



# PLECS *DEMO MODEL*

*Three-Level Boost PFC Converter*

3レベル昇圧PFCコンバータ

Last updated in PLECS 4.4.1

**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>

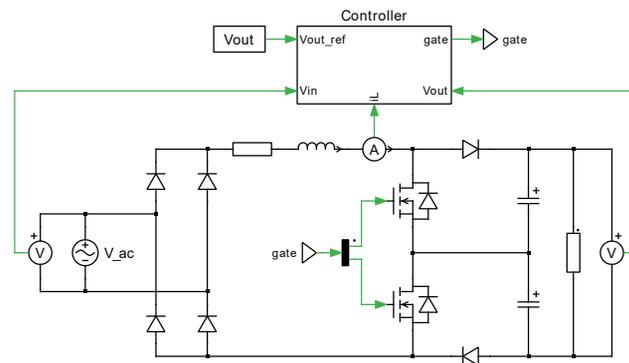
# 1 概要

このデモでは、単相3レベル昇圧型力率改善(Power Factor Correction: PFC)コンバータを紹介합니다。図1にコンバータの電気回路図を示します。モデリングしたコントローラには、PLECSコンポーネントライブラリのPID(連続系PID制御器)ブロックが組み込まれています。

システムのパラメータ:

- 入力電圧60Hz、120VAC(rms)
- 出力電圧350VDC
- スwitching周波数100kHz

図1: 3レベル昇圧コンバータの電気回路



**Note** このモデルには、次からアクセスできるモデル初期化コマンドが含まれています。

PLECS Standalone: シミュレーションメニュー + シミュレーション・パラメータ... → 初期化

PLECS Blockset: Simulinkモデルウィンドウで右クリック → モデル プロパティ → コールバック → InitFcn\*

## 2 モデル

3レベルPFC昇圧コンバータの電源回路の動作説明は[1]に記載されています。このトポロジでは、従来のPFC昇圧回路と比較して、昇圧インダクタのインダクタンスを低減でき、半導体デバイスの定格電圧を出力電圧の50%減って半分に低減できます。その結果、コンバータの電力密度と効率が大幅に向上し、高電力および/または高電圧アプリケーションの設計コストを削減できます。

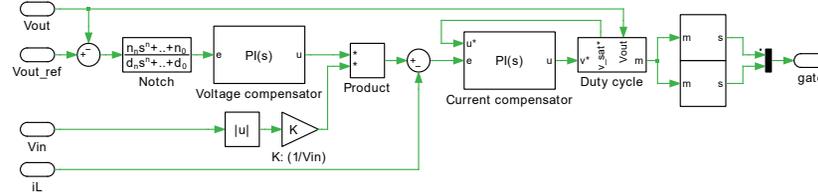
デモモデルは、単相60Hz、120VAC(rms)を350VDCに変換するパワーステージの例を示しています。

### 2.1 制御

コントローラ実装の回路図を図2に示します。電圧補償器は、検出したDC出力信号をリファレンスと比較することで、DCバス電圧を調整します。DCバスの2次高調波リップルによる入力電流の歪みを防ぐために、電圧補償器の入力にノッチフィルタを追加します。電圧ループの出力は、整流した入力電圧波形と乗算して、電流リファレンスを生成します。得られた積は、検出したインダクタ電流と比較します。この生成された誤差信号は電流補償器への入力として

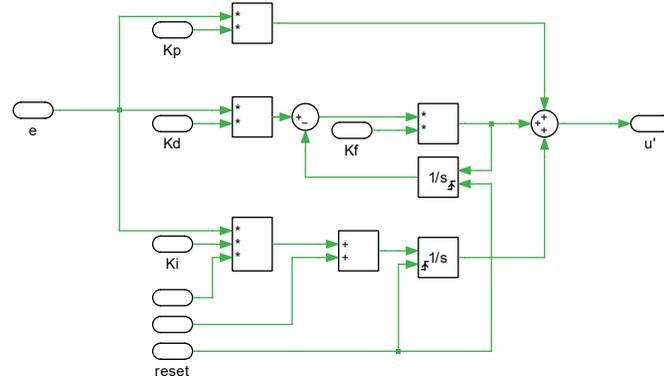
使用し、その出力である変調指数mがPWM変調器に供給されます。2つのスイッチのそれぞれに対して生成されるゲート信号は、互いに180°オフセットしており、スイッチング周波数は100kHzです。

図2: Controllerサブシステムの回路図



電圧補償器と電流補償器はどちらも、PLECSコンポーネントライブラリの連続系PID制御器ブロックを使用しており、その内部設計を図3に示します。このブロックの詳細については、ヘルプボタンからドキュメントを参照してください。電流補償器の場合、飽和はPID制御器ブロックの外部に配置されます。また、逆算法を用いた内部アンチワインドアップ手法が有効になっています。

図3: 連続系PID制御器コンポーネントの実装



プラント伝達関数

PIコントローラのゲインパラメータを設定するには、プラント伝達関数が必要です。伝達関数は2つあり、1つは内側の電流ループC(s)用で、もう1つは外側の電圧ループV(s)用です。電圧ループは電流リファレンスを歪めないように電流ループよりも遅くなるように設計されています。

C(s)は、インダクタ(L)と抵抗(R)の両端の電圧V<sub>RL</sub>(入力変数)の変化を、インダクタ電流I<sub>L</sub>(出力変数)の応答に関連付けます:

$$C(s) = \frac{I_L}{V_{RL}} = \frac{1/R}{1 + sL/R} = \frac{K_1}{1 + sT_1}, \quad \text{where } K_1 := 1/R \text{ and } T_1 := L/R$$

V(s)は、インダクタ(L)を流れる電流の変化、I<sub>L</sub>(入力変数)とキャパシタ電圧V<sub>C</sub>(出力変数)の応答に関連付けます:

$$V(s) = \frac{V_C}{I_L} \approx \frac{1}{sC} = \frac{1}{sT_2}, \quad \text{where } T_2 := C$$

### 等価遅延

制御システムでは、多くの場合、いくつかの小さな遅延(センサ、アクチュエータ、サンプリング、計算遅延、PWM遅延などによる)が発生します。一般に、これらの遅延はプラントの時定数よりも小さいと想定されます。 $T_{\Sigma}$ が制御システムの等価遅延である場合、遅延の簡略化された伝達関数は次のようになります:

$$D_{\Sigma}(s) = \frac{1}{1 + sT_{\Sigma}}$$

この特定の実装に関して、このモデルに存在する遅延は次のとおりです:

- 制御計算用の小さな時定数 $T_{\text{calc}}$ は $\frac{1}{2}T_s$ です。
- PWM出力生成の小さな時定数 $T_{\text{pwm}}$ は $\frac{1}{2}T_s$ です。ここで、 $T_s$ はコントローラのサンプル時間です。

したがって、等価遅延 $T_{\Sigma}$ は次のようになります:

$$T_{\Sigma} = T_{\text{calc}} + T_{\text{pwm}} = T_s$$

### 電流ループの制御パラメータの計算

電流PIコントローラの制御パラメータ( $K_p$ および $K_i$ )は、MOC(Magnitude Optimum Criterion)を使用して計算します。システムの開ループ伝達関数 $C_{OL}(s)$ は、コントローラからの伝達関数、等価時間遅延、およびプラントからの伝達関数の積によって与えられます:

$$C_{OL}(s) = \frac{1 + sT_n}{sT_i} \cdot \frac{1}{1 + sT_{\Sigma}} \cdot \frac{K_1}{1 + sT_1}, \quad \text{where } K_p = \frac{T_n}{T_i} \text{ and } K_i = \frac{1}{T_i}$$

コントローラのパラメータ $T_n$ は、プラント伝達関数の極がキャンセルされるように(すなわち $T_n = T_1$ ルになるように)選択します。この極ゼロのキャンセルの後、閉ループ伝達関数は2次システムを表します。残りのパラメータ $T_i$ は、2次システムの減衰係数( $\zeta$ )を $1/\sqrt{2}$ に設定して計算し、 $T_i = 2K_1T_{\Sigma}$ となります。

### 電圧ループの制御パラメータの計算

電圧PIコントローラの制御パラメータ( $K_p$ および $K_i$ )は、プラントの外側の電圧ループが純粋な積分器を表すため、SOC(Symmetrical Optimum Criterion)を使用して計算します。システムの開ループ伝達関数 $V_{OL}(s)$ は、コントローラからの伝達関数、等価時間遅延、およびプラントからの伝達関数の積によって与えられます:

$$V_{OL}(s) = \frac{1 + sT_n}{sT_i} \cdot \frac{1}{1 + sT_{\Sigma}} \cdot \frac{1}{sT_2}, \quad \text{where } K_p = \frac{T_n}{T_i} \text{ and } K_i = \frac{1}{T_i}$$

対応する閉ループ伝達関数を解くと、最終的な係数は次のようになります:

$$T_n = 4 \cdot T_{\Sigma} \text{ and } T_i = 8 \cdot \frac{T_{\Sigma}^2}{T_2}$$

コントローラのパラメータ計算の詳細については、[2]を参照してください。

### 3 シミュレーション

添付したモデルを使用してシミュレーションを実行し、それぞれ図4と図5に示すように、PWM信号、AC入力電流、DC負荷電圧、インダクタ電流を観察します。定常状態では、出力電圧のリップルと入力電流の全高調波歪み(THD)は、PLECSスコープの上部にあるカーソルボタンを使用して測定できます。あるいは、PLECSコンポーネントライブラリの全高調波歪みブロックを使用してTHDを測定することもできます。

#### 観察

- 図4に示すように、PWM信号は180°オフセットされます。
- 図5の2番目のプロットの入力電流(赤)とスケーリングされた入力電圧(緑)の波形は、ほぼ同相であることがわかります。
- 入力電流のTHDは4.75%です。

図4: PWM信号

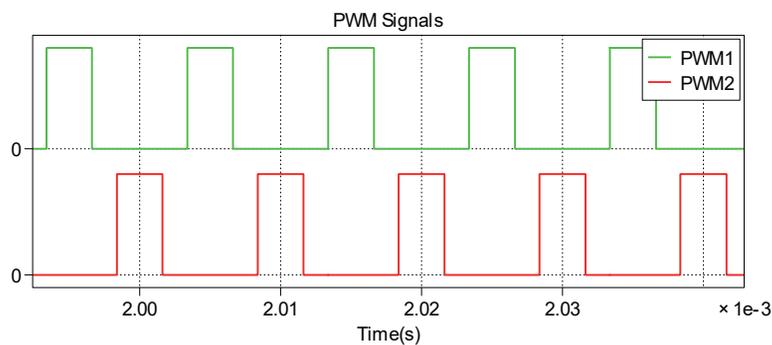
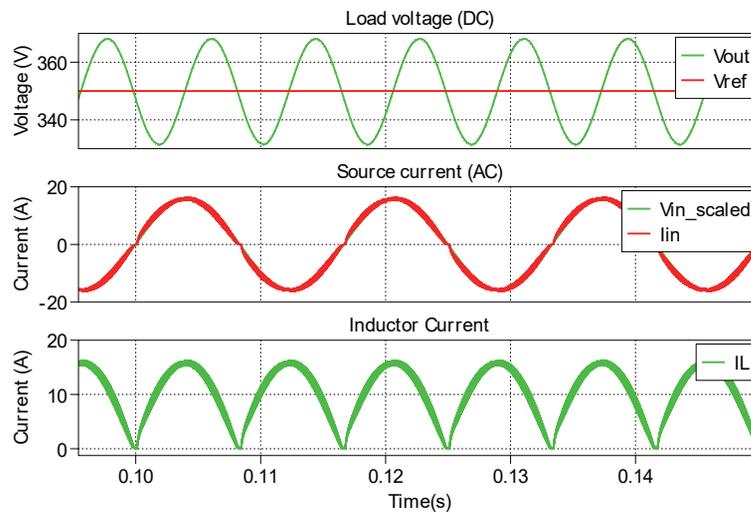


図5: 負荷電圧(DC)、入力電流(AC)、およびインダクタ電流



## 4 まとめ

このモデルは、3レベル昇圧PFCコンバータに焦点を当てています。PLECSコンポーネントライブラリの連続系PID制御器ブロックを利用しています。

## 参考文献

- [1] M. T. Zhang, Yimin Jiang, F. C. Lee and M. M. Jovanovic, "Single-phase three-level boost power factor correction converter," *Proceedings of 1995 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition - APEC'95, Dallas, TX, USA, 1995*, pp. 434-439 vol.1. Click to access online: [IEEE Xplore webpage](#).
- [2] *Conception de Systèmes automatiques*, Hansruedi Bühler, Presses Polytechniques Romandes, Lausanne 1988, ISBN 2-88074-149-1

改訂履歴:

PLECS 4.4.1 初版



**Pleximへの連絡方法:**

☎ +41 44 533 51 00	Phone
+41 44 533 51 01	Fax
✉ Plexim GmbH	Mail
Technoparkstrasse 1	
8005 Zurich	
Switzerland	
@ info@plexim.com	Email
http://www.plexim.com	Web



計測エンジニアリングシステム株式会社

<https://kesco.co.jp>

*PLECS Demo Model*

© 2002-2023 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。