ホワイトペーパー

2段階スルーレート制御により、パワー モジュール内の半導体の熱負荷を低減

インフィニオン テクノロジーズ
Wolfgang Frank
Niclas Thon
Michael Ebli

概要

IGBTのスイッチング性能を最適化するのはゲート抵抗の固定値だけでは難しいです。一般的なモーター制御のようにスイッチング時のdv/dtレベルを制限する必要がある場合や、伝導EMIレベルの制御が必要なアプリケーションでは、特に困難です。本ドキュメントでは、22 kWのインバーターで動作する簡単なスルーレート制御ゲート ドライバー ICの評価を紹介します。また、ジャンクション温度の点から、産業用モーター制御における動作上の利点を関連測定値ごとにご紹介します。

目次

概要	**1**
はじめに	**3**
デュアル ゲート抵抗の利点とは?	**3**
試験環境	**4**
計測	**6**
まとめ	**9**

はじめに

現在スルーレート ドライバーは市販されていますが ([1]、[2])、対象となるのは高性能システムです。そのため、そのサイズと複雑さから、低電力でコスト重視のコンバーター設計には適しません。本研究の目的は、商用インバーターと同様の構造を持つ22 kW駆動インバーターを設計することです。本インバーターに採用されているのは、わずか8ピンの非常にシンプルな絶縁型ゲート ドライバーの2段階スルーレート制御 (2L-SRC) ゲート ドライバー ICです。本ICでは、2種類のゲート抵抗値を交互に変更でき、パルス幅変調のサイクル単位で変更が可能です。

デュアル ゲート抵抗の利点とは?

IGBTのターンオン イベントのdv_{CE}/dtレベルは、通常は低温、低電流で高くなります。つまり、dv_{CE}/dtレベルを制限する場合、ゲート抵抗の値を大きくする必要があります。このようなdv_{CE}/dtの制限は、モーター電流にゼロ クロス点を含むモーター ドライブではよくあることです。そのため、ゲート抵抗は0または室温におけるパワー モジュールの電流定格の1/10に設定する必要があります。高いdv_{CE}/dtはモーターに有害な影響を与えることが知られています ([3]、[4])。こうした影響には、モーター ケーブルが長くなるとモーター巻線での電圧が2倍になるとか、ステータ端巻線で高ステップ電圧の変化がある、などが挙げられます。

dv_{CE}/dtレベルの上限を抑える事は可能ですが、ゲート抵抗値が高くなるとスイッチング損失が大きくなり、コンバーターの効率が低下します。また、接合部の温度が高くなり、パワー モジュールの寿命が短くなり、冷却の必要性が高まります。

しかし、2つのゲート抵抗が使用できる場合、低電流、低温でのターンオン時に高いゲート抵抗値を使用すれば、dv_{CE}/dtレベルを抑えられ、高電流、高温でのターンオンでより低いゲート抵抗値を使用して、損失を最小限に抑えることができます。

一方、誘導性ターンオフのオーバーシュートは、パワー トランジスターの耐圧Vbrを超える可能性があります。特に短絡時や過電流時のターンオフは危険です。ターンオフ用にゲート抵抗を大きくすることで、このリスクを軽減できますが、その結果、スイッチング損失が大きくなり、接合部の温度が上昇すると冷却の必要性が高まります。

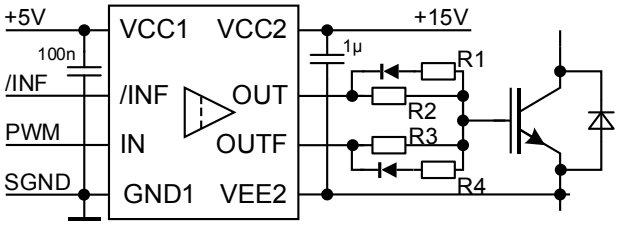

図1: 1ED3241MC12Hを用いたデュアルゲート抵抗ゲートドライブ回路の提案回路図

図1は、2L-SRCドライバー IC 1ED3241MC12Hを用いたゲート駆動回路例です。このドライバー ICは、高速/低速切り替えの制御入力 (/INF) と、PWM信号の制御入力 (IN) を1つずつ搭載しています。高速動作時は、出力端子OUTとOUTFが同時に出力するため、R1、R2、R3、R4の合成抵抗を通してIGBTのゲートを駆動します。低速動作時には、IGBTはR1とR2の並列の組み合わせのみで駆動されます。

試験環境

図2に示すインバーターが試験環境です。インバーターの寸法は市販のインバーターとほぼ同じですが、電力密度は2.35 kW/dm^{3}に達しています。表1に示す条件で、100 A、1200 Vのパワー モジュールを動作させました。

表1: インバーターの主要パラメーターと動作条件

パラメーター	値
出力電力 P_{OUT}	22 kW
入力電圧 V_{IN}	3~, 400 V
スイッチング周波数 f_p	4 kHz
周囲温度 T_{amb}	25 °C
力率 Cos φ	～0.98
PWM方式	サイン
パワー モジュール	FP100R12W3T7

負荷は三相RL負荷で、特に抵抗成分が多いため、力率が高くなります。しかし、ターンオン時、ターンオフ時の負荷電流は変化しないと考えられます。

ゲート抵抗値は、ダブルパルスの特性評価結果に沿って、すべての動作条件において、インバーターのdv_{CE}/dtを5 V/ns以下に保たれるように選択されています。この設計ルールは、温度やコレクター電流の変動を考慮しています。図3は、ダブルパルス テストベンチで得られた、こうした特性評価結果を示しています。



図2: 2段階スルーレート制御評価用インバーター

図3に示す試験結果は、10 Aの低電流でターンオンする場合、たとえば$R_{G,on}$ = 3.7 Ωのゲート抵抗で5 V/nsの目標が達成されることを示しています。このようなダブルパルス試験結果は、実験室での試験と同じ方法で最適化できない実際の用途においては、かなり楽観的に見えます。そのため、低速ターンオフ用の値として18 Ωが選択されています。またダブル パルス試験でターンオフ時のdV_{CE}/dtも評価され、大電流時におけるターンオフ ゲート抵抗$R_{G,off}$も得ています。これら2つの値は、従来のゲート ドライバー向けに選択される値です。

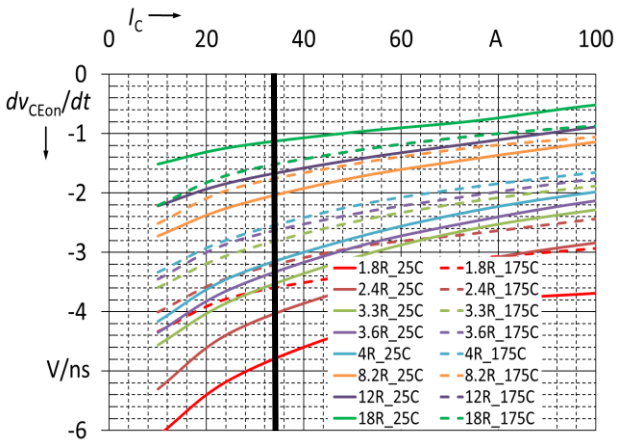

図3: 最適化済みテストベンチでの測定に使用したパワー モジュールのターンオンdv_{CE}/dt図例

表2: 高速スイッチングと低速スイッチングにおけるゲート抵抗の値

$R_{G,on,slow}$	18 Ω
$R_{G,on,fast}$	3.7 Ω
$R_{G,off,slow}$	11.2 Ω
$R_{G,off,fast}$	3.1 Ω

2段階スルーレート制御ゲート ドライバーのゲート抵抗を選択する際は、図3に黒い縦線で示すように、I_C=35 Aの瞬時コレクター電流での切り替え点を定義することも必要です。黒線によって高速スイッチングと低速スイッチングの２セクションに分けられています。各セクションには、ターンオンとターンオフの目標値である5 V/nsに達するためのゲート抵抗値が設定されています。表２にこれらのゲート抵抗値が示されています。

$R_{G,on,slow}$と$R_{G,off,slow}$の抵抗値は、EMIに配慮した動作を示す非常に遅いスイッチング速度になるよう選択されています。高速スイッチング ($R_{G,on,fast}$、$R_{G,off,fast}$) の抵抗値は、かなり低くなっています。高速スイッチングは、適切な動作範囲で作動させるとより効率的であることが明らかです。しかし、このような低いゲート抵抗を非常に低い電流で使用すると、激しい発振が引き起こされる可能性があります[6]。

計測

本項では、3つの異なるモードでの測定結果を比較しています:

- モード1: 低速ターンオン、高速ターンオフ
- モード2: 高速ターンオン、低速ターンオフ
- 2L-SRC-modeで
  - I_C < 35 A: 低速ターンオン、高速ターンオフ
  - I_C > 35 A: 高速ターンオン、低速ターンオフ

表3に、各モードの相関ゲート抵抗値を示します。2L-SRCモードは、瞬時相電流値に応じてモード1とモード2を組み合わせています。表4は、抵抗R1～R4の再計算された物理抵抗値です。

表3: 高速スイッチングと低速スイッチングの有効なゲート抵抗の値

	モード1	2L-SRC	モード2
$R_{G,on,slow}$	18 Ω	18 Ω	–
$R_{G,on,fast}$	–	3.7 Ω	3.7 Ω
$R_{G,off,\ slow}$	–	11.2 Ω	11.2 Ω
$R_{G,off,\ fast}$	3.1 Ω	3.1 Ω	–

図4に、スイッチング速度の解析結果を示します。図4上段のグラフは、ターンオン時の波形を1000個サンプリングしたもので、多様な相関を示しています。波形のサンプリングは負荷電流の周波数に同期しており、スイッチング波形はランダムにサンプリングされています。下段のグラフは、サンプリングされた波形をdv/dtクラスターで分類したヒストグラムです。それぞれの棒は、左側の1 V/nsから始まる幅0.05 V/nsのイベント数を表しています。図4からわかるように、過渡現象は0.5 V/nsから4.5 V/nsまでであり、5 V/nsを超えることはないことがわかります。そのため、IGBTは5 V/nsの想定範囲内で駆動されています。

表4: ゲート抵抗の選択値 R1、R2、R3、R4

R1	30 Ω
R2	18 Ω
R3	51 Ω
R4	4.7 Ω

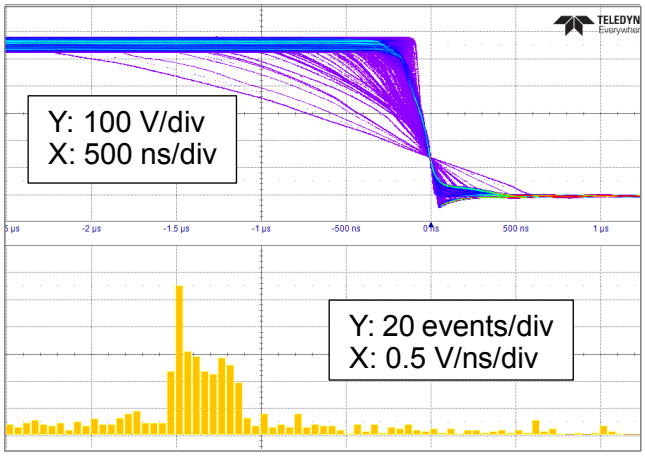

図4: ターンオフ波形 (上) とdv_{CE}/dtのヒストグラフ解析 (下) の組み合わせ例

図5は、4.5 A r.m.s. (左列) と50 A r.m.s. (右列) という2種類の電流レベルでの3つの動作モードの概要です。ターンオン (上段) とターンオフ (下段) については、所定のスイッチング速度におけるイベント数を描いています。2L-SRCとモード1の結果は原理的に似ており、2L-SRCは35 Aの変化点に達することがないため、常にモード1のままである。高速なスイッチングモード2では、明確なピークがdv_{CE}/dtが6 V/ns以上で示されるのに対し、低速なスイッチング モード1と2L-SRCモードでは、2 V/ns以下でピークが示されています。4.5 Aのターンオン時のピークはいずれもアクティブ ターンオン イベントです。4.5 Aでのターンオフ図は、ターンオフ後にIGBTの出力容量を完全に充電するのに十分な瞬時相電流を持つには1 V/ns以下と解釈できます。2 V/nsと6 V/ns以上のピークは、そのハーフブリッジの反対側のスイッチのアクティブなターンオンが原因です。相電流は、出力キャパシタンスをDCリンク電圧まで充電するには不十分です。そのため、反対側のスイッチのターンオンにより、コレクター - エミッター間電圧を引き上げます。

50 A r.m.s.の高位相電流では、dv_{CE}/dtは広い範囲に対応し、3つのモードすべてで1～1.5 V/sに高いピークがあり、2L-SRCとモード2では3 V/sを超える第2のピークがあります。第2のピークに関しては、50 A r.m.s.のターンオフでも同じ解釈ができますが、より低いレベルになっています。位相電流は通常、出力容量を充電するのに十分なレベルであり、3 V/nsを超える事象が測定されるのはわずかです。

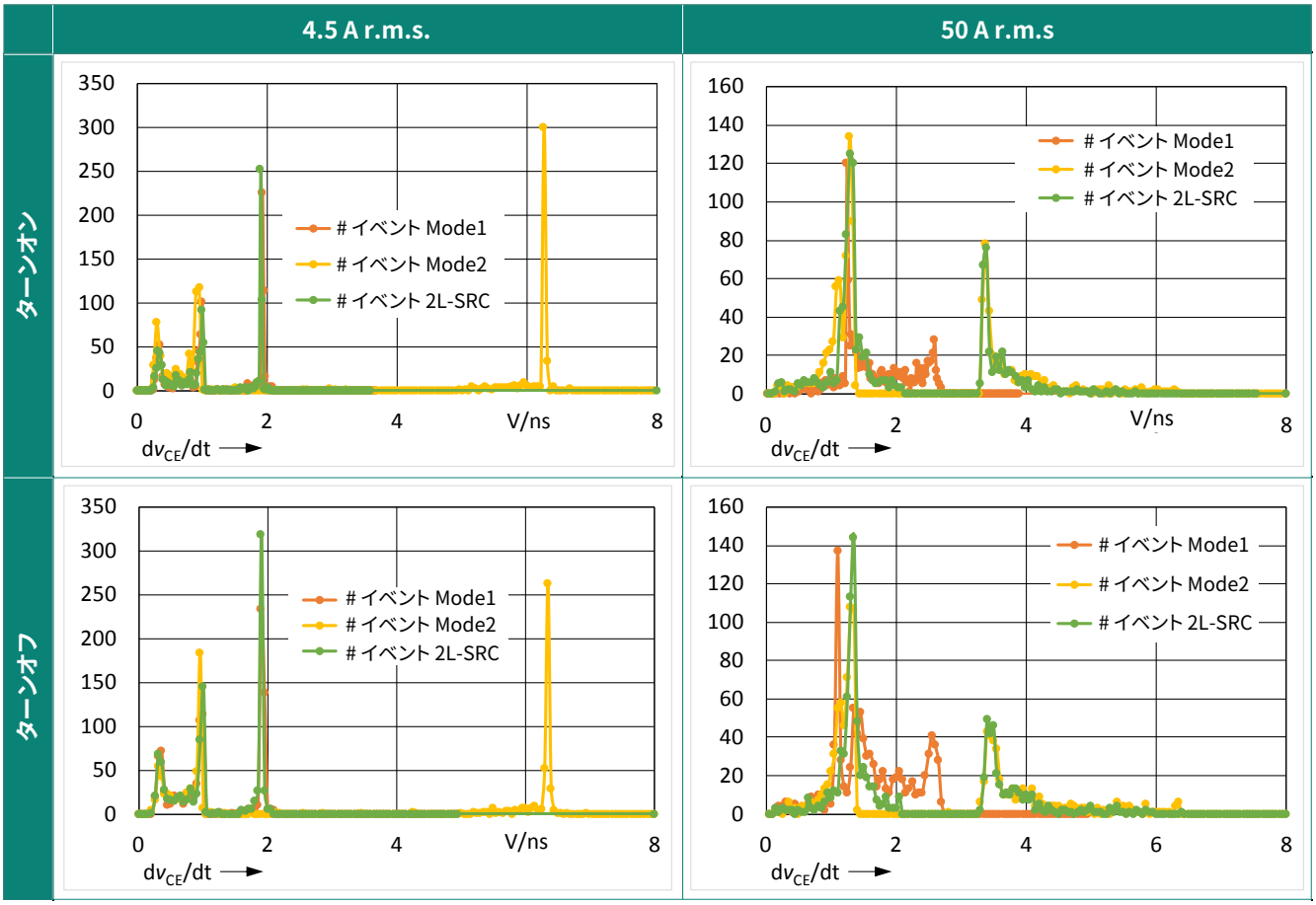

図5: モード1、モード2、2L-SRC-modeのdv_{CE}/dtイベント結果 (上: ターンオン、下: ターンオフ、左: I_C= 4.5 A r.m.s.、右: I_C = 50 A r.m.s.)

1ED3241MC12Hの2L-SRC動作は、低電流動作時の低dv_{CE}/dtレートと、高負荷電流動作時の高速で効率的なdv_{CE}/dtレートを両立させています。

図6は、IGBTとそのフリーホイーリング　ダイオードの表面温度を測定した結果を示しています。試験は、IGBTとダイオードの表面に熱電対を接続した状態で行っています。ファンの回転数制御の影響を受けないように、ファンの回転数は最大回転数の80%に固定して行いました。実線は2L-SRC動作モード時の結果、破線はモード1時の結果を表しています。このグラフから、IGBTとダイオードはともに高位相電流で最も温度が低くなることがよくわかります。したがって、ダイオードは2L-SRCモード時にモード1の時よりも12°C以上、IGBTはモード1の時よりも7°C以上温度が低くなっています。点線は、モード2での動作時の温度を表しています。IGBTとそのフリーホイールダイオードのモード2における温度は、2L-SRCモードでの動作に比べてまだ高いです。

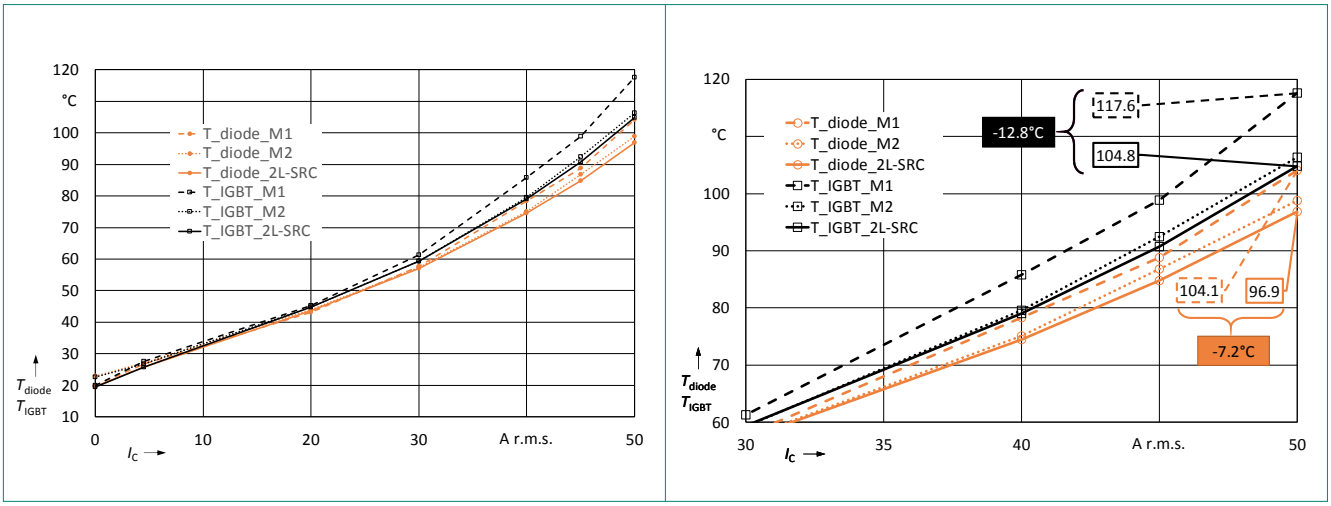

図6: インバーターのIGBTおよびダイオードの全負荷領域での表面温度 (左) と上側相電流領域の拡大図 (右)

表5: 負荷サイクル パラメーター

高負荷区間	60 s
低負荷時	240 s
サイクル期間	300 s
低負荷時相電流	25 A r.m.s.
高負荷時相電流	45 A r.m.s.

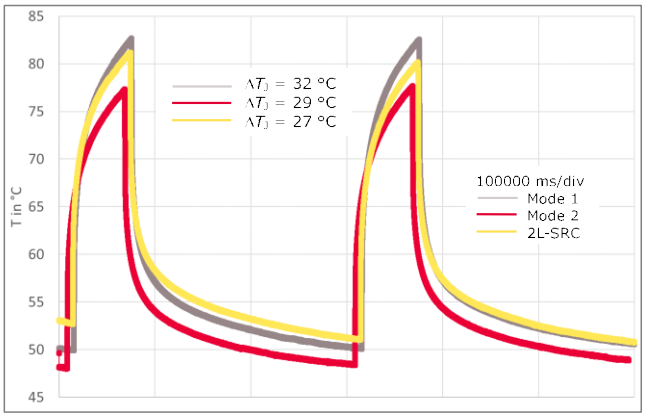

図7: モード1 (破線)、モード2 (点線)、2L-SRCモード (実線)の負荷サイクル時におけるインバーターのIGBTとダイオードの表面温度

図7は、インバーターの負荷サイクル中のIGBTおよびダイオードの表面温度を測定した結果です。表5に、サイクルパラメーター詳細を示します。負荷サイクルは高負荷と低負荷の比率が1:4で300秒続き、低負荷間隔が240秒、高負荷間隔が60秒となります。

これは大電流でゆっくりターンオンするため、ターンオンに低いゲート抵抗を使用するモード2に比べて、より多くのエネルギーが消費されることによります。このため、モード2は高負荷動作時のエネルギー消費量が少なく、ΔTJ=29 °Cとなります。図7では、2L-SRCモードでの動作が最も温度差が少ないことがわかります。2L-SRCモードは、低負荷時にゲート抵抗が大きくなるため、低負荷時の損失がやや大きくなり、温度がやや高くなります。一方、2L-SRCは高負荷時に最高の性能を発揮するため、低負荷時と高負荷時の温度差はΔTJ=27 °Cと最も小さくなります。

まとめ

2段階スルーレート制御を実装した新型ゲート ドライバー IC、1ED3241MC12Hを22 kW駆動インバーターで評価しました。2L-SRCは、低位相電流レベルでのスムーズなスイッチングと、高位相電流レベルでの効率的なスイッチングという要求を満たす技術です。そのため、2L-SRCはモード1のみ、またはモード2のみの動作に比べて低損失でありながら、伝導性電磁干渉のテストに成功する理想的な製品です。また、低損失であるため、ヒートシンクの削減などコストダウンも可能です。

負荷サイクル試験により、2L-SRCゲート駆動技術がパワー エレクトロニクス用トランジスターやダイオードの温度負荷を大幅に低減できることが証明されました。動作温度の低減は、たとえばパワー モジュールの寿命にも好影響を及ぼします。2L-SRCゲート ドライバー IC 1ED3241MC12Hを使用することにより、きわめて簡単にこうした効果が得られます。

リファレンス

[1] A. Arens, et al.: “Get tuned – A new generation of driver IC including safe isolation by coreless transformer technology,” Proceedings of PCIM 2013, Nuremberg, Germany, 2013

[2] W. Frank: “Real time adjustable gate current control IC solves dv/dt problems in electric drives,” Proceedings of PCIM 2014, Nuremberg, Germany, 2014

[3] A. v. Jouanne, P. N: Enjeti: “Design considerations for an Inverter Output Filter to Mitigate the Effects of long Motor leads in ASD applications,” IEEE transactions on industry application, Vol. 33, No. 5; 1997

[4] A. Von Jouanne, Haoran Zhang and A. Wallace, "An evaluation of mitigation techniques for bearing currents, EMI and over-voltages in ASD applications," IAS '97. Conference Record of the 1997 IEEE Industry Applications Conference Thirty-Second IAS Annual Meeting, 1997, pp. 478- 485 vol.1, doi: 10.1109/IAS.1997.643066.

[5] W. Frank, D. Levett and Z. q. Zheng, "Two-level slew-rate control driver to optimize IGBT performance," PCIM Europe digital days 2020; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management, 2020, pp. 1-6.

[6] F. Hille, W. Frank: “A new high voltage diode technology with reduced switching losses and improved softness”; Proceedings of PCIM Europe 2007, Nuremberg, Germany, 2007.

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: 09 / 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.