

# 1,500 V架線向け鉄道車両用IGBTインバータ

IGBT Inverter System for Rolling Stock

豊田 瑛一\* *Eiichi Toyota*      磯部 栄介\*\*\* *Eisuke Isobe*  
中村 清\*\* *Kiyoshi Nakamura*      堀江 哲\* *Akira Horie*



IGBTインバータを搭載した帝都高速度交通営団日比谷線03系電車とIGBTモジュール(左下)

耐電圧世界最大の2,000 V IGBTを開発し、これを適用した電車駆動用IGBTインバータ装置を製品化した。これは帝都高速度交通営団で採用され、日比谷線ほかの車両に搭載されている。平成6年までに57台が稼動に入った。

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、自己消弧機能を持つGTO(Gate Turn-off Thyristor)応用のVVVF(Variable Voltage and Variable Frequency)インバータを約15年前に世界に先駆けて導入している。現在はこのGTOインバータが電車駆動用システムの主流となっている。

一方、汎(はん)用インバータの分野では使用パワー素子として主流となりつつある絶縁ゲート型トランジスタIGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)を車両用として応用することが検討されてきており、その開発が進められてきていた。

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。インバータ装置としては主回路素子のIGBT化とともに、環境面からは静音化、無公害化を図り、経営効率向上の面からは省エネルギー、省力、性能向上、さらにメンテナンス性の向上などにくふうをこらしたもので、次の時代の電车用駆動システムと言える。

これを帝都高速度交通営団に提案し、平成5年に03系電车用、平成6年に02系用、07系用と合計57セットを納入した。これらの車両は、順調に稼動中である。

\* 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、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の高耐圧・大容量化にほかならない。しかし、GTOは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原因である動作速度の限界、大きなドライブパワー要求、厳しいスイッチング駆動仕様などの不利な面も持ち合わせている。

このような状況の中で、最近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いるIGBTは、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おり、今回さらに高耐圧化を図ることで鉄道車両への適用を可能とした。さらにこれを応用し、1,500 V架線対応の電車駆動用としてIGBTを用いたインバータシステムの主回路システム、制御方式を開発した。ここでは、IGBTインバータの特長などについて述べる。

## 2 システムの概要

### 2.1 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図るため、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(マイクロコンピュータ)による自己診断機能の充実で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、または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、性能などの幅広いニーズにこたえることができる。

### 2.2 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クラスの主電動機を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1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。

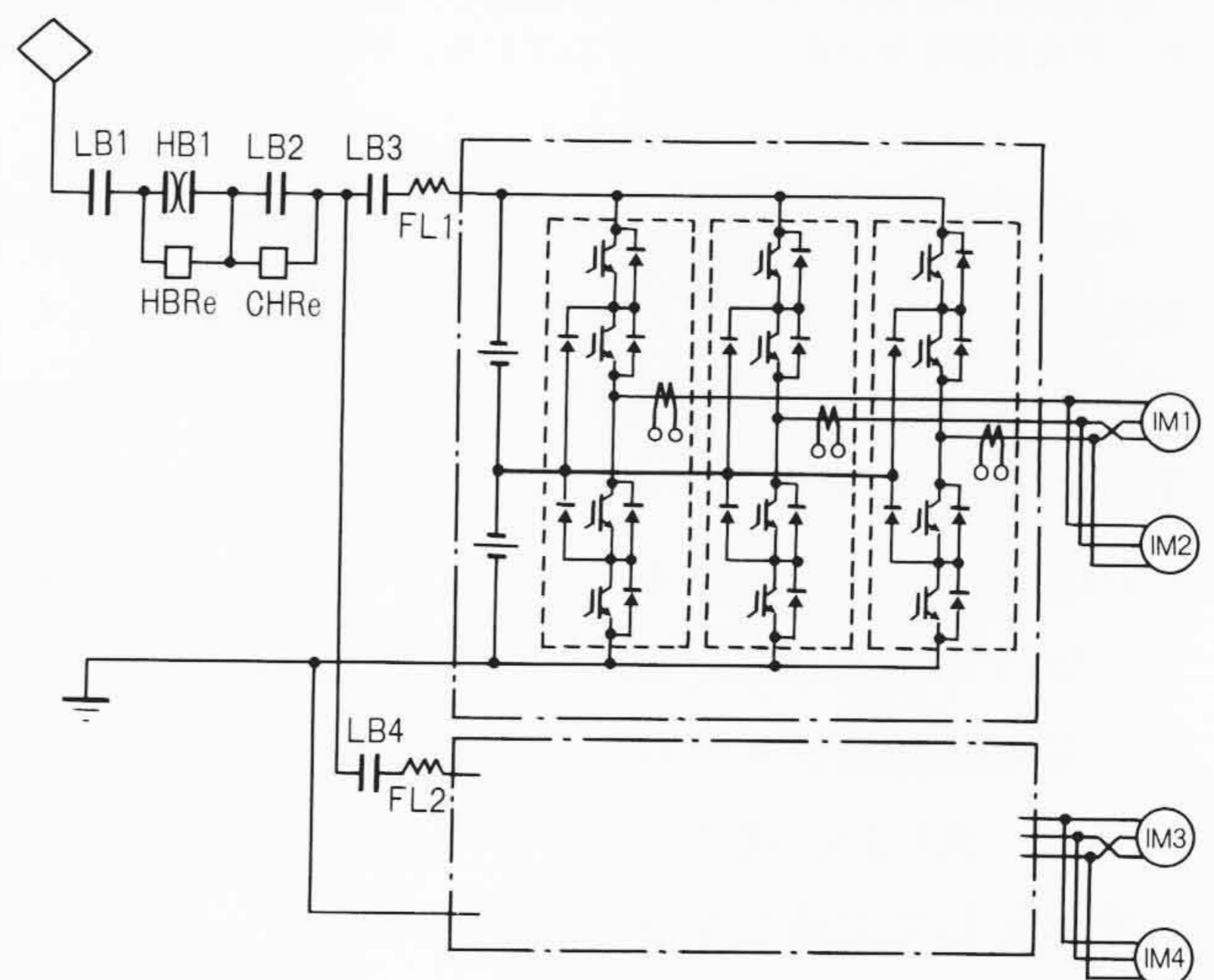
加速度は都市交通電車として最高クラスの3.3 km/h/sが出せるように、また最高速度も130 km/hまで出せるように仕様を設定し、多様化するニーズにこたえることができるようにしている。

## 3 IGBTインバータの特長

### 3.1 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、耐圧が最も厳しいPN接合表面部分の構造変更によって耐圧を約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素子ケース間絶縁耐圧をAC5,400 V



注：略語説明

LB (断流器), HBR (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1 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。

表1 IGBTとGTO素子の比較

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。

| 項目        | IGBT                                              | GTO                                      |
|-----------|---------------------------------------------------|------------------------------------------|
| 記号        | 注: C (コレクタ)<br>E (エミッタ)<br>G (ゲート)                | 注: A (アノード)<br>K (カソード)<br>G (ゲート)       |
| 構造        | IGBTチップ                                           | ユニットGTO                                  |
| 電圧        | 中                                                 | Ⓧ<br>(4,500 V)                           |
| 電流        | 小<br>(数百アンペア)                                     | Ⓧ<br>(数千アンペア)                            |
| スイッチング損失  | Ⓧ                                                 | 大                                        |
| スナバ損失     | Ⓧ                                                 | 大                                        |
| スイッチング周波数 | Ⓧ<br>(~3 kHz)                                     | 小<br>(~500 Hz)                           |
| ゲート(駆動電力) | 電圧駆動<br>(Ⓧ)                                       | 電流駆動<br>(大)                              |
| 大容量化      | 集約効果小                                             | 集約効果大                                    |
| 特長        | 小容量インバータに最適<br>↓<br>1モータ制御, 2モータ制御<br>高周波スイッチング可能 | 大容量インバータに最適<br>↓<br>8モータ制御<br>高耐圧・大電流化可能 |

とし、DC1,500 V架線向け制御装置用素子として、非絶縁の冷却器に直接取付ができるような構造とした。

IGBTの特長をGTOと比較して表1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。

### 3.2 低騒音インバータ

従来、車両用インバータの騒音低減では、次の2点についての改善が望まれていた。

- (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

PWM(Pulse Width Modulation)制御電圧インバータでは、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。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。今回、素子耐圧を考慮し、架線電圧1,500 Vを2分割し、その中性点電位を出力電位の一つとして利用する3レベル型とした。これにより、IGBTによる高周波化とともに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た。

また、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。インバータ方式に対する主電動機電流の違いを図2に示す。これらの効果により、従来比で-15 dBの低減効果を得た。

### 3.3 ノンフロン化

IGBTは内部絶縁構造を採用しており、冷却部での絶縁は不要となった。これにより、従来主回路素子の絶縁も兼ねていたフロン系冷媒に代わり、冷却性能の高い水冷媒非圧接型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慮が可能となり、IGBT、スナバ回路部品、ゲートドライブユニットなどをおのおの平面実装し、これらを階層状に組み

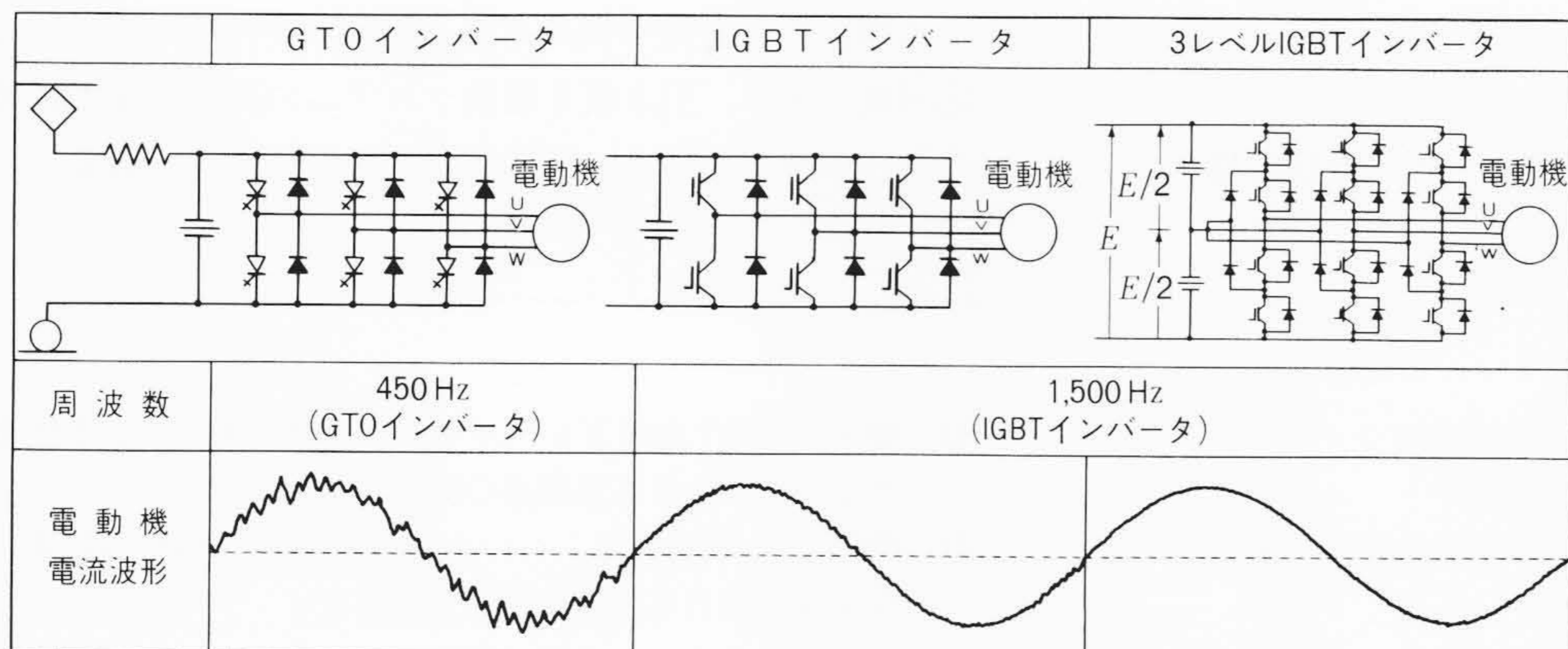


図2 インバータ方式と電動機電流波形の違い

スイッチ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。

立てて主要電気品をユニット化することができた。

### 3.4 メンテナンスフリー・小型・軽量化

パワーユニットは、冷却用ファンやフィルタを必要としない自然冷却方式とした。また、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を可能にするなど、迅速で容易な保守取り扱いを図っている。制御回路のリレーの大部分をソフトウェアに取り組み、最小限必要なリレーは密封型リレーを採用し、メンテナンスフリー化を図った。

IGBTは素子の特性上、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。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。

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%低減して余裕のある点検スペースを実現するとともに、取付を容易にした。

## 4 IGBTインバータを支える主な技術

### 4.1 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、全域非同期制御とした。また、PWM制御モードとしては、低速時に正負パルスを交互に出力し交流出力を不連続なく制御するダイポーラ、中速時に交流出力極性に合わせて正または負のパルスを出力するユニポーラ、高速時に最大電圧の矩(∩)形波インバータ出力をする1パルスの三つのパルスモードとこれらの間をつなぐ部分ダイポーラ、および過変調の変調モードにより、全域電圧連続PWM制御を実施した。

### 4.2 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

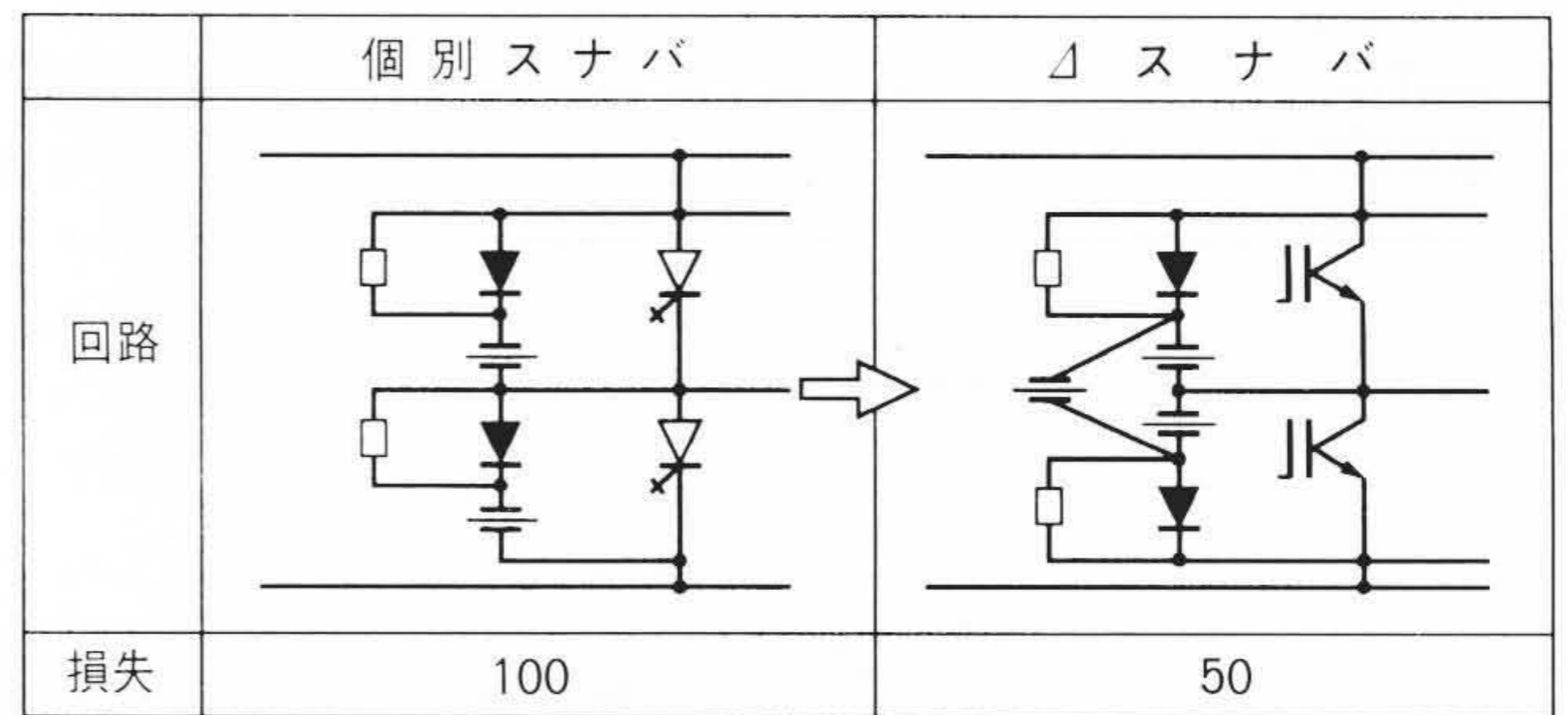


図3 Δスナバ回路

スナバコンデンサをデルタ形に接続することで余剰電荷を電動機側に回生し、損失を50%低減できる。

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。

今回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3に示す。この回路は、スイッチング時のスナバへの充電を一部負荷側に吐き出すことによってスナバ損失を低減するもので、従来の個別スナバ回路に比べ約半分の損失とすることが可能となった。

## 5 おわりに

IGBTの2,000V耐圧化により、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のニーズにこたえている。また、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。

このシステムは今後の主流として次世代のニーズに対応可能であり、引き続き駆動システムの開発・適用に努力し、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: 低損失スナバ回路の車両用インバータへの適応, 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: 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方式, 電気学会産業電力電気応用研究会(1993)