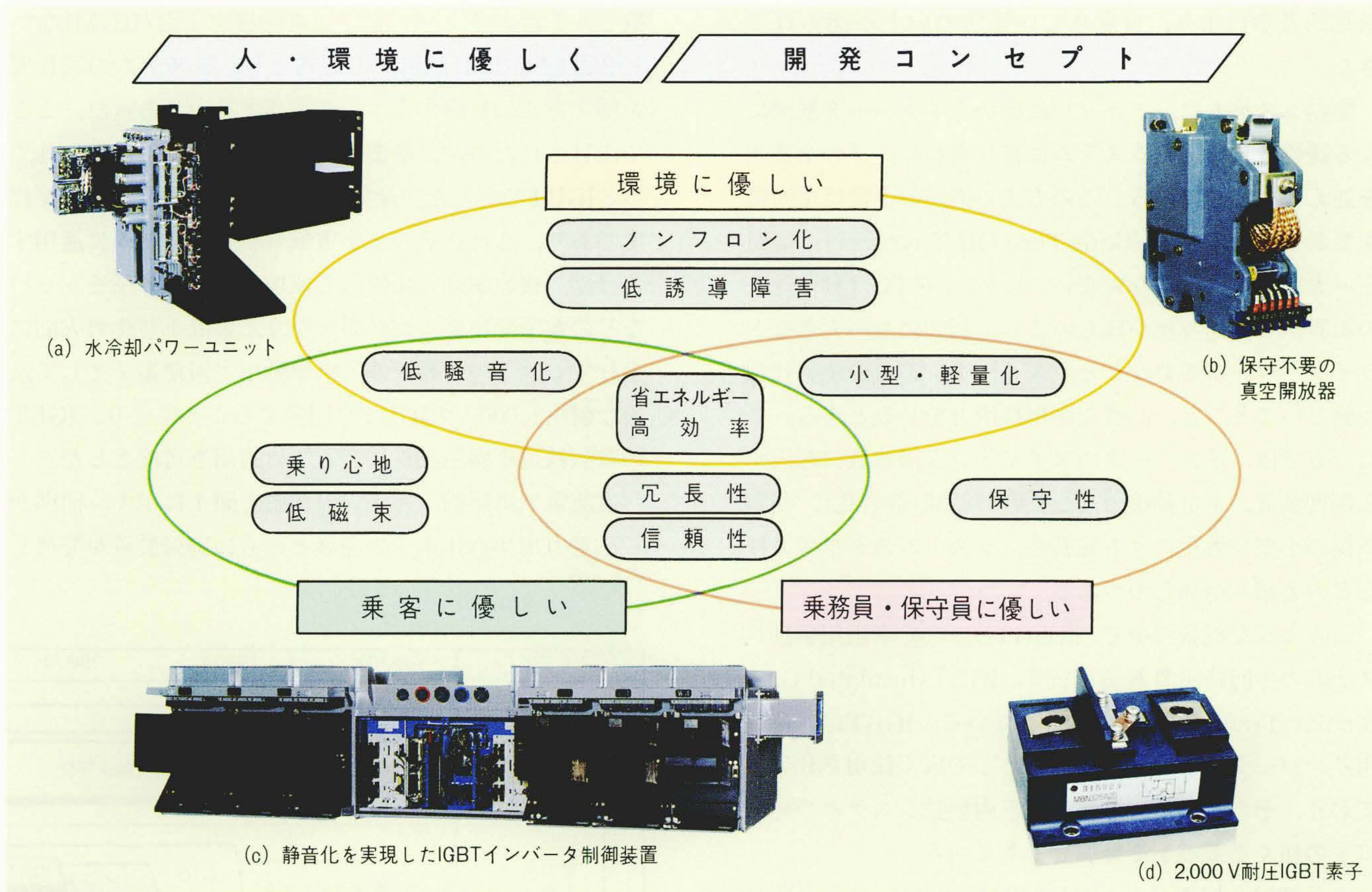


高耐圧IGBTを用いた新しいインバータ制御システム

Advanced Inverter Control System Using High Voltage IGBT

神保佳司* *Yoshiji Jimbo* 磯部栄介*** *Eisuke Isobe*
中村 清** *Kiyoshi Nakamura* 堀江 哲* *Akira Horie*



社会的ニーズにこたえる電車用駆動システム 先進パワーエレクトロニクス技術により、社会ニーズにこたえる音の静かな電車用駆動システムを開発した。IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)の冷却には純水を採用し、また保守を必要としない真空開放器を採用し、環境保全、保守性向上に配慮している。

わが国の鉄道分野は、パワーエレクトロニクス応用面で世界を常にリードしており、電車駆動用システムでも、車両のインバータに自己消弧機能を持っているGTO(Gate Turn Off Thyristor)を約10年前世界に先駆けて導入して以来、現在はGTOインバータが主流となっている。

一方、最近汎(はん)用インバータの分野で絶縁ゲート型トランジスタのIGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)が応用されてきているが、耐電圧は1,400V以下であり、車両用など高電圧・大電流用としては容量的に不足していた。

日立製作所は、今回耐電圧世界最大の2,000VのIGBTを開発し、これを使用した電車駆動用IGBTインバータ装置を製品化した。

環境の面からは静音化、無公害化が、また経営効率向上の面からは省エネルギー、省力、性能向上が求められている中で、このIGBTインバータ装置は、環境に優しいこと、乗客に優しいこと、および乗務員・保安員に優しいことをコンセプトとして製品化しており、正に次の時代にフィットした電車用駆動システムと言える。

* 日立製作所 水戸工場 ** 日立製作所 日立研究所 *** 日立製作所 交通事業部 技術士(電気・電子部門)

1 はじめに

電気鉄道車両用の駆動システムは、最近のパワーエレクトロニクス技術、およびマイコン(マイクロコンピュータ)をはじめとするマイクロエレクトロニクス技術の飛躍的進歩により、目覚ましい性能の向上が図られてきた。

駆動システムは、チョップ制御からインバータ制御による誘導電動機駆動システムに移り変わり、その全盛期を迎えようとしている。この方式の推進の主役は主回路主要素子であるGTO(Gate Turn Off Thyristor)の高耐圧・大容量化にほかならない。しかし、GTOは動作速度の限界から高周波化が難しいこと、制御のため大きなドライブパワーが必要なこと、スイッチングでの駆動仕様が厳しいことなど、高度な応用技術力を必要とする。また一方では、インバータのスイッチング周波数に起因する制御装置、主電動機のうなり音の低減(静音化)、制御単位の小型分散化による冗長性、システムのタフネス性などの要請も増加しつつある。

このような現状の中で、最近GTOに次ぐ車両用駆動システムの主回路主要素子として、IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)が注目されている。IGBTは、産業用インバータなどの主回路素子として広く使用されてきており、その容量でも電気鉄道車両駆動システムの範囲に手の届くところまで発展してきている。

ここでは今回開発した、1,500 V架線対応の電車駆動用として高耐圧・大容量IGBTを用いたインバータシステムの主回路システム、制御方式、特長などについて述べる。

2 駆動システムの変遷

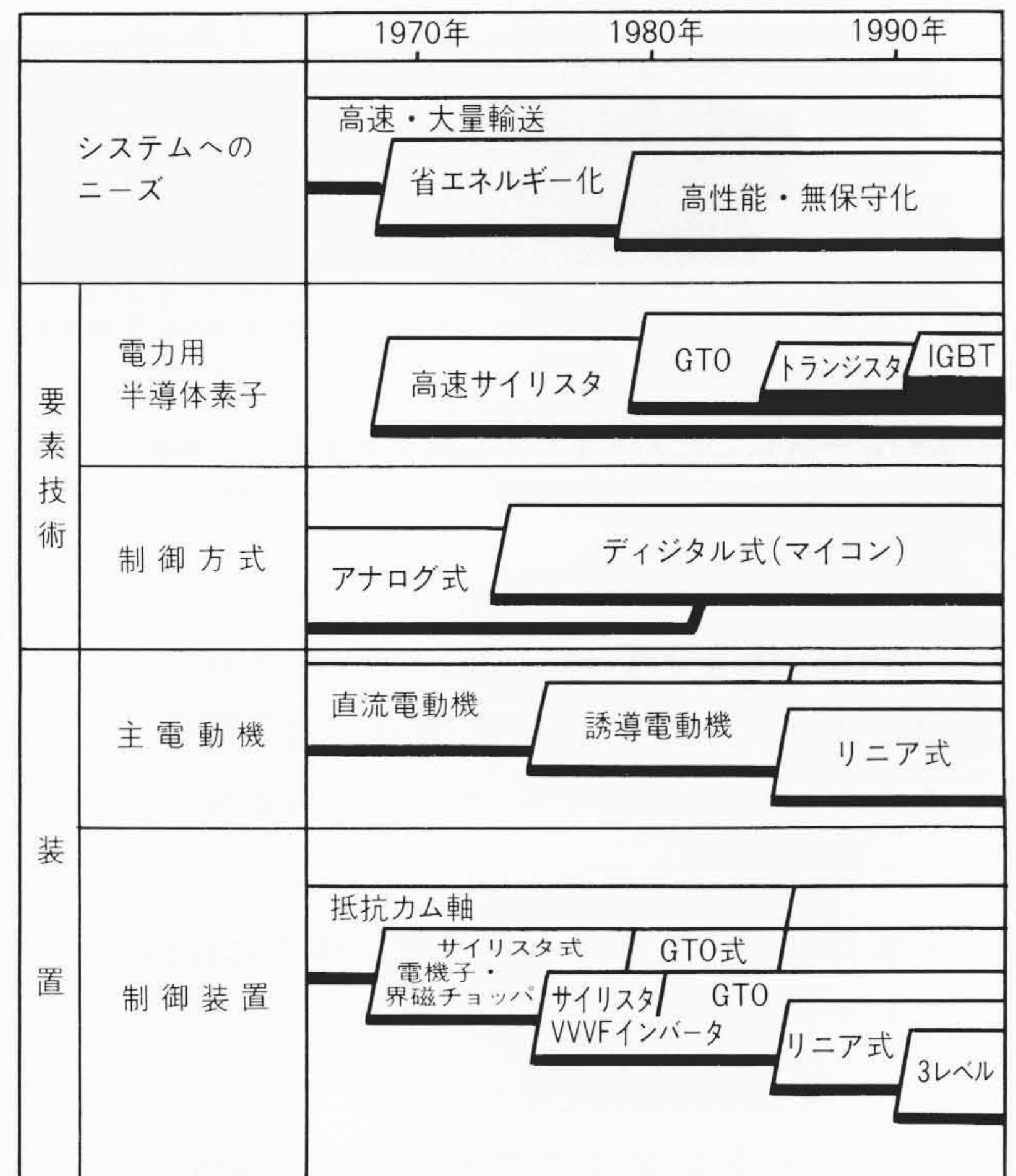
サイリスタの高速化により、チョップ制御電車が実用化されて以来、直流電気車の駆動システムのエレクトロニクス化は急速な勢いで進められてきた。サイリスタが逆導通サイリスタから自己消弧機能を持つGTOへと発展するのに伴い、チョップ制御も高周波分巻他励チョップ制御へと進んでいった。

一方、主回路の無接点化、無整流子化による保守性の向上の要求から誘導電動機を用いたVVVF(Variable Voltage Variable Frequency)インバータ制御方式が開発され、GTOの大容量化とともに実用化が拡大された。GTOは開発当初、耐圧2,500 V・可制御電流1,000 A クラスであったものが、1990年代には耐圧4,500 V・可制

御電流4,000 Aまで大容量化が進み、インバータ装置1台当たりの制御容量のアップが可能となり、1台のインバータで主電動機8台(1C8M)、すなわち電動車2両分を制御することができるようになった。

インバータの大容量化が進む一方、制御単位を小型分散し、1台のインバータで主電動機を1台(1C1M)ないし2台(1C2M)制御する方式とし、システムの冗長性を増す方式に対応するニーズが高まりつつあった。ここで注目されたのが、産業用インバータで広く使用されているIGBTであった。産業用のIGBTは耐圧が1,400 V程度であり、これをそのまま電気車駆動システムに適用するには、複数個直列接続して使用するか、降圧チョップなどの電圧変換装置が必要となり、装置小型化の方向に逆行する。そのため、電気車駆動用主回路素子として最適な耐圧2,000 VのIGBTを開発することにより、IGBTの電気鉄道車両駆動システムへの適用を可能とした。

直流電気車駆動システムの変遷を図1に示す。同図から、電力用半導体素子の発展とともに制御装置が発展し



注：略語説明
 GTO (Gate Turn Off Thyristor)
 IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)
 マイコン (マイクロコンピュータ)
 VVVF (Variable Voltage Variable Frequency)

図1 直流電気車駆動システムの変遷 電力用半導体の発達とともに制御装置が発展している。

ていったことがわかる。

3 システム概要

3.1 コンセプト

新しいインバータシステムを開発する際のコンセプトとして次の3点をあげた。

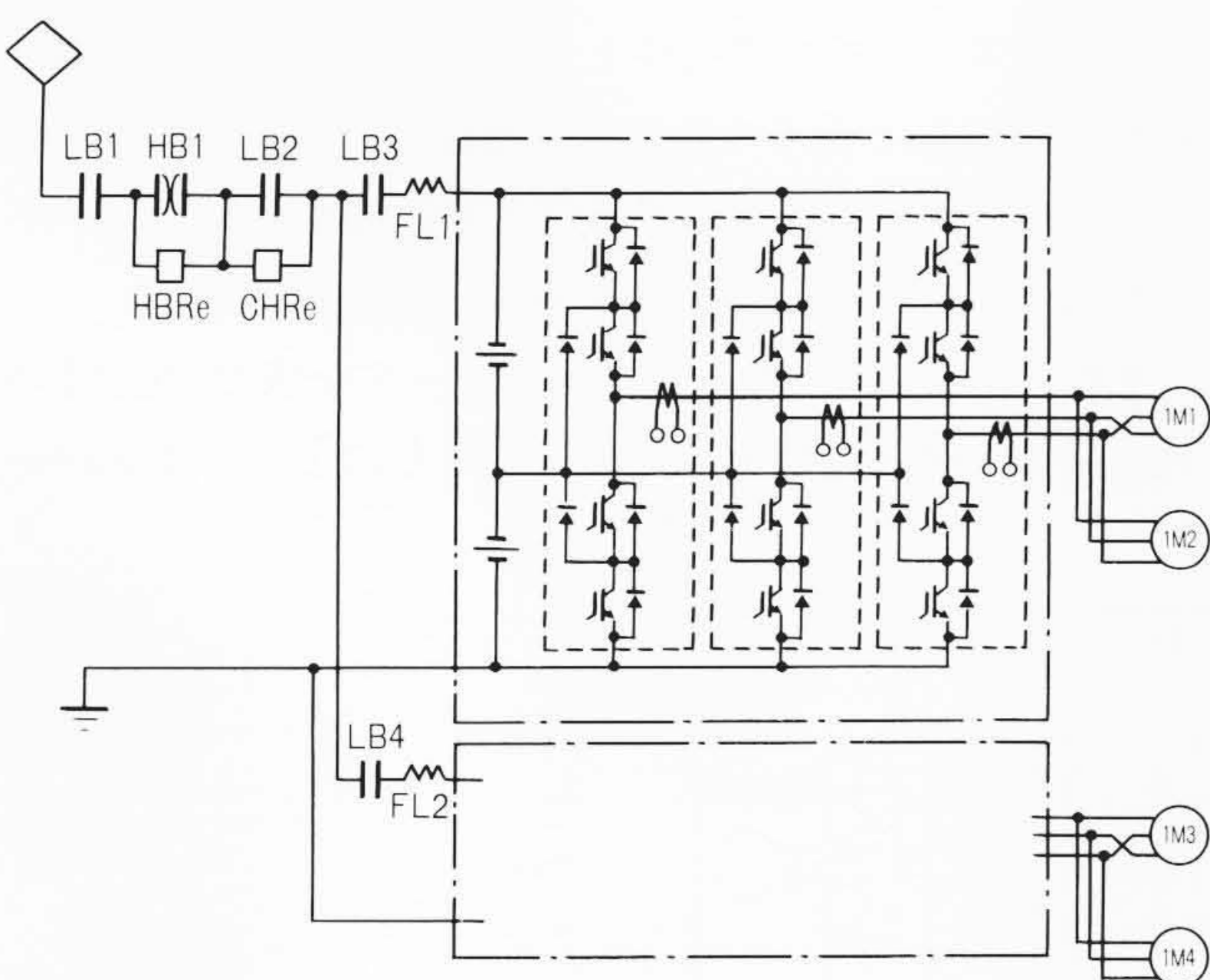
- (1) 乗る人に優しいこと。
- (2) 環境に優しいこと。
- (3) 使う人に優しいこと。

すなわち、都市交通機関を利用する人に対しては、車内騒音の低減による居住性の改善を行うため、騒音の発生源である駆動システムを見直すこととした。駆動システムからの騒音の低減は、沿線の環境改善にもなる。

また、世界的問題とされる地球環境の改善として主回路素子の絶縁構造の改造により、冷却にフロン系冷媒を使わない方式を採用することとした。

そして、制御の無接点化をはじめ、マイコンによる自己診断機能の充実による保守作業の省力化や、複数のインバータを有機的に結合し、それを群管理することによって運行信頼性の高い電車システムとすることとした。

これらを具現化するシステムとして、開発した高耐圧IGBTを用い、1,500 V架線対応で200 kWクラスの誘導電動機を1台ないし2台駆動可能な3レベルIGBTインバータシステムを製品化した。このインバータを複数組み合わせることにより、列車編成、列車運用、性能など



注：略語説明
 LB (断流器), HBRe (限流抵抗器), HB (高速度遮断器),
 CHRe (充電抵抗器), FL (フィルタリアクトル), IM (誘導電動機)

図2 主回路簡略構成 IGBTを用いた3レベルインバータでフィルタリアクトルが各群に挿入されるので、各群は独立して制御可能となっている。

の幅広いニーズにこたえることができる。

3.2 主回路システム

IGBTインバータシステムの一例として、200 kWクラスの主電源機を2台駆動するインバータを2群組み合わせた場合の主回路簡略構成を図2に示す。フィルタリアクトルが各群に挿入されるので、各群は独立して制御可能となっている。インバータ故障時には群ごとに開放が可能であり、万一の場合でも電車システムとしての性能確保を考慮している。

IGBTインバータの分散化により、1台のインバータで1台の主電動機を駆動するシステムも可能である。

基本仕様を表1に示す。加速度は都市交通電車として最高クラスの3.3 km/h・sが出せるように、また最高速度も130 km/hまで出せるように仕様を設定し、多様化するニーズに対応できるようにしている。

4 IGBTインバータの特長

4.1 高耐圧IGBT

従来のIGBTの耐圧は最大1,400 Vクラスであり、鉄道車両用としてはさらに高耐圧化が望まれた。そのため、

表1 IGBTインバータの基本仕様

項目	仕様	
加速度	3.3 km/h・s	
減速度	4.0 km/h・s(常用最大)	
架線電圧	DC1,500 V	
歯車比	7.79(109/14)	
車輪径	820 mm(780~860 mm)	
電車特性	<p>電動機電圧 (V) 電動機電流 (A) 引張力 (t/車)</p> <p>架線電圧 1,500 V 主電動機 190 kW×4 歯車比 7.79(109/14) 車輪径 820 mm</p>	
	速度-引張力特性	
インバータ仕様	インバータ方式	高周波高耐圧IGBT応用 中性点クランプ型3レベルインバータ
	定格電圧	DC1,500 V (DC900~DC1,800 V)
	最大出力	1,600 kVA (800 kVA×2)
	出力周波数	0~200 Hz
	制御電源	DC100 V (DC70~DC110 V)

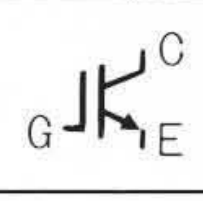
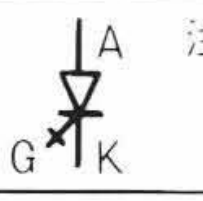
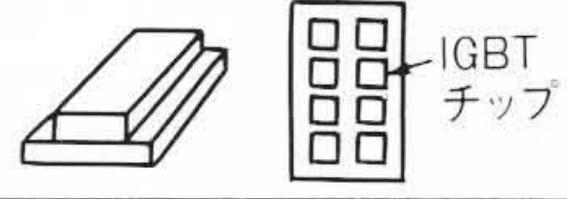
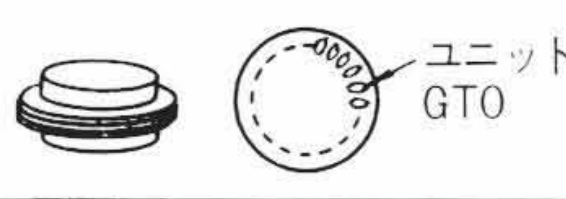
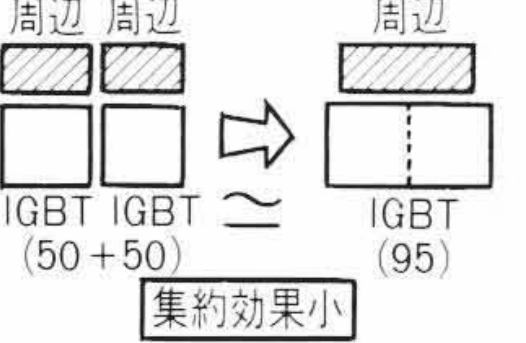
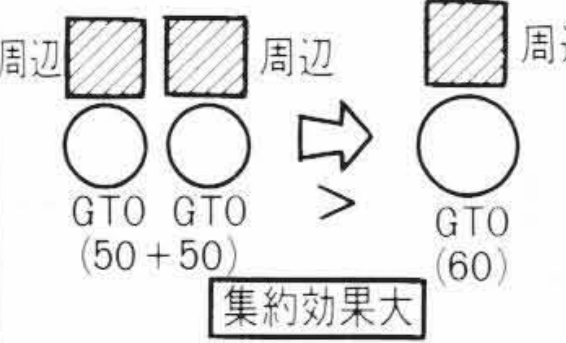
No.	項目	IGBT	GTO
1	記号	 注：C (コレクタ) E (エミッタ) G (ゲート)	 注：A (アノード) K (カソード)
2	構造	 IGBT チップ	 ユニット GTO
3	電圧	中	ⓧ (4,500 V)
4	電流	小 (数百アンペア)	ⓧ (数千アンペア)
5	スイッチング損失	⓪	大
6	スナバ損失	⓪	大
7	スイッチング周波数	ⓧ (~3 kHz)	小 (~500 Hz)
8	ゲート (駆動電力)	電圧駆動 (⓪)	電流駆動 (大)
9	大容量化	 周辺 周辺 IGBT IGBT (50+50) ≈ IGBT (95) 周辺 集約効果小	 周辺 周辺 周辺 周辺 GTO GTO (50+50) > GTO (60) 周辺 集約効果大
10	特長	小容量インバータに最適 ↓ 1モータ制御, 2モータ制御 高周波スイッチング可能	大容量インバータに最適 ↓ 8モータ制御 高耐圧・大電流化可能

図3 GTO素子とIGBTの比較 IGBTはスイッチング周波数を高くでき、しかも電圧駆動型のため駆動電力が小さい。

耐圧が最も厳しいPN接合表面部分の構造変更により、耐圧を約60%改善し、耐電圧特性2,000 Vを達成した。

IGBTはダイオード内蔵のモジュール構造とし、さらに、モジュール内の絶縁耐圧を向上し、DC1,500 V架線向け制御装置用素子としては、初めて絶縁シートなどを介さずに装置に直接取り付けができるような構造とした。これによって装置の水冷却が容易になった。IGBTの特長をGTOと比較して図3に示す。

IGBTは内部にはんだ接合部を持つため、接合部の疲労に対しての検証が必要となる。日立製作所はモデルによる接合部の疲労状態の数値解析、および等価セットによる実機相当の加速疲労試験を実施し、実使用レベルで問題のないことを確認した。

4.2 3レベルインバータ

PWM(Pulse Width Modulation)制御電圧型インバータでは、出力電圧波型の半サイクル中に、チョッピングによる多数の電圧パルス列を作り、そのパルス幅を可変制御する。この1サイクル中のパルス列をパルス数と呼ぶ。PWM制御ではこのパルス列による等価電圧が正弦波状に変化するようにパルス幅を制御し、低次高調波の少ない滑らかな出力を得ている。次に、PWM制御インバータのレベル数とは出力電圧一周期間での電圧レベル数を言う。この電圧レベルがE、0の二つある場合を2レベル、E、E/2、0の三つある場合を3レベルと言う。レベル数を増すことにより、電圧の変化分が減少し、低次高調波、トルク脈動、磁気騒音が低減できる。

4.3 低騒音インバータ

車両用インバータの騒音低減に関しては、次の2点について考慮する必要がある。

- (1) 主回路電流のリプル分による主電動機などで発生する電磁音の低減
- (2) パルスモード切換時に発生する耳障りな音色変化の除去

そこで主回路電流のリプル低減については、IGBTの持つ高速スイッチング特性を生かし、スイッチング周波数を1,500 Hzと従来の約3倍に増加し、さらに主回路的に3レベルインバータとすることで達成した。インバータ方式に対する主電動機電流の違いを図4に示す。

また、1パルス以外の多パルスモード全域で、IGBTのスイッチング周波数を一定に保つことにより、インバー

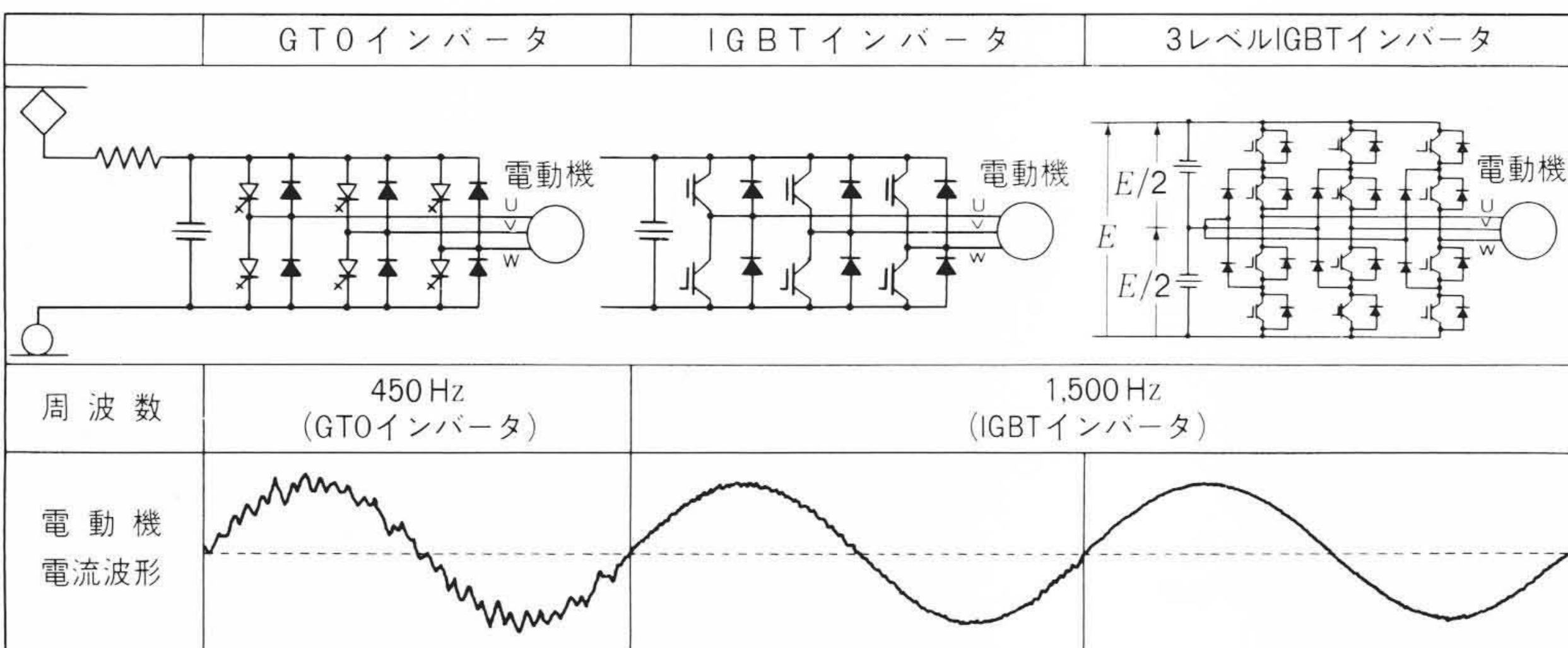


図4 インバータ方式と電動機電流波形の違い スwitchング周波数を高めることで電動機電流の波形が滑らかになり、3レベルインバータとすることでさらに滑らかになる。

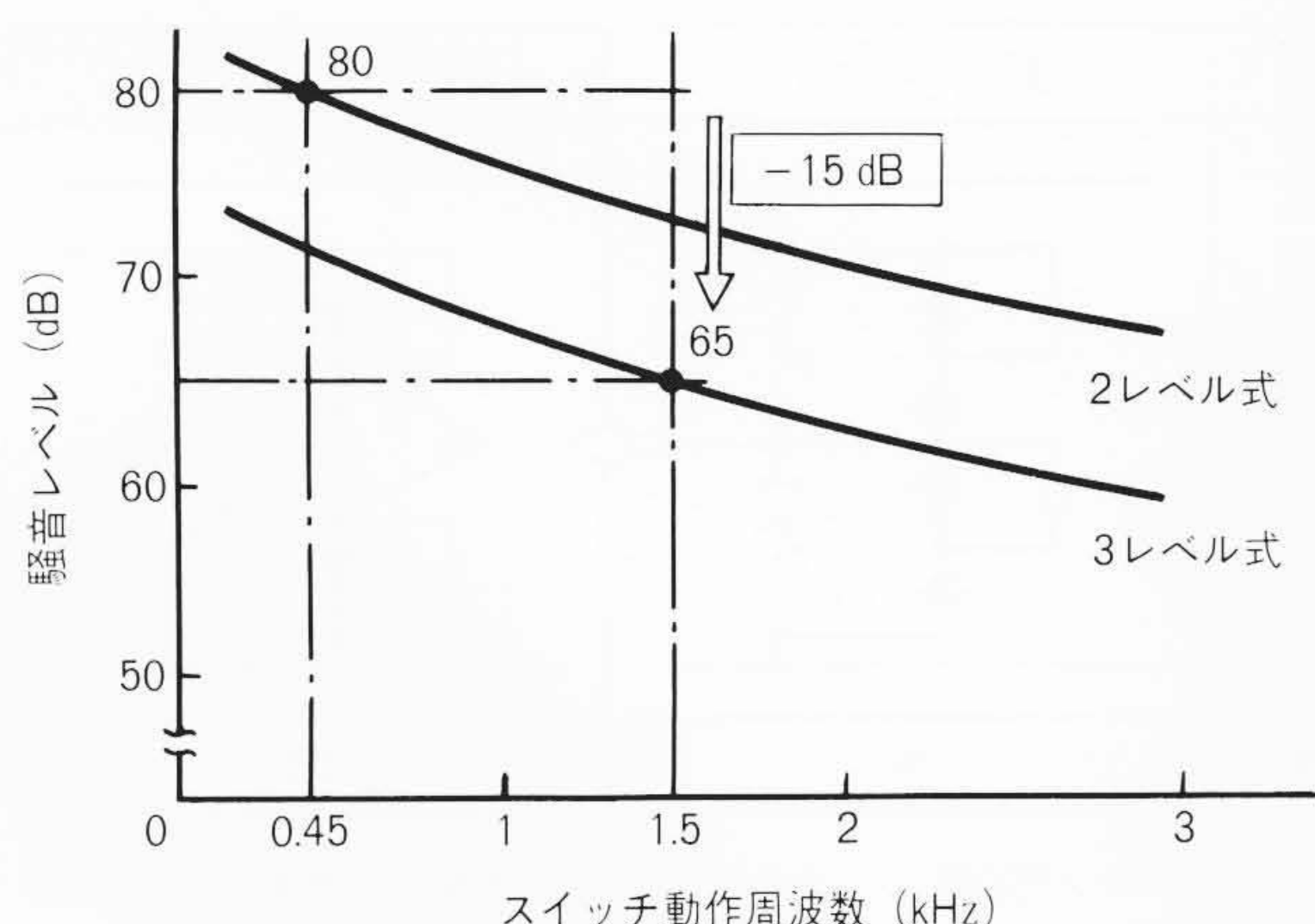


図5 スイッチング周波数と騒音レベル スイッチング周波数を高め、3レベル化することによって従来比で-15 dBの騒音低減ができる。

タ周波数に依存した音色の変化を抑え、IGBTの能力を最大限に生かした制御を可能とした。

スイッチング周波数と騒音レベルの比較グラフを図5に示す。従来比で-15 dBの低減効果を得た。

4.4 ノンフロン化

IGBTは内部絶縁構造を採用しており、1,500 Vライン用でも冷却部での絶縁は不要となった。これにより、従来主回路素子の冷却に使われているフロン系の冷媒に代わり、冷却性能の高い水を使った非圧接大容量のヒートパイプの採用が可能となった。

IGBT、ヒートパイプの構造から素子の平面配置が可能となり、IGBT、スナバ回路部品、ゲートドライブユニットなどおのおの平面実装し、さらにこれらを階層状に組み立てて主要電気品をユニット化し、パワーユニットとしてまとめることができた。

4.5 メンテナンスフリー化

パワーユニットは、ヒートパイプ式の冷却システムを採用し自然冷却方式としているため、冷却用のブロワやファンが不要となり、回転部のメンテナンスやフィルタの交換などの作業が不要となる。

制御論理部、パワーユニットなどの機器は、モジュール化によって機器単位の交換など、保守取り扱いの迅速化および容易化を図っている。また、制御回路のリレーの大部分をソフトウェアに取り組み、リレーそのものも密封型リレーを採用することにより、メンテナンスフリー化を図っている。

4.6 小型・軽量化

IGBTは素子特性上GTOに比べて小容量のスナバコンデンサでスイッチング動作することができる。さらに今

回新しく開発した低損失のスナバ回路[デルタ(Δ)スナバ回路]を採用し、スナバ抵抗の損失をいっそう低減して、スイッチング効率の向上とともにスナバ回路を小型とした。

制御論理部は、32ビットのワンチップマイコンを使用して部品の集約化を図り、従来の制御論理部に比べて大幅なプリント基板数の削減を図った。

このように、インバータの低損失化、冷却性能の向上、および個々の部品の小型化により、大きさや質量を約40%低減し余裕のある点検スペースを実現するとともに、取付けを容易にしている。

5 IGBTインバータを支える主な技術

5.1 全域PWM制御

車両用インバータに要求される出力電圧特性は、電圧利用率が0~100%までの全域を連続的かつスムーズにカバーするものである。IGBTはGTOに比べて高いスイッチング周波数で動作することができるため、図6に示す制御技術により、こう配起動時などの微小電圧制御から高速時の1パルス制御へのスムーズな移行を実現し、全域非同期で出力電圧を連続制御することが可能となった。

3レベルインバータでのPWM制御としては、ユニポーラ変調が最も一般的であり、最大電圧に従来の2レベルインバータと同様1パルスで出力する。しかしユニポーラと1パルスだけではきめ細かな出力電圧制御が困難なため、

- (1) ダイポーラ変調
- (2) 部分ダイポーラ変調
- (3) ユニポーラ変調

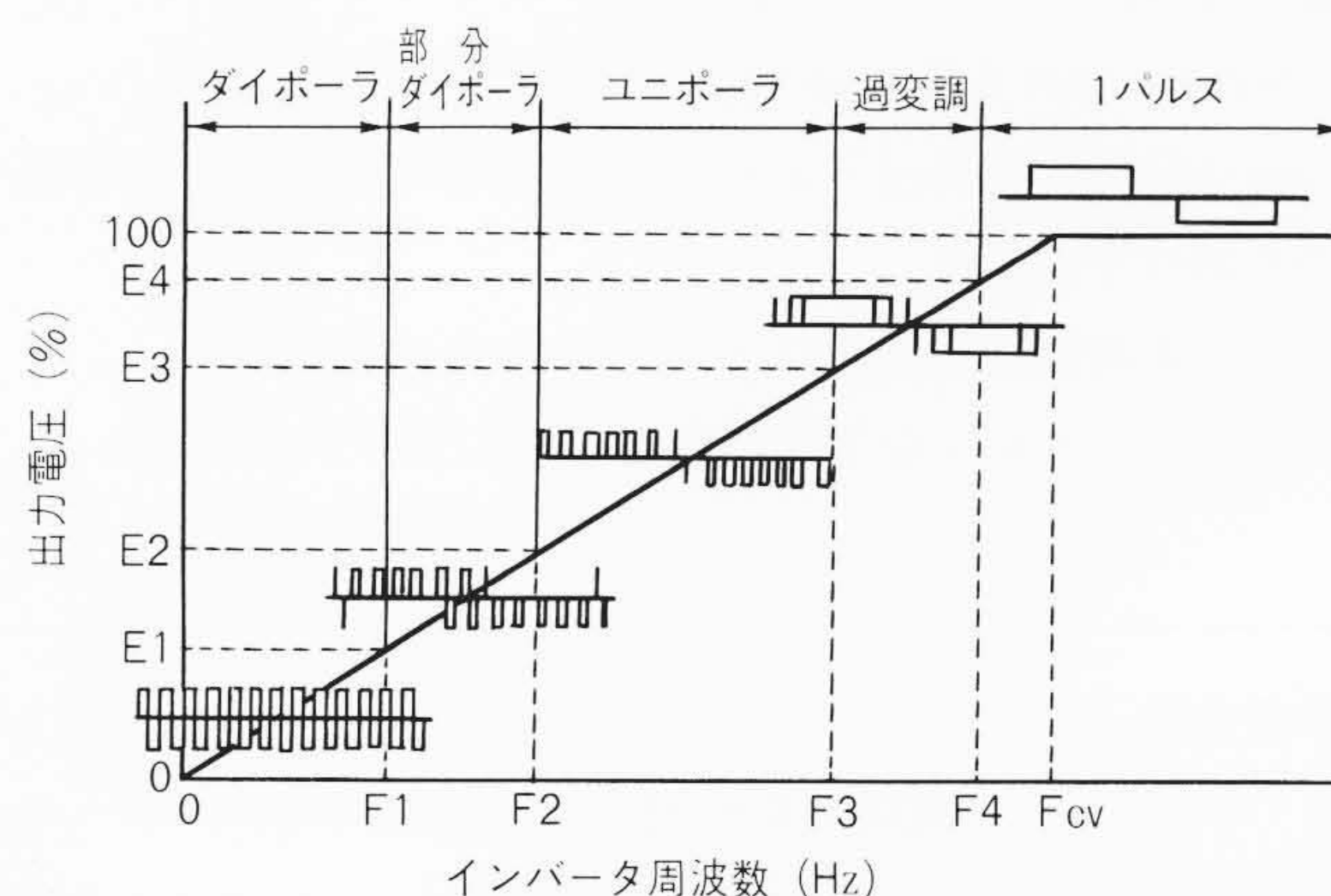


図6 全域電圧連続PWM制御 ダイポーラ、部分ダイポーラ、ユニポーラ、過変調と制御を連続推移することによって、出力電圧の連続制御が可能となった。

(4) 過変調

(5) 1パルス

から成る全域電圧連続PWM制御を採用した。特に(2)の部分ダイポラ変調, (4)の過変調を導入することにより, PWMモード切換をスムーズとし, 確実な連続電圧制御が可能となった。

5.2 Δスナバ回路

従来, 車両用インバータに用いられているスナバ回路は, 各素子ごとにコンデンサ, ダイオード, 抵抗で構成する「個別スナバ回路」である。個別スナバ回路では回路構成は簡単であるが, スナバコンデンサ容量を大きくする必要があり, またスナバ回路に蓄えられたエネルギーは, 大部分抵抗で消費されるため損失が大きい。そのため比較的簡単な回路構成でスナバ回路の損失を低減でき, かつ実装面でも有利な新しい低損失スナバ回路として「Δスナバ回路」を開発し適用した。

Δスナバ回路の構成を図7に示す。Cs₁, Cs₂が通常のスナバコンデンサとして働き, Cspはスナバコンデンサを流れる電流をバイパスするとともに, 素子にかかるオーバーチャージ電圧を制御する働きをする。この回路によれば, IGBTがオフのとき, スナバコンデンサの電荷を負荷側に吐き出すことによってスナバ損失を低減でき, またIGBTオンのときの損失はスナバコンデンサ容量を個別スナバ回路に比べて小さくできるぶんスナバ損失は低減する。その結果, スイッチング時のスナバ損失を従来の個別スナバ回路に比べ約半分に低減することが可能となった。

5.3 小型主回路真空開放器

制御の分散化に伴い, 各群のインバータを開放できるスイッチが必要となる。実装効率の良い小型主回路開放器の要求にこたえて, 真空インタラプタを用いたDC 1,500 V, 400 A級の小型主回路真空開放器VCS (Vacuum Motor Cutout Switch)を開発した。主な特長は次のとおりである。

- (1) 全電磁操作方式によるエアレス化を実現した。
- (2) 電磁コイル1台で開放または投入装作が可能である。

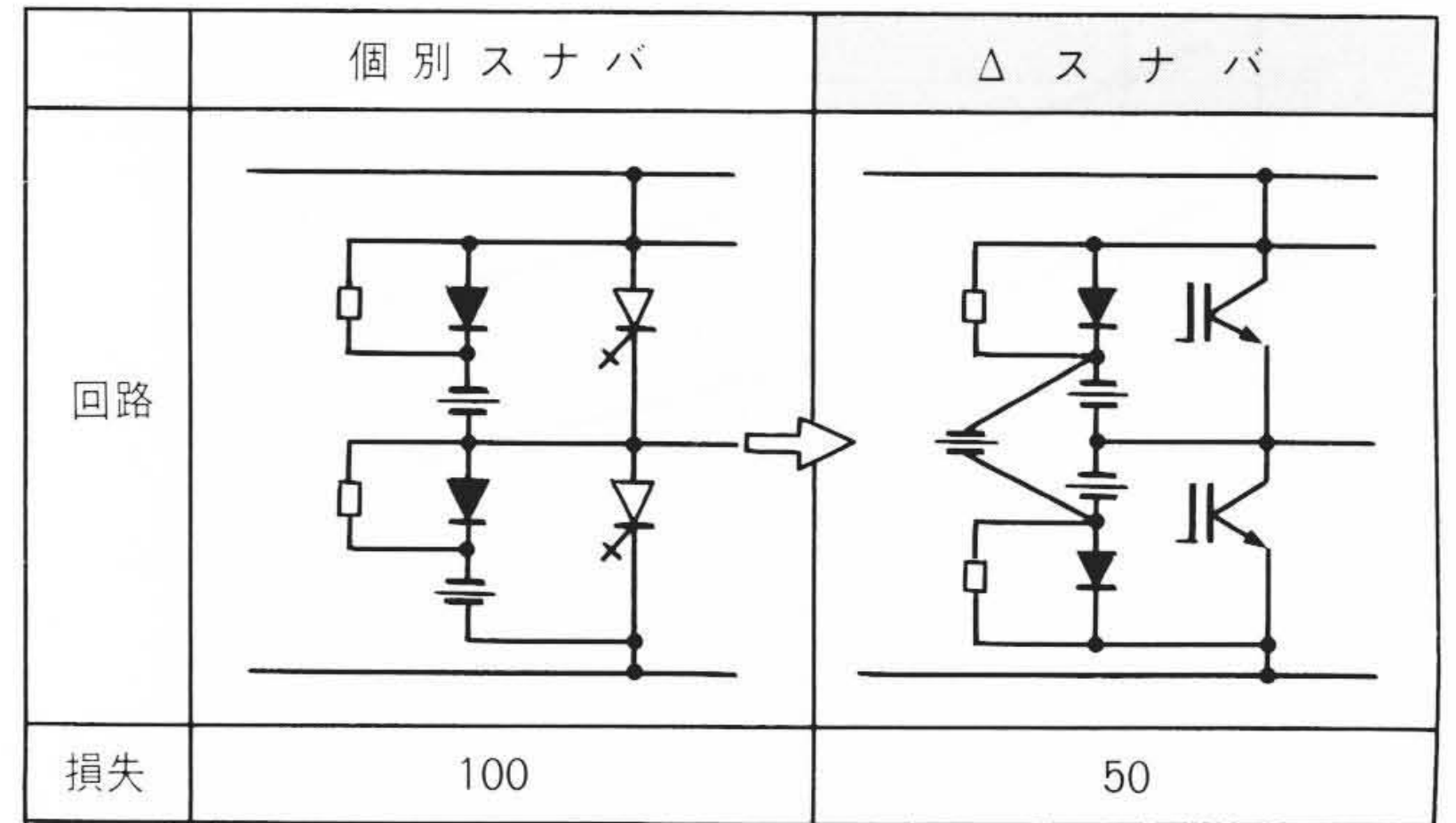


図7 Δスナバ回路 スナバコンデンサをデルタ形に接続することにより, 余剰電荷を電動機側に回生し損失を50%低減にできる。

- (3) 機械式の保持機構により, コイル断線や接点の接触障害による主回路の誤開閉がない。
- (4) 主接点に真空インタラプタを採用しているため, 接点保守が不要である。
- (5) 保守上, 給油を必要としない。
- (6) 取付け方向に制限がなく, 上下自在に取付け可能であり, 従来のF型ユニットスイッチの寸法で, 上下重ね合わせ2台のVCSが収納できる。

6 おわりに

2,000 Vの高耐圧IGBTの開発により, 車両駆動用インバータへの適用が可能となった。最新の技術を集結したこのIGBTインバータは, 主電動機電流が滑らかで騒音が低減し, フロン系の冷媒を使わずに素子を冷却する水冷式の採用, 制御の無接点化による保守の低減などで「乗る人, 環境, 使う人」に優しい設計となっている。

さらに, 制御容量の細分化と複数のインバータを有機的に結合し, それらを群管理することによって「止めない, 遅らせない」といった運行信頼性の高い電車システムのサポートを可能としている。

IGBTを採用した車両駆動インバータは, これからの主流として次世代のニーズに対応可能である。今後とも車両駆動システムの技術を開発し適用していくことにより, 多様化するニーズにこたえていく考えである。

参考文献

- 1) 安藤, 外: 新低損失スナバ回路の車両用インバータへの適用, 電気学会電気鉄道研究会(1992)
- 2) 仲田, 外: 3レベルインバータの電圧連続PWM制御, 電気学会半導体電力変換(1992)
- 3) 豊田, 外: IGBT応用3レベルインバータの開発, 日本鉄道サイバネティクス協議会(1993)
- 4) 仲田, 外: 車両用3レベルインバータの主回路制御方式, 電気学会産業電力電気応用研究会(1993)