

FIDELIX

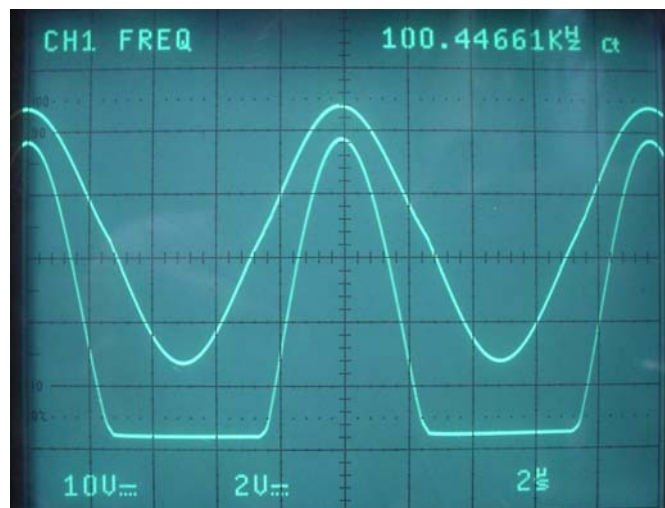
スイッチング電源の低ノイズ化

- ・ 超ローノイズ特性を持つセリニティ電源について
- ・ 電圧波形がサイン波状で、コモンモードノイズは少ない
- ・ 入出力電流は直流に近く、ノーマルモードノイズも少ない

有限会社 フィデリックス
代表取締役 中川 伸

FIDELIX

無負荷時の電圧波形



FIDELIX

オーディオ用スイッチング電源は
ひたすらローノイズにしなくては、
高音質が得られないことが、ロー
ノイズ化のきっかけであった。

FIDELIX

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。
- 2008年現在、九州大学大学院後期博士課程に在籍中

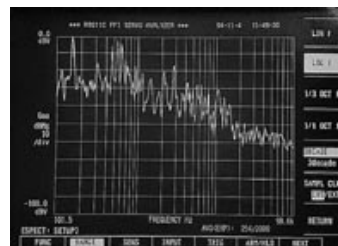
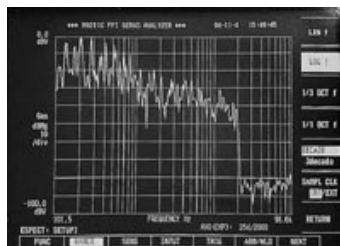
FIDELIX

1980年頃の中川 伸(写真中央)



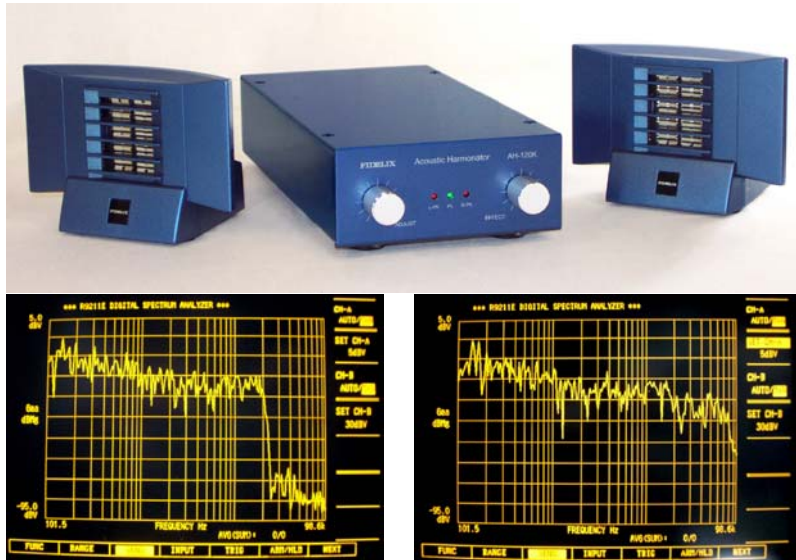
FIDELIX

'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



FIDELIX

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。

FIDELIX

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。

FIDELIX

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-N88の外観



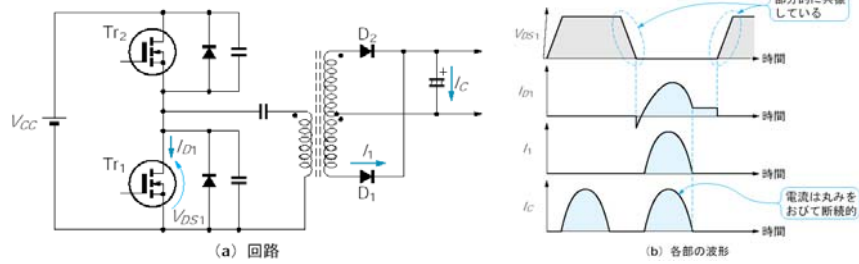
FIDELIX

PS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PS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PS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空白があったことになる。

FIDELIX

PS電源の動作



FIDELIX

PS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ZVS (Zero Voltage Switching) とZCS (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。

FIDELIX

今日までに、高級オーディオ機器用に 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

FIDELIX

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ざらざらする。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。(終わりの方で推論を述べる。)
- 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。

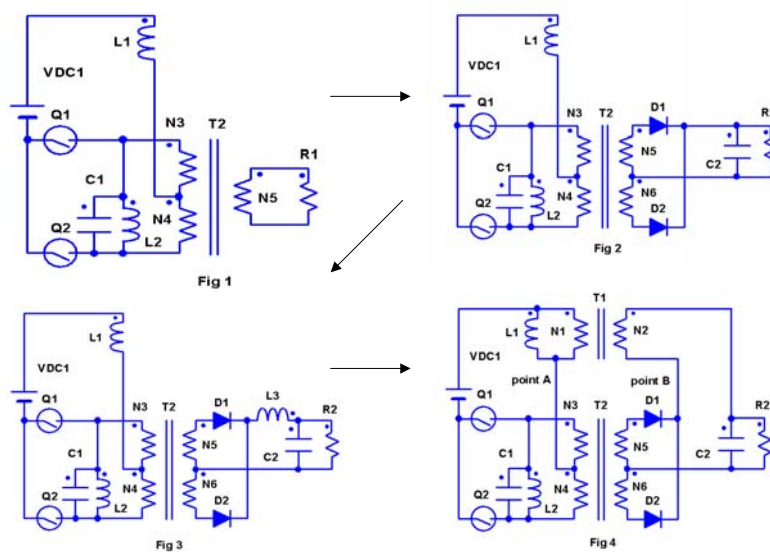
FIDELIX

サイン波で動作する共振型ロイヤ・コンバータの低ノイズ性に注目！そ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。

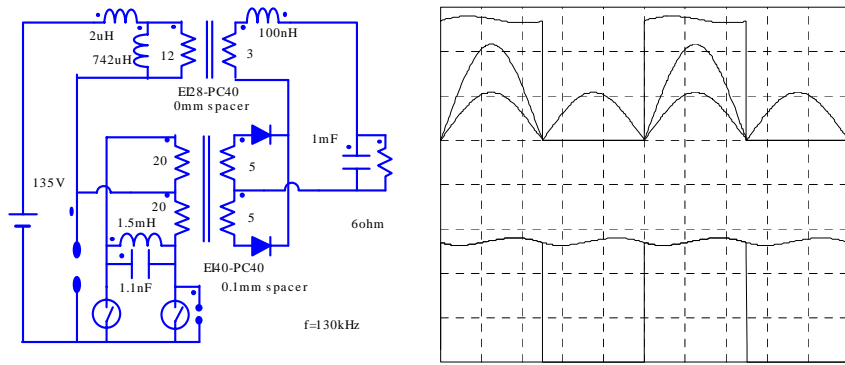
FIDELIX

セリニティー電源への経緯



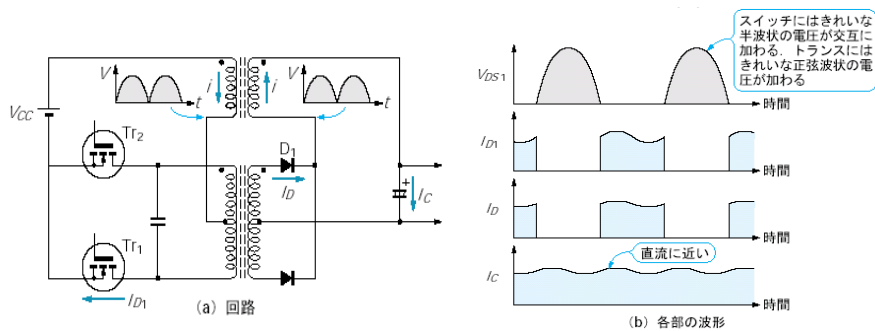
FIDELIX

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



FIDELIX

セリニティー電源の動作
(serenity power supply)



FIDELIX

聴覚のためにスイッチング周波数は
90kHz以上にしたい。

- 古い常識からCDのサンプリング周波数は44.1kHzに決められ、再生可能周波数は約20kHzまで。
- 90kHz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90kHz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90kHz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20kHz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。

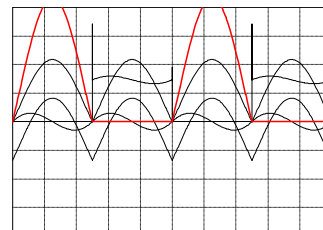
FIDELIX

電圧の式

$$V_{sw} = V_{in} \times \pi \times \sin \theta \quad 0 \leq \theta \leq \pi$$

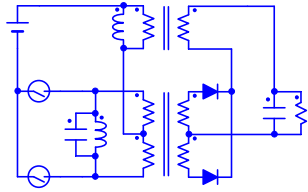
$$V_{sw} = 0 \quad \pi \leq \theta \leq 2\pi$$

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

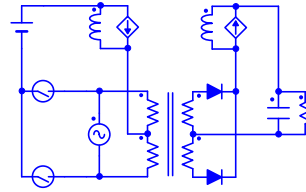


FIDELIX

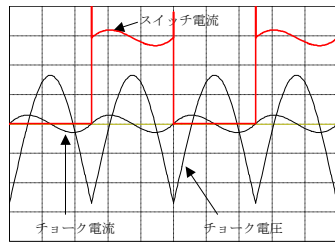
チョークに流れる電流波形



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。

FIDELIX

きれいなサイン波で動作したセリニティー電源の実験波形

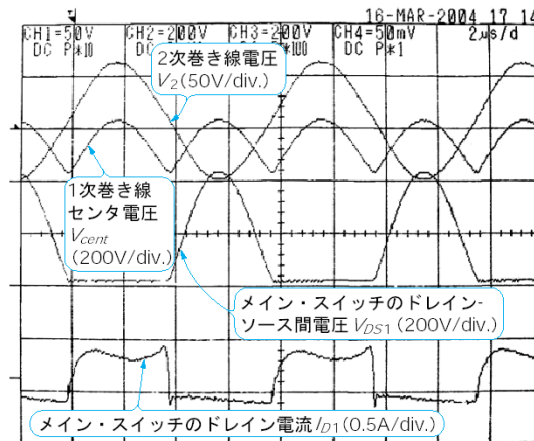
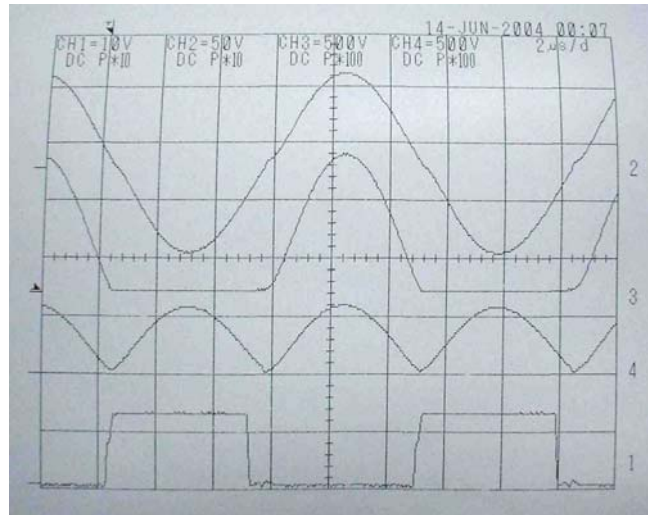


図7 試作したスイッチング電源の動作波形

FIDELIX

1500VのIGBT (TOSHIBA GT40T301)による波形



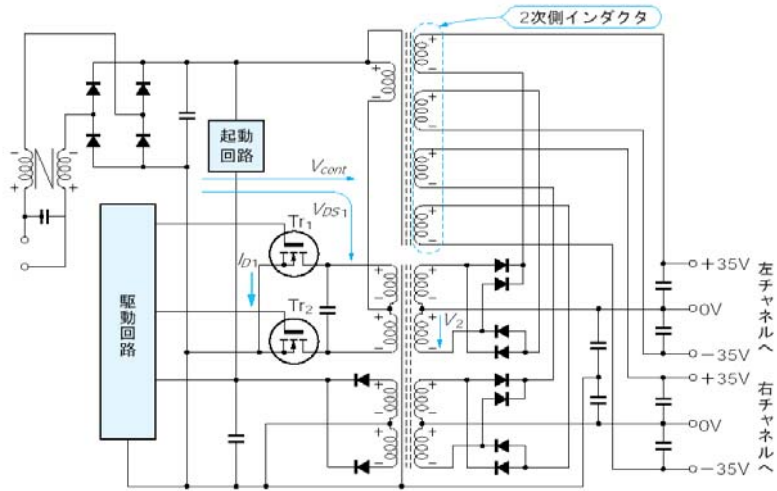
FIDELIX

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。

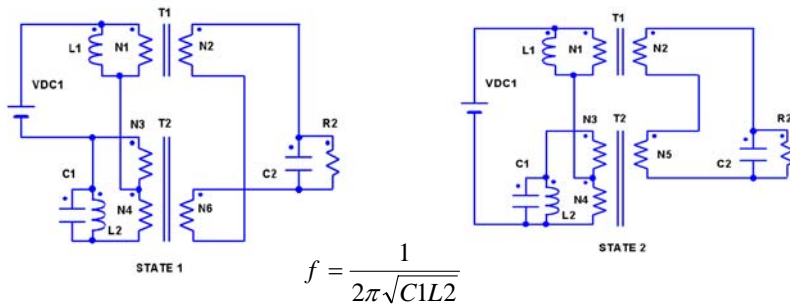
FIDELIX

実際のセリニティー電源の回路



FIDELIX

セリニティー電源の動作状態



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

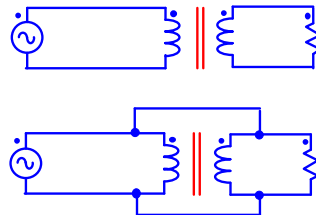
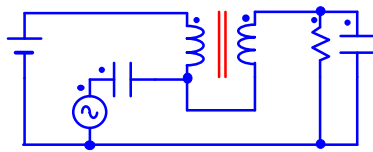
FIDELIX

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)

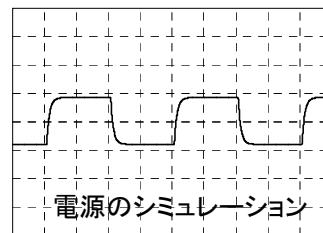
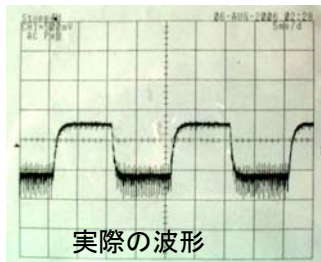
チョーク側は下図と同じ
ことなので飽和しない

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。



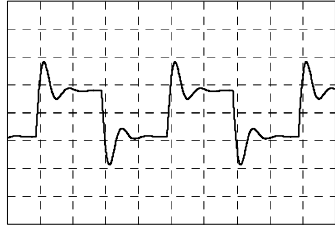
FIDELIX

負荷変動に対する応答

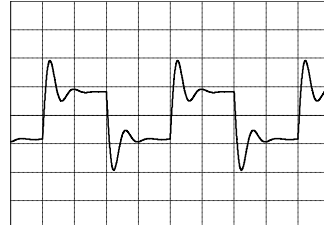


・電源の出力インピーダンス
に含まれるインダクタ成分が
圧倒的に少ないスイッチング
電源方式である。

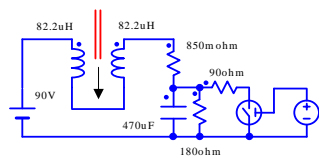
FIDELIX



結合しない電源のシミュレーション



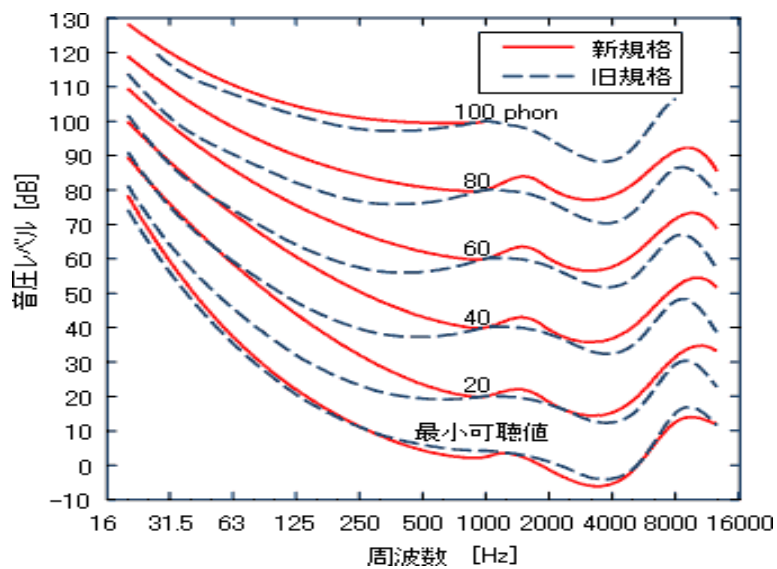
LとRとCのシミュレーション



・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。

FIDELIX

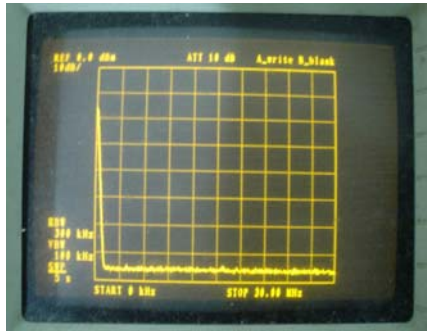
フレッチャーマンソン曲線



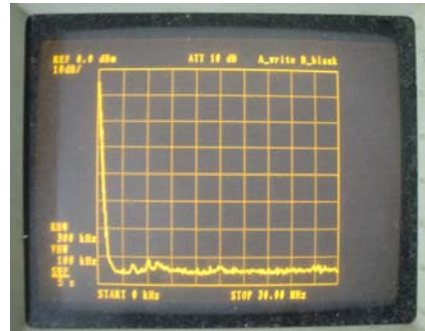
FIDELIX

ノイズ規格を約30dB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



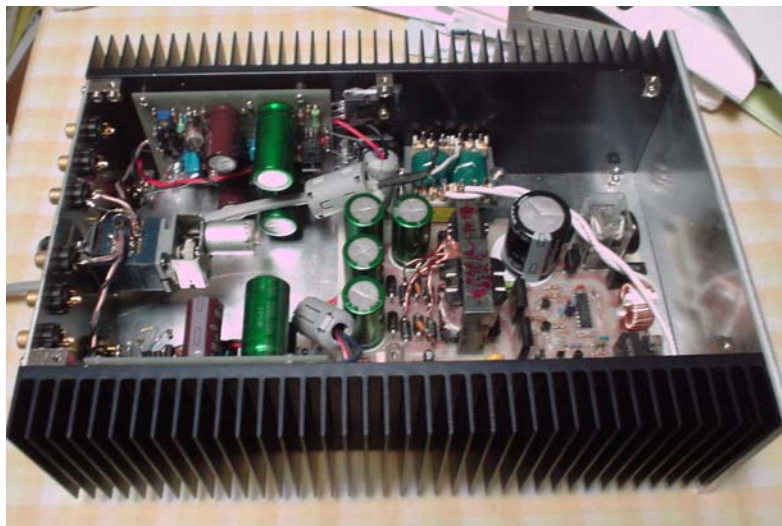
FIDELIX

セリニティー電源の電圧安定性

- 負荷変動については2%程度でまずまず良い。
- 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。

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



FIDELIX

セリニティー電源を使った試作アンプの評価

STEREO（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量」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。「ひょっとすると、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30万～40万のことだった）。

FIDELIX

D級アンプと組み合わせた例



FIDELIX

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ざらざらするので、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いオーディオ用ケミコンが使える
- 高効率

FIDELIX

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。

FIDELIX

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、ピアニッシュ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

FIDELIX

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。

FIDELIX

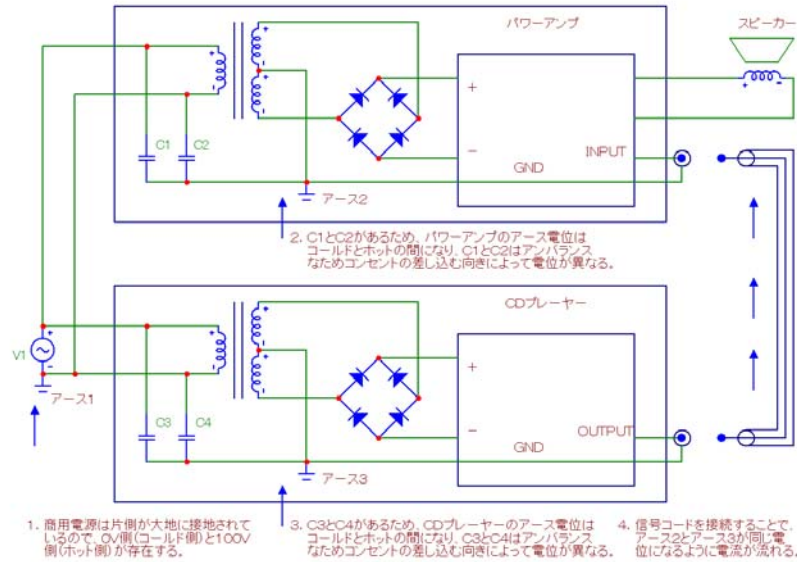
ソニーのポータブルカセットデッキTC-D5M



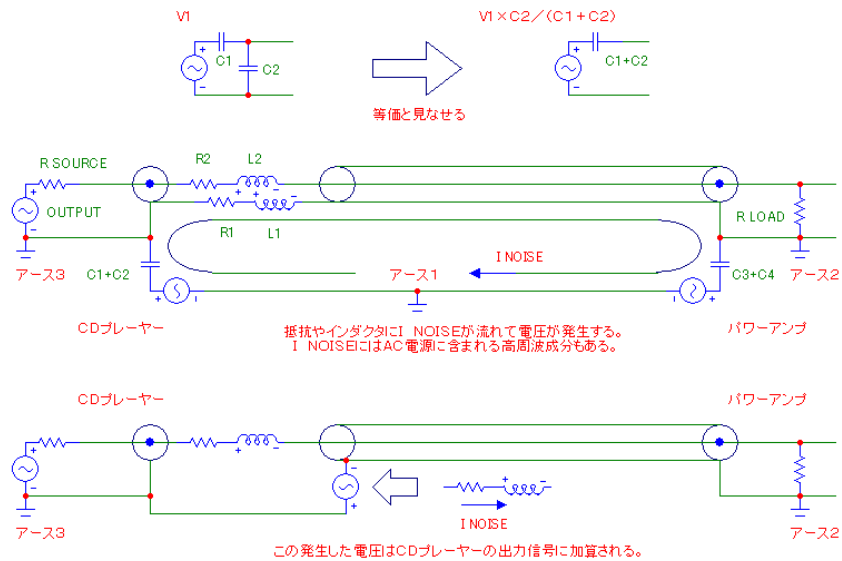
単一電池2本で動作するが、この時は内部でCD3VからDC6VにステップアップするDC-DCコンバーターが働く。ACアダプタの場合はDC6Vの動作で、DC-DCコンバーターは動作しないが、電池動作の方が圧倒的に音質が良いと言われている。電池動作の場合は、電源のコモンモード電流は流れない。

FIDELIX

電源によって音が変わる推理



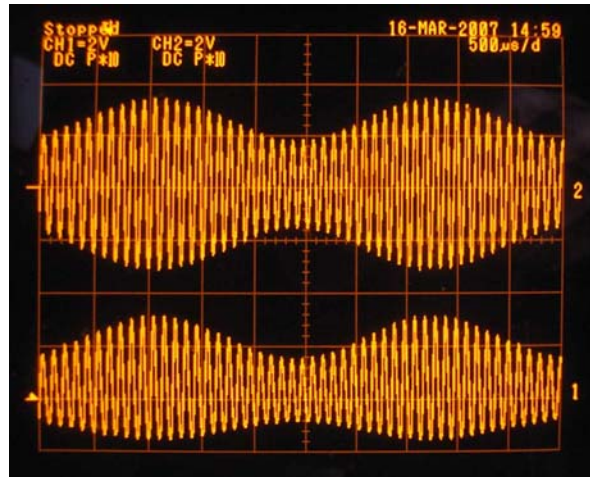
FIDELIX



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。

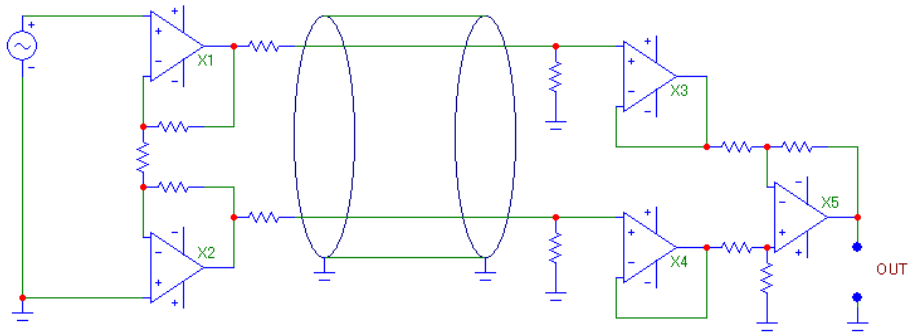


FIDELIX

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。

FIDELIX



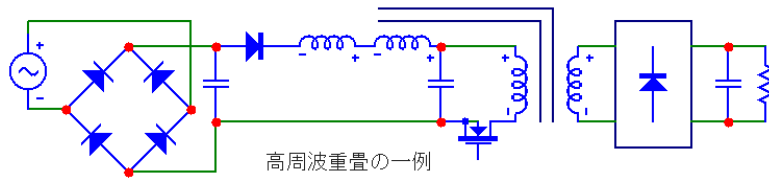
このようにバランス伝送にすることによって、I NOISEの問題は激減させることが出来るが、回路が複雑になることによって発生する新たな問題とトレードオフの関係にあるため、必ずしも良くなるとは限らない。

FIDELIX

セリニティー電源に高調波対策を施し、それでもなお高効率化と低ノイズ化を目指す回路方式の検討。

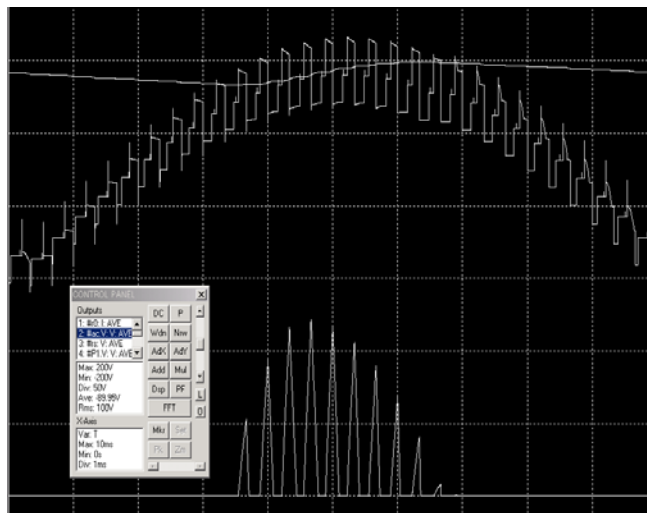
FIDELIX

高周波を重畳することで 高調波対策をする回路例



FIDELIX

三角波状の電流が流れる様子



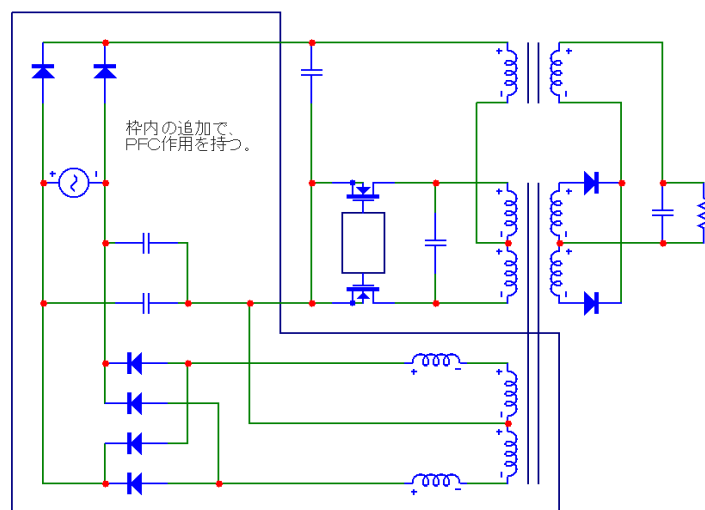
FIDELIX

インダクタに加わる方形波状の電圧波形を積分した三角波状の電流波形が流れていることに注目！

セリニティー電源はサイン波状で動作するので、積分してもサイン波状になり、これが180度の位相差で加算されると、直流に近くなって、電流ノイズが少なくなりそう。

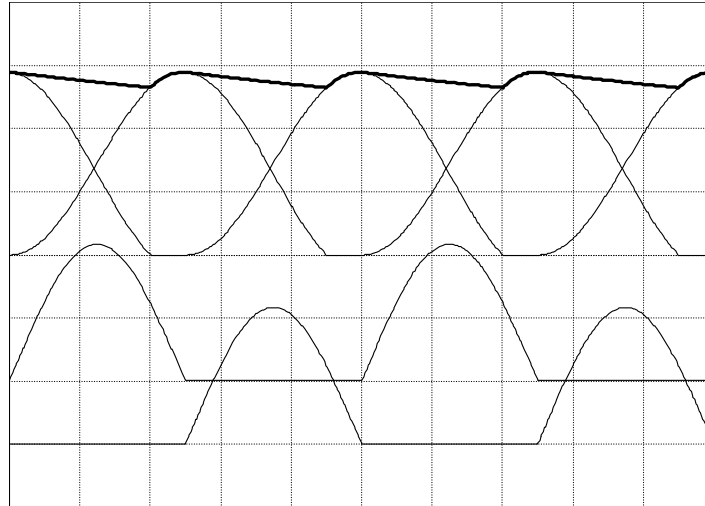
FIDELIX

セリニティー電源に高周波を重畳する



FIDELIX

SCATによる埋めあった様子

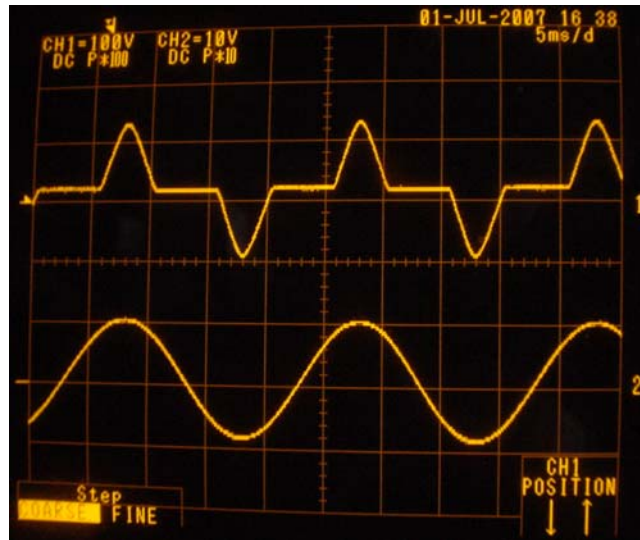


FIDELIX

PFC用のインダクタは共振周波数を決める要素になるので、この電流状態によって、共振周波数は変動する。
したがって自励発振にしないといけない。

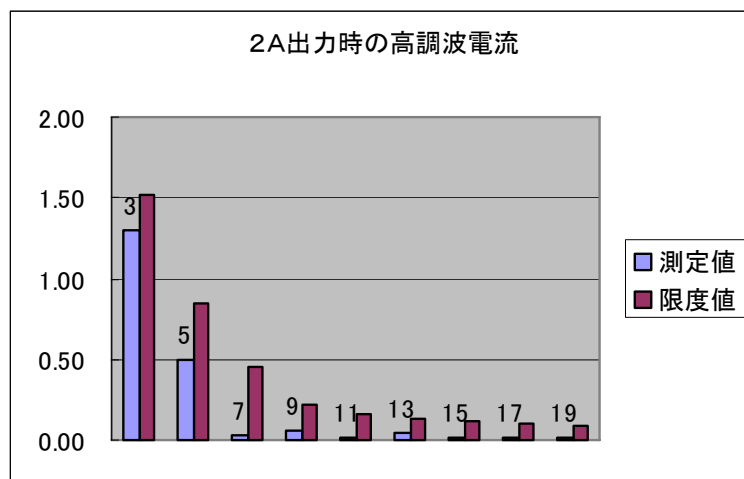
FIDELIX

電源電流の波形



FIDELIX

高調波の周波数分析



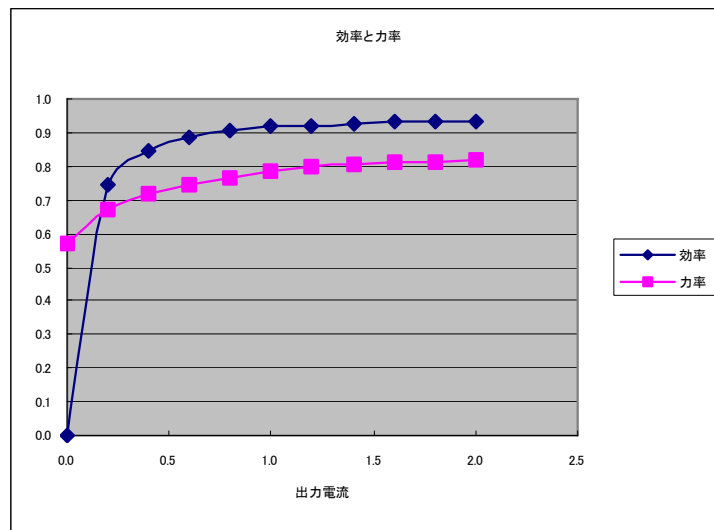
FIDELIX

測定データ

FN PFC converter with 800VCoolMOS						
入力電圧	入力電流	入力電力	出力電圧	出力電流	効率	力率
100.43	0.1396	8.00	123.014	0.0	0.000	0.5720
100.39	0.4544	30.75	114.905	0.2	0.747	0.6741
100.36	0.7215	52.01	110.085	0.4	0.847	0.7182
100.33	0.9600	71.83	106.236	0.6	0.887	0.7460
100.28	1.1813	90.74	102.997	0.8	0.908	0.7659
100.26	1.3883	108.90	100.164	1.0	0.920	0.7823
100.22	1.5925	127.19	97.772	1.2	0.922	0.7967
100.20	1.7915	144.52	95.682	1.4	0.927	0.8052
100.17	1.9902	161.50	93.857	1.6	0.930	0.8103
100.14	2.1844	178.17	92.217	1.8	0.932	0.8147
100.12	2.3805	194.63	90.785	2.0	0.933	0.8168

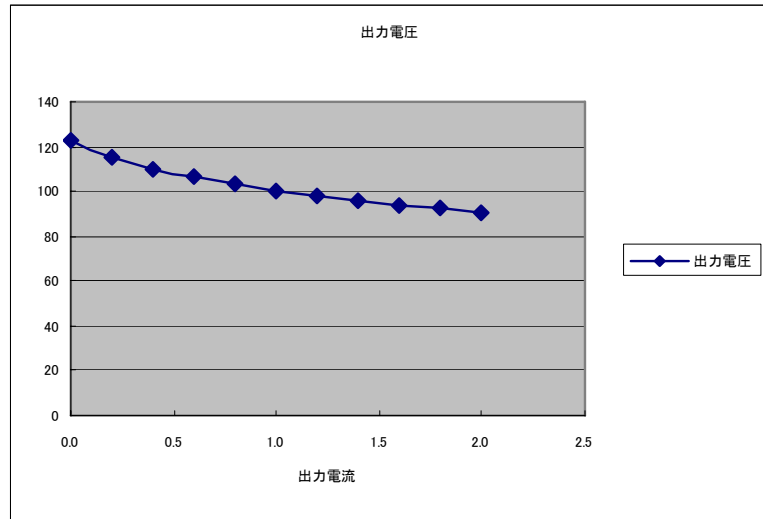
FIDELIX

効率と力率



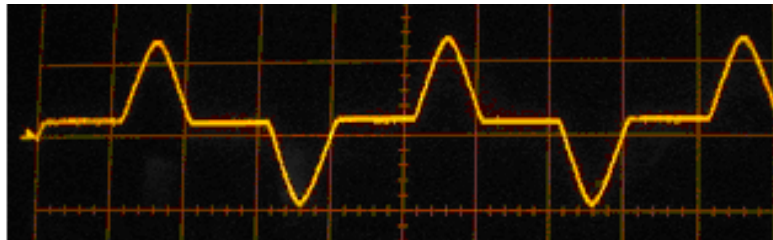
FIDELIX

出力電圧特性



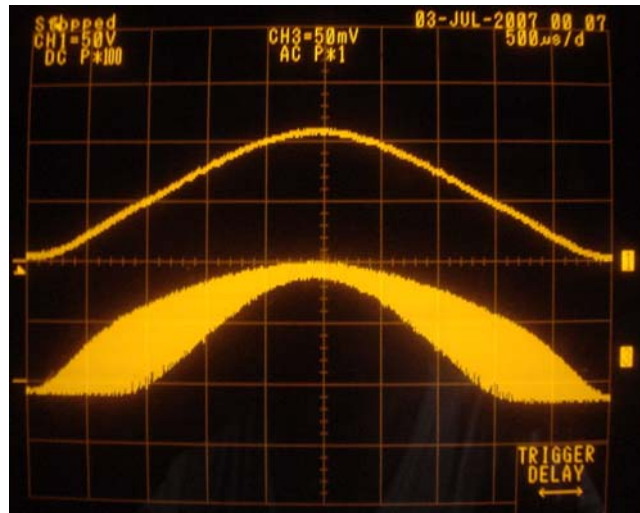
FIDELIX

入力電流波形



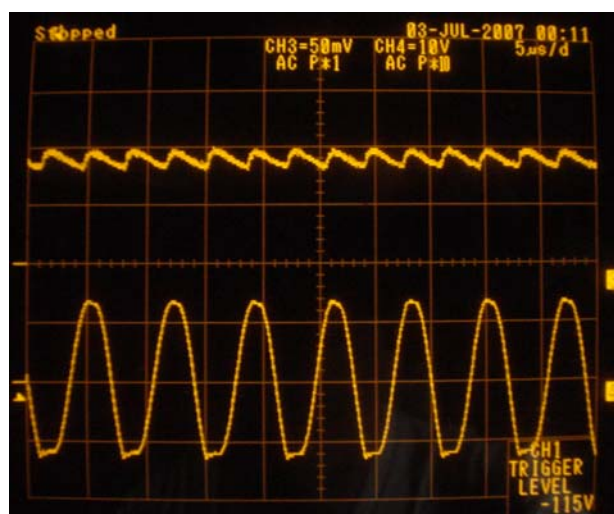
FIDELIX

PFCが動作する部分の電流波形



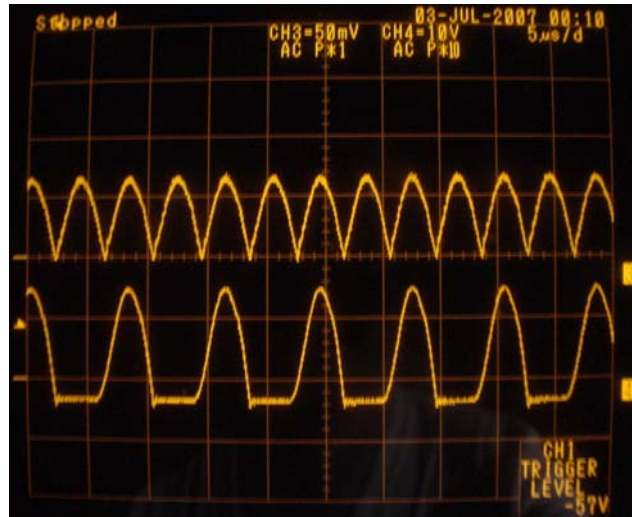
FIDELIX

ピーク部分における電流波形



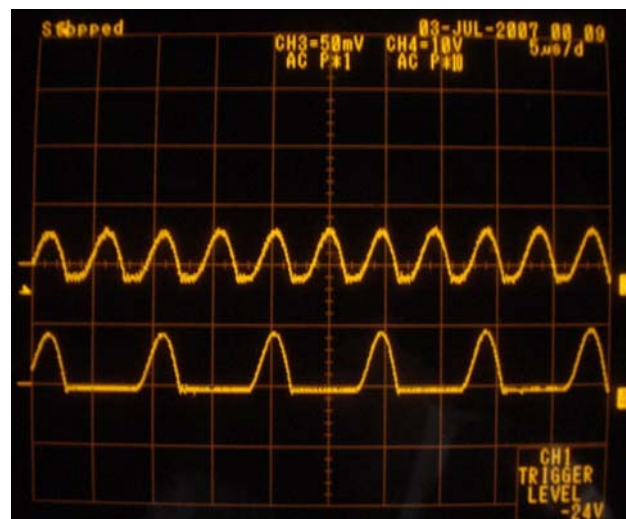
FIDELIX

中腹部分における電流波形



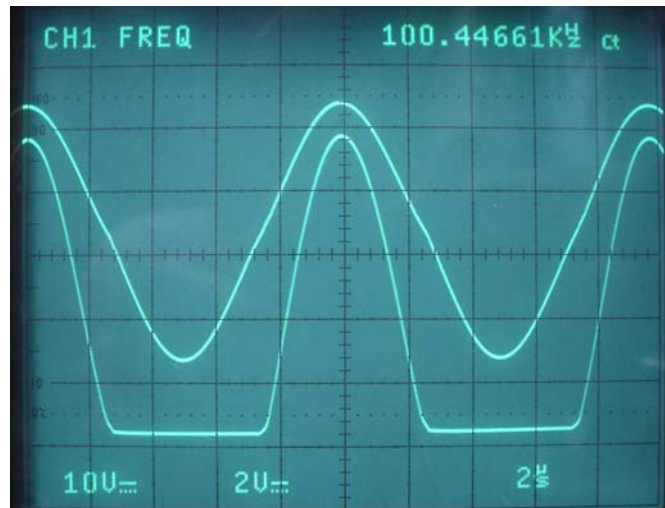
FIDELIX

裾部分における電流波形



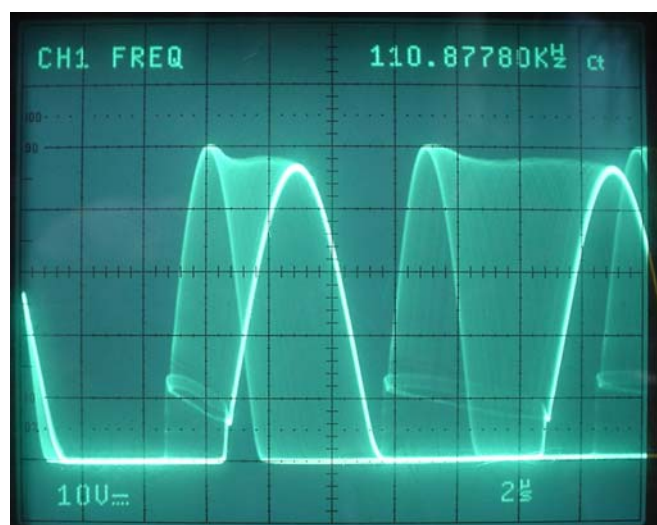
FIDELIX

無負荷時の電圧波形



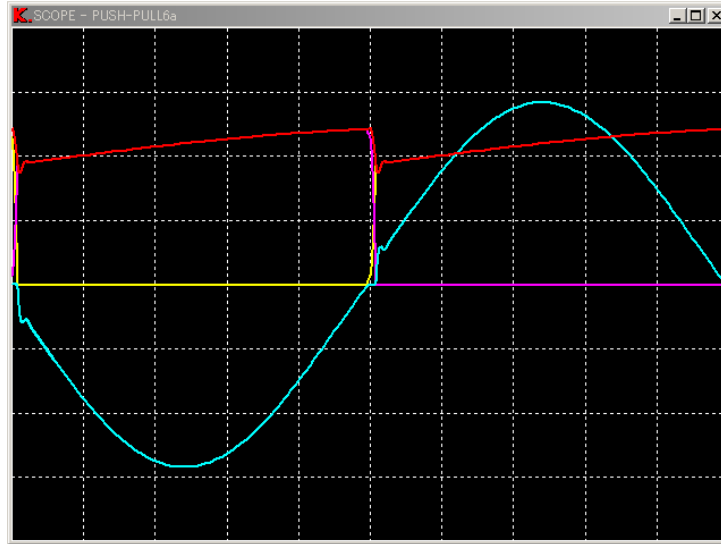
FIDELIX

2A出力時の電圧波形



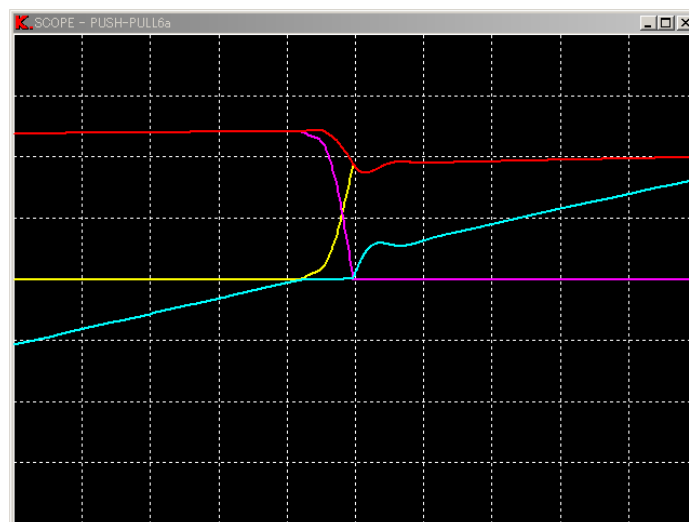
FIDELIX

漏れインダクタンスの影響



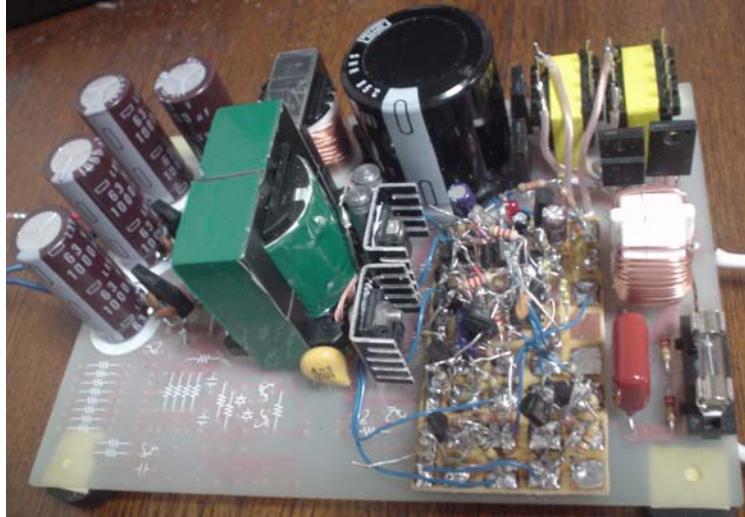
FIDELIX

拡大部分



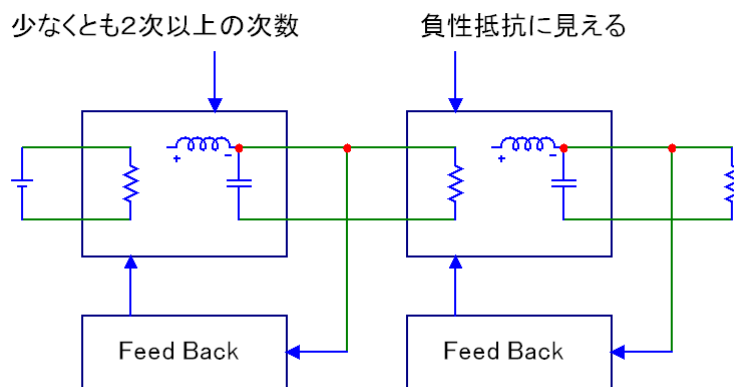
FIDELIX

実験に使った電源の写真



FIDELIX

制御が抱える不安定要因



FIDELIX

- ・スイッチング電源の多くがフライバック方式なので、電圧を一定にする性質は無い。
- ・このため一般に制御をかけ、レギュレーションは非常に良くなっている。
- ・しかし、商用周波数で動作するトランスのACアダプタは必ずしもレギュレーションが良いわけではない。
- ・また、バッテリーで動作する機器は定格電圧の60%位までは正常動作するように設計されている。
- ・つまり、電源にいくらかの電圧変動があろうとも、問題が生じない回路にすることは可能である。

FIDELIX

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。

FIDELIX

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 π 倍以上、ダイオードの耐圧は出力電圧の π 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非常に高効率である。
- 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。

FIDELIX

まとめ2

- セリニティ電源は他励発振でも自励発振でも構成することができるが、PFC作用を持たせるには自励発振にしなくてはならない。
- 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。

FIDELIX

ご静聴有難う御座いました。