

PLECS DEMO MODEL

LLC Variable Frequency Resonant Converter

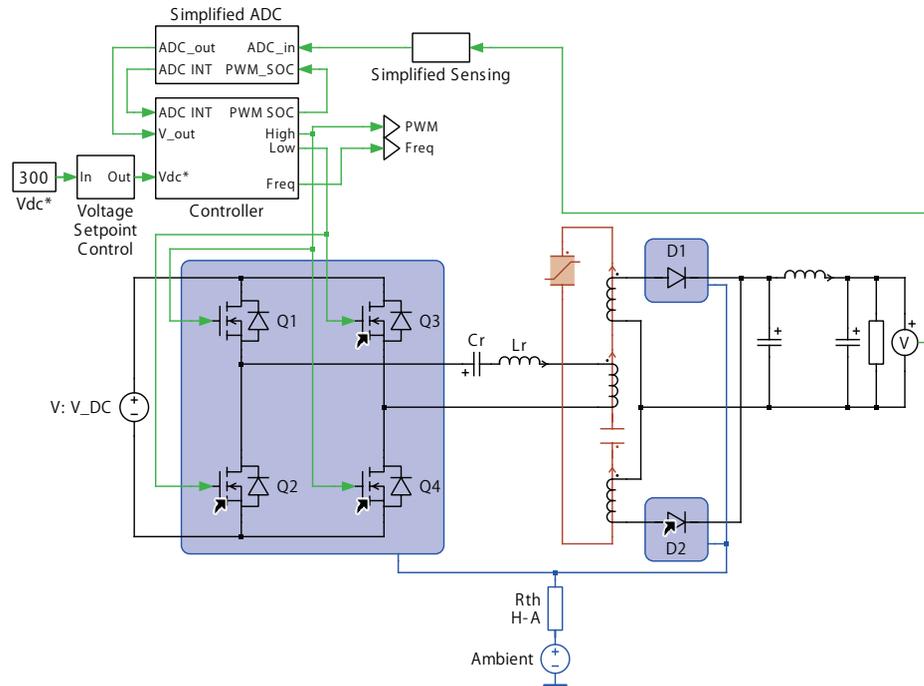
LLC可変周波数共振コンバータ

Last updated in PLECS 4.9.7

1 概要

このデモでは、周波数制御で動作する絶縁型DC/DC共振コンバータを紹介します。コンバータの出力電圧は、半導体のスイッチング周波数を変化させることで制御します。ゼロ電圧スイッチング(Zero-Voltage Switching: ZVS)を使用してスイッチング損失を低減し、より高いスイッチング周波数でコンバータを動作させることを可能にします。

図1: LLC可変周波数共振コンバータ



Note このモデルには、次からアクセスできるモデル初期化コマンドが含まれています。

PLECS Standalone: シミュレーションメニュー + シミュレーション・パラメータ... → 初期化

PLECS Blockset: Simulinkモデルウィンドウで右クリック → モデル プロパティ → コールバック → InitFcn*

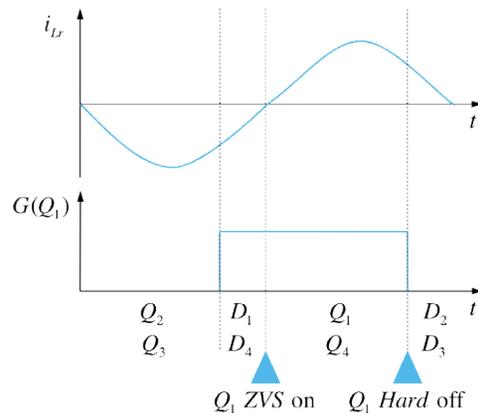
2. モデル

2.1 電源回路

LLCコンバータは、フロントエンドにHブリッジを備えたDC/DCコンバータです。HブリッジのAC側は、直列接続された共振インダクタとキャパシタを介して高周波変圧器の一次側に接続しています。変圧器の磁化インダクタンスは、インダクタとキャパシタとともに、LLC共振タンクを形成します。変圧器の二次側は全波ダイオード整流器に接続し、AC変圧器の出力を高リップルDC電圧に変換し、その後フィルタリングして低リップルDC電圧出力が得られます。

LLCコンバータは多くの場合、各FET(Q1など)が対応する逆並列ダイオード(D1など)の導通時にZVSで動作します。したがって、FETにはダイオードの順電圧降下のみが印加(DC入力電圧に比べて小さい)されます。これにより、デバイスのターンオン損失が無視できるほどになり、全体的な損失の削減に貢献します。ZVS動作中、FETは導通する際にターンオフします。これにより、デバイスのハードスイッチングが発生し、図2に示すようにターンオフスイッチング損失が発生します。

図2: ZVSスイッチングとハードスイッチング



ターンオフおよびターンオンイベント中に、各FET本体のキャパシタはそれぞれ充放電されます。ターンオン時にFET(逆ダイオードではない)がハードスイッチングする回路では、本体のキャパシタに蓄えられた電荷がFETを介して消費され、スイッチング損失が増加します。これらの損失は、特定の部品の熱損失のルックアップテーブルに記述するだけで、(FETと並列にキャパシタを追加することなく)シミュレーションで実現できます。特定の動作ポイントでFETのスイッチングエネルギー損失を測定して熱損失ルックアップテーブルを生成する場合、FET本体のキャパシタに蓄えられた電荷を損失測定値に含めることが重要です。FETに対するZVSの主な利点は、ターンオン損失の除去に加えて、Q1/Q4のターンオフとQ2/Q3のターンオン間に十分なデッドタイムがある場合、本体のキャパシタに蓄えられたエネルギーが回路に再利用されることです[1]。したがって、ZVSで動作するソフトスイッチングトポロジでは、静電容量の影響が損失ルックアップテーブルに反映されていない場合、ターンオフ損失が10~20%過大評価される可能性があります[2]。

2.2 熱モデル

WolfSpeed社製CAS300M12BM2 SiCハーフブリッジモジュールの熱特性は、フルブリッジ4つのMOSFETスイッチすべてに割り当てられており、WolfSpeed社製C4D40120D SiCショットキーダイオードは出力ダイオードに割り当てられています。いずれかのMOSFETをダブルクリックすると、カスタムのマスクサブシステムに様々な電気的および熱パラメータが実装されていることがわかります。マスクサブシステム内の半導体の熱特性を視覚化するには、**ウィンドウメニューの熱設定ライブラリブラウザメニュー**を使用するのが簡単です。ダイオードの熱特性は、コンポーネントをダブルクリックし、**熱設定**パラメータのドロップダウンメニューから**編集...**を選択することで表示および編集できます。熱特性はWolfSpeed社のWebサイトから取得しました。2種類のデバイスタイプについて、ジャンクションからケースへの熱遷移を表す熱インピーダンスチェーンが、熱特性に直接入力されています。

また、ダイオードモデルは、並列接続した複数のデバイスをモデリングできるようにカスタマイズされていることに注意してください。接続数は、ダイオードのパラメータウィンドウで設定できます。並列接続したダイオードでは、電流と電圧が均等に分配されると仮定します。熱パラメータは、デバイスの数と構成に応じて自動的に調整されます。

3つのヒートシンクコンポーネントは互いに接続しているため、6つのデバイスすべてが同じヒートシンクに熱を放散します。熱抵抗は、ヒートシンクと周囲空気の温度を結びつけます。

MOSFETとダイオードの熱記述は、ディレクトリ: /llc_variable_frequency_resonant_converter_plecsのプライベート熱ライブラリに保存されます。

モデルのスイッチング周波数は変化するため、平均スイッチング損失と伝導損失はそれぞれ"Variable Impulse Avg"サブシステムと"Variable Avg"サブシステムを使用して計算します。これらのサブシステムは、"周期インパルス平均"ブロックおよび"周期平均"ブロックと同様に動作しますが、可変PWMをサポートしています。

熱モデリングとデバイスの損失と効率の計算の詳細については、PLECSのdemosライブラリの"Buck Converter with Thermal Model"を参照してください。

2.3 制御

出力電圧はセンシング回路によって測定し、ここでは伝達関数(ローパスフィルタを表す)として簡略化しています。簡略化したADCモジュールを使用して、測定した電圧を対応するデジタル値に変換します。出力電圧測定値は、DC電圧設定値と比較します。誤差は、デジタルPIコントローラの2-pole、2-zeroに実装に入力されます[3]。ADC割り込みは、割り込みサービスルーチンをトリガして制御を実行するために使用されます(ここでは、トリガサブシステムとしてシミュレーションしています)。制御は、周波数設定値に変換するカウンタ周期設定値を生成します。周期設定値は、PLECSの可変周波数PWMブロックにが使用します。ハーフブリッジFETは50%のデューティ比でスイッチングします。

3. シミュレーション

200V入力はフルブリッジのDC側に接続されています。リファレンス電圧の変化時の出力電圧の変化率を制限するため、スルーレートがコンバータに適用されます。これは起動時の過渡応答に反映され、出力電圧は徐々に上昇します。電圧コントローラは、フルブリッジのスイッチング周波数を制御するために使用します。図3に示すように、システムは17ms後に目的のリファレンス電圧 $V_o^*=300\text{V}$ に到達します。図4に示すように、6秒後にMOSFETのジャンクション温度が安定します。適用したソフトスイッチング手法により、高周波スイッチング中でもFETの接合部温度が安全に保たれます。

LLCコンバータは2回シミュレーションします。1回は出力電圧リファレンス $V_o^*=300\text{V}$ (公称動作点)で、もう1回は $V_o^*=250\text{V}$ です。

公称動作点($V_o^*=300\text{V}$ 、定常状態)では、LLCは共振タンクの共振周波数に近いスイッチング周波数で動作します。計算による共振周波数は $f_0\approx 100\text{ kHz}$ ですが、シミュレーションによるスイッチング周波数は $f_s\approx 103\text{ kHz}$ です。したがって、 $V_o\approx 300\text{V}$ の場合、 $f_s\approx f_0$ となります。この動作点では、出力電力は30kWで、効率は98.2%です。

電圧が低下した動作点($V_o^*=250\text{V}$ 、定常状態)では、LLCは"Buck Mode"で動作し、スイッチング周波数は共振周波数($f_s\approx 120\text{ kHz}$)よりも高くなります。したがって、 $V_o\approx 250\text{V}$ では $f_s > f_0$ となります。出力電力は20.8kW、効率は96.6%に低下します。

図6と図7は、 $V_o^*=300V$ における定常状態のシミュレーション結果を示しています。図6では、共振タンクインダクタ電流がほぼ正弦波を示しており、共振に近い動作を示しています。図7のMOSFET信号から、スイッチング損失はターンオフ時のみ発生し、ターンオン時のスイッチング損失はゼロであることがわかります。

図8と図9は、 $V_o^*=250V$ における定常状態のシミュレーション結果を示しています。図9は、MOSFET電流が図7と比較して高いレベルでターンオフし、ターンオフ損失が増加し、共振タンクインダクタ電流が正弦波からより大きく外れていることを示しています。

図3: 300V出力リファレンスの出力電圧とスイッチング周波数の過渡応答

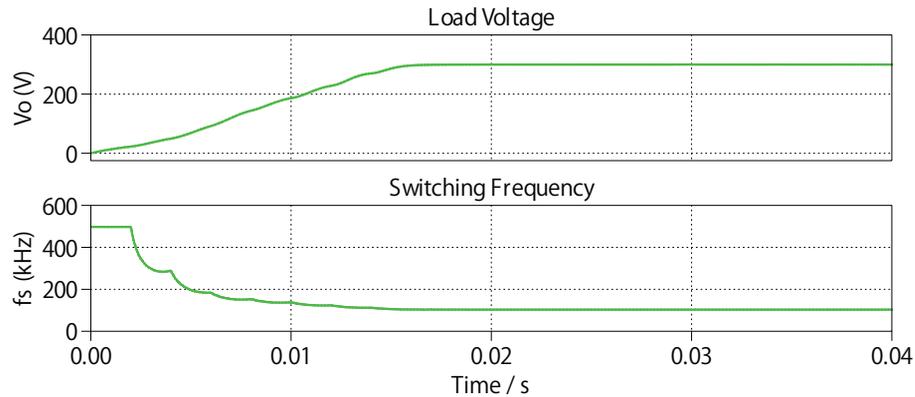


図4: 定常状態に近づく300V出力リファレンスのMOSFETジャンクション温度

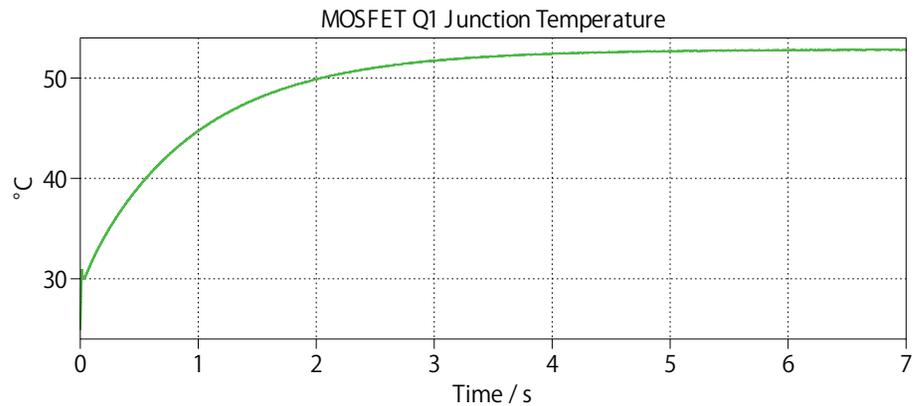


図5: トランスコアのたB-H曲線のシミュレーション

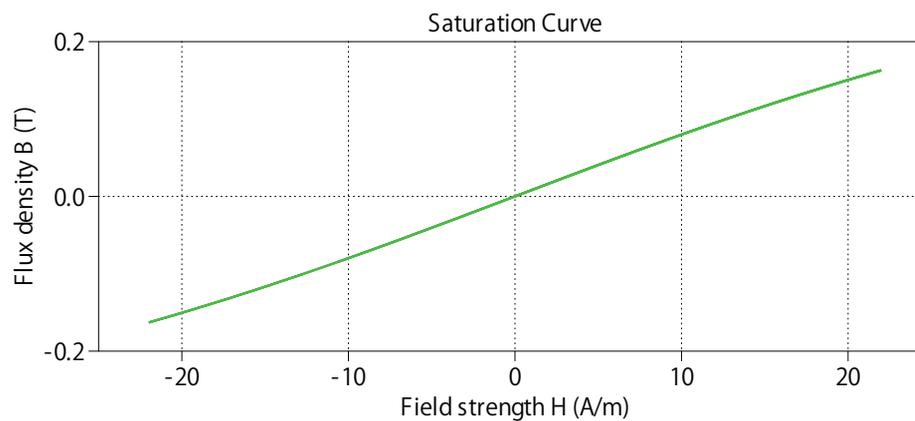


図6: 300V出力リファレンス用の定常共振タンク信号

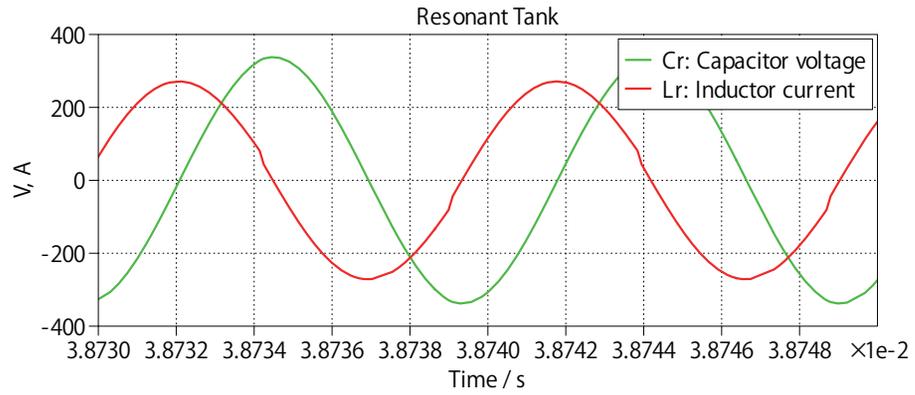


図7: 300V出力リファレンス用の定常MOSFET信号

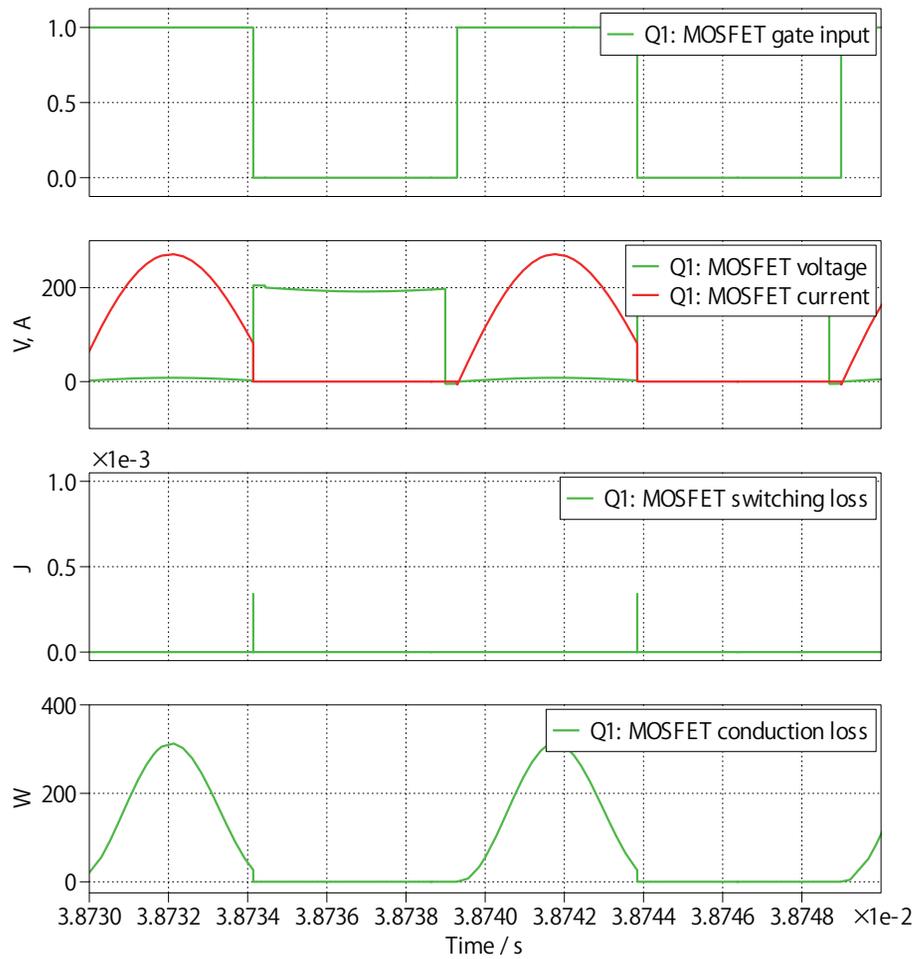


図8: 250V出力基準用の定常共振タンク信号

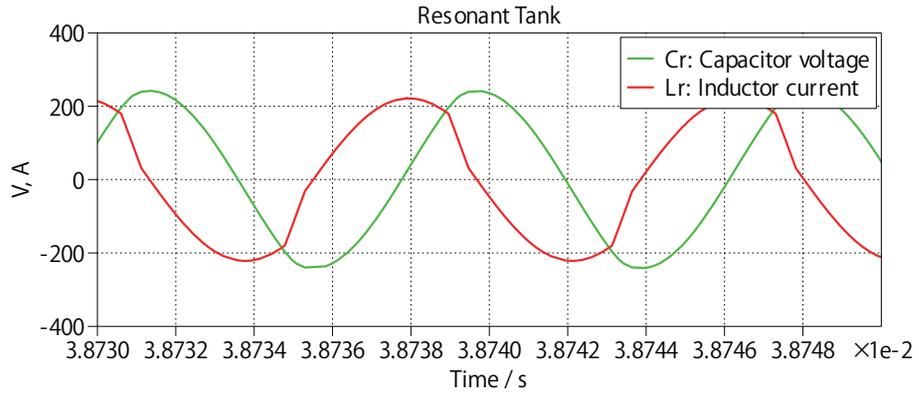
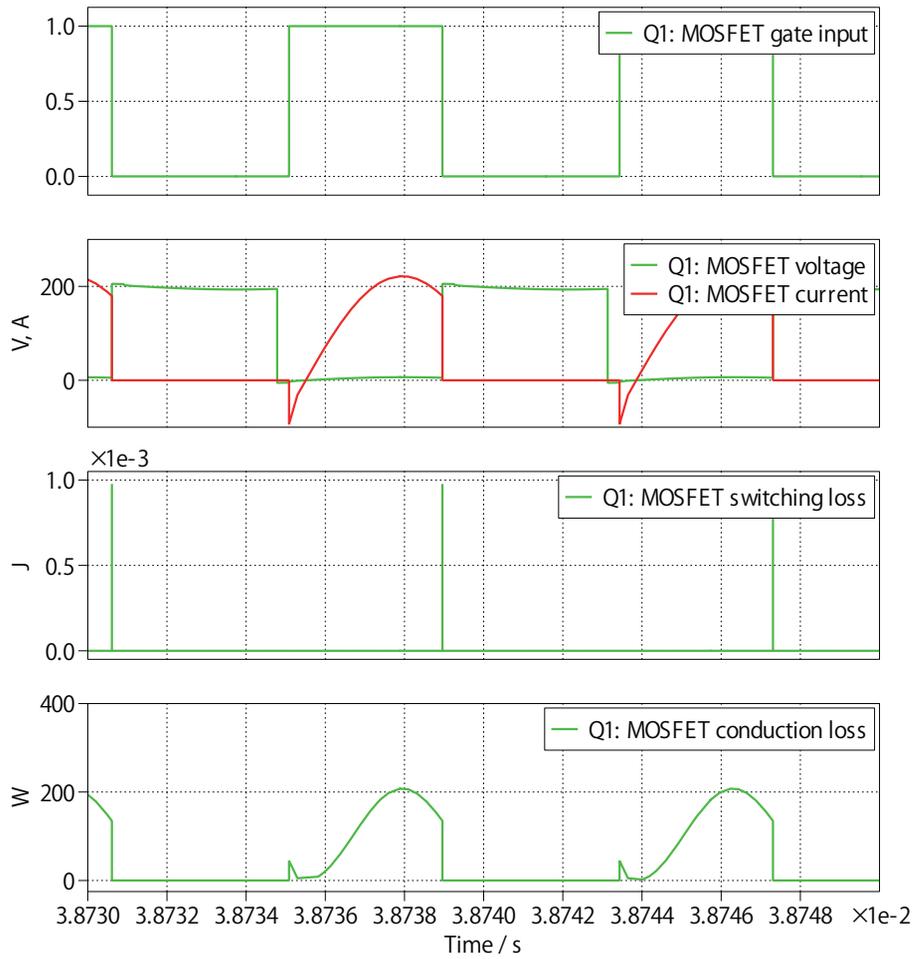


図9: 250V出力リファレンス用の定常MOSFET信号



参考文献

- [1] R. Erickson and D. Maksimovic “Fundamentals of Power Electronics”, 2nd Edition, Springer, 2001, Chapter 19.
- [2] “A More Realistic Characterization of Power MOSFET Output Capacitance Coss”, International Rectifier Application Note, AN-1001.
- [3] Digital Power Control Lab “LLC Resonant Converter”, Version 1.1, Texas Instruments, Jan 2009.

改訂履歴:

PLECS 4.3.1 初版

PLECS 4.7.2 半導体デバイスの改造; 追加損失の計算; Variable Frequency PWM
ライブラリブロックを追加

PLECS 4.9.7 コンバータを再設計して熱挙動を改善



Pleximへの連絡方法:

☎ +41 44 533 51 00	Phone
+41 44 533 51 01	Fax
✉ Plexim GmbH	Mail
Technoparkstrasse 1	
8005 Zurich	
Switzerland	
@ info@plexim.com	Email
http://www.plexim.com	Web



KEISOKU ENGINEERING SYSTEM

計測エンジニアリングシステム株式会社

<https://kesco.co.jp>

PLECS Demo Model

© 2002-2023 by Plexim GmbH

このマニュアルに記載されているソフトウェアPLECSは、ライセンス契約に基づいて提供されています。ソフトウェアは、ライセンス契約の条件の下でのみ使用またはコピーできます。Plexim GmbHの事前の書面による同意なしに、このマニュアルのいかなる部分も、いかなる形式でもコピーまたは複製することはできません。

PLECSはPlexim GmbHの登録商標です。MATLAB、Simulink、およびSimulink Coderは、The MathWorks、Inc.の登録商標です。その他の製品名またはブランド名は、それぞれの所有者の商標または登録商標です。