

高度なSIMPLISトレーニング

ドキュメントのこのセクションは、SIMPLIS社がさまざまな場所で年に数回実施するトレーニングコースから直接提供されます。次に予定されているコースの詳細については、[Advanced SIMPLIS Training Course](#)のリンクをクリックしてください。コース教材は、SIMPLISの使用経験がある方を対象としています。このコースを受講する方は、SIMPLISチュートリアルを完了し、高度なレベルのスキルを習得する準備ができています。SIMPLISの上級ユーザであっても、このコースから多くのことを学ぶことができます。

トレーニングの参加者の要件は次のとおりです。

1. SIMPLISチュートリアルから得た知識
2. SIMetrix/SIMPLISバージョン8.20d以降がロードされたコンピュータ。SIMPLIS社は、トレーニングセッション用にSIMetrix/SIMPLIS Pro w/ DVMライセンスを提供します。

Module 1 - SIMPLIS環境の概要

Module 1は、例と演習を通して参加者の意欲を高めることにより、コース全体の基礎を作ります。

セクション1.0 [SIMPLIS Basics](#)では、多くの例について、SIMPLISをより一般的なSPICEベースのシミュレータと比較し、対比します。SIMPLIS用に設計されたモデルは、Piecewise Linear (PWL) モデリングを使用します。PWLモデリングの基礎とPWLモデルの精度について説明します。SIMPLISに固有のPeriodic Operating Point (POP) 解析を紹介し、時間領域PWLモデルのAC解析も扱います。

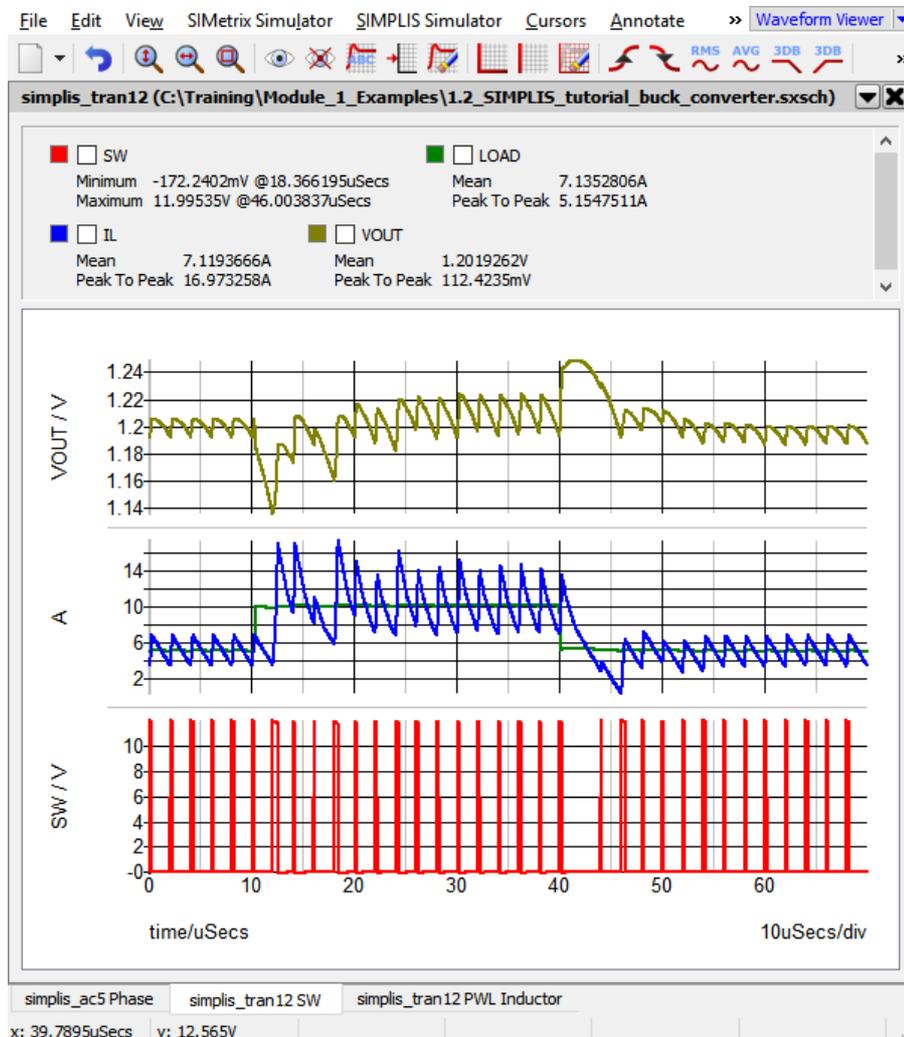
Module 1の例をダウンロードするには、[Module_1_Examples.zip](#)をクリックしてください。

1.0.1 時間領域シミュレータSIMPLIS

SIMPLISは、スイッチングパワーコンバータ用に最適化された時間領域シミュレータです。SIMPLISにアクセスするユーザのほとんどは、まったく異なる原理に基づいて動作するSPICEシミュレータを使用した経験があります。このトピックでは、SIMPLISとSPICEの重要な違いを紹介します。SIMPLISは、時間領域の結果を周波数領域のプロットで非常に正確に表現できますが、まったくの時間領域シミュレータです。

で同じ時間領域非線形回路図をシミュレートします。

- シミュレーションが最初に起動されると、**SIMPLIS**ステータスウィンドウが開き、シミュレーションの進行に合わせて波形ビューアにシミュレーション結果が表示されます。
- 過渡解析が指定されているため、**POP**解析の結果は表示されません。過渡シミュレーションは、**POP**解析で見つかった動作点で開始され、過渡解析結果のみが表示されます。
- 波形ビューアに表示されるシミュレーション結果には、時間に対してプロットされた波形と、**X-Y**プロットを使用して互いにプロットされた波形（時間の陰関数）が含まれます。



シミュレーションの実行後、波形ビューアには多くのグラフが含まれます。左端のタブには、AC解析から取得したコンバータ制御ループのゲインと位相があります。他のタブには、過渡解析の結果があります。

検討

SIMPLISは、これら3つの解析を次の順序で実行します。

1. POP解析
2. AC解析
3. 過渡解析

最初に実行する解析は、POP解析です。POP解析は、回路のスイッチングの定常状態動作点を見つけます。この定常状態の動作点は、次の目的で使用されます。

1. 定常状態の動作点で回路の小信号AC解析を実行します。
2. 後で行う過渡解析のために回路を初期化します。

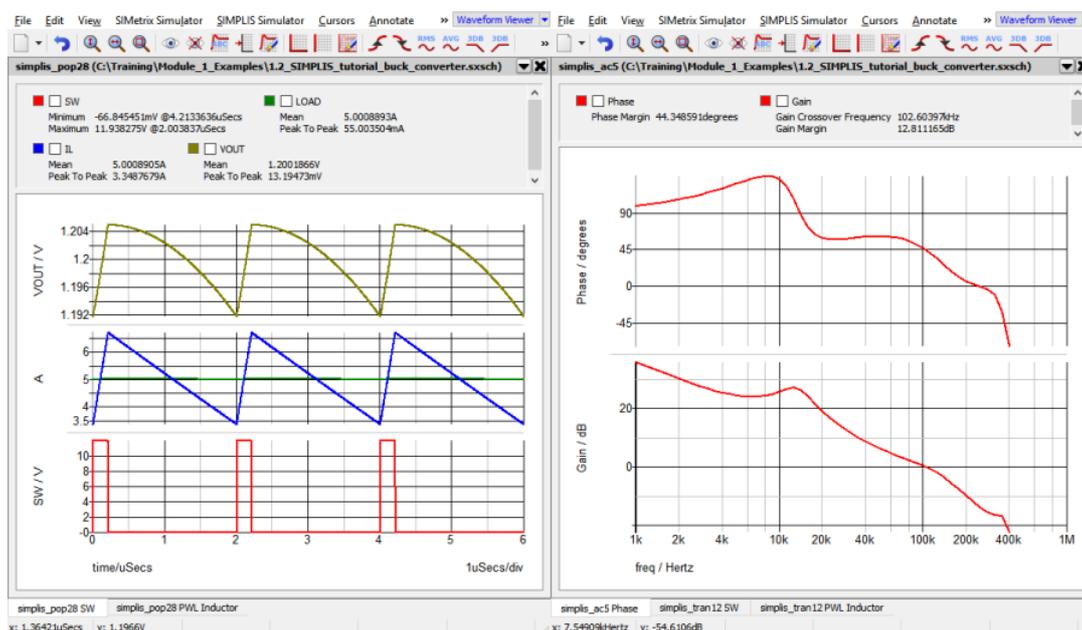
これらの解析はそれぞれ、まさに実験室で起きるように時間領域で実行されます。POP解析については、[1.0.5 POP解析](#)で詳しく説明します。今のところ、POP解析は定常状態に到達するプロセスを加速する方法とを考えてください。覚えておくべき重要な点は、周期動作点がないと、その回路でAC解析を実行できないことです。

AC解析は、最初に周期動作点を見つけてから、単一の時間領域の正弦波摂動信号を回路に注入することにより、時間領域モデルで実行されます。ACの結果は、摂動信号に対する時間領域の応答から計算されます。そして、注入する信号を次に解析する周波数に変更し、要求された周波数範囲全体をカバーするまで測定プロセスを繰り返します。平均化したモデルは使用しません。すべてのAC解析結果は、完全な非線形システムの時間領域応答から導出されます。

同期降圧コンバータの時間領域のPOP波形と周波数領域のループ応答を以下に示します。回路の周波数応答は、POP解析中に見つかった定常状態で有効です。

Time Domain Waveforms

Frequency Response of Time Domain Model



過渡解析は、他のシミュレータの過渡解析と似ていますが、より高速に実行されます。

結論と覚えておくべきポイント

SIMPLISは、実験室の回路と同じように、時間領域で動作します。

- 実験室のパワーエレクトロニクススイッチングシステムには、DC動作点やAC小信号モデルの概念はありません。
- 電源スイッチは、変調器制御回路によってオンになり、そしてオフになります。この回路は出力を検知し、出力に応じて回路性能を調整しようとします。
- 回路がスイッチングしない場合、正しく機能していません。
- スwitchingコンバータにはDC動作点がありません。
- 平均化されたACモデルは理論上の構造であり、実験室には存在しません。
- 回路でPOP解析を正常に実行できない場合：
 1. 回路のAC性能を簡単に評価することはできません。（注意：DVMにはマルチトーンAC解析がありますが、これはPOP解析とAC解析の組み合わせよりもはるかに時間がかかります。）
 2. ほとんどの場合、目的の解析を実行する前にコンバータが定常状態に達するのを最初に待つ必要があるため、シミュレーションにはかなり時間がかかります。

1.0.2 PWLシミュレーションとモデリング

SIMPLISシミュレーションで使用されるすべてのデバイスモデルは、Piecewise Linear (PWL) モデリング手法を使用します。これには、MOSFETやダイオードなどの半導体デバイスが含まれます。このトピックでは、SIMPLISがPWLモデルを使用して非線形デバイスをモデル化する方法を学習します。

重要な概念

このトピックでは、次の重要な概念について説明します。

- SIMPLISで使用されるすべてのモデルは、PWLモデルです。
- 非線形特性は、PWLプリミティブの抵抗、インダクタ、またはキャパシタを使用してモデル化されます。
- MOSFETなどの複雑なデバイスは、PWLデバイスのコレクションで表すことができます。
- SIMPLISでは、ダイオードはPWL抵抗にすぎません。

学習内容

このトピックでは、次のことを学習します。

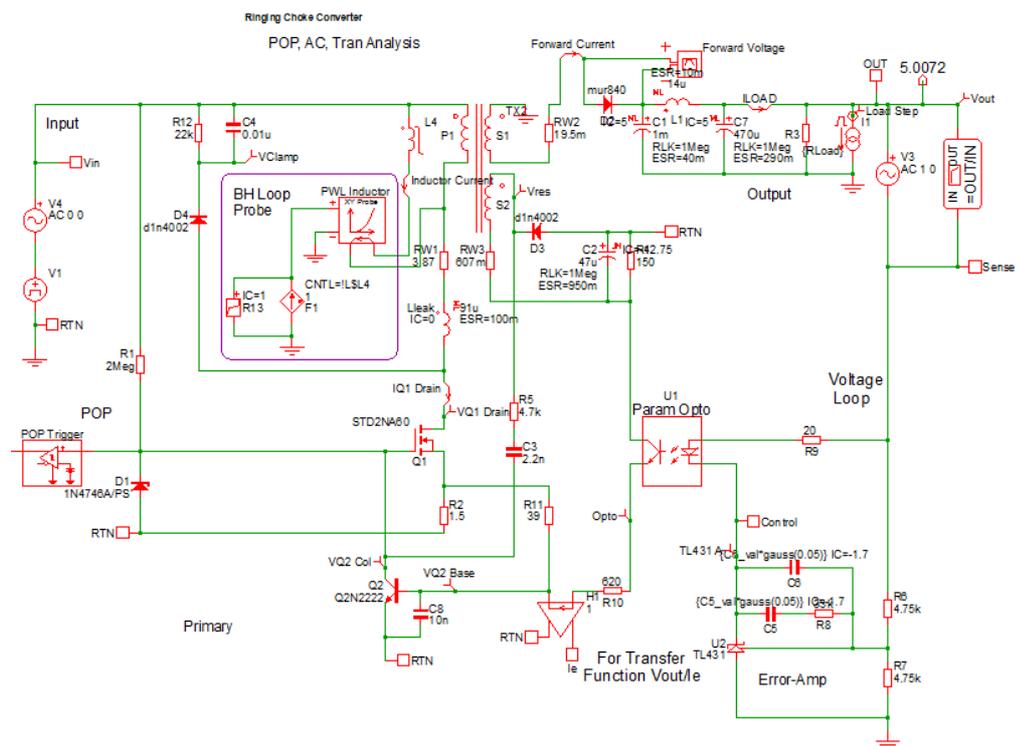
- PWLインダクタを使用したトランスの飽和のモデル化方法
- PWLデバイスのコレクションを使用したMOSFETのモデル化方法

開始

このトピックでは、自励発振フライバックコンバータを使用して、PWLモデリング手法を示します。コンバータは意図的に過負荷にされ、電流制限動作に入ります。この例を開始するには、次の手順を実行します。

1. `1.1_SelfOscillatingConverter_POP_AC_Tran.sxsch`という回路図を開きます。

結果: フライバックコンバータの回路図が開きます。

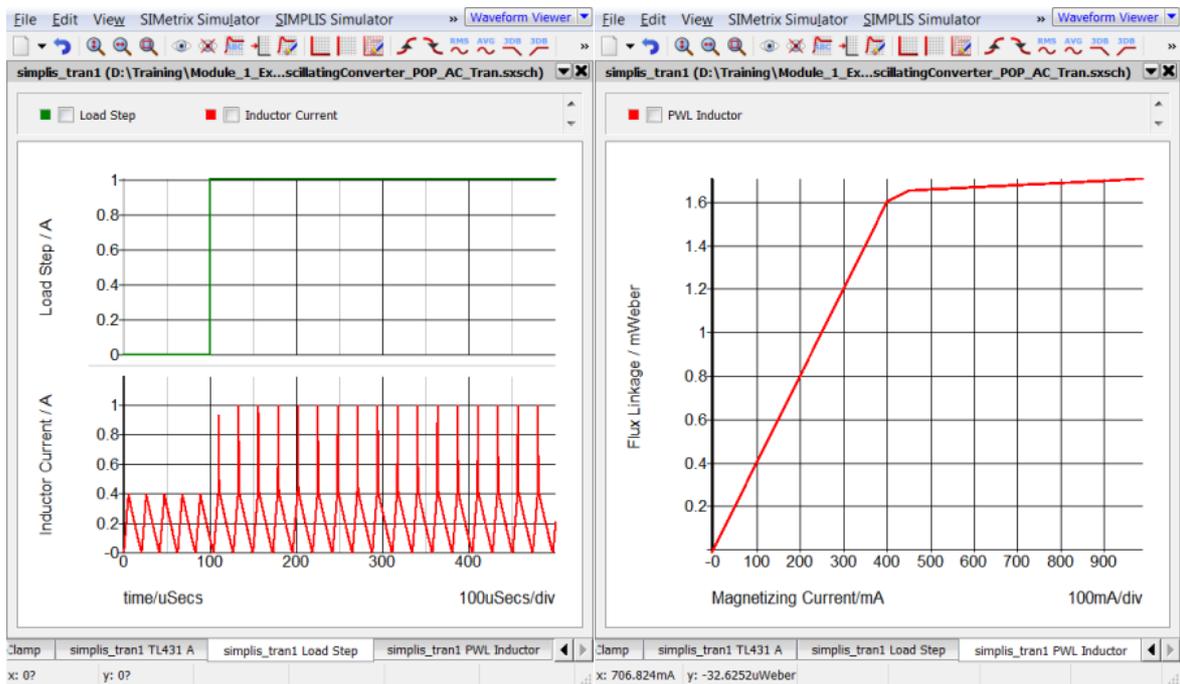


2. 設計をシミュレートするには、**F9**キーを押すか、メニューバーから**Simulator > Run Schematic**を選択します。

結果: シミュレーションが完了すると、波形ビューアに複数のグラフタブが表示されます。波形ビューアまたはグラフタブの1つを閉じている場合は、シミュレーションを再度実行してグラフを再生成します。右端の2つのグラフが重要です。これらの2つのグラフタブは次のようになります。

Time Domain Waveforms

B-H Loop of Time Domain Model



検討

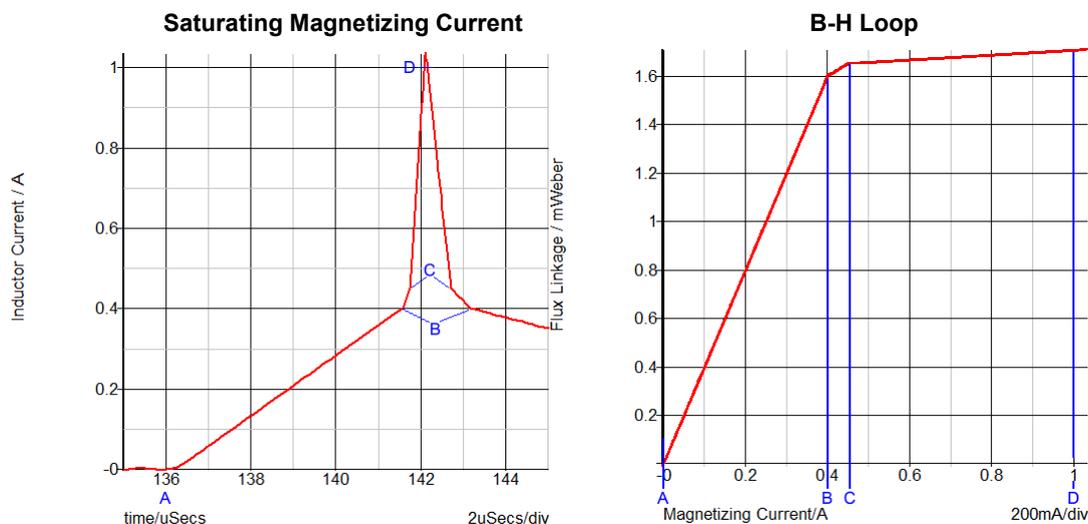
PWLインダクタ

左側のグラフには、**緑色**の**負荷ステップ**と**赤色**の**磁化インダクタ電流**の2つの曲線が含まれています。

過渡シミュレーション中に、1アンペアの負荷ステップが100usで適用されます。この負荷ステップ中に、トータル負荷電流は2Aのフル負荷条件から3Aの過負荷条件に遷移し、その結果トランスは飽和状態になります。電流制限機能が作動し、出力電圧が低下します。

この過負荷条件は、PWLインダクタがトランスの飽和をモデル化する方法を示しています。次の2つのグラフは、時間領域の磁化インダクタ波形と、磁束リンケージ対電流プレーン（PWLインダクタが定義されている）の拡大図を示します。3つのPWLインダクタセグメントのそれぞれが両方のグラフで見ることができます。

自動発振コンバータの磁化電流とB-Hループ



このトランスの飽和は、磁束リンケージ対電流プレーンの3つのPWLセグメントでモデル化されます。この曲線の勾配は磁化インダクタンスであるため、磁化インダクタンスは次の3つの異なる値を取ることができます。

- 磁化電流が0.4A未満の場合、 $1.6\text{mWeber}/0.4\text{A} = 4\text{mH}$ の通常または不飽和の磁化インダクタンスが使用されます。
- 飽和は、磁化電流が0.4-0.45Aのときに発生します。この領域のインダクタンスは $(1.65\text{ mWeber} - 1.6\text{ mWeber}) / (0.45\text{ A} - 0.40\text{ A}) = 1\text{mH}$ です。
- 最後のPWLセグメントは、「ハード」飽和を表します。このセグメントのインダクタンスは100uHです。

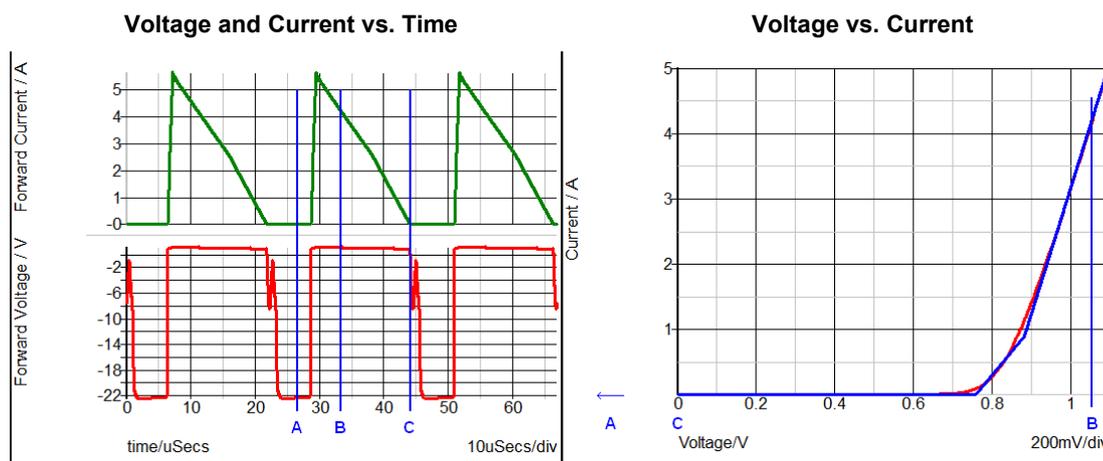
PWL MOSFETとダイオード

回路図上のダイオードとMOSFETはどうでしょうか？これらのPWLモデルも同様でしょうか？ はい！

- SIMPLISでは、組み込みのダイオードモデルは、2セグメントまたは3セグメントのPWL抵抗器にすぎません。PWLの定義は通常、SIMetrix/SIMPLISに組み込まれた自動モデルパラメータ抽出ルーチンで生成されます。
- 組み込みのMOSFETモデルは、以下を含むPWLデバイスのコレクションから作成されます。
 - ボディダイオードを表すPWL抵抗器
 - 一定の順方向相互コンダクタンスゲイン (Gm) を備えたトランジスタスイッチ
 - 電圧依存の非線形容量を表すPWLキャパシタ

一例として、自励発振コンバータの出力整流器には、過渡シミュレーション中に次の順電流曲線と順電圧曲線があります。左側のグラフには、時間に対する順電流と順電圧がプロットされています。右側のグラフでは、このダイオードの順電圧に対する順電流がプロットされています。青色の曲線は、3セグメントのSIMPLIS PWLモデルです。赤色の曲線は、同じダイオードのSPICEモデルのSIMetrixシミュレーション結果です。

出力整流器の電圧と電流



注釈付きのポイントは、次のダイオードの状態を示しています。

- A: 遮断状態
- B: 4Aの順方向電流の導通
- C: 導通から遮断状態への遷移

MOSFETモデリングの詳細については、[1.0.3 マルチレベルモデリング](#)で説明します。

結論と覚えておくべきポイント

- SIMPLISシミュレーションで使用されるすべてのデバイスは、舞台裏ではPWLモデルです。これは、シンボルとは無関係です。シンボルは、モデル化されている基になる関数のグラフィカルな表現にすぎません。
- 抵抗、キャパシタ、およびインダクタの非線形特性は、一連のPWL直線セグメントとしてモデル化されます。
- MOSFETなどの複雑なデバイスでも、PWLデバイスのコレクションで表すことができます。

1.0.3 マルチレベルモデリング

マルチレベルモデルは、SIMPLISの重要な機能です。マルチレベルモデルは、単一のパラメータを使用してモデルの複雑さを構成します。マルチレベルモデリングの概念により、モデルをアプリケーションに合わせて調整することができます。シミュレーションの目的に最小限に複雑なモデルを使用するので、結果として最速のシミュレーションとなります。このトピックでは、マルチレベルMOSFETとマルチレベルキャパシタの2種類のマルチレベルモデルについて学習します。

重要な概念

このトピックでは、次の重要な概念について説明します。

- マルチレベルモデルは、単一のパラメータで構成されます。
- モデルの回路図は、モデルレベルのパラメータに基づいて変化します。
- モデルレベルは、シミュレーションの目的に基づいて選択されます。

学習内容

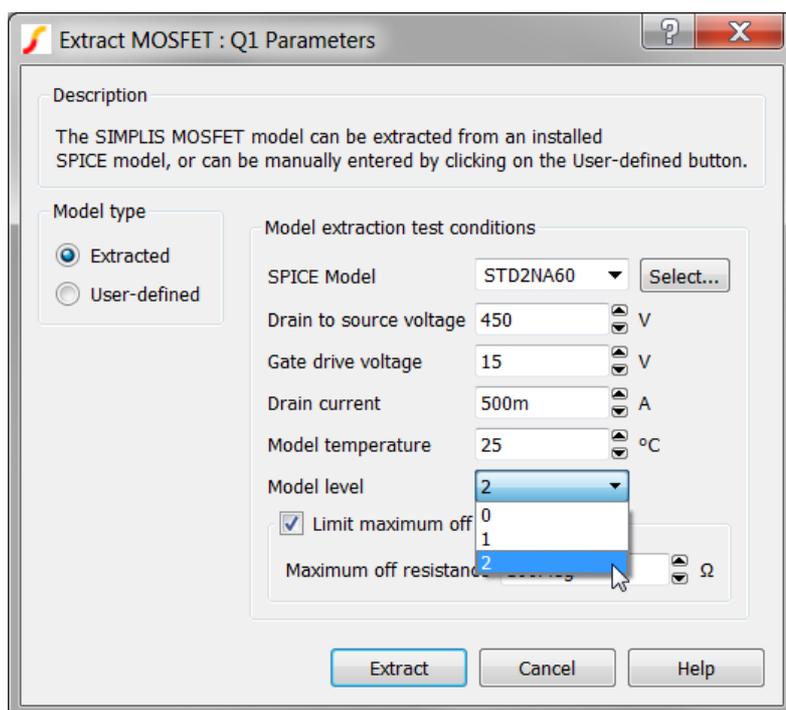
このトピックでは、次のことを学習します。

- 単一のパラメータでさまざまなレベルの複雑さでモデルを構成する方法
- シミュレーションの目的に基づいて適切なレベルを選択する方法

開始：マルチレベルMOSFETモデル

1. 1.1_SelfOscillatingConverter_POP_AC_Tran.sxschという回路図を開きます。
2. MOSFET Q1をダブルクリックします。

結果：Extract MOSFETダイアログが開きます。モデルレベルのパラメータコントロールを以下に示します。



3. ダイアログの右下隅にある**Help**ボタンをクリックします。

結果：ヘルプシステムが開き、*SIMPLIS MOSFET Models*トピックが表示されます。

検討：マルチレベルモデリング

この時点で、SIMetrix/SIMPLISでExtract MOSFETダイアログを開き、SIMPLIS MOSFET Modelsヘルプトピックをブラウザウィンドウで開く必要があります。

MOSFETは、ダイオード、ツェナーダイオード、IGBT、JFETなどの他の半導体と同様に、非常に非線形の動作をします。たとえば、MOSFETのドレイン-ソース間容量は、MOSFETの両端の電圧が遮断状態から導通状態に変化すると、極端に変化する可能性があります。このデバイスのスイッチング動作に興味がある場合、この容量の変化をモデル化することが重要です。しかし、コンバータのボード線図に主に興味がある場合、通常、スイッチング遷移の詳細は重要ではありません。

SIMPLISには、単一のパラメータ値に基づいて、基礎となる回路図構造とモデルのパラメータの両方を変更する機能があります。Extract MOSFETダイアログで、また実際に多くのSIMPLIS組み込みモデルで、"Level"または"Model Level"パラメータが、シミュレーションで使用されるモデルの回路図を制御します。

マルチレベルモデルの例#1 : SIMPLIS MOSFET

SIMPLISで使用されるMOSFETには、4つのレベルの複雑さがあります。各レベルについては、現在開かれているヘルプトピックで詳しく説明されています。以下は、レベル0、1、および2のモデルの回路図です。レベル3のモデルはユーザがカスタマイズしたモデルを対象としており、内部モデル抽出ルーチンではサポートされていません。

Level 0 Model		Level 1 Model		Level 2 Model	
!Q1:	Switch with On and Off Resistance	!Q1:	Switch with On and Off Resistance	!Q1:	Switch with forward transconductance
CGS:	Linear Capacitance	CGS:	Linear Capacitance	CGS:	PWL Capacitance
RGS:	10Meg Ω Resistor	RGS:	10Meg Ω Resistor	RGS:	10Meg Ω Resistor
RG:	Internal Gate Resistor	RG:	Internal Gate Resistor	RG:	Internal Gate Resistor
!R_BODY:	Body diode modeled by PWL Resistor	!R_BODY:	Body diode modeled by PWL Resistor	!R_BODY:	Body diode modeled by PWL Resistor
		COSS:	Lumped linear output capacitance	CDS:	PWL capacitance
				CDG:	PWL capacitance

MOSFETの詳細なスイッチング動作が重要でない場合は常に、レベル0 MOSFETが使用されます。非線形容量をモデル化するレベル2 MOSFETは、通常、効率の測定時など、スイッチング遷移が重要な場合に使用されます。レベル1 MOSFETは、コンバータトポロジーがMOSFETの出力容量に依存している場合のパワーステージ開発に使用されます。

モデルパラメータ抽出

1. Extract MOSFETダイアログを閉じている場合は、MOSFET **Q1**をダブルクリックして再度開きます。
2. **Extract**をクリックします。
結果 : SIMetrix/SIMPLISがSPICEモデルからSIMPLISモデルパラメータを抽出するときに、進行状況バーに簡単に進行状況が表示されます。
3. SIMetrix/SIMPLISコマンドシェルウィンドウを確認します。
 ⓘ ヒント : スペースバーを押すと、コマンドシェルが表示されます。
 次のメッセージが表示されるはずです。

Extracting SIMPLIS model for STD2NA60. Please wait..
Complete

STD2N60 MOSFETのSPICEモデルで複数のSIMetrix SPICEシミュレーションを実行し、SPICEシミュレーションデータをSIMPLIS PWLモデルにカーブフィットし、66個のモデルパラメータをシンボルに書き込みました。

マルチレベルモデリングの概念は、このプロセスの中心にあります。モデルは、アプリケーションに基づいてさまざまな複雑さを持つことができます。解析に必要な最小モデルレベルを使用することにより、シミュレーション速度を最大化できます。

ご覧のとおり、SIMetrix/SIMPLISには、SPICE半導体モデルをシミュレートし、これらの結果からPWL SIMPLISモデルを抽出する特殊な機能があります。この機能は、マルチレベルモデリングの概念と組み合わせると特に強力になります。重要なデバイスモデルは、特定のシミュレーションを実行する目的に基づいて、適切なレベルの複雑さを持つことができます。

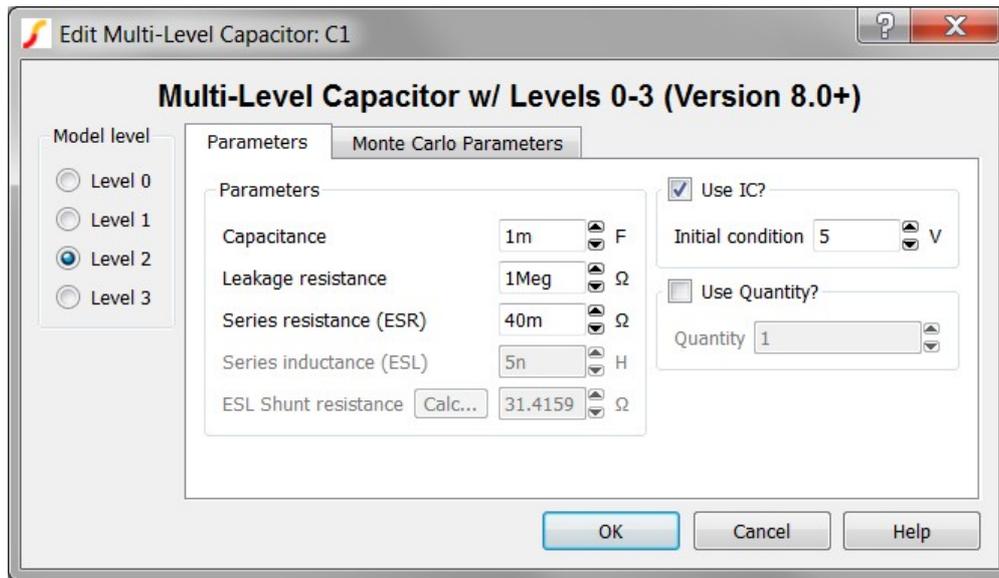
マルチレベルモデルの例#2：マルチレベルキャパシタ

インダクタやキャパシタなどの受動部品もマルチレベルモデルとして利用できます。この場合のモデルレベルは、モデルに含まれる寄生要素を決定します。このセクションでは、新しいマルチレベルキャパシタを例として使用します。このキャパシタはSIMetrix/SIMPLISバージョン8.0で導入され、古い電解キャパシタを置換します。

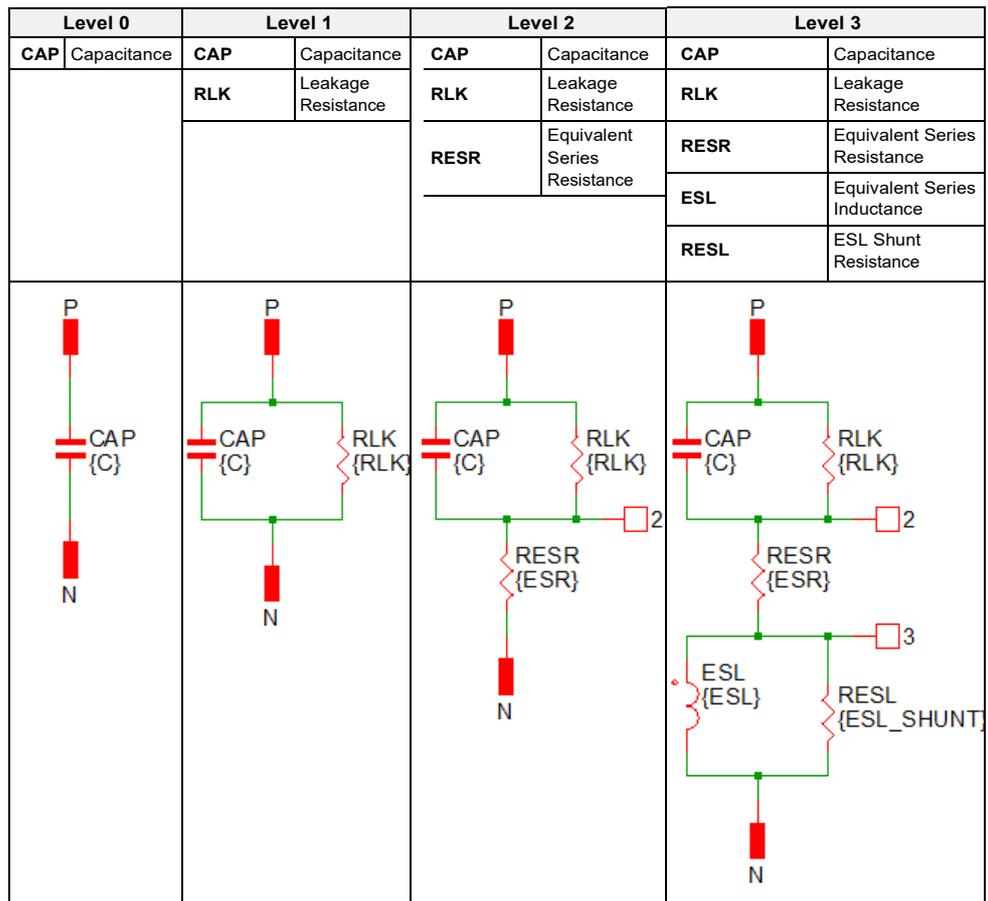
演習#2：マルチレベルキャパシタモデル

1. 出力キャパシタ**C1**をダブルクリックします。これは、トランス出力の右側にある最初のキャパシタシンボルです。

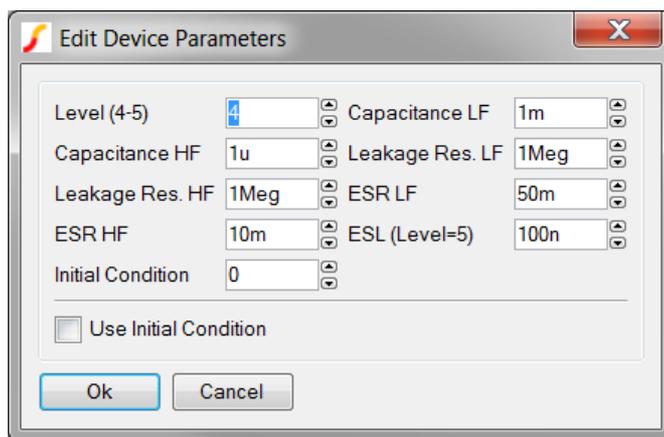
結果：Edit Multi-Level Capacitorダイアログが開きます。



SIMetrix/SIMPLISには、2つのマルチレベルキャパシタモデルがあります。ここで使用されるモデルはモデルレベル0-3で、2番目のより詳細なモデルはレベル4と5です。この回路図の3つのマルチレベルキャパシタはすべて、レベル0-3の新しいマルチレベルキャパシタモデルを使用し、モデルレベルは2に設定しています。レベル0-3モデルの等価回路図を以下に示します。



電解キャパシタのレベル4-5モデルは、低周波成分と高周波成分を別々にモデル化します。このモデルは、本質的に並列の2つの電解キャパシタです。レベル4-5電解キャパシタの編集ダイアログを以下に示します。



レベル4およびレベル5モデルの回路図を以下に示します。レベル5モデルは、レベル4モデルに等価直列インダクタンス (ESL) を追加します。

Level 4		Level 5	
CC_LF	Low Frequency Capacitance	CC_LF	Low Frequency Capacitance
RSH_CC_LF	Low Frequency Leakage Resistance	RSH_CC_LF	Low Frequency Leakage Resistance
RESR_LF	Low Frequency Equivalent Series Resistance	RESR_LF	Low Frequency Equivalent Series Resistance
CC_HF	High Frequency Capacitance	CC_HF	High Frequency Capacitance
RSH_CC_HF	High Frequency Leakage Resistance	RSH_CC_HF	High Frequency Leakage Resistance
RESR_HF	High Frequency Equivalent Series Resistance	RESR_HF	High Frequency Equivalent Series Resistance
		L_ESL	Equivalent Series Inductance

マルチレベルキャパシタはSIMPLISパーツセレクタから配置できます。

- **Commonly Used Parts>Multi-Level Capacitor (Level 0-3 w/Quantity) (Version 8+)**
- **Commonly Used Parts>Electrolytic Capacitor (w/ HF ESR and ESL) (Level 4 - 5)**

結論と覚えておくべきポイント

- マルチレベルモデリングは、次の理由で非常に強力です。
 1. マルチレベルモデルは柔軟なモデルです。モデルは、レベルパラメータに基づいて単純なものから非常に複雑なものまでさまざまです。モデルの回路図は、レベルパラメータに基づいて変更できます。
 2. ユーザは、現在のシミュレーションの目的を満たす最小の複雑度を選択できます。
 3. 1つのコンポーネントシンボルで異なる基礎モデルを使用できるようにすることで、ユーザは単一の回路図で複数のシミュレーション目的に対応できます。これにより、同じ回路図の複数のバージョンを管理するのに比べて、時間と混乱を大幅に減らすことができます。
- SIMPLISで使用されるすべての半導体は、PWLデバイスでモデル化されています。使用されているモデルのレベルを確認するには、シンボルをダブルクリックして、モデルレベルパラメータの値を確認します。シミュレーションの目的に必要な精度と適合する最も低い複雑度のモデルレベルを使用すると、シミュレーション速度が

向上します。

- **Module 6 - Modeling**では、独自のマルチレベルモデルを作成する方法を学習します。トレーニングコース中に、マルチレベルモデリングの概念を享受するために、どのような種類のモデルを使用したか、考えてください。
- **SIMPLIS**では、パラメータ名"Level"を使用して、特定のモデルの複雑さのレベルを記述します。この名前には特別なものはなく、任意のパラメータ名で独自のモデルを作成できます。たとえば、ICモデルでは"Process"パラメータまたは"Corner"パラメータをもつことができます。Processは3つの文字列をもつことができます。
 - 'Slow'
 - 'Typical'
 - 'Fast'

これらの文字列を使用して、モデルを構成することができます。変数としての文字列の使用については、**6.2 Assembling the Subcircuit Load**で説明されています。

1.0.4 PWLモデルの精度

PWLデバイスモデルは、スイッチングパワーコンバータアプリケーションに対して正確です。なぜなら、これらのデバイスは、導通状態または遮断状態のいずれかでスイッチング時間の大部分を費やし、これら2つの状態を非常に速く遷移するからです。PWLモデルの誤差が大きくなる領域は、モデルが各スイッチングサイクルのごくわずかな部分を費やすスイッチング遷移中に発生します。

重要な概念

このトピックでは、PWLモデルが時間領域と周波数領域の両方で正確であるという重要な概念について、説明します。

学習内容

このトピックでは、PWLモデルがスイッチングパワーシステムの動作を正確にモデル化できる理由を学習します。

開始

このセクションの3つの例では、さまざまなスイッチング電源のシミュレーション結果と測定された実験データを比較します。

検討

スイッチングパワーシステムのモデリングに使用すると、PWLモデルは高い精度を提供できます。SIMPLIS時間領域デバイスモデルに固有の近似は、シミュレーション結果の精度を大幅に低下させることはありません。適切に構成されたPWLモデルは、これらのPWL近似の誤差が大きい領域でほとんど時間を費やさないように設計されています。セクション1.0.2 PWLシミュレーションとモデリングでは、ダイオードの順方向伝達特性が記述されています。スイッチング電源では、ダイオードは多くの場合、受動スイッチとして使用されます。その結果、整流ダイオードは、電流の流れを遮断するか導通するかのいずれかで時間の大半を費やします。これら2つの状態間の遷移に費やされる時間はごくわずかです。電源の閉ループ動作をモデル化するシミュレーション目的では、整流ダイオードの折れ曲がり領域のモデル化に使用されるPWL近似は、システム動作モデルの精度にわずかな誤差をもたらします。

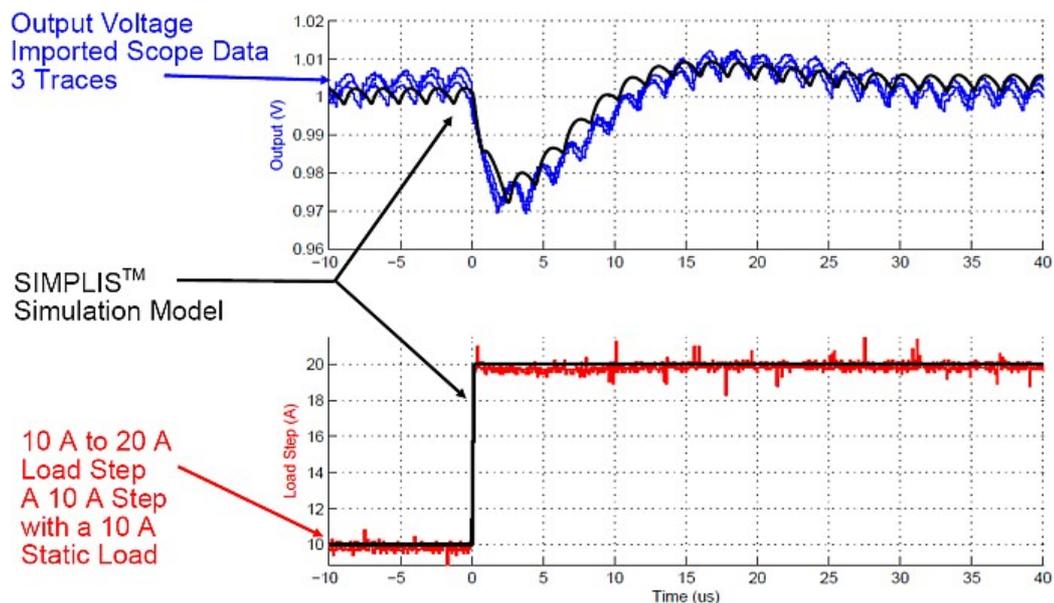
以下に説明する3つの例では、SIMPLISの結果と実際のハードウェアテストを比較しています。

過渡解析の例：単相同期降圧コンバータ

この例は、単相、デジタル制御の同期降圧コンバータからのものです。これらの出力電圧と出力電流のオシロスコープ画像は、ハードウェア測定で3つのトリガーで取得されました。SIMPLISシミュレーション結果は、ハードウェアデータに重ねられています。ステップ負荷の増加時とステップ負荷の減少時の両方で、最大誤差は0.5%です。

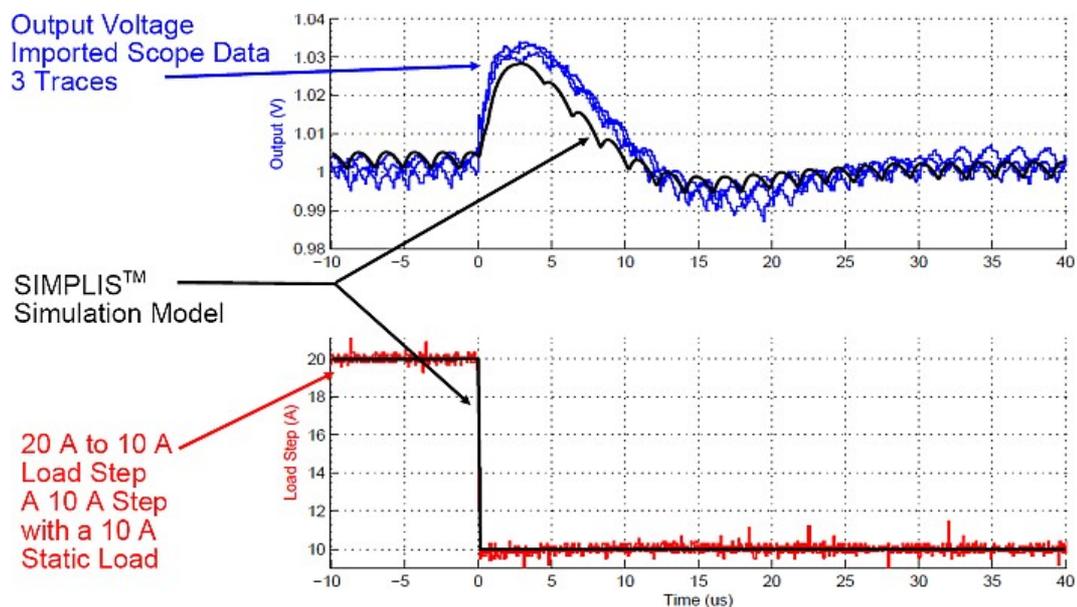
ステップ負荷が10Aから20Aに増加

時間領域シミュレーションと実験結果



ステップ負荷が20Aから10Aに減少

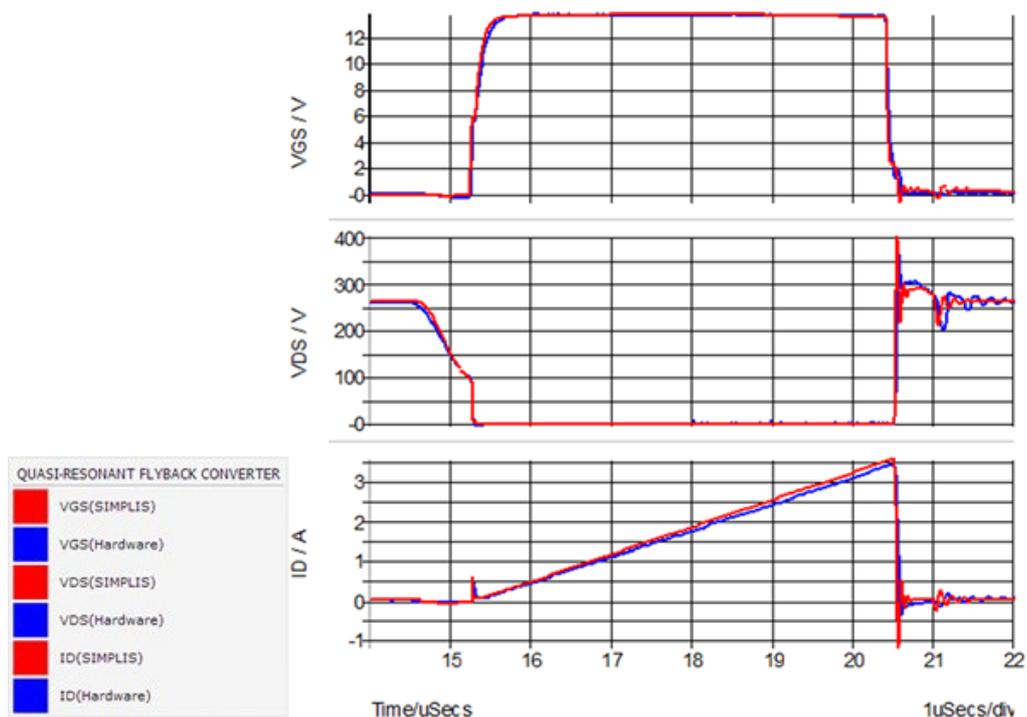
時間領域シミュレーションと実験結果



過渡解析の例：準共振フライバックコンバータ

PWLキャパシタを組み込んでMOSFETの非線形容量をモデル化することにより、SIMPLIS

はデバイススイッチング遷移のモデル化にも適しています。この例は、ACアダプターのアプリケーションで使用される準共振フライバックコンバータからのものです。例のメインMOSFETと出力整流器は、モデルパラメータ抽出アルゴリズムを使用してSPICEモデルから自動的に変換されました。結果のSIMPLISモデルは、ゲート-ソース間電圧、ドレイン-ソース間電圧、およびドレイン電流において、ハードウェア測定値とよく一致しています。



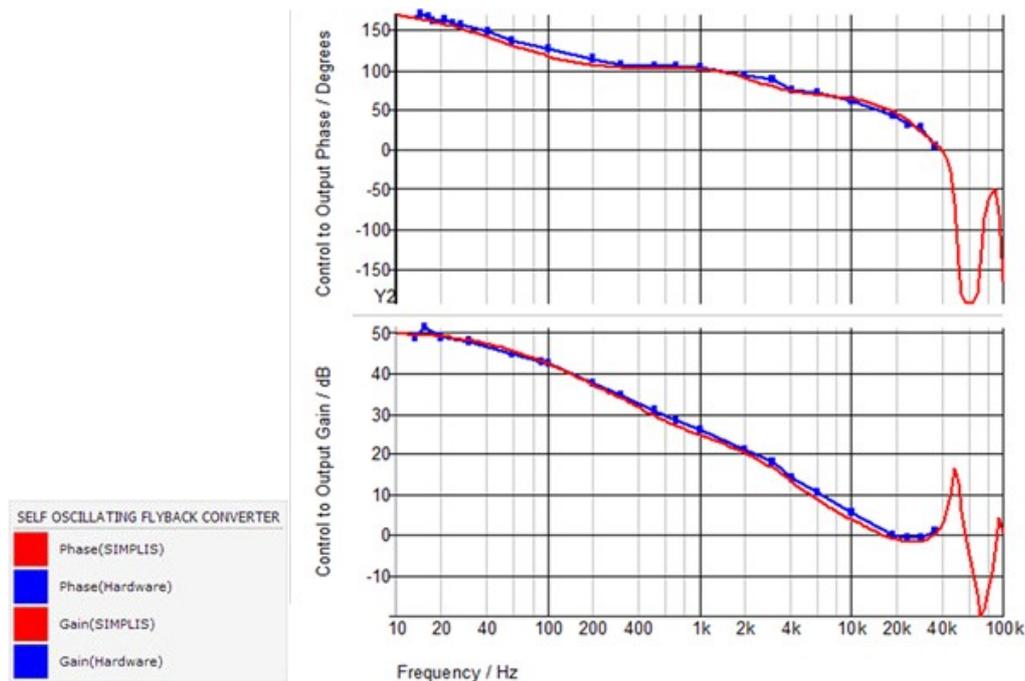
AC解析の例：自励発振フライバックコンバータ

SIMPLISは、スイッチング電源の時間領域の動作を記述するPWL回路方程式のシステムについて、非常に正確な解を数値的に見つけます。後で詳しく説明するように、SIMPLISはこの機能を利用して、スイッチングシステムの非常に正確な定常状態の周期動作点を見つけてます。システムが定常状態になると、SIMPLISは特定の周波数の非常に小さなAC信号をシステムに注入し、その信号に対する時間領域応答を測定できます。この解析を異なる周波数で繰り返し実行し、周波数の関数として結果を表示します。このように、SIMPLISは完全な非線形時間領域回路モデルのみを使用して、非常に正確なAC解析を実行できます。平均的なACモデリングは必要ありません。また、システムで固定周波数制御を使用する必要もありません。唯一の要件は、システムが安定した定常状態で動作していることです。

SIMPLISは常に非線形時間領域応答をシミュレートするため、AC解析には制御信号経路のリップル電圧の影響が含まれます。これは、一般に平均モデル手法では無視されます。その結

果、注意深く構築されたモデルを使用すると、コンバータの動作の詳細が含まれている場合でも、SIMPLIS AC解析は実験データと厳密に一致します。

次のグラフは、ハードウェアプロトタイプの赤色のSIMPLIS AC解析と青色の測定値を比較しています。これらのシミュレーション結果は、1.0.1 時間領域シミュレータSIMPLISの自励発振コンバータ回路の例から取りました。



結論と覚えておくべきポイント

- PWLモデリング手法は、スイッチングパワーシステムのモデリングにおいて非常に正確です。
- PWLモデルは、PWLモデルの近似誤差が大きい領域でスイッチングサイクルのごく一部を費やすように設計する必要があります。
- SIMPLISは、クローズ形式の小信号モデルを持たない回路を解析できます。可変周波数自励発振コンバータやLLCコンバータはその一例です。

1.0.5 POP解析

POP解析は、SIMPLISの最も強力な機能の1つです。POP解析は、回路のスイッチング定常状態の動作点をすばやく見つける特殊な過渡解析です。定常状態の動作点が見つかり、回路上で周期動作点でのAC解析を実行できます。

POP解析の後に過渡解析を行うこともできます。この場合、POP解析で見つかった動作点で過渡シミュレーションが開始されます。これは、回路が定常状態で始まるパルス負荷過渡テストなどに非常に役立ちます。

重要な概念

このトピックでは、次の重要な概念について説明します。

- POP解析は、特殊な過渡解析です。
- POP解析では、コンバータの周りに追加の制御ループを配置することにより、回路を定常状態に強制します。
- POP解析は、SPICEシミュレータのRELTOLよりもはるかに高い精度で、定常状態の動作点を求めます。
- AC解析を実行するには、成功したPOP解析が必要です。
- SIMPLISは、トポロジーまたは独自の回路構成の観点から回路を調べます。

学習内容

このトピックでは、次のことを学習します。

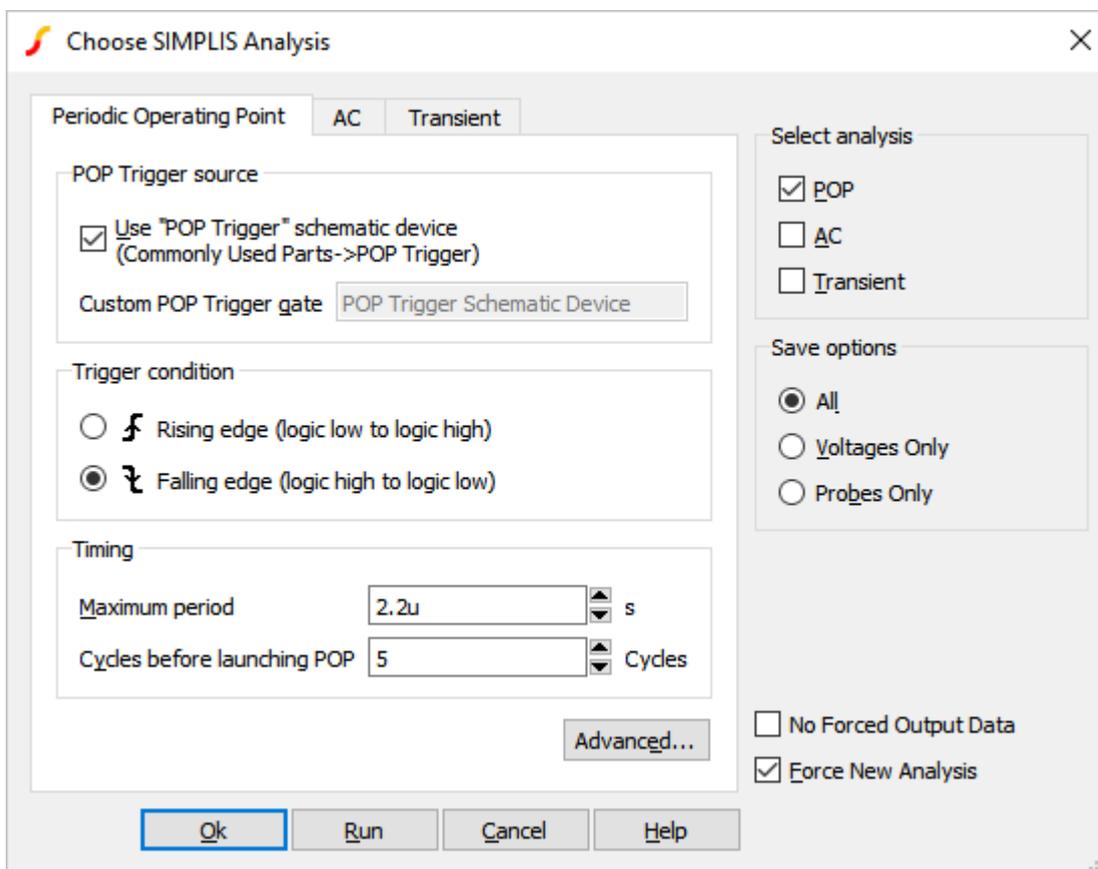
- SIMPLIS POP解析の基本的な仕組み
- スwitchングパワー回路をシミュレートするときにPOPが非常に重要な理由
- 新しいトポロジーとは何か

開始：POP解析を実行する

1. 波形ビューアが開いている場合は閉じます。
2. SIMPLIS ステータスウィンドウが開いている場合は、ウィンドウを選択し（**Ctrl+Space**）、**Clear Messages** ボタンをクリックして、ウィンドウからすべてのメッセージをクリアします。
3. **1.2_SIMPLIS_tutorial_buck_converter.sxsch**という回路図を開きます。
4. メニューバーから**Simulator > Choose Analysis...**を選択します。
5. **AC**チェックボックスと**Transient**チェックボックスのチェックを外し、**POP**解析のチェ

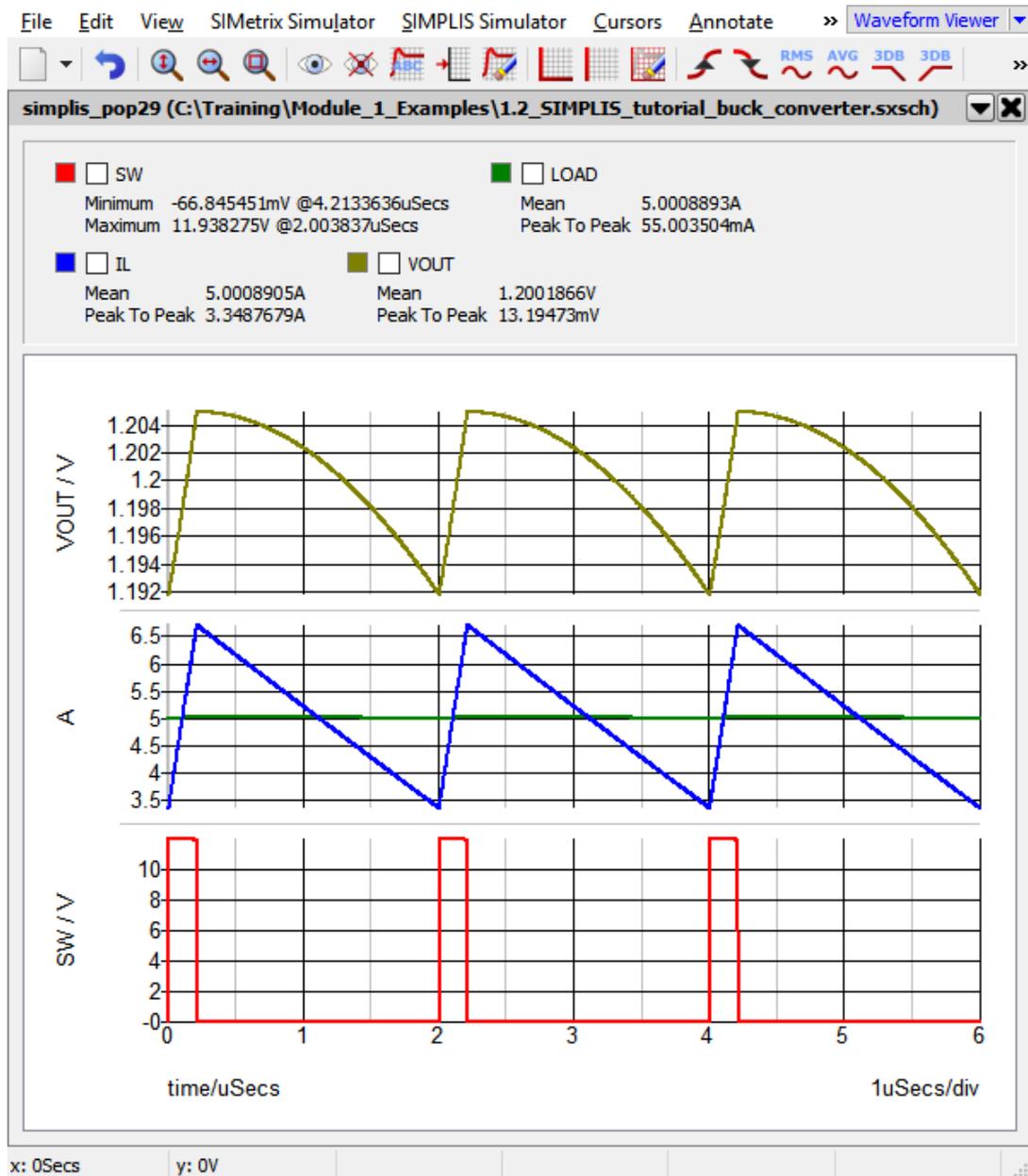
ックボックスをチェックしたままにします。

- ダイアログは次のように表示されます。



- Run**をクリックします。

結果：POP解析は、同期降圧コンバータで実行され、回路のスイッチング定常状態の動作点を見つけます。波形ビューアが、3スイッチングサイクルのデータとともに開きます。



検討

実験室に入ってスイッチングパワー回路の電源を入れると、最初のオシロスコープ画像を表示またはキャプチャする前に、数秒で安定状態に落ち着きます。帯域幅が数ヘルツの最も遅いPFC制御ループでさえ、回路の電源を入れてから最初に回路をプローブするまでの間に整定します。シミュレータでの経過は少し異なります。定常状態に到達するのに必要な時間を加速する方法が必要です。これがまさに、POPが開発された理由です。

POPの仕組み

POPは基本的に、電源制御ループを囲むソフトウェア制御ループです。POPは、コンバータの各スイッチングサイクルをモニターします。オシロスコープのトリガーが実験室で波形をキャプチャするように、POPトリガーデバイスは次のスイッチングサイクルの開始を示す波形エッジを検出します。各エッジで、POPアルゴリズムはいくつかのアクションを実行します。

1. 各キャパシタ電圧と各インダクタ電流をサンプリングして記録します。
2. デバイスが抵抗、キャパシタ、またはインダクタであるかどうかにかかわらず、各PWLデバイスの現在の動作セグメントを記録します。
3. 回路内の各スイッチの状態を記録します。

この情報を使用して、POPは別のスイッチングサイクルの回路をシミュレートします。次に、POPはキャパシタ電圧とインダクタ電流を再サンプリングし、あるスイッチングエッジから次のスイッチングエッジまでの値が実質的に同じかどうかを判断する計算を行います。相対的な誤差がPOPの収束仕様よりも小さい場合、POPアルゴリズムはコンバータが定常状態にあると判断して終了します。シミュレーション時間はゼロにリセットされ、ユーザが指定したスイッチングサイクル数（この場合は3）がシミュレートされ、波形ビューアにプロットされます。

あるスイッチングエッジから次のスイッチングエッジへのサンプリング値が収束仕様よりも大きい場合はどうなるでしょうか？POPはループを通るパスを再度実行します。各パスの中で次の処理が行われます。

1. POPは、コンバータが定常状態になるために必要なキャパシタ電圧とインダクタ電流を予測します。
2. POPはこれらの初期条件で回路をロードし、シミュレーションを再開します。
3. 次のスイッチングエッジで、処理を繰り返します。

SIMPLISステータスウィンドウにPOPの進行状況が表示される

SIMPLISシミュレータは、シミュレーションの進行状況をSIMPLISステータスウィンドウに直接出力します。データ出力には次のものが含まれます。

- 各解析の完了度
- 各解析の経過時間とCPU時間
- POPプロセスの各パスで分かったPOP収束度
- 新しいトポロジー情報。新しいトポロジーはユニークな回路構成です。たとえば、この降圧コンバータでは、MOSFETがオンになると新しいトポロジーがあり、MOSFETがオフになると別のトポロジーがあります。新しいトポロジーの詳細については、[2.0 Transient Analysis Settings](#)で学習します。

SIMPLISステータスウィンドウでは、POPアルゴリズムの動作を確認できます。以下に示すのは、POPシミュレーションの実行からの出力です。

[1.0.5_simplis_status_window_pop_analysis.log](#)をクリックすると、ステータスウィンドウのテキストを新しいブラウザウィンドウに表示できます。

```
*****
*****
simplis VERSION 8.10, RELEASE Rel-17.10.3, Mar 21, 2017
Checking syntax of ``1.2_SIMPLIS_tutorial_buck_converter.deck''

New topology #1
New topology #2
New topology #3
New topology #4
New topology #5
New topology #6

A starting operating point located.
Elapsed time   : 0 hr 0 min 1 sec
CPU time      : 0 hr 0 min 0.06 sec
Simulation time: 0.000000000000e+000 sec
```

PERIODIC OPERATING-POINT ANALYSIS

```
New topology #7  
New topology #8  
New topology #9  
New topology #10  
New topology #11  
New topology #12  
New topology #13  
New topology #14  
New topology #15
```

POPアルゴリズムの各パスの後に、パス番号と測定された収束度がSIMPLISステータスウィンドウに出力されます。各パスは、上記のPOPアルゴリズムを通る完全なループです。この回路の最終の収束度は $2.45E-13\%$ です。SIMPLISは普通に、このレベルの精度まで回路を解きます。これにより、次のセクションで説明するように、時間領域モデルでAC解析を実行できます。

このトピックは、POP解析の概要です。POPアルゴリズムの詳細については、[2.2 How POP Really Works](#)で学習します。

結論と覚えておくべきポイント

- POP解析を使用して定常状態に達するまでの時間を短縮すると、設計の反復プロセスに必要な時間が大幅に短縮されます。
- POPアルゴリズムは、回路が周期的にスイッチングする場合にのみ機能します。
- SIMPLIS PWL回路の方程式は、非常に高い精度で解かれます。POP収束仕様は、SPICEシミュレータの相対許容値 (REL TOL) よりも桁違いに小さくなっています。

1.0.6 AC解析

SIMPLIS AC解析は、[1.0.5 POP解析](#)で見つかった動作点での回路の小信号応答を解析します。これは、**DC** 動作点周辺のAC解析を見つけるSPICEシミュレータに類似しています。スイッチングパワーコンバータにはDC動作点がないため、SPICE AC解析は時間領域スイッチングパワーコンバータでは使用できません。

重要な概念

このトピックでは、次の重要な概念について説明します。

- SIMPLIS AC解析は、時間領域解析です。
- AC解析の結果は、POP解析で見つかったスイッチング動作点で有効です。

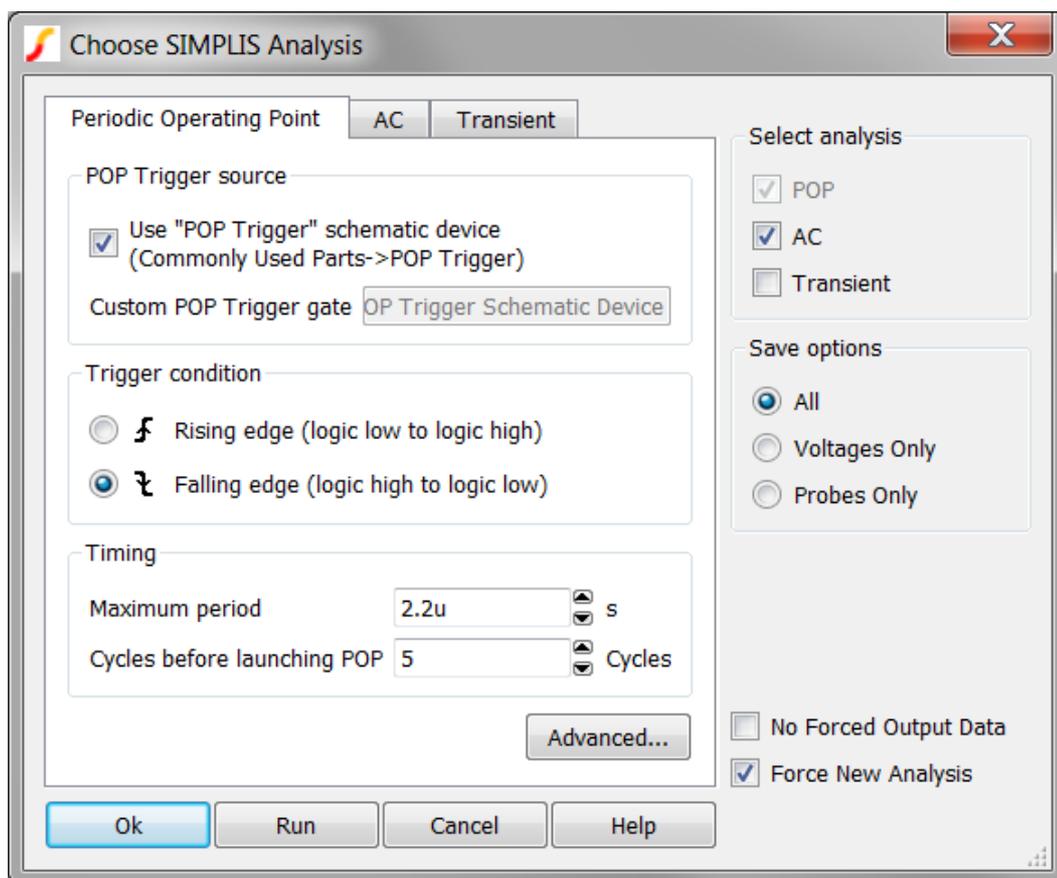
学習内容

このトピックでは、次のことを学習します。

- SIMPLISが時間領域モデルのAC応答をシミュレートする方法
- 時間領域モデルと平均モデルのAC結果の違い

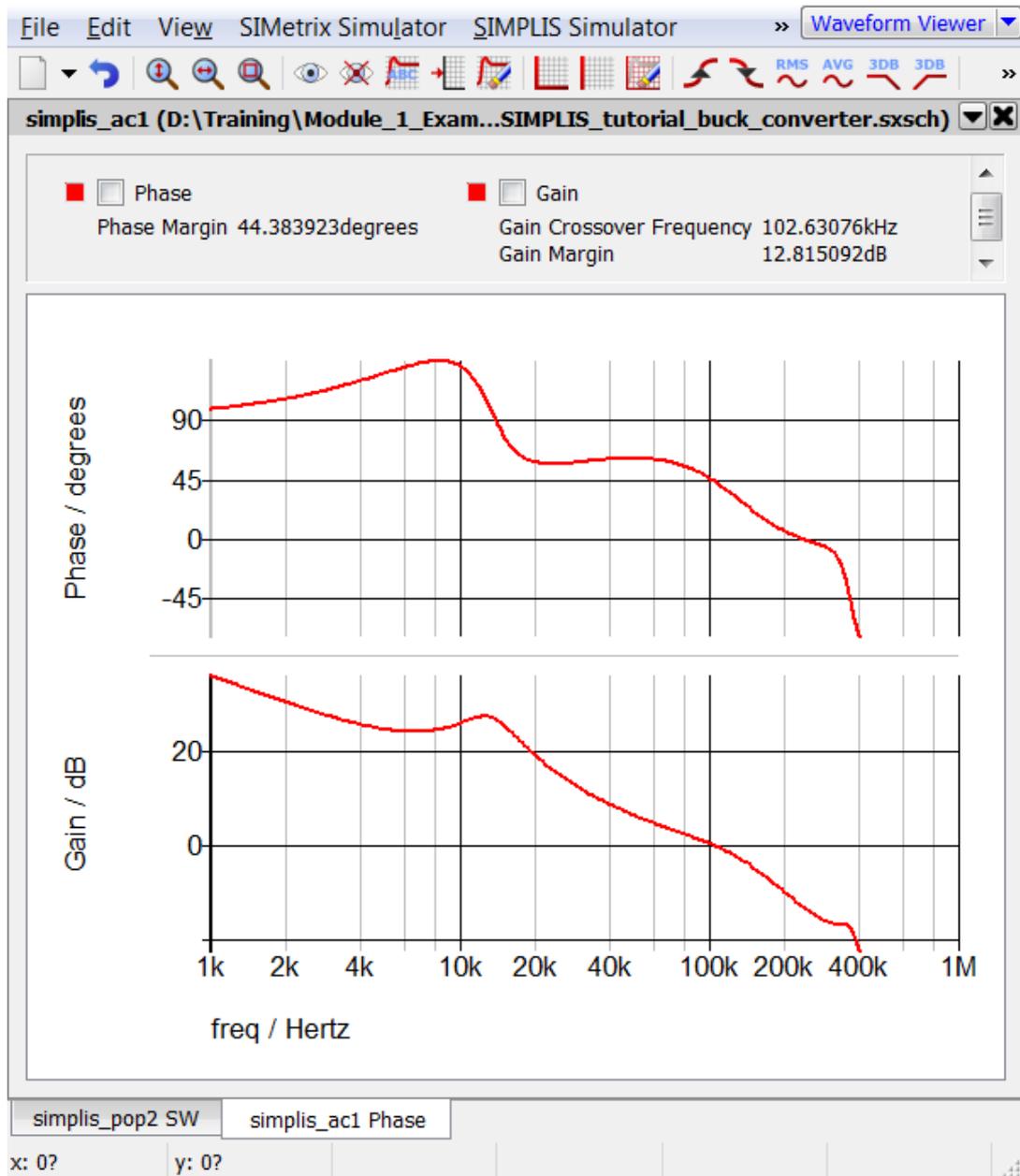
開始：AC解析の実行

1. 波形ビューアが開いている場合は閉じます。
2. **1.2_SIMPLIS_tutorial_buck_converter.sxsch**という回路図を開きます。
3. メニューから**Simulator > Choose Analysis...**を選択します。
4. すべての解析チェックボックスをオフにし、**AC解析**チェックボックスをオンにします。
結果：POPチェックボックスもチェックがつきますが、無効になっています。これは、すべてのAC解析の前にPOP解析を実行する必要があることを示しています。
5. ダイアログは次のように表示されます。



6. **Run**をクリックします。

結果：SIMPLISは、自励発振コンバータでPOP解析を実行し、続いてAC解析を実行します。前のセクションと同様に、波形ビューアはデータの3スイッチングサイクルとともに開きますが、制御ループのAC応答もあります。



検討

実験室に行ってスイッチングパワーシステムをネットワークアナライザに接続すると、時間領域で回路のAC応答が測定されます。ネットワークアナライザが接続されているとき、回路が突然平均化された小信号モデルに変わることはありません。SIMPLIS AC解析は、これとまったく同じように機能します。SIMPLISは時間領域シミュレーションモデルでAC解析を実行します。

SIMPLIS AC解析の仕組み

1. 回路でPOP解析を実行します。この解析により、回路の大信号定常状態動作点が見つかります。
2. 動作点としてPOP解析を使用して、回路でAC解析を実行します。スイープの各周波数において、AC解析は次のことを行います。
 - a. すべてのACソース（AC解析用）を共通の周波数（解析または摂動の周波数）に設定します。解析周波数は、POP解析が行われたスイッチング周波数ではなく、小信号解析が実行される周波数です。
 - b. これらのACソースは時間領域の正弦波であり、各ソースの振幅は非常に小さな値に設定されます。
 - c. SIMPLISは、AC摂動に対する回路の時間領域応答をシミュレートします。
 - d. フーリエ法を使用して、SIMPLISは時間領域データから回路の小信号応答を抽出します。

ACスイープ中、各周波数に対して上記の手順a-dが繰り返されます。回路は単一の周波数によって摂動され、周波数は段階的に変更されます。

何が間違っているのか？

1. 回路が正常にPOP解析されない場合、つまり、SIMPLISが安定した定常状態の周期動作点を見つけることができない場合、AC解析は実行されません。コマンドシェルに警告メッセージが表示されます。
2. 回路は、POP解析中に予期しない周期動作点に収束する場合があります。一般的な例は、POP解析の結果、回路が電流制限またはその他の障害状態で動作する場合に発生します。電流制限動作中に電圧ループは実質的に開いているため、電圧ループのゲインは通常の動作時と比較して大幅に減衰します。

結論と覚えておくべきポイント

- SIMPLIS AC解析は、実験室のネットワークアナライザと同じように機能します。
- すべてのAC解析の前に、POP解析が必要です。
- ACの結果は、POP解析中に見つかった動作点に完全に依存しています。
- AC解析は、すべてのリップル効果を含む時間領域モデルで実行されます。
- 小信号平均モデルは必要ないため、設計時間が短縮され、1つの時間領域モデルのみが必要です。