

パルス幅変調インバータ

Pulsewidth Modulated Inverter

In spite of its extensive use for motor speed control purposes the pulsewidth modulated inverter has never been used as a constant voltage constant frequency inverter (CVCF).

Paying attention to its excelling capability in voltage control and reduction of harmonics in the voltage, the authors recently attempted its application as a small capacity CVCF. As a result, the pulsewidth modulated inverter proved serviceable as a CVCF within the capacity range up to several ten kVA. Its dynamic characteristics are outstanding. For instance, for a step load of 50% this inverter has ensured a voltage transient of $\pm 6\%$ and a recovery time of up to 1 cycle.

松平信紀* *Nobunori Matsudaira*
 岩田幸治* *Kôji Iwata*
 竹内昌明* *Masaaki Takeuchi*
 宮下紀一** *Norikazu Miyashita*

1 緒 言

最近、計装制御システムやコンピュータによる生産管理システムおよびデータロギングシステムの高度な発達に伴い、小容量の無瞬断電源の必要性が高まっている。したがって、これらの需要にこたえるため新たにパルス幅変調方式インバータを開発製作した。

図1は、今回開発したインバータの外観で、表1はその仕様諸元を示すものである。

おもな特長を列記すると以下のようなになる。

(1) 負荷急変や電源急変に対し、1サイクル以内の速応性を

有し、出力変動は多重インバータと同等以上である。

(2) 電圧制御特性が直線的であり、全負荷領域における負荷の急増急減に対し直線的な応答を示す。

(3) インバータの起動停止は、サイリスタゲートの制御により瞬時に行なうことができる。

(4) 全負荷起動を行なっても転流失敗をしないよう起動シーケンスを配慮し、突入電流の大きい変圧器を負荷側に接続した場合でも全くさしつかえない。

(5) 125%以上の過負荷の場合、直ちに過電流検出回路が動

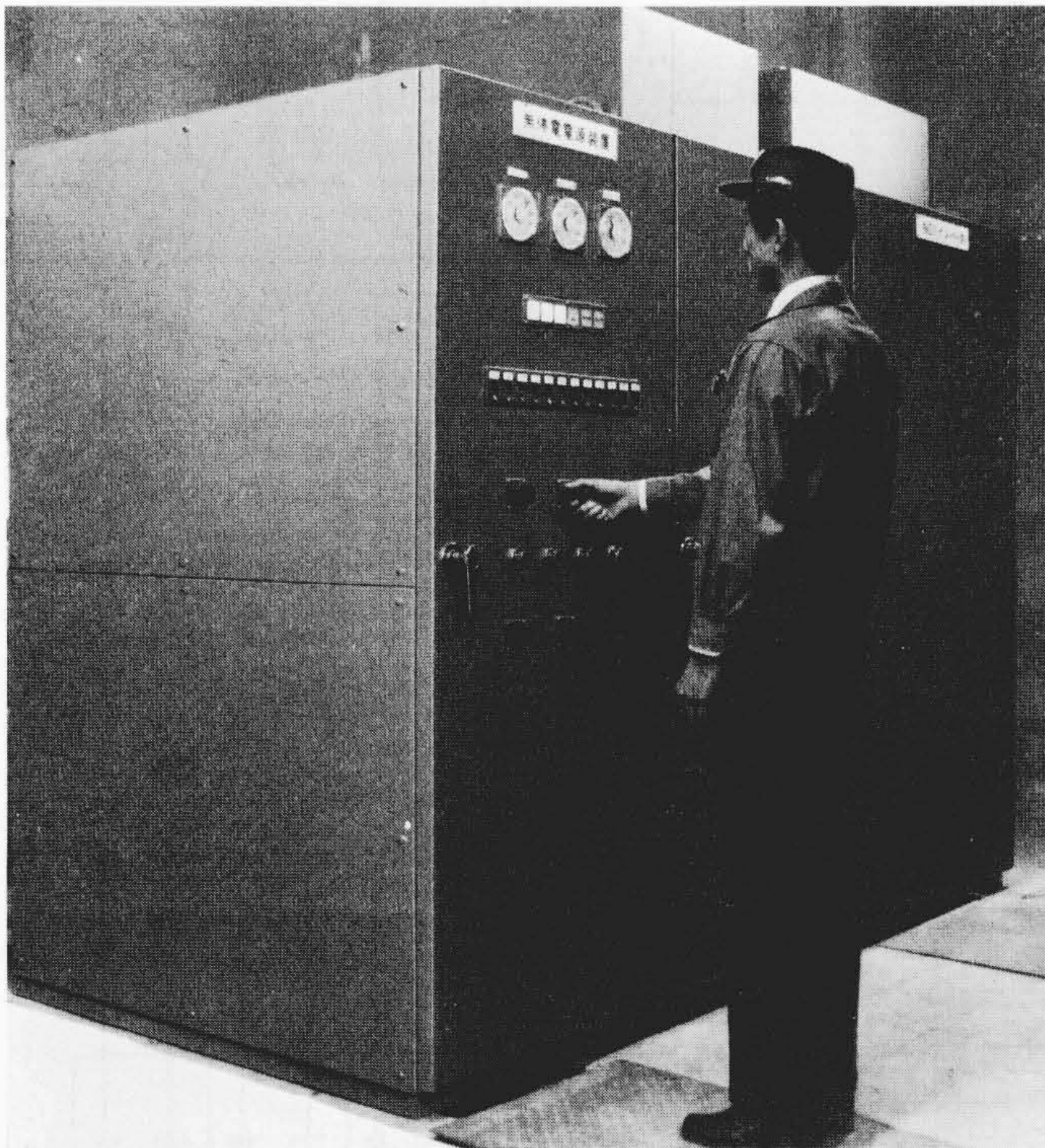


図1 50kVAパルス幅変調インバータ 操作盤、整流器盤、インバータ盤の3面から成る。

Fig. 1 50kVA Pulsewidth Modulated Inverter

表1 インバータ仕様諸元 仕様、寸法などを示す。
 Table 1 Principal Characteristics

項 目	仕 様 ・ 寸 法
1. 交流入力 (1) 定格電圧 (2) 相 数 (3) 周 波 数 (4) 短絡容量	220V $\pm 10\%$ 以内 三相 3 線式 50Hz $\pm 5\%$ 以内 100kA
2. 直流入力電圧 (1) 定格電圧 (2) 電圧許容範囲 (3) バッテリー	220V DC 180~270V DC 高率放電鉛バッテリー
3. 交流出力 (1) 定格出力 (2) 定 格 (3) 定格負荷力率 (4) 定格許容範囲 (5) 出力周波数 (6) 出力整定精度 (7) 相 数 (8) 出力電圧 (9) 出力整定精度 (10) 出力可調整範囲 (11) 出力瞬時変動 ただし、負荷急変量 または、交流入力 (12) 出力回復時間 (13) 電圧波形ひずみ率	50kVA 連 続 0.8遅れ 0.7~0.9遅れ 50Hz $\pm 0.01\%$ 三相 3 線式 220V $\pm 2\%$ 以内 $\pm 5\%$ " $\pm 10\%$ " 定格出力以下の範囲で、 $\pm 30\%$ 以内 停電または回復瞬時 3 サイクル以内 5 %以下(線形負荷において)
4. そ の 他 (1) 冷却方式 (2) 盤 構 成 (入力盤、整流器盤、インバータ盤 各1面)	強制風冷 3 面 幅2,500×奥行1,300× 高さ1,900(mm)

* 日立製作所日立工場 ** 日立製作所日立研究所

作し、限流運転を行なう。また万一、短絡事故が発生した場合でも出力電圧は直ちに押えられ、100%以下の電流に抑制される。

(6) 必要に応じ商用同期回路を付加することができる。

(7) ゲート制御回路の心臓部には、アナログ方式を採用した。積分回路は部品の温度特性、経年変化に対しても、ほとんど影響を受けないように設計され、位相特性などきわめてすぐれている。また、パターン用積分回路での時間遅れ要素は皆無である。

(8) ノイズによる制御回路誤動作を防ぐため、主回路と制御回路との結合部および操作回路と制御回路の結合部には特に注意を払って設計した。

2 定電圧制御法および波形改善法

今回開発されたインバータは、定電圧制御法としてパルス幅変調方式を採用し、波形改善の方法としてはパルス幅変調により擬似正弦波を作り、これを逆L形出力フィルタで平滑するという方法をとっているが、以下に一般の定電圧制御法および波形改善法との比較を試みる。

定電圧定周波インバータ（以下、CVCFと略す）は、その電圧制御方法により大きく次の三つに分けられる。

- (1) 可変入力電圧インバータ
- (2) 通電幅制御インバータ
- (3) パルス幅変調インバータ

図2～5は、これらの一般的な回路構成を示すものである。

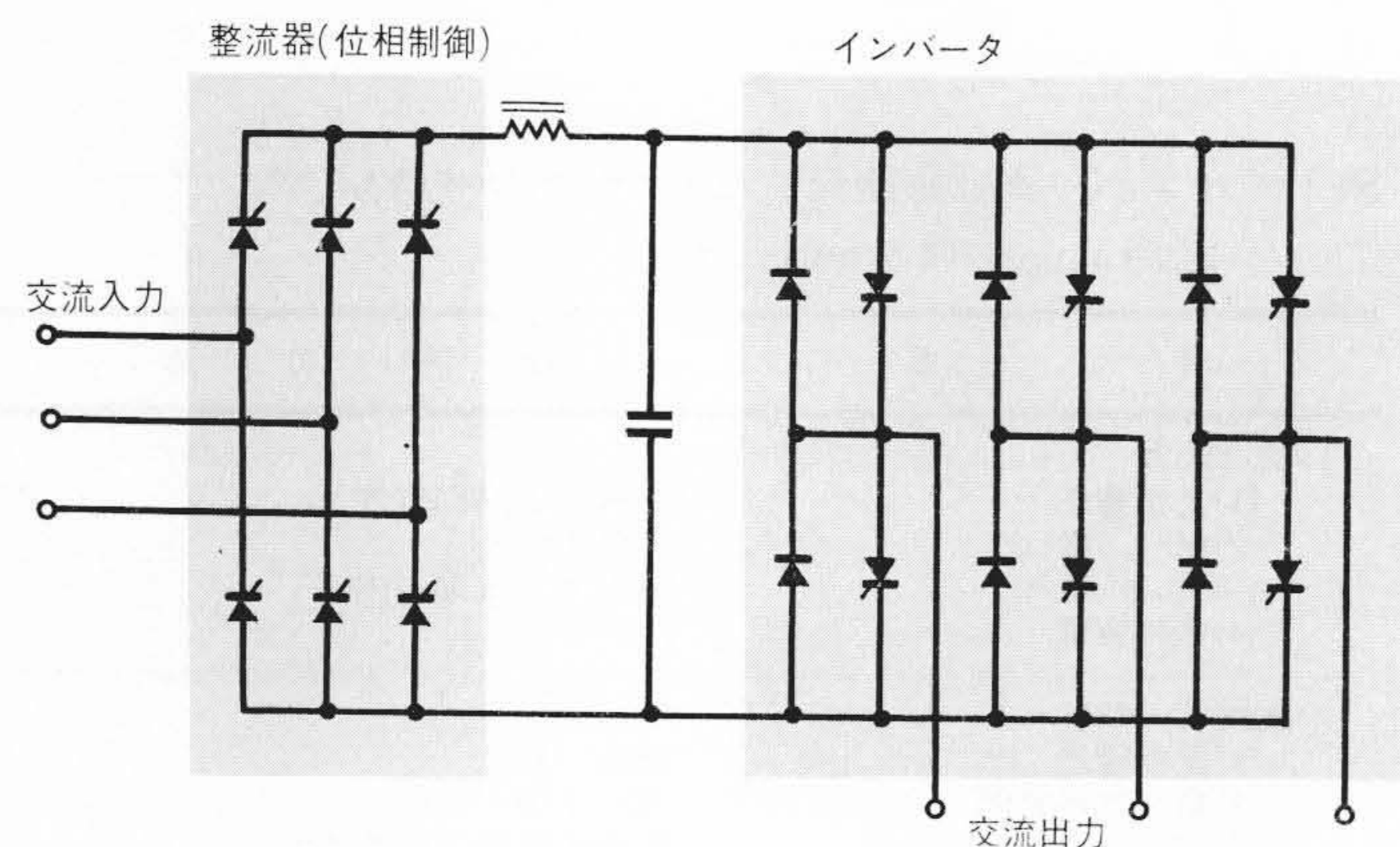


図2 可変入力電圧インバータ 整流器の位相制御を行ない、直流電圧を調整する。

Fig. 2 Variable Input Voltage Inverter

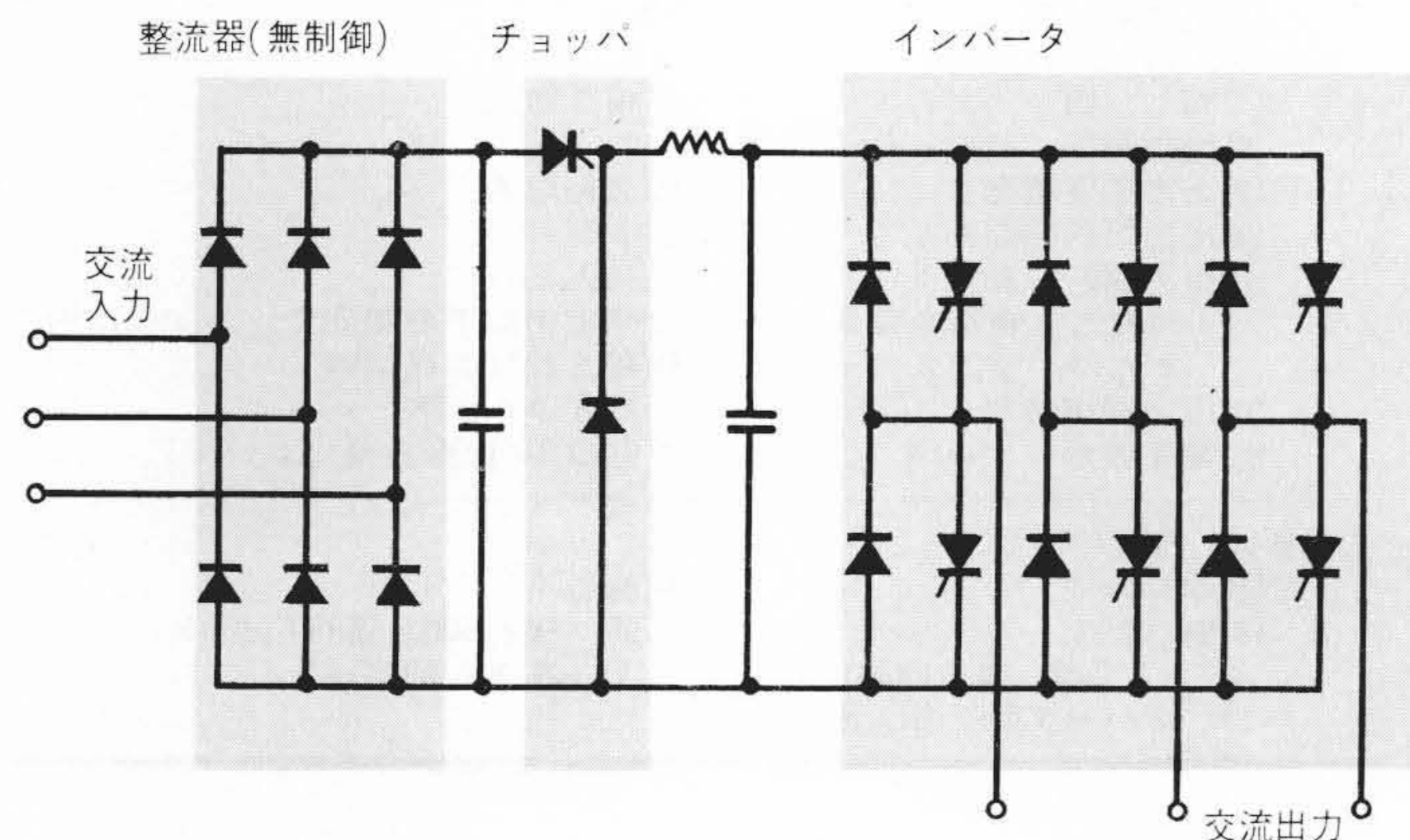


図3 可変入力電圧インバータ チョッパにより、直流電圧を調整する。

Fig. 3 Variable Input Voltage Inverter

可変入力電圧インバータは、交流入力を直流に変換する整流器部分にサイリスタを用いた三相ブリッジ整流接続や三相混合ブリッジ整流接続を用いる方法と、ダイオードを用いた三相ブリッジ整流接続によりいったん直流に変換した後、チョッパにより可変直流電圧を得る方法がある。この場合、インバータは直流入力電圧をそのまま一定周波数の交流出力に変換するもので、インバータの制御回路は簡単である。定電圧出力という点からは、インバータを一つ介した形で定電圧制御をかけるので、速応性にかける欠点がある。

通電幅制御インバータは、CVCFとして最も一般的な方式であり、定電圧制御の速応性もすぐれている。また、無停電電源としてバッテリーを接続した場合の交流入力から直流入力への切換え時にも安定した出力電圧を供給できる。さらに、インバータのアーム数が多いため、大容量出力を得ることも容易である。出力制御特性は、交流出力電圧と直流電圧との関係が余弦関数で与えられるから、直線的な制御を行なうには本質的に難がある。

$$E_a = \frac{\sqrt{6}}{\pi} E_d \cos \frac{\delta}{2}$$

ここに、 E_a ：交流出力電圧

E_d ：直流入力電圧

δ ：出力電圧がゼロになる期間(度)

パルス幅変調方式インバータは素子構成が簡単であり、小容量向きである。無停電電源としても利用できる。出力電圧制御特性は直線的である。インバータ回路の動作周波数が高

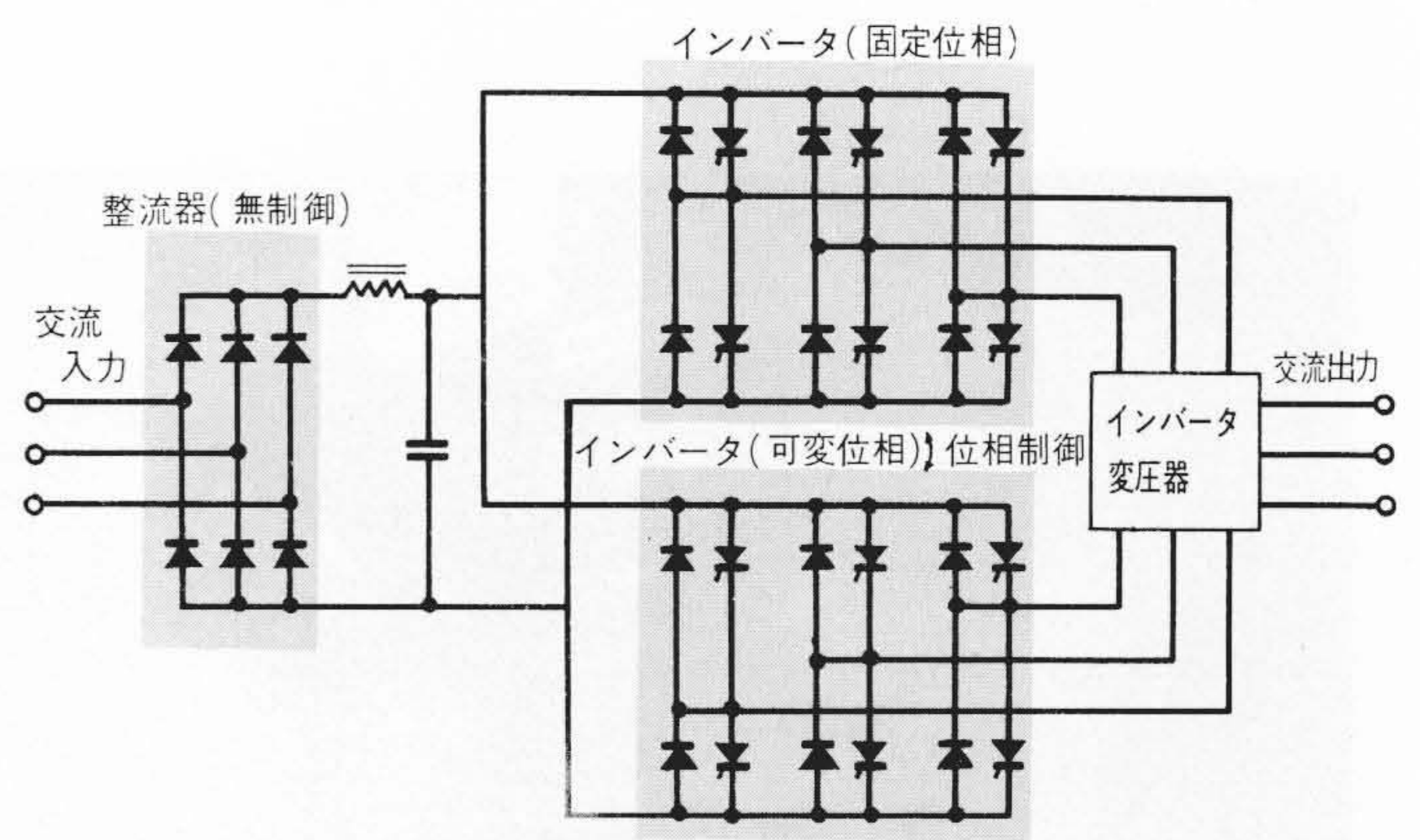


図4 通電幅制御インバータ 六相インバータの場合を示す。

Fig. 4 Pulsewidth Controlled Inverter

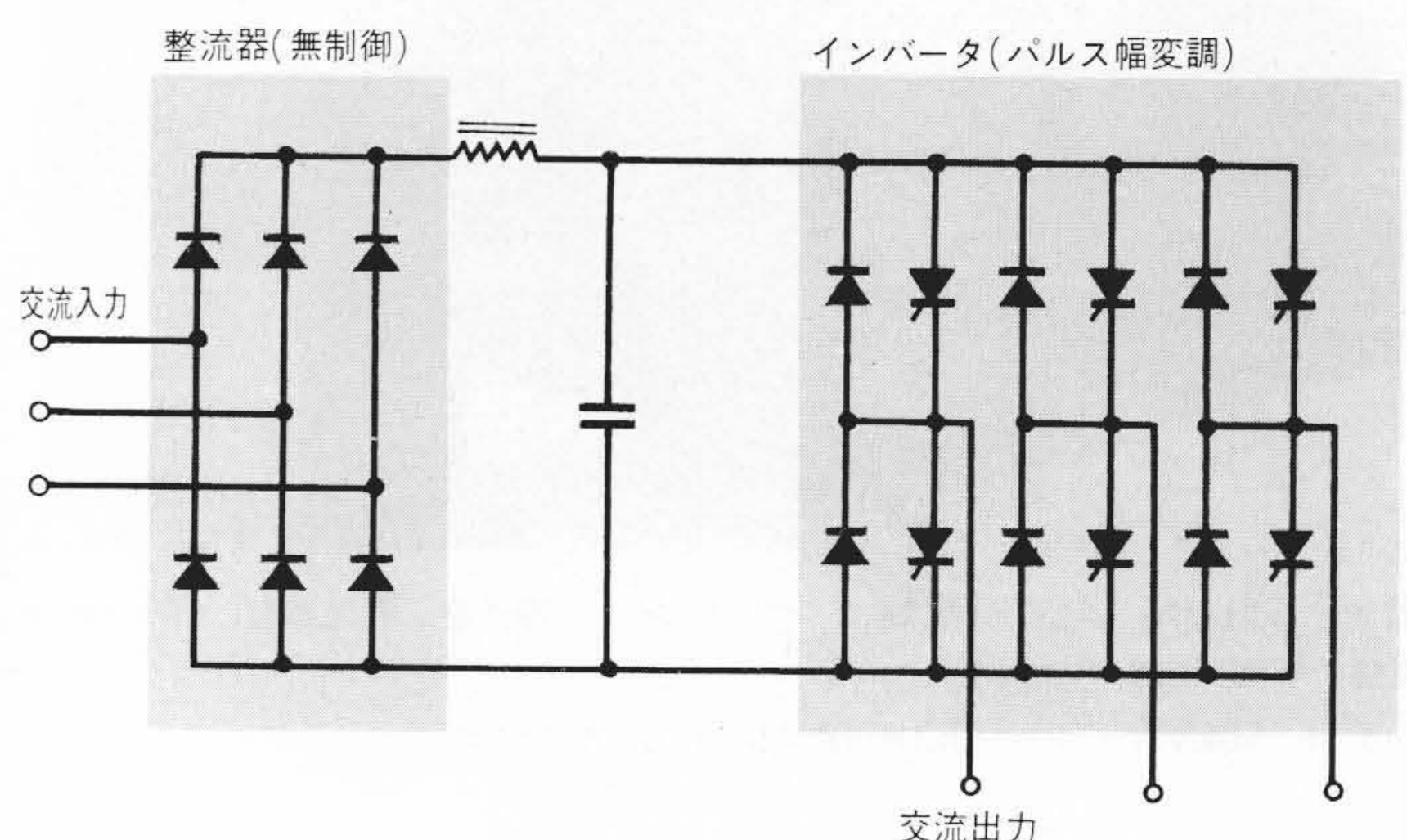


図5 パルス幅変調インバータ 三相インバータの場合を示す。

Fig. 5 Pulsewidth Modulated Inverter

表2 出力電圧制御方法の比較 おもな定電圧制御方式についての比較を行なう。

Table 2 Method of Output Voltage Control

項目	可変入力電圧インバータ		通電幅制御インバータ	パルス幅変調インバータ	備考
	整流器位相制御	チョップ式			
基本回路	図2	図3	図4	図5	—
ゲート制御回路					
整流器	要	不要	不要	不要	
チョップ	—	要	—	—	
インバータ	要	〃	要	要	
電圧精度	良	良	良	良	
電圧制御速応性	悪	悪	〃	最良	
周波数精度	良	良	〃	良	
出力波形	やや悪い	やや悪い	やや悪い※	〃	フィルタ定数同じ
効率	良	〃	良	やや悪い	
電源側力率	悪	良	〃	良	
無停電電源化	不可	可	可	可	

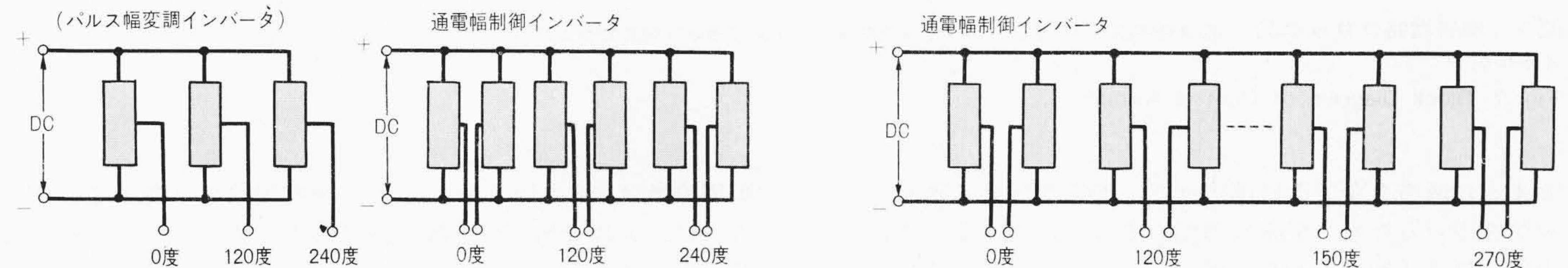
注：※印は転流周期は出力周波数と同じ。

表3 高調波除去方法の比較 三相、六相および十二相インバータの高調波除去方法の例を示す。

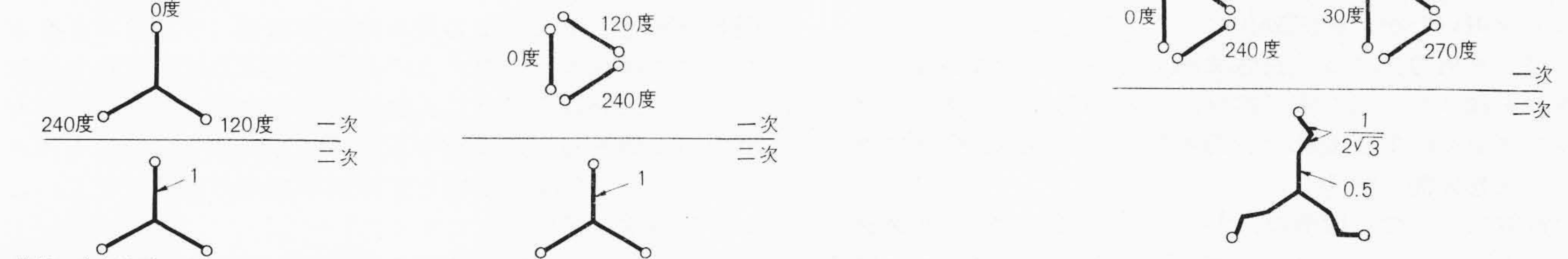
Table 3 Eliminating Method of Higher Harmonics

高調波除去方式	パルス幅変調インバータ 三相インバータ	通電幅制御インバータ 六相インバータ	通電幅制御インバータ 十二相インバータ	備考
インバータ接続		付図1.		
出力変圧器結線		付図2.		
出力波形		付図3.		フィルタ入力部
転流周期	$9f$	$5f$	$1f$	f ：出力周波数
残存低次調波	7, 11, 17, 19, ……	11, 13, 17, 19, ……	11, 13, 23, 25, ……	—
ひずみ率(フィルタ入力)	150%以下	60%以下	20%以下	入力変動±20%
ひずみ率(フィルタ出力)	5.0%以下	3.5%以下	2%以下	フィルタ定数同じ

付図1. インバータ接続

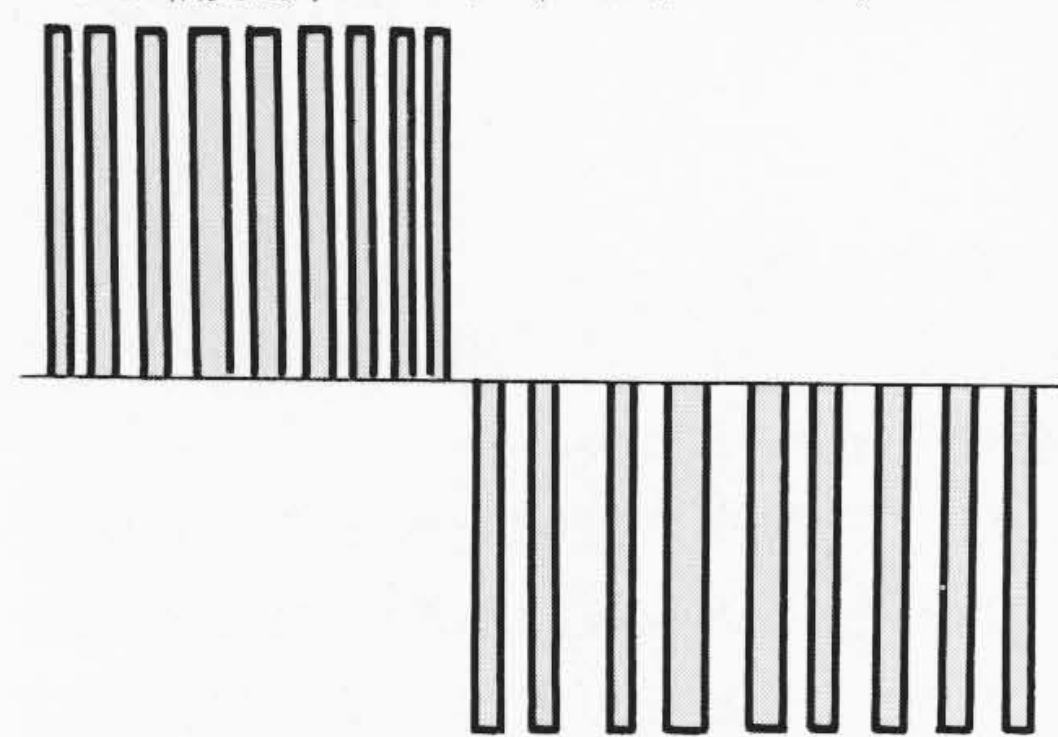


付図2. 出力変圧器結線

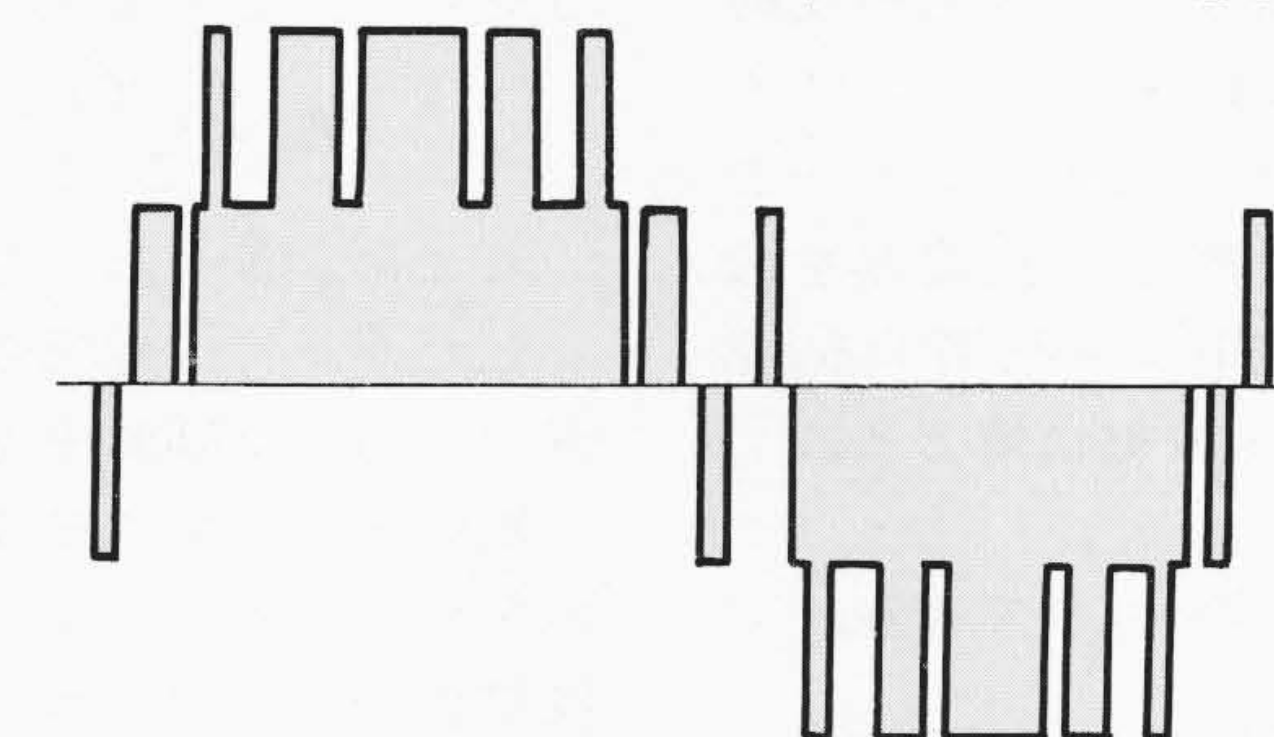


付図3. 出力波形

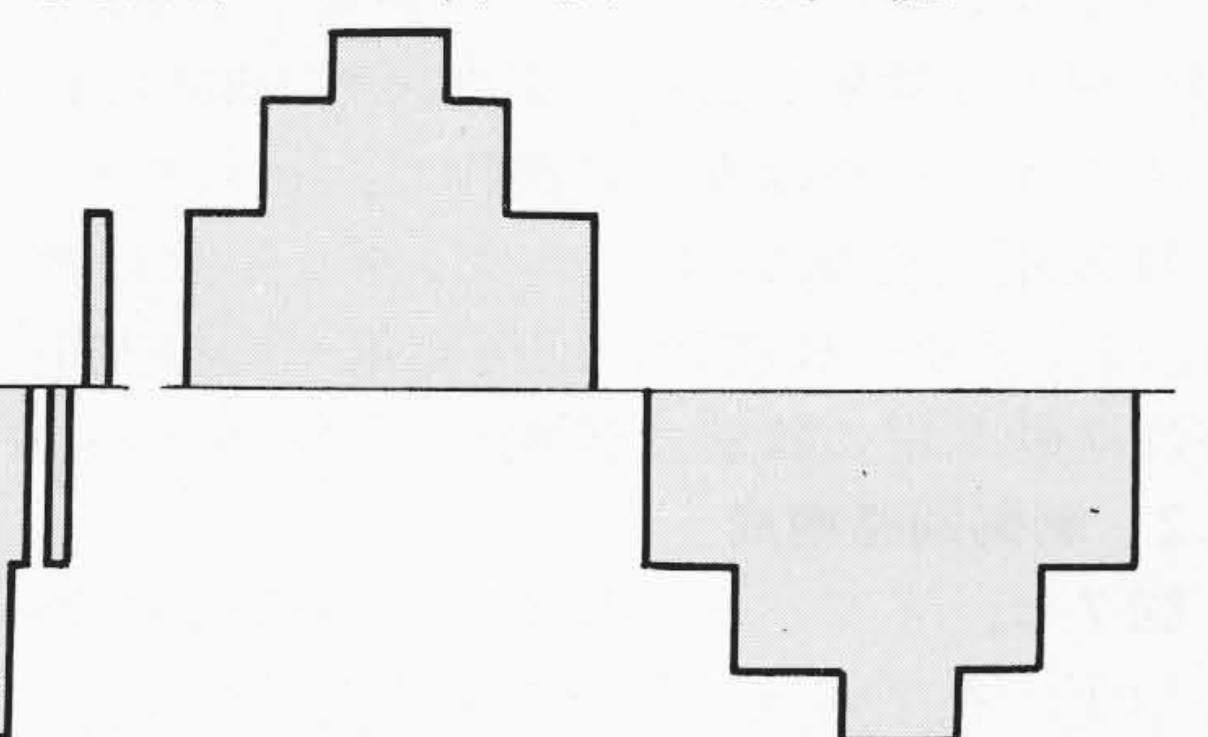
パルス幅変調インバータ（三相インバータ）の場合



通電幅制御インバータ（六相インバータ）の場合



通電幅制御インバータ（十二相インバータ）の場合



いため、速応性および安定性は良好である。

表2は、以上三者の長所短所をまとめたものである。

インバータにより直流から交流への変換を行なう場合、その出力としては方形波出力が得られるから、正弦波出力を得るために種々な方法がとられる。ここではインバータ容量を数十キロボルトアンペアから数百キロボルトアンペアまでの範囲とし、インバータの速応性および電圧精度などの点からコンピュータ用、計装制御用、データロガー用などの用途に適した通電幅制御インバータおよびパルス幅変調インバータにつき比較することにした。それが表3である。

3 構成

3.1 主回路構成

図6は、主回路構成を示すものである。また、今回開発した50kVAインバータの諸元を示したのが表1である。

交流入力、ヒューズフリーブレーカ（FFB）および電磁接触器を経て、受電変圧器に交流電力を供給する。受電変圧器は交流入力電圧200V（220V）から直流の200V（220V）を得

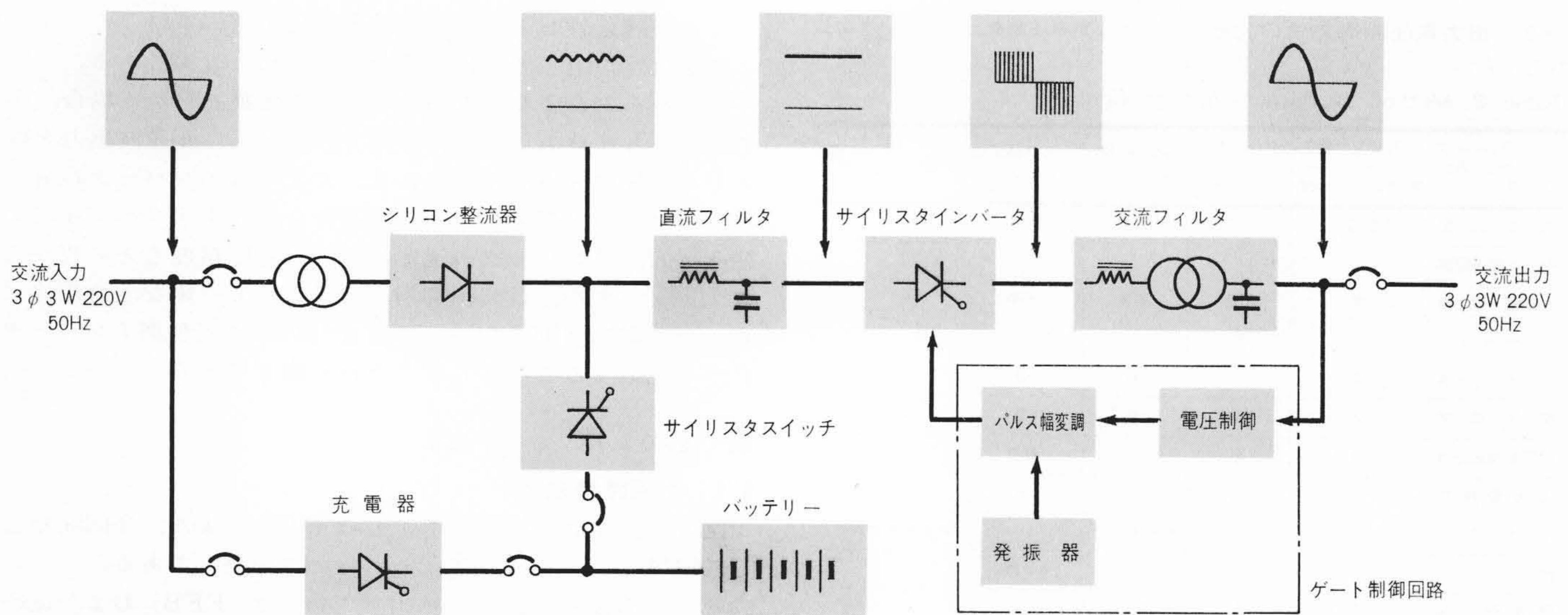


図6 50kVAパルス幅変調インバータブロック図 基本構成を示す。

Fig. 6 Block Diagram of 50kVA Pulsewidth Modulated Inverter

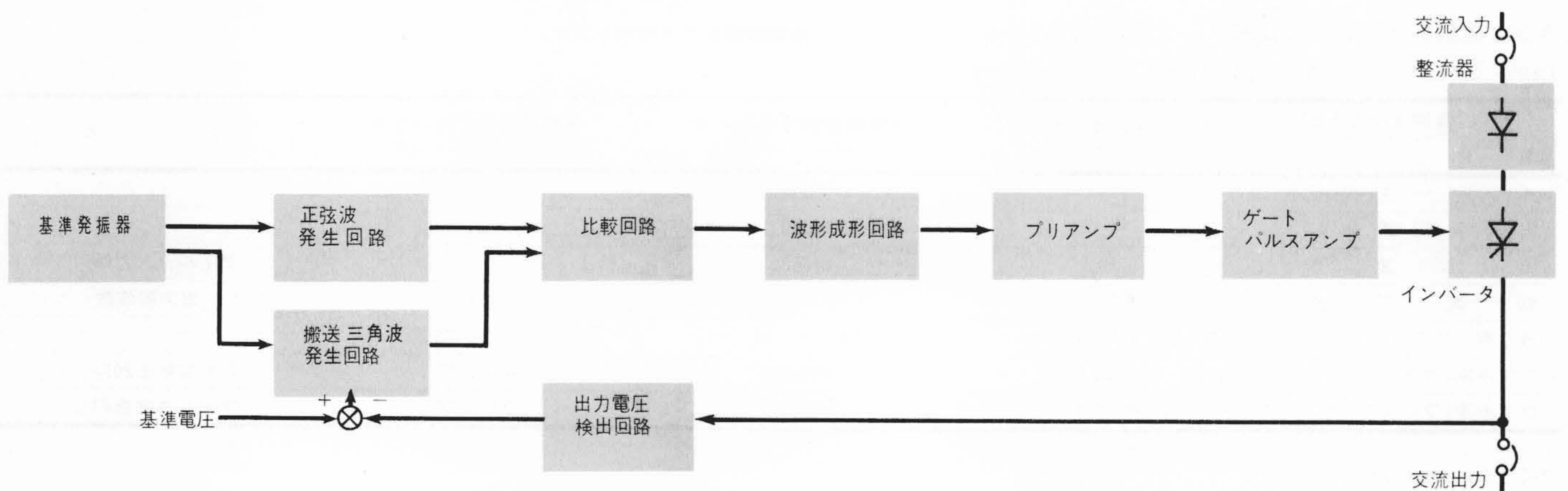


図7 制御回路ブロック図 基準発振器からの出力は、フリップフロップを経て搬送三角波発生回路に与えられる。

Fig. 7 Block Diagram of Control Circuits

るように適当な変圧比に選ばれる。整流器はダイオードブリッジを用いるため、交流入力側力率は良好である。インバータ部分には新転流方式を採用し、インバータ用サイリスタの動特性仕様を和らげた。バイパスダイオードとして普通のダイオードを用いたが、転流動作にはなんら支障はなかった。

インバータ出力側には、正弦波出力を得るために小容量のフィルタを設けた。出力変圧器は、負荷変動によるフィルタACリアクトルの電圧変動の影響を避けるため、ACリアクトルを一次巻線側に配置した。

無停電電源としての機能は、バッテリー出力をサイリスタスイッチを介して、インバータ直流入力部に接続することにより達成している。サイリスタスイッチは、直流入力の変動幅を押える効果がある。交流入力が85%以下になったらサイリスタスイッチは直ちに動作し、バッテリーよりインバータに直流電力を供給する。バッテリーには専用の充電器を設け、バッテリー放電後の回復充電や均等充電にも利用する。常時は浮動充電の状態での停電時のバッテリー放電に備える。

3.2 制御回路構成

図7は、インバータ制御回路の構成を示すものである。

以下、各ブロックにつき概要を述べる。

まず、基準発振器にはクリスタル発振器を用いている。発

振周波数は、出力周波数の $2n$ 倍の発振周波数を持っている。ここに、 n は n 倍の周波数の搬送波を形成するのに必要な数である。この発振器出力は、フリップフロップを経て搬送三角波発生回路に与えられる。

図8の搬送三角波は出力周波数の整数倍（今回は $n=9$ とした）に選ばれる。また、この三角波電圧と比較される比較制御電圧の波形は実際は二次曲線であるが、説明簡単化のため出力周波数と同じ周波数の正弦波として扱ってもほとんど差異はない。三角波の振幅と正弦波の振幅の比を k とし、この k を制御率と呼ぶことにする。

いま、インバータの転流時期を三角波と正弦波の交点と一致させると、出力電圧は次の関係にあることが知られている⁽¹⁾。

$$E_a = \frac{\sqrt{3} E_d}{2\sqrt{2}} k \cdot N$$

ここに、 N ：出力変圧器の巻数比

したがって、電源変動、負荷変動に対し出力電圧を一定に保つためには制御率を変化させればよい。

制御率を変化させるには、三角波の振幅を変えるか正弦波の振幅を変えるとよい。しかし、正弦波は三相それぞれ120度位相が異なるため、これを三相とも可変にするのは良い方法ではない。

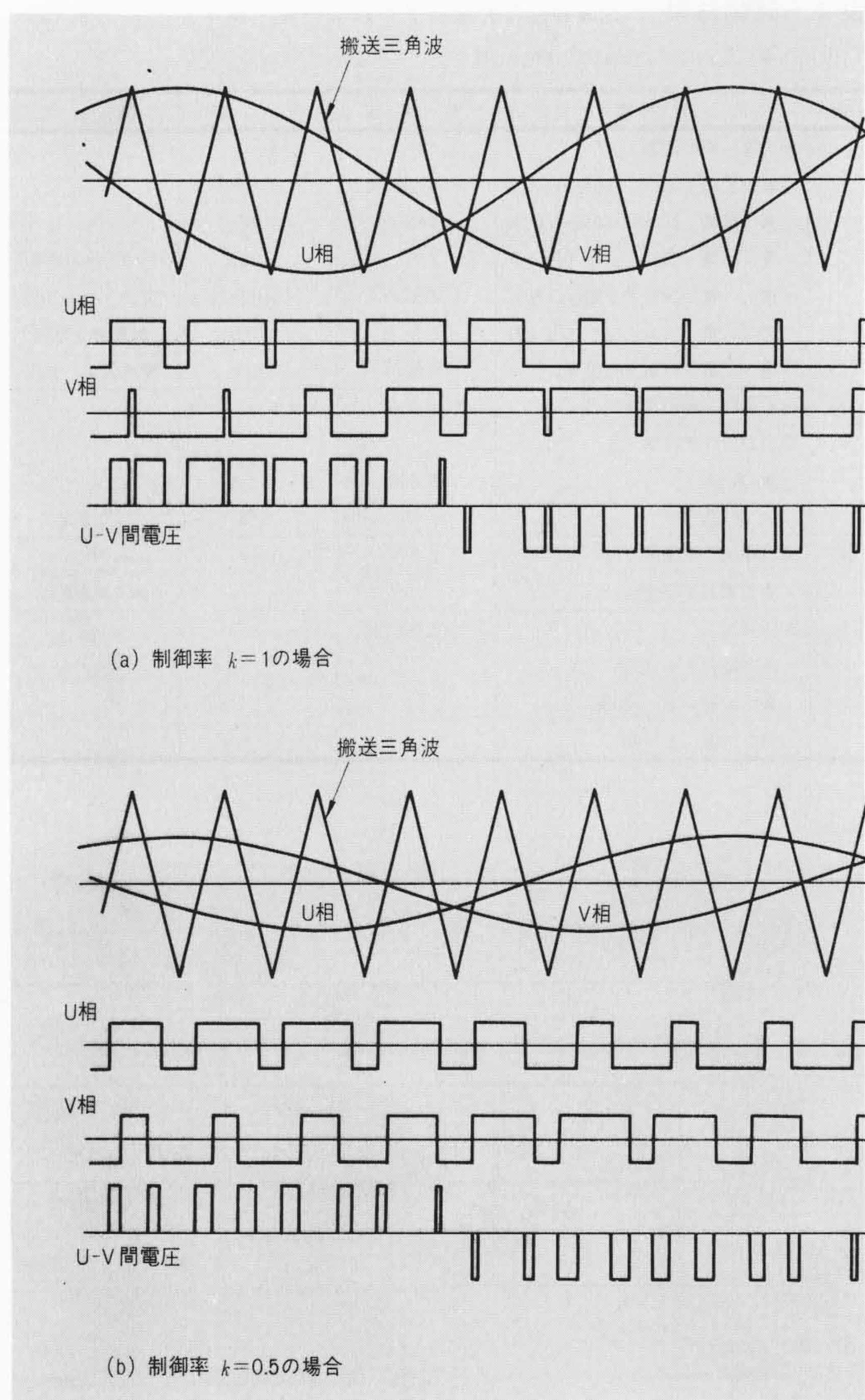


図8 搬送三角波と比較正弦波の関係 三角波および正弦波の交点と出力電圧の関係を示す。(a)は制御率 $k=1$ の場合、(b)は制御率 $k=0.5$ の場合である。

Fig. 8 Relationship between Triangular Carrier Wave and Sinusoidal Wave

今回開発した制御回路は、三角波および正弦波発生回路とといったいわゆるパターン回路は、いずれも一定振幅の一定周波数になるようにしている。パターンの三角波は、出力電圧と基準電圧との誤差電圧により振幅変調される。すなわち、これら二つの信号は乗算器において演算（除算）され、その結果を正弦波と比較する。したがって、パターン回路における積分時定数はAVR系における応答速度には全く無関係となり、本インバータの速応性をささえる一助となっている。

450/540 Hz三角波には、積分精度を上げるため大振幅動作を行なわせている。AVR系のフィードバック電圧と基準電圧との間の誤差電圧は、出力電圧検出回路においてレベル変換され、乗算器の除数側入力端子に、また三角波出力は被除数側入力端子に伝達される。乗算器出力は、

$$Y = 10 Z / X$$

Z : 三角波入力

X : 誤差電圧

Y : 出力

のように除算器として動作させる。 X が小さい場合、 Y の値

は飽和するが、除算器としては飽和領域まで使えるので比較電圧の精度は十分に得られる。

一方、正弦波（二次曲線近似）回路は、基準発振器出力を分周して出力電圧と同じ周波数のフリップフロップ出力をうる。これに積分器二段を作用させると二次曲線の出力波形が得られる。この積分器は普通のフィルムコンデンサを使用しても位相特性にはほとんど影響のないフィルタ回路を持っている（特許出願中）。

乗算器出力の三角波（飽和領域で使用される場合は台形波）と正弦波は比較回路にて三相それぞれに比較され、その交点を転流時期とするよう調整される。

比較回路出力は主サイリスタと補助サイリスタのゲートパルス幅が所要の値になるよう波形成形される。波形成形された出力は、プリアンプを介してインバータ転流回路わきのゲートパルスアンプ回路に送出される。プリアンプ出力は操作シーケンス回路、サプレス回路を経て各インバータサイリスタゲートの起動時点弧順序を制御し、転流コンデンサの転流エネルギーの確保や突入電流の防止に役だてている。また、停止時には補助サイリスタにより確実に主サイリスタをターンオフさせてインバータが停止できるようにし、起動・停止時間の大幅な短縮を図っている。

4 試験結果

図9はインバータ出力のスペクトル解析結果を示すものである。これは制御率 $k=0.5$ の場合であるが、計算結果とよく一致している。図からも明らかなように、おもな高調波成分は搬送波周波数の整数倍のところに前後して同レベルで現われる。

図10(a)は50%負荷から100%負荷への負荷急変試験のオシログラムを、図10(b)はその逆の変化に対するものを示すものである。いずれも±6%以下の出力変動であり、十分に仕様を満足している。さらに、過渡現象は1サイクル以内に回復していることもわかる。

図11(a)はバッテリーが均等充電中であり、その状態で交流入力なくなった場合の過渡変動を示すものである。この場合も出力変動は±7%以下である。また、図11(b)は入力回復時の過渡変動を示すものである。

図12は負荷短絡に対する出力電圧の抑制の様子を示すオシログラムである。150%の電流を検出すると直ちに出力電圧が絞られている。しばらくすると、インバータはソフトスタートの状態にはいる。

表4は、その他の諸特性の測定結果を示すものである。

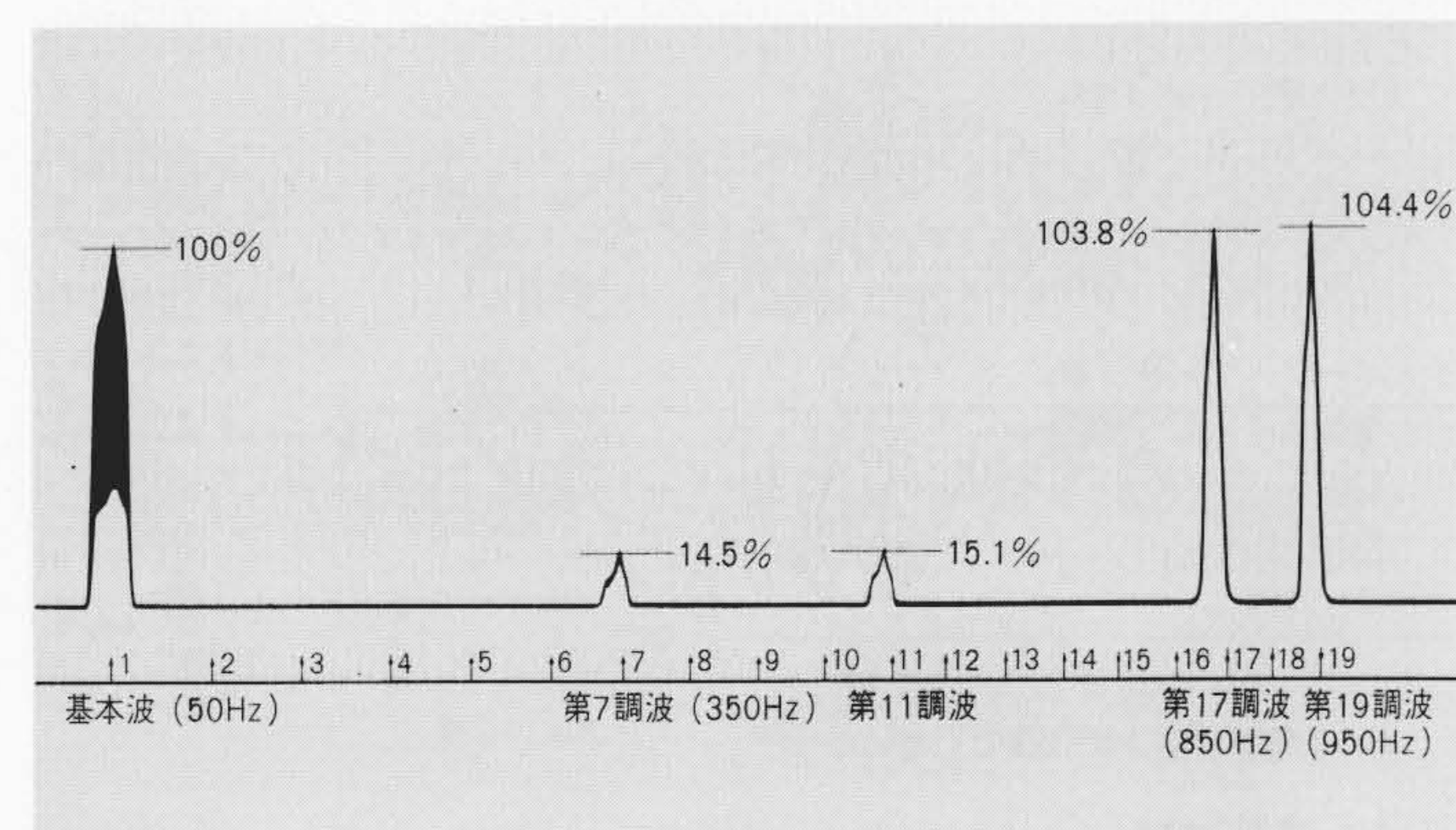


図9 出力電圧のスペクトル解析 交流フィルタの入力波形について示す。

Fig. 9 Spectral Analysis of Output Voltage

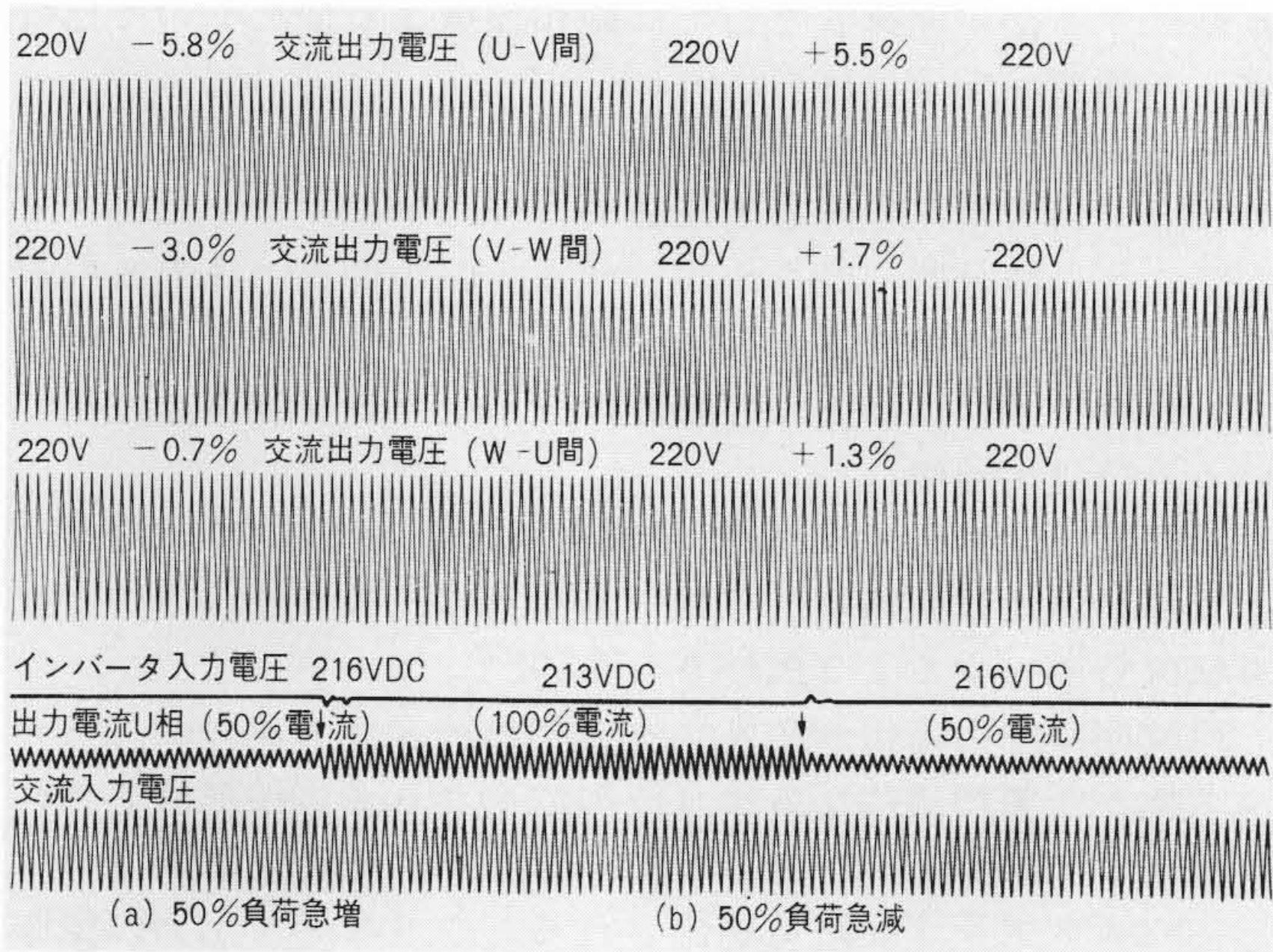


図10 負荷急変試験 (a)は50%負荷から100%負荷へ、(b)は100%負荷から50%負荷への急変時出力電圧変動を示す。

Fig. 10 Voltage Transient on Step Load Test

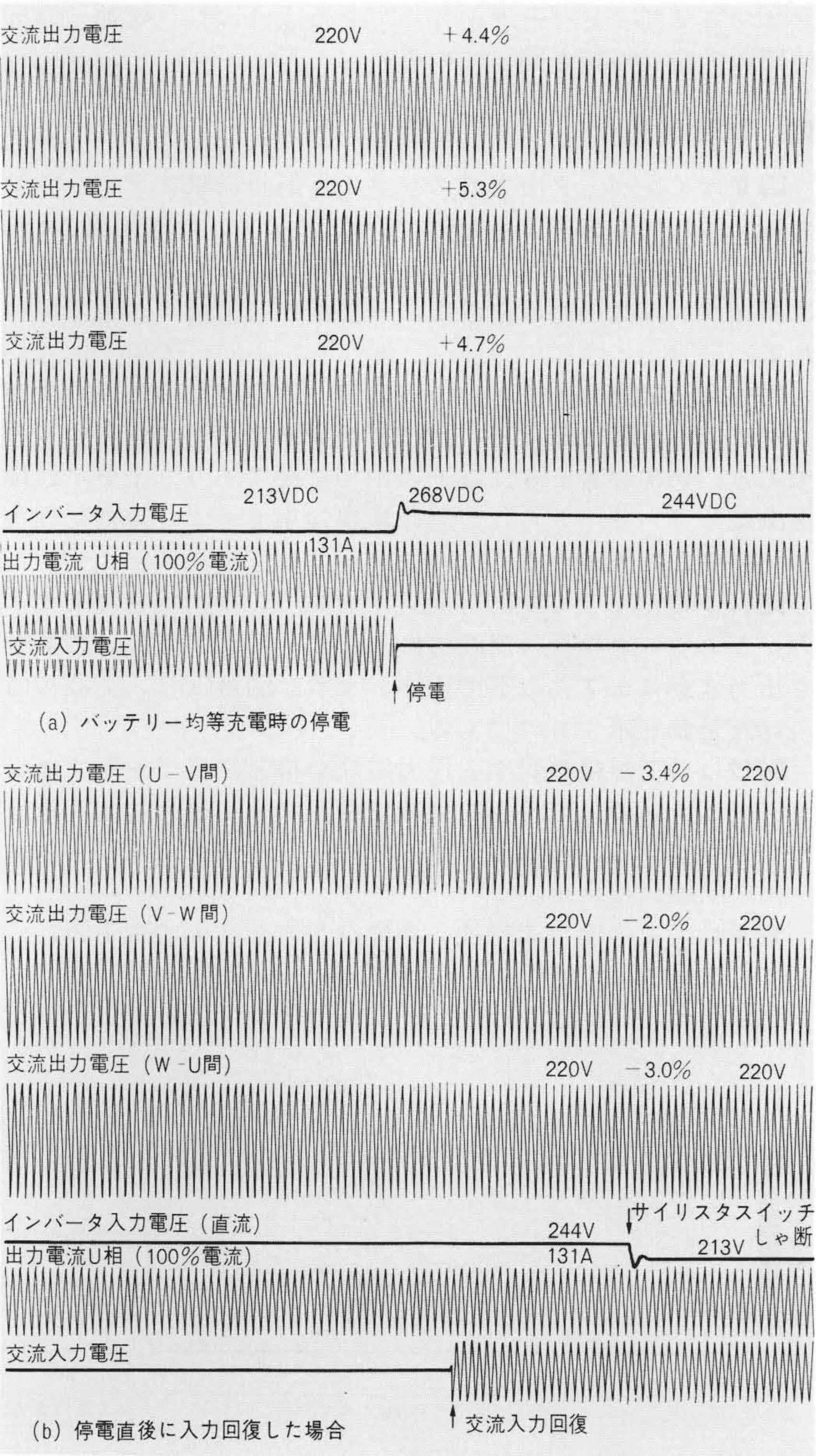


図11 停電試験 (a)はバッテリー均等充電時に停電した場合、(b)は停電直後に入力回復した場合の出力変動を示す。

Fig. 11 Power Failure Test

表4 試験結果 過渡特性は非常にすぐれている。

Table 4 Experimental Results

No.	測定項目	実測値	仕様	備考
1.	出力電圧瞬時変動			
	負荷変動 0%→50%→100%	-6%以内	(-10%)	—
	負荷変動 100%→50%→0%	+6% "	(+10%)	—
	停電 交流入力-10%より	+7% "	+10%	バッテリー均等電圧
	復電 放電終止電圧より	+7% "	+10%	交流入力+10%
	停電 交流入力+10%より	-6% "	-10%	放電終止電圧
	復電 放電直後復電	-6% "	-10%	交流入力-10%
2.	出力瞬時変動回復時間	1サイクル以内	3サイクル以内	
3.	電圧波形ひずみ率			
	無負荷	3.6%	5%	—
	全負荷	4.7%	5%	pf: 0.8遅れ
4.	出力電圧不平衡率	2.3%		
	負荷電流不平衡±15%			pf: 0.8遅れ
5.	AVR精度	±2%以下	±2%	
	入力電圧 ±10%			
	負荷 0~100%			
	周温 5~40℃			

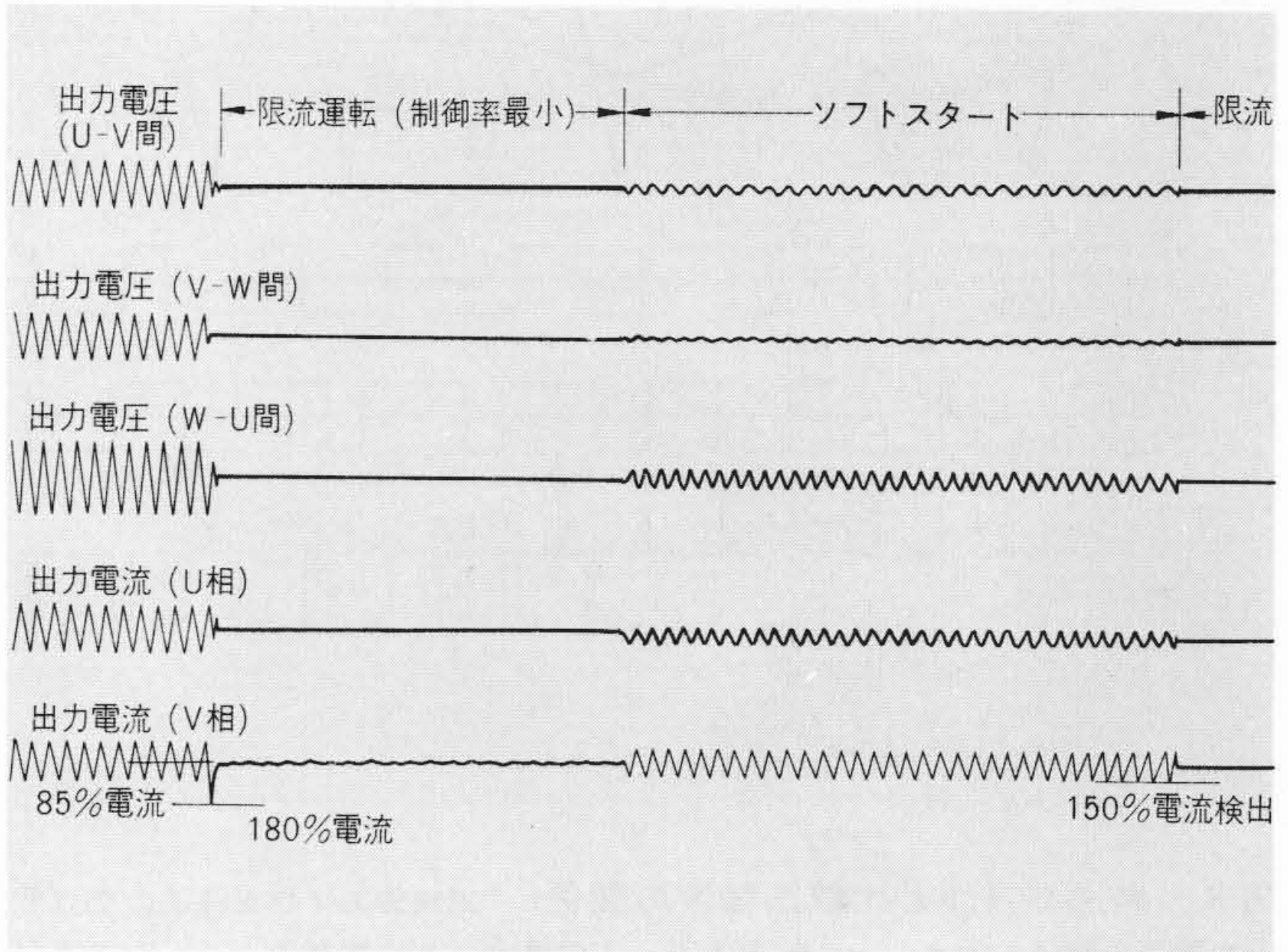


図12 負荷短絡試験 限流運転後、リフトスタートして再度限流運転に入る場合を示す。

Fig. 12 Short Circuit Test

5 結 言

以上、パルス幅変調方式による50kVAインバータの概要を紹介したが、これを要約すると下記のとおりである。

- (1) 負荷の急変や停電などの電源急変に対する過渡特性は、大容量インバータに採用している多量インバータ方式よりもすぐれていることがわかった。
- (2) 操作性を重視した設計を行ない、起動・停止は瞬時にこなえるなど、静止形インバータの速応性を十分に生かしたものが得られた。

本インバータは現在、某社製のコンピュータ用電源として順調に稼(か)動中である。

参考文献

- (1) A. Schönung and H. Stemmler: "Static Frequency Changers with Subharmonic Control in Conjunction with Reversible Variable-Speed A.C. Drives", The Brown Boveri Review 51, 8/9, 555 (Aug./Sept., 1964)