



# PLECS Tutorial

## Analysis Tools in PLECS Standalone

PLECS Standaloneの解析ツール

Tutorial Version 1.1

---

|     |        |    |
|-----|--------|----|
| 1   | はじめに   | 2  |
| 2   | ツールの概要 | 2  |
| 2.1 | 定常解析   | 2  |
| 2.2 | 小信号解析  | 6  |
| 3   | 演習     | 8  |
| 3.1 | 定常解析   | 8  |
| 3.2 | 小信号解析  | 9  |
| 4   | 参考文献   | 13 |

# 1 はじめに

PLECSの解析ツールは、定常解析および小信号解析を実行するために使用できます。定常解析ツールを使用するとシステムの定常状態の動作点を見つけることができ、小信号解析ツールを使用すると、開ループおよび閉ループの伝達関数を取得できます。小信号解析には、AC周波数解析、インパルス応答解析、マルチトーン解析の3種類があります。

このチュートリアルでは、これらのツールをいつ、どのように使用するかを学習します。このチュートリアルでは、各解析ツールの理論的背景については説明しません。ただし、システムレベルのシミュレーションでの応用に重点を置いています。各手法の理論的背景の詳細については、PLECSユーザマニュアル[1]を参照してください。

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

## 2 ツールの概要

PLECS Standaloneでは、**シミュレーションメニュー -> 解析ツール...**からアクセスできる特別な定常解析および小信号解析ツールを提供しています。次のセクションでは、さまざまなツールの最も重要なプロパティの概要を簡単に説明します。

### 2.1 定常解析

ほとんどの動的システムは、最初の動的過渡プロセスを経て、最終的に定常状態に落ち着きます。システムの定常状態は、すべての状態変数 $x$ がまったく変化しない

$$\text{一定(DC)動作点: } \dot{x}(t) = 0, \forall t > t_s \quad (1)$$

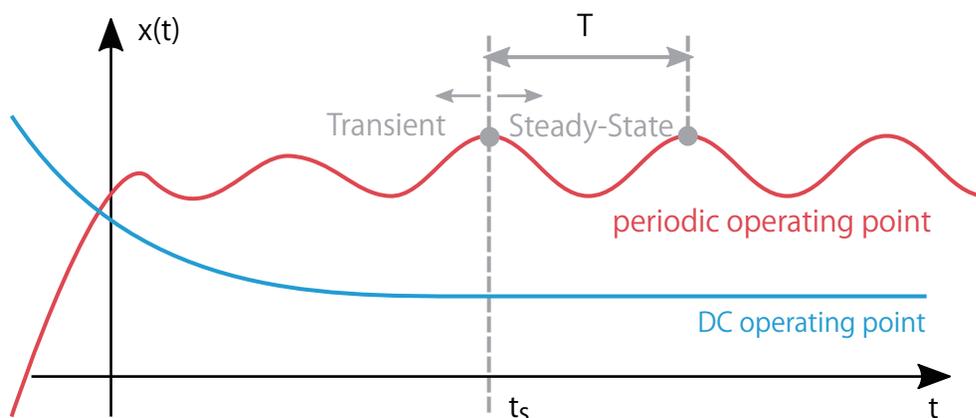
または、周期的に変化する

$$\text{周期的動作点: } x(t + T) = x(t), \forall t > t_s \quad (2)$$

のいずれかの期間 $t_s$ 後に到達します。

2つのケースを図1に示します。これらの2つのオプションは、**定常解析**ツールのパラメータウィンドウで選択することもできます。

図1: 周期的およびDC動作点



**注意:** 定常解析を実行する場合、状態変数 $x$ の定常状態値のみを計算できますが、が実際に定常状態達する時間 $t_s$ は計算できません。

## アルゴリズム

**一定動作点** 一定動作点を持つシステム、つまりパッシブフィルタの定常状態は、過渡シミュレーションを行わずに状態空間の記述から直接計算できます。式(1)の一定動作点の特性を用いて定常状態は次のように計算します。

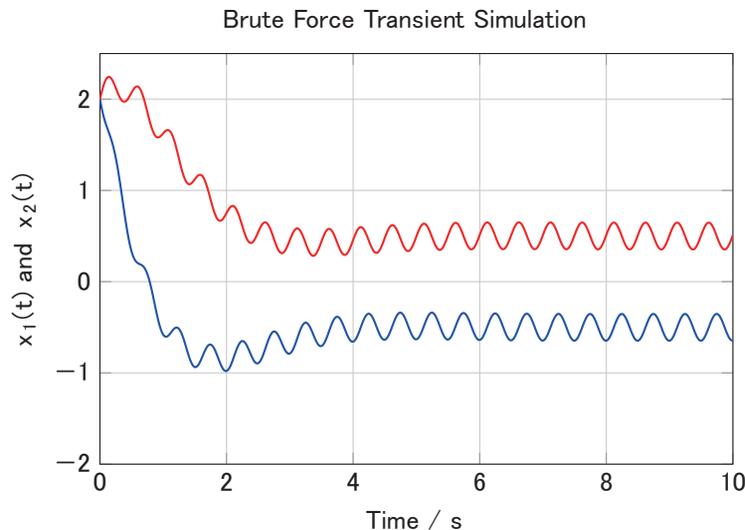
$$\dot{x} = 0 = Ax + Bu \Rightarrow x = A^{-1}Bu \quad (3)$$

**周期動作点** 周期動作点の定常解析ツールは、システムの位相空間で計算を実行します。このプロセスを視覚的に理解するには、具体的な例が必要です。次の動的システムを考えてみましょう:

$$\dot{x} = \underbrace{\begin{pmatrix} -1 & -1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix}}_A x + \underbrace{\begin{pmatrix} 2 & 0 \\ 0 & 2 \end{pmatrix}}_B \underbrace{\begin{pmatrix} \sin(4\pi t) \\ \cos(4\pi t) + 0.5 \end{pmatrix}}_u \quad \text{with} \quad x(0) = \begin{pmatrix} 2 \\ 2 \end{pmatrix} \quad (4)$$

微分方程式は、ポイント $t_s$ までの時間軸上で式(4)をシミュレートすることで解くことができます。ただし、このようなシミュレーションは、システムの初期の過渡動作が遅いため、時間がかかる場合があります。式(4)の結果の例を図2に示します。この例のPLECSモデルsteady\_state\_analysis\_example.plecは、このチュートリアル演習の解答とともに配布されています。

図2: 例モデルの過渡解析



定常状態を計算する別の方法は、周期的な成分を調べることによってシステムの周期性を決定することです。一般に、システム周期はシステム内のすべてのAC周期の最小公倍数として計算されます。この例では、式(4)の状態空間記述の入力ベクトルに2つのAC項があります。Sin関数とCos関数の周期は2Hzです。定常状態では、位相空間の軌跡( $x_2(t)$ と $x_1(t)$ )は、この周期性を円として示しています(図3を参照)。

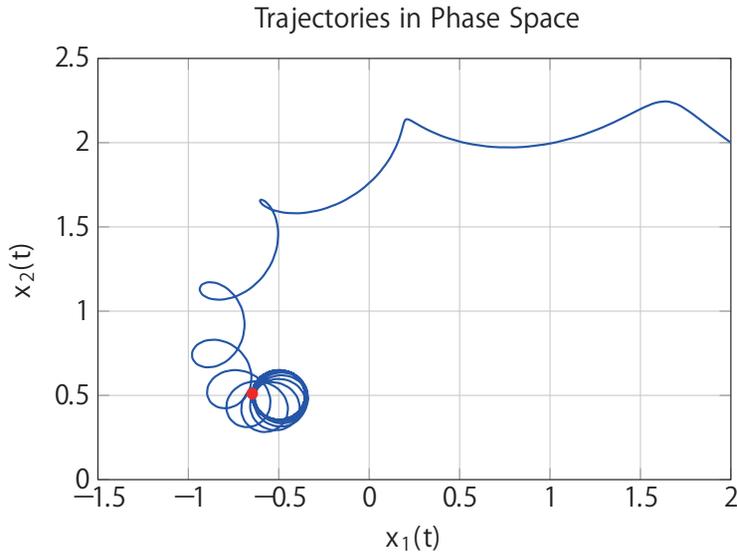
解の周期性により、定常状態では次の式が成り立ちます:

$$x = F_T(x) \quad (5)$$

ここで、 $F_T$ は、状態 $x$ から始まる1つのシステム周期 $T$ の過渡シミュレーションを示します。この式を整理すると:

$$f(x) = F_T(x) - x = (0, 0) \quad (6)$$

図3: サンプルモデルの軌跡。赤い点は定常状態の値を示しています。

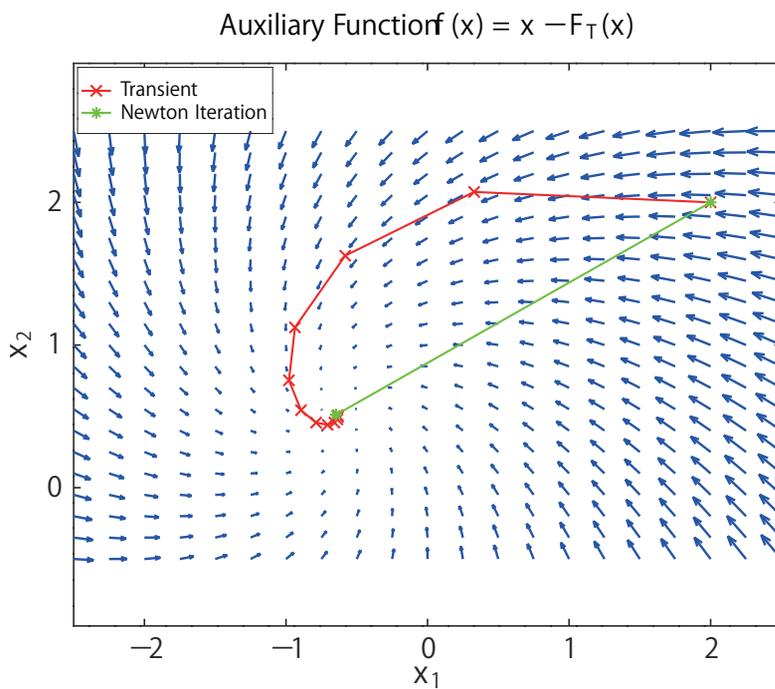


関数 $f(x)$ は、ルートがシステムの定常状態と一致する補助関数です。したがって、関数 $F_T(x)$ の計算により、一定の動作点を持つシステム内の周期システムに効果的に変換することができます。

### 視覚化

位相空間における定常状態の求め方は、図4のベクトル場を使用して視覚化できます。位相空間 $(x_1, x_2)$ の各点には、青色のベクトル $f(x) = (f_1(x_1, x_2), f_2(x_1, x_2))$ が割り当てられます。ニュートン法の開始点は $(2, 2)$ で、矢印は長いため、定常状態から遠く離れています。

図4: 補助関数 $f(x)$ のベクトル場



赤い線は、開始点を $(2, 2)$ に、最終的な定常状態の値を $(-0.65, 0.5)$ とする $F_T(x)$ のその後の過渡計算を示しています。この計算には時間がかかります。最終点では矢印の長さがゼロになり、補助関数がゼロであるため、定常状態に達したことを意味します。

一方、式(6)とニュートン法を使用した定常状態の計算は、過渡シミュレーションよりもはるかに高速です。この例では、反復は最初のステップですでに収束しています。その結果は図4に示されています。ポイントは2つだけで、1つは開始点、もう1つは最終的な定常状態です。



**注意** 一般的なケースでは、過渡計算と反復計算の計算速度の違いは、このケースほど明確でない場合があります。特に、閉ループ制御とスイッチングパワーコンバータを備えたより複雑なパワーエレクトロニクスシステムシステムの場合、ニュートン法では通常、収束するまでにより多くのステップが必要になります。

## 解析

定常解析を実行する前に、いくつかのモデル/シミュレーション要件を満たす必要があります:

- ・ システム周期 $T$ は、システム内のすべてのAC電源の周期の最小公倍数です。**システム周期**パラメータフィールドでautoが選択されている場合、PLECSはこの数値の計算を試みます。ただし、PLECS に実装が不明な特殊なブロックが使用されている場合、計算が間違ってしまう可能性があり、システム周期をユーザが計算する必要があります。計算されたパラメータが実際のシステム周期またはその整数倍を反映していない場合、解析は無意味な結果をもたらすか、完全に収束しません。
- ・ システム周期 $T$ は、**解析を実行する前**に知っておく必要があります、**システム周期**パラメータフィールドで指定する必要があります。たとえば、可変スイッチング周波数制御または可変速度ドライブを備えたコンバータの場合、定常解析は使用できません。
- ・ 解析中は、周期的な成分を除いてシステム内に過渡現象が発生してはなりません。たとえば、過渡シミュレーション中にシステムのインピーダンス行列を変更するスイッチ/ステップ負荷を追加しないでください。そうしないと、定常解析は収束しません。



**注意** これらの要件が満たされているにもかかわらず、定常状態解析が収束しない場合は、**定常解析ツール**ウィンドウの**オプション**タブで**初期定常周期**を増やすと効果があります。これにより、システムの状態を定常状態に少し近づけるために、強制的に初期の過渡シミュレーションが実行されます。

## 電気-熱解析

熱システムでは通常、電気システムよりも大幅に大きな時定数を持つ過渡現象があるため、電熱モデルの定常動作点を見つけることは難しい場合があります。この問題に対処するにはさまざまな手法があります:

- 1 定常解析ツールを使用
  - + 電気的および熱的状态の定常状態動作点の高速計算
  - ニュートン法の収束の計算限界
- 2 過渡シミュレーションを実行
  - + ロバスト性
  - 完了するまでに非常に長い時間がかかり、過剰なデータストレージが必要
- 3 熱容量を人為的に減少させ、過渡シミュレーションを実行
  - + 熱時定数が減少(シミュレーションが高速になる)
  - 温度リップルの増加(システムが熱的に不安定になる可能性がある)

4 電気と熱のシミュレーションを別々に使用

+ ロバスト性

- 2つのシミュレーションモデルと2つのシミュレーションが必要であり、温度依存の抵抗は考慮されない

2.2 小信号解析

PLECSの小信号解析は、コントローラ設計のワークフローで使用することができます。

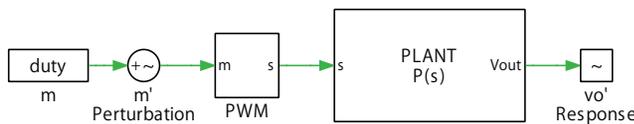
制御から出力(プラント)への伝達関数

設計プロセスの最初のステップはシステム、つまりプラントの伝達関数を見つけることです。伝達関数は、入力の変化に応じて出力がどれだけ速く変化するかをの尺度です。電力変換のコンテキストでは、プラント伝達関数は、非安定化コンバータの入力外乱が負荷に与える影響を表します。

たとえば、[図5](#)のシステムの制御から出力(プラント)への伝達関数は次のとおりです:

$$P(s) = \frac{V_o(s)}{m(s)} \tag{7}$$

図5: 開ループコントローラを備えたシステム

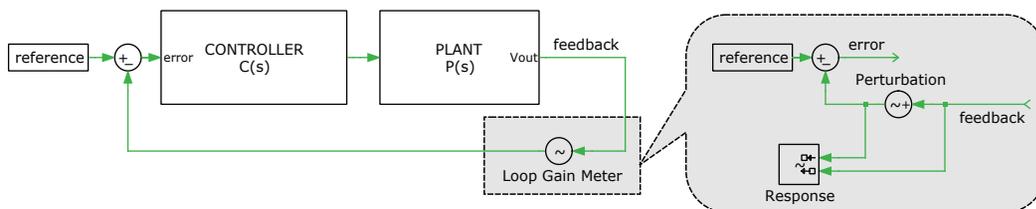


この伝達関数を取得するために、PLECS制御器ブロックライブラリの小信号解析コンポーネントを使用します。"小信号外乱"ブロックは適切な外乱信号を生成(または注入)し、"小信号応答"ブロックは小信号解析でシステム応答を測定します。

開ループゲイン

コントローラをプラント伝達関数に基づいて設計すると、開ループゲインを計算することで閉ループシステムの安定性を予測できます。[図6](#)に示す"ループゲイン・メーター"(Small Signal Gain)ブロックは、閉ループ制御の開ループゲインを測定します。このブロックは、まず"小信号外乱"ブロックを使用してフィードバックループに外乱を挿入し、次に"小信号応答"ブロックを使用してシステム応答を測定します。これにより、"ループゲイン・メーター"コンポーネントはフィードバックループをカットオフしながら、フィードバック出力の値を更新してループゲインを計算できます。閉ループ制御システムの測定された開ループゲインは $C(s) \cdot P(s)$ です。

図6: 閉ループコントローラを備えたシステム



そして、安定性を決定するゲインマージンと位相マージンが満たされているならば、シミュレーションによって設計を検証できます。それ以外の場合は、設計の反復を実行します。

## さまざまな種類の小信号解析の概要

コンバータの小信号応答を計算するために利用できるさまざまな解析ツールがあります。システムの線形化を手動で実行する場合と同様に、ツールは最初にシステムの定常状態の操作点を計算(定常解析)し、次に小信号外乱を適用します。特定の問題に対して適切なツールを使用することが重要です。以下の表は、各ツールの主なプロパティの概要を示しています。

表1: 解析ツールの概要

| ツール       | # 解析あたりのシミュレーション数 | ループゲインの計算 | 定常解析 | 定常状態の種類  |
|-----------|-------------------|-----------|------|----------|
| マルチトーン解析  | 2                 | Yes       | 過渡   | 周期的およびDC |
| AC周波数解析   | n                 | Yes       | 反復   | 周期的およびDC |
| インパルス応答解析 | 1                 | No        | 反復   | 周期的      |

[表1](#)から導き出せる主な結論は次のとおりです:

**# 解析あたりのシミュレーション数** 周波数応答は、n個の個々の周波数で構成されます。外乱のタイプ(正弦波、ディラックパルスなど)に応じて、必要なシミュレーションの数は異なります。より多くのシミュレーションが必要になるため、解析には時間がかかります。

**ループゲインの計算** インパルス応答解析はループゲインの計算をサポートしていませんが、制御から出力(プラント)への伝達関数を決定するため(または出力インピーダンスを測定するため)にのみ使用する必要があります。

**定常解析** マルチトーン解析のみが、定常状態に到達するために"強制"過渡解析を使用します。この手法は共振コンバータなど、解析前にシステム周期がわからないシステムに必要です。

**定常状態の種類** マルチトーン解析とAC周波数解析はどちらも、パッシブフィルタなどの一定(DC)の動作点を持つシステムの小信号動作を解析できます。

## 3 演習

### 3.1 定常解析

このチュートリアルでは、熱モデルを備えた単相インバータを使用して、周期的な動作点の定常解析を実行する方法を見ていきます。



**あなたのタスク:** 添付ファイルからPLECSモデルanalysis\_tools\_steadystate\_start.plecsを見つけて開きます。シミュレーションを開始し、"Electrical"および"Thermal"というラベルの付いたPLECSスコープを開いて、シミュレーション結果を観察します。電気システムの過渡現象は、熱システムよりもはるかに早く落ち着くことがわかります。

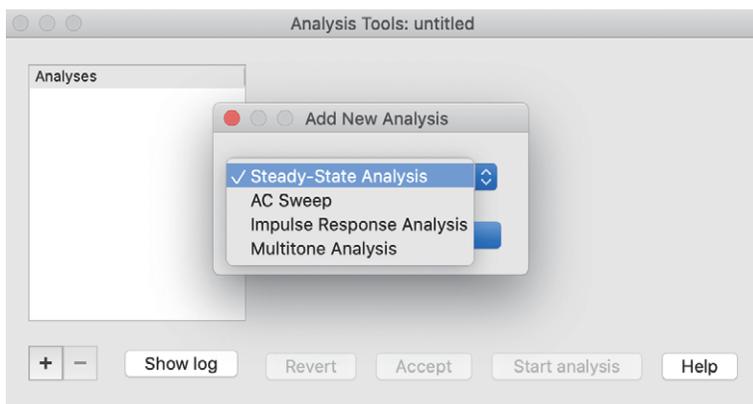
ここで、モデルの定常解析を設定します。



**あなたのタスク:**

- 1 シミュレーション -> 解析ツール...ニューから**解析ツール**ダイアログボックスを開きます。左下の+アイコンをクリックして新しい解析を追加し、[図7](#)のように、ドロップダウンメニューから定常解析を選択します。このモデルには2つの周期的なソース(正弦波信号ブロックと対称PWMブロック)があるため、**基本設定**タブで**定常動作点**を周期的に設定します。

図7: 解析ツールダイアログ



**?** モデルのシステム周期はどのくらいですか? この例では、オプションのautoは機能しますか?

**A** 正弦波信号ブロックは60Hz ( $T_{s1} = 0.01666667$ s)で構成され、スイッチング周波数は50kHz ( $T_{s2} = 20\mu$ s)です。これら2つの周期の最小公倍数は0.05秒です。PLECSでは、**システム周期**パラメータにautoオプションを付けて、同じ結果を計算します。

- 2 シミュレーション開始時間パラメータは0のままにしておきます。目的の開始時間は、ステップイベント、ランプ、その他のシステム障害などの時間指定イベントよりも長く設定する必要があります。
- 3 次に、**定常周期の表示**パラメータを5に設定します。このパラメータは、解析の完了時に表示される定常状態のサイクル数を定義します。

4 定常解析はニュートン・ラフソン法に基づいており、**オプション**タブのパラメータはアルゴリズムの微調整に役立ちます。詳細な説明はPLECSユーザマニュアル[1]に記載されています。ここでは、これらのパラメータをデフォルト値のままにして、**変更確認**および**解析開始**をクリックして定常解析を開始します。解析の進行状況は、**ログを表示**ボタンをクリックすると確認できます。

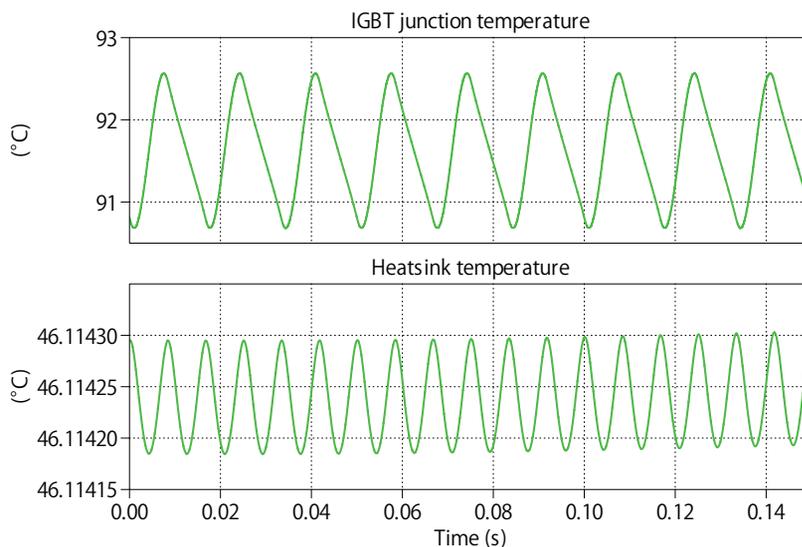
**?** 解析が収束しない場合はどうすればよいですか？

- A**
- まず、システム周期が適切に定義され計算されているかどうかを確認します。
  - 次に、**オプション**タブで**初期定常周期**を増やすことで収束を改善できます。このパラメータは、システムを定常状態に近づけるための強制的な初期シミュレーションを実行します。これにより、ツールの収束性は向上しますが、PLECSが全体の定常シミュレーションを実行するのにかかる時間は長くなります。1つの初期定常周期の長さは1システム周期と等しいことに注意してください。

ニュートン法は二次収束を示すため(実際に収束すると仮定)、**最大反復計算回数**を増やしてもほとんど役に立ちません。

 この段階では、モデルはanalysis\_tools\_steadystate\_1.plecsと同じになっているはずですが。得られたシミュレーション結果は、[図8](#)(熱シミュレーション結果)と同じであるはずですが。

図8: 定常解析のシミュレーション結果



### 3.2 小信号解析

制御から出力への伝達関数を計算

このセクションでは、[図9](#)に示す降圧コンバータのデューティ比対出力電圧伝達関数を、PLECS解析ツールを用いて計算します。

降圧コンバータのおおよそのプラント伝達関数は次のとおりです:

$$P(s) = \frac{V_o(s)}{m(s)} = \frac{V_{in}}{1 + s \frac{L}{R} + s^2 LC}, \quad (8)$$

ここで、 $m(s)$ はデューティ比、 $V_{in}$ は入力電圧、 $R$ は負荷抵抗、 $C$ は出力容量、 $L$ はインダクタンスです。



**あなたのタスク:**

- 1 添付ファイルからanalysis\_tools\_openloop\_start.plecsというラベルのPLECSモデルに小信号解析コンポーネントを追加します。これは、スイッチング周波数100kHzで動作する降圧コンバータのモデルです。
- 2 PLECSライブラリの**制御器ブロック** -> **小信号解析**から小信号外乱ブロックを回路図にドラッグアンドドロップし、デューティ比("m"とラベルされた定数ブロック)とPWMブロックの間に配置してください。
- 3 次に、**フィードスルー(直達)入力を表示**パラメータをオンに設定します。次に、小信号応答ブロックを回路図にドラッグアンドドロップし、その入力端子を負荷電圧を測定する**電圧計**の出力に接続します。すべてのパラメータはデフォルト値のままです。



この段階では、モデルはanalysis\_tools\_openloop\_1.plecsと同じになっているはずです。回路図は図9のようになります。

図9: 小信号ブロックを備えた降圧コンバータの回路図

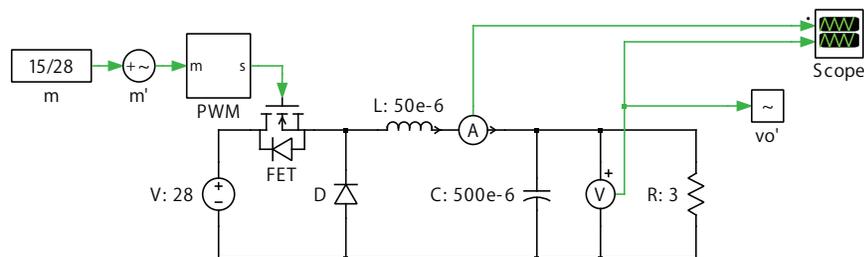


表1で説明したように、PLECS解析ツールには、開ループ伝達関数を取得するための3種類: AC周波数解析、インパルス応答解析、マルチトーン解析があります。このモデルにはどの解析を使用すべきですか?



図9に示すような周期的なシステムでは、AC周波数解析よりも高速で計算コストが低いため、インパルス応答解析を使用して開ループ伝達関数を決定する必要があります。



**あなたのタスク:** モデルのインパルス応答解析を実行します。

- 1 まず、セクション3.1で説明した定常解析を実行し、収束することを確認します。
- 2 次に、ダイアログの左下にある+アイコンをクリックし、ドロップダウンメニューから**インパルス応答解析**を選択します。
- 3 **基本設定**タブで、**システム周期**パラメータはデフォルト値のautoのままにしておきます。
- 4 次に、**周波数帯域**パラメータを[100 50e3]に設定します。このパラメータは、スイープが実行される最小および最大の外乱周波数を定義します。
- 5 **振幅**パラメータはデフォルト値の1e-3のままにしておきます。このパラメータは外乱信号の振幅を設定します。

- 6 この解析中に有効にする小信号外乱ブロックと小信号応答ブロックを選択します。これらはそれぞれ、[図9](#)のm'ブロックとvo'ブロックになります。
- 7 オプションタブと定常解析オプションタブのすべての値はデフォルトのままにしておきます。
- 8 変更確認をクリックして変更を承認し、解析開始をクリックしてインパルス応答解析を開始します。

### 💡 注意

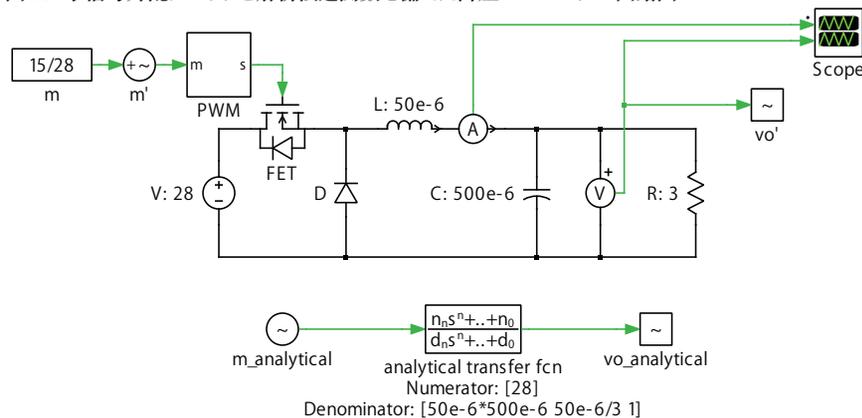
- PLECS解析ツールは、スイッチング周波数の半分までの周波数のスイッチングモデルでのみ、意味のある結果を提供します。また、最も低い外乱周波数は、主にツールのシミュレーション時間に影響します。
- システムが特定の動作点で線形に動作するようにするには、**振幅**パラメータを小さくする必要があります。一般的な目安として、外乱入力の振幅は入力信号の約1%にする必要があります。この外乱が非常に小さい場合は、**シミュレーション -> シミュレーション・パラメータ...**メニューから**シミュレーションパラメータ**ダイアログを開き、**ソルバ**タブにある**相対誤差**を下げることも有効です。

 この段階では、モデルはanalysis\_tools\_openloop\_2.plecsと同じになっているはずですが。

### 解析的伝達関数との比較

[図10](#)に示すように、ファイルanalysis\_tools\_openloop\_2.plecsにはanalytical transfer fcnブロックが追加されています。これは降圧コンバータの解析伝達関数です。

図10: 小信号外乱ブロックと解析伝達関数を備えた降圧コンバータの回路図



 **あなたのタスク:** この解析的伝達関数をPLECS解析ツールによって生成された伝達関数と比較します。

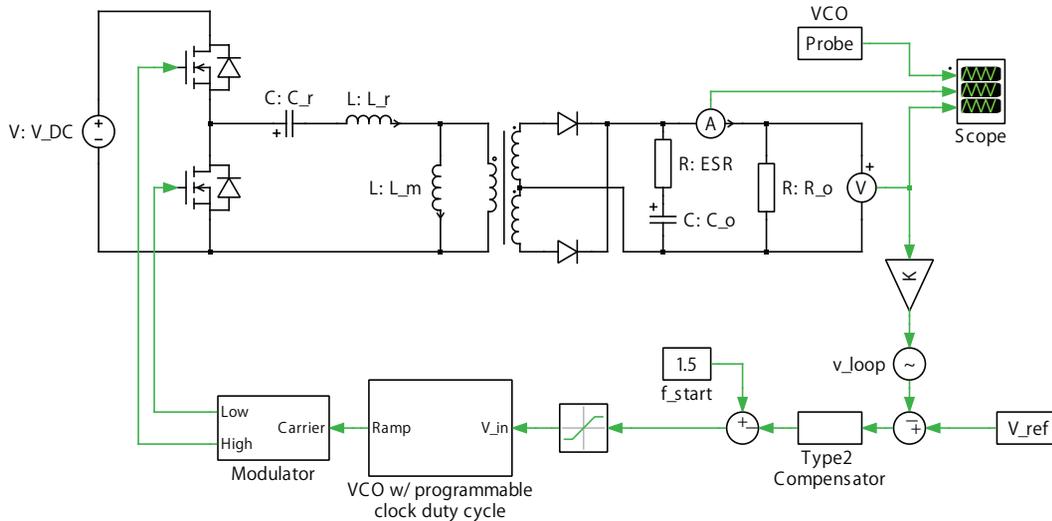
- 1 先ほど構成したインパルス応答解析を選択で、**外乱(摂動)**と**応答**パラメータに、[図10](#)からそれぞれのm'ブロックとvo'ブロックを選択します。次に解析を実行します。プロットウィンドウのアイコンをクリックして、現在のトレースを保存します。
- 2 次に、[図10](#)に示されているモデル内のm\_analyticalブロックとvo\_analyticalブロックを選択し、解析を繰り返します。

 この段階では、解析伝達関数とシミュレーションの結果がほぼ一致していることがわかります。

### ループゲイン解析

このセクションでは、[図11](#)に示すハーフブリッジLLCコンバータの開ループゲインを計算します。

図11: ループゲイン・メータルーを備えたハーフブリッジLLCコンバータの回路図



 **あなたのタスク:** 添付ファイルのPLECSモデルanalysis\_tools\_loopgain\_start.plecsを開きます。

 **表1**から、このモデルのループゲイン解析を実行するために必要な解析ツールは何ですか。

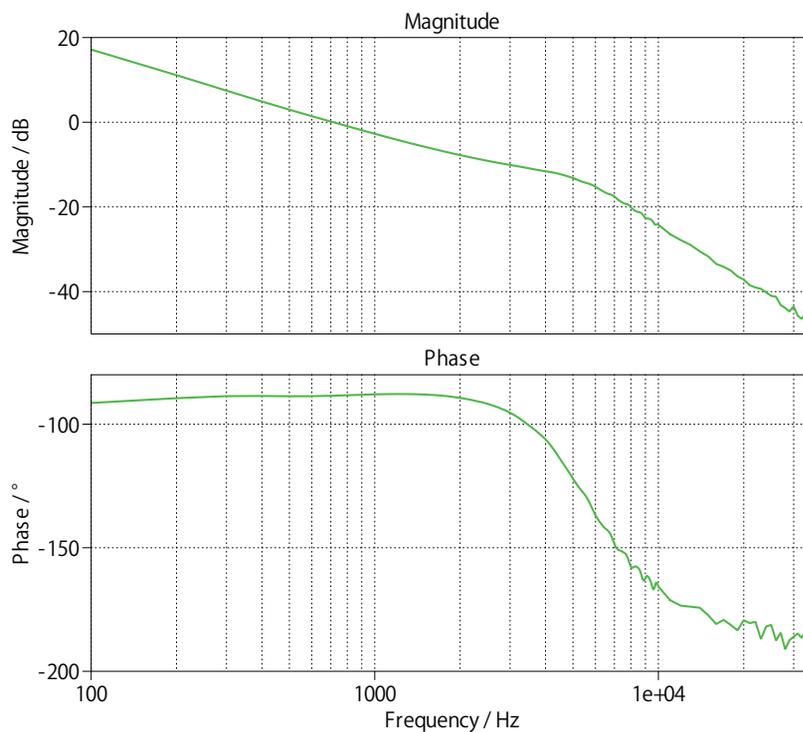
**A** コントローラは可変周波数PWMキャリアを生成するため、解析前のシステム周期は不明です。このような場合、定常解析は収束しないため、AC周波数解析ツールを使用できません。代わりに、マルチトーン解析ツールを使用します。

マルチトーン解析では、シミュレーションは2つのフェーズに分かれています。システムは最初のフェーズで定常状態に達すると想定されます。第2フェーズでは、システムの応答がフーリエ解析に記録されます。

**あなたのタスク:**

- 1 モデルanalysis\_tools\_loopgain\_start.plecsにループゲイン・メーターコンポーネントを追加し、マルチトーン解析を実行します。
- 2 最初にモデルを実行し、PLECSスコープを開いて、電気システムの過渡現象が落ち着く時間を観察します。システムは約 $10e-3$ 秒で定常状態に達することがわかります。
- 3 次にマルチトーン解析パラメータウィンドウの**基本設定**タブで、**初期シミュレーション周期パラメータ**を $10e-3$ に設定します。パラメータは上記説明の、シミュレーションの最初のフェーズに対応します。この期間中にシステムは定常状態に達すると想定されます。
- 4 次に、セクション3.2で定義した残りのパラメータを決定します。**周波数帯域**パラメータを入力する場合、設定する最小外乱周波数がツールのシミュレーション時間に大きな影響を与えることに注意してください。

図12: ハーフブリッジLLCコンバータのマルチトーン解析によるボード線図



この段階では、モデルはanalysis\_tools\_loopgain\_1.plecsと同じになっているはずです。回路図は図12のようになります。

## 4 参考文献

- [1] PLECS User Manual, URL: <https://www.plexim.com/download/documentation>  
 PLECSユーザマニュアル(日本語訳) <https://adv-auto.co.jp/products/plexim/manual.html>

改訂履歴:

Tutorial Version 1.0 初版

Tutorial Version 1.1 ニュートン法に関する情報を追加

**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。