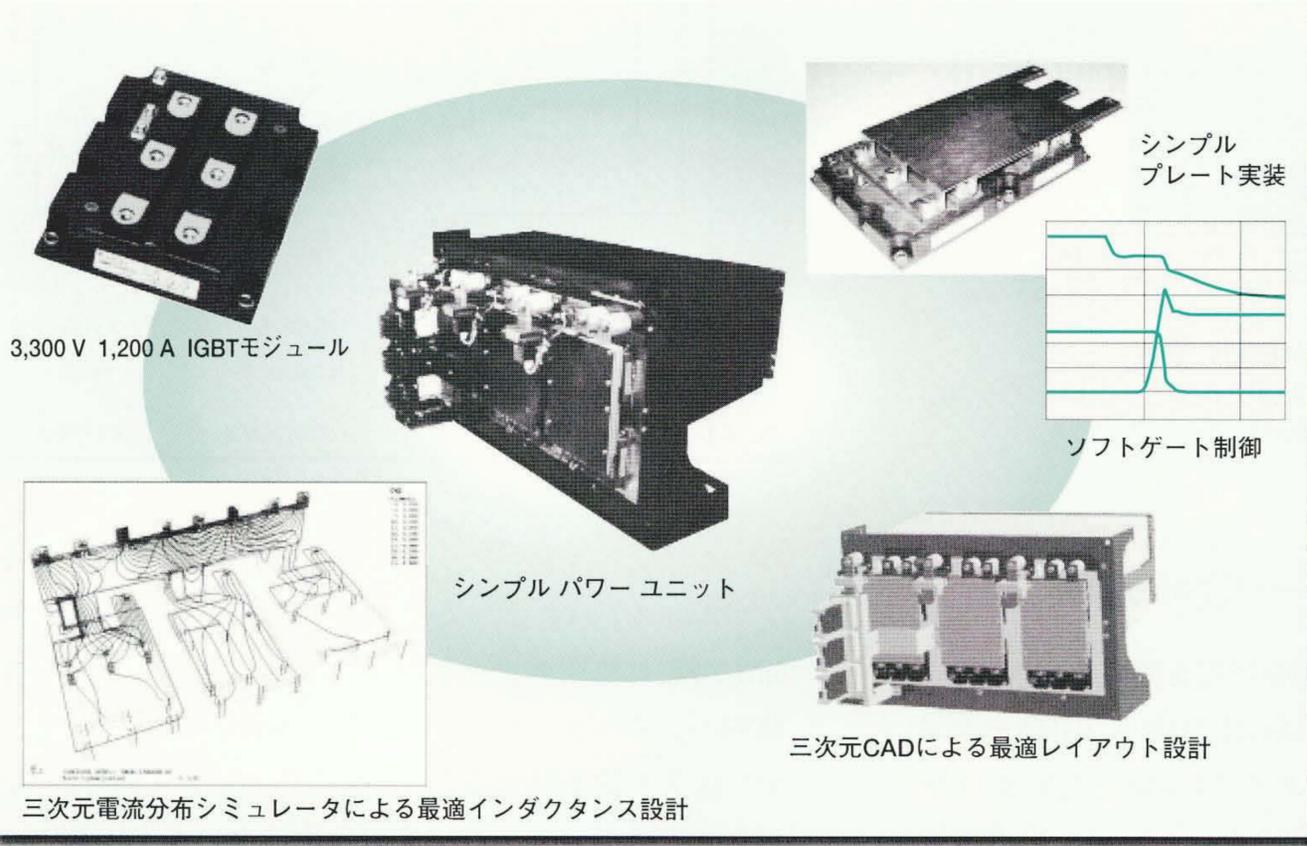


鉄道車両用1,500 kVAの小型・高効率インバータ

1,500 kVA Compact and Highly Efficient Traction Inverter for Electric Multiple Units

仲田 清 Kiyoshi Nakata 関澤俊彦 Toshihiko Sekizawa
長洲正浩 Masahiro Nagasu 原 康浩 Yasuhiro Hara



注：略語説明

IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)

鉄道車両用シンプルインバータとそれを支える技術

3,300 V 1,200 A IGBTモジュール、低インダクタンス実装、ソフトゲート制御による主回路部品最少化技術とその開発ツールにより、4個のモータを一括駆動する小型・大容量インバータを実現した。

近年のパワーエレクトロニクス技術の飛躍的進歩により、小型・軽量、高効率、低騒音、環境適合性などの数々のメリットを備えたIGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)応用インバータが実用化され、鉄道車両駆動制御システムに広く採用されている。最近では、3,300 V 1,200 A IGBTモジュールの登場に伴い、主回路部品点数の削減による小型・軽量化を目的とした2レベルIGBTインバータが実用化段階に入ってきており、小型・軽量で高効率の流れは今後も続くものと予想される。

日立製作所は、この動向に合わせて、3,300 V 1,200 A IGBT応用の鉄道車両駆動用1,500 kVA小型・シンプルインバータを開発し、車体のぎ装スペースを最小化するための小型・軽量化と、高信頼・省保守のための部品数削減および構造単純化を図った。このため、三次元電流分布シミュレータや三次元CADなどのCAEツールを駆使し、低インダクタンスで高信頼な絶縁構造のシンプルプレート実装技術や、IGBTがスイッチングする際に発生する損失を増加させることなく、モータなどの機器や誘導障害に悪影響を及ぼす可能性のあるスイッチング時の出力電圧 dv/dt を効果的に抑制するソフトゲート制御技術などを開発し、適用した。

1 はじめに

近年のパワーエレクトロニクス技術の飛躍的進歩により、鉄道車両の分野でも目覚ましい性能向上が図られてきた。

特に、耐圧2,000 VのIGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)モジュールを応用した3レベルインバータが1993年に実用化されて以来、この方式のインバータは、その特徴である小型・軽量、高効率、低騒音、環境適合性など数々のメリットのために、多くの車両駆動制御システムに採用されている。

一方、最近のIGBTの高耐圧・大電流化の急速な進展に伴い、従来の4,500 V GTO(Gate Turn-off Thyristor)の容量に匹敵する3,300 V 1,200 A IGBTモジュールが登場した。主回路部品点数の削減による小型・軽量化を目的とした2レベルIGBTインバータも登場し、すでに実用化段階に入っている。この小型・軽量で高効率の流れは、今後も続くものと予想される。

ここでは、いっそうの小型・軽量と、高信頼、高効率を目指して開発した、3,300 V 1,200 A IGBT応用の鉄道車両駆動用1,500 kVAシンプルインバータの主回路システムとその特徴などについて述べる。

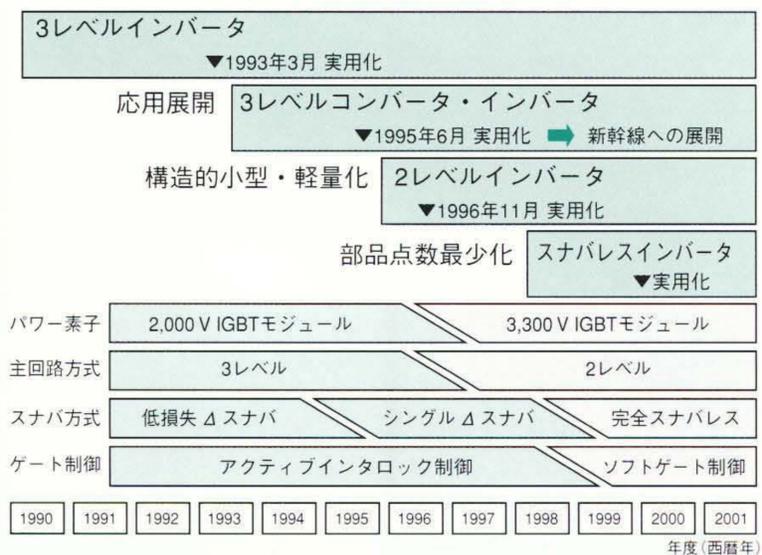


図1 鉄道車両用IGBTインバータ技術の変遷
3,300 V IGBTによって2レベル主回路を実現し、いっそうの小型・軽量、高信頼化をねらってスナバレスへと進化した。

2 車両用IGBTインバータ技術の変遷

車両用IGBTインバータの開発経過を図1に示す。日立製作所は、1993年に車両用の高耐圧2,000 V IGBTモジュールを開発し、これを使用した直流1,500 V 架線向け3レベルIGBTインバータを実用化した。さらに、交流電気車用として3レベルコンバータ・インバータに応用展開を図り、最近では、適用範囲を新幹線電車にまで拡大してきている。これらには、低損失Δスナバ回路や、IGBTの動作状態を常時監視して異常時に主回路を保護する、アクティブインタロック型ゲート制御機能を適用している。

一方、高圧・大容量の3,300 V 1,200 A IGBTモジュールの応用によって主回路を2レベル化し、小型・軽量を実現した2レベルインバータを実用化した。スナバ回路には、スナバダイオードを省略した、シンプルΔスナバ方式を採用している。

今回、低インダクタンス主回路とスイッチング時の急峻(しゅん)な電圧変化を緩和するソフトゲート制御とを組み合わせることにより、スナバ回路を完全に排除し、部品点数の最少化と構造の単純化を図った、2レベル方式のシンプルインバータを開発した。

3 小型・シンプルとするための課題

主回路を小型・シンプルとするには、スナバ回路の省略がポイントになる。スナバ回路方式とその特徴の比較を表1に示す。一般的な個別スナバでは、スナバ回路に蓄えられたエネルギーの大部分が抵抗で消費される。シ

表1 スナバ方式の特徴比較

スナバ回路の省略によって主回路部品点数を最少化し、装置の小型・軽量、高信頼化を図った。

項目	個別スナバ	シンプルΔスナバ	スナバレス
回路構成			
特徴	コレクタ電流 コレクタ電圧 素子に加わる過電圧を抑制	同左機能に加え、スナバCのエネルギーを負荷側に掃出す。	主回路インダクタンス低減が必須
損失	スナバ損失：100%	50%程度	スナバ損失なし

ンプルΔスナバでは、スナバコンデンサの電荷をIGBTの転流の際に負荷側に掃き出すことができ、また、IGBT個別のスナバコンデンサ容量を小容量にできるので、スナバ損失を約半減することができる。これに対し、スナバレス方式ではスナバ損失の発生はないが、IGBTターンオフ時の跳ね上がり電圧を抑制するために、主回路インダクタンスの低減が必須である。

完全スナバレスを実現するための課題と対応策を表2に示す。これらの課題を解決するには、主回路インダクタンスを最適化(最小化と最適分布)するブス構造と、IGBTスイッチング時の波形制御が重要となる。

4 開発品の特徴

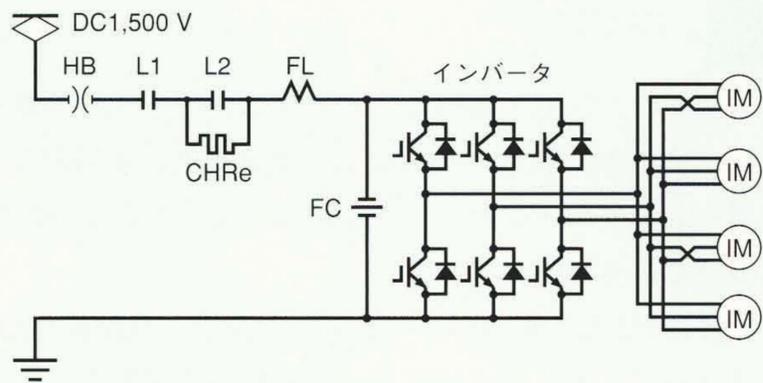
4.1 主回路システム

今回開発したシンプルインバータの主回路構成を図2

表2 スナバレス化の課題と対応策

スナバレスのための課題を解決するには、主回路インダクタンスを最適化するブス構造と、スイッチング波形制御が重要となる。

課題	対応策
電流遮断時の跳ね上がり電圧の抑制	主回路インダクタンスの低減
主回路ブスの局部加熱と応力集中の排除	インダクタンス分布の最適化(ブス電流均一化)
IGBTモジュール内発熱の均一化	インダクタンス分布の最適化(素子端子電流均一化)
誘導障害と、モータなど機器絶縁への影響排除	ソフトゲート制御によるdv/dt抑制
絶縁信頼性の確保	主端子用貫通穴のない絶縁構造



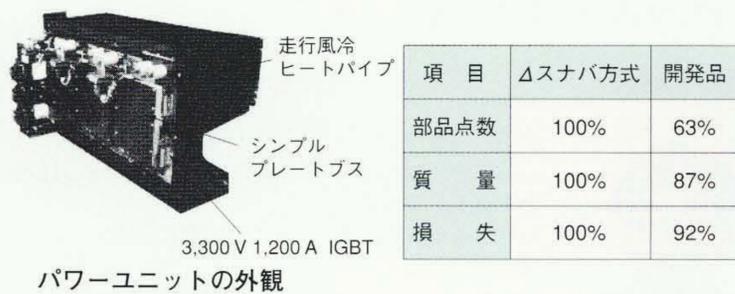
注：略語説明 HB (High-speed Breaker)
L (Line Breaker)
CHRe (Charging Resistor)
FL (Filter Reactor)
FC (Filter Capacitor)
IM (Induction Motor)

図2 主回路構成

3,300 V 1,200 A IGBTの応用により、4個のモータ制御も可能な1,500 kVAインバータを完全スナバレスで実現した。



インバータ装置の外観



パワーユニットの外観

図3 開発装置の外観

パワーユニットの部品点数を37%、質量を13%それぞれ低減するとともに、8%以上の損失を低減した。

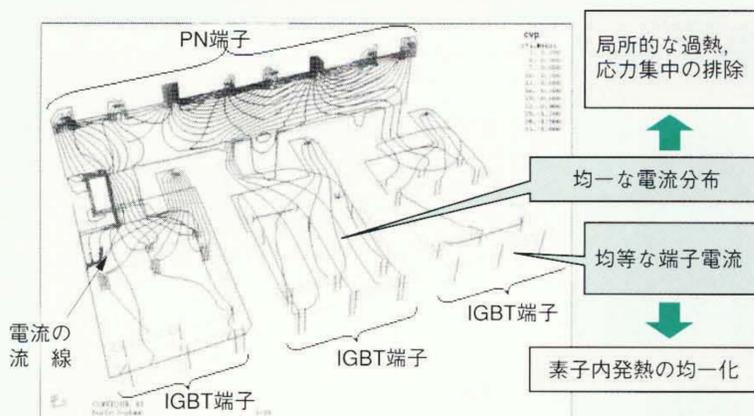


図4 電流分布シミュレータによるブスの最適設計の仕組み

独自の三次元電流分布シミュレータの活用により、バス構造の最適化を高精度かつ高効率に進めることができる。

表3 主回路の主な仕様

低インダクタンス、高信頼のシンプルプレート実装、 dv/dt をアクティブに制御するソフトゲート制御などを採用することにより、スナバ回路を省略した。

項目	仕様
電気方式	DC1,500 V(DC900~1,800 V)
主回路方式	2レベルインバータ
使用素子	3,300 V 1,200 A IGBTモジュール
実装方式	シンプルプレート実装
スナバ方式	完全スナバレス
パワーユニット構成	3相一体型
ゲート制御	dv/dt 制御型ソフトゲート制御
冷却方式	走行風冷ヒートパイプ(水冷媒)
最大制御容量	1,500 kVA

に、インバータ装置とパワーユニットの外観を図3に、主回路システムの主な仕様を表3にそれぞれ示す。従来のシンプルΔスナバ方式に比べ、部品点数を37%、質量を13%、素子損失を8%それぞれ低減した。この小型・軽量なパワーユニットにより、4個のモータの一括制御も可能な1,500 kVAの制御容量を、完全スナバレスで実現した。

4.2 主回路ブスの最適設計

今回の開発品では直流1,500 V架線での使用を対象としているため、絶縁の信頼性が重要となる。シンプルな構造で高い絶縁信頼性を確保すると同時に、完全スナバレスに対応する低インダクタンスを実現するシンプルプレートブスを新たに開発し、適用した。これは、平行平板状のブスの間に挟まれた絶縁層に貫通穴のない構造であり、バス形状の最適設計には、ブスの三次元形状から、電流分布と、インダクタンス値を高精度に解析できる電流分布シミュレータを活用した。電流分布シミュレータによる解析結果を図4に示す。これにより、IGBTモジュールの端子電流の均等化と、バス内電流分布の均一化を図った。

4.3 ソフトゲート制御

スナバレス主回路では、スナバ回路によるスイッチング速度の抑制効果がなくなるために、出力電圧 dv/dt が急峻になる。この急峻な電圧をモータに印加すると、インバータと配線、および配線とモータ接続部での反射によって過大な電圧が発生し、モータの絶縁などに悪影響を及ぼす。また、モータの浮遊容量を介してアースに高周波電流が流れると、信号機器に悪影響を及ぼすおそれがある。

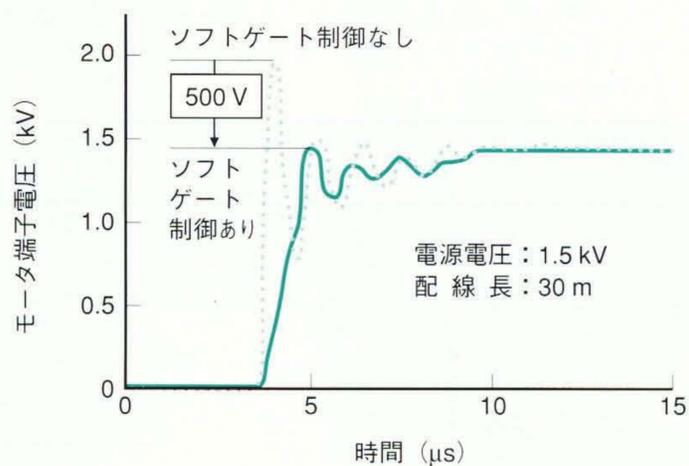


図5 モータ端子部での電圧波形

ソフトゲート制御を適用して dv/dt を抑制することにより、モータ端子電圧の跳ね上がり電圧を、従来の Δ スナバ方式と同等レベルに低減した。

ソフトゲート制御は、車両用スナバレスインバータの高信頼化と低ノイズ化を目的として開発したものであり、ソフト化に伴うスイッチング損失の増加を抑えながら、絶縁や誘導障害に悪影響を与えるスイッチング時の dv/dt を効果的に抑制することができる。

インバータとモータとの配線長が30 mの場合にモータ端子電圧を評価した例を図5に示す。従来のゲート制御では、電源電圧1,500 V時にピーク電圧が約2,000 Vまで達しているのに対し、ソフトゲート制御では、電圧ピークが電源電圧と同等の1,500 Vに抑制されていることがわかる。

また、IGBTのスイッチング動作の進展に伴ってゲート電流をアクティブに制御することにより、スイッチング損失の増加を抑えることが可能である。主回路インダクタンス低減との相乗効果により、従来のシンプル Δ スナバ方式と同等の dv/dt としながら、8%以上の損失低減(素子温度上昇換算)を達成した。

4.4 パワーユニット

パワーユニットでは3相を一つの筐(きょう)体にまとめて小型・軽量を図るとともに、三次元CADの活用によって実装部品のレイアウトと筐体構造の最適化を図った。

冷却器には、環境に優しく冷却性能の高い水冷媒を用いた非圧接型の大容量ヒートパイプを採用し、さらに、ラジエータ部では、走行風を積極的に利用できるように、構造の最適化を図った。

5 おわりに

ここでは、鉄道車両用インバータのいっそうの小型・軽量、高信頼、高効率を目指して開発した、1,500 kVA小型・シンプルインバータの主回路システムとその特徴について述べた。

IGBTに代表されるパワー素子の大容量・高性能化や、マイクロプロセッサ応用技術の進歩は目覚ましく、さらに高性能で信頼性の高い主回路・制御技術が実現できるようになってきており、これらの応用範囲はますます拡大していくものと期待している。

今後も、このようなパワーエレクトロニクス技術の高度化により、「乗る人、環境、使う人」にさらに優しい鉄道車両用インバータを開発し、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) 豊田, 外: 1,500 V架線向け鉄道車両用IGBTインバータ, 日立評論, 77, 3, 231~234(平7-3)
- 2) 堀江, 外: IGBTを用いた交流電気車用3レベルコンバータ・インバータ装置の開発, 平成7年電気学会産業応用部門全国大会, 24(1995)
- 3) 新井, 外: 3.3 kV IGBTを応用した通勤電車駆動用2レベルIGBTインバータの開発, 平成9年電気学会産業応用部門全国大会, 182(1997)

執筆者紹介



仲田 清

1985年日立製作所入社, 電力・電機グループ 水戸交通システム本部 所属
現在, 電車駆動制御システムの開発に従事
電気学会会員
E-mail: ky-nakata@em.mito.hitachi.co.jp



長洲正浩

1992年日立製作所入社, 日立研究所 情報制御第二研究部 所属
現在, 高耐圧IGBTの制御技術の研究開発に従事
電気学会会員, 応用物理学会会員, 画像情報メディア学会会員
E-mail: naga@gm.hrl.hitachi.co.jp



関澤俊彦

1986年日立製作所入社, 電力・電機グループ 水戸交通システム本部 所属
現在, 電車駆動制御システムの設計に従事
E-mail: ts-sekizawa@em.mito.hitachi.co.jp



原 康浩

1995年日立製作所入社, 電力・電機グループ 水戸交通システム本部 所属
現在, 電車駆動制御システムの設計に従事
E-mail: ys-hara@em.mito.hitachi.co.jp