

ホワイトペーパー

# Simulink で DC-DC コンバーターのデジタル 制御設計を高速化

DC-DC コンバーターには、降圧、昇圧、SEPIC、Ćuk など電圧レベルを変換するさまざまなトポロジがあります。デジタル制御によって、DC-DC コンバーターにさまざまな電源と負荷を処理させて所望の動作範囲の電力品質を維持させることが可能です。このホワイトペーパーでは、Simulink® のシステムレベルのシミュレーションを使用して DC-DC コンバーターのデジタル制御を開発する方法を説明します。

Simulink では、設計の問題点を早期に発見し、単一の開発環境で複数の設計オプションと動作ケースをシミュレーションおよび調査してシステムの動作を最適化することが可能です。システムモデルは、要件開発から設計、実装、テストまで、すべての開発作業の基礎となります。

このホワイトペーパーでは、シングルエンド プライマリインダクター コンバーター (SEPIC) の例を使用して、モデリングとシミュレーションによる、電力コンバーターのデジタル制御の開発を行います。デジタル コントローラーは TI 製の DC/DC LED キットの明るさを調整します (図 1)。SEPIC と組み込みプロセッサもキットに同梱されています。

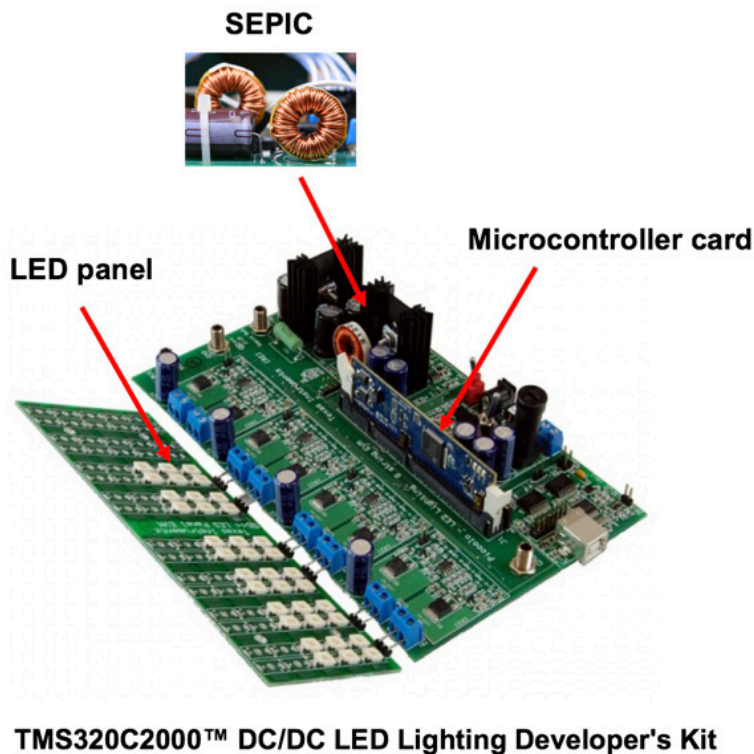


図 1. TI の DC/DC 開発者向けキット。デジタル パワーコンバーター コントローラーを動作させるマイクロコントローラー カードが同梱。

パワー エレクトロニクス エンジニアが Simulink を使用して次のような一般的なタスクを行う方法を紹介します。

- 受動回路要素、電力用半導体、およびさまざまな電源と負荷のモデリング
- 連続および不連続伝導モードでのコンバーターのシミュレーション
- 電力損失の確認とコンバーターの熱挙動のシミュレーション
- 立ち上がり時間、オーバーシュート、整定時間などの設計要件を満たすためのコントローラーのチューニング
- コントローラーのモデルから TI の C2000™ マイクロコントローラーに実装する C コードを生成

「シミュレーションとコード生成により、素早く変更を加えてコーディングの人為的エラーを排除できます。私たちのアルゴリズムは通常初回で機能するので、開発サイクルにおける、コードのデバック時間を大幅に削減することができました。」

— Dr. Robert Turner, ABB シニア R&D エンジニア

#### 関連情報

[Simulink で DC-DC コンバーター制御を開発 - 4 つのビデオ](#)

[ABB が大規模なグリッド接続インバーター製品の開発をモデルベース設計で加速 - ユーザー事例](#)

## SEPIC のモデリングとシミュレーション

図 1 で示された TI のハードウェアキットに基づく SEPIC は Simscape™ でモデリングすることが可能です。回路モデルの主要なパラメータを設定すれば、シミュレーションを使用して、連続および不連続伝導モードでのシステム全体の動作を知ることができます。さらに、このモデルは、さまざまなコンバーター構成を評価し、さまざまなスイッチング周波数の効果を探り、そしてコンポーネントの熱特性がコンバーター効率へどのように影響するかを理解するのに役立ちます。

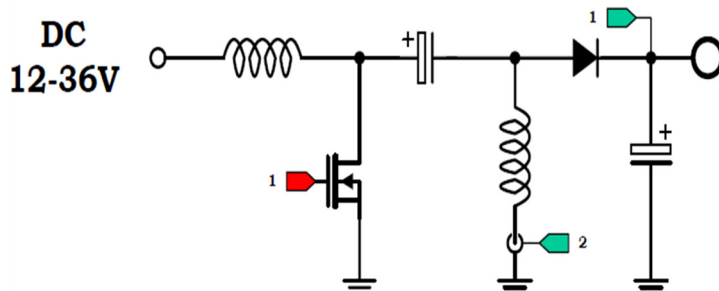
Simscape が提供する電気部品のブロックとライブラリにより、Simulink 環境で電気システムのモデル作成が可能になります。Simscape モデルは、さまざまな詳細度でコンポーネントのバリエーションを含むことが可能であり、シンプルな線形表現から開始して、複雑な非線形動作まで対応します。

SEPIC は、電圧源、抵抗器、インダクタ、そしてキャパシタなどの個別の電気部品に対応するブロックを使用してモデリングされます (図 2)。これらのブロックはパラメータ化することが可能で、ブロック間の接続は、電力を双方向に流すことができる実際のシステム内の物理接続を表します。ハードウェアが既に利用できるため、TI キットで提供されている仕様を使用して、容量やインダクタンスなどのブロックパラメータを決定することができます。そのパラメータを設定したモデルをシミュレーションすることで、コンバーターが連続と不連続伝導モードのどちらで動作するかを検証することが可能です。モデルは一定のデューティ比の開ループでシミュレーションされることに注意してください。

「Simulink と Simscape Electrical で構築したプラントのモデルをシミュレーションすることで、ハードウェアのプロトタイプを作成する前に、ハードウェアの設計を改善し最適化することができました。シミュレーションにより、ハードウェアのプロトタイプを何度も作らずに済みました。」

— Dr. Jakub Vonkomer, VONSCH

### SEPIC schematic



### Equivalent Simscape model

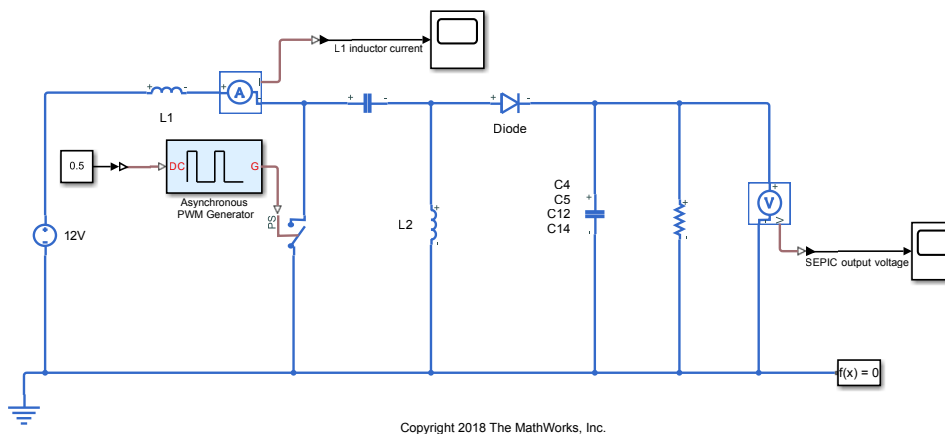


図 2. SEPIC の概略図 (上) と対応する Simscape モデル (下)。

回路のパラメータを変えた分析を行いコンバーターの設計をさらに評価したい場合もあります。たとえば、より小さなインダクタ値またはより大きな負荷でシミュレーションを再実行した場合、選択した実際の値によってコンバーターは不連続伝導モード (DCM) での動作を強制されることがあります (図 3)。また、このモデルでは半導体デバイスを理想スイッチで模擬しているため、半導体デバイスの ON/OFF 時の電圧・電流の非線形なダイナミクスはこの例では模擬されていません。

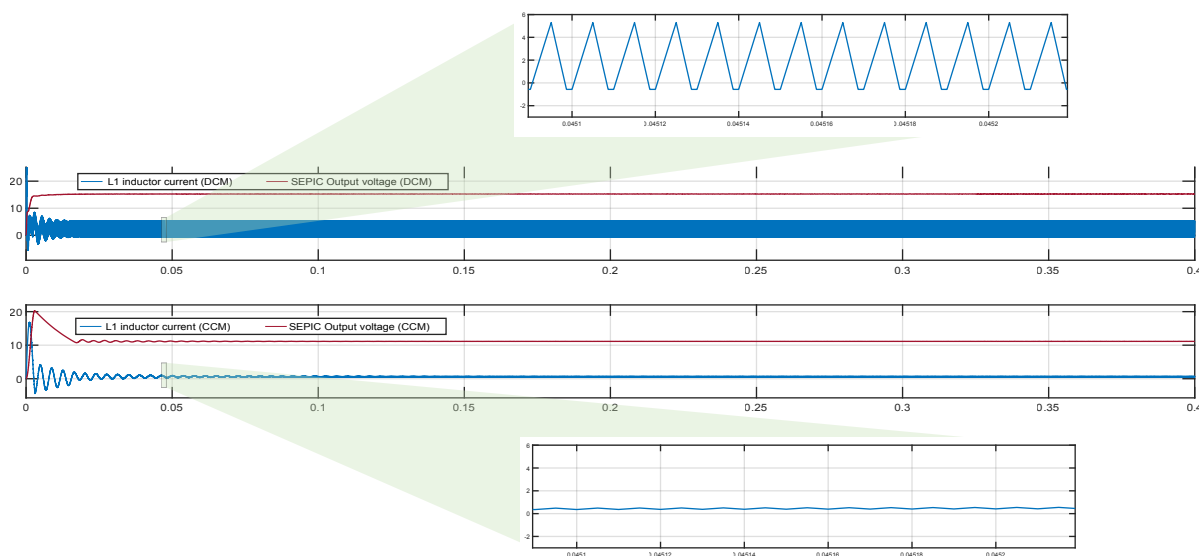


図 3. 不連続 (上) と連続 (下) 伝導モードでの SEPIC のシミュレーション結果。

## 関連情報

降圧昇圧コンバーター - 例

VONSCH がソーラーインバーターと充電器の制御システムの開発を加速 - ユーザー事例

## コンバーターの電力損失と熱挙動を確認

前述のように、Simscape モデルはさまざまな詳細度でコンポーネントのバリエーションを含むことが可能です。理想的なスイッチをより高い詳細度のブロックと交換することで、SEPIC のスイッチング動作に非線形性を組み込んで解析することが可能です。

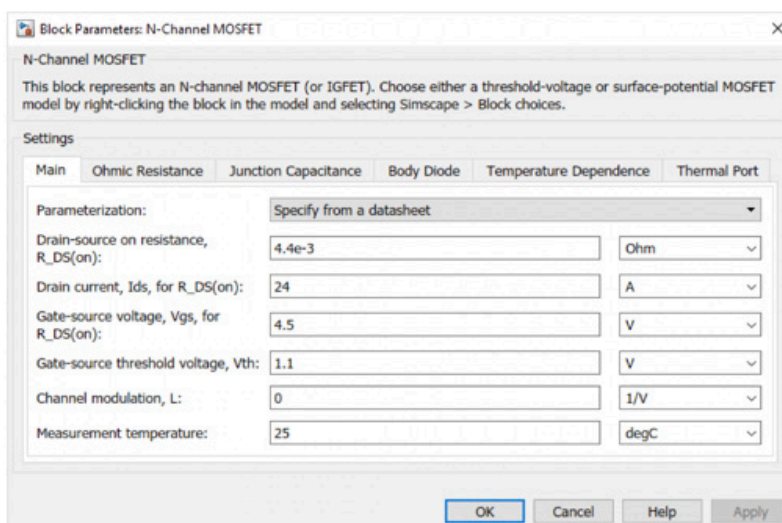
少しの変更を加えることで、シミュレーションモデルで SEPIC の電力損失を確認して熱挙動を理解することが可能です。非線形のスイッチング動作をモデリングするために、理想的なスイッチのブロックを Simscape Electrical™ の N-Channel MOSFET ブロックに交換して使用することが可能です。コンバーターの熱ダイナミク

「Simscape Electrical で電気と熱のドメインを結ぶ統合した電力システムのモデルを作成しました。宇宙船の様々なミッションの動作をシミュレーションし、システムレベルの動作を把握するためです。宇宙空間上で太陽光アレイの角度を変えるモーターをモデリングする場合、電気と機械のコンポーネントを統合して解析することも可能です。」

— Hector Hernandez, Lockheed Martin

スをモデリングするために、Simscape を使用して Simulink 環境でマルチドメイン モデルをシミュレーションすることが可能です。

MOSFET ブロックをパラメータ化するために、TI キットで使用される MOSFET のデータシートを使用することが可能です (図 4)。データシートの静特性と動特性の両方がブロックのパラメータ化に使用されます。



$T_A = 25^\circ\text{C}$		TYPICAL VALUE	UNIT
$V_{DS}$	Drain-to-Source Voltage	25	V
$Q_g$	Gate Charge Total (4.5 V)	6.2	nC
$Q_{gd}$	Gate Charge Gate-to-Drain	1.1	nC
$R_{DS(on)}$	Drain-to-Source On Resistance	$V_{GS} = 3\text{ V}$	5.4
		$V_{GS} = 4.5\text{ V}$	4.4
		$V_{GS} = 8\text{ V}$	3.8
$V_{th}$	Threshold Voltage	1.1	V

図 4. TI のデータシートを使用した MOSFET ブロックのパラメータ化。

MOSFET をパラメータ化すれば、MOSFET ブロックの特性曲線 (定常状態、伝送、ゲート電荷特性) をデータシートのグラフと比較して近似の精度を確認することが可能です。図 5 の下の列に示されるように、シミュレーションと実際の特性カーブは非常に近く、MOSFET モデルの動作が実際のハードウェアの動作と近いことが確認されます。

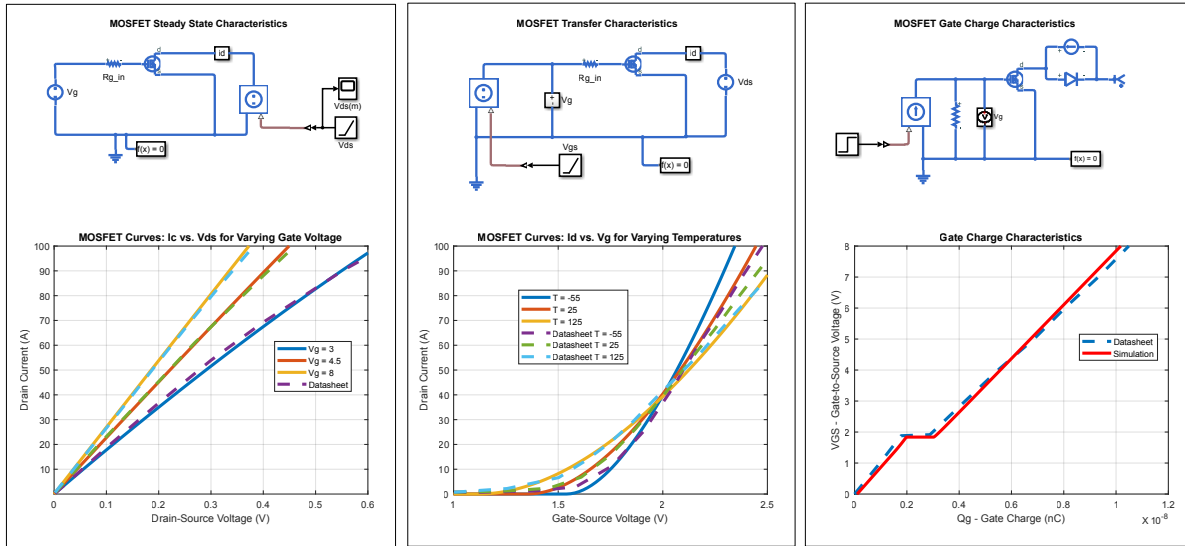


図 5. Simscape Electrical でパラメータ化された MOSFET ブロックの特性とデータシートの実際の特性との比較。  
 上の行には下のプロットを生成するために使用されたモデルが表示されています。  
 結果はほぼ一致しており、パラメータ化が良好なことを示しています。

次に、パラメータ化された N-Channel MOSFET ブロックを SEPIC モデルに追加して、理想的なスイッチのブロックと交換することができます (図 6)。ブロックの熱端子を有効化することで、コンバーターの電気と熱ダイナミクスの両方を同時にモデリングしてシミュレーションすることが可能です。ログに記録されたシミュレーションのデータに基づいて、モデル内の MOSFET が消費した電力損失を計算することが可能です。モデルはまだ一定のデューティ比の開ループで動作することに注意してください。

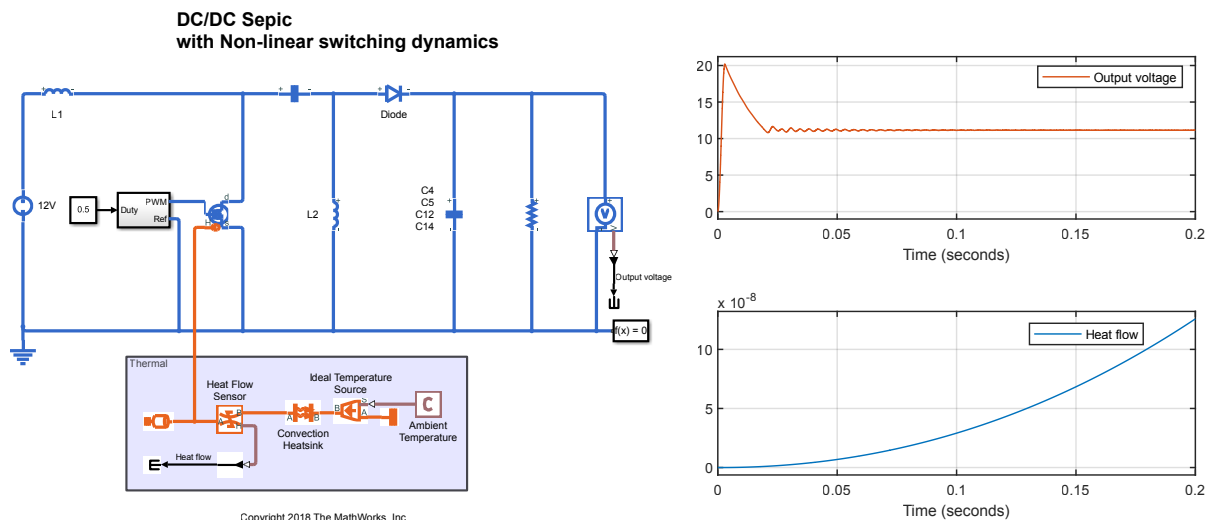


図 6. 非線形スイッチング ダイナミクスでの SEPIC モデル (左) と、電気と熱ダイナミクスをシミュレーションした結果のプロット (右)。

## 関連情報

[Lockheed Martin がマルチドメイン電力システムモデルを使用してオリオン宇宙船ミッションをシミュレーション](#) - ユーザー事例

[TI の N-Channel MOSFET](#) - データシート

[半導体デバイスが消費した電力損失を計算](#) - ドキュメンテーション

## デジタル コントローラーの設計

コンバーターの出力電圧を制限するデジタル PID コントローラーを設計するために、Simulink では不連続のシステムから線形モデルを抽出し、コントローラーゲインを自動的にチューニングすることが可能です。

図 7 では、デジタル制御ロジックを実装したフィードバック ループが SEPIC モデルに追加されていることが示されています。フィードバックループはコンバーターの出力電圧を測定し、その測定値を使って、目標とする出力電圧からの誤差を算出します。そして、その誤差は PID コントローラーの入力として使用され、SEPIC モデルのスイッチのデューティ比を制御します。

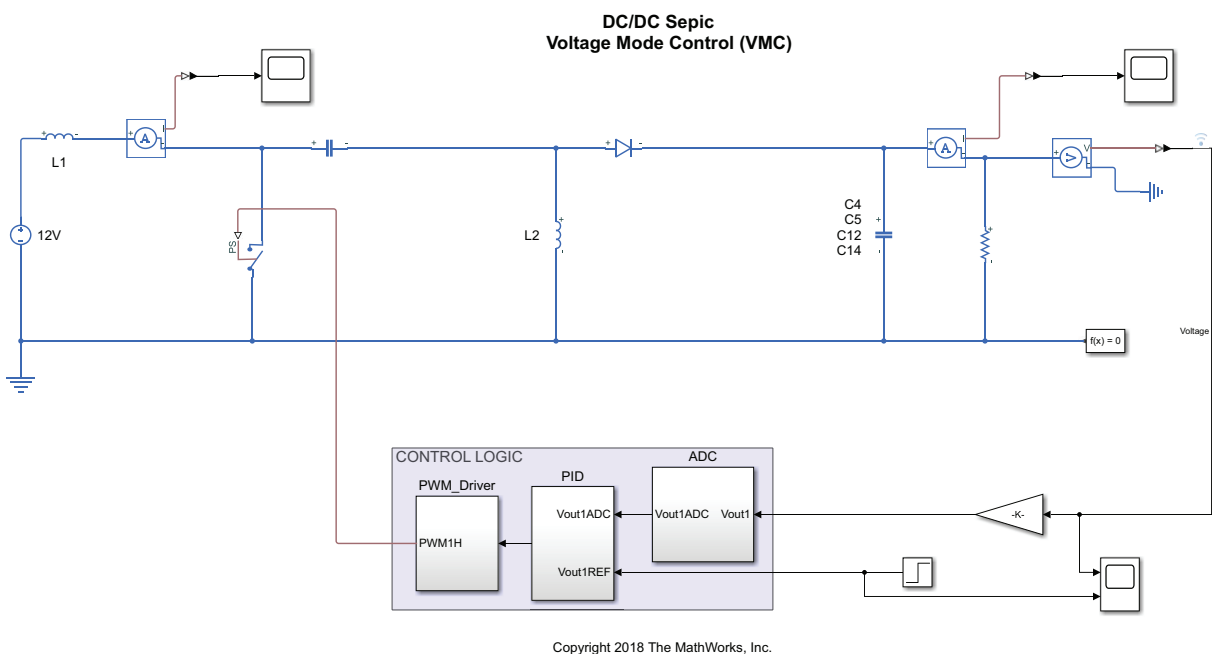


図 7. 閉ループ 電圧モード制御。



デフォルトの PID コントローラーゲインでモデルをシミュレートして、システムの動作を評価することが可能です (図 8)。パフォーマンスを向上させるため、Simulink Control Design™ の PID Tuner (PID コントローラーのゲイン調整の専用 UI) を使用して、PID コントローラーゲインを自動的にチューニングすることが可能です。PID Tuner は自動的にシステムの線形化を試行し、PID ゲインのチューニングを容易にします。ただし、シミュレーション モデルは PWM 制御などの高周波スイッチング動作を含むため線形化されません。この問題に対処するため、System Identification Toolbox™ と、シミュレーションした入力/出力データを使用して、線形化されたコンバーターのダイナミクスを近似する伝達関数を見つけ出すことが可能です。

「当社のシステムエンジニアは、MATLAB と Simulink を利用して、AC 800PEC コントローラー用の制御ソフトウェアのプログラミング、シミュレーション、検証を短期間で行っています。これにより、開発期間が大幅に削減され、仕様からの逸脱も抑えることができます。」

— Fritz Wittwer, ABB

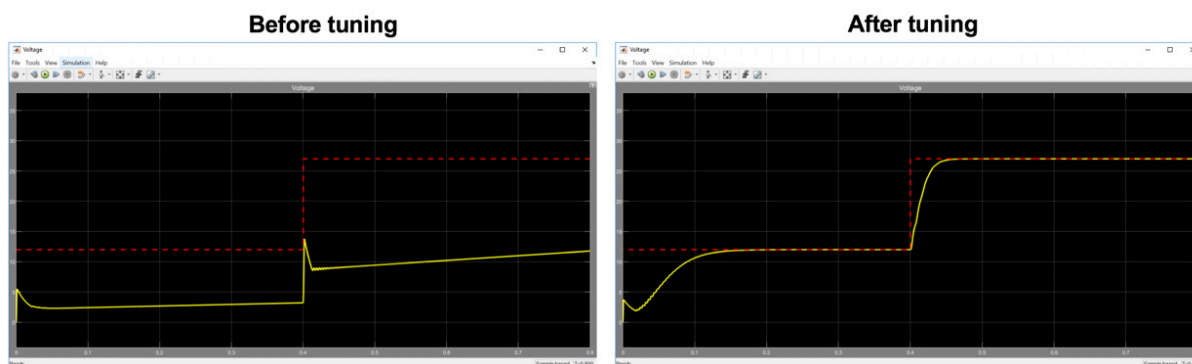


図 8. PID ゲインを自動チューニングする前 (左) と後 (右) の PID コントローラーのパフォーマンス。

System Identification Toolbox で、MOSFETのデューティ比のある動作点において微小な大きさの摂動を与えたシミュレーションを実行して、PID Tuner から出力データを生成することが可能です。その後で、シミュレーションした入力/出力データから伝達関数を見つけ出すことができます。同定されたモデルに必要な次数を指定することが可能です。たとえば、1 組の複素数の極を持つ 2 次伝達関数などです。伝達関数を取得すれば PID Tuner は、ユーザー指定の制御帯域と位相余裕の要件を満たす PID コントローラーゲインを自動的に算出します。算出されたゲインは Simulink モデルの PID Controller ブロックのゲインを更新するために使用されます。

チューニングされたコントローラーのパフォーマンスが応答時間の要件を満たすかを、元の非線形システムでシミュレーションを実行することで確認することが可能です (図 8、右)。パフォーマンスが複数のシナリオで許容されるかを確認するために、追加のシミュレーション テストを実行したい場合もあります。たとえば、さまざまな負荷のタイプを追加して、シミュレーションを再実行して、結果を検証することが可能です。

#### 関連情報

[プラントモデルが利用できない場合に PID コントローラーをチューニング - 記事](#)

[ABB 社がパワー エレクトロニクス コントローラー用のアプリケーション制御ソフトウェアの開発を加速 - ユーザー事例](#)

## マイクロコントローラーに実装するコードを生成

コントローラー設計をシミュレーションで確認した後で、ハードウェアにコントローラーを実装することが可能です。同等の C/C++ コードを手動で打ち込むとエラーが起こりやすく、開発の時間を大きく遅らせることもあります。Simulink と Embedded Coder で、アルゴリズムの C/C++ コードを自動生成して、量産ソフトウェア開発環境にエクスポートすることが可能です。

「eBike に乗ってシステムが動作する感覚を確かめた後、Simulinkで制御アルゴリズムとパラメータを調節して、プロトタイプのハードウェアのコードを再生成しました。5分もたたないうちに、更新したコントローラーでの試乗の準備ができました。」

— Daniel Baumgärtner, Bosch eBike Systems

Embedded Coder® を使用することで、デジタルコントローラーのモデルから量産用コードを生成して、TI DC/DC LED キットの TMS320F28035 マイクロコントローラーに実装することが可能です。TI キットの SEPIC の出力電圧を変更して、LED パネルの明るさを調節することにより、マイクロコントローラーで実行される生成コードのパフォーマンスを確認することが可能です。

Embedded Coder と、ハードウェアのサポート パッケージ (ダウンロード) を使用すると、TI の C2000 マイクロコントローラーのようなターゲット ハードウェアとインターフェースをとることができます (図 9)。Embedded Coder Support Package for Texas Instruments C2000 Processors は、そのインターフェースをとる専用ブロックを (ターゲットハードウェアに固有) を提供します。ユーザーが Simulink で作った制御ロジックとその専用ブロックを組み合わせることで、TI の C2000 マイクロコントローラーに制御ロジックを C コード生成してシームレスに実装することが可能です。その専用ブロックには、ドライバー、PWM 生成、ピンの制御などがあります。

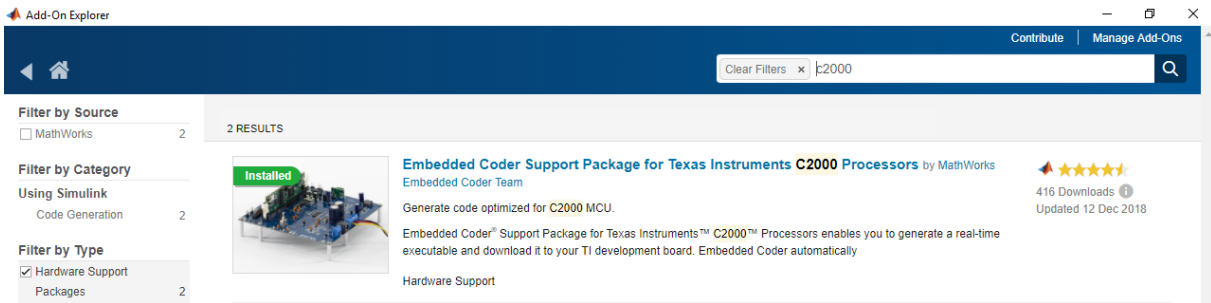


図 9. ハードウェアのサポート パッケージをダウンロードして、Embedded Coder で外部ハードウェアとのインターフェースをとる。

以下の例のように、出力電圧を制御する PI コントローラモデルに、TI のサポートパッケージが提供する専用ブロックとして、A/D コンバータ、割り込み、PWM 生成機能を追加することが可能です (図 10)。

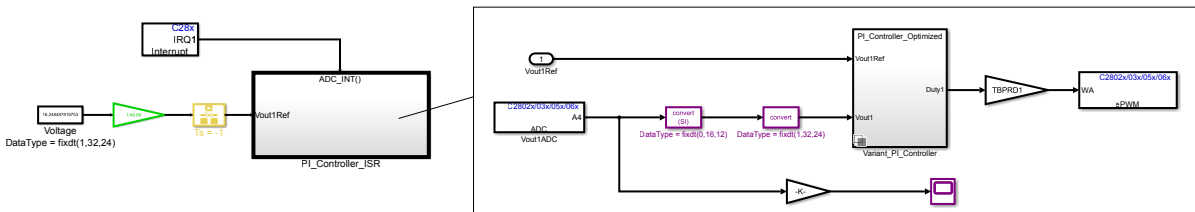


図 10. ハードウェアのサポートパッケージを使用して、ターゲット ハードウェアのドライバー、PWM 生成、ピンの制御を追加する。

新しいブロックを配置したら、マイクロコントローラーのコードを生成することが可能です。コード生成レポート (図 11、右) では、Simulink モデルと生成コード間の双方向トレーサビリティが提供されます。TI の Code Composer Studio™ IDE (図 11、左) をダウンロードすると、ハードウェアが接続されている場合、実行可能ファイルをマイクロコントローラーに実装するように設定出来ます (図 11、左)。この機能を使用して、Simulink から直接ターゲット ハードウェアにコードを生成して実装することが可能です。

「Embedded Coder で生成したコードは期待通りの動作をしてくれました。9 つの PI ループを含むコードを手作業で書き、ハードウェア上でデバッグしていたら、6 か月以上スケジュールが長くなっていたでしょう。」

— Brad Landseadel, Stem

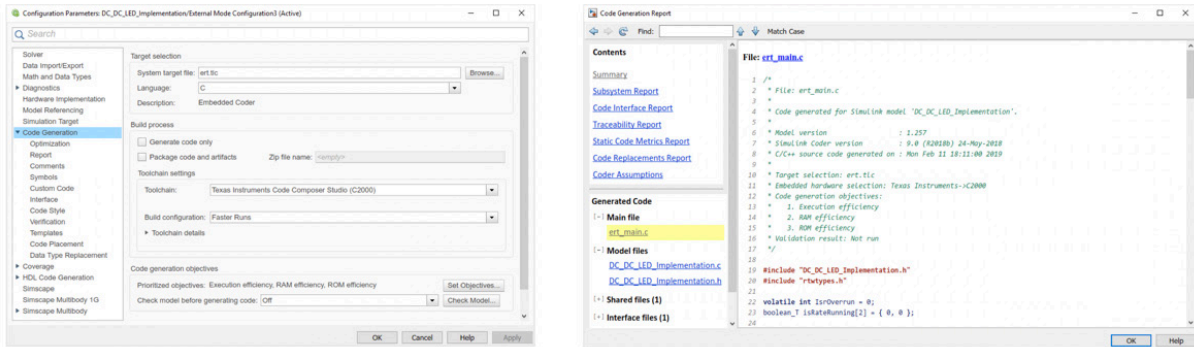


図 11. Simulink から直接ターゲット ハードウェアにコードを生成して実装。コードをトレースして Simulink モデルへたどるために、コード生成レポートが使用可能です。

コードが生成されてマイクロコントローラーに実装されると、Simulink モデルをインターフェースとして使用して、コードのパラメータをチューンしたり、信号をリアルタイムで監視できます。図 12 では、ノブを使用してコンバーターの目標電圧値を変更する Simulink モデルが示されています。この値はマイクロコントローラーで実行されるコードで更新され、LED の明るさを変更するのに使用できます。

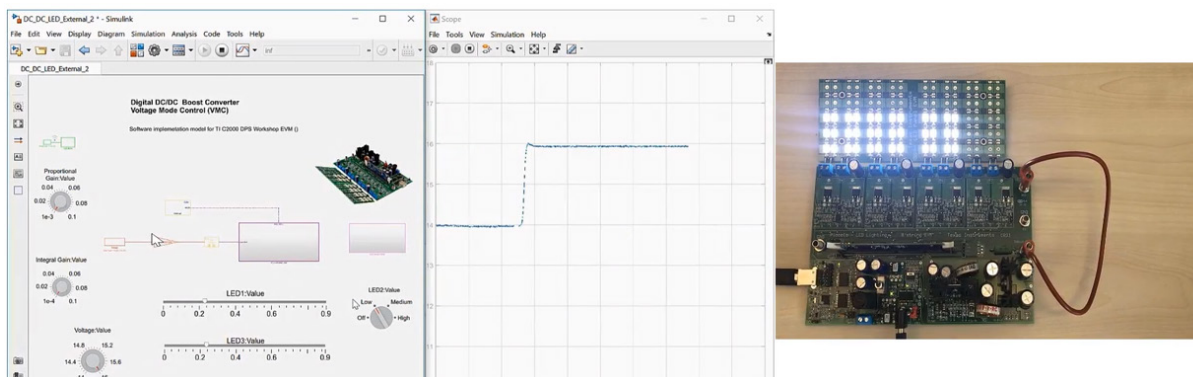


図 12. Simulink モデルを使用して、マイクロコントローラーで実行される生成コードのパラメータをチューニングする。たとえば、ノブを使用して LED の明るさコマンドを変更し、LED の反応をリアルタイムで見ることが可能です。

## 関連情報

[ターゲット ハードウェア上で実行されるモデルの調整および監視 - ドキュメンテーション](#)

[Embedded Coder を使用した降圧コンバーターのコントローラーの実装 \(34:01\) - ビデオ](#)

[Bosch eBike Systems がモデルベースデザインを使用して電動自転車コントローラーを開発 - ユーザー事例](#)

[Stem がモデルベースデザインを使用してパワー エレクトロニクス制御システムの開発を加速 - ユーザー事例](#)

## まとめ

このホワイトペーパーでは、Simulink を使用して、電力コンバーター向けのデジタル コントローラー開発を高速化する方法を説明しています。Simulink を使用すると、コンバーターのモデリングが可能になり、シミュレーションによってコンバーターのコントローラーを正常/異常な動作範囲でテストしながら PID コントローラーを設計できます。最終的に、コントローラーのモデルから C コードを生成して、TI の TMS320F28035 のようなマイクロコントローラーに実装することが可能です。

## 今すぐ始める

電力コンバーター制御プロジェクトを加速するには、次のステップに進んでください。

- [Simulink を使用したパワー エレクトロニクス制御設計 - 概要](#)
- [Simulink で DC-DC コンバーター制御を開発\(19:53\) - ビデオ](#)
- [パワー エレクトロニクス制御の評価版ソフトウェア](#) ダウンロード
- [組み込みソフトウェアの開発](#) - 技術コンサルティング