

**PLECS**  
*Tutorial*

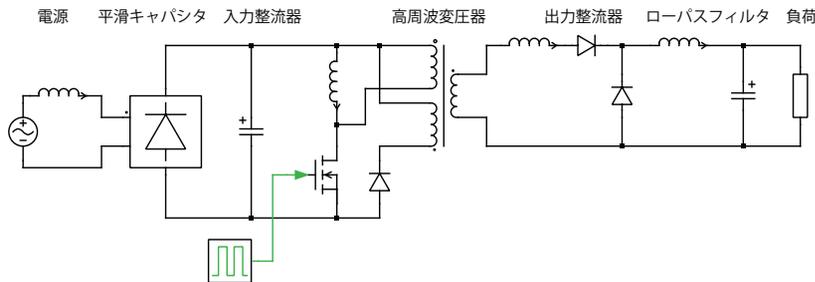
**Modeling a Switched-Mode Power Supply using PLECS**  
スイッチング電源のモデリング

Tutorial Version 1.0

# 1 はじめに

この演習の目的は、PLECSを使用して2ステージ昇圧コンバータの詳細なモデルを作成することです。図1に示す例は、単相入力整流器で生成された約325VのDC電圧を、約11Vに降圧する出力フォワードコンバータで構成されるスイッチング電源です。この演習の焦点は制御システムではなく、スイッチングコンバータのモデリングにあるため、フォワードコンバータは固定デューティサイクルのオープンループ制御モードで動作します。

図1: スwitchング電源の回路図



この演習の具体的な学習目標は次のとおりです:

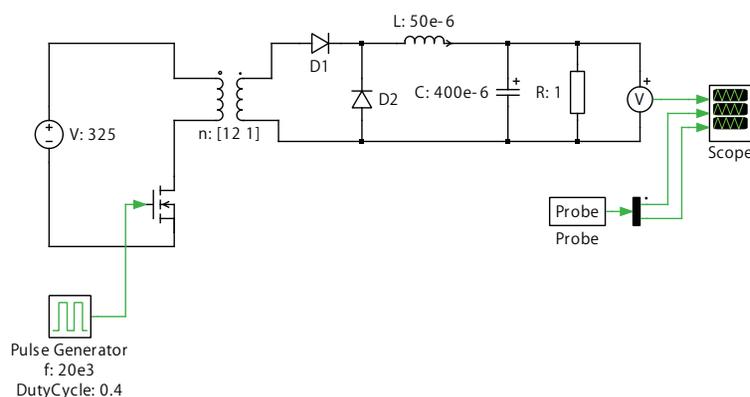
- DC-DCコンバータの詳細なモデルを段階的に作成
- 便利なキーボードショートカットをいくつかを学習
- シミュレーションに非線形の詳細を徐々に追加
- 変圧器の飽和限界を推定
- ダイオードの過電圧と過電流の立証

**始める前に:** 演習の各段階で作成したモデルと、参照モデルとを比較して確認します。

## 2 理想フォワードコンバータ

図2に示すフォワードコンバータは、基本的には絶縁型の変圧器を備えた降圧コンバータです。MOSFETがオンのとき、ダイオード $D_1$ は順方向バイアスがかかり、インダクタ電流を伝導します。この電流はオン期間中に上昇します。MOSFETがオフになると、インダクタ電流は $D_1$ から $D_2$ に転流し、減少し始めます。オフ期間中にインダクタ電流がゼロに減少しない場合、コンバータは連続伝導モード(Continuous Conduction Mode: CCM)だと言われています。フォワードコンバータの動作の詳細については[1]を参照してください。

図2: 理想フォワードコンバータのPLECS回路図



電源をモデリングするための手法は、[図2](#)に示すように、フォワードコンバータの基本モデルから始めることです。このステップでは、変圧器が理想モデルであると仮定し、固定DC電源を使用して入力整流器ステージをモデリングします。次の手順では、コンポーネントモデルに詳細を追加し、入力整流器ステージを含めます。

**あなたのタスク:** [図2](#)に示すような理想フォワードコンバータをモデリングします。ライブラリからMOSFET(理想モデル)コンポーネントを使用します。スイッチを制御するには、周波数 $20 \times 10^3 \text{ Hz}$ 、デューティ比 $0.4$ のパルス発生器ブロックを使用します。PLECSスコープを使用して負荷電圧を表示します。これらのコンポーネントをPLECSプローブブロックにドラッグし、**電流**信号をチェックすることで、MOSFET(理想モデル)とインダクタの電流を監視します。デマルチプレクサブロックを使用して、MOSFET(理想モデル)とインダクタの電流を別々のPLECSスコープのプロットに表示します。シミュレーションの**終了時間**を3ミリ秒( $3 \times 10^{-3}$ )に調整します(**シミュレーション** -> **シミュレーションパラメータ**メニューから、またはキーボードショートカットの**Ctrl + E**を使用します)。他のすべてのパラメータはデフォルトのままにして、シミュレーションを実行します(**シミュレーション**-> **開始**または**Ctrl + T**)。

**?** コンバータは連続伝導モードで動作しますか、それとも不連続伝導モードで動作しますか?

**A** 起動時の過渡現象が落ち着くと、連続伝導モードになります。連続伝導モードでは、定常状態のインダクタ電流は常にゼロより大きくなります。

 この段階では、モデルは参照モデルForward\_Converter\_1.plecsと同じになっているはずです。

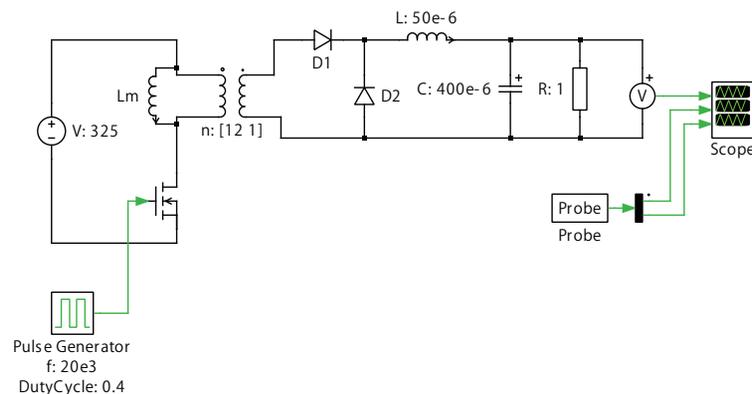
## 3 実用的なフォワードコンバータ

### 3.1 変圧器の磁化インダクタンスを含める

実際のフォワードコンバータ設計では、磁化電流が飽和レベルに達しないように、変圧器の磁化インダクタンスをモデリングする必要があります。

**あなたのタスク:** この効果をモデルに追加するには、[図3](#)に示すように、理変圧器(想モデル)の一次巻線と並列にインダクタを追加します。 $L_m$ を $L_m = 5 \text{ mH}$ ( $5 \times 10^{-3}$ )に設定して、シミュレーションを再度実行します。

図3: 磁化インダクタンスを追加したフォワードコンバータ



**?** PLECSがエラーメッセージを表示して中止するのはなぜですか?(スイッチング後の不連続状態によるエラー)

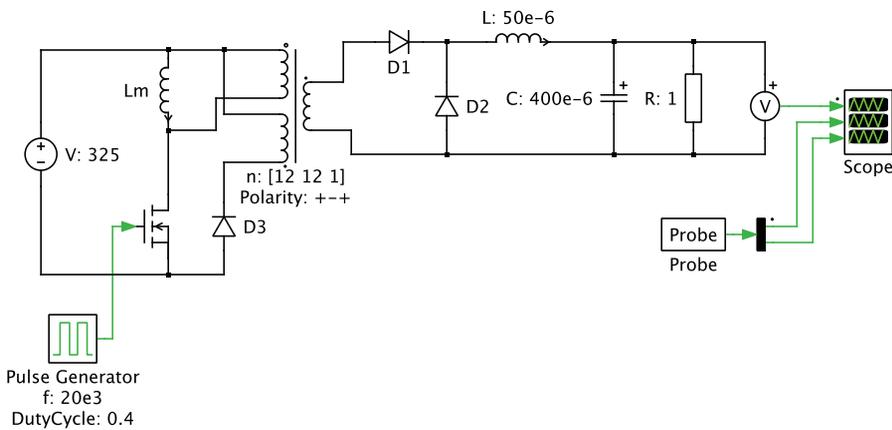
**A** MOSFET(理想モデル)がオープンになると、インダクタの電流が流れる経路がなくなり、瞬時にゼロにジャンプします。これはPLECSでは不可能です。

**💡** PLECSがこのようなエラーメッセージを表示して中断する場合は、通常、回路設計に何らかの問題があります。実際には、オフ状態のMOSFET(理想モデル)はオープンではなく、非常に大きな抵抗が存在します。これをモデリングするには、MOSFET(理想モデル)に並列接続する抵抗器(例:  $R_{off} = 10k\Omega$ )を追加します。ここでMOSFET(理想モデル)の両端の電圧を表示すると、MOSFET(理想モデル)がオフのときに非常に高い電圧が観測されます。実際の回路では、この過電圧が原因でMOSFETを破壊します。

### 3.2 消磁巻線の追加

変圧器の磁気エネルギーを回収できるようにする1つの方法は、[図4](#)に示すように第3のコイルを消磁巻線として使用することです。MOSFET(理想モデル)がオフになると、磁化電流はダイオード $D_3$ と三次巻線を経由する帰還路を持つようになります。

図4: 三次消磁巻線を追加した実用的なフォワードコンバータ



**📝 あなたのタスク:** 変圧器(理想モデル)に第3の巻線を追加し、[図4](#)に従ってダイオード(理想モデル)を接続します。これを行うには、コイル数を[2 1]に変更して、一次側に追加の巻線を追加します。巻線数12を追加([12 12 1])設定し、極性を++ に設定して極性を反転させます。

**💡 Note:** 変圧器飽和を避けるためには、MOSFET(理想モデル)が導通を開始する前に変圧器(理想モデル)を完全に消磁する必要があります。一次巻線と消磁巻線の巻数を同じにするのが一般的です。

**?** PLECSプローブブロックとPLECSスコープブロックを追加して、 $L_m$ を流れる電流を監視し、パルス発生器のデューティ比を徐々に増やします。変圧器飽和が起きる前に到達する最大デューティ比はどれくらいですか?

**A** 50%

**🏁** この段階では、モデルは参照モデルForward\_Converter\_2.plecsと同じになっているはずです。

## 4 寄生効果

コンバータの出力DC-DCステージは、理想モデルのコンポーネントを使用して正常に動作するようになりました。このモデリング演習の次の段階では、変圧器の漏れインダクタンスやダイオードの逆回復電荷などの寄生効果を追加して、これらの非理想性の影響を調査します。

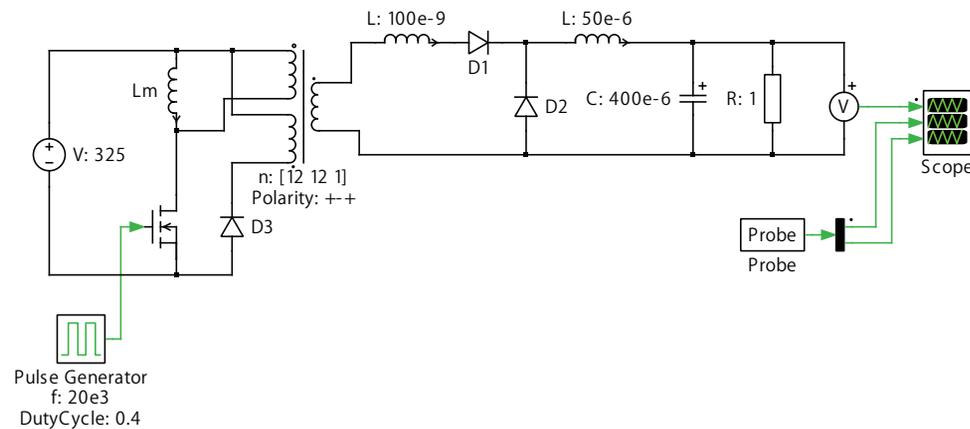
### 4.1 変圧器の漏れインダクタンス

実際の変圧器の巻線は完全には結線されていません。すべての巻線には小さな漏れインダクタンスがあり、これは巻線と直列のインダクタとしてモデリングできます。



**あなたのタスク:** 図5に示すように、変圧器(理想モデル)の二次側にインダクタンス(理想モデル) $L_1 = 100 \text{ nH}$ を追加します。

図5: 漏れインダクタンスを追加したフォワードコンバータ



- ❓ 漏れインダクタンスはダイオード $D_1$ と $D_2$ を流れる電流の形状にどのように影響しますか? 違いが観察できない場合は、整流間隔を拡大します。
- A** ダイオード電流は瞬時ではなく、短時間で上昇するようになりました。
- ❓ 漏れインダクタンスを一次巻線と消磁巻線に直列に接続できないのはなぜですか?
- A** 繰り返しになりますが、これらのパスにインダクタを追加すると、MOSFET(理想モデル)がオフになったときに誘導電流が流れる帰還路がなくなります。

## 4.2 ダイオードの逆回復

PLECSでは、パワー半導体は通常、理想スイッチ、順方向電圧、オン抵抗で構成される静的モデルで表します。ただし、場合によっては、半導体のオンおよびオフ時の動的効果を考慮することが望ましいことがあります。

パワーダイオードの逆回復効果は、おそらく最も重要な動的効果です。電力消費と過電圧が発生するため、回路設計ではこれを考慮する必要があります。この効果は、順方向バイアスのダイオードが急速にオフになったときに観察できます。導通中にダイオードに蓄積された余分な電荷が除去されるまでには、ある程度の時間がかかります。この間、ダイオードは開回路ではなく短絡し、ダイオードに負電流が流れる可能性があります。逆電流の流れによって電荷が除去されると、ダイオードは最終的にオフになります。PLECSは[2]で提示された動作モデルを使用して逆回復をモデリングします。



**あなたのタスク:** 4.1の回路で、ダイオード(理想モデル) $D_1$ と $D_2$ をダイオード(逆回復モデル) $D_{rr}$ に置き換えます。この演習では、デフォルトのパラメータを使用します。さらに、以下の質問に答えるために、ダイオードの電流と電圧を観察するPLECSプローブブロックとPLESCSスコープブロックを追加します。



**Note:** 逆回復ダイオード モデルはスティッフな微分方程式を用いており、標準のode45ソルバを使用するとエラーが発生したり、シミュレーション時間が長くなったりします。**シミュレーション・パラメータ**では、**ソルバタイプ**を、DOPRI (non-stiff) からRADAU (stiff) (PLECS Standaloneの場合)またはode15s (PLECS Blocksetの場合)に手動で変更する必要があります。しかし、PLECS バージョン4.5以降では、新しい可変ステップソルバautoがデフォルトとして追加され、シミュレーション中にモデルがスティッフになると判断した場合、DOPRIからRADAUソルバへの切り替えが自動的に行われます。デフォルトでは、**相対誤差**は $1e-3$ です。**相対誤差**を $1e-6$ に変更し、スイッチング遷移中のシミュレーション速度とダイオード電流への影響を観察します。



定常動作時のダイオード(逆回復モデル) $D_{rr1}$ のピーク過電流値と、ダイオード(逆回復モデル) $D_{rr2}$ のピーク過電圧はどれくらいですか? PLECSスコープ内のカーソルを使用してピーク過電流値を測定します。



$D_{rr1}$ の場合は $\sim 18A$ 、 $D_{rr2}$ の場合は $\sim 30V$ 。



この段階では、モデルは参照モデルForward\_Converter\_3.plecsと同じになっているはずです。

## 5 主整流器を追加

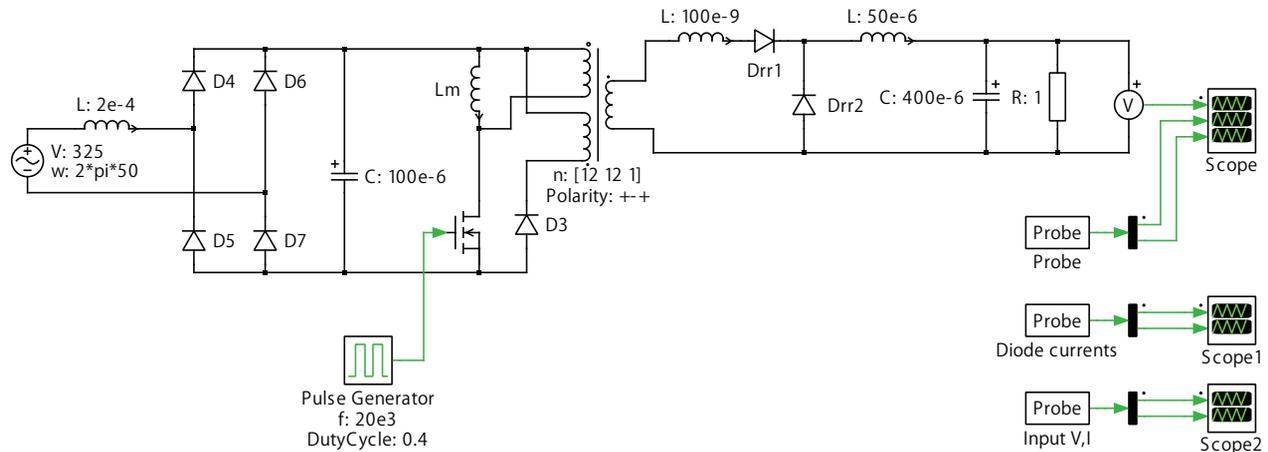
この演習の最後では、DC電圧源を主整流器ステージに置き換えてコンバータモデルを完成させます。



**あなたのタスク:** 単相主電源をモデリングするには、 $200 \mu H$ のインダクタと直列に、 $325V$ ( $230V_{rms}$ )、 $50Hz$ のAC電圧源コンポーネントを追加します。電源の入力ステージは、DC平滑キャパシタを備えたダイオード整流器で構成されます。[図6](#)のように入力ステージをモデリングし、PLECSスコープブロックを使用して主電源電流とDCリンク電圧を表示します。主電源の2つの完全な周期をシミュレートするには、シミュレーションの**終了時間**を40ミリ秒( $40e-3$ )に調整します。

 この段階では、モデルは参照モデルForward\_Converter\_4.plecsと同じになっているはずですが。

図6: 主整流器とフォワードコンバータを含む電源の回路モデル



## 6 まとめ

この演習では、理想フォワードコンバータモデルから始めて、2ステージDC-DCコンバータの詳細なモデルを作成するための段階的な手法を示しました。ダイオードの逆回復効果が追加されると、シミュレーションモデルの時定数が桁違いなため、システムは数値的にスティッフになりました。逆回復現象の時定数は10nsの範囲で、出力フィルタの時定数は1msのオーダーです。ただし、スティッフソルバと適切な相対誤差を使用すれば、コンバータを高速でシミュレートすることは可能です。

実際には、出力電圧を調整するために制御システムが追加されます。電圧コントローラは、PLECSコンポーネントライブラリ内の制御ブロックを使用して簡単に実装できますが、この手順はユーザが検討する必要があります。

## 7 参考文献

- [1]Ned Mohan, Tore M. Undeland, William P. Robbins, *Power Electronics – Converters, Applications and Design*, Third Edition, John Wiley & Sons, 2003
- [2]Alan Courtay, MAST Power Diode and Thyristor Models Including Automatic Parameter Extraction, SABER User Group Meeting Brighton, UK, September 1995

改訂履歴:

Tutorial Version 1.0 初版

**plexim**

☎ +41 44 533 51 00

+41 44 533 51 01

✉ Plexim GmbH

Technoparkstrasse 1

8005 Zurich

Switzerland

@ info@plexim.com

<http://www.plexim.com>

**Pleximへの連絡方法:**

Phone

Fax

Mail

Email

Web

**KESCO** 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 Tutorial*

© 2002–2022 by Plexim GmbH

このマニュアルで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。