

超低ノイズ特性を実現した オーディオ用スイッチング電源

瞬間的なピーク電流供給能力と
素直な負荷の過度応答特性も実現

有限会社 フィデリックス
代表取締役 中川 伸

中川 伸とフィデリックスの紹介

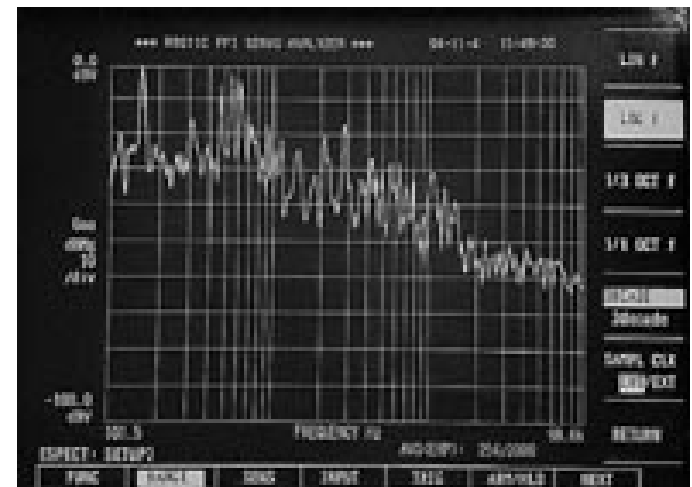
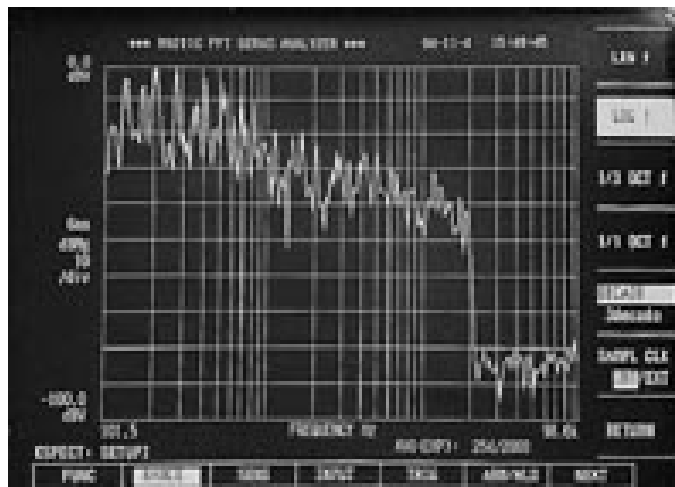
- 1967年 中部工業大学電子科入学（この時すでに大のオーディオマニアであった）。2年生の時、超低歪オーディオアンプの発明をし、ソニーへ無試験入社する運びとなり、中退する。
- 1969年 ソニーでオーディオアンプ（TA-1120F）の設計に携わる。以後、アイ電子測器、理経を経て、スタックスでもアンプ（DA-300、SRA-12Sなど）やコンデンサー・カートリッジの設計をする。
- 1976年 フィデリックスを設立し、高級オーディオ機器の設計、製造、販売を本職としながら、NTTや大学の研究所、および測定器メーカーからの依頼で特殊な装置の開発を手がけ、現在に至る。
- 最近では、後述するようCDの音質を修復するハーモネーター（SH-20K、AH-120K）や待機電力が少ない電源、高調波対策をした、高効率な電源の発明をする。
- 2007年現在、九州大学大学院後期博士課程に在籍中

FIDELIX

1980年頃の中川 伸(写真中央)

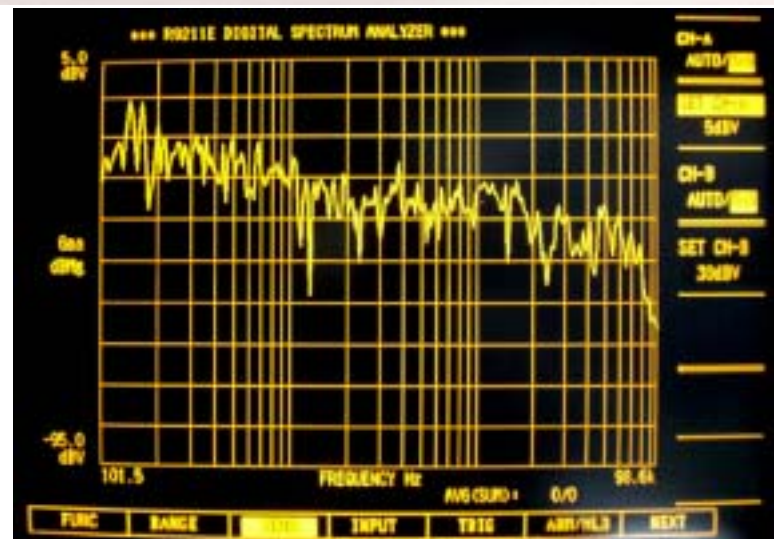
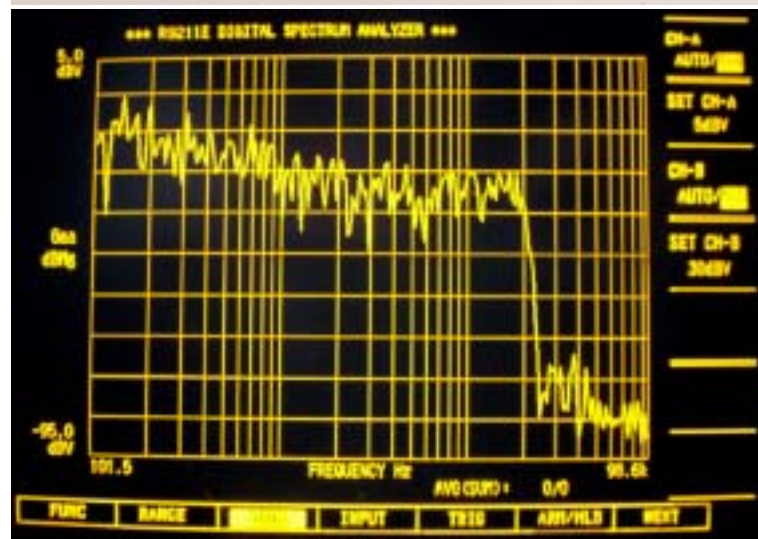


'94年発売のフィデリックス製SH-20K



FIDELIX

'06年発売フィデリックス製AH-120K



最近になってなぜスイッチング電源やクラスDやデジタルアンプなのか？

- キーワードは省スペースと環境で、小型軽量化は省資源となり、輸送コストをも低減する。
- 高効率や低待機電力の省エネ化は直接CO₂削減となる。
- 将来はヨーロッパにおいて、オーディオ機器はスイッチング電源でないとCEマーキングが許されなくなるかも？（検討を始めているとの噂もある）
- 課題は電源高調波やEMCノイズなどの電磁環境もあるが、最も重要なのは高音質化が可能か否か。
- なお、クラスDはスイッチング動作で、デジタルアンプはデジタル信号を入力可能なものとの見解も。

最近のオーディオ事情

- 最近のオーディオは2極化している。一方は音楽を高音質で楽しむもの。もう一方はAV再生で限りなく映画館に近づけるもの。後者は爆弾や銃や地響きなどを全方向から5.1チャンネルで出すことも想定されるため、全チャンネルが大出力でしかもコンパクトなアンプが要求されている。
- 特に後者の事情からデジタルアンプやスイッチング電源化の流れに至っている。

オーディオにおけるスイッチング電源の歴史

- ・ 1977年に、ソニーがオーディオ機器に世界で初めてスイッチング電源を採用したアンプとしてTA-N88を発売した（なんと先進的なD級アンプでもあった）。他社もこれが良さそうに思ったらしく、一斉に追従したが、いずれも市場での評判は芳しくなく、まもなく全て姿を消してしまった。殆どのメーカーが最終的には叩き売って赤字だったとのこと。
- ・ 今にして思えば、スイッチングノイズが音質的に悪影響を及ぼしていた可能性が非常に高い。

FIDELIX

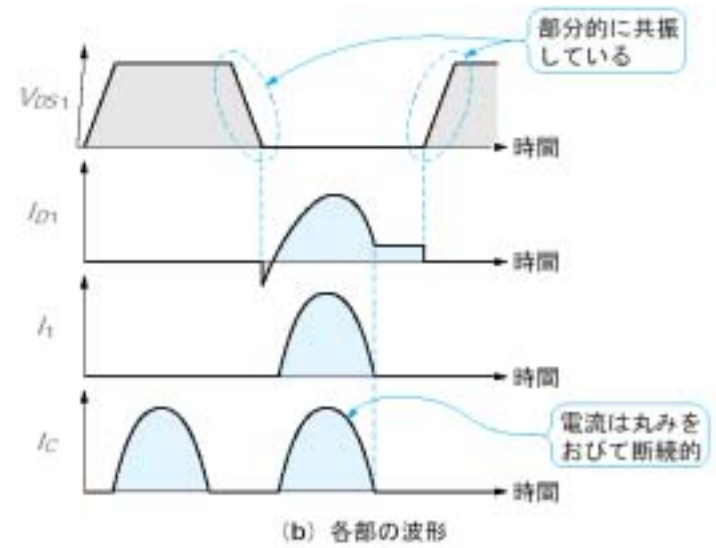
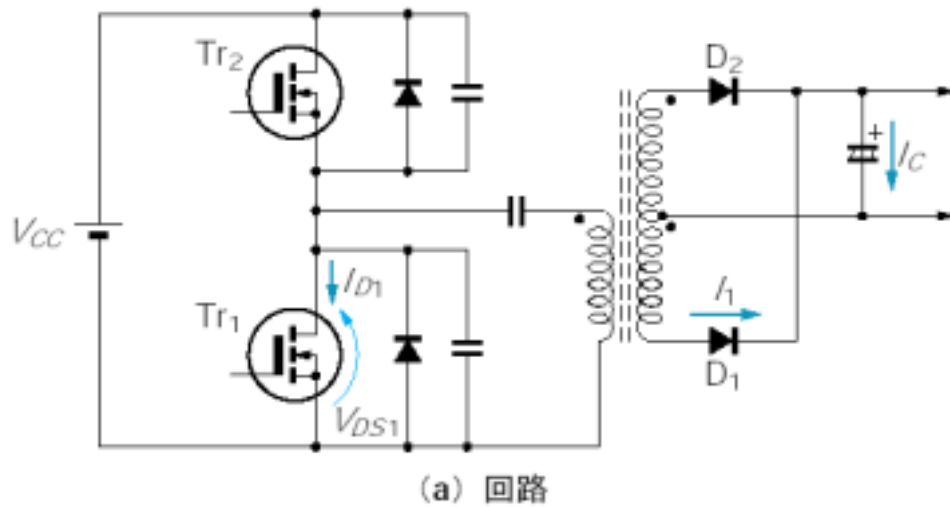
TA - N 8 8の外観



P S 電源の登場

- 1991年になって、ヤマハから電圧共振と電流共振が交互に表れる複合共振動作をし、極めてスイッチングノイズの少ないP S電源が発表され、ようやくオーディオに使えるスイッチング電源が初めて誕生した。翌年にはヤマハの業務用のアンプにP S電源が搭載されることになる。したがって、この間に十数年間のブランクがあったことになる。ちなみにP S電源のPはパラレルのPでSはシリーズのSで、並列共振と直列共振が交互に現れることから命名されたと推測される。

PS電源の動作



P S 電源はなぜ良かったのか

- 第一にスイッチングノイズが非常に少なくなるよう Z V S (Zero Voltage Switching) と Z C S (Zero Current Switching) の両方のソフトスイッチングを使っていた。これはやがて複合共振と呼ばれることになる。共振動作が加わることで電圧波形や電流波形が丸みを帯び、スイッチングノイズの高調波成分が非常に少なくなる。
- 第2に制御を掛けていないので応答が非常に素直であった。
- 第3にコアが飽和することが無いのでピーク電流供給能力に優れていた。
- 今にして思えば、オーディオ用スイッチング電源の要求を殆ど満足していたといえる。

今日まで、高級オーディオ機器に使われたことのあるその他の電源方式

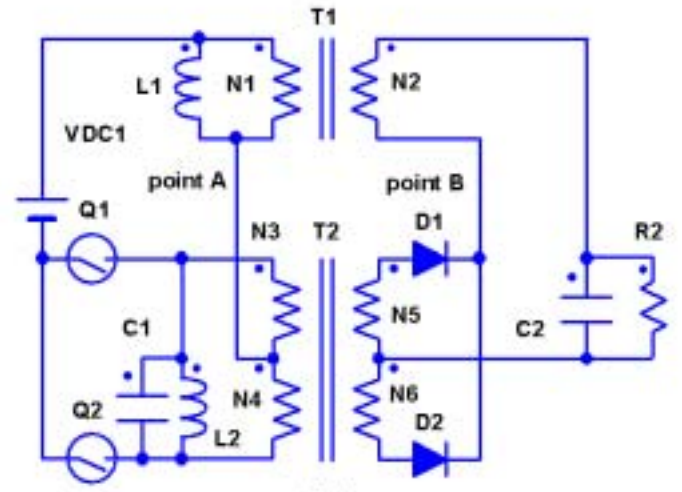
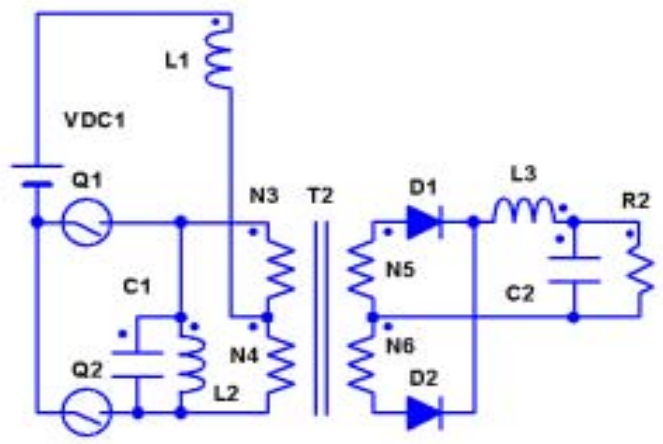
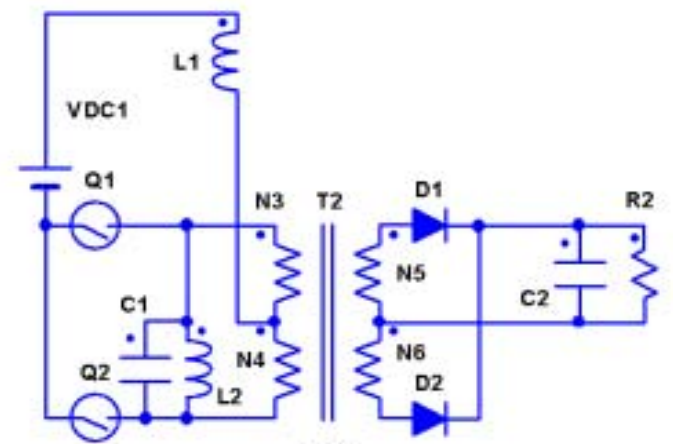
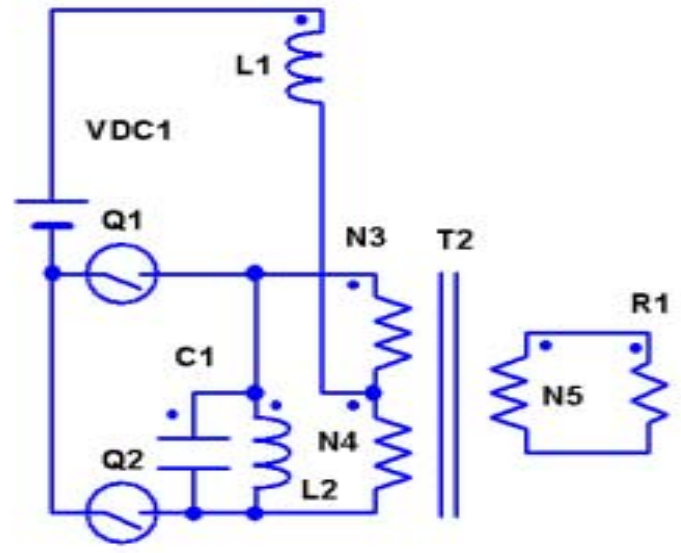
- SMZ(サンケン電気)
 - PS電源に制御を掛けるようにした
- 部分共振(VICOR)
 - アクティブクランプとも言われスイッチングノイズが少ない
- 擬似共振
 - ターンオンだけソフトスイッチングになる
- マグアンプ
 - ノイズが少ないと言われている

オーディオ用電源で重要なのは スイッチングノイズが少ないことと応答特性

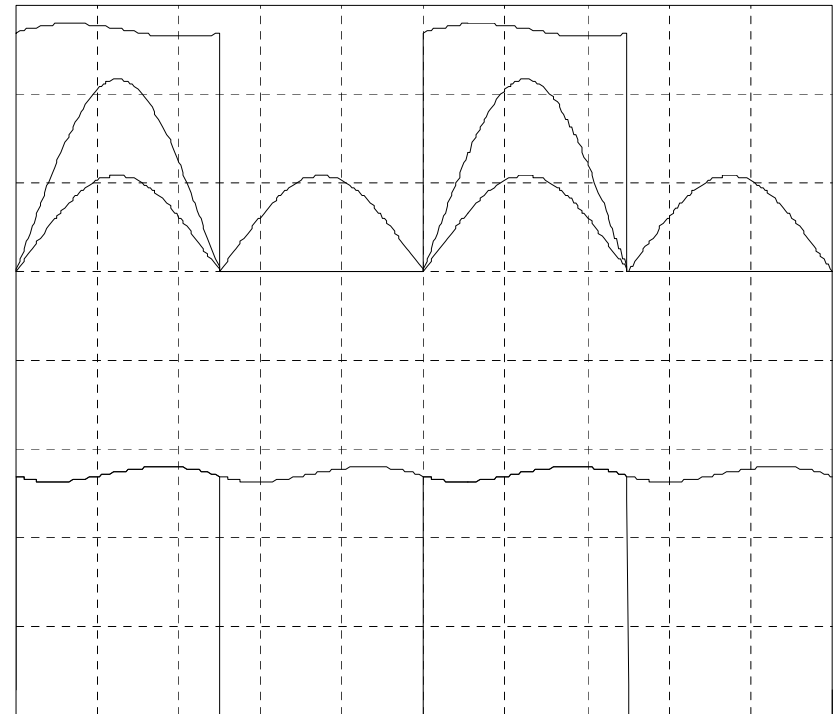
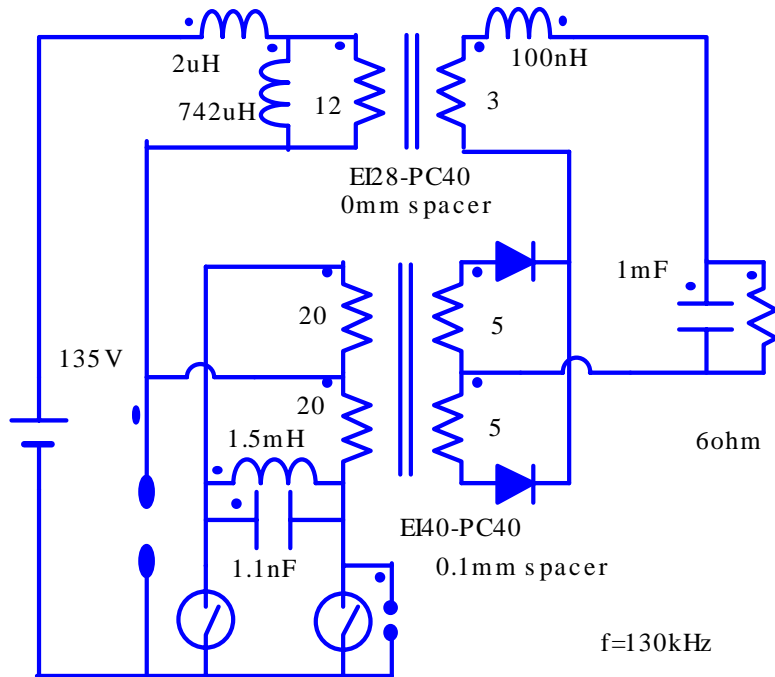
- オーディオ業界ではスイッチングノイズが少ないことが音質的に重要であることは経験上よく分かっている。スイッチングノイズが多いとなぜか高音がぎらぎらする。しかし、スイッチングノイズが音質に悪影響を与えるメカニズムはよく分かっていない。
- ノイズでノーマルモードとコモンモードのうち、下げにくいコモンモードを重視して下げなくてはならない。
- そのためにはZCSよりもZVS動作が適していそうで、さらに、シールド技術を併用してノイズを下げる。
- 負荷変動に対する応答の振る舞い方で、瞬間的な負荷電流の供給能力と、その応答波形が音のパワー感や音色に影響を与える。

共振型ロイヤコンバータの欠点と その改善方法

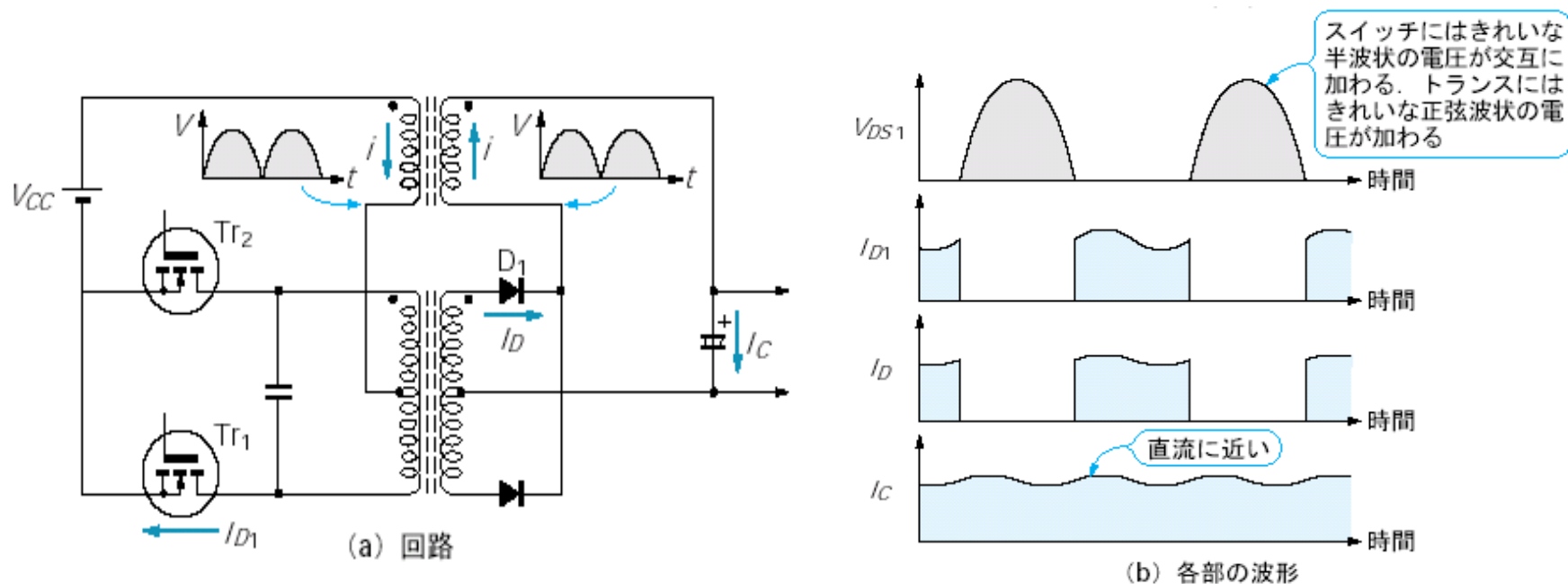
- サイン波のためDC出力では2次整流の力率が悪くなり、リップル電流も多くなる。
 - チョークインプットにすれば力率が向上し、リップル電流も少なくなる。
- 大電流時にはチョークが磁気飽和を起こす。
 - 2次にチョークを設け、1次と2次のチョークコイルを結合させればチョークは飽和しない。
- 時比率50%なので制御が掛けられない。
 - 掛けないからこそリングングが生じず返って安定。



SCATでシミュレーションし、実験してみるとまずまずうまく行った



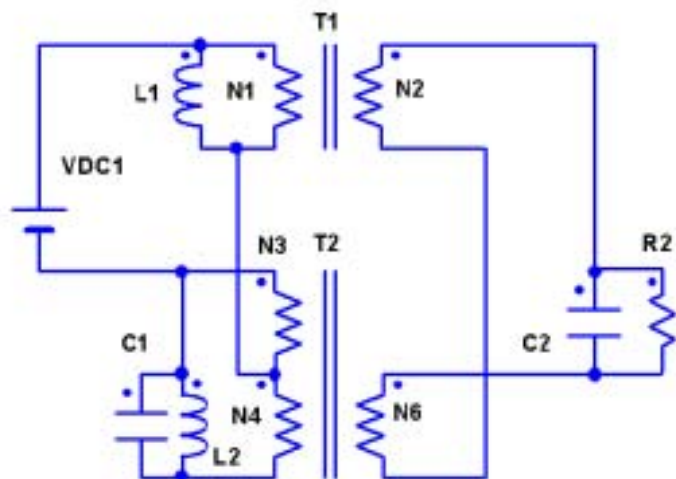
セリニティ電源の動作 (serenity power supply)



聴覚のためにスイッチング周波数は 90 kHz以上にしたい。

- 古い常識からCDのサンプリング周波数は44.1 kHzに決められ、再生可能周波数は約20 kHzまで。
- 90 kHzまで聴覚は必要であると大橋力（おおはしつとむ）教授が1984年に論文発表する。
- アメリカの学者は耳を解剖し、その構造寸法から可聴周波数上限を計算したら、約90 kHzであり、これは前記論文やその後のフィデリックス実験ともよく合っている。
- いくつかのCD音を修復する技術が出現。
- その後、SACDやDVDオーディオが出現し、約90 kHzまでを再生可能にした。
- フィデリックス製SH-20KとAH-120Kの修復技術
- 結論として20 kHz以上は単独では聴こえないが、20kHz以下と混ぜると音質に影響を与えることが判明。

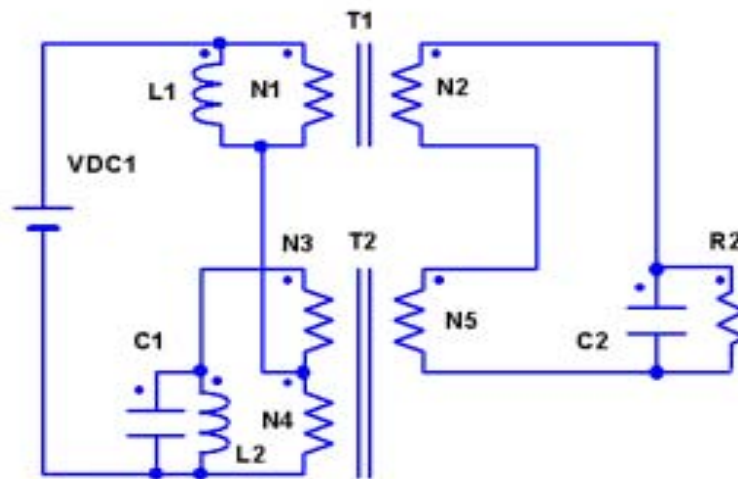
共振周波数について



STATE 1

$$f = \frac{1}{2\pi \sqrt{C1 \times \frac{4L1 \times L2}{4L1 + L2}}}$$

上式には誤差があり、その原因は、L1にはスイッチング周波数ではなく、その2倍が流れていることにあった。



STATE 2

$$f = \frac{1}{2\pi \sqrt{C1L2}}$$

実質的にはこれでほぼOK

電圧の式

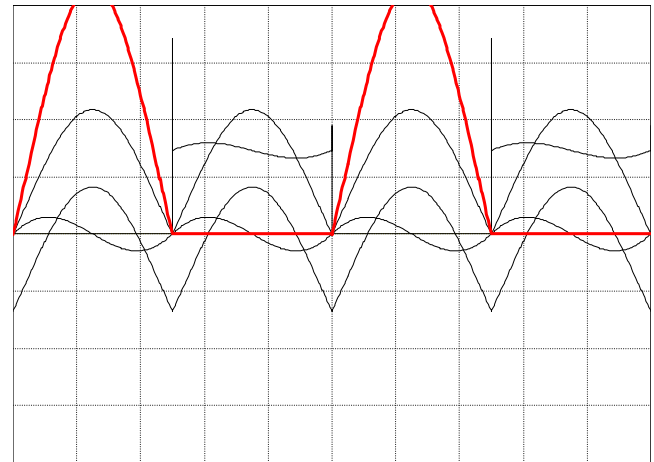
$$V_{sw} = V_{in} \times \pi \times \sin \theta$$

$$0 \leq \theta \leq \pi$$

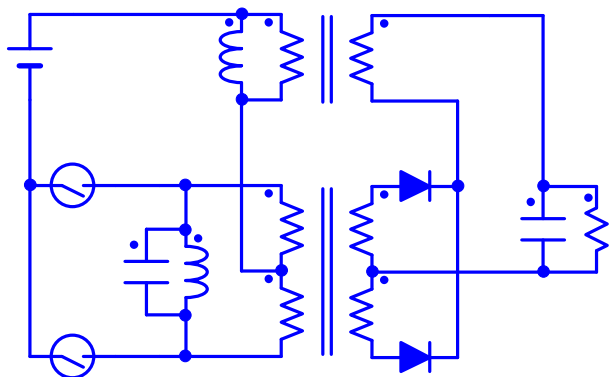
$$V_{sw} = 0$$

$$\pi \leq \theta \leq 0$$

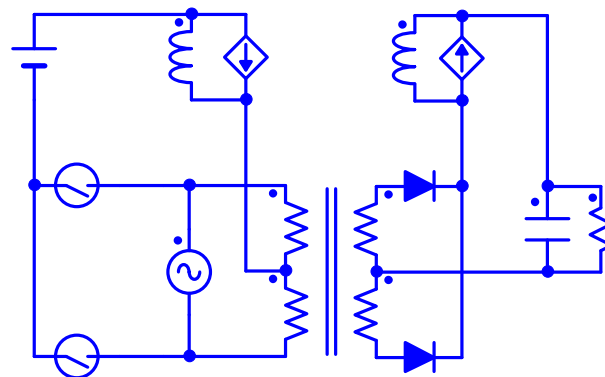
$$V_{cent} = \frac{V_{in} \times \pi \times |\sin \theta|}{2}$$



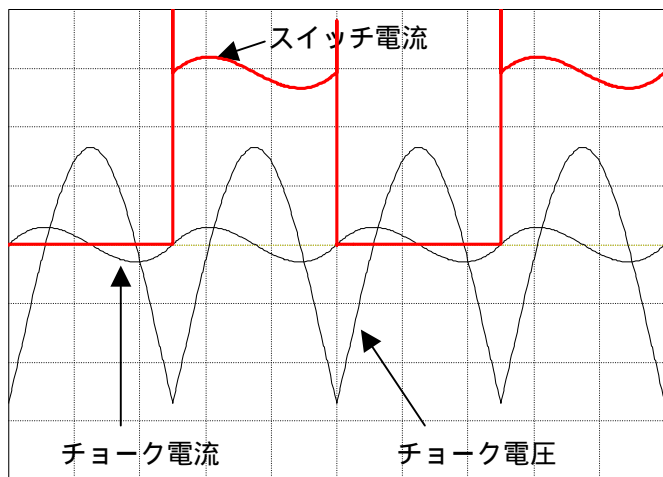
チョークに流れる電流波形



LCの共振電流はスイッチには流れない



チョークのインダクタンス値が無限の場合はスイッチとダイオードの電流は方形波になる



$$\frac{di}{dt} = \frac{V_{in} - \frac{V_{in} \times \pi \times |\sin \theta|}{2}}{L1}$$

上式のインダクタンス電流を方形波に重畳した電流がスイッチの電流となる。

きれいなサイン波で動作した セリニティ電源の実験波形

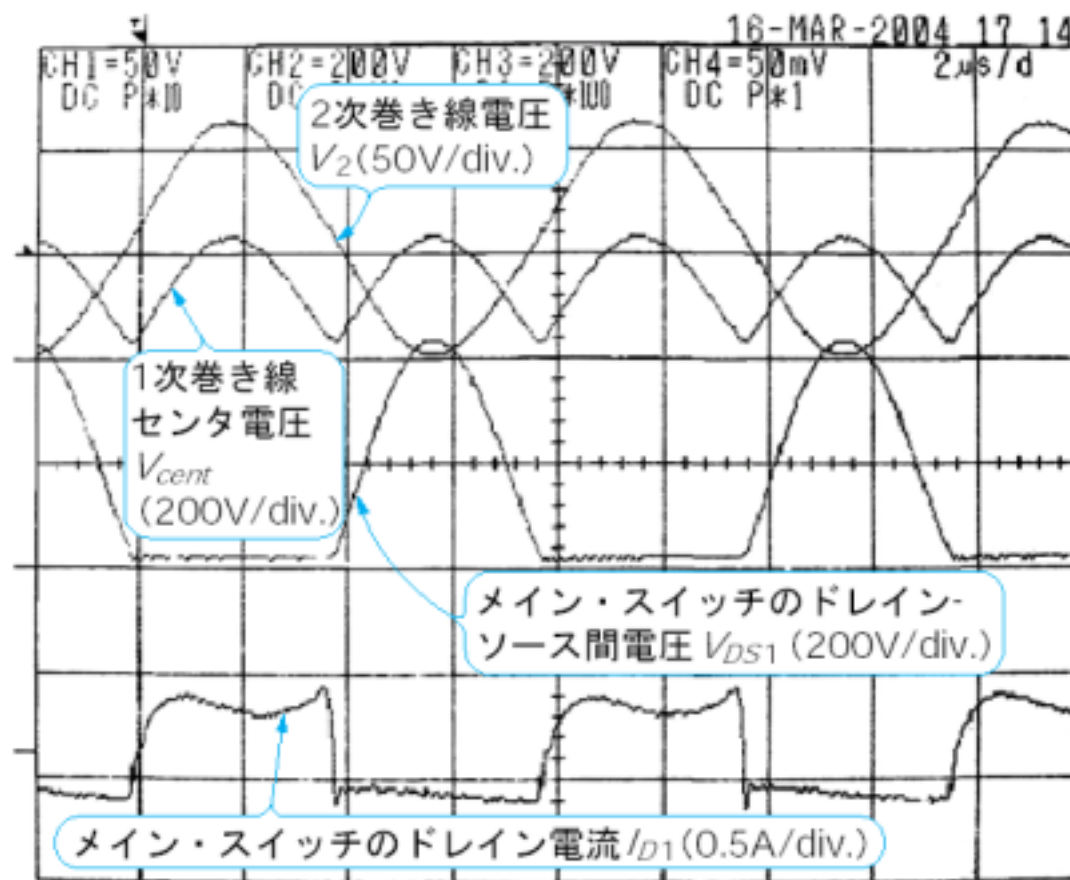
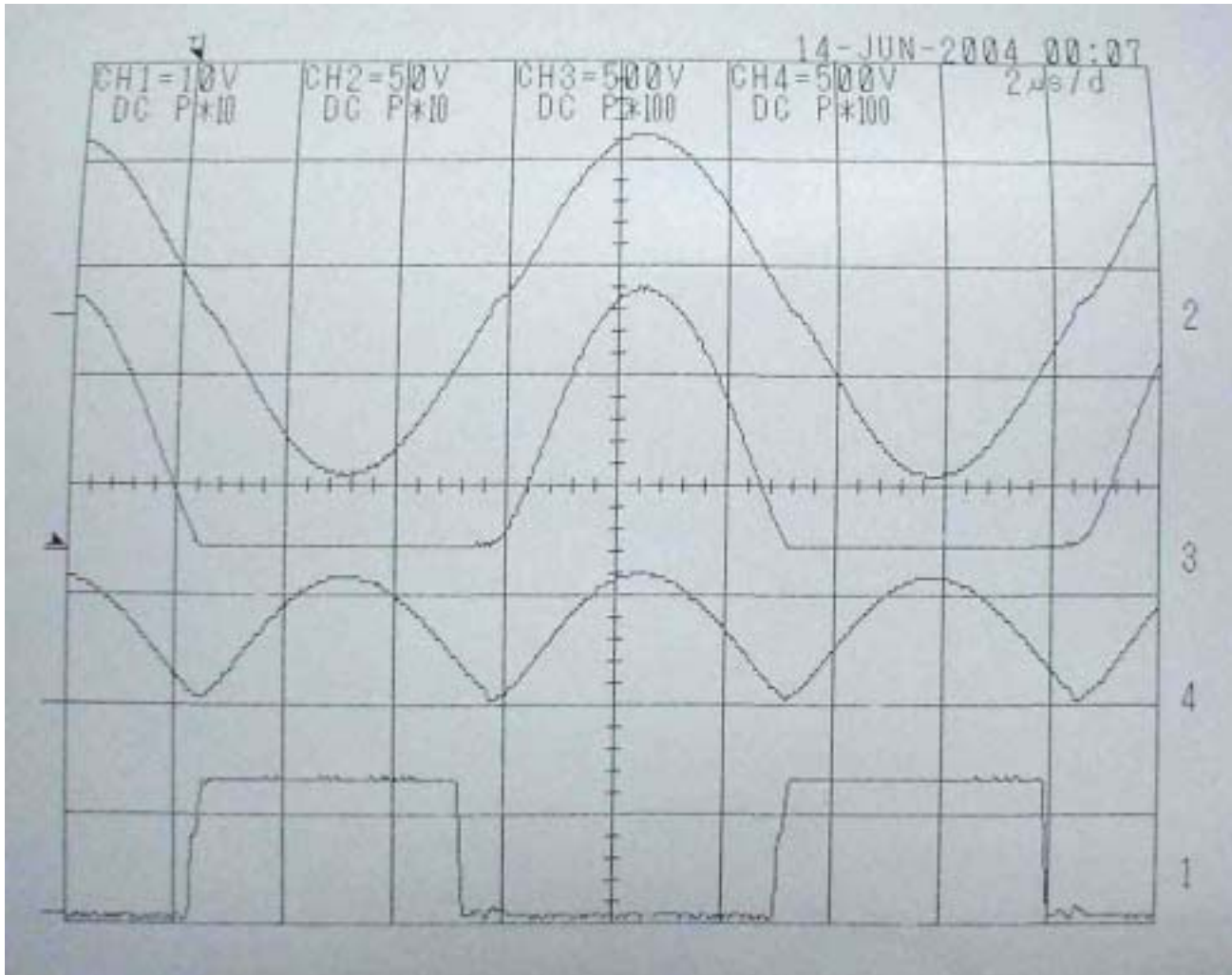


図7 試作したスイッチング電源の動作波形

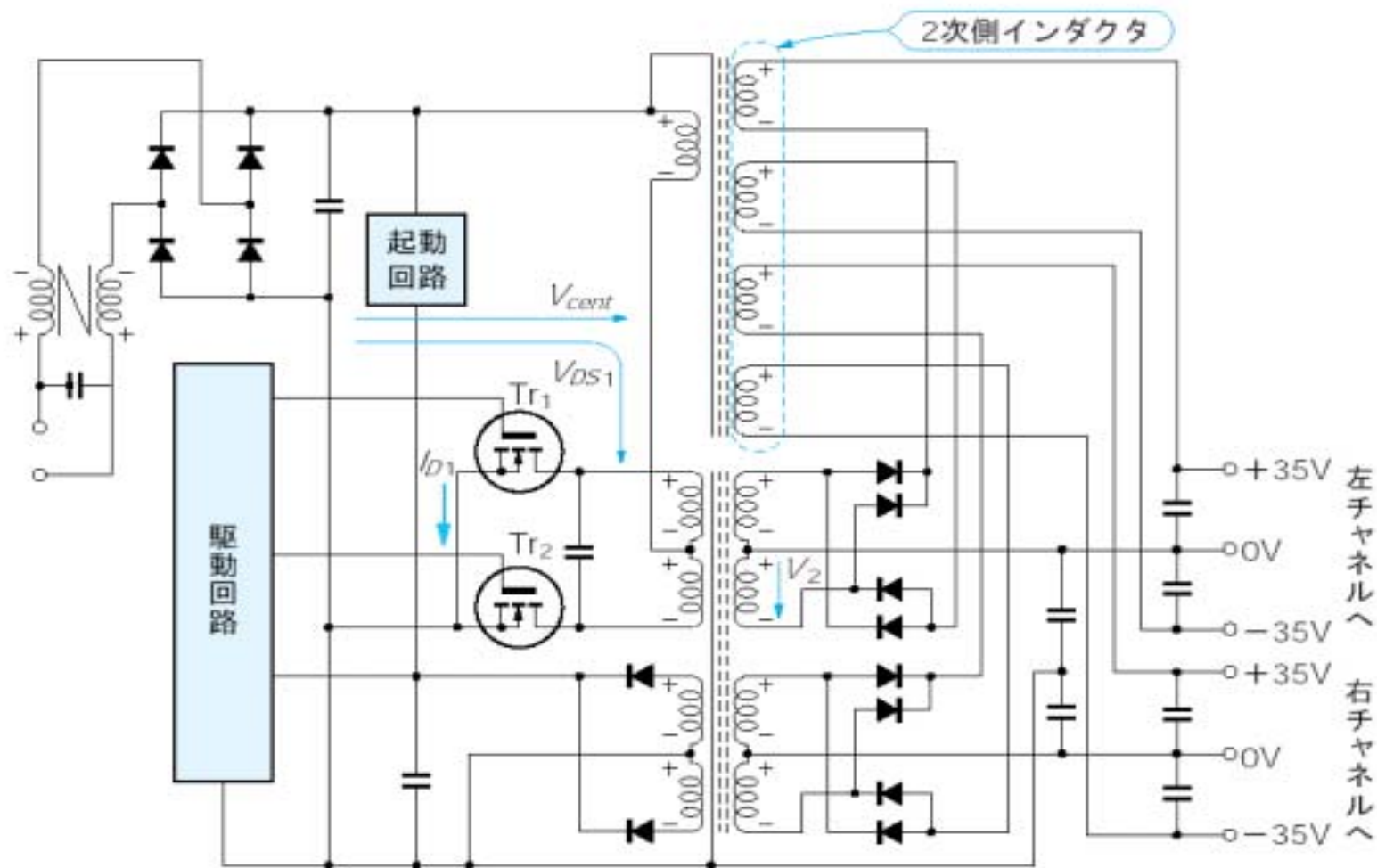
1500VのIGBT(TOSHIBA GT40T301)による波形



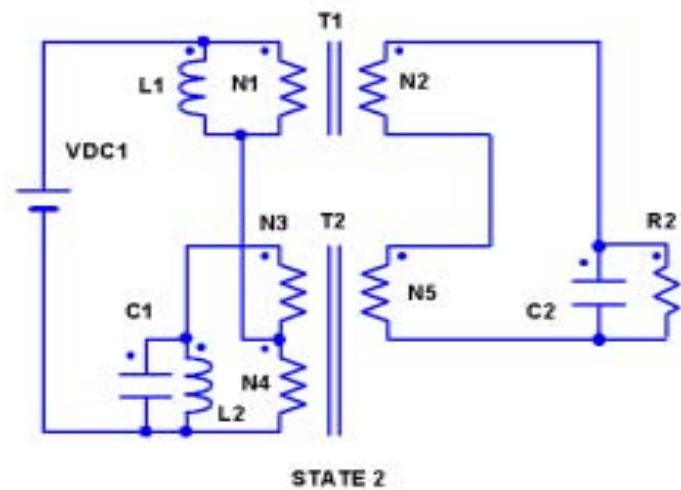
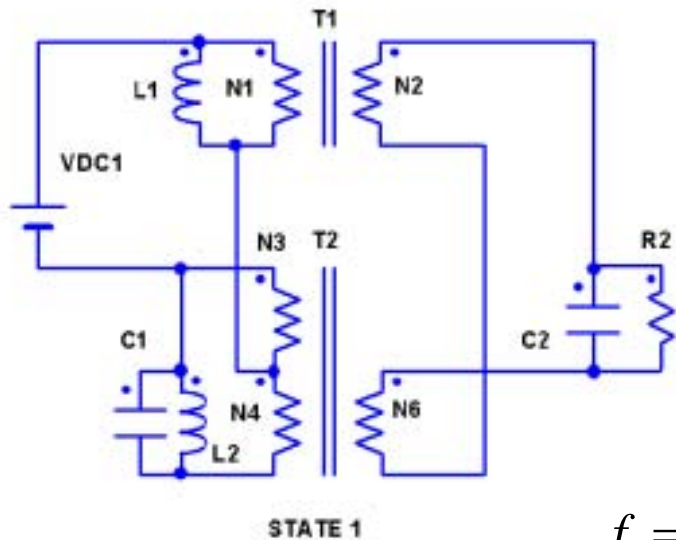
最適なスイッチング素子と、 その駆動方法（他励化）

- 大きなバイポーラトランジスタは50kHz位だとうまく動作するものが存在するが、まだ遅い。
- IGBTはかろうじて90kHz以上で動作する。
- 自励の場合、MOSFETは早すぎて同時オフができてしまう。
- 結局、MOSFETかIGBTを他励で駆動するのが最も好ましく、ピーク電流の供給能力から電流素子よりも電圧素子であるFETやIGBTの方が好ましい。
- バイポーラトランジスタはベース電流の h_{fe} 倍以上は流れない制限もできてしまうので、負荷電流の変動が少ない場合なら使える。

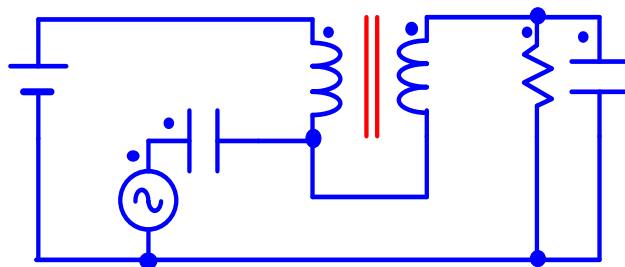
実際のセリニティー電源の回路



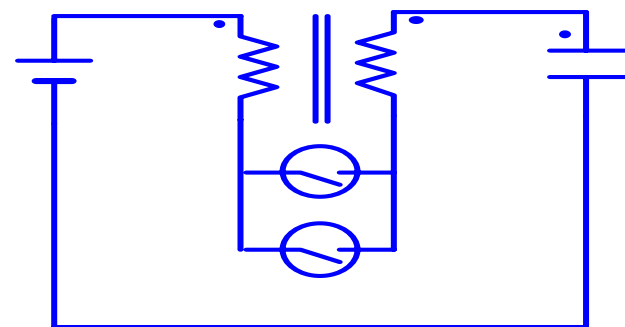
セリニティー電源の動作状態



$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{C1L2}}$$



コモンモードチョークに似た動作
なので大電流でも飽和しない。

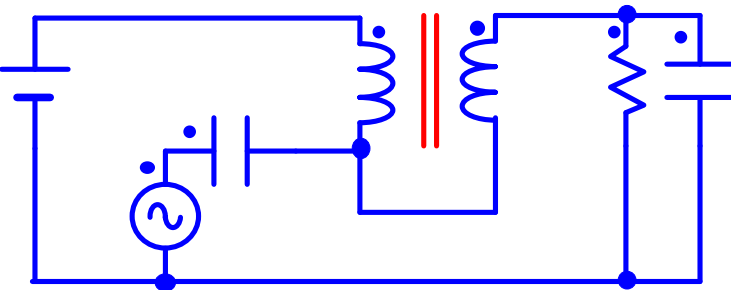


スイッチ電流は方形波で
入出力電流ともに直流に近くなる

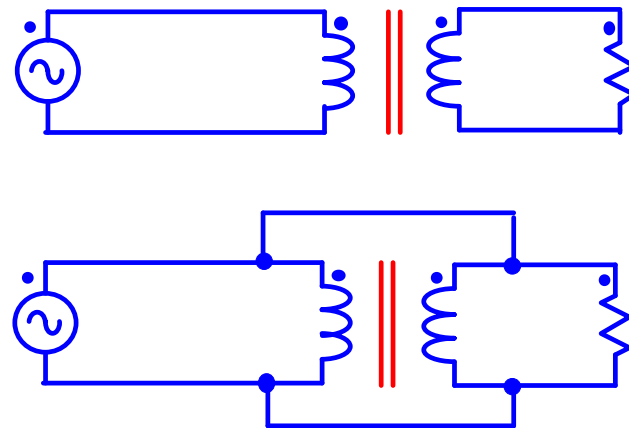
セリニティー電源の コアが飽和しない理由

(1次と2次が同じターン数の場合で説明)

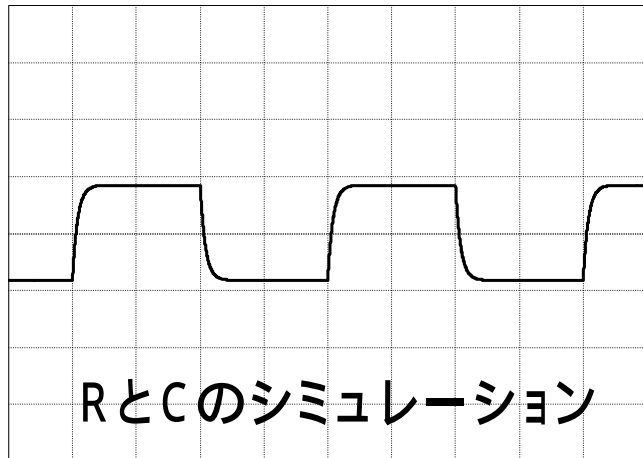
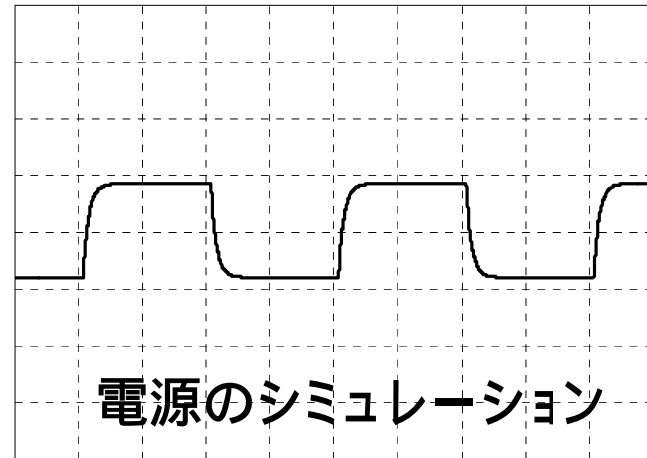
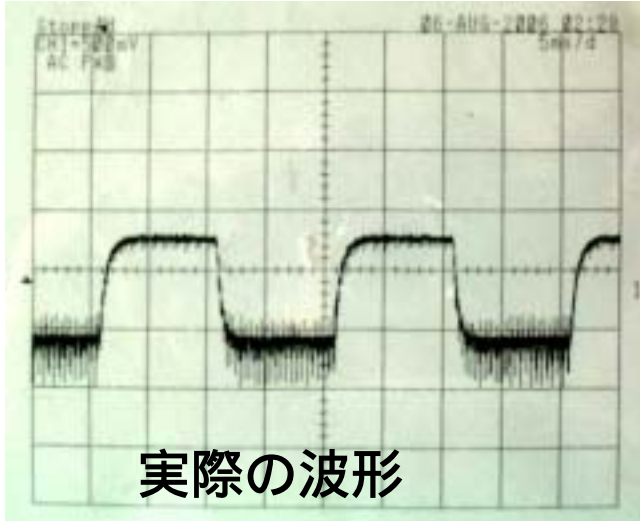
チョーク側は下図と同じ
ことなので飽和しない



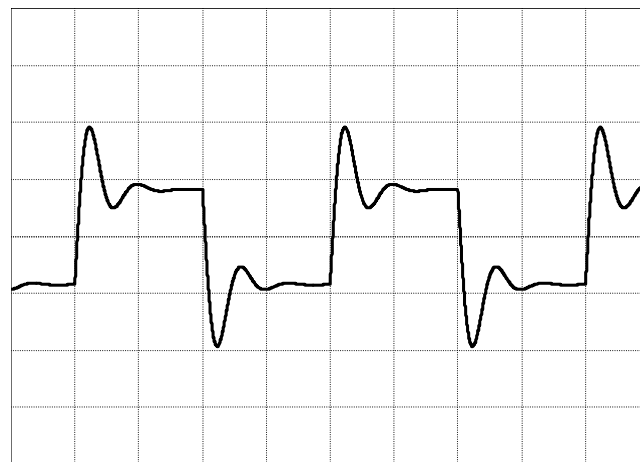
トランス側はコアにとって上と下
が等価なのでやはり飽和しない。



負荷変動に対する応答

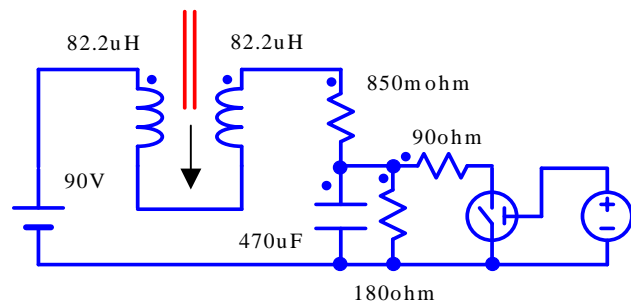


・電源の出力インピーダンスに含まれるインダクタ成分が圧倒的に少ないスイッチング電源方式である。



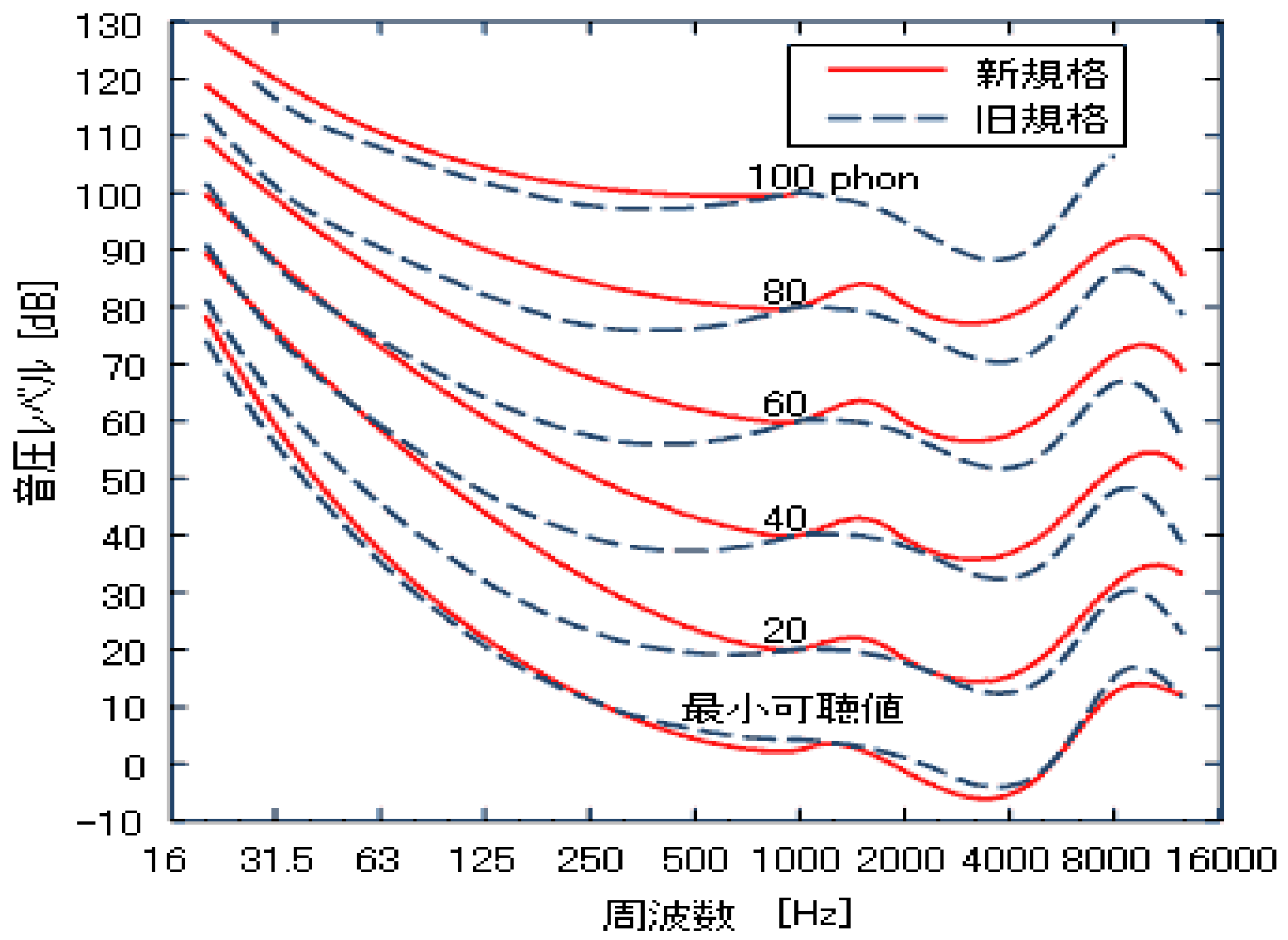
結合しない電源のシミュレーション

LとRとCのシミュレーション



・結合しない場合に比べ、インダクタ成分が激減するので、瞬間的な電流供給能力が高まり、リングングも生じないのでオーディオ用に最適。

フレッチャーマンソン曲線



ノイズ規格を約30 dB下回るノイズ量

スペアナ入力無し
のノイズ0~30MHz

セリニティー電源
のノイズ0~30MHz



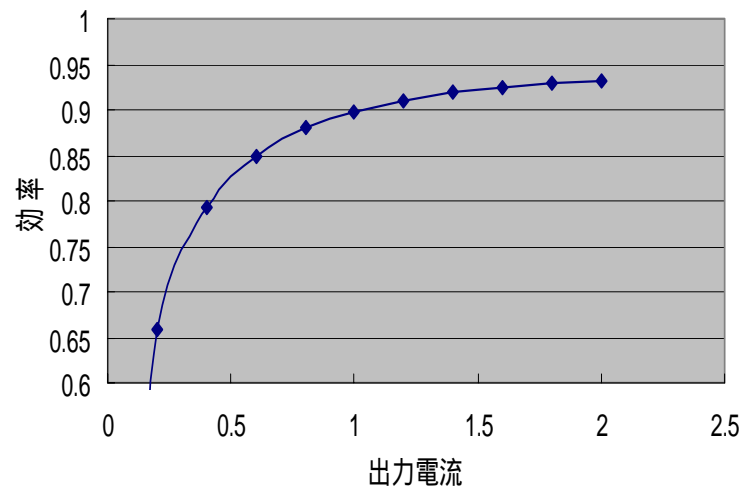
セリニティー電源の電圧安定性

- 負荷変動については2%程度でますます良い。
- 入力電圧変動は比例関係で出てしまう。
- つまり商用周波数の電源と同じ性質なので、アナログアンプでは特に問題とはならない。しかし、デジタルアンプには適合するものと適合しないものが有る。

セリニティー電源の効率

入力電圧	入力電流	出力電圧	出力電流	効率
140.013	0.067	92.71	0	0
139.985	0.2	92.05	0.2	0.65757
139.953	0.331	91.78	0.4	0.792497
139.926	0.463	91.58	0.6	0.84815
139.895	0.594	91.39	0.8	0.879833
139.867	0.726	91.23	1	0.898433
139.837	0.859	91.09	1.2	0.90999
139.808	0.992	90.97	1.4	0.918296
139.778	1.125	90.84	1.6	0.924285
139.749	1.258	90.73	1.8	0.928954
139.718	1.392	90.62	2	0.931885

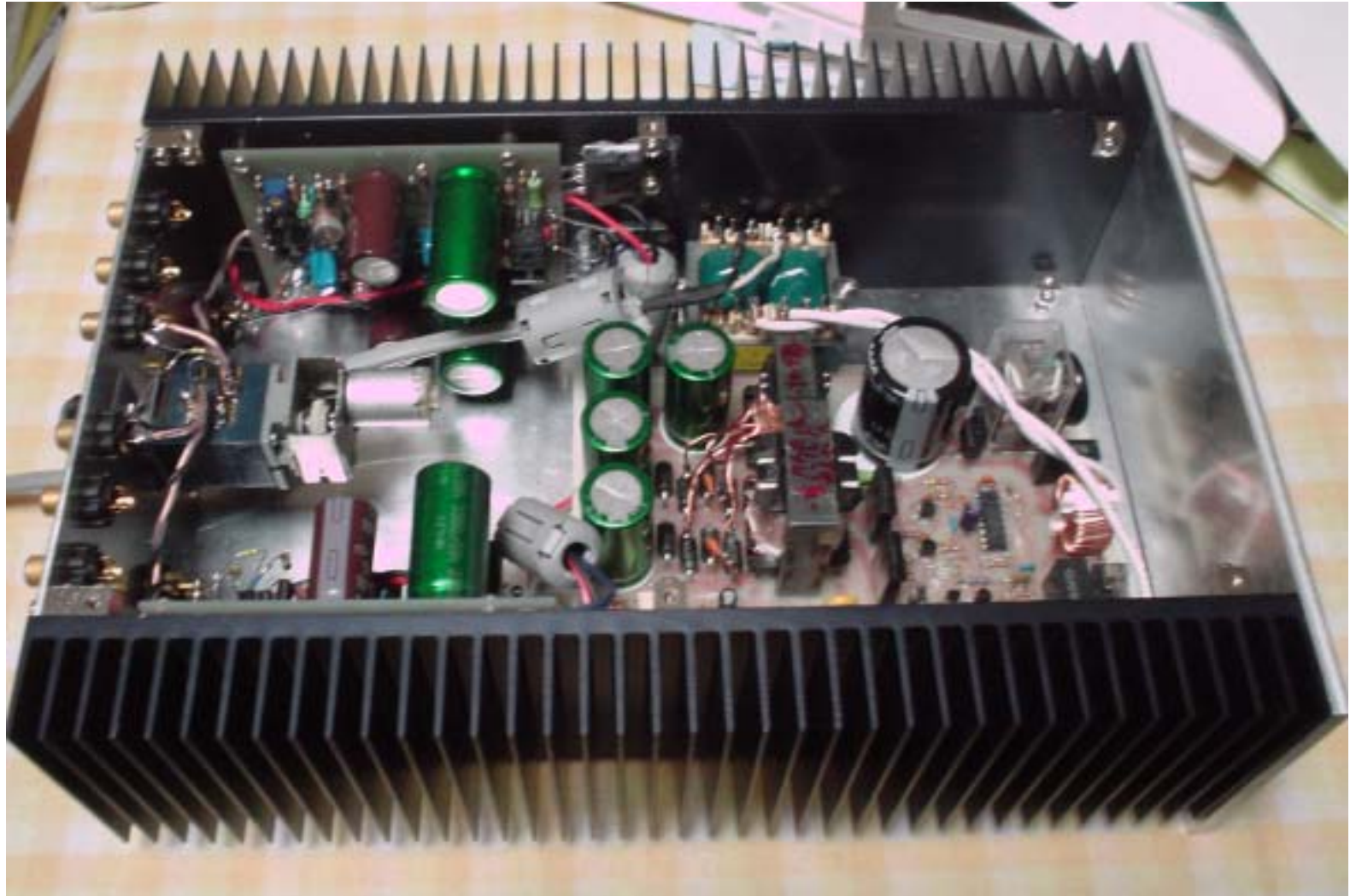
セリニティー電源の効率(DC140V入力、 $\pm 45V$ 出力)



- ・スイッチングノイズが減り、効率が落ちがちなノイズ対策は不要。
- ・電流が方形波に近いので実効電流が少なく、高効率にできる。

FIDELIX

AB級アンプと組み合わせ、その音質は非常に評判が良い



セリニティー電源を使った試作アンプの評価

S T E R E O (音楽の友社) 2006年3月48 ~ 49Pにオーディオライター村井裕弥氏による以下の記事が掲載されました。タイトルは「アンプを組むにも一思案」で記事の要約は、高価なスピーカーのローンが終わったので、新たなアンプを買おうと、高級アンプ何機種かを自宅試聴した。約220万円のヴィオラ、約168万円のゴールドムンド、約23万円のAH! (アハと読む)、357万円のハルクロ、126万円のソニーなどを比較した。迷った挙句に357万円のハルクロを発注した。

上記の記事中で、フィデリックスのセリニティー電源を使った試作機のアンプ(クロスオーバー歪の出ない特殊なAB級)は以下のように紹介されています。

そういえば、この頃わが家にフィデリックスの試作機もやって来た。この試作機を体験すると、さっきまでノーメイクと思っていたゴールドムンドの「ごくごくわずかなお化粧」がわかるようになってしまったから恐ろしい。「ひよっとすると、世界一ストレートなアンプかも」と食指が動きかけたが、「発売日未定」と言われ、泣く泣く候補リストから削除(なお、発売されるとしたら30万~40万とのことだった)。

D級アンプと組み合わせた例



オーディオ用スイッチング電源に 要求される性能のまとめ

- スwitchングノイズが多いと高音がぎらぎらするので、スイッチングノイズを極限にまで下げるとともに、スイッチング周波数は90kHz以上に！
 - 君子危うき似近寄らず
- 素直な応答特性
 - リンギングが音質に色付けをする
- 負荷変動に対しピーク電流供給能力が必要
 - 打楽器系などのアタック音に対する追従性は、瞬間的な負荷電流の供給能力と、その応答波形が音のパワー感や音色に影響を与える。
- 高周波のリプル電流がなるべく少ないこと
 - 必ずしも高周波のリプル許容電流が大きくないオーディオ用ケミコンが使える
- 高効率

セリニティー電源の特徴

- PS電源よりもコモンモードノイズが少なくなりそうな、電圧波形がサイン波状のZVSである。
- IGBTでもスイッチング周波数を90kHz以上にできる。
- 制御の抱える問題点が無いので応答が素直である。
- コアの飽和なしにピーク電流供給能力がある。
- PS電源よりもリップル電流が少ないので、必ずしもリップル許容電流が大きくはないオーディオ用ケミコンが使える。
- 高効率である。
- つまりオーディオ用にはさらに適していると思われる。

セリニティー電源の技術的な課題

- シールドや左右独立化や ± 2 電源化で漏れインダクタンスが増える。
- すると、少ない電流ではノイズが少ないが、電流が増えるとノイズも増える。
- ところが音質にとってより重要なのは、ピアノシモにおける部分であって、このときはノイズが少ない。
- +巻き線と-巻き線を独立にすることによってさらにノイズを下げられるか？
- 230V地域はIGBTの1200Vから1500V品が必要となるが、高速化とコスト

スタックス社のDAC TALENT BD バッテリードライブのDAコンバーター

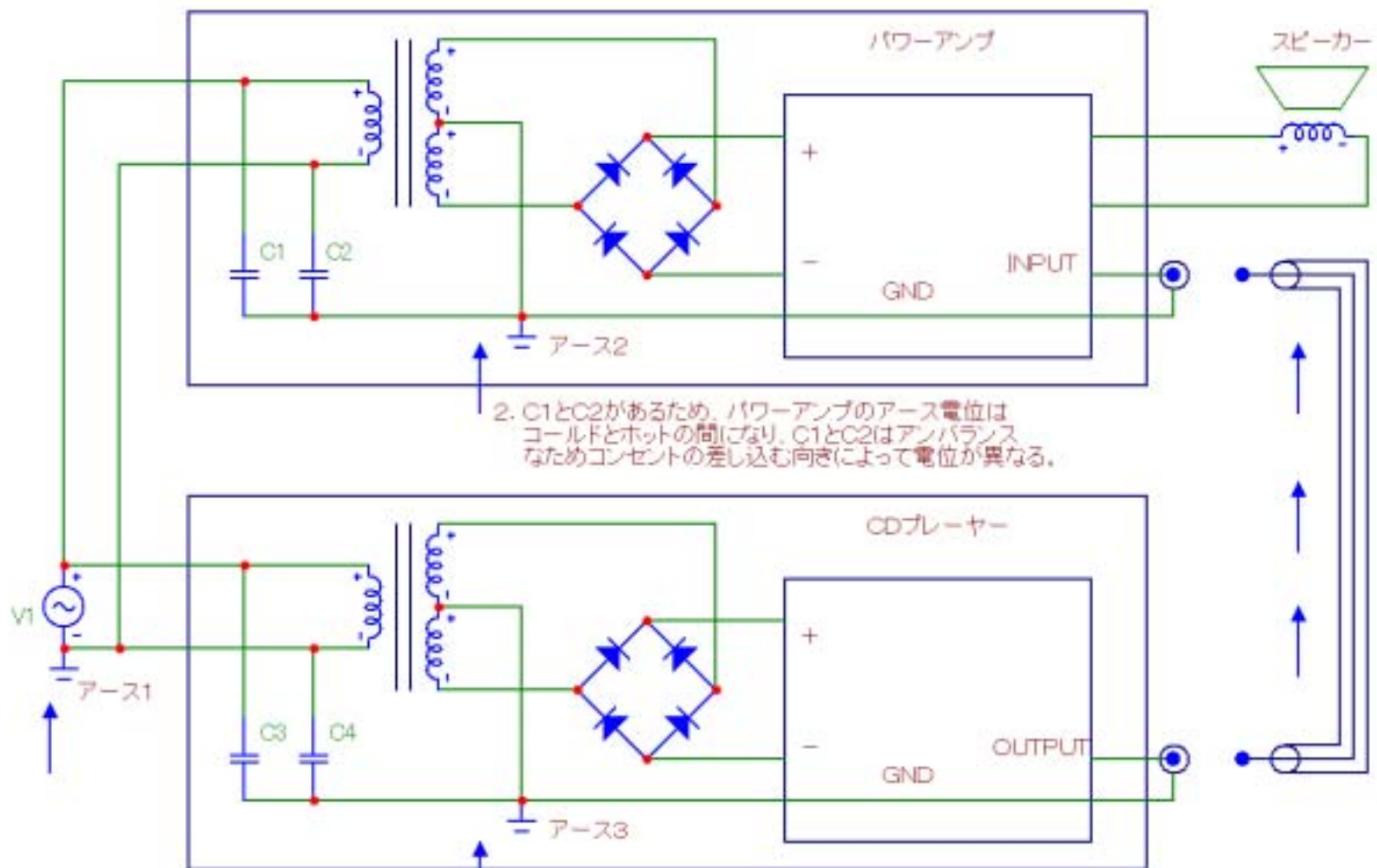


2組のバッテリーを備え、使っている方は電源ラインと完全に切り離され、使わない方に充電をする音にこだわった方式。動作中に、電源のコモンモード電流は流れない。



単一電池2本で動作するが、この時は内部でCD3VからDC6VにステップアップするDC - DCコンバーターが働く。ACアダプタの場合はDC6Vの動作で、DC - DCコンバーターは動作しないが、電池動作の方が圧倒的に音質が良いと言われている。電池動作の場合は、電源のコモンモード電流は流れない。

電源によって音が変わる推理

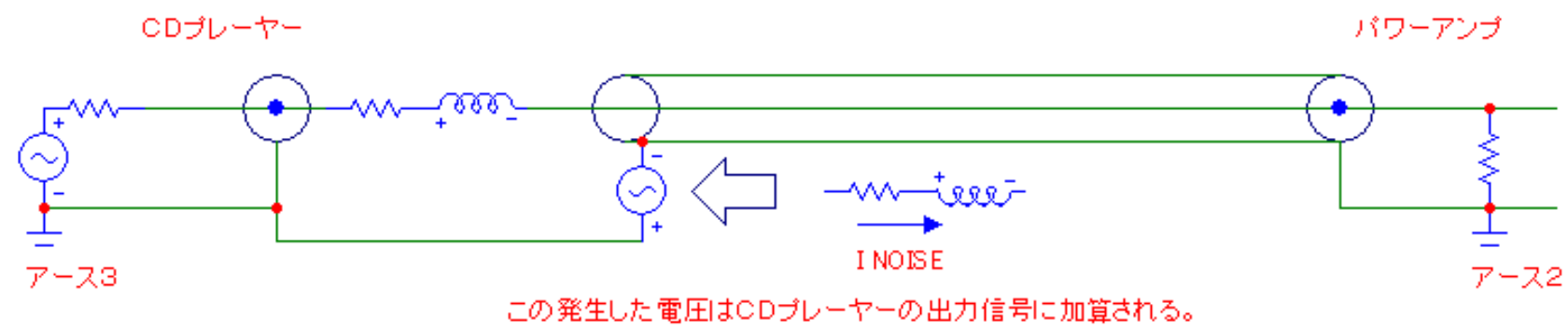
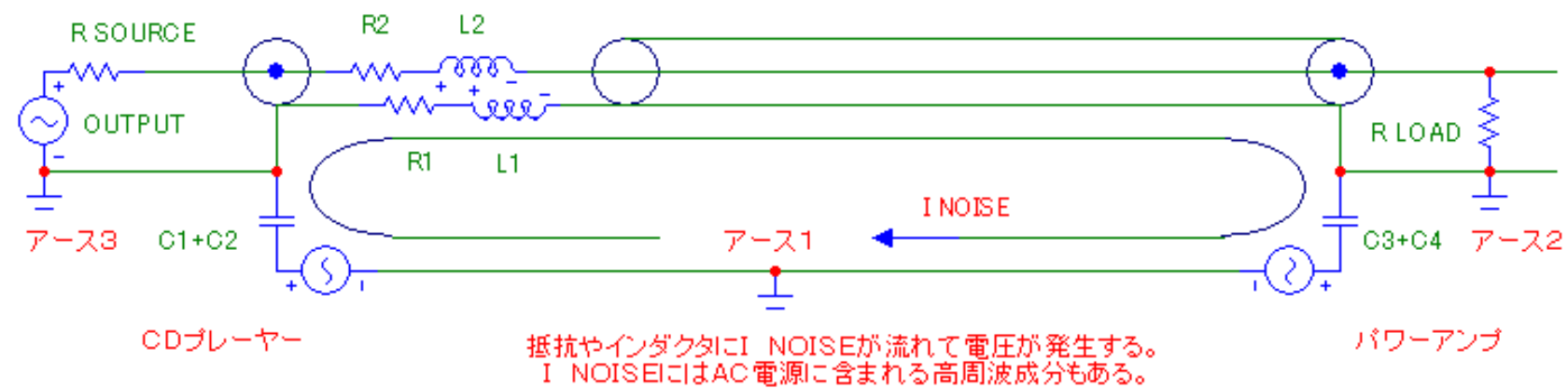


2. C1とC2があるため、パワーアンプのアース電位はコールドとホットの間になり、C1とC2はアンバランスなためコンセントの差し込む向きによって電位が異なる。

1. 商用電源は片側が大地に接地されているので、0V側(コールド側)と100V側(ホット側)が存在する。

3. C3とC4があるため、CDプレーヤーのアース電位はコールドとホットの間になり、C3とC4はアンバランスなためコンセントの差し込む向きによって電位が異なる。

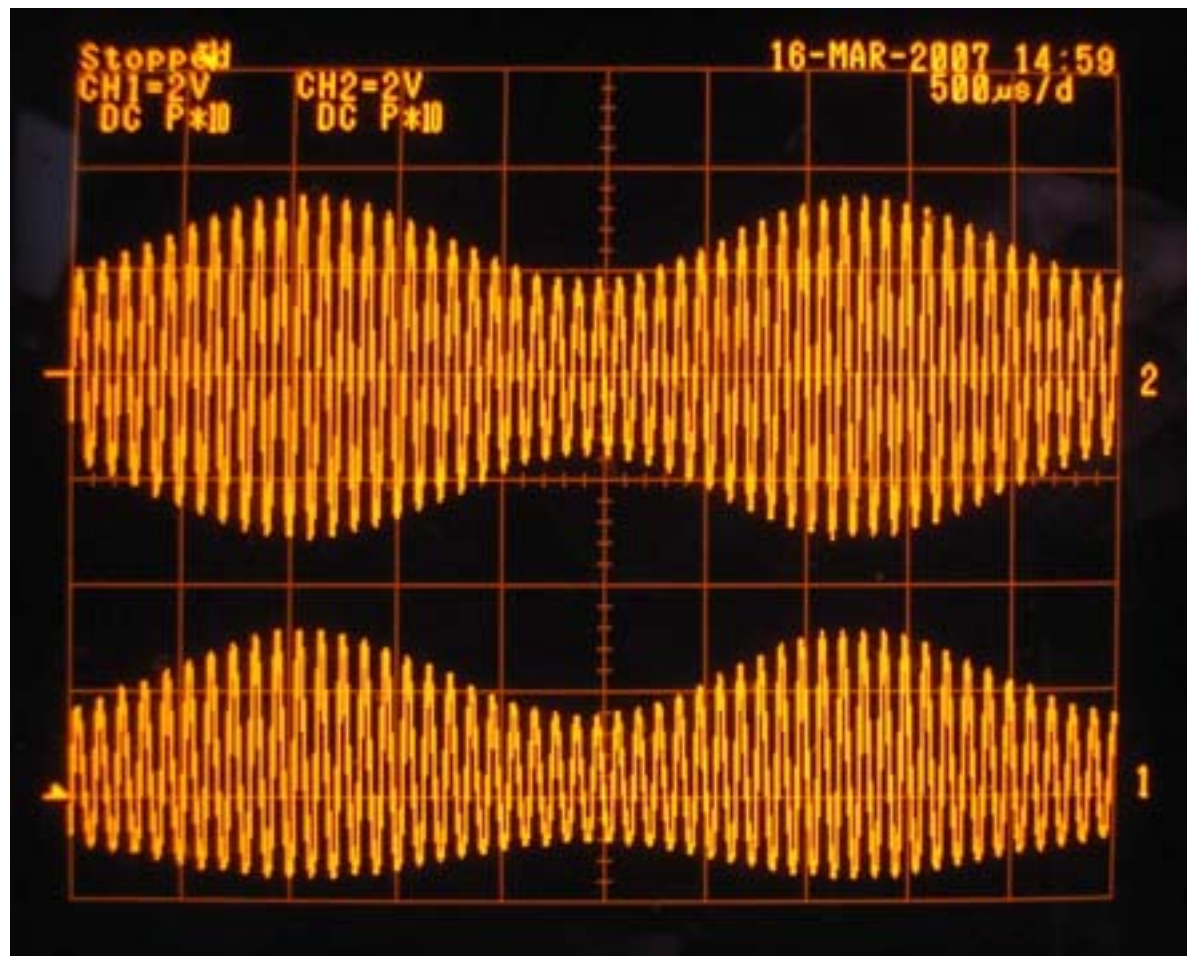
4. 信号コードを接続することで、アース2とアース3が同じ電位になるように電流が流れる。



FIDELIX

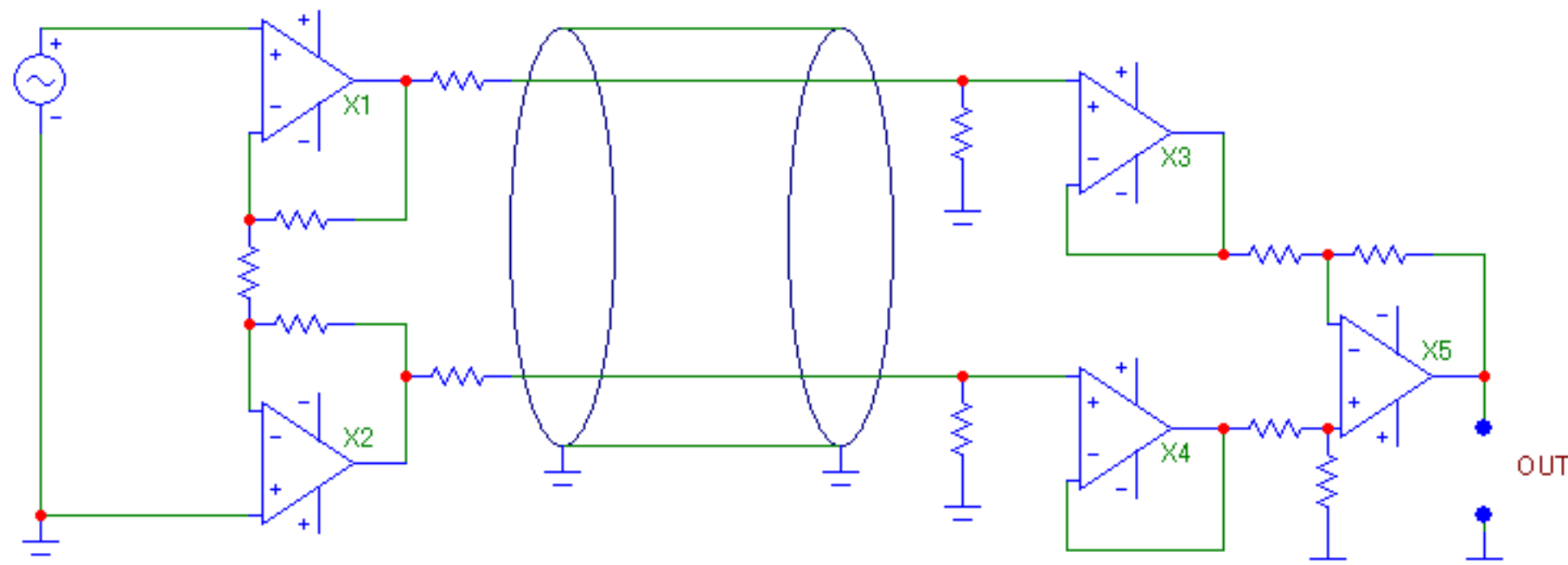
増幅素子は一般に非線形であるが、これにNFBをかけて特性を改善している。ところが高い周波数ではNFBが少なくなるので歪が増える。たとえば左図のように上下が非対称だと、低周波成分が発生する。

場合によっては
アンプなのにラジ
オが聞こえる場合
すらある。



商用電源に高周波ノイズが含まれていれば悪影響があるのは当然として、スイッチング電源を使えばそこから高周波ノイズが出る。

商用トランスのものであっても整流ダイオードのリカバリによって高周波ノイズが出ることはよく知られていて、そのため、リカバリノイズの少ないダイオードも発売されている。たとえばショットキバリアダイオード、ファーストリカバリダイオード、ソフトリカバリダイオードなどがそうである。



このようにバランス伝送にすることによって、I NOISEの問題は激減させることができるが、回路が複雑になることによって発生する新たな問題とトレードオフの関係にあるため、必ずしも良くなるとは限らない。

新たな応用例として、医療機器 への可能性がある。

- 安全性のため漏洩電流を少なくする必要がある。
- 漏洩電流の原因であるYキャパシターを小さくする必要がある。
- スイッチングノイズのうち、削減しにくいコモンモード成分を少なくするのはYキャパシターである。
- あらかじめノイズの少ない電源が要求される。

まとめ 1

- 全期間が電圧共振し、ZVSの動作をするので対策が難しいコモンモードノイズが少なく、ノイズ規格を約30dB下回る超低ノイズである。
- スイッチの耐圧は入力電圧の 倍以上、ダイオードの耐圧は出力電圧の 倍以上が必要である。(日米ではMOSFET、欧ではIGBTでOK)
- スイッチやダイオードの電流は50%時比率の方形波に近く、2つが交互に加算されるので入力電流も出力電流もリップル成分は非常に少なくなる。
- スイッチングロスが無く、実効電流が少ない方形波のため効率は93%と高効率である。
- 結合チョーク側は共振周波数に殆ど関係しておらず、共振周波数はトランスのインダクタと等価的に並列に加わる共振コンデンサの値で支配的に決まり安定である。

まとめ 2

- もともと周波数安定性が高いため、他励発振でも自励発振でも構成することができ、大差はない。
- 負荷の過度応答はスイッチング動作には関係しておらず、等価出力抵抗と等価出力インダクタンスと平滑コンデンサによってのみで決まる。
- チョークを結合させることで、等価出力インダクタンスは漏れインダクタンスだけになるので激減する。このため過度的な負荷変動はリングングが生じず、非常に安定である。
- チョークを結合させることで、瞬間的なピーク電流が流れても結合チョークのコアは飽和しない。
- 制御を掛けることで出力電圧を安定化するのは困難な回路ではあるが、制御をかけなくともオーディオ用途には十分なレギュレーションである 2% が得られる。（一部のクラス D を除く）
- ワールドワイド入力には対応できない。