

多重インバータによる定周波定電圧電源装置

Constant-Frequency Constant-Voltage Power Source of Multi-Inverter System

前 島 和 二*
Katsuji Maeshima

内 容 梗 概

多重インバータは複数の方形波インバータの位相を適当にずらし、その出力を直列に結び積重ねることにより波形を改善し、群間位相差角を制御して、出力電圧を制御する方式である。多重インバータは過去にその例を見ないほど理論的に解明されており、定周波定電圧装置への応用に際して特に問題点はない。容量として3~25 kVA、周波数として50~400 c/sにわたる多機種がある。定周波特性については簡単な水晶発振器の使用により 10^{-4} 、また温度制御した水晶発振器によれば 10^{-6} 以下の精度のものが実現できた。定電圧特性については精密級定電圧ダイオードの使用と十分な温度補償によって $\pm 0.5\%$ 以下の精度が得られた。以下その概要および試験結果につき報告する。

1. 結 言

SCR インバータによる定周波定電圧電源装置にはすでに種々の方式が開発されているが、SCR の特長を最も有効に活用したインバータ方式はいわゆる「転流改良形⁽¹⁾」である。この方式は負荷変動およびその力率の変動に対してきわめて安定に動作し、電圧変動率⁽²⁾は従来の方式に比較して、はるかに小さい。しかし直流入力電圧の変動に応じて変化する出力電圧を定電圧化すること、方形波出力を正弦波に整形することの2点が定電圧電源装置として用いる場合の問題点である。これに対する一つの方法としてこの転流改良形インバータと鉄共振定電圧変圧器とを組み合わせることにより、この問題を解決した実用例がある⁽³⁾。

この問題の別の解決方法として多重インバータがある。この出力電圧を制御する方式は、前記の方式に比べて回路構成が複雑となり小容量装置には簡便でないが、定周波定電圧制御ばかりでなく、周波数および電圧の可変制御が可能であるという点において大容量装置には好適なものといえる。

2. 特 長

多重 SCR インバータによる定周波定電圧電源装置は、負荷変動および電源電圧変動に対して安定な転流改良形インバータを基本とした新方式であり、その特長として次の諸点があげられる。

まず回転機方式すなわち電動発電機やディーゼル発電機と比較して、

- (1) 回転機のような騒音がない。大容量機では冷却扇を必要とするが、小形電動機であるので騒音ははるかに小さい。
- (2) 機械的な振動がほとんどない。
- (3) 設置場所に応じて適当な立体構造にすることができる。

以上の特長は設置場所の制約を著しく軽減するもので、基礎工事の負担を小さくし、任意の場所に設置できることを意味する。

- (4) 水晶発振器などの信号によって駆動されるので、周波数精度が高く、負荷急変などによる瞬時周波数変動は皆無である。

- (5) 瞬時起動が可能であり、非常用電源として最適である。

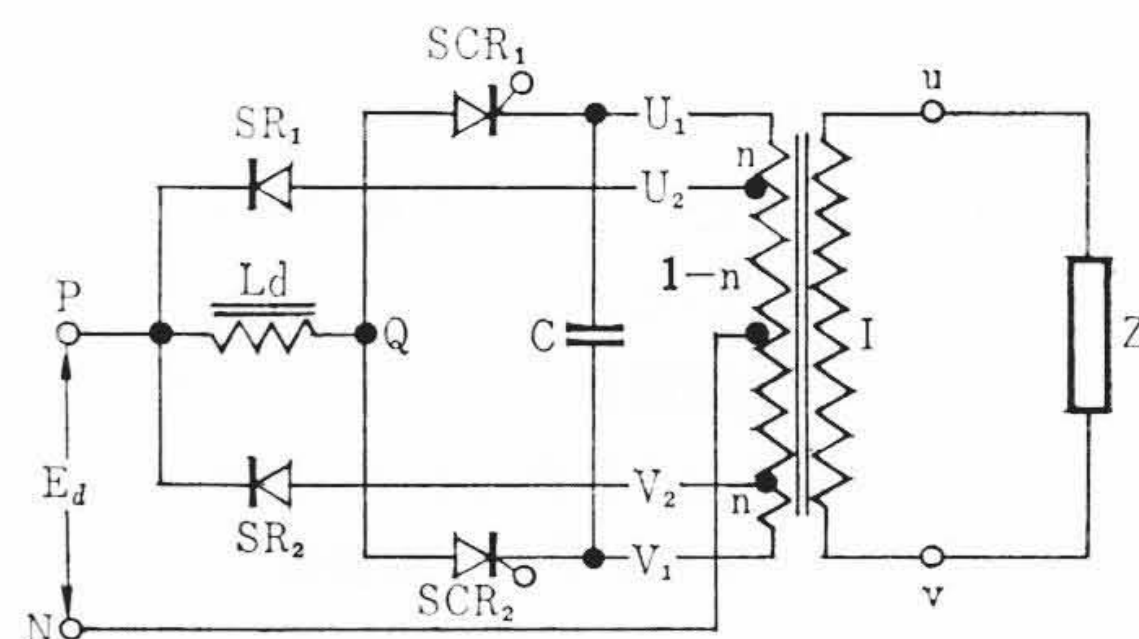
また多重インバータ独特の特長として次の諸点があげられる。

- (6) 基本インバータとして転流改良形インバータを採用しているので、負荷変動およびその力率の広範囲の変化に対してきわめて安定である。

- (7) 移相制御による整流器と同様に利得高く、制御回路の半導

第1表 DC-AC 変換装置比較表

項 目	方 式 別	電 動 発 電 機	多 重 SCR インバータ
騒 音 と 振 動		大	ほとんどなし
重 量		100%	90~80%
占 用 面 積		100%	80~60%
基 礎 工 事		必 要	不 要
起 動・停 止・切 換		加速時間必要	瞬 時 可 能
周 波 数 の 影 響		ほとんどなし	ほとんどなし
耐 震、耐 衝 撃 性		比 較 的 大	比 較 的 大
負 荷 特 性		分 撓 特 性	分 撓 的 特 性
瞬 時 電 圧 降 下		小	比 較 的 小
回 復 時 間		0.5 s	0.2 s
瞬 時 過 負 荷		安 定	安 定
定 周 波 特 性		負 荷 と 電 源 に よ り 変 動	発 振 器 精 度 内 で 安 定
保 守		比 較 的 困 難	容 易



第1図 転流改良形インバータ基本回路

体化によって、応答速度大で、整定電圧誤差が小さく $\pm 0.5\%$ 程度の自動電圧制御も可能である。

- (8) 周波数を固定しているのは、発振器および濾波回路のみであるから簡単に50, 60 c/sの切り換えができる。

3. 多重インバータの動作原理

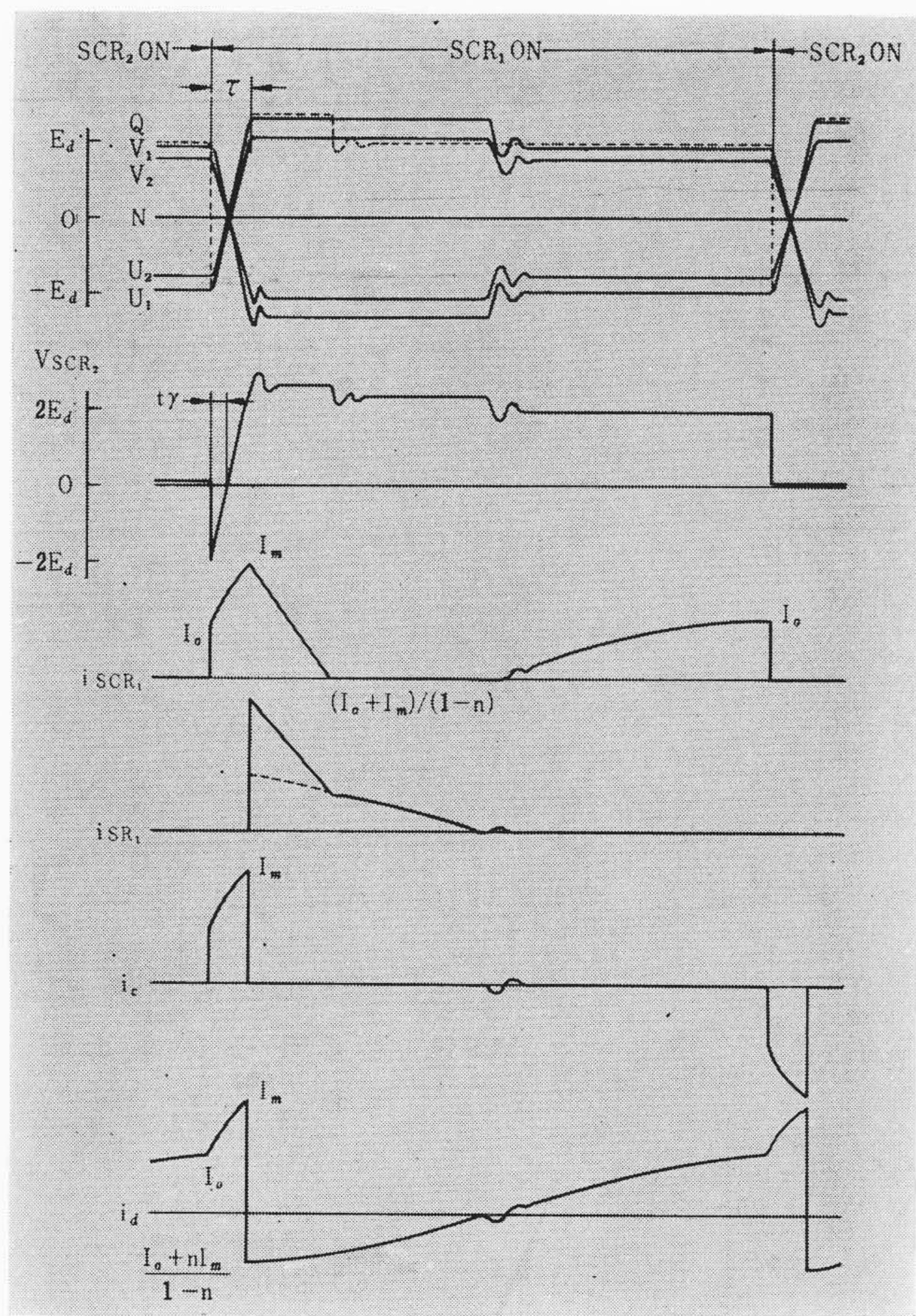
転流改良形インバータ⁽²⁾は第1図のように、基本インバータ回路に整流素子 SR_1, SR_2 を追加することにより、無負荷より全負荷までいかなる力率においても安定に動作する。その出力電圧波形は、第2図 U_1-V_1 に示すように方形波であって、正弦波出力の要求にほど遠い。この波形を方形波としてフーリエ級数に展開すれば次の式で示される。

$$E_0 = \frac{4}{\pi} E \left(\sin \omega t + \frac{1}{3} \sin 3 \omega t + \frac{1}{5} \sin 5 \omega t + \dots \right)$$

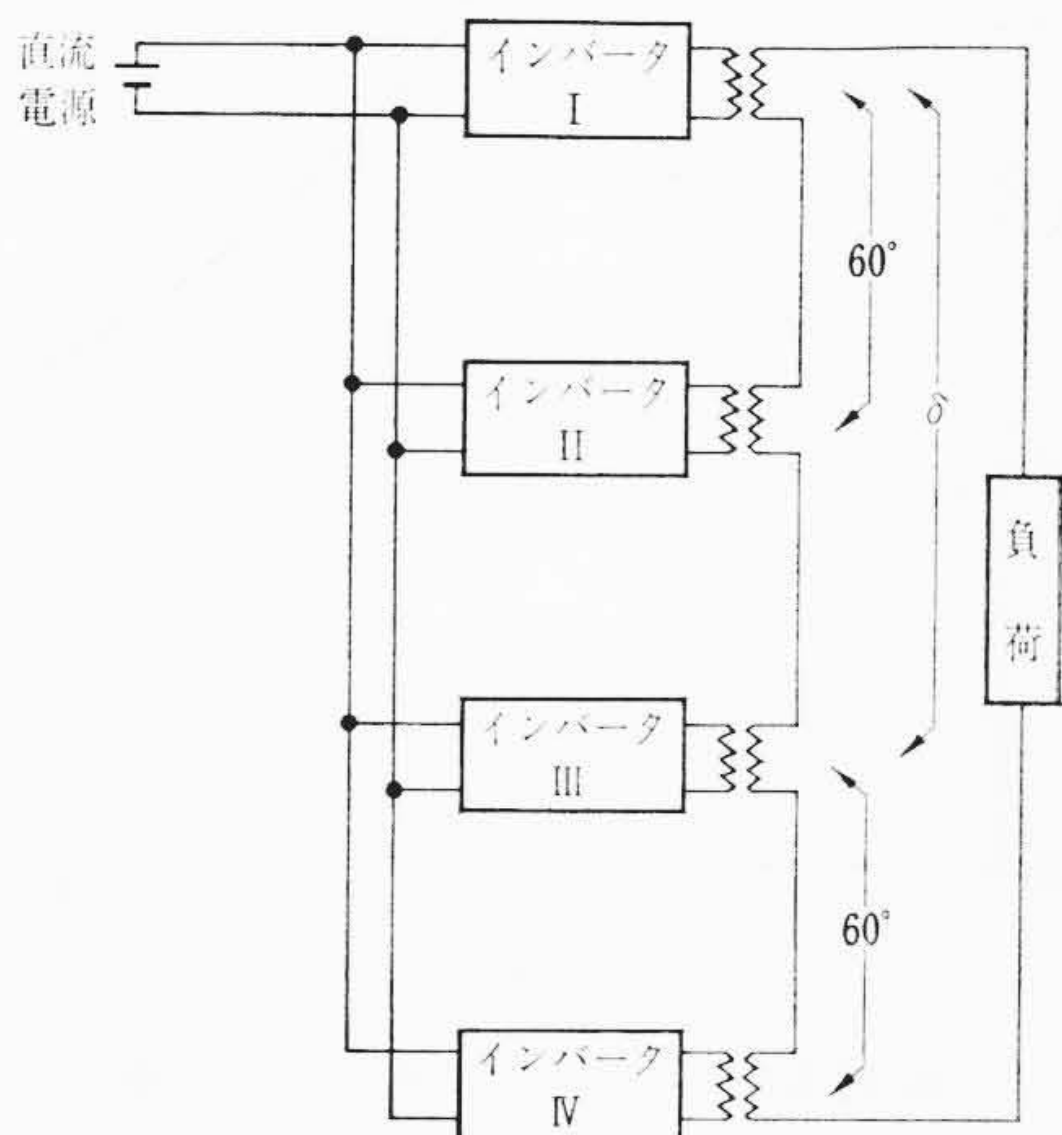
$$= \frac{4}{\pi} E \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{2n-1} \sin (2n-1) \omega t \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 E : 方形波電圧 $m=2n-1$

* 日立製作所日立工場



第2図 転流改良形インバータの電圧電流

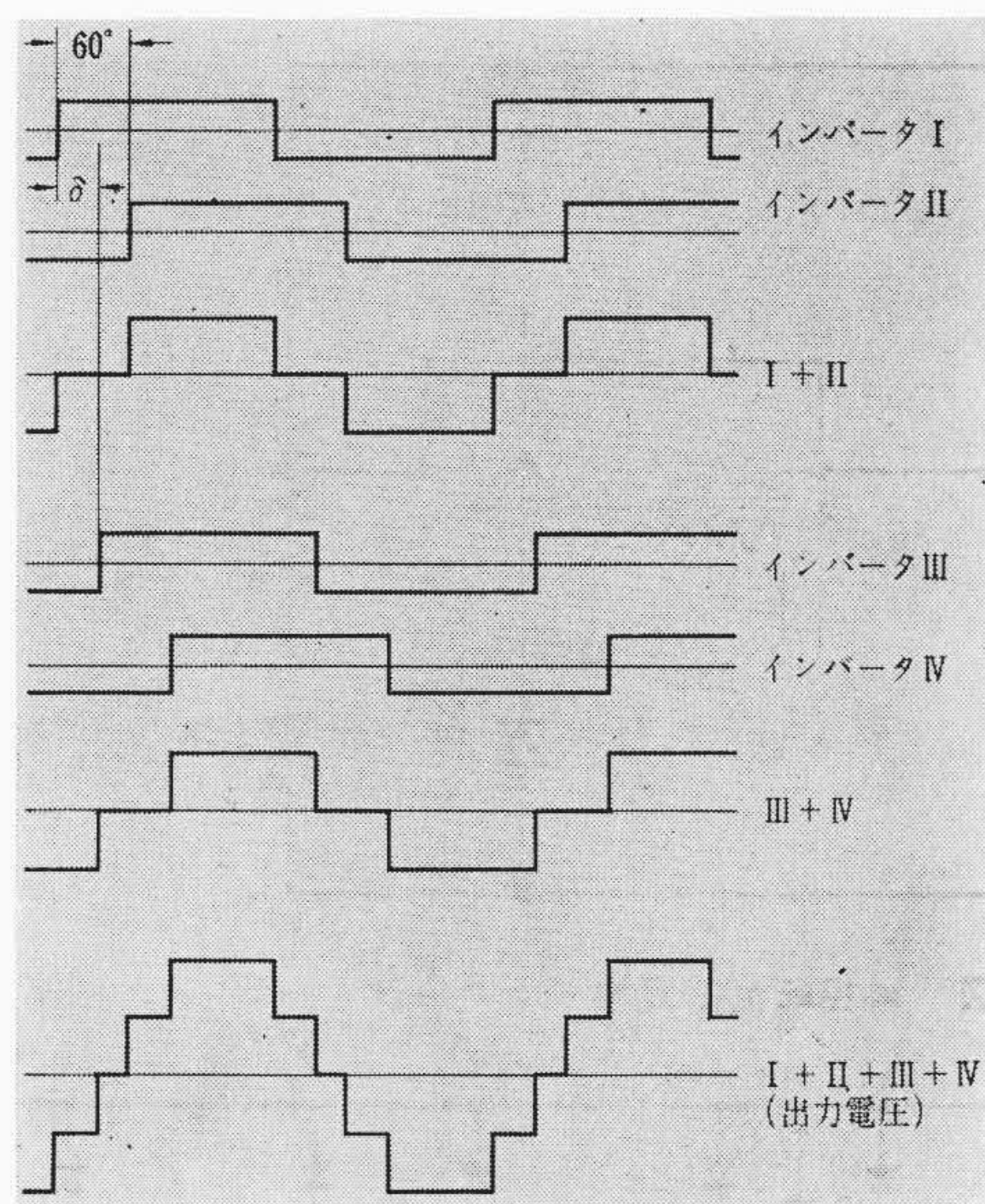


第3図 単相4段多重インバータの概略接続

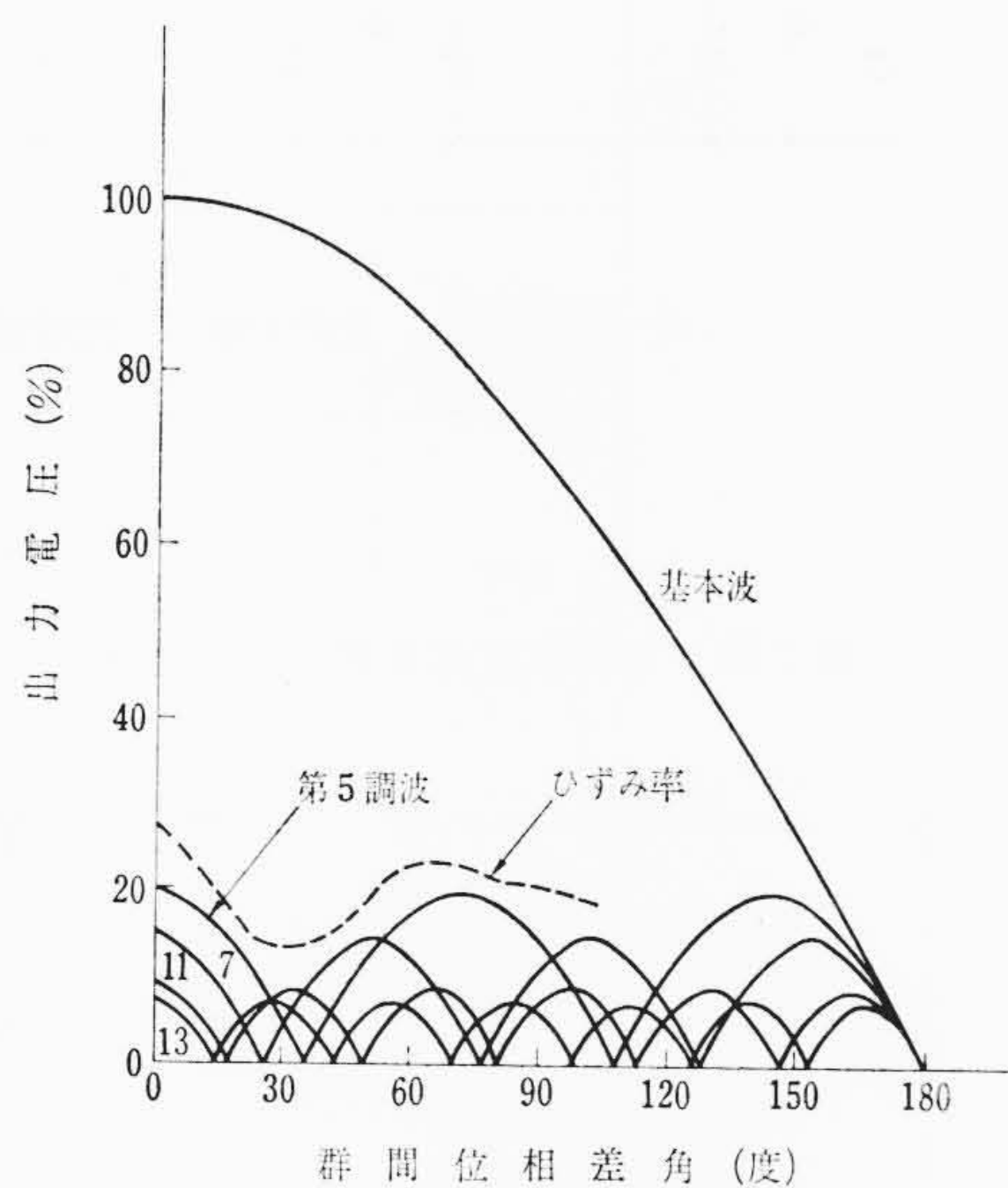
m : 高調波次数

単相4段多重インバータの概略接続および位相関係を第3図に示す。インバータIに対しIIは60度遅れ位相、IIIに対してIVは同様60度遅れ位相で運転する。この位相差はいずれも固定位相差である。インバータIとIIIの間の位相差を δ とし、これを群間位相差と呼び、この群間位相差 δ を調整することにより出力の電圧調整を行なう。その総合出力電圧 E は

$$E = \frac{4}{\pi} E \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{2n-1} \sin(2n-1) \left(\omega t + \frac{\delta+60^\circ}{2} \right) + \frac{4}{\pi} E \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{2n-1} \sin(2n-1) \left(\omega t + \frac{\delta-60^\circ}{2} \right)$$



第4図 単相4段多重インバータの電圧位相関係および出力波形



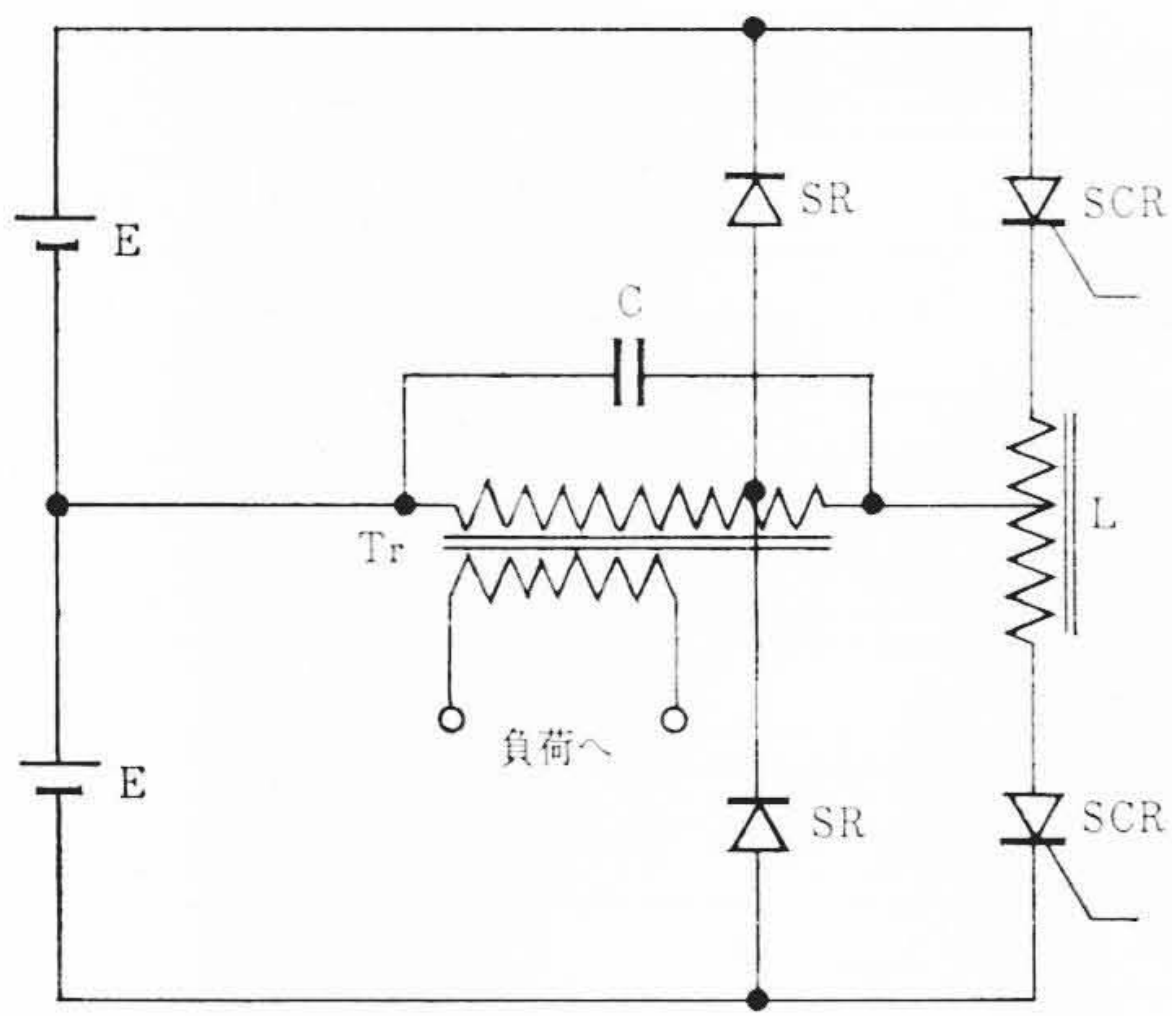
第5図 各調波電圧と群間位相差角の関係

$$\begin{aligned} & + \frac{4}{\pi} E \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{2n-1} \sin(2n-1) \left(\omega t - \frac{\delta+60^\circ}{2} \right) \\ & + \frac{4}{\pi} E \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{2n-1} \sin(2n-1) \left(\omega t - \frac{\delta-60^\circ}{2} \right) \\ & = \frac{4}{\pi} E \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4}{2n-1} \sin(2n-1) \omega t \cos(2n-1) \frac{\delta}{2} \cos(2n-1) \frac{\pi}{6} \\ & = \frac{4}{\pi} E \left\{ 2\sqrt{3} \sin \omega t \cos \frac{\delta}{2} - 2\sqrt{3} \sin 5\omega t \cos \frac{5\delta}{2} \right. \\ & \quad \left. - 2\sqrt{3} \sin 7\omega t \cos \frac{7\delta}{2} + 2\sqrt{3} \sin 11\omega t \cos \frac{11\delta}{2} + \dots \right\} \end{aligned} \quad (2)$$

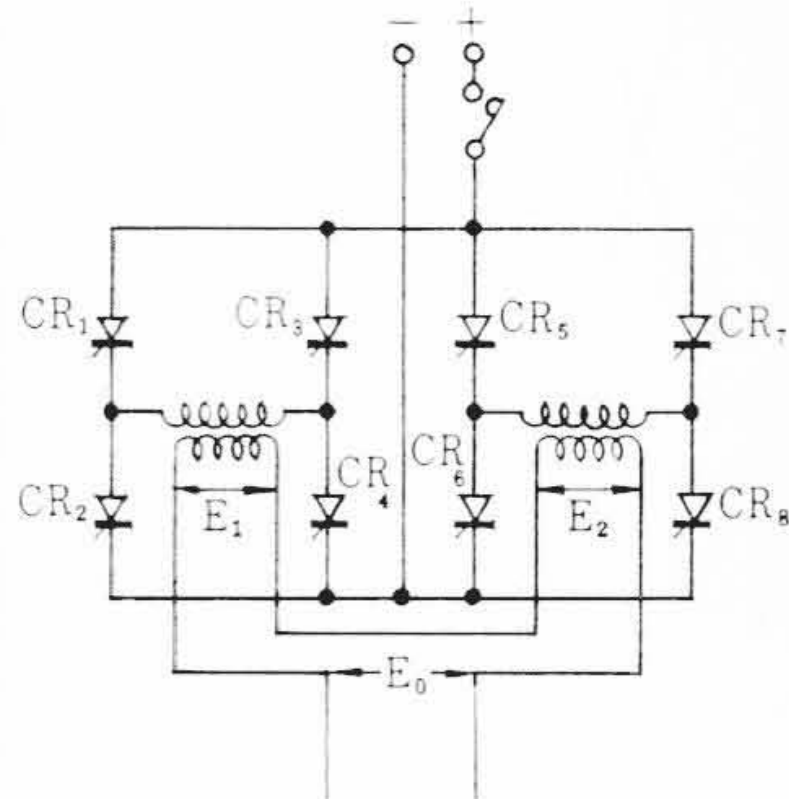
で表わされる。3の倍数の高調波が消去され、波形が改善される。群間位相差角 δ と基本波および高調波出力電圧の関係は第5図のようになり、そのひずみ率は点線のように表わされる。これ以下のひずみ率を要求する用途では、さらに適当な固定位相差を持たせて積段数を増加する。あるいは適当な濾波回路を付加すればその目的を達することができる。

4. 主回路構成

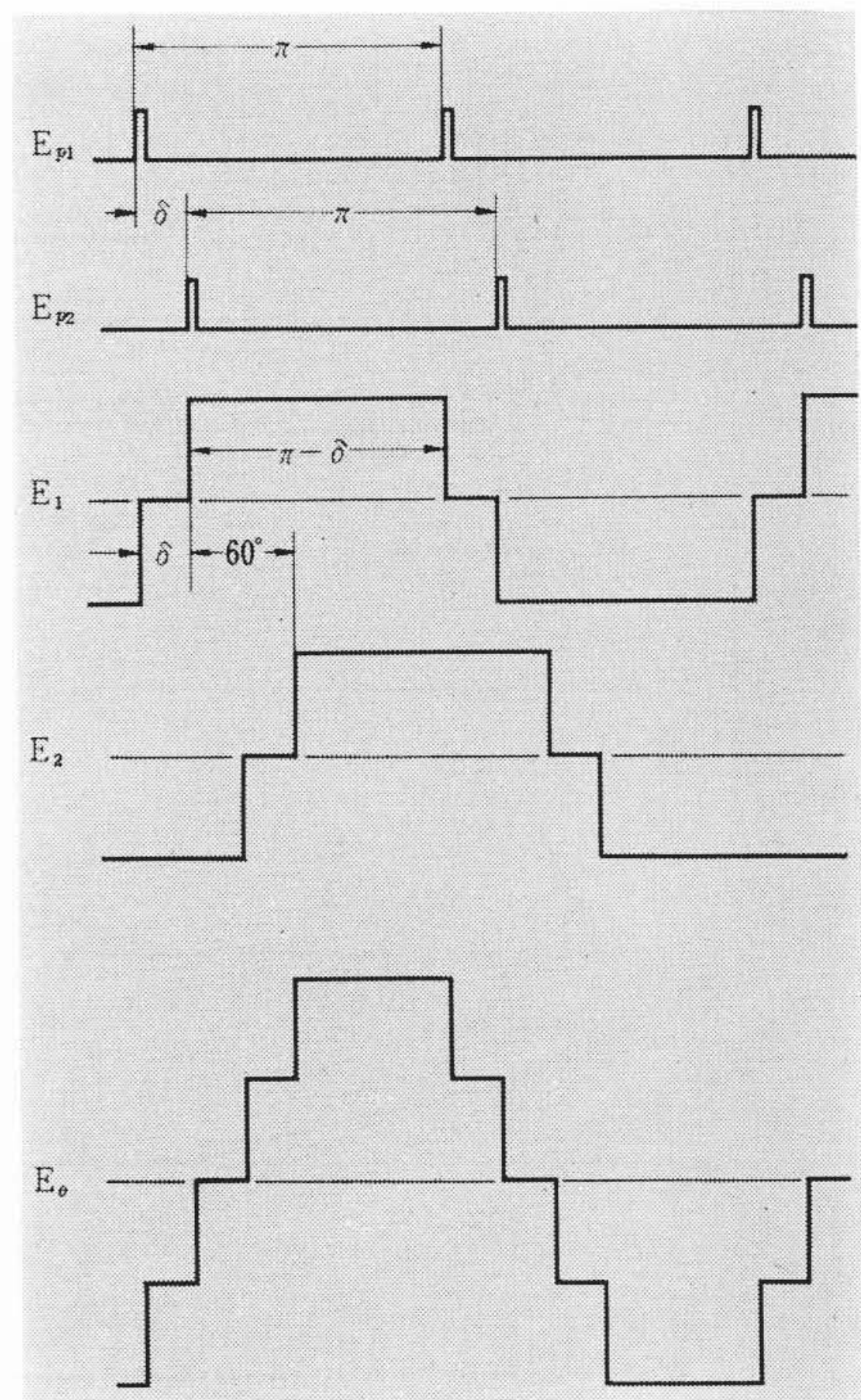
多重インバータに使用される基本インバータは単相(第6図)、多



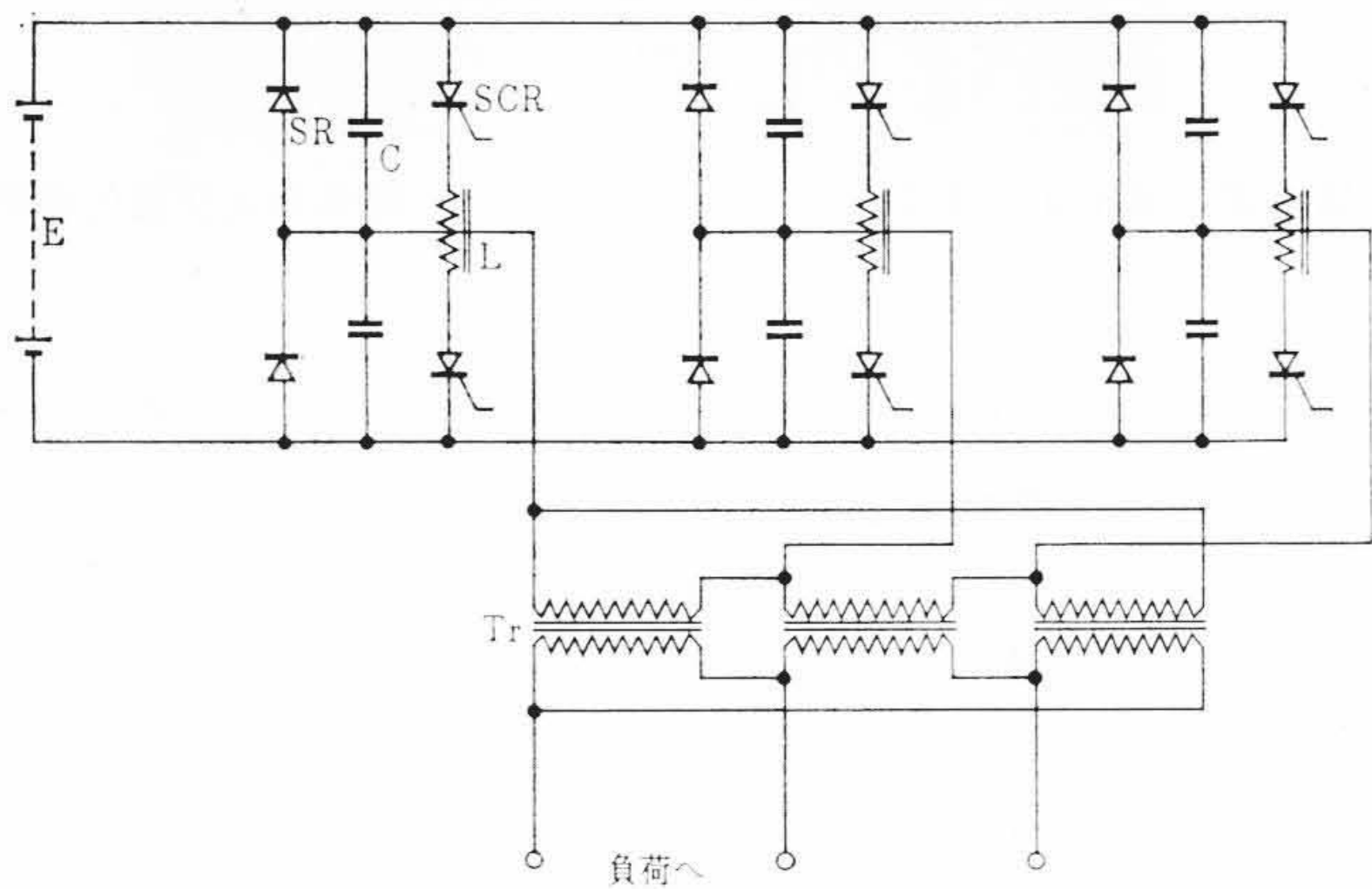
第6図 単相転流改良形インバータ



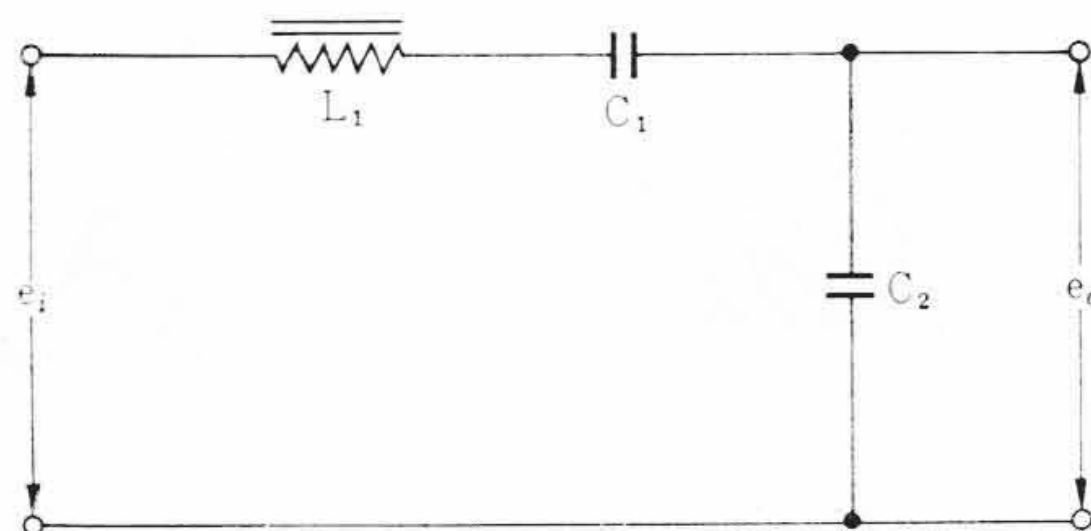
第8図 幅制御インバータ



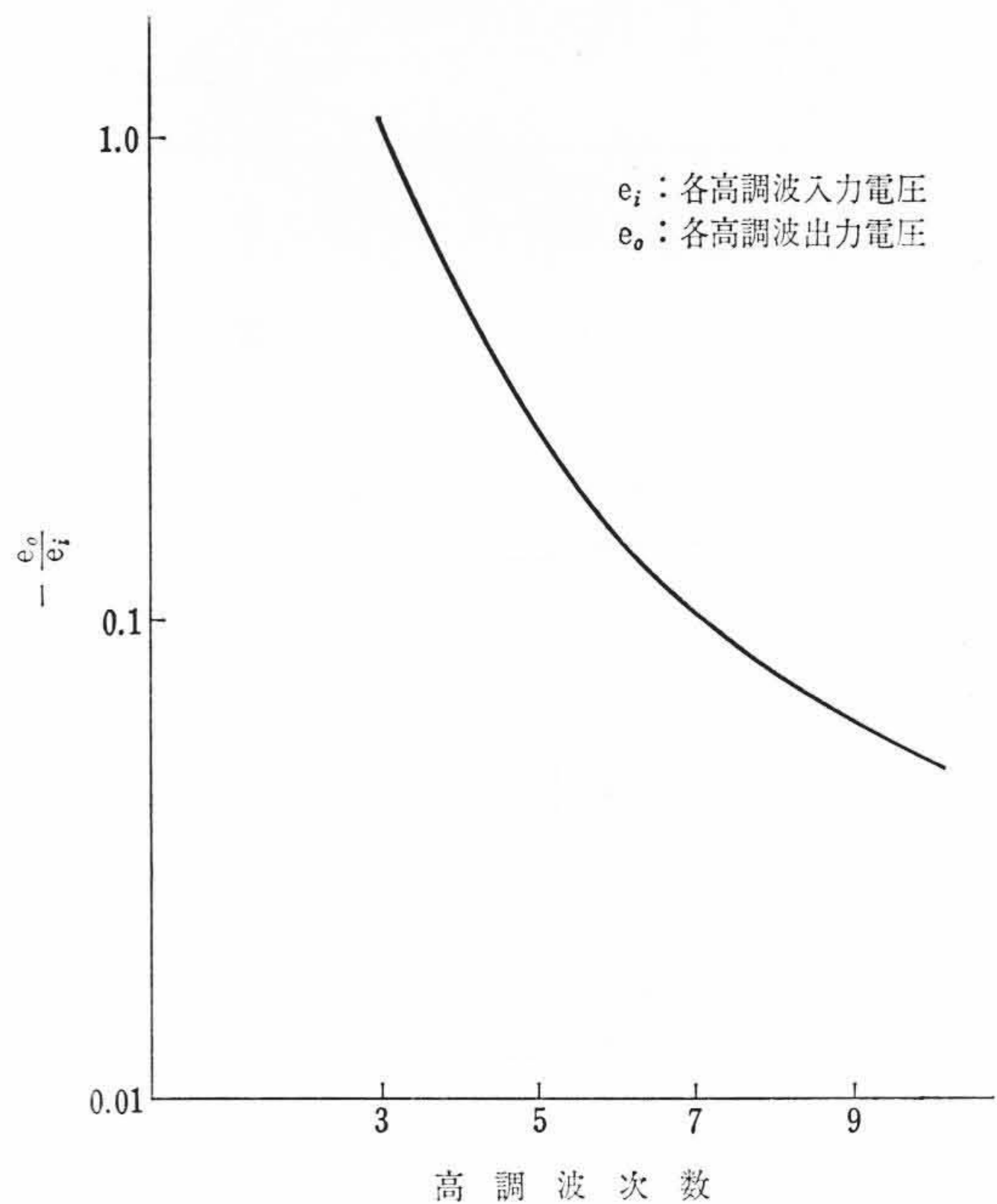
第9図 定常時各部電圧



第7図 三相転流改良形インバータ



第10図 共振回路の一例



第11図 共振回路特性の一例

相(第7図)の別なく安定な転流をするものであればいかなるものでもよく、おのこのインバータは180度または120度幅を有する電圧を発生する。今回製品化した単相インバータでは後述するように起動の安定性と経済性に主眼をおき、第8,9図のように1台のインバータで2台のインバータを組み合わせたと等価な $\pi-\delta$ の幅を有する電圧を発生させている。この方法は次のような利点を有する。

- (1) 後述するように起動時 δ を大にして安定に起動できるので、定常時の磁束密度が高く取れる。
- (2) 位相差 δ に相当する分のみ変圧器容量が小さくなる。

出力側に設けられた共振回路は第10図のように構成され、直列に結ばれた L_1, C_1 はインバータの電圧変動率を含めて等価的に直列共振するように選ばれ、高調波に対して入、出力電圧の関係は次の式で示される。

$$\frac{e_o}{e_i} = - \frac{\frac{1}{\omega C_2}}{(n^2-1)\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_2}} \dots\dots\dots (3)$$

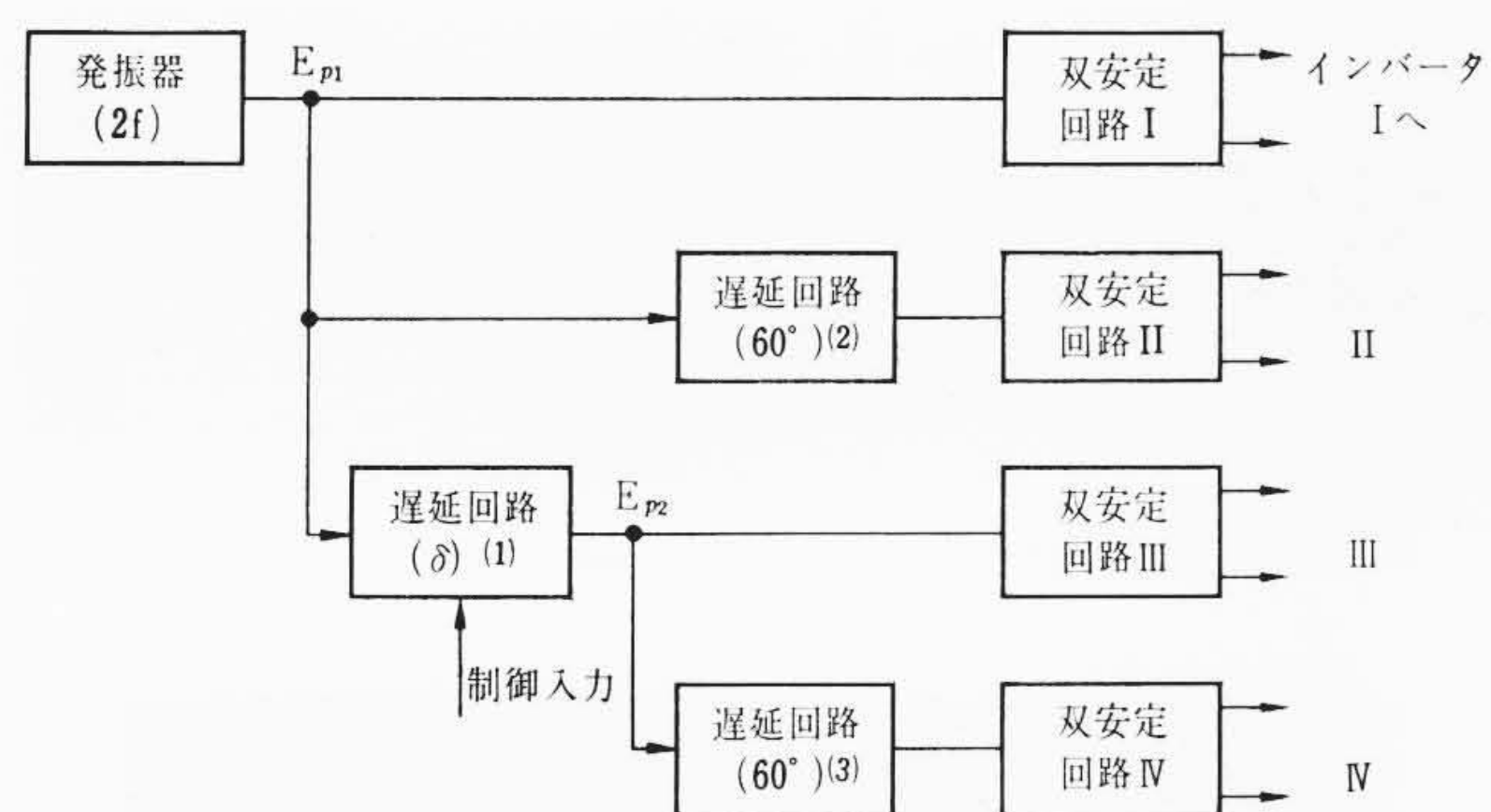
ここに、 n ：高調波次数
各高調波に対する入出力電圧の関係の一例を第11図に示す。

5. 制御回路構成

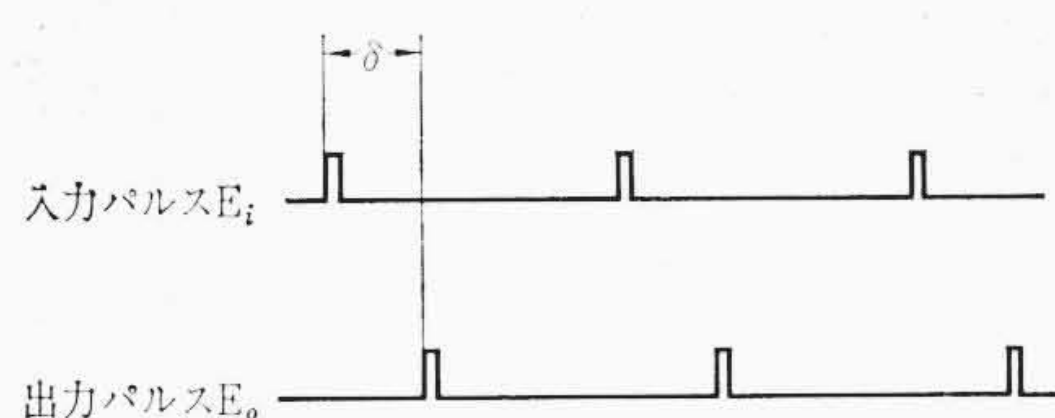
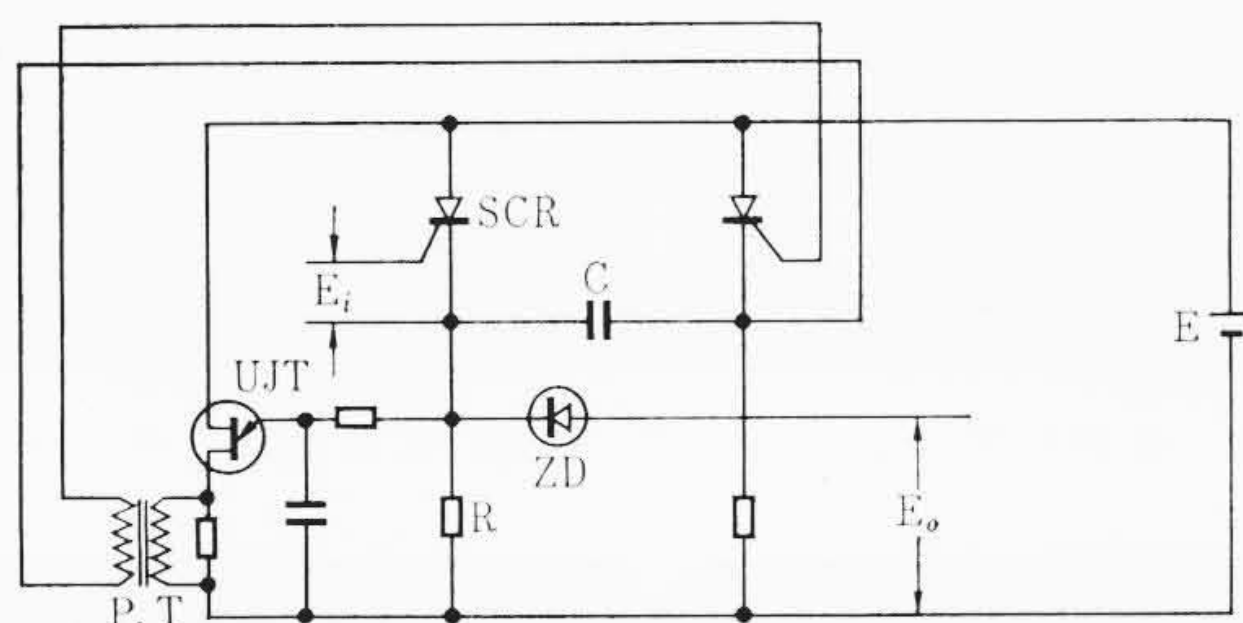
多重インバータの点弧制御回路は次の事項を満足しなければならない。

- (1) 単位インバータの電圧、電流の位相差が負荷力率と群間位相差 δ によって変化するので、ゲート信号としては180度の幅を必要とする。
- (2) 固定の位相差と可変の位相差を有するパルスが安定に順序正しく出せること。
- (3) 自動電圧調整のため可変の位相差を作り出す装置としては十分な利得を有すること。
- (4) 強電機制御回路であるので、遮断器などからの外来雑音に対して十分な強度を有すること。

第12図は単相4段多重インバータの点弧制御回路ブロック線図



第12図 点弧装置ブロック線図



第13図 SCRによる遅延回路

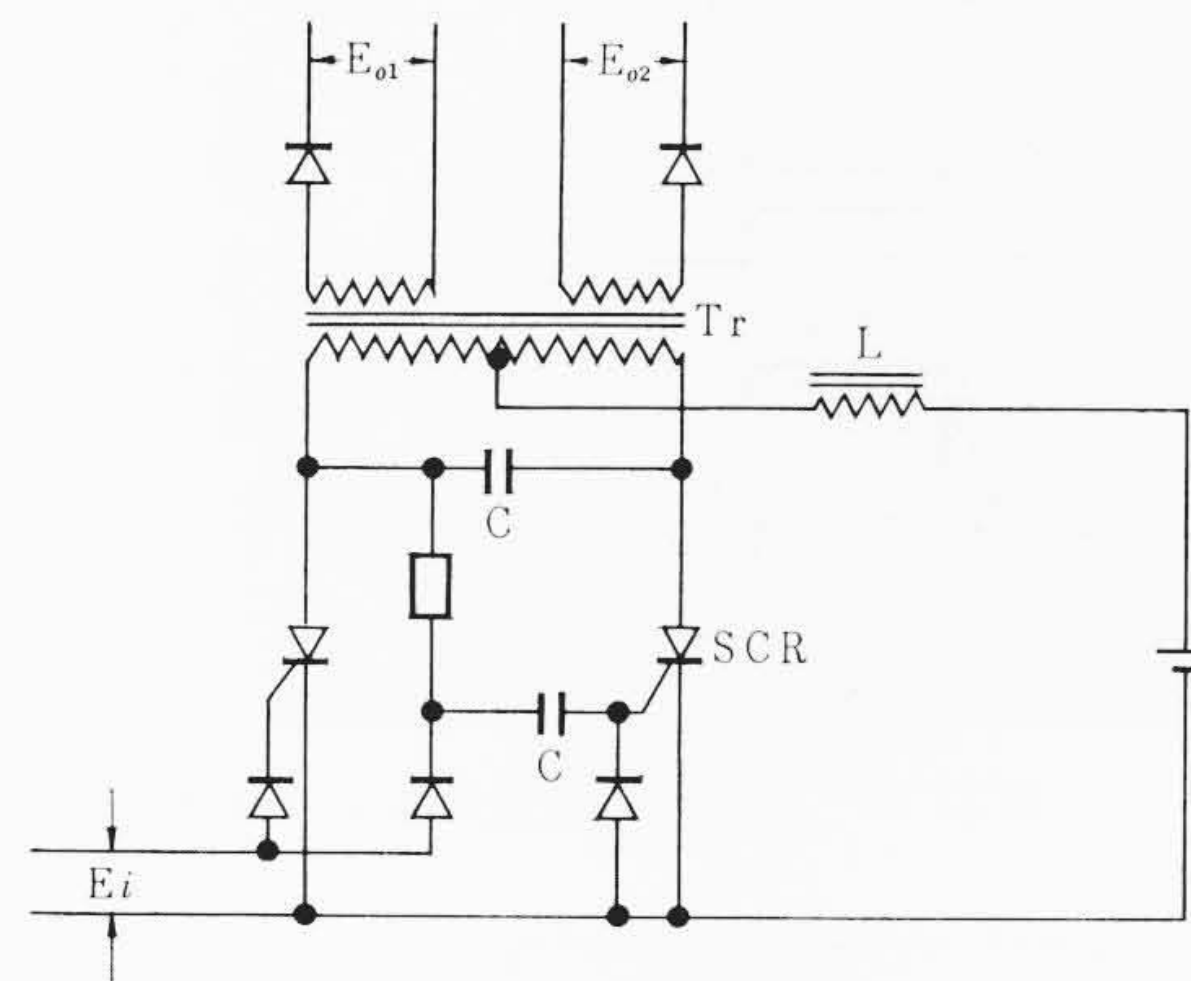
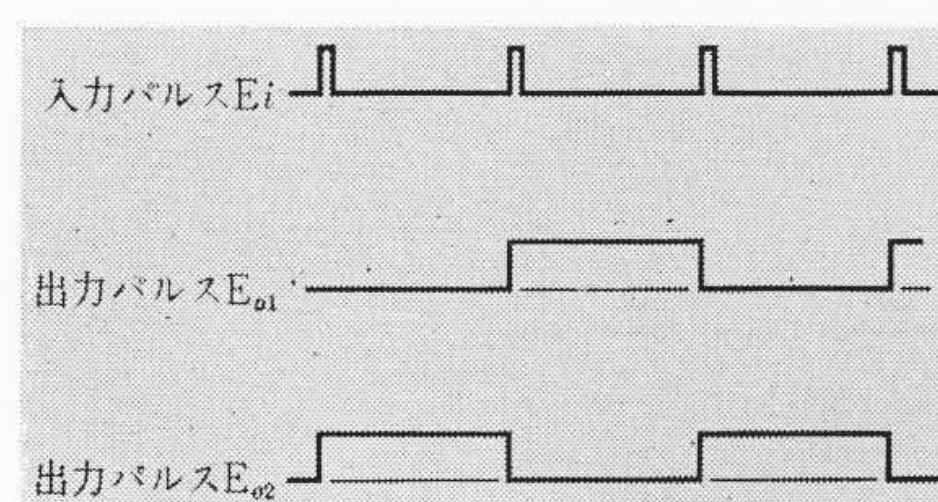
である。各部はSCRを主体とした半導体を使用し、十分なシールドによって外来雑音に対しても誤動作することのないようにしてある。発振器は必要とする周波数精度によって適当なものを選ばれ、インバータ出力の倍周波のパルスが発生し、双安定回路によって180度幅を有するパルスとしてインバータ用SCRのゲートに印加される。遅延回路(2)、(3)はインバータI、II間およびIII、IV間の固定位相差60度を保つ。遅延回路(1)は群間位相差 δ を制御入力によって変えられる可変遅延回路であってその出力はおのこの双安定回路に加えられインバータに所定の位相差を与える。この際インバータ各部の位相を正しく保つために、双安定回路はその起動順序を固定化している。SCRを主体とした固定遅延回路と双安定回路の原理図および各部波形は第13～14図に示すとおりである。

インバータを起動する順序として次の二つの方法がある。

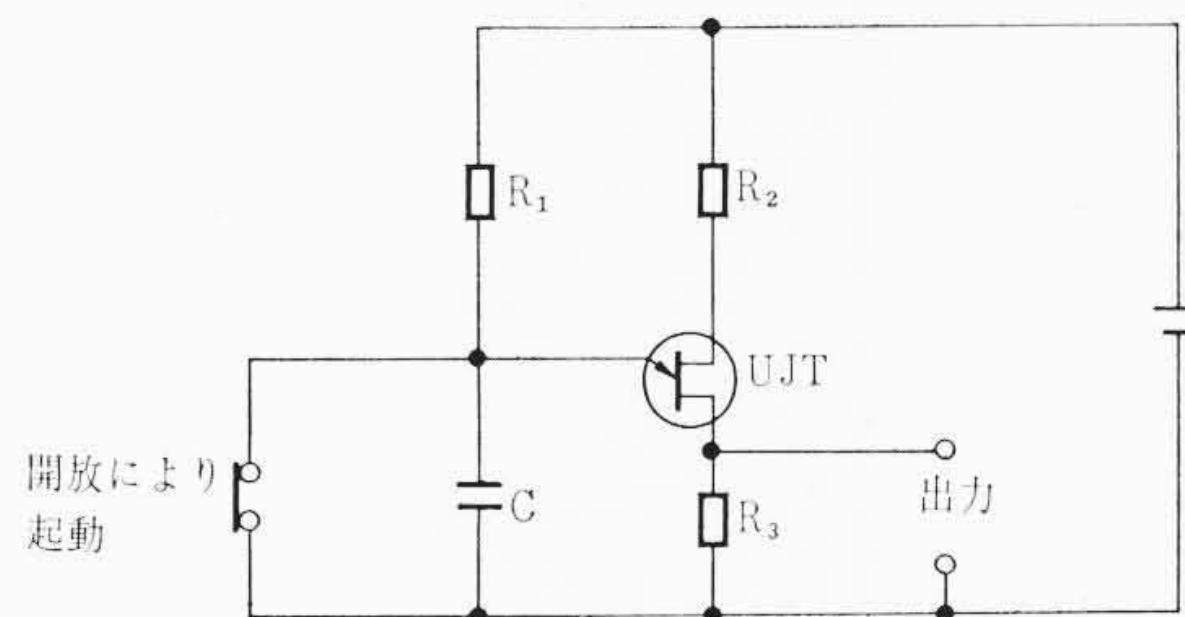
- (1) インバータ主回路に直流電圧を印加してから、SCRゲートに信号を与えるいわゆる「ゲート起動」。
- (2) SCRゲートに信号を与えてから、インバータ主回路に直流電圧を印加する「直流起動」。

多重インバータのように180度幅の信号を必要とするインバータにおいては、安定な起動を行なうために前記のゲート起動を採用する必要がある。ゲート起動を行なうために種々の方法が考案されているが、最も単純なのは第15図のようにCRし張発振器のCの短絡を解放することであるので、この方法によって起動することにした。この方法は静止スイッチを使用すればもちろんのこと、機械接点を使用しても、b接点であるのでチャタリングの恐れはなく、最初より正確な周波数で起動することができる。

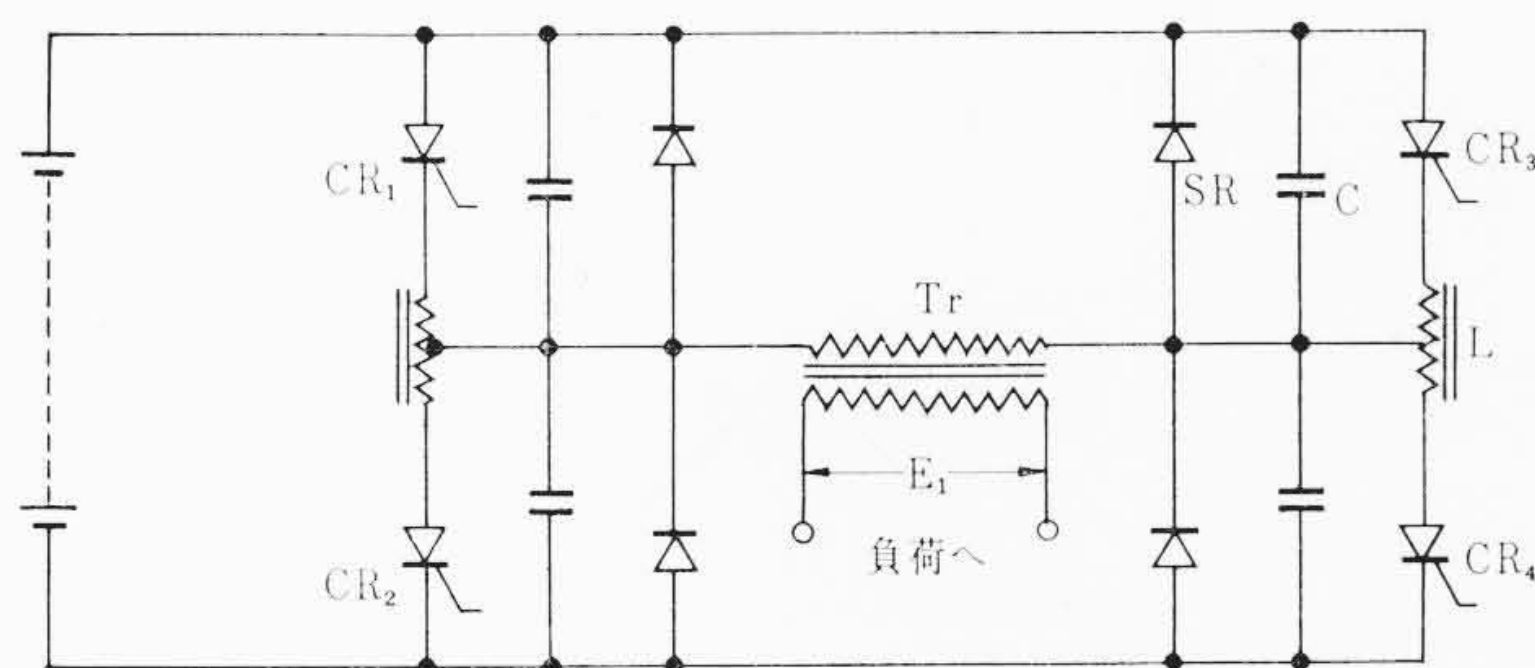
ゲート起動するインバータにおいて、インバータ変圧器に印加する電圧は一般の電源で電圧が零線を切る点で投入されたものと等価にな



第14図 SCRによる双安定回路



第15図 インバータ起動回路

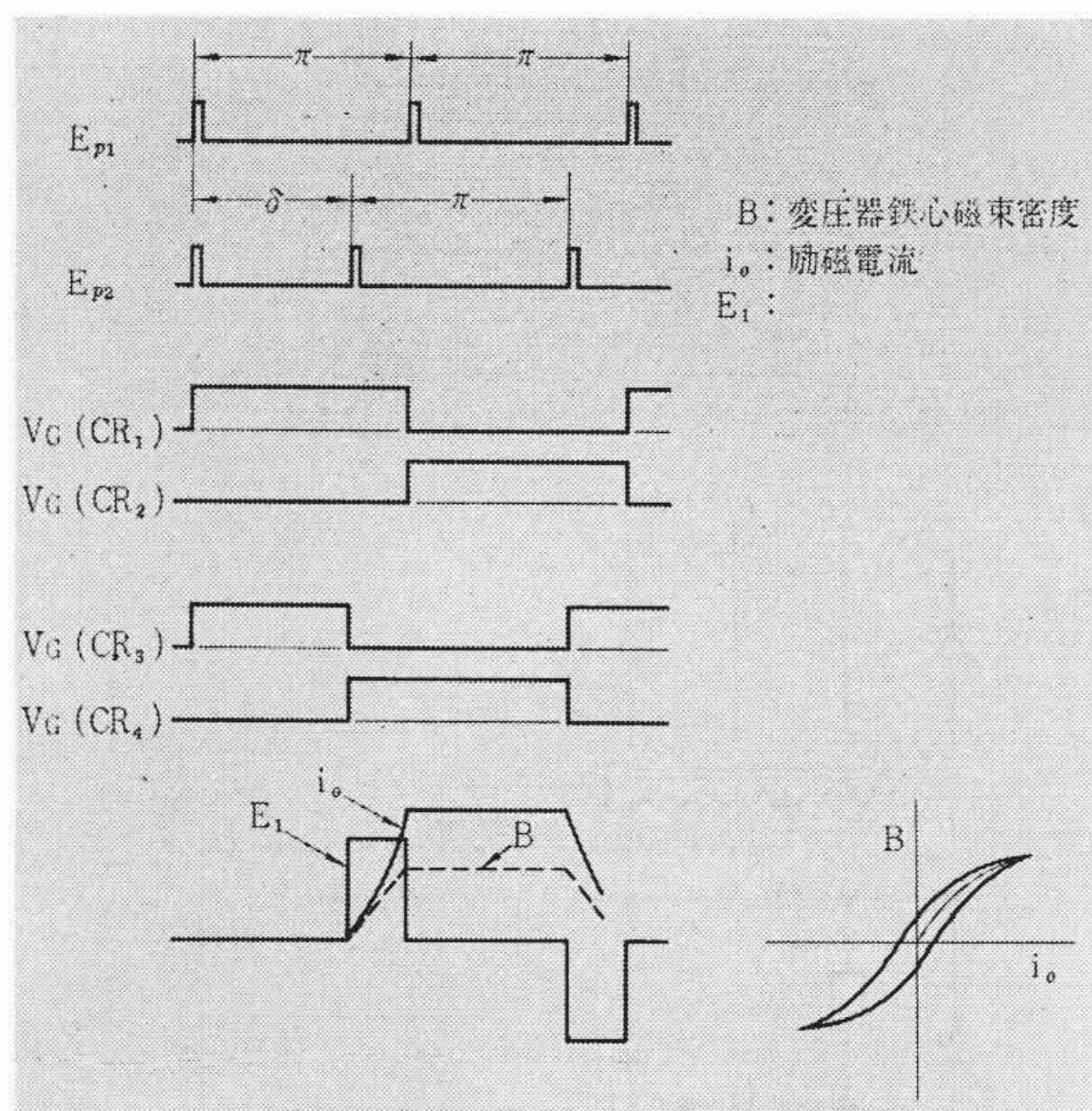


第16図 幅制御インバータ接続

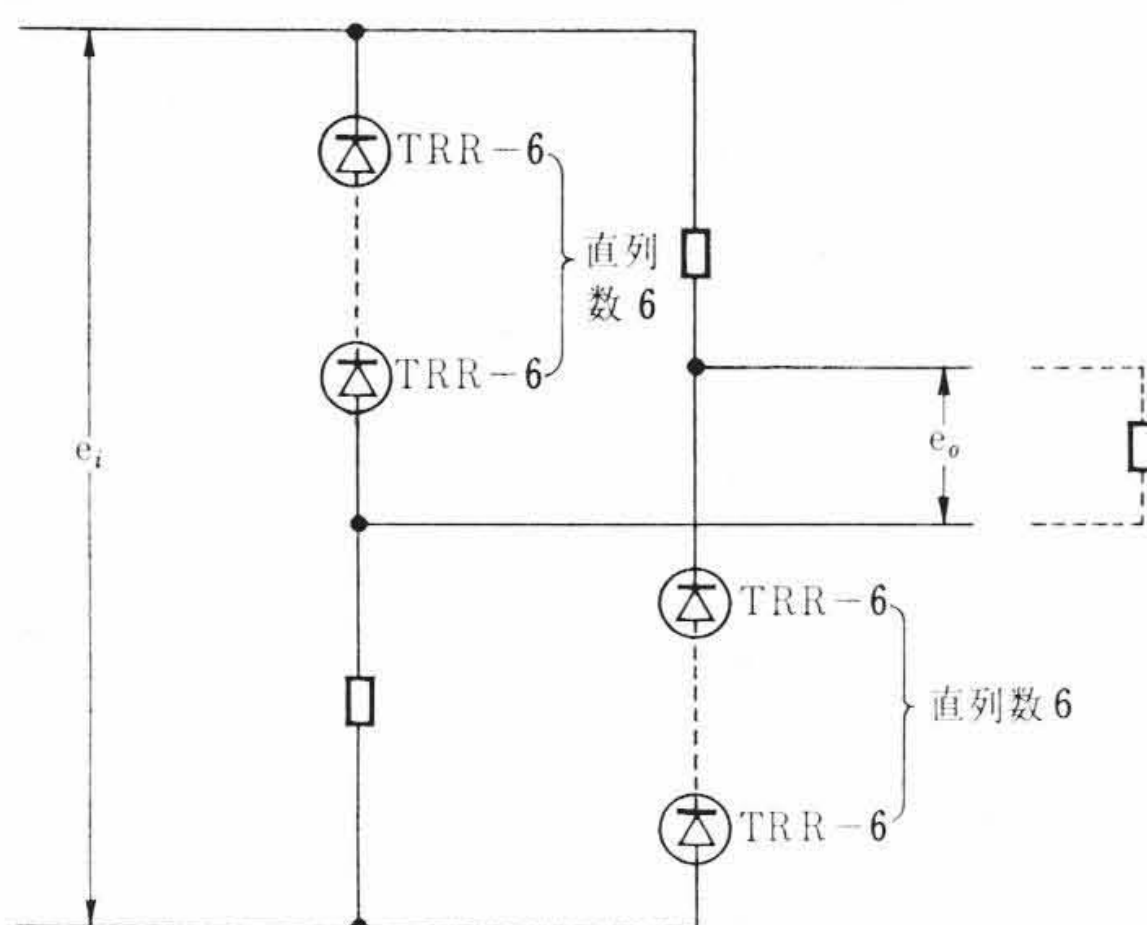
るので、鉄心の飽和によって過渡突入電流が流れ、転流すべき逆電圧を失って転流は失敗する。この解決方法として

- (1) 起動時のみ周波数を大にして運転する。
- (2) 逆方向に予備励磁を施し鉄心飽和を避ける。
- (3) 起動時のみ直流電圧を下げる。
- (4) 電圧幅をしばって起動し徐々に定格幅まで広げる。

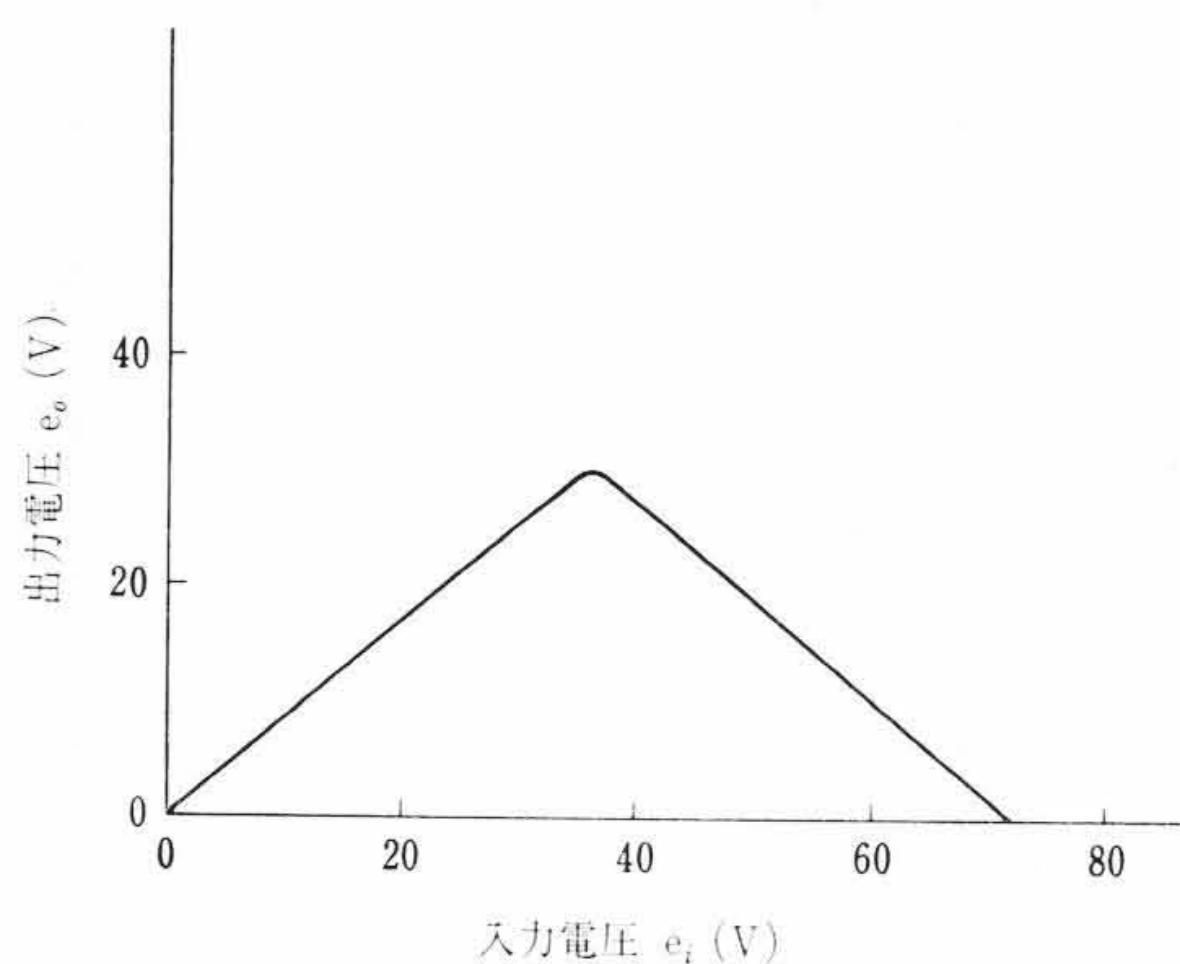
などがあるが、全負荷でも負荷に影響を与えず起動する方法として、電圧幅をしばって起動する方法が最も良い。この場合の概略接続および各部の電圧、磁束などの関係は第16, 17図に示すとおりである。第18図には平滑回路を付加した多重インバータの総合出力電圧の推移を示す。かような施策を施したインバータは無負荷、全負荷のいかなる範囲においても安定に起動し、商用周波では数サイクルで設定電圧に達する。第19, 20図は交流出力電圧の整定誤差を検出する回路およびその特性であって交流を直流に変換してから検出する。第20図より明らかのように1に近い高利得が得られるので、精



第17図 起動時各部電圧および磁束



第19図 電圧検出器接続



第20図 電圧検出器特性

度の高い自動電圧制御が可能である。

6. 特 性

6.1 定周波特性

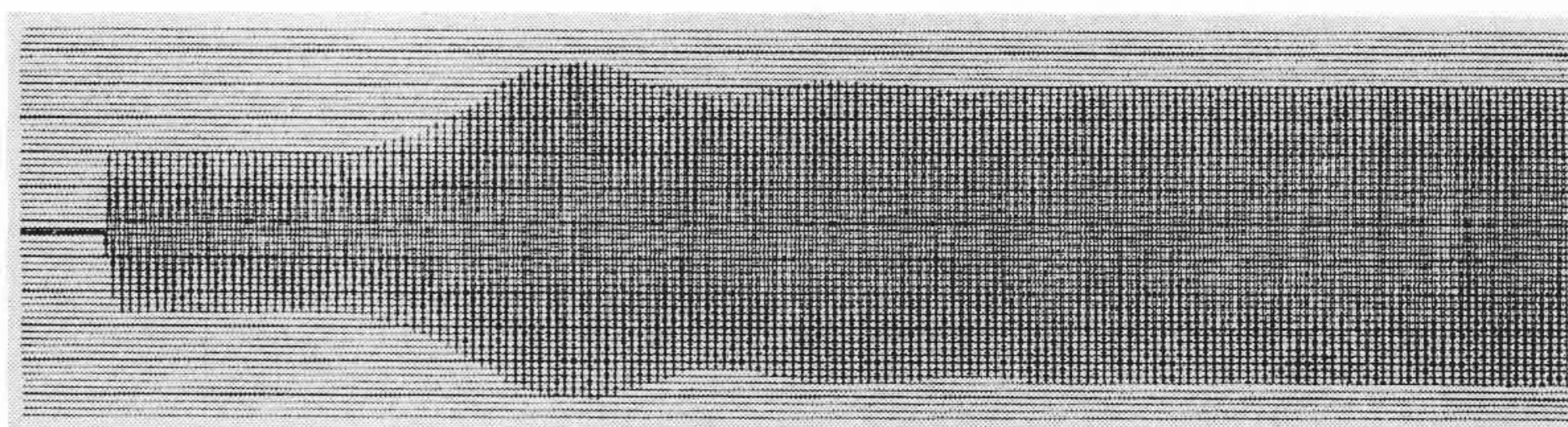
インバータの周波数精度は駆動発振器によって決まり、負荷、入力電圧の影響を受けない。所要周波数精度と適用される発振器は第2表のとおりであって、いずれも周囲温度 $-10\sim+40^{\circ}\text{C}$ に対するものである。

6.2 定電圧特性

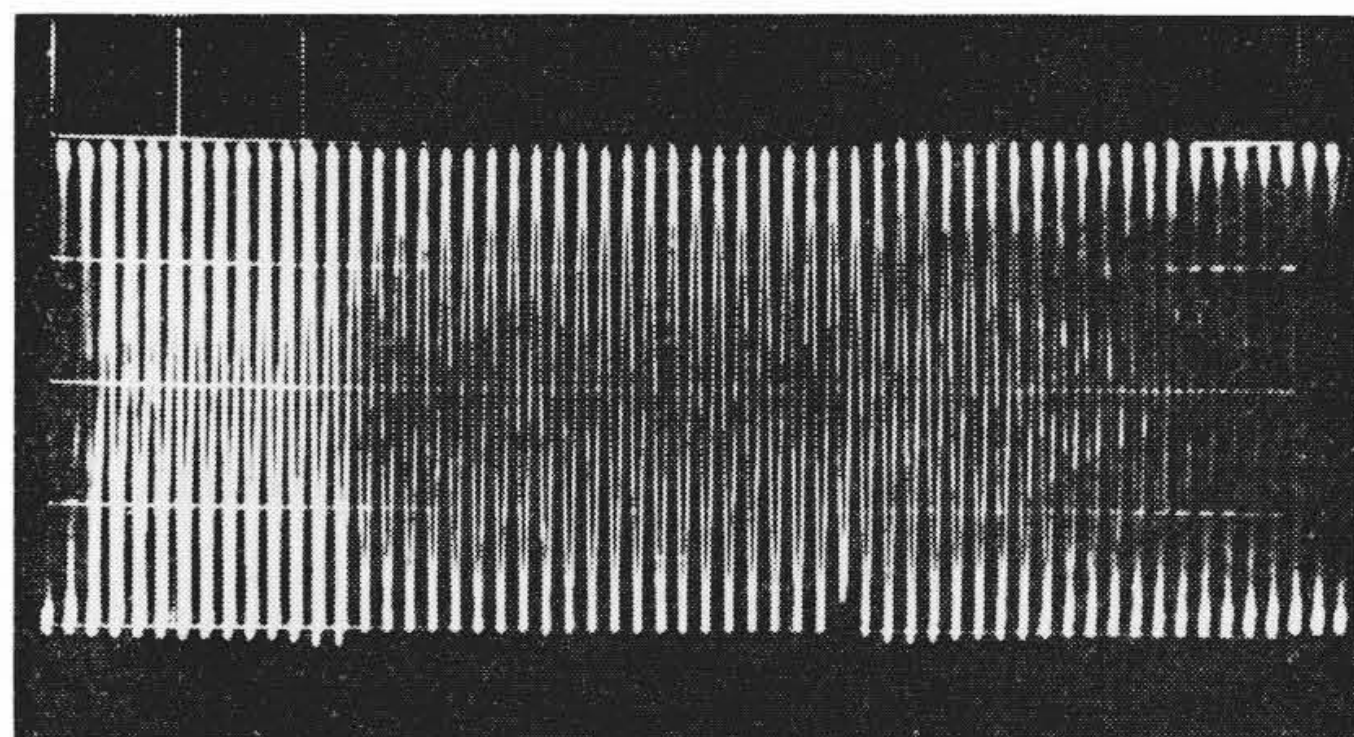
多重インバータの利得 G_i は

$$G_i = \frac{dV}{d\delta} = -\frac{4}{\pi} 2\sqrt{3} E \sin \frac{\delta}{2} \dots\dots\dots (4)$$

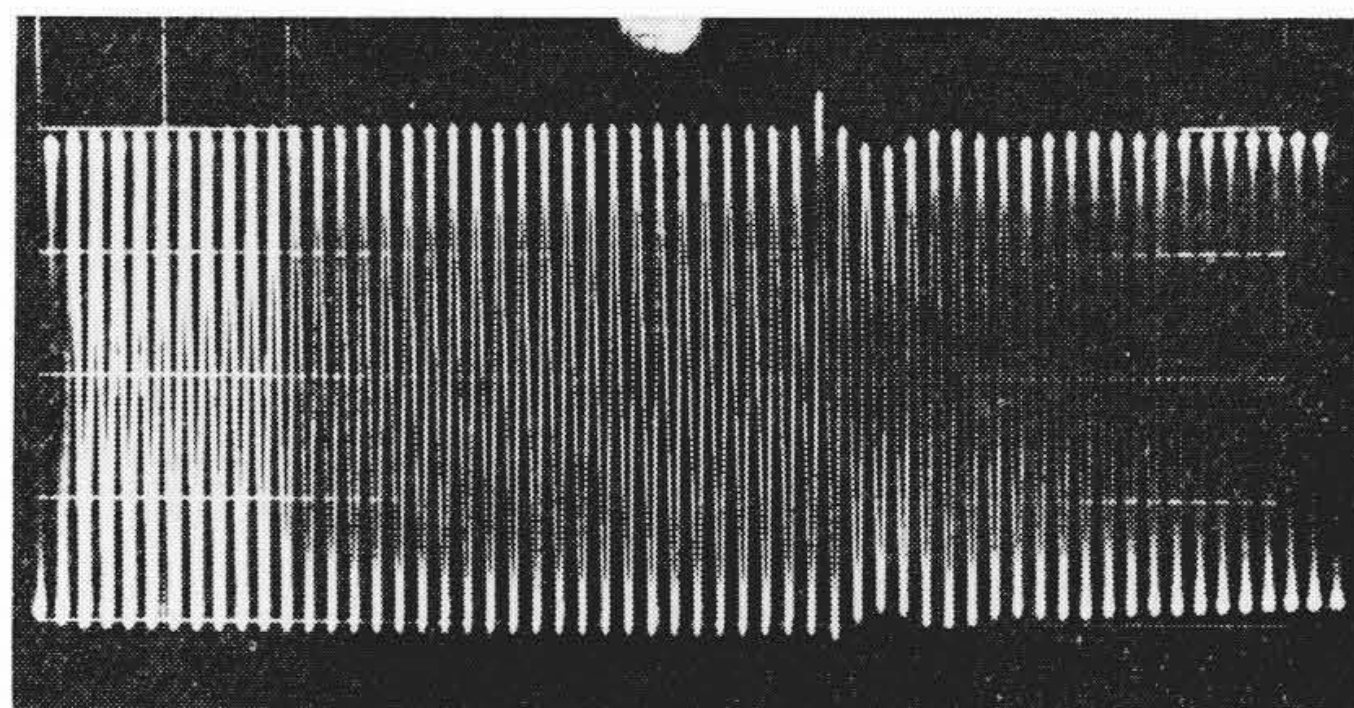
であらわれ、全波制御整流器の半分程度の利得を有するので、定



第18図 起動時交流出力電圧 400 c/s



第21図 負荷急変による瞬時電圧変動 負荷瞬時変動 100→50%



第22図 負荷急変による瞬時電圧変動 負荷瞬時変動 50→100%

第2表 所要周波数精度と適用発振素子

周波数精度	適用発振素子
$\pm 1.0\%$	単接合トランジスタ
$\pm 0.01\%$	水晶発振器(温度制御なし)
$\pm 0.0001\%$	水晶発振器(簡単な温度制御)

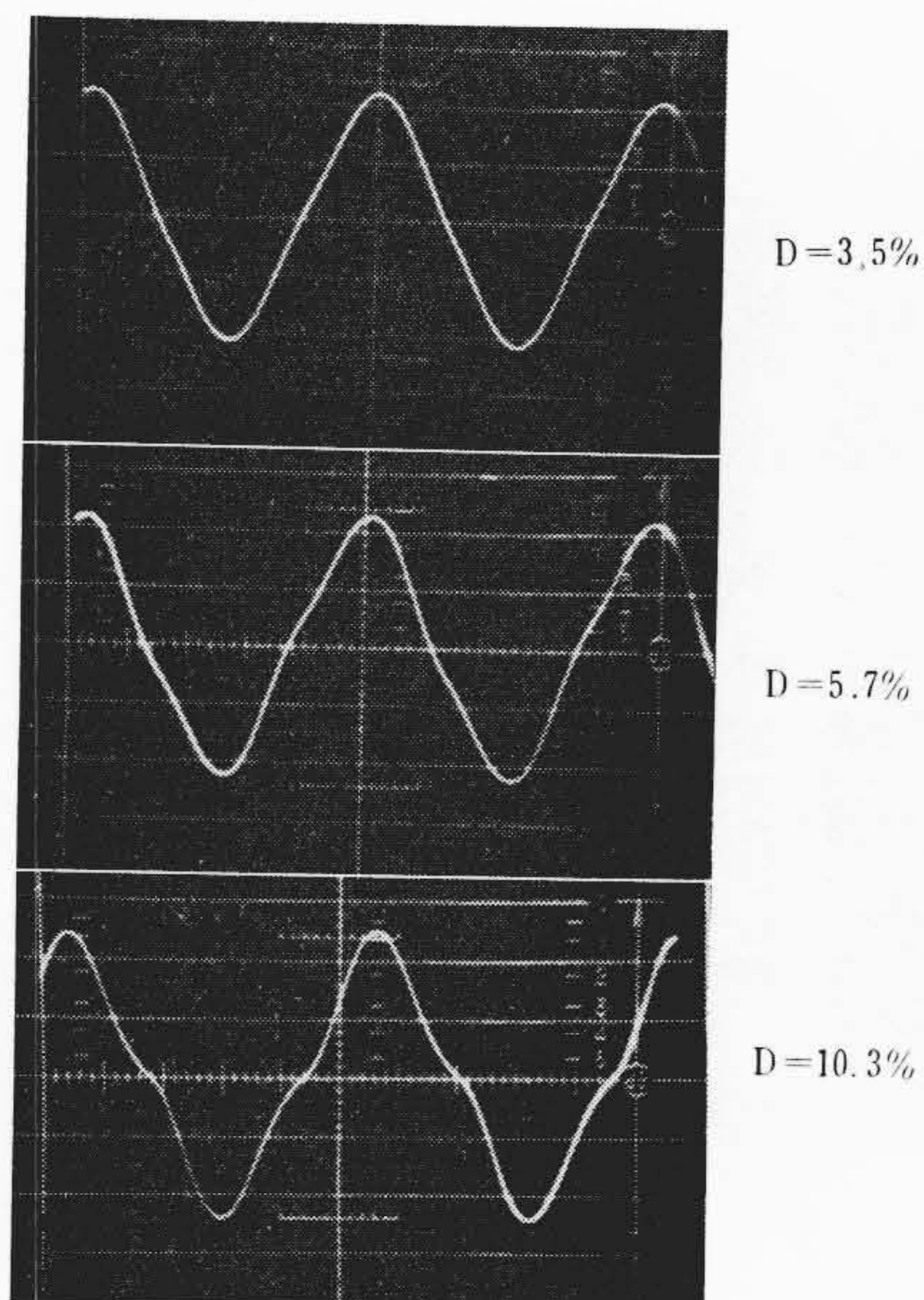
電圧精度を良くすることは容易であり、精密級定電圧ダイオードの採用と入念な温度補償によって、 $-10\sim+40^{\circ}\text{C}$ の周囲温度変化に対しても $\pm 0.5\%$ 以下の精度が実現できる。

6.3 瞬時電圧変動

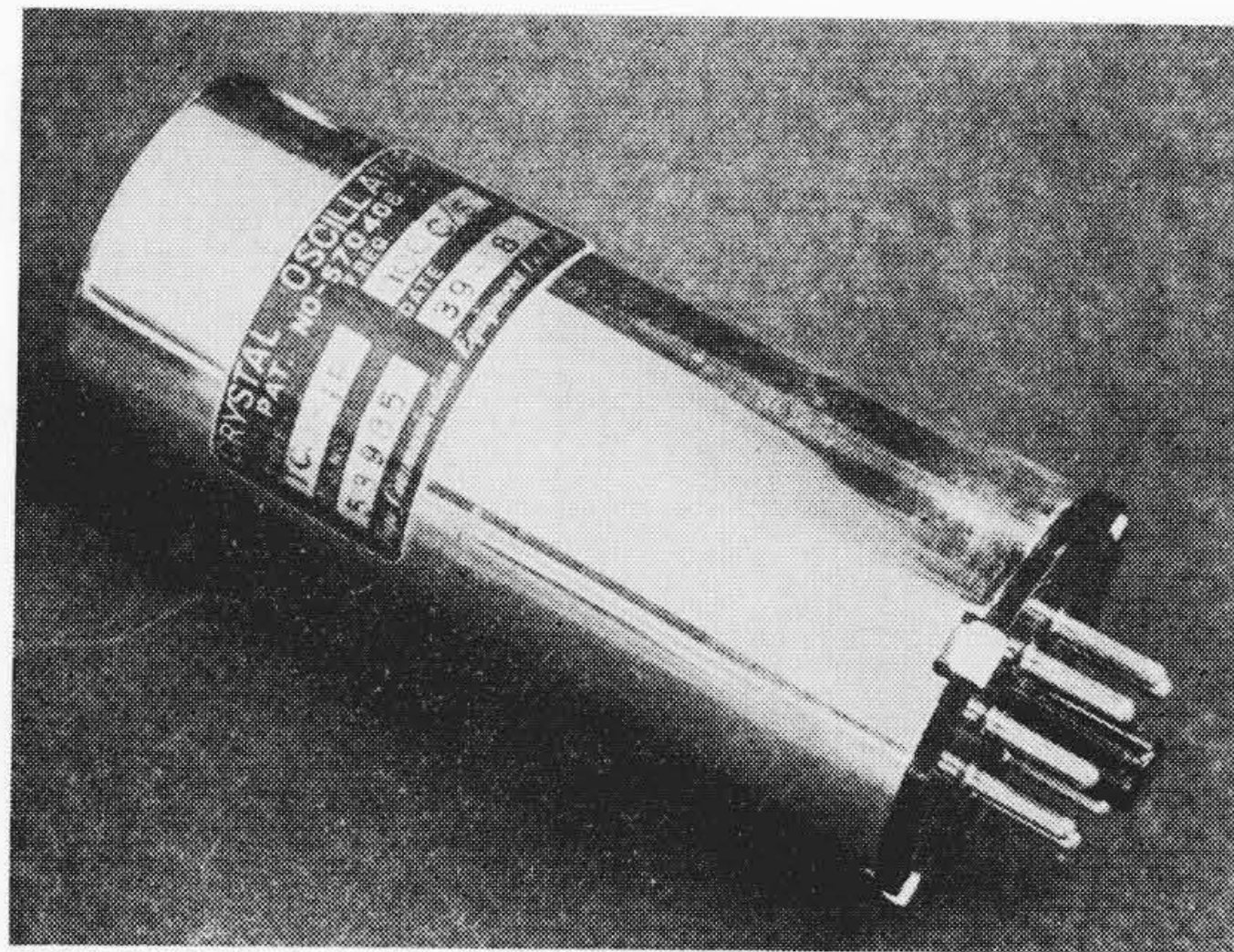
出力側に設けられた直列コンデンサによって補償され電圧変動率は比較的小さい。したがって負荷急変による出力電圧の変動は1～2 c/s程度で落ち着き、ACGなどで問題になるいわゆる「瞬時電圧変動」はほとんど無いといって良く、一般的な負荷の場合この程度の電圧変動の及ぼす影響は非常に少ないと考えられる。第21, 22図は25 kVA インバータで負荷を50→100%急変した場合の出力電圧変化の模様を示すものである。

6.4 出力電圧波形

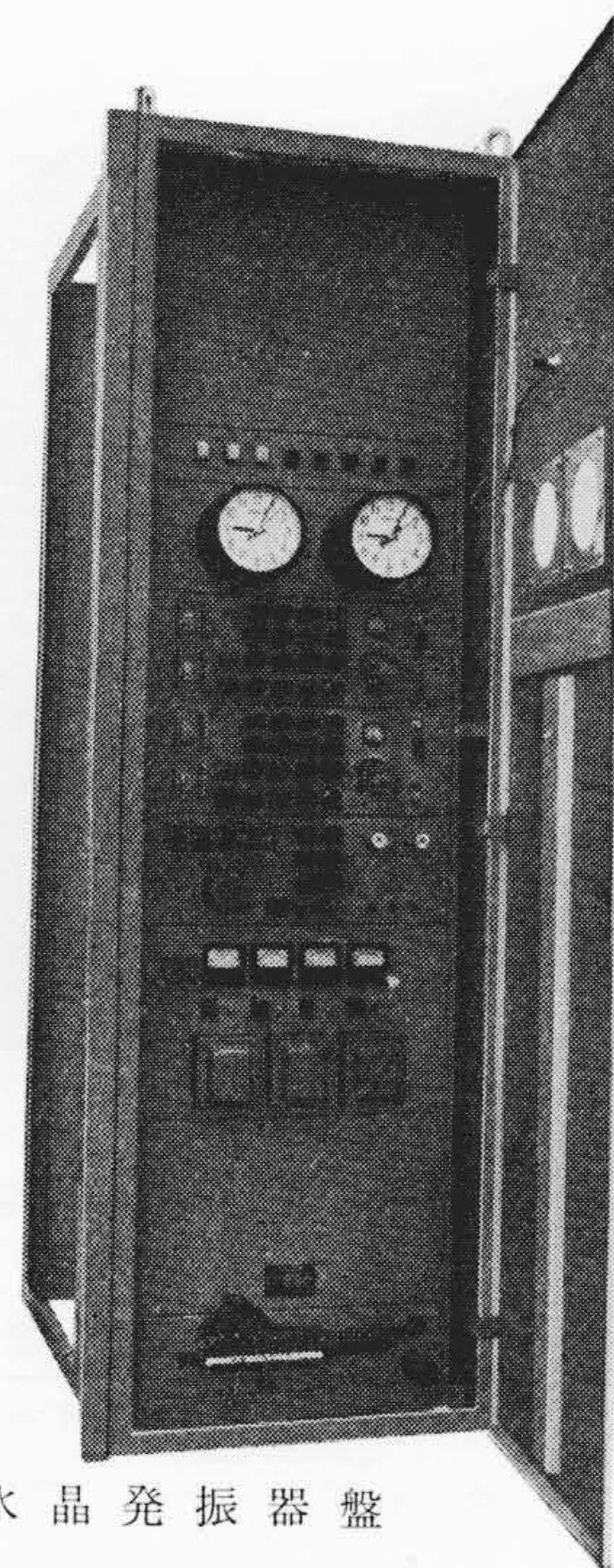
汨波回路を設けない場合の出力電圧波形は前述のように階段状波形であり、多少の高調波を含み波形ひずみ率は群間位相差角によって変わり、第5図に示すとおりである。第5調波以上の汨波回路を設けることにより所要の波形に改善することができる。多重インバータは従来のインバータと異なり、汨波回路の付加によって転流に及ぼす影響が小さいので、波形ひずみ率3%以下も実現可能である。波形ひずみ率10～3%の波形を第23図に示す。



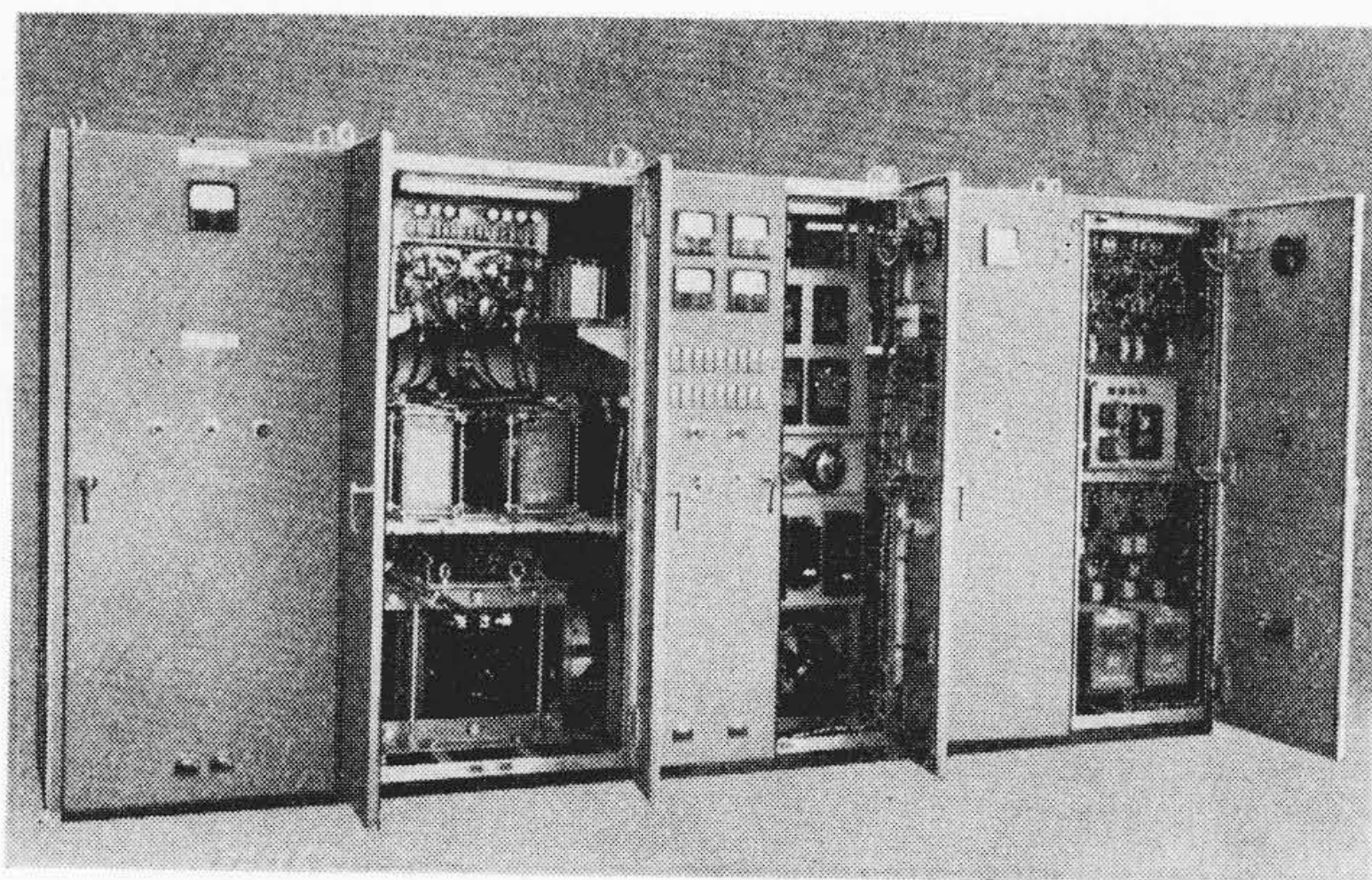
第23図 出力電圧波形例



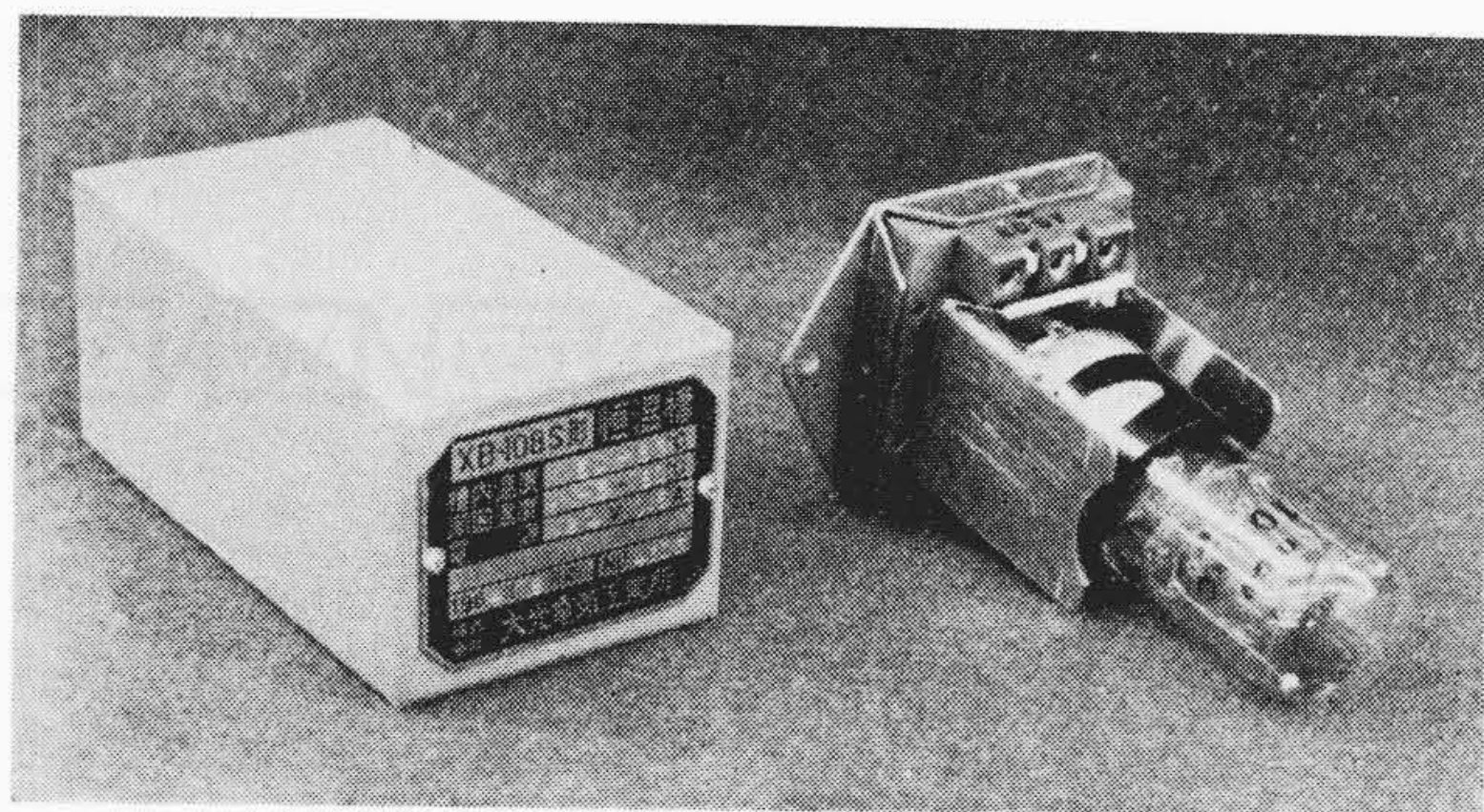
第24図 水晶発振器 (温度制御なし)



第26図 水晶発振器盤



第25図 無停電電源装置 (25 kVA)



第27図 簡単な温度制御付水晶発振器

7. 定周波定電圧インバータ応用製品

SCRによる定周波定電圧インバータは前述したように、従来の電動発電機に置換できる能力を有しているが、現状ではその価格の面からその特長を十分に生かすような用途が好適であろう。

- (1) 高い周波数精度と瞬時周波数変動を避ける要求のある電源、放送用電源、電気時計用電源
- (2) テレビ放送用電源のように、他機と並列運転せずに、同期運転を必要とする電源
- (3) 車両用、船舶用として、保守と騒音の点より静止器を必要とする電源
- (4) 長期間連続運転を必要とする電源

第3表 放送用無停電電源装置仕様

項 目	SCR 整流装置	鉛 蓄 電 池	SCR インバータ
定 格 出 力	26 kW×2	500 AH	25 kVA
定 格 電 圧	130 V×2	224 V	210 V (105 V×2)
可 変 範 囲	(90~130 V)×2		200 V~220 V
周 波 数			50 c/s
波形ひずみ率			5% 以下
入 力	3φ200 V 50 c/s		DC 224 V
周 囲 温 度	-10℃~+40℃	-10℃~+40℃	-10℃~+40℃

- (5) 直流電源を有し交流出力が要求される場合 (周波数変換装置でIM+ACG程度の周波数精度のものは得策でない)

多重インバータはその特性上容量を制限する要素はないといってよく、直流入力側に使用する遮断器によって将来製作される機器容量は決するであろう。アメリカにおいても本方式によって1,000 kVA程度まで商品化されていると伝えられる。

7.1 放送用無停電電源装置

本装置は日本放送協会札幌放送会館に納入され、放送用電源として使用されているもので1965年1月29日より好調な運転を続けている。放送技術規格 (BSS, BTS) に準拠して設計された装置で、その概略仕様は第3表に示すとおりである。周波数精度は±0.01%以下で、簡単な水晶発振器が使用されている。第24図および第25図は水晶発振器および無停電電源装置の外観を示したものである。

7.2 電気時計用電源

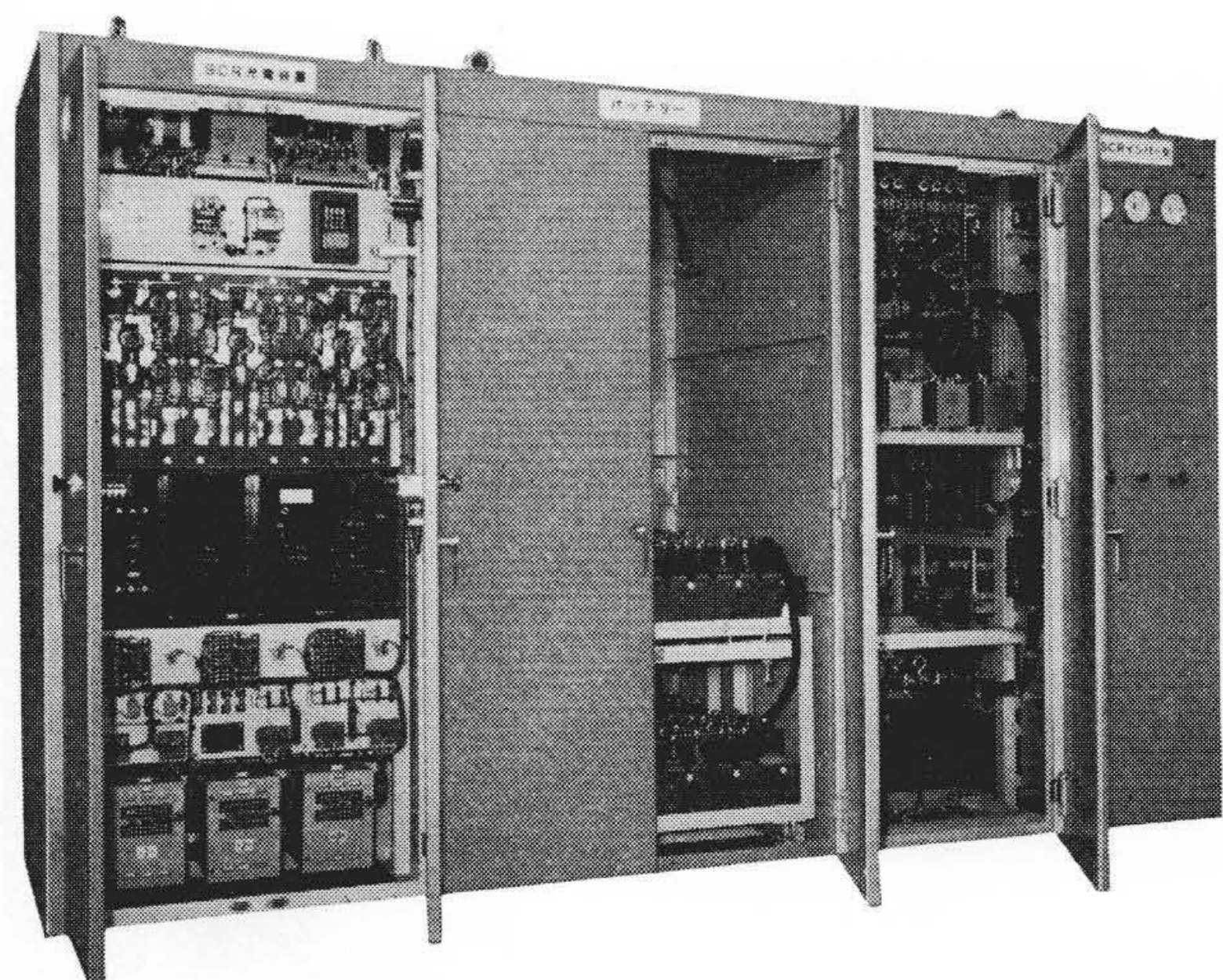
第26図は東北電力株式会社、新潟火力発電所に納入されたSCRインバータ駆動用親時計および水晶発振器盤であって、恒温槽の併用によって±0.0001%以下の周波数精度を得ている。この水晶発振器によって駆動されたSCRインバータの出力は子時計および記録計駆動用電源として、そのすぐれた周波数特性の威力を発揮している。

7.3 計器用無停電電源装置

本装置はゼネラル石油株式会社堺製油所の石油プラントの計器用電源として製作されたもので、アルカリ電池をキュービクルに収納しコンパクトにまとめている。アルカリ電池は常時浮動充電し、若干の直流負荷を含め30分間の停電に耐えるようにしてある。

7.4 船舶用周波数変換装置

本装置は防衛庁護衛艦に設置される特殊計算機用電源であって防



第28図 計器用無停電電源装置

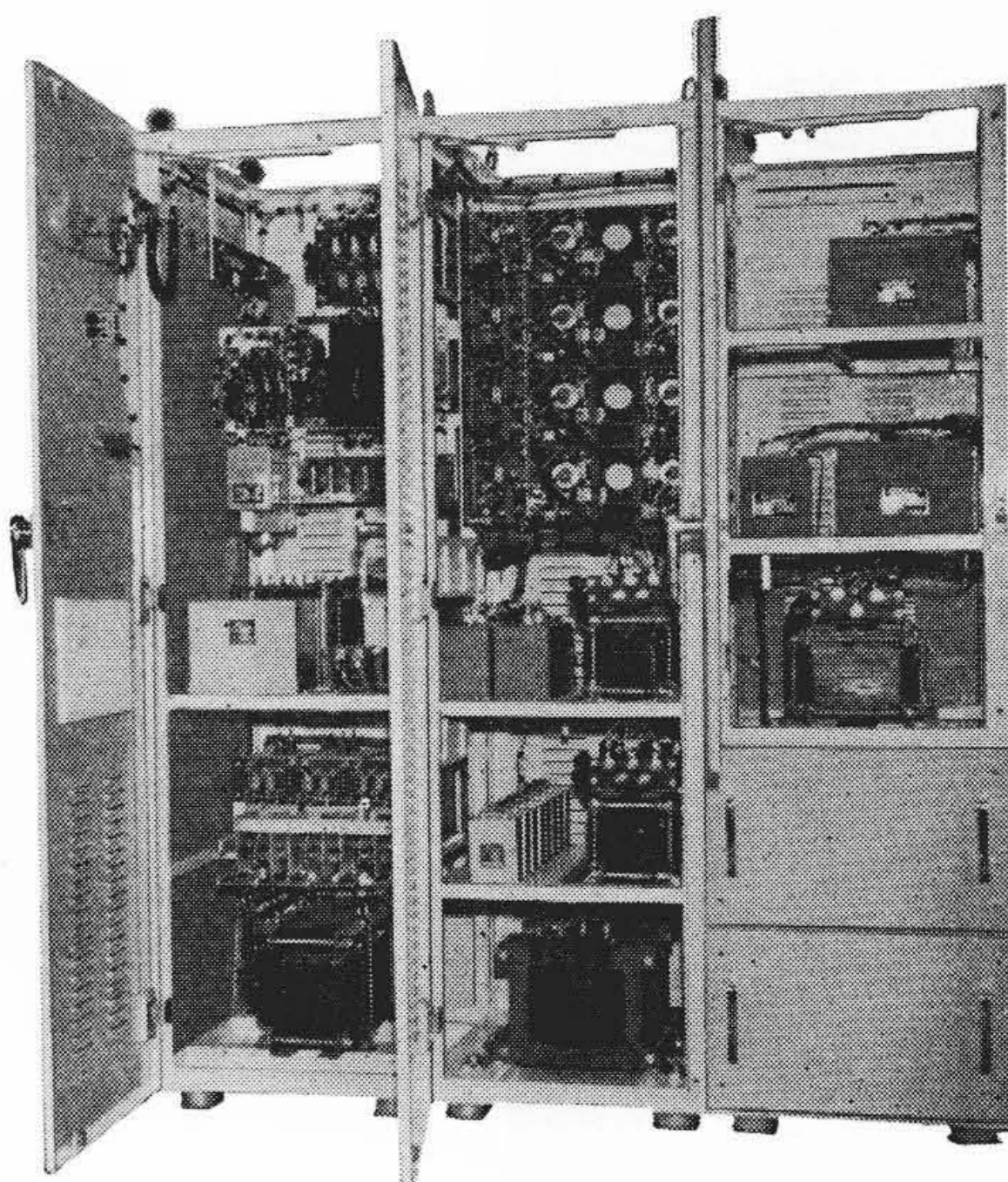
第4表 計器用無停電電源装置仕様

項目	SCR 整流装置	アルカリ蓄電池	SCR インバータ
定格出力	32.5 kW	200 AH	15 kVA
定格電圧	130 V	116 V	110 V
可変範囲	90 V~130 V		100~110 V
周波数			60 c/s ± 1 c/s
波形ひずみ率			8% 以下
入力	3 ϕ 60c/s 440V $\pm 10\%$		DC116V
周囲温度	-10°C~+40°C	-10°C~+40°C	-10°C~+40°C

衛庁規格 (NDS) によって設計された初めての機器である。負荷の性質上高い電圧精度と波形が要求されたが、定電圧特性については前述のように $\pm 0.5\%$ 以下の仕様を満足している。船舶用機器として要求される防滴、耐衝撃については特に意を用い、過酷な走行試験にも耐え、将来艦船用電源設備を静止器化するうえに明るい見通しを与えている。

8. 結 言

SCR による転流改良形インバータを基礎とした多重インバータ



第29図 船舶用波数変換装置

はほとんど理論的に解明され、技術的には一応の完成を見た機器といつてよく、今後大容量機器はこの種の方式に落着くことは論をまたない。今後の課題としては、転流方式をさらに改良して、より効率の向上によってその優位性を確立する必要がある。

終わりに、多重インバータの採用に際し、暖かいご協力をたまわった防衛庁技術研究本部、日本放送協会一般設備部、ゼネラル石油株式会社機械技術課の各位に深甚の謝意を表わすものである。

参 考 文 献

- (1) W. Mc Murray, D. P. Shattuk: I.E.E.E., Trans. Communication & Electronics, No. 57, p. 531 (Nov. 1961)
- (2) 岩田, 前田: 昭40連大 No. 833
- (3) 上田, 前田: 日立評論 46, No. 3, p. 128 (1964)



新 案 の 紹 介



登録新案 第743429号

矢 崎 智

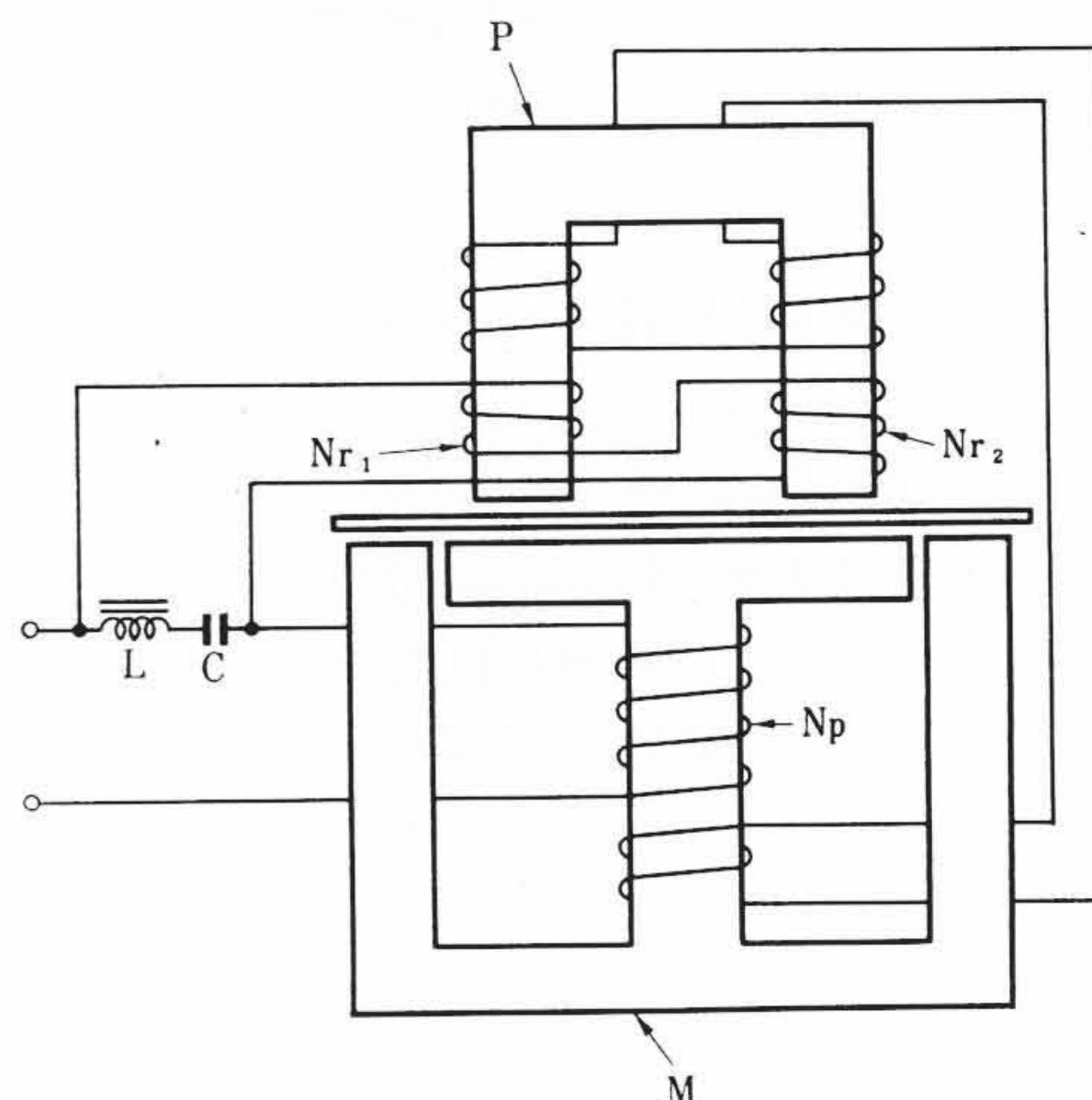
誘 導 円 板 型 継 電 器

誘導円板型継電器の回転力は周波数に比例するため、最少起動電流および限時特性が周波数の影響を相当大きく受けるという欠点がある。

この考案はこの欠点を改良するもので、主鉄心 M に巻かれた一次巻線 N_p の入力回路に、周波数変化に応動した出力を発生するリアクタ L 、コンデンサ C の直列共振回路を設け、この出力を極鉄心 P の発生磁束がうける周波数変化の影響を補償するように直列共振回路の両端から極鉄心 P に直列に巻かれる抑制巻線 N_{r1} , N_{r2} を設けたものである。

周波数が上がった場合は共振回路のインピーダンスが急激に上昇するゆえ、その端子電圧を利用して極鉄心 P の磁束に抑制が加えられ、逆に周波数が下がった場合にはインピーダンスが減少して抑制力が弱くなる。

したがってこの考案によれば巻線 N_{r1} , N_{r2} を適切に選ぶことにより誘導円板型継電器の回転力を周波数に無関係なものにすることができるので、最少動作電流および限時特性の非常にすぐれた継電器を得ることができる。(西宮)



第1図