

省エネルギーのための電子技術専門誌

グリーン・ Green Electronics エレクトロニクス

No.
16

高効率/省部品/低 EMC…無線機や高精細映像機器にも安心組み込み

特集

LLC共振による低雑音スリム電源 現代設計法 [シミュレータ&データ付き]

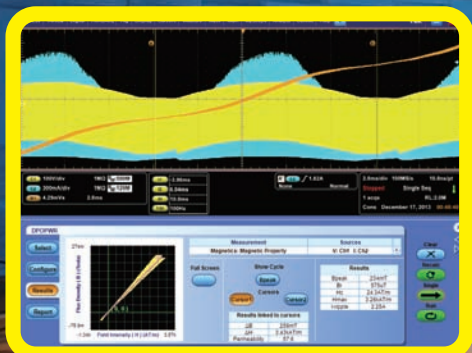


CD-ROM付属

- ① 無制限電子回路シミュレータ LTspice
- ② トランス・コイル設計ツール Magnetics Designer
- ③ 記事で紹介した回路ファイルとモデル一式

高性能電源作りに
欠かせない
2大ツール

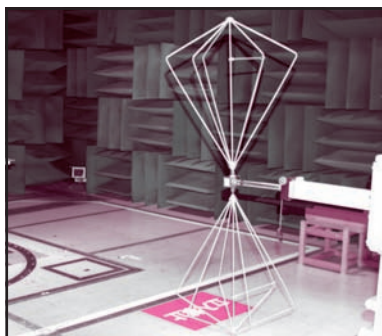
小型部品だけで作れる
3相超のインターリーブPFC技術



トランスとコイルの実践的
シミュレーション技術

見本

第1章



LTspiceとMagnetics Designerによる シミュレーションで検証する

小型化のための高効率/低ノイズ・ スイッチング電源技術の応用

蓮村 茂

Hasumura Shigeru

近年は、スイッチング電源の分野において回路トポロジーやトランス、インダクタのモデリングに関して、解析ツールを活用した設計手法が採用されています。

回路シミュレータではフリー（「LTspice 許諾・免責」の範囲で利用する）で機能制限のない「LTspice」は、スイッチング電源のシミュレーションを現実の動作に近い状態で結果を示してくれる高性能/高速シミュレータとして使いやすく、広く活用されています。

トランスやインダクタの設計では、代表的なツールとして、米国Intusoft社の「Magnetics Designer」（以下MD）があります。MD評価版には機能制限がありますが、使いかたしでトランスやインダクタをコア、巻き線構造、線種、線形などを変更して簡単に解析でき、試作段階での試行錯誤による検討時間を大幅に低減できます。MDの自由度は高くカスタマイズ性に優れているので、さらなる精度改善のため、ユーザ独自の係数やデータ、計算式を組み込むこともできます〔MDの理解を深めるためにも『スイッチング電源のコイル/トランス設計』（CQ出版社）などの図書の

内容習得は必須です〕。

ここでは、小型化のための高効率、低ノイズ・スイッチング電源技術の応用を目的として、シミュレータを使った仮想検証を、新電元工業の臨界型PFC機能搭載LLC電流共振ブリッジ・コンバータの評価ボードを使い、検討と解析事例を紹介し、回路解析はLTspiceを用い、臨界型PFC制御回路モデルとLLC共振制御回路モデルにMDで解析したPFCインダクタSPICEモデルやLLC共振トランスSPICEモデルを適用し、評価ボードの実測結果とシミュレーション結果より損失低減化とノイズ発生源を探ります。

MDで設計したLLC共振トランス巻き線のリーケージ・インダクタンスや浮遊容量の影響によるMHz帯の高周波振動（MDで作成された等価回路より巻き線のリーケージ・インダクタンスや浮遊容量の影響度合いが把握できる）の発生に関しても、手探りで対策するのではなく発生要因を特定し、巻き線構造の検討やシミュレーションによる振動の低減策などで対処することができるようになります。

臨界型PFC機能搭載LLC電流共振ブリッジ・コンバータ 制御IC MCZ5205SEの概要と機能設計

● 概要

MCZ5205SEは、臨界型PFC(Power Factor Correction)制御用コントローラと、高耐圧ゲート・ドライバを有した周波数変調タイプのLLCブリッジ型全波電流共振制御用コントローラの二つの制御回路を集積したコントローラICで、この二つのコントローラを1チップに内蔵することで省スペース化を図ることができます。MCZ5205SEの内部ブロックを図1に、端子配置を図2に、端子機能の一覧を表1に示します。

PFC部は臨界PFCを採用し、低ノイズ/高効率化を実現しています。LLC部は、共振はずれ防止機能などの各種保護機能を備え、高効率化を実現しています。さらに、アクティブ・スタンバイ(AS)機能を有し、軽負荷待機時の電力損失を大幅に改善することができます。

本ICは、PFCおよびLLCをワンチップで搭載し、各種保護機能も備わっているため、設計の簡易化および省スペース化を実現でき、以下の製品に最適です。

- PDP/LCDなどの大画面フラットTV用電源
- レーザ・プリンタなどのOA機器用電源
- 大出力ACアダプタ
- 大電力産業機器用電源
- ハイ・パワーLED照明

● 特徴

▶ 一般的な特徴

- (1) PFCとLLCの機能をコンボ化し、SOP22パッケージで実現
- (2) アクティブ・スタンバイ機能を搭載し、軽負荷領域の損失低減に対応

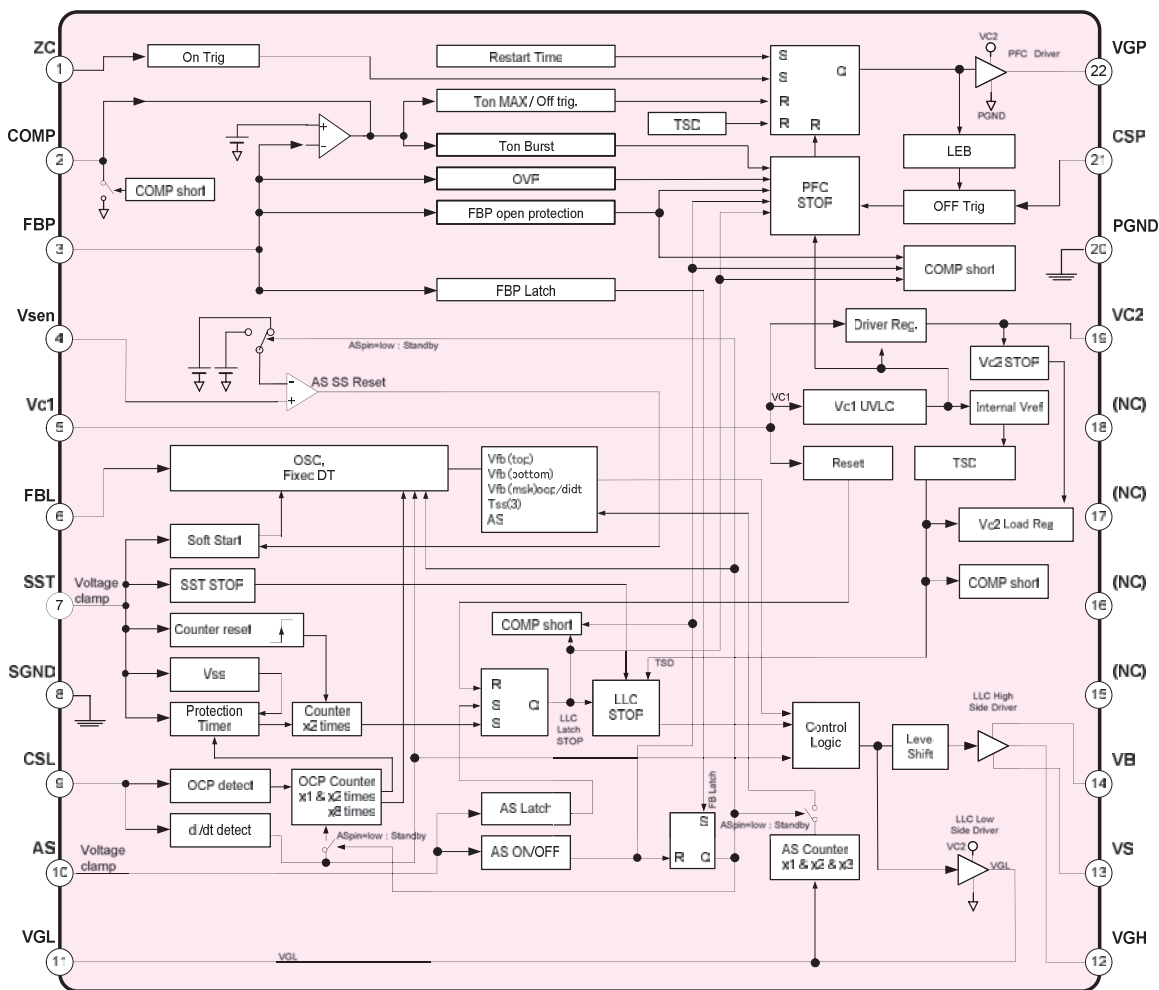


図1 MCZ5205SEの内部ブロック図

- (3) アクティブ・スタンバイ端子(外部ラッチ端子)を利用した過電圧ラッチ回路を構成可能
- (4) PFC/LLC ON-OFFシーケンスを最適化
- (5) V_{CC} 耐圧は35 V, UVLOはヒステリシスをもち12.6 V/8.5 V

▶ PFC 部の特徴

- (1) 臨界型PFCコントローラ
- (2) 過電流検出閾値は0.5 Vであり、検出抵抗のロス
を削減
- (3) オン幅(電圧)制御により入力ライン検出不要
- (4) フィードバック・オープン・ショート保護、過電
圧発振停止保護(OVP)、過熱保護(LLC部共通)、軽
負荷の時出力電圧上昇保護機能搭載

▶ LLC部の特徴

- (1) ドライブ能力(ソース:0.18 A, シンク:0.38 A).
最適化により, ゲート周りをシンプルに構成可能
- (2) ハイ・サイド・ドライバ内蔵により MOSFET の

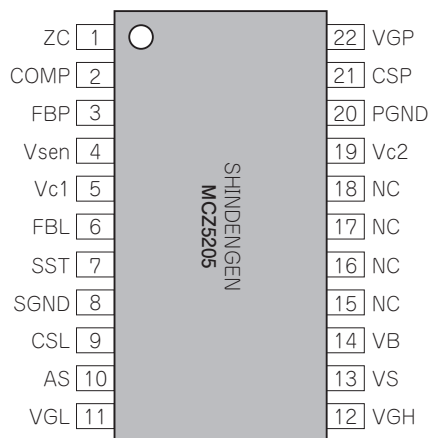


図2 MCZ5205SEの端子配置

表1 MCZ5205SEのピン機能一覧

端子番号	記号	コンバータ	機 能
1	ZC	PFC	ON タイミング検出端子。ゼロ電流を検出してPFC部主SWのON タイミングを決める
2	COMP	PFC	フィードバック・アンプの出力端子。位相補償設定用の端子
3	FBP	PFC	フィードバック・アンプの入力端子。PFC出力電圧のフィードバック、低入力電圧監視を行う
4	Vsen	LLC	PFC出力電圧監視用端子。ブラウンアウト保護のため、低入力保護、リモートON/OFF、SS-Resetを行う
5	Vcl	共通	制御回路の電源供給端子。Vcl ≥ 12.6 V で動作開始、Vcl ≤ 8.5 V で動作停止
6	FBL	LLC	LLC部発振器の周波数設定用端子。外付けコンデンサ、抵抗によりデューティや動作周波数が決まる
7	SST	LLC	ソフト・スタートと異常検出時の間欠動作用コンデンサ接続端子。ソフト・スタート時間および異常検出時の間欠動作時間を決める
8	SGND	共通	制御信号系GND端子。制御信号系のグラウンド接続端子
9	CSL	LLC	LLC部の過電流検出およびdi/dt(共振はずれ)保護機能用端子。OCPおよびdi/dtを検出して、過電流および共振はずれを保護する
10	AS	共通	アクティブ・スタンバイ切り替え端子。端子ショート時、アクティブ・スタンバイ・モードで動作する。外部入力ラッチ機能としても使用できる
11	VGL	LLC	LLC部下側MOSのゲート駆動用端子。LLC部下側MOSのゲートを駆動する
12	VGH	LLC	LLC部上側MOSのゲート駆動用端子。LLC部上側MOSのゲートを駆動する
13	VS	LLC	LLC部上側ドライバの基準電源端子。LLC部上側MOSのソースおよび下側MOSのドレインに接続
14	VB	LLC	LLC部上側ドライバの電源端子。LLC部上側ドライバ駆動用電源端子
15-18	NC	—	沿面距離確保のための空きピン
19	Vc2	共通	ドライバ用電源出力端子。PFCおよびLLC MOSゲート駆動用電源出力端子
20	PGND	共通	パワー系GND端子。パワー系のグラウンド接続端子
21	CSP	PFC	PFC部過電流検出端子。PFC部主SWの過電流を検出する
22	VGP	PFC	PFCゲート出力端子。PFC部主SWの駆動用

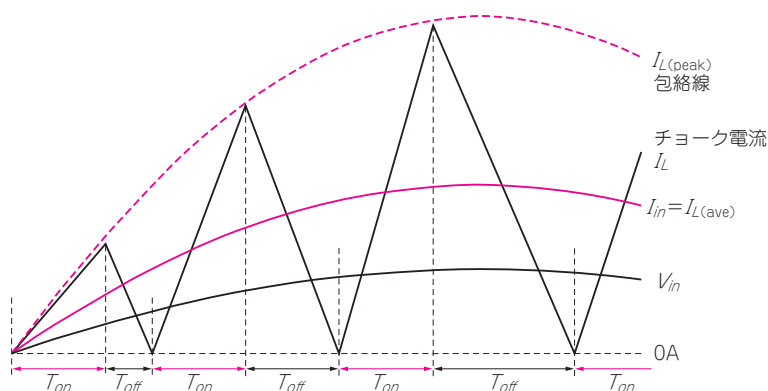


図3 臨界動作の波形

直接ドライブが可能

- (3) アクティブ・スタンバイ・モードで非対称スイッチング動作。非対称制御に切り替わり、軽負荷領域での損失を低減
- (4) di/dt保護機能により、危険なdi/dtモードを回避しMOSFETを保護
- (5) 過電流保護(OCP)、di/dt保護(共振はずれ保護)、タイマ・ラッチ、不足電圧保護、過熱保護(PFC部共通)などの各種保護機能を搭載

● 電流臨界型オン幅制御方式PFCの動作原理

本ICは、電流臨界型を採用しており、図3のよう

にチョーク電流 I_L はゼロ・スタート/ゼロ・エンドの繰り返し三角波となります。また、オン幅制御方式であるため、オン幅 T_{on} は負荷に応じて決定され一定値となります。なお、オフ幅 T_{off} は入力電圧 V_{in} に応じてスイッチングごとに変わりますので、スイッチング周期は変動します。

各電流値は以下の式(1)により算出されます。 T_{on} および L 値は一定であるため、 I_L のピークである $I_{L(peak)}$ は V_{in} に比例します。 V_{in} は正弦波状であるため、 $I_{L(peak)}$ も正弦波状となります。

$$I_{L(peak)} = \frac{V_{in} T_{on}}{L} \dots\dots\dots (1)$$

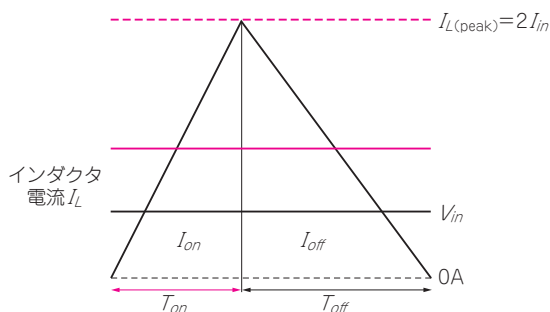


図4 スイッチング1サイクルの波形

ただし、スイッチング周波数はAC商用周波数より十分に高く、スイッチングの1周期では V_{in} を一定とみなします(図4)。

入力電流 I_{in} は、コンデンサ C_{in} により I_L から高周波成分が除去されて平均化された電流 $I_{L(ave)}$ と等しくなります。また、 I_L は三角波のため、 $I_{L(ave)}$ は $I_{L(peak)}$ の1/2となります。

$$I_{in} [A] = I_{L(ave)} = \frac{I_{L(peak)}}{2} \quad (2)$$

式(2)に式(1)を代入し、

$$I_{in} [A] = I_{L(ave)} = \frac{V_{in} T_{on}}{2L} \quad (3)$$

式(3)のように、本ICのオン幅制御により、 I_{in} と V_{in} は比例関係となるため、力率改善が可能となります。回路上での波形例を図5に示します。

インダクタの選定

インダクタ(チョーク・コイル)は、PFC回路の性能を左右する重要な部品です。PFC回路の仕様により最適な定数を以下の計算式を利用して算出し、MD

で設計します。

最終的には実機にてコアおよび巻き線の温度上昇を確認したうえで、巻き線およびコア・サイズを決定してください。

● コア・サイズの選定

コア・サイズの選定には、コア・ギャップ l_G が2 mm 以下を目安に選定してください。

コア・ギャップ l_G の算出式は以下の式(4)～式(8)になります。

$$l_G [\text{mm}] = 4\pi \frac{A_e N_P^2}{L_P} \times 10^{-7} \quad (4)$$

$$L_P [\text{mH}] = T_{on} \frac{\sqrt{2} V_{in(AC)min}}{I_{DQ}} \times 10^{-3} \quad (5)$$

$$I_{DQ} [A] = \frac{2\sqrt{2} P_S}{\eta V_{in(AC)min}} \quad (6)$$

$$T_{on} [s] = D_{on} T_{max} = \frac{D_{on}}{f_{min}} \quad (7)$$

$$D_{on} = \frac{V_{out} - \sqrt{2} V_{in(AC)min}}{V_{out}} \quad (8)$$

A_e : コアの実効断面積 [mm²]

P_S : 垂下点での出力電力 [W] ($P_{o(max)}$ の1.2～1.5倍)

f_{min} : 最小発振周波数 [Hz] (ワールド・ワイド入力: 40 k～60 kHz, 100 V/200 V系: 50 k～70 kHz)

()内の数値については目安となります。

● N_P 巻き線のターン数

チョーク・コイル N_P 巻き線のターン数は、式(6)にて算出される値の小数点以下を切り上げた整数で決定します。

$$N_P [\text{回}] = T_{on} \frac{\sqrt{2} V_{in(AC)min}}{\Delta B A_e} \times 10^9 \quad (9)$$

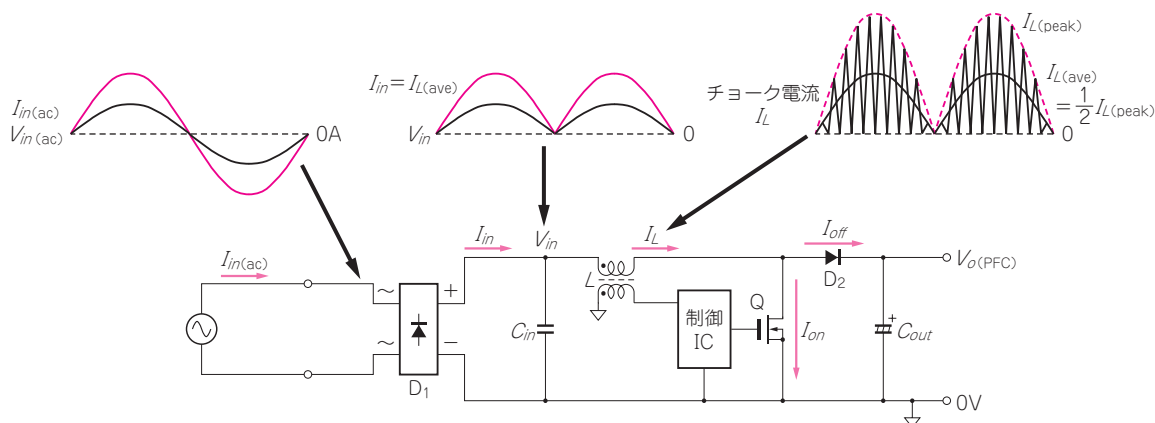
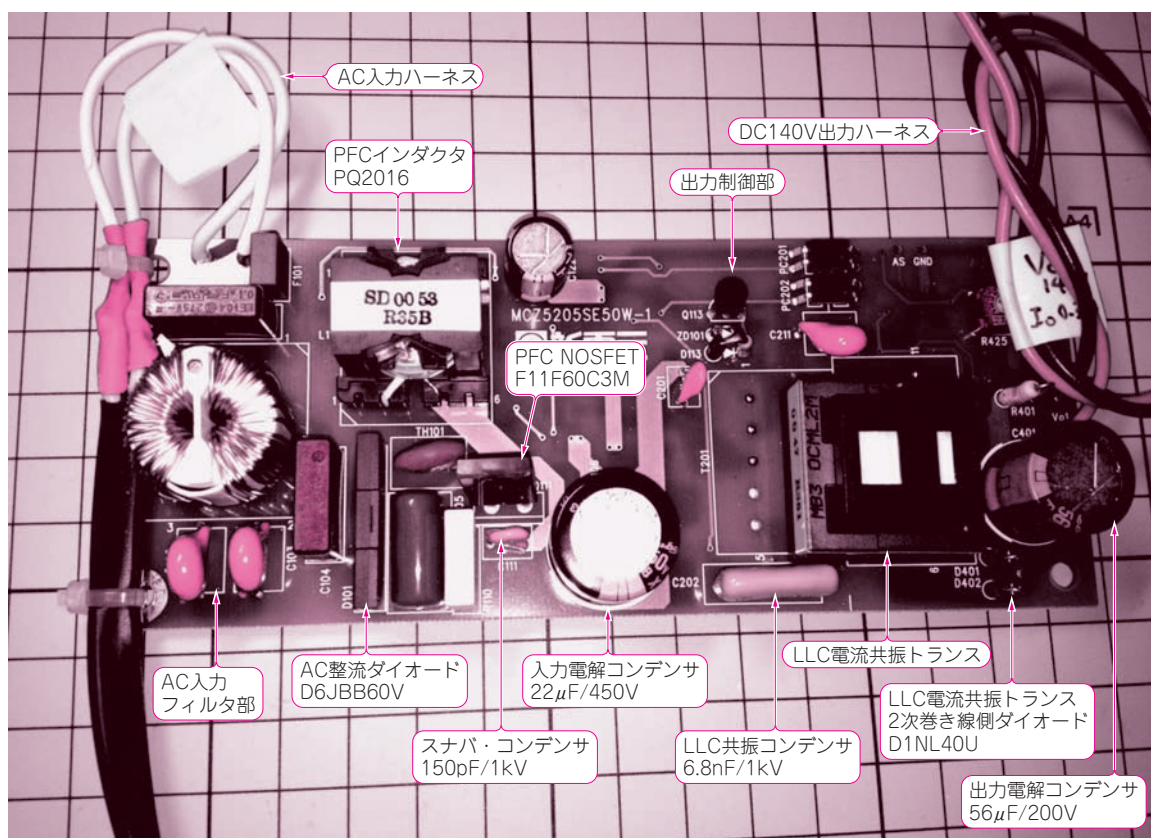
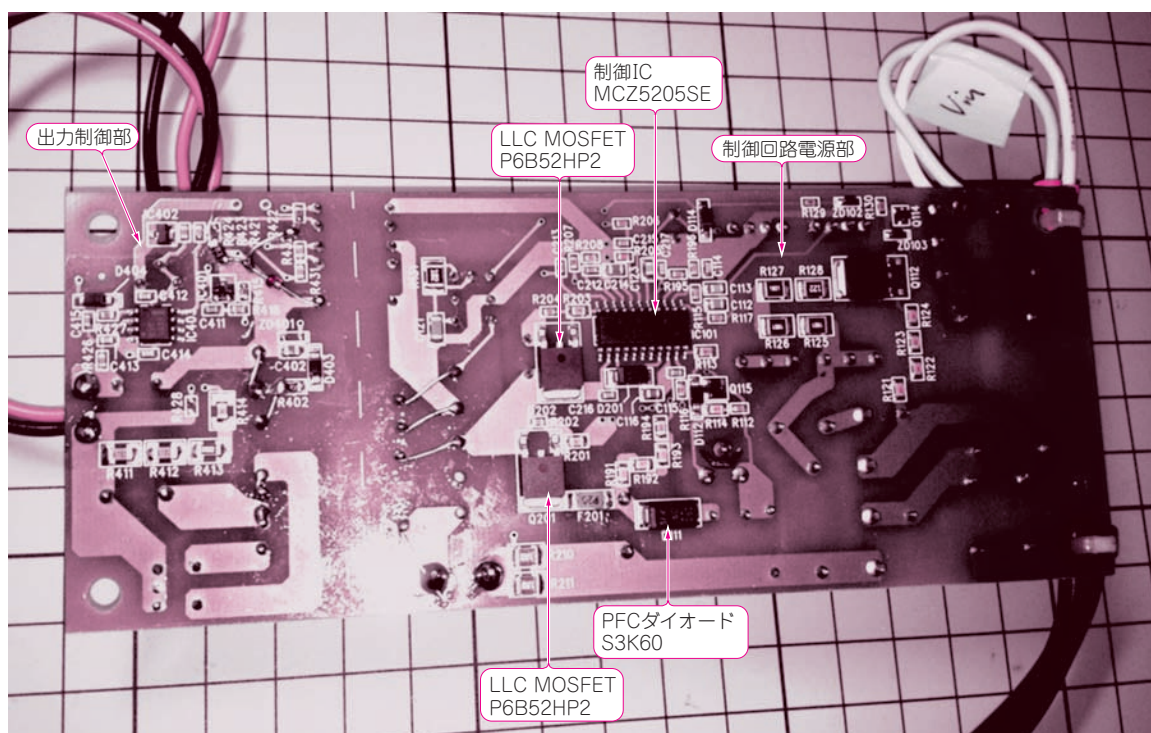


図5 回路上の波形例



(a) 部品面



(b) はんだ面

写真1 MCZ5205SE-49W 評価ボードの外観

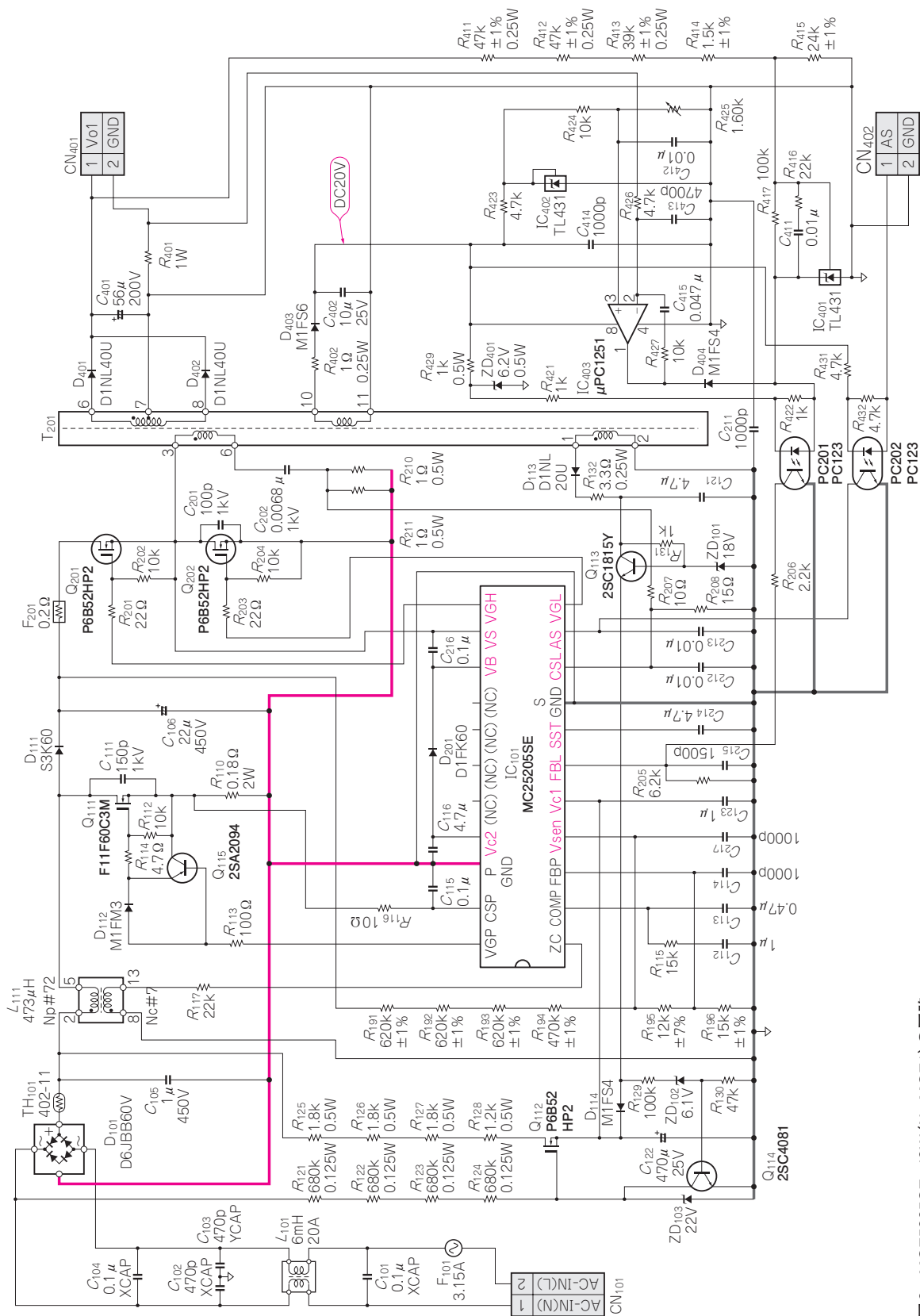


図6 MCZ5205SE-49W(No.MCZ1)の回路

なお、 ΔB [mT] はコアの磁束密度変化です。 ΔB はコア材により大きく異なりますので、コイル・メーカーに問い合わせください。

▶ N_C 巻き線のターン数

N_C 巻き線のターン数は、最大入力電圧時に 1.5 V 以上の電圧が制御巻き線に発生する必要がありますので、式 (7) を目安に最小の整数で決定してください。

$$N_C [\text{回}] > 1.5 \times \frac{N_P}{V_{out} - \sqrt{2} V_{in(AC)max}} \dots\dots\dots (10)$$

ワールド・ワイド入力で $V_{in(AC)max}$ を 264 V、PFC 出力電圧 V_{out} を 390 V とした場合、 N_P と N_C の巻き数は大体 10 : 1 が目安になります。

【例】ワールド・ワイド入力想定で N_P が 50 ターンの場合

$V_{in(AC)max} = 264 \text{ V}$ 、 $V_{out} = 390 \text{ V}$ とすると、 $N_C > 4.5$ となり、 N_C は 5 ターンとなります。

● 巻き線の選定

N_P 巻き線の断面積は、インダクタの実効電流値 $I_L(\text{RMS})$ [A] と巻き線の電流密度 [A/mm²] から選定します。電流密度は使用する銅線の種類(単線もしくはリッツ線)、撚り本数などによって変わります。コイル・メーカーに問い合わせください。

MD によるインダクタの設計

LED 電源評価ボードの仕様が入力電圧 AC 90 ~ 264 V、出力 DC 140 V、0.39 A であり、PFC 出力電圧は DC 400 V、PFC インダクタの仕様は 473 μH (1 kHz)、PQ2016 コア、スパーサ・ギャップ 0.85 mm となっているので、この仕様を基に MD で設計します(評価ボードに搭載されているインダクタと MD の設計結果とを比較するため)。

● MCZ5205SE-49W 評価ボード

写真 1 は MCZ5205SE-49W 評価ボードの部品面、はんだ面の写真です。回路を図 6 に示します。

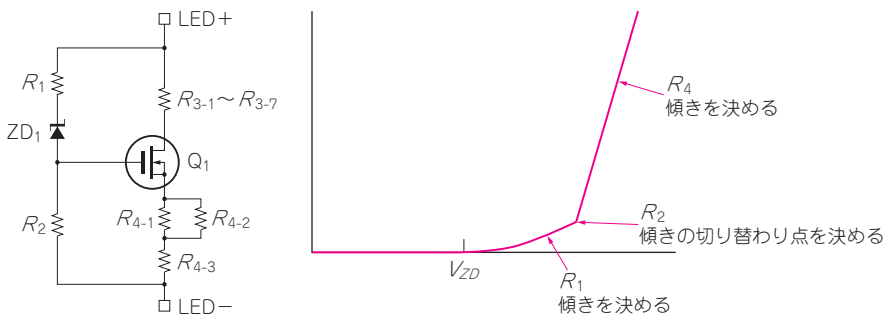


図8 擬似LED負荷回路の構成

PFC回路は電流臨界型を採用し、LLC回路は電流共振ブリッジコンバータを採用することにより低損失、低ノイズで小型電源となっています。

ハイ・パワー LED 照明用の 定電流簡易負荷装置

LED を点灯させるための電源は定電流制御を行っています。図 7 に示すように、疑似負荷装置は電源の出力特性と LED の非線形負荷特性が交差する点で LED が点灯する LED の電圧-電流特性に近い負荷特性となっており、評価に最適な定電流簡易負荷装置といえます。

図 8 は、疑似 LED 負荷の回路構成です。

● 疑似負荷シミュレーション特性

LED 電源の疑似負荷シミュレーションでは図 9 の回路を 2 段直列構成として、図 10 の特性で出力 140 V、負荷電流 360 mA に対応させています。 R_3 の 2 k Ω を調整することにより定電流値の調整ができるので、疑似負荷評価装置では可変抵抗として定電流特性の可変評価ができるようにしています。

また、 R_{13} とスイッチの直列回路を設けることによ

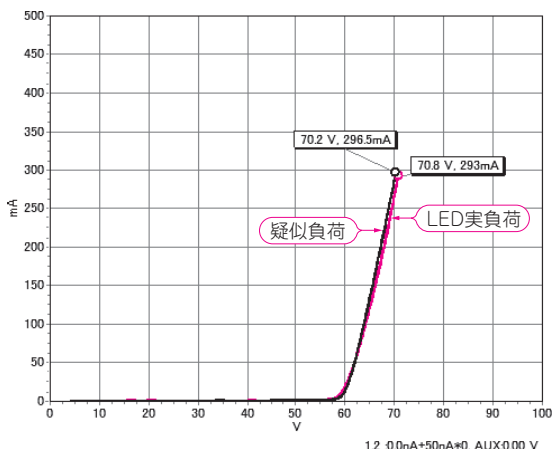


図7 疑似負荷とLED負荷のV-I特性の比較

R_1 : 7.5k
 R_2 : 2k
 R_3 : 8.2+10+100/2
 R_4 : 3.3
 ZD_1 : 22+24
 Q_1 : FP15W50VX3

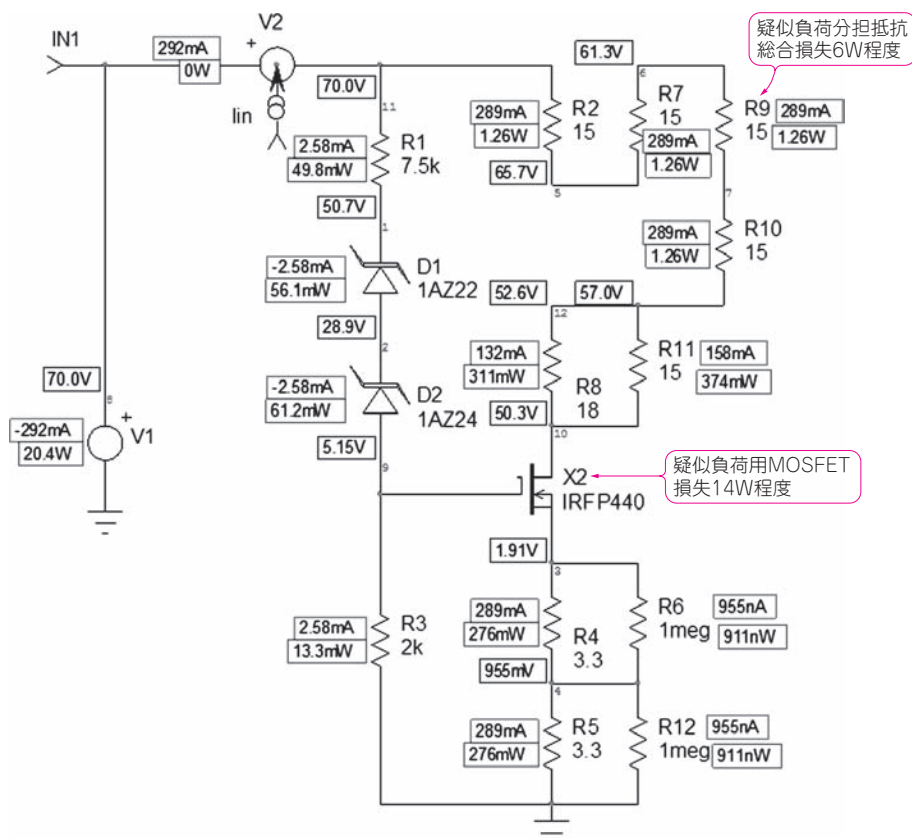


図9 疑似負荷回路各部の電圧，電流，損失

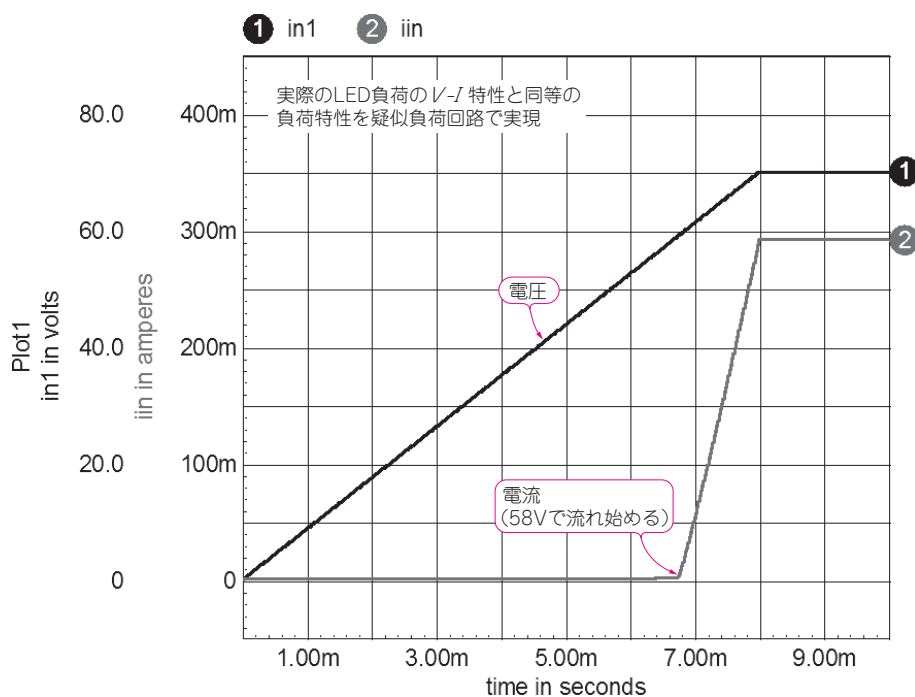


図10 疑似負荷シミュレーションのV-I特性

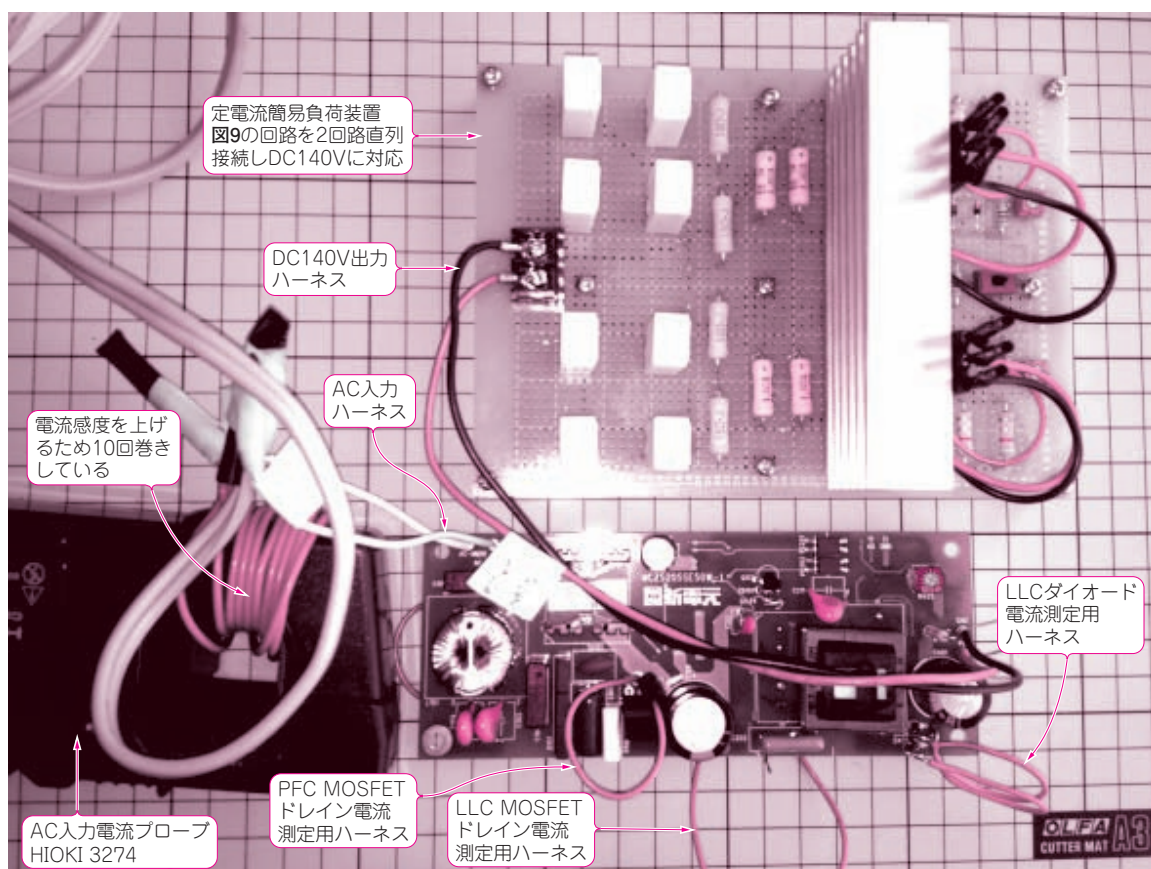


写真2 LED電源評価ボードと定電流簡易負荷装置

り、定電流負荷のON/OFFができる構成にしています。電源仕様によっては定電流負荷ではなく、電源に設けた外部端子でのON/OFFで規定されている場合がありますので、制御ICの仕様書で確認が必要です。

● 定電流簡易負荷装置

写真2、写真3の定電流簡易負荷装置は50 W 負荷を

想定しており、放熱器の強制風冷は必要になります。半導体素子の破損時の交換作業がしやすいようにリード線にて配線を行っていますが、同様な定電流簡易負荷装置を製作される場合にはケースに収納されると安全に試験/評価作業ができます。発熱処理が必要で高電圧装置となりますので、感電対策など安全には配慮してください。

臨界型PFCコンバータ

PFC部は電流臨界動作方式を採用しており、インダクタのコントロール巻き線電圧を検出してスイッチング素子のONを行っています。このオン・タイミングはZC端子により決まります。回路図は図6になります。動作の詳細はここでは説明しませんので、メーカーのドキュメントIC_MCZ5205SE_AppNote_Jp.pdfを参照ください。

● 臨界型PFCコンバータのシミュレーション

シミュレーションで動作検証を行うにあたり、メー

カより制御ICのシミュレーション・モデルが公開されていない場合は、独自にモデルを作成するか(ハードルは高く制御IC内部の機能に関し精通している必要がありお勧めできない)、同機能の制御ICのSPICEモデルがウェブ上から入手できる場合は、そのモデルをLTspiceで解析できるように変更して使用します。今回は、Intusoft社のSpiceシミュレータICAP4のオン・セミコンダクター社製PFCコントローラ(MC33262)のモデルを活用し、評価ボードに搭載されているPFCインダクタとMDで設計した特性比較を行ってみます。

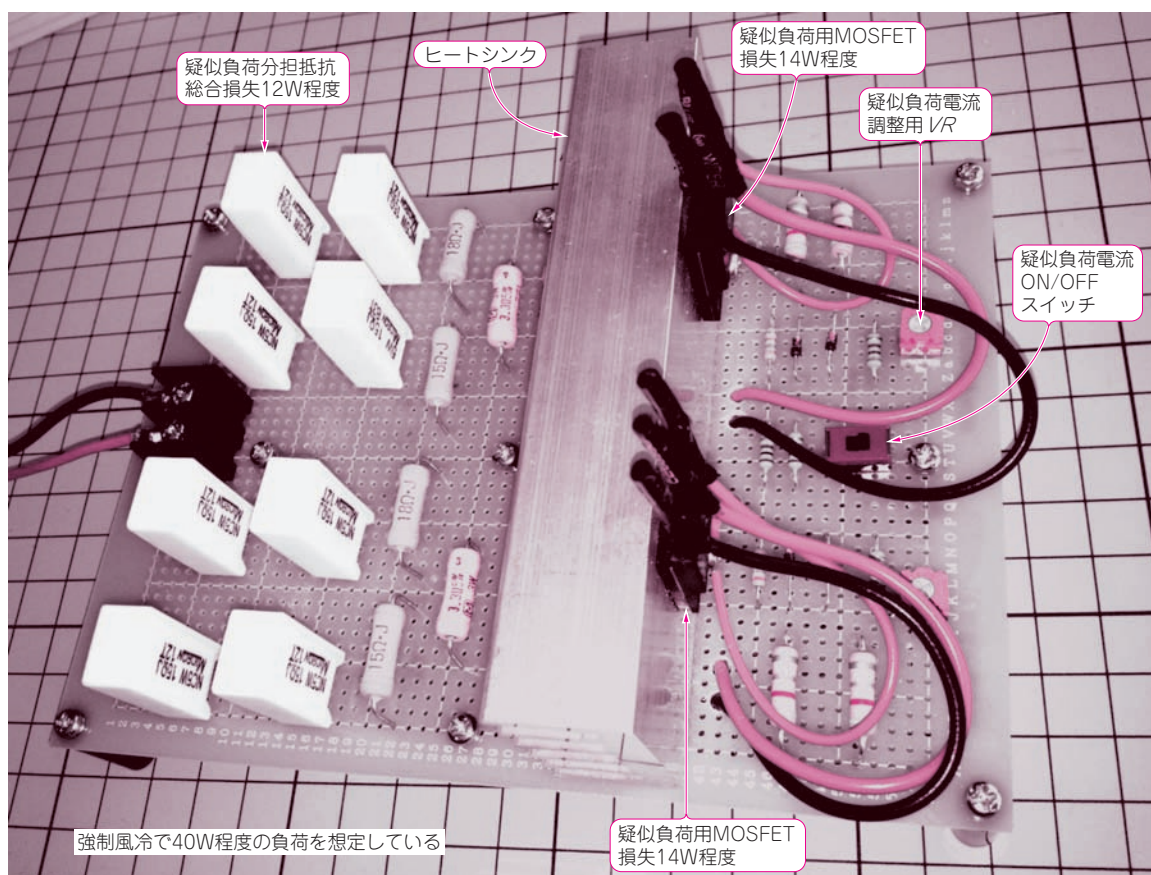
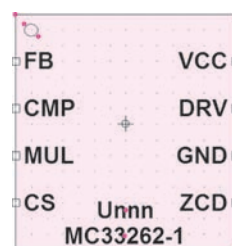


写真3 定電流簡易負荷装置

一般的には、SPICEツール(PSpice, ICAP4など)により提供されている制御ICのシミュレーション・モデルを他のSPICEツール(LTspiceなど)に、そのまま使用しても動作しない場合が多く、内部のネット・リストを使用するSPICEツールで読めるように書き換える必要があります。サブサーキットのパラメータ記述やビヘイビア・モデルの記述式などの書き換えで済む場合と、使用するツールにない素子のモデルが記述されていた場合には他の素子で置き換える必要があります、個々の動作を確認しながら機能検証を行う必要があります。ICAP4のオン・セミコンダクター社製PFCコントローラ(MC33262)のモデルは、表2(次頁)のような置換で対応できています。MC33262の詳細はメーカのデータシートなどで確認ください。

本稿では、LTspiceのモデルに同機能のモデルがないのと、評価ボードで使用している制御ICのSPICEモデルが整備されていないので、他メーカの同機能のモデルを流用してシミュレーションを行います。設計者にとっては制御ICのSPICEモデルの整備は制御ICを選択するうえで優先順位は高いと考えており、設計検証時間の短縮と製品化を加速するうえでもフリーの

図11
MC33262-1モデル・シンボル



SPICE制御モデルの提供を期待します。

主要な変更点は、サブサーキットのパラメータ記述やビヘイビア・モデルの記述式の変更、電源のモデルで無記入の箇所を0とする書き換えとなります。

シンボル作成に関しては『電子回路シミュレータLTspice入門編』(CQ出版社)などの図書やヘルプを参考に作成してください。

図11のように作成したシンボルをMC33262-1の名前で、表2のネット・リストはファイルMC33262-1.subの名前でシミュレーションするフォルダに保存します(付属CD-ROMではLTspice_LLC¥PFCsim¥MD_modelフォルダにある)。

CQ出版社

内容・購入方法などにつきましては以下のホームページをご覧ください。
内容 <http://shop.cqpub.co.jp/hanbai/books/MSP/MSPZ201409.htm>
購入方法 <http://www.cqpub.co.jp/order.htm>

見本