

鉄道車両へのパワーエレクトロニクスの応用

Application of Power Electronics to Rolling Stock

鉄道車両へのパワーエレクトロニクスの応用は、昭和30年代後半からの電力用サイリスタ及びダイオードの進展とともに始まった。チョップパの分野では、次々とサイリスタの高耐圧・大容量化を図るとともに、フロン沸騰冷却方式を実用化してきた。更に最近では急速に発展した電力用GTOサイリスタがチョップパ及び誘導電動機制御用VVVFインバータなどのキーコンポーネントとして広く適用されるようになり、装置のいっそうの小形化・高性能化が可能となった。

本論文では、最近のパワーエレクトロニクスデバイスの開発状況及びこれらの応用製品の紹介並びに今後の動向について述べる。

安波政弘* Masahiro Yasunami
 中村 清** Kiyoshi Nakamura
 阪上 正*** Tadashi Sakaue
 田村 薫*** Kaoru Tamura

1 緒 言

電力用の高耐圧・大容量のサイリスタ及びダイオードの発展には目覚ましいものがある。昭和30年代の半ばにはまだ大電力を制御できるほどの大容量のものはなかったが、昭和30年代の後半から交流車両への適用が始まり、引き続き昭和40年代の初めには、直流車両のチョップパ制御に実用化された。この間、日立製作所は絶えず新しい大容量サイリスタを開発し、顧客のニーズに対応し車両の省力化、省エネルギー化に貢献してきた。

更に、ここ数年前から自己消弧形機能をもつ電力用半導体素子GTO(Gate Turn Off)サイリスタの目覚ましい開発とあいまって、これらの素子を適用したチョップパ装置や誘導電動機を制御するVVVF(Variable Voltage Variable Frequency)インバータ装置などが開発され実用化が進んでいる。

ここでは、直流車両への応用を主体に、主としてチョップパ・VVVFインバータ用GTOサイリスタの開発経過とこれらの実用化されている製品の現状、及び交流車両への応用も合わせて述べる。

2 電気車両のパワーエレクトロニクス化の発展

2.1 直流車両のパワーエレクトロニクス化の発展

図1に示すように、直流車両の動力方式は、メンテナンスフリー及び省エネルギー化のニーズにこたえて、パワーエレクトロニクスの進歩を背景として、発展してきた。

すなわち、昭和40年代に従来からの抵抗カム軸制御方式に電力回生ブレーキの機能を付加した界磁チョップパ制御方式が実用化され、比較的駅間距離の長い近郊電車に使用されてきた。一方、駅間距離が短く頻繁に起動・停止を行なう地下鉄電車には、抵抗カム軸制御部分をサイリスタチョップパに置き換えて、力行時の無接点制御と停止直前まで有効に電力回生ブレーキをかける電機子チョップパが実用化され、メンテナンスフリー、省エネルギー化の効果を挙げてきた。

デバイスとしては、界磁チョップパには逆阻止サイリスタが、電機子チョップパには、高速逆導通サイリスタが使われ、素子の高耐圧、大電流化、冷却方式の進歩とあいまって装置の小形・軽量化が進んだ。

昭和50年代に入ると、主電動機を直流電動機から誘導電動機に替え、ブラシレス化によるいっそうのメンテナンスフリ

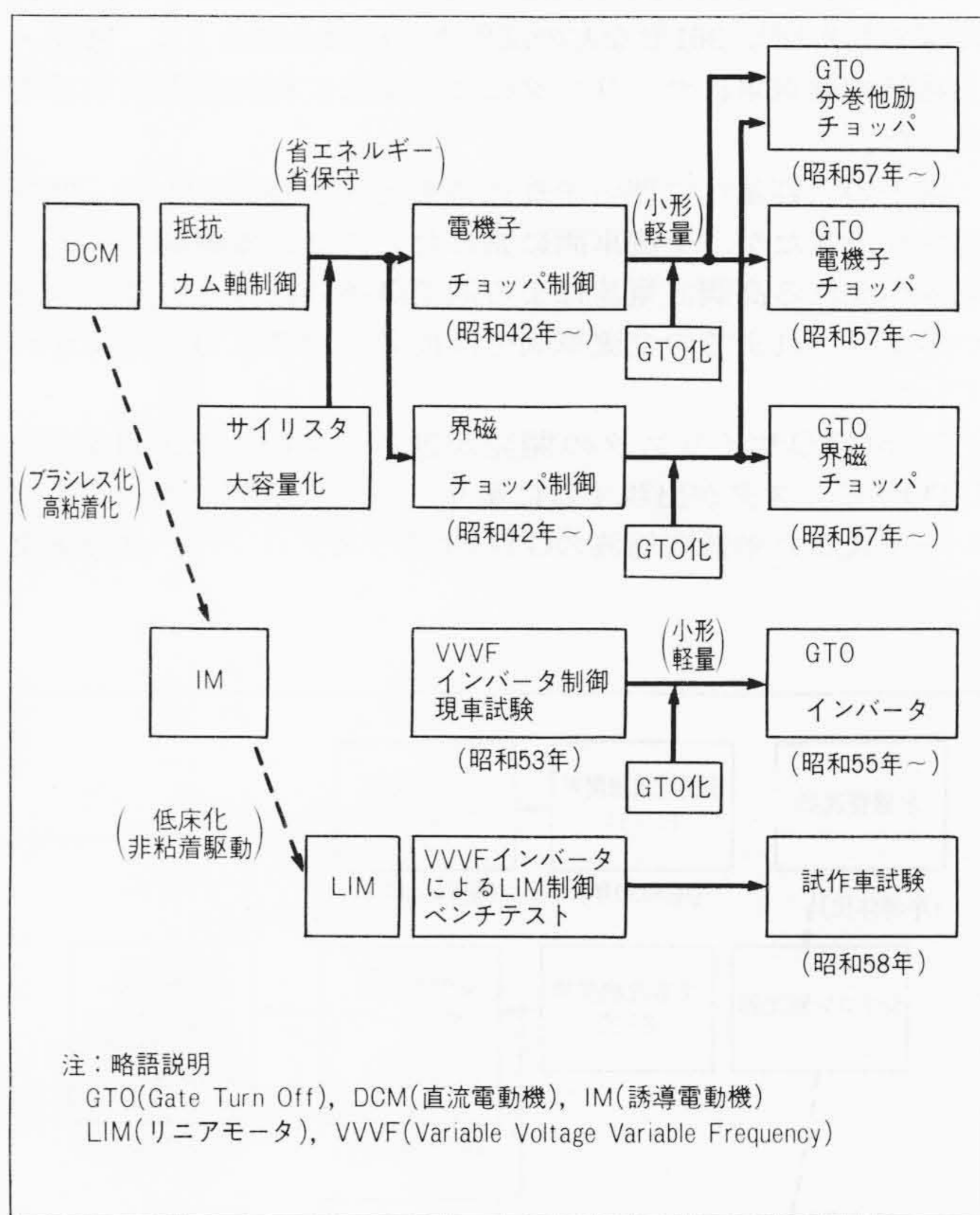


図1 直流車両動力方式の発展 直流車両の制御方式は省エネ、省保守のニーズに沿いつつ抵抗カム軸制御→チョップパ制御→インバータ制御へと発展している。

ーを追求すべく誘導電動機のVVVFインバータ制御のニーズが高まり、実機による現車試験¹⁾などの開発が盛んになった。

インバータ制御は、チョップパ制御に比べて電源系の遮断器を除いてほぼ完全な無接点化が可能であるが、反面使用するパワーデバイスの数が増加する。この問題を解決するため、自己消弧機能をもつGTOサイリスタの大容量化が進められVVVFインバータ方式の実用化時代に入った。

GTOサイリスタは、界磁チョップパ及び電機子チョップパにも

* 日立製作所水戸工場 ** 日立製作所日立研究所 *** 日立製作所日立工場

適用され、装置が小形・高性能化されてきた。

GTOサイリスタによって確立されたインバータ、小形・軽量化技術は、将来の動力方式として注目されるリニアモータ式小断面地下鉄電車の試作車^{2),3)}にも適用され、この方式の実現性を高めることにも大きく貢献した。

2.2 交流車両のパワーエレクトロニクスの発展

商用周波交流電化の幕あけは、昭和30年の水銀整流器式機関車の登場であるが、保守費のかかることからシリコン整流器の実用化が望まれ、シリコン整流器の急速な発展とともに徐々にシリコン整流器が使用され、交流車両のパワーエレクトロニクス化が始まった(図2)。

シリコン整流器は昭和35年の401系形交直流電車から始まり、昭和39年の東海道新幹線の開業により全盛期を迎えた。

昭和40年になると1,000V、250Aのサイリスタを使用した連続位相制御による711系電車をはじめED93形交流機関車、更に昭和41年には我が国初の回生ブレーキ式ED94が登場し、サイリスタによる交流車両の技術は完全に確立された。一方、新幹線でも951形、961形などの試作車の経験を踏まえて、東北・上越新幹線電車にサイリスタによる連続位相制御方式が採用された。

素子の大容量化に伴い冷却技術も進み、装置は小形・軽量化されてきたが、交流車両に常に付いてまわる課題として、架線へ流れる高調波電流による通信障害の低減と力率の改善があり、これまでの交流車両では前者の対策に力点が置かれていた。

近年GTOサイリスタの開発が進み4,500V、2,000A級のGTOサイリスタが出現するに至り、パルス制御による回生ブレーキ式高力率低高周波のGTOサイリスタコンバータの実現

が可能となり次期交流車両のコンバータとして注目されている。

2.3 車両用パワーデバイスの発展

昭和40年代前半に、逆阻止形サイリスタが車両用チョップ装置に使用されたのを契機に、装置側の需要とあいまった半導体パワーデバイスの大容量化と付加機能の拡大が行なわれた。

図3に車両用サイリスタ素子の開発経緯を示す。逆阻止形サイリスタの車両用途のものは、昭和52年までに大容量化が進み、交流受電装置に応用されている。直流受電のチョップ装置にはダイオードを逆並列に内蔵し、高速化が可能な逆導通サイリスタが開発された。

逆導通サイリスタは、チョップ装置の容量とチョップ周波数に応じて、増幅ゲート方式によるターンオン性能の向上及びサイリスタ部とダイオード部の隔離構造による転流ターンオフ性能の向上など、新技術を適用して現在に至っている。

一方、チョップ装置の高周波化とVVVFインバータ装置の開発に対して、ゲートを正・負にバイアスさせて電流をオン・オフできるGTOサイリスタが着目された。自己消弧機能をもつGTOサイリスタを使用すると、従来の強制転流回路を削減できるので、車両装置に必要な小形・軽量化を実現できる。車両用GTOサイリスタは、サイリスタで確立した高耐圧・大電流化技術と半導体ホトリソグラフィ技術の進展を併せて、急速に大容量化された。電圧は架線電圧750V系と1,500V系電車用にそれぞれ素子耐圧2,500Vと4,500V、また可制御電流は2,000AまでのGTOサイリスタが開発され、チョップやVVVFインバータに適用され実用化に入った。

図4に耐圧4,500V、可制御電流2,000AのGTOサイリスタの外観を示す。

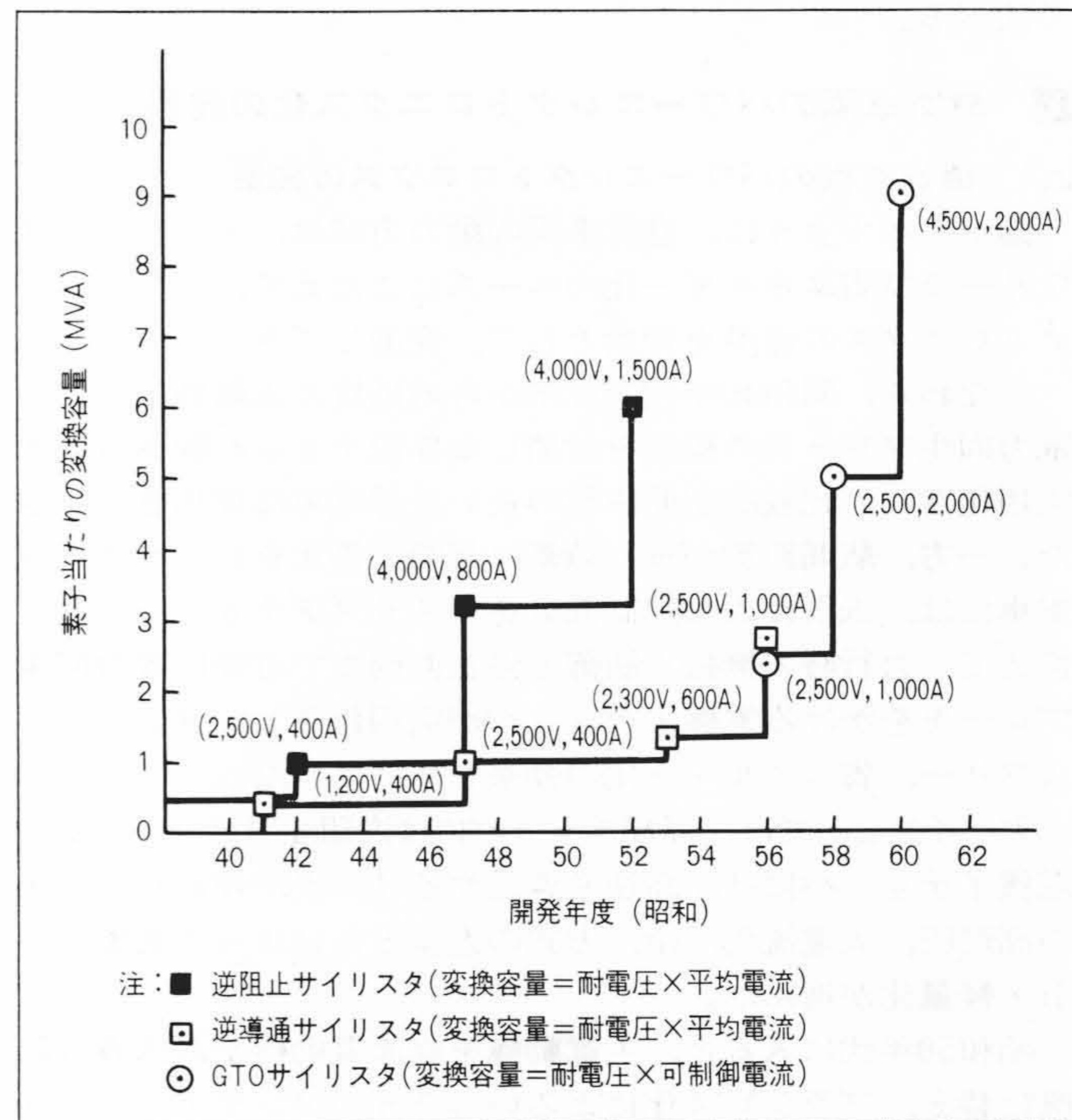
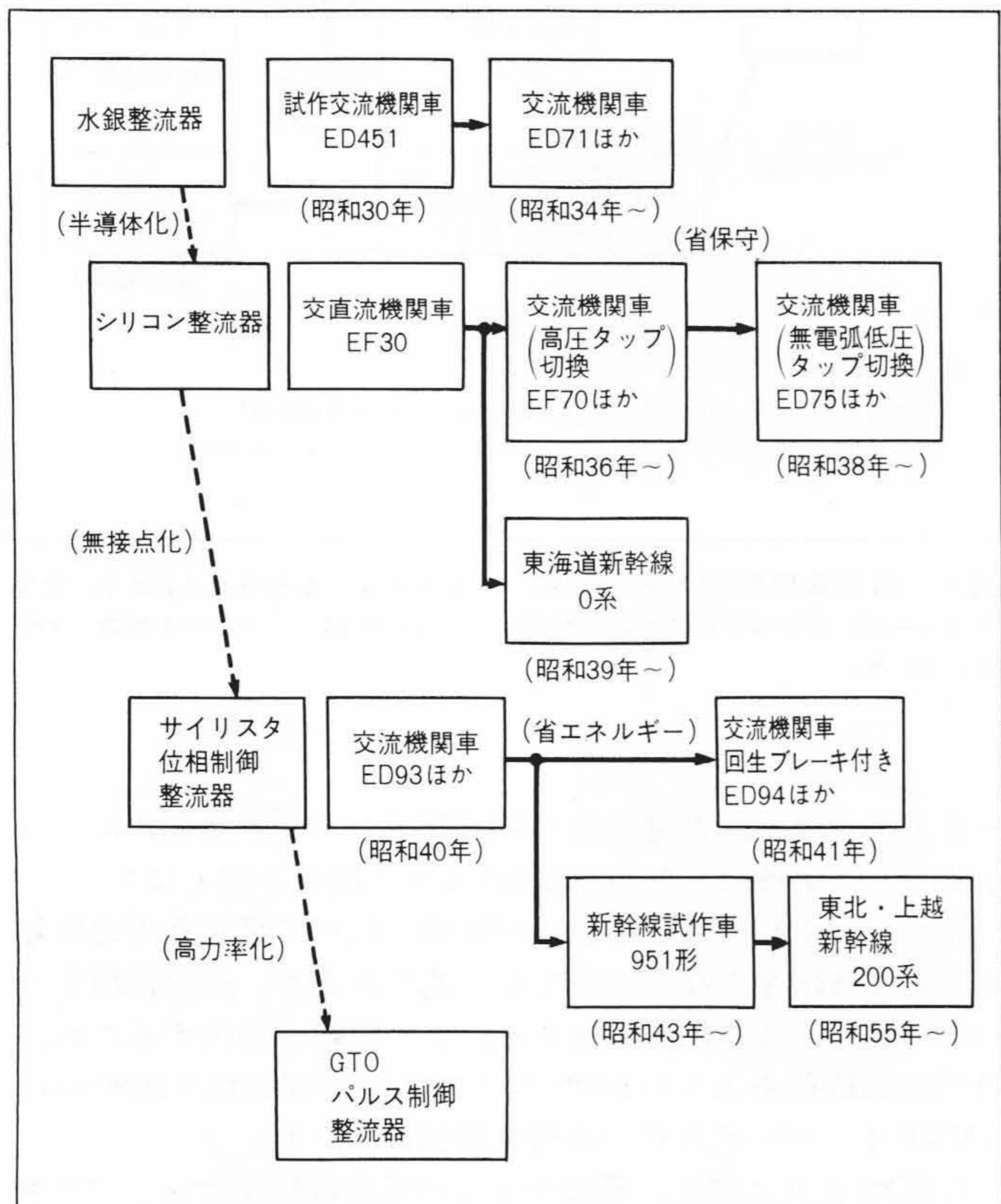


図2 交流車両動力方式の発展 交流車両の制御方式は、現在サイリスタ位相制御が主流であるが、高力率化のためGTOパルス制御が開発されつつある。

図3 車両用サイリスタ素子の開発経緯 交流車両位相制御用に逆阻止サイリスタが、またチョップ及びインバータ用に逆導通形高速サイリスタ及びGTOサイリスタが用いられている。

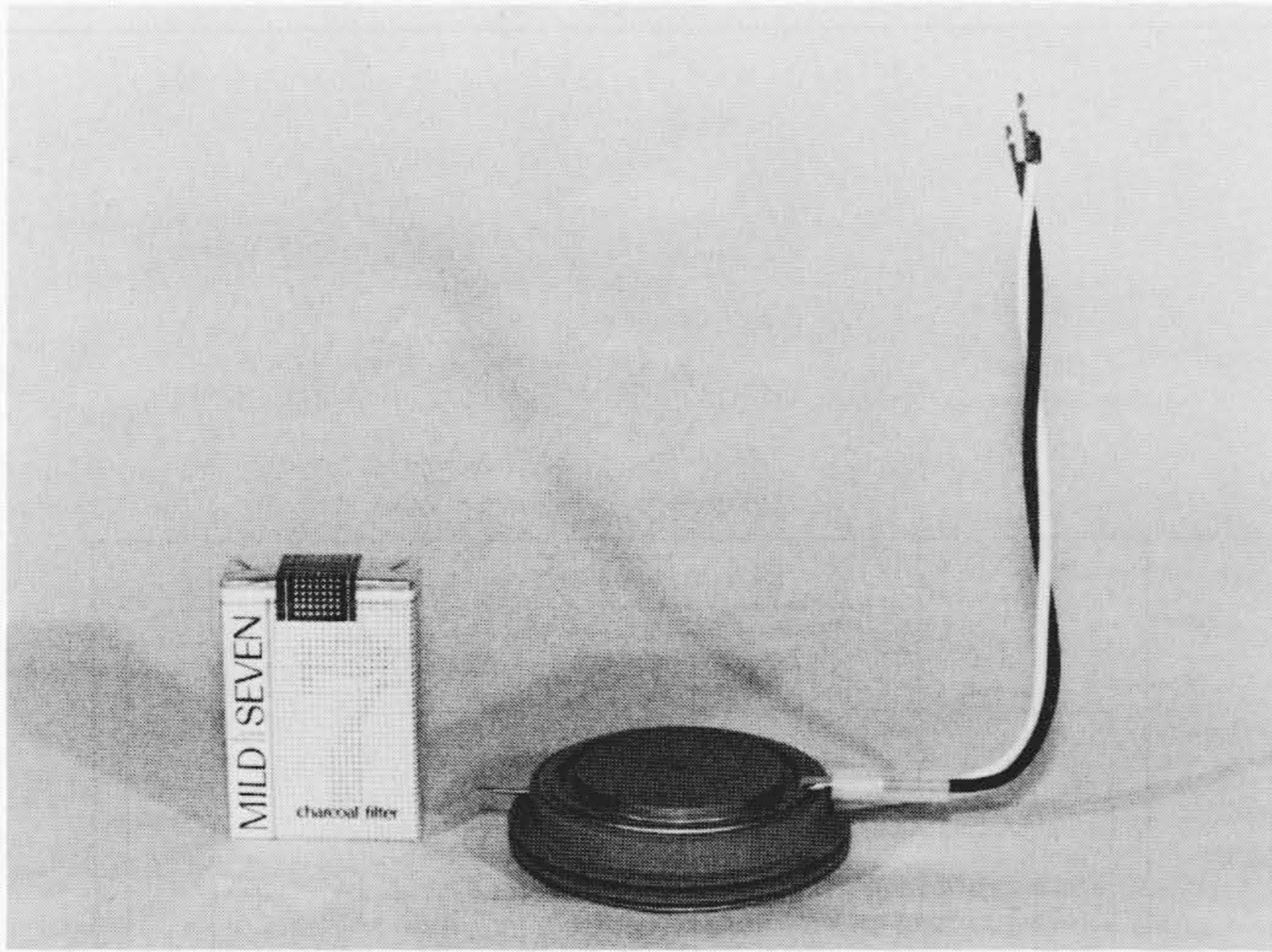


図4 4,500V, 2,000A GTOサイリスタの外観 4,500V, 2,000AのGTOサイリスタの外観を示す。

3 最近のパワーエレクトロニクス応用

大容量パワーエレクトロニクスの開発は前記したように目覚ましいものがあり、最近では大容量GTOサイリスタの開発により、電気車両用制御装置へ広く適用されている。

ここに、これらの大容量GTOサイリスタを適用した装置の現状を紹介する。

3.1 チョップ装置への適用

チョップ装置には複巻電動機他励界磁を制御する界磁チョップや直巻電動機を制御する電機子チョップ及び分巻電動機の電機子並びに他励界磁を同時制御する分巻他励制御チョップなどがある。これらのチョップ装置は、チョップ部を従来のサイリスタか新しく開発されたGTOサイリスタに置き換え、小形・軽量化高効率・高性能化された新しいチョップに生まれ変わりつつある。

GTOサイリスタは従来のサイリスタに比べて高速スイッチング特性に優れているので、チョップ周波数を従来の約3～4倍に高めた高周波チョップが実現できる。この高周波特性を生かすことにより、主回路のリアクトル又はコンデンサを小さくすることが可能となる。更にGTOサイリスタは、従来のサイリスタには必要な強制転流回路が不要となることで、装置の小形・軽量・高効率を図られる。GTOサイリスタの大容量化により、これらの多くの利点をもったチョップ装置が容易に実現できるようになった。

3.1.1 界磁チョップ装置

昭和45年に逆阻止形サイリスタを用いた界磁チョップ装置を開発して以来、この装置を大量に納入し実績を挙げたが、顧客からの小形・軽量化の要求にこたえて、前記のGTOサイリスタ2,500V, 1,000Aを直列接続したDC1,500V回路用装置を新たに開発した。

図5に界磁チョップ車の主回路図⁴⁾を示す。一般に制御する主電動機は130～160kW級複巻電動機4台又は8台で、それぞれ直並列切換えしている。

電機子電流は、電機子回路に接続された起動抵抗をカム軸制御器により順次短絡することにより制御され、他励界磁電流はGTOサイリスタによるチョップで制御される。

これらのGTOサイリスタの採用により、従来の装置に比べて、体積・重量ともに75%に小形・軽量化が図られた。

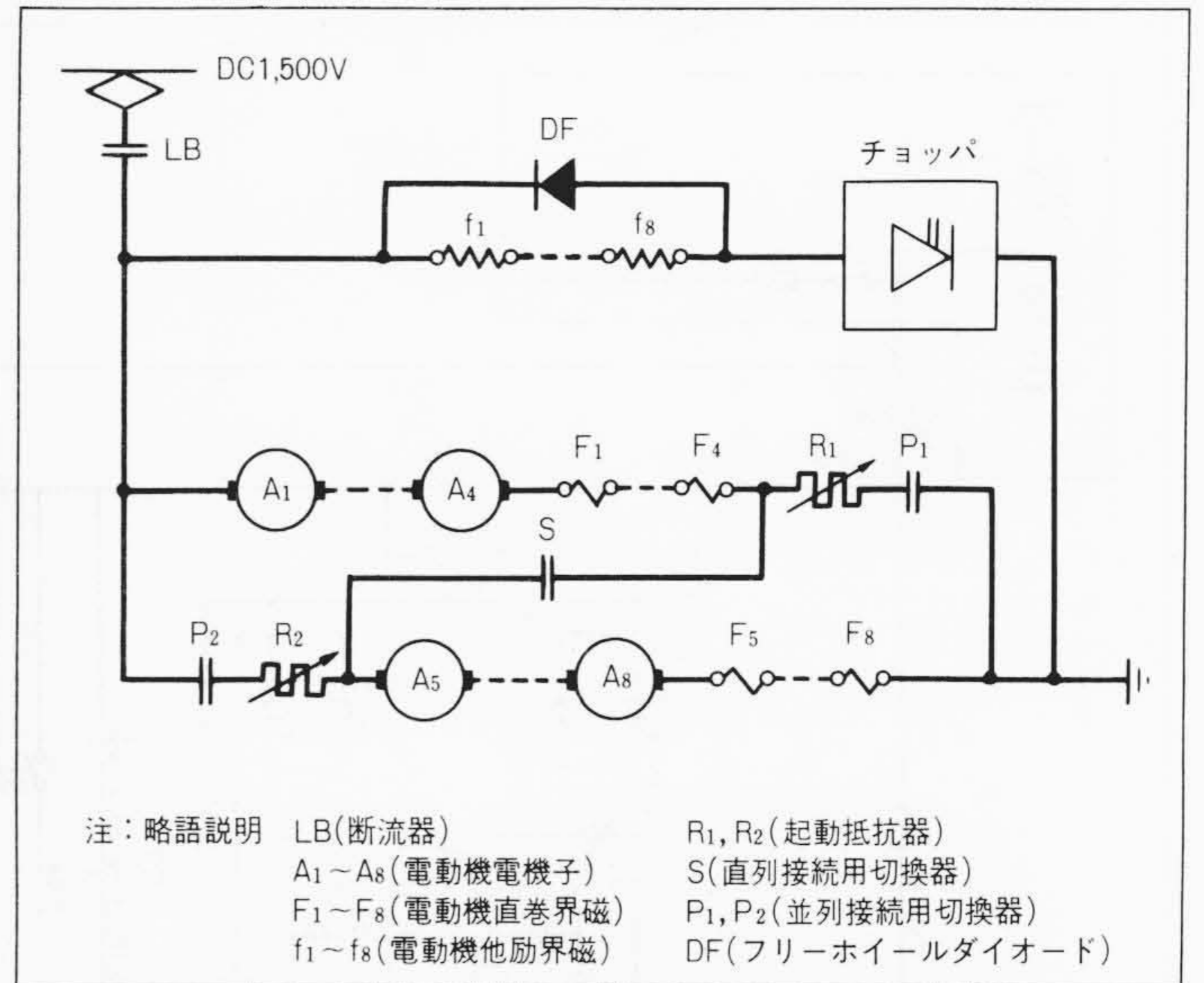


図5 界磁チョップ制御装置の主回路簡略図 速度に応じ、電機子回路を直並列切換え、他励界磁電流をチョップの通流率により制御して、力行ブレーキ及び回生ブレーキ制御を行なう。

3.1.2 電機子チョップ装置

昭和41年に逆阻止形サイリスタを使用し、帝都高速度交通営団日比谷線で75kW主電動機4台を制御するチョップ装置の現車試験に成功して以来、数々のチョップ技術の開発を積み重ね、現在までに2,500V, 1,000A級の大容量逆導通サイリスタを使用したものが主流となってきた。最近ではいっそう高性能・高機能化を追求して、大容量GTOサイリスタを適用した新しいチョップの実用化が始められている。代表的なものに帝都高速度交通営団納め銀座線01系電車がある。図6に01系チョップ電車の主回路つなぎを、図7にチョップ装置の外観図を示す。

これらの開発のポイントは、前記のように強制転流回路の削除とチョップ周波数を従来に比べて約3～4倍と高周波化、チョップ化することにより主平滑リアクトルを削除するなど小形・軽量・高効率化をねらったものとして開発が進められている。

3.2 VVVFインバータ装置への適用

日立製作所でのVVVFインバータ制御誘導電動機駆動方式の開発は、昭和53年逆導通サイリスタによるDC1,500Vインバータの現車走行試験に始まり、昭和55年、逆導通サイリスタによるDC1,500Vインバータ電車1両を完成し、粘着性能、空転時の駆動系動荷重、誘導障害など長期実用化試験を実施するなど実用化技術を蓄積してきた。

このVVVFインバータ制御方式は、高い信頼性、保守性の面から、現在広く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いたが、装置の小形・軽量化の面でなお課題が残っていた。

この課題は、大容量GTOサイリスタとその適用技術の開発によって解決の見通しが得られた。このように、性能面以外に小形・軽量化の実現の見通しが得られたことがきっかけとなり、既に一部の顧客では、試作電車での確認後、量産化へと進んでいる。

(1) インバータ電車の特徴

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

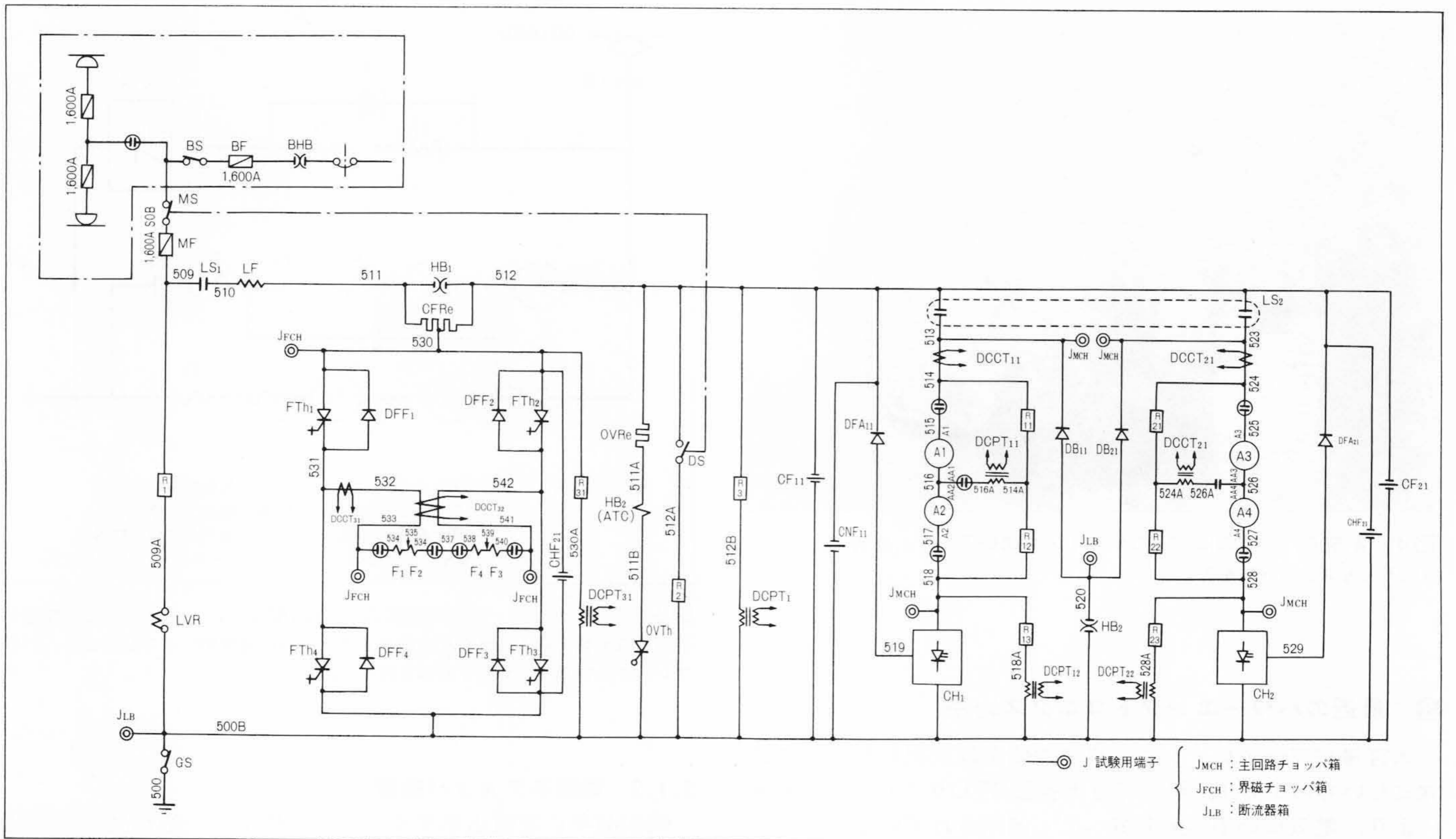


図6 01系チョッパ電車の主回路つなぎ 主回路チョッパ及び界磁チョッパで構成され、両チョッパの良い点を取り入れた分巻他励制御用チョッパである。

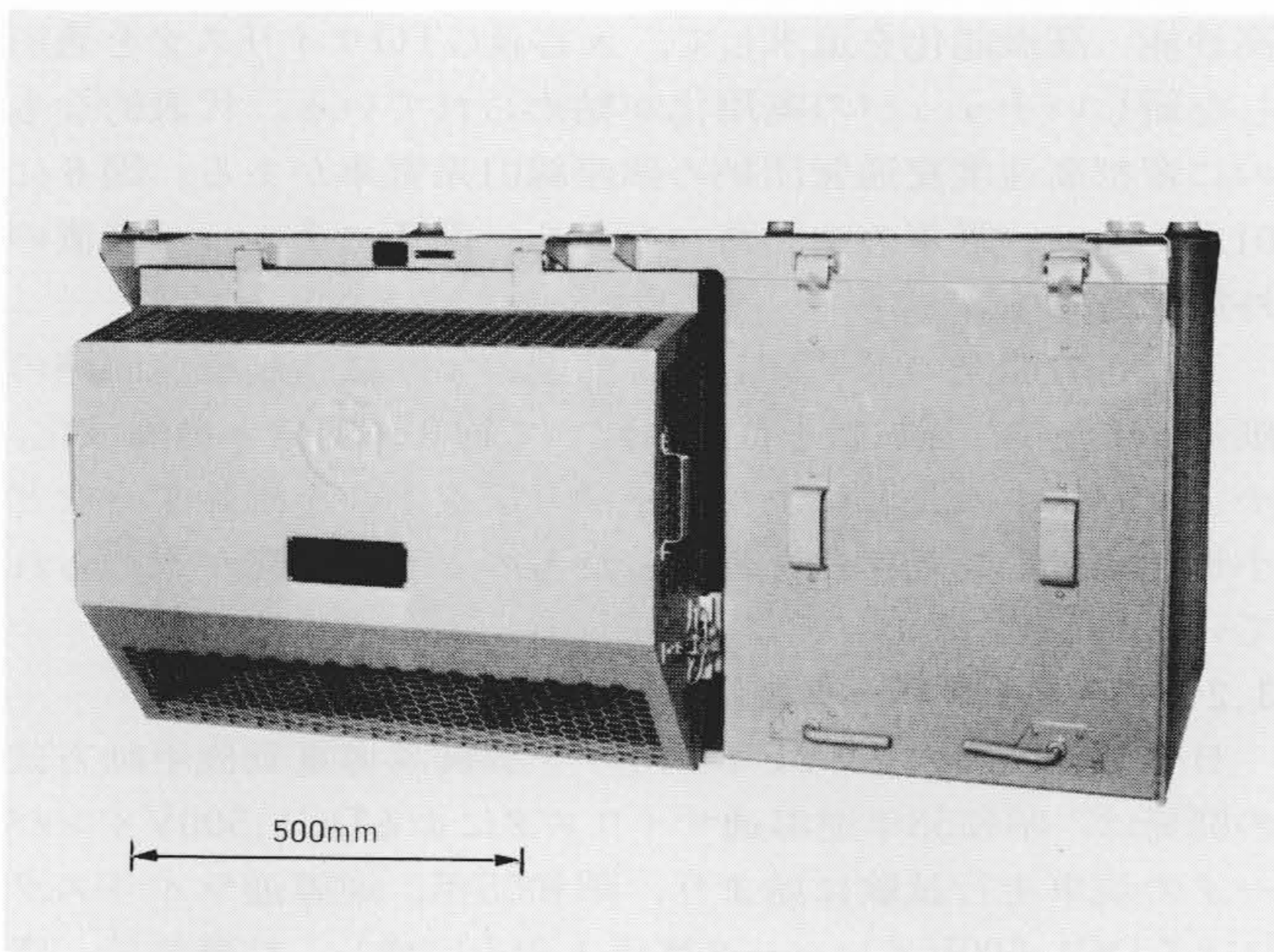


図7 01系GTOチョッパ装置の外観 GTOサイリスタ2,500V, 2,000Aを応用した分巻他励制御用チョッパの外観を示す。

レクトロニクス技術の進歩により、誘導電動機が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本格化してきた。

このインバータ電車の特徴⁶⁾としては、次のような点を挙げることができ、いずれも車両の省力化、省エネルギー化及び高性能化につながるものである。

(a) 無接点化

ブラシや整流子がなく従来電車に比べて保守の簡易化が図られる。更に主回路では、力行・ブレーキ転換や逆転用の接触器が不要となり、すべてGTOサイリスタスイッチにより

無接点化でき、これらを総合して保守の簡易化が図られる。

(b) スペース、重量

誘導電動機の採用でブラシ、整流子がないため、高速回転数(6,000rpm以上)主電動機の製作が可能となり小形・軽量化される。またインバータ装置も大容量GTOサイリスタ(4,500V, 2,000A)の採用により主回路が大幅に簡単化されるため、小形・軽量化が実現できる。

(c) 粘着性能

交流電動機は、本質的に大空転や大滑走が起こらない性質をもっており、これらの性質を有効に利用することで、粘着性能の向上が図られる。更に最近では、この粘着性能向上策の一つとして、空転、滑走しにくい附随車の軸からの速度信号を利用し、この信号と電動機回転数との比較により、より空転、滑走させない制御方式も開発⁷⁾され採用し始めている。このように粘着性能の向上により電動車と附随車の比率を下げ、電車全体としての価格低減を図ることも検討されている。

(d) 広領域性能

整流の問題のない誘導電動機の採用により、高速域でのトルク特性の設計自由度が増す。すなわち、必要な車両性能を満足する広領域特性をもたせることも可能である。

一方、低速域、特に0 km/h付近での周波数連続制御を行なうことにより、こう配起動、通常起動などはチョッパ制御と同様にスムーズに制御することが可能となった⁸⁾。

(2) インバータからの誘導障害

しかし、このVVVFインバータ化で一つの問題となったものに、信号系に対する誘導障害対策がある。この問題については、誘導障害を受ける信号器の対ノイズ特性、部品の配置、主回路配線の及ぼす影響、箱のシールドの効果などについて

徹底的に研究し、各顧客で使用中の主な信号設備など貸与を受け、横断的に誘導障害確認試験を実施し、これらの信号設備に対し許容信号レベル以下に誘導障害レベルを抑えることを確認している。この結果、この種の問題に対しては、現在では問題なく新線だけでなく在来線への投入も可能であると考えている。

(3) 納入実績と仕様比較

日立製作所は前記したように、本VVVFインバータ制御については昭和53年から開発品の確認をして以来、長年にわたって顧客の指導のもとに各種の制御装置を開発してきた。これらの納入した装置の主な仕様比較を表1に示す。

これらの装置の開発の引金となった大きな要因は、大容量GTOサイリスタの開発と、きめ細かい制御が実現できるマイクロコンピュータの開発が同時に行なわれたことであるといっても過言ではない。

図8に最近のDC1,500V、VVVFインバータの主回路つなぎを、図9にGTO4,500V、2,000Aサイリスタを適用したVVVFインバータ装置の外観を示す。

3.3 交流車両の制御装置への適用

交流車両では、サイリスタの位相制御により、直流電動機の世界制御を行なう方式が主流であり、今後も使用されてゆくものと考えられる。この方式では、制御によって生ずる高調波電流が通信系に与える影響の低減や力率の改善のために今まで種々の研究が行なわれ、その成果が実用化されてきた。

ところで、前記の課題の解決手段のひとつとして、交流直流交換器をGTOサイリスタにより高周波で制御し、電流波形を正弦波状とし高調波電流を減らすと同時に、力率値をほぼ1として効率の向上を図るシステムが注目されている。

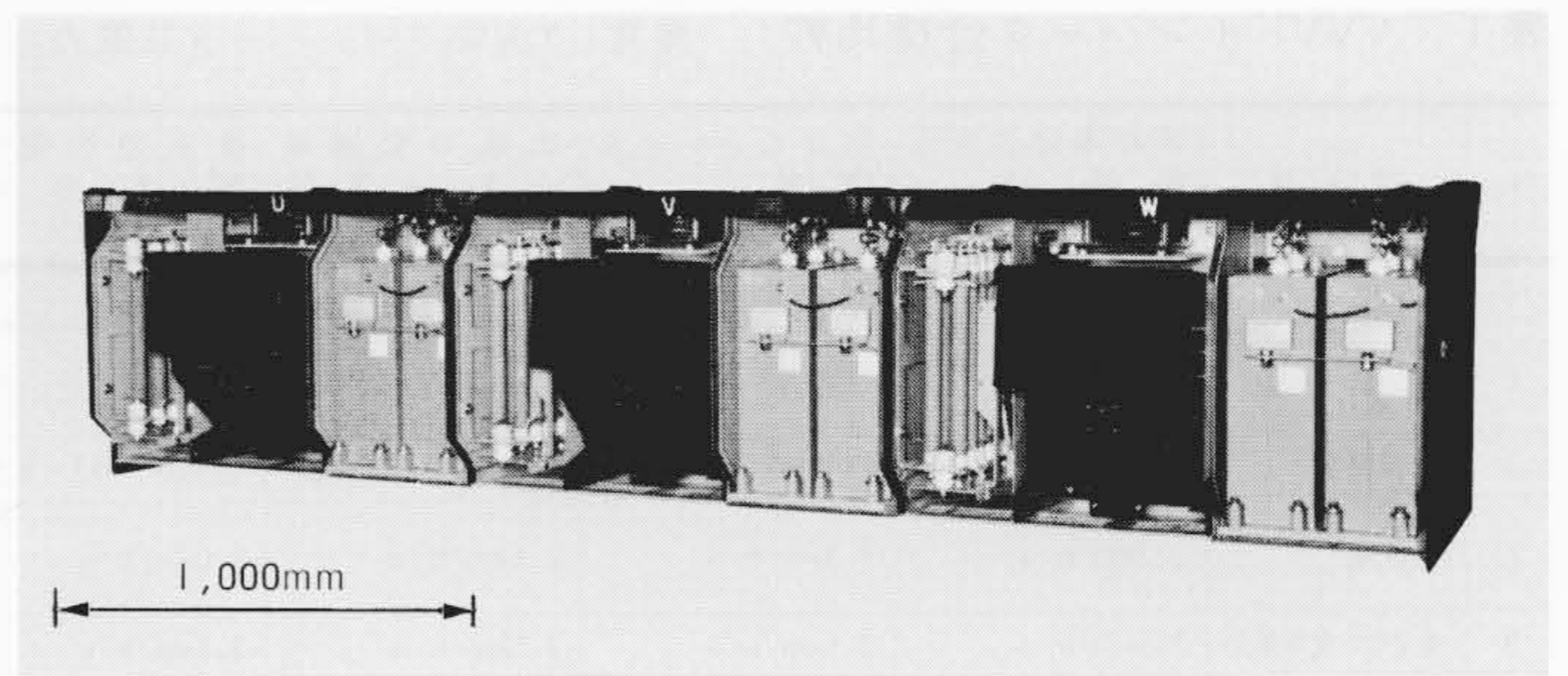


図9 VVVFインバータ装置の外観 4,500V、2,000AのGTOサイリスタを用い、Freon Cooling方式を採用した装置を示す。

このような考え方は古くから知られたものであるが、以前は高周波スイッチングに適応できる電力用半導体素子がなかったために実用化に向かったの具体的な検討がなされていなかった。しかし最近では、前記のようにパワーエレクトロニクスの目覚ましい発展により高周波スイッチングが可能な大容量GTOサイリスタが実用化の見通しが得られたことにより、実現可能の見通しが得られ、具体的開発が日立製作所でも進められている。

図10に交流車両用PWMパルス幅変調制御コンバータを用いた制御システム構成を示す。すなわち、このシステムは交流・直流変換を行なうPWM制御コンバータ、VVVFインバータ及び誘導電動機で構成されている。今後これらの個々の制御技術を、系統的に効率よく有機的に結合した誘導電動機駆動の高効率交流電気車両システムが急速に開発されるものと思われる。

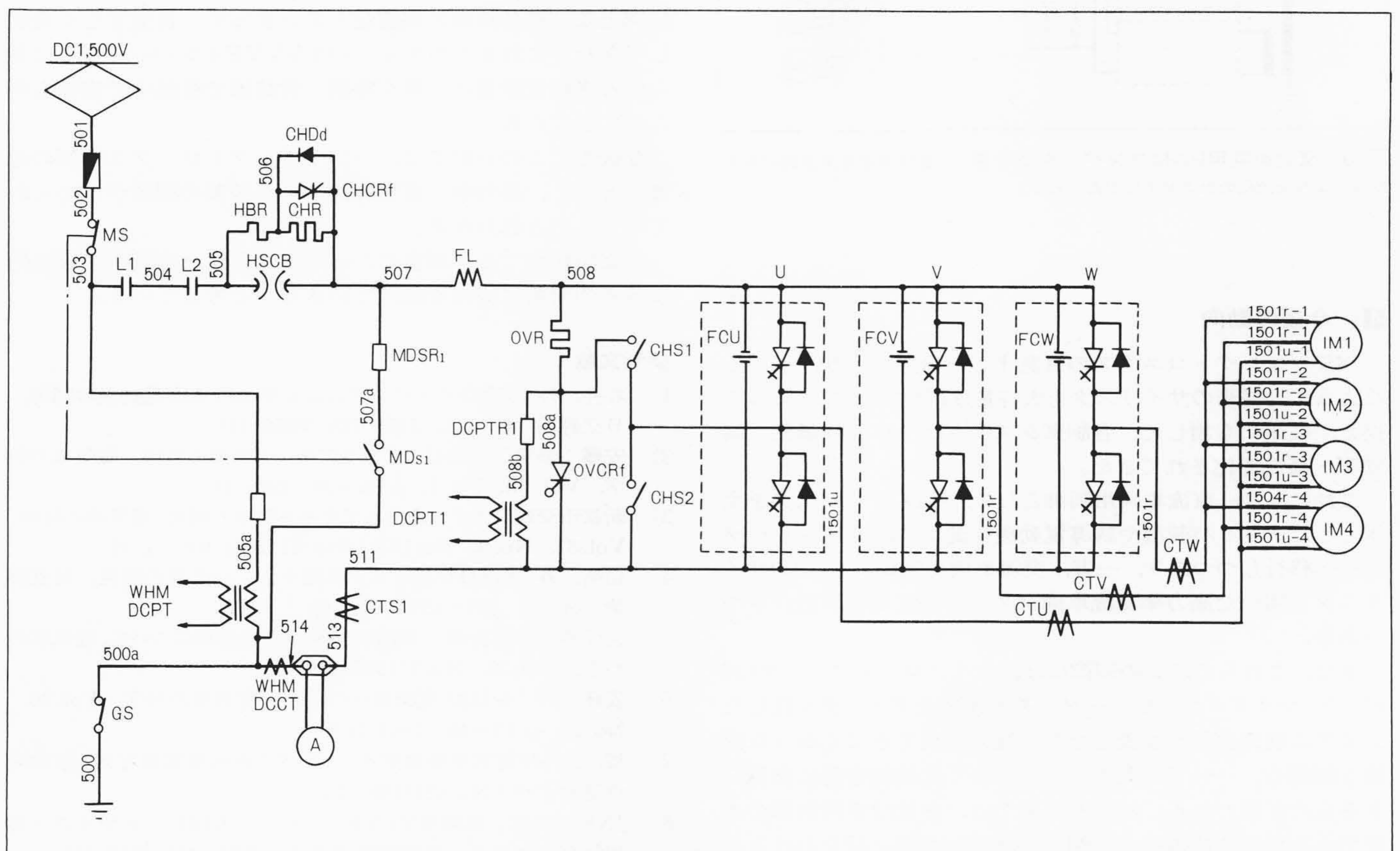


図8 VVVFインバータ主回路つなぎ DC1,500V用VVVFインバータで、4,500V、2,000A GTOサイリスタを使用した主回路で、170kW主電動機4台の制御を行なう。

表1 VVVFインバータ仕様比較 開発したVVVFインバータ装置の主な仕様比較を示す。

No.	項目	帝都高速度交通 営団 (試作)	日立インバータ 電車	大阪市交通局 小形地下鉄	東京急行電鉄 株式会社 (試作)	大阪市交通局	東大阪生駒電鉄 株式会社	西武鉄道株式会社 (山口線)	東京急行電鉄 株式会社	近畿日本鉄道 株式会社
1	電気方式	DC1,500V	DC1,500V	DC750V	DC1,500V	DC750V	DC750V	DC750V	DC1,500V	DC1,500V
2	インバータ出力 (最大)	1,000kVA	1,000kVA	600kVA	1,500kVA	675kVA×2	555kVA×2	480kVA	1,390kVA	1,280kVA
3	制御容量	130kW IM×4台	130kW IM×4台	160kW IM×4台	165kW IM×4台	140kW IM×4台	140kW IM×4台	95kW IM×2台	170kW IM×4台	155kW IM×4台
4	加速度	3.3km/h/s	3.3km/h/s	2.5km/h/s	3.0km/h/s	2.5km/h/s	3.0km/h/s	3.5km/h/s	(地上)3.1 (地下)3.3 km/h/s	2.5km/h/s
5	減速度 常用最大	3.5km/h/s	3.5km/h/s	3.5km/h/s	3.5km/h/s	3.5km/h/s	3.5km/h/s	3.5km/h/s	3.5km/h/s	3.5km/h/s
6	機器高さ	739mm	739mm	550mm	725mm	735mm	735mm	720mm	700mm	700mm
7	インバータ方式	電圧形PWM	同左	同左	同左	同左	同左	同左	同左	同左
8	出力周波数	5~140Hz	5~140Hz	3~120Hz	2~150Hz	2~120Hz	2~120Hz	3~80Hz	0~	0~
9	主サイリスタ	2,500V 400A RCT	同左	2,500V 1,000A GTO	2,500V 2,000A GTO	同左	同左	同左	4,500V 2,000A GTO	同左
10	同上の接続	2SIP	2SIP	1S2P	2SIP	1S1P	1S1P	1S1P	1S1P	1S1P
11	同上の冷却方式	強制風冷	同左	フロン冷却 (素子外置方式)	フロン冷却 (素子内蔵方式)	同左	同左	同左	同左	同左
12	制御電圧	AC200V 50Hz (二相3線) DC100V	AC100V 50Hz (三相3線) DC100V	AC200V 60Hz (二相3線) DC100V	AC200V 120Hz (単相) DC100V	AC200V 60Hz (二相3線) DC100V	AC200V 60Hz (三相3線) DC100V	DC100V	AC200V 60Hz (単相) DC100V	DC100V

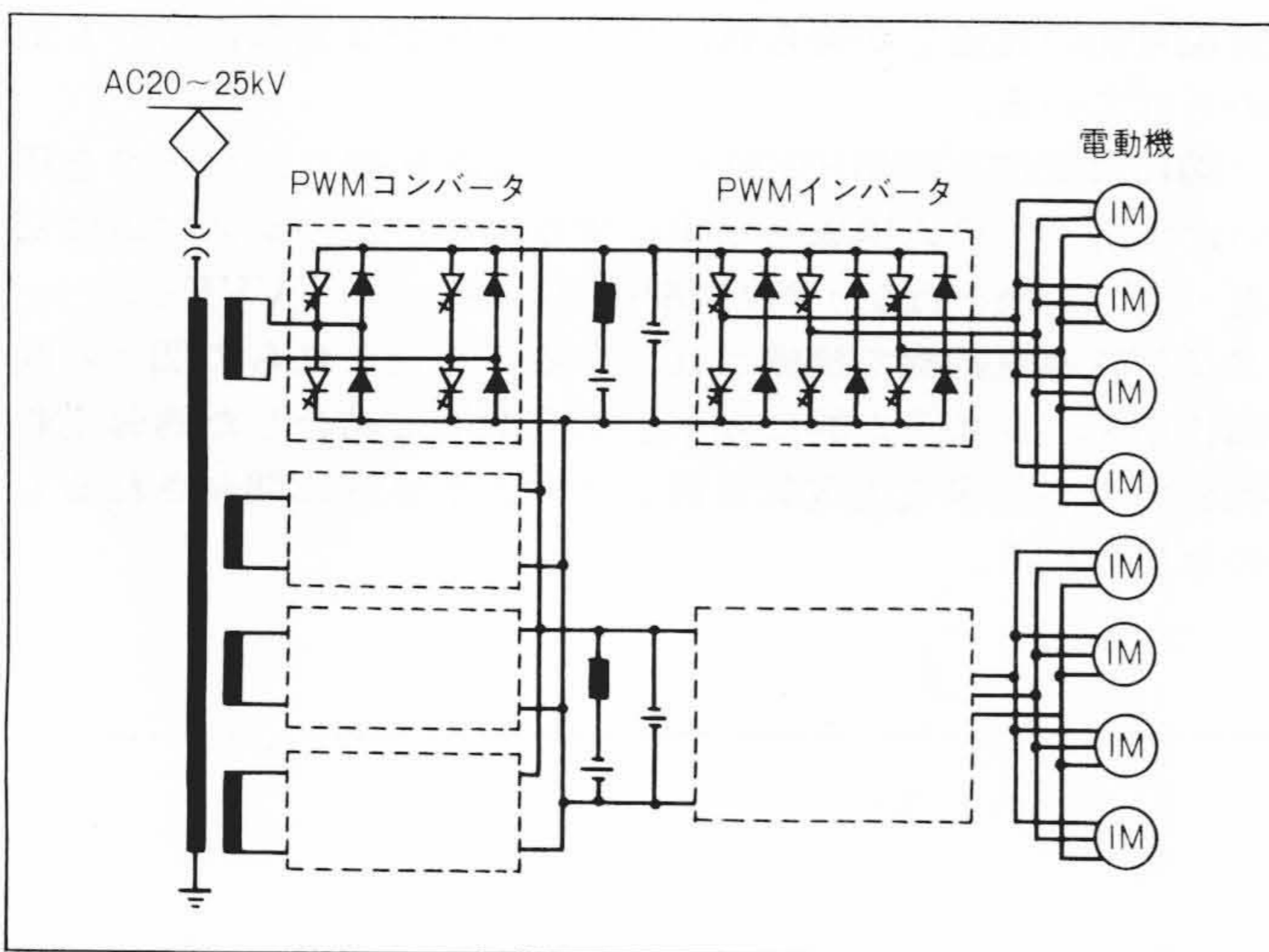


図10 交流車両用PWMコンバータつなぎ GTOサイリスタのパルス制御により交流側の力率が1に制御される。

4 今後の動向

パワーエレクトロニクスの目覚ましい発展により、前記したように、従来のサイリスタを大容量GTOサイリスタに置き換え、従来にも増して、各制御システムは小形・軽量化、高効率・高性能化されてきた。

これにより、直流車両用制御として、GTOサイリスタを主体としたチョッパ装置や誘導電動機制御用VVVFインバータ装置へ移行しつつあり、一方、交流車両用制御でもGTOサイリスタを用いた高力率交流車両システムの実用化が近づきつつある。

また、これらの機器の制御には、マイクロコンピュータ(16ビット マイクロコンピュータ)を主体に全デジタル化したシステム制御装置が主流となり、従来実現できにくかった複雑な制御も、ハードの大幅な増加もなく比較的容易に実現できるものと思われる。時に制御面では、今後は車両制御の本質である粘着性能の向上に関する研究が主体に行なわれるものと考えられ、日立製作所で適応形再粘着制御(アダプティブクリープ制御)⁹⁾の開発が進められ、実用化の見通しも得ら

れている。

また、マイクロコンピュータの採用により、自己診断機能、故障や運転中の各機器の動作状態を記憶するモニタシステムもより高度化していくものと考えられる。

更に今後は、パワーエレクトロニクスの適用範囲が広がり、一段と省エネルギー化、メンテナンスフリー化及びシステムの高密度化が進んでいくものと考えられる。

5 結 言

鉄道車両でのパワーエレクトロニクスは、保守の軽減や省エネルギー化のニーズにこたえ、かつ電力用半導体素子の性能向上及び制御技術の高度化とあいまって、目覚ましく発展してきた。これまでのチョッパやVVVFインバータなどに見られる実用化装置は、現在順調に営業線で稼動中で実績も得られてきている。

今後更にこの分野では、パワーエレクトロニクス技術の進展とともに、高効率・高性能化された装置の開発が進められていくものと思われる。

日立製作所でも、顧客のニーズに適合した高効率で経済的な装置の開発に努力を続けていきたいと考えている。

参考文献

- 1) 坪井, 外: GTOインバータによる車両用誘導電動機の制御, 日立評論, 63, 11, 775~778 (昭56-11)
- 2) 安藤: 鉄車論支持によるリニアモータ電車の展望, 電気車の科学, Vol. 38, No. 1, p.36~38 (1985-1)
- 3) 新都市交通システム向けリニアモータ電車の開発, 電気車の科学, Vol. 37, No. 9, No.10及びNo.11(1984-9月~11月)
- 4) 山崎, 外: GTOサイリスタ界磁チョッパ装置の開発, 日立評論, 66, 6, 451~455 (昭59-6)
- 5) 営団車両部設計課: 営団銀座線01系量産車について, 電気車の科学, Vol.38, No.1(1985-1月)
- 6) 安藤, 外: GTOの電気車への応用, 電気車の科学, Vol. 36, No.12, p.43~46 (1983-12月)
- 7) 堀江, 外: 電気車制御用インバータの再粘着制御方式, 第22回鉄道サイバネNo.414(1985-11)
- 8) JNR, 日立: 車両用VVVFインバータの16ビットマイコン応用制御システム, 第22回鉄道サイバネNo.418(1985-11)
- 9) 弘津, 外: アダプティブクリープコントロール式高粘着制御, 第22回鉄道サイバネNo.415(1985-11)