

# 3 レベルインバータ用 IGBT

## DC/AC 変換の効率改善

電力エネルギーは極めて重要な資源であり、多くの市場調査にて電力需要が急激に増加し続けていることが確認されています。2001 年から 2006 年までに、電力消費は 16.1%上昇しました。(出展: BP Statistical Review of World Energy, June 2007) 電力エネルギーは限られた資源であり、また燃油価格の上昇の影響を受けて、新たな技術の時代が始まりました。それは、電力消費を削減し、次世代エネルギーの開発を促進することを目標としたものです。その結果、効率の継続的な改善が全ての産業及び家電アプリケーションにおいて急務となっています。

SEMIKRON イタリア プロダクトマネージャー Marco Di Lella、Riccardo Ramin

効率について述べる際、主に電力効率について言及します。この場合、用語「効率」の意味が限定されています。パワーエレクトロニクスアプリケーションでは、新製品を開発する技術者により追及される主な目標は、高調波歪と全体寸法の最適化と共に、電力及び熱効率といった異なる効率を最大限にすることです。

上記の目標は、経済性及び開発期間の達成といった他の厳しくなる目標に沿って実現されなければなりません。この論文で取り上げられる疑問の 1 つは、より良い効率のパワーモジュールが極めて重要な目標効率を達成できるかどうかです。

SEMITOP パワーモジュールは、最大効率とコストパフォーマンスに繋がる熱的特性と最新のシリコン技術および画期的な回路構成を誇っています。絶縁されたパワーモジュールは、PCB はんだ付けタイプです。マウント用ネジ 1 本とベースプレートレスデザインは、熱的特性に優れ、それによりアプリケーションにおいて高信頼性を提供します。信頼性は 10,000 時間に及ぶ 17 項目の試験に基づいた、広範囲な認証プログラムにより確認されています。

SEMITOP 製品グループは 3 レベルインバータアプリケーション用モジュール製品の開発により、さらに拡大しました。

3 レベルインバータは、中小容量 (5-40kVA) を含む UPS アプリケーションに多く使用されています。

マルチレベルインバータ技術は単純なコンセプトに基づいており、IGBT モジュールが直列に接続され、IGBT の耐圧より遥かに高い電圧を印加することが出来ます。当初このコンセプトは数 10kV の電圧レンジのアプリケーションにおいて標準 IGBT を使用する目的で、高圧大電力コンバータ用として紹介されました。

マルチレベルインバータを使うことにより、DC/AC 変換の効率を容易に改善することが出来ます。コンバータは高調波歪が極めて低い、ほぼ正弦波に近い波形を出力します。これには 2 つの利点があります。1 つはスイッチング周波数を 2 レベルインバータより低くする事により、損失を低減することが出来ます。また出力フィルターの低減により、全体の寸法とコストを削減します。

標準的なハーフブリッジ (図 1) による 3 相インバータでは、2 段階の電圧をスイッチングすることにより電圧波形が出力されます。図 1b の回路では、3 段階の電圧をスイッチングすることにより、電圧波形が出力されます。これが 3 レベルインバータと言われる由来です。

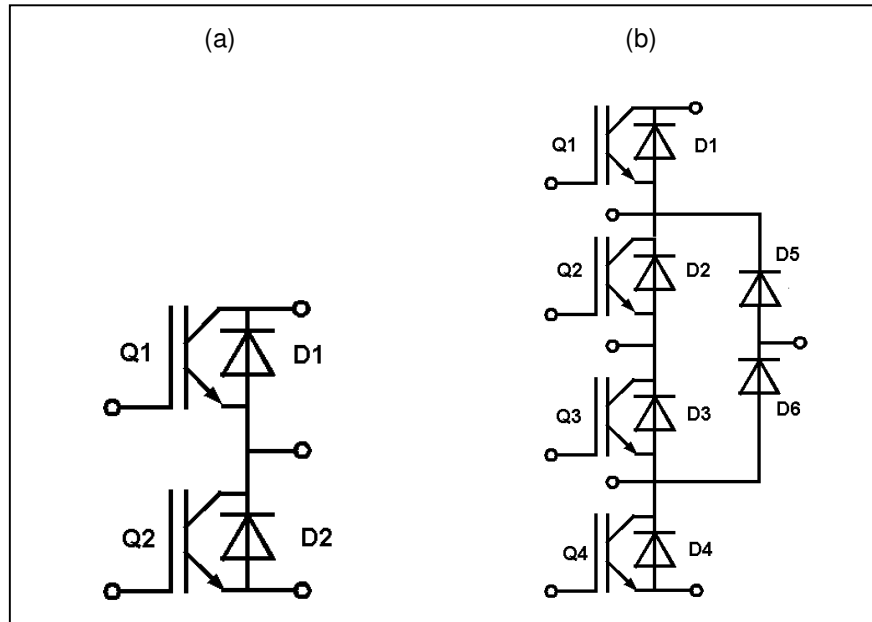


Figure1 – 2レベルインバータ(2L)と3レベルインバータ(3L)の一相分

2レベルインバータ[1]との違いを確認するために、3レベルインバータの原理を解析します。3相3レベルインバータでは、12個のIGBT素子を使用されています(図2参照)。各々の相は3段階の電圧(+ $V_{dc}/2$ 、0、- $V_{dc}/2$ )でスイッチングされます。この構成では、IGBTの最大電圧はDC-Link電圧の半分( $V_{dc}/2$ )に制限されます。これは、IGBTが中性点クランプダイオードと呼ばれる高速ダイオードにより、中性点(MP)に接続されていることによります。

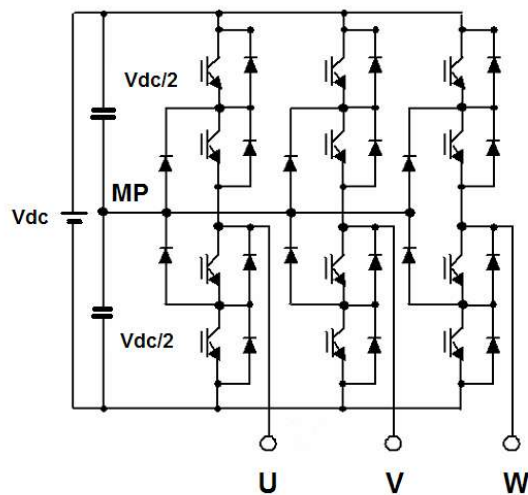


Figure 2 – 3相3レベルインバータ

3相2レベルインバータのPWMアルゴリズム[2]がマルチレベルインバータにも適用出来ます。三角キャリア波形のアルゴリズムは、高調波低減の観点で効果をもたらします。即ちキャリア波と基準波の両方が必要となります。三角キャリアの数がL-1に等しい場合、Lは電圧レベルの数です。3相3レベルインバータの場合、2つの三角キャリア波と1つの基準正弦波形が必要ということになります。

異相関係にある3つのPWMが3レベルインバータに用いられます:

- Alternative phase opposition disposition (APOD)、近接した周波数帯域のキャリアの位相が180°ずれる状態
- Phase opposition disposition (POD)、基準となる零点より上のキャリアの位相が180°外れ、零点を下回る状態
- Phase disposition (PD)、全てのキャリアが周波数帯域全体の位相にある状態

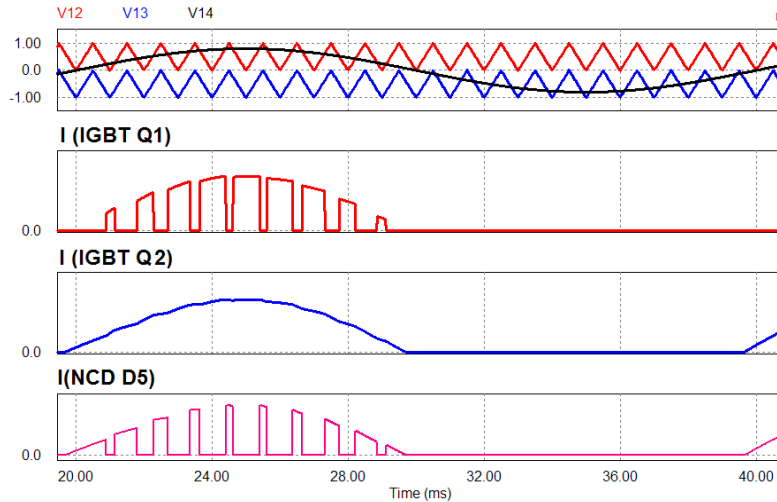


Figure 3 – 3レベルインバータ原理

PD 手法がライン間の出力電圧において生じる高調波歪が最小なので、最もよく使われています。三角キャリア波および基準正弦波形を、IGBT および NCD 電流波形と共に図3に示します。

3レベルインバータは2レベルインバータと比較して、とりわけ複雑な回路で構成されています。技術的および経済的な優位性より、3レベルインバータを強く推奨します。

ここに2個の標準モジュールを表1に示す条件にて同じアプリケーションで比較します。([3], [4]) IGBTとダイオードのオン損失およびスイッチング損失は、表2[5], [6]に示す式で計算されます。

S = 20 kVA	cos (φ) = 0,85	f <sub>sw</sub> = 20 kHz
M = 1	V <sub>ll,rms</sub> = 400V	I <sub>out,rms</sub> = 29 A
i <sub>pk</sub> = 40,8 A	T <sub>s</sub> = 80 °C	

	IGBT 逆耐圧	I <sub>c</sub> @ T <sub>s</sub> =80 °C	V <sub>ce,sat typ</sub> @ 50A チップレベル	E <sub>on</sub> +E <sub>off</sub> @ I <sub>c</sub> =50A, R <sub>g</sub> =33Ω	IGBT R <sub>thj,s</sub>
<b>SK 30 MLI 066</b>	600V	31A	1,65 V	4,2mJ @ V <sub>cc</sub> =300V, T <sub>j</sub> = 150 °C	1,8 [K/W]
<b>SK 60 GB 128</b>	1200V	44A	1,9 V	12,5mJ @V <sub>cc</sub> =600V, T <sub>j</sub> =125 °C	0,6 [K/W]

Table 1 – シミュレーション条件およびIGBTの主要特性

3レベルインバータは1200Vの代わりに600VのIGBTを使用するのが特徴です。一般的に600Vチップは1200Vチップより高速で薄いので、3レベルインバータに用いるIGBTモジュールは、それゆえ低スイッチング損失かつ低電圧降下特性を有します。

3レベルインバータ(3L)	
オン損失 IGBT Q1/Q4	$P_{con} = U_o \cdot I_{avg} + r_f \cdot I_{rms}^2$ $I_{avg} = \frac{M \cdot \hat{I}}{4\pi} \cdot [\sin \phi  + (\pi -  \phi ) \cos\phi]$ $I_{rms}^2 = \frac{M \cdot \hat{I}^2}{4\pi} \left[ 1 + \frac{4}{3} \cos\phi + \frac{1}{3} \cos(2\phi) \right]$
オン損失 IGBT Q2/Q3	$P_{con} = U_o \cdot I_{avg} + r_f \cdot I_{rms}^2$ $I_{avg} = \frac{\hat{I}}{\pi} - \frac{M \cdot \hat{I}}{4\pi} \cdot [\sin \phi  -  \phi  \cos\phi]$ $I_{rms}^2 = \frac{\hat{I}^2}{4} - \frac{M \cdot \hat{I}^2}{4\pi} \left[ 1 - \frac{4}{3} \cos\phi + \frac{1}{3} \cos(2\phi) \right]$
スイッチング損失 IGBT Q1/Q4	$P_{sw} = \frac{1}{\pi} \cdot (E_{on} + E_{off}) \cdot f_{sw}$
2レベルインバータ(2L)	
オン損失 Q1/Q2	$P_{on} = \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{V_{CEo}}{\pi} \cdot \hat{i} + \frac{r_{CE}}{4} \cdot \hat{i}^2 \right) + m \cdot \cos\phi \cdot \left( \frac{V_{CEo}}{8} \cdot \hat{i} + \frac{r_{CE}}{3 \cdot \pi} \cdot \hat{i}^2 \right)$
スイッチング損失 IGBT Q1/Q2	$P_{sw} = f_{sw} \cdot E_{sw} \cdot \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{I_1}{I_{ref}} \cdot \left( \frac{V_{cc}}{V_{ref}} \right)^{K_v}$

Table 2 – 3L インバータ[5]と 2L インバータ[6]におけるスイッチングおよびオン損失

SK 30 MLI 066		SK 60 GB 128	
IGBT: 1相あたりの全損失	118 W	1相あたりの全損失	176,1 W
中性点クランプダイオードの全損失 (D5/D6)	28 W	ダイオードの全損失	53 W
1相あたりの全損失	146 W	1相あたりの全損失	229 W

Table 3 – 損失解析:3L対2Lインバータ

図 4 はインバータ 1 相(3L 及び 2L)あたりのスイッチング周波数と全損失の関係を示します。ノイズを減少させるために、20kVA レンジの UPS アプリケーションでは、可聴領域以上の周波数で動作させます。この周波数レンジでは、3L インバータの全損失は明らかに 2L のそれより小さくなります。

### 3レベルインバータにより60%損失改善

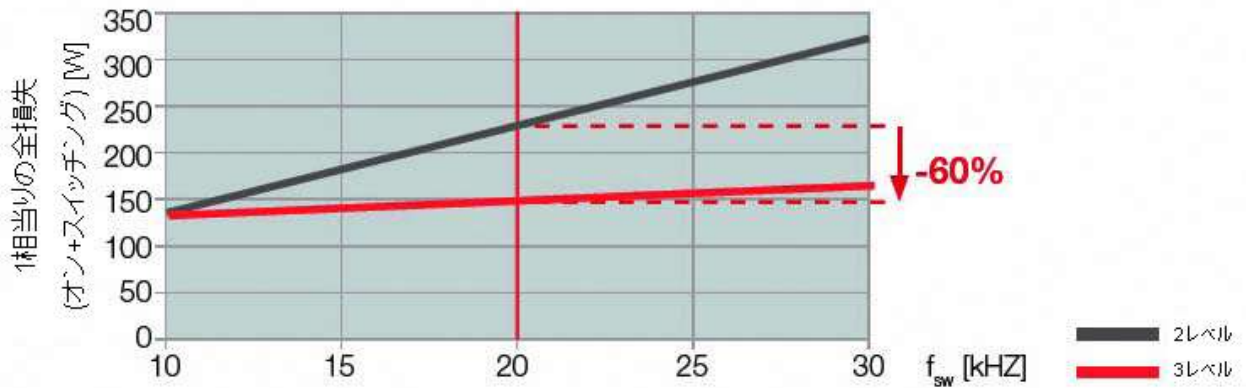


Figure 4 – 1相あたりの全損失と周波数との関係

さらに3レベルインバータでは、出力電圧波形は正弦波に近くなり、出力フィルターを小さく出来ます。IGBT及びダイオードのストレスは減少し、信頼性とアプリケーション全体の効率が向上します。

特定の解析において、コスト面では600V IGBT使用の3Lインバータは、1200Vの2Lインバータよりも25%安価になります。

3Lインバータの実際の利点は、出力電圧が3段階の電圧に変換され、低損失になることによりパワースイッチのストレスが低減することです。出力電圧波形は出力フィルターが小さく出来る高調和歪が小さい正弦波形です。全損失の低減により、より小さいヒートシンクの使用が可能です。ヒートシンクと出力フィルターを小型化することで、UPSアプリケーションにおいてサイズを縮小することが出来るので、アプリケーション全体のコストを削減します。

先に述べた理由により、UPSアプリケーションで3Lインバータ用標準SEMITOPモジュールを用いることにより、電気的および熱的効率を最大化し、商品化までの時間を短縮し、さらにUPSアプリケーションにおいて全体のコストを削減します。

## SEMISTOP について

### SEMISTOP<sup>®</sup>モジュールの特徴

- DCB とヒートシンクを直接コンタクト: ベースプレート不要
- 絶縁にセラミックを使用
- PCB 用はんだ付けピン
- ネジ 1 本による容易な組み付け
- 電流レンジ
  - ・ 600V IGBT ~200A
  - ・ 1200V IGBT ~100A
  - ・ 300V MOSFET ~300A

### SEMISTOP<sup>®</sup>モジュールの優位点

- 組み立てコスト削減
- 低熱抵抗
  - ・ 絶縁 TO パッケージと比較、-30%
  - ・ IMS と比較、-18%
- 多様なチップ技術と回路の組み合わせ: 整流ブリッジ、インバータ、AC スイッチ、ハーフブリッジ、コンバータ-インバータ-ブレーキ、ブレーキチョップ
- コンパクト設計によるコストとスペースの削減
- 低抵抗ピンの使用: 他社製品よりオン損失が 14%低い

モジュールは全て RoHS 指令準拠

### 参考文献:

- [1] Grahame Holmes, Lipo - Pulse width modulation for power converters: principle and practice. Pages 42-49
- [2] Grahame Holmes, Lipo - Pulse width modulation for power converters: principle and practice. Pages 467-469
- [3] SK60GB128 datasheet. <http://www.semikron.com/internet/ds.jsp?file=2469.html> (referenced 13.02.2007)
- [4] SK30MLI066 datasheet. <http://www.semikron.com/internet/ds.jsp?file=2782.html> (referenced 17.01.2008)
- [5] Gjermund Tomta, Roy Nielsen. "Analytical Equations for Three Level NPC Converters". 9th European Conference on Power Electronics and Applications, EPE 2001. Graz, 27 – 29 August, 7 pages.
- [6] Semikron application manual. Web-document. <http://www.semikron.com/internet/index.jsp?sekId=13> (referenced 14.9.2005)