

**PSIMチュートリアル**  
**共振コンバータ (LLC) の設計**  
**(Power Supply Design Suite)**

Mywayプラス株式会社

## デザイン・スイートによる LLC コンバータの設計

### 1、概要

PSIM のパワー・サプライ設計スイートは、共振型 LLC コンバータ設計のための快適な設計環境を提供します。共振型 LLC コンバータは、非常に高い効率で広い動作範囲にわたってソフト・スイッチング動作を保ちながら、広い入力電圧範囲および負荷レギュレーションを必要とするパワー・エレクトロニクスで広く使用されています。

一方で、共振型 LLC コンバータの最適設計は、動作が非線形であるため、設計には多くの反復計算が含まれるため、算出には非常に時間がかかり簡単な作業ではありません。最適設計をすすめる上で、パワー・サプライ設計スイートを使用すると算出作業は非常に簡単になります。

パワー・サプライ設計スイートは、動作周波数範囲、共振回路の値などの必要な設計パラメータを自動計算し、さまざまなアプリケーションの負荷およびライン制限を算出することができます。パワー・サプライ設計スイートの大きな機能の 1 つは、負荷と入力ラインの両方の制限で正確な周波数範囲を決定する機能があることです。

パワー・サプライ設計スイートは、2 つの設計ツールとフィード・フォワード制御を行うためのルック・アップ・テーブルを提供して、共振型 LLC コンバータおよび、その他の共振型コンバータのための最適な設計補助を行います。

#### ● 定常動作解析・ツール：

定常動作の解析は、時間領域での解析に基づいています。高速定常状態解析とパラメータ最適化のための動作で確認を行っています。

この設計ツールは、回路素子の選択と損失の計算のために、共振波形のピーク値および実効値を出力します。

定常動作状態の波形を極端な場合と最悪の場合の条件で確認して、ソフト・スイッチング動作を確認して、最大直流ゲインと最小周波数を確認することができます。

#### ● 設計カーブ・ツール：

設計カーブ・ツールも、時間領域の解析に基づいています。このツールを使用するとインダクタンス比 ( $K_{ind}$ ) と Q 係数 ( $Q_{rated}$ ) のさまざまな値で、相対周波数にする直流ゲイン、実効値、尖頭値、および平均値の変動を比較することができます。必要な直流ゲインについて、設計カーブ・ツールは周波数の計算値を含む Excel ファイルを自動的に生成します。周波数範囲、共振回路の LC 値、および様々な  $Q_{rated}$  値と  $K_{ind}$  値に対する LLC コンバータを構成するコンポーネントの実効値尖頭値/平均値を出力します。

- ・ フィード・フォワード制御 :

設計ツールは設計のためのカーブと出力波形を瞬時に生成するため、ユーザーは共振コンバーターの最適化を簡単に実行することが出来ます。定常状態解析ツール、デザイン・カーブ・ツール、およびフィード・フォワード制御については、以下で解説いたします。

詳細な回路モデルを使用して LLC 共振コンバーターの設計を簡単にすばやく実行することのできる機能を備えたパワー・サプライ設計スイートは、以下の方法により大きなメリットを提供します。

- ・ 高速な設計手順に沿って、共振コンバーターの設計を実行し最適化できます。
- ・ 高速な定常解析ツールを使用して、様々な動作条件での出力と波形を簡単に高速で出力することが出来ます。
- ・ 定常解析ツールを使用して、境界条件から簡単に連続モードと不連続モード動作を分析することが出来ます。
- ・ 設計カーブ・ツールを使用すると、視覚的に様々なアプリケーションの設計を繰り返し、最適化することが出来ます
- ・ 共振コンバータの最適化されたコンポーネントの選択と設計を実行することを支援し、ソフトウェア/制御エンジニアが制御アルゴリズムを開発することを支援します。

LLC 共振コンバータは、直流ライン、フルブリッジ/ハーフブリッジ電圧源インバーター、LL 共振タンク、トランス、ダイオード・ブリッジ、出力コンデンサ・フィルタ、直流負荷で構成されます。

共振型 LLC コンバータの構造を以下に示します。

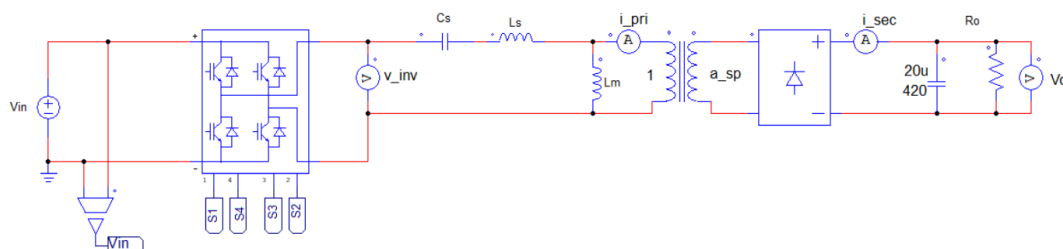


図 1.1 共振型 LLC コンバータの回路

ハーフ・ブリッジ・インバータとフル・ブリッジ・インバータのどちらを選択するかは、電力レベルと入力側の電圧レベルによって選択します。同様に、出力側のハーフ・ブリッジまたはフル・ブリッジ・ダイオード・ブリッジの選択は出力電圧とシステム電力によって選択します。パワー・サプライ設計スイートには、次のデザイン・テンプレートが用意されています。

Full-Bridge Resonant LLC	フル・ブリッジ共振型LLC DC/DCコンバータは固定、可変電圧のアプリケーション用途
Half-Bridge Resonant LLC	ハーフ・ブリッジ共振型LLC DC/DCコンバータは固定、可変電圧のアプリケーション用途
Full-Bridge Resonant LLC-L	フル・ブリッジ共振型LLC-L DC/DCコンバータは共振インダクタLa2を付加した固定、可変電圧のアプリケーション用途

## 2. フル・ブリッジ 共振型 LLC コンバータの設計

デザイン・スイートは、様々なアプリケーションでの LLC 共振タンクの設計と最適化に使用することができます。

設計の例として、フルブリッジ共振 LLC を取り上げます。例題として入力直流電圧 400V / 出力直流電圧 48V のテレコム電源を取り上げます。

コンバータの入力および出力仕様は

Input:  $V_{in\_rated} = 400V$ ;  $V_{in\_min} = 320V$ ;  $V_{in\_max} = 480V$ ;  $f_{res} = 200\text{ kHz}$

Output:  $V_{o\_rated} = 48V$ ;  $V_{o\_min} = 42V$ ;  $V_{o\_max} = 58V$ ;  $P_{o\_rated} = 1kW$

入力電圧は直流 400V、変動は 20%とします。出力電圧の変動範囲は直流 42V~58V で、定格出力直流電圧は 48V です（一般的なテレコム電源の仕様要件）。

共振型 LLC コンバータの設計の重要なパラメータとして、Q 値、k（インダクタンス比）、および動作周波数範囲の最適値を見つけ出すことです。Q 値と k（インダクタンス比）の最適化された値が決定されると、共振成分の値を計算することができます。

まず、中程度の Q 値 ( $Q_{rated}$ ) とインダクタンス比 ( $K_{ind}$ ) の初期値を選択し、Design Suite の設計ツールを使用して設計を微調整することで最適化された値を得ることが出来ます。例として、初期値を次のように選択します。

$Q_{rated} = 0.5$

$K_{ind} = 5$

パワー・サプライ設計スイートは次の手順に沿って実行します。

- ・ 入力パラメータ・パネルで、入力仕様、出力要件、および動作条件を設定します。
- ・ 定常動作解析ツールで、コンバータの定常状態の波形、出力値、境界条件、および極端な場合の動作条件を分析します。
- ・ 設計カーブで、パラメータの最適化とデザインの比較を行います。
- ・ パラメータ・ファイルを更新し、フィード・フォワード制御を使用して回路図を実行し、時間領域シミュレーションを通じて設計を検証します。

次に、設計の手順とその機能について詳しく説明します。

### ステップ 1：入力パラメータの設定

デザイン・スイート・テンプレートを実行するには、以下の手順に従って実行します。

PSIM で、[ Design Suit ] >> [ Power Supply Design Suite ] に移動し、[ Full Bridge

Resonant LLC ]を選択します。

図 2.1 に示すようなダイアログ・ウィンドウが表示されます。 [ Unpack ]をクリックして、ファイルをデフォルトのフォルダーに解凍します。別のフォルダに解凍するには、 [ Change Folder ] をクリックして

フォルダ、またはフォルダ名を入力します。

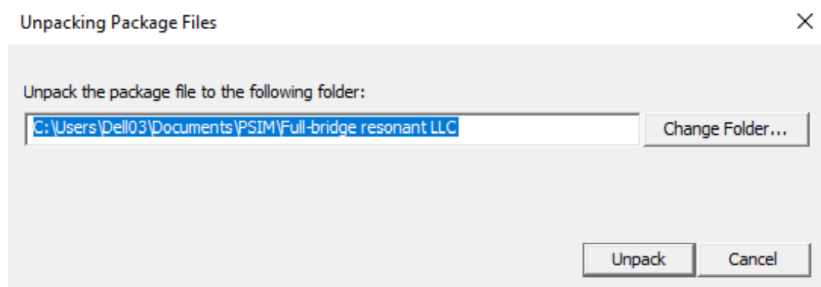


図 2.2 解凍ファイルの表示

ファイルが解凍されると、テンプレートの回路が次のように表示されます。

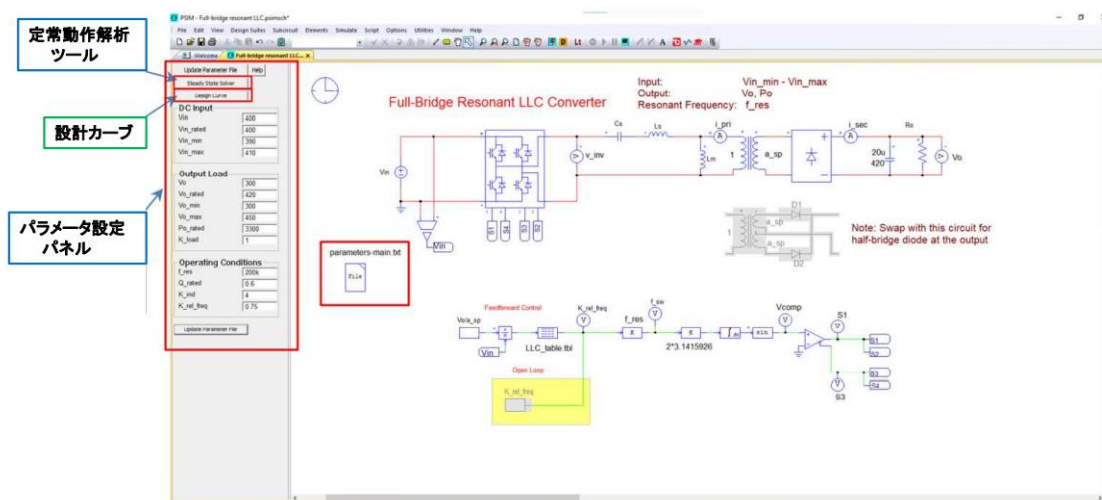


図 1 : 解凍されたファイルの共振型 LLC フル・ブリッジの回路

回路図の左側にはパラメータパネルがあります。これにより、入力設計仕様を定義し、定常動作解析ツールと設計カーブツールを起動することができます。

回路図の左側にあるパラメータ・ファイルには、回路の計算されたパラメータ値が保存されています。

## 入力パラメータ

・ Vin	動作入力電圧	400
・ Vin_rated	定格入力電圧	400
・ Vin_min	最小入力電圧	320
・ Vin_max	最大入力電圧	480

## 定格出力

・ Vo	動作出力電圧	48
・ Vo_rated	定格出力電圧	48
・ Vo_min	最小出力電圧	42
・ Vo_max	最大出力電圧	58
・ Po_rated	定格出力電力	1000
・ K_load	負荷指数	1

## 動作環境

・ f_res	共振周波数	200k
・ Q_rate	Q 指数	0.5
・ k_ind	直列-並列インダクタ の比 Lm / Ls	5
・ k_rel_freq	相対周波数指数	0.75

Q は次のように定義されます。

$$Q = \frac{Z_o}{R} = \sqrt{\frac{L_s}{C_s}}$$

Ls : 直列共振のインダクタンス

Cs : 直列共振のキャパシタンス

R はトランスの一次側を基準とした負荷抵抗です。

K\_load 負荷率は 0 から 1 の間で、1 は 100% の負荷を意味し、0 は無負荷を意味します。

相対周波数係数は次のように定義されます。

$$K_{rel\_freq} = f_{sw} / f_{res}$$

f\_sw は動作スイッチング周波数

回路図では、トランスの巻数比 a\_sp は次のように定義されています。

$$a_{sp} = \frac{(V_{o\_max} + V_{o\_min})}{(2 * V_{in\_rated})} = \frac{N_s}{N_p}$$

選択した直流入力電圧範囲 320V-480V、直流出力電圧 42V-58V の設計例では、次のように、選択した巻数比に基づいて、出力レギュレーションに必要な直流ゲインの範囲を計算できます。

$$G_{dc\_max} = [V_{o\_max} / (V_{in\_min} * a_{sp})]$$

この例では、G\_dc\_max の値は 1.45 です。

$$G_{dc\_min} = V_{o\_min} / (V_{in\_max} * a_{sp})$$

この例では、 $G_{dc\_min}$  の値は 0.7 です。

出力要件、入力仕様、および動作条件を入力すると、共振タンク値、出力負荷、動作スイッチング周波数、およびトランスの巻数比が算出されます。この出力計算のパラメータ・ファイルには、標準の数式が含まれています。

必要な直流ゲインの範囲は 1.45 ~ 0.70 であるため、Steady State Solver tool または Design Curve tool を使用して、最初に選択した Q 値 0.5 および k (インダクタンス比) 5 で相対周波数範囲が 0.62 ~ 1.61 であることがすぐにわかります。

次に、Q と k (インダクタンス比) を変化させて、周波数範囲の変化、実効値の変化、ピーク値の変化を観察することができます。Q と k (インダクタンス比) の最終的な最適値を見つけるための変化、および出力条件の変化から Q と k の値を定めます。

設計の最適化には、狭い動作周波数範囲、低い循環電流 ( $I_{Lm}$ )、低く一定な実行値 ( $I_{sw\_rms}$ )、低い軽負荷損失、低いピーク値が必要です。 ( $I_{sw\_peak}, I_{diode\_peak}$ )、ターンオフ損失が少ない ( $I_{Cs}(0)$  が低い)、効率の曲線が平坦であるなどの条件が満たされる。最適化の目的を選択し、ツールを使用してそれに応じて進めることができます。この設計例については、次のセクションで詳しく説明します。

なお、上記の負荷抵抗 R は、時間領域に基づく設計であるため、近似なしの実際の抵抗値です。従来の周波数近似法 (FHA) で使用されている等価抵抗  $R_e = 8/\pi^2 R_o$  は時間領域法では無効です。実際の抵抗 R は、FHA 法で連続導通モードでのダイオード・ブリッジ電流の近似値から  $R_e$  に変更されます。共振型 LLC は不連続導モードでダイオード・ブリッジ電流を持つ可能性があるため、FHA 法では、波形の高調波成分が原因で、共振周波数から離れて動作するときに大きなエラーが発生する可能性があります。実際、共振型 LLC の最も有用な動作モードは、共振周波数よりも低い領域のブースト・モードです。このブースト・モードでは、不連続モードのダイオード・ブリッジ電流が 1 を超える直流ゲインになります。さらに、高調波成分が非常に高いダイオード・ブリッジ電流に関連する他の連続モードおよび不連続モード動作がいくつかあります。このデザイン・スイートで使用される方法は、時間領域で共振型 LLC 回路を解析して、連

続モードと不連続モードについて解析して、境界条件を見つけることができます。時間領域法には、全ての高調波が含まれており、近似なしで正確な結果を提供します。

## ステップ 2: 定常解析の動作

定常解析ツールは、定常状態の解析を高速で実行します。このツールは、共振波形とその他の波形、およびデバイスの選択と損失計算のためのピーク値と実効値を算出します。すべての波形と出力パラメータが計算されます。

定常解析ツールのダイアログを次の図 2.3 に示します。

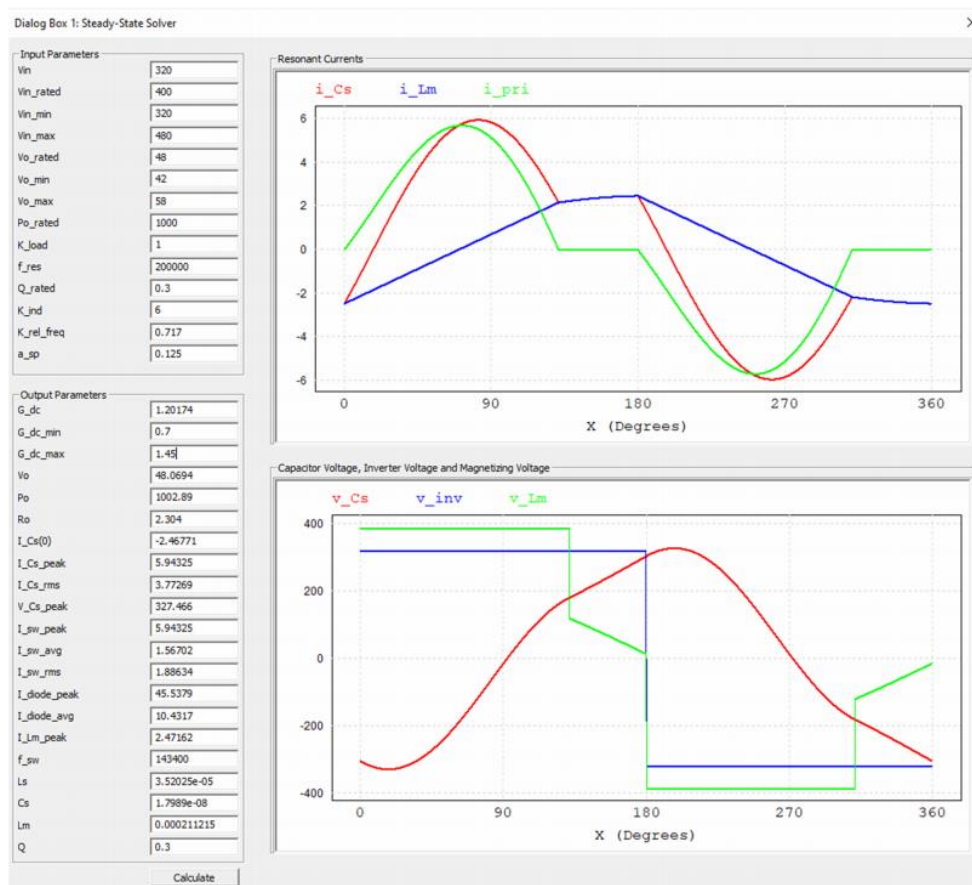


図 2.3 定常動作解析ツールで算出した出力パラメータと出力波形

定常動作解析ツールの入力仕様は左側にあります。デフォルトでは、入力仕様はパラメータ・パネルの仕様と同じです。これらの値は自由に変更できます。分析を実行するには、[ Calculate ] ボタンをクリックします。

主要な定常状態の波形が右側に表示されます。

ソフト・スイッチング、最大直流ゲイン、最小周波数、ピーク・ストレス値、最大伝導損失等を検証するために、極端な場合と最悪の場合の定常状態の波形を取得することができます。

入力パラメータが定義されると、ツールは次の出力値を計算します。



- ・  $G_{dc}$  共振タンクの直流ゲイン
- ・  $G_{dc\_min}$  直流ゲインの必要な最小値
- ・  $G_{dc\_max}$  直流ゲインの必要な最大値
- ・  $V_o$  直流出力電圧
- ・  $P_o$  出力電力/平均出力電力の動作/計算値
- ・  $R_o$  出力負荷抵抗値
- ・  $I_{Cs(0)}$  共振回路、スイッチに流れる電流のターン・オフ時の初期値
- ・  $I_{Cs\_peak}$  共振キャパシタ  $C_s$  に流れる電流のピーク値
- ・  $I_{Cs\_rms}$  共振キャパシタ  $C_s$  に流れる電流の実効値
- ・  $V_{Cs\_peak}$  共振キャパシタ  $C_s$  の端子間ピーク電圧
  
- ・  $I_{sw\_peak}$  スwitchに流れる電流のピーク値
- ・  $I_{sw\_avg}$  スwitchに流れる電流の平均値
- ・  $I_{sw\_rms}$  スwitchに流れる電流の実効値
- ・  $I_{diode\_peak}$  出力ダイオードに流れる電流のピーク値
- ・  $I_{diode\_avg}$  出力ダイオードに流れる電流の平均値
- ・  $I_{Lm\_peak}$  励磁電流のピーク値
- ・  $f_{sw}$  スイッチング周波数
- ・  $L_s$  共振インダクタ  $L_s$
- ・  $C_s$  共振キャパシタ  $C_s$
- ・  $L_m$  並列共振インダクタ  $L_m$
- ・  $Q$  共振回路の  $Q$  値

出力値には、スイッチの導通損失の計算に必要なスイッチ電流の実効値が含まれます。スイッチ電流のピーク値は、電力または電圧定格に基づいて適切なスイッチ計算を行うために提供されています。直列共振コンデンサと直列共振インダクタを流れる実効値とピーク値電流はスイッチと同じになります。

スイッチ電流の初期値またはターン・オフ値は、ターン・オフ損失を見つけるために提供されます。

出力計算には、ダイオード両端の電圧降下による総電力損失の計算に必要な、ダイオードを流れる電流の平均値も含まれます。励磁電流のピーク値は、トランスのコアの設計に使用します。共振成分の値と実際の負荷抵抗は、どの入力条件でも見つけることができます。

定常動作解析ツールの主な機能は次のとおりです。

- ・ 共振型 LLC コンバータの主要な出力とパラメータの計算は、ボタンをクリックするだけで取得することができます。
- ・ ソフト・スイッチング状態を確認し、動作モード（出力ダイオード電流の連続モードと不連続モード）を見つけるために、定常状態の波形が表示されます。

- ・ 共振型 LLC コンバータの直流ゲイン、ピーク値、初期値、ターン・オンおよびターン・オフ値、平均値、RMS 値などを見つけたための高速ツールです。
- ・ さまざまな動作条件と入力条件での出力変動の瞬時分析を行うことができます。
- ・ ある出力および設計要件から別の出力および設計要件に簡単に変更することができます。

選択した設計例のように、ゲイン要件は 1.45 から 0.70 であることがわかっています。

解析ツールを使用すると、入力された Q および K\_ind に必要な範囲をすばやく見つけることができます。たとえば、必要な相対周波数は、 $Q_{\text{rated}} = 0.6$ 、 $K_{\text{ind}} = 4$  で 0.66~1.49 の範囲です。同様に、他の周波数範囲、実効値変動、ピーク値を見つけることができます。他の Q 値、K\_ind、または他の入力条件でのさまざまな設計比較のための変動などで比較を行うことができます。定常解析のもう 1 つの興味深い点は、選択した入力条件での ZVS が可能な相対周波数の最小値をすばやく見つけるオプションをユーザーに提供していることです。つまり、最小スイッチング周波数は、共振周波数よりも下の領域の ZVS-ZCS 境界で自動的に計算されます。ZVS-ZCS 境界での波形とこの境界での出力計算を使用した定常解析ツールを使用した設計例を図 2.4 に示します。

図 2.4 では、左右のパネルに表示されている入力仕様またはパラメータを使用して、共振型 LLC アプリケーションが選択されています。これらの入力仕様では、 $Q = 0.3$  とインダクタンス比  $k = 6$  が選択されており、計算された最小相対周波数は 0.49、最大直流ゲインは 1.85338 です。その他の重要な出力計算は、左下のパネルの出力パラメータで確認できます。対応する共振波形およびその他の波形は、ZVS-ZCS 境界を持っていることが示されています。共振型 LLC の設計は、最適な共振値を見つけるために多くの反復を経る必要があるため、高速な定常解析ツールを持つことは、共振 LLC 設計に関連する複雑な答えを見つけるために非常に役立ちます。

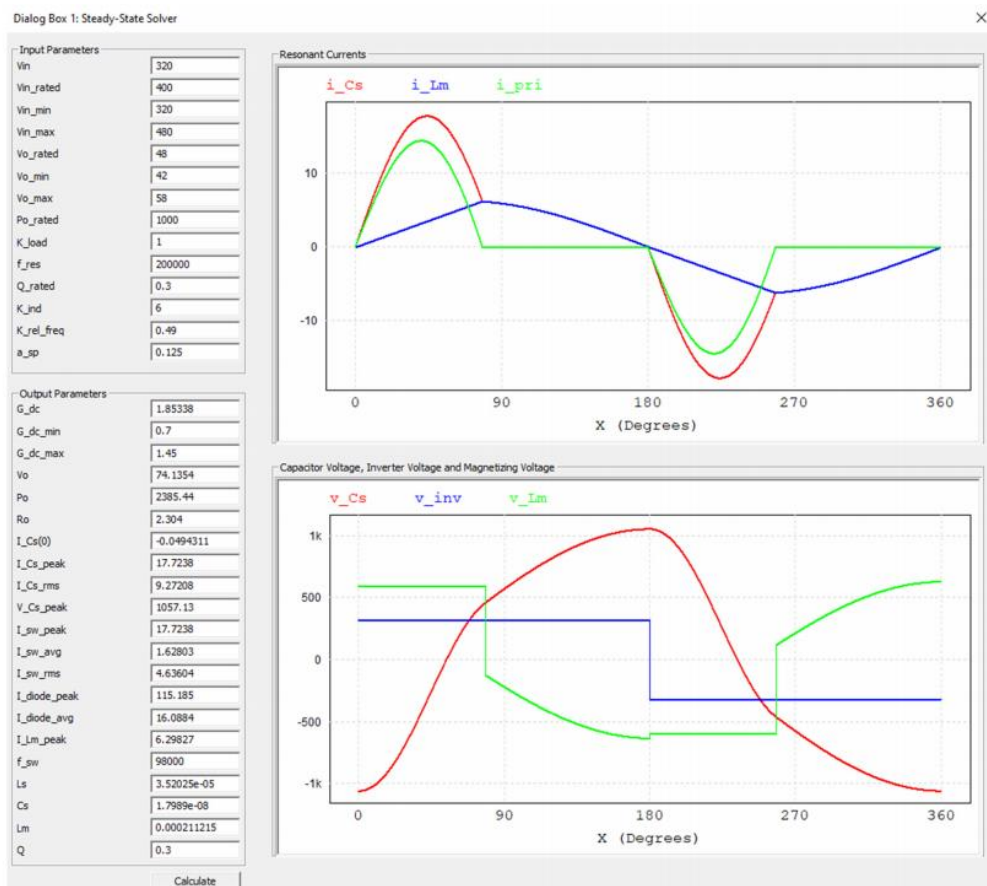


図 2.4 ZVS/ZCS 動作時の定常解析ツールと動作波形

### ステップ3：設計カーブ・ツールの働き

設計カーブ・ツールを使用すると、 $k$ (インダクタンス比)と  $Q$  のさまざまな値で、直流ゲイン値、実効値、ピーク値、および平均値の変動を相対周波数と比較することができます。ゲイン曲線の形状は、伝導損失と制御ダイナミクスに影響を与え、目標のバランスを取ります。 $Q$  値と  $k$ (インダクタンス比)を変えることにより、曲線の急勾配と平坦度のバランスを調べることができます。設計と最適化の目的に基づいて、設計曲線の急勾配と平坦性を試して、周波数範囲を狭くし、実効値を低くし、ピーク値を低くすることができます。

広い負荷および入力ライン範囲のアプリケーションに最適な周波数範囲を見つけることは、多くの反復とシミュレーションの実行を伴う困難な作業です。設計カーブ・ツールは、設計の反復を大幅に削減し、設計グラフから  $Q$  係数、 $k$ (インダクタンス比)、および周波数範囲の動作の最適値を見つけるのに役立ちます。LLC タンクの直流ゲイン、スイッチを流れる電流の実効値、スイッチを流れる電流のピーク値、励磁電流のピーク値、およびさまざまな  $Q$  係数と  $k$ (インダクタンス比)での相対周波数の変化、ダイオードを流れる電流の平均値の設計曲線を取得するオプションがあります。

ツールを使用して、2つのセット設計曲線と出力パラメーターを含む Excel ファイルが自動的に生成されます。

ツールの左側のインターフェイスで、 $Q_{rated}$  と  $K_{ind}$  の範囲で入力仕様を変更するオプションがあります。1つのパネルには、固定の  $Q_{rated}$  で  $K_{ind}$  のさまざまな値の曲線が表示され、別のパネルでは、固定の  $K_{ind}$  でさまざまな値の  $Q_{rated}$  の曲線が表示されます。

設計カーブ・ツールを図 2.5 に示します。ユーザーは、計算ボタンのいずれかをクリックして、目的の設計曲線を取得することができます。

実例を示すために、[ Calculate  $G_{dc}$  ] をクリックして、相対周波数係数 (  $K_{rel\_freq}$  ) に関する直流ゲイン曲線 ( Figure 2.5 ) を表示し、必要な直流ゲインの相対周波数の範囲を見つけました。同時に、図 2.6 に示すように、異なる  $Q_{rated}$  と  $K_{ind}$  の結果を示す Excel ファイルが自動的に生成されます。

Excel ファイルでは、この例で必要な最小から最大の直流ゲインに基づいて、最小スイッチング周波数と最大スイッチング周波数での出力計算が提供されます。出力計算には、実効値、ピーク値、スイッチの電流と電圧に関連する平均値、ダイオード、共振コンポーネントなどが含まれます。 $Q$  値と  $K_{ind}$  の入力値ごとに、共振成分の値も計算されて表示されます。

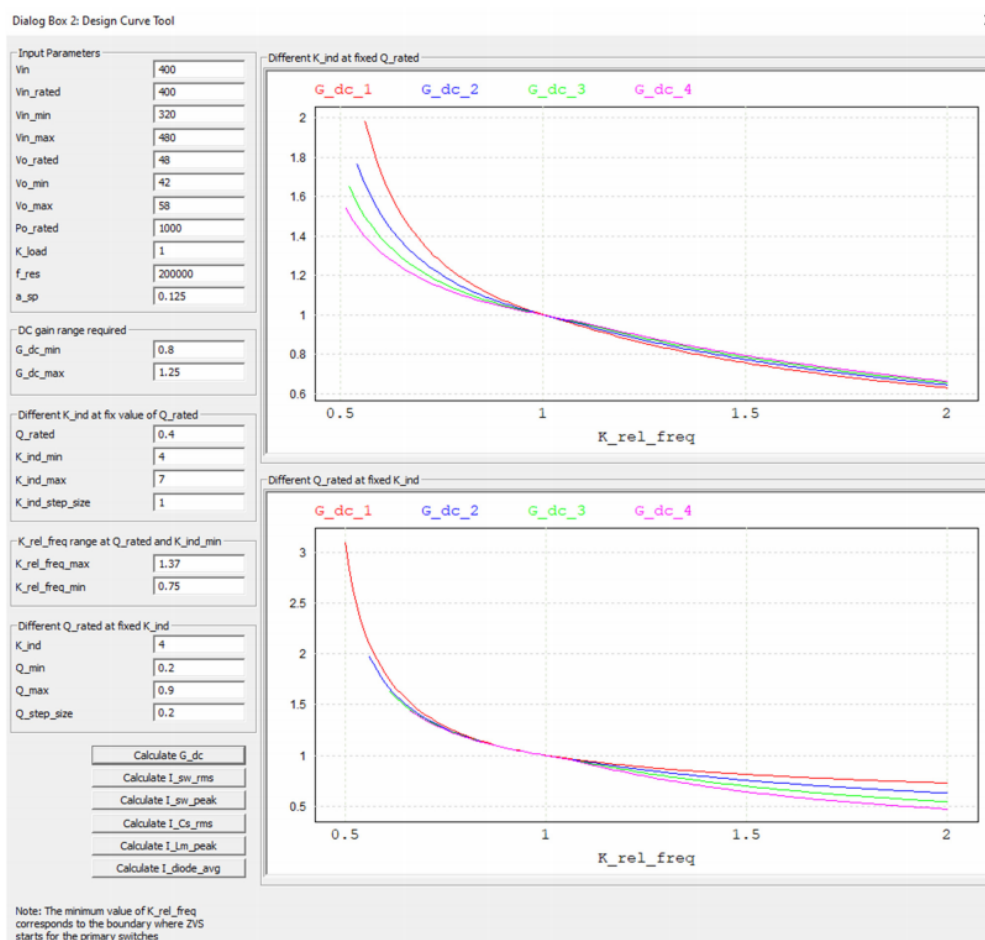


図 2.5 設計カーブ・ツールは異なる  $Q$  値とインダクタンス比 (  $L_m/L_s$  ) での直流ゲインと相対周波数をグラフに表しています。

注:

相対周波数の最大値は、実用上の理由から 2 に制限されています。最小値の相対周波数係数は、ZVS（ゼロ電圧スイッチング）が可能な範囲まで自動的に計算されます。最小スイッチング周波数は次のようになります。共振周波数以下の領域で ZVS-ZCS（ゼロ電流スイッチング）境界で自動的に計算されます。

Q_rated	K_ind	G_dc	K_rel_freq	f_sw	I_sw_rms	I_sw_peak	V_sw_peak	I_diode_avg	V_diode_p	V_diode_j	I_Lm_peak	Cs_rms	V_Cs_peak	Cs	Lm		
0.4	4	0.802786	1.37	274000	1.401441	4.139722	480	8.710785	27.50926	58	116	1.560546	2.802882	165.2851	4.69E-05	1.35E-08	0.000188
0.4	4	1.263693	0.75	150000	2.593022	7.996405	480	13.71195	58.4573	58	116	3.453799	5.186043	855.5169	4.69E-05	1.35E-08	0.000188
0.4	5	0.80039	1.42	284000	1.341893	3.942789	480	8.684788	27.10983	58	116	1.200883	2.683786	152.7112	4.69E-05	1.35E-08	0.000235
0.4	5	1.257612	0.71	142000	2.537647	8.154683	480	13.64597	61.31175	58	116	2.782165	5.075294	801.9583	4.69E-05	1.35E-08	0.000235
0.4	6	0.801315	1.45	290000	1.311797	3.830021	480	8.69482	26.93196	58	116	0.981163	2.623594	146.4297	4.69E-05	1.35E-08	0.000282
0.4	6	1.25979	0.67	134000	2.566631	8.575457	480	13.66959	65.17849	58	116	2.385249	5.133261	772.2246	4.69E-05	1.35E-08	0.000282
0.4	7	0.802984	1.47	294000	1.294204	3.756817	480	8.712935	26.83756	58	116	0.831283	2.588408	142.7797	4.69E-05	1.35E-08	0.000329
0.4	7	1.253478	0.64	128000	2.583418	8.896471	480	13.60111	67.96983	58	116	2.101863	5.166835	750.6484	4.69E-05	1.35E-08	0.000329
0.2	4	0.800342	1.56	312000	1.671868	5.605324	480	8.684268	28.98176	58	116	2.732615	3.343735	85.44456	2.35E-05	2.70E-08	9.39E-05
0.2	4	1.26408	0.76	152000	3.405479	9.437638	480	13.71614	58.53967	58	116	8.024751	6.810959	929.1868	2.35E-05	2.70E-08	9.39E-05
0.4	4	0.802786	1.37	274000	1.401441	4.139722	480	8.710785	27.50926	58	116	1.560546	2.802882	165.2851	4.69E-05	1.35E-08	0.000188
0.4	4	1.263693	0.75	150000	2.593022	7.996405	480	13.71195	58.4573	58	116	3.453799	5.186043	855.5169	4.69E-05	1.35E-08	0.000188
0.6	4	0.801359	1.29	258000	1.3110643	3.71269	480	8.695298	26.73749	58	116	1.102919	2.621285	249.0185	7.04E-05	8.99E-09	0.000282
0.6	4	1.256526	0.75	150000	2.515716	8.012818	480	13.63418	59.02452	58	116	2.676271	5.031431	929.4546	7.04E-05	8.99E-09	0.000282
0.8	4	0.800947	1.24	248000	1.269592	3.533558	480	8.690834	26.25045	58	116	0.860101	2.539184	337.2143	9.39E-05	6.75E-09	0.000375
0.8	4	1.252885	0.75	150000	2.523302	8.127621	480	13.59467	59.4641	58	116	2.68201	5.046604	1107.453	9.39E-05	6.75E-09	0.000375

図 2.6 Q\_rated=0.4、K\_ind=4~7、と K\_ind=4、Q\_rated=0.21~0.8 の  
エクセル・ファイルが出力されます。

図 2.6 では、詳細な出力計算は、Q 値と K\_ind の各セットの最小および最大スイッチング周波数で生成されます。上部の強調表示された部分は、Q = 0.4 で入力された各 K\_ind（3 から 7）の最大から最小への相対周波数係数（K\_rel\_freq）の変化を示しています。下の強調表示された部分は、K\_ind = 4 で入力された各 Q 値（0.2 から 0.8）の K\_rel\_freq の変動を示しています。

デザイングラフ 1 の場合：X 軸は K\_rel\_freq、Y 軸は G\_dc、I\_sw\_rms、I\_sw\_peak、I\_Lm\_peak、I\_diode\_avg のいずれかで、次の値を指定できます。

- Q\_rated
- K\_ind\_min
- K\_ind\_max
- K\_ind\_step\_size

デザイングラフ 2 の場合：X 軸は K\_rel\_freq、Y 軸は G\_dc、I\_sw\_rms、I\_sw\_peak、I\_Lm\_peak、I\_diode\_avg のいずれかで、次の値を指定できます。

- K\_ind
- Q\_rated\_min



- Q\_rated\_max
- Q\_rated\_step\_size

設計カーブ・ツールの主な機能は次のとおりです。

- ・ 実際のソフト・スイッチング領域全体を示しています。
- ・ ZVS が可能な相対周波数の最小値と、選択した Q 値と k (インダクタンス比)の最大直流ゲイン値を自動的に計算します。
- ・ ZVS 領域の相対周波数の全間隔にわたる実効値とピーク値の変動を取得し、損失推定、デバイス選択、および効率分析の計算に役立ちます。
- ・ ZVS 領域の相対周波数の全間隔にわたって直流ゲイン範囲を見つけることができます。これにより、動作周波数範囲を絞り込むことができます。
- ・ 設計曲線からアプリケーションに基づいて、幅広い負荷およびラインレギュレーションに最適な k(インダクタンス比)と Q 係数を選択できます。
- ・ 最適な k(インダクタンス比)と Q 係数を選択すると、共振コンポーネントと磁気設計の最適値を見つけるのに役立ちます。

定常動作解析ツールで説明したように、設計曲線内の既知の直流ゲイン範囲に基づいて周波数範囲を狭めることができます。その後で、直流ゲイン、実効値、およびピーク値の変動を、Q 係数と k(インダクタンス比)のさまざまな値または新しい入力パラメータでの相対周波数変動と直接比較できます。上記の設計例では必要なゲイン範囲が 0.75~1.25 であるため、Q 係数を 0.2~2、k(インダクタンス比)を 2~20 に変化させたさまざまな曲線を取得し、効率、磁気サイズに基づいてほぼ最適な答えを見つけました。ハードウェア要件に基づいて、他の最適化目標を決定できます。

定常動作解析ツールと設計カーブ・ツールを使用すると、K\_ind が 5~6、Q 値が 0.3~0.4 の範囲で、電圧調整の周波数範囲が狭くなり、実効値電流が広範囲にわたって低くなります。設計の観点から、Q の値が低いと、磁気サイズが小さくなり、コンデンサの電圧ストレスが低くなる設計になります。ただし、一方で、Q の値を大きくすると、最小の直流ゲインを得るのに必要なスイッチング周波数が低くなります。また、K\_ind を高くすると、トランスの循環電流を低くし、電力デバイスの導通損失を低くすることができます。

明らかに、広い直流ゲイン要件（バック領域とブースト領域の両方をカバー）と循環電流の量の間のトレードオフを見つける必要があります。

定常解析ツールと設計カーブ・ツールを使用して数回繰り返した後、Q 係数と k(インダクタンス比)の最適化された値を取得できます。

#### ステップ 4 : パラメータ・ファイルのアップ・デート

デザインが完成したら、Q\_rated と K\_ind の最終的なデザイン値をパラメータパネルに入力しま

す。次に、パラメータパネルの[Update Parameter File]ボタンをクリックして、回路図面のパラメータファイル「parameters-main.txt」を更新します。このパラメータファイルには、ユーザーが入力したパラメータと、DesignSuiteによって計算された出力が含まれています。パラメータファイルの典型的な例と、パラメータファイル内の計算された出力を次の図に示します。

Q<sub>rated</sub>とK<sub>ind</sub>の最終値は、ライン、負荷レギュレーション、低い実効値電流、狭い周波数範囲、低い磁気サイズなどの間のトレードオフを考慮して設計から選択されます。選択した値は次のとおりです。

$$Q_{\text{rated}} = 0.3$$

$$K_{\text{ind}} = 6$$

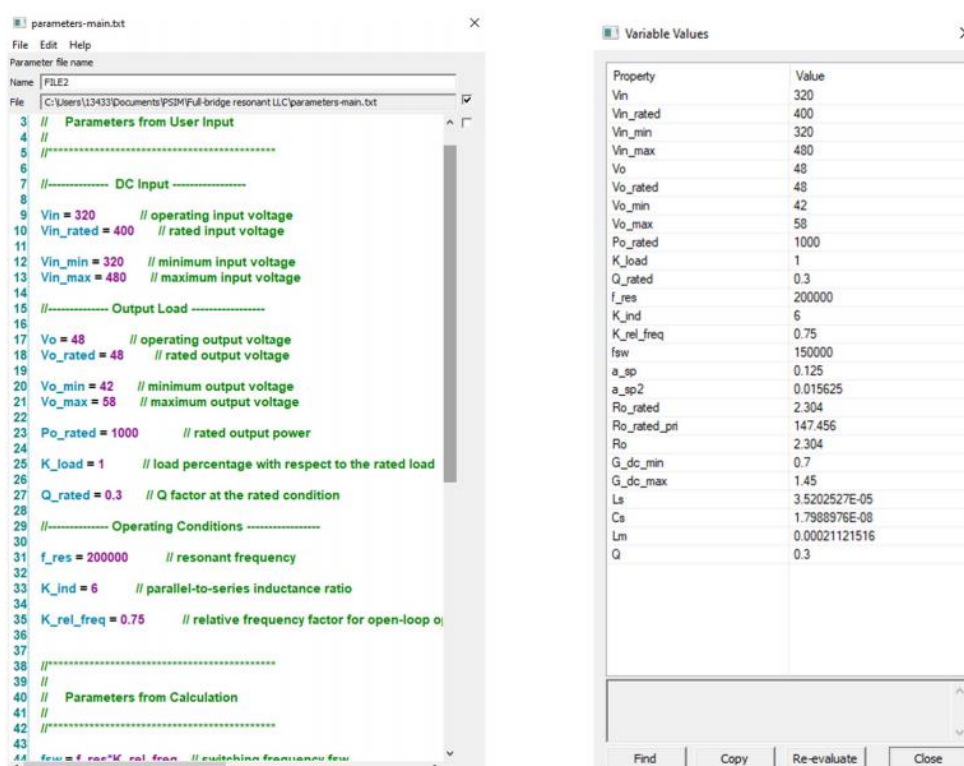


図 2.7 (a)例題のフル・ブリッジ共振型 LLC のパラメータ・ファイル

(b)入力パラメータの全てと算出した内部パラメータ・ファイル

パラメータパネルのパラメータのいずれかが変更された場合は、回路図面のパラメータ/ファイルを更新する必要があります。

#### ステップ5：時間領域でのシミュレーションによる設計の検証

設計が完成したら、PSIMで回路をシミュレートして、設計を検証できます。相対周波数係数と電圧ゲインのルックアップテーブルは、デザイン・スイートによって自動的に生成されます。これにより、フィード・フォワード制御が提供され、必要な値に近いスイッチング周波数が出力さ

れ、さまざまな負荷およびライン条件で目的の出力電圧レギュレーションが実現されます。  
シミュレーションと定常解析の結果は、最小入力電圧（320V）と定格出力電圧（48V）で示されています。

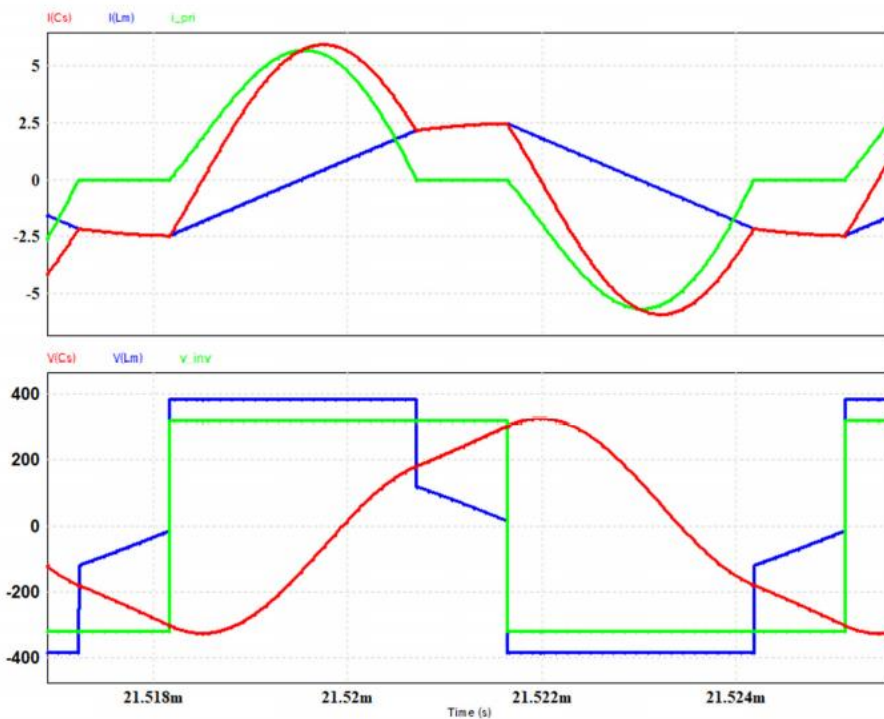


図 2.8 : 定常出力電圧(48V)と最小入力電圧(320V)、 $K_{rel\_freq}=0.718$   
( 143.6 kHz 共振周波数以下 ) の時間領域でのシミュレーション



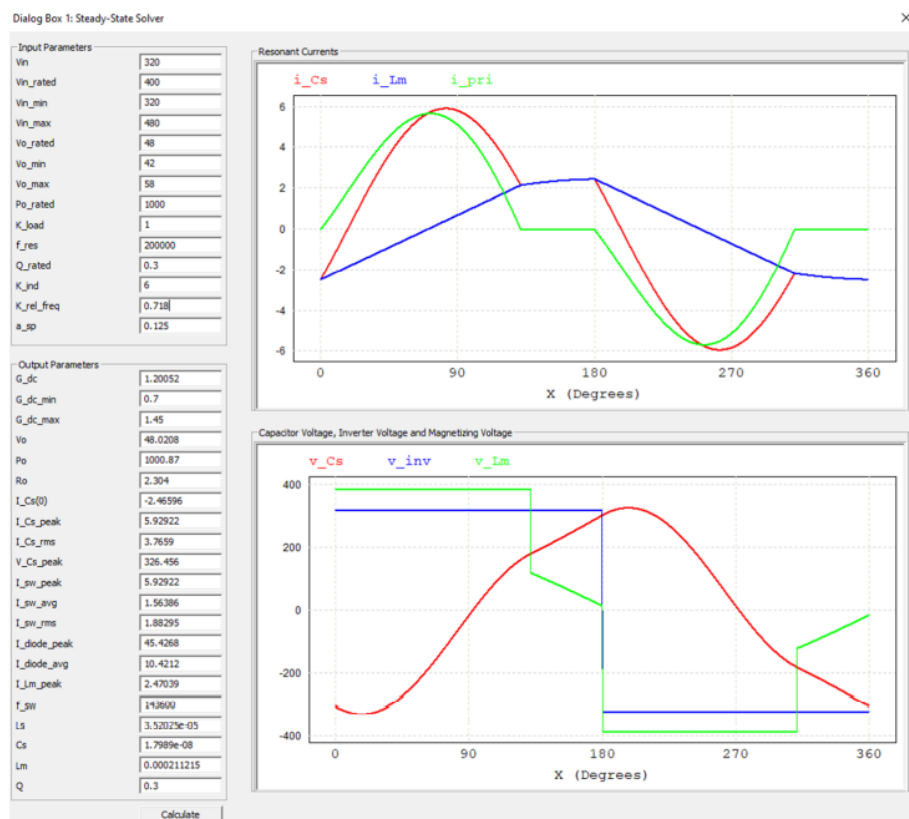


図 2.9 : 定常出力電圧(48V)、最小入力電圧(320V)、 $K_{rel\_freq}=0.718$

(143.6 kHz 共振周波数以下) 定常解析ツールから求めた波形

図 2.8 は、 $K_{rel\_freq} = 0.718$  (143.6kHz) (共振モード以下) での定格出力電圧 (48V) と最小入力電圧 (320V) でのシミュレーション結果を示しています。 $Q_{rated}$  は 0.3、 $K_{ind} = 6$  で、必要な  $G_{dc} = 1.2005$  です。

図 2.9 は、同じ動作条件での同じ波形を示していますが、定常解析ツールから結果です。波形は同一であり、定常状態ソルバーを検証します。

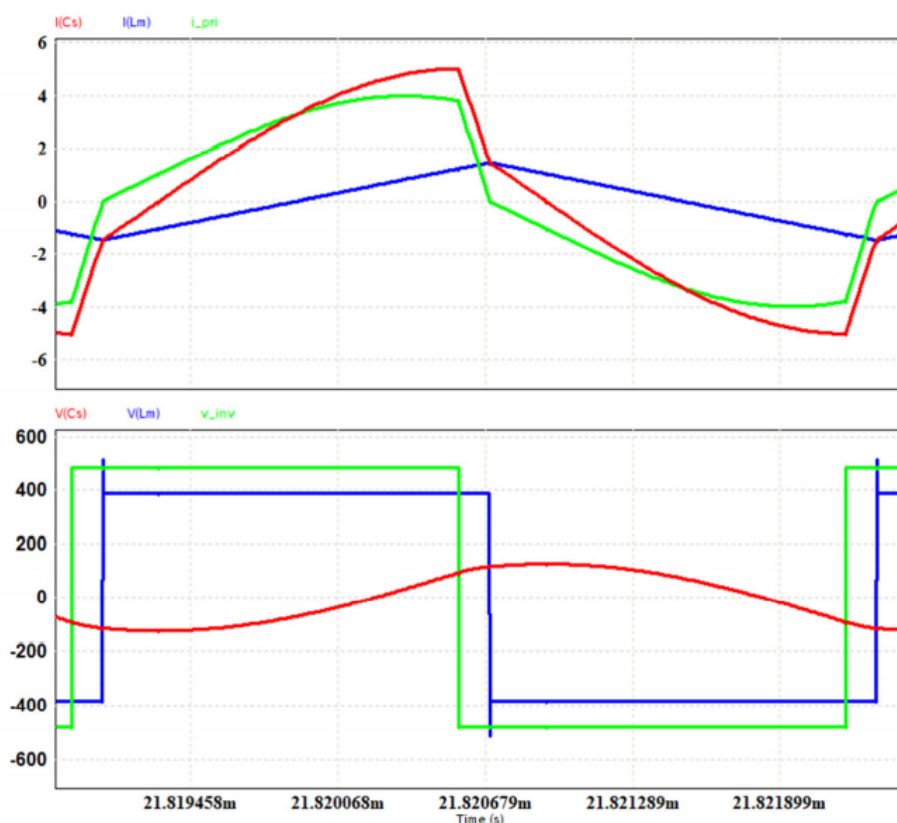


図 2.10 : 定常出力電圧(48V)、最大入力電圧(480V)、 $K_{rel\_freq}=1.56$   
( 302kHz 共振周波数以上)

図 2.10 は、 $K_{rel\_freq} = 1.56$  (302kHz) (共振モード以上) での最大入力電圧 (480V) と定格出力電圧 (48V) でのシミュレーション結果を示しています。 $Q_{rated}$  は 0.3、 $K_{ind} = 6$  で、必要な  $G_{dc} = 0.8001$  です。

シミュレーションは、関連する寄生、デッド・タイム、MOSFET 容量などを含めることによっても実行できます。

ツールから計算された周波数は、非理想的または損失のあるシステムに対して適切な負荷とラインの規制を行うのに十分な精度の結果を提供します。

#### フィード・フォワード制御とルックアップ・テーブル

フィード・フォワード制御は、さまざまなライン規制および負荷規制の下で必要な動作点に近いソリューションを提供します。

フィード・フォワード制御の一般的なルック・アップ・テーブルを以下に示します。この例では、 $Q$  係数は 0.3 で、 $k$ (インダクタンス比)は 6 です。相対周波数を 0.4899 から 2 に変更した場合、直流ゲインの変動は 1.9034 から 0.7069 になります。

ゲイン曲線から任意の周波数範囲を選択して、アプリケーションに合わせて幅広い設計を行うことができます。

同様に、アプリケーションに基づいて、ゲイン曲線に 2 : 1 の変動、またはゲイン曲線に 1.5 : 1 の変動を持たせるために、Q 係数と k(インダクタンス比)を選択できます。

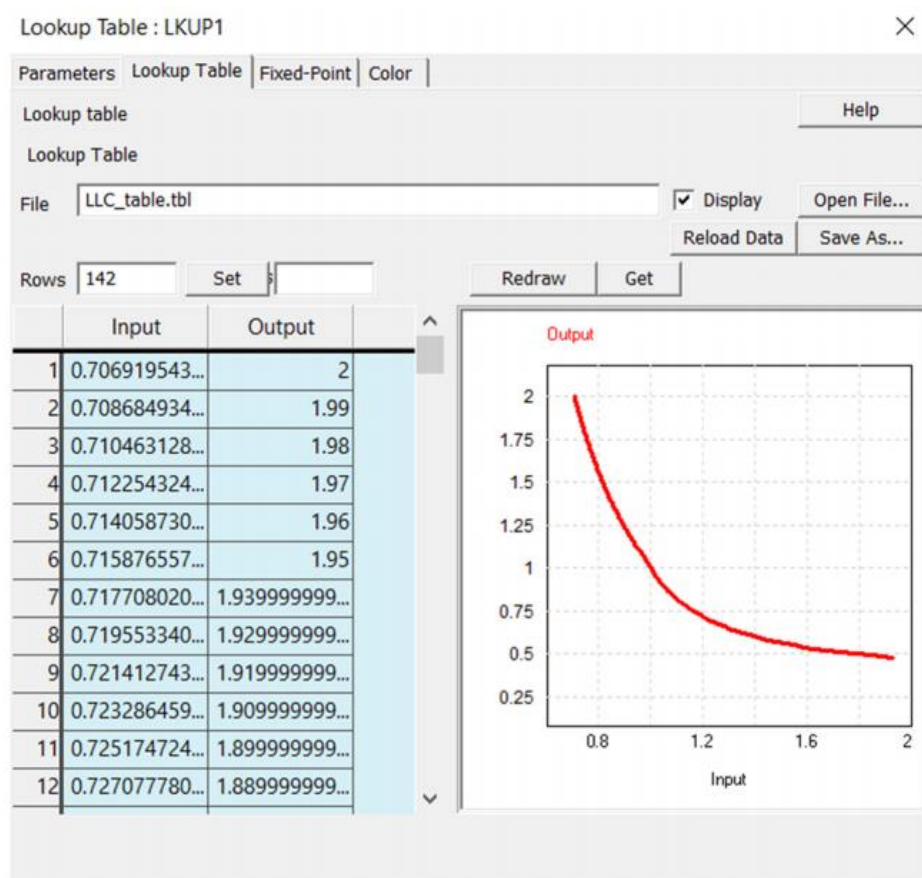


図 2.11 : Q=0.3、k=6、直流ゲイン 0.7069~1.9034、相対周波数 2~0.4899

### 3.他の設計テンプレート

フル・ブリッジ共振型 LLC テンプレートに加えて、以下に説明するように、共振型 LLC と他の共振型コンバーター用に 2 つのテンプレートが用意されています。

#### 3.1 ハーフ・ブリッジ共振型 LLC

定電圧出力および可変出力電圧アプリケーション用のハーフ・ブリッジ共振型 LLC コンバーターのテンプレートが提供されています。テンプレートと回路を以下に示します。

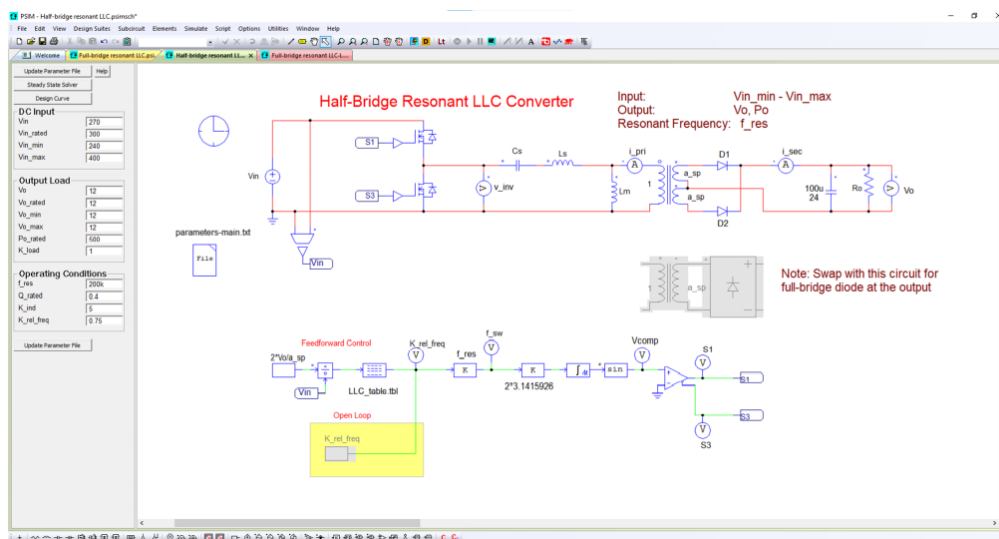


図 3.2 : デザイン・スイートのハーフ・ブリッジ・テンプレートを解凍した回路

### 3.2 フル・ブリッジ共振型 LLC-L コンバータ

フル・ブリッジ共振型 LLC-L コンバータのテンプレートが提供されています。テンプレートと回路を以下に示します。このテンプレートには、5 つの異なる共振コンバータ（LC、LLC、CLL、CL、LLC-L）の設計と最適化に使用できる 4 次一般的な共振タンクのテンプレートがあります。高次共振タンクのアプリケーションには、ワイヤレス電力伝送（WPT）、誘導電力伝送（IPT）、EV 車載バッテリー充電器（OBC）などがあります。

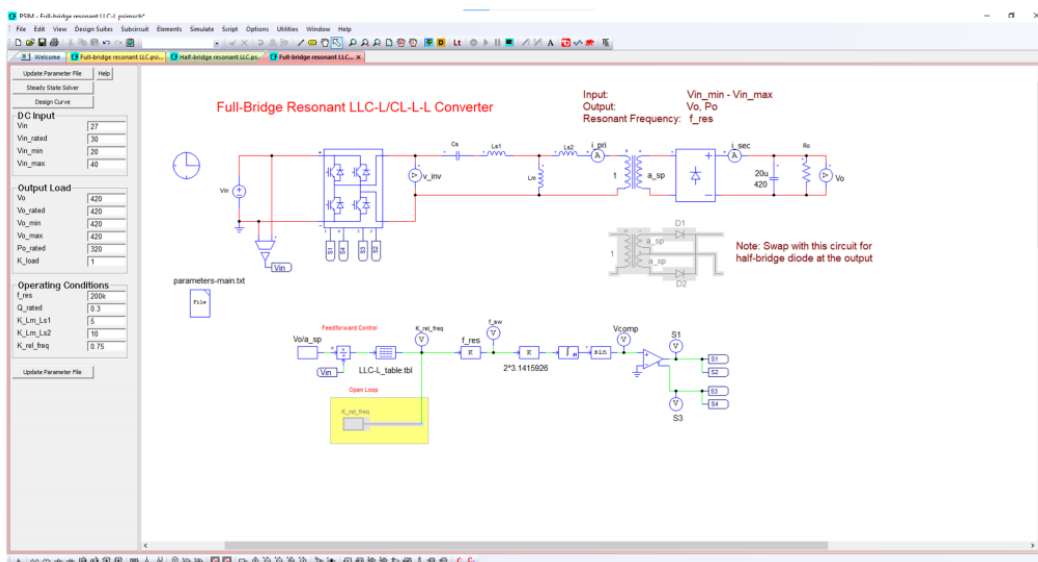


図 3.4 : デザイン・スイートの共振型 LLC-L を解凍したテンプレート

他の LLC コンバータ回路とは異なり、この回路には 4 つの共振要素 : Cs、Ls1、Ls2、および Lm があります。

インダクタンス Ls2 は、トランスの 2 次巻線の漏れインダクタンスと、トランスの 2 次側に追

加され、1次側に反射して戻る外部インダクタンスの合計になります。

余分な要素が追加されているため、共振 LLC-L / CL-L-L コンバーターの分析ははるかに複雑になります。さらに、コンバータの設計と最適化では、追加の要素を考慮する必要があります。このような設計プロセスは、デザイン・スイートを使用することにより簡単になります。

### 共振型 LLC コンバータの設計における検討事項とトレードオフについて

(1).

K ( $L_m / L_s$ ) と Q が高いほど、循環電流とターン・オフ電流が低くなります。ただし、Q が高くなると、磁気部品のサイズが大きくなり、コンデンサに加わるストレス大きくなります。K が高いほど、直流ゲイン調整のために周波数のより広い変化が必要になります。したがって、Q と K でトレードオフの必要があります。

(2).

Q が低い方が電力密度を高くすることが出来ます。Q が高いと、最小直流ゲインの要件を満たすために必要な動作最大周波数が低くなります。

(3).

広範囲のアプリケーションの場合、公称動作点が共振に近くなるように Q と K を選択します。このようにして、コンバータはゲイン調整のために降圧領域と昇圧領域の両方で均一に動作します。どちらの領域にも、それぞれ長所と短所があります。

(4).

Q が高いと、ターン・オフとピーク励磁電流が低くなります。共振モードより上の領域では、共振モードより下の領域に比べて非常に高いターン・オフ損失があります。ただし、共振モードよりも上の領域では、出力ダイオードの CCM 動作により、循環電流値が低くなります。

(5).

ZVS 動作条件でスイッチの  $C_{oss}$  を充電および放電するためには、スイッチの出力容量が大きいほど大きな電流が必要になります。したがって、出力容量  $C_{oss}$  が小さいスイッチを選択すると、導通損失が減少しますが、一方でオン抵抗が小さいスイッチでは出力容量  $C_{oss}$  が大きくなり導通損失が増加します。

(6).

HV から LV までのアプリケーションの有用な設計としてマトリックス・ストランス構造を使用します。マトリックス・トランスは、ダイオード/スイッチ整流器の電流ストレス/ RMS /ピークを低くするために、2次側の並列接続を行っています。

(7).

共振よりも下の領域と上の領域の両方で、動作上の問題点があります。共振よりも下の領域のモードの場合、出力ダイオードの DCM 動作により、リングングやリップルの問題を引き起こすダイオードの並列寄生容量が問題になります。これは、トランスと並列に小さな容量を追加することで問題を排除することができます。

以上のように CCM(共振よりも高い領域)と DCM(共振よりも低い領域)とも出力ダイオードはそれぞれの領域でメリットとデメリットを持っています。

(8)、

Q が低いと共振よりも下の領域で軽負荷に出力ダイオードが DCM 動作することでターン・オフ電流は大きくなり(ピーク電流値とほぼ同じ)ます。より高い励磁電流のピーク値は DCM 動作をしている出力ダイオード励磁電流のピーク値と同じです。軽負荷時の効率維持を考慮した場合は周波数-PWM 制御方式をお勧めします。

**ご注意**

1. 本資料に記載された製品の仕様は、予告なく変更することがあります。
2. 本資料の内容については、万全を期しておりますが、万一ご不明な点などがありましたら、弊社までお申しつけください。
3. 本資料に記載された情報に起因する損害または特許権その他権利の侵害に関しては、弊社は一切の責任を負いません。
4. 本資料によって第三者または弊社の特許権その他権利の実施権を許諾するものではありません。
5. 弊社の書面許諾なく、本資料の一部または全部を無断で複製することを固くお断りします。
6. 本資料に記載されている会社名、商品名は、各社の商標または登録商標です。

Copyright 2021 by Myway Corporation  
All rights reserved. No part of this manual may be photocopied or reproduced in any form or by any means without the written permission of Myway Corporation.

---

発行: Myway プラス株式会社

〒220-0022

横浜市西区花咲町 6-145 横浜花咲ビル

TEL: 045-548-8836

FAX: 045-548-8832

ホームページ: <https://www.myway.co.jp>

Eメール: [sales@myway.co.jp](mailto:sales@myway.co.jp)

---