

# 電気車両補助電源用高圧インバータ

High Voltage Thyristor Inverter for Electric Car

堀 江 竜 郎\* 山 崎 泰 広\*\*  
Tatsuro Horie Yasuhiro Yamazaki

## 要 旨

従来電気車両の補助電源は電動発電機(MG)によるものが普通であった。これに代わってサイリスタインバータを採用することにより、保守性の向上が期待されると同時に効率向上を図ることができる。

日立製作所は数年前より日本国有鉄道、帝都高速度交通営団、名古屋市交通局などに1~2台ずつ高圧サイリスタインバータを納入してその使用実績をつみ重ねてきたが、このたび電車用として名古屋市交通局納8.5kVAインバータを量産納入するとともに、機関車用として日本国有鉄道の新形交直流電気機関車EF81の電気暖房用電源である320kVAインバータを受注し、1号機は昭和43年末に納入実用中であり、2号機以降が続々量産納入されている。本稿はこれら高圧インバータの特長および試験結果について述べたものである。

## 1. 緒 言

直流電気車の車内照明、ファン、制御回路などの電源として従来MGが用いられてきたが、保守の簡易化、騒音防止などの理由でサイリスタインバータがとって代わる傾向にある。他方大容量の電気暖房用インバータは、MGと比較して重量がほぼ $\frac{1}{2}$ となるのでサイリスタインバータを採用する意義は大きい。

サイリスタインバータを車両用として実用化する場合に問題となったパンタ離線、電車線リップルとインバータ運転周波数とがビートを生ずる問題、および波形ひずみについてもすでに解決され、MGと同等以上の性能を示すに至っている。

## 2. 日立インバータの特長

日立製作所の車両補助電源用サイリスタインバータの特長を要約すると次のとおりである。

- (1) 転流回路に電流変成器を用いた帰還回路を設けて帰還効率を高め、飽和形電流変成器を用いてインバータの効率を向上させるとともに、転流電流の減衰を早めている。
- (2) 交流出力波形改善用の汜波回路としては、基本周波数に対する直列共振フィルタと第3次高調波バイパスフィルタとを設け、実使用状態における波形ひずみ率を数パーセントとし、MGと同等以上の性能をもたせている。
- (3) 上記フィルタをインバータの一次側に設け、効率向上と機器の小形化を図っている<sup>(1)</sup>。
- (4) インバータ変圧器の磁束密度を適切にし、かつ構造的にも検討し、ファンなど回転機のような負荷投入時に発生しやすい鉄共振現象を完全に防止している。
- (5) 図1に示すようにパンタジャンプ、デットセクションなどにおいても無停電とすることができる回路<sup>(2)</sup>を用いて、ブス引通しのない車両であっても、複数個のパンタによって給電されるようにし、インバータを安定に動作させるとともにサービス面の向上にも寄与させている。
- (6) インバータ回路、サイリスタゲートパルス発生回路などを標準化し、性能の安定化と品質の向上を図っている。
- (7) 直流高圧側にL-Cフィルタ回路を設け、電車線のリップル周波数とインバータの動作周波数とで発生するビートの防止、および高調波電流が電車線に流れることを阻止している。
- (8) インバータ保護用として、動作の早いかつ定格電流としゃ

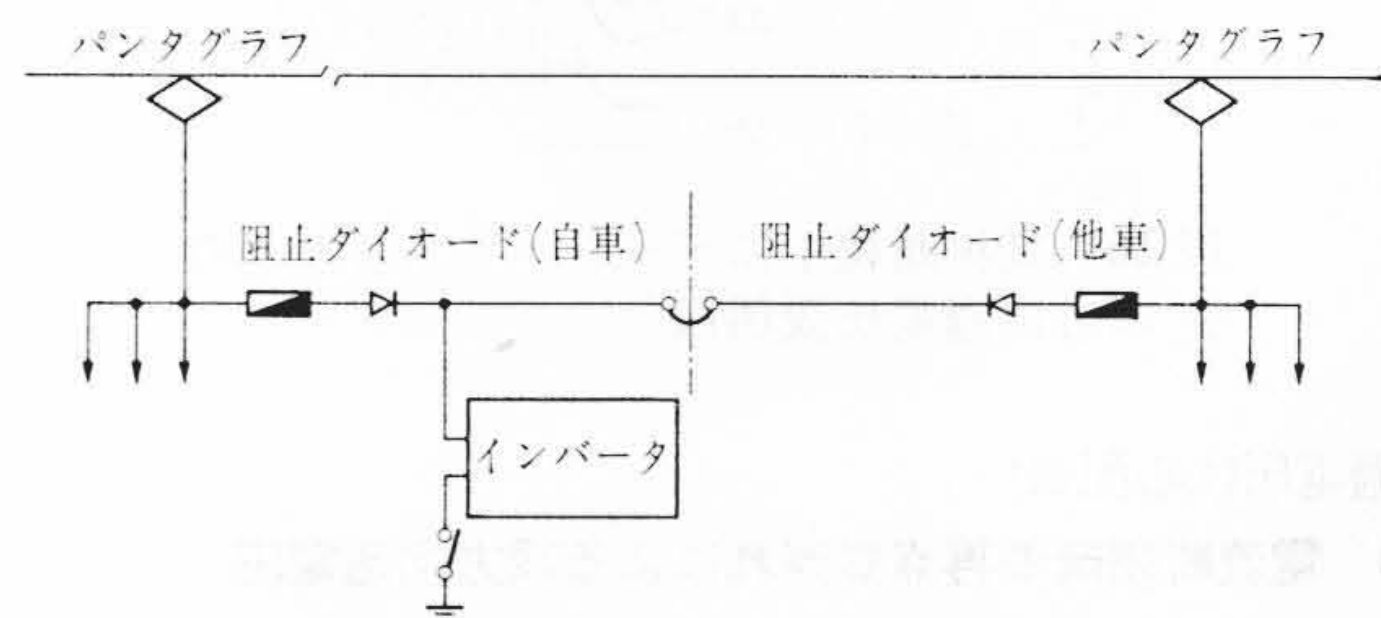


図1 無停電化方式原理図

表1 8.5kVA サイリスタインバータ仕様

|                    |                                                                   |
|--------------------|-------------------------------------------------------------------|
| 形 式                | I N-MWA                                                           |
| 方 式                | 転流改良形 ブリッジ方式                                                      |
| 素 子 サ イ リ ス タ      | C J 02 V L 250 A 1,000 V<br>タノフタイム 50 $\mu$ s 以下                  |
| 構 成                | 2 S $\times$ 1 P $\times$ 4 A                                     |
| ダイ オード             | L 03/04 L 100 A 1,000 V                                           |
| 構 成                | 2 S $\times$ 1 P $\times$ 4 A $\times$ 2 G                        |
| 定 格 出 力            | AC 100 V 6.8 kVA (力率おくれ 0.9)<br>DC 100 V 1.2 kW<br>DC 24 V 0.3 kW |
| 出 力 電 圧 精 度        | $\pm 10\%$ (AC 100 V)<br>$-10\% \sim +15\%$ (DC 出力)               |
| 出 力 相 数            | 単 相                                                               |
| 定 格 周 波 数          | 60 Hz                                                             |
| 周 波 数 精 度          | $\pm 5\%$                                                         |
| 定 格 入 力 電 圧        | DC 600 V                                                          |
| 入 力 電 圧 変 動 範 囲    | DC 400 V $\sim$ 750 V                                             |
| 出 力 波 形 (AC 100 V) | ほ ぼ 正 弦 波                                                         |
| 定 格                | 100% 連続 15 kVA 1 分間                                               |
| 冷 却 方 式            | 自 然 自 冷 方 式                                                       |
| 重 量                | 約 920 kg                                                          |

断電流の比の大きい接触器を用い、保護の確実性を図っている。

以上の特長は補助電源用の単相インバータに関するものであるが、暖房用インバータのように汜波器の不要なものもある。

## 3. 名古屋市交通局納インバータ

昭和44年1月名古屋市交通局に納入したサイリスタインバータは、先行試作品として長期の現車実用化試験により、じゅうぶんな性能が確認された<sup>(3)</sup>、その実績をもとに量産されたものである。

以下本インバータの仕様、性能、構造の概要および試験結果について述べる。

### 3.1 仕様および性能

本インバータの仕様、性能は表1に示すとおりである。製作するにあたり特に留意した点を列記すれば次のとおりである。

- (1) 第3軌条より複数個の集電靴により集電するが、先頭車と

\* 日立製作所水戸工場

\*\* 日立製作所日立工場



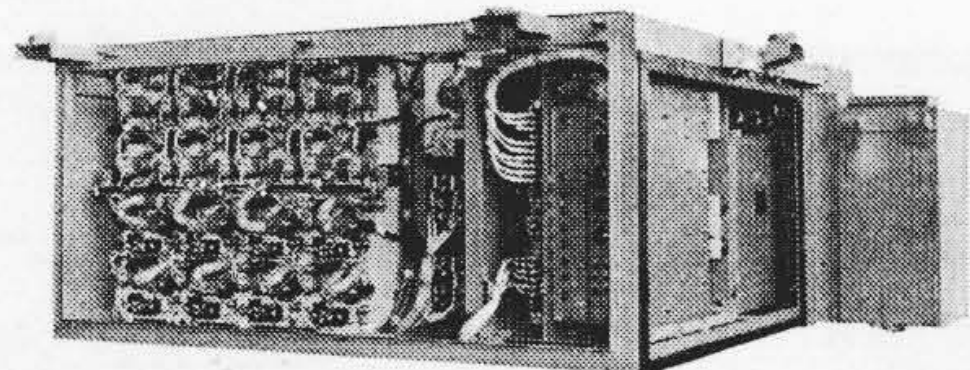


図2 8.5kVA インバータ

後尾車の集電靴を専用引通線をもって接続し、これによって集電靴個々の離線があっても引通線が無電圧になることを防止した。また引通線に主電動機回路電流が流れないように阻止ダイオードを突合せ接続した。(図1参照)

(2) 上記の結果デッドセクション通過に対しても引通線が無電圧となることはない。

(3) 直流入力側にはインバータ運転にともなう電源リップルと、その結果発生する高調波成分による影響を考慮し、平滑リアクトル  $L_v L$  およびバラストコンデンサ ( $Bac$ ) を接続した。

(4) 転流電流を早く減衰させるために、電流変成器 ( $CT$ ) 方式を用い効率を向上させるとともに、サイリスタ・ダイオードの電流値を小にした。

(5) 出力波形整形用フィルタ回路は、直列共振フィルタ  $L_F C_F$  と第3高調波並列共振フィルタ  $L_H C_H$  および並列コンデンサ  $C_P$  より構成されているため波形ひずみが小さい。

(6) インバータ変圧器をギャップ付変圧器とし、鉄共振現象の発生を防止するために励磁電流を流し、かつ磁束密度を小にしている。

### 3.2 構 造

インバータ装置は電車床下に取り付けられる構造とし、車側面より点検できるようにした。構造設計に当たり留意した点は下記のとおりである。

(1) メインテナンスフリーの構造とするためにファンを内蔵形とせず自然自冷形としている。したがって内部損失による部品の温度上昇にはじゅうぶん注意し、サイリスタ、ダイオードスタックやトランス、リアクトルからの発熱に対しては熱しゃへい板を配置した。さらにベンチレータ、金網などを用いて冷却効果を高めている。

(2) 起動回路を除いてインバータ一式を一箱に収納しコンパクトなものとした。

(3) ゲート制御回路は一部の部品を除きパッケージ化し、外部雑音に対して障害をうけないよう配置と配線に留意した。

### 3.3 インバータ主回路

図3はインバータ主回路を示すものである。

直流入力側から直列抵抗器、ダイオード、平滑リアクトルおよびバラストコンデンサが配置されている。万一起こるかも知れないインバータ転流失敗による直流短絡に対しては、過電流継電器により検出し、しゃ断器により事故電流をしゃ断する。事故電流の値は直列抵抗器で制限される。なおヒューズは最終保護用であり、転流失敗に対する事故電流はしゃ断器でしゃ断することを原則としている。

低電圧継電器  $LVR$  は、電車線電圧が比較的ゆるやかに低下したときにインバータを停止させるものであり、ダイオード ( $Do$ ) は、バラストコンデンサの放電による  $LVR$  の積放時限のおくれることを防止するためのものである。

インバータ方式は幅制御1段ブリッジインバータであり、サイリスタ1アームは  $PIV 1,000V$  素子  $2S$  で構成されている。帰還用電流変成器  $CT 1 \sim 2$  は、転流時に発生する転流コンデンサの放電電流の一部を損失とせず電源に帰還するもので、この結果インバータの総合効率を高めることができる。インバータの出力波形としてはほ

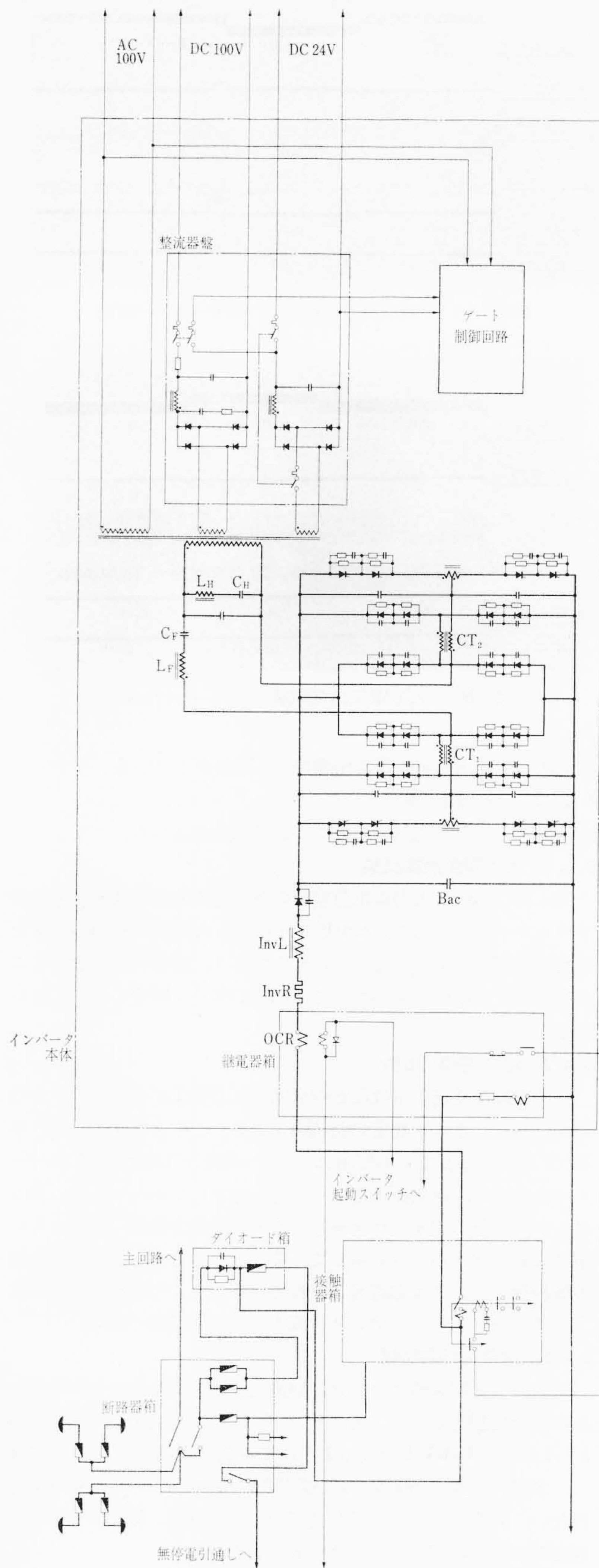


図3 8.5kVA インバータツナギ

ぼ方形波となるので、正弦波とするためフィルタ回路を設けている。

保護方式としては、出力側の短絡事故に対してはインバータの転流失敗に至るので、直流側の過電流継電器によりこれを検出保護するが、部分的な負荷の事故その他を考慮して、比較的小容量の直流



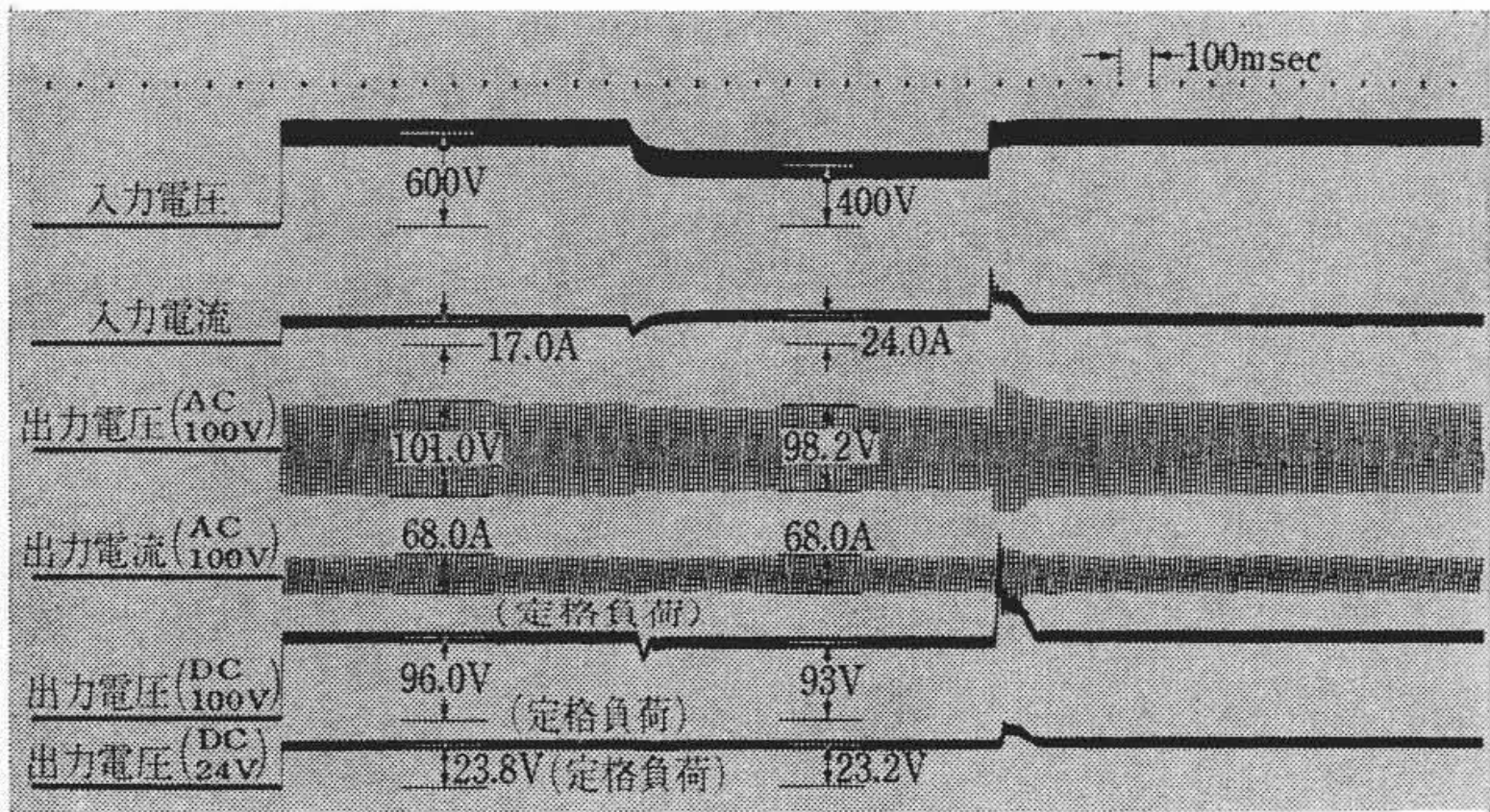


図4(a) 入力電圧急変試験 (600V→400V→600V)

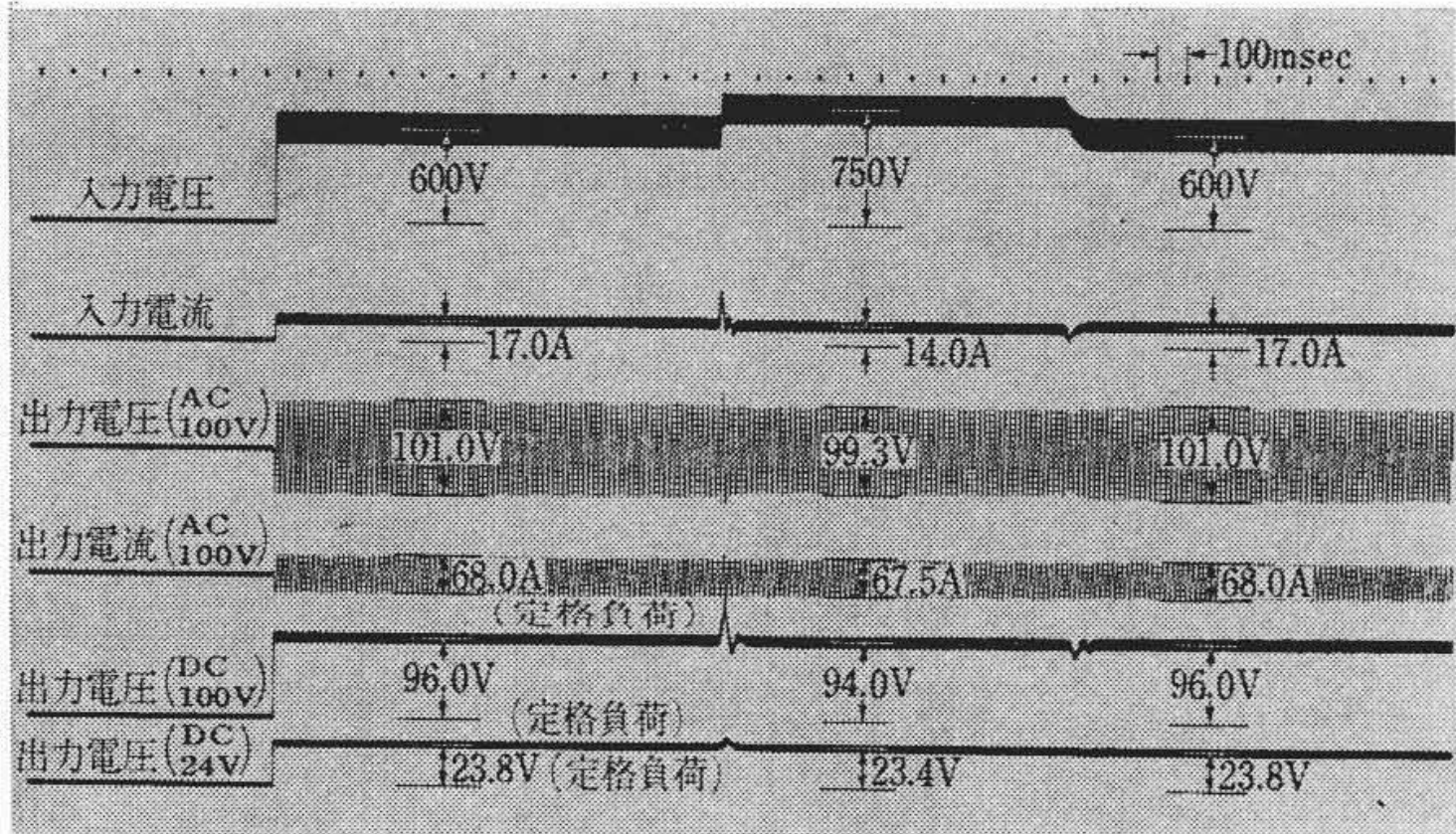


図4(b) 入力電圧急変試験 (600V→750V→600V)

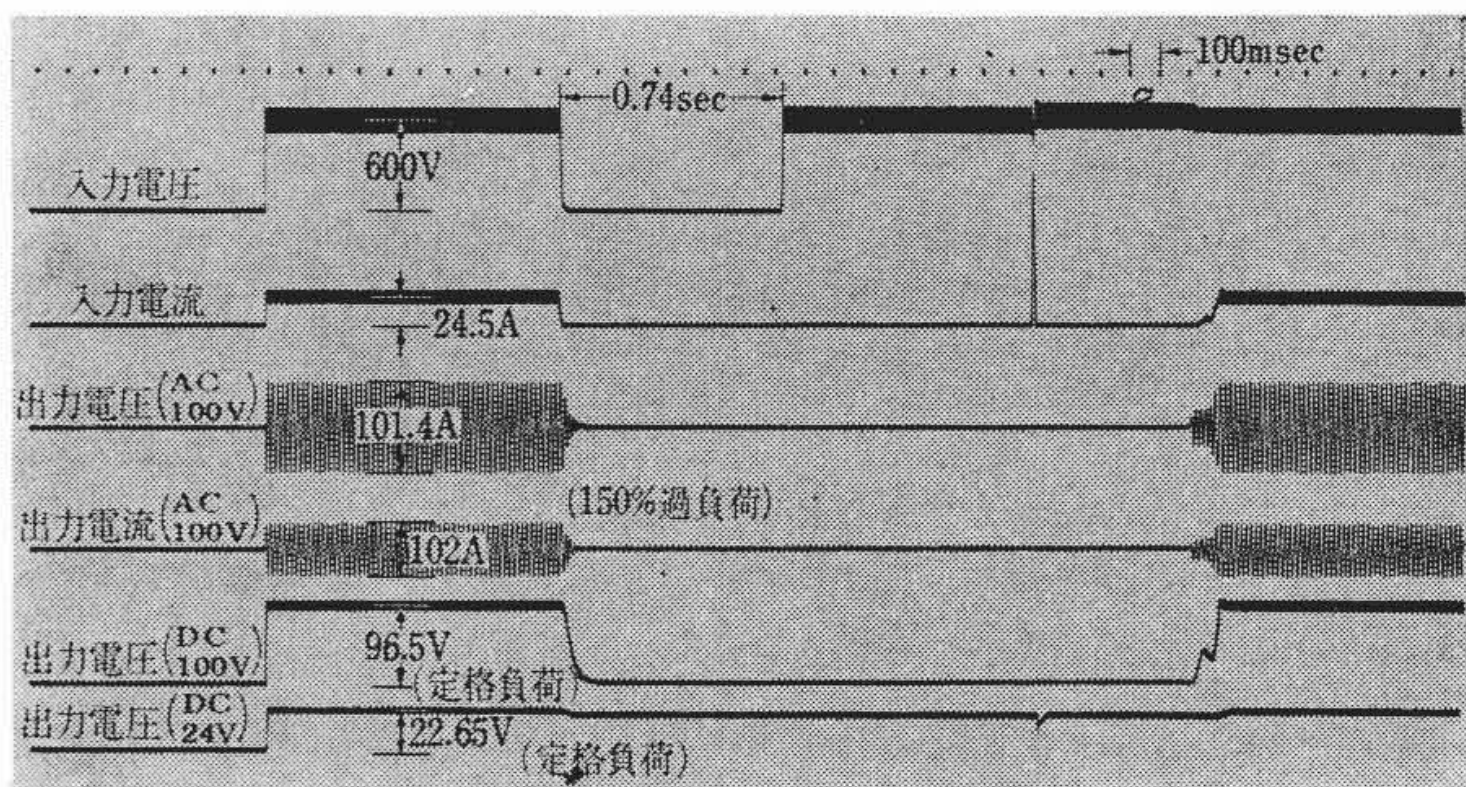


図5 入力電圧中断試験

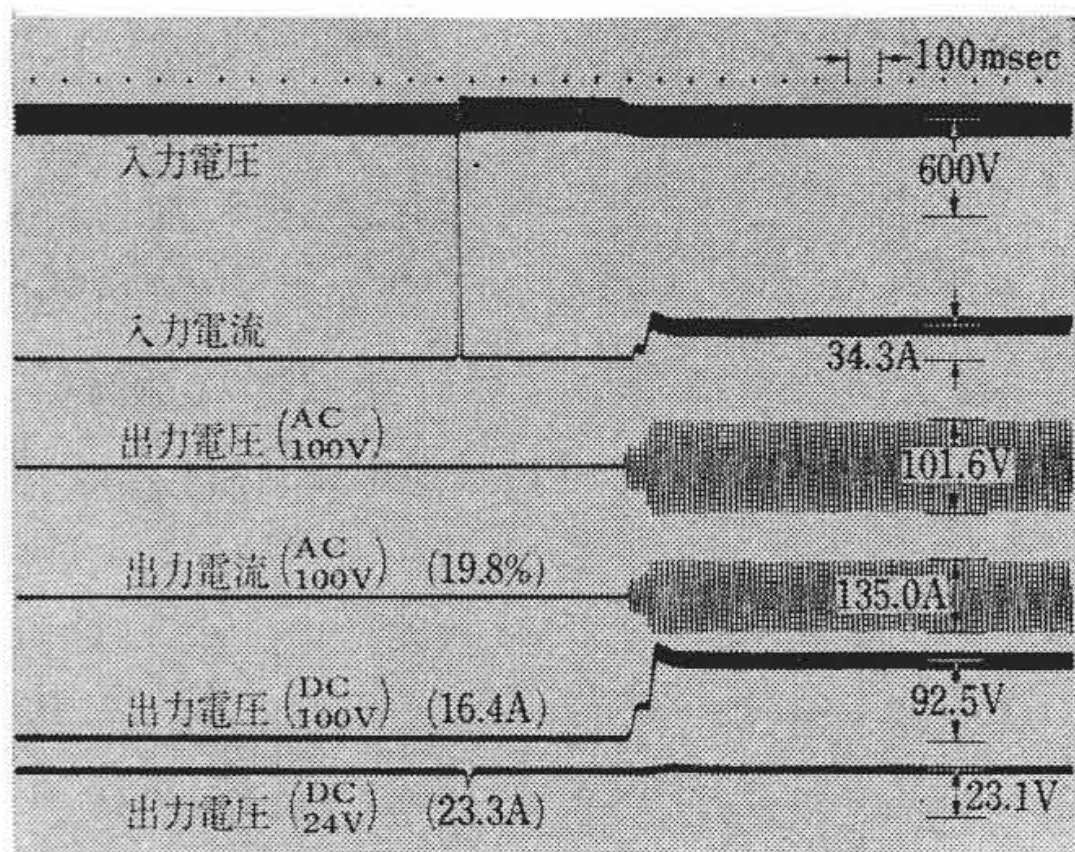


図6 過負荷起動試験 (入力電圧600V)

負荷側には配線用しゃ断器を保護用として使用している。

### 3.4 試験結果

本インバータの社内試験結果について簡単に述べる。

#### 3.4.1 入力電圧急変試験

図4(a)(b)は入力電圧急変時の各部電圧電流の波形状態を示すオシログラムである。600Vを中心とした電圧変動幅の最低と最高値について試験を行なったものであり、定格負荷においてこの程度の入力電圧急変があっても応答が早く、MGに比べて良い結果を示している。

#### 3.4.2 電圧中断試験

この試験は変電所事故などの原因で入力電圧が中断され、その後再開したときを想定した試験である。このとき交流負荷のみ150%過負荷としている理由は、ファンなどが回転中にインバータが投入され、逆相投入となることを想定したからである。図5はその状態を示すオシログラムであるが、出力電圧、電流ともに順調な減衰と立ち上りを示している。なお電車線電圧印加後約0.85秒後にピーク入力電流が流れているが、この電流は接触器投入によりバラストコンデンサへ流入する充電電流である。

#### 3.4.3 過負荷起動試験

インバータ起動時にファン、整流装置などが負荷された状態にある場合を想定したもので、インバータの等価出力が定格8.5kVAに対し15kVAとなるように交流側負荷、直流側負荷を調整し、定格入力電圧(600V)および750V 450Vについて起動試験を行ない、異常の有無を確認し良好な結果を得た。図6は定格入力電圧時の過負荷起動オシログラムである。

#### 3.4.4 その他の試験

その他試験として温度上昇試験、入力電圧変動試験、負荷変動試験および振動試験を行なったが良好な結果を得た。

交流100Vの出力電圧波形の波形ひずみについては、DC 400～750Vの範囲に変動させても、定格負荷において6.5%以下にすることができた。また周囲温度を-10℃～40℃に変化させ各種試験を行ない、その性能を確認した。

サイリスタ素子2Sのターンオン、ターンオフ時の電圧分担については良好な結果を得ており、転流余裕角(逆電圧時間)の実測結果も15kVA過負荷運転時の場合においても約80μsあり、素子のタンオフタイムは50μsであるのでじゅうぶんの余裕をもっている。

インバータの変換効率は定格入力電圧、定格負荷において約75%である。これは主として正弦波出力とするためのフィルタの損失と限流抵抗器による損失のためである。

## 4. 国鉄納電気暖房用インバータ

昭和43年11月、日本国有鉄道に納入したEF81形交直流電気機関車とう載の暖房用サイリスタインバータに対しては、すでにかずかずの現車試験が行なわれ、その性能が確認されている。EF81形交直流電気機関車の暖房インバータの量産に先だち、42年2月にEF80形交直流電気機関車に同じく暖房用320kVAインバータが1台納入され、その実績より今回EF81形にて量産されたものである。

本インバータは交流区間に力行用として使用する主シリコン整流器が、直流区間では不用となるので、インバータ回路に転用し、サイリスタを追加して主回路を切換えて主変圧器、主平滑リアクトルなどとともにインバータを構成するものである。したがってインバータ装置としては力行用主シリコン整流器と一体となった構造であり、かつ交直切換器を内蔵している。

EF81形機関車は引きつづき23台の量産にはいっており、44年10月までに全台数が完成納入される予定である。

機関車全体よりみたインバータ、整流器関係については別稿<sup>(4)</sup>にゆづるとして本稿ではインバータを主体に概説する。

### 4.1 仕様性能および特長

本インバータの仕様、性能は表2に示すとおりで、おもな特長は下記である。

(1) 従来使用されてきた電気暖房用電動発電機にとって代わるものであり、単相インバータとしては320kVAと比較的大容量である。



表 2 320 kVA 電暖インバータ

|             |                                                                                                                   |
|-------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 形 式         | RS36A (国 鉄 型 式)                                                                                                   |
| 方 式         | 転流改良形 ブリッジ方式                                                                                                      |
| 電 圧 制 御 方 式 | 位 相 制 御 (幅 制 御)                                                                                                   |
| 素 子         |                                                                                                                   |
| サイリスタ       | 形式 (日立) CST 400X-13 (CH 03 VM)<br>400 A 1,300 V<br>タノオフタイム 50 $\mu$ s<br>構成 4 S $\times$ 1 P $\times$ 4 A         |
| ダイオード       | 形式 (日立) SI 800-25 (CD1CF)<br>800 A 2,500 V<br>構成 4 S $\times$ 2 P $\times$ 4 A<br>(ダイオードの構成は力行用シリコン整流器として決定されている) |
| 架約電圧 (変動範囲) | DC 1,500 V (900~1,650 V)                                                                                          |
| 出力電圧調整範囲    | 100% (強) 87% (中) 71% (弱)                                                                                          |
| 定 格 出 力     | 320 kVA/1,440 V/222 A 連 続                                                                                         |
| 出 力 相 数     | 単 相                                                                                                               |
| 出 力 周 波 数   | 67 Hz                                                                                                             |
| 出力周波数精度     | $\pm 2$ サイクル                                                                                                      |
| 出 力 波 形     | 数 ほ ぼ 矩 形 波                                                                                                       |
| 冷 却 方 式     | 送 油 風 冷 式                                                                                                         |
| 重 量         | 約 4,350 kg                                                                                                        |

(2) 負荷は列車暖房用ヒータであるのでインバータの通流幅を可変にして出力電圧をかえ、ヒータ発熱量を強, 中, 弱の3段に切換えるようになっている。インバータとしての自動電圧制御は行なわれない。またフィルタも設けないので回路も簡単で、インバータ応用としては最適である。

(3) インバータ運転中は両パンタ運転を行なっているので、パンタが同時に離線することはきわめて少ない。したがって電源の電圧急変幅も小さい。

(4) サイリスタ、ダイオードには平形素子を採用し(図7参照)油浸構造としてある。これにより高い冷却効果が得られ、電流容量が増し、素子数が減少し装置を小形化することができる。またサイリスタアノードカソード、およびゲートカソード間の抵抗コンデンサなど付属品とともに油浸構造となるため、点検がほとんど不用となる。

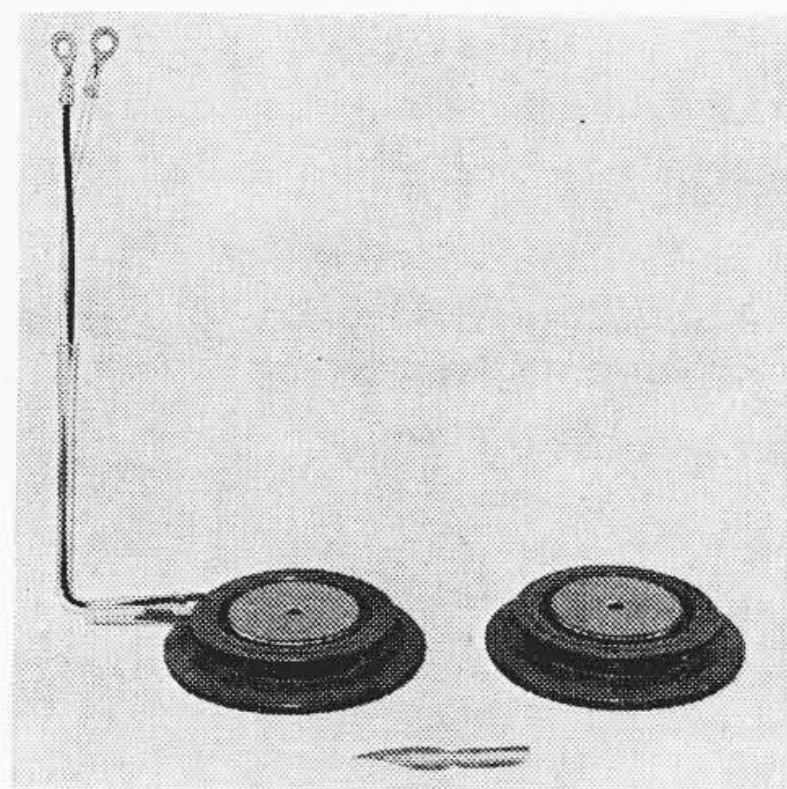
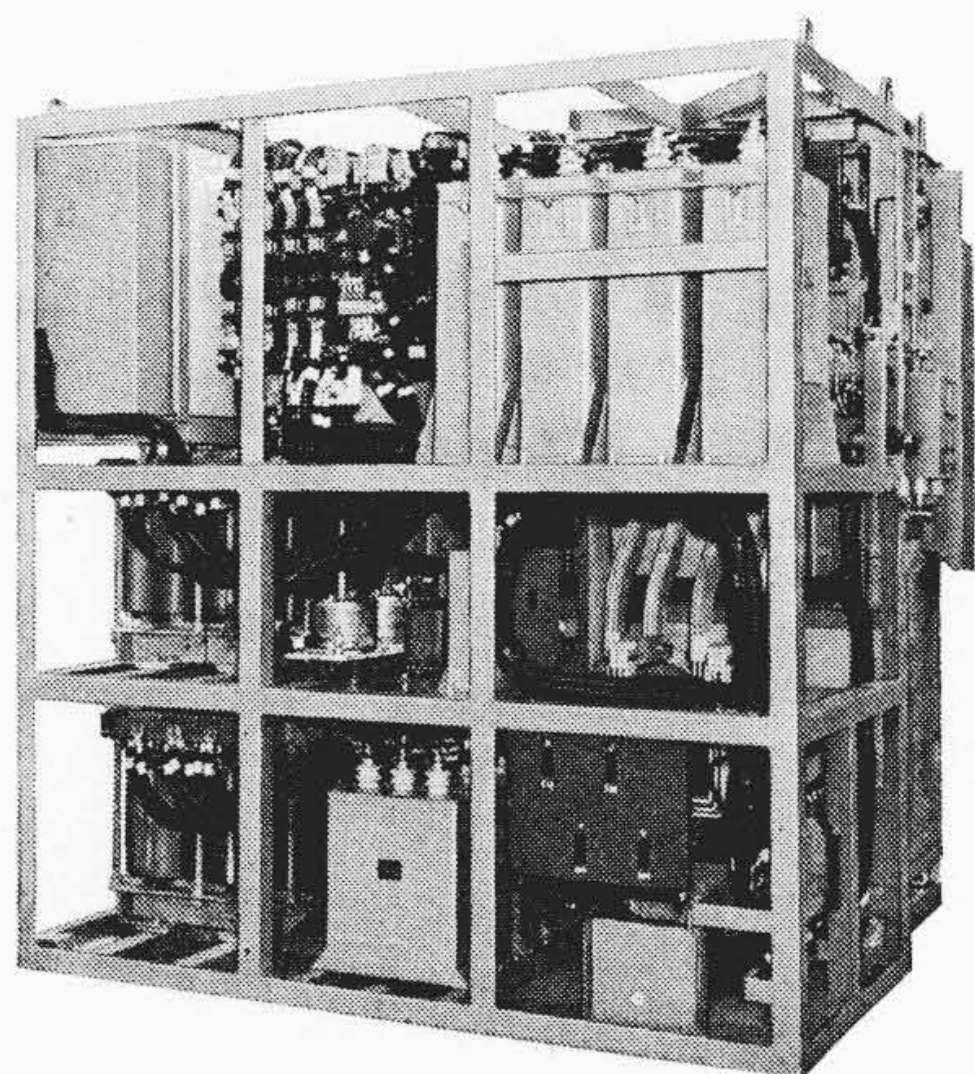


図 7 平 形 素 子



(列車, 暖房用インバータ付)

図 8 RS 36 形主シリコン整流器

## 4.2 構 造

図8は本インバータ装置の外観を示したものである。これは機関車内の機械室にぎ装され、点検を要する機器は廊下面に配置されている。それら機器のおもなものは油タンク内部の油面をチェックする油面計、インバータを外部電源にて調整試験を行なうためのシーケンススイッチコンセント、ゲート制御装置などである。インバータ運転時使用する機器で装置外にぎ装されているものは、入力側平滑リアクトル、インバータ変圧器および入出力回路の接触器類である。

## 4.3 主 回 路

図9は320 kVA 電気暖房用インバータの主回路ツナギである。インバータおよび負荷短絡などの事故電流は高速度しゃ断器により保護され、サイリスタ素子の過電流耐量との保護協調はじゅうぶんとれるようにしてある。

インバータの運転周波数はその2倍の周波数成分が軌道を通るので、軌道信号回路の妨害電流とならぬよう、また転流回路の発生損失を小にするよう67 Hzに決定された。なお高調波分の軌道回路への万一の妨害を考慮し、134 Hz共振分路を平滑リアクトルの中間位置に接続し、数アンペアの高調波電流を吸収するとともに、架線のリアクタンス分の影響をなくするようにしている。

インバータゲート制御回路については部品の経年度変化、故障などによるインバータ周波数の変化についても通信線、軌道信号回路への影響を考慮し、インバータの運転周波数を水晶発振器によって安定化し、万一の故障に対しては出力周波数の漂動検出装置を開発した。

サイリスタの転流回路方式としては、転流電流減衰用に転流抵抗器を用い、帰還ダイオードを省いたものとした。この抵抗器は強制通風方式で、オイルクーラと直列通風構造となっている。

インバータ変圧器には、主変圧器の二次巻線を転用してインバータ変圧器の一次巻線として使用した。変圧器はゲートパルスの正負のアンバランス、サイリスタの順電圧降下のアンバランスを含む回路

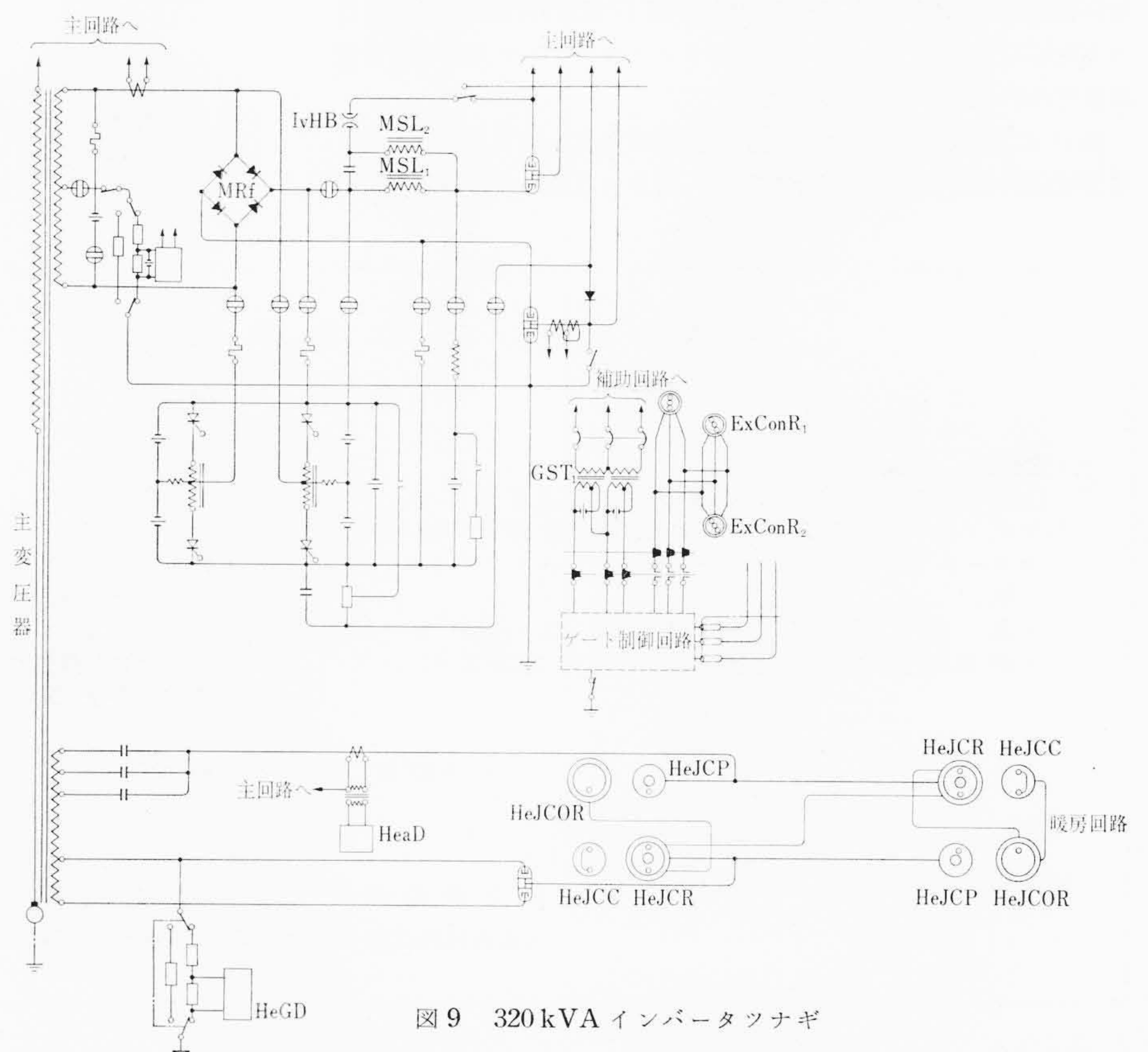


図 9 320 kVA インバータツナギ



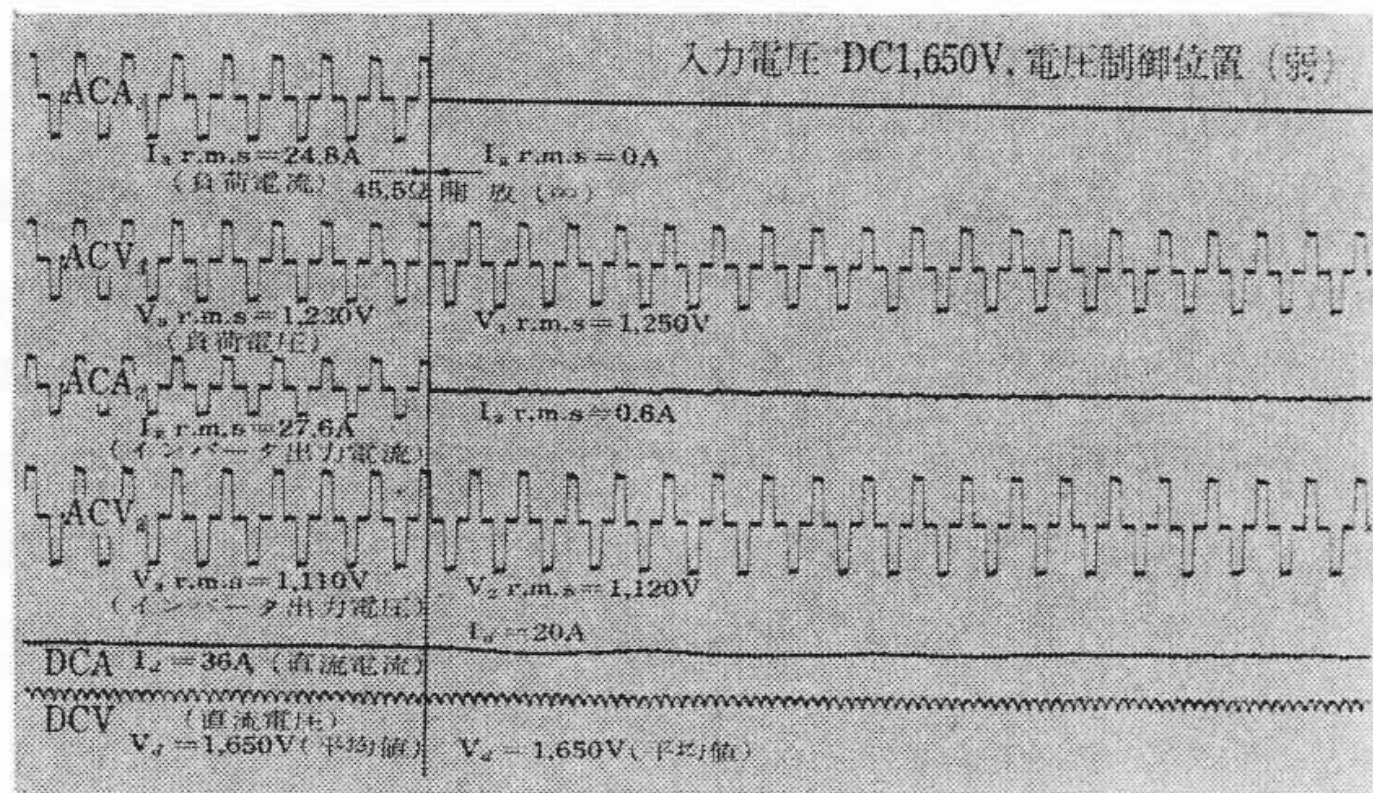


図10 負荷急変試験

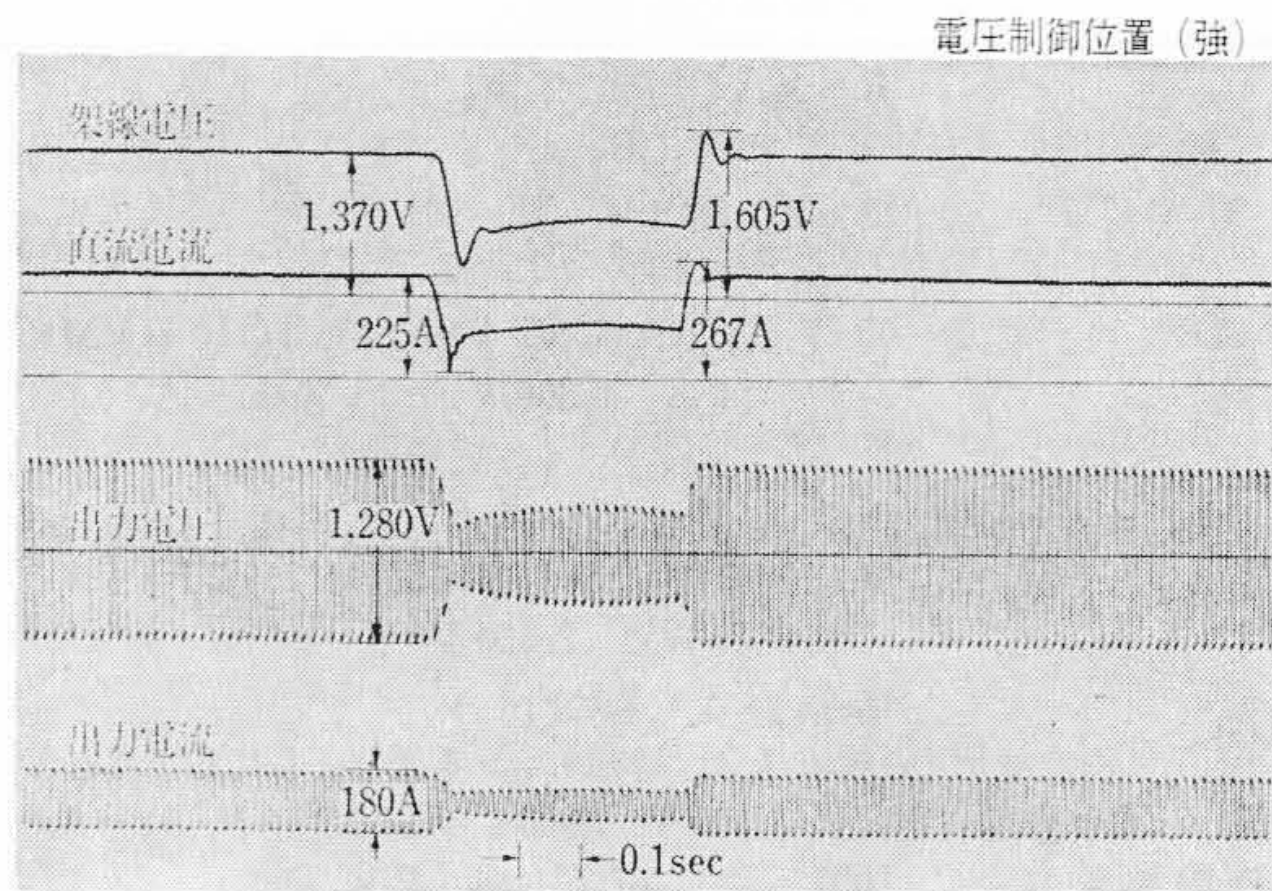


図11 電力中断試験

のアンバランスによって、変圧器一次巻線に直流電流が流れ、変圧器鉄心が直流偏磁をうけて励磁電流にピーク電流が発生し、転流失敗を招くおそれがある。このため直流電流を制限する抵抗器を主変圧器に直列に接続し、直流偏磁を防止した。

逆流阻止ダイオードは直流—交流セクションにおいて、直流電圧検出用継電器の動作を確実にするために設けられたものである。

#### 4.4 試験結果

本インバータの試験は装置と別装置の主変圧器、リアクトル、接触器などと組み合わせて行なわれ、きわめて良好な結果を得た。

インバータの性能試験では、起動、停止、出力電圧調整、静特性電圧急変および負荷急変など各種試験が行なわれた。図10は負荷急変開放試験の一例である。

サイリスタの転流余裕時間については定格入力電圧(1,500V)定格負荷時において約80 $\mu$ S以上あり、素子のターンオフタイム50 $\mu$ Sに比べて余裕のある値である。

サイリスタ4Sのそれぞれの電圧分担は、素子のターンオン特性をそろえることにより良好な結果を得た。

電力中断試験は、工場試験と機関車とう載後の現車試験で行なわれた。工場試験では、低電圧継電器が動作しインバータを停止させない範囲の約0.4秒の入力電圧中断に対し、電源回復時の電源電圧は100%の急変となり、このときバラストコンデンサ端子電圧は定格電圧の約185%程度になった。

図11に現車試験における入力-出力電圧電流を示すものである。電源電圧回復時に発生する過電圧は、現車では90kVA電動発電機

が架線に負荷されているため、120%程度の過電圧におちつき工場試験の値より低い値となった。いずれにしる素子耐圧上は余裕のある値となっている。

一方ゲート制御装置単独についてもインバータの性能を左右するものであるから、高温、低温度動作試験をはじめとする各種性能試験、および振動試験を行ない良好な結果を得ている。

またゲートパルスの正、負の時間のアンバランスも2~3 $\mu$ S以下、変圧器の直流偏磁の値もじゅうぶん小で、実用上さしつかえない値である。

## 5. 結 言

本稿において量産化した小容量インバータと大容量インバータの2種類について特長や試験結果などを紹介した。

現圧補助電源用サイリスタインバータは、回路的にも車両の特殊性を備えており、車両に適合する標準形インバータとしてほぼ固まったものといえる。ここに至るまでに現車とう載による長期試験などについて多大のご指導を賜った日本国有鉄道、帝都高速度交通営団、名古屋市交通局の関係各位に深甚の謝意を表わすものである。

## 参 考 文 献

- (1) 特許実用新案出願中
- (2) 特許実用新案出願中
- (3) 前島ほか：日立評論 48, 1226 (昭41-10)
- (4) 山崎ほか：日立評論 51, 726 (昭44-8)

Vol. 30

日立造船技報

No. 2

## 目 次

### ■ 論 文

- 針路安定性の悪い船の操縦性の判定方法について
- ディーゼル機関潤滑油の化学洗浄方式の自動化
- オーステナイト系ステンレス鋼のウエルド・ディケイ対策
- 魚腹型ゲートの水理実験
- 尾道大橋の走行荷重による動的応答について

- 高圧用メカニカルシールの研究(第2報)  
—密封圧力によるしゅう動面の変形が密封特性に及ぼす影響—
- 高圧用メカニカルシールの研究(第3報)  
—しゅう動面の熱変形が密封特性に及ぼす影響—
- すぐ歯平歯車の疲れ試験(その3)  
—給油と損傷について—
- 純流体OR-NOR素子の切換に関する二、三の考察

……………本誌に関する照会は下記に願います……………

日立造船株式会社技術研究所  
大阪市此花区桜島北之町60 郵便番号554