

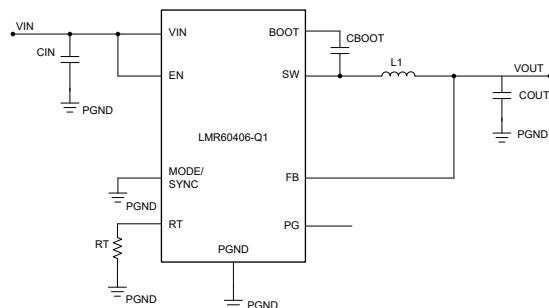
LMR60406-Q1 36V、0.6A、車載干渉およびノイズ低減技術 (MINT) 搭載、EMI 最適化、低出力キャパシタンスの同期整流型降圧コンバータ

1 特長

- 干渉およびノイズ軽減技術 - アーキテクチャ 1 (MINT 1):
 - CISPR 25 クラス 5 準拠を促進
 - 低インダクタンス HotRod™ QFN パッケージ
 - 高度なスペクトラム拡散オプションを利用可能
- 車載アプリケーション向けに AEC-Q100 認証済み
 - デバイス温度グレード 1: 動作時周囲温度範囲 -40°C ~ 125°C
- 機能安全対応
 - 機能安全システムの設計に役立つ資料を利用可能
- 広い動作入力電圧範囲: 3V ~ 36V (絶対最大値 42V)
- 固定 3.3V/ADJ および 5V/ADJ のプログラマブル出力電圧オプションが利用可能
 - 可変出力電圧範囲: 1V ~ 20V
- 非常に低い静止電流
 - シャットダウン電流: 0.7μA
 - スタンバイ電流: 3.5μA
- 低出力容量用に最適化された制御ループ
- スイッチング周波数 200kHz ~ 2.2MHz
- 低い最小オン時間 t_{ON} (標準値 30ns)
- FPWM、PFM、または外部周波数同期を利用可能
- スケーラブルな電源に対応した設計
 - LMR60410-Q1、LMR60420-Q1、LMR60430-Q1、LMR61430-Q1、LMR60440-Q1、LMR61440-Q1、LMR60441-Q1、LMR60450-Q1、および LMR60460-Q1 とのピン互換
- 電源シーケンス用のパワー グッド出力

2 アプリケーション

- 車載用インフォテインメントおよびクラスタ
- 車載用運転支援システム
- 車載用ボディアプリケーション



概略回路図 - 固定出力

3 説明

LMR60406-Q1 は、3V ~ 36V (過渡電圧 42V)、0.6A、車載グレードの同期型降圧コンバータであり、ウェットプル フランクを備えた超小型の 2.5mm × 2mm QFN-9 パッケージに封入されています。HotRod™ QFN パッケージは、アーキテクチャ 1 の機能を使用して干渉とノイズを軽減 (MINT 1) しており、低 EMI 特性を達成しているため、車載やその他のノイズに敏感な設計の認定取得が容易になります。

すべてのデバイスバリエーションは、可変出力構成で 1V ~ 20V の範囲の出力電圧に対応しています。各バリエーションは、出力電圧ノードをフィードバック ピンに直接接続することで、固定出力電圧を供給することもできます。デバイス比較表には、固定出力電圧オプションの詳細が記載されています。最小オン時間 30ns の電流モード制御アーキテクチャにより、高周波数での高い変換比、高速過渡応答、優れた負荷およびライン レギュレーションを可能にします。

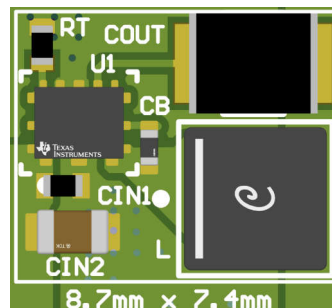
オープン ドレインのパワー グッド出力により、電源シーケンス要件が容易になります。LMR60406-Q1 の MODE/SYNC ピンを使用すると、強制パルス幅変調 (FPWM)、自動モード、または外部同期モードのいずれかを動作させることができます。

LMR60406-Q1 は、出力容量を低減するよう設計されており、PCB レイアウトの小型化とシステムコストの削減につながります。LMR60406-Q1 は、0.6A ~ 6A の電流レベルの範囲にわたるピン互換デバイスファミリの製品です。

パッケージ情報

部品番号	パッケージ ⁽¹⁾	パッケージ サイズ ⁽²⁾
LMR60406-Q1	RAK (WQFN-HR, 9)	2.5mm × 2.0mm

- 詳細については、セクション 11 を参照してください。
- パッケージ サイズ (長さ × 幅) は公称値であり、該当する場合はピンも含まれます。



EVM のレイアウト- 2.2MHz 3.3V 固定出力



目次

1 特長	1	8 アプリケーションと実装	22
2 アプリケーション	1	8.1 使用上の注意.....	22
3 説明	1	8.2 代表的なアプリケーション.....	22
4 デバイスの比較	3	8.3 設計のベスト プラクティス.....	33
5 ピン構成および機能	4	8.4 電源に関する推奨事項.....	33
6 仕様	6	8.5 レイアウト.....	34
6.1 絶対最大定格.....	6	9 デバイスおよびドキュメントのサポート	37
6.2 ESD 定格.....	6	9.1 デバイス サポート.....	37
6.3 推奨動作条件.....	6	9.2 ドキュメントのサポート.....	37
6.4 熱に関する情報.....	7	9.3 ドキュメントの更新通知を受け取る方法.....	38
6.5 電気的特性.....	7	9.4 サポート・リソース.....	38
6.6 代表的特性.....	9	9.5 商標.....	38
7 詳細説明	11	9.6 静電気放電に関する注意事項.....	38
7.1 概要.....	11	9.7 用語集.....	38
7.2 機能ブロック図.....	12	10 改訂履歴	39
7.3 機能説明.....	12	11 メカニカル、パッケージ、および注文情報	40
7.4 デバイスの機能モード.....	17		

4 デバイスの比較

表 4-1. A バリエント

発注用部品番号 ⁽¹⁾ ⁽²⁾	出力電流	出力電圧	スペクトラム拡散
LMR604065SRAKRQ1	0.6A	5V 固定/可変	あり

表 4-2. B バリエント

発注用部品番号 ⁽¹⁾ ⁽²⁾	出力電流	出力電圧	スペクトラム拡散
LMR604063SBRAKRQ1	0.6A	3.3V 固定/可変	あり
LMR604065SBRAKRQ1	0.6A	5V 固定/可変	あり
LMR604063BRAKRQ1	0.6A	3.3V 固定/可変	なし
LMR604065BRAKRQ1	0.6A	5V 固定/可変	なし

- (1) 他のバリエーションオプションについては、TI にお問い合わせください。
 (2) VIN UVLO ヒステリシスは、「A」バリエント デバイスで 0.6V、「B」バリエント デバイスで 1V です。

5 ピン構成および機能

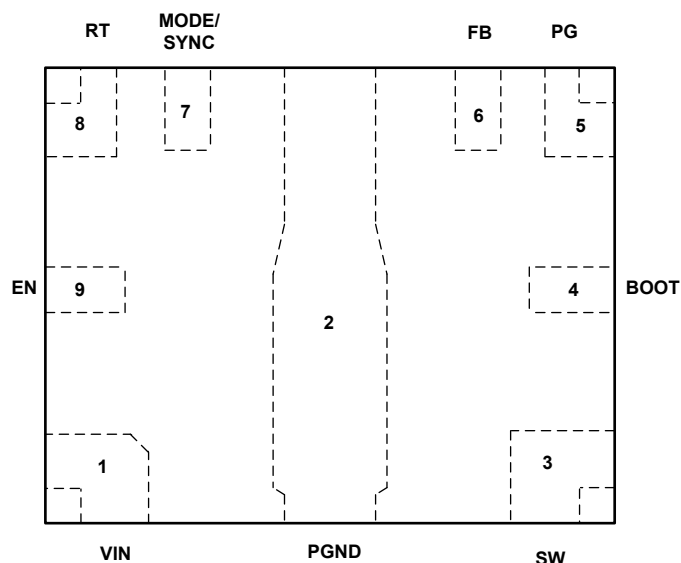


図 5-1. RAK パッケージ 9 ピン WQFN-HR (上面図)

表 5-1. ピンの機能

ピン		タイプ ⁽¹⁾	説明
番号	名称		
1	VIN	P	レギュレータの入力電源ピンをハイサイドのパワー MOSFET および内部 VCC レギュレータに接続します。入力電源および入力フィルタコンデンサのプラス端子に接続します。VIN ピンから入力コンデンサへの経路はできる限り短くする必要があります。
2	PGND	G	電源グランド。このピンは内部でローサイド MOSFET のソースに接続されます。システム グランド、および CIN と COUT コンデンサのグランド端子に接続します。CIN への経路はできる限り短くする必要があります。
3	SW	P	レギュレータスイッチノード。パワー インダクタおよびブートストラップ コンデンサに接続します。
4	BOOT	P	ブートストラップゲート駆動用ハイサイド MOSFET ドライバ電源。このピンと SW の間に、できるだけデバイスに近い位置に高品質の 100nF コンデンサを接続してください。
5	PG	O	オープンドレインのパワーグッド出力。電流制限ブルアップ抵抗を介して、適切な電圧源に接続してください。High = レギュレータはパワー グッド、Low = 出力はレギュレーション外。EN = ローになるとローになります。セクション 7.3.8 も参照してください。
6	FB	I	フィードバックピン。固定 V _{OUT} 動作では、このピンを出力電圧ノードに直接接続します。各デバイス バリエーションの電圧レベルについては、「セクション 4」を参照してください。V _{OUT} ノードと PGND の間に配置された帰還電圧分圧器の中心点に接続して、調整可能な出力電圧をプログラムします。
7	MODE/SYNC	I	動作モード入力ピン。このピンを RT ピンに接続して FPWM スイッチングを選択するか、このピンを PGND に接続して軽負荷での PFM スイッチングを選択します。外部クロックと同期するには、100kΩ の抵抗をグランドに接続して、クロックから直接駆動します。許容される電圧レベルとタイミング要件については、「電氣的特性」の表を参照してください。
8	RT	I	周波数設定ピン。RT と PGND の間に抵抗を配置することにより、発振器の周波数は 200kHz～2.2MHz の範囲に設定されます。

表 5-1. ピンの機能 (続き)

ピン		タイプ ⁽¹⁾	説明
番号	名称		
9	EN	I	レギュレータの有効ピン。 このピンをハイにするとデバイスが有効になり、ローにするとデバイスが無効になります。イネーブル機能が不要な場合は、このピンを VIN ピンに接続します。許容される電圧レベルの詳細については、「 電氣的特性 」を参照してください。

(1) G=グラウンド、I=入力、O=出力、P=電源

6 仕様

6.1 絶対最大定格

動作時接合部温度範囲内 (特に記述のない限り) ⁽¹⁾

		最小値	最大値	単位
入力電圧	VIN から PGND へ	-0.3	42	V
入力電圧	EN/UVLO から PGND へ	-0.3	42	V
入力電圧	RT, MODE/SYNC から PGND へ	-0.3	42	V
入力電圧	FB から PGND	-0.3	20	V
出力電圧	PG から PGND	-0.3	20	V
出力電圧	SW ~ PGND ⁽²⁾	-0.3	$V_{IN} + 0.3$	V
出力電圧	BOOT から SW へ	-0.3	5.5	V
T _J	動作時接合部温度	-40	150	°C
T _{stg}	保存温度	-55	150	°C

- (1) 「絶対最大定格」の範囲外の動作は、デバイスの永続的な損傷の原因となる可能性があります。「絶対最大定格」は、これらの条件において、または「推奨動作条件」に示された値を超える他のいかなる条件でも、本製品が正しく動作することを意味するものではありません。「絶対最大定格」の範囲内であっても「推奨動作条件」の範囲外で使用すると、デバイスが完全に機能しない可能性があり、デバイスの信頼性、機能、性能に影響を及ぼし、デバイスの寿命を縮める可能性があります。
- (2) SW ピンを外部から駆動しないでください。スイッチング遷移時には、PGND より 5V 低い電圧、および 20ns 未満の間においてピーク電圧が 42V を超えないことが許容されます

6.2 ESD 定格

			値	単位
V _(ESD)	静電放電	人体モデル (HBM)、AEC Q100-002 に準拠 ⁽¹⁾	±2000	V
		荷電デバイス モデル (CDM)、AEC Q100-011 準拠	±750	

- (1) AEC Q100-002 は、HBM ストレス試験を ANSI / ESDA / JEDEC JS-001 仕様に従って実施しなければならないと規定しています。

6.3 推奨動作条件

動作時接合部温度範囲内 (特に記述のない限り)

		最小値	最大値	単位
入力電圧	VIN	3	36	V
入力電圧	EN	0	36	V
入力電圧	PG	0	18	V
入力電圧	MODE/SYNC, RT	0	5.5	V
出力電圧	可変出力電圧範囲	1.0	20 ⁽¹⁾	V
出力電流	IOUT (LMR60406-Q1)	0	0.6	A
温度	動作時の接合部温度、T _J	-40	150	°C

- (1) この範囲外の出力電圧については、テキサス・インスツルメンツまでお問い合わせください。いかなる条件下でも、出力電圧は 0V を下回ることはできません。

6.4 熱に関する情報

熱評価基準 ⁽¹⁾		デバイス	単位
		RAK (WQFN-HR)	
		9 ピン	
R _{θJA}	接合部から周囲への熱抵抗 (JESD 51-7)	86.8	°C/W
R _{θJA}	接合部から周囲への熱抵抗 (EVM) ⁽²⁾	35	°C/W
R _{θJC(top)}	接合部からケース (上面) への熱抵抗	58.4	°C/W
R _{θJB}	接合部から基板への熱抵抗	27	°C/W
Ψ _{JT}	接合部から上面への特性パラメータ	2.6	°C/W
Ψ _{JB}	接合部から基板への特性パラメータ	27	°C/W

- (1) 従来および最新の熱評価基準の詳細については、『半導体および IC パッケージの熱評価基準』アプリケーション ノートを参照してください。
[spra953](#)
- (2) この表に示す R_{θJA} の値は、その他のパッケージとの比較のためにのみに有効であり、設計目的では使用できません。これらの値は JESD 51-7 に従って計算されており、4 層 JEDEC 基板上でシミュレーションされています。この値は、実際のアプリケーションで得られた性能を表すものではありません。たとえば、EVM R_{θJA} = 35°C/W です。

6.5 電気的特性

特に記述のない限り、各制限値は推奨動作接合部温度 (T_J) 範囲 (-40°C ~ +150°C) にわたって適用されます。最小値および最大値は、試験、設計、および統計的相関に基づいて規定されています。標準値は T_J = 25°C における最も一般的なパラメータ基準値を表しており、参考目的のみに提供されています。特に記述のない限り、次の条件が適用されます。V_{IN} = 13.5V、V_{EN} = 5V

パラメータ	テスト条件	最小値	標準値	最大値	単位
電源 (VIN ピン)					
V _{INUVLO(R)}	V _{IN} UVLO 立ち上がりスレッショルド (「A」バリエーション)	V _{IN} の立ち上がり (起動に必要な)	2.7	3.0	3.2 V
V _{INUVLO(R)}	V _{IN} の UVLO 立ち上がりスレッショルド電圧 (「B」バリエーション)	V _{IN} の立ち上がり (起動に必要な)	3.3	3.5	3.7 V
V _{INUVLO(F)}	V _{IN} UVLO 立ち下がりスレッショルド	V _{IN} の立ち下がり (動作開始後)			2.65 V
V _{INUVLO(H)}	V _{IN} の UVLO ヒステリシス (「A」バリエーション)		0.6		V
V _{INUVLO(H)}	V _{IN} の UVLO ヒステリシス (「B」バリエーション)		1		V
V _{INOV(R)}	V _{IN} OVP 立ち上がりスレッショルド	デバイスを PFM 動作に切り替えるために必要な V _{IN} 立ち上がり	35	37	39 V
V _{INOV(F)}	V _{IN} OVP 立ち下がりスレッショルド	デバイスを PFM 動作から FPWM 動作に切り替えるために必要な V _{IN} 立ち下がり	34	36	38 V
V _{INOV(H)}	V _{IN} OVP ヒステリシス		0.6	0.95	1.2 V
I _{Q(FIX-3.3V)}	V _{IN} 静止電流の合計、3.3V 固定出力、スイッチングなし	V _{IN} = 13.5V、I _{OUT} = 0A、V _{FB} = 3.3V + 4%、T _J = 25°C、自動モード有効		3.5	5 μA
I _{Q-SD}	V _{IN} のシャットダウン時の電源電流	V _{EN} = 0V、T _J = 25°C		0.7	1 μA
イネーブル (EN ピン)					
V _{EN-TH(R)}	イネーブル電圧立ち上がりスレッショルド	V _{EN} 立ち上がり	1.15	1.25	1.35 V
V _{EN-TH(F)}	イネーブル入力 Low スレッショルド	V _{EN} 立ち下がり	0.9	1	1.1 V
V _{EN-HYS}	イネーブル電圧のヒステリシス		275		mV
I _{EN-LKG}	イネーブル入力リーク電流	V _{EN} = V _{IN}	1	670	nA
電圧リファレンス (FB ピン)					
V _{FB}	内部フィードバックリファレンス電圧	FPWM モード	0.99	1.0	1.01 V
I _{FB-LKG}	フィードバックピン入力リーク電流	V _{FB} = 0.8V、可変出力電圧	0.09	50	nA
V _{OUT(3.3V)}	3.3V 固定出力電圧	FPWM モード、FB ピンが V _{OUT} へ短絡	3.24	3.3	3.35 V
V _{OUT(5V)}	5.0V 固定出力電圧	FPWM モード、V _{OUT} への FB 短絡	4.9	5	5.075 V
スタートアップ					
t _{SS}	内部固定ソフトスタート時間	最初の SW パルスから V _{REF} が設定点の 90% に達するまでの時間。	6		ms
電流制限およびヒックアップ					

LMR60406-Q1

JAJSQY3B – JULY 2025 – REVISED AUGUST 2026

特に記述のない限り、各制限値は推奨動作接合部温度 (T_J) 範囲 ($-40^{\circ}\text{C} \sim +150^{\circ}\text{C}$) にわたって適用されます。最小値および最大値は、試験、設計、および統計的相関に基づいて規定されています。標準値は $T_J = 25^{\circ}\text{C}$ における最も一般的なパラメータ基準値を表しており、参考目的にのみ提供されています。特に記述のない限り、次の条件が適用されます。 $V_{IN} = 13.5\text{V}$ 、 $V_{EN} = 5\text{V}$

パラメータ		テスト条件	最小値	標準値	最大値	単位
I_{HS-LIM}	ハイサイド ピーク電流制限	デューティ サイクルを 0% に近付ける	1.1	1.35	1.7	A
I_{LS-LIM}	ローサイド バレー電流制限	LS FET のバレー電流制限	0.75	0.98	1.15	A
$I_{LS-NEG-LIM}$	ローサイドの負の電流制限、	LS FET のシンク電流制限、FPWM モード	-0.43	-0.35	-0.2	A
$I_{L-ZC-LIM}$	ゼロクロスの電流制限値	自動モード		20		mA
V_{HIC}	FB ピンの過電流ヒカップ スレッショルド	LS FET オン時間 > 165ns、ソフトスタート中ではない	0.14	0.2	0.25	V
パワー グッド (PG ピン)						
$V_{PG-OVP(R)}$	PG 過電圧立ち上がりスレッショルド	FB 電圧の % (可変)	105	107	109.7	%
$V_{PG-OVP(F)}$	PG 過電圧立ち下がりスレッショルド	FB 電圧の % (可変)	104	106	108	%
$V_{PG-UV(P)}$	PG 低電圧立ち上がりスレッショルド	FB 電圧の % (可変)	92	94	96.6	%
$V_{PG-UV(F)}$	PG 低電圧立ち下がりスレッショルド	FB 電圧の % (可変)	91	93	95	%
$t_{PG-DEGLITCH(F)}$	PG 立ち下がりエッジでのグリッチ除去フィルタ遅延		41	50	81	μs
$t_{PG-DEGLITCH(R)}$	PG 立ち上がりエッジでのグリッチ除去フィルタ遅延		1.0	2.0	3.0	ms
$V_{IN(PG-VALID)}$	有効な PG 出力の最小 V_{IN}	$V_{OL(PG)} < 0.4\text{V}$, $R_{PU} = 10\text{k}\Omega$, $V_{PU} = 5\text{V}$			1.25	V
$R_{ON(PG)}$	PG オン抵抗	$I_{PG} = 1\text{mA}$		130	420	Ω
スイッチング周波数 (RT ピン)						
$f_{SW1(FPWM)}$	スイッチング周波数、FPWM 動作	$R_{RT} = 15.2\text{k}\Omega$ 、1%	1800	2000	2200	kHz
$f_{SW2(FPWM)}$	スイッチング周波数、FPWM 動作	$R_{RT} = 32.8\text{k}\Omega$ 、1%	900	1000	1100	kHz
同期 (MODE/SYNC ピン)						
V_{IH_FPWM}	FPWM に移行する MODE/SYNC ピン電圧		0.5		0.85	V
V_{IL_FPWM}	FPWM を終了する MODE/SYNC ピン電圧		0.4		0.72	V
V_{IH_CLK}	外部クロック入力ハイレベル スレッショルド		1.3			V
V_{IL_CLK}	外部クロック入力ローレベル スレッショルド				0.35	V
$t_{CLKIN(TON)}$	外部 SYNC 信号の最小正パルス幅			150		ns
$T_{CLKIN(TOFF)}$	外部 SYNC 信号の最小負パルス幅			150		ns
電力段						
$R_{DS-ON-HS}$	ハイサイド FET オン抵抗	$I_{SW} = 250\text{mA}$		245	510	m Ω
$R_{DS-ON-LS}$	ローサイド FET オン抵抗	$I_{SW} = 250\text{mA}$		205	425	m Ω
$t_{ON-MIN}^{(1)}$	最小オン時間			30		ns
$t_{OFF-MIN}^{(1)}$	最小オフ時間			89		ns
サーマル シャットダウン						
T_{SD}	サーマル シャットダウン ⁽¹⁾	シャットダウン スレッショルド	155	165	176	$^{\circ}\text{C}$
		復帰スレッショルド		156		$^{\circ}\text{C}$

(1) 量産時にはテストを行っていません。

6.6 代表的特性

$V_{IN} = 13.5V$ 、 $T_A = 25^\circ C$ (特に記述のない限り)。指定温度は周囲温度です。

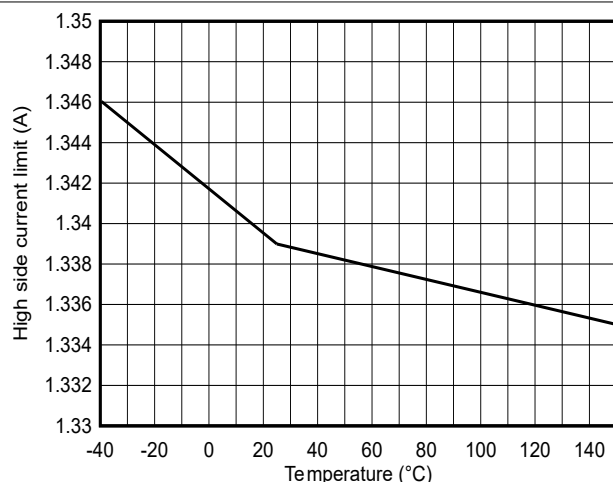


図 6-1. ハイサイド MOSFET 電流制限値

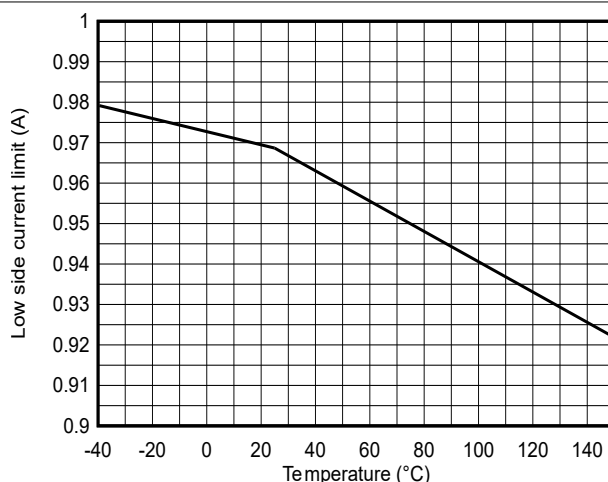


図 6-2. ローサイド MOSFET 電流制限値

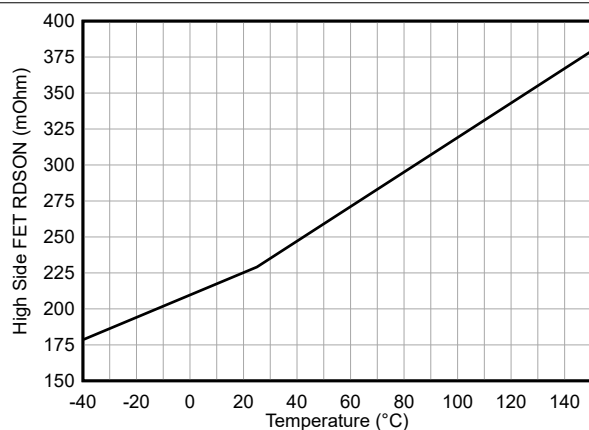


図 6-3. ハイサイド MOSFET の $R_{DS(on)}$

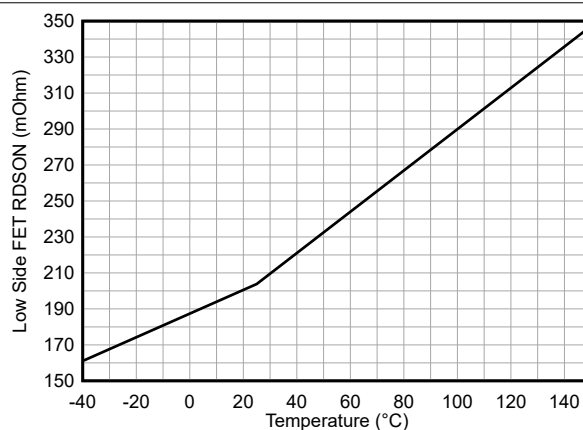


図 6-4. ローサイド MOSFET の $R_{DS(on)}$

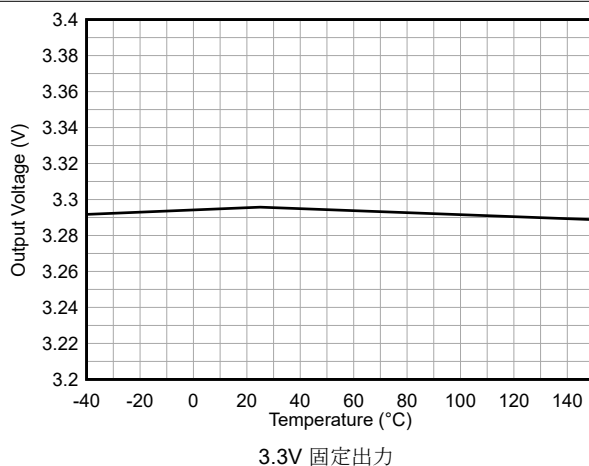


図 6-5. 出力電圧精度

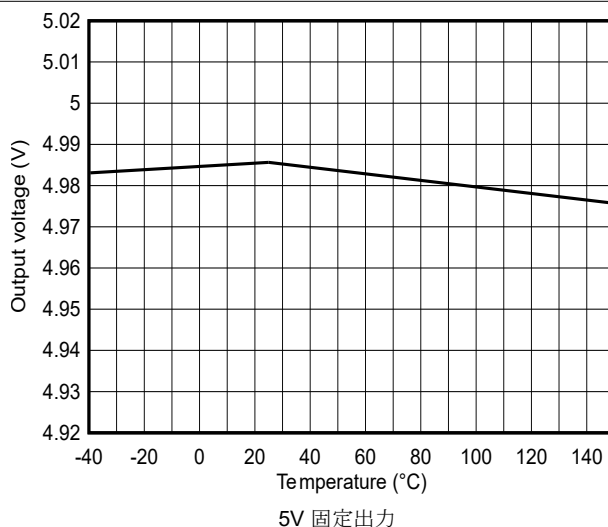


図 6-6. 出力電圧精度

6.6 代表的特性 (続き)

$V_{IN} = 13.5V$ 、 $T_A = 25^{\circ}C$ (特に記述のない限り)。指定温度は周囲温度です。

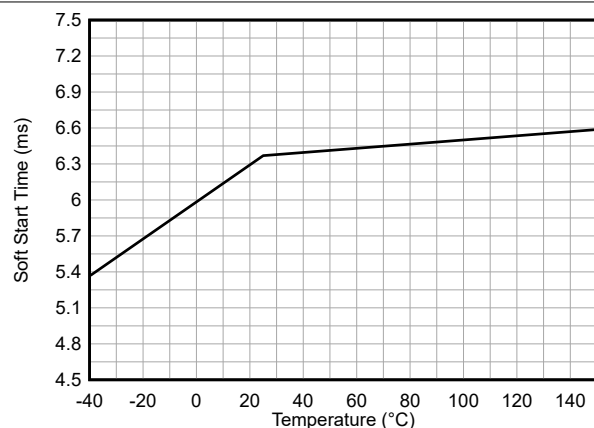


図 6-7. ソフト スタート時間

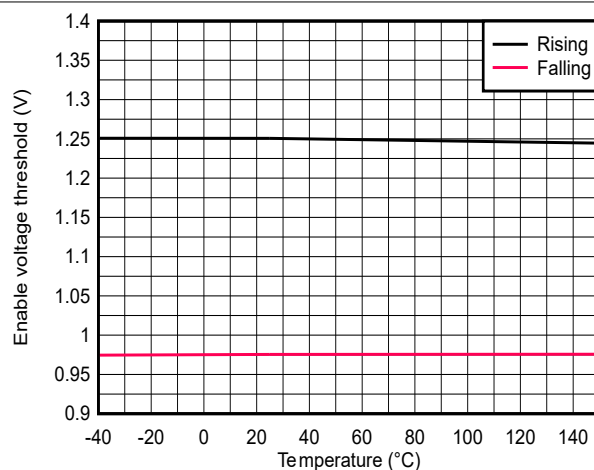


図 6-8. イネーブル スレッシュリッド電圧

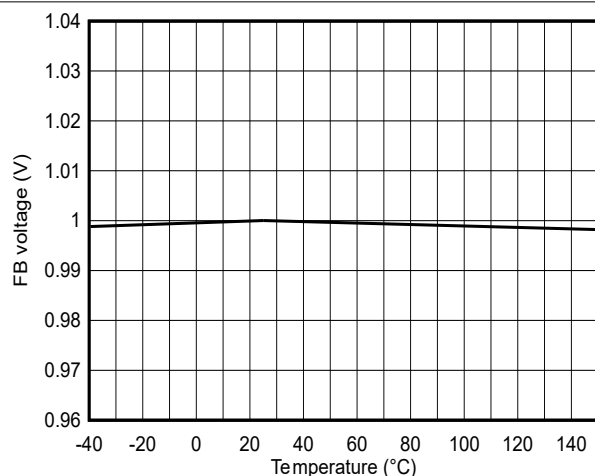


図 6-9. 帰還電圧精度

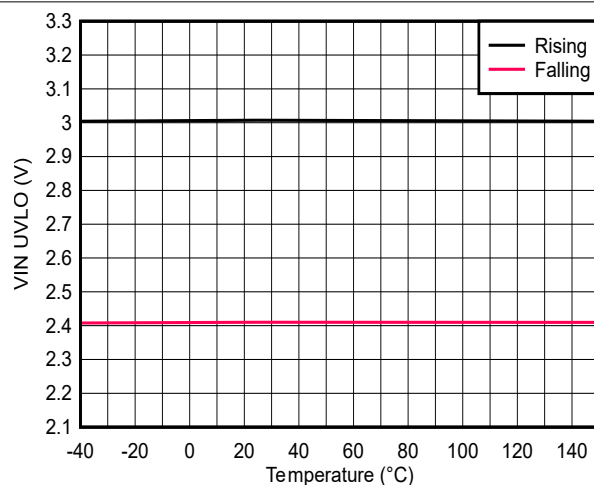


図 6-10. 入力電圧 UVLO - A バリエーション

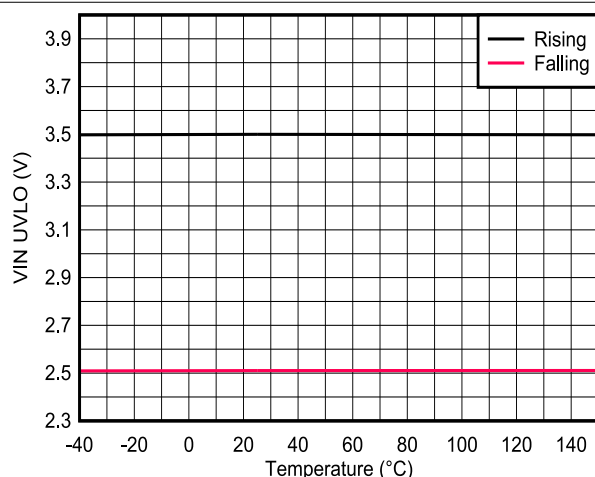


図 6-11. 入力電圧 UVLO - B バリエーション

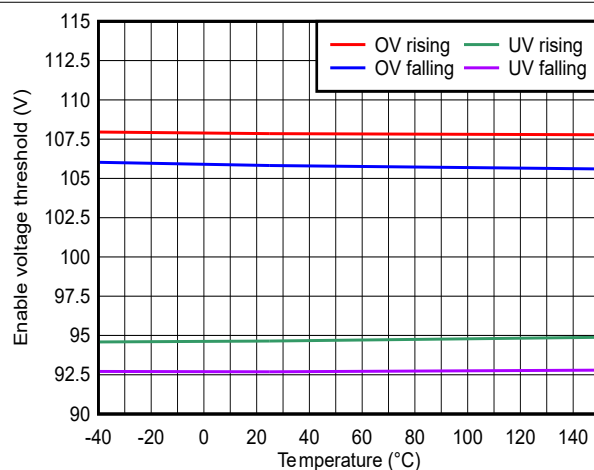


図 6-12. PGOOD スレッシュリッド

7 詳細説明

7.1 概要

LMR60406-Q1 は、高効率の 3V ~ 36V、超低 IQ 同期整流降圧コンバータで、高い電力密度と低 EMI を実現しています。LMR60406-Q1 は、安定した設計のために必要な外付けパッシブ部品を減らすことで、最終製品のコストとサイズを最小限に抑えるように設計されています。要求の厳しい車載用アプリケーション向けの LMR60406-Q1 デバイスは AEC-Q100 認定を受けており、最大接合部温度 150°C までの電気的特性が規定されています。

LMR60406-Q1 は、目的の動作条件に応じて設計の柔軟性を向上させるための以下の主要機能を備えています：

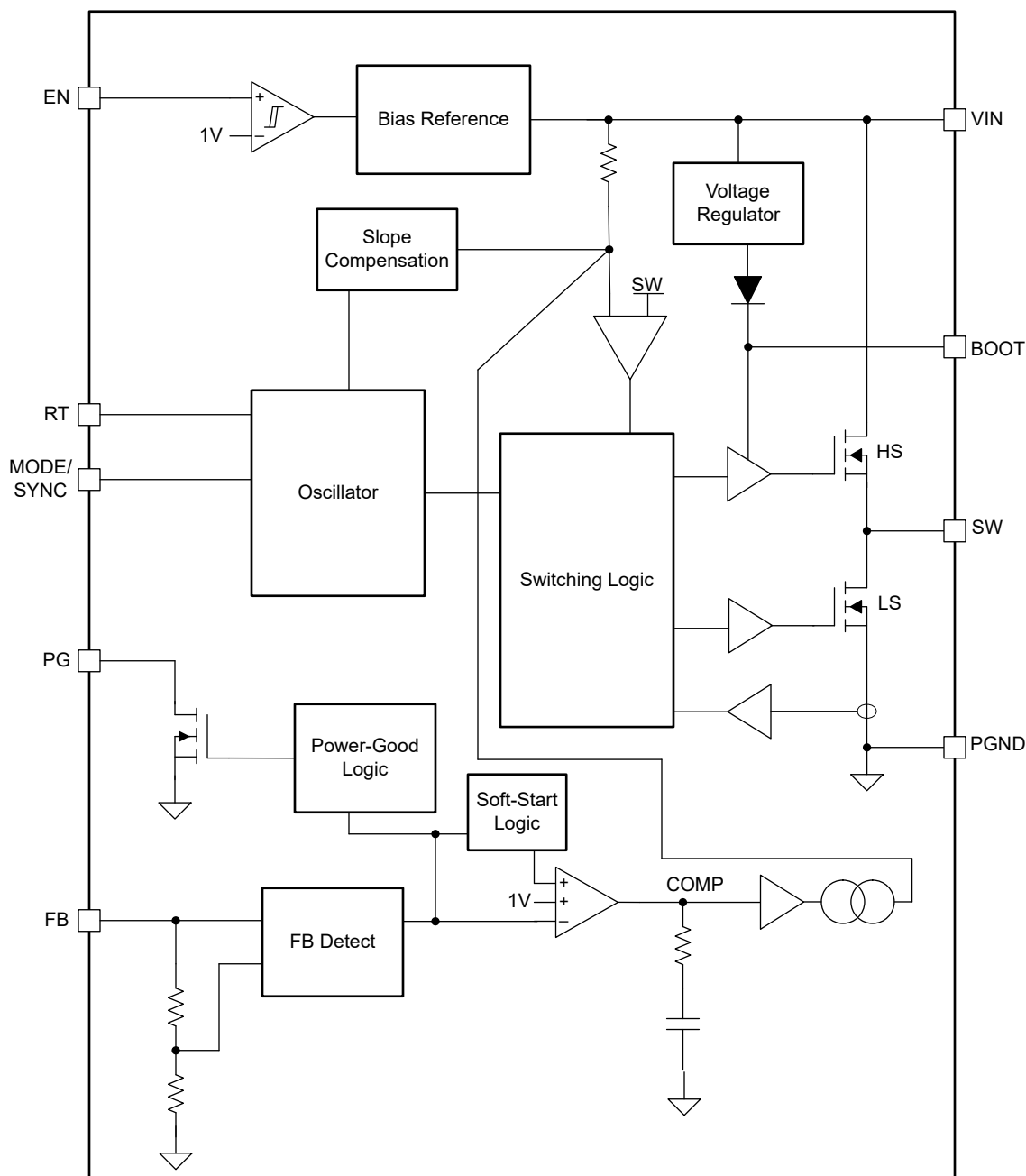
- EN ピンによる高精度イネーブルにより、デバイス電源のオン/オフを正確に行えます
- RT ピンを使用してスイッチング周波数を選択すると、設計者は 200kHz ~ 2.2MHz のスイッチング周波数を選択できます
- MODE/SYNC ピンを使用すると、設計者は動作モードを選択、または外部クロック周波数に同期を行うことができます
- PG ピンを使用すると、外部電圧監視回路なしで、電源シーケンスと、出力電圧のステータス通知を実行できます

各コンバータは、最大 0.6A の出力電流を供給するように設計されたパワー MOSFET を一組内蔵しています。LMR60406-Q1 のすべてのバリエーションには帰還インピーダンス検出回路が組み込まれており、帰還抵抗の有無に応じて、各デバイスを固定出力電圧または可変出力電圧に設定できます。固定出力電圧の設定は、特定の注文可能品番によって決定され、その情報は付録 [セクション 4](#) に記載されています。

LMR60406-Q1 には、要求の厳しいアプリケーションに最適な選択肢となる、いくつかの保護機能が用意されています。帰還ピンには電圧定格が設定されており、固定出力電圧構成であっても、出力がバッテリーに短絡された場合のテストに耐えられるようになっています。デバイスは入力電圧が $V_{IN(OVP(R))}$ を超えると FPWM スwitchングを無効にし、出力電圧が入力電源に短絡した場合に負の電流により入力電圧が過充電されることを防ぎます。サーマル シャットダウンによりスイッチングが無効にされ、LMR60406-Q1 が再起動を試行する前に冷却できます。

電流モード制御アーキテクチャの最小オン時間は 30ns で、高周波数での高い変換比、容易なループ補償、高速過渡応答、優れた負荷およびライン レギュレーションを実現します。これらのコンバータはスペクトラム拡散機能を強化した HotRod™ パッケージも採用しており、低 EMI 性能を実現して、車載およびノイズに敏感な設計の認定取得が容易になります。

7.2 機能ブロック図



7.3 機能説明

7.3.1 イネーブルおよび低電圧誤動作防止

LMR60406-Q1 は高精度のイネーブルおよび低電圧誤動作防止 (UVLO) 機能を備えており、ユーザーは EN ピンに印加される電圧に基づいてデバイスの電源をオン/オフにする電圧レベルを選択できます。デバイスに電力を供給するには、EN ピンと PGND ピンの間の電圧がイネーブル電圧立ち上がりスレッショルド $V_{EN-TH(R)}$ (標準 1.25V) を超えている必要があります。 $V_{EN-TH(R)}$ を超え、最小電源電圧、 $V_{INUVLO(R)}$ の両方が満たされると、デバイスは「[セクション 7.3.2](#)」で説明されているソフトスタートシーケンスを開始します。

EN ピンは、EN ピンと PGND ピン間の電圧をイネーブル入力 Low スレッショルド $V_{EN-TH(F)}$ 1V (標準) より低くすることで、デバイスの電源をオフにするために使用できます。

VIN と PGND の間に抵抗分圧器を配置して、中心点を EN ピンに接続すると、VIN UVLO を実装できます。デバイスがオフなる入力電圧を選択してから、 R_{ENT} の値を選択し、必要な R_{ENB} を計算する必要があります。 R_{ENB} を計算すると、結果として生じるターンオン入力電圧を計算できます。必要な EN 抵抗を判断するには、「図 7-1」、「式 1」および「式 2」を参照してください。VIN UVLO 機能が不要な場合には、EN ピンを VIN に直接接続できます。

$$R_{ENB} = \frac{V_{EN-TH(F)}}{(V_{IN_{turn-off}} - V_{EN-TH(F)})} \times R_{ENT} \quad (1)$$

$$V_{IN_{turn-on}} = \left(1 + \frac{R_{ENT}}{R_{ENB}}\right) \times V_{EN-TH(R)} \quad (2)$$

ここで

- $V_{IN_{turn-off}}$ は LMR60406-Q1 をオフにした入力電圧を表します。
- $V_{IN_{turn-on}}$ は LMR60406-Q1 をオンにした入力電圧を表します。

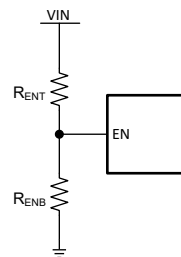


図 7-1. EN ピンを使った VIN UVLO

7.3.2 ソフト スタートとドロップアウトからの回復

LMR60406-Q1 は、起動中の出力電圧のオーバーシュートと大きな突入電流を防止するため、ソフト スタートを採用しています。ソフト スタート時間は内部で固定され、6ms です (標準値)。LMR60406-Q1 デバイスは、起動前に出力に電圧が印加されていても正しく動作します。

LMR60406-Q1 を起動してソフト スタート シーケンスを開始するには、VIN ピンと EN ピンに印加される電圧がそれぞれ $V_{IN_{UVLO(R)}}$ と $V_{EN-TH(R)}$ を超えている必要があります。これらの条件が満たされると、ソフト スタート シーケンスが開始され、出力電圧は 6ms (標準値) で設定点に達します。

ドロップアウトは、入力電圧が出力電圧の設定点の電圧レベルを下回るときに発生します。この条件では、出力電圧は入力電圧に追従します。

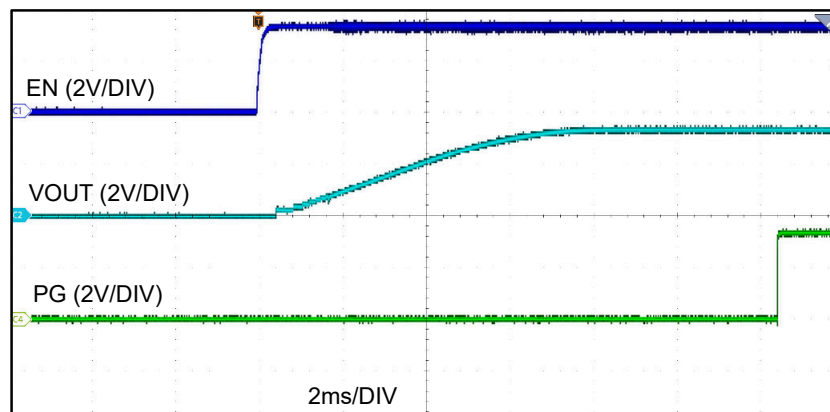


図 7-2. ソフト スタートを有効にする

7.3.3 RT による周波数の選択

RT ピンと PGND の間に配置された抵抗を使って、LMR60406-Q1 の設定点のスイッチング周波数 (通常 200kHz ~ 2.2MHz) を選択します。設定点のスイッチング周波数は、LMR60406-Q1 がスペクトラム拡散を無効化した状態で連続導通モードで動作する場合に発生するスイッチング周波数を表します。スペクトラム拡散がスイッチング周波数に与える影響の詳細については、「[セクション 7.3.9](#)」を参照してください。式 3 を使用して、目的の設定点のスイッチング周波数に対する RT 抵抗値を決定します。

$$RT = \frac{\frac{1}{f_{sw}} - 69.6 \times 10^{-9}}{2.825 \times 10^{-11}} \quad (3)$$

ここで:

- RT: オーム (Ω) による RT 抵抗値を表します。
- f_{sw} : ヘルツ (Hz) による設定点のスイッチング周波数を表します。

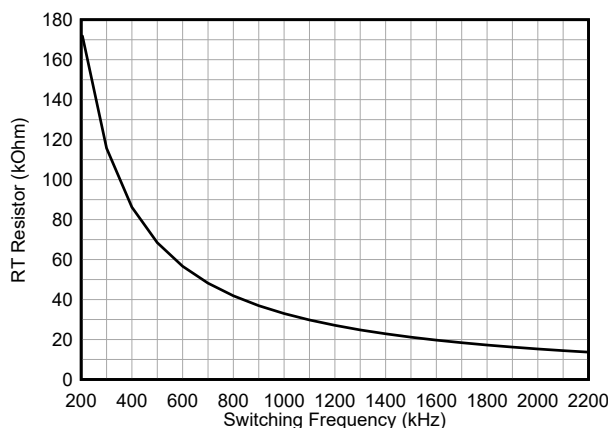


図 7-3. RT の値とスイッチング周波数との関係

7.3.4 MODE/SYNC ピン制御

LMR60406-Q1 の MODE/SYNC ピンは、デバイスの動作モードを選択したり、スイッチング周波数を外部クロック周波数に同期させたりするために使用する入力ピンです。外部クロックがない場合は、RT 抵抗によってスイッチング周波数が決定されます。TI は、MODE/SYNC ピンをフローティングにしないことを推奨します。動作モードの詳細については、「[セクション 7.4](#)」セクションを参照してください。

MODE/SYNC ピンを使用すると、複数の動作モードを必要とするシステムの動作モードを動的に変更できます。次の 3 つの動作モードを選択できます:

- **AUTO モード:** パルス周波数変調 (PFM) 動作は、軽負荷時に有効化され、ダイオード エミュレーションは、インダクタを流れる逆電流を防止します。詳細については、[セクション 7.4.2.2](#) を参照してください。
- **FPWM モード:** FPWM モードでは、ダイオード エミュレーションは無効化され、電流はインダクタを逆方向に流れることができます。これにより、負荷電流が流れなくても最大周波数で動作できます。詳細については、[セクション 7.4.2.3](#) を参照してください。
- **SYNC モード:** 内部クロックは、MODE/SYNC ピンに印加された外部信号にロックします。外部クロック信号の周波数は、RT 抵抗で設定される周波数の 1 倍 ~ 2 倍の範囲内である必要があります。外部クロックのハイレベルは V_{IH_CLK} 以上である必要があり、外部クロックのローレベルは V_{IL_CLK} 以下である必要があります。外部クロックは、[セクション 6.1](#) に示す MODE/SYNC ピンの定格を超えないようにする必要があります。出力電圧が全周波数で制御可能であり、最小オフ時間または最小オン時間によって制限されない限り、クロック周波数は MODE/SYNC ピンに印加された信号の周波数に一致します。本デバイスは、SYNC モードに入っている場合でも、FPWM モードであるかのように動作します (ダイオードエミュレーションが無効化され、無負荷でも、MODE/SYNC ピンに印加された周波数に適合できます)。

動作モードを動的に切り替えるには、有効な信号を MODE/SYNC ピンに印加する必要があります。表 7-1 に、パルス依存モード選択設定の概要を示します。

表 7-1. パルス依存モード選択の設定

MODE/SYNC 入力	モード
V_{IH_FPWM} より大きい	FPWM (工場出荷時にスペクトラム拡散機能を設定)
V_{IL_FPWM} より小さい	自動モード (工場出荷時にスペクトラム拡散機能を設定)
同期クロック	SYNC モード

動作モードを動的に切り替える必要がない場合は、このピンを一定の電圧に保持して固定動作モードにできます。自動モードでは、このピンを PGND に短絡するか、 V_{IL_FPWM} 未満にプルダウンできます。FPWM モードでは、このピンを RT ピンに短絡するか、外部電圧源を使用して V_{IH_FPWM} にプルアップできます。詳しくは、セクション 6.5 を参照してください。

7.3.5 出力電圧の選択

LMR60406-Q1 では、FB ピンに接続された帰還抵抗分圧気の有無に応じて、LMR60406-Q1 の出力電圧を固定または可変に設定できます。固定出力電圧は、注文可能な製品番号に基づいて決定されます。詳細は セクション 4 を参照してください。固定出力電圧が必要な場合、FB ピンを出力電圧レールに直接短絡できます。デバイスが固定出力電圧になるためには、FB ピンと出力電圧レールの間に 25Ω 未満の抵抗が必要です。調整可能な出力電圧が必要な場合、上側と下側の帰還抵抗の並列組み合わせが 1100Ω を超える必要があります。上側の帰還抵抗 R_{FBT} を選択した後、式 4 を使用して下側の帰還抵抗 R_{FBB} を選択できます。

$$R_{FBB} = \frac{V_{FB}}{V_{OUT} - V_{FB}} \times R_{FBT} \quad (4)$$

ここで、 V_{FB} は標準値 1V で、 R_{FBT} については通常 $100k\Omega$ を選択します。

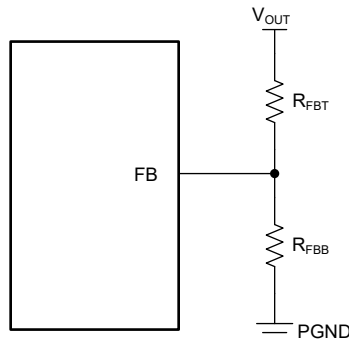


図 7-4. 可変 VOUT 用の帰還抵抗セットアップ

7.3.6 電流制限

LMR60406-Q1 は 2 つの電流制限を使用して、出力に供給される合計負荷電流を制限します。これらの制限値は、ハイサイド ピーク電流制限値 (I_{HS-LIM}) およびローサイド バレー電流制限値 (I_{LS-LIM}) と呼ばれます。インダクタ電流が I_{HS-LIM} に到達すると、ハイサイド MOSFET がオフになり、インダクタ電流が I_{LS-LIM} を下回るまでローサイド MOSFET がオンになります。この動作によりスイッチング周波数が低下する可能性があり、ソフト電流制限とも呼ばれることがあります。インダクタ電流は I_{HS-LIM} と I_{LS-LIM} 間の切り替えに制限されるため、最大出力電流はこれらの 2 つの値の平均値に非常に近い値になります。負荷が最大出力電流より高い電流を要求すると、出力電圧は低下します。出力電圧が低下して FB ピンの電圧が V_{HIC} を下回ると、デバイスはヒカップ モードになります。ヒカップ モードも参照してください。

LMR60406-Q1 におけるハイサイド 電流制限は、デューティ サイクルの変化に応じて変動します。この動作はピーク電流モード制御の特徴であり、高いデューティ サイクル時のサブハーモニック発振を回避するのに役立ちます。標準的なハイサイド電流制限を図 7-5 に示します。

LMR60406-Q1 は、ローサイド MOSFET がシンクできる電流量を制限するための負の電流制限 ($I_{LS-NEG-LIM}$) も実装しています。負の電流制限に達すると、ローサイド MOSFET はオフになります。

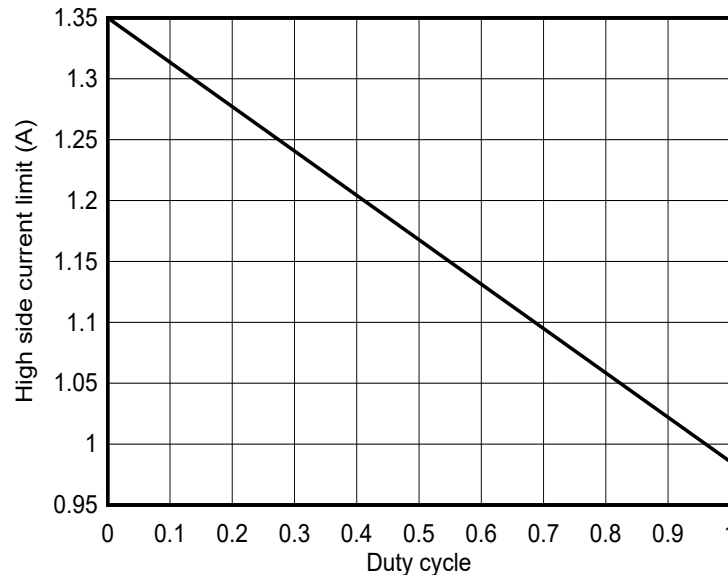


図 7-5. デューティ サイクル D の関数としての典型的なハイ サイド電流制限 I_{HS-LIM}

7.3.7 ヒカップモード

持続的な短絡状態での過度の発熱と電力消費を防ぐために、ヒカップモードが搭載されています。過電流状態が続くと、LMR60406-Q1 デバイスは出力をシャットオフして約 85ms 待機します。その後 LMR60406-Q1 はソフトスタートを有効にして動作を再開します。

LMR60406-Q1 では、次の条件が満たされるとヒカップモード動作に移行します：

- ソフトスタートシーケンスが完了した
- FB ピンの電圧が V_{HIC} を下回った

ヒカップモード動作とは、スイッチングを行わない期間と、出力電圧を所定の設定値まで立ち上げて制御しようとするスイッチング期間が交互に繰り返される動作モードを指します。出力の障害が解消されると、デバイスは通常どおりに起動します。

7.3.8 パワーグッド機能

LMR60406-Q1 のパワーグッド機能は、出力電圧がレギュレーション範囲を外れたときにシステムのマイクロプロセッサをリセットしたり、下流にある部品の電源シーケンスを容易にするために使用できます。この機能は、PG ピンと適切な電圧源との間にプルアップ抵抗を配置することにより実装するオプション機能です。プルアップリファレンス電圧の推奨範囲については、「[推奨動作条件](#)」を参照してください。

パワーグッド出力は、ソフトスタートシーケンスが完了し、入力電圧が $V_{IN(PG-VALID)}$ を上回った後に有効になります。これらの条件が両方とも満たされると、PG と GND の間の電圧は、出力電圧がレギュレーション範囲内であるかどうかを示すようになります。ロジックのハイ信号は出力電圧がレギュレーション範囲内であることを示し、ロジックのロー信号は出力電圧がレギュレーション範囲外であることを示します。出力電圧のスプリアスグリッチが PG ピン出力に影響しないことを確認するための、グリッチ除去フィルタも備えています。

PG ピンは、次の条件でローにプルダウンされます：

- 出力電圧が、少なくとも $t_{PG-DEGLITCH}$ の間、PG の過電圧立ち上がりスレッショルド ($V_{PG-OVP(R)}$) を上回っている
- 出力電圧が、少なくとも $t_{PG-DEGLITCH}$ の間、PG の過電圧立ち下がりスレッショルド ($V_{PG-UV(F)}$) を下回っている

出力のフォルト条件に続いて PG ピンがローにプルダウンされると、PG ピンの電圧は少なくとも $t_{PG-DEASSERT}$ または約 2ms (代表値) の間、ローを維持する必要があります。 $t_{PG-DEASSERT}$ が経過した後、PG ピン電圧がプルアップされるためには、次のいずれかの条件を満たす必要があります:

- 低電圧障害からの回復を前提とすると、出力電圧を PG 低電圧立ち上がりスレッショルド ($V_{PG-UV(R)}$) より高くし、少なくとも $t_{PG-DEGLITCH}$ の間、過電圧立ち上がりスレッショルド ($V_{PG-OVP(R)}$) を下回ったままにする必要があります。
- 低電圧障害からの回復を前提とすると、出力電圧を PG 過電圧立ち下がりスレッショルド ($V_{PG-OVP(F)}$) より高くし、少なくとも $t_{PG-DEGLITCH}$ の間、低電圧立ち下がりスレッショルドを上回ったままにする必要があります。

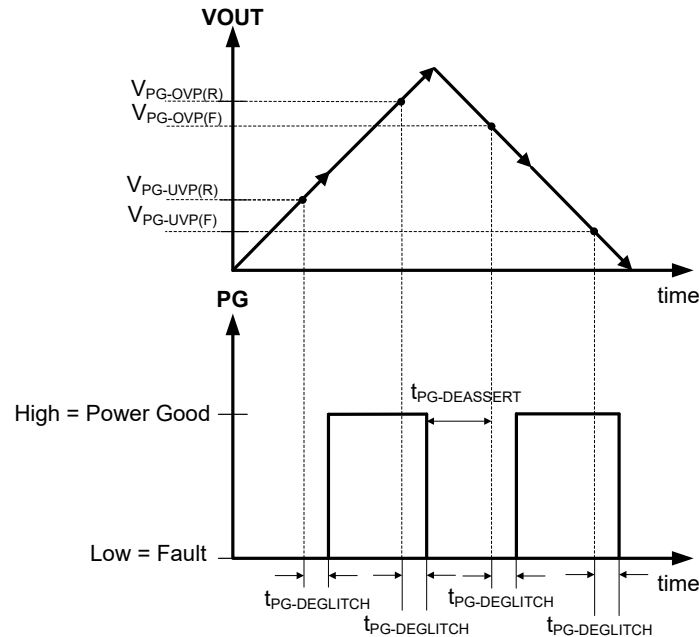


図 7-6. パワー グッド スレッショルド

7.3.9 スペクトラム拡散

スペクトラム拡散の目的は、固定周波数で動作する範囲より広範囲に放射を拡散することで、特定の周波数でのピーク放射を低減することです。LMR60406-Q1 デバイスが含まれるほとんどのシステムでは、スイッチング周波数の最初の数個の高調波からの低い周波数の伝導エミッションは、簡単にフィルタで除去できます。LMR60406-Q1 は、RT 抵抗により確立される設定点のスイッチング周波数より 18% 高いスイッチング周波数を拡散します。このアクションは、RT 抵抗によって確立される設定点のスイッチング周波数が、デバイスがスペクトラム拡散で動作しているときのスイッチング周波数の下限を表すことを意味します。

以下の条件はスペクトラム拡散に優先し、スペクトラム拡散はオフになります:

- MODE/SYNC 端子に外部クロックが印加されます。
- 低入力電圧での動作によりクロックが遅くなります。この状態をドロップアウト動作と呼びます。
- 高い入力電圧のため、クロックが遅くなっています。ハイサイドスイッチのオン時間が t_{ON-MIN} に近づいています。
- 自動モードでの軽負荷時にはクロックが遅くなります。この状態は、デバイスが PFM モードに切り替わったときに発生します。FPWM モードでは、無負荷でもスペクトラム拡散は作動します。

7.4 デバイスの機能モード

7.4.1 シャットダウン

LMR60406-Q1 デバイスは、以下のいずれかの条件下で、スイッチ ノードに接続されているほとんどの内部回路、およびハイサイドとローサイドの両方のパワー スwitch をシャットダウンします:

1. EN が $V_{EN-TH(R)}$ を下回る
2. VIN が $V_{INUVLO(R)}$ を下回る
3. 接合部温度が T_{SD} を超える

上記の条件にはヒステリシスがあることに注意してください。PG は非常に低い入力電圧 $V_{IN(PG-VALID)}$ でも動作し続けます。さらに、EN から PGND 間の電圧が $V_{EN-TH(F)}$ 未満に引き下げられ、かつ入力電圧が $V_{INUVLO(R)}$ を上回っている場合、SW から PGND 間に約 $8k\Omega$ (代表値) の抵抗が接続され、出力コンデンサが放電されます。

7.4.2 アクティブモード

EN ピンの電圧が $V_{EN-TH(R)}$ を上回り、入力電圧が $V_{INUVLO(R)}$ を超えていて、その他のフォルト条件が存在しない場合は常に、LMR60406-Q1 はアクティブモードです。LMR60406-Q1 を有効にする最も簡単な方法は、EN ピンを VIN に接続することです。これにより、印加された入力電圧が $V_{INUVLO(R)}$ を超えると自動的に起動できます。

アクティブモードでは、LMR60406-Q1 は次のいずれかのモードになります：

- 連続導通モード (CCM)。負荷電流がインダクタリップル電流の 1/2 より大きいときには、固定周波数の連続導通モードになります
- 自動モード - 軽負荷動作：パルス周波数変調 (PFM) です。軽負荷時にスイッチング周波数が低下します
- FPWM モード - 軽負荷動作：CCM モード。負荷電流がインダクタリップル電流の 1/2 未満である場合
- 最小オン時間：入力電圧が高くかつ出力電圧が低い場合に、レギュレーションを維持するため、スイッチング周波数が低下します
- ドロップアウトモード：スイッチング周波数が低下して、入出力間の電圧ドロップアウトを最小限に抑えます

7.4.2.1 連続導通モード (CCM)

CCM では、LMR60406-Q1 は、各種デューティサイクル (D) で内蔵ハイサイド (HS) およびローサイド (LS) スイッチをオンにすることで、出力電圧のレギュレーションを実現します。HS スイッチのオン時間の間、SW ピンの電圧 (V_{SW}) は V_{IN} の付近までスイングし、インダクタ電流 (i_L) は線形的な傾きで増加します。HS スイッチは、制御ロジックによってオフにされます。HS スイッチのオフ時間 (t_{OFF}) の間、LS スイッチはオンにされます。インダクタ電流は LS スイッチを通して放電され、LS スイッチの両端の電圧降下によって V_{SW} をグラウンドの下まで強制的にスイングさせます。一定の出力電圧を維持するため、コンバータループはデューティサイクルを調整します。D は、HS スイッチのオン時間をスイッチング周期で割った値として次のように定義されます。

$$D = \frac{T_{ON}}{T_{SW}} \quad (5)$$

損失が無視される理想的な降圧コンバータでは、次のように D は出力電圧に比例し、入力電圧に反比例します。

$$D = \frac{V_{OUT}}{V_{IN}} \quad (6)$$

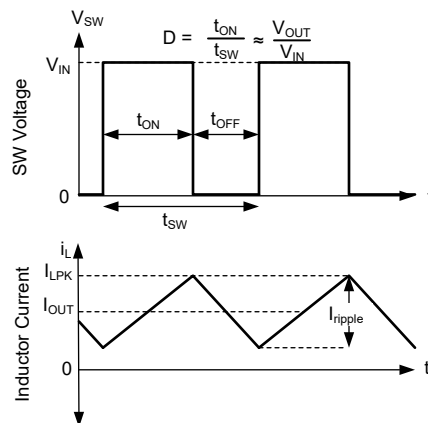


図 7-7. 連続モード (CCM) における SW 電圧とインダクタ電流の波形

7.4.2.2 自動モード オペレーション - 軽負荷動作時

MODE/SYNC 電圧が $V_{IL(MODE/SYNC)}$ を下回る場合、インダクタの逆電流は許可されません。この機能をダイオード エミュレーション (DEM) と呼びます。DEM は負荷電流がインダクタリップル電流の 1/2 未満のときに発生します。インダクタ電流がゼロクロス電流制限値を下回ると、LS FET がオフになり、インダクタ電流は LS FET のボディダイオードを流れます。入力電圧を一定にした状態で、電流値が下がると、オン時間は一定になります。その後、周波数を調整することで、レギュレーションが達成されます。この動作モードをパルス周波数変調 (PFM) モードレギュレーションと呼びます。

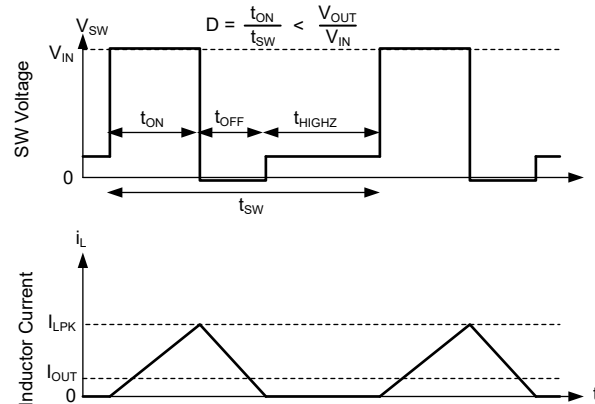


図 7-8. PFM 動作

PFM 動作では、負荷不足により出力コンデンサが過充電されるため、出力電圧に小さな正の DC オフセットが観測される場合があります。 V_{OUT} におけるこの DC オフセットを許容できない場合、 V_{OUT} に接続したダミー負荷または FPWM モードを使うことで、このオフセットを低減または除去できます。このオフセットは通常、高負荷時にデバイスがレギュレートする V_{OUT} の 1% を超えません。

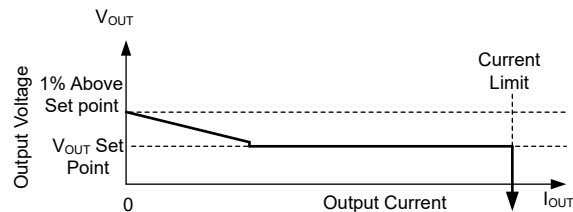


図 7-9. 定常状態の出力電圧と自動モードの出力電流との関係

7.4.2.3 FPWM 動作 - 軽負荷動作

強制パルス幅変調 (FPWM) モードでは、軽負荷時に周波数が維持されます。周波数を維持するため、インダクタを流れる逆電流が制限されます。逆電流制限回路により、逆電流が制限されます。[セクション 6.5](#) も参照してください。

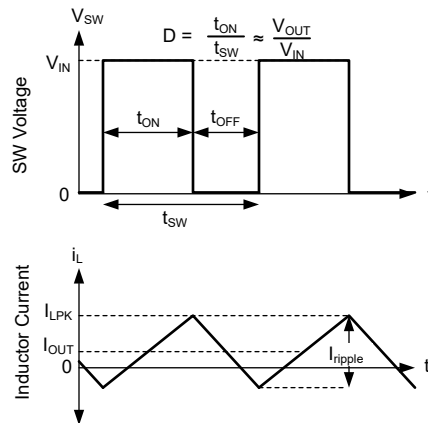


図 7-10. FPWM モード動作

FPWM モードは、次のいずれかの方法で実現できます：

- MODE/SYNC を RT ピンに直接接続する。
- MODE/SYNC と PGND の間に $V_{IH(MODE/SYNC)}$ より大きい外部電圧を印加する。
- 適切な外部クロック信号を印加する。セクション 7.3.4 を参照してください。

最小オン時間または最小オフ時間を超える可能性のある動作条件下では、FPWM の動作中でも周波数が低下し、最小タイミング仕様を維持します。また、入力電圧が $V_{IN(OVP(R))}$ を超える場合、LMR60406-Q1 はインダクタに負の電流が流れるのを防ぎます。LMR60406-Q1 は PFM スイッチングを実装しています。入力電圧が $V_{IN(OVP(F))}$ を下回ると、デバイスは再度 FPWM で動作し、負のインダクタ電流を許容します。

7.4.2.4 最小オン時間

最小オン時間とは、ハイサイド MOSFET をオンにできる最小時間を意味しています。出力電圧に対する入力電圧の比が要求するオン時間が、与えられたクロック設定のチップの最小オン時間 t_{ON-MIN} より短い場合でも、LMR60406-Q1 は出力電圧をレギュレートします。これを実現するため、LMR60406-Q1 では、スイッチング周波数をフォールドバックすることにより、オン時間 t_{ON-MIN} を維持しながら同じ入出力電圧比をサポートしています。LMR60406-Q1 は最小オン時間 30ns (標準値) をサポートしています。式 7 J を使用して、特定の動作条件におけるオン時間を推定します。

$$t_{ON} = \frac{V_{OUT}}{V_{IN} \times f_{SW}} \quad (7)$$

ここで：

- t_{ON} = ハイサイド MOSFET オン時間
- V_{OUT} = 出力電圧
- V_{IN} = 入力電圧
- f_{SW} = スwitchング周波数

7.4.2.5 ドロップアウト

ドロップアウト動作とは、入力電圧が希望する出力電圧に近づいたときに発生し、必要なデューティサイクルを達成するためにスイッチング周波数を低下させる必要があるような入力対出力電圧比として定義されます。ドロップアウト動作では、デューティサイクルは所定のクロック周波数に対する最小オフ時間によって制限されます。図 7-11 はドロップアウト時のスイッチ ノード電圧およびインダクタ電流の波形を示しています。ドロップアウト動作中、LMR60406-Q1 は必要なピーク インダクタ電流が達成されるまで、クロック サイクルの終了を超えてハイサイド スイッチのオン時間を延長します。必要なピーク インダクタ電流に達すると、または設定済みの最大オン時間 (10μs) が経過すると、クロックは新しいサイクルを開始できます。その結果、最小オフ時間の存在に起因して、選択されたクロック周波数において必要なデューティサイクルが達成できない場合、レギュレーションを維持するために周波数が低下します。図 7-12 に示すように、 t_{ON-MAX} のオン時間を使っても出力電圧をレギュレートできないほど入力電圧が低い場合、出力電圧は入力電圧よりもわずかに (V_{DROP}) 低

い値に下がります。 V_{DROP} の大きさは、内部 MOSFET 間の抵抗性損失、インダクタの直列抵抗、プリント基板抵抗に依存します。入力電圧が出力電圧の設定点を超えた後、[セクション 7.3.2](#) で説明されているように、ソフトスタート中であるかのように出力電圧が上昇します。

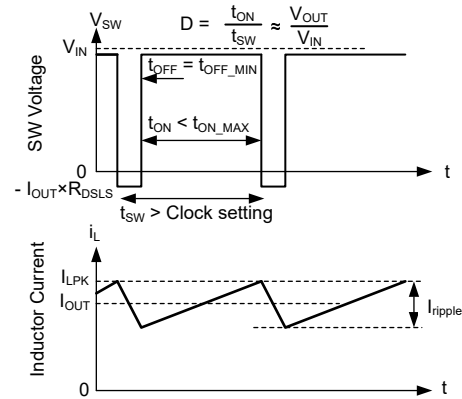


図 7-11. ドロップアウト波形

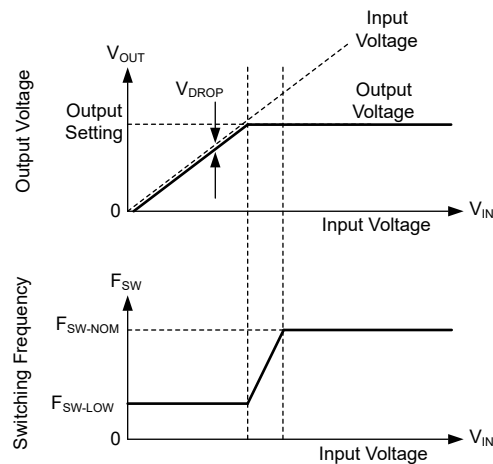


図 7-12. ドロップアウト時の周波数と出力電圧

8 アプリケーションと実装

注

以下のアプリケーション情報は、テキサス・インスツルメンツの製品仕様に含まれるものではなく、テキサス・インスツルメンツはその正確性も完全性も保証いたしません。個々の目的に対する製品の適合性については、お客様の責任で判断していただくことになります。また、お客様は自身の設計実装を検証しテストすることで、システムの機能を確認する必要があります。

8.1 使用上の注意

LMR60406-Q1 は降圧 DC/DC コンバータで、0.6A の最大出力電流で、高い DC 電圧を低い DC 電圧に変換するために使われることが一般的です。LMR60406-Q1 の部品を選択する際には、次の設計手順を使用します。回路図の参考としては [図 8-1](#) を参照します。部品選定の参考としては [表 8-2](#) を参照します。

8.2 代表的なアプリケーション

[図 8-1](#) に、LMR60406-Q1 の代表的なアプリケーション回路を示します。本デバイスは、幅広い外付け部品とシステムパラメータで機能するように設計されています。クイック スタート ガイドとして、[表 8-2](#) に最も一般的な動作条件に対する代表的な部品値を示しています。

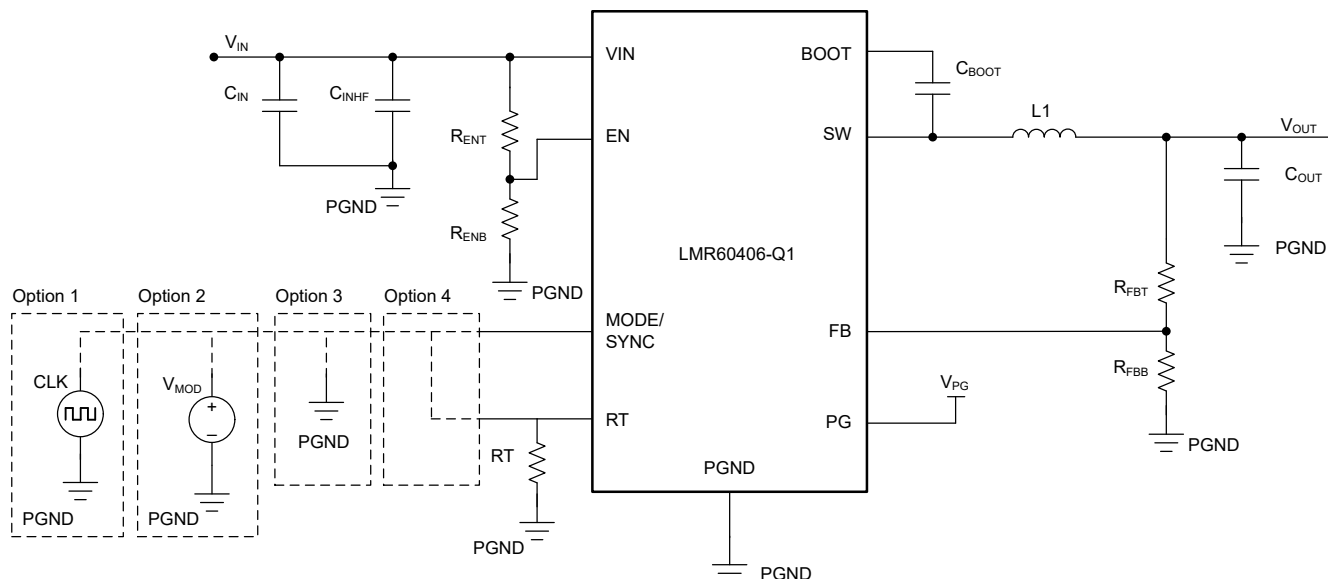


図 8-1. LMR60406-Q1 のリファレンス回路図

表 8-1. MODE/SYNC ピンのオプションの説明

オプション 1	外部クロックと同期するには、MODE/SYNC ピンをクロックから直接駆動します。
オプション 2	MODE/SYNC で適切な電圧 V_{MOD} を使うことで、自動モードと FPWM モードを動的に切り替えることができます。
オプション 3	デバイスを自動モードで実行するには、MODE/SYNC を接地します。
オプション 4	デバイスを FPWM モードで実行するには、MODE/SYNC を RT に接続します。

[MODE/SYNC ピン制御](#) も参照してください。

表 8-2. 推奨パッシブ部品

F _{SW} (kHz)	V _{OUT} (V)	I _{OUT} (A)	L (μH)	C _{OUT} ⁽¹⁾	RFBT (kΩ)	RFBB (kΩ)	C _{IN} (μF)	C _{BOOT} (nF)	RT (kΩ)
400	3.3	0.6	47	32	SHUNT	DNP	4.7	100	86.6
400	5	0.6	47	32	SHUNT	DNP	4.7	100	86.6
1000	3.3	0.6	22	22	SHUNT	DNP	4.7	100	33.2
1000	5	0.6	22	22	SHUNT	DNP	4.7	100	33.2
2000	3.3	0.6	10	14	SHUNT	DNP	4.7	100	15.4
2000	5	0.6	10	14	SHUNT	DNP	4.7	100	15.4

(1) 定格静電容量。

8.2.1 設計要件

この設計例では、表 8-3 に記載されているパラメータを入力パラメータとして使用します。

表 8-3. 設計パラメータ

設計パラメータ	値	備考
入力電圧範囲	12V (標準値)、4V ~ 36V	このコンバータは最大 36V で連続して動作します
出力電圧	5V	使用される固定オプション
出力電流範囲	0.6A まで無負荷	
スイッチング周波数	2MHz	
軽負荷時のモード	切り替え可能	
スペクトラム拡散	イネーブル	工場オプション

8.2.2 詳細な設計手順

8.2.2.1 スwitchング周波数の選択

スイッチング周波数の選択は、変換効率と設計全体のサイズとのトレードオフとなります。スイッチング周波数を低くすると、スイッチング損失は減少し、一般的にシステム効率が高くなります。一方、スイッチング周波数を高くすると、より小型のインダクタと出力コンデンサを使用できるようになるため、よりコンパクトな設計が可能となります。この例では、2MHz を使用します。RT 抵抗の選択肢の詳細については、「[セクション 7.3.3](#)」を参照してください。

8.2.2.2 インダクタの選択

インダクタを選択するためのパラメータはインダクタンスと飽和電流です。目的のピーク ツー ピーク インダクタリップル電流がデバイスの最大出力電流定格の 20%~40% の範囲に収まるように、インダクタを選択します。このデバイスで利用可能な最大電流よりも最大負荷電流の方がはるかに小さいアプリケーションの場合でも、リップル電流を選択する際はデバイスの最大電流を使用してください。インダクタンスの値を決定するには、式 8 を使用します。定数 K はインダクタ電流リップルのパーセンテージです。この例では、K = 0.25 を選択して、L = 9.72μH のインダクタンスを求めます。標準値である 10μH を選択します。

$$L = \frac{(V_{IN} - V_{OUT})}{f_{SW} \times K \times I_{OUTmax}} \times \frac{V_{OUT}}{V_{IN}} \quad (8)$$

理想的には、インダクタの飽和電流定格は、ハイサイド スwitch の電流制限値 I_{HS-LIM} 以上にする必要があります ([セクション 6.5](#) を参照)。この大きさであれば、出力の短絡時にもインダクタが飽和しないようになります。インダクタのコア材が飽和すると、インダクタンスは非常に小さい値に低下し、インダクタ電流は急増します。バレー電流制限値 I_{LS-LIM} は、電流が暴走しづらいように設計されているとはいえ、インダクタが飽和することで電流値が急増する可能性があります。この動作は部品の損傷につながる可能性があります。したがって、インダクタを飽和させないようにしてください。フェライト コア材を採用したインダクタは飽和特性が非常に急峻ですが、コア損失は通常、圧粉コアよりも小さいです。圧粉コアは穏やかな飽和特性を示すため、インダクタの電流定格をある程度緩和できます。ただし、圧粉コアは約 1MHz を超える周波数でコア損失が大きくなります。いずれにしても、インダクタの飽和電流が、全負荷時のピーク インダクタ電流の最大値よりも小さくならないようにする必要があります。

分数調波発振を回避するための最小インダクタンス値は、式 9 を使用して求められます：

$$L_{\min} = M \times \frac{V_{\text{OUT}}}{f_{\text{sw}}} \quad (9)$$

ここで：

- $M = 1.35$

式 9 では分数調波の不安定性を回避するために必要な理論的最小インダクタンスが定義されていますが、TI では計算された最小値の「2 倍」以上のインダクタ値を選択することを強く推奨しています。この選択により、部品の許容差、温度変化、過渡応答の要件を考慮して、設計マージンを増やすことができます。

8.2.2.3 出力コンデンサの選択

LMR60406-Q1 デバイスは、電流モード制御方式により、広い範囲のインダクタと出力容量を組み合わせで動作できます。出力容量は動作中に目的の出力電圧を維持する役割を果たします。出力容量は、以下のような主要な性能要因に影響を与えます：

- 定常状態動作中の出力電圧リップルの量
- 負荷過渡が発生したときの出力電圧のオーバーシュートおよびアンダーシュート
- ループ安定性

定常状態での動作中、インダクタは負荷に三角波電流を供給します。この三角波電流の AC 部分は出力要領によってフィルタリングされ、DC 部分は負荷まで通過します。出力容量を流れる AC 電流と、この容量の等価直列抵抗 (ESR) は、どちらも出力電圧リップルに寄与します。以下の式を使用して、所定の出力容量に対して必要なピーク ツー ピークの出力電圧リップル量を見積もることができます：

$$V_{\text{ripple}} \approx \Delta I_L \times \sqrt{\text{ESR}^2 + \frac{1}{(8 \times f_{\text{sw}} \times C_{\text{OUT}})^2}} \quad (10)$$

ここで、

- ΔI_L = ピーク ツー ピークのインダクタ電流

3.3V および 5V 出力電圧に対する標準的な出力コンデンサ値については、表 8-2 を参照してください。この例では、は、1 個の 10 μ F 積層セラミック コンデンサ、および 1 個の 4.7 μ F 積層セラミック コンデンサが使用されています。他の出力電圧やスイッチング周波数の設計については、出力コンデンサの値を選定する際の出発点として WEBENCH を利用できます。

実際には、過渡応答とループ位相マージンに最も影響を与えるのは出力コンデンサです。負荷過渡テストおよびボード線図は、特定の設計を検証する最善の方法であり、アプリケーションを量産に移行する前に必ず完了する必要があります。必要な出力容量に加えて、出力に小さなセラミックコンデンサを配置すると、高周波ノイズの低減に役立ちます。小さいケース サイズで 1nF~100nF の範囲のセラミック コンデンサは、インダクタや基板の寄生成分に起因する出力のスパイクを低減するのに非常に役立ちます。

ほとんどのセラミック コンデンサの実効的な容量は、表示されたそのコンデンサの定格値よりもはるかに小さい値です。選択されたすべてのコンデンサの初期精度、温度ディレーティング、電圧ディレーティングを必ず確認します。表 8-2 は、車載グレードの 16V、X7R コンデンサの代表的なディレーティングを仮定して作成されています。より低い電圧定格、非車載グレード、またはより低い温度定格のコンデンサを使用する場合、表に記載されている数よりも多くのコンデンサが必要になる可能性があります。

8.2.2.4 入力コンデンサの選択

入力コンデンサは 2 つの重要な機能を果たします。1 つ目は、LMR60406-Q1 と、システムの入力フィルタへの入力電圧リップルを低減することです。2 つ目は高周波ノイズを低減することです。これら 2 つの機能は、別々のコンデンサを使用することで最も効果的に実装されます。表 8-4 を参照してください。

表 8-4. 入力コンデンサ

コンデンサ	推奨値	備考
C_{IN_HF}	0.1 μ F	このコンデンサはスイッチング時に発生する高周波ノイズを抑制するために使用します。コンデンサは、設計ルールが許す限り LMR60406-Q1 デバイスの近くに配置します。正確な容量よりも位置のほうが重要です。高周波がシステムに伝搬した後は、抑制またはフィルタリングが困難になる場合があります。このコンデンサは、バッテリーから直接動作するシステムではバッテリー電圧にさらされるため、テキサス・インスツルメンツでは 50V 以上の定格を推奨しています。
C_{IN}	4.7 μ F	この容量は、出力負荷の過渡に起因する入力リップルと過渡を抑制するために使用します。 C_{IN} が小さすぎると、システムが低電圧条件下で動作している場合に、負荷過渡時に入力電圧が低下してシステムがリセットされる可能性があります。テキサス・インスツルメンツでは、 LMR60406-Q1 デバイスの近くでは 4.7 μ F を推奨しています。このコンデンサは、バッテリーから直接動作するシステムではバッテリー電圧にさらされるため、テキサス・インスツルメンツでは 50V 以上の定格を推奨しています。

「表 8-4」に示される C_{IN_HF} および C_{IN} の値は、ほとんどのアプリケーションで使用できます。特定の入力電圧リップルが必要な場合は、式 11 を使用して必要な入力容量を計算してください。

$$C_{IN} \geq \frac{D \times (1 - D) \times I_{OUT}}{\Delta V_{IN_PP} \times f_{sw}} \quad (11)$$

ここで:

- D = デューティ サイクル = V_{OUT}/V_{IN}
- I_{OUT} = DC 出力電流
- ΔV_{IN_PP} = ピークツーピーク入力電圧リップル
- f_{sw} = スwitchング周波数

式 12 を使用して、選択した入力コンデンサの RMS 電流定格を比較し、入力コンデンサが入力スイッチング電流を供給できることを確認します。

$$I_{IN_RMS_max} = I_{OUT} \times \sqrt{D \times (1 - D) + \frac{1}{12} \times \left(\frac{V_{OUT}}{L \times f_{sw} \times I_{OUT}} \right)^2 \times (1 - D)^2 \times D} \quad (12)$$

8.2.2.5 ブートストラップ コンデンサ (CBOOT) の選定

ブートストラップ コンデンサ (C_{BOOT}) は、BOOT ピンと SW ピンの間に接続され、ハイサイド MOSFET のゲート電荷を供給します。このコンデンサは、設計ルールが許す限り **LMR60406-Q1** の近くに配置します。テキサス・インスツルメンツでは、10V 以上の 100nF 高品質セラミック コンデンサを推奨しています。

8.2.2.6 可変バージョン用の FB 電圧デバイダ

LMR60406-Q1 デバイスは、固定出力電圧モードまたは可変出力電圧モードで動作するように構成できます。デバイスの注文可能部品番号で指定された固定出力電圧の場合、出力電圧レールを FB ピンに直接接続するだけです。他の出力電圧が必要な場合は、出力電圧レールとグラウンドの間に FB ピンを中心点とする分圧抵抗により出力を設定します。次の式 13 を使用して、特定の帰還分圧器で指定する出力電圧を計算します。

$$V_{OUT} = V_{FB} \times \left(1 + \frac{R_{FBT}}{R_{FBB}} \right) \quad (13)$$

または、出力電圧と R_{FBT} が既にわかっている場合は、式 14 を使用して R_{FBB} の値を計算します。

$$R_{FBB} = R_{FBT} \times \frac{V_{FB}}{V_{OUT} - V_{FB}} \quad (14)$$

通常、 R_{FBT} には 100k Ω が使用されることに注意してください。

8.2.2.6.1 フィードフォワード コンデンサ (CFF) の選択

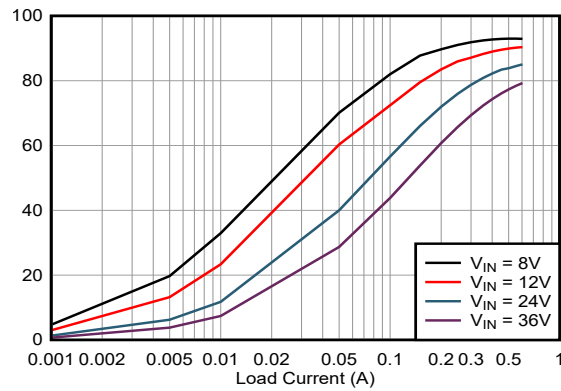
調整可能な出力電圧構成が必要な場合は、フィードフォワード コンデンサ (CFF) を R_{FBT} と並列に配置して、過渡性能とループ位相マージンを改善できます。『[内部的に補正される、フィードフォワード コンデンサを持つ DC/DC コンバータの過渡応答の最適化](#)』アプリケーション レポートは、フィードフォワード コンデンサの実験に役立ちます。

8.2.2.7 R_{PU} - PGOOD プルアップ抵抗

PGOOD ピンは監視ピンとして使用するオープンドレイン出力です。必要に応じて、 $100k\Omega$ の抵抗を使用して適切な電源電圧にプルアップすることができます。PGOOD ピンの推奨プルアップ電圧範囲については、「[セクション 6.3](#)」を参照してください。消費電力などの他の考慮事項のために、上記の値を増加させる可能性があります。

8.2.3 アプリケーション曲線

以下の特性は、図 8-1 に示す回路に適用されます。これらのパラメータはテスト済みではありません。代表的な性能のみを表しています。特に記述のない限り、次の条件が適用されます。 $V_{IN} = 12V$ 、 $T_A = 25^\circ C$ 。

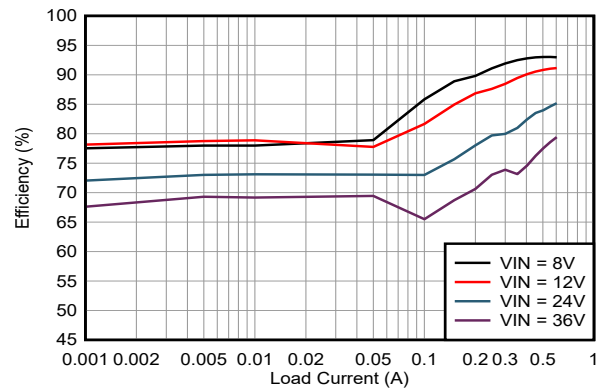


デバイスの種類 = 5V 出力
0.6A

モード = FPWM

$F_{sw} = 2MHz$

図 8-2. 効率

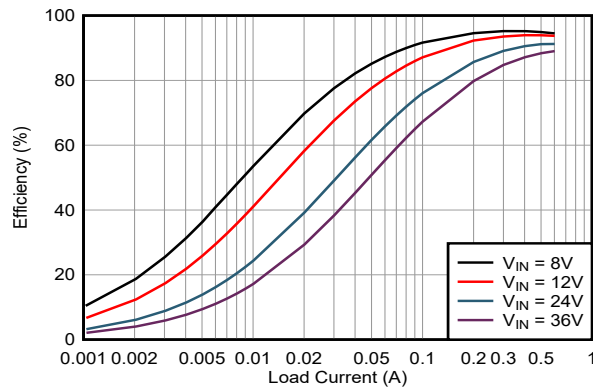


デバイスの種類 = 5V 出力
0.6A

モード = 自動

$F_{sw} = 2MHz$

図 8-3. 効率

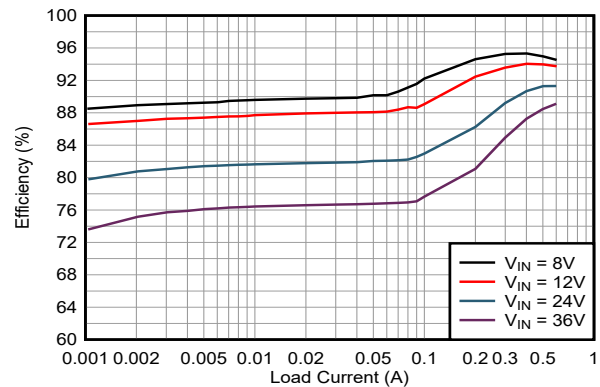


デバイスの種類 = 5V 出力
0.6A

モード = FPWM

$F_{sw} = 400kHz$

図 8-4. 効率

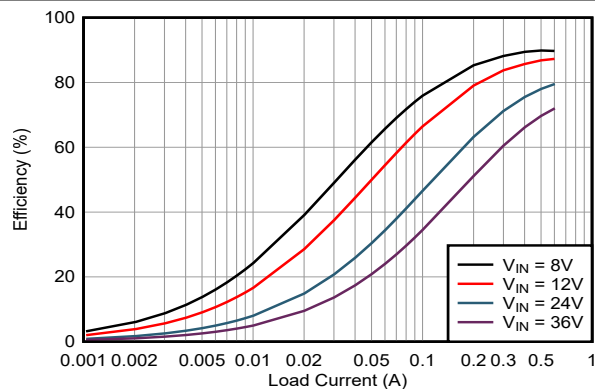


デバイスの種類 = 5V 出力
0.6A

モード = 自動

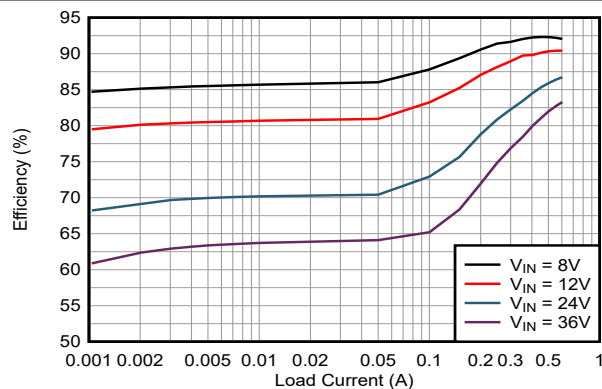
$F_{sw} = 400kHz$

図 8-5. 効率



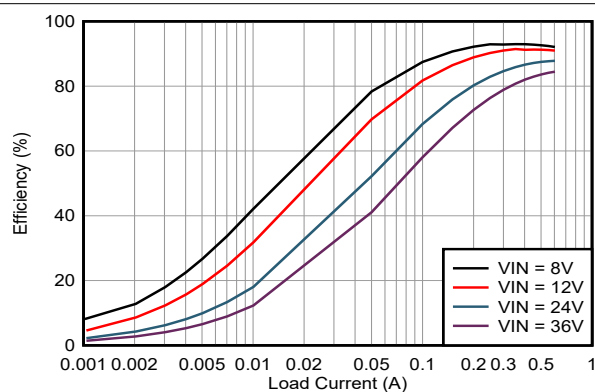
デバイスの種類 = 3.3V 出力 モード = FPWM
0.6A
 $F_{sw} = 2\text{MHz}$

図 8-6. 効率



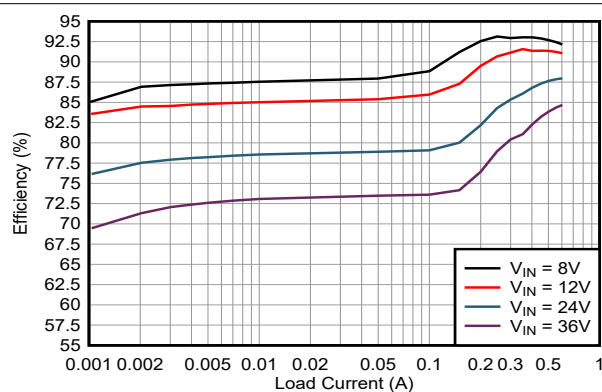
デバイスの種類 = 3.3V 出力 モード = 自動
0.6A
 $F_{sw} = 2\text{MHz}$

図 8-7. 効率



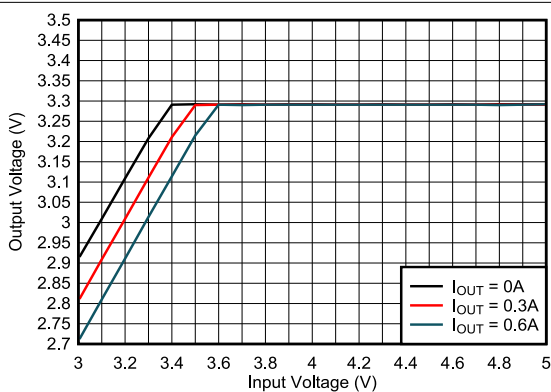
デバイスの種類 = 3.3V 出力 モード = FPWM
0.6A
 $F_{sw} = 400\text{kHz}$

図 8-8. 効率



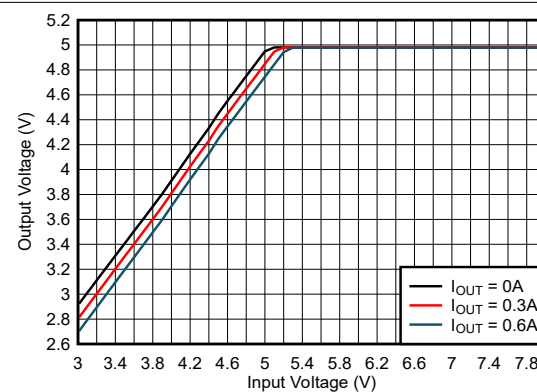
デバイスの種類 = 3.3V 出力 モード = 自動
0.6A
 $F_{sw} = 400\text{kHz}$

図 8-9. 効率



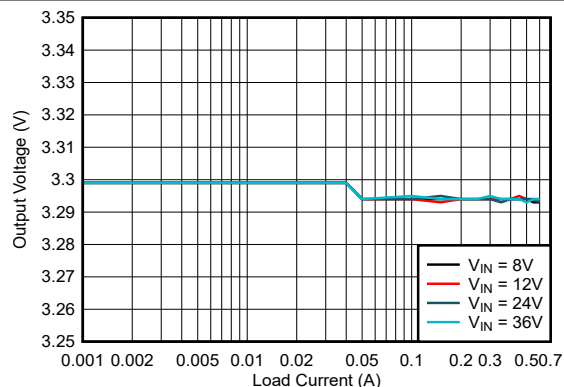
デバイスの種類 = 3.3V 出力 モード = FPWM
0.6A
 $F_{sw} = 2\text{MHz}$

図 8-10. ドロップアウト電圧



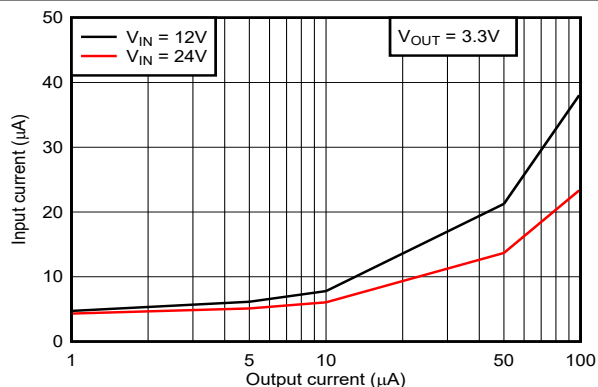
デバイスの種類 = 5V 出力 モード = FPWM
0.6A
 $F_{sw} = 2\text{MHz}$

図 8-11. ドロップアウト



デバイスの種類 = 3.3V 出力 モード = FPWM
0.6A
 $F_{sw} = 2\text{MHz}$

図 8-12. ロードレギュレーション



3.3V 固定出力 $F_{sw} = 2\text{MHz}$ モード = AUTO

図 8-13. 軽負荷時における入力電流と負荷電流との関係

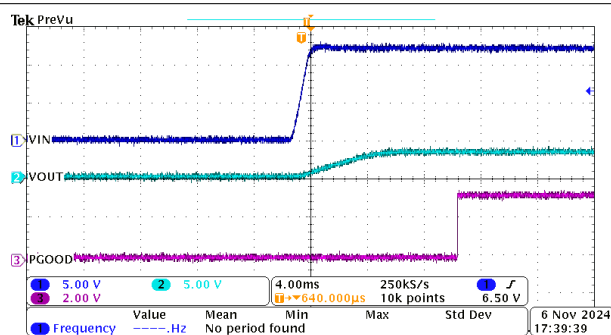


図 8-14. スタートアップ

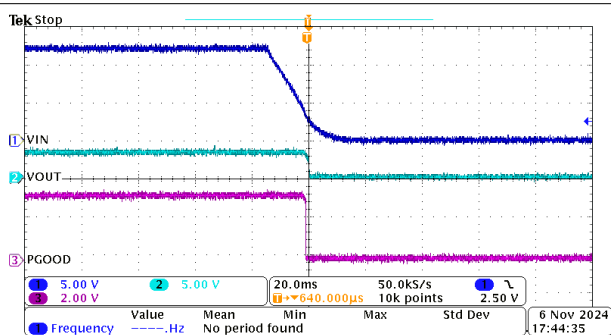
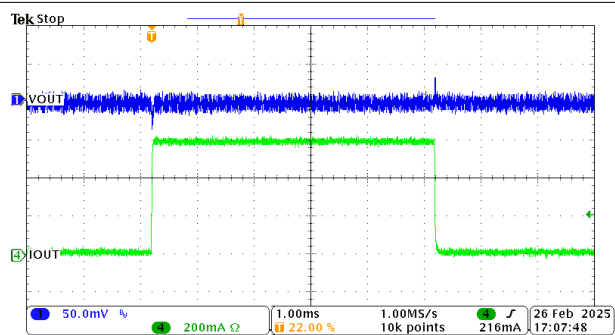
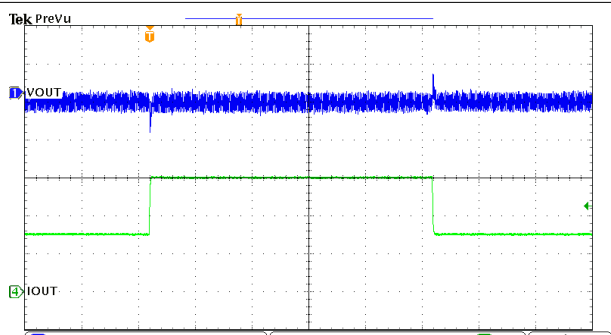


図 8-15. シャットダウン



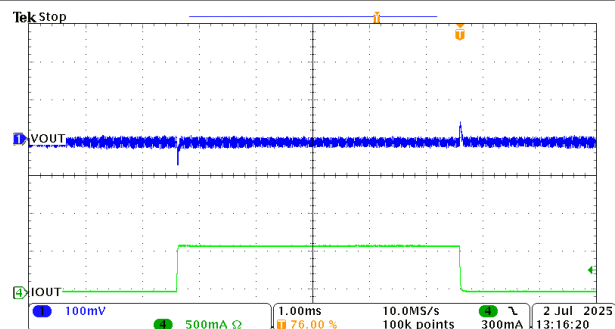
デバイスの種類 = 3.3V 出力 モード = FPWM
0.6A
 $F_{sw} = 2\text{MHz}$

図 8-16. 0A ~ 0.6A の負荷過渡



デバイスの種類 = 3.3V 出力 モード = FPWM
0.6A
 $F_{sw} = 2\text{MHz}$

図 8-17. 0.3A ~ 0.6A の負荷過渡

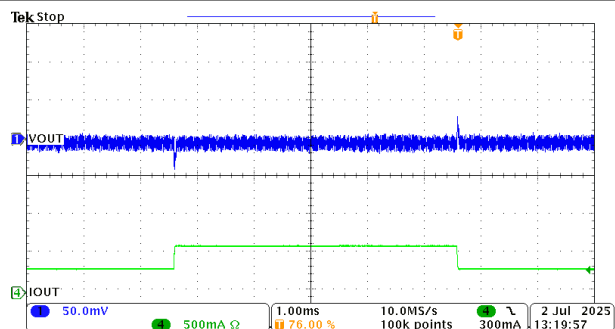


デバイスの種類 = 5V 出力
0.6A

モード = FPWM

$F_{SW} = 2\text{MHz}$

図 8-18. 0A ~ 0.6A の負荷過渡

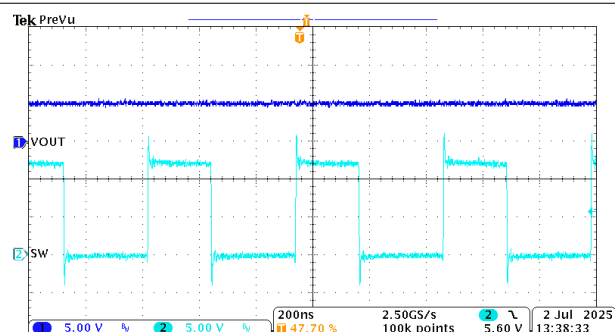


デバイスの種類 = 5V 出力
0.6A

モード = FPWM

$F_{SW} = 2\text{MHz}$

図 8-19. 0.3A ~ 0.6A の負荷過渡



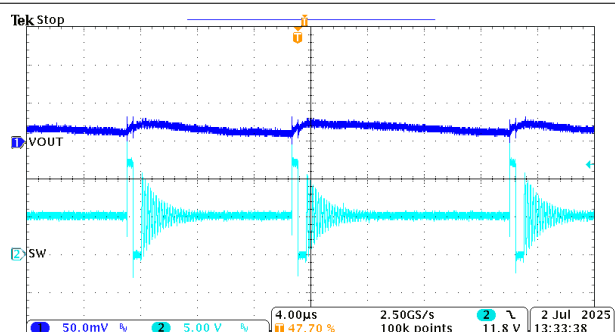
デバイスの種類 = 5V 出力
0.6A

モード = 自動

$F_{SW} = 2\text{MHz}$

$I_{OUT} = 0.6\text{A}$

図 8-20. 定常状態波形

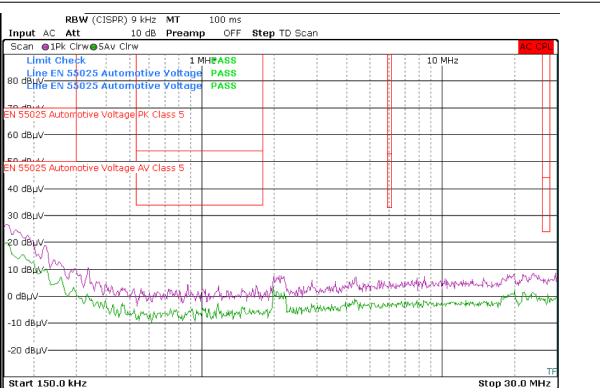


デバイスの種類 = 5V 出力
0.6A

モード = 自動

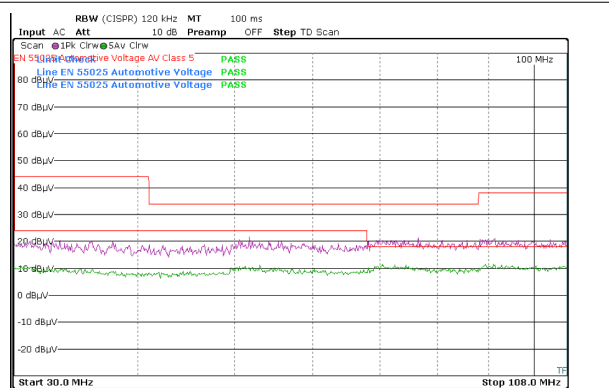
$I_{OUT} = 0.01\text{A}$

図 8-21. 定常状態波形



$V_{OUT} = 5\text{V}$
 $F_{SW} = 2\text{MHz}$
 $I_{OUT} = 0.6\text{A}$
周波数スパン: 150kHz ~ 30MHz

図 8-22. 伝導 EMI と CISPR25 制限値との関係 (紫: ピーク信号、緑: 平均信号)、 LMR60410QEV



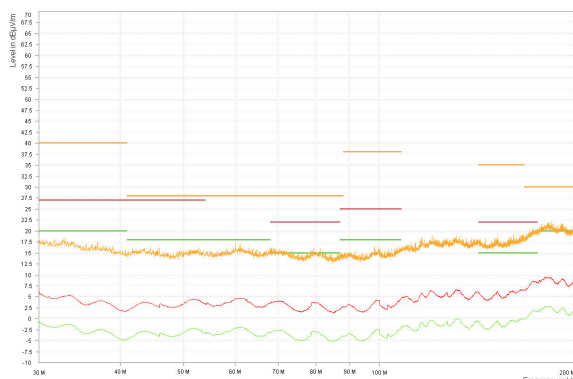
$V_{OUT} = 5\text{V}$
 $F_{SW} = 2\text{MHz}$
 $I_{OUT} = 0.6\text{A}$
周波数スパン: 30MHz ~ 108MHz

図 8-23. 伝導 EMI と CISPR25 制限値との関係 (紫: ピーク信号、緑: 平均信号)、 LMR60410QEV



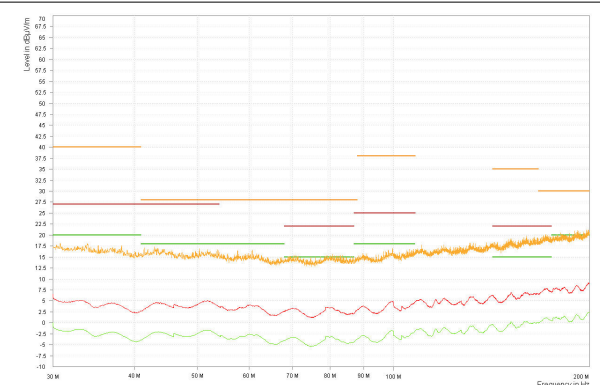
$V_{OUT} = 3.3V$ $F_{SW} = 2MHz$ $I_{OUT} = 1A$
周波数スパン: 150kHz ~ 30MHz

図 8-24. 伝導 EMI と CISPR25 制限値との関係 (黄: ピーク信号、赤: 疑似ピーク信号、緑: 平均信号)、モノポール アンテナ、 LMR60410QEVN



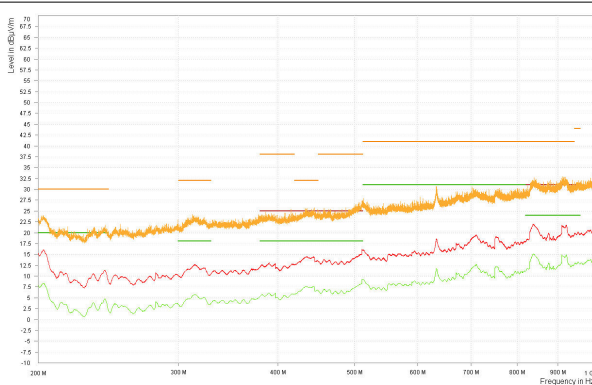
$V_{OUT} = 3.3V$ $F_{SW} = 2MHz$ $I_{OUT} = 1A$
周波数スパン: 30MHz ~ 200MHz

図 8-25. 伝導 EMI と CISPR25 制限値との関係 (黄: ピーク信号、赤: 疑似ピーク信号、緑: 平均信号)、水平バイコンカル アンテナ、 LMR60410QEVN



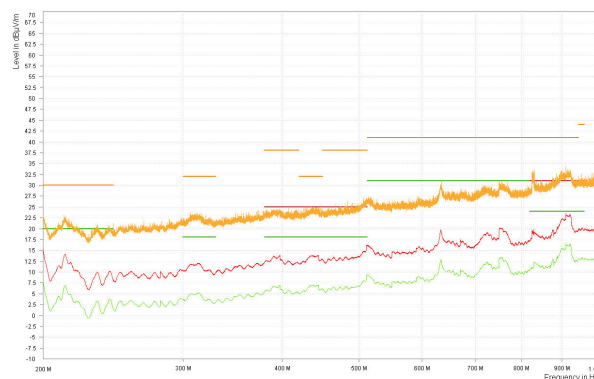
$V_{OUT} = 3.3V$ $F_{SW} = 2MHz$ $I_{OUT} = 1A$
周波数スパン: 30MHz ~ 200MHz

図 8-26. 伝導 EMI と CISPR25 制限値との関係 (黄: ピーク信号、赤: 疑似ピーク信号、緑: 平均信号)、垂直バイコンカル アンテナ、 LMR60410QEVN



$V_{OUT} = 3.3V$ $F_{SW} = 2MHz$ $I_{OUT} = 1A$
周波数スパン: 200MHz ~ 1GHz

図 8-27. 伝導 EMI と CISPR25 制限値との関係 (黄: ピーク信号、赤: 疑似ピーク信号、緑: 平均信号)、水平対数アンテナ、 LMR60410QEVN

 $V_{OUT} = 3.3V$ $F_{SW} = 2MHz$ $I_{OUT} = 1A$

周波数スパン: 200MHz ~ 1GHz

図 8-28. 伝導 EMI と CISPR25 制限値との関係 (黄 : ピーク信号、赤 : 疑似ピーク信号、緑 : 平均信号)、垂直対数アンテナ、[LMR60410QEVM](#)

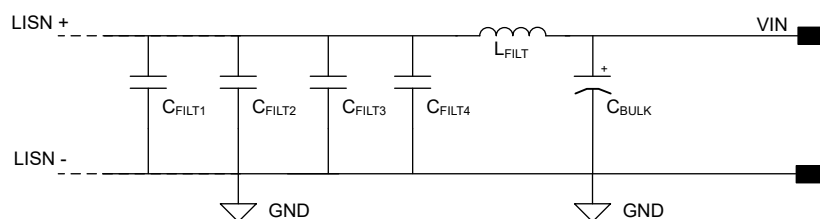


図 8-29. 標準入力 EMI フィルタ回路図

表 8-5. 標準 EMI フィルタ部品

$F_{SW}(kHz)$	$C_{FILT1}(\mu F)$	$C_{FILT2}(\mu F)$	$C_{FILT3}(\mu F)$	$C_{FILT4}(\mu F)$	$L_{FILT}(\mu H)$	$C_{BULK}(\mu F)$
2000	2.2	2.2	DNP	DNP	2.2	47

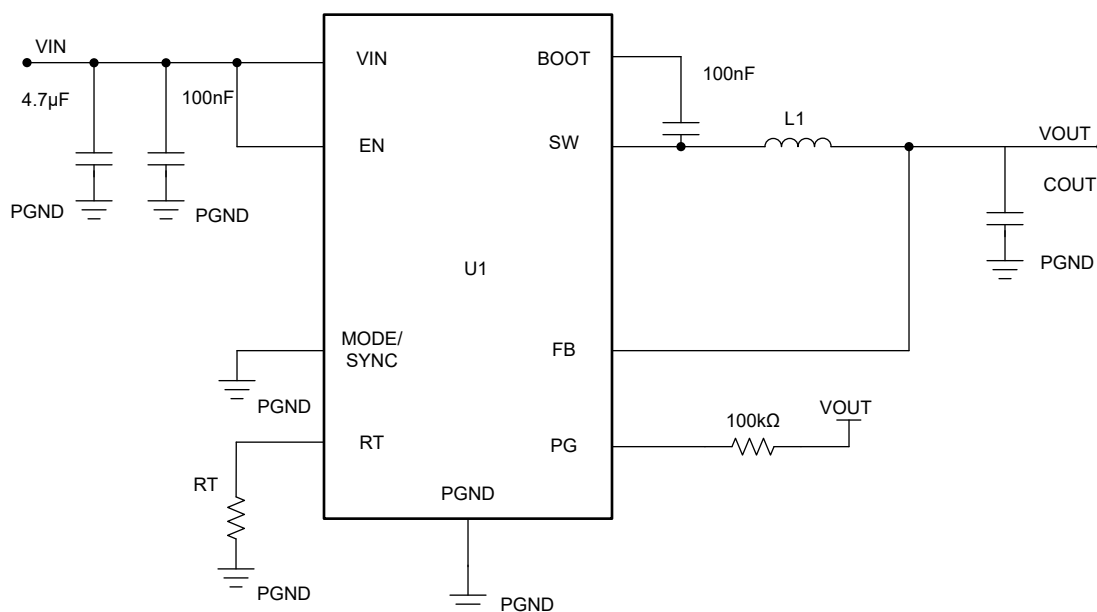


図 8-30. アプリケーション回路例

表 8-6. 代表的なアプリケーションの特性曲線で使われた BOM

U1	F _{SW} (kHz)	V _{OUT} (V)	L1 (μH)	公称 C _{OUT} (μF)	RT (kΩ)
LMR604065SRAKRQ1	2000	5	10	1 × 10 + 1 × 4.7	15.2

8.3 設計のベスト プラクティス

- 絶対最大定格を超過してはなりません。
- ESD レーティングを超過してはなりません。
- 推奨動作条件を超過してはなりません。
- EN、RT、MODE/SYNC 入力をフローティングにしないでください。
- 出力電圧が入力電圧を超えないように、またグラウンドを下回らないようにしてください。
- 設計を量産用に確定する前に、このデータシートに記載されているすべてのガイドラインと推奨事項に従ってください。TI のアプリケーション エンジニアが、設計および PCB レイアウトの評価をサポートして、プロジェクトの成功を支援します。
- セクション 9.2.1 にある役立つ資料を参照してください。

8.4 電源に関する推奨事項

入力電源の特性は、このデータシートに記載されている仕様に適合している必要があります。また、入力電源は、負荷時のレギュレータに必要な入力電流を供給できる必要があります。平均入力電流は、次の式を使って見積もることができます。

$$I_{IN} = \frac{V_{OUT} \times I_{OUT}}{V_{IN} \times \eta} \quad (15)$$

ここで、

η は効率です。

レギュレータを長いワイヤや PCB パターンで入力電源に接続している場合は、良好な性能を実現するために特別な注意が必要です。入力ケーブルの寄生インダクタンスと抵抗は、レギュレータの動作に悪影響を及ぼすおそれがあります。寄生インダクタンスは、低 ESR セラミック入力コンデンサとの組み合わせによって不足減衰共振回路を形成し、レギュレータへの入力での過電圧過渡の原因となる可能性があります。寄生抵抗は、出力に負荷過渡が加わった際に、VIN ピンの電圧が低下する原因となる可能性があります。アプリケーションが最小入力電圧に近い値で動作している場合、この低下によってレギュレータが瞬間的にシャットダウンし、リセットされる可能性があります。このような問題を解決する最善策は、入力電源からレギュレータまでの距離を制限、またはセラミックと並列にアルミニウムやタンタルの入力コンデンサを使用を計画することです。この種のコンデンサの ESR は比較的低いいため、入力共振回路の減衰およびオーバーシュートの低減に役立ちます。通常、値の範囲が 20μF ~ 100μF であれば入力を減衰させるのに十分で、大きな負荷過渡中も入力電圧を安定した状態に保持できます。

システムに関するその他の考慮事項として、レギュレータの前に入力フィルタが使われる場合があります。その際は、注意深く設計しないと、不安定性につながる可能性があり、上述の現象の一因ともなり得ます。AN-2162『DC/DC コンバータ向け伝導 EMI の簡単な成功事例』アプリケーション ノートでは、スイッチング レギュレータの入力フィルタを設計する際に役立つ提案を紹介しています。

場合によっては、コンバータの入力に過渡電圧サプレッサ (TVS) が使われています。この素子の種類には、スナップバック特性を持つもの (サイリスタ型) があります。テキサス・インスツルメンツでは、このタイプの特性を持つデバイスの使用を推奨していません。このタイプの TVS が作動すると、クランプ電圧は非常に低い値に低下します。この電圧がレギュレータの出力電圧よりも低い場合、出力コンデンサは本デバイスを通して入力に向かって放電します。この制御されない電流は、デバイスに損傷を与える可能性があります。

8.5 レイアウト

8.5.1 レイアウトのガイドライン

DC/DC コンバータの PCB レイアウトは、優れた設計性能を実現するために重要です。PCB レイアウトが不適切な場合、適正な回路図設計の動作の妨げとなる可能性があります。コンバータが適切にレギュレートしている場合でも、PCB レイアウトが不適切では、堅牢な設計と量産できない設計という違いが生じる可能性があります。さらに、レギュレータの EMI 性能は、PCB レイアウトの影響を大きく受けます。降圧コンバータにおける PCB の最も重要な機能は、入力コンデンサと電源グラウンドによって形成されるループです (図 8-31 を参照)。このループには、パターンインダクタンスに依存して大きな過渡電圧を発生させる可能性がある大きな過渡電流が流れます。これらの望ましくない過渡電圧は、コンバータの正常な動作を妨げます。このことから、このループ内のパターンは広く短くして、ループ領域をできる限り小さくし、寄生インダクタンスを低減する必要があります。図 8-32 は、LMR60406-Q1 の重要な部品の推奨レイアウトを示しています。

- 入力コンデンサは、VIN および GND ピンにできる限り近づけて配置してください。
- C_{BOOT} コンデンサには広いパターンを使用します。C_{BOOT} コンデンサは、デバイスのできる限り近くに、BOOT および SW ピンに短くて幅の広いパターンで配置します。
- 帰還分圧器は、本デバイスの FB ピンのできるだけ近くに配置します。R_{FBB}、R_{FBT}、C_{FF} は、使用する場合、本デバイスに物理的に近付けて配置します。FB および GND への接続は、短くする必要があり、かつ本デバイスのそれらのピンに近付ける必要があります。V_{OUT} への接続は、多少長くなってもかまいません。ただし、後者のパターンは、レギュレータの帰還経路に静電容量結合する可能性があるすべてのノイズ源 (SW ノードなど) の近くには配線しないでください。
- 内層の 1 つを使って、少なくとも 1 つのグラウンドプレーンを配置します。このプレーンは、ノイズシールドと放熱経路として機能します。
- VIN、VOUT、GND には広いパターンを使います。コンバータの入力または出力経路でのすべての電圧降下を低減し、効率を最大化するため、これらの配線はできるだけ広くかつ真つすぐにする必要があります。
- 適切なヒートシンクのために十分な PCB 領域を確保します。最大負荷電流と周囲温度に見合った低 R_{θJA} を実現するため、十分な銅箔面積を確保してください。PCB の上層と下層は 2 オンス銅箔とし、最低でも 1 オンス以上とする必要があります。PCB 設計に複数の銅層を使用している場合は (推奨設計)、サーマルビアも内部層の熱拡散グラウンドプレーンに接続することができます。
- スイッチングする領域は小さく保ちます。SW ピンをインダクタに接続する銅箔領域は、できるだけ短くかつ広くします。同時に、放射 EMI を低減するため、このノードの総面積を最小化する必要があります。

その他の重要なガイドラインについては、以下の PCB レイアウト資料を参照してください。

- [スイッチング電源レイアウトのガイドラインアプリケーションレポート](#)
- [Simple Switcher PCB レイアウト ガイドラインアプリケーションレポート](#)
- [『独自電源の構築 - レイアウトの考慮事項』セミナー](#)
- [LM4360x および LM4600x による低放射 EMI レイアウトの簡素化アプリケーションレポート](#)

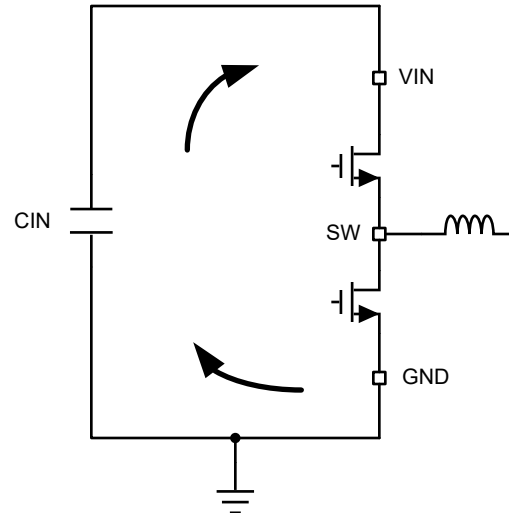


図 8-31. 高速過渡を持つ電流ループ

8.5.1.1 グランドとサーマル プレーンに関する考慮事項

前述のように、テキサス・インスツルメンツでは、中間層のいずれかをソリッド グランド プレーンとして使用することを推奨しています。グラウンド プレーンは、ノイズの影響を受けやすい回路とパターンにシールドを提供します。また、グラウンド プレーンは、制御回路に対して、低ノイズのリファレンス電位も提供します。PGND ピンは、内部ローサイド MOSFET スイッチのソースです。このピンは入力および出力コンデンサのグラウンドに直接接続する必要があります。PGND にはスイッチング周波数におけるノイズが含まれており、負荷変動により戻ってくる場合があります。

テキサス・インスツルメンツは、プライマリ サーマル パスとして IC の PGND を使用して十分なデバイス ヒートシンクを提供することを推奨しています。サーマル ビアは、PGND ピンの下に均等に配置する必要があります。最大の放熱効果を得るため、最上層および最下層のシステム グランド プレーンに対して可能な限り多くの銅を使用します。テキサス・インスツルメンツでは、銅厚が上から以下になっている 4 層基板を使用するよう推奨しています: 2oz / 1oz / 1oz / 2oz。十分な厚さの銅箔と適切なレイアウトを備えた 4 層基板は、低インピーダンスの電流導通、適切なシールド効果、低熱抵抗を実現します。

熱 PCB 設計に関するリソース:

- 『AN-2020 過去ではなく、現在の識見による熱設計』アプリケーション ノート
- 『露出パッド パッケージで最良の熱抵抗を実現するための基板レイアウト ガイド』アプリケーション ノート
- 『半導体および IC パッケージの熱評価基準』アプリケーション レポート
- 『LM43603 および LM43602 によるシンプルな熱設計』アプリケーション ノート
- 『PowerPAD™ 熱特性強化型パッケージ』アプリケーション レポート
- 『PowerPAD の簡単な使用法』アプリケーション ノート
- 『新しい熱評価基準の解説』アプリケーション レポート

8.5.2 レイアウト例

図 8-32 に、LMR60406-Q1 の基板レイアウト例が示されています。

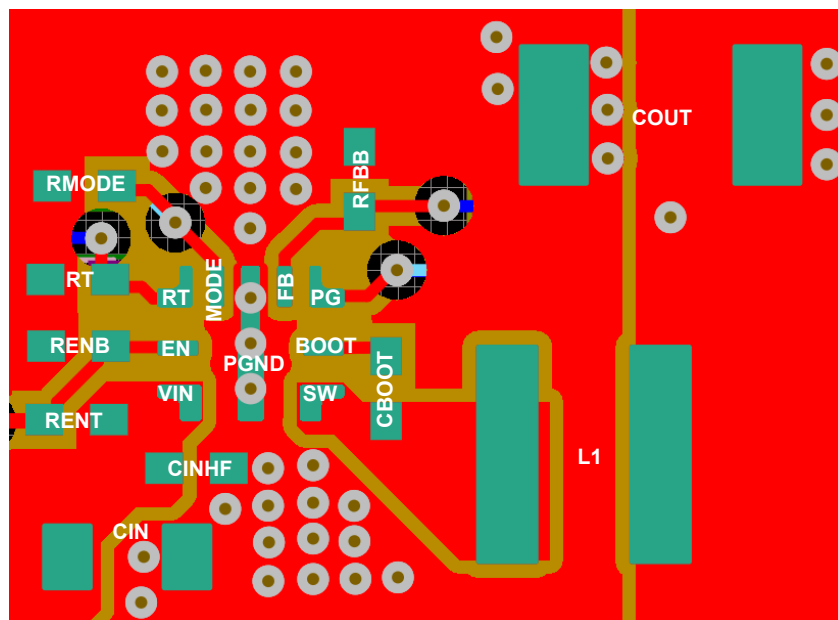


図 8-32. レイアウト例

9 デバイスおよびドキュメントのサポート

9.1 デバイス サポート

9.1.1 サード・パーティ製品に関する免責事項

サード・パーティ製品またはサービスに関するテキサス・インスツルメンツの出版物は、単独またはテキサス・インスツルメンツの製品、サービスと一緒に提供される場合に関係なく、サード・パーティ製品またはサービスの適合性に関する是認、サード・パーティ製品またはサービスの是認の表明を意味するものではありません。

9.1.2 デバイスの命名規則

図 9-1 に、LMR60406-Q1 のデバイス命名規則を示します。各バリエーションの特長については、セクション 4 を参照してください。他のオプションの詳細と提供状況については、テキサス インスツルメンツの販売代理店または テキサス インスツルメンツの E2E サポート フォーラムをご覧ください。最小注文数量が適用されます。

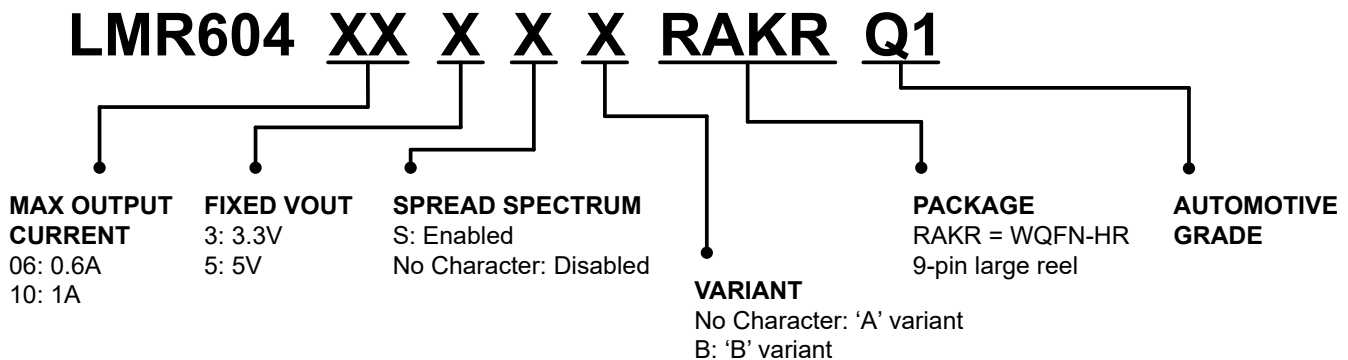


図 9-1. デバイスの命名規則

9.2 ドキュメントのサポート

9.2.1 関連資料

関連資料については、以下を参照してください。

- テキサス・インスツルメンツ、[AN-1149『スイッチング電源のレイアウトのガイドライン』アプリケーション ノート](#)
- テキサス・インスツルメンツ、[『LM4360x および LM4600x による低放射 EMI レイアウトの簡単な設計』アプリケーション ノート](#)
- テキサス・インスツルメンツ、[『独自電源の構築 - レイアウトの考慮事項』アプリケーション ノート](#)
- テキサス・インスツルメンツ、[AN-1229『Simple Switcher PCB レイアウト ガイドライン』アプリケーション ノート](#)
- テキサス・インスツルメンツ、[『新しい熱評価基準の解説』アプリケーション ノート](#)
- テキサス・インスツルメンツ、[『PowerPAD™ 入門』アプリケーション ノート](#)
- テキサス・インスツルメンツ、[『熱特性強化型パッケージ PowerPAD™』アプリケーション ノート](#)
- テキサス・インスツルメンツ、[『LM43603 および LM43602 を使用した簡単な熱設計』アプリケーション ノート](#)
- テキサス・インスツルメンツ、[半導体および IC パッケージの熱評価指標アプリケーション ノート](#)
- テキサス・インスツルメンツ、[AN-2020『過去ではなく、現在の識見による熱設計』アプリケーション ノート](#)
- テキサス・インスツルメンツ、[AN-1520『露出パッド パッケージで最良の熱抵抗を実現するための基板レイアウト ガイド』アプリケーション ノート](#)
- テキサス・インスツルメンツ、[『DC-DC コンバータからの伝導 EMI への簡単な対処方法』アプリケーション ノート](#)
- テキサス・インスツルメンツ、[『電流モード制御理論の理解と適用』アプリケーション ノート](#)
- テキサス・インスツルメンツ、[『フィードフォワード コンデンサ付きの内部的に補正される dc-dc コンバータの過渡応答の最適化』アプリケーション ノート](#)

9.3 ドキュメントの更新通知を受け取る方法

ドキュメントの更新についての通知を受け取るには、www.tij.co.jp のデバイス製品フォルダを開いてください。[通知] をクリックして登録すると、変更されたすべての製品情報に関するダイジェストを毎週受け取ることができます。変更の詳細については、改訂されたドキュメントに含まれている改訂履歴をご覧ください。

9.4 サポート・リソース

テキサス・インスツルメンツ E2E™ サポート・フォーラムは、エンジニアが検証済みの回答と設計に関するヒントをエキスパートから迅速かつ直接得ることができる場所です。既存の回答を検索したり、独自の質問をしたりすることで、設計に必要な支援を迅速に得ることができます。

リンクされているコンテンツは、各寄稿者により「現状のまま」提供されるものです。これらはテキサス・インスツルメンツの仕様を構成するものではなく、必ずしもテキサス・インスツルメンツの見解を反映したものではありません。テキサス・インスツルメンツの[使用条件](#)を参照してください。

9.5 商標

HotRod™, PowerPAD™, and テキサス・インスツルメンツ E2E™ are trademarks of Texas Instruments.

すべての商標は、それぞれの所有者に帰属します。

9.6 静電気放電に関する注意事項



この IC は、ESD によって破損する可能性があります。テキサス・インスツルメンツは、IC を取り扱う際には常に適切な注意を払うことを推奨します。正しい取り扱いおよび設置手順に従わない場合、デバイスを破損するおそれがあります。

ESD による破損は、わずかな性能低下からデバイスの完全な故障まで多岐にわたります。精密な IC の場合、パラメータがわずかに変化するだけで公表されている仕様から外れる可能性があるため、破損が発生しやすくなっています。

9.7 用語集

[テキサス・インスツルメンツ用語集](#)

この用語集には、用語や略語の一覧および定義が記載されています。

10 改訂履歴

資料番号末尾の英字は改訂を表しています。その改訂履歴は英語版に準じています。

Changes from Revision A (February 2026) to Revision B (August 2026)	Page
ドキュメントタイトルの 特長 、および 概要 セクションに MINT 1 スイッチャの用語を追加しました	1
特長 セクションにさらに多くのピン互換デバイスを追加しました	1
特長 セクションのシャットダウン電流を 5 μ A から 3.5 μ A に更新しました	1
「 説明 」と「 概要 」内の HotRod に ™ 記号を追加	1
LMR604065SBRAKRQ1、LMR604063BRAKRQ1、および LMR604065BRAKRQ1 のデバイス ステータスを デバイスの比較 の量産データに更新しました	3
デバイスの比較 セクションから部品番号 LMR604063SRAKRQ1、LMR604063RAKRQ1 および LMR60404065RAKRQ1 を削除しました	3
ドロップアウトからの回復に関するセクションを明確化するために ソフト スタートとドロップアウトからの回復 を更新しました	13
における SYNC モードの説明を更新し、外部クロックの周波数範囲を明確化 MODE/SYNC ピン制御	14
分数調波安定性の推奨設計マージンを含めるように「 インダクタの選択 」のガイダンスを更新	23

Changes from Revision * (July 2025) to Revision A (February 2026)	Page
特長 セクションのシャットダウン電流を 0.65 μ A から 0.7 μ A に更新	1
特長 セクションに低出力キャパシタンスに関するポイントを追加	1
「概略回路図」において、RT ピンと PGND の間に RT 抵抗を追加	1
先頭ページに超小型 PCB レイアウトの画像を追加	1
「B」バリエント デバイスの注文可能な型番を記載した表を追加しました デバイスの比較	3
「推奨動作条件」表に RT を追加	6
「電気的特性」表に「B」バリエント デバイスの仕様を追加	7
「電気的特性」表の I _{Q-SD} を 0.65 μ A (標準値) から 0.7 μ A (標準値) に変更	7
「 代表的特性 」セクションに曲線を追加	9
「 電流制限 」に、デューティ サイクルによるハイサイド電流制限の変動を示す段落および図を追加	15
「 スペクトラム拡散 」で、スペクトラム拡散の代表的なスイッチング周波数拡散幅を、16% から 18% に変更	17
「 スペクトラム拡散 」で、スペクトラム拡散を無効化する条件に、2 つの箇条書きを追加	17
図 8-1 から注を削除し、図を更新して、MODE/SYNC ピンにオプション 4 を追加	22
出力コンデンサの選択プロセスを簡素化するために 出力コンデンサの選択 セクションを更新	24
図 8-13 において、入力電流の可視性を向上させるため、x 軸スケールを線形から対数に更新	27
「アプリケーション曲線」セクションに 放射 EMI 曲線 を追加	27
デバイスの命名規則を説明する 図 を追加	37

11 メカニカル、パッケージ、および注文情報

以降のページには、メカニカル、パッケージ、および注文に関する情報が記載されています。この情報は、指定のデバイスに使用できる最新のデータです。このデータは、予告なく、このドキュメントを改訂せずに変更される場合があります。本データシートのブラウザ版を使用されている場合は、画面左側の説明をご覧ください。

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)
LMR604063BRAKRQ1	Active	Production	WQFN-HR (RAK) 9	3000 LARGE T&R	Yes	SN	Level-2-260C-1 YEAR	-40 to 150	463BQ
LMR604063SBRAKRQ1	Active	Production	WQFN-HR (RAK) 9	3000 LARGE T&R	Yes	SN	Level-2-260C-1 YEAR	-40 to 150	63SBQ
LMR604065BRAKRQ1	Active	Production	WQFN-HR (RAK) 9	3000 LARGE T&R	Yes	SN	Level-2-260C-1 YEAR	-40 to 150	465BQ
LMR604065SBRAKRQ1	Active	Production	WQFN-HR (RAK) 9	3000 LARGE T&R	Yes	SN	Level-2-260C-1 YEAR	-40 to 150	65SBQ
LMR604065SRAKRQ1	Active	Production	WQFN-HR (RAK) 9	3000 LARGE T&R	Yes	SN	Level-2-260C-1 YEAR	-40 to 150	465SQ

⁽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.

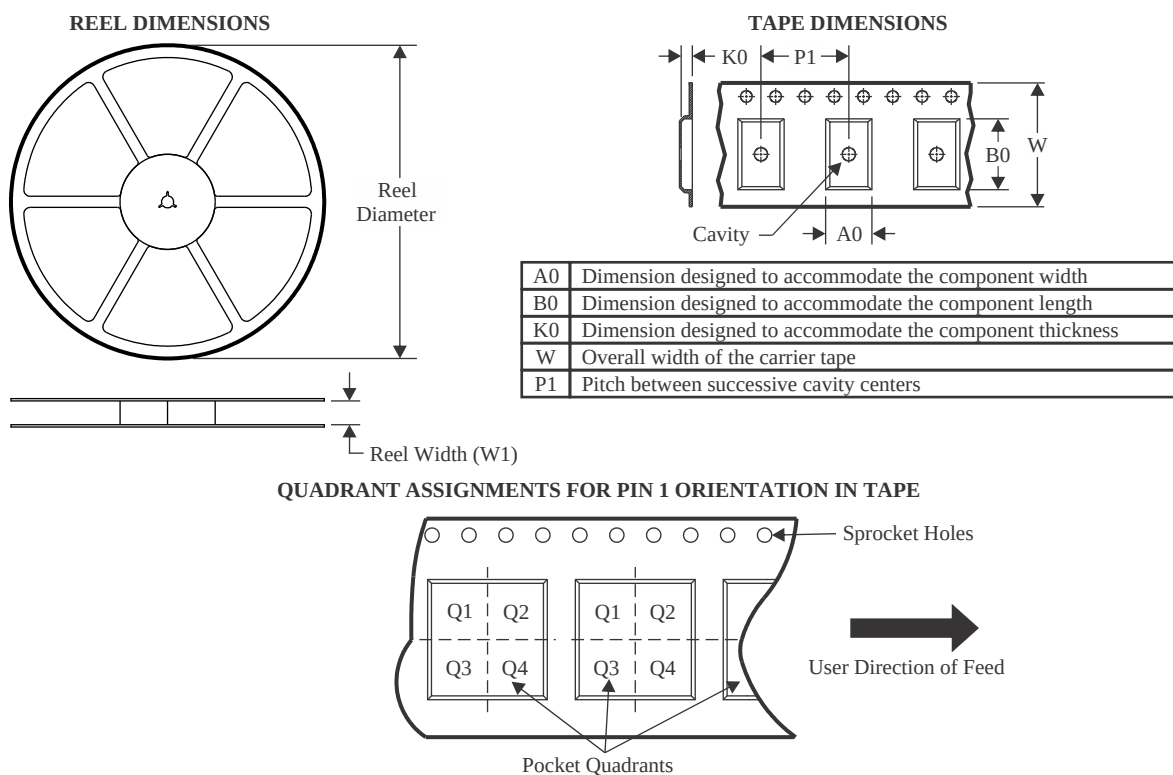
⁽⁶⁾ **Part marking:** There may be an additional marking, which relates to the logo, the lot trace code information, or the environmental category of the part.

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.

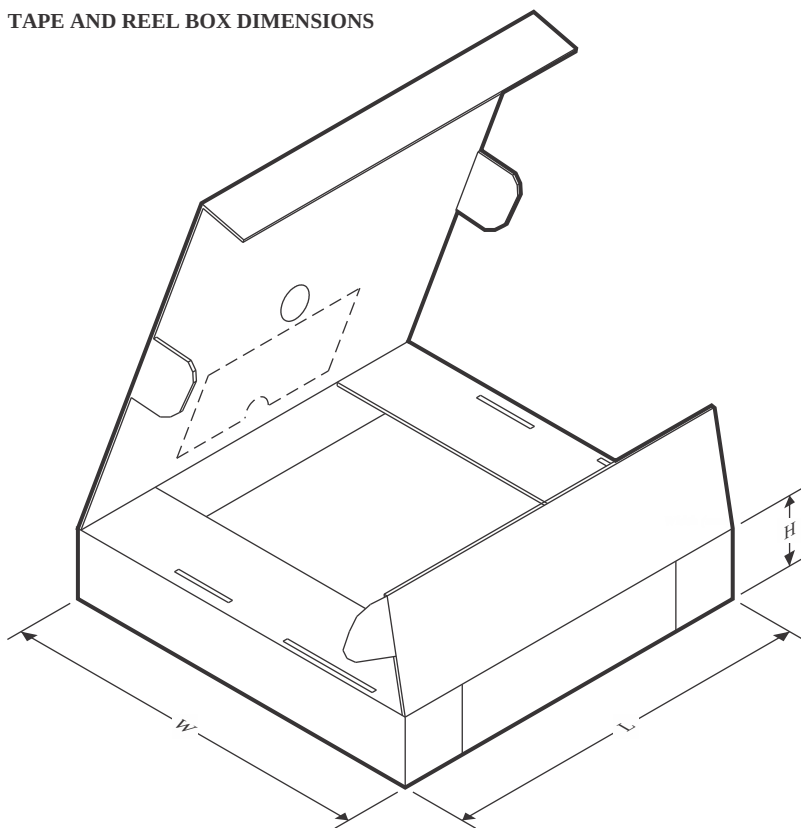
TAPE AND REEL INFORMATION



*All dimensions are nominal

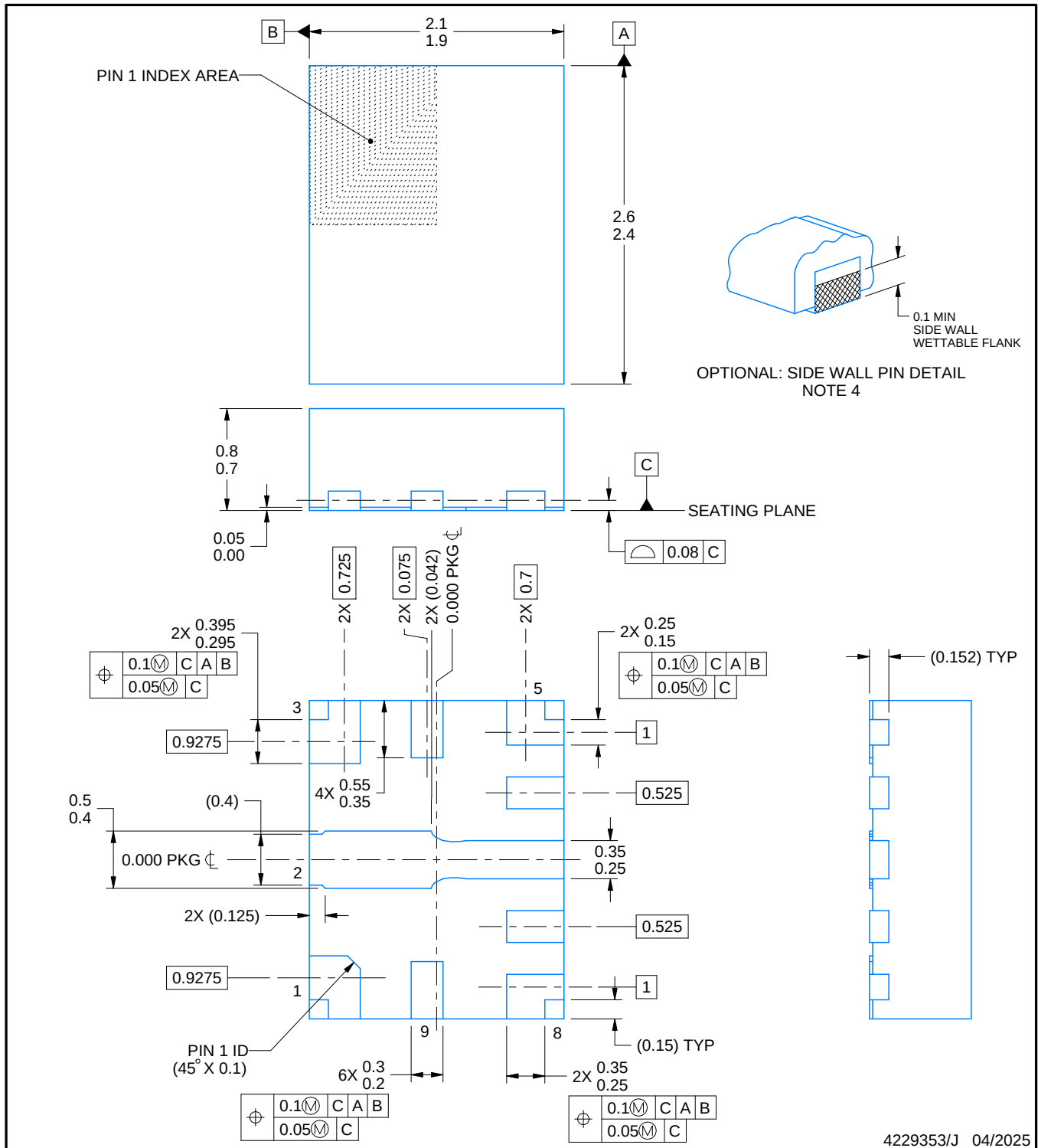
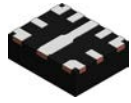
Device	Package Type	Package Drawing	Pins	SPQ	Reel Diameter (mm)	Reel Width W1 (mm)	A0 (mm)	B0 (mm)	K0 (mm)	P1 (mm)	W (mm)	Pin1 Quadrant
LMR604063BRAKRQ1	WQFN-HR	RAK	9	3000	180.0	8.4	2.3	2.8	1.15	4.0	8.0	Q1
LMR604063SBRAKRQ1	WQFN-HR	RAK	9	3000	180.0	8.4	2.3	2.8	1.15	4.0	8.0	Q1
LMR604065BRAKRQ1	WQFN-HR	RAK	9	3000	180.0	8.4	2.3	2.8	1.15	4.0	8.0	Q1
LMR604065SBRAKRQ1	WQFN-HR	RAK	9	3000	180.0	8.4	2.3	2.8	1.15	4.0	8.0	Q1
LMR604065SRAKRQ1	WQFN-HR	RAK	9	3000	180.0	8.4	2.3	2.8	1.15	4.0	8.0	Q1

TAPE AND REEL BOX DIMENSIONS



*All dimensions are nominal

Device	Package Type	Package Drawing	Pins	SPQ	Length (mm)	Width (mm)	Height (mm)
LMR604063BRAKRQ1	WQFN-HR	RAK	9	3000	210.0	185.0	35.0
LMR604063SBRAKRQ1	WQFN-HR	RAK	9	3000	210.0	185.0	35.0
LMR604065BRAKRQ1	WQFN-HR	RAK	9	3000	210.0	185.0	35.0
LMR604065SBRAKRQ1	WQFN-HR	RAK	9	3000	210.0	185.0	35.0
LMR604065SRAKRQ1	WQFN-HR	RAK	9	3000	210.0	185.0	35.0



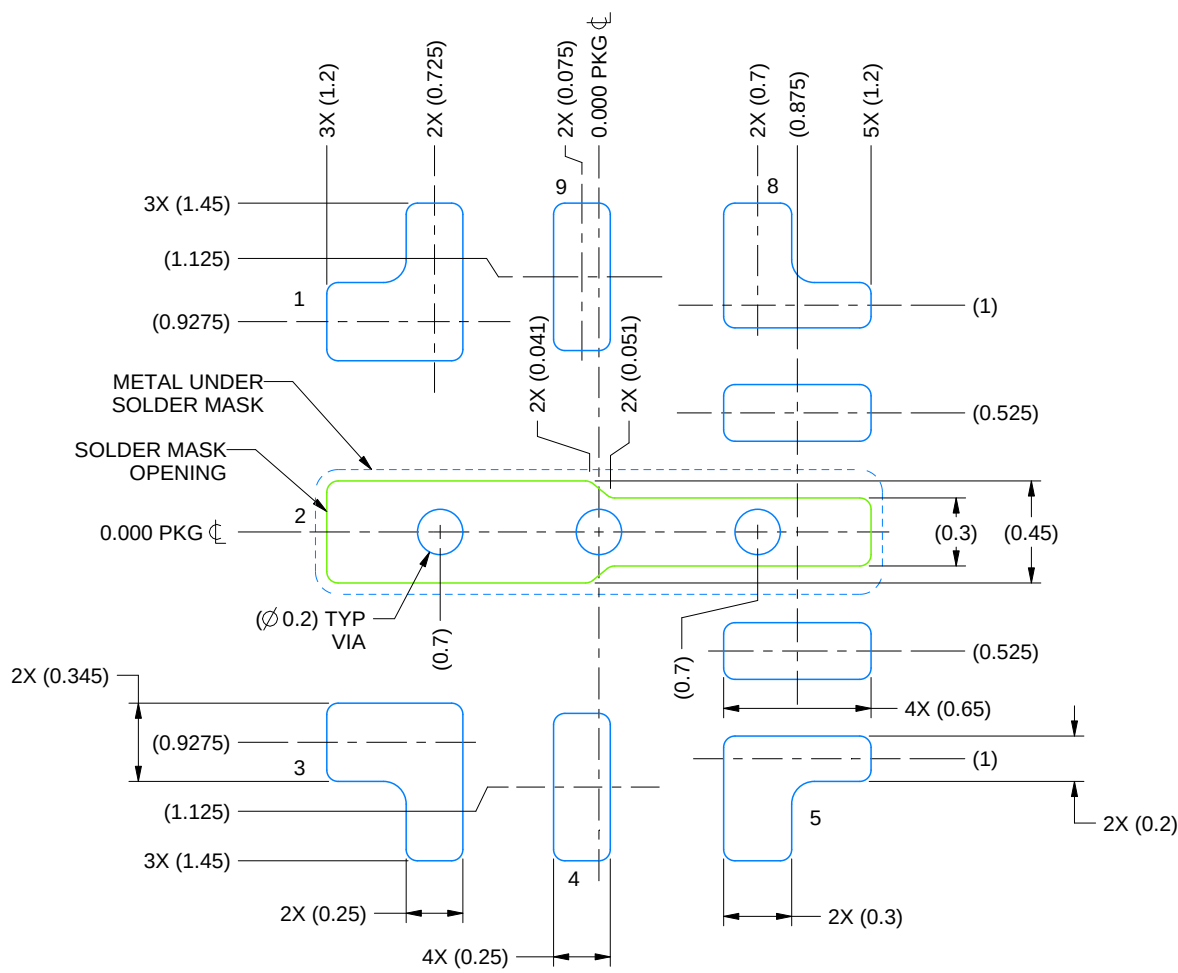
NOTES:

1. All linear dimensions are in millimeters. Any dimensions in parenthesis are for reference only. Dimensioning and tolerancing per ASME Y14.5M.
2. This drawing is subject to change without notice.
3. The package thermal pad must be soldered to the printed circuit board for thermal and mechanical performance.
4. Minimum 0.1 mm solder wetting on pin side wall. Available for wettable flank version only.

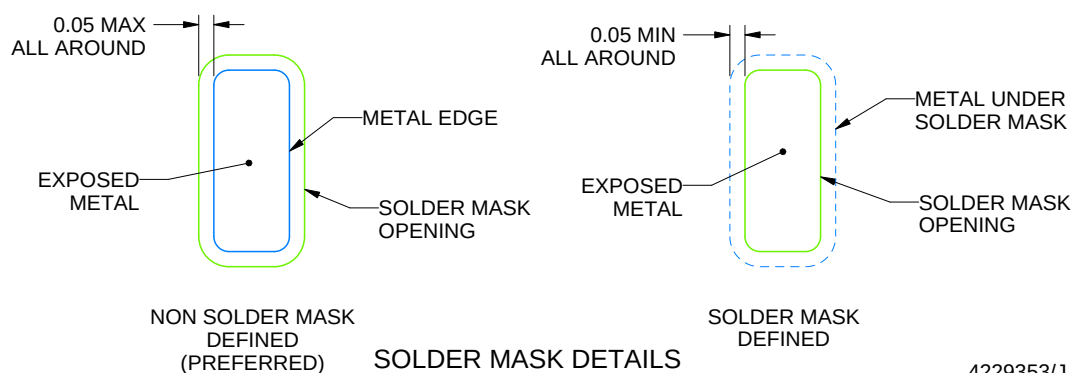
RAK0009A

WQFN-HR - 0.8 mm max height

PLASTIC QUAD FLATPACK - NO LEAD



LAND PATTERN EXAMPLE
EXPOSED METAL SHOWN
SCALE: 30X



4229353/J 04/2025

NOTES: (continued)

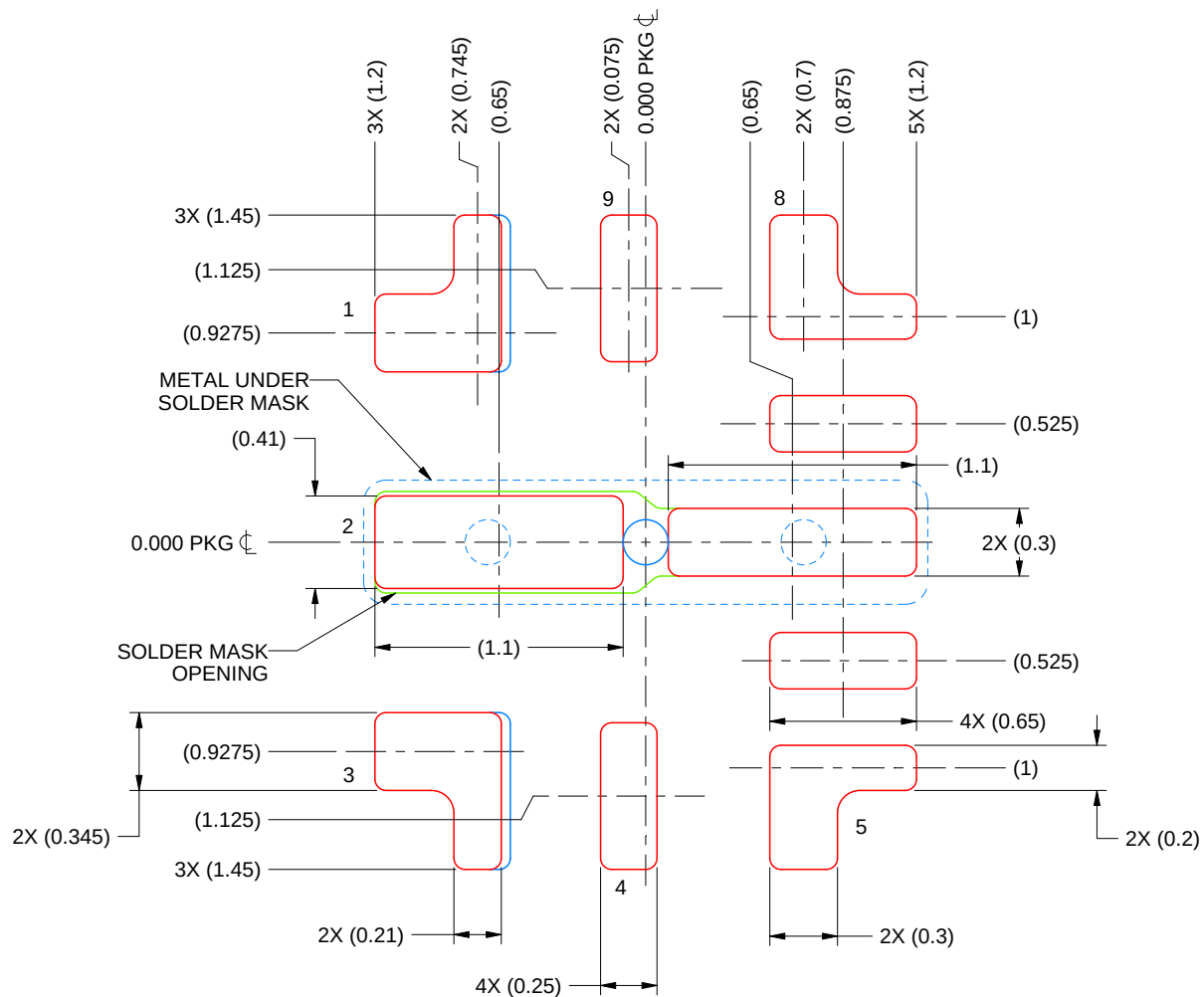
5. This package is designed to be soldered to a thermal pad on the board. For more information, see Texas Instruments literature number SLUA271 (www.ti.com/lit/sluea271).
6. Vias are optional depending on application, refer to device data sheet. If any vias are implemented, refer to their locations shown on this view. It is recommended that vias under paste be filled, plugged or tented.

EXAMPLE STENCIL DESIGN

RAK0009A

WQFN-HR - 0.8 mm max height

PLASTIC QUAD FLATPACK - NO LEAD



SOLDER PASTE EXAMPLE
 BASED ON 0.125 mm THICK STENCIL
 SCALE: 30X

PRINTED SOLDER COVERAGE BY AREA UNDER PACKAGE
 PADS: 1 & 3: 91%
 PAD 2: 84%

4229353/J 04/2025

NOTES: (continued)

7. Laser cutting apertures with trapezoidal walls and rounded corners may offer better paste release. IPC-7525 may have alternate design recommendations.

重要なお知らせと免責事項

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

これらのリソースは、TI 製品を使用する設計の経験を積んだ開発者への提供を意図したものです。(1) お客様のアプリケーションに適した TI 製品の選定、(2) お客様のアプリケーションの設計、検証、試験、(3) お客様のアプリケーションに該当する各種規格や、その他のあらゆる安全性、セキュリティ、規制、または他の要件への確実な適合に関する責任を、お客様のみが単独で負うものとし、TI は一切の責任を拒否します。

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](https://www.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 © 2026, Texas Instruments Incorporated

最終更新日：2025 年 10 月