テレビ放送機用固体化電力増幅器

東京芝浦電気株式会社 小 野 浩

テレビ放送機の固体化レベルは kW 級に達し、その性能、能率および信頼性に確信が持たれるようになった。これまでの性能向上の努力や出力レベル向上の経過を整理し、最も重要な信頼性がどの程度実現されたかを VHF 帯の電力増幅器を中心に述べる。MTBF の実績値は37万時間に達し、固体化のメリットを十分に発揮している。

1. ま え が き

低電力中間周波 (IF) 変調方式が UHF テレビ放送機¹⁾で採用され、その固体化変調部の性能、安定性が評価されるにつれ、VHF テレビ放送機²⁾⁻⁵⁾においても IF 変調方式が採用されるようになった。これに伴ない、性能、信頼性、安全性の面で有利な固体化電力増幅器 (PA) の実現が期待されるようになった。

固体化 PA の開発が推進され、出力レベルの上昇とともに、25kW の放送機の送信管は 5 本²⁾ から 3 本⁵⁾に、そして 2 本¹¹⁾に減少した。10kW については 3 本⁶⁾から 2 本²⁾になり、最近 1 本¹⁷⁾の発表がある。1kW⁷⁾と 5kW⁴⁾は球 1 本式が運用されている。さらに 1¹⁰⁾~3kW¹⁶⁾ 全固体化放送機および 500W 全固体化中継放送機¹²⁾¹³⁾ (サテライト) が実用化されている。

写真 1 VHF 1kW テレビ放送機 (映像: PA 8 並列, 音声: PA 3 並列)

表 1 テレビ放送機用固体化電力増幅器

項目	区分	映像音声分離増幅		映像音声同時増幅
		映 像 用	音 声 用	
増 幅		直線増幅	CW 増幅	直線増幅
信 号		AM-VSB	FM	AM+FM
帯 域		広帯域約 5MHz	狭帯域	広帯域 6MHz
周 波 数		VHF, UHF	VHF, UHF	VHF, UHF
用 途		テレビ放送機	テレビ, FM 放送機	サテライト
定格対実効出力	黒信号	60%	100%	85%
	平 均	29%	100%	54%
重 点		伝送特性	効 率	伝送特性
環 境 条 件	温 度	-20~+60℃: 動作維持 -10~+45℃: 性能維持		
	湿 度	40~95%		
	使 用	連 続		
	過入力	+10dB 程度		
	過電圧	+10% 程度		

これらの放送機に最も多く運用されている 100W クラスの PA を中心に、筆者らの経験的事実等を説明して、性能、出力、能率および信頼性の 4 つのポイントをどのように調和させて高出力化、高信頼化を実現したかを述べる。

写真 1 は VHF 1kW テレビ放送機の例である。

表 1 にテレビ放送機用 PA の分野を示した。テレビ放送機では映像と音声をそれぞれ専用の PA で増幅し、サテライトでは映像、音声を同時増幅している。映像増幅の場合には定格出力対実効出力の比が AM 波を伝送しているために大きく変化することに注意すべきである。

表 2 には筆者らの体験を中心にした VHF 固体化 PA の沿革の例をまとめた。大きくわけると次のようになっ

"Solid State Television Broadcasting Power Amplifier" by Hiroshi Ono (Toshiba Corporation, Kawasaki)

表 2 VHF 固体化電力増幅器の沿革の例

グループ		Ⅰ グ ル ー プ		Ⅱグループ	Ⅲ グ ル ー プ		備 考
		第 1 世代	第 2 世代	第 3 世代	第 4 世代	第 5 世代	
(1) 終段トランジスタ (TR)	名 称	2 SC 1077	B 70-28	CM 75-28 R	CM 80-28 R	CM 80-28 R	最大定格 映像尖頭値 at 28 V
	P_{CMAX} (W)	50	140	220	250	250	
	P_{OMAX} (W)	10	20	40	60	90	
	G_P (dB)	3	3	9	10	10	
	I_{CDC} (A)	—	—	2.6	5.5	5.5	
(2) 励振段動作		A B 級		A 級			
(3) 電 源	エ ミ ッ タ ー	抵 抗 有		直 接 接 地			
	ベ ー ス	抵 抗 分 割		ダイオードバイアス		バイアス	
	コ レ ク タ ー	シリーズドロップパー			スイッチングレギュレーター		主電源
(4) R F 部	回 路	同調チャンネル専用型			広帯域プッシュプル		
	合 成 方 式	単 純 合 成			プッシュプル		
(5) コンデンサー	R F	磁器コン 積層マイカコン			チ ッ プ コ ン		
	可 変 部	バリコン多数			バリコン最少数		
	バ イ パ ス	タンタル	電解コン	電 解 コ ン		高温用電解	
(6) リ ミ ッ タ ー		無			有		
(7) 標準ユニット	出 力 (W)	10	25	50	100	150	映像尖頭値
	利 得 (dB)	27	10	33	22	33	
	電 源 (V)	28	28	28	28	28	
	電 源 (A)	2.5	4.0	5.1	9.0	11.0	
	T R 数	7	4	5	5	5	
	総 段 数	6	3	4	3	3	
	A B 級 段 数	2	2	1	1	1	
(8) 計算 MTBF	部 品 点 数	313		192	160		環境係数 1
	MTBF (hr)	65,900		99,700	101,000		
(9) 実績 MTBF	総 台 数	96		154	356		国内 1978年10月調査
	現 用 数	50		67	266		
	MTBF (hr)	90,600		130,400	371,200		
(10) 運 用 開 始		1971.1	1972.9	1973.4	1974.9	1977.3	

(注) 同時増幅の場合、映像単独増幅時の約 1/2 の出力となる。

ている。

I グループ：同調型 AB 級多段増幅方式

II グループ：同調型 AB 級 1 段増幅方式

III グループ：広帯域プッシュプル AB 級 1 段増幅方式

図 1 は各グループごとの系統を示している。

2. 性能の向上

2.1 I グループの問題点

(1) RF 帯振幅周波数特性

トランジスタの利得が 3dB と低いため、第 1 世代では 6 段の多段同調増幅器となり、映像搬送波 (f_v) に対して、 $-1\text{MHz} \sim +4.2\text{MHz}$ の帯域を確保するのにかなり努力を要した。スタガ同調となりやすく、レベルを変化させると傾斜が変化することがあった。第 2 世代は出

力を 30W まで増加させたが、この場合、第 1 世代の数 W 6 段の PA と第 2 世代の 30W 3 段の PA を接続するため 9 段接続で働かせることになり、いっそう調整がむずかしいことになった。

(2) SBA 波形

AM-VSB 信号の伝送を行うため、 $\pm 1\text{MHz}$ の DSB 部と $+1 \sim +4.2\text{MHz}$ の SSB 部との間にサイドバンドアナライザー波形上で写真 2 のように段差を生ずることがある。これは AB 級の動作点により凹にも凸にも変化する⁴⁾。I グループの場合、AB 級の段数が 2 段以上かつ 3 本以上のトランジスタとなるため、最良点の決定が後述の下側波帯の再生とも関係して非常に困難であった。

(3) 下側波帯の再生

- (注) 1. 100 W 出力の PA を中心にとりあげている
 2. 300 W 出力の PA も実用化されている
 (終段：4本のトランジスタ並列)

図 1 VHF 固体化電力増幅器の系統

写真 2 SBA 波形 (変調度 60%)

A 級増幅を採用できれば、混変調も少なく、 $f_v-1.25$ MHz 以下の下側波帯が入力より増加することはないが、出力レベルと効率の面から AB 級を使用しなければならないため、この再生の問題を生ずる⁴⁾。図 2 は変調度により下側波帯レベルが変化している様子を示している。AB 級多段増幅の場合これが複雑な動きを示すため、最良点の設定のための調整に時間を要した。第 3 世代以降はこの問題をほとんど生じていない。

(4) 同期信号のひずみ

I グループのトランジスタは、いずれも C 級増幅用であるため、安全動作領域 (ASO) 拡大に寄与するエミッタの安定化抵抗が小さく、外部にエミッタ抵抗を付加して、無信号時のコレクタ電流 (アイドル電流) を流せるようにした。RF のバイパスコンデンサをエミッター

図 2 下側波帯減衰特性

写真 3 垂直同期波形

写真 4 微分利得 (DG)

抵抗に並列に必要なとしたが、ここに大容量の電解コンデンサを入れると垂直同期波形にひずみを生じた (図 3 の (1) の回路、写真 3)。すなわち、AB 級動作トランジスタのビデオインピーダンスが平坦で小さくない場合にこのようなひずみが生ずる。

(5) 変調度変化に伴う特性変化

AB 級動作トランジスタの非直線性により、変調度が変化すると、白変調度、DG、DP、SBA 波形、下側波帯特性、出力変化および出力変動などが変化する。写真 4 に DG の変化例である。

(6) 温度特性の補償

ASO のより大きな AB 級トランジスタとしたため、エミッター抵抗が不要となり、ゼロインピーダンス化が可能となった。このためバイパスコンデンサーも不要となり波形ひずみ等が改善できた。

(4) ダイオードバイアスの採用

図3の(2)のようなダイオードによるバイアス方式としたため、温度補償が容易になり温度特性も良好となった。AB 級段数が1段しかないことも有効に働き、温度特性の安定性は非常に向上した。この方式はⅢグループの一部にも継続使用した。

3. 高出力・高効率の実現

ⅡグループからⅢグループへの発展はまさに高出力・高効率への道を示している。性能向上策はⅡグループの対策をとりいれているのはもちろんである。

(1) 余裕度の大きいトランジスタの採用

終段トランジスタは CM80-28R によっている。CM-75と比較すると 28V で 5.5A と約2倍であり、利得も

図4 単純並列合成回路

図5 プッシュプル回路

写真5 広帯域振幅周波数特性 (センターマーカー 200 MHz, マーカー 10 MHz ごと, レベル±1dB)

やや高い。実力は約 100W 出力のトランジスタである。

(2) 広帯域プッシュプル回路の採用

Ⅰ, Ⅱグループでは図4のような単純並列合成回路を使用していた。この方式ではトランジスタの動作バランスをとることがむずかしく広帯域化も困難である。Ⅲグループでは図5のような広帯域プッシュプル回路⁸⁾を採用した。T4, T5 が入出力の逆相用トランスであり、不平衡-平衡の変換トランスとなっており、トランジスタの対地容量を軽減できるため広帯域化に適している。広帯域振幅周波数特性の波形が写真5であり、約 100 MHz カバーである。

(3) Q の高いチップコンデンサーの採用

ここで、採用したチップコンデンサーは、Q が 10,000 以上と高く、回路損が小さくできる。また電力容量も大きいので、広帯域、高出力の面から有利である。温度上昇も小さくなるため長寿命化にも寄与している。

(4) バイアス回路のゼロインピーダンス(ZO)化

図6に図3の(3)ハイブリッド方式と(4)ZO

図6 バイアス回路の出力特性

方式の出力特性を示したが、ZO方式では約 0.5Ω の出力インピーダンスとなっている。したがって、高出力レベルで h_{FE} が飽和してもバイアス電流は不足を生じない。このため第5世代では第4世代より5割近く大きな出力が得られるようになった。下側波帯の再生も数dB軽減している。図3でもわかるように、ベースバイアスの電解コンデンサが(3)と(4)で3桁も小さくなっていることも出力インピーダンスが小さくなったためである。

(5) 主電源の高効率化とゼロインピーダンス化

コレクタすなわち主電源にスイッチングレギュレーターを使用して全体の高効率化を行った。電源の出力インピーダンスが高いと同期波形のひずみなどを生ずるためスイッチングレギュレーターに $1.5V$ ほどのシールドロップを内蔵した⁹⁾。この効果は約 $30dB$ である。スイッチング周波数を高くすることによりインピーダンスの改善を行うことも考えられている。

(6) RF 出力回路の最適化

トランジスタの出力回路の整合は、直線性を重視するときと飽和出力を重視するときとで異なり、効率は当然大きく違ってくる。信頼性面より効率をできるだけ上げて熱の発生を最少とする必要があるため、かなり効率重視の回路となっている。このとき出力回路はできるだけ Q が低く、トランジスタからみたインピーダンスがほぼ次の条件を満たしている必要がある。ただ、このインピーダンスは数 Ω であるため、測定上の誤差はかなり入りやすい。

$$R_0 = \frac{V_{CC}^2}{2P_0} \quad (1)$$

$$|X_0| = \frac{1}{\omega C_{CB}} \quad (2)$$

R_0, X_0 : 出力インピーダンスの抵抗分とリアクタンス分, P_0 : 出力電力, V_{CC} : コレクター電源

電圧, C_{CB} : コレクター・ベース間容量

実際の能率としては、実効出力に対して終段コレクター効率 50% であり、PAとしては約 30% が実現できるようになった。

4. 信頼性の検討

4.1 計算による MTBF

各グループの代表的なPAにつき、機構部品のファクターを無視し、環境係数を1として例えばトランジスタ・ダイオードの故障率を一率に $0.5 \times 10^{-6}/hr$, $0.2 \times 10^{-6}/hr$ として計算したのが、表2の(8)である。Iグループの部品点数がIIIグループの2倍ほどあるのが目立っている。Iグループが6万時間、II, IIIグループが10万時間程度の予測値となっている。

4.2 実績による MTBF

表3に世代別のMTBFの実績値をあげた。この表より次のようなことがわかる。

- (1) すべてのグループとも予測MTBFを上まわっている。
 - (2) IIIグループのMTBFが非常に長い。
 - (3) 現用台数の70%を占めるIIIグループの故障件数が26%と少ない。
 - (4) 稼働月数の27%を占めるIIグループの故障件数が43%と多い。
 - (5) 用途別にみると、音声専用増幅用が故障件数の46%を占め、I, IIグループがほとんどである。
- IIIグループの高信頼性が証明されるデータである。また(5)の理由については、I, IIグループの映像増幅用は終段電流 $1.4A$ であるのに音声用は $2.3A$ と大きいためである。

4.3 故障内容の分析

稼働月数に対して、故障内容を分析したのが表4である。グループ別にも内容がわかるようになっている。トランジスタ故障が51%を占めており、IIグループがその56%を占めている。これは、ジャンクション温度が $110^\circ C$ 以下になっているにもかかわらず生じているので並列トランジスタの動作アンバランスなどが原因であろう。また電源が過電圧になったため(*印)IIグループで5件故障している。IIIグループ(第4世代に属する)で過大入力により4件故障を発生している。

出力低下および特性劣化がIグループを中心に発生しており、音声増幅用の出力低下が6件、映像増幅用の下側波帯特性の劣化が3件生じている。

4.4 IIIグループの信頼性向上の理由

高出力化、高効率化の中で述べたことが信頼性向上に寄与していることは当然であるが、その他に長寿化に

表 3 VHF 固体化増幅器の実績 MTBF

グループ 項 目		I グループ		II グループ	III グループ	総 合	
		第 1 世代	第 2 世代	3 第世代	第 4, 5 世代		
映 像 用	台 数	27	15	27	46	115	台 月 件
	稼働月数	1,969	879	1,326	935	5,109	
	故障件数	2	3	2	0	7	
	MTBF(hr)	590,700	175,800	397,800	561,000	437,900	
音 声 用	台 数	—	8	34	50	92	台 月 件
	稼働月数	—	480	1,624	891	2,995	
	故障件数	—	6	10	0	16	
	MTBF(hr)	—	48,000	97,400	534,600	112,300	
同 時 増 幅 用	台 数	—	—	6	170	176	台 月 件
	稼働月数	—	—	310	3,742	4,052	
	故障件数	—	—	3	9	12	
	MTBF(hr)	—	—	62,000	249,500	202,600	
総 合	台 数	27	23	67	266	383	台 月 件
	稼働月数	1,969	1,359	3,260	5,568	12,156	
	故障件数	2	9	15	9	35	
	MTBF(hr)	590,700	90,600	130,400	371,200	208,400	

- (注) 1. 運用状況のはっきりした国内のユニットに限定した。
 2. 1978年10月の調査である。
 3. 6カ月以内の初期不良は含めていない。
 4. 第4と第5世代はⅢグループとして一緒に扱っている。
 6. 30日×20時間/月としている。

表 4 故 障 内 容 の 分 析

故 障 内 容	グループ	稼 働 月 数									小 計	合 計	構 成 率 (%)
		3	6	12	24	36	48	60	72	84			
トランジスタ * 過 電 圧 ** 過 入 力	I		2	1							3	23	51.1
	II			2	2	3 1*	2*	2*	1		13		
	III		1	1 4**	1*						7		
出力低下または特性劣化(Δ)	I		1	1 (Δ)	5		2 (Δ)				9	10	22.2
	II					1					1		
	III										0		
ハンダ付不良	I										0	6	13.3
	II		1								1		
	III	1	2	2							5		
コンデンサー	I			1				1			2	3	6.7
	II						1				1		
	III										0		
ダイオード	III				1						1	1	6.7
出 力 検 知	III	2									2	2	
小 計		3	7	12	9	5	5	3	1		45		100
合 計		10		35									

(注) 1. 出力検知はⅢグループのみ装備している。

役立っていると思われる環境条件に対する安定化対策¹⁵⁾について説明する。

(1) 過大入力対策

テレビ放送機ではDC-AC結合の切換え時に過励振されることがあり、サテライトではAGCによる過励振がある。レベルとしては+6～+10dB程度である。これ

図 7 リミッター特性 (定格出力 35W)

らの対策としてⅢグループではリミッターを採用した。第5世代は複合ダイオード式により良好なリミッター特性を得ている (図 7)。

(2) 過大電圧対策

安定化電源の故障による過大な電源電圧の印加を防止するため、過電圧保護回路を設けている。したがって、PAは少なくともその設定電圧 (約 +10%) に耐えねばならない。バイアス電圧がこのとき同時に過大になると順方向バイアスで使用しているトランジスタの熱暴走を招くので、図3のバイアス回路のように、さらに5V程度に安定化して直接ベース電圧が上昇しないようにしている。

(3) 温度対策

(a) バイアス回路: サーマルトラッキングを良好にすることが重要である。とくに高温で不良であるとトランジスタの熱暴走を招きやすい。第5世代のZO方式はトランジスタのB-E間のジャンクションとダイオードを組合せているので、この追従性が良好である。

(b) 筐体構造: I, IIグループは横型のラックマウント型 [420(W)×150(H)×250(D)mm] であった。Ⅲグループは縦型 [105(W)×300(H)×350(D)mm] としたため放熱フィンの包絡体積が約2倍となり、約200Wの損失を容易に熱処理できるようになり、ジャンクション温度を110°C以下におさえることができる。

5. む す び

このように VHF PA においてはトランジスタ1本当りの出力が 90W, PA として MTBF 37 万時間の実績

をあげることができた。そのための主要項目は次の通りである。

- (1) 高利得、許容損失の大きいトランジスタの選択。
- (2) 高性能コンデンサを使用。
- (3) AB 級動作段数を最少とする。
- (4) 電源回路のゼロインピーダンス化。
- (5) 広帯域プッシュプル回路の採用。
- (6) 高能率化の推進。
- (7) 環境条件に対する安定化対策。

これらの考え方を適用して、今後とも固体化のメリットを発揮した固体化電力増幅器がますます発展してゆくことを期待したい。

最後に、本文のために貴重なデータを提供してくれた送信機設計課梶原典夫君に深謝します。

(昭和54年3月26日受付)

〔参 考 文 献〕

- 1) 倉石ほか: UHF 大電力 TV 放送装置, 東芝レビュー, 24, 8 (1969) 957-963
- 2) 田口ほか: IF 帯における低電力段変調方式を使用した VHF テレビジョン放送機の諸特性, テレビ誌, 24, 6 (1970) 435-441
- 3) A.H. Bott, et. al.: IF Modulation of VHF Television Transmitters, BC-16, No. 3, Sep. (1970) 65-74
- 4) 北沢: テレビジョン放送機用直線増幅器の振幅周波数特性, 信学誌, 55-B, 12 (1972)
- 5) 鈴木ほか: VHF 50kW テレビ放送装置, テレビ学会無線技術研資, RE 73-11 (1973)
- 6) 北沢ほか: 送信管3本方式 VHF 10kW テレビ放送機, テレビ全大 (1973) 173-176
- 7) 市原ほか: 電子管1本方式 1kW テレビ放送機, テレビ学会無線技術研資, RE 73-20 (1973)
- 8) 小野ほか: VHF 広帯域直線増幅器, テレビ全大 (1974) 7-10
- 9) 小山ほか: TV およびサテライト用スイッチングレギュレータ電源, テレビ学会無線技術研資, RE 75-18 (1975)
- 10) 小野ほか: 全固体化 VHF 1kW TV 放送機, テレビ全大 (1976) 6-6
- 11) 土屋ほか: 新形 50kW VHF テレビ放送機, 放送技術, 5 (昭和 51)
- 12) NHK・東芝: 映・音同時増幅方式による VHF 500W 全固体化放送装置, 放送技術, 11 (昭和 51)
- 13) 末松: テレビジョン中継放送装置の諸問題, テレビ誌, 30, 11 (1976) 868-877
- 14) 杉本ほか: 送信管1本方式 VHF 5kW テレビ放送機, テレビ全大 (1977) 7-2
- 15) 山岡ほか: UHF 500W テレビ中継放送装置, テレビ学会技術報告, RE 78-12 (1978)
- 16) 河西ほか: VHF 全固体化 3kW TV 放送機, テレビ学会技術報告, RE 78-12 (1978)
- 17) J.F.H. Binns & J.F. Weedon: A Compact 10 kW Band III Television Transmitter, IBC (1978)