

ソーラー インバーターの設計

高効率、高電力密度のインバーター設計競争

インフィニオンテクノロジーズ

アプリケーション エンジニア シニアスタッフ Mostafa Khazraei

アプリケーション エンジニア Damijan Zupancic

概要

クリーンで再生可能なエネルギー源に対する需要の高まりから、太陽光発電システムの設置はここ10年で加速的に増加しています。現代のソーラー アプリケーションでは、非常に高効率で電力密度が高く、軽量のグリッド型インバーターが求められています。

従来、三相および単相 (10 kW以下) のソーラー インバーターではIGBTが主流であり、スーパージャンクション (SJ) MOSFET (600 / 650 V) も一部の単相設計で使用されてきました。しかし、IGBTとSJ MOSFETのどちらにも、インバーターの効率や電力密度に限界があります。

近年、エンジニアは、単相インバーターの効率と電力密度をさらに向上させるために、2つの異なるアプローチに着目しています。一つは、IGBTやSJ MOSFETをSiC MOSFETのようなワイドバンドギャップのデバイスに置き換えることです。もう一つのアプローチは、従来のトポロジー (H4、H5、H6等) をより低電圧のSi MOSFETを用いたマルチレベル トポロジーに置き換えることです。この記事では、この2つのアプローチが99%までの効率と非常に高い電力密度のインバーター設計を可能にすることについて説明します。

目次

概要	1
IGBTおよびSJ MOSFETからSiC MOSFET へ置き換える	3
従来トポロジーをマルチレベルトポロジーに置き換える	5
4 kWヒートシンクレス、ファンレス、中高圧MOSFETベース マルチレベル インバーター	7
まとめ	8

IGBTおよびSJ MOSFETからSiC MOSFETへ置き換える

IGBTはスイッチング損失が大きく、20 kHz以下の周波数にしか使用できません。一方、 Q_{rr} (逆回復電荷量) が高い、ボディダイオードが遅い、 $R_{DS(on)}$ が比較的高いなどの理由から、インバーター用途でのSJ MOSFETの使用には制限があります。これらの制約により、従来の単相ソーラーインバーターの効率や電力密度は約98%以下に制限されています。

一方、SiC MOSFETは、非常に高速なパラレルダイオード、非常に低い Q_{rr} 、IGBTよりはるかに低いスイッチング損失を提供します。先頃、インフィニオンは、インバーターのトポロジーを変更することなく、IGBTやSJ MOSFETを直接置き換えることができる650 V CoolSiC™ MOSFETを発表しました。SiC MOSFETは、より高い周波数でのスイッチングを可能にし、磁気サイズ、キャパシタフィルタ、筐体サイズを大幅に削減することができます。パワーレベルが上がれば上がるほど、サイズと重量の軽減はコスト削減につながります。図1は、SJ MOSFETをSiC MOSFETに置き換えることで、スイッチング損失が大幅に減少することを明確に示しています。

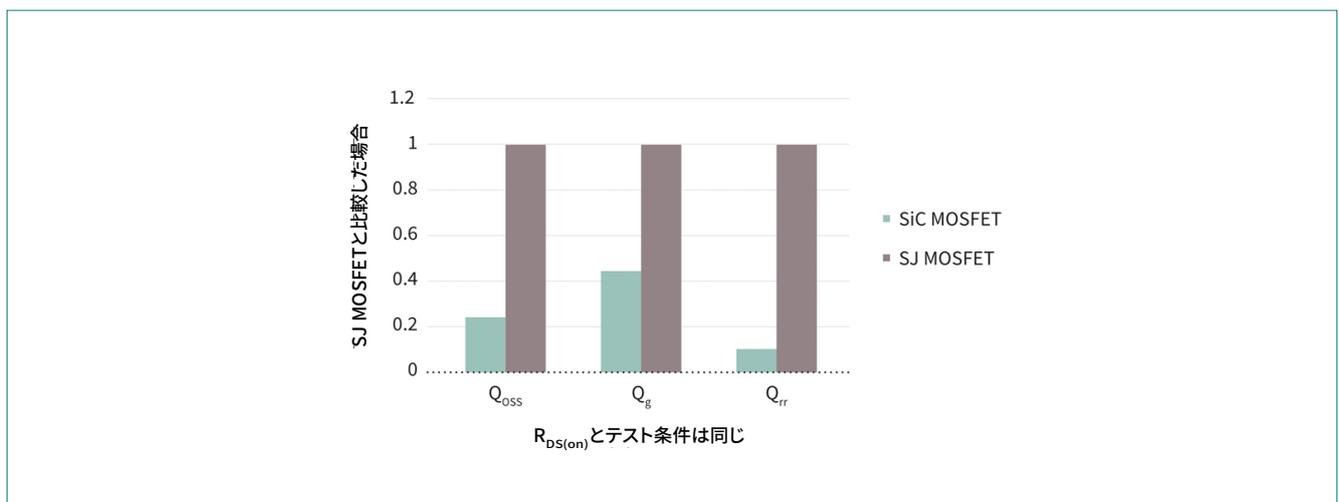


図1: SJ MOSFETをSiC MOSFETに置き換えることでスイッチング損失を大幅に低減

図1に示すように、ドレインソース間電荷量 (Q_{oss})、逆回復電荷量 (Q_{rr})、ゲート電荷量 (Q_g) の観点から考えると、SiC MOSFET (650V CoolSiC™ MOSFET) は、代替品として最適なSJ MOSFET (600 V CoolMOS™ CFD7) より優れた特性値を示します。

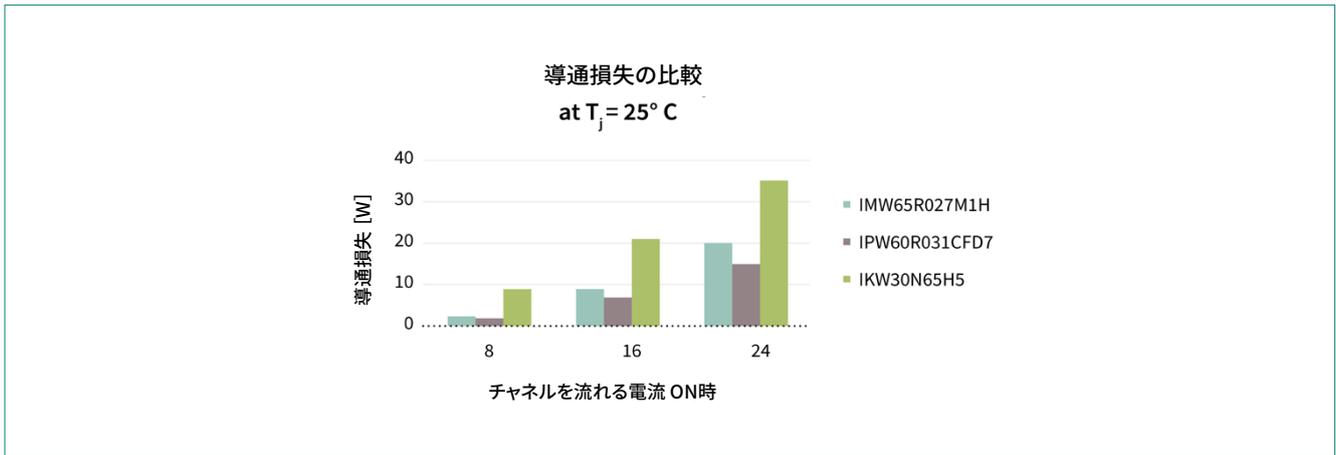


図2a: 電流ごとの導通損失の変化 ($T_j = 25^\circ\text{C}$)

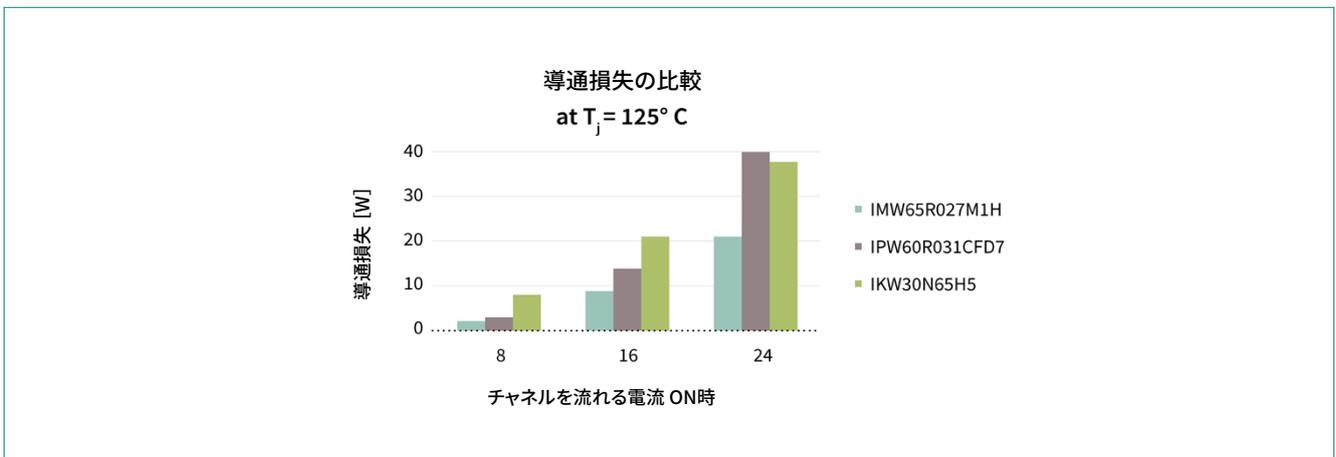


図2b: 電流ごとの導通損失の変化 ($T_j = 125^\circ\text{C}$)

図2aは、IGBT IKW30N65H5 (650 V)、SJ MOSFET IPW60R031CFD7 (600 V) およびSiC MOSFET IMW65R027M1H (650 V) を含むクラス最高の3デバイスの、ジャンクション温度 25°C の場合の導通損失比較です。図2bは 125°C での電流を変化させた場合、どのように導通損失が変化するかを示しています。まず、IGBTの導通損失は、見ての通り、 25°C では他のデバイスに比べて著しく高いことがわかります。ただし、 125°C まで温度が上昇したときは、大幅に増加しません。次に、SJ MOSFETでは 125°C における導通損失が、同じデバイスの 25°C における導通損失の2倍となっています。3つめに、SiC MOSFETのデータを見ると、この温度範囲では約20%の導通損失上昇にとどまっていることがわかります。このことから、大電流、高温動作の条件において、SiおよびSiC MOSFETに明確な違いがあることがわかります。

従来トポロジーをマルチレベルトポロジーに置き換える

単相ソーラー インバーターでは、従来、IGBTやSJ MOSFETを用いたH4、H5、H6などのトポロジーが広く使われてきました。近年、効率と電力密度を向上させるために注目されているのが、これらの従来のトポロジーを、中耐圧MOSFET (60V～300V) を用いたマルチレベルに置き換えるという新しいアプローチです (例： 図3参照)。インフィニオンのOptiMOS™ 5ファミリーは、中耐圧の製品です。MOSFETは、 $R_{DS(on)} \times Q_g$ 、 $R_{DS(on)} \times Q_{rr}$ 、 $R_{DS(on)} \times Q_{oss}$ が極めて小さいという優れた特性を持ち、マルチレベルインバーターに適用することで、非常に高い効率 (最大99%) および高電力密度な設計が可能です。

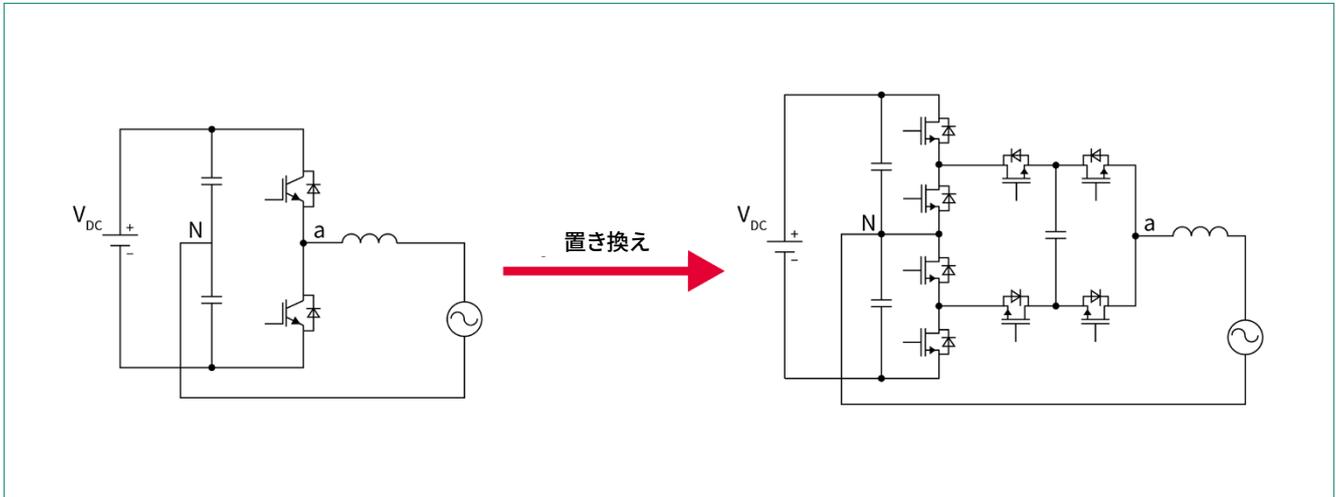


図3: 従来トポロジーからマルチレベルトポロジーへの置き換えで効率と電力密度を向上

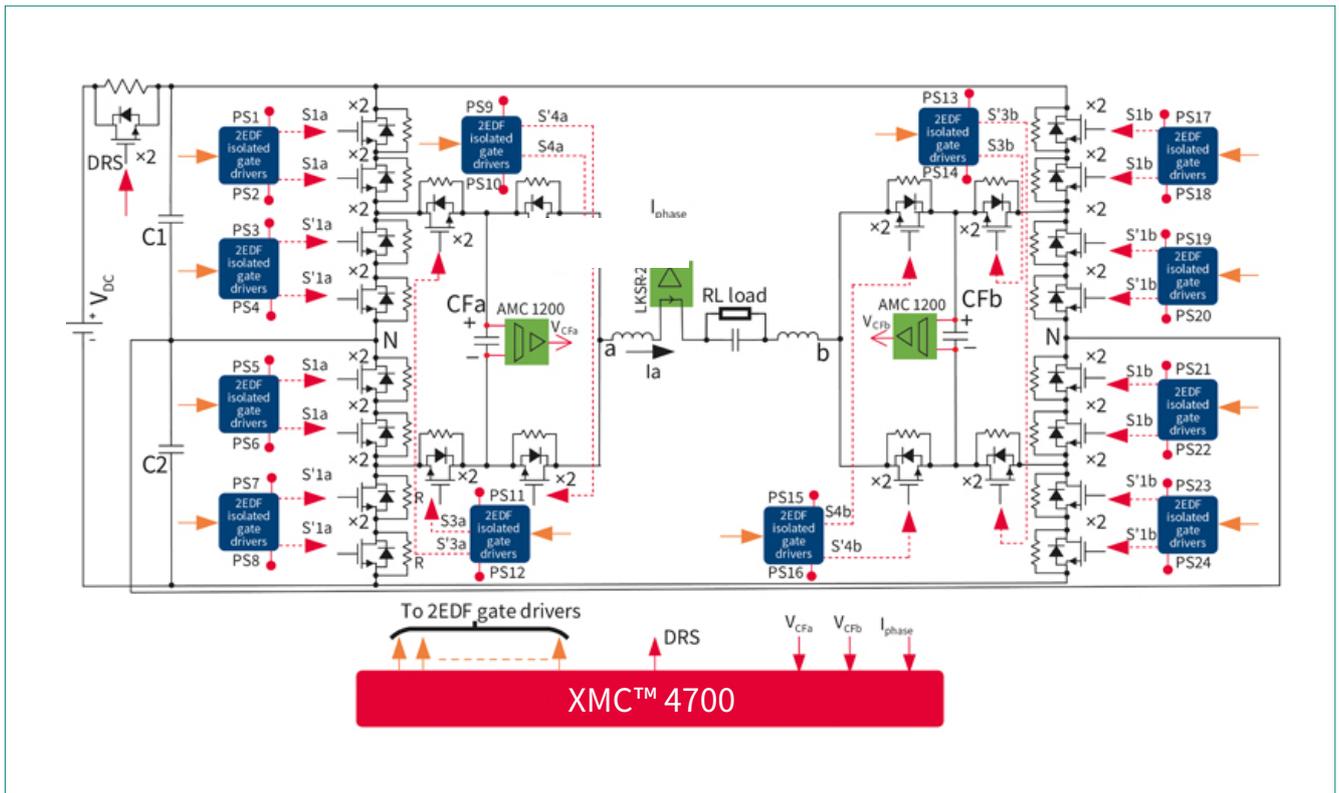


図4: マルチレベル インバーター デモボードの回路図

従来設計に比べ、マルチレベル インバーターではインダクターやコンデンサーのフィルター サイズが数倍小さくなります。これに加え、冷却システム小型化の必要と共に、筐体の小型化および大幅な軽量化を実現できます。一方、マルチレベル設計では耐圧の低い中耐圧MOSFETを用いるため、従来のトポロジーに比べてより多くのMOSFETが使用されます。これは、マルチレベル インバーターの電力損失による発熱（従来設計より少ない）が、より多くのデバイスに分散されることも意味します。その結果、マルチレベル インバーターの熱管理はより効率的になり、ヒートシンクフリーやファンレス設計に繋がります。一般的な単相ストリング インバーター（3 kW以上）では、半導体が全体のコストの10%未満になるのが一般的です。ただし、冷却装置や磁気回路は通常より高価になります。半導体デバイスの価格が下がり続けている一方で、磁気部品やヒートシンクなど他の部品のコストは変化していません。つまり、機構部品のコストが設計に占める割合が大きい定格3 kW以上の単相ソーラー インバーターでは、マルチレベル インバーターを採用することによって、製造コストを削減することができることを意味しています。

マルチレベル インバーターのもう一つの大きな利点は、MOSFET1個あたりの損失が小さいため、SMD（表面実装）パッケージが使用できることです。SMDパッケージの採用は、ピック＆プレイス工程の自動化により、組み立てコストの削減に貢献します。さらに、パッケージのインダクタンスを低減することで、高周波でのスイッチング性能も向上します。

マルチレベル インバーターのもう一つの大きな利点が、拡張性です。マルチレベル インバーターは、ほぼ同じ設計とPCBレイアウトで、より高い出力設計に容易に拡張できます。

しかし、マルチレベル インバーターにも、ある大きな課題があることは言うまでもありません。従来のトポロジーと比較して、より多くのゲートドライバーとそれらを駆動するための絶縁電源が必要なのです。この課題には、非常にコスト効率の高い、低消費電力のマルチ出力フライバック電源（ $\leq 1\text{ W}$ ）を使用して対処します。

4 kWヒートシンクレス、ファンレス、中高圧MOSFETベース マルチレベル インバーター

ここでは、4 kW、5レベル単相フライングキャパシター方式のアクティブ中性点クランプ型マルチレベル インバーターのデモボードを紹介します。ファンレス、ヒートシンクレス設計で、ピーク効率99%以上、フルパワー効率98.7%を実現しています。

図4にマルチレベル インバーター デモボードの回路図、表1に本インバーターの仕様を示しています。5レベル インバーターであることから、DCバス電圧400 Vでありながら、150 VのBSC093N15NS5 (9.3 mΩ, OptiMOS™ 5) MOSFETを使用しています。このデバイスは、IGBTやSJ MOSFETに比べ、はるかに優れた特性を備えています。

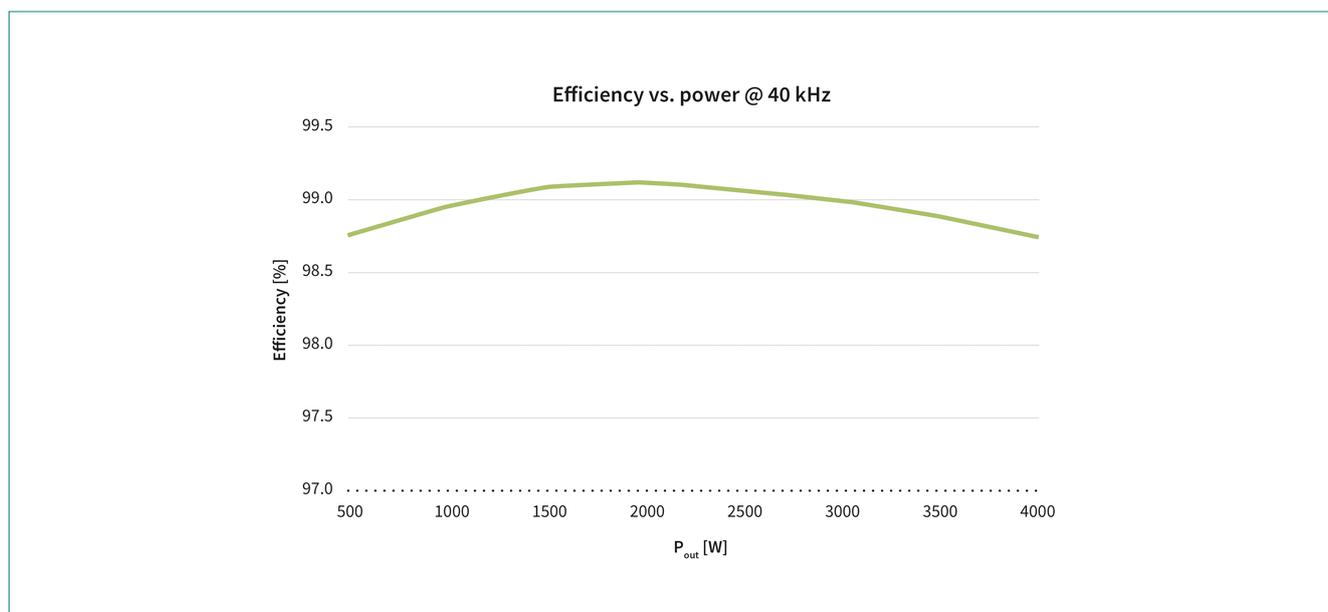


図5: 出力電力に対するデモボードの効率性

図5は、出力電力に対するデモボードの効率を示しています。2 kW程度で最大効率 (約99.1%) を実現しています。最大負荷時 (4 kW) でも約98.7%と非常に高い効率を実現しており、ヒートシンクやファンを必要としないマルチレベル インバーターの連続動作が可能な理由です。

表1: インバーター仕様

マルチレベル インバーター仕様	
入力DC電圧 (VDC)、負荷	400 V, passive RL load
スイッチの種類	2×BSC093N15NS5 (150 V/9.3 mΩ) MOSFETs, gate driver: 12×2EDF7275F
有効出力スイッチング周波数	40 kHz
DRS スイッチ	2×IPT60R022S7
定格出力容量	4000 VA

まとめ

より高い効率と電力密度を求めるインバーター設計者にとって、問題は上記のソリューションのうちどれを選択するかです。IGBTやSJ MOSFETをSiC MOSFETに置き換えるのか、あるいは従来型からマルチレベル トポロジに置き換えるのかを検討する必要があります。

SiベースのデバイスをSiC MOSFETに置き換えることは、トポロジの変更に比べて労力がかからないのは間違いありません。しかし、このSiCへの変更によって効率と電力密度は向上しますが、それでもマルチレベル ソリューションほどではありません。ヒートシンクはやはり必要で、より高いレベルの出力範囲 (> 5 kW) では、おそらく強制冷却も考慮する必要があります。

マルチレベル トポロジは従来のトポロジよりも複雑ですが、もし設計者が過去にこのようなトポロジの経験がある方、学ぶ意欲や研究開発に力を入れたいというモチベーションがある方は、99%の効率と非常に高い電力密度を容易に達成できるマルチレベル インバーターへの移行をお勧めします。



www.infineon.com/jp

発行元
インフィニオンテクノロジーズ ジャパン株式会社

© 2023 Infineon Technologies AG
All rights reserved.

Public

Date: 08/2023

Please note!

This Document is for information purposes only and any information given herein shall in no event be regarded as a warranty, guarantee or description of any functionality, conditions and/or quality of our products or any suitability for a particular purpose. With regard to the technical specifications of our products, we kindly ask you to refer to the relevant product data sheets provided by us. Our customers and their technical departments are required to evaluate the suitability of our products for the intended application.

We reserve the right to change this document and/or the information given herein at any time.

Additional information

For further information on technologies, our products, the application of our products, delivery terms and conditions and/or prices, please contact your nearest Infineon Technologies office (www.infineon.com).

Warnings

Due to technical requirements, our products may contain dangerous substances. For information on the types in question, please contact your nearest Infineon Technologies office.

Except as otherwise explicitly approved by us in a written document signed by authorized representatives of Infineon Technologies, our products may not be used in any life-endangering applications, including but not limited to medical, nuclear, military, life-critical or any other applications where a failure of the product or any consequences of the use thereof can result in personal injury.