



# PLECS Tutorial

## Introduction to the PLECS Magnetic Domain

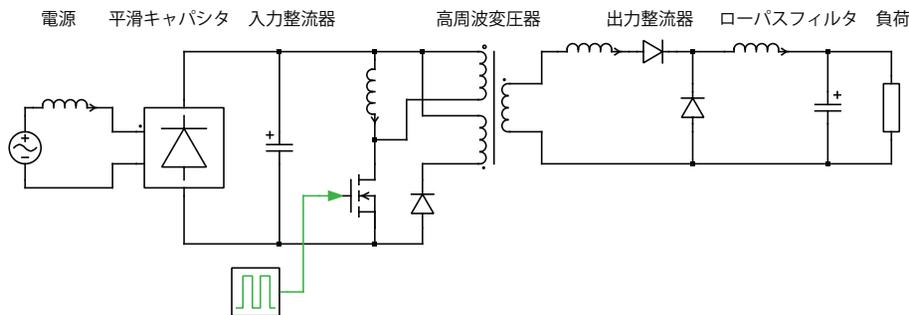
磁気回路ブロックの紹介

Tutorial Version 1.0

# 1 はじめに

この演習の目的は、PLECSの磁気コンポーネントを使用して、磁気コアの飽和を含むフォワードコンバータ用の変圧器を設計することです。[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。

図1: スwitchング電源の回路図



**始める前に:** 作業ディレクトリにmagnetics\_domain\_start.plecsファイルが配置されていることを確認してください。また、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。

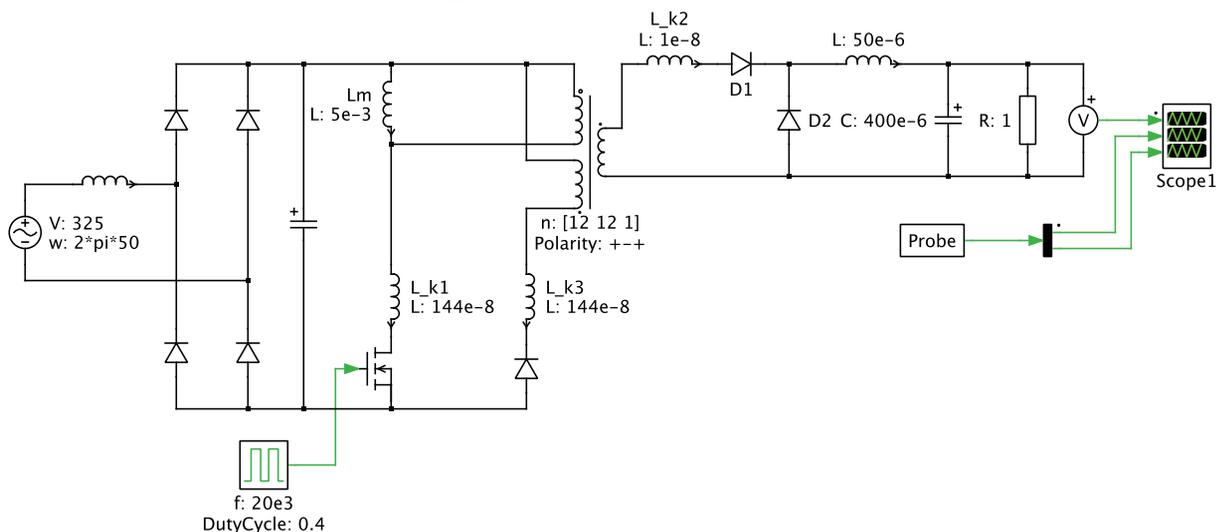
## 2 理想フォワードコンバータへの漏れインダクタンスの追加

[図1](#)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。最初のチュートリアルでは、トランスの二次側に漏れインダクタンスを追加しましたが、実際のトランスは完全には結線されておらず、実際にはすべての巻線に小さな漏れインダクタンスがあります。ただし漏れインダクタンスは回路に追加しない限り、一次巻線および消磁巻線と直列に接続することはできません。

 **あなたのタスク:** magnetics\_domain\_start.plecsを開きます。

1 [図2](#)に示すように、一次巻線と消磁巻線に $144e-8$ の漏れインダクタンスを追加し、シミュレーションを実行します。

図2: 3つの巻線すべてに漏れ電流が追加された変圧器



❓ なぜこれが問題を引き起こすのでしょうか?(半導体の伝導状態を見て、磁化インダクタンス電流の経路を探してみてください。)

A 磁化電流が流れる経路がないため、スイッチがオフになった後に蓄積されたエネルギーを消費するために、漏れ抵抗を追加する必要があります。

2 3次巻線のスイッチとダイオードの両方に並列に1e6の抵抗を追加し、出力側の2つのダイオードも抵抗を追加します。  
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、**相対誤差**パラメータを1e-5に強化し、**ダイオードターンオン電圧閾値**を0.0001に変更して、ダイオードのバウンスを防止します。次にシミュレーションを再実行します。結果は、巻線の漏れがないモデルの場合と同様になるはずですが、各半導体と並列に浮遊容量が存在する可能性もありますが、実際に非常に小さい容量値のため、これをモデルに追加するとシミュレーション速度が大幅に低下するため、この演習では考慮しません。

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

### 3 磁気コンポーネントを使用した変圧器の実装

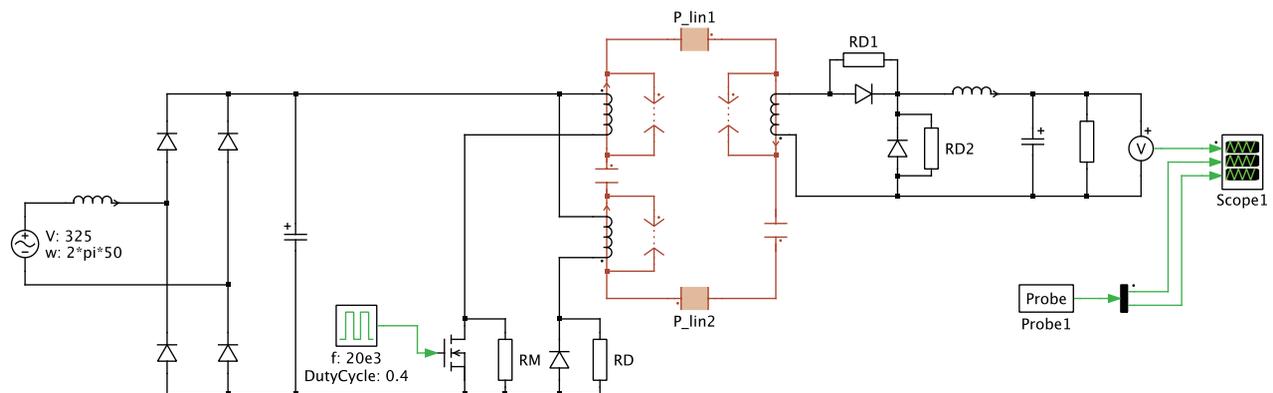
#### 3.1 線形パーミアンスを用いた磁気回路の設計

ここで、変圧器の電気等価回路を磁気回路ブロックライブラリのコンポーネントに置き換えます。磁気コアの主なインダクタンスの主要なパラメータは以下の表1に示しています。絶対磁束経路の長さはすでに2で除算しているため、パラメータを直接使用できます。

表1: 図3に示す線形コア要素の主なパラメータ

パラメータ	計算変数	値
磁路長(m)	$l_{core}$	0.175
断面積(m <sup>2</sup> )	$A_{core}$	$2.7 \cdot 10^{-4}$
磁気飽和(T)	$B_{sat}$	1.56
不飽和比透磁率	$\mu_r \cdot \mu_{unsat}$	45000

図3: 線形コア、エアギャップ、漏れ磁束を含む磁気回路を備えたフォワードコンバータ





## あなたのタスク:

- 1 3巻線の変圧器(理想モデル)および4つのインダクタを含む、変圧器を表す電気回路を削除します。巻線コンポーネントを使用して、壊れた3つの電気端子を磁気ドメインに接続します。[図3](#)に示す巻線の矢印の方向に注意してください。一次巻線と消磁巻線( $N_1, N_3$ )には巻数72、二次巻線( $N_2$ )には巻数6を使用します。二次巻線と消磁巻線は負極性で巻く必要があることに注意してください。これは、各巻線のブロックの配置から構成できます。
- 2 磁気回路の上部と下部に線形コアコンポーネントを追加し、コアの半分と巻線を配線してループを完成させます。また、[図3](#)に示すように、回路の両側にエアギャップコンポーネントを追加し、各巻線と並列に漏れ磁束コンポーネントを追加します。表1の値を使用して、線形コアの**断面積**、**磁束長**、**比透磁率**パラメータを入力します。線形コアの場合、不飽和相対透磁率は相対透磁率 $U_r$ に等しくなります。

## 3.2 エアギャップの計算



## あなたのタスク:

- 1 まず、単一のコアコンポーネントの磁気抵抗を計算する必要があります。この式は次のとおりです:

$$R_{\text{mag,core}} = \frac{1}{\mu_0 \cdot \mu_{r,\text{unsat}}} \cdot \frac{l_{\text{core}}}{A_{\text{core}}} \quad (1)$$

ここで $\mu_0 = 4\pi \cdot 1e-7$ は真空透磁率定数であり、 $\mu_{r,\text{unsat}}, l_{\text{core}}, A_{\text{core}}$ は上記の[表1](#)に示されています。

- 2 次に、エアギャップの断面積を計算する際に、フリンジング効果を考慮するために乗算係数を1.1と仮定します。したがって、

$$A_{\text{air-gap}} = 1.1 \cdot A_{\text{core}} \quad (2)$$

- 3 次に、磁気回路と各エアギャップの合計磁気抵抗を計算します。式は以下のとおりです:

$$R_{\text{mag,total}} = \frac{N_1^2}{L_m} \quad (3)$$

ここで、 $N_1$ は一次巻線の巻数、 $L_m$ は一次側の目的の磁化インダクタンス( $5e-3$ )であり、

$$R_{\text{mag,air-gap}} = \frac{R_{\text{mag,total}} - 2 \cdot R_{\text{mag,core}}}{2} \quad (4)$$

- 4 最後に、単一のエアギャップの長さを計算するために、次の式を使用します:

$$l_{\text{air-gap}} = R_{\text{mag,air-gap}} \cdot \mu_0 \cdot A_{\text{air-gap}} \quad (5)$$

計算した値をコンポーネントのパラメータに入力するか、パラメータの変数を指定して、すべての計算と一致する変数を**モデル初期化コマンド**ウィンドウに配置します。このウィンドウは、**シミュレーション** -> **シミュレーションパラメータ...**メニューの**初期化**タブにあります。

### 3.3 漏れパーミアンスを計算



あなたのタスク:

- 3つの巻線それぞれの漏れパーミアンスを計算します。最初の演習では、二次巻線( $L_{k2}$ )に $1e-8$ の漏れインダクタンスを使用しました。3つの巻線それぞれの漏れ経路の磁化抵抗は同じであるため、漏れインダクタンスは巻線の巻数の2乗に比例すると仮定します。一次巻線と消磁巻線の漏れインダクタンスの式は次のとおりです:

$$L_{k1} = \left( \frac{N_1}{N_2} \right)^2 \cdot L_{k2} \quad (6)$$

$$L_{k3} = \left( \frac{N_3}{N_2} \right)^2 \cdot L_{k2} \quad (7)$$

- 次に、各漏れ磁束経路の等価パーミアンスが、各巻線ごとに次のように計算します:

$$P_{kn} = \frac{L_{kn}}{N_n^2} \quad (8)$$

- シミュレーションを実行し、結果を純粋に電気ドメインで設計された変圧器のモデルの結果と比較します。計算結果が正しいかどうか分からない場合は、[表2](#)で検証してください。



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

### 3.4 磁気コアに飽和を追加



あなたのタスク:

- 2つの線形コアコンポーネントを飽和コアコンポーネントに置き換え、[表1](#)の情報を使用してブロックパラメータを構成します。コアコンポーネントの**飽和比透磁率**パラメータはデフォルト値のままにしておきます。
- フィッティング関数**は磁場強度と磁束密度の非線形関係に適したcothを選択します。
- モデルにXYプロットコンポーネントを追加し、PLECSプローブブロックを使用して飽和コアコンポーネントの1つのBHループを測定します。一つのPLECSプローブで磁場強度と磁束密度をプローブし、出力をXYプロットに直接配線すると、2つの信号の関係が表示されます。
- パルス発生器の**デューティ比**を0.4から0.6に増やし、BHループの変化を観察します。



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

## 4 まとめ

この演習では、変圧器の実用的なモデルを作成するための段階的な手法を示しました。電氣的等価回路と、線形コアや飽和コアを持つPLECSの磁気ドメイン回路との比較を示しています。PLECSのXYプロットを使用すると、コアコンポーネントのBHループを表示できます。磁気回路は、固有損失の分析のために簡単に拡張できます。磁気抵抗コンポーネントは、特定の損失の性質に応じて、パーミアンスに直列や並列に接続できます。また、ヒステリシスコアブロックでは、磁化サイクルによるヒステリシス損失を実装できます。

## 5 計算結果

[表2](#)に、磁気コンポーネントに関するセクション[3.2](#)および[3.3](#)の計算結果を示します。

表2: 磁気コンポーネントの計算パラメータ

コンポーネント	パラメータ	値
エアギャップ(2)	断面積(m <sup>2</sup> )	$2.97 \cdot 10^{-4}$
エアギャップ(2)	経路長(m)	$1.892 \cdot 10^{-4}$
経路長(3)	等価パーミアンス	$2.778 \cdot 10^{-10}$

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*

© 2002–2021 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。