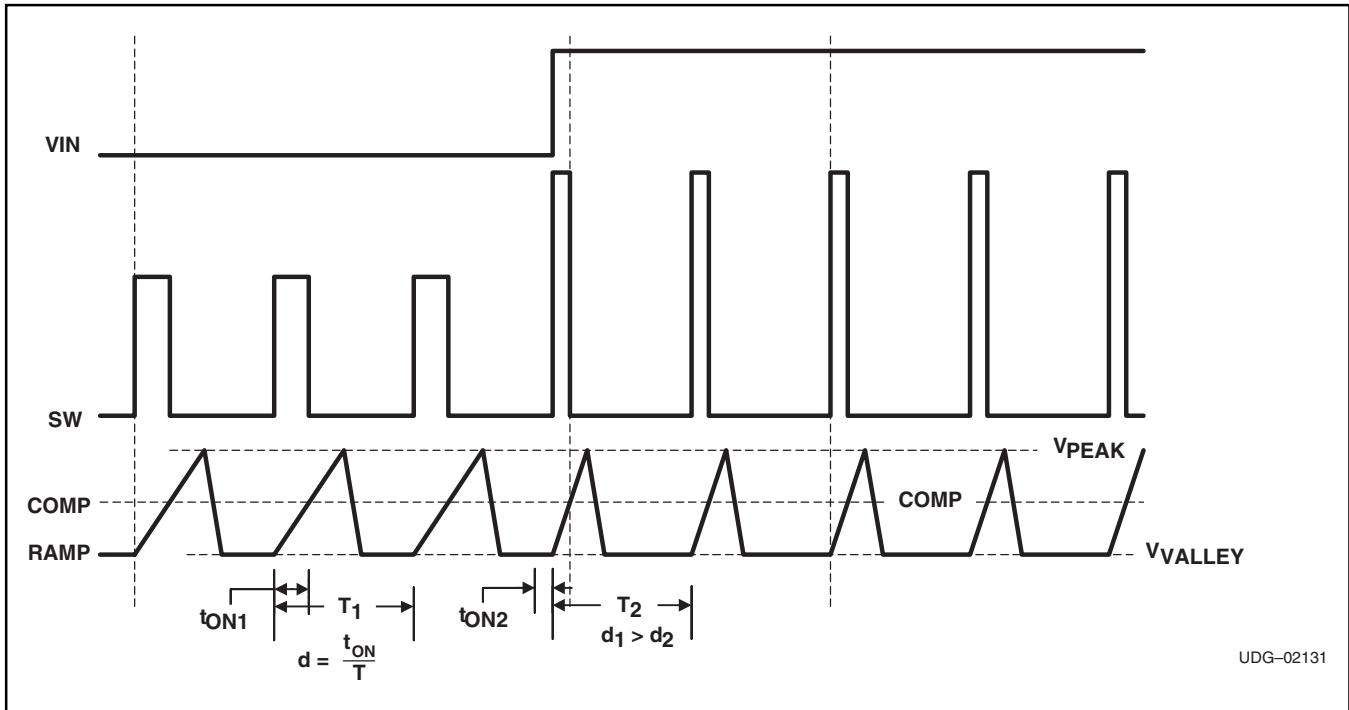


図1. Voltage Feed-Forward Effect on PWM Duty Cycle

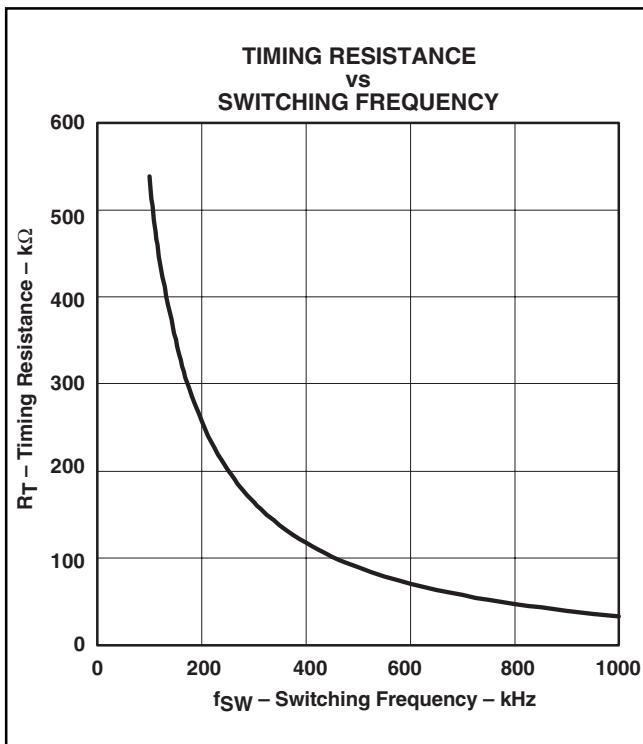


図2.

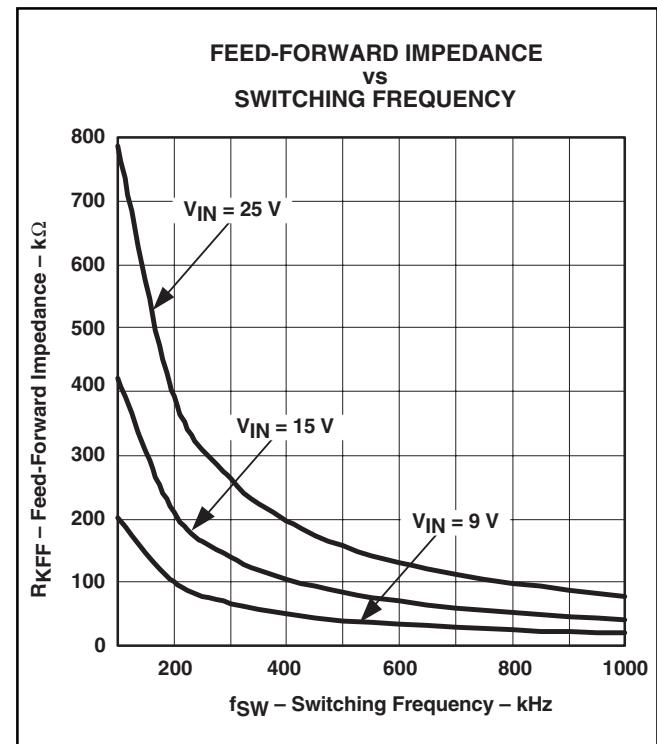


図3.

UVLO動作

TPS40060及びTPS40061は固定及び調整可能(ユーザーがプログラムできる)の両方のUVLO保護を使用しています。固定方式のUVLOはBP10とBP5の両方のバイパス電圧をモニタします。UVLO回路は、BP5とBP10の電圧レールがそのスレッシングホールドを越え、かつ、入力電圧がユーザーがプログラムした低電圧スレッシングホールドを越えるまでソフトスタートを“L”レベルに保持しています。

TPS40060及びTPS40061はユーザーがプログラムできる低ラインのUVLO保護としてフィードフォワード・ピンKFFを使用しています。この調整可能な低ラインのUVLOスレッシングホールドはPWMランプの幅を発振器のクロック周期と比較します。ランプがその全振幅の90%に達する前にデバイスがクロック・パルスを受け取った場合低電圧状態にあることになります。ランプ幅はランプの勾配の関数で、KFFピンに流れ込む電流に直接関係しています。KFFピンに流れる電流は入力電圧とKFFピンから入力電圧へ接続される抵抗の関数です。KFFピンの抵抗は式(3)で表されるように発振器の周波数を基準として求めることができます。

$$R_{KFF} = (V_{IN(min)} - 3.5) \times (65.27 \times R_T + 1502) \quad (\Omega) \quad (3)$$

但し、

● V_{IN} は設定する起動(UVLO)入力電圧です。

調整可能なUVLO機能では、スパイクまたは高速のライン過渡により誤ってシャットダウンあるいはターンオンするのを防ぐため3ビットの全加算器が使用されています。加算器で、ランプ幅がクロック・サイクルよりも短いことが合計7カウントに達すると、パワーグッド信号がアクティブになります。ソフトスタートが開始し、上下のMOSFETはオフになります。

ソフトスタートが開始すると、UVLO回路は、低電圧状態を宣言する前に、ランプ幅がクロック・サイクルよりも長いことがサイクルで合計7カウント分あることを確かめなければなりません(図4参照)。

入力電圧ラインに高インピーダンスをもつか、あるいは V_{IN} ラインに過大なリギングがあるシステムなど、アプリケーションによってはUVLO電圧レベルで誤って再起動するのを防ぐために回路を追加することが必要とされることがあります。入力電圧のインピーダンスは起動時にUVLOシャットダウンやそれに続く再起動を起こすのに十分なほど入力電圧を下げる原因となります。簡素な回路を外付けすると迷惑なUVLOシャットダウンを防ぐためのヒステリシス量を選択することができます。

ヒステリシス電流が I_{KFF} の10%、ピーク検出器が8Vにチャージされ、 $V_{IN(min)} = 18V$ とすると、 R_A の値は以下の式で計算されます。

$$R_A = \frac{R_{KFF} \times (8 - 3.5)}{0.1 \times (V_{IN(min)} - 3.5)} = 565 \text{ k}\Omega, \approx 562 \text{ k}\Omega \quad (4)$$

CAの値はスイッチング・サイクル間で十分な高さのピーク電圧を保持するよう選ばれます。キャパシタの電荷を0.1Vのドロープ(この場合8Vから7.9V)にならないようにするには、以下の式でCAを計算します。

$$C_A = \frac{(8 - 3.5)}{(R_A \times 7.9 \times f_{SW})} \quad (5)$$

CAの値は10pF以下まで計算できますが、最大470pFまでの標準値の設計でも十分に機能します。この設計では定格が20V以上の小信号のスイッチング・ダイオードまたはショットキーにすることができます。図5に代表的実施例を示します。

ソフトスタート

ソフトスタート回路により出力電圧のランプアップが閉ループでコントロールされます。ソフトスタートの持続時間はSS/SDピンに接続される1つのキャパシタによりプログラムされます。内部の0.7V基準電圧を誤差増幅器の1番目の非反転入力に接続し、ソフトスタートのランプを2番目の非反転入力に入れることで閉ループのコントロールが行なわれます。誤差増幅器は最小の非反

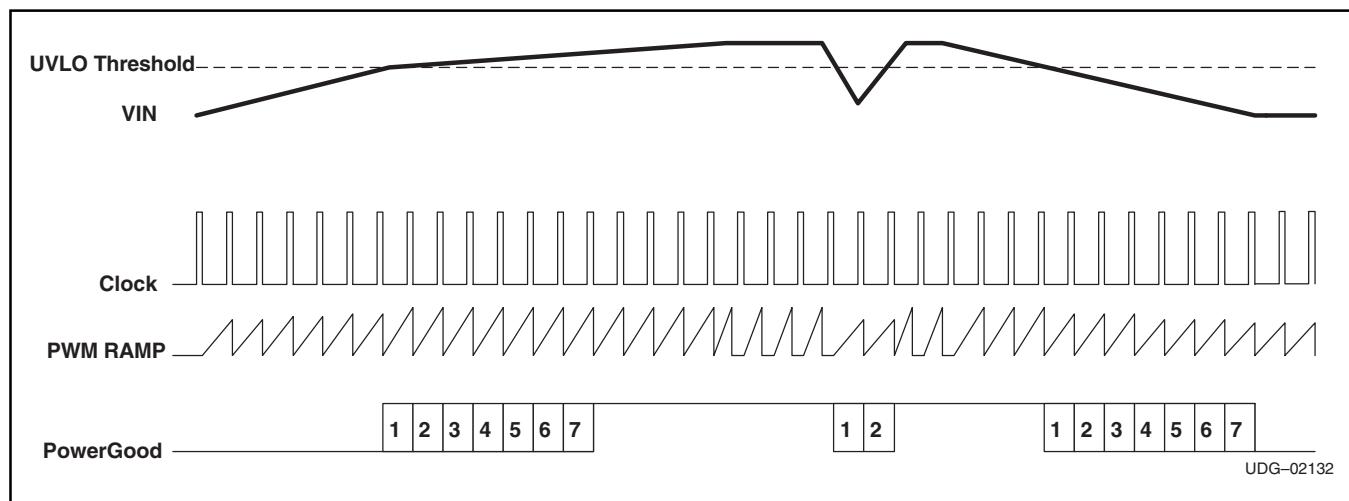


図4. Undervoltage Lockout Operation

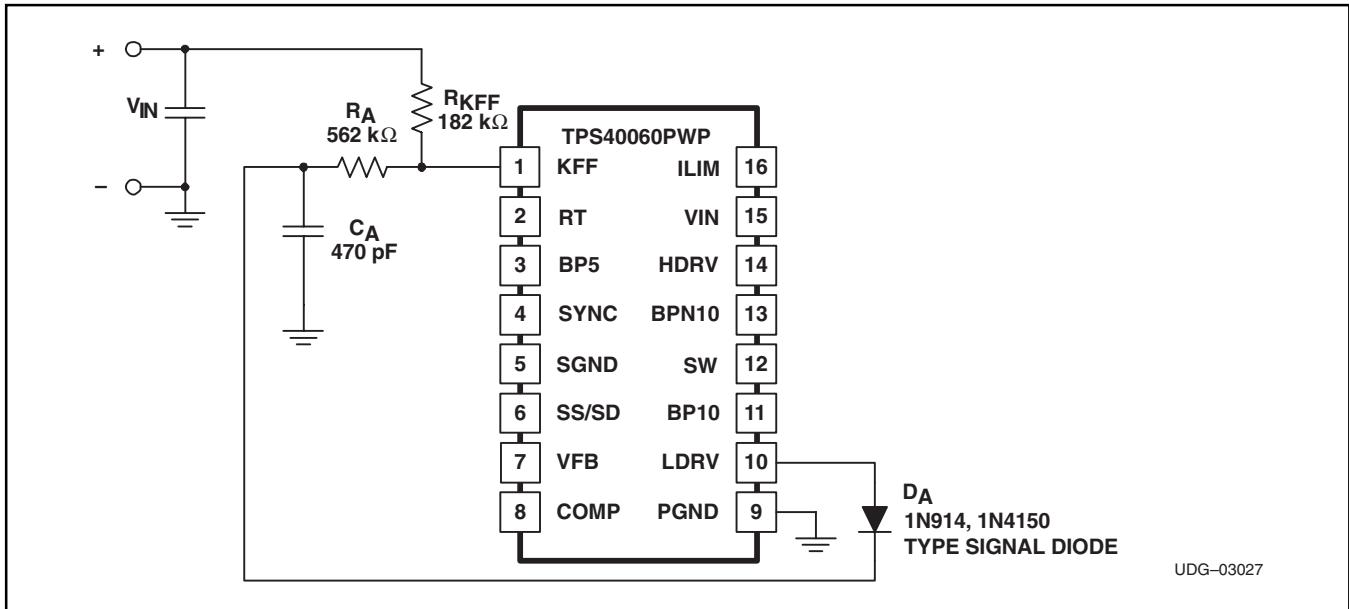


図5. Hysteresis for Programmable Undervoltage Lockout

転入力電圧でレギュレーションを行ないます。外付けのソフトスタート・キャパシタは標準2.3μAの内部電流源により充電されます。出力電圧は、SS/SDピンの電圧が0.8V～1.5Vに上昇した場合ランプアップします。

$$t_{SS} = 0.304 \times C_{SS} \quad (s) \quad (6)$$

但し、

● CSSの単位はμFです

パワーの印加からソフトスタートのランプの開始までには t_{SS} の時間遅延があります。

V_{IN} 電源がゆっくりとランプアップする(一般的には50ms)アプリケーションでは、誤ってUVLOが作動するのを防ぐためソフトスタート時間を増加させることが必要かも知れません。ソフトスタート時間は、 V_{IN} 電源が6Vと7Vの間を遷移する時間よりも長くしてください。

イネーブル

SS/SDピンの電圧が0.2V以下になると出力はディスエーブルになります。オープンドレイン型のMOSFETがこの特性を実現するのに適しています。

電流制限のプログラミング

このデバイスでは過電流保護に2段の手法を使用しています。1段目はパルス毎の保護という仕組みです。電流制限はハイサイドMOSFETで実行され、ゲートが“L”レベルに駆動されている時にMOSFET端の電圧降下を検出します。MOSFETの電圧は一定の電流シンクで駆動されている時VINピンからILIMピンに接続されている抵抗端での降下電圧と比較されます。MOSFET端の電

圧降下がILIM抵抗端の電圧降下より大きい場合、スイッチング・パルスは即座に終了します。MOSFETは次のスイッチング・サイクルが開始するまでオフのままでです。

第2段目はフォルト・カウンタで構成されています。フォルト・カウンタは過電流パルスによって増加し、過電流パルスのないクロック・サイクルにより減少します。カウンタが7に達した時、再起動が出され7サイクルのソフトスタートが開始します。上下両方のMOSFETともこの期間オフになります。カウンタはソフトスタートのサイクルごとに減少してゆきます。カウンタがゼロに減少した時、PWMは再びインエーブルになります。障害条件が取り除かれたら、出力は正常に作動し始めます。出力に依然として障害が存在している場合、カウンタは7個の過電流パルスをカウントし、再び第2段目のフォルト・モードに入ります。代表的な過電流保護の波形については図6を参照してください。

電流制限の最小設定点(I_{LIM})は t_{START} 、 C_O 、 V_O 、ターンオン時の負荷電流(I_L)により決まります。

$$I_{LIM} = \left[\frac{(C_O \times V_O)}{t_{SS}} \right] + I_L \quad (A) \quad (7)$$

電流制限をプログラミングする抵抗(R_{ILIM})は以下の式(8)を使って計算されます。

$$R_{ILIM} = \frac{I_{OC} \times R_{DS(on)[max]}}{1.12 \times I_{SINK}} + \frac{V_{OS}}{I_{SINK}} \quad (\Omega) \quad (8)$$

但し、

- I_{SINK} はILIMピンに流れ込む電流で標準値は10μAです。
- I_{OC} は過電流の設定点で、DC出力電流にピーク・インダクタ電流の1/2を加えたものです。
- V_{OS} は過電流コンパレータのオフセットで標準値は-95mVです。

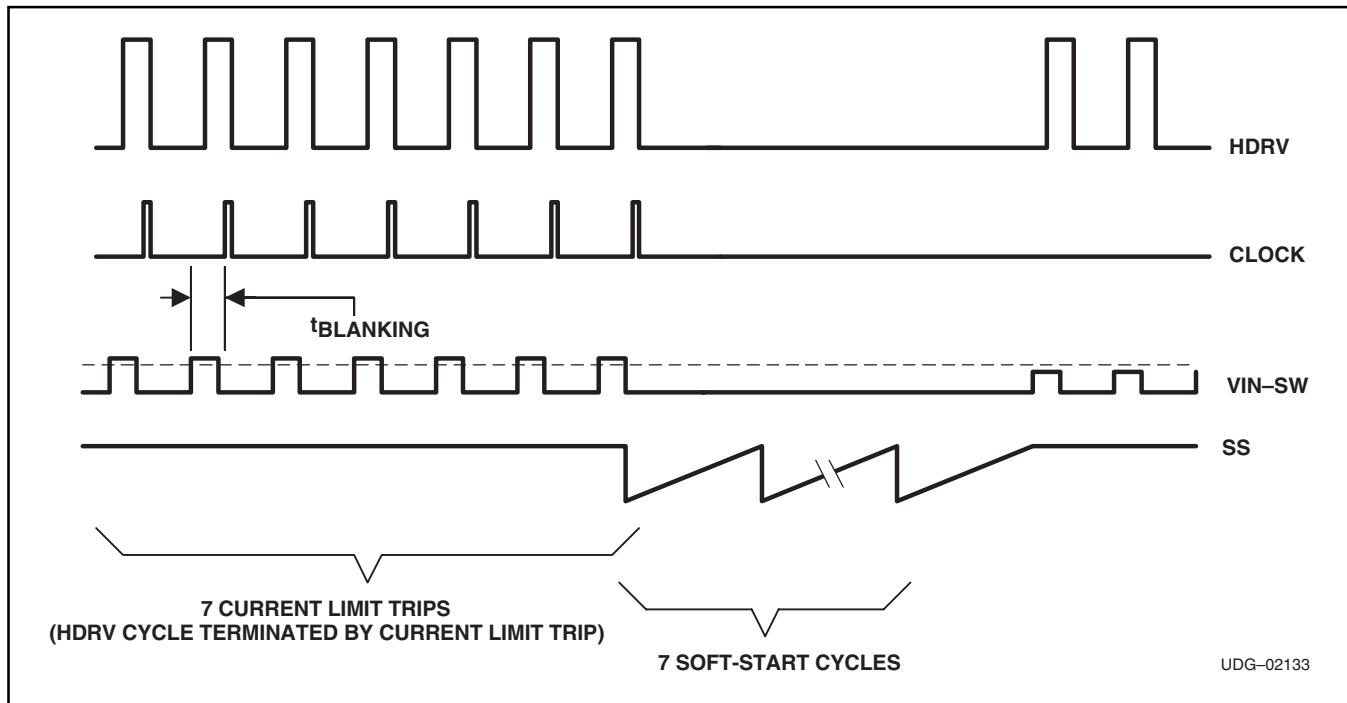


図6. Typical Current Limit Protection Waveforms

BP10及びBP10Vバイパス・キャパシタの計算

BP10容量はハイサイド・ドライバに部分的な低インピーダンス源を供給します。BP10Vキャパシタは品質が優れた高周波のキャパシタにしてください。バイパス・キャパシタの大きさはMOSFETの総ゲート電荷とバイパス・キャパシタに許容されるドループ量に依存します。BP10容量は以下の式で表されます。

$$C_{BP10} = \frac{Q_g}{\Delta V} \quad (F) \quad (9)$$

10V基準電圧ピンBP10VはBP10Vキャパシタを介して同期MOSFETのゲート駆動にエネルギーを供給する必要があります。効率上で不利な条件をすべて無視すると、BP10Vの容量は以下の式で表されます。

$$C_{BP10V} = \frac{Q_{gSR}}{\Delta V} \quad (F) \quad (10)$$

外部電源への同期

TPS40060及びTPS40061はSYNCピンにより外部のクロックに同期することができます。このデバイスはそのプログラムされたフリーラン周波数よりも20%高い周波数で同期させなければなりません。SYNCピンのクロック周波数は発振器回路で生成されるマスター・クロックに取って代わります。SYNCピンを“L”レベルにするとデバイスは R_T でプログラムされる周波数でフリーランするようプログラムされます。

PWMランプのジェネレータ回路をプログラムする時は高い周波数で同期させることを考慮に入れなければなりません。PWMランプがSYNCパルスで妨げられると、UVLO状態が宣言されPWMはディスエーブルになります。一般的にはこのことは低ライン条件下のみで懸念されます。いかなる場合でも、スイッチング周波数が高い場合にはRKFFを調整することが必要です。

インダクタ値の選択

インダクタ値により、コンバータが不連続モードになる時の負荷電流だけでなく、出力キャパシタのリップル電流の大きさも決まります。インダクタンスが過度に大きいと、リップル電流は小さくなりますが、同一負荷電流では物理的寸法は大きくなります。一方、インダクタンスが過度に小さいと、リップル電流は大きくなり、同じ出力リップル電圧を満たすための要件が多くなります(または出力キャパシタが高価になります)。妥協案として望ましいのは、負荷が定格出力の10%と30%の間の値に近づくまでコンバータが不連続モードにならない程度のインダクタンス値を選択することです。インダクタンス値の計算は以下の式で表されます。

$$L = \frac{(V_{IN} - V_O) \times V_O}{V_{IN} \times \Delta I \times f_{SW}} \quad (H) \quad (11)$$

但し、

● V_O は出力電圧です

● ΔI はピーク間インダクタ電流です

出力容量の計算

出力容量は、負荷過渡時の出力電圧偏位の要件に加え、出力リップル電圧と出力リップル電流で決まります。

出力リップル電圧は出力容量とキャパシタのESRの両方の関数です。ワースト・ケース時の出力リップル電圧は以下の式で表されます。

$$\Delta V = \Delta I \left[ESR + \left(\frac{1}{8 \times C_O \times f_{SW}} \right) \right] (V_{P-P}) \quad (12)$$

出力リップル電圧はESR成分により一般的に90%から95%の間です。

出力容量の要件は一般的に負荷過渡の要件に伴い増加します。ステップ負荷時、出力容量は、出力電圧を許容範囲内に保持しながら、エネルギーを負荷に供給(軽負荷から重負荷へのステップ)するか、あるいは過度のインダクタ・エネルギーを吸収(重負荷から軽負荷へのステップ)しなければなりません。容量は、負荷ステップの大きさ、ループの速度、インダクタの大きさに依存します。

重負荷から軽負荷への負荷ステップでは出力がオーバーシュートします。インダクタに蓄えられた過度のエネルギーは出力容量で吸収されなければなりません。インダクタに蓄えられたエネルギーは以下の式で表されます。

$$E_L = \frac{1}{2} \times L \times I^2 \quad (J) \quad (13)$$

ここで、

$$I^2 = [(I_{OH})^2 - (I_{OL})^2] \quad ((\text{Amperes})^2) \quad (14)$$

但し、

- I_{OH} は重負荷条件での出力電流です
- I_{OL} は軽負荷条件での出力電流です

キャパシタのエネルギーは以下の式で表されます。

$$E_C = \frac{1}{2} \times C \times V^2 \quad (J) \quad (15)$$

ここで、

$$V^2 = (V_f)^2 - (V_i)^2 \quad (\text{Volts}^2) \quad (16)$$

但し、

- V_f はキャパシタの最終ピーク電圧です
- V_i はキャパシタの初期電圧です

式(14)を式(13)に代入し、次に式(16)を式(15)に代入し、さらにその次に式(13)が式(15)に等しいとして、 C_0 について解くと以下の式で求められます。

$$C_0 = \frac{L \times [(I_{OH})^2 - (I_{OL})^2]}{[(V_f)^2 - (V_i)^2]} \quad (F) \quad (17)$$

入力容量の計算

入力キャパシタの大きさは入力電圧の許容リップルと運ぶのに必要とされるRMS電流をもとに選択されます。標準的なバック・コンバータのアプリケーションでは、前段のコンバータからその出力容量が供給されます。この例での単独型の電源では、入力電圧リップルとRMS電流を考慮してオンボード上に容量が付加されます。この電力レベルの場合、150mVの入力電圧リップルが妥当で、内輪に見積もった最小容量値は以下の式で計算されます。

$$C = \frac{I \times \Delta t}{\Delta V} = \frac{10 \text{ A} \times 2.5 \mu\text{s}}{0.15 \text{ V}} = 167 \mu\text{F} \quad (18)$$

この最小容量の要件に加え、RMS電流のストレスを考慮しなければなりません。式(19)は、台形の電流波形のRMS電流の計算を簡略化した式で、10A時入力24V/出力2.5Vの場合について計算します。

$$I_{RMS} = I \times \sqrt{D} = I \times \sqrt{\frac{V_{OUT}}{V_{IN (\min)}}} = 10 \text{ A} \times \sqrt{\frac{2.5 \text{ V}}{24 \text{ V}}} = 3.23 \text{ A} \quad (19)$$

電流のリップル成分について式に項を追加するのは少量を総RMS電流に加えるのみで、それは無視できます。この小型化、コストの初期要件に適合させるには、キャパシタの組み合わせを考慮します。高周波のリップル電流を通すため、2つ、または3つの10μFのX5Rセラミック・キャパシタを電源回路に近づけて配置します。このキャパシタのESRは非常に小さく、データシートでは500kHzで2A_{RMS}電流の場合部品の温度が30°C上昇すると表されているため、このセラミック・キャパシタは2つ、または3つで十分です。

ループ補償

電圧モードの降圧型コントローラは一般的にはタイプIIIの回路を使用して補償されます。TPS40060及びTPS40061は電圧フィードフォワード・コントロールを使用しているため、電圧フィードフォワード回路を含んだPWM変調器の利得が含まれなければなりません。変調器の利得を、ランプ動作を全スイッチング周期の範囲にわたせるのに必要な最小入力電圧 V_{IN} とともに図7に示します。

$$A_{MOD} = \frac{V_{IN}}{V_S} \quad \text{or} \quad A_{MOD(\text{db})} = 20 \times \log \left(\frac{V_{IN}}{V_S} \right) \quad (20)$$

デューティ・サイクルDはコントロール電圧 V_C が最小ランプ電圧から最大ランプ電圧 V_S に変化するにつれ0から1に変わります。また、同期式バック・コンバータの場合は、 $D = V_O/V_{IN}$ です。出力電圧に対するコントロール電圧を得るのに、変調器の利得の入力電圧とランプ電圧に置き換えると、

$$D = \frac{V_O}{V_{IN}} = \frac{V_C}{V_S} \quad \text{or} \quad \frac{V_O}{V_C} = \frac{V_{IN}}{V_S}$$

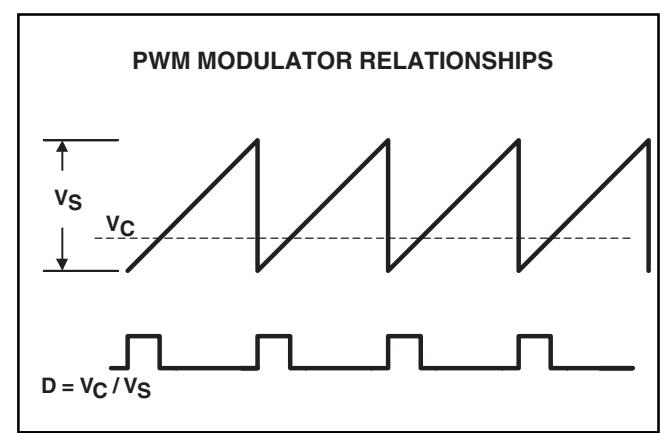


図7.

極とゼロの計算

電圧モード・コントロールを使用したバック・コンバータでは、出力のL-C₀により二重極があります。二重極は式(21)で計算される周波数の位置にあります。

$$f_{LC} = \frac{1}{2\pi \times \sqrt{L \times C_0}} \text{ (Hz)} \quad (21)$$

また、出力容量C₀とそのESRにより生成されるゼロもあります。ESRのゼロは式(22)で計算される周波数の位置にあります。

$$f_Z = \frac{1}{2\pi \times ESR \times C_0} \text{ (Hz)} \quad (22)$$

連続モードで動作する電圧フィードフォワード・コントロールをもつバック・コンバータの出力電圧対開ループ・コントロール電圧の利得V_O対V_Cのボーデ線図を図8に示します。

最大クロスオーバー周波数(0dBのループ利得)は式(23)で計算されます。

$$f_C = \frac{f_{SW}}{4} \text{ (Hz)} \quad (23)$$

一般的には、f_CはL-C₀の二重極とESRゼロの中間点の近くに選択されます。タイプIIIのトポロジでは+1の勾配(20dB/ディケード)であるのに対し、この周波数では、出力対コントロールの利得は-2の勾配(-40dB/ディケード)であるため、閉ループ全体では-1の勾配(-20dB/ディケード)になります。

図8に変調器の利得、L-Cフィルタ、出力キャパシタのESRゼロ、及びその結果として補償すべき応答を示します。

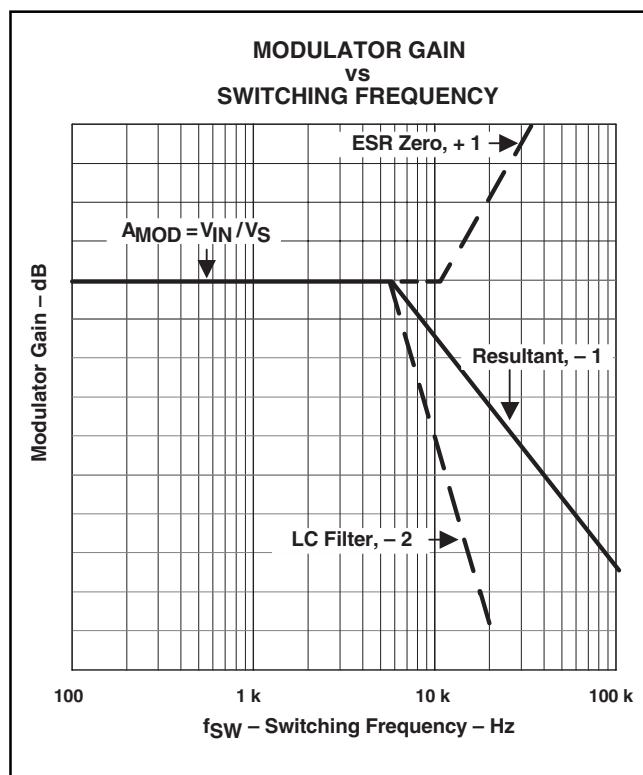


図8.

図9に示されるタイプIIIのトポロジには原点の極に加え2組のゼロ/極があります。タイプIIIのトポロジの利得と位相のブーストを図10に示します。2つのゼロはL-C₀の二重極を補償するのに使われ、位相のブーストを行ないます。二重極はESRゼロを補償するのに使われ、利得のロールオフをコントロールします。ほとんどの場合、2番目の極は取り除くことができ、増幅器の利得のロールオフは高周波で総利得をロールオフするのに使用されます。

タイプIIIの回路の極とゼロは式(24)で表されます。

$$\begin{aligned} f_{Z1} &= \frac{1}{2\pi \times R2 \times C1} \text{ (Hz)} & f_{Z2} &= \frac{1}{2\pi \times R1 \times C3} \text{ (Hz)} \\ f_{P1} &= \frac{1}{2\pi \times R2 \times C2} \text{ (Hz)} & f_{P2} &= \frac{1}{2\pi \times R3 \times C3} \text{ (Hz)} \end{aligned} \quad (24)$$

单一利得周波数は式(25)で表されます。

$$f_C = \frac{1}{2\pi \times R1 \times C2} \text{ (Hz)} \quad (25)$$

二重ゼロf_{Z1}、f_{Z2}と二重極f_{P1}、f_{P2}はVenableのKFactor^[1]により選択され、それは以下のようになっています。

$$f_{Z1} = f_{Z2} = \frac{f_C}{\sqrt{K}} \quad \text{and} \quad f_{P1} = f_{P2} = f_C \times \sqrt{K} \quad (26)$$

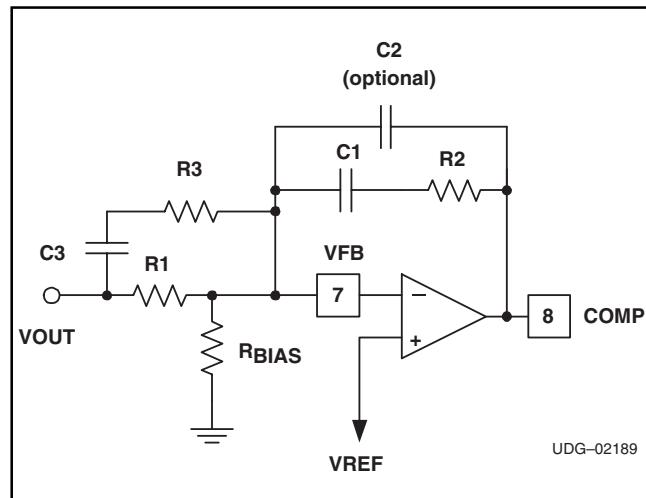


図9. Type III Compensation Configuration

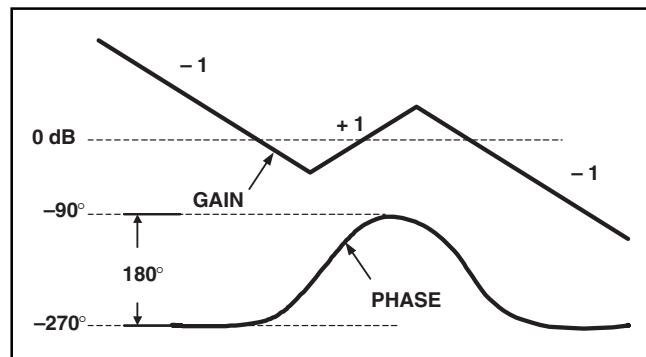


図10. Type III Compensation Gain and Phase

ファクタKを決めるには、単一利得周波数 f_C における目標の位相余裕Mと変調器の位相シフトPが分かった後位相のブーストを計算しなければなりません。その上で、 $\text{Boost} = M - P - 90^\circ$ で計算します。Pは測定することが最善ですが、一般的な値は $-140^\circ \sim -170^\circ$ の範囲です。よって、Kの値は以下の式で求められます。

$$K = \left(\tan \left(\frac{\text{Boost}}{4} + 45^\circ \right) \right)^2 \quad (27)$$

出力電圧 V_{OUT} を設定するため R_{BIAS} の値を計算します。

$$R_{\text{BIAS}} = \frac{0.7 \times R1}{V_{\text{OUT}} - 0.7} \quad (28)$$

誤差増幅器の最小負荷抵抗

極端に小さいフィードバック抵抗 $R2$ により誤差増幅器の出力の負荷をダウントさせないよう注意が必要です。誤差増幅器には $R2$ の大きさを決める場合に考慮しなければならないある有限の出力ソース/シンク電流があります。過度に小さな値では出力はそのフル・レンジ全体に振れることはできません。

$$R2_{(\text{MIN})} = \frac{V_C(\text{max})}{I_{\text{SOURCE}}(\text{min})} (\Omega) = \frac{3.45 \text{ V}}{2.0 \text{ mA}} = 1.725 \text{ k}\Omega \quad (29)$$

dv/dt により誘発されるターンオン

MOSFETは特に高電圧(V_{DS})のアプリケーションで dv/dt によるターンオンに影響を受けやすくなっています。ターンオンは C_{GD} と C_{GS} で形成されるキャパシタ・デバイダにより引き起こされます。高い dv/dt とMOSFETのドレイン/ソース間電圧により C_{GD} に電流が流れ、ゲート/ソース間電圧を上昇させます。ゲート/ソース間電圧がMOSFETのスレッショールド電圧以上に上昇

すると、MOSFETはオンになります。その結果大きなシートスルーレ電流が流れます。従って、同期整流MOSFETは C_{GD} 容量が C_{GS} 容量よりも小さくなるよう選んでください。上側MOSFETのゲートのリードに $2\Omega \sim 5\Omega$ の値の抵抗を入れるとターンオンとSWノードの dv/dt を適合させ、ターンオンが誘発されることを少なくてするのに役立ちます。

ハイサイドMOSFETの消費電力

外付けハイサイドMOSFETで消費される電力は導通損失とスイッチング損失より構成されます。導通損失はMOSFETを流れる I_{RMS} 電流とMOSFETの $R_{\text{DS(on)}}$ の関数です。ハイサイドMOSFETの導通損失は式(30)で定義されます。

$$P_{\text{COND}} = (I_{\text{RMS}})^2 \times R_{\text{DS(on)}} \times (1 + TCR \times [T_J - 25^\circ\text{C}]) \quad (\text{W}) \quad (30)$$

但し、

- TCR はMOSFET $R_{\text{DS(on)}}$ の温度係数です

TCR はMOSFET技術と製造メーカーにより変動しますが、一般的には $0.0035\text{ppm}/^\circ\text{C} \sim 0.010\text{ppm}/^\circ\text{C}$ の範囲にあります。

ハイサイドMOSFETの I_{RMS} 電流は以下の式(31)で表されます。

$$I_{\text{RMS}} = I_0 \times \sqrt{d} \quad (\text{Amperes}_{\text{RMS}}) \quad (31)$$

ハイサイドMOSFETのスイッチング損失は以下の式(32)で表されます。

$$P_{\text{SW(fsw)}} = V_{\text{IN}} \times \left(\frac{I_{D1} \times t_{s1}}{6} + \frac{I_{D2} \times t_{s2}}{2} \right) \times f_{\text{SW}} \quad (32)$$

但し、

- I_{D1} と I_{D2} はMOSFETのスイッチング時の電流の大きさです(図11参照)。

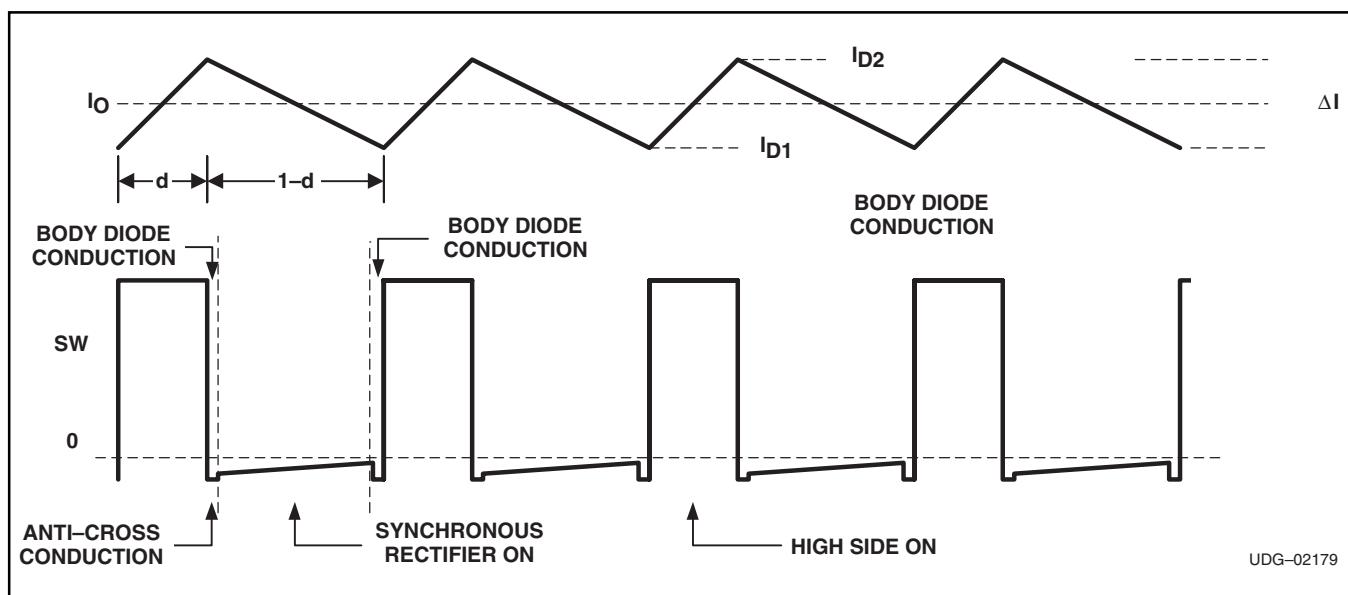


図11. Inductor Current and SW Node Waveforms

I_{D1} と I_{D2} はインダクタ値と負荷電流の関数です。インダクタ値は通常、標準負荷の約10%から30%が達成されるまでコンバータが連続動作モードにとどまるよう選択されます。インダクタ電流の変化は式(33)で表されます。

$$\Delta I = 2 \times I_{O(dis)} \quad (A) \quad (33)$$

但し、

● $I_{O(dis)}$ はコンバータが不連続動作モードになった時の負荷電流です。

I_{D1} と I_{D2} は以下の式(34)で計算できます。

$$I_{D1} = I_O - \left(\frac{\Delta I}{2} \right) \quad \text{and} \quad I_{D2} = I_O + \left(\frac{\Delta I}{2} \right) \quad (A) \quad (34)$$

但し、

● ΔI はインダクタのリップル電流です(図11参照)

コンバータはDC出力電流がインダクタ・リップル電流の1/2の時不連続モードになります。詳細についてはインダクタ値の選択の節、及び式(11)を参照してください。

過渡時間 t_{s1} と t_{s2} は選択した外付けMOSFETの関数です。

MOSFETの許容最大消費電力は以下の式で決まります。

$$P_T = \frac{(T_J - T_A)}{\theta_{JA}} \quad (W) \quad (35)$$

ここで、

$$P_T = P_{COND} + P_{SW(fsw)} \quad (W) \quad (36)$$

また、 θ_{JA} はパッケージの熱抵抗です。

同期整流MOSFETの消費電力

同期整流MOSFETで消費される電力は、 $R_{DS(on)}$ の導通損失、ボディ・ダイオードの導通損失、逆回復損失の3つの要素より構成されています。 $R_{DS(on)}$ の導通損失は式(30)を使って求めることができ、同期整流MOSFETを流れるRMS電流は以下の式(37)で表されます。

$$I_{RMS} = I_O \times \sqrt{1-d} \quad (A_{RMS}) \quad (37)$$

ボディ・ダイオードの導通損失はアンチ・クロス導通の遅延時間にボディ・ダイオードが順方向に導通することが原因です。ボディ・ダイオードの導通損失は以下の式(38)で表されます。

$$P_{DC} = I_O \times V_F \times t_{DELAY} \times f_{SW} \quad (W) \quad (38)$$

但し、

● V_F はボディ・ダイオードの順方向電圧です

● t_{DELAY} はスイッチング周期ごとの総遅延時間です

逆回復損失はボディ・ダイオードが順方向のバイアスから逆遮断状態への回復に要する時間が原因で生じます。逆回復損失は以下の式(39)で表されます。

$$P_{RR} = 0.5 \times Q_{RR} \times V_{IN} \times f_{SW} \quad (W) \quad (39)$$

但し、

● Q_{RR} はボディ・ダイオードの逆回復電荷です

同期整流MOSFETの総消費電力は以下の式(40)で表されます。

$$P_{SR} = P_{DC} + P_{RR} + P_{COND} \quad (W) \quad (40)$$

TPS40060/TPS40061の消費電力

TPS40060とTPS40061の消費電力はMOSFETドライバ電流と入力電圧に大きく依存します。ドライバ電流は外付けMOSFETの総ゲート電荷 Q_g に比例します。外付けのゲート抵抗を無視すると(参考資料[2]参照)ドライバの電力は式(41)で計算できます。

$$P_D = Q_g \times V_{DR} \times f_{SW} \quad (W) \quad (41)$$

そして、デバイスの総消費電力は、ハイサイドと同期整流器の両方が類似したゲート電荷をもつMOSFETであるとすると、以下の式(42)で表されます。

$$P_T = \left(\frac{2 \times P_D}{V_{DR}} + I_Q \right) \times V_{IN} \quad (W) \quad (42)$$

または、

$$P_T = \left[(2 \times Q_g \times f_{SW}) + I_Q \right] \times V_{IN} \quad (W) \quad (43)$$

但し、

● I_Q は静止時の動作電流です(ドライバは無視)

PowerPAD™パッケージデバイスがもつ最大の電力能力はエア・フローと同様にレイアウトにも依存します。接合部から外気への熱抵抗は、2オンスの銅配線、サーマル・パッドがはんだ付け、エア・フローなしとすると以下の値になります。

$$\theta_{JA} = 36.51^\circ\text{C/W}$$

パッケージの許容最大消費電力は式(35)により周囲温度に関係します。式(35)を式(43)に代入して、 f_{SW} について解くとTPS40060とTPS40061の最大動作周波数が求められます。その結果は以下の式(44)で表されます。

$$f_{SW} = \frac{\left(\left[\frac{(T_J - T_A)}{(\theta_{JA} \times V_{DD})} \right] - I_Q \right)}{(2 \times Q_g)} \quad (\text{Hz}) \quad (44)$$

レイアウトについての考察

PowerPAD™パッケージ

PowerPAD™パッケージはデバイスから熱を取り除くため低い熱抵抗を提供します。PowerPAD™はその名前の由来のとおりデバイスの底面の大きな接合用パッドにより熱抵抗が低くなります。最良の熱特性を得るには、回路ボードにはパッケージの真下にはんだ/スズめっき/銅の領域があることが必要です。この領域の大きさはPowerPAD™パッケージの寸法により決まります。16ピンのTSSOP(PWP)パッケージではこの領域は5 mm x 3.4 mm[3]です。

放熱用ビアは、この領域を内部または外部の銅のプレーンに接続し、また、そのビア穴はビア・バレルが銅めっきされる場合効率よく埋まるよう十分に小さな直径にしておきます。この埋め栓は、はんだリフロー時パッケージ本体とデバイスの下のはんだ/スズめっき領域との接触面からはんだが逃げるの防ぐために必要です。1オンスの銅がボード表面にめっきされ、同時にビア・バレルをめっきした場合、ビアの直径は0.33mm(13ミル)が適切です。銅めっきされる場合に放熱用ビアを埋めなければ、最小が

0.1mmであるビア直径に等しい直径のはんだマスク材を使ってビアに蓋をしてください。この蓋により、はんだが放熱用ビアの中を通って逃げ、可能性として起こりうるパッケージの下にはんだのボイドができることが防止されます。PowerPAD™パッケージの詳細な情報についてはPowerPAD™ Thermally Enhanced Package^[3]を参照してください。

MOSFETのパッケージ

MOSFETのパッケージの選択はMOSFETの消費電力と予測される動作条件によります。一般的に、表面実装のアプリケーションでは、DPAK型のパッケージが熱抵抗(θ_{JA})が最小にできるため、消費電力の能力が最大になります。しかし、DPAKの有効性は適切にレイアウトすることと熱管理にかかっています。MOSFETのデータシートに規定されている θ_{JA} は所定の銅面積と厚さを基準にしています。ほとんどの場合、40°C/Wの最小熱抵抗を達成するにはG-10/FR4ボード上で1平方インチあたり2オンスの銅が必要です。ボード面積を犠牲にすると熱抵抗を低くすることができます。実装を適切に行なうことについての詳細な情報は選択するMOSFETのデータシートを参照してください。

グランドと回路のレイアウトについての考察

このデバイスには信号グランド(SGND)ピンと電源グランド(PGND)ピンが別々に用意されています。回路のグランドは適切に分離されていることが重要です。各グランドは、そのインピーダンスを最小限に抑えるため、できればプレーンで構成してください。出力、同期整流器、MOSFETドライバのデカップリング・キャパシタ(BP10)、入力キャパシタなどの高電力でノイズの多い回路は入力キャパシタ点でPGNDのプレーンに接続してください。

FB抵抗デバイダ、R_T、ILIMなどのノイズに敏感なノードはSGNDのプレーンに接続してください。SGNDのプレーンはPGNDのプレーンに一点のみで接続するようにしてください。

部品の配置はできるだけバイパス・キャパシタ(BP10, BP5, BPN10)がそれぞれの電源ピン及びグランド・ピンの近くに配置されるようにします。また、FB, RT, ILIMなどのノイズに敏感な回路は、HDRV, LDRV, BPN10, スイッチ・ノード(SW)などの高いdv/dtのノードの近くに置かないようにしてください。

設計例

- 入力電圧: 18V_{DC}~55V_{DC}
- 出力電圧: 3.3V ±2%
- 出力電流: 5A(最大、定常状態時)、7A(サージ、持続時間10ms、最大デューティ・サイクル10%)
- 出力リップル電圧: 33mV_{P-P}(5A時)
- 出力負荷応答: 0.3V(ステップ負荷変化10%~90%)
- 動作温度: -40°C~85°C
- f_{SW} = 300kHz

1. 最大/最小デューティ・サイクルの計算

$$d_{MIN} = \frac{V_{O(min)}}{V_{IN(max)}} = 0.0588 \quad d_{MAX} = \frac{V_{O(max)}}{V_{IN(min)}} = 0.187 \quad (45)$$

2. ΔIの選択

この場合、ΔIはコンバータが標準負荷の20%で不連続モードになるよう選択します。

$$\Delta I = I_0 \times 2 \times 0.2 = 2.0 \text{ A} \quad (46)$$

3. 48V入力時のハイサイドMOSFET(Si9407AEY)の電力損失の計算

$$d_{48V} = \frac{V_O}{V_{IN}} = 0.069 \quad (47)$$

式(31)より、

$$I_{RMS} = I_0 \times \sqrt{d} = 5 \times \sqrt{0.069} = 1.31 \text{ A} \quad (48)$$

式(48)を式(30)に代入して、

$$P_{COND} = I_{RMS}^2 \times R_{DS(on)} \times (1 + T_{CR} \times [T_J - 25^\circ\text{C}]) \quad (49) \\ = 1.31^2 \times 0.12 \times (1 + 0.007 \times (150 - 25)) = 0.386 \text{ W}$$

式(34)より、

$$I_{D1} = I_0 - \frac{\Delta I}{2} = 5 - 1.0 = 4.0 \text{ A} \quad (50)$$

$$I_{D2} = I_0 + \frac{\Delta I}{2} = 5 + 1.0 = 6.0 \text{ A}$$

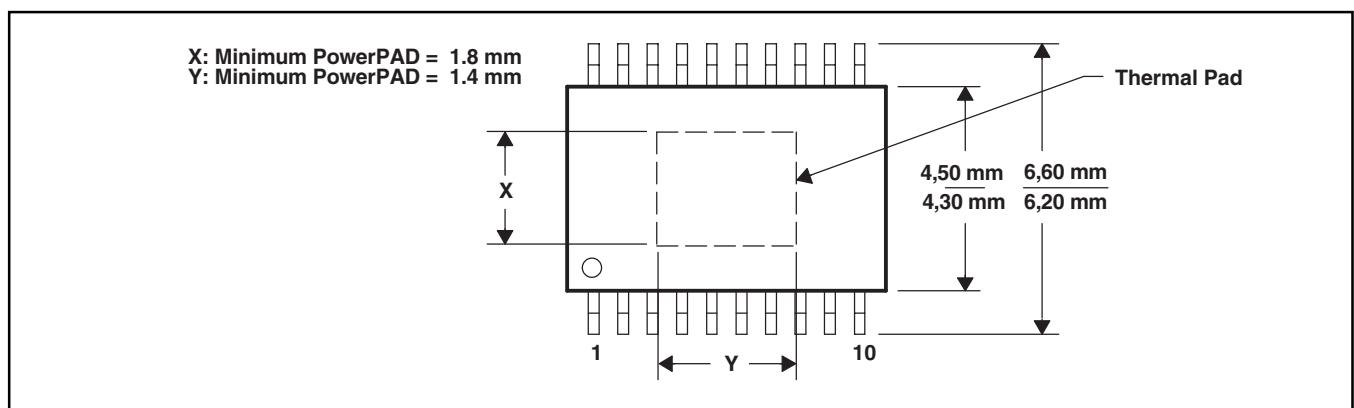


図12. PowerPAD™ Dimensions

t_{S1} (立上がり時間)と t_{S2} (立下り時間)はMOSFETのデータシートのゲート電荷特性グラフより概算されます。

Q2-Q1をゲート電圧がそのプラトー電圧(V_{PLT})まで増加するのに要する電荷に等しいとします。この期間での等価入力容量は、

$$C_{IN} = \frac{dQ}{dV} = \frac{5 \text{ nC}}{4.5 \text{ V}} = 1111 \text{ pF} \quad (51)$$

等価容量を充電するのに要する時間は、

$$4.5 = 10 - (10 - 2) \times e^{\left(\frac{-t}{R \times C}\right)} \quad (52)$$

但し、Rは実効ゲート駆動抵抗で 10Ω です。

$$t_1 = -10 \times 1111 \text{ pF} \times \ln\left(\frac{5.5}{8}\right) = 4.2 \text{ ns} \quad (53)$$

ドレイン/ソース間電圧 V_{DS} が降下するのにかかる時間はデータシートで計算します。この時間では、電荷の変化は V_{GS} がミラー充電電圧3.1Vで一定の時起ります。

$$\Delta Q = Q3 - Q2 = 2 \text{ nC} \quad (54)$$

この期間では V_{GS} は一定に保たれています。従って、MOSFETのゲート駆動は以下の電流をもつ一定の電流ソースのようにみえます。

$$I_{DRV} = \frac{V_{DRV} - V_{GS}}{R_{DRV}} = \frac{8 - 3.1}{10} = 490 \text{ mA} \quad (55)$$

ここで V_{DS} が降下するのにかかる時間を計算することができます。

$$t_2 = \frac{\Delta Q}{I_{DRV}} = \frac{2.0 \text{ nC}}{0.490 \text{ A}} = 4.1 \text{ ns} \quad (56)$$

総立上がり時間は、

$$t_{S1} = t_R = t_1 + t_2 = 4.2 \text{ ns} + 4.1 \text{ ns} = 8.3 \text{ ns} \quad (57)$$

同様に立下り時間も以下のように求めることができます。

$$t_3 = (Q3 - Q2) \times \frac{R_{DRV}}{V_{PLT}} = 2.0 \text{ nC} \times \frac{7.5 \Omega}{3.1 \text{ V}} = 4.8 \text{ ns} \quad (58)$$

$$t_4 = -R_{DRV} \times C_{IN} \times \ln\left(\frac{3.1}{8}\right) = 8.0 \text{ ns} \quad (59)$$

総立下り時間は、

$$t_{S2} = t_F = t_3 + t_4 = 4.8 \text{ ns} + 8 \text{ ns} = 12.8 \text{ ns} \quad (60)$$

$t_{S1}, t_{S2}, I_{D1}, I_{D2}$ を式(32)に代入すると、

$$P_{SW} (f_{SW}) = 48 \times \left(\frac{8.3 \text{ ns} \times 4.0}{6} + \frac{12.6 \text{ ns} \times 6.0}{2} \right) \times 300 \text{ kHz} \\ = 477 \text{ mW} \quad (61)$$

式(35)を並び替えて式(36)を代入するとMOSFETの接合部温度が求められます。

$$T_J = (P_{COND} + P_{SW}) \times \theta_{JA} + T_A$$

4. 同期整流器の損失の計算

同期整流MOSFETには、導通損失、ダイオード逆回復損失の2つの損失要素があります。導通損失はアンチ・クロス導通遅延に伴うデッドタイム時のボディ・ダイオードの導通損失に加え I_{RMS} 損失にも起因します。

式(37)より同期整流器を流れる I_{RMS} 電流は、

$$I_{RMS} = I_O \times \sqrt{1 - d} = 5 \times \sqrt{1 - 0.069} = 4.82 \text{ A}_{RMS} \quad (62)$$

式(30)より同期MOSFETの導通損失は、

$$P_{COND} = I_{RMS}^2 \times R_{DS(on)} \times (1 + T_{CR} \times [T_J - 25^\circ\text{C}]) \\ = 4.82^2 \times 0.011 \times (1 + 0.007 (150 - 25)) = 0.48 \text{ W} \quad (63)$$

式(38)よりボディ・ダイオードの導通損失は、

$$P_{DC} = I_O \times V_{FD} \times t_{DELAY} \times f_{SW} \\ = 5.0 \times 0.8 \times 100 \text{ ns} \times 300 \text{ kHz} = 0.120 \text{ W} \quad (64)$$

式(39)よりボディ・ダイオードの逆回復損失は、

$$P_{RR} = 0.5 \times Q_{RR} \times V_{DD} \times f_{SW} \\ = 0.5 \times 30 \text{ nC} \times 48 \times 300 \text{ kHz} = 0.216 \text{ W} \quad (65)$$

式(40)より同期整流MOSFETで消費される総電力は、

$$P_{SR} = P_{RR} + P_{COND} + P_{DC} \\ = 0.216 + 0.48 + 0.12 = 0.816 \text{ W} \quad (66)$$

同期整流器の接合部温度は、

$$T_J = P_{SR} \times \theta_{JA} + T_A = (0.816) \times 40 + 85 = 118^\circ\text{C} \quad (67)$$

標準的なアプリケーションでは、同期整流MOSFETをショットキー・ダイオードと並列にするとボディ・ダイオードの導通期間と逆回復期間で消費電力が小さくなるためコンバータの総効率が約2%上昇します。

5. インダクタ値の計算

インダクタ値は式(11)より計算されます。

$$L = \frac{(48 - 3.3) \times 3.3}{48 \times 1.0 \times 300 \text{ kHz}} = 10.2 \mu\text{H} \quad (68)$$

10 μH の標準インダクタ値を選択します。

6. スイッチング周波数の設定

クロック周波数はRTピンからグランドへの抵抗(R_T)により設定されます。 R_T の値は f_{SW} (単位はkHz)を用い以下の式より求めることができます。

$$R_T = \left(\frac{1}{f_{SW} \times 17.82 \times 10^{-6}} - 23 \right) \text{ k}\Omega = 164 \text{ k}\Omega, \text{ use } 165 \text{ k}\Omega \quad (69)$$

7. ランプ・ジェネレータ回路のプログラミング

PWMランプはKFFピンからV_{IN}への抵抗(R_{KFF})によりプログラミされます。また、ランプ・ジェネレータは入力UVLO電圧もコントロールします。低電圧レベルが14.4V(18VのV_{IN(min)}の20%ダウン)の場合、R_{KFF}は以下の式より計算することができます。

$$R_{KFF} = (V_{IN(min)} - 3.5) (65.27 \times R_T + 1502) \Omega \\ = 133.7 \text{ k}\Omega, \text{ use } 133 \text{ k}\Omega \quad (70)$$

8. 出力容量(C_O)の計算

この例では、出力容量は1Aから5Aへのステップ負荷でΔV = 0.3Vという負荷応答要件により決まります。C_Oは式(17)を使って求められます。

$$C_O = \frac{10 \mu\text{H} \times (5^2 - 1^2)}{(3.3^2 - 3.0^2)} = 127 \mu\text{F} \quad (71)$$

式(12)を使用して、出力リップルの要件に適合するのに必要なESRを計算することができます。

$$33 \text{ mV} = 2.0 \left(\text{ESR} + \frac{1}{8 \times 127 \mu\text{F} \times 300 \text{ kHz}} \right) \quad (72)$$

$$\text{ESR} = 14.9 \text{ m}\Omega$$

必要とされるESRを得るには、上記計算結果の127μFより大きな容量が必要です。例えば、ESRが12mΩで180μFのPanasonicのSPキャパシタを1つ使用します。この新しい値180μFにより必要とされるESRの再計算を式(73)に示します。

$$33 \text{ mV} = 2.0 \left(\text{ESR} + \frac{1}{8 \times 180 \mu\text{F} \times 300 \text{ kHz}} \right) \quad (73)$$

$$\text{ESR} = 16.5 \text{ m}\Omega$$

9. ソフトスタート・キャパシタ(C_{SS})の計算

この設計では、ソフトスタート時間(t_{START})は1msが要求されています。C_{SS}は以下の式で計算することができます。

$$C_{SS} = \frac{2.3 \mu\text{A}}{0.7 \text{ V}} \times 1 \text{ ms} = 3.28 \text{ nF} = 3300 \text{ pF} \quad (74)$$

10. 電流制限抵抗(R_{I_{LIM}})の計算

電流制限の設定点は、式(7)に示されるように、t_{START}、V_O、C_O、起動時のI_{LOAD}により決まります。

$$I_{LIM} > \frac{180 \mu\text{F} \times 3.3}{1 \text{ m}} + 7.0 = 7.6 \text{ A} \quad (75)$$

この設計では、I_{LIM}は最小10.0Aに設定します。式(8)より、

$$R_{ILIM} = \frac{10 \times 0.14}{1.12 \times 10.0 \mu\text{A}} + \frac{V_{OS}}{I_{SINK}} \Omega \\ = \frac{10 \times 0.14}{1.12 \times 10.0 \mu\text{A}} + \frac{(-60 \text{ mV})}{10 \text{ mA}} \Omega \\ = 119 \text{ k}\Omega = 118 \text{ k}\Omega \quad (76)$$

11. ループ補償値の計算

式(20)より電圧フィードフォワード定数(K)を計算します。

$$A_{MOD} = \frac{10}{2} = 5 \quad (77)$$

$$A_{MOD(\text{dB})} = 20 \times \log (5.0) = 14 \text{ dB} \quad (78)$$

L-C フィルタの式(21)と式(22)より出力の極とゼロを計算します。

$$f_{LC} = \frac{1}{2\pi \sqrt{10 \mu\text{H} \times 180 \mu\text{F}}} = 3.7 \text{ kHz} \quad (79)$$

及び、

$$f_Z = \frac{1}{2\pi \times 0.012 \times 180 \mu\text{F}} = 74 \text{ kHz} \quad (80)$$

閉ループの0dBクロスオーバー周波数f_Cを選択します。この例ではf_C = 20 kHzです。

タイプIIIの補償回路の二重ゼロの位置を選択します。参考資料[1]により極/ゼロの配置位置はクロスオーバーで必要とされる位相ブーストにより決まります。この例では位相余裕60°が望ましい値です。この例で要求される位相ブーストは、

$$\text{Boost} = M - P - 90^\circ = 60^\circ - (-145^\circ) - 90^\circ = 115^\circ \quad (81)$$

但し、

● Mは望ましい位相余裕

● Pは変調器の位相シフト(この例では-145°)

$$K = \left(\tan \left[\frac{115^\circ}{4} + 45^\circ \right] \right)^2 \approx 11.77 \text{ and } \sqrt{K} = 3.43 \quad (82)$$

従って、

$$f_{P1} = f_{P2} = \sqrt{K} \times 20 \text{ kHz} = 69 \text{ kHz}$$

$$\text{and } f_{Z1} = f_{Z2} = \frac{1}{\sqrt{K}} \times 20 \text{ kHz} = 5.8 \text{ kHz}$$

参考資料[1]に従い、二重ゼロは5.8 kHz付近に置かれ、二重極は69 kHzに置かれます。式(24)、式(25)、式(28)より図9の部品値について解きます。R1 = 100 kΩを選択します。

$$C_3 = \frac{1}{2\pi \times 100 \text{ k}\Omega \times 5.8 \text{ kHz}} = 274 \text{ pF} \approx 270 \text{ pF, from } f_{Z2} \quad (83)$$

$$R_3 = \frac{1}{2\pi \times 270 \text{ pF} \times 69 \text{ kHz}} = 8.54 \text{ k}\Omega \approx 8.45 \text{ k}\Omega, \text{ from } f_{P2} \quad (84)$$

$$C_2 = \frac{1}{2\pi \times 100 \text{ k}\Omega \times 20 \text{ kHz}} = 79.6 \text{ pF, from } f_C \approx 82 \text{ pF} \quad (85)$$

$$R_2 = \frac{1}{2\pi \times 82 \text{ pF} \times 69 \text{ kHz}} = 28.1 \text{ k}\Omega, \text{ from } f_{P1} \approx 28 \text{ kHz} \quad (86)$$

$$C_1 = \frac{1}{2\pi \times 28 \text{ k}\Omega \times 5.8 \text{ kHz}} = 980 \text{ pF} \approx 1000 \text{ pF, from } f_{Z1} \quad (87)$$

$$R_{BIAS} = \frac{0.7 \times 100 \text{ k}\Omega}{3.3 - 0.7} = 26.9 \text{ k}\Omega \approx 26.7 \text{ k}\Omega \quad (88)$$

ゲート駆動の構成

Si4470のもつ高速のMOSFETスイッチング時間、高いV_{DS}電圧、低いゲート・スレッシホールドからdv/dtによりターンオンが誘発される可能性があるため、この設計では上側MOSFETのゲート・リードに2Ωの抵抗が含まれています。この抵抗はスイッチ・ノードの“L”レベルから“H”レベルへの遷移を成形するのに使用することができます、dv/dtによるターンオンを誘発しにくくします。

BPN10及びBP10Vバイパス容量の計算

バイパス・キャパシタの大きさは、使用されているMOSFETの総ゲート電荷とバイパス・キャパシタに許容されるドロープ量により決まります。BPN10ピンで0.5Vの電圧ドロープが許容されるとすると、BPN10容量は式(9)より、以下の式(89)で求められます。

$$C_{BPN10} = \frac{Q_g}{\Delta V} = \frac{30 \text{ nC}}{0.5} = 60 \text{ nF} \quad (89)$$

また、BP10V容量は式(10)より以下の式(90)で求められます。

$$C_{BP10X} = \frac{Q_{gSR}}{\Delta V} = \frac{57 \text{ nC}}{0.5} = 114 \text{ nF} \quad (90)$$

このアプリケーションでは、BPN10Vバイパス・キャパシタには0.1μFのキャパシタ、BP10Vには1.0μFのキャパシタが使用されます。図13に、この設計例で規定されている出力電流5A、入力電圧18V～55V/出力電圧3.3VのDC/DCコンバータについて選択した部品を示します。

REFERENCES

1. Venable, H. Dean, *The K Factor: A New Mathematical Tool for Stability Analysis and Synthesis* Proceedings of Powercon 10, pp A5-1 through A5-12
2. Balogh, Laszlo, *Design and Application Guide for High Speed MOSFET Gate Drive Circuits*, Texas Instruments/Unitrode Corporation, Power Supply Design Seminar, SEM-1400 Topic 2.
3. *PowerPAD™ Thermally Enhanced Package* Texas Instruments, Semiconductor Group, Technical Brief: TI Literature No. SLMA002

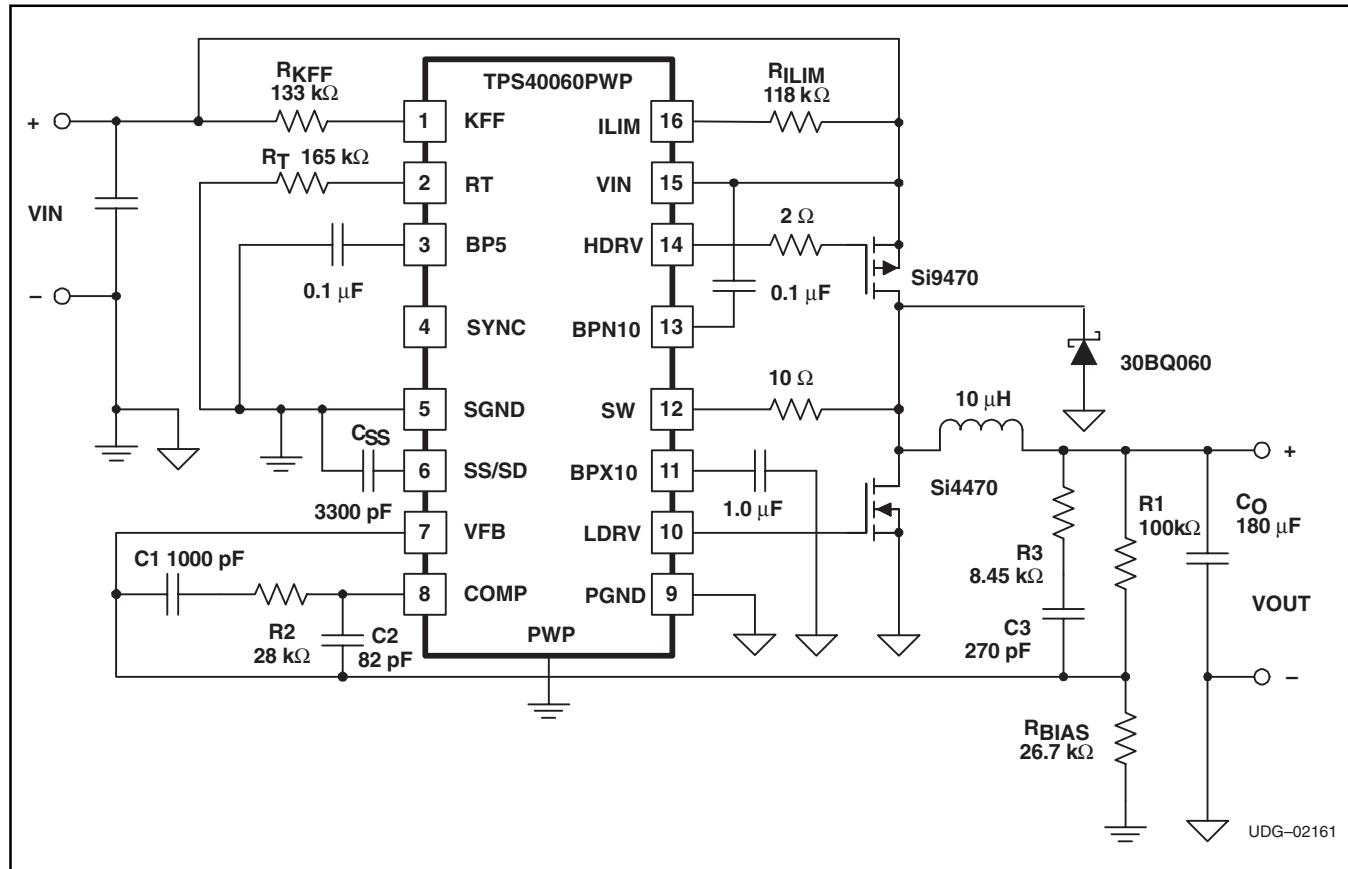


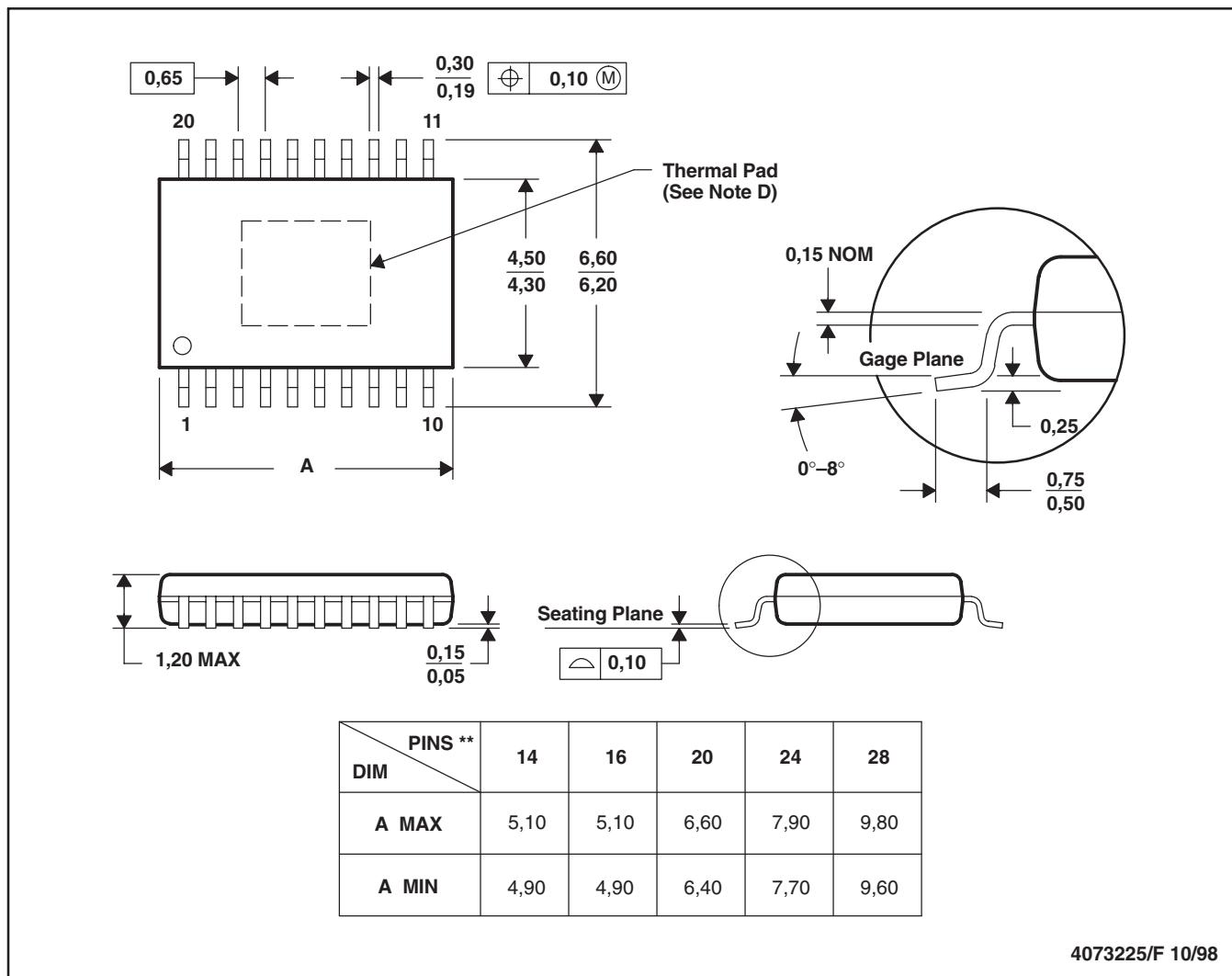
図13. Design Example, 48 V to 3.3 V at 5 A dc-to-dc Converter

外観

PWP (R-PDSO-G**)

PowerPAD™ PLASTIC SMALL-OUTLINE

20 PINS SHOWN



注：A. 全ての線寸法の単位はミリメートルです。

B. 図は予告なく変更することがあります。

C. ボディ寸法はモールド突起部を含みません。

D. パッケージの熱特性はサーマル・パッドを外部のサーマル・プレーンに接合することで改善されることがあります。

このパッドはダイの裏側と一部のリードに電気的にかつ熱的に接続されています。

E. JEDEC MO-153に準拠します。

PACKAGING INFORMATION

Orderable part number	Status (1)	Material type (2)	Package Pins	Package qty Carrier	RoHS (3)	Lead finish/ Ball material (4)	MSL rating/ Peak reflow (5)	Op temp (°C)	Part marking (6)
TPS40060PWP	Active	Production	HTSSOP (PWP) 16	90 TUBE	Yes	NIPDAU	Level-2-260C-1 YEAR	-40 to 85	40060
TPS40060PWP.A	Active	Production	HTSSOP (PWP) 16	90 TUBE	Yes	NIPDAU	Level-2-260C-1 YEAR	-40 to 85	40060
TPS40060PWPR	Active	Production	HTSSOP (PWP) 16	2000 LARGE T&R	Yes	NIPDAU	Level-2-260C-1 YEAR	-40 to 85	40060
TPS40060PWPR.A	Active	Production	HTSSOP (PWP) 16	2000 LARGE T&R	Yes	NIPDAU	Level-2-260C-1 YEAR	-40 to 85	40060
TPS40060PWPRG4	Active	Production	HTSSOP (PWP) 16	2000 LARGE T&R	Yes	NIPDAU	Level-2-260C-1 YEAR	-40 to 85	40060
TPS40061PWP	Active	Production	HTSSOP (PWP) 16	90 TUBE	Yes	NIPDAU	Level-2-260C-1 YEAR	-40 to 85	40061
TPS40061PWP.A	Active	Production	HTSSOP (PWP) 16	90 TUBE	Yes	NIPDAU	Level-2-260C-1 YEAR	-40 to 85	40061
TPS40061PWPG4	Active	Production	HTSSOP (PWP) 16	90 TUBE	Yes	NIPDAU	Level-2-260C-1 YEAR	-40 to 85	40061
TPS40061PWPR	Active	Production	HTSSOP (PWP) 16	2000 LARGE T&R	Yes	NIPDAU	Level-2-260C-1 YEAR	-40 to 85	40061
TPS40061PWPR.A	Active	Production	HTSSOP (PWP) 16	2000 LARGE T&R	Yes	NIPDAU	Level-2-260C-1 YEAR	-40 to 85	40061
TPS40061PWPRG4	Active	Production	HTSSOP (PWP) 16	2000 LARGE T&R	Yes	NIPDAU	Level-2-260C-1 YEAR	-40 to 85	40061

⁽¹⁾ **Status:** For more details on status, see our [product life cycle](#).

⁽²⁾ **Material type:** When designated, preproduction parts are prototypes/experimental devices, and are not yet approved or released for full production. Testing and final process, including without limitation quality assurance, reliability performance testing, and/or process qualification, may not yet be complete, and this item is subject to further changes or possible discontinuation. If available for ordering, purchases will be subject to an additional waiver at checkout, and are intended for early internal evaluation purposes only. These items are sold without warranties of any kind.

⁽³⁾ **RoHS values:** Yes, No, RoHS Exempt. See the [TI RoHS Statement](#) for additional information and value definition.

⁽⁴⁾ **Lead finish/Ball material:** Parts may have multiple material finish options. Finish options are separated by a vertical ruled line. Lead finish/Ball material values may wrap to two lines if the finish value exceeds the maximum column width.

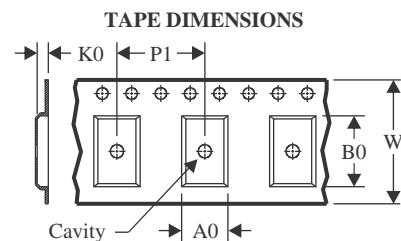
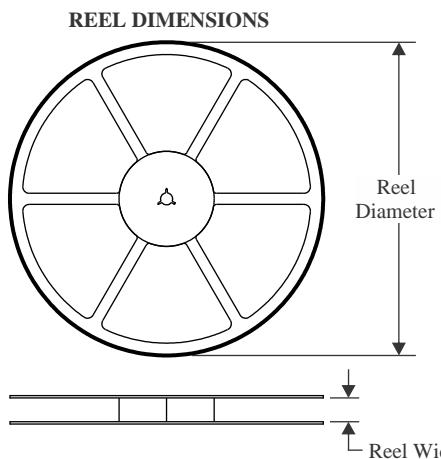
⁽⁵⁾ **MSL rating/Peak reflow:** The moisture sensitivity level ratings and peak solder (reflow) temperatures. In the event that a part has multiple moisture sensitivity ratings, only the lowest level per JEDEC standards is shown. Refer to the shipping label for the actual reflow temperature that will be used to mount the part to the printed circuit board.

⁽⁶⁾ **Part marking:** There may be an additional marking, which relates to the logo, the lot trace code information, or the environmental category of the part.

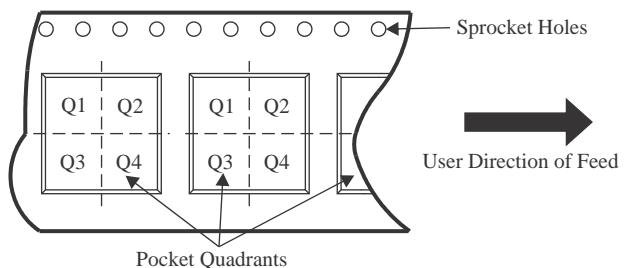
Multiple part markings will be inside parentheses. Only one part marking contained in parentheses and separated by a "~" will appear on a part. If a line is indented then it is a continuation of the previous line and the two combined represent the entire part marking for that device.

Important Information and Disclaimer: The information provided on this page represents TI's knowledge and belief as of the date that it is provided. TI bases its knowledge and belief on information provided by third parties, and makes no representation or warranty as to the accuracy of such information. Efforts are underway to better integrate information from third parties. TI has taken and continues to take reasonable steps to provide representative and accurate information but may not have conducted destructive testing or chemical analysis on incoming materials and chemicals. TI and TI suppliers consider certain information to be proprietary, and thus CAS numbers and other limited information may not be available for release.

In no event shall TI's liability arising out of such information exceed the total purchase price of the TI part(s) at issue in this document sold by TI to Customer on an annual basis.

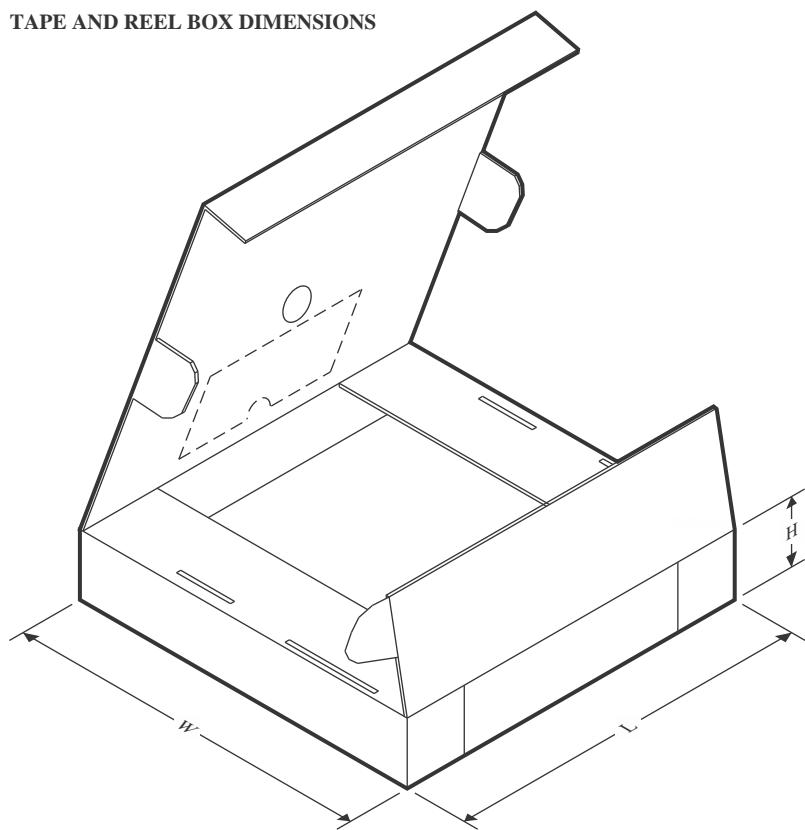
TAPE AND REEL INFORMATION


A0	Dimension designed to accommodate the component width
B0	Dimension designed to accommodate the component length
K0	Dimension designed to accommodate the component thickness
W	Overall width of the carrier tape
P1	Pitch between successive cavity centers

QUADRANT ASSIGNMENTS FOR PIN 1 ORIENTATION IN TAPE


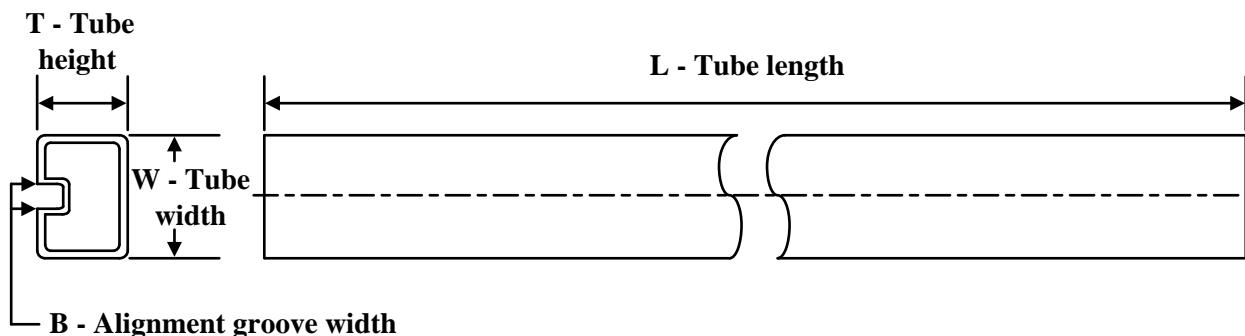
*All dimensions are nominal

Device	Package Type	Package Drawing	Pins	SPQ	Reel Diameter (mm)	Reel Width W1 (mm)	A0 (mm)	B0 (mm)	K0 (mm)	P1 (mm)	W (mm)	Pin1 Quadrant
TPS40060PWPR	HTSSOP	PWP	16	2000	330.0	12.4	6.9	5.6	1.6	8.0	12.0	Q1
TPS40061PWPR	HTSSOP	PWP	16	2000	330.0	12.4	6.9	5.6	1.6	8.0	12.0	Q1

TAPE AND REEL BOX DIMENSIONS


*All dimensions are nominal

Device	Package Type	Package Drawing	Pins	SPQ	Length (mm)	Width (mm)	Height (mm)
TPS40060PWPR	HTSSOP	PWP	16	2000	350.0	350.0	43.0
TPS40061PWPR	HTSSOP	PWP	16	2000	350.0	350.0	43.0

TUBE


*All dimensions are nominal

Device	Package Name	Package Type	Pins	SPQ	L (mm)	W (mm)	T (μ m)	B (mm)
TPS40060PWP	PWP	HTSSOP	16	90	530	10.2	3600	3.5
TPS40060PWP.A	PWP	HTSSOP	16	90	530	10.2	3600	3.5
TPS40061PWP	PWP	HTSSOP	16	90	530	10.2	3600	3.5
TPS40061PWP.A	PWP	HTSSOP	16	90	530	10.2	3600	3.5
TPS40061PWPG4	PWP	HTSSOP	16	90	530	10.2	3600	3.5

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默示保証、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、明示的または默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、(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、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ます。

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](#)、[TI の総合的な品質ガイドライン](#)、[ti.com](#) または TI 製品などに関連して提供される他の適用条件に従い提供されます。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。TI がカスタム、またはカスタマー仕様として明示的に指定していない限り、TI の製品は標準的なカタログに掲載される汎用機器です。

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

Copyright © 2025, Texas Instruments Incorporated

最終更新日：2025 年 10 月