

# アドバンスト NPC 回路用 IGBT モジュール

特集

## IGBT Module for Advanced NPC Circuits

小松 康佑 Kousuke Komatsu

原田 孝仁 Takahito Harada

中澤 治雄 Haruo Nakazawa

アドバンスト NPC (A-NPC: Advanced Neutral-Point-Clamped) インバータを実現するために、新しい IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) モジュールを開発した。A-NPC 用 IGBT モジュールは、第 6 世代 IGBT と FWD (Free Wheeling Diode), 第 2 世代 RB-IGBT (Reverse-Blocking IGBT) を採用することで発生損失を最小化した。各主端子間の内部インダクタンスは 40 nH 以下であり、端子配列は A-NPC インバータのサイズが小さくなるよう最適化した。本製品は、適用装置内のデバイス数の低減に寄与し、発生損失が低く、高いパワー変換効率の電力変換機の開発に貢献できる。

A new IGBT module has been developed to realize advanced NPC (A-NPC: advanced neutral-point-clamped) inverters. The IGBT (insulated gate bipolar transistor) module used for A-NPC minimized power loss by using a 6th generation IGBT and FWD (free wheeling diode), as well as a 2nd generation RB-IGBT (reverse blocking IGBT). The internal inductance between each of the main terminals is less than 40 nH, and the terminal layout was optimized to reduce the A-NPC inverter size. This product can be applied to reduce the number of devices inside equipment, and can also contribute to the development of various types of power conversion equipment having lower power loss and higher power conversion efficiency.

### 1 まえがき

近年、CO<sub>2</sub> 排出量の低減は人類にとって最も重要な課題の一つとなっている。これに対するさまざまな取組みが世界規模で行われている。

この課題を解決するために、パワーエレクトロニクス機器においては、省エネルギーに取り組み、その効果的な方法であるインバータ・コンバータ回路システムを開発し、普及を進めてきた。その応用分野は、モータや電気鉄道、FA システムといった消費型のアプリケーションだけでなく、UPS や風力発電、太陽光発電および燃料電池のような発電・送電・電力供給の分野にまで広がっている。これらのアプリケーションにおいては、電力変換システムの電力変換効率の向上が求められ、多くの研究が行われている。電力変換効率を高める最も効果的な方法の一つであるマルチレベルインバータにおいて、いくつかの NPC (Neutral-

Point-Clamped) インバータが提案されている<sup>(1)</sup>。近年、ダイオードによる中性点クランプを持つ NPC インバータが、AC ドライブ用インバータや UPS などに使われ始めている。図 1 に、従来の 2 レベルインバータとマルチレベルインバータ回路を示す<sup>(注)</sup>。図 1 の出力電圧波形に示すように、マルチレベルインバータの出力電圧波形は理想的なサイン波に近づく。その結果、スイッチングロスの低減やフィルタサイズの小型化に効果を上げている。

しかし、この NPC インバータは、使用する半導体デバイスが多く構成も複雑になる。導通ロスやコストの面から、特に数百 kVA 以下の中小容量装置への適用は困難であるという課題があった。

富士電機は、この課題を解決するために、富士電機独自のパワー半導体の一つである RB-IGBT (Reverse-Blocking IGBT) を中性点クランプに使用し、双方向スイッチとして活用するアドバンスト NPC (A-NPC) 用 IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) モジュールを開発した<sup>(4)</sup>。図 2 に等価回路を示す。

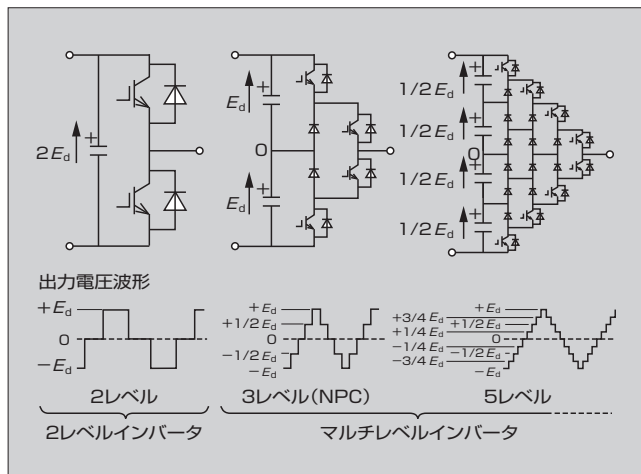


図 1 各インバータ回路方式と出力電圧波形

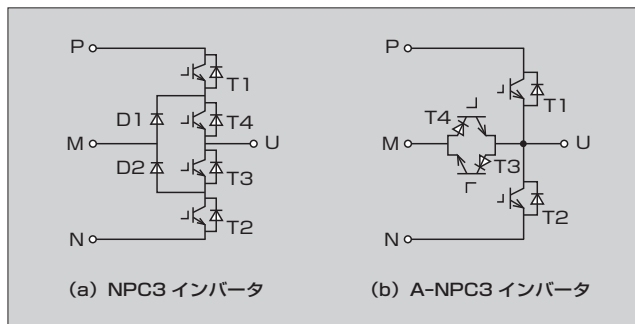


図 2 等価回路

〈注〉 3 レベルインバータ技術：425 ページ「解説」参照

表 1 A-NPC 用 IGBT モジュールの概要

型式名	パッケージ寸法	電圧定格	電流定格
4MBI300VG-120R-54	L110 × W80 × H30 (mm)	1,200 V (メインスイッチ部)	300 A (メインスイッチ部)
		600 V (双方向スイッチ部)	300 A (双方向スイッチ部)



図 3 A-NPC 用 IGBT モジュールの外観

富士電機では、この A-NPC の特長を生かした UPS を開発し、市場に投入することで“エネルギー・環境”分野への貢献を図っている。

本稿では、その概要と技術開発について紹介する。

## 2 A-NPC 用 IGBT モジュールの特徴

### 2.1 定格・外形

表 1 に定格・外形などの概要を、図 3 に A-NPC 用 IGBT モジュールの外観を示す。

4 in 1 パッケージである A-NPC 用 IGBT モジュールは、メインスイッチである T1, T2 が 1,200 V/300 A の IGBT 素子と、双方向スイッチである T3, T4 が 600 V/300 A の RB-IGBT 素子とで構成されている [図 2 (b)]。

T1, T2 は、通常の 2 in 1 モジュールと同じ回路構成である。中間電位は、T3, T4 が逆並列に接続された RB-IGBT を双方向スイッチとしている。

### 2.2 素子の電気特性

#### (1) メインスイッチ

メインスイッチである T1, T2 には、1,200 V 定格の第 6 世代「V シリーズ」IGBT および FWD (Free Wheeling Diode) を採用している。

第 6 世代 V シリーズでは、表面構造の最適化と薄ウェーハ化によりドリフト層の低抵抗化を実現し、オン電圧  $V_{CE(sat)}$  とスイッチング損失を低減している。さらに、ターンオン  $di/dt$  の制御性も改善したので、従来素子と比較して放射ノイズの低減も実現している。

#### (2) 双方向スイッチ

双方向スイッチである T3, T4 には、600 V 定格の第 2

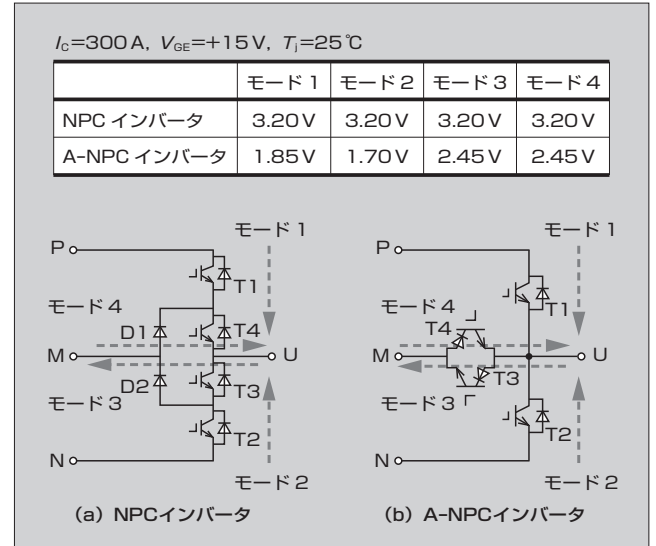


図 4 NPC インバータと A-NPC インバータのオン電圧比較

世代 RB-IGBT を採用している。

RB-IGBT は、従来の IGBT が持ち得なかった逆耐圧性能を持つ半導体デバイスである。双方向スイッチは、従来、IGBT とダイオードで構成しなければならなかった。RB-IGBT を採用すると、逆耐圧保持の役割を担うダイオードが不要になり、オン電圧も低減できる。

図 4 に、従来の NPC インバータと A-NPC インバータのオン電圧の比較を示す。

従来の NPC インバータは、電流経路 (モード 1 ~ 4) のすべてにおいて、IGBT またはダイオードが直列に二つ、あるいは IGBT とダイオードが直列に接続された回路になるため、オン電圧が大きかった。一方、A-NPC インバータは、NPC インバータ比べて 2 倍の電圧定格の素子を T1, T2 に使用することと、T3, T4 に RB-IGBT を使用することによって、モード 1 ~ 4 すべてで導通する素子数を半分にしている。

その結果、A-NPC 3 レベルインバータ用モジュールは、従来の NPC 3 レベルインバータ用モジュールに比べて、スイッチングロス・ノイズは同等ながら導通ロスを約 30% 低減している。

RB-IGBT は、従来の IGBT と基本構造が同じである。そのため、RB-IGBT のスイッチングスピードとオン電圧のトレードオフ特性は、従来の IGBT と変わらない。逆方向電圧を印加したときのリカバリー特性は、従来の FWD と同様の特性である。図 5 に、RB-IGBT のオン電圧とターンオフロスのトレードオフカーブを示す。カーブの傾向は IGBT+FWD と同じであるが、導通する素子が少ない分  $V_{CE(sat)}$  が小さい。

### 2.3 A-NPC インバータ用パッケージ

本製品は、A-NPC インバータを構成するために最適なパッケージを、次の項目に重点を置いて最適化設計を行った。

- (a) 主端子 P, U, N, M は、サージ電圧を低減するためのスナバコンデンサが配置しやすいこと
- (b) 出力端子である U 端子は、制御端子から最も遠い位置に配置し、出力電流が制御信号に影響を及ぼさないこと
- (c) パッケージサイズは、従来品の外形サイズから選択し、可能な限り小さくすること

この結果、端子配列の条件を満たし、M247 同等のパッケージサイズ 110×80 (mm) を達成した。

### 2.4 低インダクタンスパッケージ

回路インダクタンスは、半導体デバイスのターンオフ時に発生するサージ電圧に直接影響を及ぼす。本製品と同じ回路構成を、従来の 2in1 モジュールと 1in1 モジュールで実現しようとする、各モジュールを接続するためのブスバーとパッケージ内部のインダクタンスの合計が 100 nH 以上と大きくなり、A-NPC インバータは実現が困難であった。そこで、本製品は 2in1 モジュールと 1in1 モジュールを一つのパッケージに収めることで、ブスバーのインダクタンス分を大幅に低減した。各電流ルートにおいては、ターンオフ時のサージ電圧を抑制できる従来の 2in1 モジュールと同等のパッケージ内部インダクタンス (P-N, P-M, M-N の各電流ルートにおいて、内部インダクタンス 40 nH) 以下を達成した。

### 2.5 合理化・高信頼性パッケージ

本製品は、半導体デバイスを搭載する DCB (Direct Copper Bonding) 基板を 4 枚に分割することによって、同サイズの従来製品 (M236 1 枚基板仕様) に比べて、熱収縮時に発生する基板および基板下はんだへのストレス

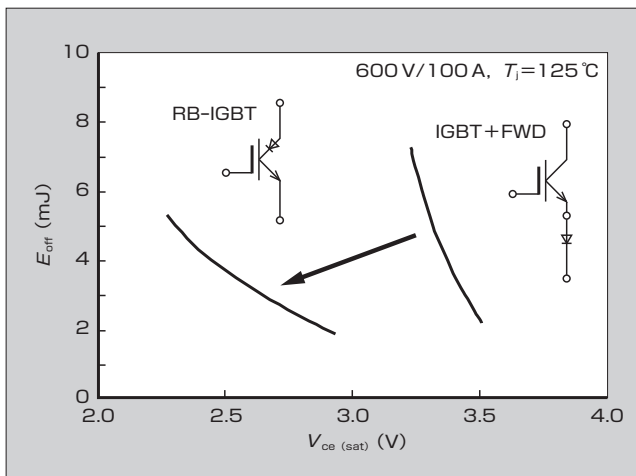


図5 RB-IGBT のオン電圧・ターンオフロスとのトレードオフカーブ

低減を達成した。

図 6 に、温度サイクル試験時に発生する DCB 基板の下のはんだのひずみ量の FEM (Finite Element Method) 解析による比較を示す。高温時、1 枚基板仕様で発生するはんだひずみ量を 1.0 としたとき、4 枚基板仕様では 0.45 であり、ひずみ量が 55% 低減している。

したがって、従来製品に対し、温度サイクル試験耐量など熱膨張・熱収縮に対する信頼性の向上が期待できる。

さらに、環境対策として、欧州の RoHS 指令<sup>(注)</sup>に対応した鉛フリーパッケージとしている。

### ③ 発生損失・電力変換効率

図 7 に、従来の 2 レベルインバータ、NPC 3 レベル

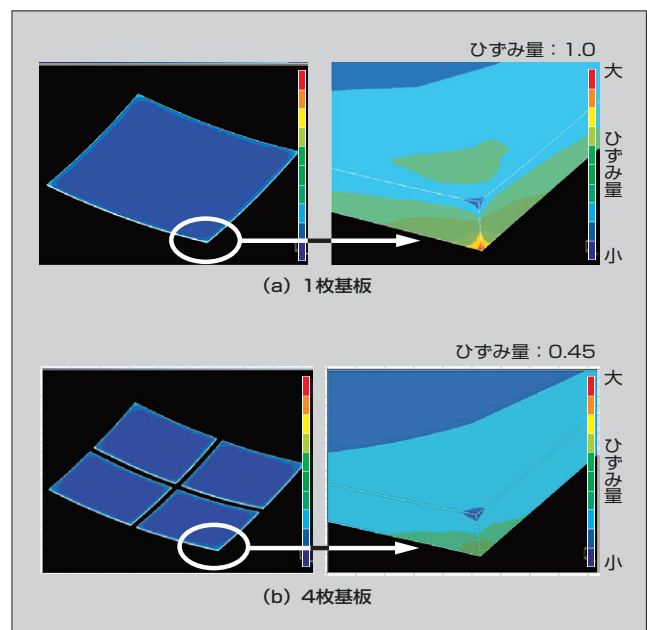


図6 FEM 解析結果 (高温時)

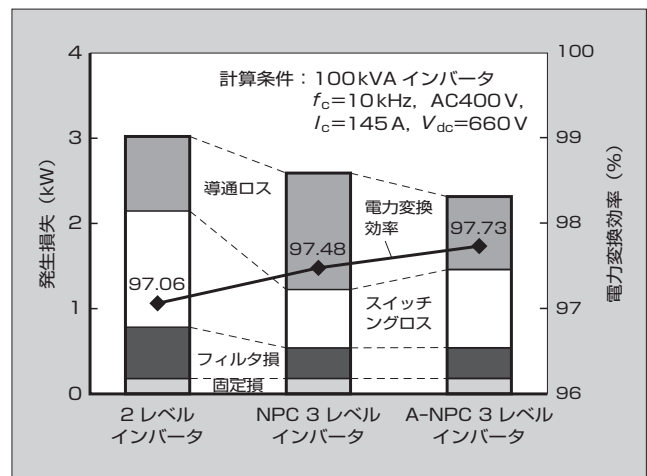


図7 各インバータの発生損失と電力変換効率の比較

〈注〉 RoHS 指令：電気電子機器に含まれる特定有害物質の使用制限についての EU (欧州連合) の指令

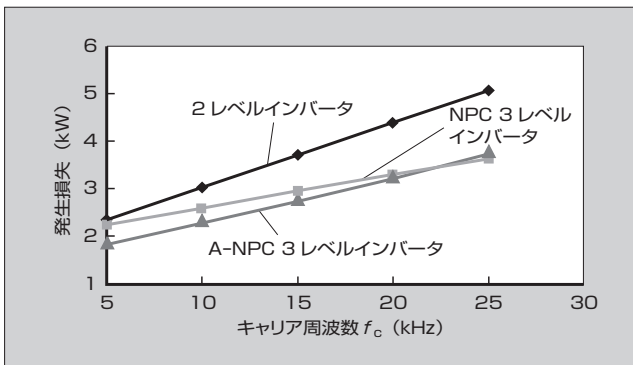


図8 発生損失のキャリア周波数依存性

ンバータ、A-NPC 3レベルインバータを同じ条件で運転したときの発生損失と電力変換効率の比較を示す。

従来の2レベルインバータは、第6世代Vシリーズ1,200Vの特性とし、NPCインバータは、第6世代Vシリーズ600Vの特性をそれぞれ用いた。NPCインバータ用モジュールの内部インダクタンスは、A-NPCインバータ用モジュールと同じと仮定した。

インバータの運転条件は、 $f_c = 10$  kHz、DC電圧 = 660 V、出力電流 = 145 Aとした。その結果、A-NPCインバータの発生損失が最も小さく、従来の2レベルインバータよりも23%、NPCインバータよりも9%低減できる。また、電力変換効率はA-NPCインバータが97.73%で最も高く、NPCインバータよりも0.25ポイント、従来の2レベルインバータよりも0.67ポイント改善できる。

この理由は、次のとおりである。

- (a) フィルタ損低減：3レベル化による出力電圧波形の高周波低減
- (b) スイッチングロス低減：3レベル化によるキャリア周波数低減
- (c) 導通ロス低減：電圧定格の異なるデバイスの組合せおよびRB-IGBTの採用

また、図8に発生損失のキャリア周波数依存性比較を示す。基本的に、2レベルインバータに比べて、3レベルインバータは発生損失が小さくなる。しかし、NPCインバータとA-NPCインバータを比べると、 $f_c = 21.5$  kHzにクロスポイントがあることが分かる。これは、A-NPCインバータでは、スイッチングロスの占める割合が大きいことを示唆している。また、A-NPCインバータが、 $f_c = 21.5$  kHz以下のアプリケーションで有効であることを示している。

#### 4 あとがき

A-NPCインバータに適用する、新IGBTモジュールの概要および特徴について紹介した。本製品では、3レベル

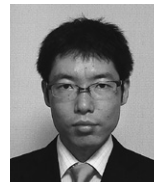
制御による低ノイズ化、第6世代IGBTとFWD採用によるスイッチングロス低減、第2世代RB-IGBTの採用による導通ロスの低減、端子配列最適化、パッケージ内部インダクタンス低減によるサージ電圧の低減などを実現した。これにより、お客さまによるA-NPCインバータの設計を容易にした。また、使用デバイス数の低減、構成部材の最小化、共通化によりお客さまの装置の低コスト化を実現可能とした。

キャリア周波数が比較的低いアプリケーションでは、発生損失と電力変換効率の面から、2レベルインバータ、NPCインバータよりも高性能にできる。

富士電機では、素子性能の向上に加え、さらなる小型化・高信頼性を提案できるパッケージ設計を進め、市場要求に応えるモジュール開発を行っていく所存である。

#### 参考文献

- (1) Nabae, A. et al., "A New Neutral-Point-Clamped PWM Inverter", IEEE Trans. on I. A., 1981, vol. IA-17, no.5, p.518-523.
- (2) "IGBT Power Modules for 3-level UPS Inverters", <http://www.semikron.com/>, (accessed July 2008).
- (3) Takei, M. et al., "The Reverse Blocking IGBT for Matrix Converter with Ultra-Thin Wafer Technology", Proc. of ISPSD '03, 2003, p.156-159.
- (4) Komatsu, K. et al., "New IGBT Modules for Advanced Neutral-Point-Clamped 3-Level Power Converters" proc. of IPEC '10, 2010, p.523-527.



小松 康佑

IGBTモジュールの開発設計に従事。現在、富士電機システムズ株式会社半導体事業本部半導体統括部モジュール技術部。



原田 孝仁

IGBTモジュールの構造開発・設計に従事。現在、富士電機システムズ株式会社半導体事業本部半導体開発センターパッケージ開発部。



中澤 治雄

マイクロマシンの研究、パワーデバイスの開発に従事。富士電機ホールディングス株式会社技術開発本部基礎技術研究センターグリーンパワエレプロジェクト部マネージャー。電気学会会員、応用物理学会会員。



\*本誌に記載されている会社名および製品名は、それぞれの会社が所有する  
商標または登録商標である場合があります。