

GTOインバータによる車両用誘導電動機の制御

AC Traction Drives Using GTO Inverters

電気車両のインバータ制御誘導電動機駆動方式は、その高い信頼性、保守性の面から、現在普及しているチョップ制御直流電動機方式に代わる新動力方式として注目されており、既に実用化が始まっている。しかし、インバータ装置のいっそうの小形化が重要な課題である。

今回、インバータ装置の小形・高性能化を目的として、大容量GTOサイリスタを適用した750V、600kVAの装置を開発した。GTOサイリスタは自己消弧機能をもつので、強制転流回路が不要となり、装置の小形化、高効率化及び低誘導障害化が可能である。

坪井 孝* *Takashi Tsuboi*
植田明照** *Akiteru Ueda*
八尾 勉** *Tsutomu Yatsuo*
福井 宏** *Hiroshi Fukui*
安藤正博*** *Masahiro Ando*

1 緒 言

誘導電動機を車両用主電動機として用い、VVVF (Variable Voltage and Variable Frequency: 可変電圧・可変周波数)^{*)} インバータで制御する方式は、主電動機の小形・軽量化、保守性・信頼性の向上など多くのメリットが期待できる。

日立製作所は、先に130kW誘導電動機4台と1,500V、1,000kVAインバータ装置による実車走行試験を行ない、その実用性を確認した¹⁾。

ところで、最近の電力用半導体スイッチング素子の進歩は目覚ましく^{2),3)}、強制転流回路が不要なGTO(ゲートターンオフ)サイリスタの適用が可能となった。そこで、今回、インバータ装置の小形化を目的として、2,500V、1,000A GTOサイリスタを用いた750V、600kVAインバータ装置を開発した。

この論文では、誘導電動機のインバータ制御について概説し、GTOを適用したインバータ方式及び装置について紹介する。

2 車両用誘導電動機のインバータ制御

2.1 誘導電動機の車両制御への適用

車両駆動用には、トルク制御が行ないやすいことから、従来から直流電動機が一般に使用されてきた。しかし、パワーエレクトロニクス技術の進歩により、誘導電動機のトルクを直流電動機と同様に制御することが可能となり、かご形誘導電動機の車両への適用が試みられるようになった。

誘導電動機駆動方式の利点としては、

- (1) ブラシや整流子がないので、保守が簡単であること。
- (2) 電動機の構造が簡単で丈夫なことから、回転速度を高くとることが可能となり、小形・軽量化できること。
- (3) 定速特性をもっているため、空転又は滑走を小さな値に抑える制御が容易であり、高い粘着性能が得られることである。

これらの利点は、省力化、省エネルギー化につながるものであり、その実用化が期待されている。図1に昭和55年11月

に完成した誘導電動機駆動方式試験電車の外観を示す。

2.2 トルク制御

誘導電動機のトルクは、空隙磁束と回転子に流れる電流によって発生する。トルクを制御するには、磁束及び回転子電流を制御すればよい。これらを制御することにより、電動機停動トルクの範囲内で任意のトルク特性が得られる。

図2に、直流直巻電動機で駆動される車両と同様な加速特性を得る制御パターン例を示す。定トルク領域では、滑り周波数を一定に保ちながら定電流制御する。この間、電圧/周波数、すなわち磁束はほぼ一定に保たれており、直流電動機での全界磁領域に相当する定トルク加速特性となる。インバータの出力電圧が最大値に達すると、滑り周波数を増してゆき定電流制御を続ける。この領域は定出力領域であり、直流電動機の弱め界磁制御に相当する。滑り周波数が停動トルクで制限される限界に近づくと、それ以後は滑り周波数を固定して周波数だけを上昇させる。この領域では速度が増すに従い、磁束及び電流が共に減少し、直巻特性となる。

滑り周波数を負とすれば、回転子電流の位相が反転してブレーキトルクが生ずる。すなわち、回生ブレーキ制御が可能

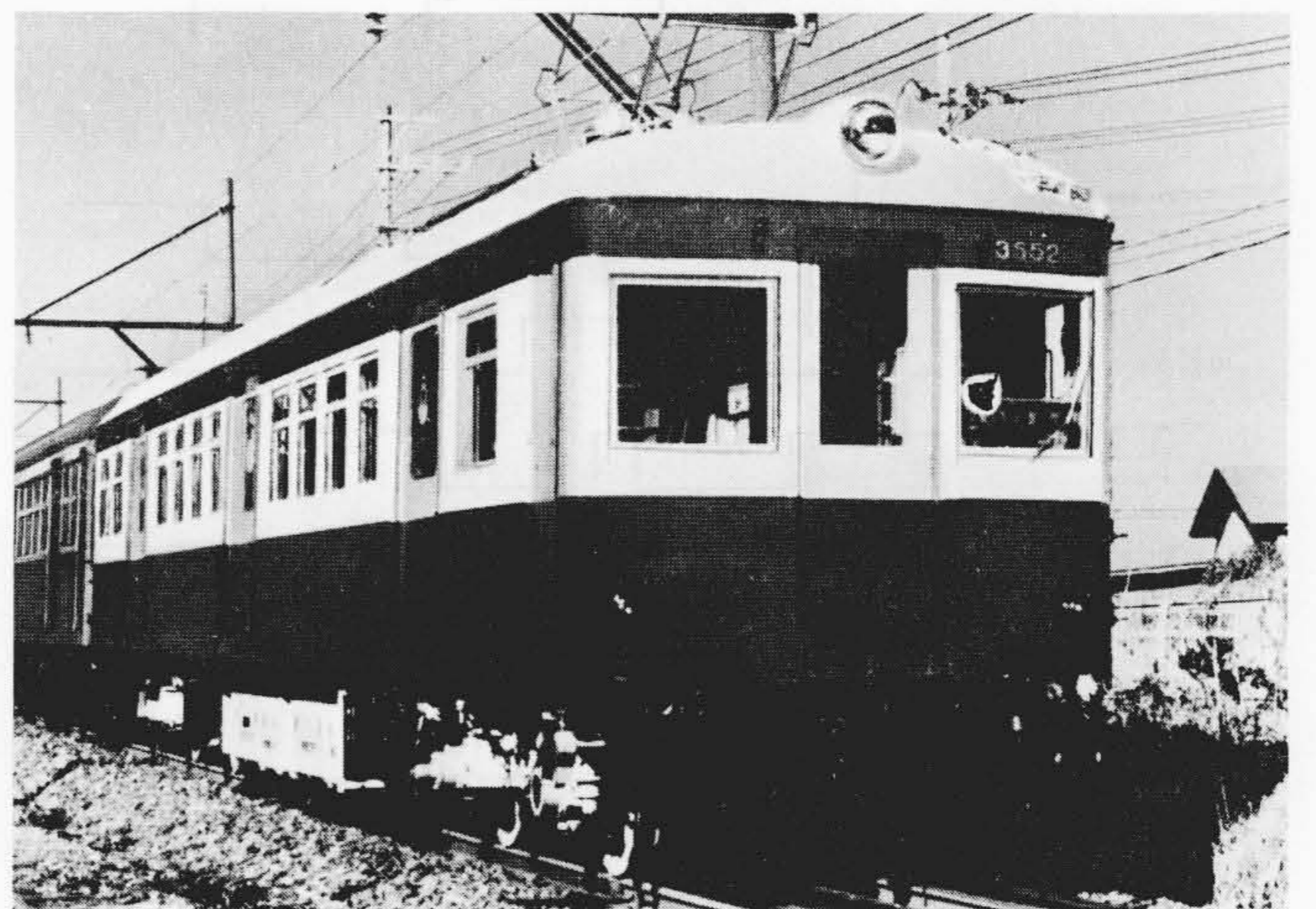


図1 誘導電動機駆動方式試験電車 工場構内試験線で走行させ、粘着性能、空転時の駆動系動荷重、誘導障害などに関する実験研究を行なった。

※) AVAF (Adjustable Voltage and Adjustable Frequency) と呼ばれる。

* 日立製作所水戸工場 ** 日立製作所日立研究所 *** 日立製作所機電事業本部

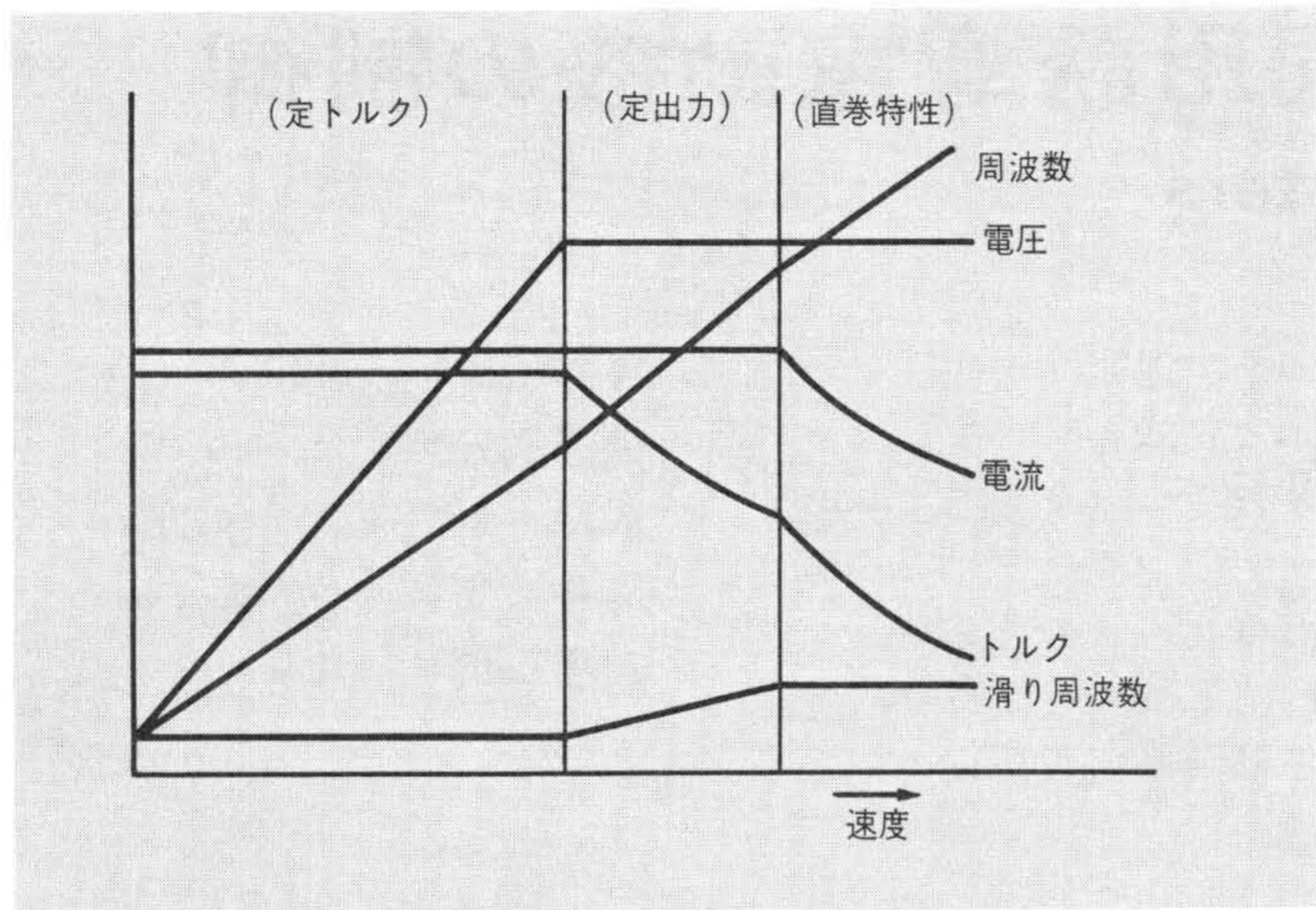


図2 制御パターン 誘導電動機の電圧と周波数を制御することにより、直流直巻電動機駆動の従来車両と同様な速度-トルク特性が得られる。

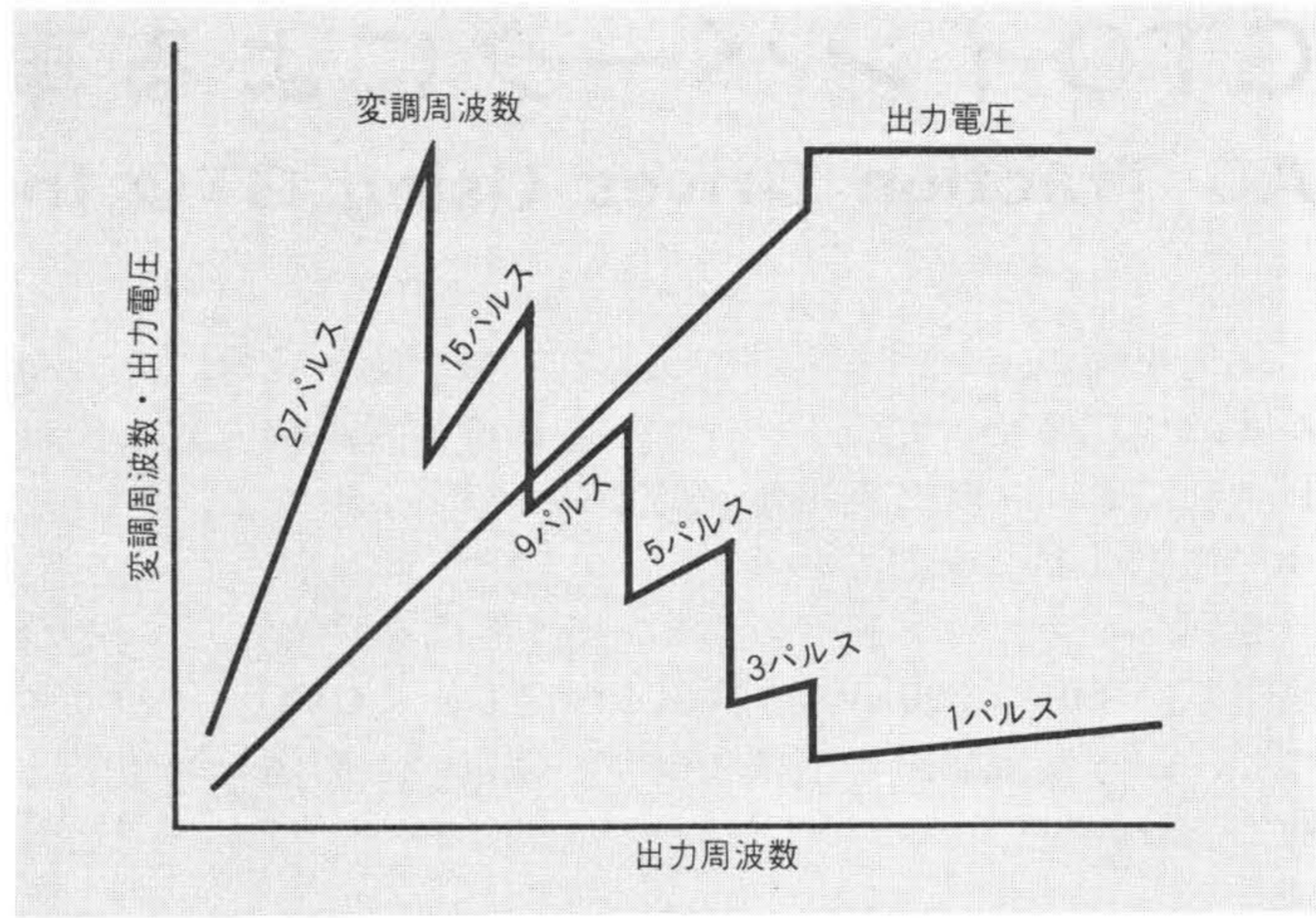


図4 パルスモードの切換 電流リップルが過大とならないように、出力周波数に応じてPWMパルス数を切り換える。

である。回生ブレーキの制御は、高速から低速へ向かって力行制御の逆をたどってゆく制御となる。

2.3 電圧、周波数制御

前述したように、誘導電動機を車両用主電動機に適用するには、電圧及び周波数を広範囲に制御する必要がある。このためのインバータ方式として種々のものがあるが、直流架線の電気車を前提とした場合、次に述べる理由により電圧形PWM(Pulse Width Modulation: パルス幅変調)制御方式が適すと考えられる。

(1) インバータ自身で電圧制御と周波数制御が可能であり、

構成や力行・回生切換制御も簡単である。

(2) 電流平滑リアクトルが不要であり効率が良い。

(3) PWM制御の変調周波数を十分高くすることにより、トルクリプルを十分小さくできる。

図3は、PWMインバータの原理的動作説明図である。同図からインバータは三相出力端子U、V、Wを直流入力端子P又はNに切り換える3組みのスイッチと考えることができる。この3組みのスイッチを(a)~(c)のように切り換えると、出力端には(d)~(f)のような方形波パルス列の交流電圧が得られる。

実際の制御では、電流リップル量が過大とならないように、図4に示すようにインバータ周波数に対して変調周波数を段階的に切り換える。円滑なトルク制御を行なうために、パルスモード切換時にインバータ出力電圧基本波の大きさ、及び位相の連続性を保つ必要がある。通流率制御が可能な多パルスモード間の切換時には、通流率制御により電圧の連続性を保つことができる。しかし、1パルスモードでは電圧制御ができないので、3パルスモードとの切換時に電圧の跳躍が生ずる。跳躍量を小さくするには、オン時間、オフ時間の最小値が小さくできるインバータ方式が望ましい。

3 GTOサイリスタの適用

GTOサイリスタは、ゲート電流によって主回路電流をオン・オフ制御できるスイッチング素子である。

図5に、逆導通サイリスタを用いた従来形とGTOサイリスタを用いたインバータの基本アーム構成を示す。GTOサイリスタは自己消弧機能をもつので、転流コンデンサ及び転流用補助サイリスタが不要である。このため、次のようなメリットがある。

(1) オン時間、オフ時間の最小値が短縮できるので、パルスモード切換が円滑にできる。更に、制御周波数を高めることも可能となり、インバータの制御性能が向上する。

(2) 電流のカットオフ性能が電源電圧の影響を受けない。この特性は、電車線電圧が大幅に変動する電気車両用として好適である。すなわち、従来の転流回路付インバータのように、電源電圧変動を考慮して、あらかじめ転流能力に余裕をもたせた設計を行なう必要がない。

(3) 誘導障害の主因となる転流電流が存在しないので、信号系への直達ノイズが小さい。

(4) 転流損失がなくなり、代わりにゲート損失、スイッチン

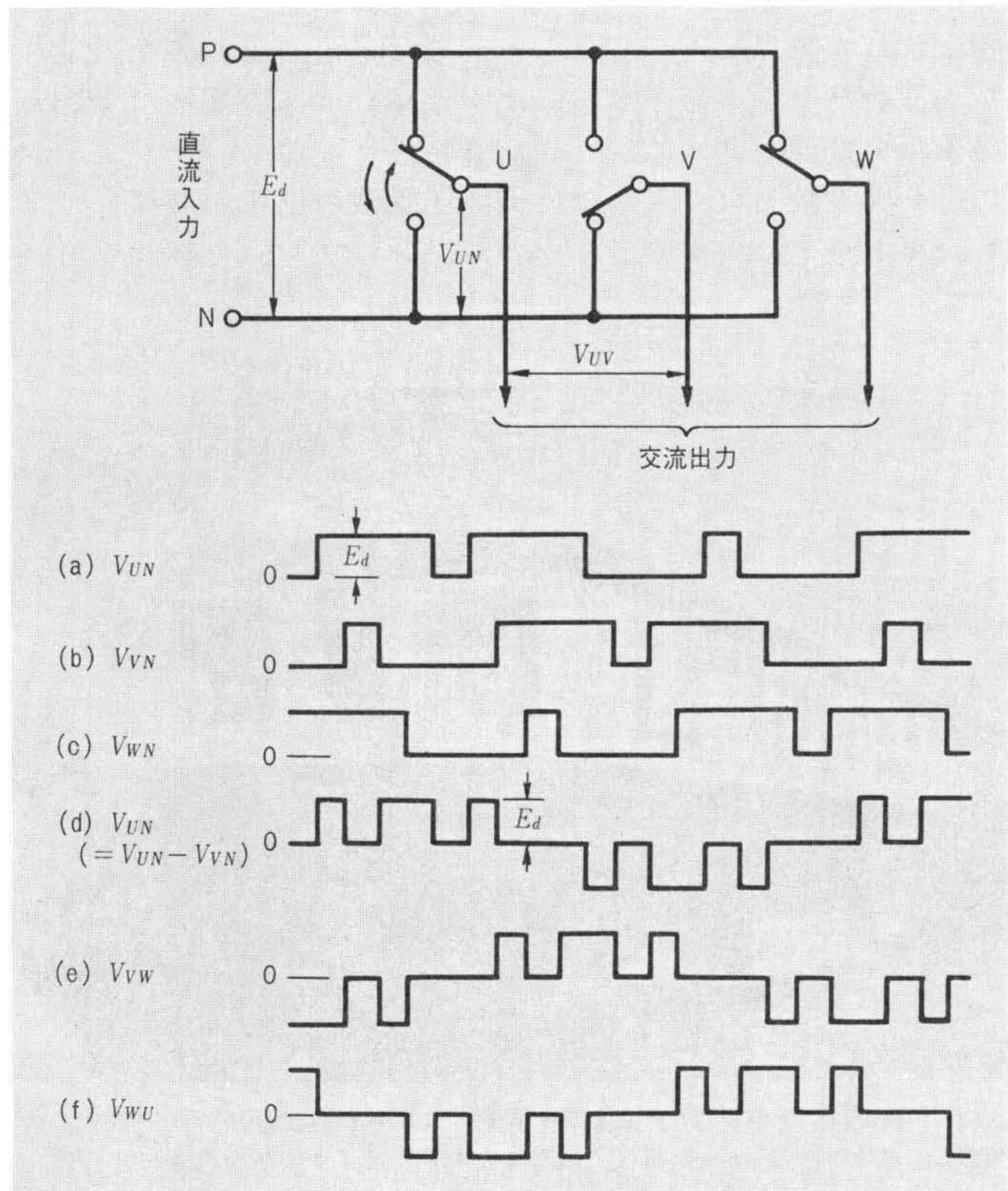


図3 PWMインバータの動作原理 各相スイッチの切換時間を制御するパルス幅変調制御により、交流出力電圧基本波の大きさ及び周波数を任意に制御できる。

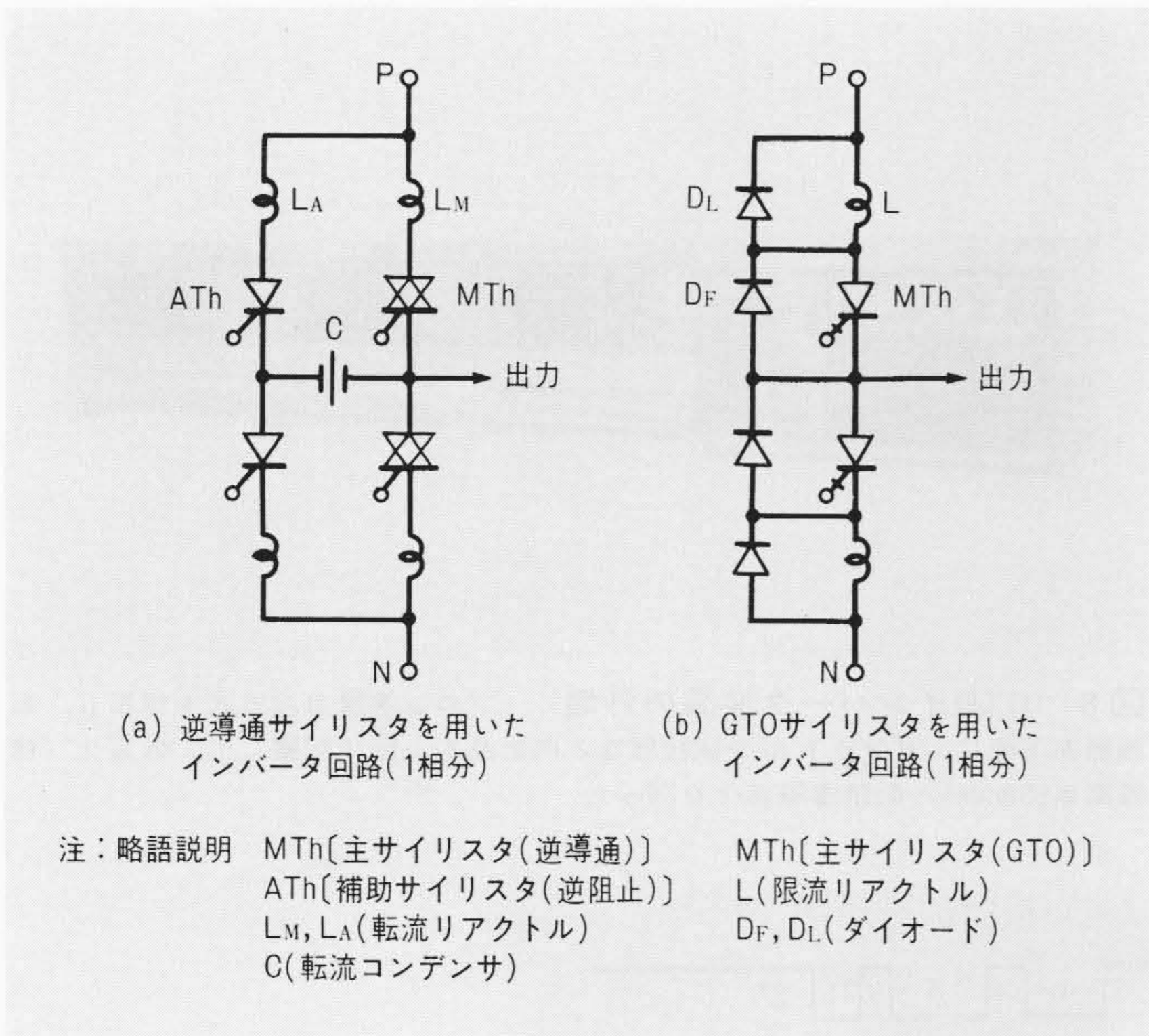


図5 インバータのアーム構成 GTOサイリスタを適用すると、転流コンデンサ及び転流補助サイリスタが省略できる。

グ損失が増加するが、全体的に損失が減少し変換効率が向上する。

(5) 主回路構成が単純となり、GTOサイリスタの大容量化とあいまって、装置の小形・軽量化が期待できる。

4 インバータ装置の概要

以上述べたように、GTOサイリスタをインバータの制御素子に適用すると、多くのメリットが期待できる。新都市交通システムなどの小形・低床車両への適用を考慮して、機器高さを550mmと低くした制御装置を開発した。主な仕様は次に示すとおりである。

- (1) 電車線電圧………DC 750V
- (2) 制御容量………160kW誘導電動機 2 台
- (3) インバータ出力………最大 600kVA, 0~550V, 三相,

3~125Hz

図6に主回路つなぎを示す。制御装置は、インバータ装置、断流器箱、フィルタコンデンサ箱及びフィルタリアクトルから構成されており、長さ12m程度の低床車両の床下に装備可能な設計としてある。

4.1 GTOサイリスタ

本装置には2,500V, 1,000A GTOサイリスタを2個並列6アーム構成として用いている。素子の主な電気的特性を表1に、外観を図7に示す。この素子は、重金属ドーピング工程を廃止したアノード・エミッタ短絡構造を採用しているので、金ドーピング形のものに比べて、オン電圧が低くできるという特長をもっている。

4.2 インバータ装置

図8にインバータ装置の外観を示す。装置設計上、次のような点に特に意を払った。

- (1) 半導体素子冷却用フロン凝縮器は、低床化及び低誘導障害配置を可能とするため、扁平形状とし装置下面に配置した。リアクトルなど周辺に磁界を発生する部品は、装置上面に配置し軌道面から遠ざけた。
- (2) GTOサイリスタのスパイク電圧を抑制するため、GTO

表1 2,500V, 1,000A GTOサイリスタ(GFPI000B25)の電気的特性 金ドーピング工程を廃止したアノード・エミッタ短絡構造の採用により、オン電圧の低減を図っている。

項目	記号	性能
ピーク繰返しオフ電圧	V_{DRXM}	2,500V
繰返し可制御電流	I_{TCM}	1,000A
非繰返しサージ電流	I_{TSM}	7,000A
ピークオン電圧	V_{TM}	TYP1.8V
ゲートトリガ電流	I_{GT}	TYP600mA
ターンオン時間	t_{gt}	10 μ s
ターンオフ時間	t_{gq}	25 μ s
最大動作接合温度	T_j	125 $^{\circ}$ C

注：略語説明 TYP (Typical Value)

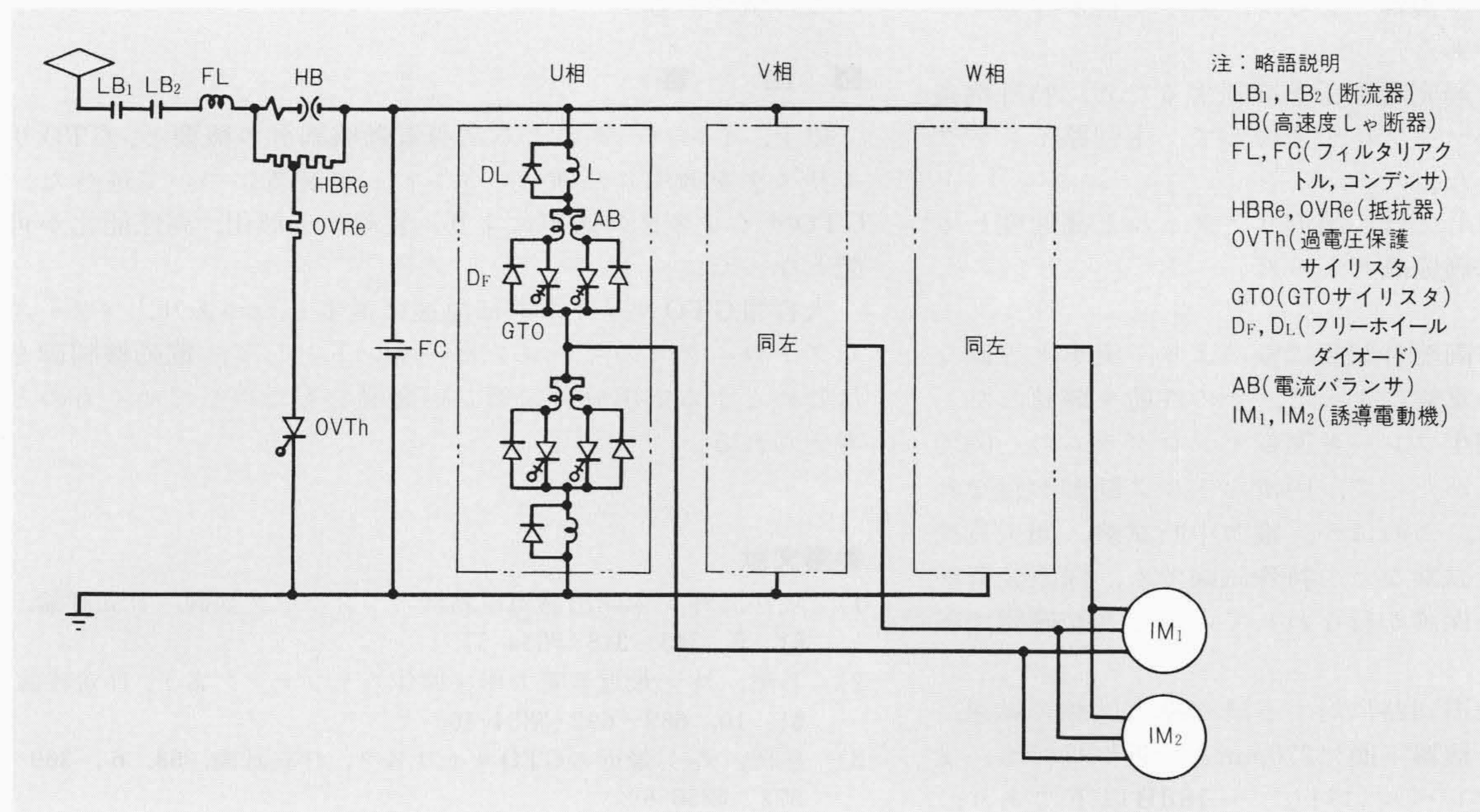


図6 主回路つなぎ GTOサイリスタ素子を2個並列6アーム構成としている。

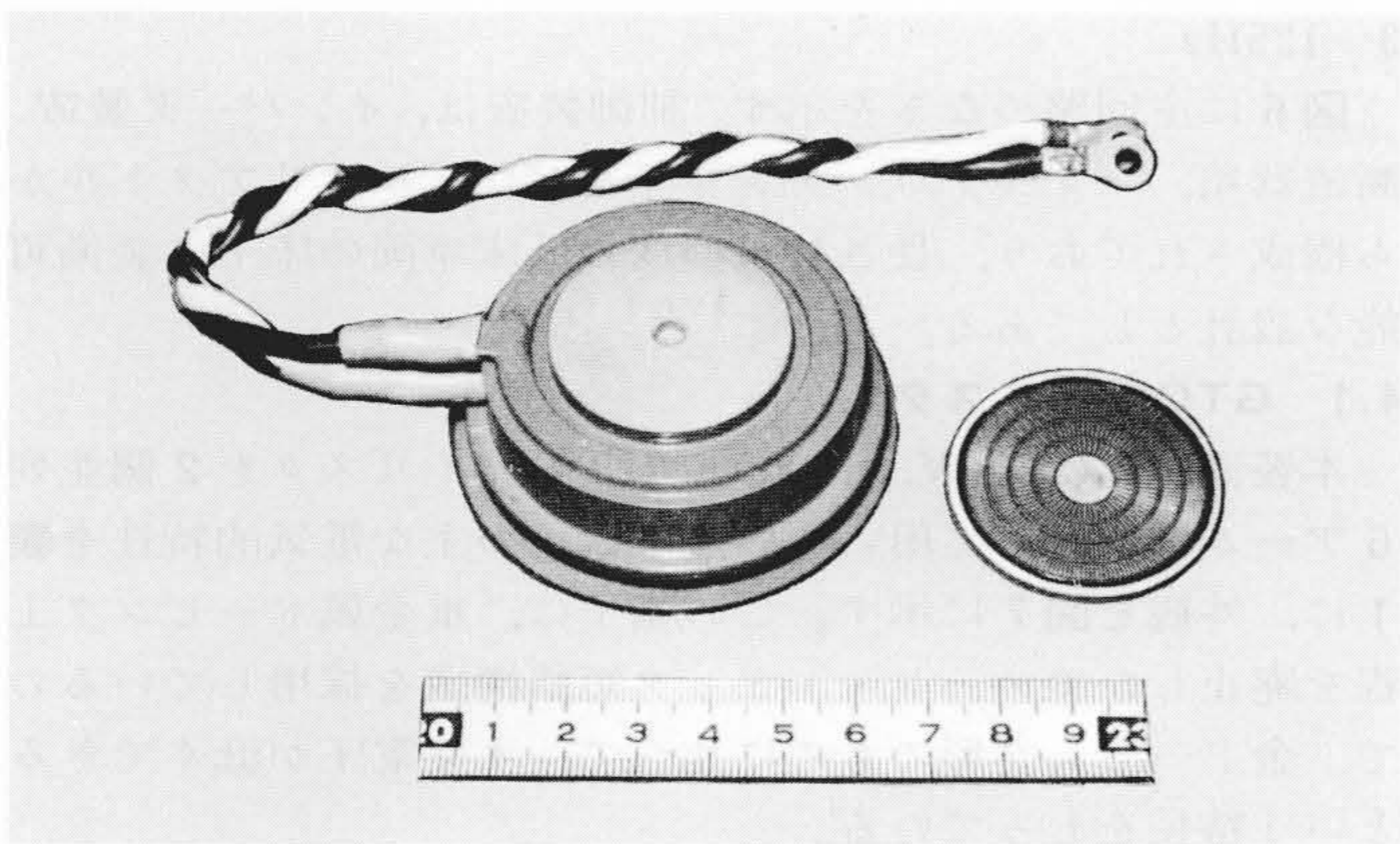


図7 2,500V, 1,000A GTOサイリスタの外観 ジャンクションは、両面冷却のパッケージに収納されている。

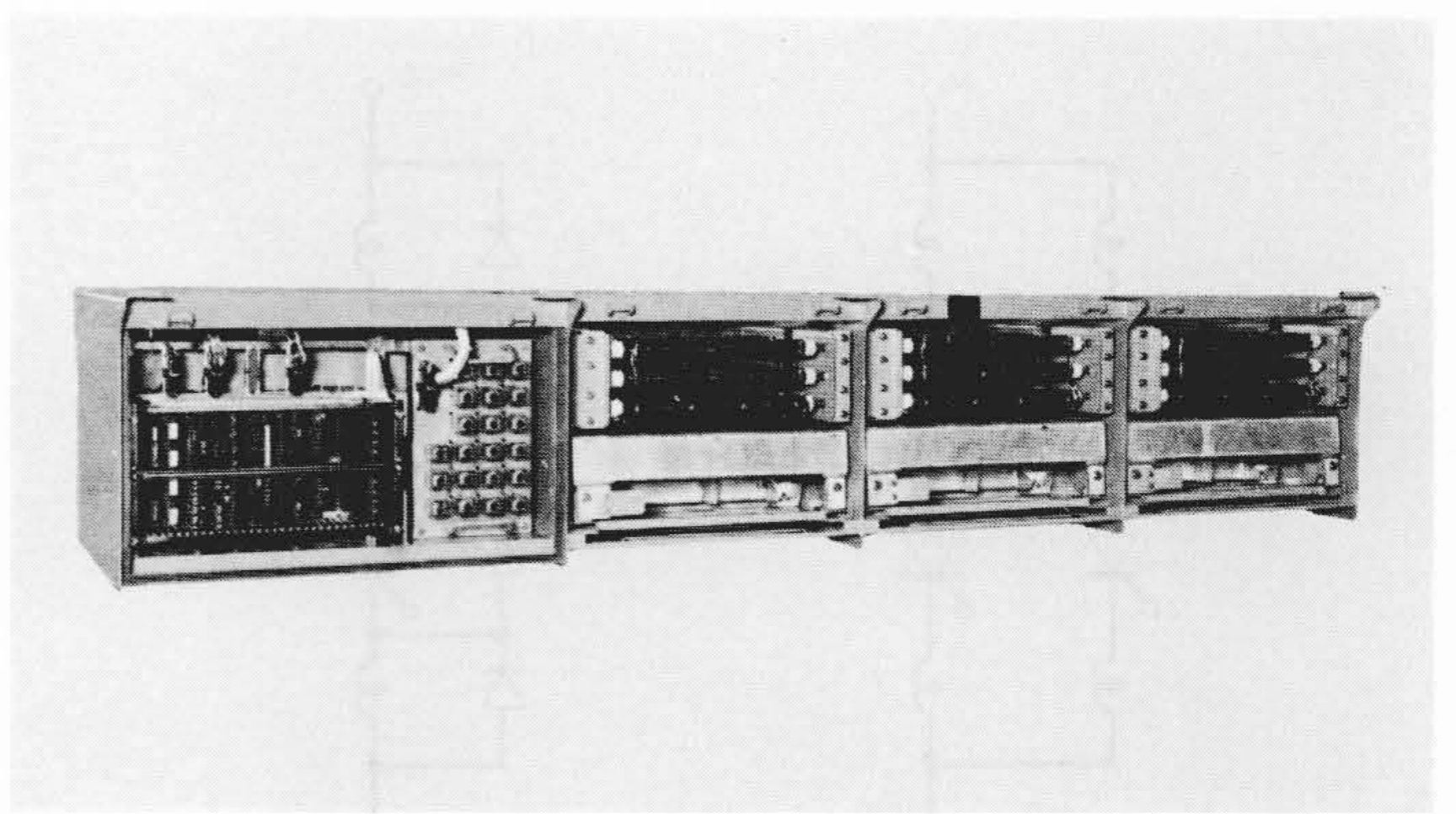


図8 GTOインバータ装置の外観 フロン沸騰自冷方式を採用し、凝縮器を下面に、リアクトルや抵抗器などの部品を上面に配置して、低床化（機器高さ550mm）と低誘導障害化を図った。

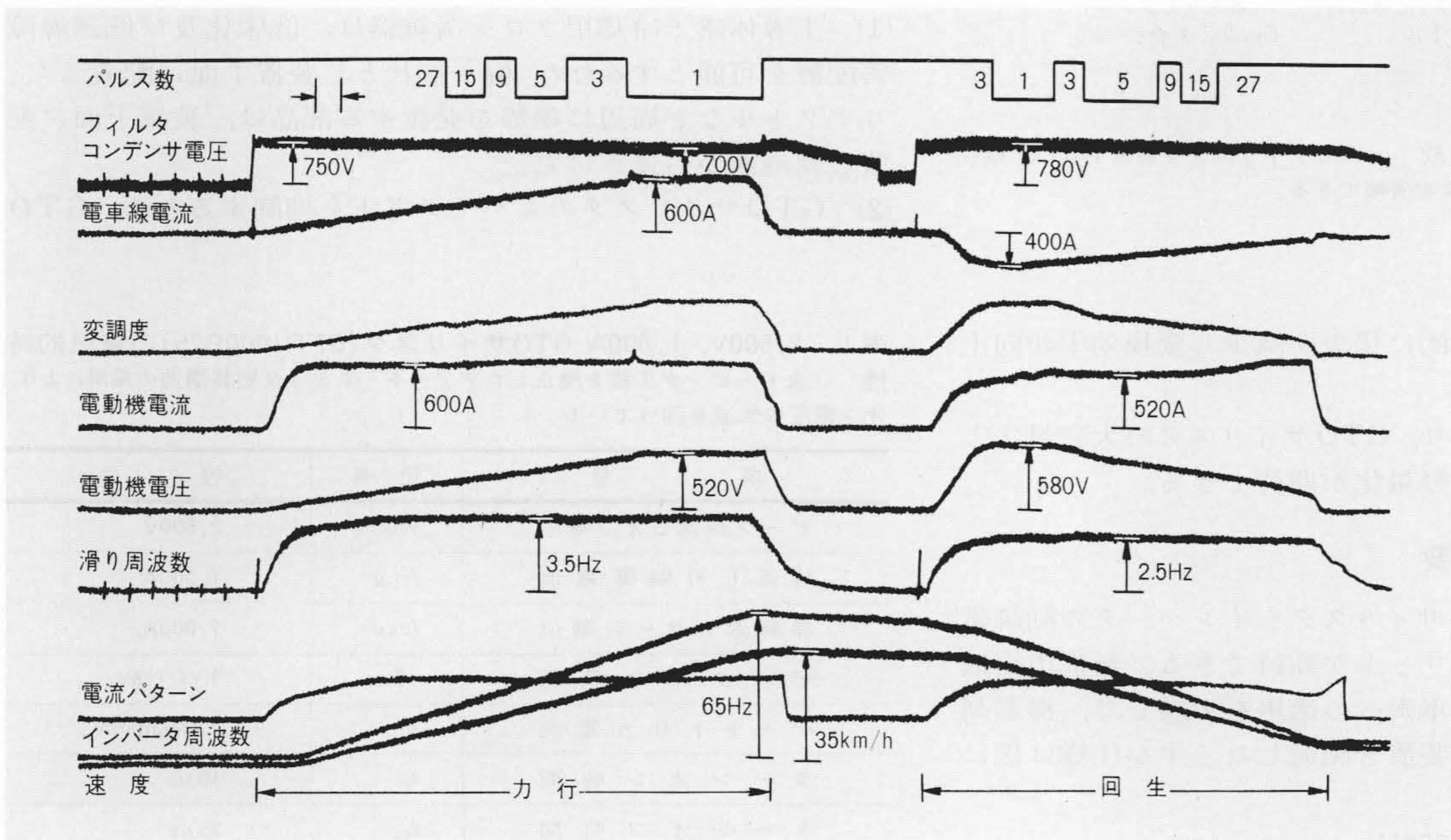


図9 加減速試験オシログラム 力行、回生全域にわたって円滑な制御が行なわれている。

サイリスタとスナバ回路部品との間の配線長さが短くできる素子外置形フロン冷却方式を採用した。この方式は、素子内蔵形に比べて構造的にやや複雑となるが、素子交換が容易で、軽量というメリットがある。

(3) スナバコンデンサ過充電電圧を抑制するため、特殊構造の電流バランス、共心ケーブルを使用して、主回路インダクタンスを極力小さくした。

(4) 素子短絡故障に対しては、限流リアクトルと高速度しゃ断器で素子耐量との保護協調をとった。

4.3 試験結果

インバータ装置は車両総合試験設備により、実車と等価な状態において、各種の試験によって、その性能を確認した。

図9は、力行及び回生ブレーキ運転オシログラムの一例である。同図から全域にわたって、円滑なトルク制御が行なわれていることが分かる。このほか、電力中断試験、回生負荷喪失試験、無負荷回生試験などの特殊試験でも、保護装置が確実に作動し、過電圧保護が行なわれていることが確認できた。

AF（可聴周波数）軌道回路に対する誘導障害試験の結果、受信用ループコイルを機器下面に270mmまで近づけても、受信器ノイズ電圧は動作レベルに対して-18dB以下であり、

十分低いことが確認できた。これらのノイズレベルは、既に実用されているチョップ制御装置と同等であり、実用上問題のない値である。

5 結 言

以上、インバータによる誘導電動機制御の概要と、GTOサイリスタを適用した新しいインバータ装置について述べた。GTOサイリスタの適用により、装置の小形化、高性能化が可能となった。

大容量GTOサイリスタは急速に進歩しつつあり、パワーエレクトロニクスのキーコンポーネントとして、電動機制御をはじめとする応用分野に新しい発展をもたらしてゆくものと考えられる。

参考文献

- 1) 坪井，外：車両用誘導電動機のインバータ制御，日立評論，61，5，343～348（昭54-5）
- 2) 八尾，外：最近の電力用半導体スイッチング素子，日立評論，61，10，689～692（昭54-10）
- 3) 桜田，外：最近のGTOサイリスタ，日立評論，63，6，369～372（昭56-6）