

LLC 共振電源学習キット ベーシックモデルマニュアル

PAT030-A 取扱説明書



〒350-0209
埼玉県坂戸市塚越 1220-1
TEL:049-298-4326
FAX:049-298-4364

● 【注意事項】

本キットは、LLC 共振電源を学習するための部品キットです。
安全に使用するため下記の注意事項を組み立て前に必ずお読みください。

1) 扱いと使用場所

- ・ 基板に触れるときは、事前に他の金属などに触れるなどして体の静電気を逃がしてから使用してください。
- ・ 小さな子供やペットに触れることの無いよう注意してください。
- ・ 直射日光や、高温になる暖房器具付近や多湿の場所では使用しないでください。

2) 組み立て配線

- ・ あらかじめ基板の搭載部品は、実装されていてハンダ付けの必要はありません。
共振トランスは、巻線、調整後、各巻線を基板の端子台にネジで接続します。
入力電源、負荷と基板間は電線と負荷を端子ネジで締め付けることで配線が可能です。
- ・ ニッパー等で電線や部品などの切断の際は、破片が飛ぶこともあります。
可能であれば安全めがねを使用してください。
- ・ 配線はマニュアルに従い、端子ネジの接続や極性に注意し、正しく接続してください。

3) 使用する時には

- ・ 電源を通电する前には、必ず配線が正しいかマニュアルにて確認してください。
- ・ 基板は回路がむき出しのため、金属板の上に置き動作をさせないでください。
必ず木の板や厚いクラフト紙のような絶縁性の良い板の上で行ってください。
- ・ 直流電源は 32V / 1A 程度で過電流保護が動作するものを採用してください。
キットを使用しないときは、電源はオフにし通电しない状態にしてください。
- ・ 基板の裏側は挿入部品のカット部がシャープであり、触れる場合には注意してください。

4) 応用

- ・ 本キットは精密電子機器であるため、電気知識の無い方は改造等を行わないでください。
改造する場合は安全性に十分注意し自己責任で行ってください。
- ・ 本キットは、入力 400V 300W 程度まで使用可能な部品を実装しています。
オプションのパワーアップキットにより、入力 380V 時、出力 300W 程度までの LLC 共振電源の実験確認ができます。(出力電流が大きい場合、整流ダイオードの温度に注意し、過大の場合には強制空冷を行ってください。)
実験する場合には、十分に仕様を確認し自己責任で使用してください。

LLC 共振電源実験キットマニュアル目次

1. キットの概要	P. 4
2. 実験電源の仕様	P. 5
3. 回路の概要	P. 6
(回路図 P. 8)	
(部品表 P. 9)	
4. トランスの設計	P. 13
5. トランスの製作	P. 15
6. シミュレーションにより動作を確認する	P. 16
7. 最低周波数 (Fmin) とデッドタイムの設定	P. 21
8. 波形を観測する	P. 23
9. 効率の測定	P. 26
10. オプション	P. 27

1. キットの概要

中大容量電源でもっとも効率が良いと言われている LLC 共振電源について、トランスを製作し、キットに実装して波形を観測することにより、原理と動作を習得するキットです。

キットには、LLC 共振用 IC (NCP1396)を使用して、最低周波数 (Fmin)、最高周波数 (Fmax)、デットタイム (DT) を可変抵抗で設定可能とし、設定方法を習得できるように構成しています。

また、オプションとして、パワーアップキット (150W、240W、300W) を用意し、入力電圧 380V、出力電圧 12V~48V、出力電流 12.5A、電力 300W までの LLC 共振電源のトランスの設計と検証ができます。

また、別売の PFC350 ユニートを接続することにより、ワイド入力の電源を構成できます。

キットの梱包内容は、写真 1 を参照してください。

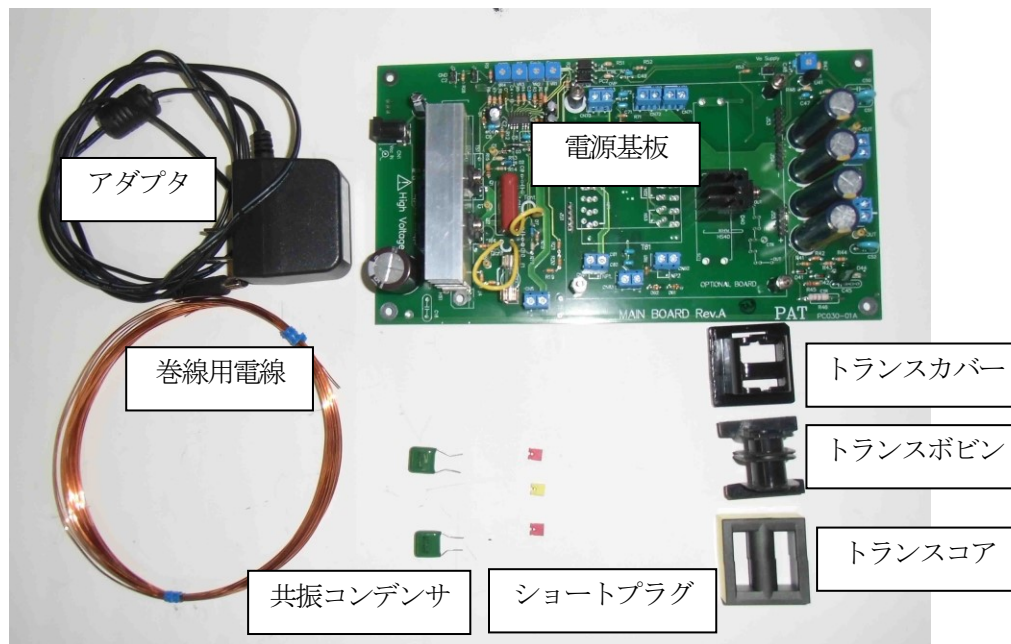


写真 1 キットの内容

【同梱部品】

- 1) 電源基板 (部品実装済み) : 1 枚
 - 2) 共振コンデンサ (250V 0.22 μ F PP コン) : 2 個
 - 3) LLC 共振トランス (コア、ボビン、カバー) : 1 式
 - 4) 巻線用電線 (0.6 ϕ UEW 線) : 7 m
 - 5) アダプタ (DC12V 出力) : 1 個
 - 6) ショートプラグ : 3 個
 - 7) マニュアル (本書) : 1 部
- となっています。

組み立て作業前に以下の部品を用意ください。

【用意するもの】

- 1) プラスドライバ (3mm 以下のもの) 1 個
- 2) 電源 (32V 1A 以上可変直流電源装置) 1 個
- 3) ニッパー (電線等切断用、同等品でも良い) 1 個
- 4) ダイヤモンドヤスリ 1 個
- 5) 配線用電線 適量
- 6) 測定器 オシロスコープ 1 台
- 7) 電流プローブ 1 台
- 8) 測定器 (電圧計、電流計 入力、出力電圧、電流測定用) 各 2 台 (注 1)
- 9) LCR メータ 1 台
- 10) 負荷装置 (20~100Ω以上可変 30W 程度) 1 台

注 1 : 電源装置および負荷装置で電圧、電流が測定可能な場合は不要です。

2. 実験電源の仕様

このマニュアルで解説している標準仕様

入力電圧 : DC32V

出力電圧 : DC24V 出力電流 : 1A (24W)

制御方式 : NCP1396 による周波数制御方式

トランスを新規に設計・製作して出力可能な仕様

入力電圧範囲 : DC12V~DC380V

出力電圧範囲 : DC12V~DC48V

最大出力電流 : 12.5A

※出力電圧、電力は入力電圧、出力電圧により制限されます

出力電流は 12.5A 以下で使用してください

また FET (Q1,Q2) に流れる電流の最大値は必ず 9A 以下としてください

パワーアップキットの EER40 サイズトランスを使用時、最大 300W まで出力することができます

3. 回路の概要

実験回路の構成を図 1 に示します。

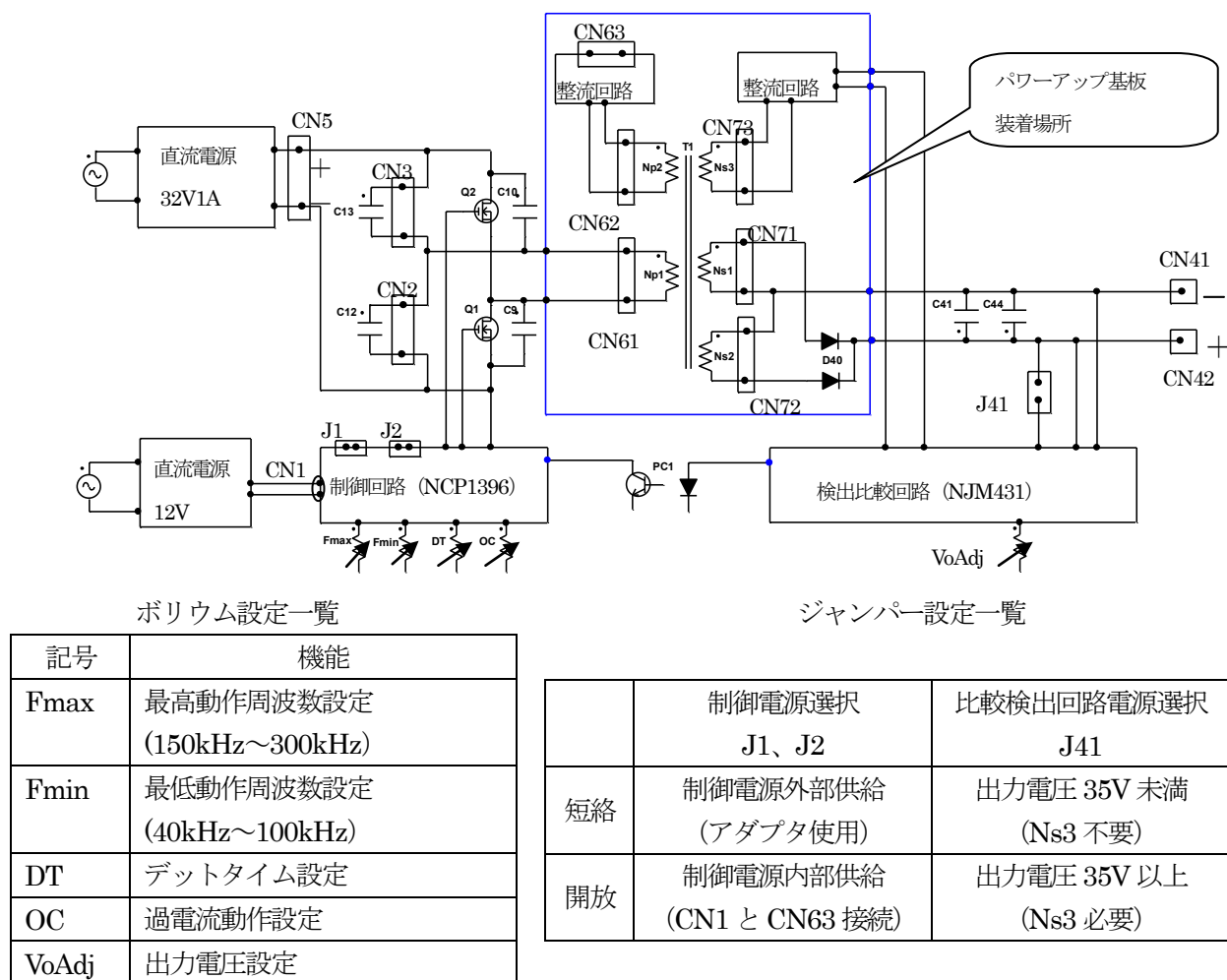


図 1 実験回路の構成

C12,13 と Q1,Q2 のブリッジ回路のセンター間にトランス T1 の Np1 コイルが接続され、32V の直流電圧を Q1 と Q2 により、交互にスイッチングします。

Np1 コイルには、入力電圧の半分の矩形波が加えられ、結果 C12,13 と Np1 に電流が流れます。この電流の値は、スイッチング周波数が L_p (Np1 のインダクタンス) と C_r (C12,13 の合成容量 $C12+C13$) の共振周波数付近が最大となり、Np1 の電圧も最大となります。

周波数が共振周波数より高くなった場合、Np1 の電圧は、低くなるとともに、Q1,Q2 は、共振スイッチ (ZVS,ZCS) として動作します。したがって、スイッチング周波数を L_p と C_r の共振周波数付近から、高い方に変化させることにより、FET を共振スイッチさせるとともに、Np1 の電圧を制御することができます。

トランスに 2 次巻線 (Ns) を設け、Ns の電圧を整流すれば、絶縁した直流出力電圧を得ることができます。

ZVSとは、Zero Voltage Switchのことで電圧がゼロのときFETをON、ZCSとは、Zero Current Switchのことで電流がゼロで、FETをONすることにより、スイッチング損失を減少させるスイッチング方法です。LLC 共振回路は、ZVS、ZCS スwitchングを行うため、スイッチング損失を非常に少なくでき、スパイク電流が流れないためノイズ低く、出力整流ダイオードのスパイク電圧が少ないため低圧のダイオードが使用できます。このため、LLC 方式は

①低ノイズ

②高効率

が特徴の方式です。

共振スイッチとして、動作させるためには、共振周波数より高い周波数で動作させる必要があるため、最低周波数 (Fmin)、回路の動作の上限 (Fmax)、Q1,Q2 が同時に ON になるのを防止するデットタイムを基板に実装されたボリウムにより設定できるようにしています。

Fmin は約 40kHz～100kHz の範囲で、Fmax はおよそ 150kHz～300kHz の範囲で可変できます。

直流出力は、検出比較回路により基準電圧より高い場合には、周波数を上昇させ出力電圧を一定にします。電圧値は、VoAdj ボリウムにより設定します。

LLC 共振電源は、周波数と電力がトランスと共振コンデンサにより決まるため、トランスと共振コンデンサは、取り外しができるように、端子台を介して接続できる構造となっています。また、出力容量の異なる電源も実験できるようにパワーアップキットがオプションで用意され、設計したトランスを実装したパワーアップモジュールを電源基板に実装できるようになっています。

制御回路は、アダプタから 12V を供給し、直流入力が無い場合でも最低動作周波数 (Fmin) と Q1,Q2 のデットタイム (DT)が設定できるようになっています。

アダプタで制御回路を動作させるためには、IC の保護回路の動作を解除するために、J1 と J2 をショートプラグで短絡します。

注：J1,J2 をショートするとソフトスタート回路、低入力保護回路等 IC 内の保護回路の一部が動作しなくなります。このため、直流入力電圧は、制御電源 (12V) 入力後 FET の電流、電圧を観測しながら徐々に上昇させてください。

入力電圧を PFC 出力の 380V で使用する場合には、Np2 巻線を 12～18V の電圧が出るように巻くと、CN62 に 12V～18V ほどの直流電圧が出力されます。CN62 と CN1 を接続 (+、- に注意) し、J1,J2 をオープンにするとアダプタなしで使用できます。

この場合には、入力電圧が 300V 程度でコンバータが起動します。

出力電圧が 35V 以下の場合には、J41 をショートプラグにより短絡し、検出比較回路の電源を出力より供給します。35V 以上の場合には、J41 を開放 (J41 のショートプラグを抜く) としてトランスに Ns3 巻線を設け、24V 程度の電圧をトランスより供給します。出力電圧は、48V まで出力可能です。

注、出力電圧が 35V 以上の場合には、J41 のショートプラグは実装しないでください。

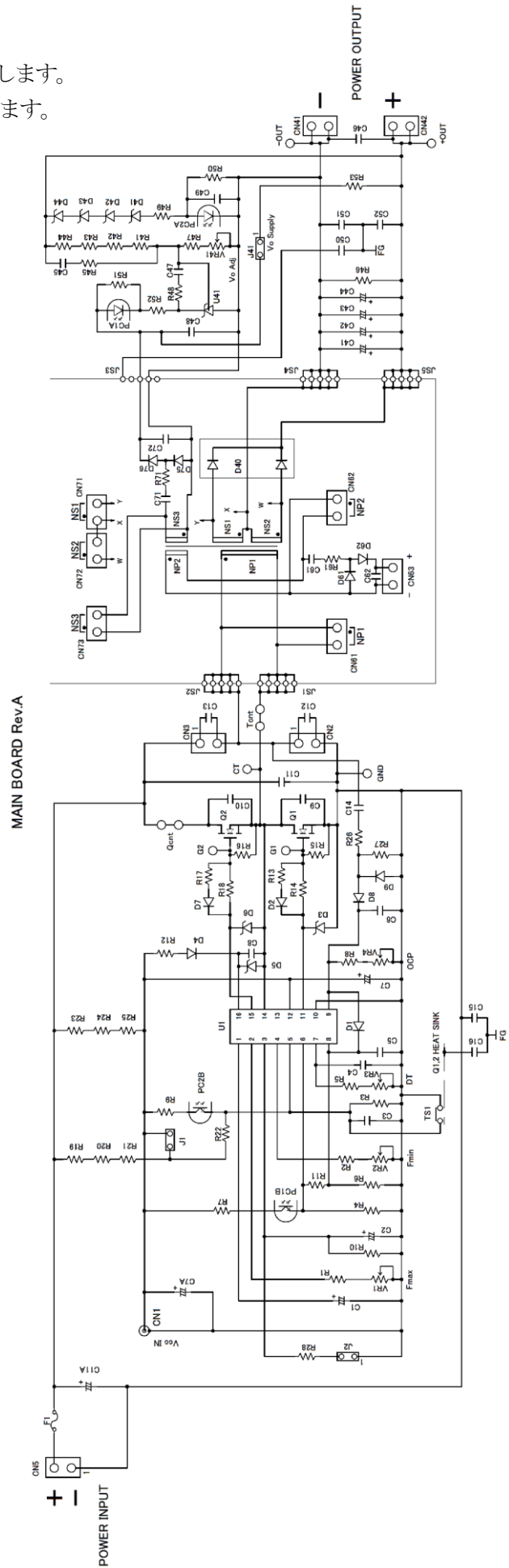
検出比較回路内の IC の電圧を越え破損の原因となります。また、出力電圧が 55V 程度を越えた場合、回路内の保護回路が動作して、出力を停止させます。この場合は、電源を切断し、再度立ち上げてください。

出力電圧を 24V 以下の電圧に設定する場合には、PC1 のダイオードに流れる電流を 4mA 程度になるように R52 を変更してください。 $R52 (k\Omega) = (V_{out}-4)/4$

電源基板には LLC 共振 IC (NCP1396)を実装し、制御信号に応じて Q1,Q2 を ON、OFF させます。FET (Q1,Q2) は耐圧 500V の 2SK3696 を実装し、交流入力の PFC 出力の 380V に対応しています。整流ダイオード (D40)には、出力電圧 48V を考慮して耐圧 150V の SBD を実装しています。

電源基板の回路図を図 2、部品表を表 1 に示します。
また、主要部品の仕様を図 3 から図 7 に示します。

図 2 電源基板の回路図



記号	部品名	型式	記号	部品名	型式
D1,2,7,8,9,10	ダイオード	1SS133	D3,5,6	ツェナーダイオード	BZX79C18
D4	ダイオード	EG01B	D41,42	ツェナーダイオード	BZX79C27
D43,44		短絡	F1	ヒューズ	3.15A 250V
PC1,2	フォトカプラ	TLP781F	U1	制御 IC	NCP1396
U41	定電圧 IC	NJM431C	C1,2	電解コンデンサ	4.7 μ F 50V
C3,47,48,49	コンデンサ	0.1 μ F 50V	C4		開放
C5	コンデンサ	2200P 50V	C6,51,52	コンデンサ	0.01 μ F 50V
C7	電解コンデンサ	10 μ F 50V	C8	コンデンサ	1 μ F 50V
C9,10,15,16,17		開放	C11	コンデンサ	ECQE6474F
C14	コンデンサ	47pF 2KV	C45	コンデンサ	2200pF 100V
C41,42,43,44	電解コンデンサ	820 μ F 63V	C46,50		開放
Q1,2	FET	2SK3696	R1,4,47	抵抗器	2.2k Ω
R2,15,16	抵抗器	10k Ω	R3	抵抗器	3.3k Ω
R5,46,52	抵抗器	4.7k Ω	R6	抵抗器	1.5k Ω
R7,48,49	抵抗器	1k Ω	R8	抵抗器	1k Ω
R9	抵抗器	2.7k Ω	R10	抵抗器	150k Ω
R11	抵抗器	8.2k Ω	R12	抵抗器	10 Ω
R13,17	抵抗器	6.8 Ω	R14,18	抵抗器	22 Ω
R19,20,21	抵抗器	330k Ω	R22	抵抗器	27k Ω
R23,24,25	抵抗器	330k Ω	R26,28	抵抗器	4.7 Ω
R27	抵抗器	5.6k Ω	R41,42	抵抗器	12k Ω
R43,44		短絡	R45	抵抗器	10k Ω
R50,51	抵抗器	2.2k Ω	R53	抵抗器	100 Ω
TS1		開放	D40	ダイオード	MBRF20H150
D61,62,75,76		開放	C61,62,71		開放
C72		開放			
VR1	可変抵抗器	10k Ω	VR2,3	可変抵抗器	20k Ω
VR4,5	可変抵抗器	5k Ω			

表1 電源基板の部品表（部品は同等品に変更する場合があります。）

Features

- High-frequency Operation from 50 kHz up to 500 kHz
- 600 V High-Voltage Floating Driver
- Selectable Minimum Switching Frequency with $\pm 3\%$ Accuracy
- Adjustable Deadtime from 100 ns to 2 μ s.
- Startup Sequence via an Adjustable Soft-start
- Brown-out Protection for a Simpler PFC Association
- Latched Input for Severe Fault Conditions, e.g. Over Temperature or OVP
- Timer-based Input with Auto-recovery Operation for Delayed Event Reaction
- Enable Input for Immediate Event Reaction or Simple ON/OFF Control
- V_{CC} Operation up to 20 V
- Low Startup Current of 300 μ A
- 1 A / 0.5 A Peak Current Sink / Source Drive Capability
- Common Collector Optocoupler Connection for Easier ORing
- Internal Temperature Shutdown
- B Version features 10 V V_{CC} Startup Threshold
- These are Pb-Free Devices

x = A or B
A = Assembly Location
WL = Wafer Lot
Y = Year
WW = Work Week
G = Pb-Free Package

PIN CONNECTIONS

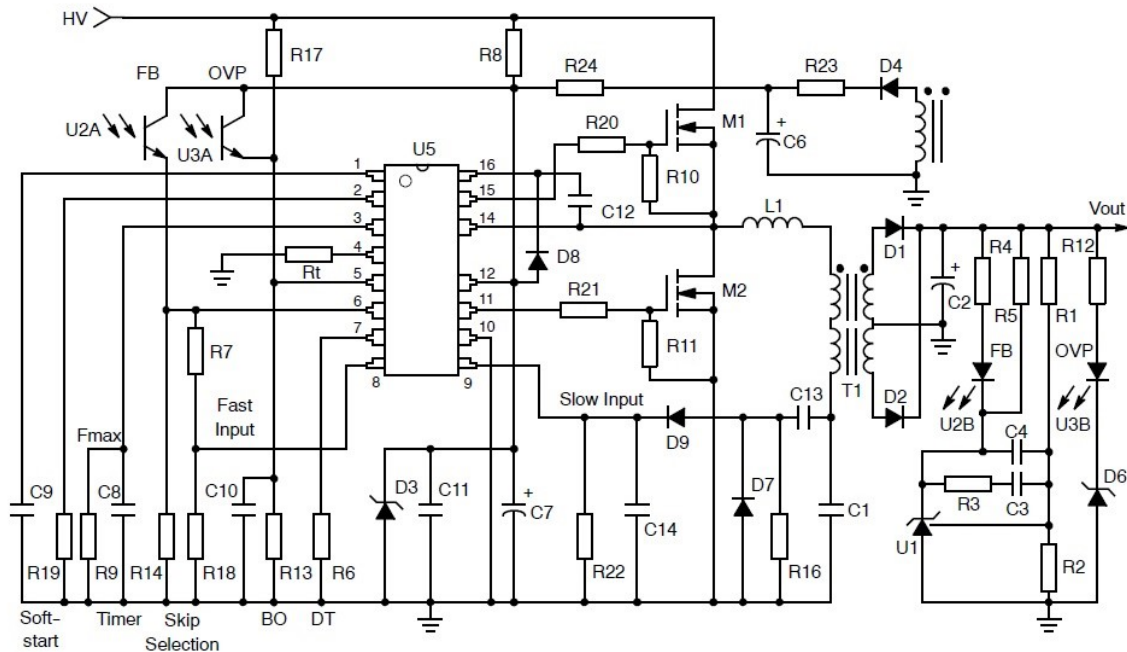
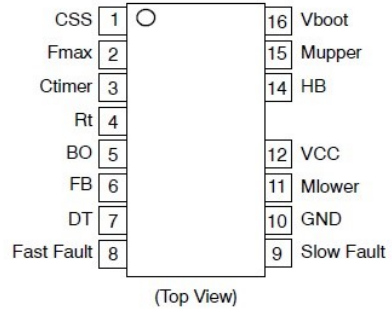


図3 U1 : LLC 共振 IC (NCP1396)の仕様

可変シャントレギュレータ

■ 概要

NJM431 は高精度可変シャントレギュレータです。出力電圧を2つの外部抵抗で V_{REF} (約 2.5V) から 36V まで任意にセットできます。出力回路は非常に鋭いターン・オン特性を示し、多くの応用回路例においてツェナーダイオードより優れた特性が得られます。

■ 特徴

- 動作電源電圧 ($V_{KA}=V_{REF}\sim 36V$)
- 高精度基準電圧
- 外付け部品少
- バイポーラ構造
- 外形 DIP8, DMP8, SOT-89

■ 外形



NJM431D (DIP8)



NJM431M (DMP8)



NJM431U (SOT-89)

■ 端子配列

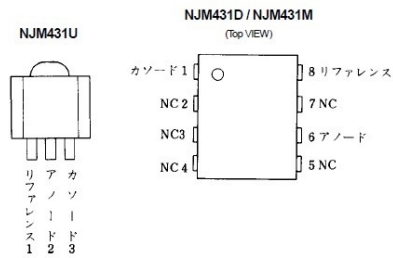


図4 U41 : 3 端子 Reg (NJM431)の仕様

2SK3696-01MR

FUJI POWER MOSFET
Super FAP-G Series

N-CHANNEL SILICON POWER MOSFET

200309



■ Features

- High speed switching
- Low on-resistance
- No secondary breakdown
- Low driving power
- Avalanche-proof

■ Applications

- Switching regulators
- DC-DC converters
- UPS (Uninterruptible Power Supply)

■ Maximum ratings and characteristic Absolute maximum ratings

● ($T_c=25^\circ\text{C}$ unless otherwise specified)

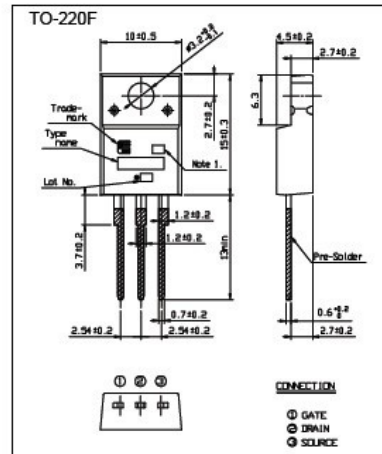
Item	Symbol	Rated	Unit	Remarks
Drain-source voltage	V_{DS}	500	V	
Continuous drain current	I_D	± 13	A	
Pulsed drain current	$I_{D(puls)}$	± 52	A	
Gate-source voltage	V_{GS}	± 30	V	
Non-Repetitive Maximum avalanche current	I_{AS}	13	A	$T_{ch} \leq 150^\circ\text{C}$
Non-Repetitive Maximum avalanche energy	E_{AS}	202	mJ	*1
Maximum Drain-Source dV/dt	dV_{DS}/dt	20	kV/s	$V_{DS} \leq 500V$
Peak diode recovery dV/dt	dV/dt	5	kV/ μs	*2
Peak diode recovery $-di/dt$	$-di/dt$	100	A/ μs	*3
Max. power dissipation	P_D	2.16	W	$T_a=25^\circ\text{C}$
		70		$T_c=25^\circ\text{C}$
Operating and storage temperature range	T_{ch}	+150	$^\circ\text{C}$	
	T_{stg}	-55 to +150	$^\circ\text{C}$	
Isolation voltage	V_{ISO}	2	kVrms	$t=60\text{sec } f=60\text{Hz}$

*1 $L=2.20\text{mH}$, $V_{CC}=50V$, Starting $T_{ch}=25^\circ\text{C}$, See to Avalanche Energy Graph

*2 $I_F \leq -I_D$, $-di/dt=100A/\mu\text{s}$, $V_{CC} \leq BV_{DSS}$, $T_{ch} \leq 150^\circ\text{C}$

*3 $I_F \leq -I_D$, $dV/dt=5kV/\mu\text{s}$, $V_{CC} \leq BV_{DSS}$, $T_{ch} \leq 150^\circ\text{C}$

■ Outline Drawings [mm]



■ Equivalent circuit schematic

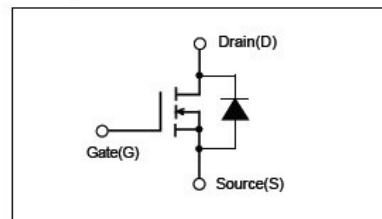


図5 Q1,Q2 : FET (2SK3696) の仕様

MBRF20H150CTG, MBR20H150CTG

SWITCHMODE Power Rectifier 150 V, 20 A

Features and Benefits

- Low Forward Voltage
- Low Power Loss/High Efficiency
- High Surge Capability
- 20 A Total (10 A Per Diode Leg)
- Guard-Ring for Stress Protection
- These are Pb-Free Devices

Applications

- Power Supply - Output Rectification
- Power Management
- Instrumentation

Mechanical Characteristics:

- Case: Epoxy, Molded
- Epoxy Meets UL 94 V-0 @ 0.125 in
- Weight (Approximately): 1.9 Grams (TO-220 & TO-220FP)
- Finish: All External Surfaces Corrosion Resistant and Terminal Leads are Readily Solderable
- Lead Temperature for Soldering Purposes:
260°C Max. for 10 Seconds

MAXIMUM RATINGS

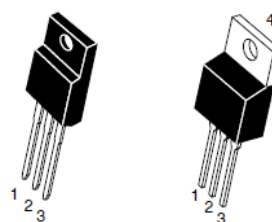
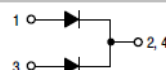
Please See the Table on the Following Page



ON Semiconductor®

<http://onsemi.com>

SCHOTTKY BARRIER RECTIFIER 20 AMPERES, 150 VOLTS



TO-220 FULLPAK™
CASE 221D
STYLE 3

TO-220AB
CASE 221A
STYLE 6

ORDERING AND MARKING INFORMATION

See detailed ordering and shipping information in the package dimensions section on page 5 of this data sheet.

図6 D40 : 整流ダイオード (MRBF20H150)の仕様

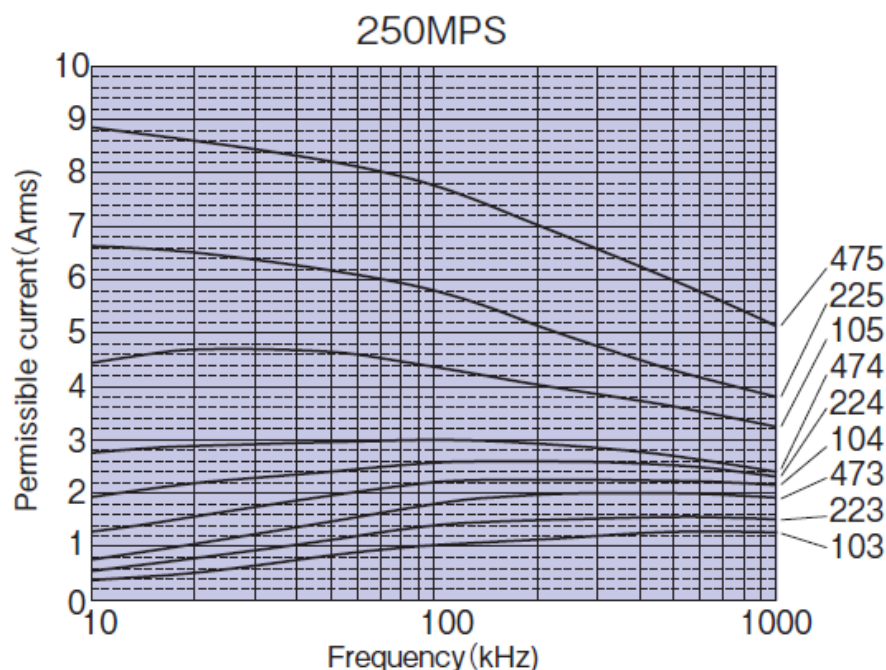


図7 共振コンデンサ (250MPS) の仕様

4. トランスの設計

LLC 共振電源のトランスは、適度な漏れインダクタンスを必要とするため特殊なボビンのトランスを使用します。写真 2 に、トランスの部品を示します。

コアとボビンの形状により、一次巻数 (N_p) で漏れインダクタンスが決まります。

ETD34、ETD39、ER40 のボビンの N_p 巻線の巻数と、漏れインダクタンス (L_r) との関係を図 8 に示します。

磁束密度は、周波数と巻数により決まります。通常 LLC 共振電源の周波数は、70kHz~100kHz 程度で決めますので、おおよその出力容量は、コアにより決まります。

ETD34 : 150W、ETD39 : 240W、EER40 : 300W となります。本キットでは ETD34 を使用して、安全性を考慮して入力 32V で動作を確認できるように配慮しました。

オプションとして、380V 入力で 150W、240W、300W のパワーアップキットを用意して、本基板と組み合わせて高出力な電源の確認ができるようにしています。

LLC 共振電源の効率は、24V 出力では通常 90%以上ですが、入力電圧が 32V で FET の抵抗を考慮し 85% とします。出力 24V1A での入力電流は、入力電圧 32V では

$$I_{in} = \frac{P_o}{\eta \times V_{in}} = \frac{24}{0.85 \times 32} \approx 0.88 \text{ (A)}$$

トランスの N_p 巻線に流れる電流 (I_{np}) は、共振コンデンサ (C_{12} 、 C_{13}) により、電圧が 1/2 となり、直流電流と正弦波電流の波形率 1.11、トランスの励磁電流を考慮して、2.4 倍とします。

$$I_{np} = 2.4 \times I_{in} \approx 2.1 \text{ (A)}$$

となります。共振コンデンサにも I_{np} が流れるため通常動作周波数 (F_{o1}) を 70kHz 程度とし、共振コンデンサの電圧の P-P 値を電源電圧とした場合、共振コンデンサの容量 (C_r) は、

$$C_r = \frac{2 \times \sqrt{2} \times I_{np}}{2\pi \times F_{o1} \times V_{in}} = \frac{\sqrt{2} \times 2.1}{\pi \times 70 \times 10^3 \times 32} \approx 0.44 (\mu F)$$

となります。

F_{o1} は、トランスの漏れインダクタンス (L_1) と共振コンデンサ ($C_r = C_{12} + C_{13}$) の共振周波数から

$$L_1 = \frac{1}{C_r (2\pi F_{o1})^2} = \frac{1}{0.44 \times 10^{-6} (2\pi \times 70 \times 10^3)^2} \approx 11 (\mu H)$$

となります。

動作周波数は、トランスの漏れインダクタンスと共振コンデンサの共振周波数付近で使います。ここで使用した場合、負荷にかかわらず入力電圧と出力電圧の比はほぼ一定となり、最も損失の少ない周波数です。

出力電圧はこの周波数より下げると上昇しますが、上げてそれほど下降しません。

このため LLC 共振電源では、入力電圧最大とき出力電圧が規格の最小となるように設計します。

これが LLC 共振電源の最大の欠点で、入力電圧範囲が広い電源、出力電圧に可変範囲のある電源は苦手です。

最近では、入力に PFC 回路を挿入しほぼ一定の入力電圧で動作させるため、低ノイズ、高効率な電源として普及するようになりました。

LLC 共振回路では、共振コンデンサには、大きな高周波電流が流れます。このため、通常ポリプロピレンコンデンサを使用して、交流電圧分の P-P 値を最大入力電圧程度で計算するのが目安です。

電圧は、最大入力電圧の 1.5 倍程度（入力 380V では、630V）は必要です。使用状態において、電圧と電流がコンデンサの規格以内であることが重要です。

電流が規格を超える場合は、少ない容量のコンデンサを並列接続すると電流を増やすことができます。並列接続する場合、コンデンサを電源間に直列接続し、中点を N_p 巻線に接続しても容量は並列接続した場合と同じになります。入力に流れる高周波電流が少なくなるため有利な方法です。

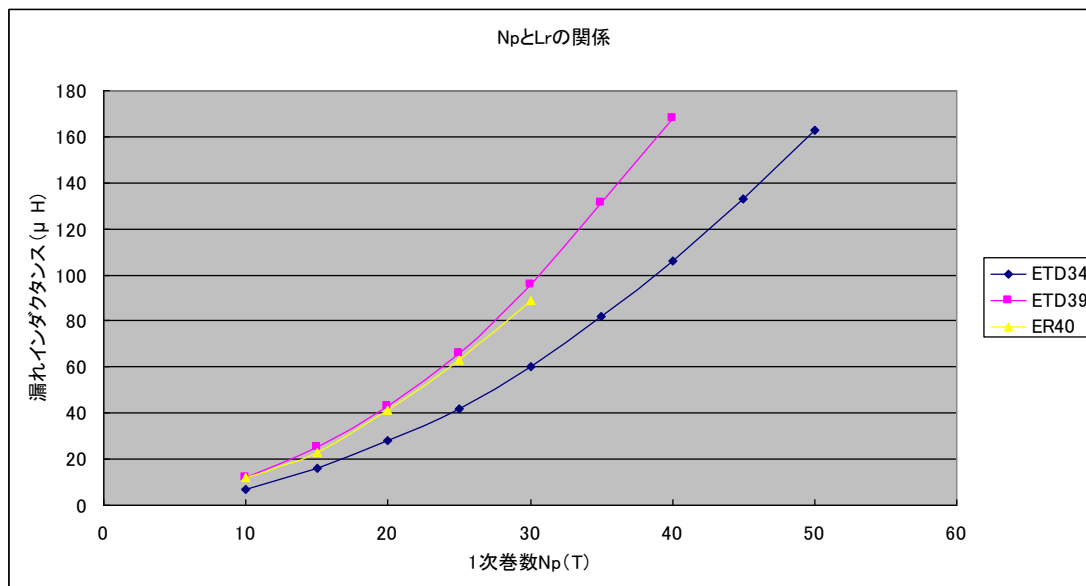


図 8 共振トランスの 1 次巻数と漏れインダクタンスの関係

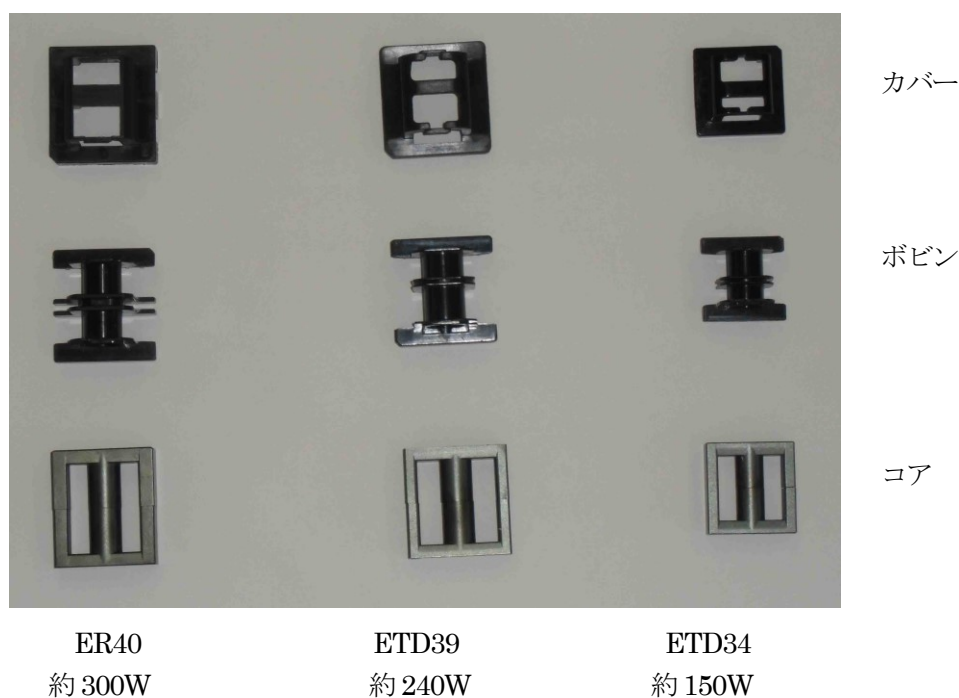


写真 2 LLC 共振トランスと出力容量

- To IEC 61185
- For SMPS transformers with optimum weight/performance ratio at small volume
- Delivery mode: single units

Magnetic characteristics (per set)

$$\Sigma l/A = 0.81 \text{ mm}^{-1}$$

$$l_e = 78.6 \text{ mm}$$

$$A_e = 97.1 \text{ mm}^2$$

$$A_{\min} = 91.6 \text{ mm}^2$$

$$V_e = 7630 \text{ mm}^3$$

Approx. weight 40 g/set

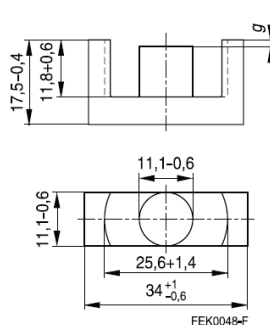
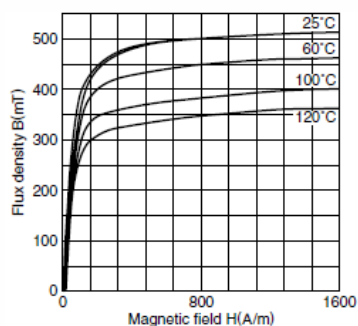


図9 コア (ETD34) の仕様

B-H 温度特性 (代表例)

材質: PC40



材質: PC44

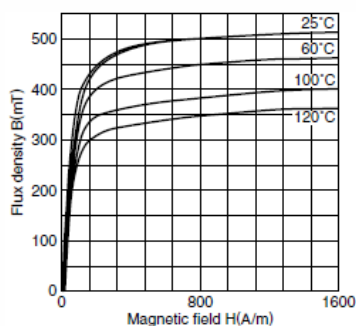


図10 コア材料の特性

コアは、図9のETD34を使用すると図8から、 N_p 巻線の巻数は、12T程度となります。
2次巻線 N_s の巻数は、1次巻線 N_p の電圧が 16V (入力電圧の 1/2) から、

$$N_s = \frac{2 \times N_p \times V_o}{V_{in}} = \frac{2 \times 12 \times 24}{32} = 18(T)$$

となります。

N_s 巻線には、Fo1の周波数の V_o (V) のほぼ矩形波の電圧が加わることから、コアの磁束密度 (B_m) を計算します。

$$B_m = \frac{V_o}{4 \times F_{o1} \times A \times N_s} = \frac{24}{4 \times 70 \times 10^3 \times 0.971 \times 10^{-4} \times 18} \approx 0.049(T) \quad A: \text{コアの断面積}$$

となります。

2次巻線 (N_s) は、センタータップ方式として、整流ダイオードの損失を減らします。ここから、2次巻線 (N_s) に流れる電流の実効値は

$$I_{ns} \approx \frac{1.11 \times I_o}{\sqrt{2}} = \frac{1.11 \times 1}{\sqrt{2}} \approx 0.8(A)$$

となります。

本キットでは、実験を容易とするために 0.6ϕ の UEW 線を使用します。トランスの仕様を図 11、シミュレーションで使用するトランスの等価回路を図 12、コアの仕様を図 9、コアの材料の特性を図 10 に示します。

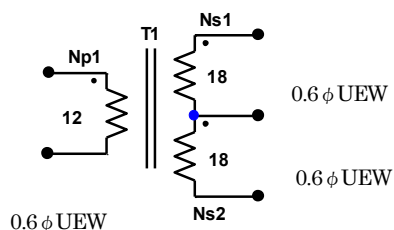


図 11 トランスの仕様

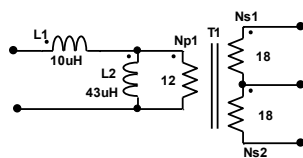


図 12 トランスの等価回路

本来の設計では、トランスのコアの温度上昇から、磁束密度は、 0.15 (T) ～ 0.23 (T) としますが、このコアでは、 150W 程度の出力となります。今回は、 24W で使用するために磁束密度を低めにして（漏れインダクタンスを大きくして）FET の電流を少なく設計しました。

共振トランスでは、漏れインダクタンスを利用するためにリッツ線を使用して漏れ磁束による電線の発熱を防いでいます。 0.1ϕ 程度の細い素線を使用して、並列接続して、必要な線径とします。また、漏れ磁束の影響を少なくするために電線に捩りを施しています。電流容量の関係で 2 本以上のリッツ線を並列接続して使用する場合にもリッツ線どうしに捩りを加えて使用する必要があります。

電線の電流密度は、 $3\sim 5\text{A/mm}$ 程度としますが、実装条件等により、調整する必要があります。

5 トランスの製作

Np 巻線は、0.6φ UEW 線を 12T ボビンの狭い方に巻き、Ns 巻線は、センタータップ方式とするために、2本の電線を並列（バイファイラー巻）にして 18T 巻きます。巻き始めと巻き終わりは端子に接続するため、ボビンより 5cm 程度出し、先端の 5mm 程度被覆を剥ぎます。写真 3 を参照してください。

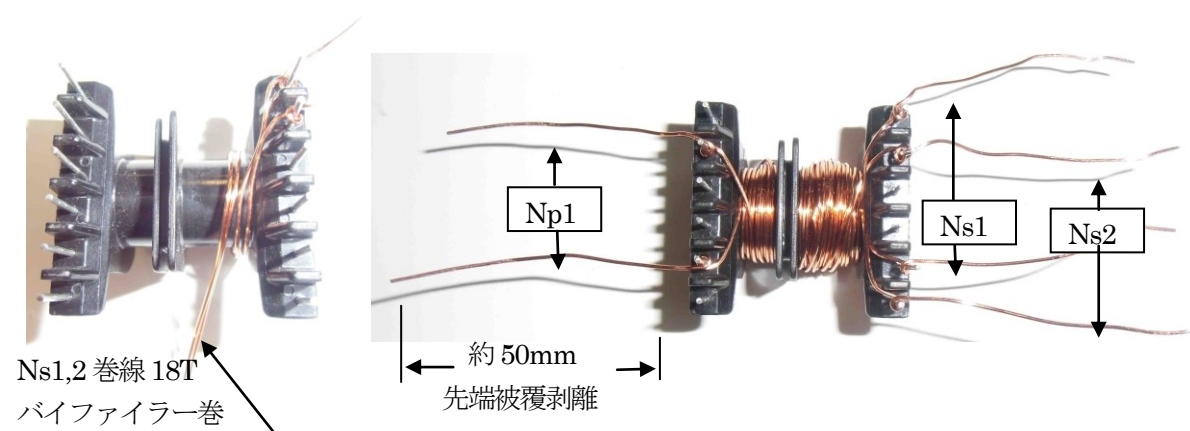


写真3 トランス制作方法

Ns 巻線は、センタータップ接続となるように出力線を配置します。（中側 2 本が端子台で接続され中点となります。）

次に、トランスの漏れインダクタンスを測定します。測定手順は

- ①コアをボビンに挿入する。
- ②二次巻線（Ns 巻線）を短絡する。
- ③一次巻線（Np 巻線）のインダクタンスを測定する。

となります。今回の測定値は、 $10\mu\text{H}$ でした。

注：コアは、テープで固定されています。テープを解きコアをボビンに差し込みますが、テープは、そのまま保管しておいてください。トランスのコアの固定に使用します。



写真4 トランスのインダクタンス調整

この値から、Np 巻線の励磁インダクタンスを $50\mu\text{H}\sim 100\mu\text{H}$ くらいとして、シミュレーションで動作を確認後、コアのセンター脚をダイヤモンド鑢で削り、励磁インダクタンスを調整します。削り方は、写真 4 を参照してください。励磁インダクタンスの測定方法は、コアをボビンに挿入し、二次巻線（Ns）を開放して、一次巻線（Np）巻線のインダクタンスを測定します。製作したトランスでは、 $53\mu\text{H}$ でした。

励磁インダクタンスが予定の値となった後、ボビンにカバーを装着し、コアを挿入しテープで止めます。

巻線の励磁インダクタンスは、漏れインダクタンスの 5～10 倍程度とします。励磁インダクタンスが小さいほど制御範囲（入力電圧を下げても出力電圧が変わらない範囲）を広くできますが、励磁電流が増えるため効率が低下します。

最近では、PFC 回路により入力電圧が 380V 一定のため励磁インダクタンスを大きめ（10 倍ちかく）に設定することが多くなっています。

6 シミュレーションにより動作を確認する

シミュレーションの方法は、SPICE による方法と SCAT による方法があります。

SPICE のソフトは、LTspice、TINA-TI 等が無償で Web よりダウンロードできます。
SCAT は、電源の回路動作を確認するのに便利なソフトで、Demo 版が、無償でダウンロードできます。

SPICE (TINA-TI)によるシミュレーションを図 13 に示します。 L1 が漏れインダクタンス、L1+L2 が励磁インダクタンスです。

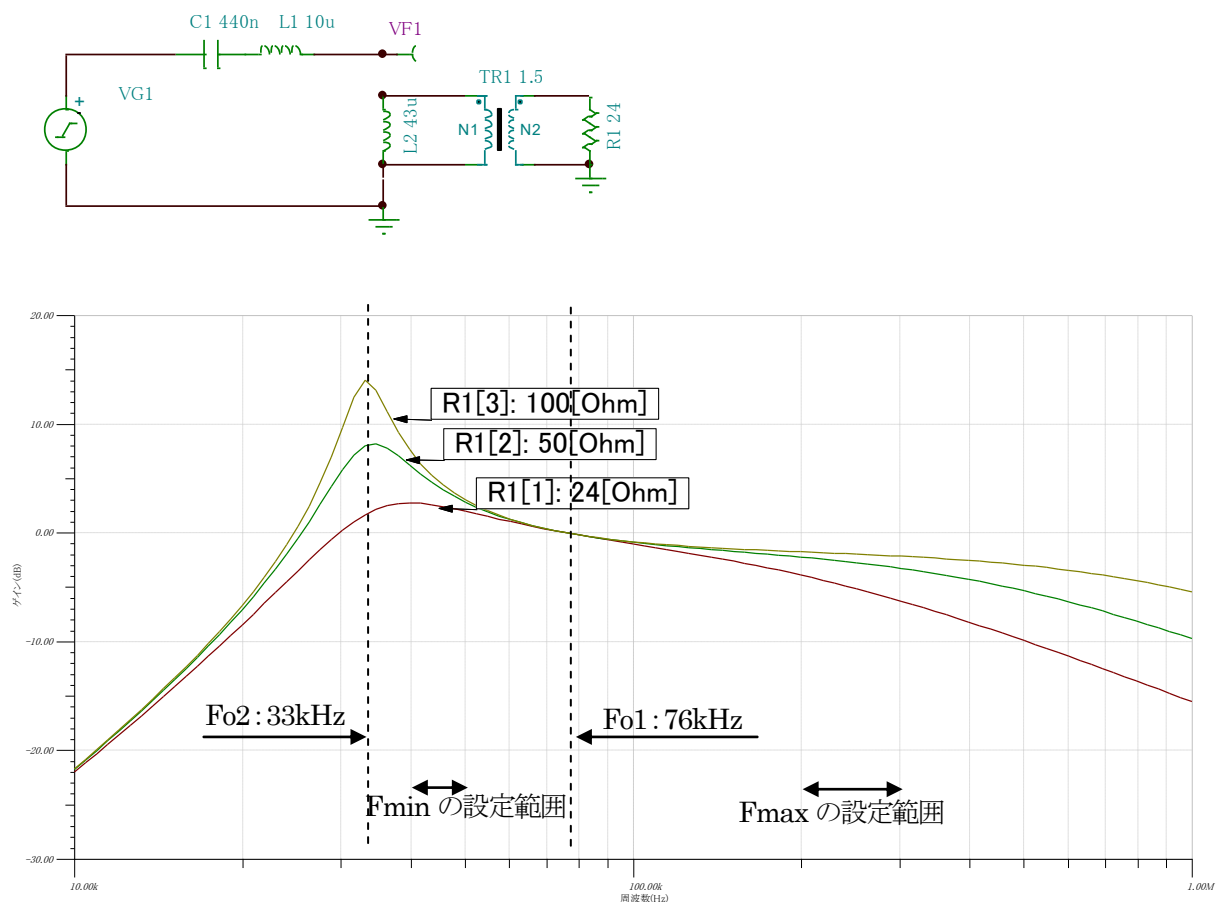


図 13 SPICE (TINA-TI) によるシミュレーション

負荷抵抗を 24Ω (定格負荷)、50Ω、100Ωとして、VF1 を観測点として、入力と出力の伝達特性を測定します。0db が、入力と出力の比が 1 倍で、6db が 2 倍です。

Fo1 は、漏れインダクタンス (L1)と共振コンデンサ (C1) の共振周波数で

$$Fo1 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L1 \times C1}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{10 \times 10^{-6} \times 0.44 \times 10^{-6}}} \approx 76(KHz)$$

となります。

Fo2 は、励磁インダクタンス (L1+L2)と共振コンデンサ (C1)の共振周波数で

$$Fo2 = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L1+L2) \times C1}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{53 \times 10^{-6} \times 0.44 \times 10^{-6}}} \approx 33(KHz)$$

となります。

Fo2 付近で出力電圧が最大となります。

最低動作周波数 (Fmin) は、電流が電圧より遅れる必要から、40kHz～50kHz 程度で、最高動作周波数 (Fmax) 200kHz～300kHz 程度が良いとわかります。

また、24W 出力での入力電圧の最低値は、23V 程度であることがわかります。

図 14 は、SCAT によるシミュレーションでの各部の波形で、負荷抵抗 24Ω (定格負荷)、240Ω (軽負荷) の波形です。

SCAT を使用することにより、共振コンデンサの電流、電圧、実効値等も表示できます。

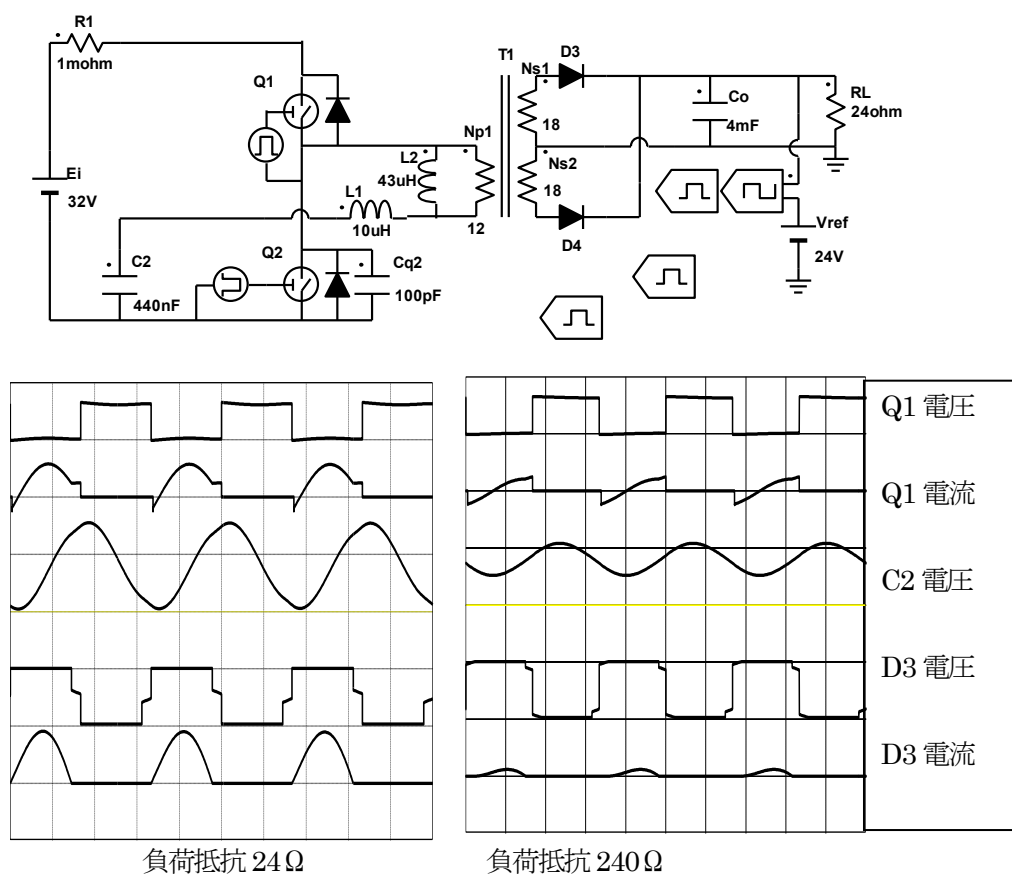


図 14 SCAT によるシミュレーション (定格負荷時、軽負荷時)

図 15 は、負荷抵抗を 2.4Ω としたときの波形で共振はずれ現象（FET の電流が進み電流となり、ハードスイッチングとなる現象）を示します。右図の正常状態と比較してみてください。

LLC 共振方式は、配線のインダクタンス等の影響が少なく、シミュレーション波形と実際の波形がかなり一致します。

トランスを製作し、漏れインダクタンスを計測した後で、シミュレーションにより動作を確認すれば、設計上のおおきな間違いをなくすることができます。

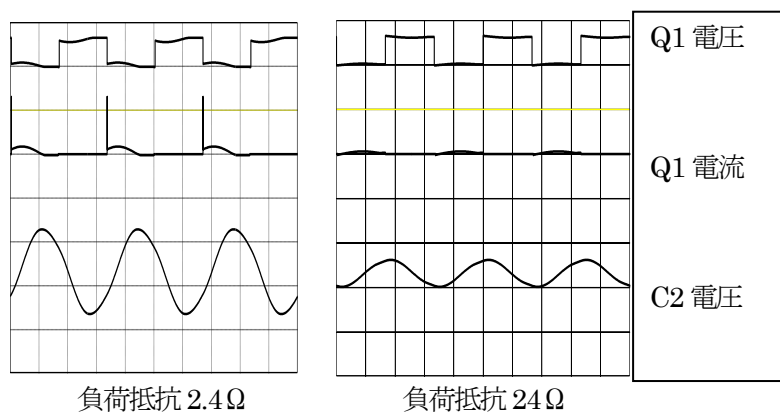
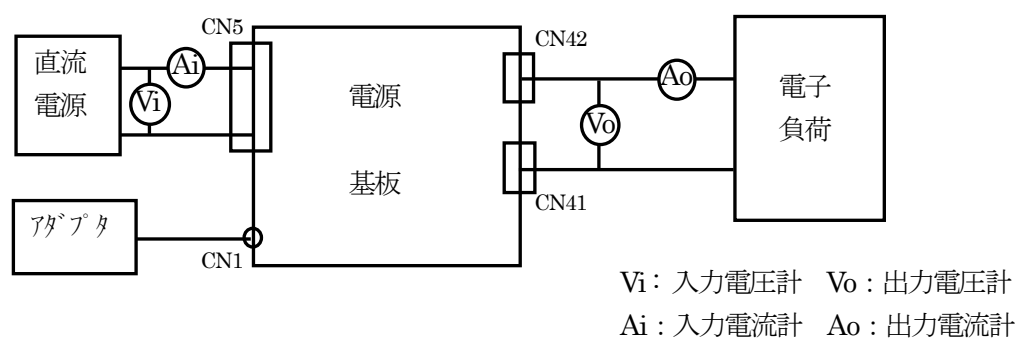


図 15 SCAT によるシミュレーション（共振はずれ現象）

7. 最低周波数 (Fmin) とデットタイムの設定



$$\eta = \frac{V_o \times I_o}{V_i \times I_i} \times 100(\%)$$

図 16 測定回路

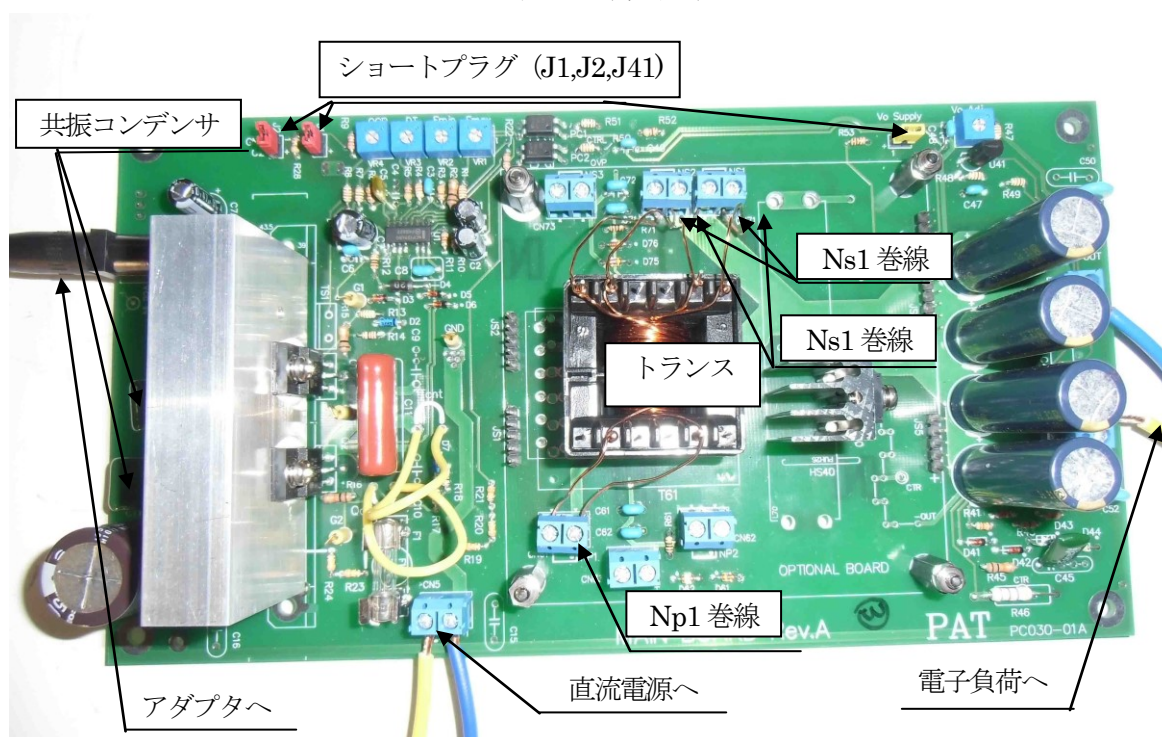


写真 5 電源基板の配線方法

電源基板と外部の電源負荷等の接続を図 16 に示します。
直流電源と電子負荷にメータがついている場合には、電流計 (Ai,Ao)、電圧計 (Vi,V0)は不要です。
写真 5 により、接続方法を説明します。

- ①CN2、CN3 に共振コンデンサ (250V0.22 μ F) を接続する。
- ②J1、J2、J41 をショートプラグにより、短絡する。
- ③CN5 の+と直流電源の+、CN5 の-と直流電源の-を電線で接続する。
- ④CN42 と電子負荷の+、CN41 と電子負荷の-を電線で接続する。
- ⑤トランス Np1 巻線を Np1 端子台、Ns1 と Ns2 巻線を Ns1 と Ns2 端子台へ接続
(Ns1,Ns2 の内側の端子は、接続されているため Ns1,Ns2 のどちらも接続可)
(基板のパターンに接触しないように写真のように端子側を基板に接触しないように置く。)
の順で接続します。

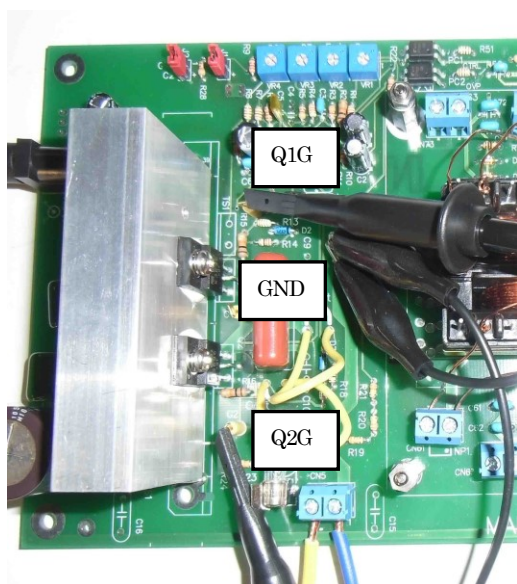


写真6 ゲート駆動波形観測

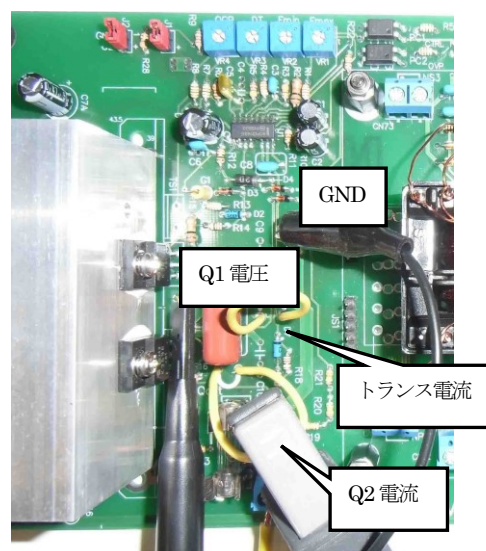


写真7 FET の電圧、電流観測

次に、写真6のようにオシロスコープのプロブをチェック端子 Q1G と GND、Q2G と GND に接続します。

動作時のゲート電圧は約 10V、周波数は 50kHz 程度ですので、オシロスコープの電圧軸(縦軸)は 5V/div、時間軸(横軸)は $5\mu\text{S}/\text{div}$ 程度に設定しておくといよいでしょう。

この後アダプタ (出力 12V) の出力を CN1 に接続し、動作を開始します。

オシロスコープには図 17 のような波形が表示されます。

周波数を 50kHz となるように Fmin ボリウムを調整します。

次にデットタイムが 500nS 程度となるよう DT ボリウムを調整します。DT ボリウムは、動作させながら再調整します。

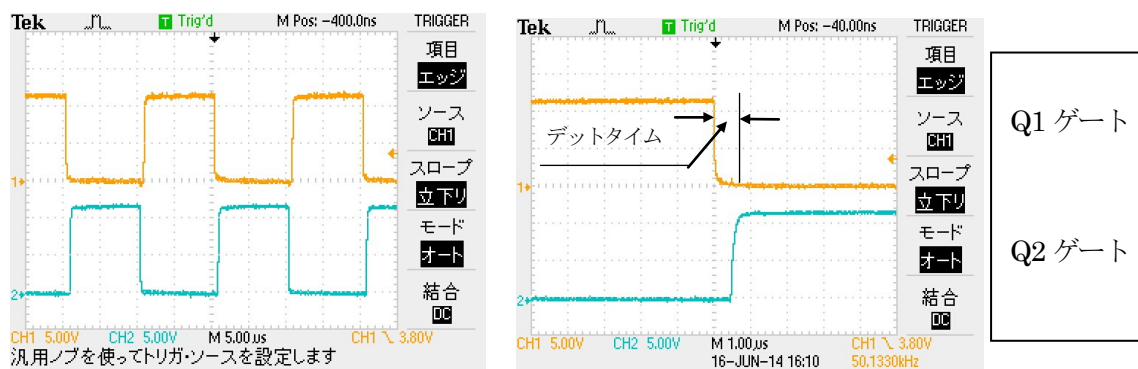


図 17 駆動波形と調整

8. 波形を観測する

オシロスコープのプロブの一つを電流プロブに交換し、写真7のように電圧プロブをチェック端子 GND と CT に接続し、電流プロブを Q2 電流測定電線に通します。

アダプタを接続し、直流電源の電流を観測しながら、電圧を 15V 程度まで上昇させます。電圧波形の立ち上がりで同期をとり、時間軸を 100 ns 程度として立ち上がり時のデットタイム調整の状態を確認します。調整要領を確認するために負荷と DT ボリウムを可変して、図 18 の波形を確認してください。

実際には、入力電圧を 32V として、負荷電流を変化させ、どのような状態でも適正波形になるのが理想です。

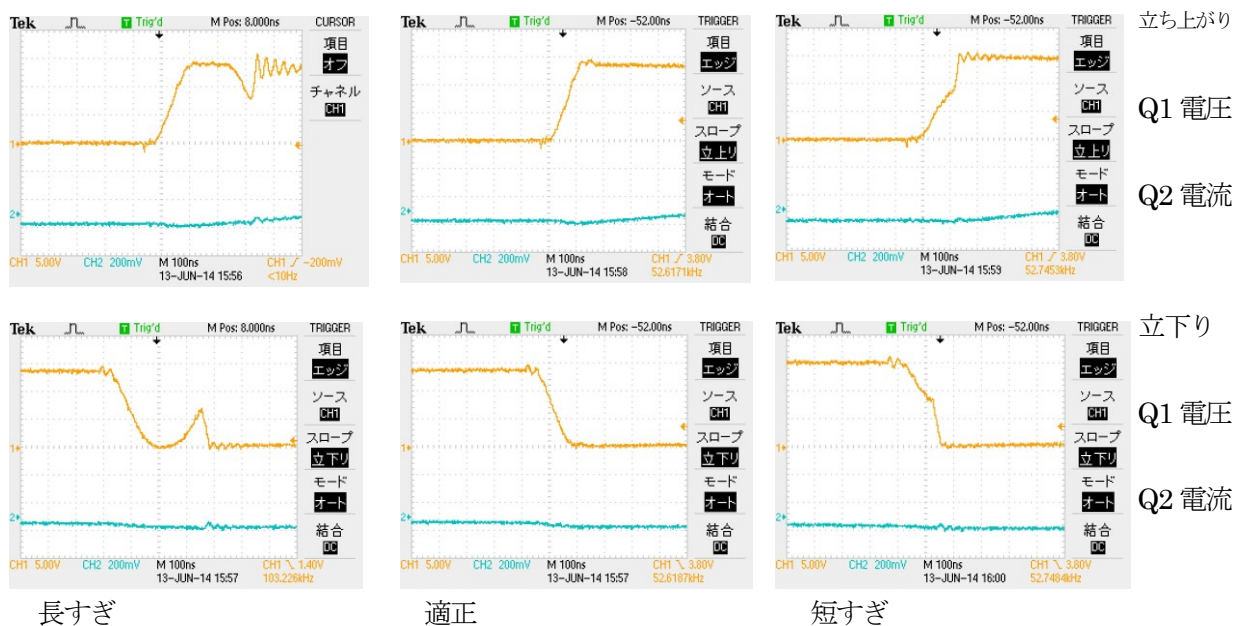


図 18 デットタイムの調整

共振はずれにならないように Fmin を設定するのが LLC 方式の要です。特性を満足する範囲で Fmin 周波数を高めに設定するのが基本です。

最近では、Fmin を自動設定する IC が販売されています。設定の自由度が失われる場合もありますが、自動設定の IC を使用すると調整工数の削減になります。

デッドタイムが適切な値に調整したのち、出力電圧を設定します。

波形を観測しながら、入力電圧を上昇させ、出力電圧が 24V 近辺となったら VoAdj ボリウムを調整し、出力電圧を 24V に設定します。 入力電圧を 32V まで上昇させ、負荷を 1A まで増やし安定化されていることを確認します。

出力の定電圧動作の確認を終えたら、最高動作周波数を設定します。

負荷を減らしながらスイッチング周波数を確認し、間欠動作する直前の周波数が 200kHz から 250kHz となるように、Fmax ボリウムを調整します。

これですべてのボリウム設定が完了しました。

最後に、設定値が適切かどうかを確認します。

負荷を可変しながら、Q1 の立ち上がり、立ち下がり電圧が図 18 の適正な波形であるか確認します。

デッドタイムに大きなズレが生じているようなら、波形を見ながら DT ボリウムを再調整します。

入力電圧を 15V 程度として、負荷を上昇させると図 19 のように共振はずれとなります。

注：この観測は、入力電圧 15V 程度で短時間おこなってください。FET に過大なストレスが加わり破壊することがあります。今回の実験では、入力電圧が 32V のため過電流設定が行えないため保護回路が動作しません。

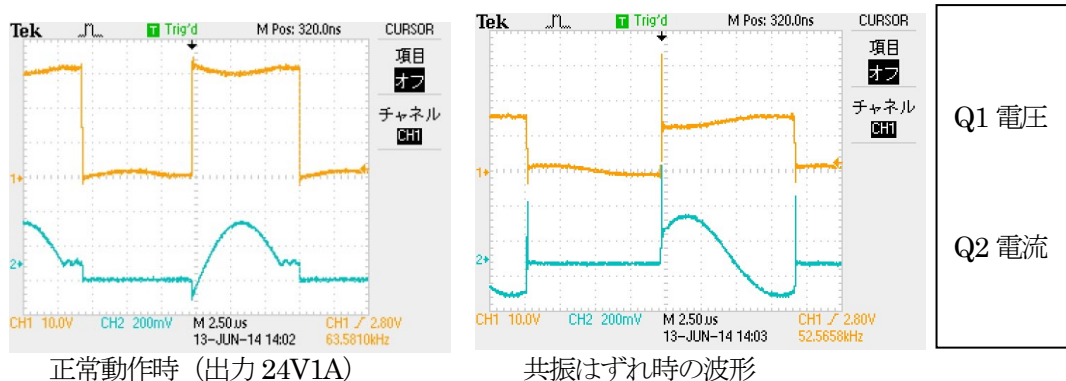
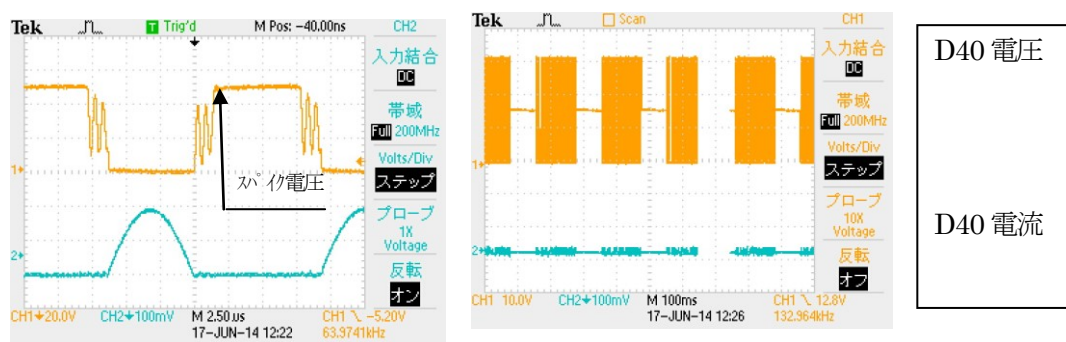


図 19 波形観測 正常動作波形と共振はずれ時の波形

Ns1 の電圧と電流波形を観測することにより、整流ダイオード (D40) の電圧と電流を確認できます。観測波形を図 20 に示します。電流は、正弦波の半波、電圧は、出力電圧の 2 倍の矩形波となり、スパイク電圧は観測されません。無負荷とすると間欠動作を確認できます。



入力 32V 出力 24V 1A 間欠動作 出力 24V0A

図 20 整流ダイオード波形と軽負荷時の間欠動作波形

LLC 共振電源の整流ダイオードの電圧は、出力電圧の 2 倍（ブリッジ整流の場合は 1 倍）でスパイク電圧がほとんどないため 24V 出力でも 60V ショットキーダイオードが使用できます。

一般的なスイッチング電源の二次側整流に用いられている高耐圧のファーストリカバリダイオードと比較して、順方向電圧降下(VF)が小さく逆回復時間が理論的にゼロであるショットキーダイオードを使用することは、スイッチングロスの低減につながります。

これも LLC 共振電源の効率が良い理由の一つです。

Fmax 周波数を可変すると間欠動作の状態が変化します。FET の損失が増えない範囲で Fmax を高く設定するのが基本です。

Fmax を高くすると FET の電圧の立ち上がり、立ち下がりが遅くなるためデットタイムを長くする必要があります。また、電流が不足して、ZVS 動作しなくなる場合もあります。

周波数が高いと、わずかなスイッチング損失も問題になることもあります。FET が発熱しない範囲に Fmax を決定してください。

9. 効率の測定

入力電圧 32V 出力電圧 24V で電流を 1A まで変化させ、効率と周波数のデータを取得します。
電流を 0A から 0.1A ずつ増やし、入力電流、出力電圧、周波数のデータを取ります。

入力電圧 (V_i)、入力電流 (I_i)、出力電圧 (V_o)、出力電流 (I_o)から

$$\eta = \frac{V_o \times I_o}{V_i \times I_i} \times 100(\%)$$

で効率を計算します。今回のトランスでは、図 21 の特性になりました。

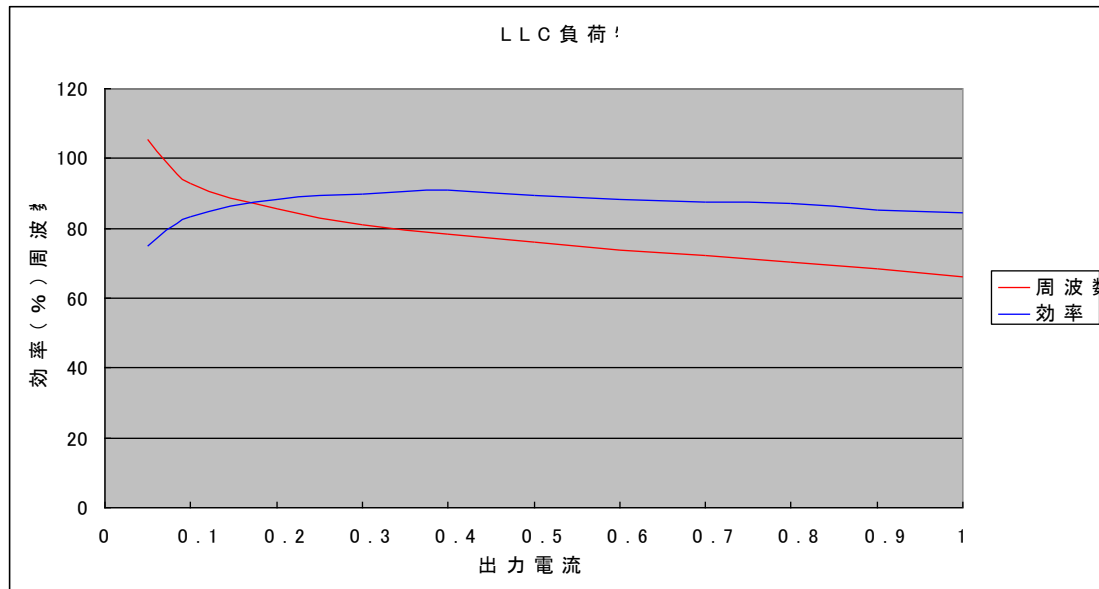


図 21 測定結果 (効率と周波数)

LLC 共振電源の利点は

- ①効率が向上 (損失が減少) する。
- ②整流ダイオードの耐圧が出力電圧の 2 倍 (ブリッジ整流では 1 倍) で耐圧の低いダイオードが使用可能
- ③低ノイズ

一方欠点としては

- ①制御範囲が狭い
- ②共振はずれ現象がある。
- ③特殊なボビンが必要

があります

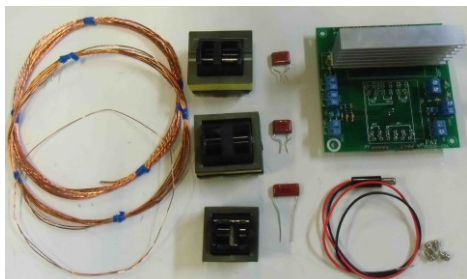
①の制御範囲の問題は、軽負荷時の間欠動作、PFC 回路とともに使用等により、問題とならないことが多くなっています。

②の共振はずれ現象については、PFC と共に使用と自動設定 IC により、大きな問題とはならなくなっています。

③の特殊ボビンに対しては、一定以上の数量を生産し、少数でも販売する会社も出現したため、少数でも生産できるようになって来ています。

10. オプション

パワーアップキット PAT030-AOP



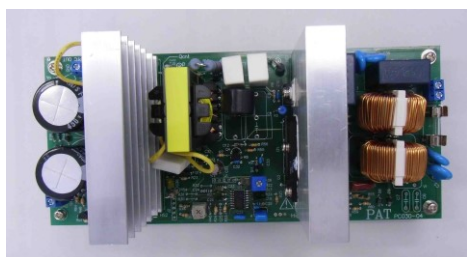
PAT030-A ベーシックキットを最大 300W まで対応できる、トランス材料や大容量整流ダイオード等を搭載した実装基板がセットになったキットです。ベーシックキットに簡単な改造を施すことで、より実用的な動作条件で LLC 回路を動作させることができ、本設計前の事前実験などにもお使いいただくことができます。

ハイパワーキット PAT030-B



PAT030-A ベーシックキットとパワーアップキットをセットにした 300W 対応高出力版のキットです。ベーシックキットはパワーアップキットに対応した改造を実施済みなので、マニュアルに従いトランスを作成するだけで大容量の LLC 回路をお試しいただけます。

350WPFC ユニット PEC350

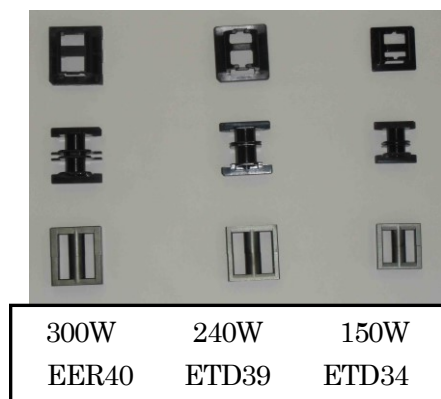


LLC 共振電源学習キットに対応した PFC 電源です。AC90V～AC240V の幅広い AC 入力を DC380V に変換します。

最大 350W の大容量出力なので、ハイパワーキットにもそのままお使いいただけます。

もちろん、汎用の PFC ユニットとして単独で使用することも可能です。

トランスキット



300W	240W	150W
EER40	ETD39	ETD34

PAT030 シリーズ LLC 共振電源学習キットに使用している 3 種類のトランスボビン、カバー、コアがセットになったトランスキットです。異なる仕様での特性比較や、補修用のパーツとしてご利用ください。



パワーアシストテクノロジー株式会社

〒350-0209

埼玉県坂戸市塚越 1220-1

TEL 049-298-4326

FAX 049-298-4364

URL <http://power-assist-tech.co.jp/>
