4. 固体化中波放送機の動向

三菱電機株式会社 隠 岐 恒 夫
 笹 田 雅 昭
 楠 好 次

中波放送機の固体化技術について、半導体の利点を生かしたD級増幅器、スイッチング型高能率変調方式および耐雷設計などの概要を紹介している。

1. ま え が き

中波放送機は、需要の停滞とともにその技術の進展はここ10年ほど休憩していたが、周波数再編成を機運として、最近になって活動を再開した。最近の中波放送機の注目される技術は固体化であり、ここではこの固体化放送機に焦点をしばって紹介する。

中波放送機の固体化において、単に従来の電子管を半導体におきかえるのみでなく、固体化の利点を活用し、欠点を補うものでなければならない。このため固体化中波放送機は、従来の電子管方式にくらべ、次の相異点がある。

- (1) スwitching動作により、効率を改善している。半導体は温度制限が厳しいため高効率化を必要とするので、トランジスタの特長であるSwitching動作を活用して効率を改善し、発熱を抑える。
- (2) 耐雷特性を付与する必要がある。トランジスタは電子管のような過電圧(流)耐力がないので、何らかの保護を必要とする。

現在、出力5kWまでが固体化された中波放送機として実用に供されている。また、耐雷性については従来の電子管方式のものより実験室における比較では改善されたものが実用に供されている。以下、これらの概要を紹介する。

2. D 級 増 幅 器

(1) 概 要

トランジスタをスイッチングモードで使用するD級増幅器は、非常に高い能率の得られる固体化に適した増幅器である。

D級増幅器においては、トランジスタはプッシュプルペアで使用されるのが一般的であり、各トランジスタは180°周期で交互にカットオフと飽和をくり返す。コレクタ電流はトランジスタの飽和期間のみ流れ、トランジスタの飽和電圧は通常充分小さいのでコレクタ損失は少なくなる。

D級増幅器には図1および図2に示す電圧スイッチ型と電流スイッチ型がある。電圧スイッチ型では、2つのトランジスタは電源と直列に接続され、交互に電源電圧をスイッチする。電流スイッチ型では、トランジスタは電源に対し並列に接続され、電源電流を交互にスイッチする。図中の L_2 は定電流化のためのものである。

これらの動作パラメータを表1に示す。この表ではトランジスタの飽和電圧以外の損失等は無視している。

(2) 直線性

D級増幅器の出力電圧は、飽和電圧を無視すればコレクタ供給電圧に比例する。したがって被変調増幅器として使用した場合の変調直線性は良好である。コレクタ電

表1 D級増幅器の基本動作パラメータ

	電流スイッチ型	電圧スイッチ型
出力電圧 (rms)	$\frac{\pi}{\sqrt{2}}(V_{CC}-V_{SAT})$	$\frac{\sqrt{2}}{\pi}(V_{CC}-2V_{SAT})$
出力電力	$\frac{\pi^2}{2R_L}(V_{CC}-V_{SAT})^2$	$\frac{2}{\pi^2 R_L}(V_{CC}-2V_{SAT})^2$
入力電流 (DC)	$\frac{\pi^2}{2R_L}(V_{CC}-V_{SAT})$	$\frac{2}{\pi^2 R_L}(V_{CC}-2V_{SAT})$
入力電力 (DC)	$\frac{\pi^2 V_{CC}}{2R_L}(V_{CC}-V_{SAT})$	$\frac{2V_{CC}}{\pi^2 R_L}(V_{CC}-V_{SAT})$
コレクタ効率	$\frac{V_{CC}-V_{SAT}}{V_{CC}}$	$\frac{V_{CC}-2V_{SAT}}{V_{CC}}$

(注) 以下の損失を無視している

- (1) トランジスタのカットオフ時のリーク電流
- (2) スwitchingの過渡応答時の損失
- (3) 共振回路の同調ずれ、および共振回路の損失

"A Summary of the Solid State AM Broadcasting Transmitters"
 by Tsuneo Iki, Masa-aki Sasada and Yoshitsugu Kusunoki (Mitsubishi Electric Corporation, Tokyo)

図1 電圧スイッチ型D級増幅器

図2 電流スイッチ型D級増幅器

圧がゼロに近いところでは、飽和電圧の定電圧性がくずれることと、トランジスタ容量による駆動電力の漏れで非直線性が若干でてくる。

(3) 損失

損失は大別して、スイッチング時の過渡損と、飽和電圧損がある。飽和電圧損は表1にあるようにコレクタ効率の低下と、出力電圧の低下を伴う。電力スイッチングトランジスタでは飽和電圧は通常1~3V位で、電源電圧を高くとればその影響は少ない。

立上り、立下り時間内ではトランジスタは活性状態にあり、コレクタ損を生ずる。その値はおおよそ高周波1サイクルに占める過渡時間の割合の1/4である。蓄積時間が立上り時間より長いと、両方のトランジスタがともにオンの状態となり、電源が短絡されてサージ電流が流れる。これはトランジスタの損失を増大させるだけでなく、2次破壊をもたらす危険があるので、さげなければならない。

(4) 負荷同調回路

電圧スイッチ型では、出力端は電圧源になるので、高調波に対し高インピーダンスをもつ直列共振、もしくはインダクタンス始端のLPFが必要である。電流スイッチ型では、電流源なので並列共振フィルタになる。フィルタの動作Qは5以上あれば、高調波による損失はほぼ無視できる。

同調回路の離調により負荷がリアクティブになると、負荷の電圧と電流の位相がずれ、電圧スイッチ型では負

方向電流が流れ、電流スイッチ型では負電圧が加わる。このような負荷ではトランジスタが破損する。これを避けるには、電圧スイッチ型ではダイオードをトランジスタと逆向きに並列に接続する。電流スイッチ型ではコレクタ回路に直列にダイオードを入れる。

図(5) 駆動回路

電力トランジスタを高速スイッチング動作させるうえで駆動回路の役割は重要である。低インピーダンスで容量性のベースを駆動するには低インピーダンスの

駆動回路を必要とする。このため駆動回路もスイッチング型増幅器が使用される例が多い。トランス結合で駆動する場合は、リーケージインダクタンスが充分少なくなるよう巻き方に注意しなければならない。電圧スイッチ型では、正弦波でベースを駆動する方が蓄積時間を短くできる。

過剰ドライブは蓄積時間が長くなり、ドライブ不足はスイッチング波形がなまり、損失を増大させる。D級増幅器を被変調増幅器として使用する場合は、変調に応じて

動作点が変わり、最適ドライブレベルも変る。このため駆動回路にも前段変調をかけ、最適ドライブレベルを維持する方法がとられる

3. 高効率変調回路

固体化放送機では、変調回路も高効率化がはかられている。高効率変調方式の例として、図3~図5にPDM方式、PSM方式、搬送波PDM方式の各基本回路を示す。また表2にB級増幅器との比較を示す。

(1) PDM (Pulse Duration Modulation) 方式

音声信号をいったんパルス幅変調信号に変換し、スイッチング増幅したのち低域フィルタで原信号に戻す方式である。

音声信号は副搬送波(三角波)と比較することによりパルス幅変調信号(PDM信号)に変換される。副搬送波周波数は音声信号の最大周波数の5~10倍が必要で、高い周波数を使用するほど後続の低域フィルタが小形軽量化できる。

図3 PDM 基本回路

図 4 PSM 基本回路

図 5 搬送波 PDM 基本回路

PDM 信号に変換する際、適当な直流バイアスを与えれば PDM 信号は直流分を含む。この直流分は搬送波レベルに相当し、パルス幅の変動分は変調信号に相当する。したがって、この方式では低電力部で搬送波出力を

表 2 変調方式の比較

項目 \ 方式	B 級 増 幅	PSM	PDM	搬送波 PDM
効 率	約 60~70%	約 80%	約 90%	約 80~90%
搬送波増幅器との結合	変調トランスまたはチョーク	直結	LPF	—
副搬送波	—	—	50~100 kHz	—
トランジスタの遮断周波数	100 MHz 以上	同左	1 MHz 以上	10 MHz 以上
搬送波出力の可変	不可	連続可変可 (効率の変動あり)	連続可変	同左
搬送波出力の安定化	不可	直流帰還により安定化可	同左	同左
電源	1 電源	2 電源	1 電源	同左
トランジスタの動作モード	直線増幅	同左	スイッチング増幅	同左
ひずみ	トランジスタの非直線ひずみによる	同左	パルス変換誤差とスイッチングスピードによる	同左
採用メーカー例		Harris/沖電気 (100 W/1kW)	W.H (5kW) Harris (5kW) 三菱 (100 W/1kW)	

効率を犠牲にすることなく連続可変できる。同時に適当な直流帰還を行うことにより、搬送波出力を電源電圧変動などに対し安定化できる。

変調器の終段トランジスタは、LPF、負荷（搬送波増幅器）と電源に対し直列に接続される。副搬送波は LPF で除去され、負荷には PDM 信号の平均デューティ比で決まる直流電圧と音声信号が加わる。ダイオードはトランジスタがカットオフのとき、インダクタンスに貯えられた磁気エネルギーを電源に戻す役割がある。このダイオードによってインダクタンスを流れる電流は連続的になり、サージ電圧の発生を防止する。

この回路の効率はトランジスタおよびダイオードの飽和電圧および、スイッチング時の過渡損で決まる。LPF での損失は通常充分に小さい値である。

ひずみは PDM 変換時の三角波の直線性と、トランジスタのスイッチング時間によるパルス幅の変化によって生ずる。パルス幅のデューティは音声信号によって 20~100% まで変化する。したがってパルス波形が維持できないような狭いパルス幅になるとひずみを発生しやすくなるので、三角波に特殊な整形

を施したり、駆動回路に前段変調をかけたりして、全体の直線性を維持する工夫がなされる。

(2) PSM (Progressive Series Modulation) 方式

直列変調の一種であるが、適時電源電圧を切替えて損失を少なくする方式である。

2つの異なる電源を用意し、変調の正側では高压電源により TR1, TR2 を通じて負荷（搬送波増幅器）に電力を供給する。このとき TR2 は完全に飽和しており、ダイオードは逆バイアスとなって低压電源は切離される。変調の負側では、TR1 をカットオフとし、低压電源側よりダイオード、TR2 を通じて負荷に電力を供給する。

トランジスタは直線動作であるが、電源電圧を適時切替えて使用するためトランジスタでのコレクタ損は少なくできる。電源電圧の種類を増せば、効率は 100% に近づけられる。被変調回路と直結であるため、変調トランス、LPF 類が不要で構成が簡単になる利点がある。

あるが、大電力機では損失の点で若干不利となる。

ひずみはトランジスタの直線性で決まる。またトランジスタおよびダイオードがカットオフからアクティブになるとき、もしくは飽和状態からアクティブになるときに、立上り遅れ、蓄積遅れによる過渡ひずみが発生しやすい。したがってトランジスタ、ダイオードはある程度高速スイッチできるものが必要である。

(3) 搬送波 PDM 方式

D級増幅器において、搬送波に直接パルス幅変調を施せば振幅変調波を得ることができる。出力搬送波の振幅は、パルス信号のパルス幅の $\sin$ 値に比例する。したがって、 $\arcsin$ に比例するパルス幅変調が必要で、搬送波の全波整流波形と音声信号を比較してパルス幅変調を行えば、系全体として直線変調を行うことができる。この方式では搬送波増幅と変調が同時に行われるので独立した変調器が不要であり、系として高効率が期待できる。

損失はD級増幅器と同じく、トランジスタの過渡損と飽和電圧損による。トランジスタはD級増幅器のそれよりも相当高速動作が要求される。

4. 耐 雷 設 計

中波放送アンテナは、一般に周囲の建造物より高いので落雷の確率が高く、その対策を考える必要がある。文献 3) によれば、雷サージの 1% 発生頻度の電流波高値は約 100 kA であるから、このあたりを目標に設計すればよい。

過去の雷害例は、空中線整合器に被害が集中しているので、まず整合器の耐サージ能力強化を必要とする。従来、ボールギャップと称する球間隙で放電させる手法が取られていたが、これは、環境条件、経年変化に対する信頼性が低いので、最近では、密閉形の放電ギャップが、高周波アレスタとして使用される。表 3 はその一例である。図 6 は、このアレスタを使用した整合器の一例であり、雷サージ電流の不平衡成分をアレスタで抑え、平衡成分を高周波トランジスタで阻止している。

この方法により、76 dB のサージ減衰量を得ており、これは図 7 の特性を持つ、終段トランジスタに加わっても、障害に至るものでないと考えられる。これらの改良の結果、かえってサージ電流が放送機の方に流れ込み、放送機に障害を与えることも予想される。この点から、図 8 に示すように雷サージ経路を全体としてとらえ、 I_0 を最大とし、 i を最少となるように、接地方法と各部サージインピーダンスの設定に配慮を要する。

図 6 の系統に擬似的に設定した試験設備で、実際に I_0

図 6 空中線整合器と電圧サージ試験

図 7 終段電力増幅トランジスタ (2SC 2175, 三菱) のサージ耐圧特性例

表 3 高周波用アレスタの特性例

項 目	高 速 型	大 電 流 型
許 容 電 流	3 kA	100 kA
寿 命	96 coulombs	20 k coulombs
応 答 速 度	約 2 ns ^{*1}	約 1 μs ^{*1}
静 電 容 量	5 pF ^{*2}	15 pF ^{*2}

*1 印加パルス波形により変化する (概略値)

*2 動作電圧により変化する (1 kV 動作値)

図 8 サージ耐力を改善する機器配置

≈100 kA (18 kJ) を流して製品検査を行っているが、接地抵抗が若干でも大きければ、 I_2 が異常に流れる点は注目を要する。もちろん、これらはあくまで擬似的な試験結果であり、今後フィールドにおいて結果が確認され、

なお改良されるものと考えられる。

以上の考察は、従来の非接地型空中線に対するものであり、本質的改良は空中線を接地型にすることにより得られる。すなわち、雷エネルギーを電子機器で直接受けとめるのではなく、空中線構築物で受けとめるが妥当である。これら接地型空中線は小型化および高能率化にも通じるものであり、国内でも実用の機運があるので、追ってこの分野の報告がなされると推察する。

5. 固体化放送機の例

固体化中波放送機の例として、写真1に三菱電機 100 W 放送機（無停電装置、音声調整装置付、2台化方式）を示す。搬送波増幅器にはD級増幅器を、変調は PDM 方式を使用しており、従来の真空管装置とくらべて格段

写真1 固体化中波放送機例

に小型化、軽量化、高能率化がなされている。

6. む す び

固体化技術を中心とした最近の中波放送機について概要を紹介した。これらの技術は今後いっそうの発展が予想される。予想される主なテーマを列挙すれば、

- (1) 出力電圧は空冷方式で 10 kW 出力まで
- (2) 素子としては、バイポーラから FET へ
- (3) 強力超音波源、高周波加熱への活用

などが対象となろう。

最後に本稿の技術内容に関し、ご討論と有益な助言をいただいた NHK 技術本部、施設、放送網の各位、ならびに CBC, BSS, STV, SBS, NBC 各社の技術部門各位に厚くお礼を申し上げます。

(昭和52年4月5日受付)

〔参 考 文 献〕

- 1) Frederick, H. Raab: 高能率増幅回路の動作クラス分け, 日経エレクトロニクス, 8, 23 (1976)
- 2) 三瓶 徹, 大橋伸一: B級プッシュプル回路の電力効率を上げる新回路, 日経エレクトロニクス, 7, 12 (1976)
- 3) 木下: 電撃電流, 電気評論, 11 (1970)
- 4) 鈴木重雄: 空中線の雷害と放送機の安定策, 放送技術, 9 (1959)
- 5) 中野淳一: TV 中継放送所の雷害対策, テレビ誌, 7 (1969)
- 6) Harris/沖電気: 中波放送機カタログ
- 7) Westing House: Solid State AM Broadcast Transmitter, Technical Paper Presented At the National Association of Broadcasters Conference, Apr. 8 (1975)
- 8) A. Gashwindt: Some reflections regarding the design of future amplitude-modulated Sound-broadcasting transmitters, EBU Rev., No. 129, Oct. (1971)
- 9) Walter, J. Chudobiak & Donald, F. Page: Frequency and Power Limitation of Class-D Transistor Amplifiers, IEEE Jour., SC-4, 1, Feb. (1969)