

ROHM Solution Simulator

入力電圧 3.5V ~ 36V

出力スイッチ電流 4.0A

1ch 降圧スイッチングレギュレータ

BD90640EFJ/BD90640HFP シミュレーションガイド

この資料は ROHM Solution Simulator を用いて BD90640EFJ/BD90640HFP のシミュレーションを行うための案内を記載しています。本ユーザーズガイドでは HTSOP-J8 パッケージの BD90640EFJ について述べますが、HRP7 パッケージの BD90640HFP もあります。データシートの端子配置図をご参照の上、読み替えてご覧下さい。

目次

定数設定とシミュレーション	2
設計パラメータの設定	4
詳細手順	5
1. 出力電圧	5
2. スイッチング周波数	8
3. インダクタ	11
4. 出力コンデンサ	16
5. 入力コンデンサ	21
6. ショットキーバリアダイオード	22
7-1. 位相補償回路：位相マージン、ゲインマージン	24
7-2. 位相補償回路：負荷過渡応答	31
8. ソフトスタート	36

お知らせ ・製品の詳細は次の製品情報リンクを参照してください。

▶ 製品情報リンク： [BD90640EFJ](#), [BD90640HFP](#)

・実機とシミュレーション結果の比較は次のモデリングレポートを参照してください。

▶ モデリングレポート： [Modeling report 1](#), [Modeling report 2](#)

定数設定とシミュレーション

BD90640EFJ にはいくつかの外付け部品があり、目標の特性が得られるように定数を決定する必要があります。設計やシミュレーションに必要な項目を Table 1 に示します。

定数の決定は設計項目の列にある番号 1 から順に行います。

関連部品名の列は関連する部品記号を記載しています。

シミュレータ^(NOTE 1)と解析タイプの列は使用するシミュレータ環境を記載しています。ROHM の公式サイトにある ROHM Solution Simulator では「Frequency Domain」（周波数解析）と「Time Domain」（過渡解析）が利用可能です。ただし、限られた部品定数以外の変更ができません。同列で回路図の変更を伴う項目に「SystemVision[®]Cloud」と記載しています。この表記があるシミュレーションは SystemVision[®]Cloud 環境へ移行して行います。移行

するには ROHM Solution Simulator 環境の回路図上にある「Edit in systemvision.com」ボタンをクリックします。移行後は回路図編集とシミュレーション実行が可能になります。実行可能なシミュレーションは ROHM Solution Simulator と同じで「Frequency Domain」と「Time Domain」の 2 種類です。

確認箇所と特性の列は波形を表示する箇所と確認する特性を表示しています。

各設計項目の詳細手順は、ページ列に記載のページをご参照ください。

項目ごとにシミュレーションを行いますが、それぞれの部品が各特性に影響を及ぼしあっているため、すべての部品定数が確定したあとに、再度全てのシミュレーションする必要があります。

Table 1. 実施すべき設計とシミュレーションの項目一覧

設計項目	関連部品名	シミュレータ ^(NOTE 1) と 解析タイプ	確認箇所と特性	ページ
1. 出力電圧	R1, R2	Time Domain	出力ピン 出力電圧	5
2. スwitchング周波数	RRT	Time Domain	スイッチングピン スイッチング周波数	8
3. インダクタ	L1	Time Domain	インダクタ インダクタ電流	11
4. 出力コンデンサ	CO1, CO2	Time Domain	出力ピン、出力コンデンサ 出力リップル電圧、コンデンサリップル電流	16
5. 入力コンデンサ	Cin, Cbulk	計算式	入力コンデンサ リップル電流	21
6. ショットキーバリアダイオード	D1	計算式	ショットキーバリアダイオード ダイオード電流、損失	22
7-1. 位相補償回路：位相マージン、ゲインマージン	R3, C1 CO1, CO2	Frequency Domain	帰還回路 位相マージン、ゲインマージン	24
7-2. 位相補償回路：負荷過渡応答	R3, C1 CO1, CO2	SystemVision [®] Cloud Time Domain	出力ピン 負荷過渡応答	31
8. ソフトスタート	RRT	Time Domain	出力ピン 出力電圧	36

(NOTE 1) 次ページに記載

定数設定とシミュレーション（つづき）

(NOTE 1) シミュレータと解析タイプの種類と説明

- | | |
|--|--|
| - Frequency Domain | : ROHM Solution Simulator で実行できる周波数解析です。 |
| - Time Domain | : ROHM Solution Simulator で実行できる過渡解析です。 |
| - SystemVision [®] Cloud Frequency Domain | : SystemVision [®] Cloud で実行できる周波数解析です。 |
| - SystemVision [®] Cloud Time Domain | : SystemVision [®] Cloud で実行できる過渡解析です。 |
| - 計算式 | : シミュレータは使用せず、計算式で求めます。 |

お知らせ Table 1 の手順は、ROHM が提供するシミュレータを使用したものです。他のシミュレータをお持ちの方は、別途 SPICE モデルを提供していますので、次のリンクから入手してください。

- ▶ SPICE モデル : [BD90640EFJ](#), [BD90640HFP](#)

SystemVision[®]は Mentor Graphics Corp.の登録商標です。

設計パラメータの設定

回路設計をするに当たり、パラメータを設定します。Table 2 に一例を示します。代表的な項目と値を記載していますが、これは搭載する機器や機能によって重視する特性が異なるため、状況に応じて変更してください。

Table 2. 設計パラメータの一例

項目	値
入力電圧	min 6V, nominal 13.2V, max 18V
出力電圧	5V±10%
出力リップル電圧	20mVp-p 以下
出力電圧 負荷過渡応答	±3%以下 ($I_{OUT} = 1.5A \rightarrow 2.0A \rightarrow 1.5A$ 時)
出力電流	min 0.5A, nominal 1.5A, max 2.0A
スイッチング周波数	500kHz
ソフトスタート時間	1.38ms

詳細手順

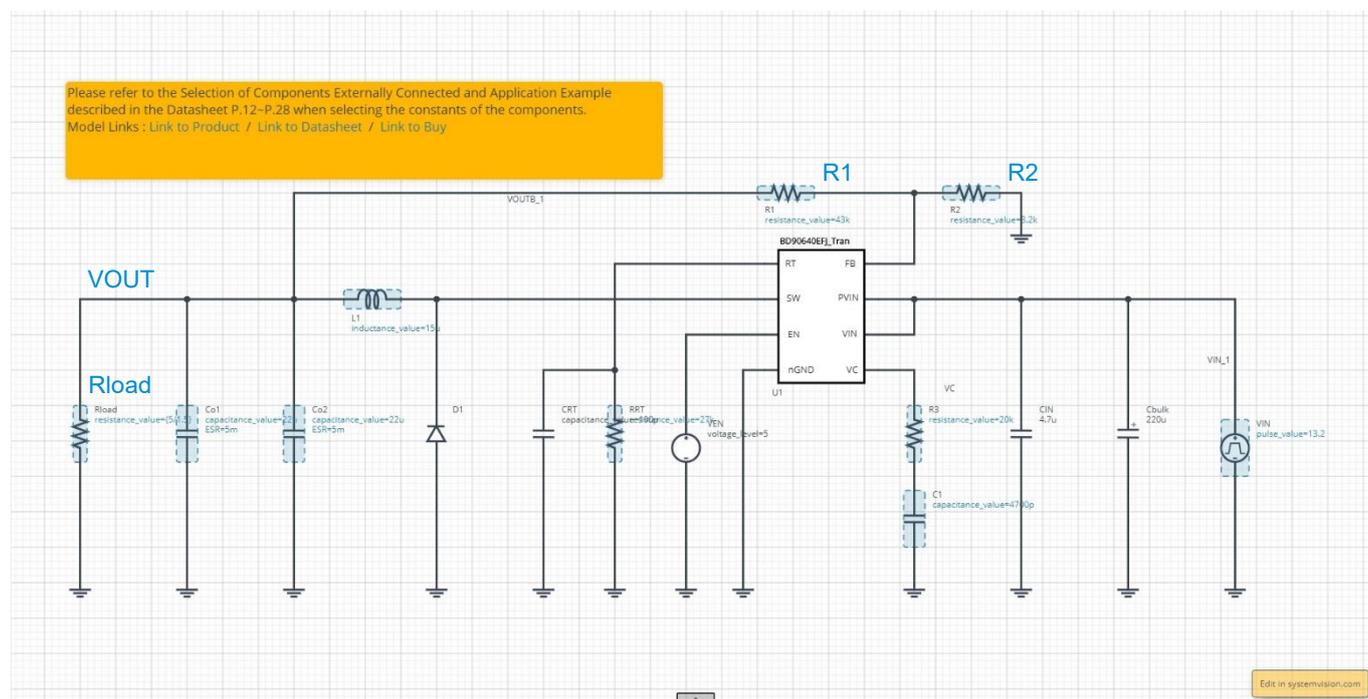
1. 出力電圧

使用するシミュレータ : ROHM Solution Simulator

シミュレーションタイプ : Time Domain

設計する外付け部品 : R1, R2

モニターポイント : VOUT



出力電圧を計算する

- 出力電圧は次式で計算できます。

$$V_{OUT} = 0.8 \cdot \frac{R1 + R2}{R2} \quad [V]$$

例えば出力電圧を 5V にする場合は R2 を 8.2kΩ、R1 を 43kΩ にします。

$$V_{OUT} = 0.8 \times \frac{43k + 8.2k}{8.2k} = 4.995 \quad [V]$$

詳細手順

1. 出力電圧 (つづき)

負荷抵抗を決める

- 製品動作時に流れる電流をオームの法則を用いて負荷抵抗 R_{load} で設定し、次式で計算できます。

$$R_{load} = \frac{V_{OUT}}{I_{LOAD}} \quad [\Omega]$$

負荷電流が少ない、つまり負荷抵抗が大きいと、出力電圧は起動後に僅かにオーバーシュートしてから設定電圧へ収束に向かいますが、負帰還利得が小さいので収束時間が長くなります。その場合、シミュレーション終了時間も長く設定する必要があります。収束時間を短くしてシミュレーション時間を短縮するため、例として負荷電流を 1.5A に設定します。前式より負荷抵抗は 3.33Ω になります。

$$R_{load} = \frac{5}{1.5A} = 3.33 \quad [\Omega]$$

シミュレーション時間を設定する

- この IC はソフトスタート機能が搭載されているため、その起動時間よりも長い時間を設定する必要があります。RRT=27kΩの時、ソフトスタート時間は 1.38ms なので、出力電圧の収束時間も考慮し、4ms に設定します。

シミュレーションを実行する

- ▶をクリックしシミュレーションを実行し、終了するまで待ちます。

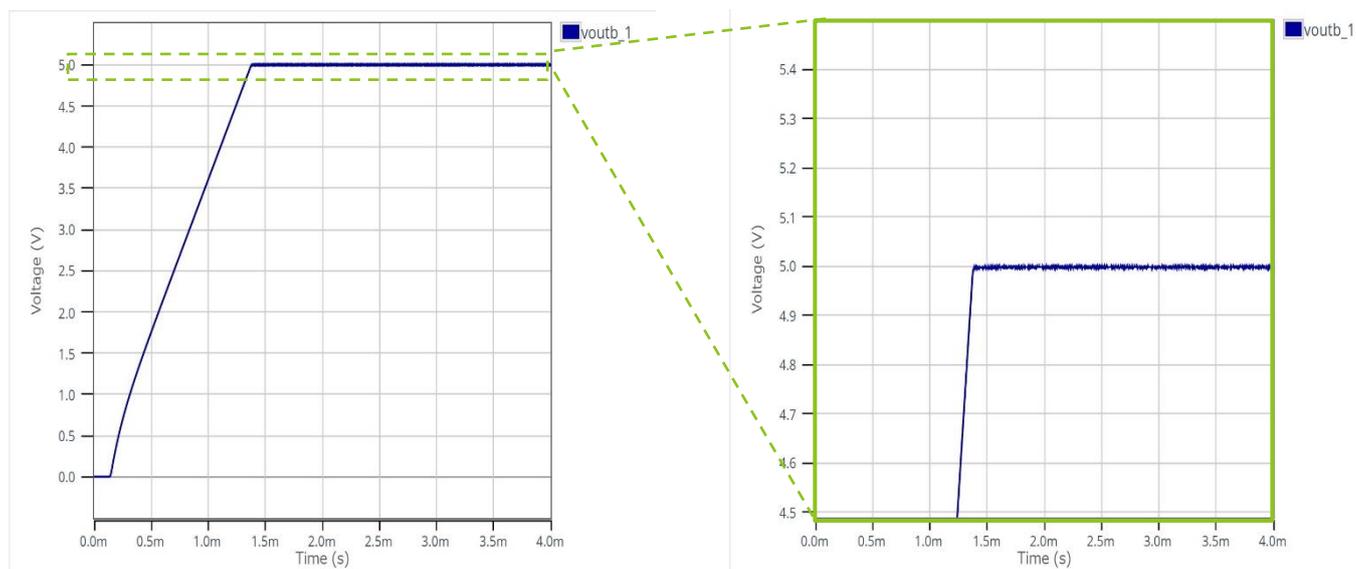
お知らせ シミュレーション時間は約 14 分です。時間はサーバーの使用率により変化します。
Advanced Options は “Balanced” を推奨します。

詳細手順

1. 出力電圧 (つづき)

波形を表示しカーソルで電圧値を読む

1. “Waveform Probe” を回路図の VOUT ヘドレッジ・アンド・ドロップして波形を表示します。
2. 波形を拡大し電圧が安定していることを確認します。
3. カーソルを表示し電圧値を読み、設計パラメータの範囲内であることを確認します。



詳細手順

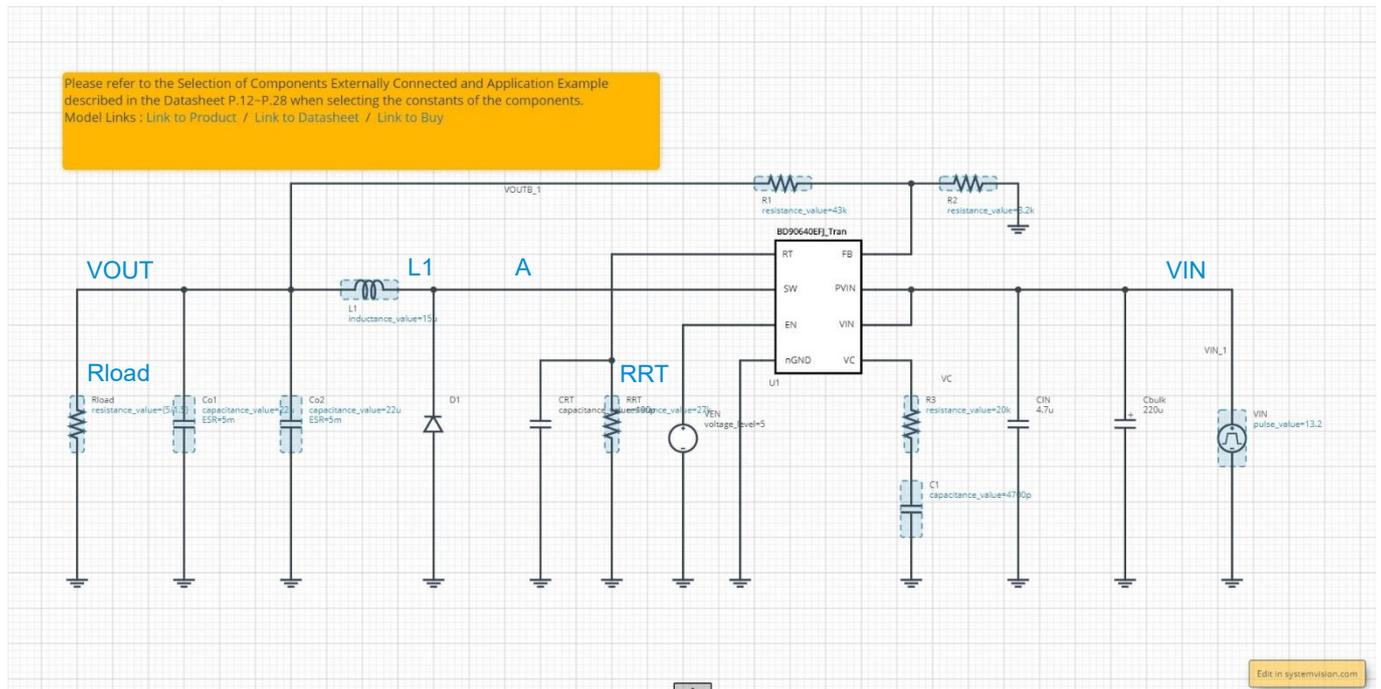
2. スイッチング周波数

使用するシミュレータ : ROHM Solution Simulator

シミュレーションタイプ : Time Domain

設計する外付け部品 : RRT

モニターポイント : 下図 A



スイッチング周波数を設定する

- スイッチング周波数は RRT の値で設定します。

RRT の値は Datasheet の「スイッチング周波数設定抵抗 R_{RT}、C_{RT} の選定」の項に記載されているグラフおよび表をご参照ください。

負荷電流を設定する

- スイッチング周波数は連続動作の方が波形は単純になり読み取りやすいため負荷電流はある程度流すようにします。電流値は次の式で求められます。

$$I_{LOAD} > \frac{(V_{IN} - V_{OUT}) \cdot V_{OUT}}{2 \cdot V_{IN} \cdot f_{SW} \cdot L1} > \frac{(18V - 5V) \times 5V}{2 \times 18V \times 500kHz \times 15\mu H} = 241m \quad [A]$$

ここで I_{LOAD} は設計パラメータの範囲で、上記式を満たす 1.5A に設定します。その負荷電流は負荷抵抗 Rload で設定しますので 3.33Ω (=5V/1.5A)です。

詳細手順

2. スイッチング周波数（つづき）

シミュレーション時間を設定する

- この IC はソフトスタート機能が搭載されているため、その起動時間よりも長い時間を設定する必要があります。スイッチング周波数の収束時間も考慮し、4ms に設定します。

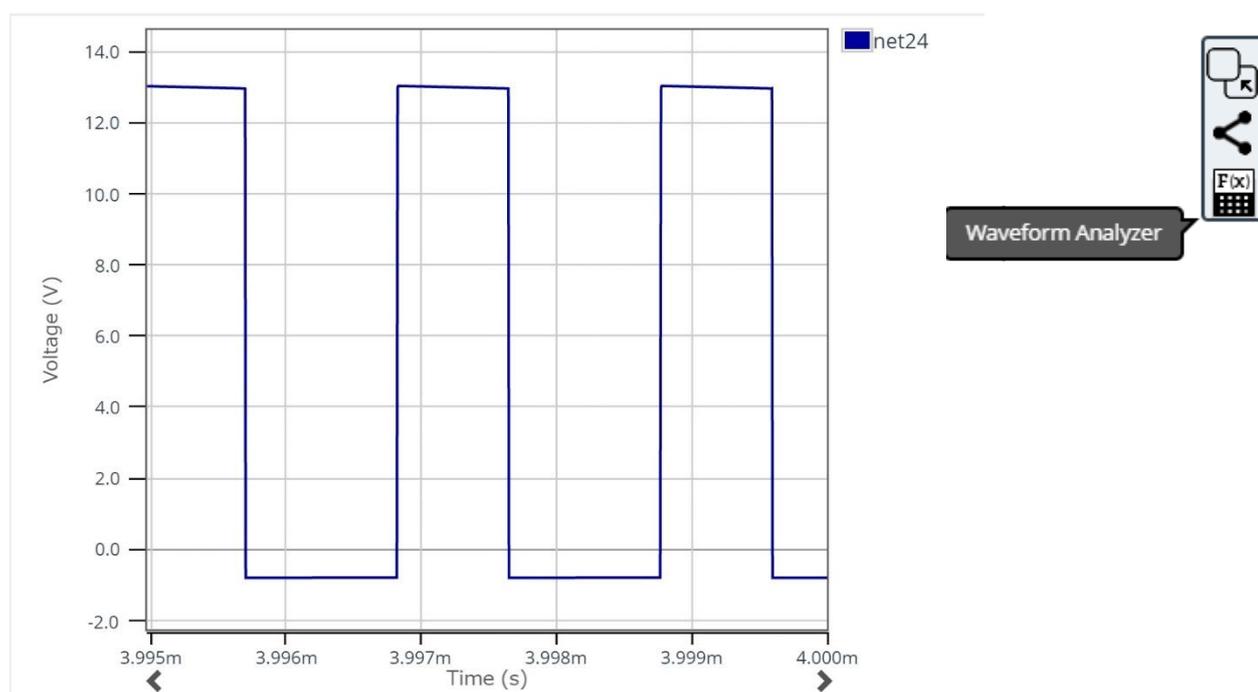
シミュレーションを実行する

- ▶をクリックしシミュレーションを実行し、終了するまで待ちます。

お知らせ シミュレーション時間は約 14 分です。時間はサーバーの使用率により変化します。
Advanced Options は “Balanced” を推奨します。

波形を表示し周波数を読む

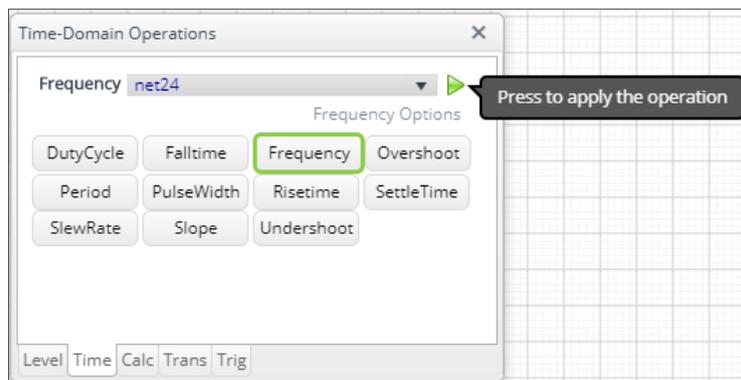
1. “Waveform Probe” を回路図の A 点へドラッグ・アンド・ドロップして波形を表示します。
2. 波形の上にカーソルを移動し、右クリックします。
3. ポップアップメニューから “Plot in Viewer” を選択します。
4. Viewer で終了付近の波形を拡大し、右側の “Waveform Analyzer” のアイコンをクリックします。



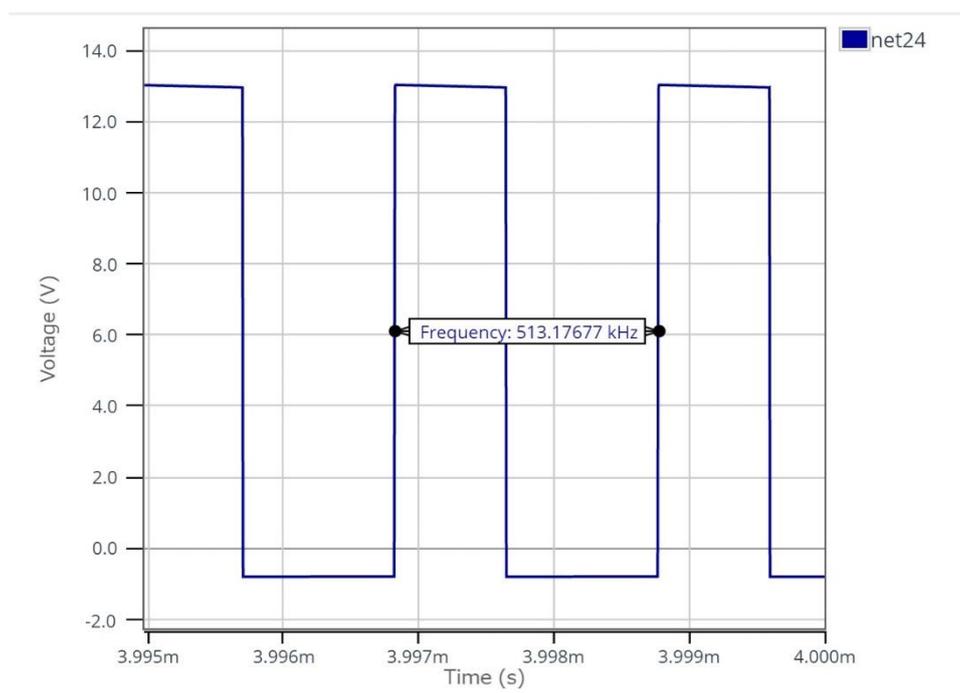
詳細手順

2. スイッチング周波数 (つづき)

5. “Operations window” が起動するので、下側の “Time” タブを選択し、“Frequency” ボタンをクリックします。最後に ▶ をクリックすると波形上に周波数が表示されます。



6. 周波数が設計目標値内であることを確認します。



詳細手順

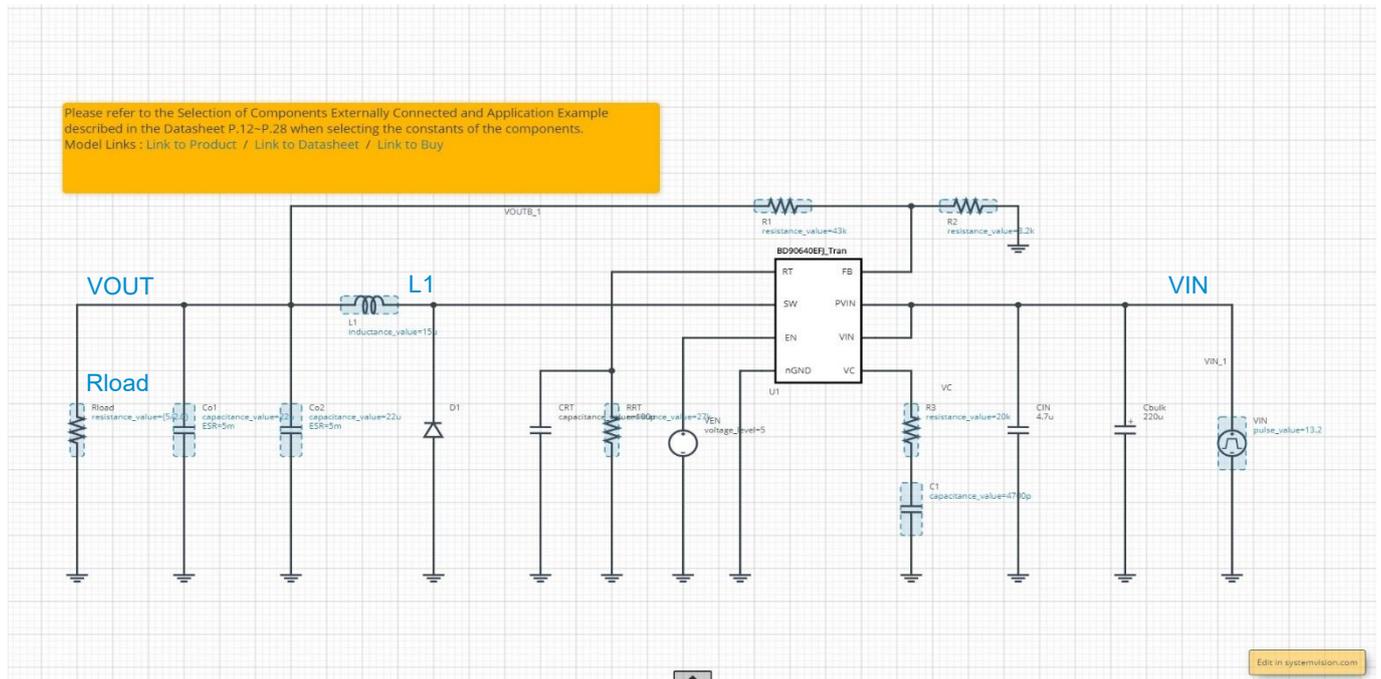
3. インダクタ

使用するシミュレータ : ROHM Solution Simulator

シミュレーションタイプ : Time Domain

設計する外付け部品 : L1

モニターポイント : L1



インダクタンス値を計算する

- インダクタンス値は次の式を使って計算します。インダクタリップル電流は IC の許容電流の 30%程度に設定します。

$$L1 = \frac{(V_{IN(Max)} - V_{OUT}) \cdot V_{OUT}}{V_{IN(Max)} \cdot f_{SW} \cdot \Delta I_L} \quad [H]$$

$V_{IN(Max)}$: 設計パラメータの最大入力電圧

ΔI_L : インダクタリップル電流 = ICの許容電流 × 0.3

設計パラメータの一例で計算すると次のようになります。

$$L1 = \frac{(18V - 5V) \times 5V}{18V \times 500kHz \times 4.0A \times 0.3} = 6.0 \mu H$$

市販品より 6.8μH を選択します。

詳細手順

3. インダクタ (つづき)

不連続動作となる負荷電流を確認する

- 負荷電流が小さいと不連続動作になります。連続動作になる負荷電流の条件は次の式で求めることができます。負荷電流が小さく不連続動作を回避したい場合はインダクタンス値(L1)を大きくする必要があります。

$$I_{LOAD} > \frac{(V_{IN(Max)} - V_{OUT}) \cdot V_{OUT}}{2 \cdot V_{IN(Max)} \cdot f_{SW} \cdot L1} \quad [A]$$

設計パラメータの一例で計算すると次のようになります。この例では負荷電流が 0.53A よりも小さくなると不連続動作へ移行します。

$$I_{LOAD} > \frac{(18V - 5V) \times 5V}{2 \times 18V \times 500kHz \times 6.8\mu H} \quad [A]$$

$$I_{LOAD} > 0.53 \text{ A}$$

設計パラメータの最小負荷電流 0.5A では不連続動作へ移行します。ここでは連続動作する仕様に変更します。余裕を考慮し 0.25A まで連続動作するようにインダクタンス値を大きくします。上式を変形してインダクタンス値を求めます。

$$L1 > \frac{(V_{IN(Max)} - V_{OUT}) \cdot V_{OUT}}{2 \cdot V_{IN(Max)} \cdot f_{SW} \cdot I_{LOAD}} \quad [H]$$

$$L1 > \frac{(18V - 5V) \times 5V}{2 \times 18V \times 500kHz \times 0.25A} \quad [A]$$

$$L1 > 14.4 \mu H$$

市販品より 15μH を選択します。

詳細手順

3. インダクタ (つづき)

インダクタ電流を確認する

- インダクタ電流が過電流保護動作出力スイッチ電流の最小値よりも小さいことを確認します。これらの関係は次の式で表すことができます。

$$I_{SWLIMIT(Min)} \geq I_{OUT(Max)} + \frac{\Delta I_L}{2} \quad [A]$$

$I_{OUT(Max)}$: 設計パラメータの最大出力電流

ΔI_L : インダクタリップル電流

冒頭で計算したインダクタンス値は、インダクタリップル電流を上式のように“ICの許容電流×0.3”とし、6.0μHが得られました。しかし、不連続動作となる負荷電流値を小さくするためにインダクタンス値を15μHに変更しました。そのためインダクタリップル電流は初期計算時よりも小さくなっています。インダクタンス変更後のリップル電流を次式で計算します。

$$\Delta I_L = \frac{(V_{IN(Max)} - V_{OUT}) \cdot V_{OUT}}{V_{IN(Max)} \cdot f_{SW} \cdot L1} \quad [A]$$

$$\Delta I_L = \frac{(18V - 5V) \times 5V}{18V \times 500kHz \times 15\mu H} = 481mA$$

インダクタンス値15μH時のリップル電流が計算できたので、もう一度一番上の条件式が満足できるか下式で確認します。

$$4.00 [A] \geq 2.0A + \frac{481mA}{2} \quad [A]$$

$$4.00 [A] \geq 2.241 [A]$$

この例ではインダクタ電流が過電流保護動作出力スイッチ電流の最小値よりも小さいため設計パラメータで動作可能です。

詳細手順

3. インダクタ（つづき）

サブハーモニック発振防止を確認する

- カレントモード制御の DC/DC コンバータでは、オン・デューティ比が 50%以上にて連続動作している場合に、サブハーモニック発振を起こす場合があります。次式の条件を満たすことでサブハーモニック発振を防止できますので数値を代入して確認します。条件を満たさない場合はインダクタンス値を大きくする必要があります。

$$L1 \geq \frac{2 \cdot D - 1}{2 \cdot (1 - D)} \cdot R_S \cdot \frac{V_{IN(Min)} - V_{OUT}}{m} \quad [H]$$

$$D: \text{スイッチングパルスのオン・デューティ} = \frac{V_{OUT}}{V_{IN(Min)}}$$

$V_{IN(Min)}$: 設計パラメータの最小入力電圧

R_S : 電流帰還係数 = 4.0μ [A/A]

m : スローブ補償電流の傾き = $6 \times 10^{-6} \cdot f_{SW}$

f_{SW} : スwitchング周波数 [Hz]

設計パラメータの一例で計算すると次のようになります。前述の計算でインダクタンス値(L1)は 15 μ H なので問題ありません。

$$L1 \geq \frac{2 \cdot \frac{5V}{6V} - 1}{2 \cdot \left(1 - \frac{5V}{6V}\right)} \times 4\mu A/A \times \frac{6V - 5V}{6 \times 10^{-6} \times 500kHz} \quad [H]$$

$$L1 \geq 2.7 \mu H$$

負荷電流を設定する

- インダクタ電流の最大値を確認するため、負荷電流は設計パラメータの一例にある最大値に設定します。この例では 2.0A ですので、負荷抵抗 Rload は $2.5\Omega (=5V/2.0A)$ になります。

シミュレーション時間を設定する

- この IC はソフトスタート機能が搭載されているため、その起動時間よりも長い時間を設定する必要があります。ソフトスタート時間は 1.38ms なので、出力電圧の収束時間も考慮し、ここでは 4ms に設定します。

詳細手順

3. インダクタ (つづき)

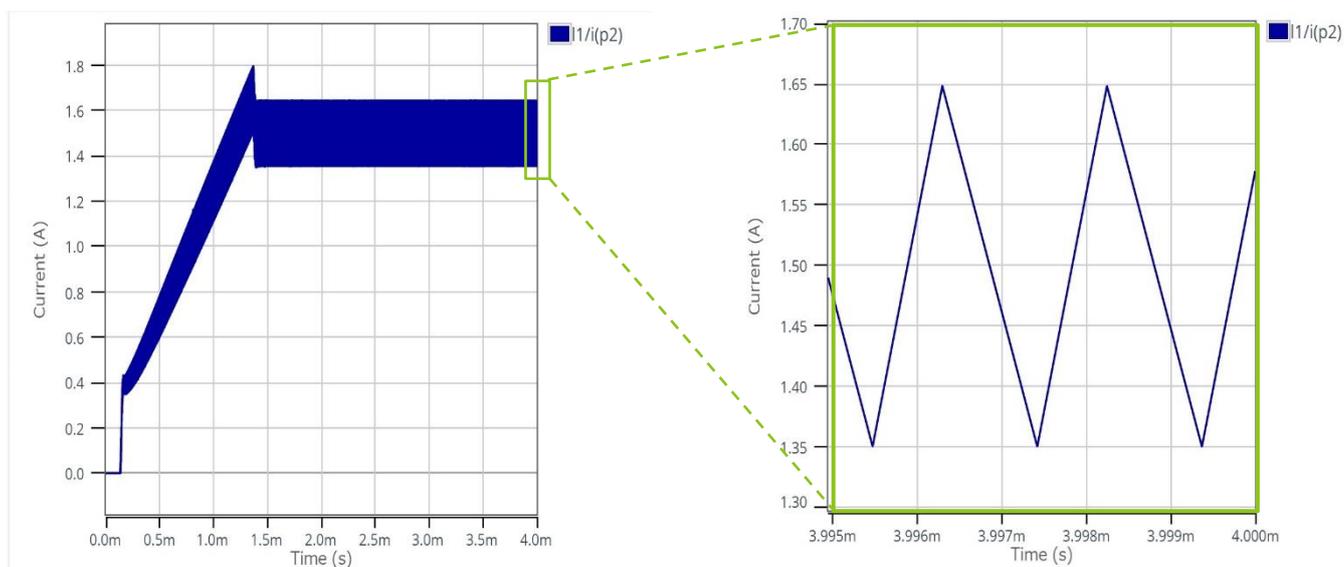
シミュレーションを実行する

- ▶をクリックしシミュレーションを実行し、終了するまで待ちます。

お知らせ シミュレーション時間は約 14 分です。時間はサーバーの使用率により変化します。
Advanced Options は “Balanced” を推奨します。

波形を表示しインダクタ電流を確認する

- “Waveform Probe” を回路図の L1 のシンボル上へドラッグ・アンド・ドロップします。波形ダイアログが開くので、電流波形 “i(p2)” を選択すると波形が表示されます。
- 電流が安定している部分を拡大して、ピーク電流をカーソルで読みます。前に計算した最大出力電流と合っているか確認します。



詳細手順

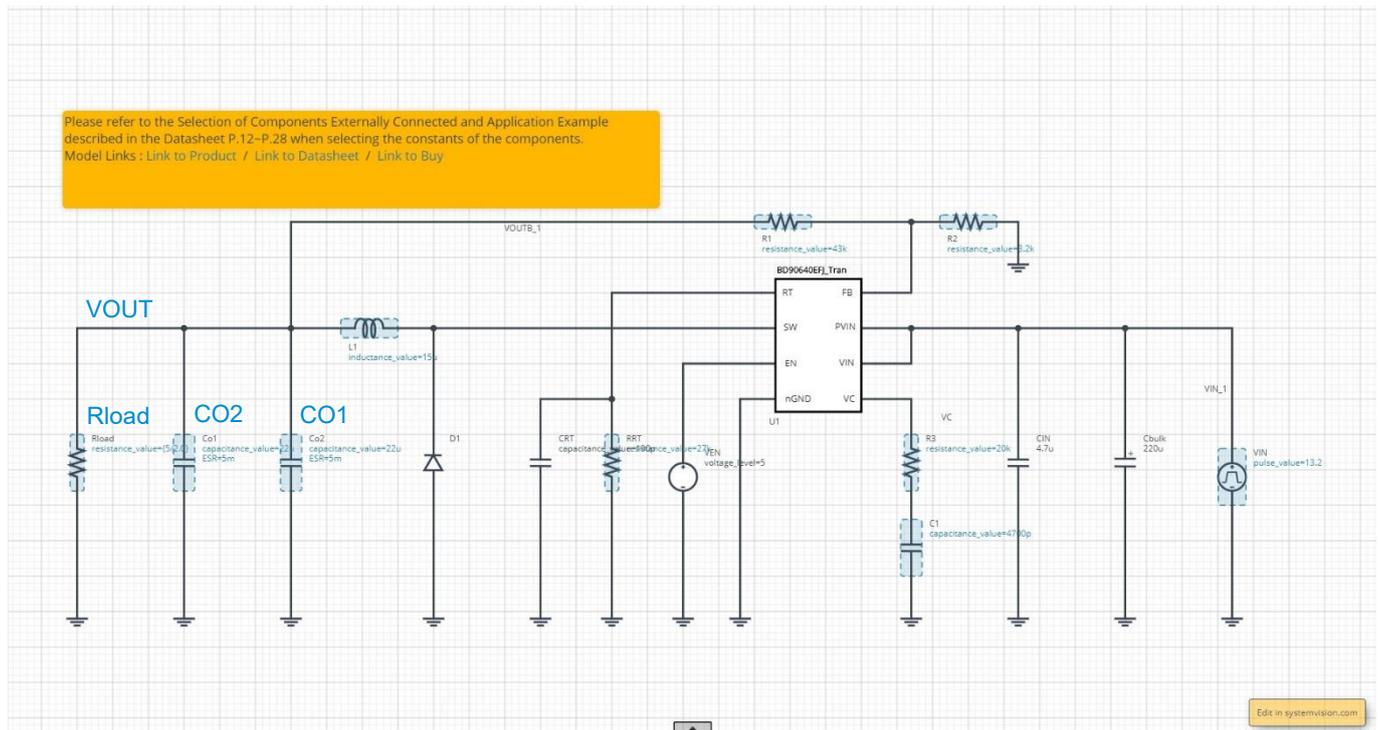
4. 出力コンデンサ

使用するシミュレータ : ROHM Solution Simulator

シミュレーションタイプ : Time Domain

設計する外付け部品 : CO1, CO2

モニターポイント : VOUT、CO1



リップル電圧を計算する

- 出力リップル電圧は次式で計算できます。

$$\Delta V_{PP} = \Delta I_L \cdot ESR + \frac{\Delta I_L}{8 \cdot C_{OUT} \cdot f_{SW}} \quad [V]$$

ただし、

ΔI_L : インダクタリップル電流 [A]

ESR: 出力コンデンサの等価直列抵抗 [Ω]

C_{OUT} : 出力コンデンサ容量 ^(NOTE 1) [F]

f_{SW} : スイッチング周波数 [Hz]

(NOTE 1) 積層セラミックコンデンサ(MLCC)は DC バイアス特性や AC 電圧特性によって公称容量よりも値が低下します。正確にシミュレーションするには、公称容量ではなく実容量を使用してください。本回路では公称容量 22 μ F ではなく、実容量 13.8 μ F を使用します。

詳細手順

4. 出力コンデンサ（つづき）

ここでは出力コンデンサ CO1 と CO2 に実容量 13.8 μ F の MLCC を使用した場合で計算します。ESR はコンデンサ 1 個あたり 5m Ω とし、2 個を並列接続しているため ESR は 1/2 として計算しています。

$$\Delta V_{PP} = 481mA \times \frac{5m\Omega}{2} + \frac{481mA}{8 \times 13.8\mu F \times 2 \times 500kHz} = 5.56 \text{ mV}$$

出力コンデンサのリップル電流を計算する

- 出力コンデンサのリップル電流は次式で計算できます。

$$I_{CO(RMS)} = \frac{\Delta I_L}{\sqrt{12}} \quad [A_{rms}]$$

ただし、

ΔI_L : インダクタリップル電流 [A]

コンデンサには定格リップル電流が規定されています。上式で計算した値を満足するコンデンサを選択する必要があります。前述で計算したインダクタリップル電流を用いて計算すると次のようになります。

$$I_{CO(RMS)} = \frac{481mA}{\sqrt{12}} = 139 \text{ mA}_{rms}$$

この回路では CO1 と CO2 が 2 個並列接続されているため、1 個あたりのリップル電流は上記計算値の 1/2 となり、69.4mA_{rms} になります。

詳細手順

4. 出力コンデンサ（つづき）

出力容量の最大値を確認する

- 出力容量が大きすぎると、起動時の突入電流により過電流保護が動作し、出力が起動しない可能性があります。ここで言う出力容量は、CO1、CO2 以外にも、後段につながった全回路の容量値の合計になります。容量の最大値は下記の条件式を満たす必要があります。

$$C_{OUT} < \frac{T_{SS(Min)} \cdot (I_{SW_LIMIT(Min)} - I_{SW_START(Max)})}{V_{OUT}}$$

ただし、

$$T_{SS(Min)}: \text{ソフトスタート時間の最小値} = \frac{690.8}{f_{SW}} \times 0.819 \quad [s]$$

$$I_{SW_LIMIT(Min)}: \text{過電流保護動作出力スイッチ電流の最小値} = 4.0 \quad A$$

$$I_{SW_START(Max)}: \text{起動時に出力スイッチに流れる負荷電流の最大値} \quad [A]$$

$$V_{OUT}: \text{出力電圧} \quad [V]$$

$$f_{SW}: \text{スイッチング周波数} \quad [Hz]$$

設計パラメータの一例で、起動時に流れる電流が 2.0A だとすると次のように算出できます。後段につながった全回路の容量値の合計は下記の値以下に設定する必要があります。

$$C_{OUT} < \frac{\frac{690.8}{500kHz} \times 0.819 \times (4.0A - 2.0A)}{5V}$$

$$C_{OUT} < 452.6 \quad \mu F$$

負荷電流を設定する

- リプル電圧の最大値を確認するため、設計パラメータの最大負荷電流に設定します。この例では 2.0A ですので、負荷抵抗 Rload は 2.5Ω (=5V/2.0A)になります。

シミュレーション時間を設定する

- この IC はソフトスタート機能が搭載されているため、その起動時間よりも長い時間を設定する必要があります。ソフトスタート時間は 1.38ms なので、出力電圧の収束時間も考慮し、ここでは 4ms に設定します。

詳細手順

4. 出力コンデンサ (つづき)

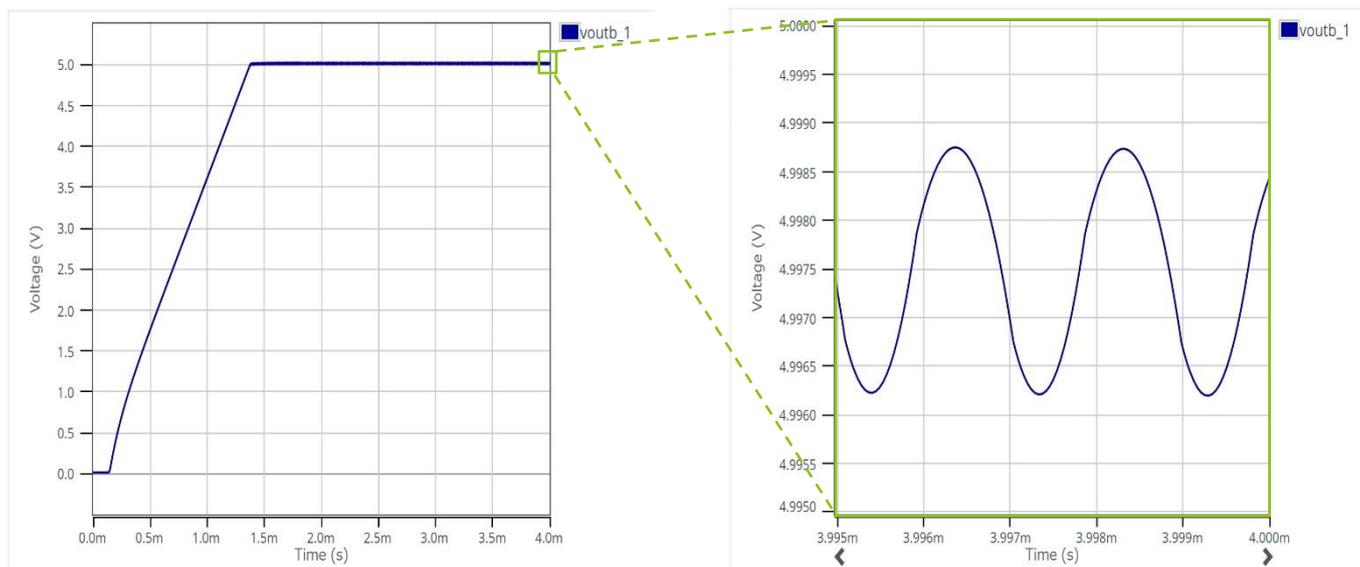
シミュレーションを実行する

- ▶をクリックしシミュレーションを実行し、終了するまで待ちます。

お知らせ シミュレーション時間は約 14 分です。時間はサーバーの使用率により変化します。
Advanced Options は “Balanced” を推奨します。

波形を表示しリップル電圧を確認する

1. “Waveform Probe” を回路図の VOUT ヘドラッグ・アンド・ドロップして波形を表示します。
2. リップル電圧が読み取れるまで波形を拡大します。
3. カーソルを表示し電圧振幅を読みます。

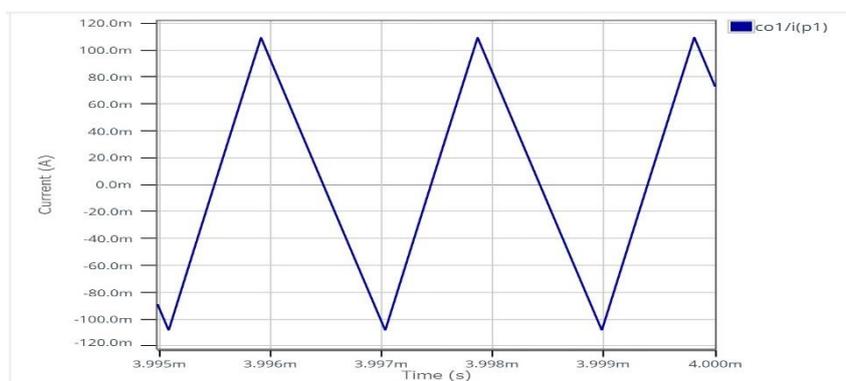


詳細手順

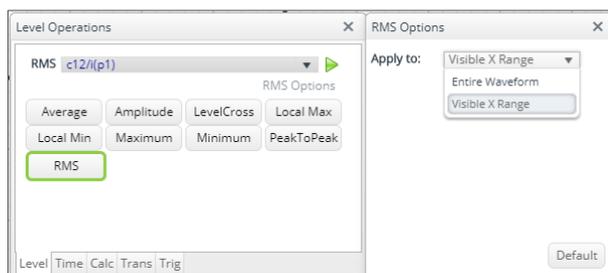
4. 出力コンデンサ（つづき）

波形を表示し出力コンデンサのリプル電流を確認する

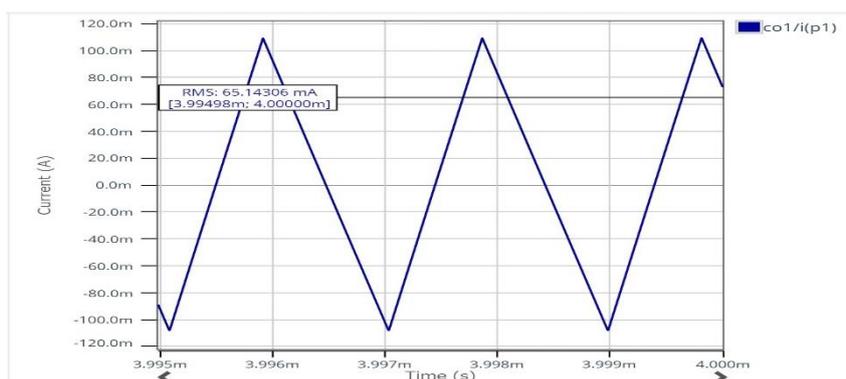
1. “Waveform Probe” を回路図の CO1 のシンボル上へドラッグ・アンド・ドロップします。波形ダイアログが開くので、電流波形 “i(p1)” を選択すると波形が表示されます。
2. 波形の上にカーソルを移動し、右クリックします。
3. ポップアップメニューから「Plot in Viewer」を選択します。
4. Viewer で終了付近の波形を拡大し、右側の「Waveform Analyzer」のアイコンをクリックします。



5. “Operations window” が起動するので、下側の “Level” タブを選択し、“RMS” ボタンをクリックします。次に “RMS Options” をクリックすると “RMS Options” window が右側に展開します。“Apply to:” のプルダウンメニューから “Visible X Range” を選択します。最後に ▶ をクリックすると波形上にリプル電流の実効値が表示されます。



6. リプル電流の実効値が計算値に近いことを確認します。



詳細手順

5. 入力コンデンサ

入力コンデンサのリップル電流を計算する

- 入力コンデンサのリップル電流は次式で計算できます。スイッチング波形のデューティ比が 50%となる条件でリップル電流が最大になります。

$$I_{CIN(RMS)} = I_{OUT(Max)} \cdot \frac{\sqrt{V_{OUT} \cdot (V_{IN(50\%)} - V_{OUT})}}{V_{IN(50\%)}} \quad [A_{rms}]$$

ただし、

$I_{OUT(Max)}$: 設計パラメータの最大出力電流 [A]

$V_{IN(50\%)}$: デューティ比が 50%となる入力電圧 = $\frac{V_{OUT}}{0.5}$ [V]

V_{OUT} : 出力電圧 [V]

コンデンサには定格リップル電流が規定されています。上式で計算した値を満足するコンデンサを選択する必要があります。設計パラメータの一例を用いて計算すると次のようになります。

$$I_{CIN(RMS)} = 2.0A \times \frac{\sqrt{5V \times \left(\frac{5V}{0.5} - 5V\right)}}{\frac{5V}{0.5}} = 1.0 A_{rms}$$

詳細手順

6. ショットキーバリアダイオード

平均整流電流を計算する

- ダイオードには順方向電圧が小さく、逆回復時間が短いショットキーバリアダイオードを使用します。ダイオードに流れる平均整流電流は次式で計算できます。

$$I_{F(AVE)} = I_{OUT(Max)} \cdot \frac{V_{IN(Max)} - V_{OUT}}{V_{IN(Max)}} \quad [A]$$

ただし、

$I_{OUT(Max)}$: 設計パラメータの最大出力電流 [A]

$V_{IN(Max)}$: 設計パラメータの最大入力電圧 [V]

V_{OUT} : 出力電圧 [V]

ダイオードの平均整流電流の絶対最大定格は上記で計算した値の 1.2 倍以上の部品を選択してください。設計パラメータの一例を用いて計算すると次のようになります。

$$I_{F(AVE)} = 2.0A \times \frac{18V - 5V}{18V} = 1.44 \text{ A}$$

ダイオードの平均整流電流の絶対最大定格 > $I_{F(AVE)} \times 1.2$

ダイオードの平均整流電流の絶対最大定格 > 1.73A (= 1.44A × 1.2)

電力損失を計算する

- ダイオードの順方向電圧が小さい方が損失は小さくなり、効率が良くなります。順方向電圧は 0.65V 以下の部品を選択してください。値が大きいものを使用すると IC 内部素子が破壊する可能性がありますので注意してください。ダイオードで発生する損失は次式で計算できます。

$$P_{Diode} = I_{OUT(Max)} \cdot \frac{V_{IN(Max)} - V_{OUT}}{V_{IN(Max)}} \cdot V_F \quad [W]$$

ただし、

$I_{OUT(Max)}$: 設計パラメータの最大出力電流 [A]

$V_{IN(Max)}$: 設計パラメータの最大入力電圧 [V]

V_{OUT} : 出力電圧 [V]

V_F : ダイオードの順方向電圧 [V]

詳細手順

6. ショットキーバリアダイオード（つづき）

設計パラメータの一例を用いて計算すると次のようになります（ V_F が 0.5V の場合）。

$$P_{Diode} = 2.0A \times \frac{18V - 5V}{18V} \times 0.5V = 0.72 \text{ W}$$

出力短絡状態に耐える必要がある場合は、さらに余裕を持った電流と放熱能力が必要です。定格電流は過電流検出値の 1.5 倍程度が必要です。

逆方向電圧を計算する

- 逆方向電圧は入力電圧の最大値の 1.2 倍以上の部品を選択してください。

$$\text{逆方向電圧} > V_{IN(Max)} \times 1.2$$

設計パラメータの一例を用いて計算すると次のようになります。

$$\text{逆方向電圧} > 21.6V \quad (= 18V \times 1.2)$$

詳細手順

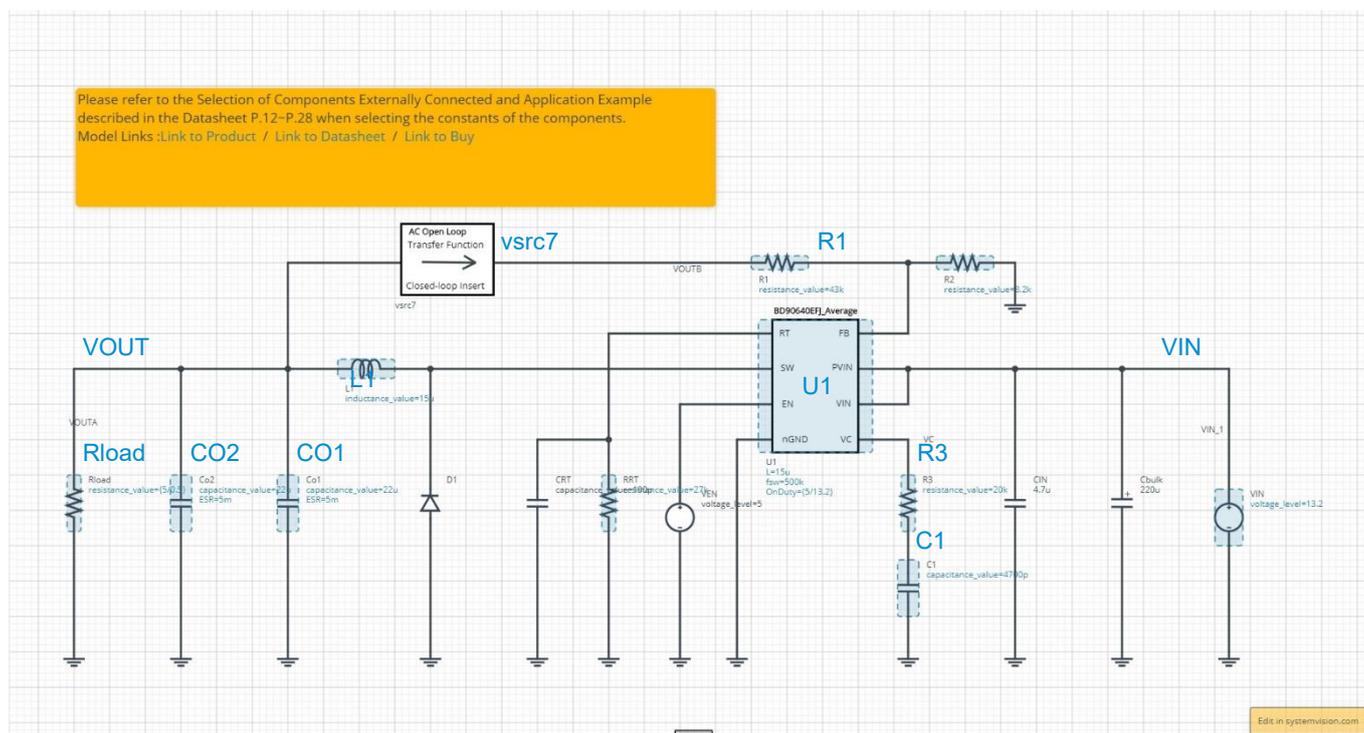
7-1. 位相補償回路：位相マージン、ゲインマージン

使用するシミュレータ：ROHM Solution Simulator

シミュレーションタイプ：Frequency Domain

設計する外付け部品：R3, C1, CO1, CO2

モニターポイント：vsrc7



応答性能を高めるには、ループゲインのゼロクロス周波数 f_c を高くする必要があります。ただし、周波数を高くすると位相遅れにより位相マージンが減少し安定性が低下するため、両者はトレードオフの関係にあります。また、スイッチングレギュレータアプリケーションは、スイッチング周波数によりサンプリングしているため、スイッチング周波数でのゲインを抑える必要があります。そのため設計値としてゼロクロス周波数 f_c はスイッチング周波数 f_{sw} の $1/10$ 以下に設定する必要があります。

位相補償は VC ピンに接続した R3 と C1 で設定します。位相補償により安定性を得る要領は、系にできる 2 つのポール f_{p1} と f_{p2} による位相遅れを、ゼロ f_{z1} による位相進みを挿入してキャンセルすることです。また、本稿では使用していませんが、ゼロクロス周波数を高周波側へ伸ばす場合や、ゼロクロス周波数での位相余裕を改善する目的で、もう一つゼロ f_{z2} を追加し位相進みを挿入することができます。これは帰還抵抗 R1 に並列に C2 を追加することで実現します。この方法は進み補償と呼ばれます。

なおゼロクロス周波数と位相マージン、ゲインマージンは後ほどシミュレーションで確認します。

詳細手順

7-1. 位相補償回路：位相マージン、ゲインマージン（つづき）

各周波数の計算式

- 以上の、2つのポール(位相遅れ)と2つのゼロ(位相進み)の周波数は次式によって求めることができます。

$$f_{P1} = \frac{1}{2\pi \cdot C_{OUT} \cdot R_{load}} \quad [Hz]$$

$$f_{P2} = \frac{G_{EA}}{2\pi \cdot C1 \cdot A_V} \quad [Hz]$$

$$f_{Z1} = \frac{1}{2\pi \cdot R3 \cdot C1} \quad [Hz]$$

$$f_{Z2} = \frac{1}{2\pi \cdot R1 \cdot C2} \quad [Hz]$$

ただし、

$$C_{OUT}: \text{出力コンデンサ容量} \quad (NOTE 1) \quad [F]$$

$$R_{load}: \text{負荷抵抗} \quad [\Omega] = \frac{\text{出力電圧} [V]}{\text{負荷電流} [A]} \quad (1)$$

$$G_{EA}: \text{エラーアンプの相互コンダクタンス} = 270 \quad [\mu A/V]$$

$$A_V: \text{エラーアンプの電圧利得} = 7943 \quad (= 78dB)$$

(NOTE 1) 積層セラミックコンデンサ(MLCC)は DC バイアス特性や AC 電圧特性によって公称容量よりも値が低下します。正確にシミュレーションするには、公称容量ではなく実容量を使用してください。本回路では公称容量 22 μ F ではなく、実容量 13.8 μ F を使用します。

- 設計パラメータの一例の値を使って各周波数を計算します。ここでは出力コンデンサ容量 CO1 と CO2 は公称容量 22 μ F の MLCC を使用し、実容量は 13.8 μ F であるという想定で計算を行います。R_{load} はオームの法則(1)で求められます。fp1 はこの R_{load} によって変化します。R_{load} は最小負荷電流の時、および、最大負荷電流の時で計算すればよいでしょう。

$$\text{負荷電流最小時}(= 0.5A), f_{P1} = \frac{1}{2\pi \cdot C_{OUT} \cdot R_{OUT}} = \frac{1}{2\pi \times 13.8\mu F \times 2 \times \frac{5V}{0.5A}} = 577 \text{ Hz}$$

$$\text{負荷電流最大時}(= 2.0A), f_{P1} = \frac{1}{2\pi \cdot C_{OUT} \cdot R_{OUT}} = \frac{1}{2\pi \times 13.8\mu F \times 2 \times \frac{5V}{2.0A}} = 2.3 \text{ kHz}$$

$$f_{P2} = \frac{G_{EA}}{2\pi \cdot C1 \cdot A_V} = \frac{270}{2\pi \times 4700pF \times 7943} = 1.15 \text{ MHz}$$

$$f_{Z1} = \frac{1}{2\pi \cdot R3 \cdot C1} = \frac{1}{2\pi \times 20k\Omega \times 4700pF} = 1.69 \text{ kHz}$$

$$f_{Z2} = \frac{1}{2\pi \cdot R1 \cdot C2} = \frac{1}{2\pi \times 43k\Omega \times 180pF} = 20.6 \text{ kHz}$$

詳細手順

7-1. 位相補償回路：位相マージン、ゲインマージン（つづき）

ICのプロパティを設定する

- スイッチングレギュレータ IC U1 のプロパティを設定します。
 1. パラメータ L：インダクタ L1 と同じ値を設定します。
 2. パラメータ fsw：前項で決めたスイッチング周波数を設定します。
 3. パラメータ OnDuty：オン・デューティ比のパラメータです。設定する値は “{出力電圧/入力電圧}” です。

シミュレーション周波数を設定する

- ボード線図の全容が観測できるように、“Start Frequency”を 0.01 Hz に、“End Frequency”を 1Meg Hz に設定します。

シミュレーションを実行する

- ▶をクリックしシミュレーションを実行し、終了するまで待ちます。

お知らせ シミュレーション時間は約 20 秒です。時間はサーバーの使用率により変化します。
Advanced Options は “Balanced” を推奨します。

詳細手順

7-1. 位相補償回路：位相マージン、ゲインマージン（つづき）

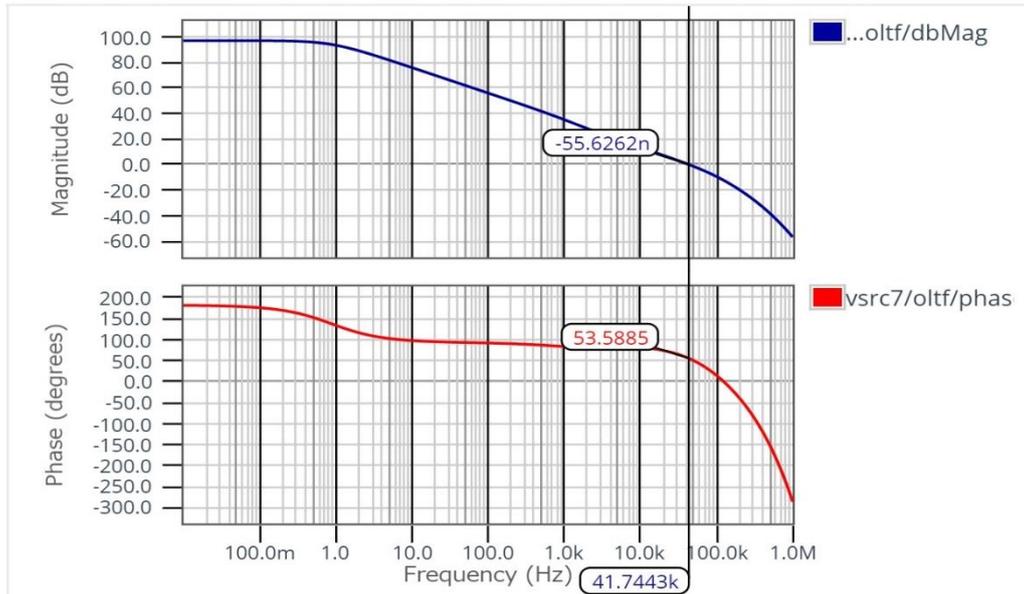
特性を表示し値を確認する

1. 特性は初期画面に表示されているグラフへ、振幅と位相特性が描画されます。もしグラフを閉じてしまった場合は次の手順で表示します。
 - a. “Waveform Probe” を回路図の vsrc7 のシンボル上へドラッグ・アンド・ドロップします。
 - b. 波形ダイアログが開くので、フォルダ vsrc7、oltf と進み、dbMag を選択すると振幅特性が表示されます。
 - c. グラフの左下にあるプローブシンボルをもう一度 vsrc7 のシンボル上へドラッグ・アンド・ドラッグします。
 - d. 波形ダイアログが開くので、フォルダ vsrc7、oltf と進み、phase を選択すると位相特性が表示されます。
2. グラフ上で右クリックし、ポップアップメニューから「Display Mode」の「Multi Trace」を選択します。上のグラフに振幅特性、下に位相特性が表示されます。
3. グラフ上で右クリックし、ポップアップメニューから「Add Cursor」を選択します。
4. カーソルが表示されるので、振幅特性がゼロとなる点へカーソルを移動します。実際はシミュレーションの分解能の制限でゼロに最も近い点になります。
5. 位相特性のカーソル値を読みます。これが位相マージンの値です。
6. 周波数軸のカーソル値を読みます。これがゼロクロス周波数です。

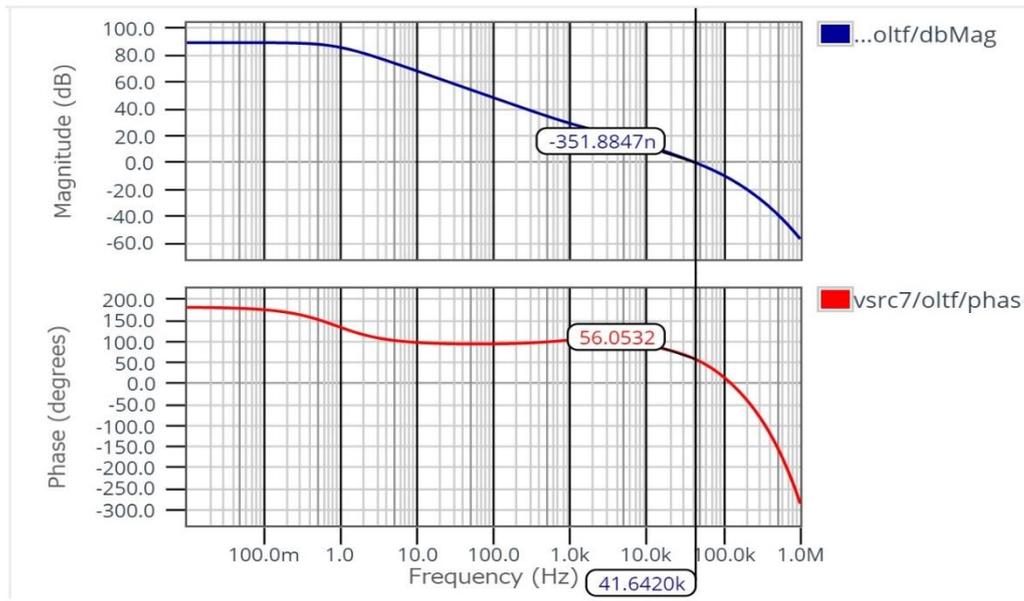
詳細手順

7-1. 位相補償回路：位相マージン、ゲインマージン（つづき）

ゼロクロス周波数と位相マージン、負荷電流最小時(=0.5A)



ゼロクロス周波数と位相マージン、負荷電流最大時(=2.0A)

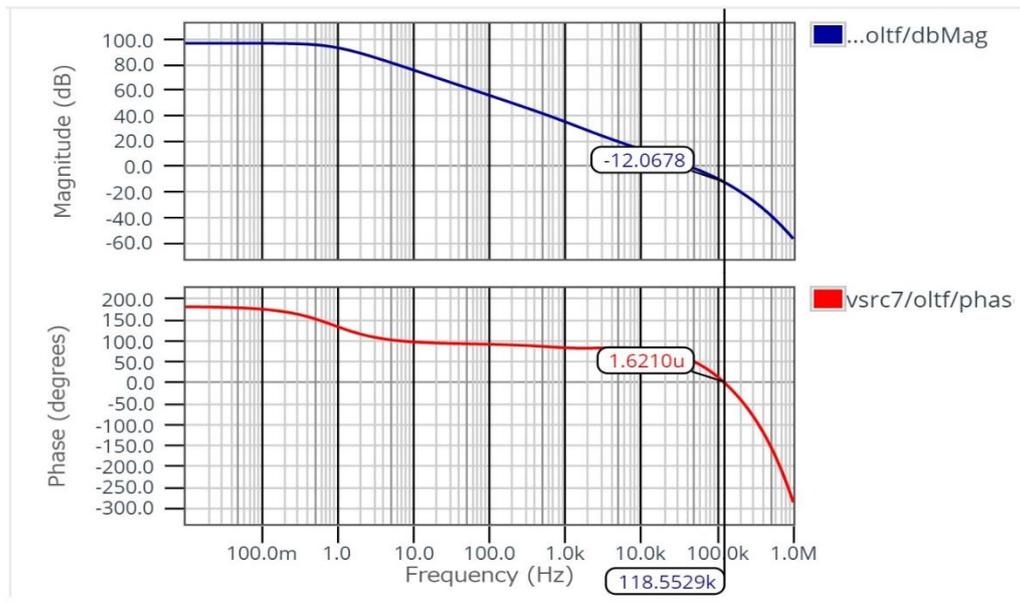


詳細手順

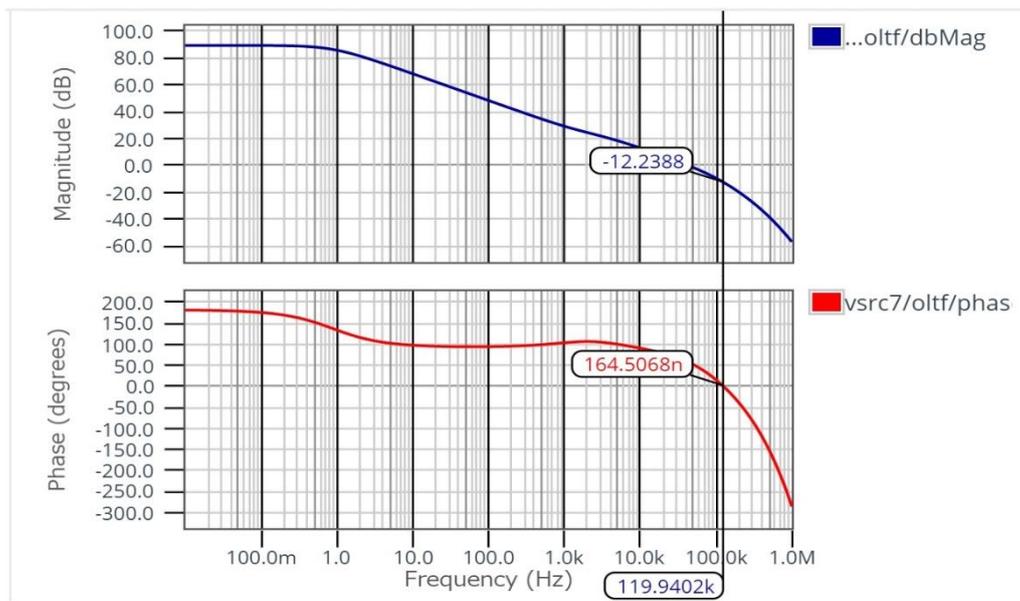
7-1. 位相補償回路：位相マージン、ゲインマージン（つづき）

7. 次にカーソルを、位相特性がゼロとなる点へ移動します。実際はシミュレーションの分解能の制限でゼロに最も近い点になります。
8. 振幅特性のカーソル値を読みます。これがゲインマージンの値です。

ゲインマージン、負荷電流最小時(=0.5A)



ゲインマージン、負荷電流最大時(=2.0A)



詳細手順

7-1. 位相補償回路：位相マージン、ゲインマージン（つづき）

設計パラメータの一例から安定動作の目安を確認する

- ポールやゼロの周波数が次の式を満たす場合、安定動作しているといえます。

$$1. 0.5 f_{p1} \leq f_{z1} \leq 5 f_{p1}$$

負荷電流最小時(= 0.5A)、 $288\text{Hz} \leq 1.69\text{kHz} \leq 2.88\text{Hz}$

負荷電流最大時(= 2.0A)、 $1.15\text{kHz} \leq 1.69\text{kHz} \leq 11.5\text{kHz}$

目安の条件を満たしていることが確認できました。より詳細には、次項目の 3 式を満たす事ができれば最終的に安定動作するといえます。

参考までに f_{z2} を挿入した場合を想定します。

$$2. 0.5 f_c \leq f_{z2} \leq 2 f_c$$

負荷電流最小時(= 0.5A)、 $20.9\text{kHz} \leq 20.6\text{kHz} \leq 83.5\text{kHz}$

負荷電流最大時(= 2.0A)、 $20.8\text{kHz} \leq 20.6\text{kHz} \leq 83.3\text{kHz}$

僅かに上記式を満たせませんでした。定数の見直しをすればよいでしょう。

設計パラメータの一例から安定動作の要件を確認する

- 設計パラメータの一例の値を使って、次に示す要件を満たしているか確認します。満たしていれば安定動作していると判断できます。

$$1. \text{ゼロクロス周波数 } f_c < \frac{\text{スイッチング周波数 } f_{sw}}{10}$$

負荷電流最小時(= 0.5A)、 $41.7\text{kHz} < 50\text{kHz}$

負荷電流最大時(= 2.0A)、 $41.6\text{kHz} < 50\text{kHz}$

要件を満たしていることが確認できました。

$$2. \text{位相マージン：代表値 } 45^\circ \text{以上、最悪値 } 30^\circ \text{以上であること}$$

負荷電流最小時(=0.5A)、 $53.6^\circ > 30^\circ$

負荷電流最大時(=2.0A)、 $56.1^\circ > 30^\circ$

要件を満たしていることが確認できました。

$$3. \text{ゲインマージン：代表値 } -10\text{dB} \text{以下、最悪値 } -6\text{dB} \text{以下であること}$$

負荷電流最小時(=0.5A)、 $-12.1\text{dB} < -6\text{dB}$

負荷電流最大時(=2.0A)、 $-12.2\text{dB} < -6\text{dB}$

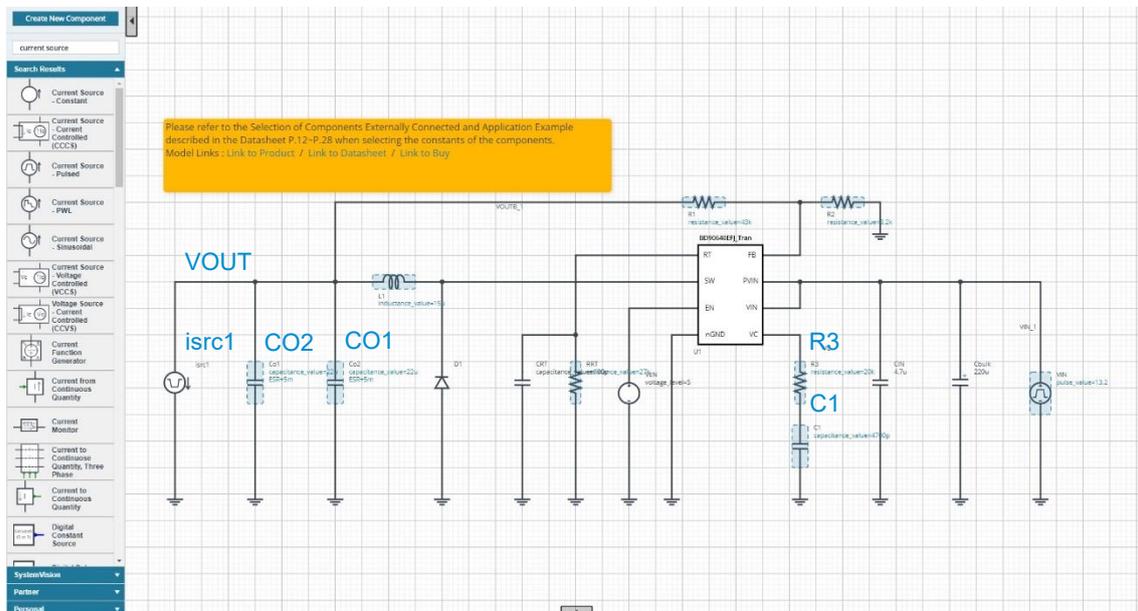
要件を満たしていることが確認できました。

詳細手順

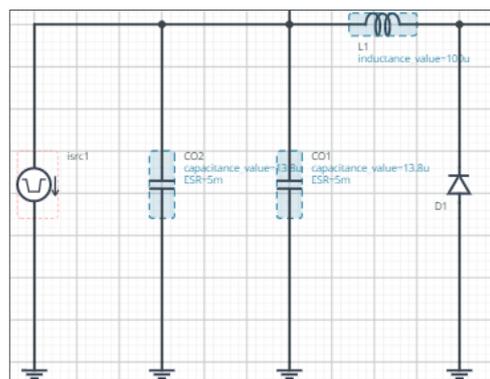
7-2. 位相補償回路：負荷過渡応答（つづき）

回路図を変更する

- 各素子の定数が初期値になっていますので、必要に応じて、前に設計した値に変更します。
- 負荷抵抗 Rload を可変電流源に変更します。
 1. SystemVision[®]Cloud へ移行すると回路図の左側に関連のコンポーネントが表示されます。
 2. サーチコンポーネントフレームに“current source”と入力すると電流源のリストが表示されます。
 3. Rload を選択して、delete キーを押して削除します。
 4. “Current Source – Pulsed”を Rload のあった場所にドラッグ・アンド・ドロップします。



5. 「Current Source – Pulsed」は初期状態だと GND から IC に向かって電流が流れるようになっています。測定に合わせ IC から GND に電流を流すには電流源を選択したときに現れる「Flip Vertical」を選択してください。（もしくは、向きはそのままに、プロパティへの入力をマイナスとしても良いでしょう。）

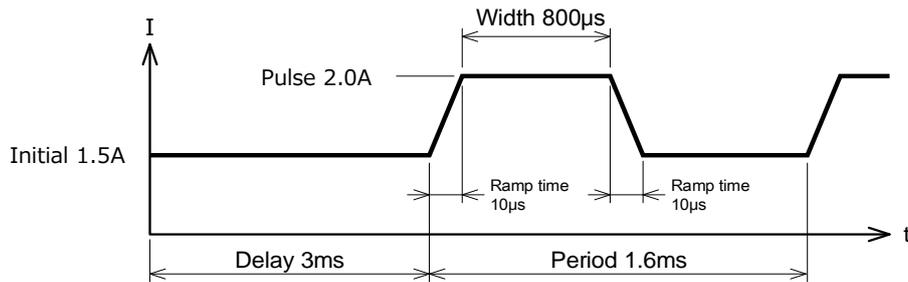


詳細手順

7-2. 位相補償回路：負荷過渡応答（つづき）

負荷電流を設定する

- 過渡的に変化させる負荷電流は前で配置した電流源 isrc1 で設定します。シンボルをダブルクリックしてプロパティを表示し値を入力します。設定例を以下に示します。



負荷電流の一例

プロパティの値

Property Editor	
Current Source - Pulsed	
Label	isrc1
INITIAL_VALUE	1.5 A
PULSE_VALUE	2.0 A
RAMPTIME_INITIAL_TO_PULSE	10e-6 sec
RAMPTIME_PULSE_TO_INITIAL	10e-6 sec
START_DELAY	3e-3 sec
PULSE_WIDTH	800e-6 sec
PERIOD	1.6e-3 sec
AC_MAGNITUDE	0.0 A
AC_PHASE	0.0 degree

詳細手順

7-2. 位相補償回路：負荷過渡応答（つづき）

シミュレーション時間を設定する

- IC はソフトスタート時間 13.8ms(RRT=27kΩ)で実行され、その後、電子負荷による出力変動を確認するため 4ms に設定します。

シミュレーションを実行する

- ▶をクリックしシミュレーションを実行し、終了するまで待ちます。

お知らせ シミュレーション時間は約 12 分です。時間はサーバーの使用率により変化します。
Advanced Options は “Balanced” を推奨します。

波形を表示し負荷変動電圧を確認する

1. “Waveform Probe” を回路図の VOUT ヘドラッグ・アンド・ドロップして電圧波形を表示します。
2. i (p1)(「Current Source – Pulsed」を上下反転「Flip Vertical」させていない場合は i (p2))をリストから選択してください。
3. 負荷変動を測定するには、x 軸を 2.8ms から 4ms 程度を、y 軸は 4.9V から 5.1V 程度で拡大してください。
4. グラフ上で右クリックしてカーソルを追加します。
5. 2.8ms 付近の安定状態の出力電圧と、アンダーシュートの最小値、オーバーシュートの最大値にそれぞれカーソルを移動させます。
6. 測定値からアンダーシュート率とオーバーシュート率が求まり、設計パラメータを満たす事が確認できます。

(A) 出力電圧のアンダーシュートは下記の式で求められます。

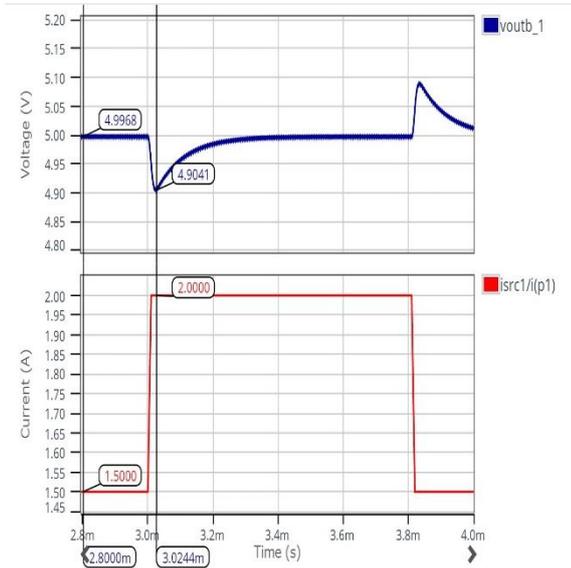
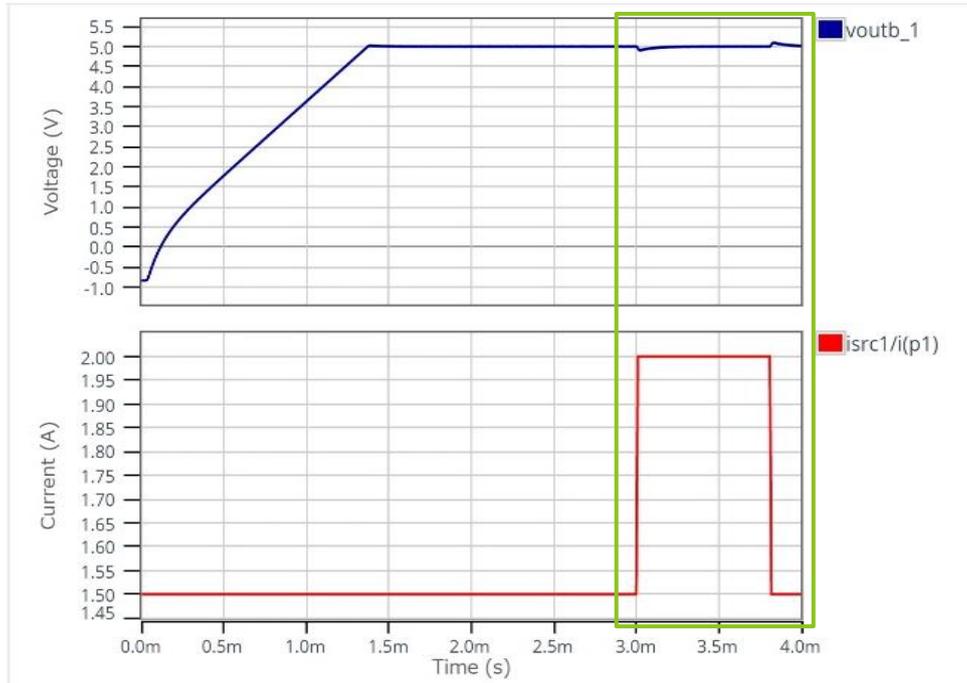
$$(4.9041 \text{ V} - 4.9968 \text{ V})/4.9968 \text{ V} \times 100 = -1.86\%$$

(B) 出力電圧のオーバーシュートは下記の式で求められます。

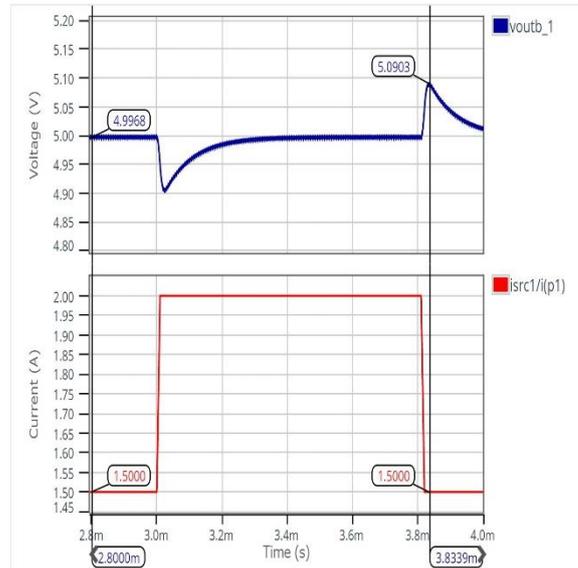
$$(5.0903 \text{ V} - 4.9968 \text{ V})/4.9968 \text{ V} \times 100 = +1.87\%$$

詳細手順

7-2. 位相補償回路：負荷過渡応答（つづき）



アンダーシュートの確認



オーバーシュートの確認

詳細手順

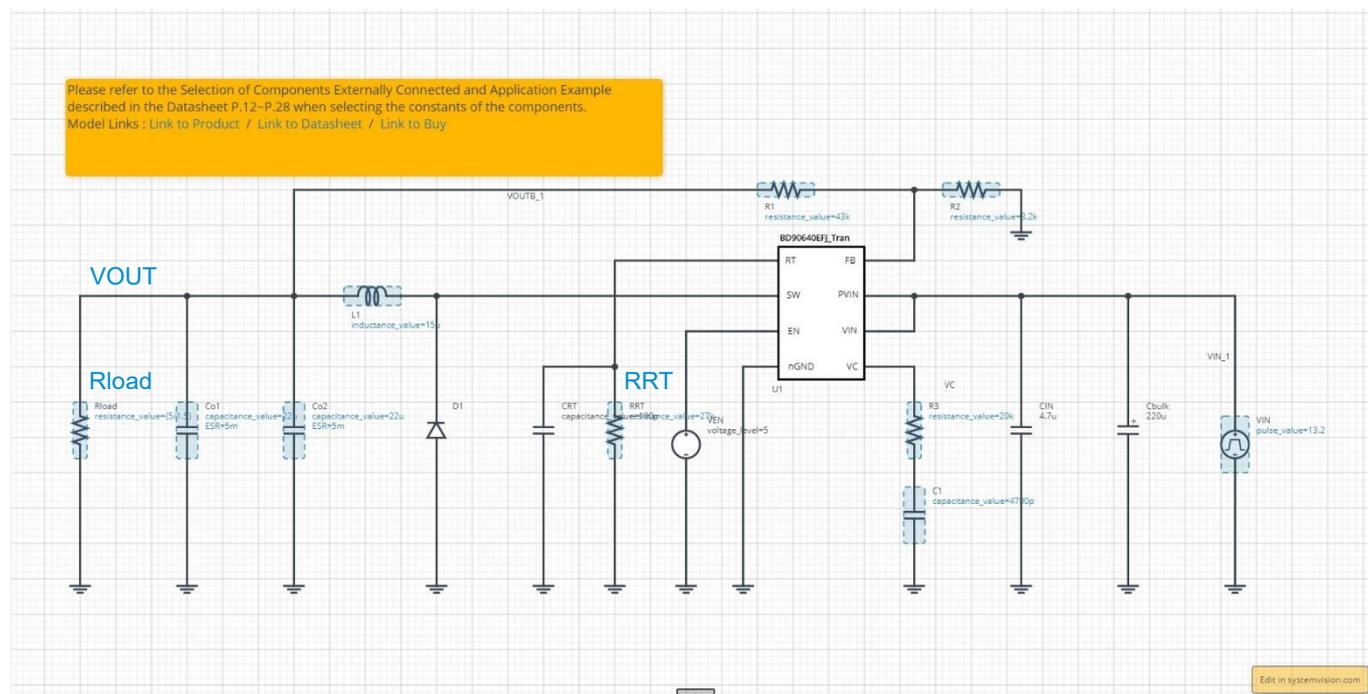
8. ソフトスタート

使用するシミュレータ : ROHM Solution Simulator

シミュレーションタイプ : Time Domain

設計する外付け部品 : RRT

モニターポイント : VOUT



ソフトスタート時間を計算する

- ソフトスタート時間は次式で計算でき、スイッチング周波数で決まります。時間のばらつきは±18.1%です。スイッチング周波数の設定方法は、前述の「スイッチング周波数」の項目を参照してください。

$$T_{SS} = \frac{690.8}{f_{SW}} \quad [s]$$

設計パラメータの一例から計算すると、スイッチング周波数が 500kHz なので 1.38ms になります。

$$T_{SS} = \frac{690.8}{500kHz} = 1.38m \quad [s]$$

詳細手順

8. ソフトスタート (つづき)

負荷電流を設定する

- 負荷電流は負荷抵抗 R_{load} で設定し、次式で計算できます。

$$I_{LOAD} = \frac{V_{OUT}}{R_{load}} \quad [A]$$

負荷電流は設計パラメータの一例の標準値 1.5A に設定します。前式より負荷抵抗は 3.33Ω になります。

$$R_{Load} = \frac{5}{1.5A} = 3.33 \quad [\Omega]$$

シミュレーション時間を設定する

- ソフトスタート時間よりも長い時間を設定する必要があります。ソフトスタート時間は 1.38ms ($RRT=27k\Omega$) ですが、他項目に合わせ 4ms に設定します。

シミュレーションを実行する

- ▶ をクリックしシミュレーションを実行し、終了するまで待ちます。

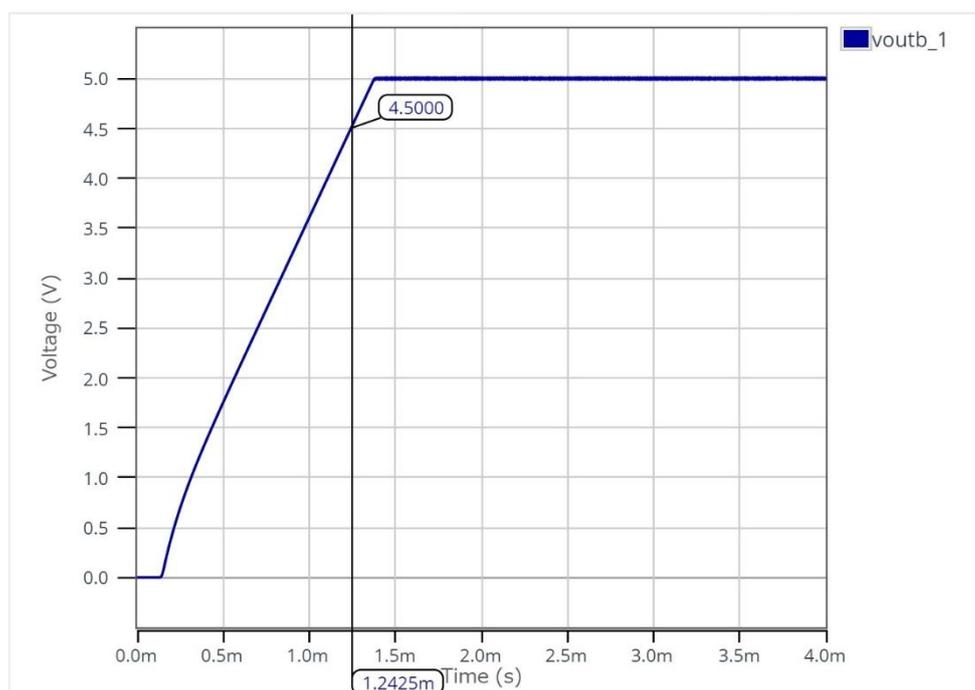
お知らせ シミュレーション時間は約 14 分です。時間はサーバーの使用率により変化します。
Advanced Options は “Balanced” を推奨します。

詳細手順

8. ソフトスタート (つづき)

波形を表示しカーソルで電圧値を読む

1. “Waveform Probe” を回路図の VOUT ヘッドラッグ・アンド・ドロップして波形を表示します。
2. カーソルを表示し、出力電圧の 90%となる点へ移動します。この例では 4.5V (=5V×0.9) になります。時間値を読み、設計目標値内であることを確認します。



ご 注 意

- 1) 本資料の記載内容は改良などのため予告なく変更することがあります。
- 2) 本資料に記載されている内容は製品のご紹介資料です。ご使用に際しては、別途最新の仕様書を必ずご請求のうえ、ご確認ください。
- 3) ロームは常に品質・信頼性の向上に取り組んでおりますが、半導体製品は種々の要因で故障・誤作動する可能性があります。
万が一、本製品が故障・誤作動した場合であっても、その影響により人身事故、火災損害等が起こらないようご使用機器でのディレーティング、冗長設計、延焼防止、バックアップ、フェイルセーフ等の安全確保をお願いします。定格を超えたご使用や使用上の注意書が守られていない場合、いかなる責任もロームは負うものではありません。
- 4) 本資料に記載されております応用回路例やその定数などの情報につきましては、本製品の標準的な動作や使い方を説明するものです。
したがって、量産設計をされる場合には、外部諸条件を考慮していただきますようお願いいたします。
- 5) 本資料に記載されております技術情報は、製品の代表的動作および応用回路例などを示したものであり、ロームまたは他社の知的財産権その他のあらゆる権利について明示的にも黙示的にも、その実施または利用を許諾するものではありません。上記技術情報の使用に起因して紛争が発生した場合、ロームはその責任を負うものではありません。
- 6) 本資料に掲載されております製品は、耐放射線設計はなされていません。
- 7) 本製品を下記のような特に高い信頼性が要求される機器等に使用される際には、ロームへ必ずご連絡の上、承諾を得てください。
・輸送機器（車載、船舶、鉄道など）、幹線用通信機器、交通信号機器、防災・防犯装置、安全確保のための装置、医療機器、サーバー、太陽電池、送電システム
- 8) 本製品を極めて高い信頼性を要求される下記のような機器等には、使用しないでください。
・航空宇宙機器、原子力制御機器、海底中継機器
- 9) 本資料の記載に従わないために生じたいかなる事故、損害もロームはその責任を負うものではありません。
- 10) 本資料に記載されております情報は、正確を期すため慎重に作成したのですが、万が一、当該情報の誤り・誤植に起因する損害がお客様に生じた場合においても、ロームはその責任を負うものではありません。
- 11) 本製品のご使用に際しては、RoHS 指令など適用される環境関連法令を遵守の上ご使用ください。
お客様がかかる法令を順守しないことにより生じた損害に関して、ロームは一切の責任を負いません。
本製品の RoHS 適合性などの詳細につきましては、セールス・オフィスまでお問合せください。
- 12) 本製品および本資料に記載の技術を輸出又は国外へ提供する際には、「外国為替及び外国貿易法」、「米国輸出管理規則」など適用される輸出関連法令を遵守し、それらの定めにしたがって必要な手続を行ってください。
- 13) 本資料の一部または全部をロームの許可なく、転載・複写することを堅くお断りします。



ローム製品のご検討ありがとうございます。
より詳しい資料やカタログなどご用意しておりますので、お問合せください。

ROHM Customer Support System

<http://www.rohm.co.jp/contact/>