

1 . 電源回路の概要	
1 - 1 電源回路で検討すべき項目	1
1 - 2 安全性	2
1 - 3 商用電源	7
1 - 4 レギュレータ(安定化回路)概要	9
リニアレギュレータ	9
スイッチングレギュレータ(Switch-Mode Power Supply:SMPS)	11
1 - 5 電源回路とシミュレータ	12
2 . 電源回路のための基礎知識	
2 - 1 コンデンサ	15
2 - 2 コイル	20
2 - 3 トランス	24
2 - 4 ヒューズ	33
3 . 電源回路の負帰還	
3 - 1 負帰還の概要	34
3 - 2 負帰還の動作を数式で表す	35
3 - 3 安定な負帰還を施すために	37
3 - 4 ボーデ線図と利得合成	39
3 - 5 利得・位相 - 周波数特性	42
3 - 6 誤差増幅器の設計	47
3 - 7 gmアンプ	56
4 . リニア電源	
4 - 1 整流・平滑回路	60
4 - 2 ツェナーダイオード	64
4 - 3 シリーズレギュレータの基本動作	65
4 - 4 シリーズレギュレータの性能を表すパラメータ	66
4 - 5 熱設計	67
4 - 6 リニアレギュレータの設計例	69
4 - 7 100V 50mA レギュレータ	79
5 . スイッチング電源	
5 - 1 降圧形コンバータ(Buck Converter)	82
5 - 2 昇圧形コンバータ(Boost Converter)	83
5 - 3 昇降圧形コンバータ(Buck Boost Converter)	84
5 - 4 その他のコンバータ	85
5 - 5 パルス幅変調(PWM:Pulse Width Modulation)器	86
5 - 6 電流連続モードと電流不連続モード	87
5 - 7 スイッチング部と誤差増幅器の利得 - 周波数特性の漸近線	88
5 - 8 電圧制御モードと電流制御モード	93
5 - 9 降圧型コンバータの設計例	97

1 . 電源回路の概要

1 - 1 電源回路で検討すべき項目

当然のことながらどんな電子機器でも動作させるための電源が必要です。そして機器によっては電源が電池であったり商用電源であったりします。

今回のセミナーでは商用電源から機器に必要な電圧・電流に変換する電源回路について解説します。

電源回路は人間でいうと血液を送り出す心臓の部分に相当し、とても重要な部分です。また電源回路は出力電圧の品質だけではなく外部より侵入する雑音の阻止特性、そして事故・感電等の安全性を大きく左右します。

電源回路で検討が必要な項目を下記に示します

安全性の確保 電気は人体を流れると感電状態になり、非常に危険です。
そして当然ながら電源部の発熱による火傷等、発火による火災の恐れがないことが最も重要な事項です。

EMC対策 他の電子機器に害を及ぼす雑音を出さない、他の機器からの雑音に影響されないことが求められます。

入力変動対策 商用電源の電圧変動等による出力電圧変動を規定内にする。

負荷変動対策 機器の消費電流の変動による出力電圧変動を規定内にする。

出力容量の確保 機器の安定動作に必要な電圧・電流を供給する。

出力雑音対策 出力電圧に含まれる雑音の量を規定内にする。

電源の保護 内部機械の故障等により過電流が流れても電源回路が破壊されないまたは、発火等が生じないための保護機能。

効 率 使用環境や発熱、電源のクリーン度によりリニア方式かスイッチング方式かを選択します。

コスト 商品として販売するためには重要な要素です。
回路方式だけではなく、市販標準電源の購入か、内製または特注仕様での外注かの選択が必要です。

1 - 2 安全性

設計する電子機器の安全性は最も重要な項目です。安全性に対しては内外、様々な規格が制定されています。

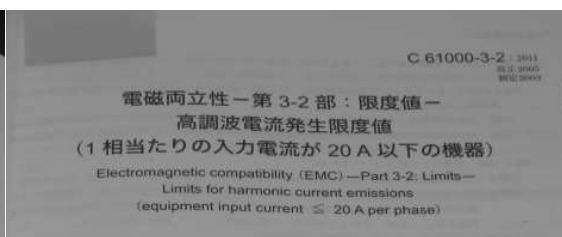
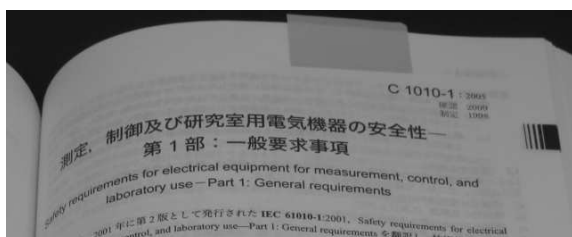
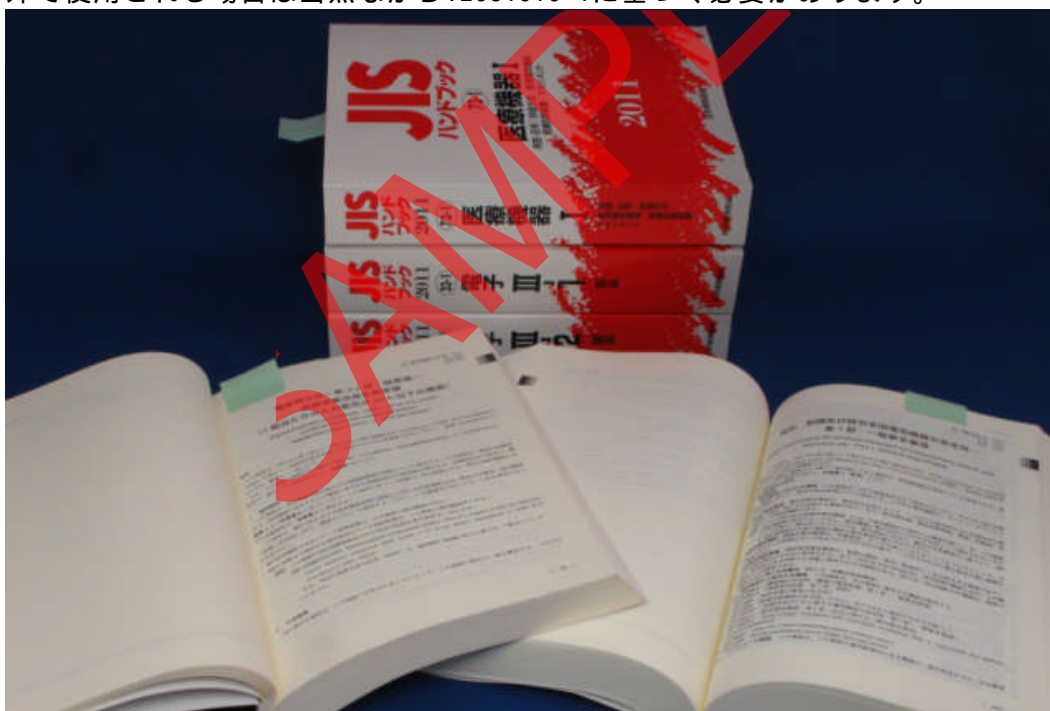
一般の方が使用する電子機器については経済産業省からPSEで有名な**電気用品安全法**があります。そして下記に例を示すように電子機器を使用する分野によりそれぞれ個別にJIS規格が定められています。

測定、制御及び研究室用電気機器	JIS C 1010-1
医用電気機器	JIS T 0601-1
レーザ製品	JIS C 6802-11

まずは自分の設計する機器がどの分野に属し、どのような規格が定められているかを認識し、規格に沿った設計が必要です。

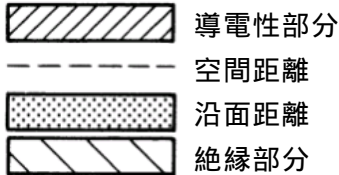
測定、制御及び研究室用電気機器の安全規格JIS C1010-1は、IEC(国際電気標準会議)61010-1の規格に基づいて制定されていますが同一内容ではなく一部変更されています。

海外で使用される場合は当然ながらIEC61010-1に基づく必要があります。

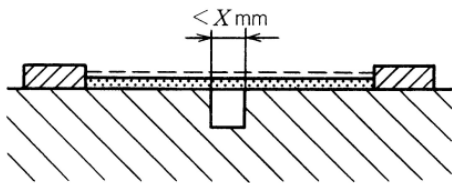


JIS C 1010-1の規格全てを解説することはとても無理なので、ここでは導電部分どうしを絶縁する距離を例にとって一部を紹介します。

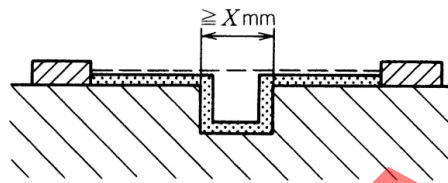
下図に示すように絶縁のための距離には**空間距離**と絶縁体の沿面に添った**沿面距離**があります(下図の例以外にも色々な形状について定められています)。そして設置される環境(過電圧カテゴリ、**汚染度**)によって、空間距離・沿面距離の最小値が定められています。



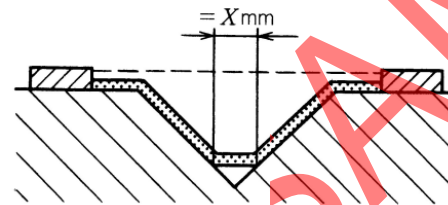
汚染度	溝の幅 X の最小値
1	0.25mm
2	1.0mm
3	1.5mm
4	2.5mm



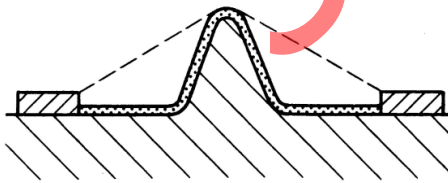
例1 幅X未満で任意の深さの平行かV字の溝がある場合。
空間距離と沿面距離が同じで、溝を横切って直接測定する。



例2 幅X以上で任意の深さの平行かV字の溝がある場合。
空間距離：見通し線距離
沿面距離：溝の輪郭線に沿った距離

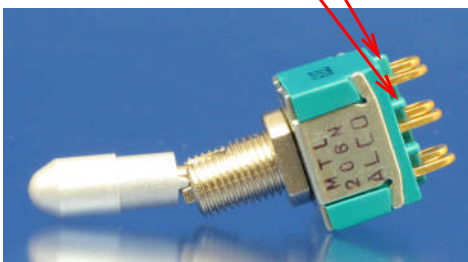


例3 幅Xを超えるV字の溝がある場合
空間距離：見通し線距離
沿面距離：溝の輪郭線に沿うが、幅がXの位置で短絡する。

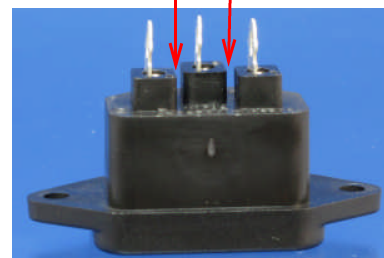


例4 リブがある経路
空間距離：リブの頂点を越える最短の直接経路。
沿面距離：リブの輪郭線に沿った距離。

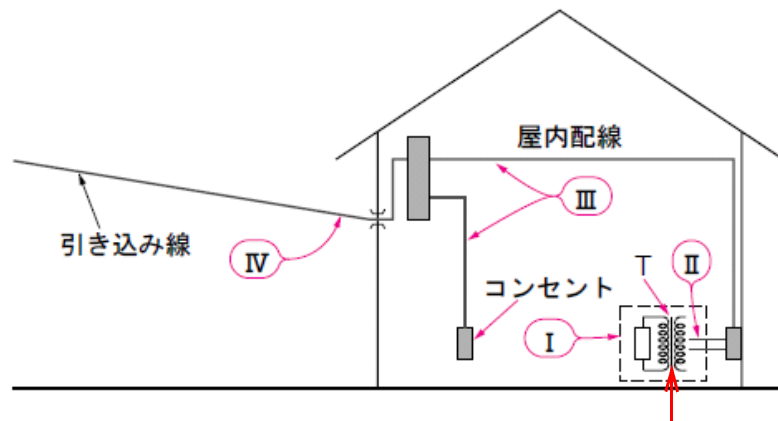
トグルスイッチのリブ



ACインレットの溝



過電圧カテゴリ(以前は設置カテゴリ)の分類は下記の4つに区分されています。



- ・ 過電圧カテゴリⅠ：コンセントを経由し、電源トランスにより絶縁された2次側の部分。
- ・ 過電圧カテゴリⅡ：コンセントに接続する電源コード付き機器の1次側の部分。
- ・ 過電圧カテゴリⅢ：直接配電盤から電気を取り込む、工場等の産業機器の一次側、および分岐部からコンセントまで。
- ・ 過電圧カテゴリⅣ：建造物の引込み線で使用される電気計器、および一次過電流保護装置等、引き込み線に直接接続される部分。

オシロスコープ等の電源の仕様部分に書かれている「CAT」は「過電圧カテゴリ」であることを示しています。

汚染度の等級(機器が使用される環境)下記の4つに区分されています。

- ・ 汚染度1：汚染がないか、乾燥した非導電性の汚染だけが発生する、結露の生じない密閉された部分。
これは通常、密封性のある部屋がクリーン・ルームでの使用を想定したものです。
- ・ 汚染度2：結露が生じるが、非導電性の汚染しか発生しない場所。
これは標準的なオフィスや家庭内の環境に相当します。
- ・ 汚染度3：導電性の汚染が発生するか、または予想されるような結露のために導電性となる乾燥した非導電性の汚染が発生する場所。
これは温度・湿度の管理されていない屋内環境に相当します。
- ・ 汚染度4：汚染は導電性のほこり、または雨や雪によって発生される永続性の導電性を発生される場所。
これは一般的な屋外環境に相当します。

1 - 4 レギュレータ(安定化回路)概要

レギュレータは入力電圧や負荷が変動しても常に一定な出力電圧(又は電流)になるように制御し、安定化する装置です。

レギュレータは**リニア方式**と**スイッチング方式**(Switch-Mode Power Supply: SMPS)に大別されます。

リニアレギュレータ

トランジスタやFETをリニア動作で使用し、コレクタ - エミッタ間またはドレイン - ソース間の電圧や流れる電流を制御し、出力電圧(又は電流)を一定値に制御します。

リニアレギュレータは下記の特徴があります。

出力雑音が少ない。

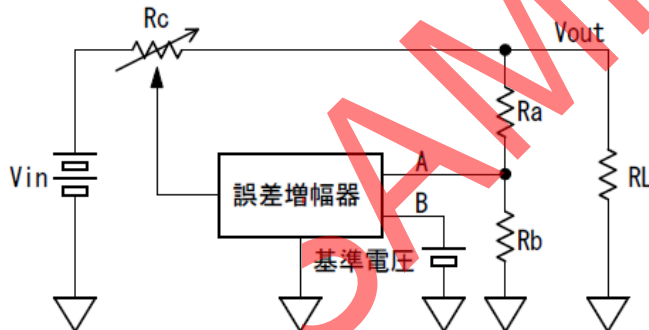
大量の負帰還が比較的容易で、正確な出力電圧が得られる。

比較的部品点数が少なく、コイルを使用しなくても実現できる

電力効率が悪く、ヒートシンクが大きくなり、省エネに向かない。

リニアレギュレータには下記に示す2種があります。

・ シリーズレギュレータ

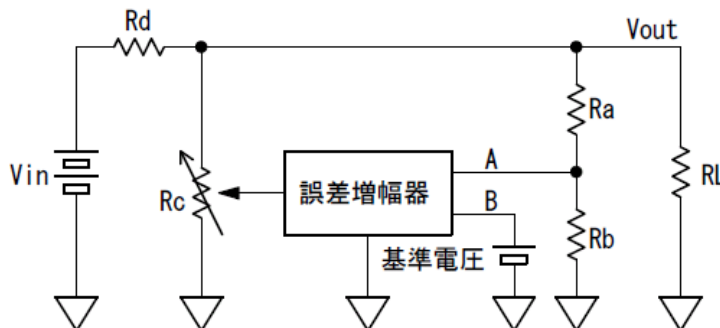


出力電圧をRaとRbで分圧し、その値と基準電圧の値が同じになるようにRcの値を制御する。

その結果、VinやRLが変動してもVoutが一定の値に自動調整される。

実際にはRcはトランジスタやMOSFETが使用されます。

・ シャントレギュレータ



Rdによる電圧降下を利用して、VinやRLが変動してもVoutが一定の値になるようRcの値を自動調整する。

負荷電流が流れないときにはRcに最大負荷電流に等しい電流が流れ、RdとRcによる電力損失が多く、特殊な用途を除きあまり用いられません。

4 . リニア電源

4 - 1 整流・平滑回路

商用周波数のトランスを使用するリニア電源では商用電源をトランスで降圧した後、整流回路そして平滑回路で直流電圧に変換します。

整流・平滑回路での重要なパラメータは得られる直流電圧とリップルの大きさです。

これらの値を主に左右するのは電源トランスの巻き線比、巻き線抵抗および平滑コンデンサの容量です。

電源トランスに表示されている出力電圧の値は定格負荷を接続したときの値です。定格負荷時には流れる電流とトランスの内部インピーダンスとで電圧降下が発生します。

一般的に1次と2次の巻き数比に比べると定格負荷時の2次電圧は10%程度少な目になります。このため巻き線比は無負荷時の1次と2次の電圧を計測して決定します。

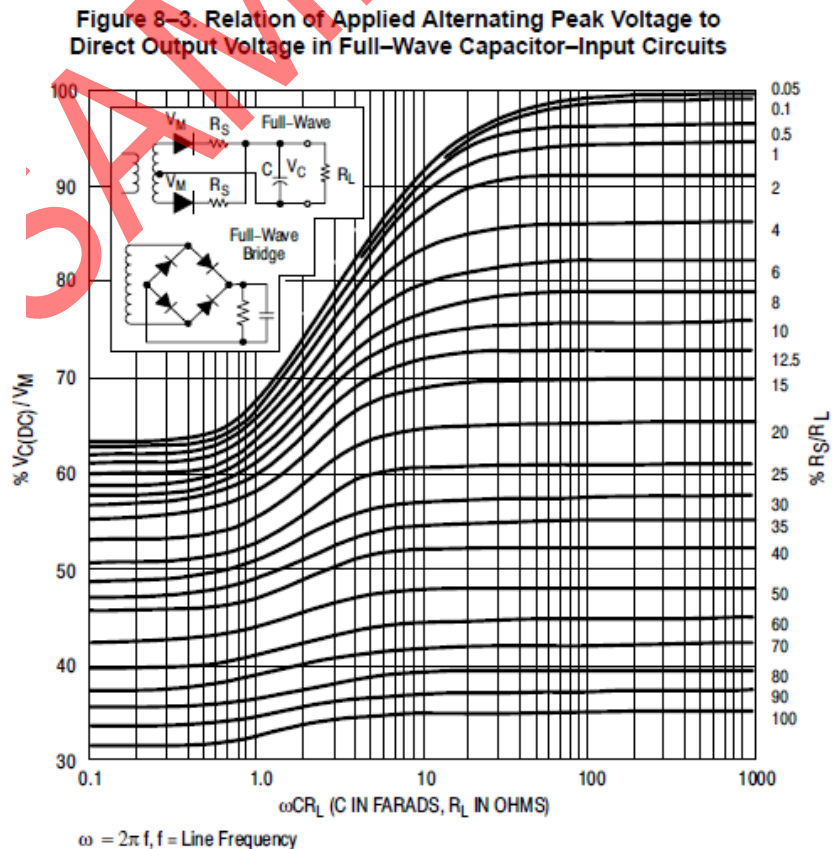
巻き線抵抗は商用周波数のトランスの場合は周波数が低いので直流での値で事足りません。またリーケージインダクタンスや浮遊容量は周波数が低いため考慮しなくてもシミュレーション値と実測値がよく一致します。

整流・平滑回路は回路こそ簡単ですが、非線形要素がたくさん含まれ、数式によって出力電圧やリップル電圧等の値を算出するのが非常に難しい回路です。以前は下図のO.H.Sc hade氏の作成したグラフを頼りに、これらの値を算出し部品の定数を求めていました。

しかし現在では回路シミュレータが手軽に使用できるようになったため、シミュレーションにより各パラメータの最適値が簡単に求められます。

また平滑回路に使用される電解コンデンサに流すことのできるリップル電流には許容値があります。許容値を超えて使用すると電解コンデンサの寿命が短くなり、最悪破壊してしまいます。試作後の変更は大変なのでシミュレーションで予め確認しておくことが大切です。

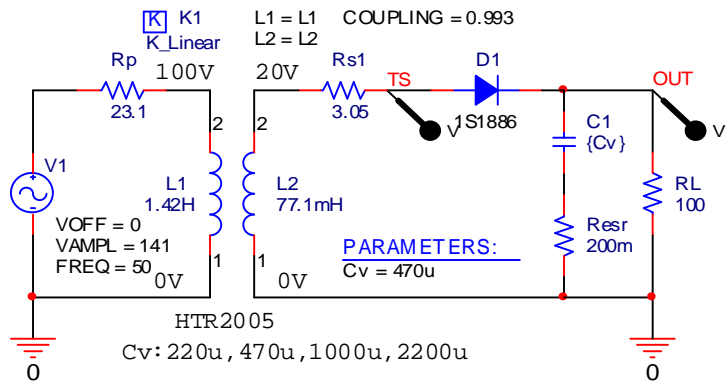
O. H. Schade氏が
作成したグラフ



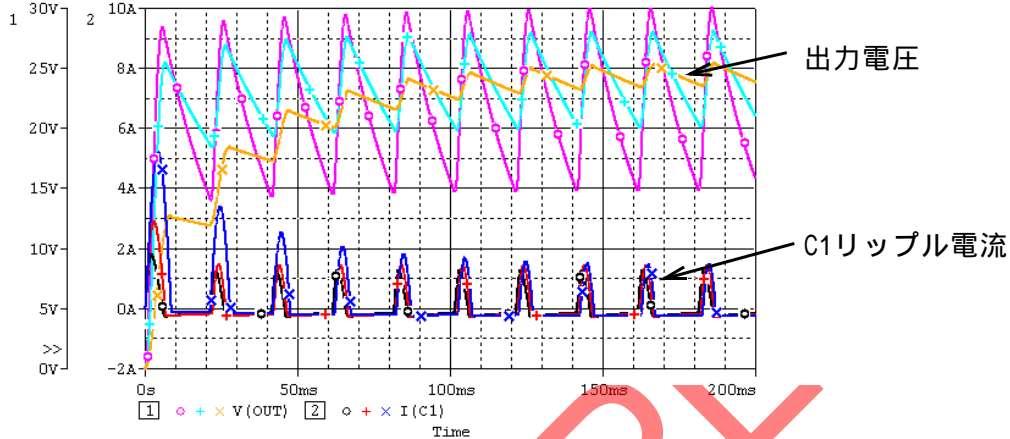
半波整流回路

[HTR2005_HalfRect]

シミュレーション回路

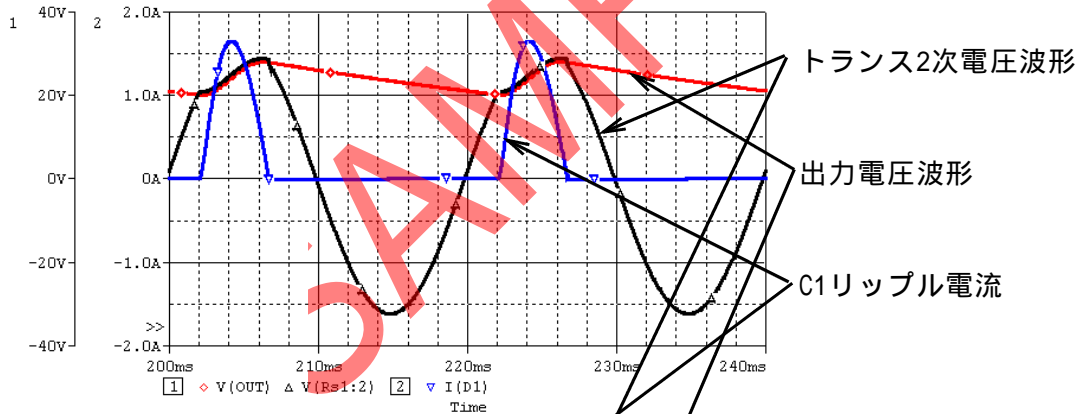


電源投入時

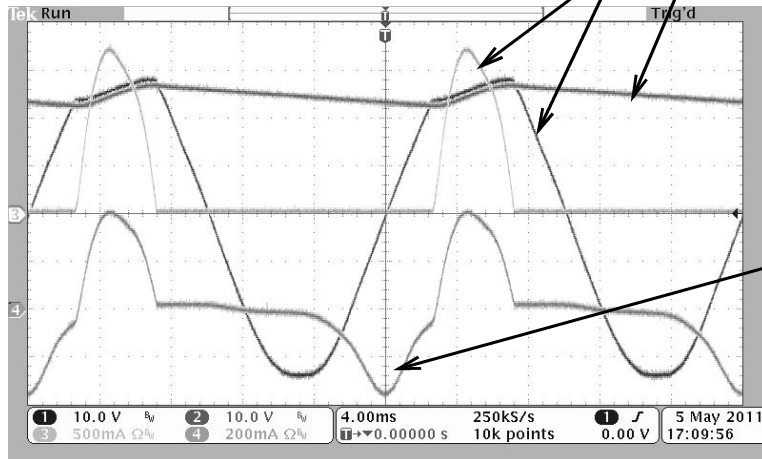


定常時

C1:470uFのとき



C1:470uFのときの実測波形

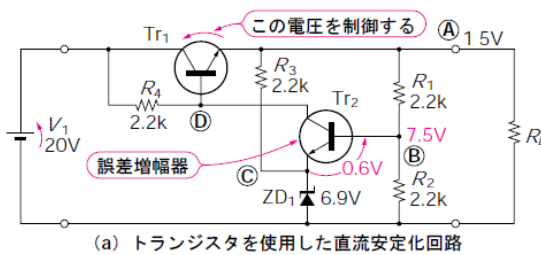


トランス1次電流波形

2次電流が片側しか流れないので交流波形にするため毎周期、飽和電流が流れる

IEC61000-3-2では半波整流回路は禁止されている。相当するJISではこの項目が削除されている。

4 - 3 シリーズレギュレータの基本動作



左図はレギュレータの基本回路です。電圧変動のあるV1を入力し、直列制御素子であるTr1のコレクタ - エミッタ間の電圧を自動制御して安定した一定電圧を出力します。

Tr2は出力電圧を監視してTr1を制御する誤差増幅器として動作します。

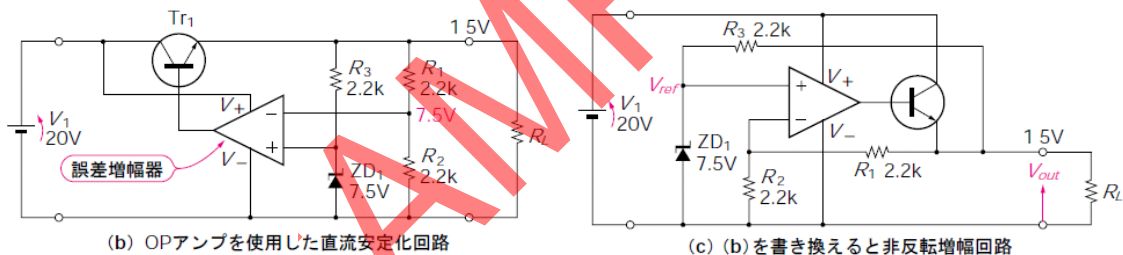
上図のC点はツェナーダイオードにより6.9Vの一定電圧になっています。

Tr2の入力インピーダンスがR1//R2よりも十分大きいので、 $R2/(R1+R2) = 0.5$ よりB点はほぼ出力電圧の半分になります(正確にはベース電流等により若干ズレます)。

Tr2のベースエミッタ間の電圧はほぼ0.6Vなので、B点は7.5Vになり、この回路の出力電圧は15Vで安定します。

いま入力電圧E1が上昇したり、負荷抵抗RLの値が大きく(負荷が軽く)なるとA点の出力電圧が上昇し、B点も比例して上昇します。するとTr2のベースエミッタ間の電圧が大きくなるので、Tr2のコレクタ電流が増加し、R4による電圧降下が大きくなり、D点の電圧が下がり、A点の出力電圧が上昇するのを防ぎます。

逆に、E1が下降したり、負荷が重くなるとA点の出力電圧が下降し、B点も比例して下降します。するとTr2のベースエミッタ間の電圧が小さくなるので、Tr2のコレクタ電流が減少し、R4による電圧降下が小さくなり、D点の電圧が上がり、出力電圧が下降するのを防ぎます。



上図bは誤差増幅器にOPアンプを使用したレギュレータの基本回路です。OPアンプの+入力にはツェナーダイオードにより7.5Vの一定電圧になっています。OPアンプの入力インピーダンスはR1//R2よりも十分大きいので、出力電圧の半分の値が-入力に加わります。したがって出力電圧が+15Vよりも大きくなると、-入力が+7.5Vよりも大きくなりOPアンプ出力電圧が下がり、出力電圧が+15Vよりも上昇するのを防ぎます。

上図cは上図bを書き換えただけでまったく同じ回路です。上図cからわかるようにレギュレータはツェナーダイオードの一定電圧を非反転増幅器で増幅している回路ということが解ります。

したがってツェナーダイオードの電圧をVrefとすると出力電圧Voは下式で求められます。

$$V_o = V_{ref} \times ((R1+R2)/R2)$$

4 - 6 リニアレギュレータの設計例

下記は一般的なFET入力OPアンプ、LF411を使ったリニア・レギュレータです。

(ここではPSpice評価版にLF411のモデルがあったので使用しました。他のトランジスタ入力のOPアンプでも同等のGBWがあれば使用できます)

使用するOPアンプの電源を出力電圧から供給しているので、出力できる最高電圧はLF411 1Aの最大電源電圧(44V)で制限されます。したがってR5,6の値を変更すれば40V程度までの出力電圧に対応できます。

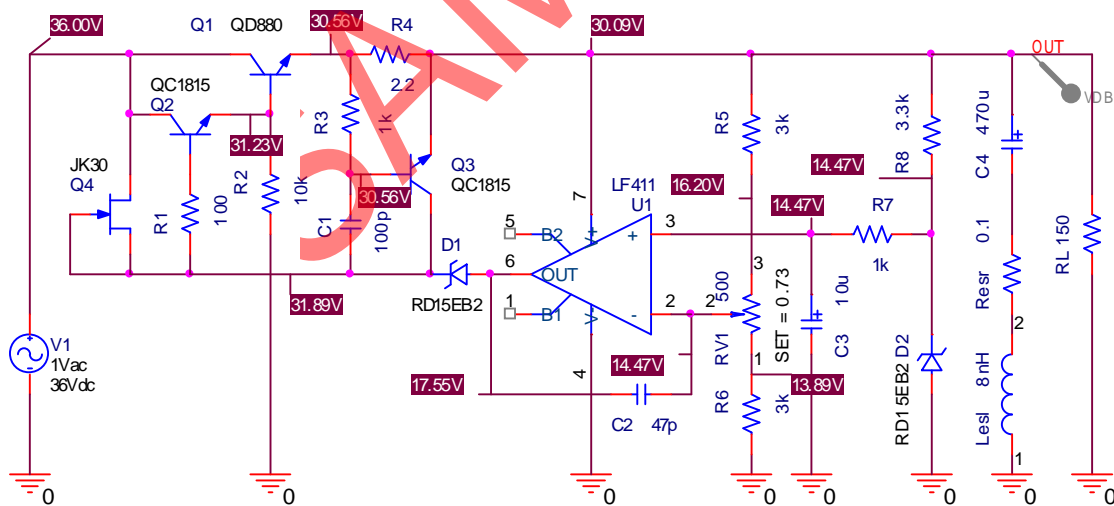
最大出力電流のときR4での電圧降下は約0.6Vになります。このときQ1,Q2のVBEを0.6VとするとQ2のベース電圧には、出力電圧 + 0.6V × 3 = 31.8V が必要です。ところがU1の電源電圧が30VなのでU1の最大出力電圧は27V程度です。このためD1のツェナーダイオードを挿入し、出力電圧を15Vレベルシフトしています。したがってU1に必要な最大出力電圧は 31.8V - 15V = 16.8V になります。

D2のツェナーダイオードからは比較的大きな雑音(100nV/√Hz程度)が発生します。このためR7,C3を挿入し(fc:16HzのLPF)、ツェナーダイオードから発生する雑音を除去しています。

D2の代わりに高精度基準電圧ICを使用し、R5,R6,RV1に温度特性のよい抵抗を使用すれば高精度、低雑音の電源に改善できます。

万一の事故で出力が短絡された場合Q1に過大な電流が流れ、Q1が破壊してしまいます。このため Q3,R4,R3,C1で保護回路を構成しています。出力電流が増大し、R4の両端電圧が約0.6VになるとQ3が動作開始しQ2の電圧を降下させ 0.6V ÷ 2.2 = 270mA の電流に制限します。C1はQ3が動作したとき発振ないように挿入しています。

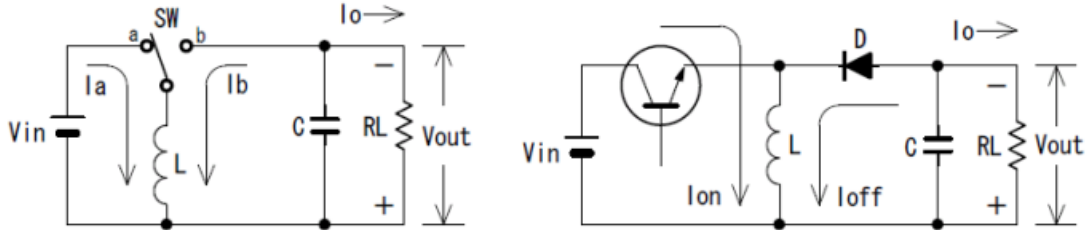
[SerReguA]



リニア・レギュレータには負帰還が施されているのでループ利得が1になる周波数での位相余裕を確保しなくてはなりません。

このためまず誤差増幅器を除いた制御部の利得・位相 - 周波数特性を求め、この特性から誤差増幅器の利得・位相 - 周波数特性を設計します。

5 - 3 昇降圧形コンバータ (Buck-Boost Converter)



上図は昇降圧形コンバータと呼ばれるスイッチング電源で入力電圧よりも低い出力電圧から高い出力電圧まで得られます。入力電圧に対し出力電圧の極性が反転しているので反転形とも呼ばれます。

SWがa接点に接続されるとVinがLに印加され、Lにエネルギーが蓄えられます。スイッチがb接点に切り替わるとLに蓄えられたエネルギーが負荷に流れます。

SWがa接点に接続されたときの I_L は

$$I_L = \frac{V_{in}}{L} \times t_{on}$$

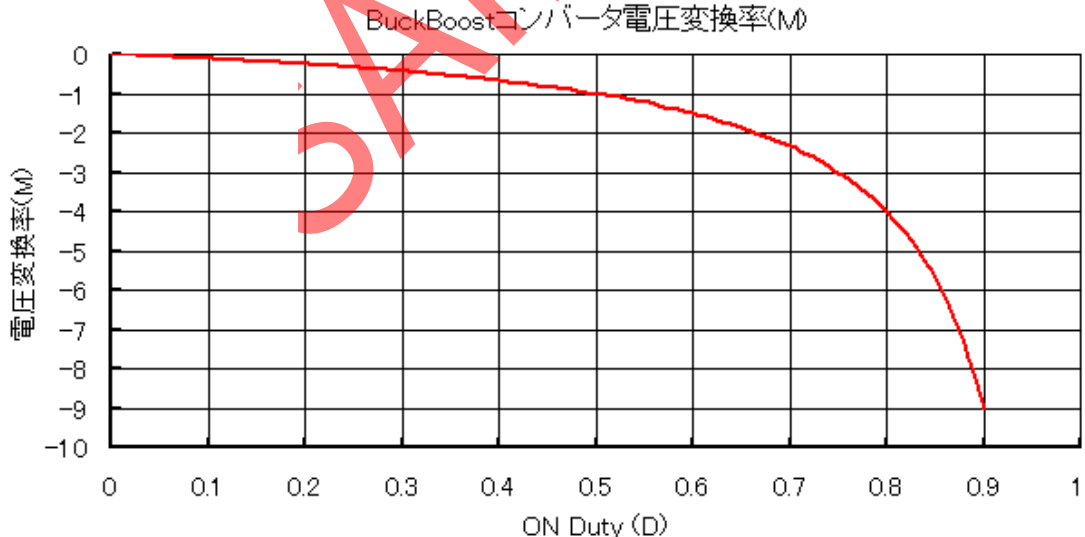
SWがb接点に接続されたときの I_L は

$$I_L = \frac{V_{out}}{L} \times t_{off}$$

上2式が等しく $T_{on} = D$ $T_{off} = 1 - D$ とし、整理すると下式が得られます

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{-D}{1-D} = -M$$

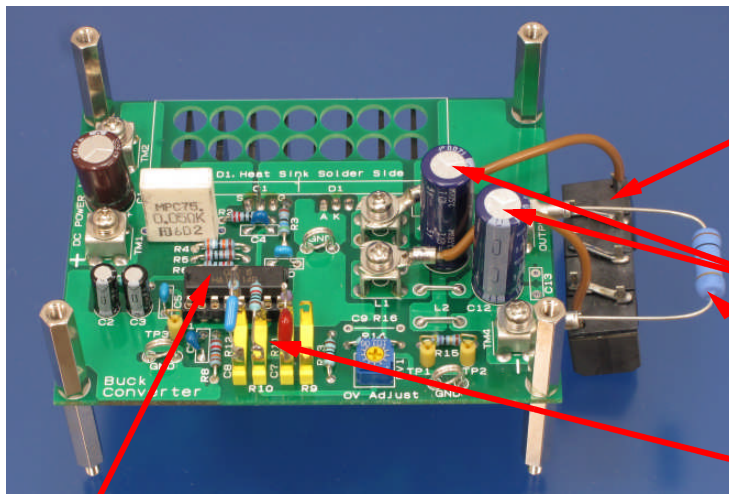
昇圧形と同様Dが1に近づくとき非常に大きな変換率になりますが実際には効率を考えるとDは0.8程度までが現実的です。したがって変換率は4~5倍程度までになります。



昇圧コンバータと同様にトランジスタがオフしているときにしかCに電流が流れません。降圧形コンバータに比べ入力と出力の電流リップルが大きくなります。

5 - 9 降圧形コンバータの設計例

下図はセミナの負帰還演習のために設計した降圧形コンバータです。
 入力電圧は12V、定格出力は5V1A、スイッチング周波数は約100kHzとしています。



部品面

出力コイルは交換して比較できるようにしています。
 22uH x 4

出力コンデンサ
 LXY1200uF16V x 2

負荷抵抗 100
 定格負荷は5 です。

誤差増幅器用CR

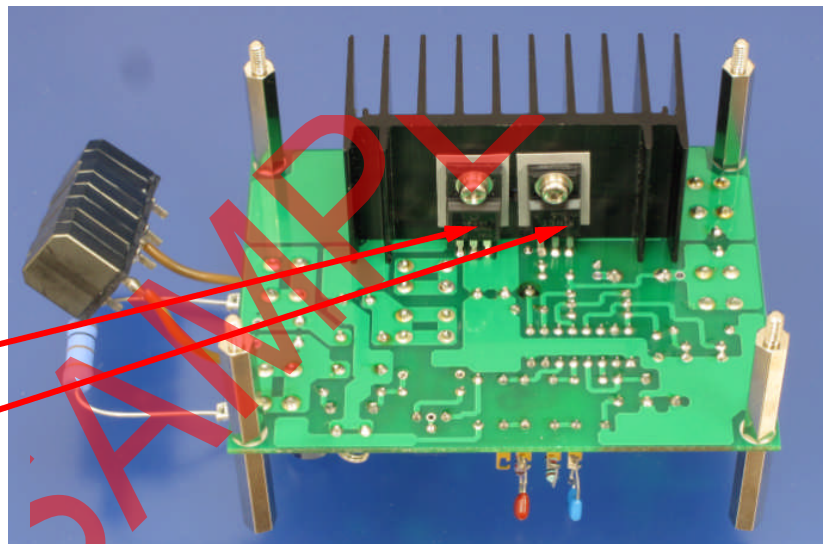
制御IC HA16114P

ハンダ面

ヒートシンクは大きく
 余裕があります。

ダイオード

MOSFET



出力コイルのインダクタンスは大きいほどコイルに流れるリップル電流が小さくなり、出力リップル電圧が小さくなります。ただしインダクタンスが大きいと形状が大きく、価格も高くなります。

一般的にはリップル電流が最大直流出力電流の30%程度になるようにインダクタンスの値を決定することが多いようです。ここではインダクタンスを88uHとしました。

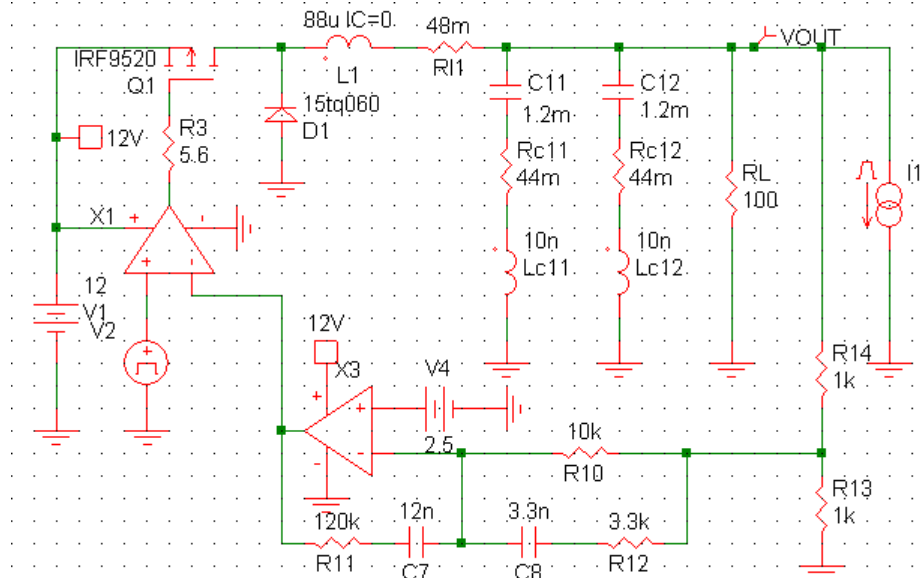
$$\text{リップル電流 } I_L = \frac{(V_{IN} - V_{SAT} - V_{OUT})T_{ON}}{L} = \frac{(12V - 0.5V - 5V) \times 5\mu s}{88\mu H} = 370mA$$

VIN:入力電圧 VSAT:制御MOSFETのON電圧 VOUT:出力電圧 TON:ON時間

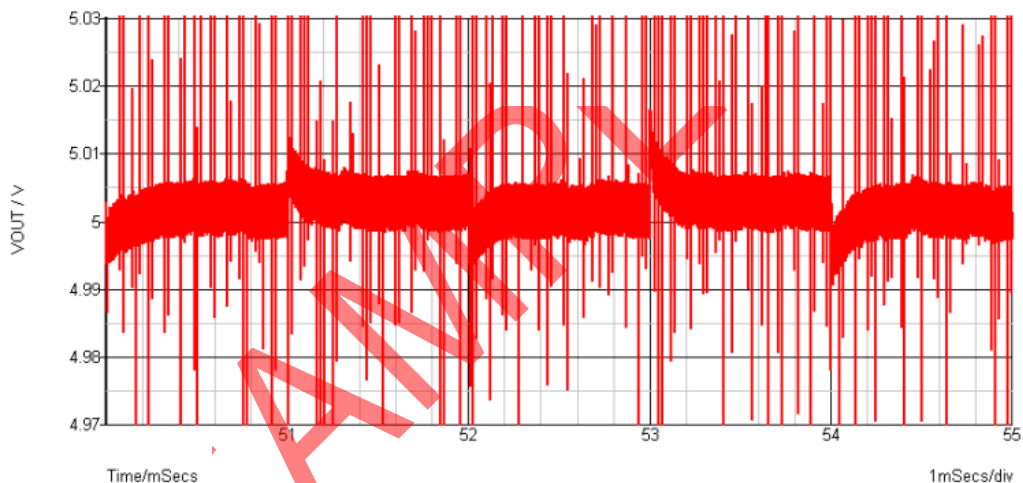
出力コンデンサのESRをRCESR:22m とすると

$$\text{出力リップル電圧は } V_0 = I_L \times RCESR = 8mV$$

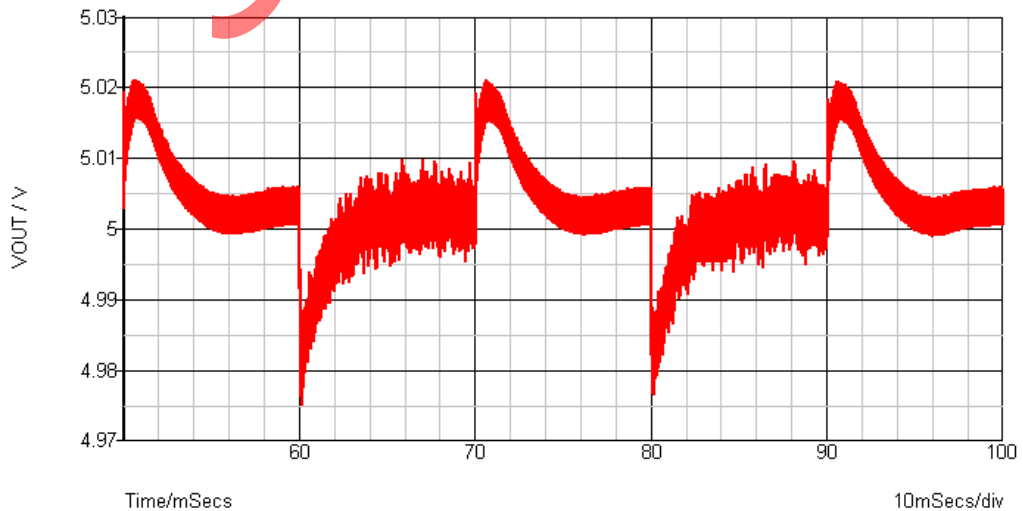
出力の過渡応答波形をSIMetrixでシミュレーションする



出力電流 550mA ~ 1.05A で CCM

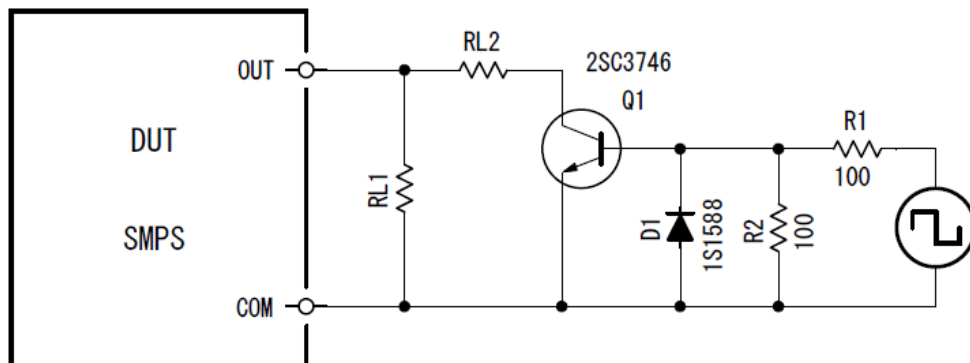


出力電流 50mA ~ 1.05A で DCMとCCMに変化したとき



出力過渡応答波形観測

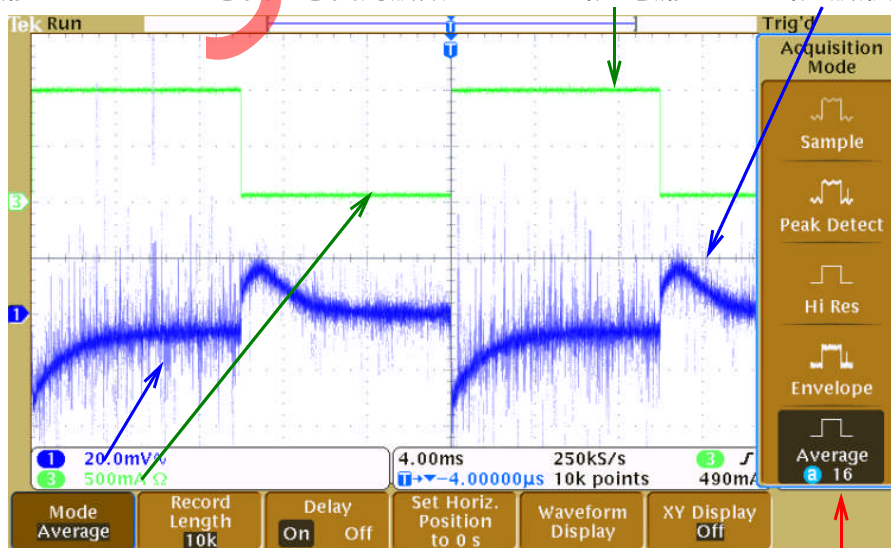
Q1をオン・オフし、出力電流を急変させ、そのときの出力電圧の変動を観測します。



負荷電流 500mA ~ 1A 急変 急変周波数500Hz 出力電流 出力波形変動



負荷電流 50mA ~ 1.05A 急変 急変周波数50Hz 出力電流 出力波形変動



いずれの観測も波形を平均化しています。