

アキュフェーズ40年の歩み(3)

パワーアンプ回路技術の変遷 [後編]

柴崎 功 SHIBAZAKI Isao

1994年に発売されたP-550からアキュフェーズのパワーアンプは電流帰還方式に移行し、「MCS」や「MCS+」などの改良版を開発して現在に至っている。そこで電流帰還に移行してからの同社パワーアンプの変遷と、電流帰還アンプを用いて交流電源波形の修復や安定化を行うクリーン電源装置の変遷を振り返ってみよう。



1200VAクリーン電源装置PS-1220の内部。歪み補正アンプは、放熱器と合体した10バラMOS-FET出力段の電流増幅部が左右に配置され、並列接続されている

パワーアンプ編

電流帰還アンプの基礎知識

「カレントフィードバック」や「電流フィードバック」とも呼ばれる電流帰還は、1990年代に入ってからジェフロランドなどの米国メーカーが採用し始め、現在では多くのメーカーが採用している。国内でいち早く電流帰還を採用したのはアキュフェーズで、写真1のP-550は270W/8Ωというハイパワーでありながら、繊細さと力強さを併せ持つ音を実現して注目された。

電圧帰還アンプは図1のように、NFB信号を戻す初段「-入力」のインピーダンスが、帰還回路の合成インピーダンスに対して十分高いアンプを指す。NFB回路の抵抗で分圧された電圧が帰還されるか

ら「電圧帰還」というわけだ。それに対して「-入力」のインピーダンスを帰還回路インピーダンスより低くしたアンプは、帰還回路で分流された電流が帰還されるので「電流帰還」と呼ばれる。

両帰還方式の周波数特性を比較すると、電圧帰還は図2(a)のように、ゲインを上げると6dB/octの下降線に乗ってどんどん帯域が狭くなるのでゲイン帯域幅積は一定だ。それに対して電流帰還型は、理想的には図2(b)のように、ゲインに関係なく帯域がほぼ一定である。実際はゲインを上げると若干帯域が狭くなるが、電圧帰還のように、ゲインを2倍にすると帯域が半減するという極端な変化はない。

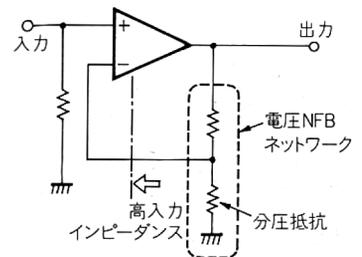
電流帰還アンプは、当時米国アナログデバイスの顧問であったマーク・アレキサンダー (Mark Alexander) 氏が1990年3月の

AES (Audio Engineering Society) コンベンションで論文発表してから注目され始めたが、実は昔からある。図3のエミッター接地2段直結アンプが古典的な電流帰還アンプである。インピーダンスの低い初段エミッターに、出力から電流モードで帰還が掛かっているで電流帰還アンプなのだ。

初段はエミッターに帰還抵抗が付いたエミッター接地回路であるが、視点を変えるとこれはエミッターフォロワーで、そのコレクターに電流検出抵抗が入っているという見方もできる。そしてこの抵抗で検出した初段の電流を、2段目トランジスタが電圧に変換しているのだ。つまり初段で電圧信号を電流に変換 (V/I変換) し、2段目で電流を負荷に流して電圧に変換 (I/V変換) して電圧を増幅する。



[写真1] 1994年4月に発売されたアキュフェーズ初の電流帰還型ステレオパワーアンプP-550 (270W + 270W/8Ω, 税別58万円)。同年7月には150W + 150W/8Ωの第2分P-350 (税別30万円) が発売された



[図1] 電圧帰還

そして出力から初段のエミッターに電流帰還が掛かっている。

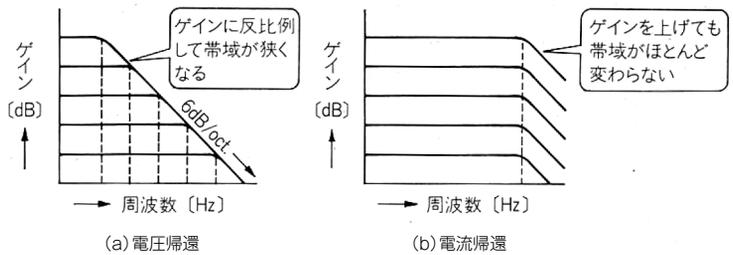
図3の回路はV/I変換を1石のトランジスタで行っているため変換精度が低い。そこでV/I変換回路にダイヤモンド回路のようにリニアリティの優れたバッファ回路を用い、インピーダンスの低い電流帰還点には-入力用のバッファを追加してバランス信号に対応できるようにしたのが図4に示す電流帰還型パワーアンプで、これがアキュフェーズの電流帰還型パワーアンプの基本形となっている。具体的には、電流帰還型パワーアンプ第1弾のP-550と第2弾P-350に採用された電流帰還アンプは、図5、6に示す構成になっている。

電流帰還パワーアンプの変遷

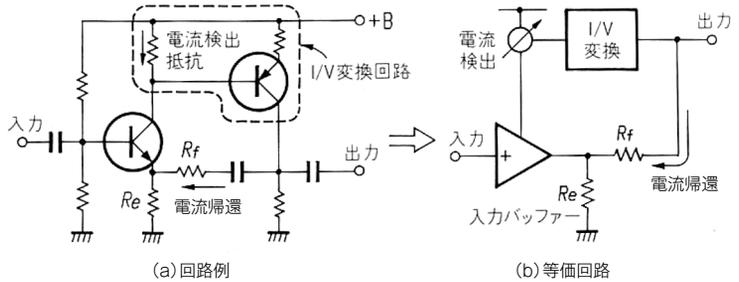
アキュフェーズの電流帰還アンプは図7 (a) の基本形からスタートして、図7 (b) のMCS回路、図7 (c) のMCS +回路へと進化し、最近の高級機 (M-6000やA-200) には、2つのMCS +回路を並列接続した「ダブルMCS +回路」が採用されている。

Multiple Circuit Summing-upの頭文字を採ったMCS回路は、V/I変換回路を複数並列にしてローノイズ化した改良版である。これをさらに改良してV/I変換とI/V変換の回路を複数設けて並列接続し、ローノイズ化に加えてドライブ能力も強化したのがMCS +回路だ。

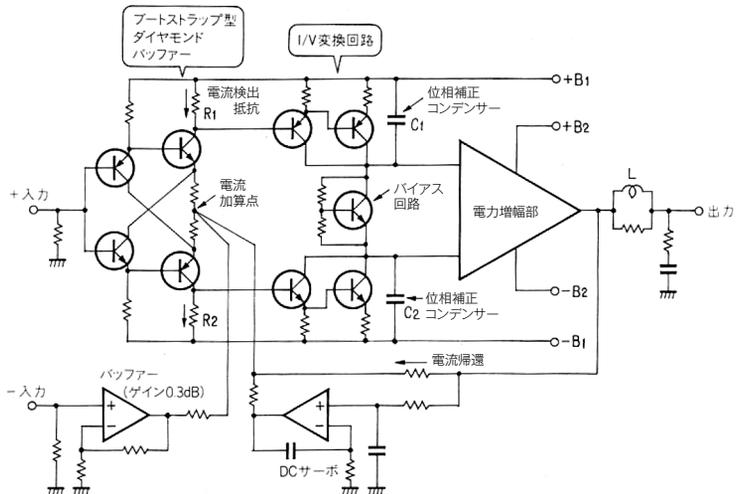
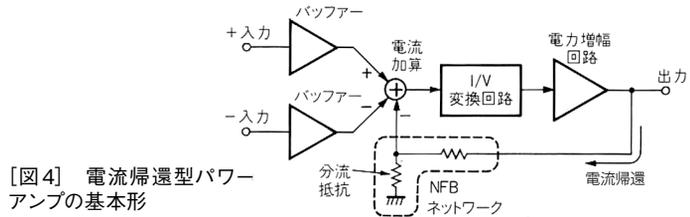
写真2はMCS回路を採用したモノラルパワーアンプM-8000で、アンプ部の基本構成は図8のようになっている。V/I変換回路は4石構成のたすき掛け帰還型ダイヤモンド回路を3組並列接続し、2段目のコレクター抵抗を3組で共



【図2】 周波数特性のゲイン依存性

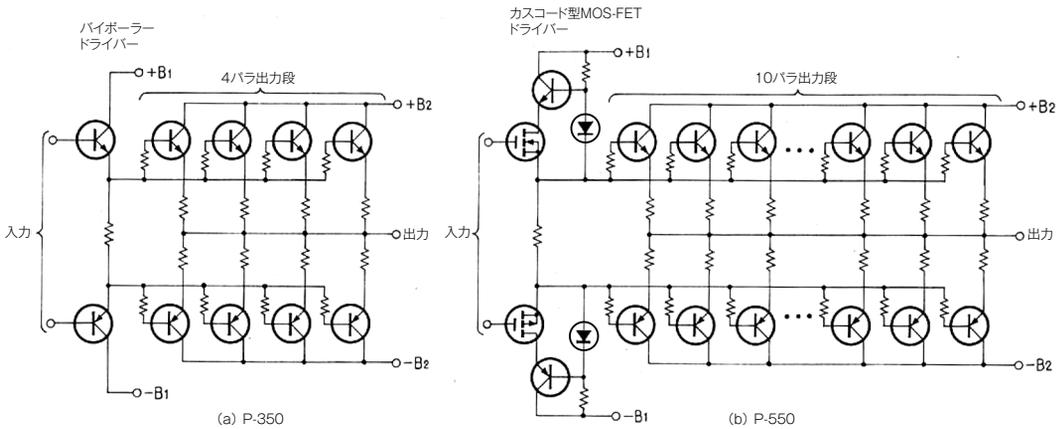


【図3】 古典的な電流帰還アンプの例

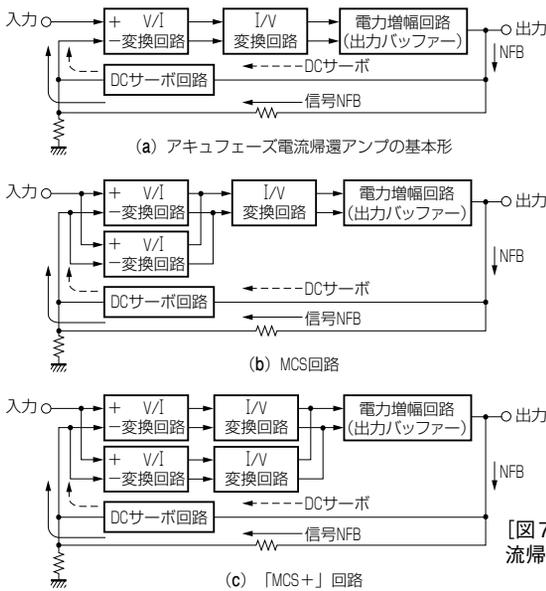


用した構成になっている。こうすると信号電流が3倍になるので、電流検出抵抗や帰還回路の抵抗を低くすることができて、より低雑音化できる。

コールド入力側は約0.3dBの電圧ゲインを持つバッファアンプで電圧信号を電流信号に変換し、DCサーボからのDC電流や出力からの帰還電流信号と合成して、3



【図6】 P-350とP-550の電力増幅部



【図7】 アクフェーズ電流帰還アンプの変遷



【写真2】 V/I変換回路を3つ並列接続にした「MCS回路」を採用した、250W/8Ωの電流帰還型モノラルパワーアンプM-8000（2002年8月発売、税別110万円）

組のダイヤモンド回路の中心に誤差吸収用低抵抗を介して電流帰還する。I/V変換回路はダーリントン接続エミッター接地トランジスタのプッシュプル構成で、直線性と高域特性を改善するためカスコードブートストラップ接続されている。

写真3、4は「ダブルMCS+回路」を採用したM-8000の後継機M-6000で、図9はアンプ部の基本構成である。入力端子の直近にはデュアルオペアンプのインストゥルメンテーション型入力アンプが設けられ、ここで12dB増幅すると同

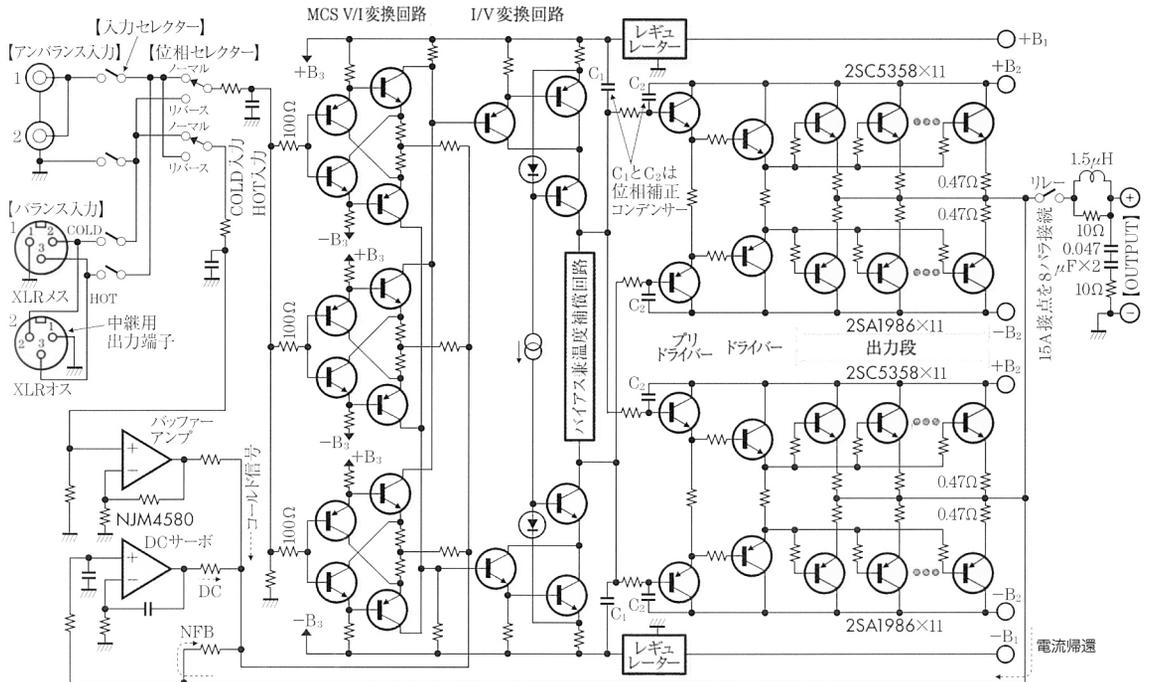
時に完全対称のバランス信号に変換した信号がパワーアンプユニットにハイレベル伝送される。そしてパワーアンプユニットのゲイン(M-8000は28dB)を16dBに下げ、S/N改善が図られている。またS/Nをより改善するため、入力アンプは2組設けて並列接続されている。

左右に1個ずつあるパワーアンプユニットは、2つのV/I変換回路とI/V変換回路をそれぞれ並列接続したMCS+回路を採用しており、2つのパワーアンプユニットはそれぞれ並列接続されてダブル

MCS+回路を構築している。注目すべき点は、両パワーアンプユニットは入力と出力だけでなく、ドライブ段の入力が低抵抗を介して並列接続されている点である。これはトランジスタのバラツキなどで高域特性が微妙に異なって、出力段の並列運転に支障が出るのを防ぐための予防措置なのだ。

MOS-FET スイッチの採用

2011年6月に発売されたMCS+回路採用ステレオパワーアンプA-46（税別60万円）では、出力回路のリレーがMOS-FETスイッチ（写真5）に置き換わった。機械式接点を持つリレーは、経年変化で接点が劣化したり故障しやすいし、接点の酸化膜に起因する非直線性もある。それに対してMOS-FETスイッチは、正しく使



【図8】 MCSを採用したM-8000のアンプ部基本構成



【写真3】 2つのV/I変換回路とI/V変換回路をそれぞれ並列接続した「MCS+回路」を採用した、150W/8Ωの電流帰還型モノラルパワーアンプM-6000（2008年3月発売、税別85万円）



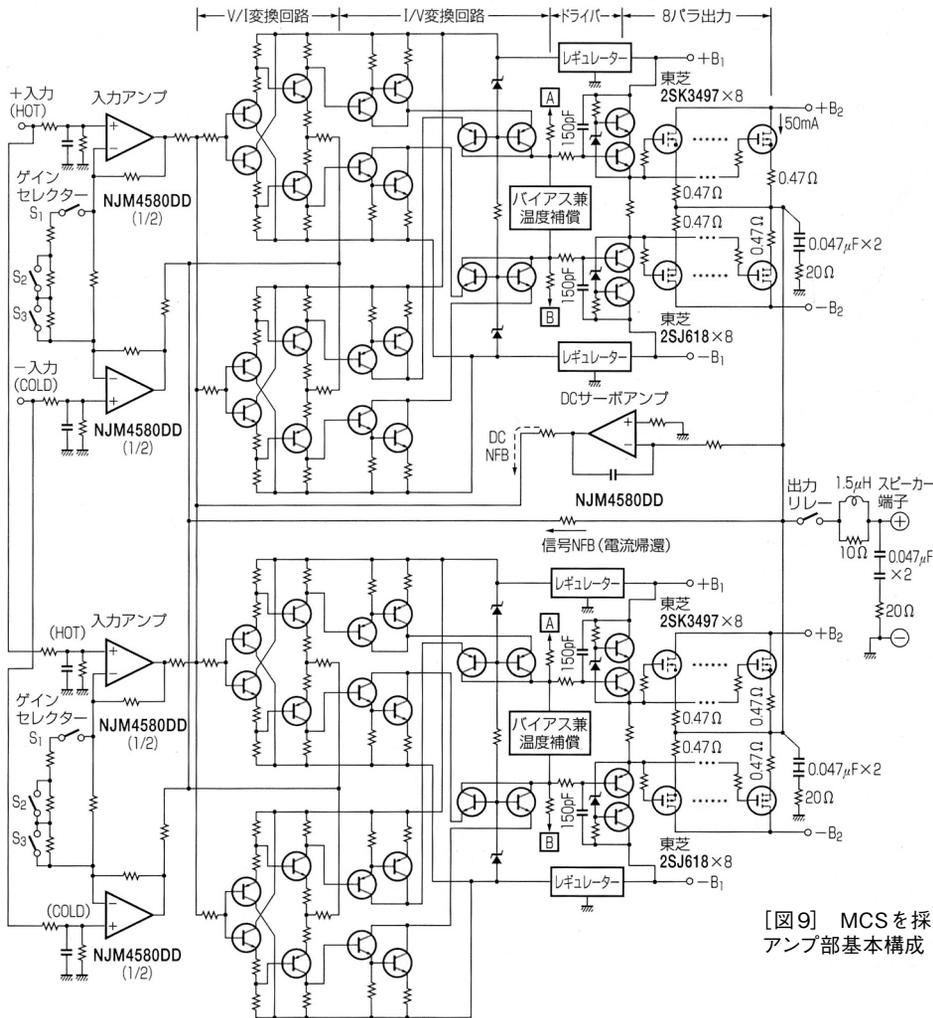
【写真4】 独自の工夫で2つのパワーアンプユニットの並列接続を実現したM-6000の内部。左右の放熱器にMOS-FET 8バラ出力段のパワーアンプユニットを搭載し、入力と中間点と出力を並列接続して16バラ相当のハイパワーアンプを構築

えば信号電圧に依存しないリニアな抵抗となり、劣化や故障もほとんどない。ただしMOS-FETはドレイン・ソース間に寄生ダイオードがあるので、交流スイッチに用いる場合は図10のように、ソースを連結して2個直列で用いる必要があり、出力レベルが変動してもFETの順バイアス電圧が変動しないよう、ゲート・ソース間抵抗に

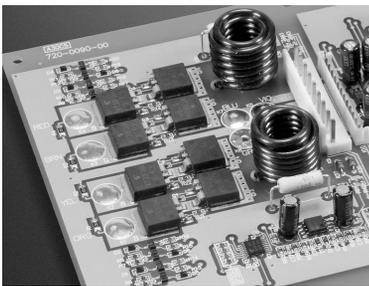
は出力段の+電源電圧より十分高い電圧で駆動した定電流回路から給電する必要がある。MOS-FETには、A-46ではON抵抗が2.6mΩで最大電流DC130Aの東芝TK130F06K3、A-200では1.5mΩでDC195AのIRのIRFP4368が採用されている。

写真6はA級100WモノラルアンプA-200で、その信号系は図

11の構成になっている。これはM-6000で培った入力アンプの並列接続と、パワーアンプユニットの並列接続（ダブルMCS+回路）およびA-46で培ったMOS-FETスイッチを導入し、入力アンプはディスクリート構成にして±30Vという高い電源電圧で22dBというハイゲイン化し、リモートセンシングNFBや金メッキ銅板配線など

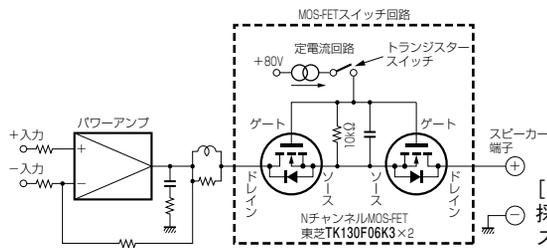


[図9] MCSを採用したM-6000の
アンプ部基本構成



[写真5] MOS-FETスイッチを4組搭載した、A級45W/8ΩステレオパワーアンプA-46(2011年6月発売、税別60万円)の保護回路。スイッチング用MOS-FETを2個逆向きに直列接続してスイッチを構成。機械的接点がないので信頼性が高い

実装法も工夫して、11μVというプリアンプ並みの超低雑音と、8mΩ未満という超低出力インピーダンスを実現した力作だ。



[図10] A-46に初採用されたMOS-FETスイッチの原理図

クリーン電源編

開発経緯と技術的な特徴

アキュフェーズがクリーン電源と称する交流安定化電源装置を開発したのは、社内計測用電源の自製が発端である。アンプの特性を測る際は電源電圧を100V一定に

保つ必要があり、当初はそれをスライダックで行っていた。しかしハイパワーアンプになると頻繁に調整する必要があつて面倒なので、社内の計測用電源として、交流電圧自動安定化装置が開発された。

当初は交流電源を整流して直流にし、直流電源から発振器とパワーアンプで交流100V電源を生成

する構成であったが、この方式は効率が悪い上に非常に故障しやすい。そこで発想を転換して、100Vの交流を全部新規に生成するのではなく、元の電源を流用して、その歪み、ノイズ、電圧変動分だけを補正するという独自方式が開発された。この方式だと90～110Vの電源電圧に対応するのに必要なパワーアンプの電源電圧が±30V程度で済む。このため低耐圧で諸特性の優れたトランジスタが使える、安全動作領域が広くなるので過負荷に非常に強くなり、アナログアンプ方式なのに低損失で発熱量が少ない。定格出力容量が1200VAのPS-1200(写真7)は1997年4月、500VAのPS-500(写真8)は1996年3月に発売された。

[写真6] アキュフェーズのパワーアンプ技術を集大成したA級100W/8ΩのモノラルパワーアンプA-200(2012年7月発売、税別125万円)。入カアンプとパワーアンプユニットをそれぞれ並列接続し、より進化したMOS-FETスイッチを搭載

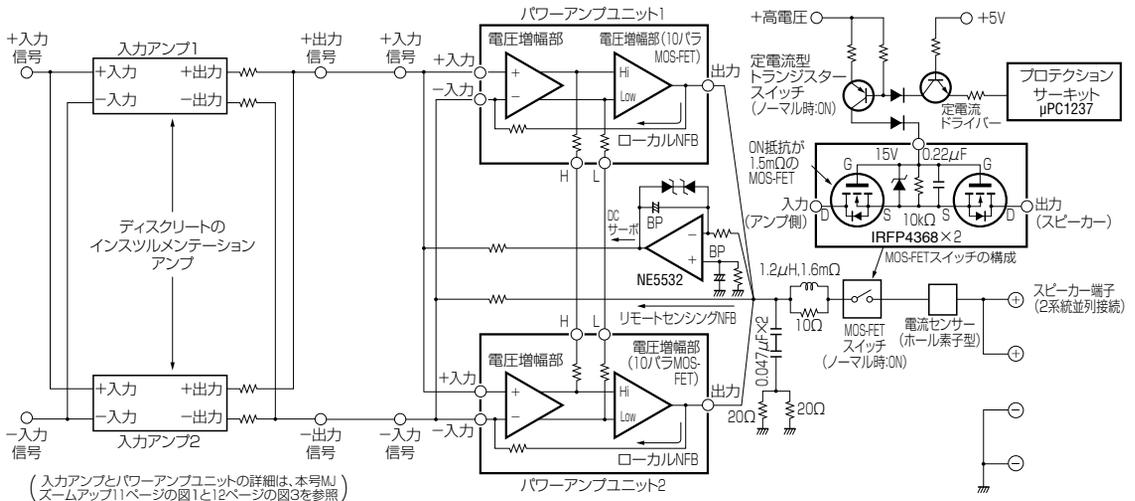


PSシリーズの動作原理

図12は基本構成で、まずラインフィルターで交流電源の高周波ノイズを取り除く。次に巻数比が1対1のシールドトランスを介してさらにノイズを除去し、それと同時に、2次巻線Siと直列に挿入したパワーアンプで巻線を振り、電源波形の歪んだ部分をアンプで修復

するというしくみだ。電源電圧は90～110V、周波数は50Hzと60Hzに対応し、出力電圧波形を、電源と同期した100Vの正弦波に修復する。

つまり図13のように、入力された電源電圧が100V正弦波の瞬時値より低かったり頭がつぶれていたらアンプが不足分を補充し、100Vより高い場合はアンプが過剰



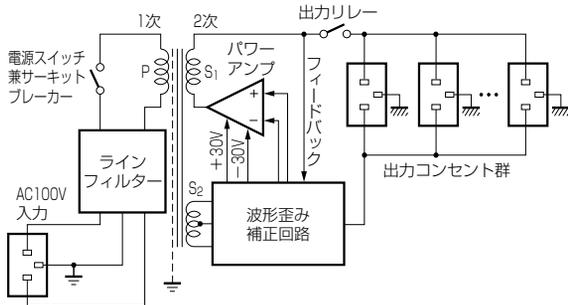
[図11] A-200アンプ部の構成



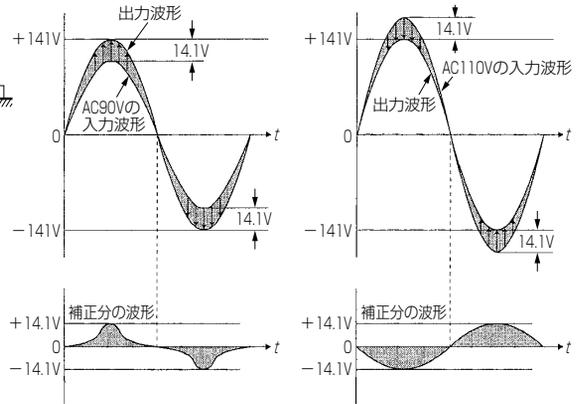
[写真7] 1200VAクリーン電源の第1弾PS-1200(1997年4月発売、税別50万円)。出力コンセントは3Pで、リアに5口、フロントに2口付いている



[写真8] 500VAクリーン電源の第1弾PS-500(1996年3月発売、税別30万円)。出力コンセントはリアに2Pが3口、3Pが2口付いている。次世代のPS-500V以降は容量が510VAにアップされた



【図12】 アクフェーズ・クリーン電源装置の基本構成 (アクセサリ回路は省略)

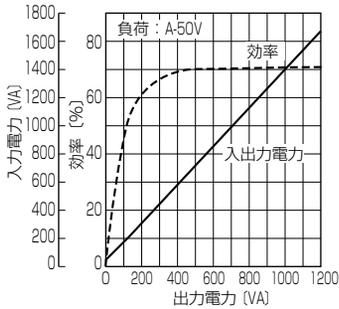


【図13】

電源波形を修復するしくみ

(a) 電源電圧が低いときは不足分を補充する

(b) 100Vより高い場合は差し引く



【図14】 PS-1200Vの電力対効率特性

分を吸収して、出力電圧が常に100Vの正弦波となるようリアルタイム制御する。この方式は図14のように効率が約70%と高く、頭のつぶれた電圧波形が正弦波に修復

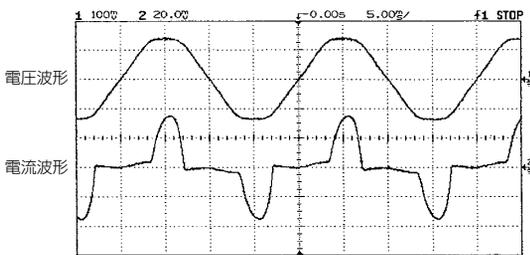
されるため、図15のようにピーク電流が増えて電流供給能力が強化される。

クリーン電源装置の変遷

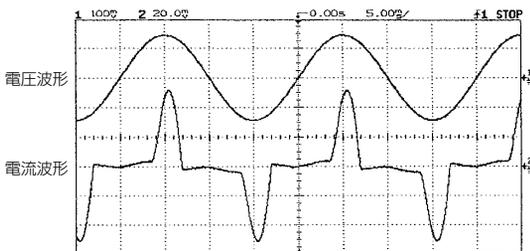
1200シリーズは初代機がマイナーチェンジされて2000年にPS-1200V (写真9) となり、2005年には回路が一新されたPS-1210 (写真10)、2011年には回路も実装法も一新されてPS-1220 (写真11) になった。

初代と第2世代の基本構成は図

16のようになっており、正弦波基準信号はLEDで生成した方形波 (正確には台形波) をBPF (バンドパスフィルター) に通して成形していた。方形波にするのは、入力電圧が変動しても振幅や位相が変動しない安定度の高い基準信号を得るためだ。しかしこの方式だとゼロクロス付近の傾斜が緩やかなので、入力電圧変動で基準信号の位相が変動しやすい。波形歪みをアンプで補正する場合は、基準信号の位相が入力電圧の位相と合



(a) PS-500V使用前



(b) PS-500V使用后

【図15】 AC電源波形の改善例 (負荷はA-20)



【写真9】 1200VAクリーン電源の第2世代機PS-1200V (2000年11月発売、税別53万円)。PS-1200と酷似しているが、メーター窓内のカラーリングが変更され、リアの3P出力コンセントが6口になった



【写真10】 1200VAクリーン電源の第3世代機PS-1210 (2005年12月発売、税別56万円)。メーターモードセレクターがロータリー式からプッシュ式に変更され、性能が大幅にアップ



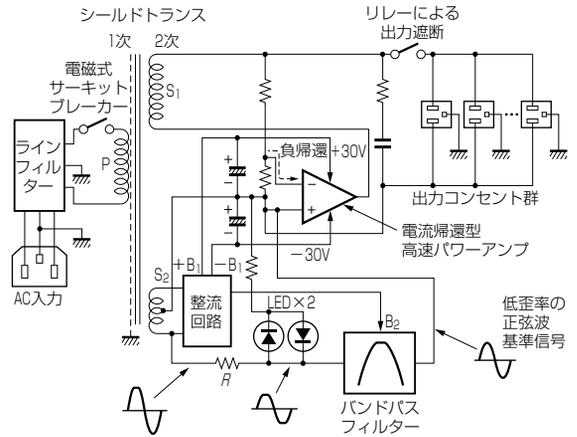
[写真11] 1200VAクリーン電源の第4世代機PS-1220 (2011年4月発売, 税別63万円)。メーター窓が大型の黒地になって「Accuphase」のイルミネーションが付き、右端にオートモニターボタンを増設。バランス伝送の採用でさらに高性能化

わないと補正量が増えて発熱が増えるため、位相の管理は非常に重要なのだ。

そこで第3世代のPS-1210やPS-510以降の製品には図17 (b)の回路が採用され、後続のフィルターはBPFと3次歪みトラップを組み合わせた回路に変更されて、従来より位相精度が高くて、低歪率で高電圧の正弦波基準信号に改

善された。

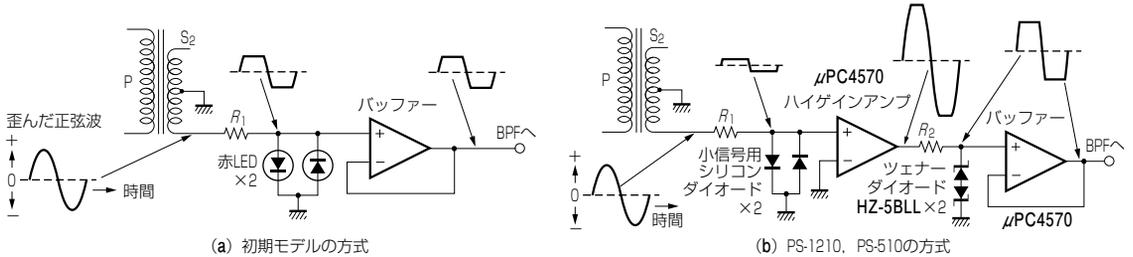
図18はPS-1220のブロック図である。波形修復の基準となる基準信号発生回路はPS-1210と基本的に同じ構成だが、バランス出力にして伝送系のS/Nを改善し、アンプの出力段が、PS-1220とPS-520ではMOS-FETに変更されている。



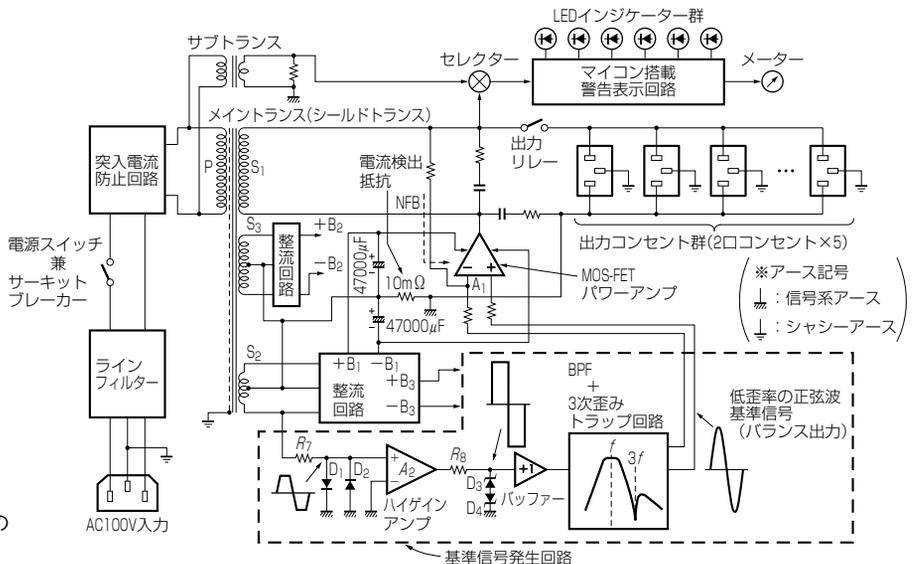
[図16] 初期モデルのブロック図(アクセサリ回路は省略)

【参考文献】

- アキュフェーズ提供資料
 - アキュフェーズ&柴崎功：アキュフェーズの電流帰還型アンプ、MJ無線と実験、1994年11月号
 - 曾根原荘治：アキュフェーズPS-500クリーン電源の詳細と性能
- ※写真はアキュフェーズ提供



[図17] 方形波発生回路の変遷



[図18] PS-1220のブロック図