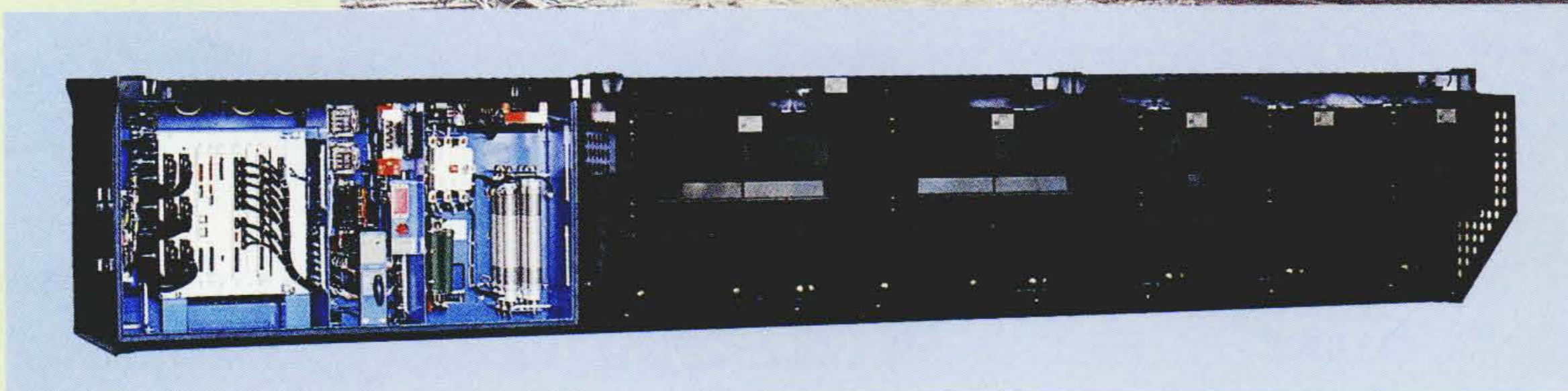


# 最近のIGBTを適用した電車駆動システム

IGBT Inverter System for Rolling Stock

堀江 哲\* Akira Horie  
中村 清\*\* Kiyoshi Nakamura  
伊藤 謙\* Ken Itô

731系交流電車



IGBTを使用した3レベルPWM主変換装置

## 北海道旅客鉄道株式会社納め731系交流電車

この731系交流電車には、IGBTを使用した3レベル電力回生付きPWM主変換装置を搭載している。この装置により、高調波成分の大幅な低減を図ることができた。

わが国の鉄道車両の主電動機駆動方式としてはVVVF(Variable Voltage Variable Frequency)インバータ制御方式が主流となっている。VVVFインバータは、当初GTO(Gate Turn-off Thyristor)を用いた2レベルインバータであったが、近年は装置の小型化や騒音の低減をねらって、IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor:絶縁ゲート型バイポーラトランジスタ)素子を適用した3レベルインバータが主流になりつつある。

日立製作所は、JR在来線電車をはじめ公民鉄道用にIGBTを適用した各種の制御装置を開発した。これらの

中には、閑散線区での電気ブレーキを有効に活用するためのブレーキチョップシステムや、短編成でのSIV(静止型電源装置)の故障時にVVVFインバータでバックアップするなどの特徴を兼ね備えているものもある。

IGBT車両駆動システムは、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凝らしたもので、次の時代にふさわしい車両駆動システムと言える。

\*日立製作所 水戸工場 \*\*日立製作所 交通事業部 工学博士

## 1. はじめに

電気鉄道車両用の駆動システムは、直流電動機駆動システム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。この方式は、主回路素子であるGTO(Gate Turn-off Thyristor)の高耐圧・大容量化に並行してDC750 V用からDC1,500 V用へ、また170 kW級4台制御から150 kW級8台制御へとその応用が拡大されてきた。しかし、GTOは動作速度の限界からスイッチング周波数に起因する主電動機のような音が大きいこと、大きなドライブパワーを必要とすることなどの点でその改良が望まれてきた。

このような状況の中で、最近では電気鉄道車両駆動システムの主回路素子としてIGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)の適用が一般的になりつつある。ここでは、IGBT車両駆動システムの特徴と応用例について述べる。

## 2. IGBTインバータの特徴

### 2.1 静音化インバータ

車両用インバータの騒音の低減については、(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の2点に考慮する必要がある。

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1,800 Hzと従来の約3倍に増加することによって達成できた。また低速域(速度0~40 km/h)では、IGBTのスイッチング周波数を一定に保つことが可能となる全域非同期電圧連続PWM(Pulse Width Modulation)制御により、インバータ周波数に依存した音色変化を抑えることが可能になった。

以上の二つの制御方式を採用することにより、騒音レベルは従来車に比べて-15 dBの低減効果を得ることができた。

### 2.2 ノンフロン化パワーユニット

IGBTは内部絶縁構造を採用することにより、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を平面実装し、さらにこれを階層状

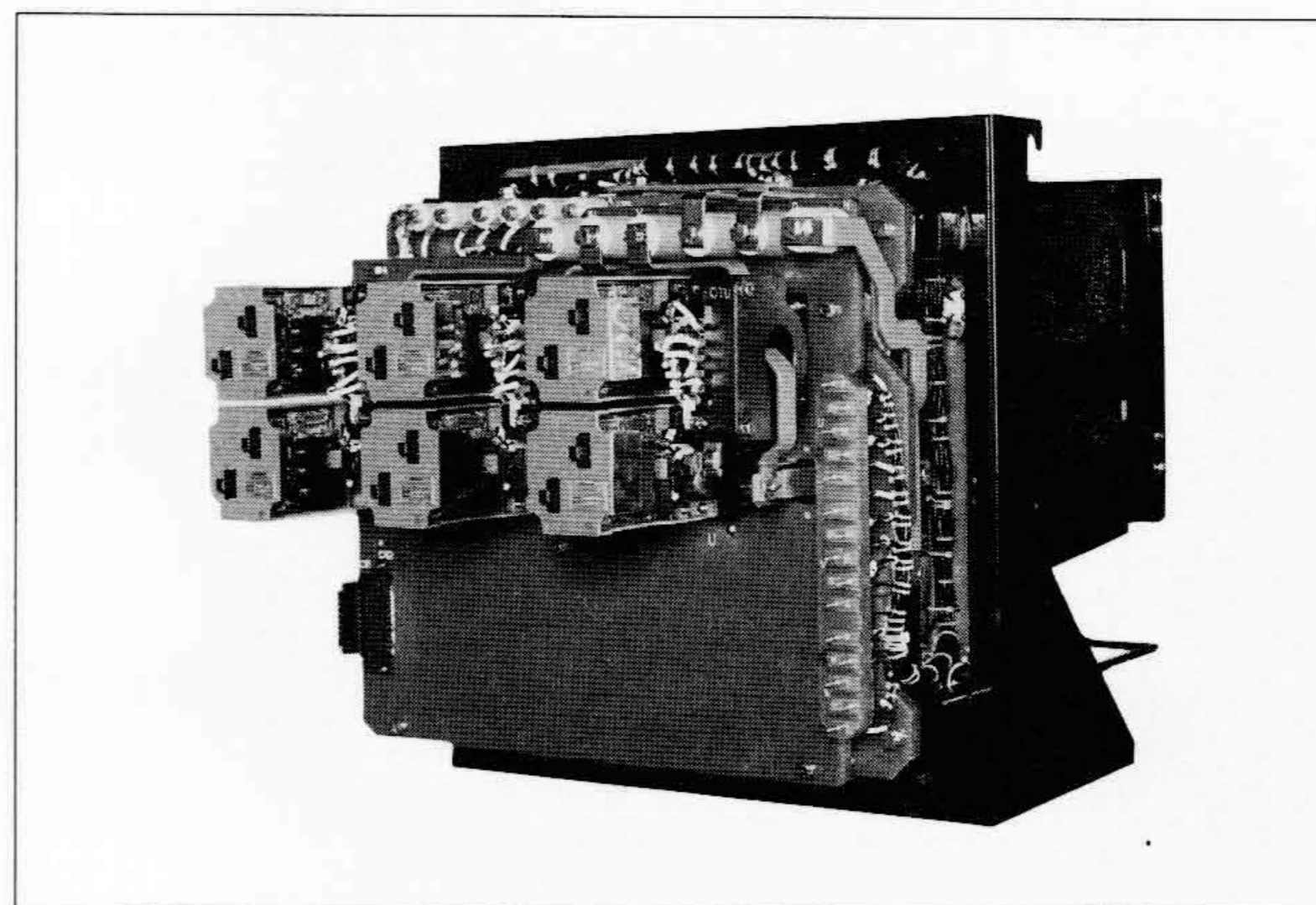


図1 3相一体型パワーユニットの外観例  
U相、V相、W相の3相を一つの筐(きょう)体にまとめて装置全体の小型・軽量化を図った。

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。U相、V相、W相の3相一体としたパワーユニットの外観例を図1に示す。

### 2.3 低損失スナバ回路

小型化・省エネルギー化を図るためには、スナバ回路の低損失化が重要である。そこで、これまでに実績のある $\Delta$ スナバ回路を基本としてさらに信頼性を高め、エネルギーロスが減らすことができるようにスナバダイオードを省略し、コンデンサや抵抗器だけで構成するシンプル $\Delta$ スナバ回路を実現した。

従来の $\Delta$ スナバ回路とシンプル $\Delta$ スナバ回路の基本構成を図2に示す。スナバコンデンサを $\Delta$ 形に接続することにより、スナバコンデンサの容量を低減しながらターンオフ時のはね上がり電圧を効果的に抑制することができる。同時にスナバエネルギーの回収機能も備えており、インバータ装置の高効率化を図ることができる。このスナバエネルギーの回収機能は、スナバコンデンサに蓄積されたエネルギーの一部を、IGBTの転流の際に負荷側

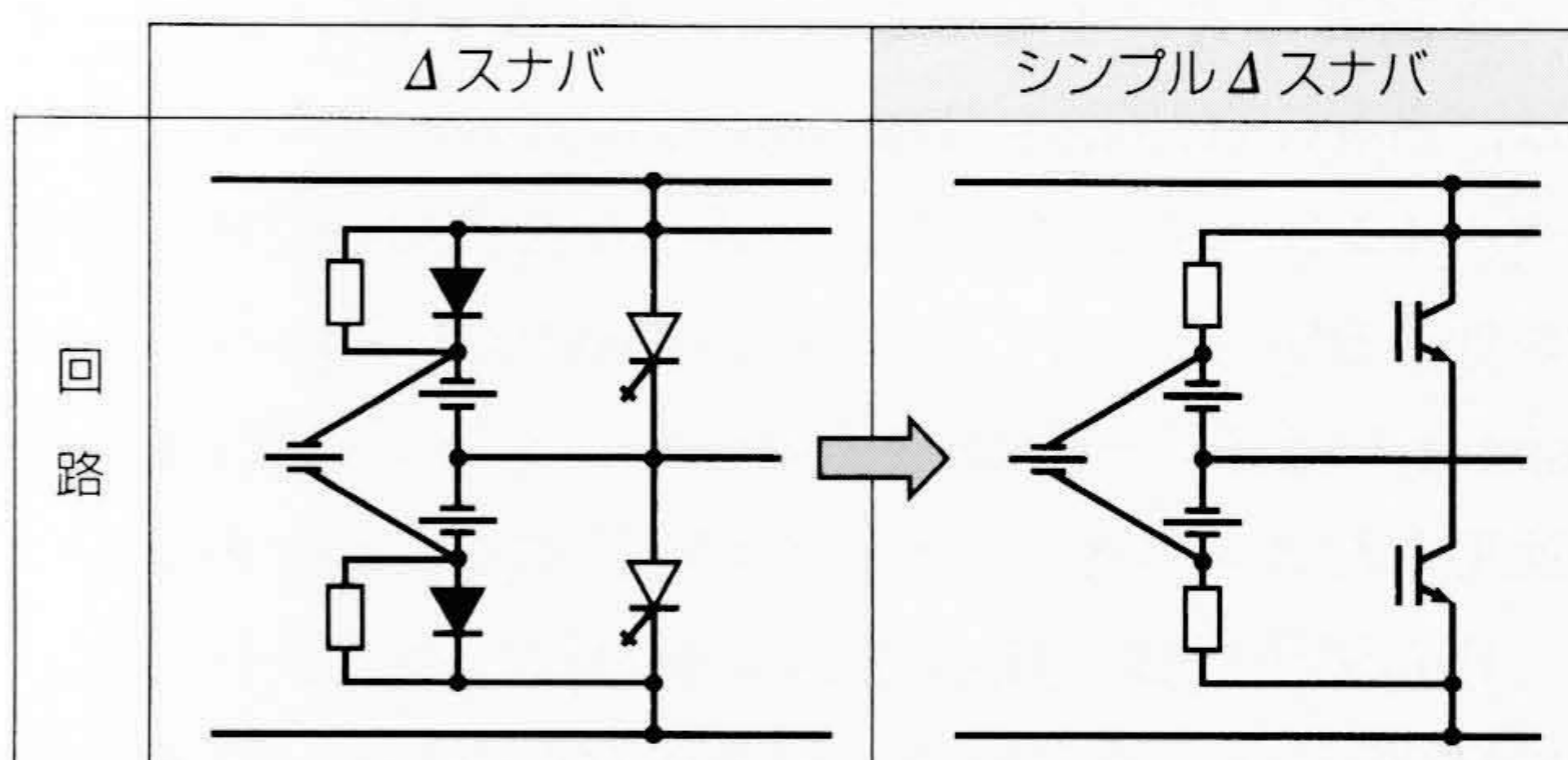


図2 シンプル $\Delta$ スナバ回路  
スナバコンデンサをデルタ形に接続することにより、高信頼で小型・低損失のスナバ回路を実現することができた。

表1 最近の主なIGBT車両駆動システムの納入事例  
現在営業運転中のIGBTインバータ装置を示す。

顧客名	営業運転開始	車種	車両編成	編成数	制御容量 (1群当たり)	インバータ出力 (1セット当たり)	最高速度 (km/h)	加速度 (km/h/s)	減速度 (km/h/s)
帝都高速度交通営団	1993年3月	03系	4M4T	10	190 kW×2台	762 kVA×4群	110	3.3	4
帝都高速度交通営団	1994年8月	02系	3M3T	7	120 kW×2台	460 kVA×4群	80	3.2	4
帝都高速度交通営団	1994年12月	07系	4M6T	4	205 kW×1台	510 kVA×4群	110	3.3	3.5
北海道旅客鉄道株式会社	1995年6月	721系	1M2T	1	230 kW×2台	1,285 kVA×2群	120	2.2	4.7
西日本旅客鉄道株式会社	1995年8月	223系	3M5T	4	220 kW×1台	440 kVA×4群	130	2.5	4.3
札幌市交通局	1995年11月	5000系	3M3T	3	150 kW×2台	670 kVA×4群	70	4	4
東日本旅客鉄道株式会社	1995年12月	E351系	4M4T	2	150 kW×4台	793 kVA×2群	130	1.7	5.2
京王帝都電鉄株式会社	1996年1月	1000系	2M3T	2	180 kW×4台	1,388 kVA×1群	100	2.6	3.7
帝都高速度交通営団	1996年3月	9000系	4M4T	9	190 kW×2台	808 kVA×4群	110	3.3	3.5
近畿日本鉄道株式会社	1996年6月	16400系	1M1T	2	160 kW×2台	660 kVA×2群	120	2.5	4
大阪府都市開発株式会社	1996年7月	7000系	3M3T 2M2T	1 1	170 kW×4台	1,390 kVA×1群	120	2.5	3.7
西日本旅客鉄道株式会社	1996年7月	283系	1M2T	1	220 kW×1台	433 kVA×4群	130	2.1	4.3
帝都高速度交通営団	1996年9月	6000系	6M4T	2	160 kW×2台	846 kVA×4群	110	3.3	3.7

に吐き出す動作によって実現しており、スナバ回路を複雑化することなく、高信頼で小型・低損失のスナバ回路を実現することができた。

### 3. 最近のIGBT車両駆動システム

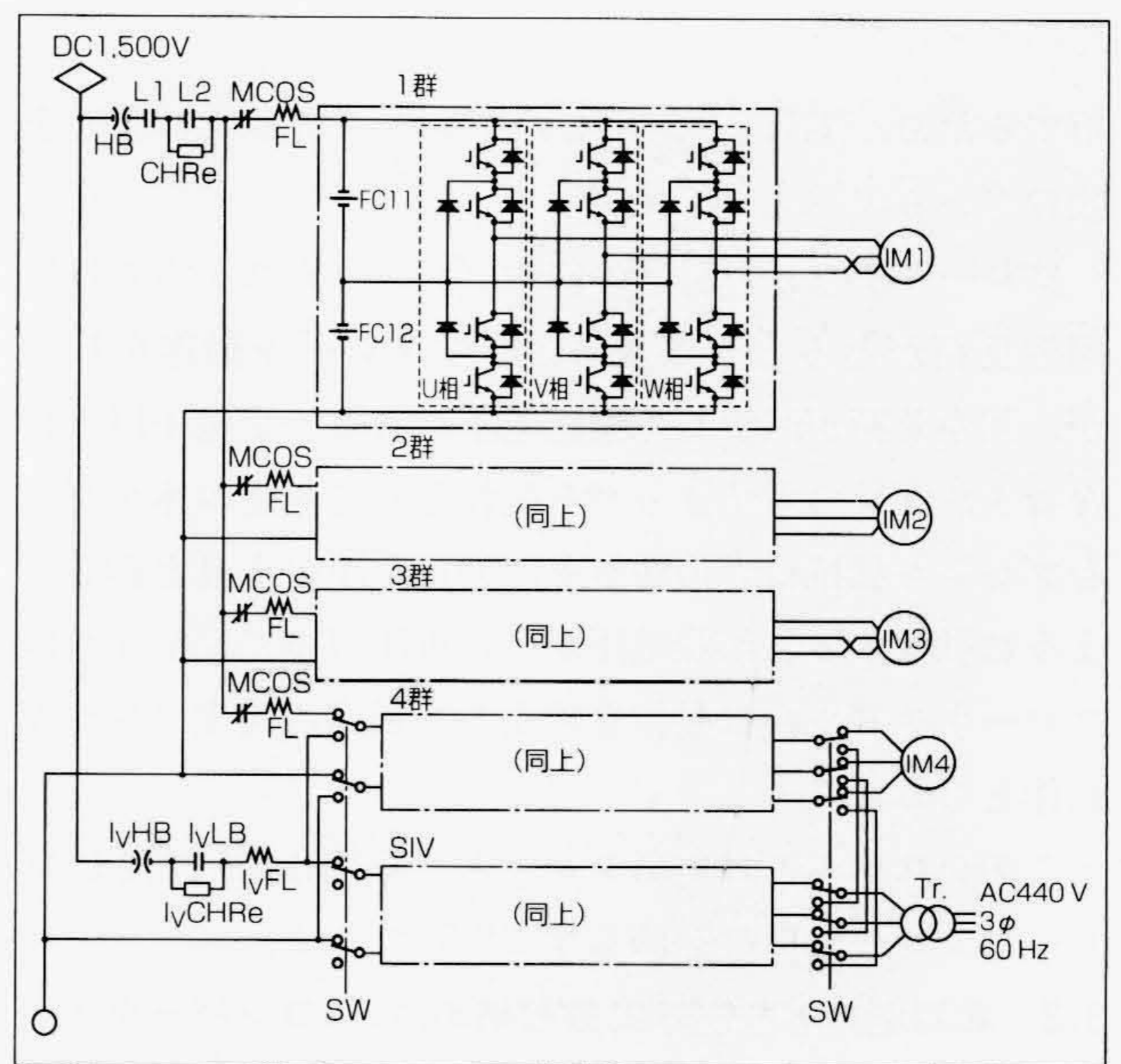
最近の主なIGBT車両駆動システムの納入事例を表1に示す。同表は、このシステムを導入した車両の制御容量、インバータ出力、加減速度などを示したものである。この章では、JR在来線用に開発したIGBT車両駆動システムの代表的な事例の仕様や構成の概要について述べる。

#### 3.1 西日本旅客鉄道株式会社納め223系1000代・283系車両制御装置

西日本旅客鉄道株式会社は、今後の車両駆動システムの標準形とするように223系1000代電車を開発した。主回路簡略構成を図3に示す。主電動機は220 kWとし、各群個別制御が可能である。このシステムは、1編成に搭載する制御装置の数が少ない場合に適する。万一のインバータ故障時では群ごとに開放が可能であり、開放単位を1モータ当たりの最小限に抑えることができる。これにより、電車システムとしての安全性を高めている。また、車両駆動用制御装置と同一箱内に120 kVA出力のSIV(静止型電源装置)を搭載し、制御装置全体としての小型・軽量化を図った。1編成にSIVが1台しかない電車システムを考慮し、SIVが万一故障したときはナイフスイッチを手動で切り換えることにより、4群目のインバータをSIVとして運転することができるようにした。283系電車もほぼ同一のシステム構成であり、SIVの出力が140 kVAに出力アップした点異なる。

#### 3.2 東日本旅客鉄道株式会社納めE351系インバータ装置

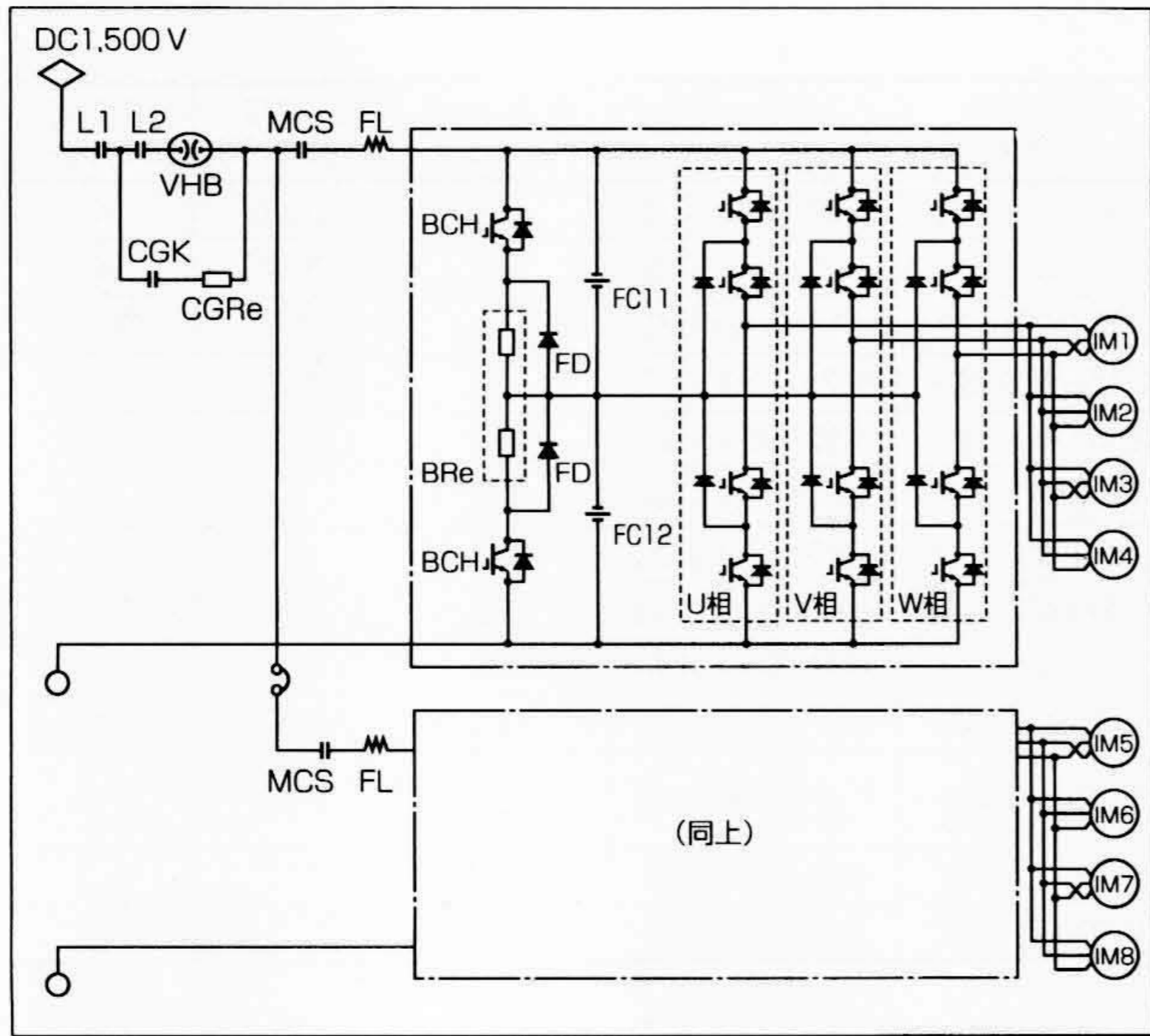
東日本旅客鉄道株式会社は、E351系2次車用のIGBTインバータ制御装置を開発した。主回路簡略図を図4に示す。このシステムでは、1台のインバータで150 kWの主電動機4台を一括制御する。このため、325 AのIGBTを4個並列使用とし、大容量化に対応している。一般に、列車本数の閑散区間では回生ブレーキが失効しやすくなる。そこでこのシステムでは、電気ブレーキを有効に活



注：略語説明  
HB(High-speed Breaker), L(Line Breaker)  
MCOS(Motor Cutout Switch), FL(Filter Reactor)  
CHRe(Charging Resistor), I<sub>v</sub>(Inverter)  
FC(Filter Condenser), SIV(Static Inverter)  
IM(Induction Motor), Tr.(Transformer), SW(Switch)

図3 直流・近郊電車(223系1000代)車両制御装置の主回路簡略図

SIV故障時にはスイッチを切り換えることによって4群をSIVとして動作させることができる。



注：略語説明 VHB(Vacuum High-speed Breaker)  
 MCS(Motor Cutout Switch)  
 CGK(Charging Contactor)  
 CGRe(Charging Resistor)  
 BCH(Braking Chopper)  
 FD(Freewheel Diode)  
 BRe(Braking Resistor)

図4 直流・特急電車(E351系)インバータ装置の主回路簡略図

VVVFインバータが回生動作中に、回生負荷が減少して架線電圧が一定電圧以上になると、BCHが動作して回生エネルギーをBReで消費させる。

用するため、IGBTを適用したブレーキチョップ装置を設けている。

ブレーキチョップ付きの回生ブレーキシステムでは、回生負荷があるときは通常の回生ブレーキ動作を行うが、回生負荷が減少して架線電圧がある一定電圧以上になると、ブレーキチョップを動作させて回生エネルギーをブレーキ抵抗器で消費させ、架線電圧の上昇を抑えるように動作する。架線電圧が一定電圧以下に復帰すればブレーキチョップは動作を停止し、通常の回生ブレーキ動作となる。

このシステムでは電気ブレーキが有効に活用でき、ブレーキシューの磨耗を減らすことができる。

### 3.3 北海道旅客鉄道株式会社納め721系コンバータ・インバータ装置

交流電車の制御装置として、従来のサイリスタ位相

制御による他励コンバータや、GTOを用いたPWMコンバータが実用化されている。今回、以下のことを目的として、IGBTを用いた3レベルコンバータ・インバータ装置を開発した。

- (1) 高調波成分の低減による低誘導障害化
- (2) 三次高調波フィルタなどの地上設備への負担の低減
- (3) 電流波形改善による主変圧器やモータから発生する騒音の低減

PWMコンバータではフィルタコンデンサの充電回路が必要になるが、主変圧器の三次巻線(AC400V)から充電する方式を採用し、装置の小型化とメンテナンスの省力化を図った。

この装置は721系電車に搭載して各種試験を実施したあと営業運転に投入されており、今後731系新形式電車として量産化される予定である。

## 4. 今後の動向

以上述べたような多数のメリットを持つ電気車駆動用IGBTインバータシステムに対するニーズは、今後も増加するものと考えられる。IGBT素子の電流容量の増加によって1台のインバータで8台の主電動機の一括制御を可能とするインバータの大容量化、IGBT素子のいっそうの高耐圧化による部品点数の削減と、小型・軽量化を目的とした2レベルインバータの実現など、IGBTインバータに対するニーズは多様化していくものと考えられる。

## 5. おわりに

ここでは、最近のIGBT車両駆動システムの概要および今後の動向について述べた。

IGBTインバータでは、主電動機電流のリプル低減による低騒音化、フロン系の冷媒を使わずに素子を冷却する水冷却方式の採用、主回路損失の低減、制御の無接点化による保守の低減などを実現してきた。

これらは、対環境性の改善、ランニングコストの低減、メンテナンスフリーなど多様化するニーズにこたえている。

今後は、インバータの大容量化と、いっそうの小型・軽量化に向けて努力していく考えである。

## 参考文献

- 1) 神保, 外: 高耐圧IGBTを用いた新しいインバータ制御システム, 日立評論, 76, 5, 373~378(平6-5)
- 2) 堀江, 外: IGBTを用いた交流電気分動用3レベルコンバータ・インバータ装置の開発, 電気学会産業応用部門全国大会(1995)
- 3) 仲田, 外: 3.3kV IGBT応用車両駆動用2レベルインバータの開発, 電気学会産業応用部門全国大会(1996)