AN_2111_PL51_2111_105141

MOSFETの新しいOptiMOS 6 100Vシリーズ

新たな業界標準となるインフィニオンの最新トレンチMOSFET技術

著者：Simone Mazzer, Moshe Domb, Jeff Malmrose, Yevgeniy Trosman, Francesca Pastorelli

本ドキュメントについて

範囲と目的

本資料では、インフィニオンの新しいOptiMOS™ 6 100 VファミリーのMOSFETを紹介します。革新的なセル設計を活用したインフィニオンの最新トレンチMOSFET技術をベースにした、全く新しいOptiMOS™ 6 100 Vは、非常に低いオン抵抗と優れたスイッチング性能の二つのメリットを提供します。こうした特徴により、OptiMOS™ 6は、高スイッチング周波数のアプリケーションに最適で、大幅な高効率化のトレンドに対応するとともに、いちだんと高い電力密度とコスト効率の設計を可能にします。

こうしたMOSFETの典型的なアプリケーションには、テレコム、サーバー、データコムのほか、ソーラー、ドローン、e-bike、パワーツールなどのバッテリー駆動アプリケーション (BPA) があります。

本アプリケーションノートでは、高速スイッチングDC-DC通信用スイッチモード電源 (SMPS) に焦点を当て、新しいOptiMOS™ 6 100 Vを使用することで得られる性能を紹介します。最初に、技術的な利点を中心にした、簡単な技術の紹介をします。次に、OptiMOS™ 6 100 Vと前世代製品のOptiMOS™ 5 100 V MOSFETとを比較して、広範な実験評価を行いました。

対象読者

本アプリケーションノートは、通信用DC-DC SMPSのアプリケーションエンジニアや設計者を対象としています。

目次

新たな業界標準となるインフィニオンの最新トレンチMOSFET技術 2
本ドキュメントについて 2
1 はじめに：新しいOptiMOS™ 6 100 V 4
1.1 特徴と利点 4
1.2 対象となるアプリケーション 4
1.3 OptiMOS™ 6 100 VとOptiMOS™ 5 100 Vの技術パラメーターの比較 6
1.3.1 BiCデバイスのデータシート比較 6
1.3.2 オン抵抗 *R*DS(on) 7
1.3.3 技術的な性能指数 (FOMg) およびゲートドレイン間の電荷のFOMgd 7
1.3.4 性能指数FOMoss 9
1.3.5 伝達特性と安全動作領域 10
2 実験結果 13

2.1 インフィニオン 600W FB-FB 36～75V->12V絶縁型クォーターブリックDC-DCコンバーター 13
2.1.1 はじめに 13
2.1.2 システムの説明 15
2.1.2.1 PCBの説明 15
2.1.2.2 基板の仕様 17
2.1.2.3 基板の回路図 18
2.1.3 テスト装置の説明 19
2.1.3.1 フィクスチャ ボード 19
2.1.3.2 テスト装置の説明 19
2.1.4 効率性テスト 20
2.1.4.1 はじめに 20
2.1.4.2 Vin = 48 Vでの効率比較 21
2.1.4.3 Vin = 75 Vでの効率比較 22
2.1.4.4 おわりに 24
2.1.5 熱の比較 24
2.1.5.1 測定方法と熱データの紹介 24
2.1.5.2 長時間稼働後の熱画像 25
2.1.5.3 おわりに 26
2.1.6 動作波形 26
2.1.7 インフィニオン OptiMOS™ 6 100 Vが実現するエネルギー効率の複数のメリットの定量化 28
2.1.7.1 運用支出 (OPEX) における節約額の見積もり 28
2.1.7.2 環境問題：さらに環境に配慮した生活にするには 30
2.2 ZVSバック-ブースト型-(36...60)V-12 V DC-DCコンバーター 31
2.2.1 はじめに 31
2.2.2 システムの説明 32
2.2.2.1 PCBの説明 33
2.2.2.2 基板仕様 34
2.2.2.3 基板の回路図 34
2.2.3 テスト装置の説明 35
2.2.4 効率テスト 36
2.2.4.1 はじめに 36
2.2.4.2 Vin = -36 Vでの効率比較 36
2.2.4.3 Vin = -48 Vでの効率比較 38
2.2.4.4 Vin = -56 Vでの効率比較 38
2.2.4.5 おわりに 39
2.2.5 熱の比較 40
2.2.6 動作波形 41
3 製品ラインアップ 42
4 まとめ 43
5 クレジット 44

1 はじめに：新しいOptiMOS™ 6 100 V

1.1 特徴と利点

新しいシリコン技術の開発では、仕様の定義に特別な注意を払い、顧客にシステムレベルでの大きな利点と付加価値を提供しています。新しいOptiMOS™ 6 100 Vの開発の背景には、インフィニオンが20年以上にわたり、トレンチMOSFET技術を開発してきた経験と、顧客のエンドアプリケーション開発をサポートしてきたことにより得られたシステムレベルでの専門知識があります。

インフィニオンの最新のベストインクラス (BiC) 技術は、高周波SMPS向けに最適化されています。業界最高水準のFOM (figure of merit) を実現し、高効率、高電力密度、高いシステム信頼性の実現に貢献しています。

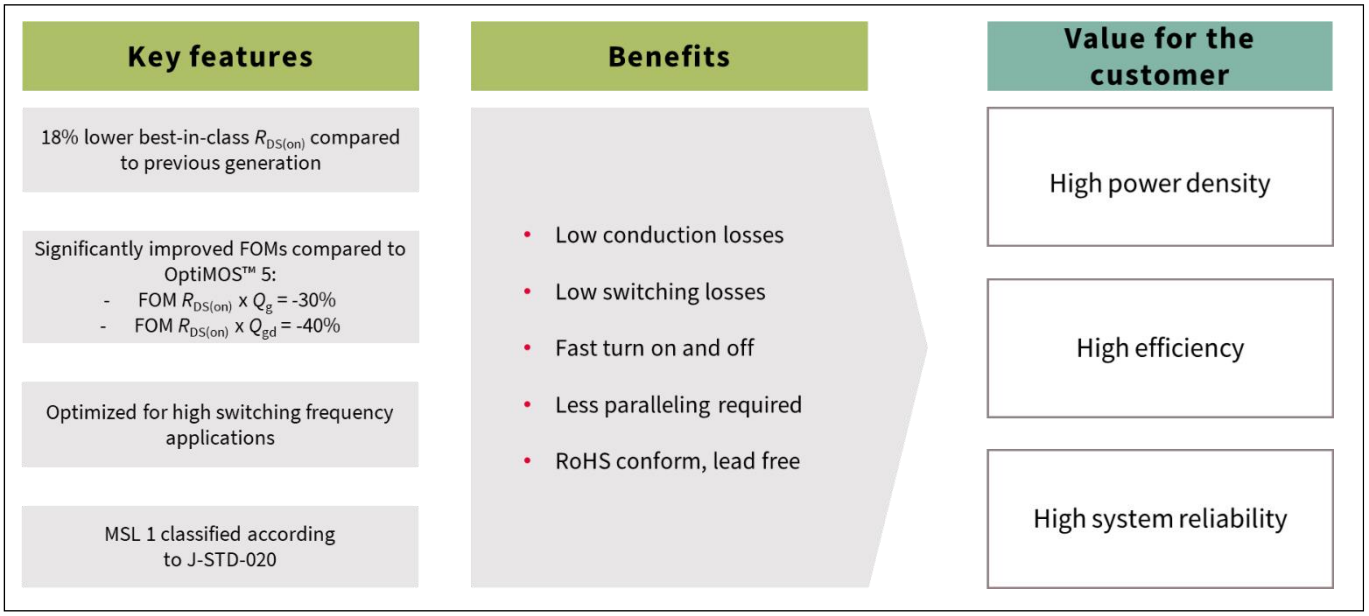


図 1　新技術OptiMOS™ 6 100 V MOSFETの主な特徴と利点

新しいOptiMOS™ 6 100 Vは、完全な3次元電荷補償の原理を採用した斬新なセル設計で、オン抵抗の大幅な改善を実現しています。また、新しいセル構造では、ゲートトレンチを完全に再設計しており、ゲート-ドレイン間の電荷Qgdと総ゲート電荷Qgを大幅に削減しています。メタルゲート技術の導入により、局所的なRgを公称値に正確に制御することで、ダイ面積全体で究極のスイッチング均一性を実現しています。また、メタルゲート技術は、dv/dtに起因するMOSFETの寄生再ターンオンに対する効果的な真性障壁であることも証明しています。また、ポリシリコンに比べて抵抗率が低いため、セル間のゲート電位分布を最も均一にすることができます。

新しいOptiMOS™ 6 100 Vは、幅広い製品ラインアップ (セクション3参照) を持ち、SuperSO8およびPQFN (3.3 x 3.3) に封止されており、幅広いアプリケーションに対応しています。

1.2 対象となるアプリケーション

新しいOptiMOS™ 6 100 Vは、あらゆるFOMにわたって非常にバランスのとれた改善を示しており、高周波SMPS動作や、充電 (スイッチング) とオン抵抗 (導通) の両方によりて損失が発生するソーラーには、重大な利点となります。

この新技術は、特に高周波SMPS向けに最適化されており、ハードスイッチングとソフトスイッチングの両アプリケーションに適しています。

また、BiC $R_{DS(on)}$により、OptiMOS™ 6 100 Vは、ドローン、eバイク、パワーツールなどのBPAの低電圧モータードライブや、バッテリー マネジメント システム (BMS) の切断スイッチにも使用できます。新しいインフィニオンOptiMOS™ 6 100 Vの主な対象アプリケーションの一覧を、表 1に示します。

表 1　新しいインフィニオンOptiMOS™ 6 100Vが対象とする主なアプリケーションのリスト

アプリケーション	トポロジー	適合ブロック
テレコムブリック コンバーター/SMPS	ハードスイッチのフルブリッジ/ ハーフブリッジ	一次側MOSFET
通信 5G RFPA PSU	カスケード：降圧 + DCX	制御/SR MOSFET
ソーラーオプティマイザー	バック、バックブースト	制御/SR MOSFET
ドローン	B6 (3Φ、2Lインバーター)	全て最適
Eバイク	B6 (3Φ、2Lインバーター)	全て最適
パワーツール	B6 (3Φ、2Lインバーター)	全て最適
BMS	バッテリー保護スイッチ	直列パストランジスター

図 2 は、新しいインフィニオンOptiMOS™ 6 100 Vの対象アプリケーションの詳細な概要を示しています。

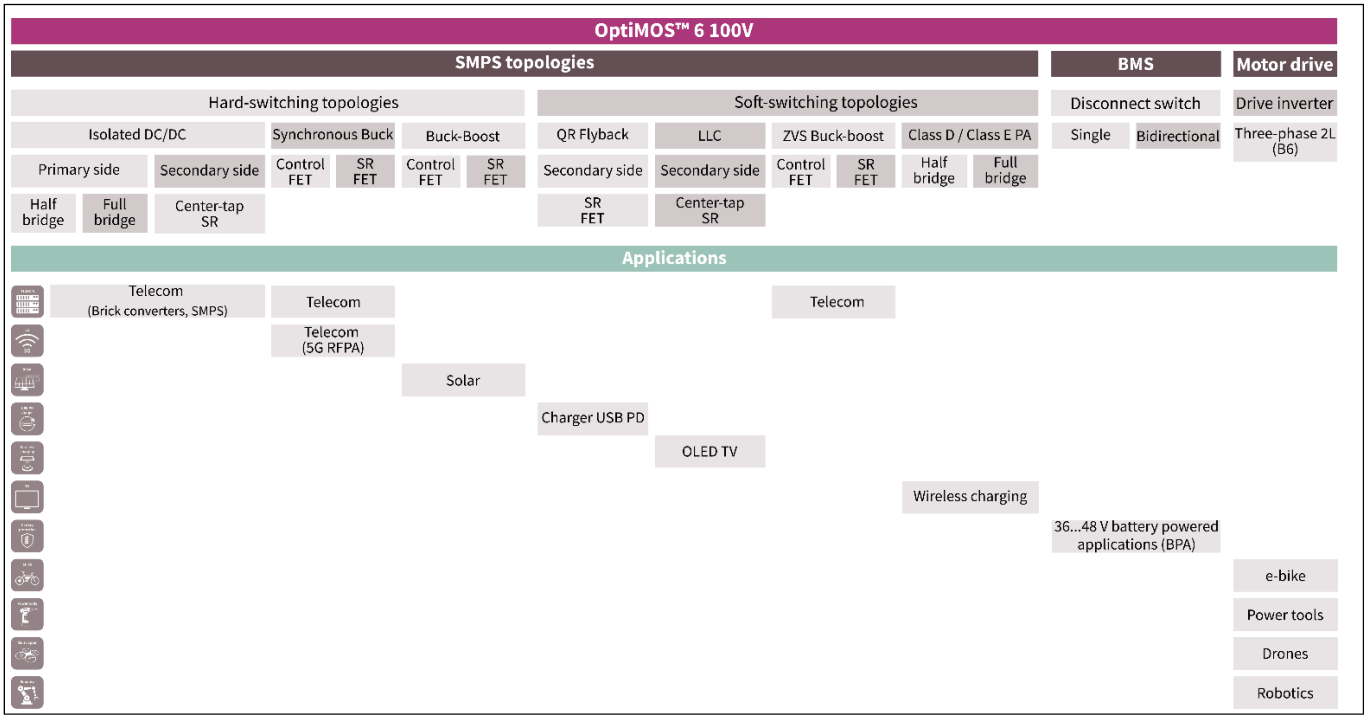


図 2　インフィニオンの新しいOptiMOS™ 6 100Vの対象アプリケーション概要

1.3 OptiMOS™ 6 100 VとOptiMOS™ 5 100 Vの技術パラメーターの比較

以下のセクションでは、最新のOptiMOS™ 6 100Vテクノロジーを、その前世代製品であるOptiMOS™ 5と比較します。まず、それぞれのファミリーの製品ラインアップの単一デバイス (BiCデバイス、つまり最小$R_{DS(on)}$のデバイス) に焦点を当てます。その後、テクノロジーのFOMを比較することで、それぞれのファミリーに一般化して議論します。

1.3.1 BiCデバイスのデータシート比較

表 2では、OptiMOS™ 6 100 VとOptiMOS™ 5 100 Vを搭載したBiCデバイスのデータシートを比較しています。この表では、高スイッチング周波数のSMPSにとって最も重要なパラメーターに焦点を当てています。

表 2　OptiMOS™ 6 100 VとOptiMOS™ 5 100 VのBiCデバイスのデータシートの比較

仕様	記号	単位	条件	インフィニオン OptiMOS™ 6 ISC022N10NM6		インフィニオン OptiMOS™ 6 ISC027N10NM6		インフィニオン OptiMOS™ 5 BSC027N10NS5	
最大オン抵抗	$R_{DS(on)}$	mΩ	T_J = 25°C	2.24		2.7		2.7	
ジャンクション ケース間熱抵抗	R_{thJC}	°C/W	ケース底面 (typ./max.)	0.29/0.59		0.34/0.69		0.4/0.7	
最大ジャンクション温度	$T_{J,max}$	°C		175		175		175	
ドレイン電流	I_D	A	T_C = 25°C	230		192		194	
	$I_{D,pulse}$	A	T_C = 25°C	920		768		776	
電荷量 (Typ.)	Q_{gs} Q_{gd} Q_g	nC	注を参照[1) 2)]	27[1)] 12.6[1)] 73[1)]	24[2)] 11.9[2)] 73[2)]	21.6[1)] 10.1[1)] 58[1)]	19[2)] 9.6[2)] 58[2)]	28[1)] 18[1)] 89[1)]	28[2)] 18[2)] 89[2)]
入力容量 (Typ.)	C_{iss}	pF	V_{GS} = 0 V, V_{DS} = 50 V, f = 1 MHz	5400		4300		6300	
出力容量 (Typ.)	C_{oss}	pF	V_{GS} = 0 V, V_{DS} = 50 V, f = 1 MHz	1200		960		970	
帰還容量 (Typ.)	C_{rss}	pF	V_{GS} = 0 V, V_{DS} = 50 V, f = 1 MHz	19		16		43	
出力電荷 (Typ.)	Q_{oss}	nC	V_{GS} = 0 V, V_{DS} = 50 V	135		107		114	

[1)] 以下の条件で与えられた値：V_{DD} = 50 V, I_D = 67 A

[2)] データシートの公表値。数値はデータシートで定義された動作条件に依存します。

1.3.2 オン抵抗 *R*DS(on)

新しいOptiMOS™ 6 100 Vテクノロジーは、前世代のOptiMOS™ 5 100 V MOSFETに比べ、オン抵抗の大幅な改善を示しています。オン抵抗は、この技術の重要なパラメータです。

図 3は、OptiMOS™ファミリーのBiC製品のデータシートに記載されている、ゲート-ソース間電圧VGS = 10 Vに規定された最大オンステート抵抗値の比較です。SuperSO8パッケージに封止されたBiC OptiMOS™ 6 100 Vは、従来のBiC OptiMOS™ 5 100 Vに比べ、RDS(on)が18%減少しています。

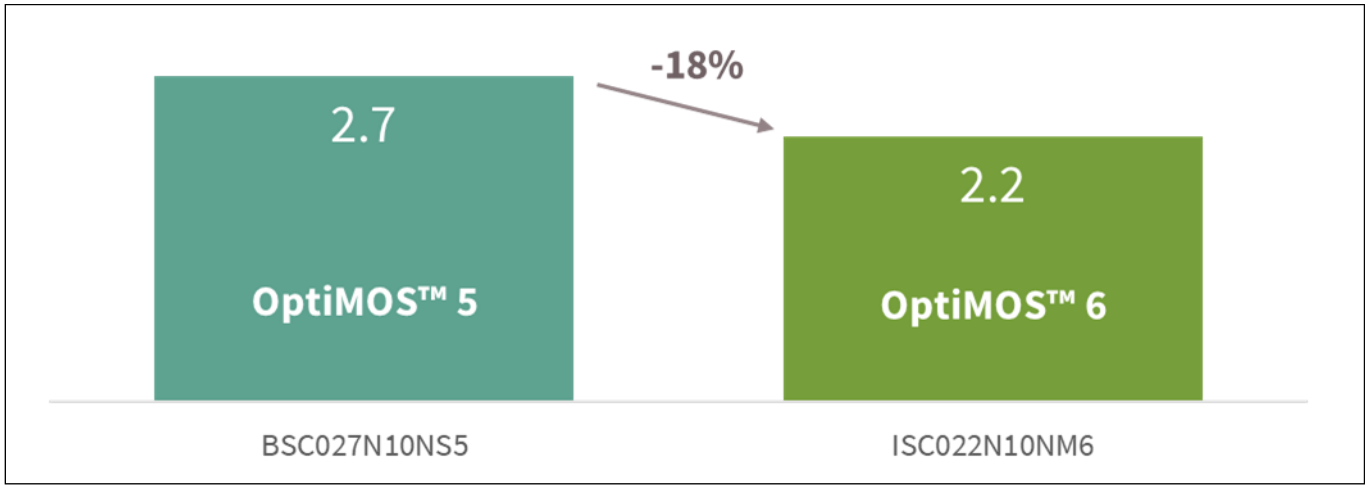


図 3　PQFN (5x6) パッケージに搭載されたBiC 100V MOSFETの最大オン抵抗 (mΩ) の比較

新製品OptiMOS™ 6 100Vは、業界最高水準の比オン抵抗FOMを備えています。これにより、エンドアプリケーションに以下のような一連のメリットをもたらします。

1. 導通損失を最大18%削減。
2. $R_{DS(on)}$の向上により、並列するMOSFETの数を減らすことができ、コストと基板面積の両方を節約し、電力密度を向上させることができます。
3. アプリケーションによっては、$R_{DS(on)}$値を損なうことなく、より小さなパッケージ (PQFN 3.3 x 3.3など) を選択することも可能です。
4. 新しいOptiMOS™ 6 100 VのRDS(on)はOptiMOS™ 5と同じのため、Error! Reference source not found. で示すように、効率の向上が価格と性能の両面でメリットをもたらします。

1.3.3 技術的な性能指数 (FOMg) およびゲート ドレイン間の電荷のFOMgd

新しいOptiMOS™ 6 100 Vの革新的なゲート トレンチ 技術は、ゲート-ソース間およびゲート-ドレイン間の比誘電率を大幅に低減します。これは、前世代製品のOptiMOS™ 5 100 V MOSFETに比べ、それぞれ30%と43%の改善で、性能指数FOMgとFOMgdに反映されています (図 4)。



図 4　OptiMOS™ 5 100 VおよびOptiMOS™ 6 100 Vファミリーのゲート電荷およびゲート ドレイン間電荷のFOM$_g$およびFOM$_{gd}$の比較

The FOM$_g$ は、普通は単にFOMと呼ばれ、技術の総合的な性能指標を示すもので、通常mΩ×nCで表されます。$R_{DS(on)}$は伝導損失の指標であり、Q_gは駆動損失と、Q_{gd}を含むスイッチング損失の一部に影響します。総損失を最小にするためには、$R_{DS(on)}$とQgの両方を最小にする必要があります。FOMは低ければ低いほどよく、$R_{DS(on)}$とQ_gの積を小さくします。

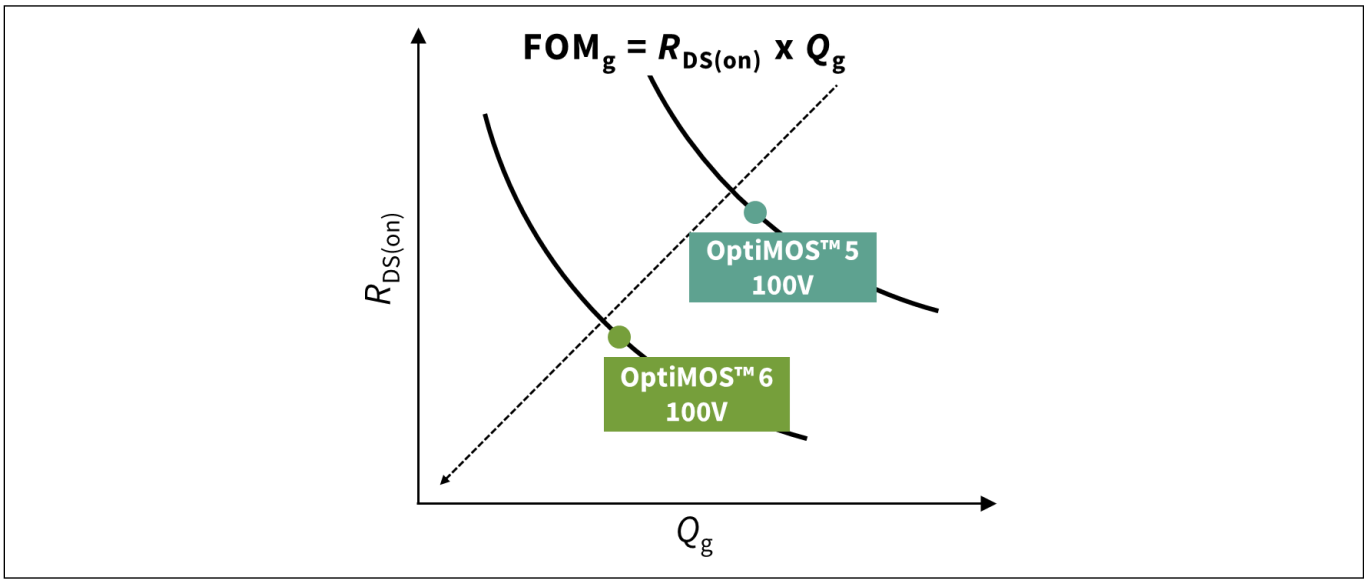


図 5　特定の技術に対して$R_{DS(on)}$とQ_gの間にトレードオフを生じさせるFOM

特定の技術において、電荷に影響を与えずに$R_{DS(on)}$を下げることは、チップの大型化や部品の並列化が必要となるため、不可能です。$R_{DS(on)}$とQ_gの両方を向上させるには、FOMの良い新技術に移行するしかありません (図 5).

図 6では、SuperSO8パッケージでOptiMOS 6 100 V (ISC027N10NM6) とOptiMOS 5 100 V (BSC027N10NS5) の両方の製品ラインアップで利用可能な、同じ$R_{DS(on),max}$ 2.7 mΩのデバイスのゲートチャージ特性がプロットされています。新しいOptiMOS™ 6 100 V ISC027N10NM6は、OptiMOS™ 5 100 Vファミリーの同等品と比較して、総ゲートチャージを35%削減するという優れた効果を発揮します。また、試験の特殊な条件下で、ゲートからドレインへの電荷の改善は、前世代のOptiMOS™ 5と比較して、極めて優れた-45%となりました。

Q_gの低減は、駆動損失 $P_{aux} = Q_g \times U_{GG} \times f_{sw}$ の低減により、特に軽負荷時の効率向上につながります。これは、スイッチング周波数の高いSMPSや、モーター駆動のように多数のMOSFETが並列に配置されているアプリケーションでは特に重要です。後者の場合、Q_gが低いと、ドライバーの電流能力の要件を緩和することもできます。

一方、Q_{gd}が低いと、高速スイッチング過渡現象が発生し、スイッチングクロスオーバー損失が低下しますが、これは時にターンオフ損失全体の無視できない要因となります。

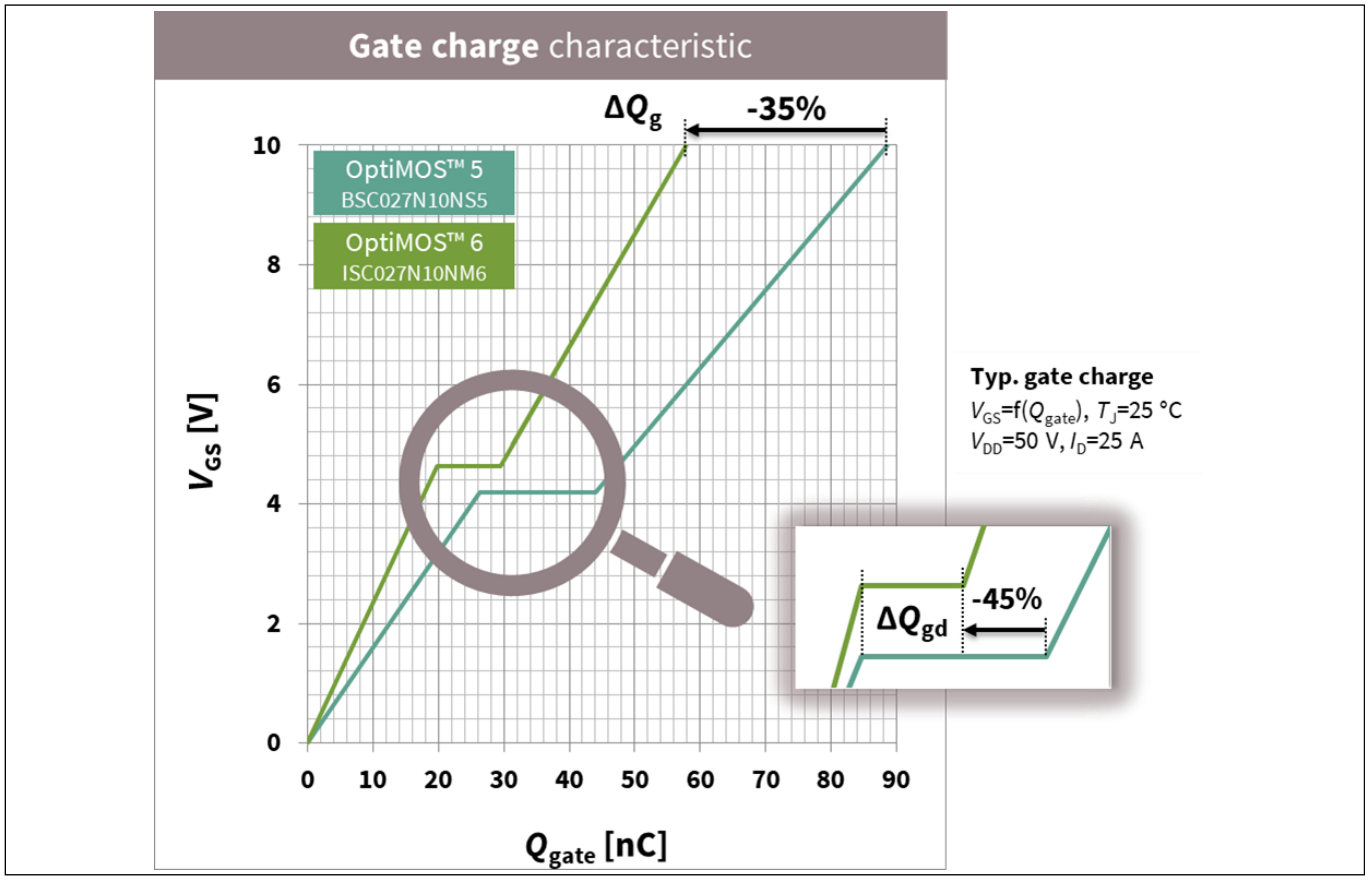


図 6　OptiMOS™ 6 100 V (緑) とOptiMOS™ 5 100 V (青)を用いた同一$R_{DS(on)}$ (2.7 mΩ) デバイスのゲート電荷曲線の比較

1.3.4　性能指数FOMoss

MOSFETの出力キャパシタンスは、スイッチングサイクルごとに充電されます。一般に、ハードスイッチトポロジーでは、蓄積されたエネルギーは回収できず、ターンオン損失のかなりの部分を発生させてしまいます。

テクノロジー FOM$_g$, と同様に、出力電荷性能FOM$_{oss}$ = $R_{DS(on)} \times Q_{oss}$ は、伝導とスイッチングにおけるテクノロジーの性能を示す合成指標です。Q_{oss}に関連する損失は、ドレイン電圧が高くなるとますます重要になり、スイッチング周波数に比例して大きくなります。一般的に、スイッチング周波数の高いハードスイッチ型のSMPSでは、効率を上げるために出力電荷の値を小さくすることが望ましいとされています。

前世代のOptiMOS™ 5 100 V MOSFETは、すでに優れた出力電荷FOMを示していたため、OptiMOS™ 6 100 Vの最適化では、FOM$_{oss}$に影響を与えることなく、ゲート-ドレイン間の電荷Q_{gd}と総ゲート電荷Q_g、ひいては対応するFOMを改善することに焦点を当てました(図 7).

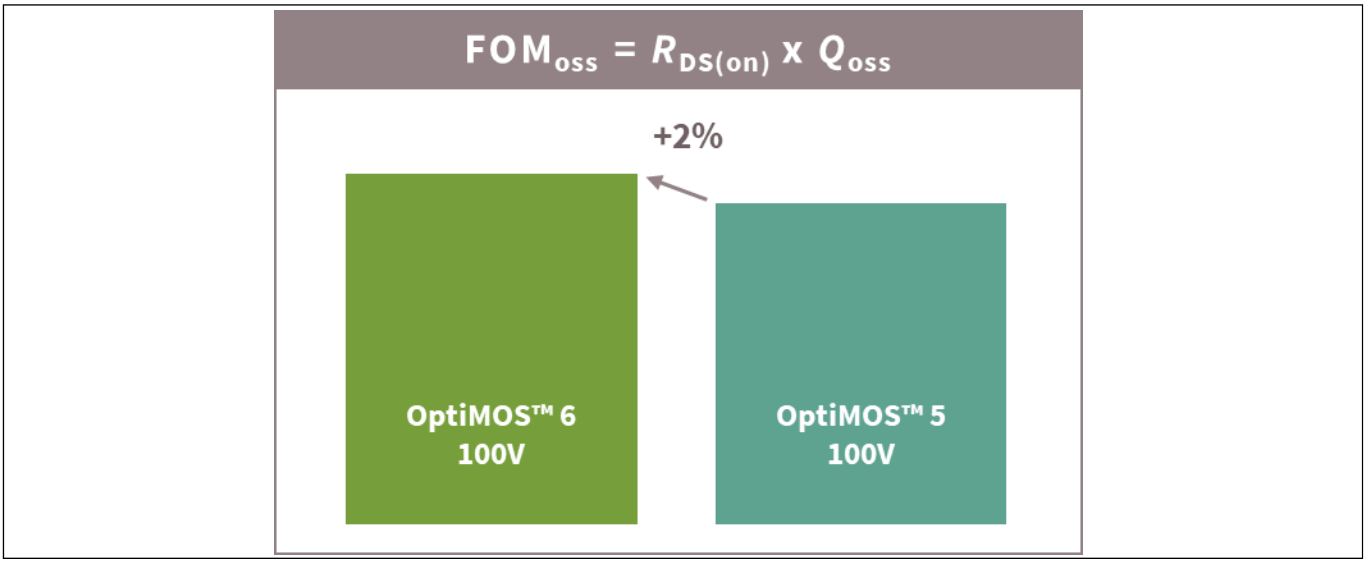


図 7　100V MOSFETの技術別の出力電荷FOM_{OSS}の比較

1.3.5　伝達特性と安全動作領域

新しいOptiMOS™ 6 100 Vの斬新なセル構造は、MOSFETの伝達特性 $I_D = f(V_{GS})$ にも反映されています。

伝達特性が特に重要なのは、MOSFETが線形領域で動作するように駆動される場合、つまり電圧制御の電流源として動作する場合です。スイッチング過渡時には、MOSFETは線形領域を通過するため、伝達特性はミラープラトー電圧の値などのスイッチング特性も制御します。

新しいOptiMOS™ 6 100VファミリーのMOSFETと、前世代のOptiMOS™ 5のBiCデバイスの伝達特性を比較しました (図8)。OptiMOS™ 6では、セルの特殊な設計により、MOSFETのターンオン動作がより緩やかになっているため、相互コンダクタンスが若干低くなっています。.

これは、SMPS以外のアプリケーションで、MOSFETがゆっくりと切り替わる場合や、ホットスワップ保護回路のようにMOSFETを意図的に線形領域で動作させる場合に特に有効です。このような場合にトランスコンダクタンスを低くすると、熱暴走に対するMOSFETのロバスト性が高まるというメリットがあります。ZTC (ゼロ温度係数) 以下の電流では、伝達特性に正の温度係数が現れ、チップの最も高温な部分にどんどん電流が流れ、さらに温度が上昇してしまう。この自立現象 (電流集中) は、ダイにホットスポットを形成し、故障の原因となります。

ZTCポイントが高いドレイン電流に配置されたMOSFETは、熱暴走の影響を受けやすくなります。新しいOptiMOS™ 6 100 Vの伝達特性では、このポイントが低電流にシフトしており、また、25°Cから175°Cの間のジャンクション温度でトランスコンダクタンスの増加は限定的で (図 8)、熱暴走に対する堅牢性が向上しています。新しいOptiMOS™ 6は、ジャンクションからケースまでの優れた熱抵抗とともに、図 9の比較から明らかなように、安全動作領域 (SOA) の大幅な改善を示しています。

MOSFETの熱暴走現象とその原因については、インフィニオンのアプリケーションノート [1]、[2]をご覧ください。

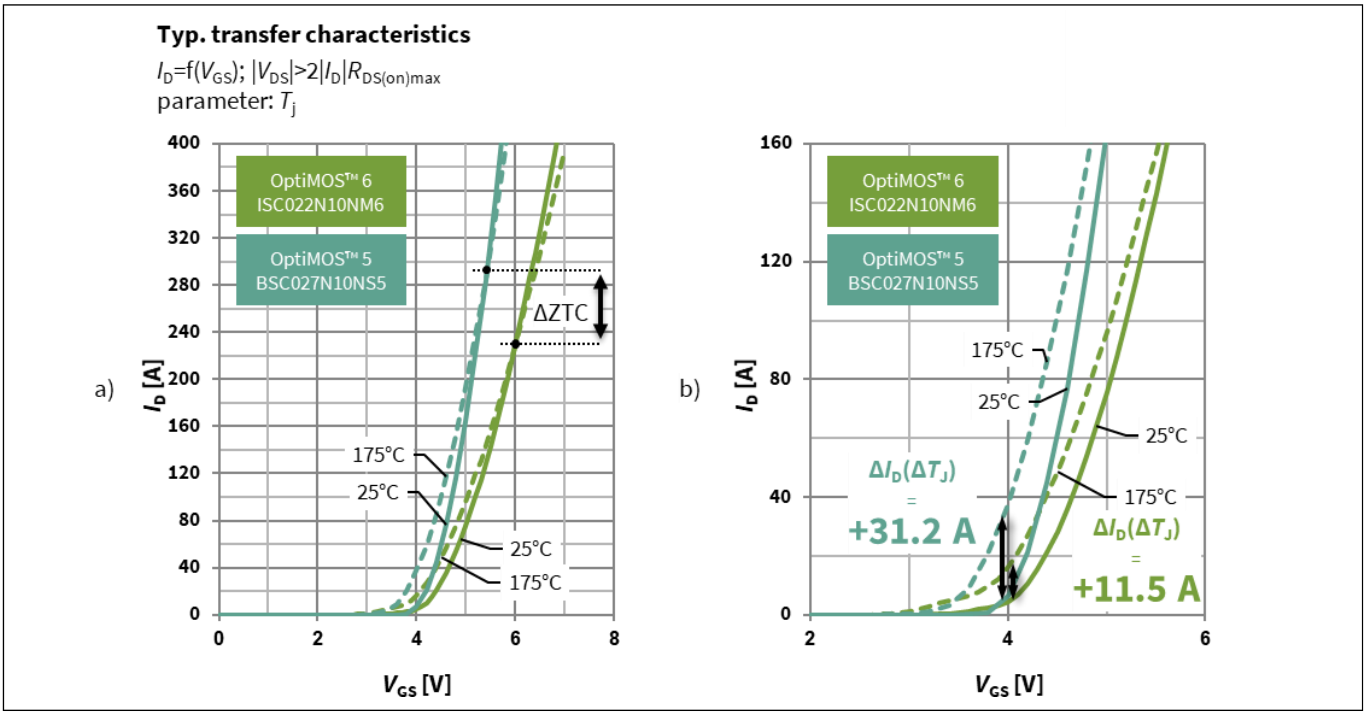


図 8　OptiMOS™ 5 100 VおよびOptiMOS™ 6 100 Vファミリー MOSFETのBiCデバイスの代表的な伝達特性の比較

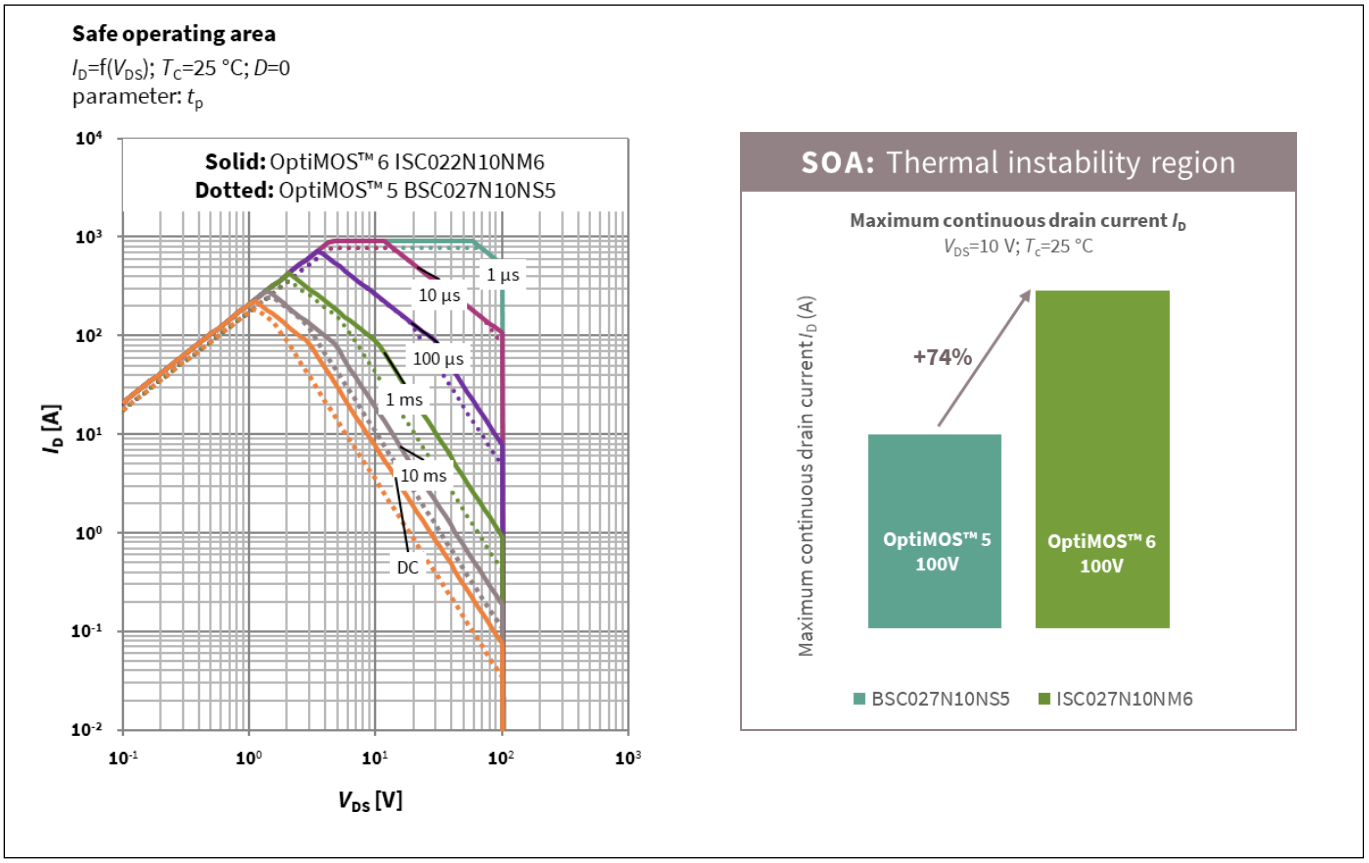


図 9　左：OptiMOS™ 6 100 VファミリーとOptiMOS™ 5 100 VファミリーのMOSFETから選択したBiCデバイスのSOA比較。右：SOA改善によるリニア動作時のDC電流耐量の向上

注： *SOA図は、パッケージ温度をTC=25°Cに保たれた理想的な場合のものです。電力パルスが印加されると、ジャンクション温度は過渡熱インピーダンスZthjCによって上昇します。インフィニオンのOptiMOS™パワートランジスタのデータシートでは、オン状態の抵抗値の最悪値、すなわちTJ = 175°Cで予想される最大値を考慮して、$R_{DS(on)}$制限領域をトレースしています。*

最新のトレンチ型MOSFET技術を改良する際、比オン抵抗の低下とトレードオフの関係にあるSOAの狭小化傾向が観察されました。新しいOptiMOS™ 6 100 V技術は、特にミリ秒領域のパワーパルスに対して、$R_{DS(on)}$を損なうことなく、より広いSOAを実現しています。これにより、新しいOptiMOS™ 6 100 Vは、BMSの保護スイッチとして、あるいはテレコムのホットスワップスイッチとして、実現可能な候補となるはずです。

2 実験結果

次のセクションでは、高周波数のSMPSのための実際の最先端の実装に焦点を当てて、実験結果を報告します。

2つの異なるSMPSアプリケーションについて、実験的な評価が行われました。

1. 最初に紹介するアプリケーションは、DOSA (Distributed Power Open Standards Alliance) のクォーターブリックフォームファクタのテレコム用DC-DC中間バスコンバーター (IBC) です。フルブリッジ整流方式のフルブリッジトポロジーを採用しており、ハードスイッチングという性質上、伝導損失とスイッチング損失の両方がシステム全体の効率に影響を与えます。このアプリケーションに適しているのは、可能な限り低いRDS(on)と低電荷の必要性を組み合わせたデバイスであり、典型的な600Wのコンバーターに最も適しているのは、範囲6mΩまでのデバイスです。このアプリケーションでは、SuperSO8にパッケージされた新しいOptiMOS™ 6 100 V ISC060N10NM6、6 mΩ RDS(on),maxを、前世代のOptiMOS™ 5 MOSFETのBSC050N10NS5と比較しています。
2. 二番目に紹介するアプリケーションは、ゼロ電圧スイッチング(ZVS) 反転バックブースト トポロジーに基づく通信用DC-DCコンバーターです。このソフトスイッチングアプリケーションでは、損失の主な原因が導通によるものであるため、可能な限り低い$R_{DS(on)}$値を示すBiCが最適なデバイスとなります。このアプリケーションでは、SuperSO8にパッケージされた新しいOptiMOS™ 6 100 V ISC022N10NM6、2.2 mΩ $R_{DS(on),max}$が、前世代のOptiMOS™ 5 MOSFETのBSC027N10NS5と比較されています。

両アプリケーションについて、効率測定、熱データ、波形を比較しています。

2.1 インフィニオン 600W FB-FB 36～75V->12V絶縁型クォーターブリックDC-DCコンバーター

2.1.1 はじめに

テレコムやデータコムの電源システムでは、変換チェーンに絶縁型DC-DC IBCを採用するのが一般的で、公称-48Vの入力を受けて、下流のポイントオブロード (PoL) コンバーター用に12 Vのバスを生成します (図10)。本アーキテクチャは、モジュール方式で実装されるのが一般的です。モジュール化は具体的には以下に対応します。

- 標準化
- スケーラビリティ
- フォールトトレランス
- シンプルなメンテナンス

これは通信用電源システムの厳しい要件を満たすために必要です。IBCは通常、パワーモジュールとして提供されており、DOSAが定める標準化されたフォームファクターとフットプリントのファミリーで、一般にブリックパワーモジュールとして知られています。ブリックコンバーターは、複数のメーカーから発売されており、標準設計により、バックボーンPCBの設計を変更することなく、相互に交換できる可能性があります。この規格では、パワーモジュールの機械的な概要とフットプリントのみが定義されており、電気的な仕様は規定されていません。つまり、アプリケーション (通信、データコム)、システムの種類 (-48V、-60V)、または下流のPoLの要件に応じて、モジュールを設計することができます。

具体的には、さまざまな電力変換トポロジーを実装することができ、それには非レギュレーション型とレギュレーション型があります。非レギュレーション型トポロジーは、DCトランス（DCX）のように動作し、一般的に最高の効率を示しますが、仕様内の出力を提供するためには、厳密にレギュレーションされた入力電圧に依存します。一方、レギュレーテッドトポロジーは、効率はやや劣るものの、通常、-75 Vから-36 Vまでの全通信範囲に対応する必要があります [3]。

実験結果

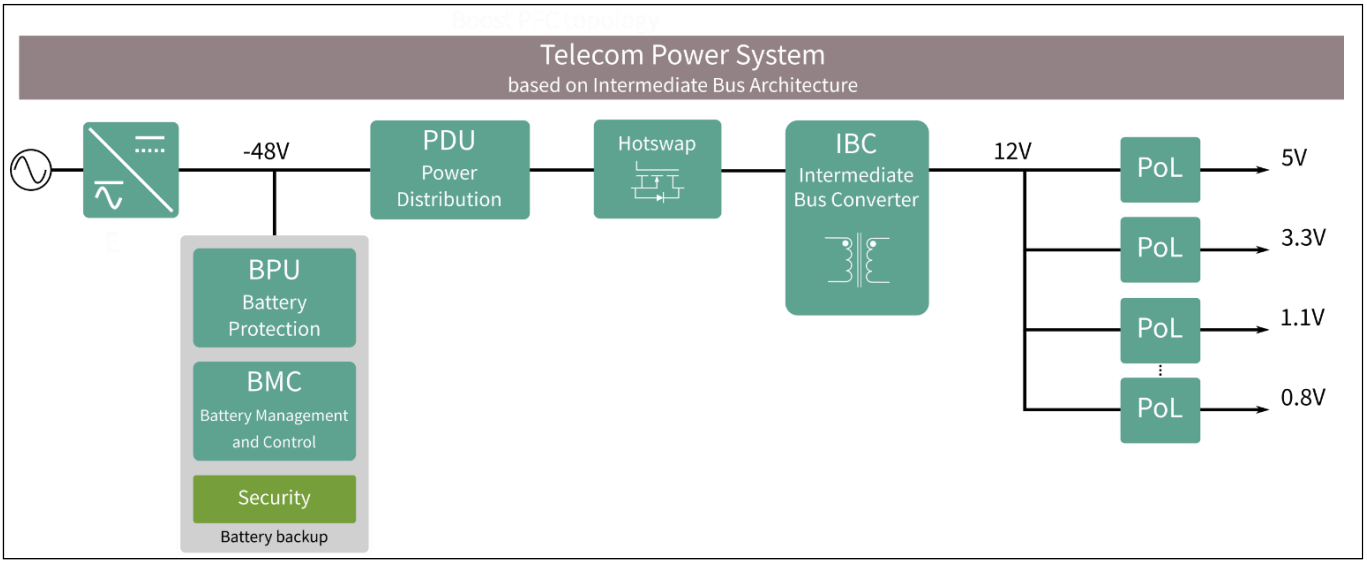
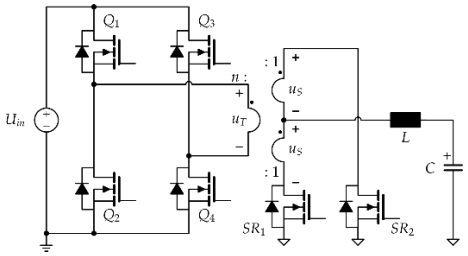
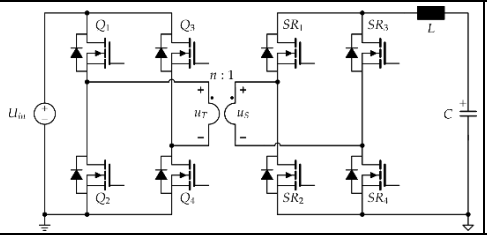


図 10　　中間バスアーキテクチャ (IBA) を用いた典型的な通信電力システムの簡略化した模式図

近年では、クオーターブリックフォーマットが業界標準として定着しています。このフォームファクターを採用したIBCの代表的な電力変換アーキテクチャは、ハーフブリッジとフルブリッジのフォワードタイプのハードスイッチ降圧型です。同期整流 (SR) ステージは、センタータップ型トランスの設計を利用するか、ブリッジとして構成することができます。表 3は、これらのトポロジーの簡略化した回路図です。

近年のMOSFET技術の継続的な向上により、電力密度は着実に増加しています。現在、主要メーカーが公表しているデータシートによると、標準的なクオーターブリックのIBCは、通常600Wの範囲の電力を供給しています。インフィニオンは、入力電圧範囲が36～75V DCで動作し、最大600Wの出力電力を供給する、完全に機能するクオーターブリックのIBC評価ユニットを開発しました。このユニットについては、次の段落で紹介しますが、新しいOptiMOS™ 6 100 Vを実際のアプリケーションで使用することによって得られる性能を紹介する最初のテストベンチとして使用されます。

表 3 標準的なクオーターブリックデザインに採用されているフルブリッジのハードスイッチングトポロジー

トポロジー	回路図	コスト/複雑さ	効率性	消費電力
センタータップ整流式フルブリッジ (FB-CT)		部品点数が少なく、2次側の駆動がシンプルなため、HBドライバーを使用せずに済むことから、低コストを実現。	高	300～600 W
フルブリッジ整流方式のフルブリッジ (FB-FB)		コストが高い。補正のために4台のSRと、2台のHBドライバーが必要。	最高	600～800 W

2.1.2 システムの説明

インフィニオンは、完全に機能するIBC評価ユニットを開発しました。このユニットは、入力電圧範囲がDC 36～75Vで動作します。大電流クォーターブリックのDOSAメカニカルアウトラインを踏襲したデザインで、DC12Vの出力電圧を調整し、最大600Wの出力を実現しています。

IBCには機能絶縁を提供することが求められます。インフィニオンは、このような電力/電圧範囲では最適なアプローチと考え、フルブリッジSR (FB-FB) を用いたフルブリッジトポロジーのメインパワーステージを設計しました。

インフィニオン半導体の優れた性能、革新的な冷却コンセプトソリューション、平面磁気構造により、22W/cm3 (360W/in3) 台の電力密度を実現しています。この基板は、テスト用プラットフォームとして設計されており、プローブテストポイントへのアクセスが容易で、部品の再加工/交換も容易です。このモジュールには、必要なバイアスを供給するための補助ハウスキーピング電源が搭載されています。

インフィニオンのこの600 W 絶縁 FB-FBクオーターバックは、さまざまな温度環境で動作するため、信頼性の高い動作を保証するのに十分な冷却を行う必要があります。

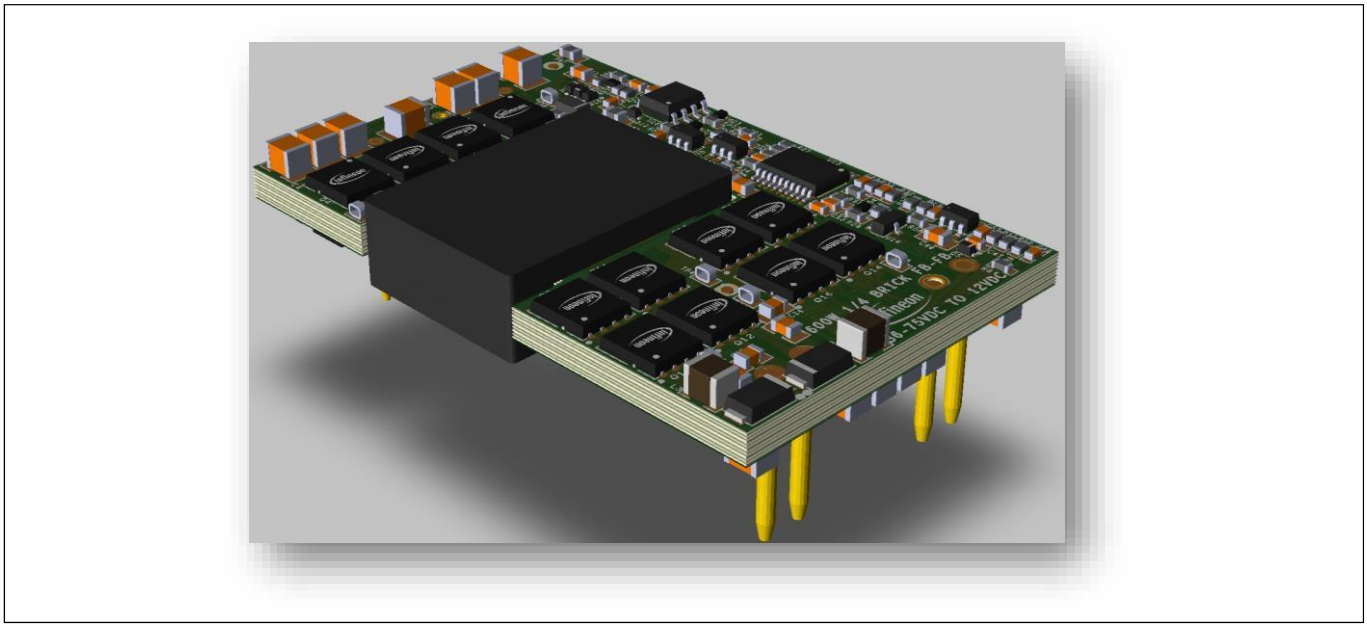


図 11　インフィニオン600 W FB-FB 36～75 V→12 V絶縁型クォーターブリック コンバーターの3D図

2.1.2.1 PCBの説明

図 12 は、インフィニオン600W FB-FB 36～75 V->12 V絶縁型1/4ブリック コンバーター上の各部品と測定テストポイントの配置を示しています。筐体なしで設計された基板の外形寸法は、2.3インチ×1.45インチ×0.5インチ (58.42mm x 36.83mm x 12.5mm) です。(2.3インチ×1.45インチ×0.5インチ（58.42ミリ×36.83ミリ×12.7ミリ）で、電力密度は22W/cm³（360W/in³）の範囲となります。

プリント基板は10層基板を使用しています。内部の層はすべて5オンス銅 (6.88mil、0.174mm) の厚さで、上部と下部の層は4オンス銅 (5.5mil、0.140mm) の厚さです。基板の総厚さは118mil (3mm) です。

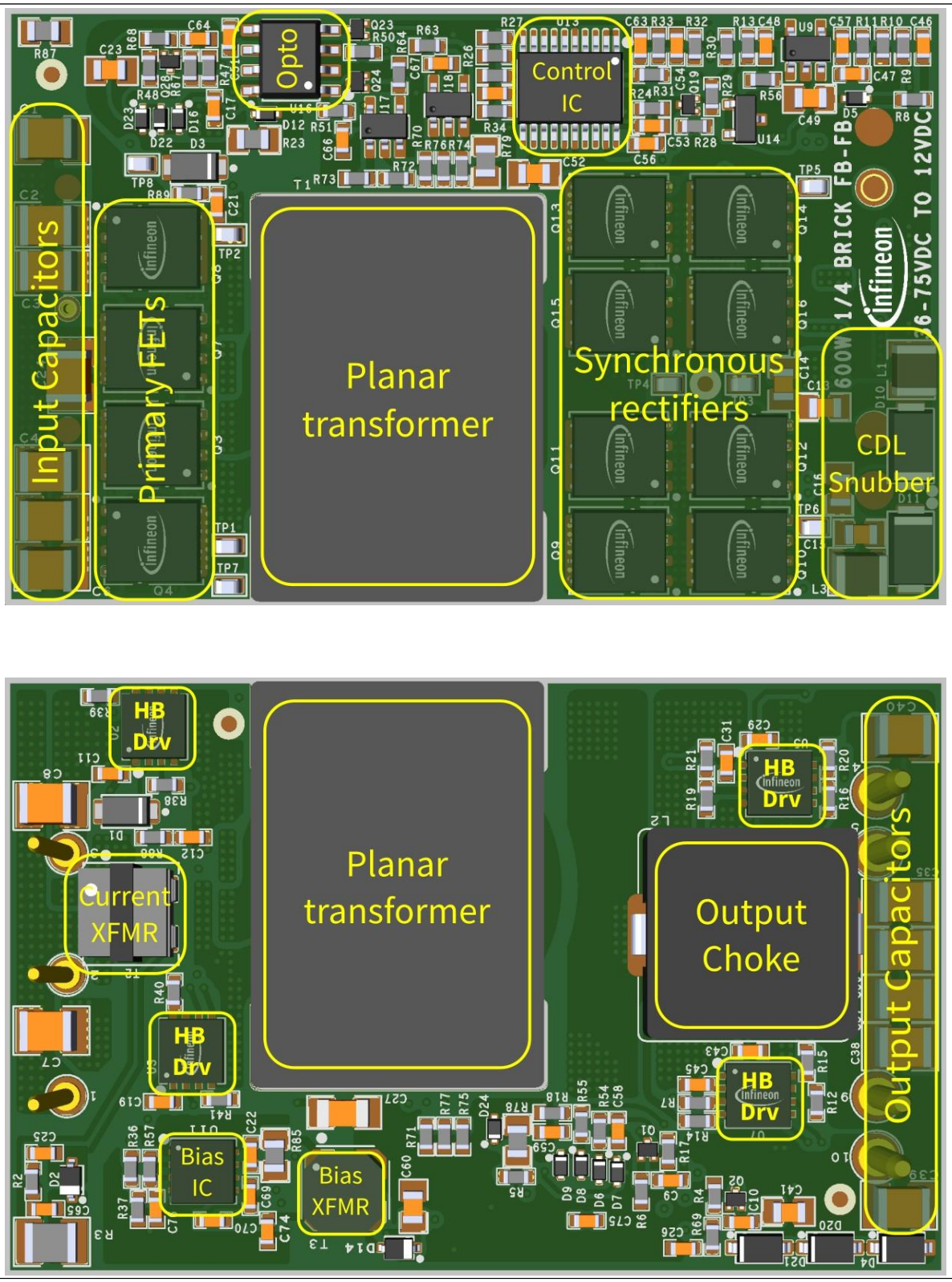


図 12　インフィニオン 600W FB-FB 36V～75V->12V絶縁型1/4ブリック コンバーターにおける最重要部品の配置

2.1.2.2 基板の仕様

インフィニオン600W FB-FB 36～75V→12Vの絶縁型1/4ブリックDC-DCコンバーターの仕様を表 4に示します。.

表 4 インフィニオン 600 W FB-FB 36～75 V→12 V絶縁型クオーター ブリックDC-DCコンバーターの仕様

パラメータ	記号	値			単位	備考/テスト条件
		Min.	Typ.	Max.		
動作入力電圧	V_{in}	36	48	75	V	
入力電流実効値	$I_{in,RMS}$		16 13 9		A	V_{in} = 36 V, P_{out} = 600 W V_{in} = 48 V, P_{out} = 600 W V_{in} = 75 V, P_{out} = 600 W
効率	η	95.5%				V_{in} = 48 V, P_{out} = 420 W
起動時の電圧閾値	$UVLO_{(on)}$	32		36		
起動後の最低動作電圧	$UVLO_{(off)}$	29		34		
消費電力	P_{out}	0		600	W	
出力電圧設定値	$V_{out,nom}$		12		V	出力レギュレーションはVin = 42 V～75 Vを達成
出力電圧設定値の許容範囲	$\sigma V_{out,nom}$	-3		3	%	
電力消費量	P_{diss}		25			
相対的な出力電圧変動 (負荷)	$\Delta V_{out}/V_{out}$			0.5	%	
相対的な出力電圧変動 (ライン)	$\Delta V_{out}/V_{out}$			0.5	%	
出力リップル＆ノイズ			120		mVpp	0.1µFのセラミック コンデンサーと10µFのタンタル コンデンサーを並列に配置して25°Cで測定
出力DC電流	I_{out}			50	A	
最大出力キャパシタンス	$C_{out,max}$			1500000	µF	
スイッチング周波数	f_{sw}		250		kHz	
気流速度	v_{air}		600 3		LFM m/s	
機能分離電圧	V_{iso}		1500		V	

2.1.2.3 基板の回路図

インフィニオン 600W FB-FB 36～75V→12Vの絶縁型クォーターブリックDC-DCコンバーターの主電源段の回路図を図 13に示します。

メインパワーステージ

インフィニオン600W FB-FB 36～75V→12V絶縁型クォーターブリックDC-DCコンバーターは、インフィニオンのパワー半導体の他に、インフィニオンのゲートドライバーを使用し設計されています。基板の設計については、下記のとおりです。

- OptiMOS™ 5 100 V BSC050N10NS5、5 mΩ、 SuperSO8パッケージは、フルブリッジコンバーターの一次側に使用されることを意図しています。基板は、1カ所に1個のデバイスが収まるように設計されており、合計4個のパワーMOSFETが搭載されています。
- OptiMOS™ 6 40V BSC010N04LS6、1 mΩ、SuperSO8パッケージは、フルブリッジコンバーターの2次側のSRとして使用されています。1カ所に2個のデバイスを並列化して出力電流を処理し、合計8個のパワーMOSFETを搭載しています。
- 2EDL8124G EiceDRIVER™ デュアルチャネルジャンクションアイソレーションゲートドライバーは、一次側ブリッジに使用され、差動入力でありながら内蔵ヒステリシスを備えているため、シュートスルー保護機能を有しています。
- 2EDL8024G EiceDRIVER™ デュアルチャネルジャンクションアイソレーションゲートドライバは，2次側ブリッジに独立した入力を持ち、ヒステリシスを内蔵してノイズ耐性を高めています。

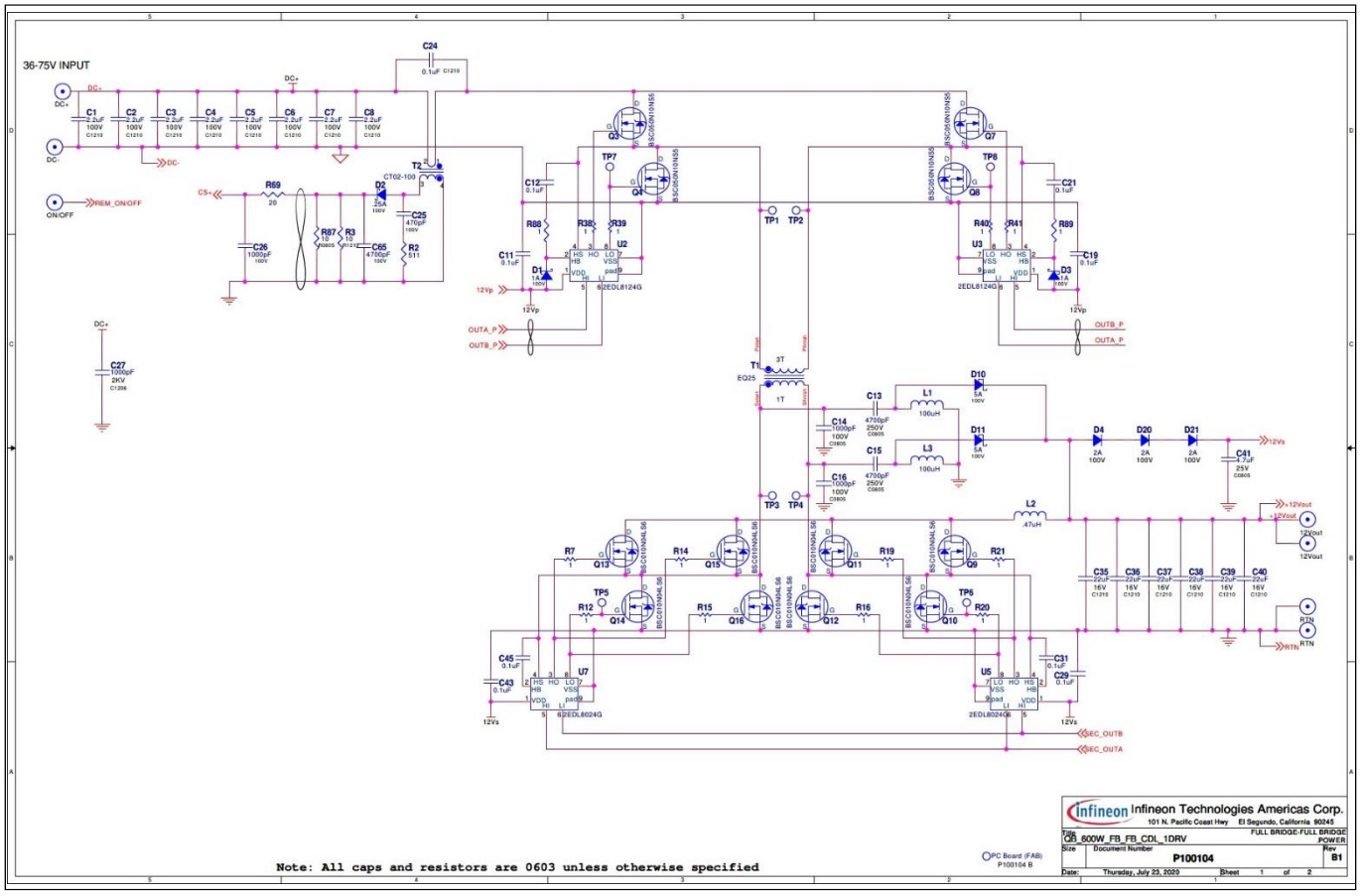


図 13　インフィニオン 600W FB-FB 36～75V→12Vの絶縁型クォーターブリックDC-DCコンバーター。回路図1ページ目：主電源段

2.1.3 テスト装置の説明

2.1.3.1 フィクスチャ ボード

ブリックパワーモジュールとしてのインフィニオン600W FB-FB 36～75V->12V IBCは、基板実装型の電源です。バックボーンボードには、入出力ポートに必要なフィルターコンデンサ、電源接続端子、冷却ファンを設ける必要があります。ホストボードとの電源接続はプレスフィットコネクタで行います。

2.1.3.2 テスト装置の説明

実際のテスト装置を図 14図 14 に示します。ここでは、そのテストセットアップ (図 15) について詳しく説明します。

電圧源

- 少なくとも700 W、最大80 VのDCを供給可能なDC PSU
- ファンバイアスを供給するための7～12 V DCを供給可能な低電圧、低消費電力のDC PSU

アクティブ負荷

- 低電圧、大電流 (50A以上) の電子負荷 (定電流モードで動作)。

計測機器

- 入力電流高精度電流シャント抵抗 (20A、0.1%)
- 出力電流高精度電流シャント抵抗 (100A、0.1%)
- 入力電圧、出力電圧、シャント電圧測定用の6½桁デジタルマルチメーター (DMM) を4台搭載
- 高帯域 (500MHz超) のデジタルオシロスコープ (DSO) とパッシブ電圧プローブ
- 基板全体の温度を取得するサーモグラフィ

テストフィクスチャーボード

信頼性と再現性のある測定データを提供するためには、インフィニオン 600 W FB-FB 36～75 V→12 V絶縁型クォーターブリックDC-DCコンバーターを適切なテスト装置でテストすることが有効です。インフィニオンのブリックテストフィクスチャボードを使用すると、はんだ付けの必要がなく、簡単に実現できます。テスト機器はテストフィクスチャに直接接続され、ブリックモジュールは簡単に抜き差しできるので、異なるテスト間の再作業活動が容易になります。

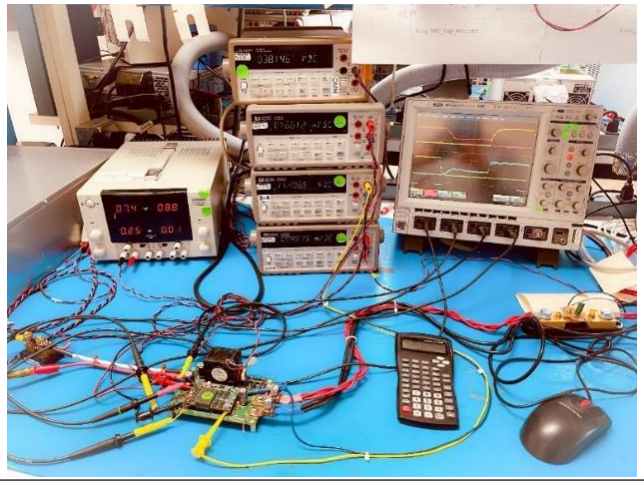


図 14 実際のテスト装置

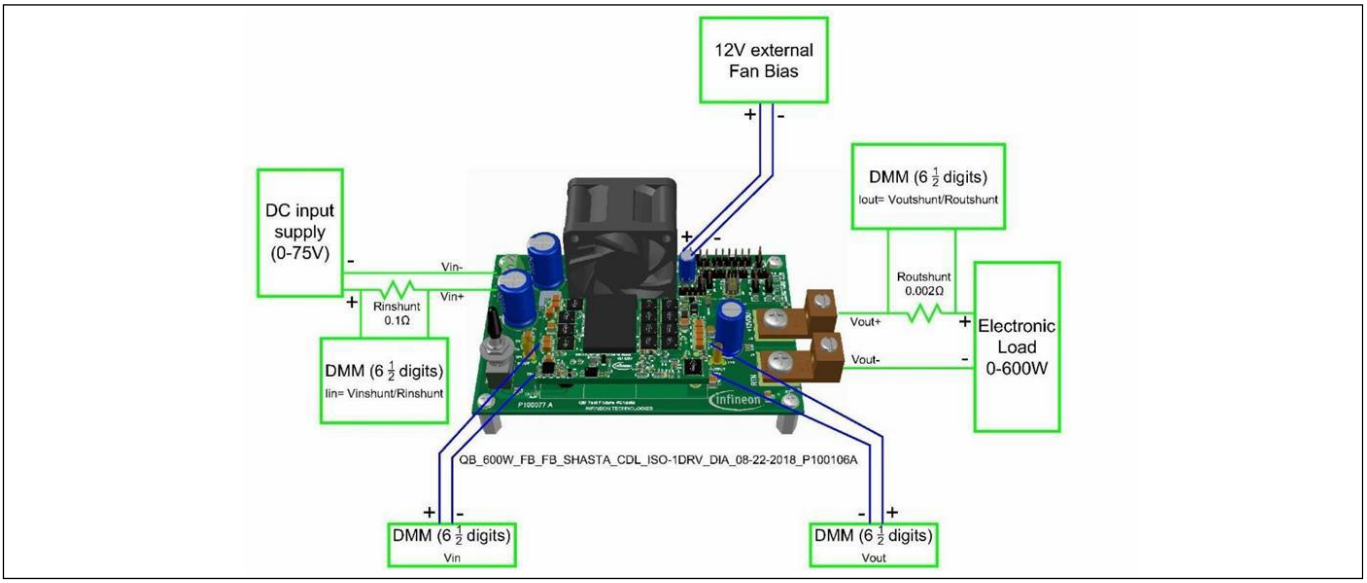


図 15　　テスト装置の概略説明

2.1.4　効率性テスト

2.1.4.1　はじめに

2.1.3 テスト装置の説明で紹介したテスト装置を使用して、インフィニオン 600 W FB-FB 36～75 V->12 V 絶縁型 1/4ブリック DC-DC コンバータの効率テストを実施しました。

2.1.2.3 基板の回路図に示すように、インフィニオン600 W FB-FB 36～75 V->12 V絶縁型1/4ブリックDC-DCコンバーターは、当初、一次側ブリッジにインフィニオンOptiMOS™ 5 100 V BSC050N10NS5を使用して設計されています。オリジナルの設計でも、一次側のMOSFETの代わりに新しいインフィニオンOptiMOS™ 6 ISC060N10NM6を使用しても、効率性は確保されています。その他の部分は、ブリックボードとテスト セットアップ全体で変更されていません。被試験デバイス (DUT) の概要とその位置を表 5に示します。

表 5　テスト対象のデバイス - 図 13の回路図ファイルを参照

DUTの位置	DUT #1	DUT #2
プライマリーブリッジ型 MOSFET :Q3, Q4, Q7, Q8	インフィニオンOptiMOS™ 5 100 V, 5 mΩ BSC050N10NS5	インフィニオン OptiMOS™ 6 100 V, 6 mΩ ISC060N10NM6

注：　インフィニオン600 W FB-FB 36～75 V→12 V絶縁型クオーター ブリックDC-DCコンバーターと同じユニットを使用し効率を上げています。まず、インフィニオン OptiMOS™ 5 100 V BSC050N10NS5を一次側のMOSFETとして使用した新品のユニットで効率性を得て、次にもう一方のDUTで効率を得るよう作り直しています。これにより、DUT間の公平な比較が可能になります。

2.1.4.2 V_{in} = 48 Vでの効率比較

表 6は、異なるDUTの公称入力電圧 (Vin = 48 V) で取得した効率をまとめたものです。効率は600LFM (3m/s) の風量で測定され、熱的定常状態に達した後に捕捉されます。

DUTとしてOptiMOS™ 5を採用したオリジナルのセットアップに対する絶対的および相対的な効率曲線を、それぞれ図 16と図 17に示します。

表 6　公称入力電圧 V_{in} = 48 Vでの効率測定値 (%)

出力電流	インフィニオン OptiMOS™ 6 100 V, 6 mΩ ISC060N10NM6	インフィニオン OptiMOS™ 5 100 V, 5 mΩ BSC050N10NS 5
5 A	88.49	87.80
10 A	92.55	92.14
25 A	95.57	95.37
35 A	95.80	95.64
50 A	95.51	95.37

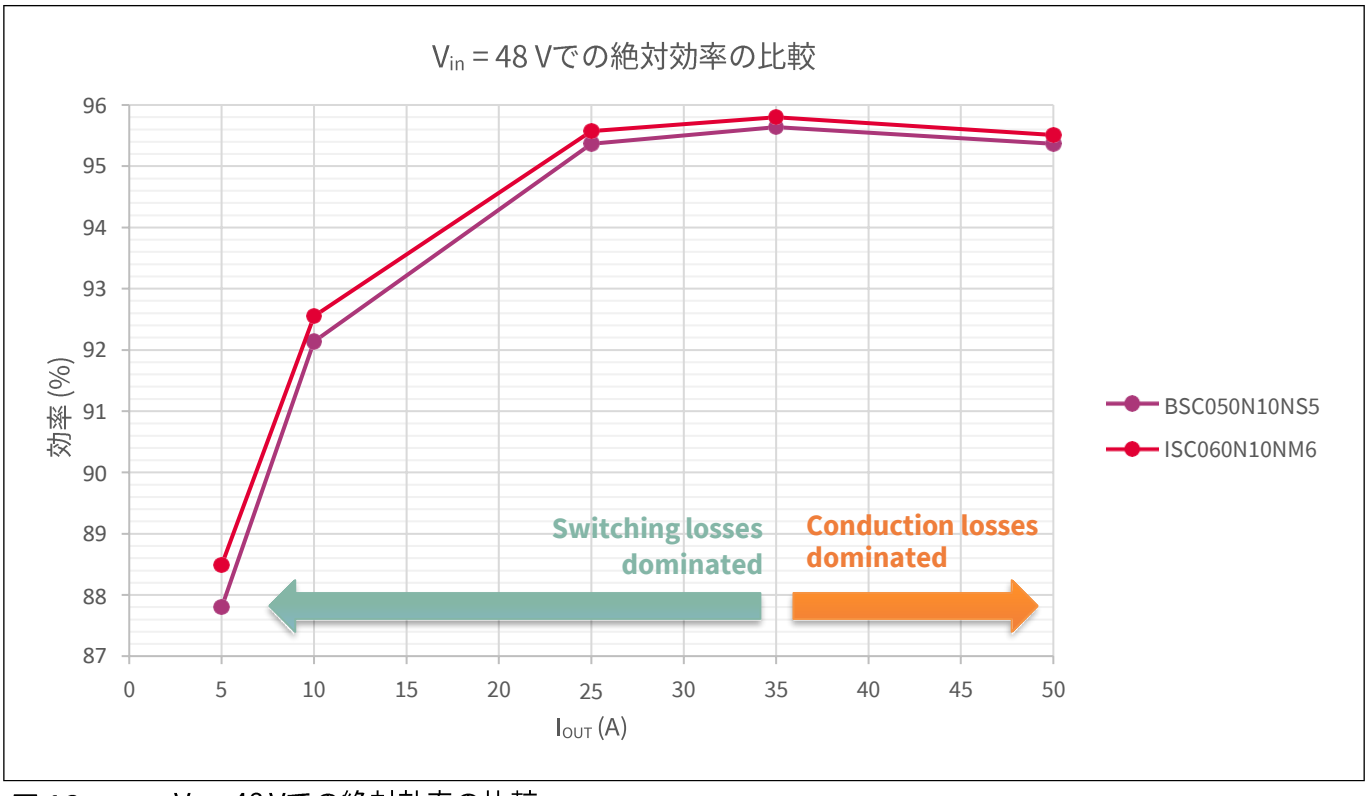


図 16　V_{in} = 48 Vでの絶対効率の比較

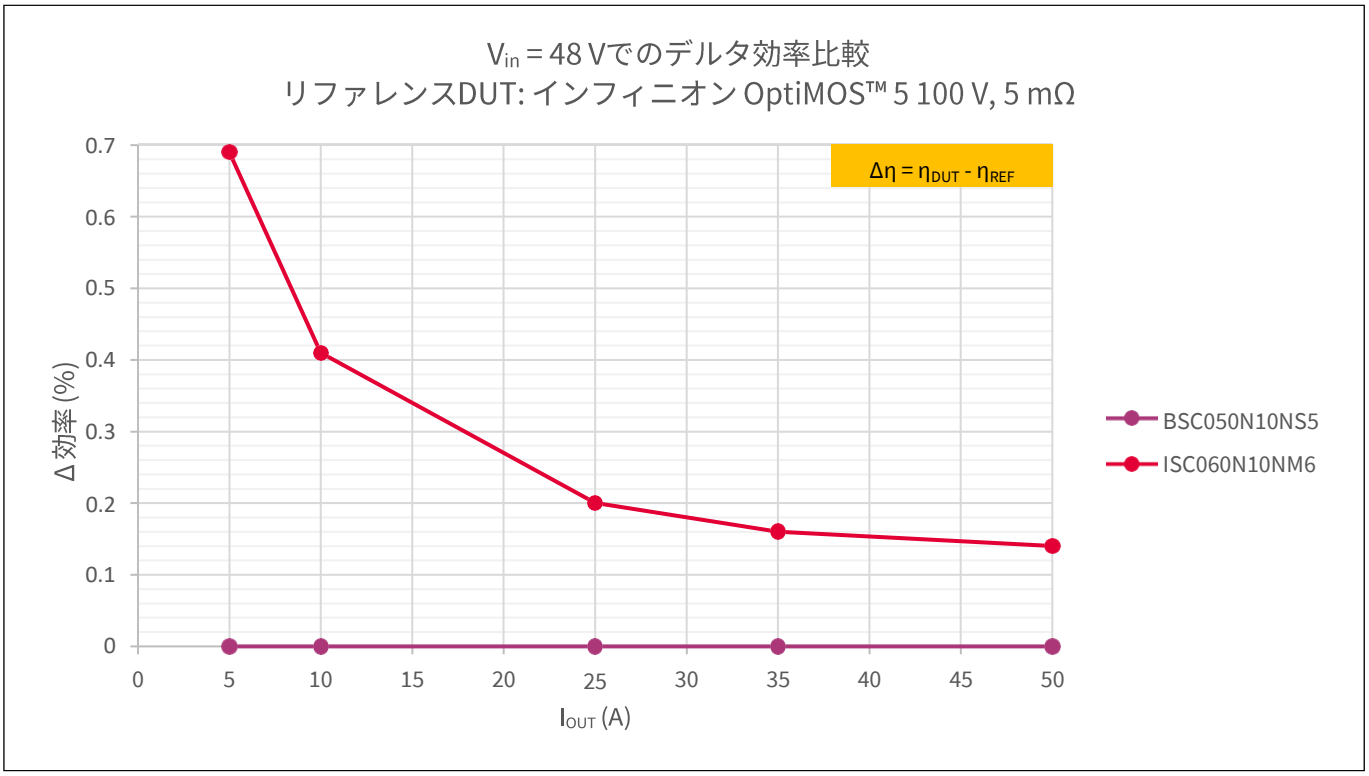


図 17 V_{in} = 48 Vでのデルタ効率比較。リファレンスDUT: インフィニオン OptiMOS™ 5 100 V, 5 mΩ $R_{DS(on),max}$ BSC050N10NS5

2.1.4.3 V_{in} = 75 Vでの効率比較

表 7 は、異なるDUTの高ライン電圧 (Vin = 75 V) で得られた効率をまとめたものです。効率は600LFM（3m/s）の風量で測定され、熱的定常状態に達した後に捕捉されます。

DUTとしてOptiMOS™ 5を採用したオリジナルのセットアップに対する絶対的および相対的な効率曲線を、それぞれ図18と図19に示します。

表 7 公称入力電圧V_{in} =75Vでの効率測定値 (%)

出力電流	インフィニオン OptiMOS™ 6 100 V, 6 mΩ ISC060N10NM6	インフィニオン OptiMOS™ 5 100 V, 5 mΩ BSC050N10NS 5
5 A	82.45	81.75
10 A	89.53	88.92
25 A	93.13	92.91
35 A	93.92	93.75
50 A	94.22	93.81

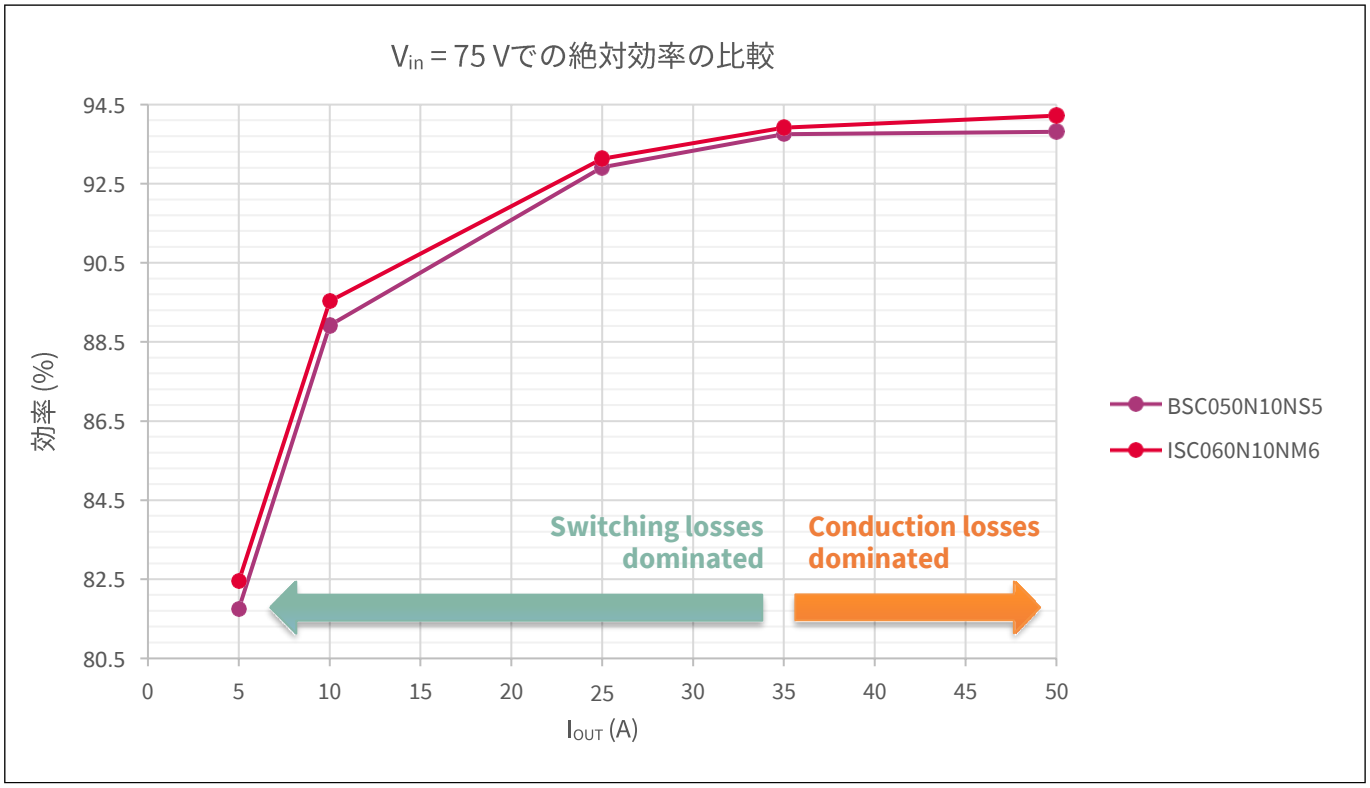


図 18　V_{in} = 75 Vでの絶対効率の比較

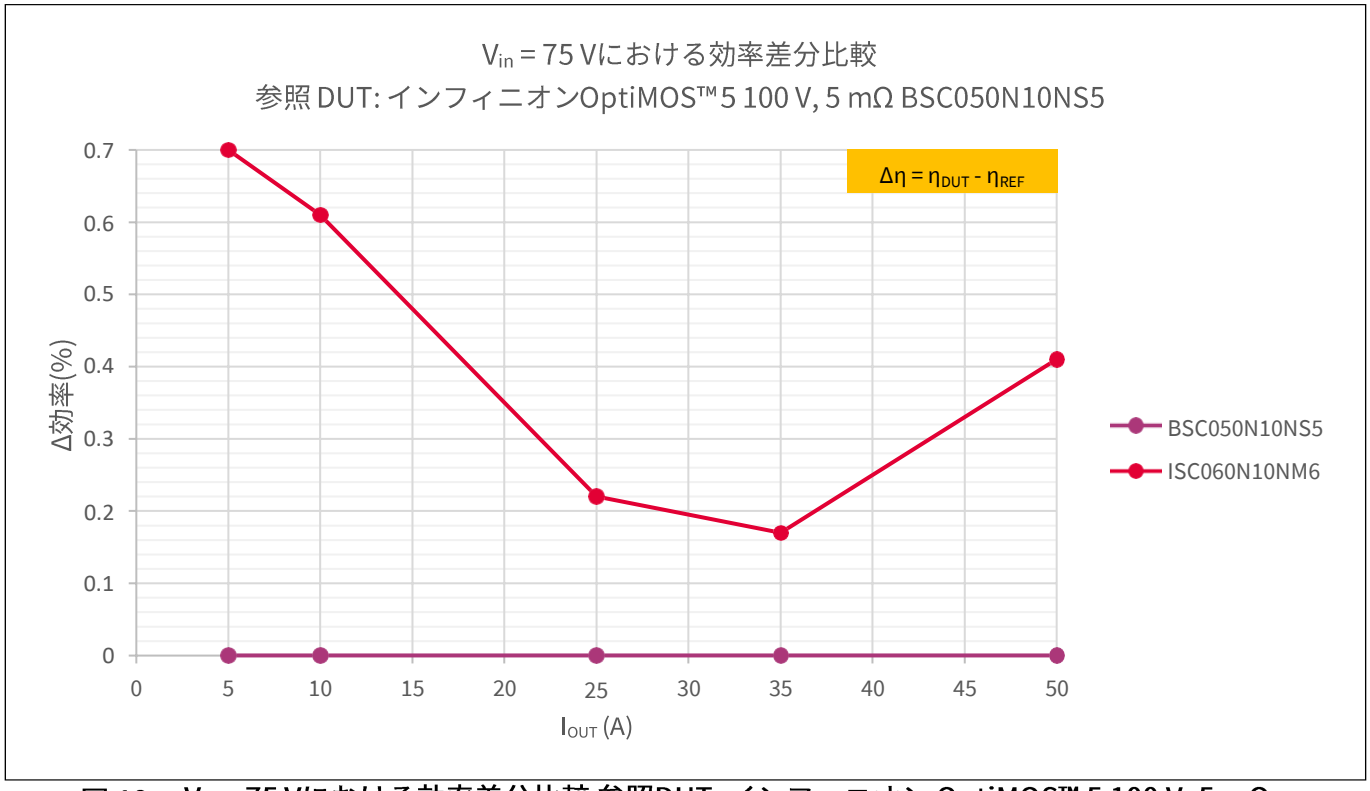


図 19　V_{in} = 75 Vにおける効率差分比較 参照DUT: インフィニオン OptiMOS™ 5 100 V, 5 mΩ $R_{DS(on),max}$ BSC050N10NS5

2.1.4.4 おわりに

図 16および図 18の効率プロットは、新しいインフィニオンOptiMOS™ 6 100 Vを高性能/高スイッチング周波数のSMPSに使用した場合、価値ある利益が得られることを示しています。OptiMOS™ 5ソリューションに比べ、スイッチング性能向上の直接的な結果として、軽負荷状態で0.7%の効率向上が記録されています。また、Q_gが47パーセント (typ.) 低下したことで、補助バイアス電源の消費電力にプラスの影響を与え、Q_{gd}が56% (typ.) 低下したことで、超高速のスイッチング過渡現象が可能となり、ターンオフ時の損失が低減されます。また、ターンオン時の損失についても、Qossを19% (typ.) 低減したことで、MOSFETの出力容量E_{oss}に蓄積されるエネルギーを大幅に低減しています。軽負荷時の高効率化は、中負荷時には0.2%にまで低下します。バイアスなどの負荷に依存しない損失は、負荷が大きくなるにつれて影響が小さくなります。実際に、損失の原因が負荷に依存しないもの (Q_{oss}やQ_gのような関連損失) だけで、P_Qに対応する損失内訳をちょっと仮定してみると、次のようになります。

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{loss}} = \frac{1}{1 + \frac{P_Q}{P_{out}}} \approx 1 - \frac{P_Q}{P_{out}}$$

そして、相対的な効率は、実験的に記録されたように、$\Delta P_Q / P_{out}$という負荷に対する反比例に定性的に変換されます (図 17)。負荷が増加すると、導通の寄与 (I_{RMS}^2 x $R_{DS(on)}$)が全体の効率に比例して現れ始め、効率曲線は負荷電流の直線的な漸近線をたどって曲がり始めます。公称ライン電圧では、OptiMOS™ 5を使用したリファレンス デザインに比べDUTの$R_{DS(on)}$が高いにもかかわらず、全負荷効率は依然として0.14%という顕著な結果を示しています。

実験結果は、すべての主要なFOMをバランスよく強化した新しいインフィニオンOptiMOS™ 6 100 Vファミリーが、低$R_{DS(on)}$と優れたスイッチング性能のトレードオフが必要で、全負荷範囲で最高の効率を達成する必要がある高周波SMPSでは高周波数のSMPSのようなアプリケーションでいかに優れているかを示しています。

2.1.5 熱の比較

2.1.5.1 測定方法と熱データの紹介

Error! Reference source not found. Error! Reference source not found.で紹介したテスト装置を用いて、効率テストと同時に熱データも取得しました。温度が定常状態に達した後、サーモグラフィーを用いてブリックボード全体の温度を測定しました。図 20と図 21では、ラインおよび負荷のすべての条件において、異なるDUTの一次側のMOSFET間で記録されたホットスポット温度を比較しています。

600LFM (3m/s) の風量を測定しています。

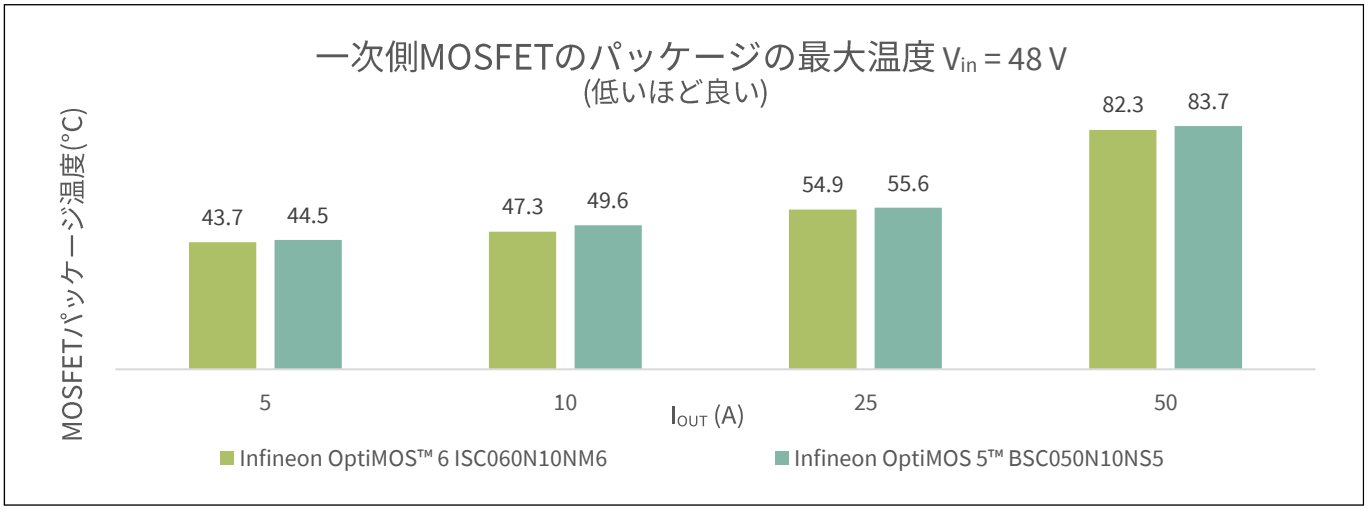


図 20 一次側MOSFETのパッケージの最大温度 (低いほど良い)。 V_{in} = 48 V

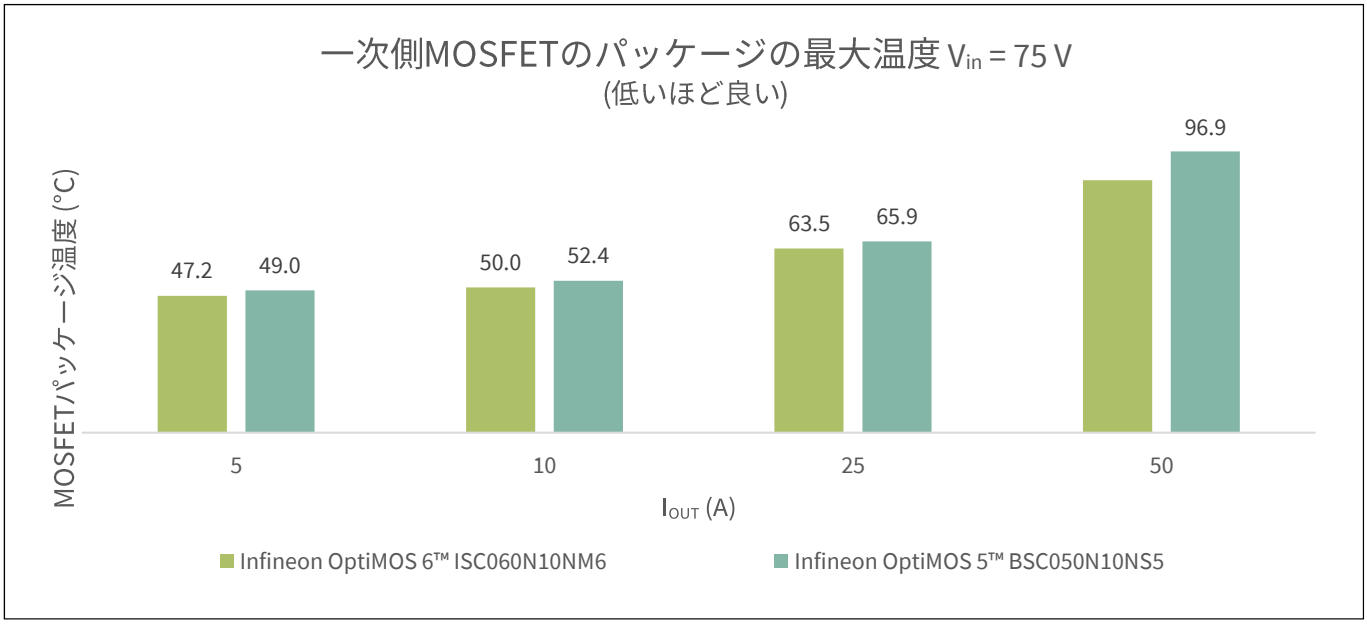


図 21 一次側MOSFETのパッケージの最高温度 (低いほど良い)。 V_{in} = 75 V

2.1.5.2 長時間稼働後の熱画像

一次側ブリッジにOptiMOS™ 6 100 V ISC060N10NM6を使用したインフィニオン 600 W FB-FB 36～75 V->12 V絶縁型1/4ブリックDC-DCコンバーターは、全負荷 (I_{out} = 50 A) を印加したハイライン動作 (V_{in} = 75 V) を意味する、最悪の動作条件下に長時間にわたり置かれました。このユニットは600LFM (3m/s) の風量下で動作していました。

図 22に、一晩稼働させた後、ユニットの熱画像を撮影したものを示します。注目すべきは、一次側のMOSFETのケース温度が86°Cを超えておらず、ホットスポットが高負荷電流を処理するSRステージに集中していることです。

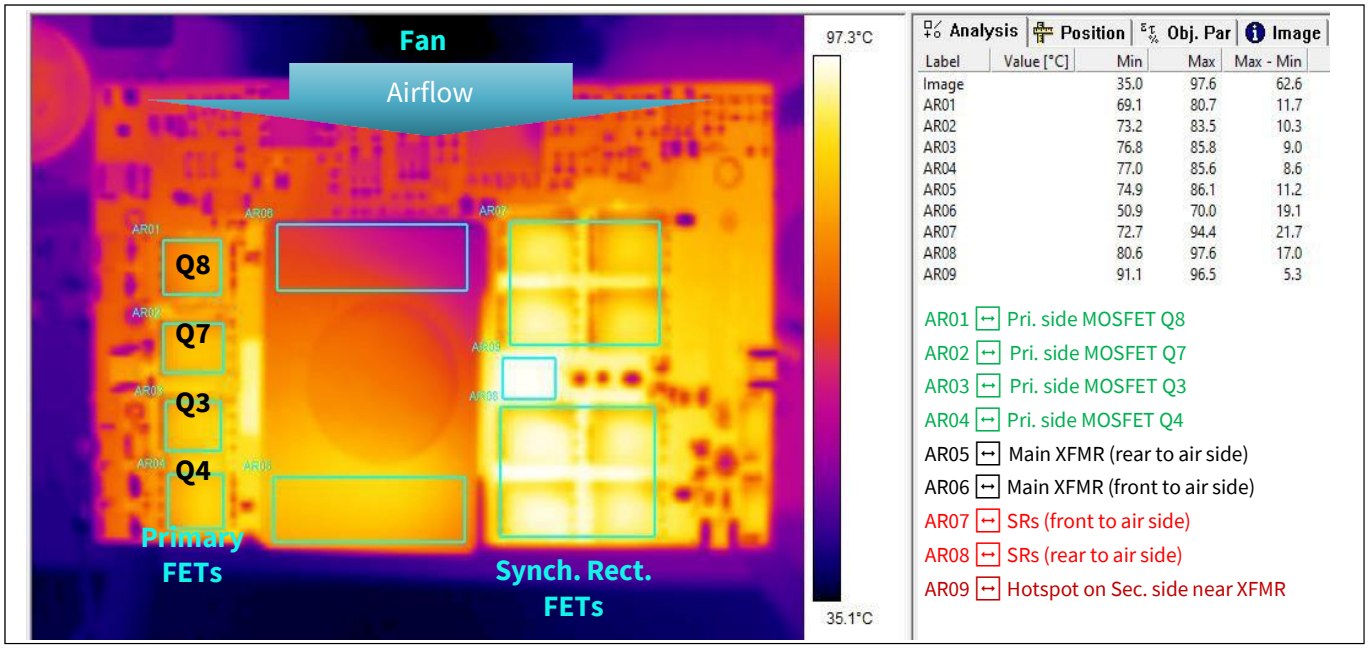


図 22 一次側ブリッジにOptiMOS™ 6 100 V ISC060N10NM6を使用したインフィニオン 600 W FB-FB 36～75 V->12 V絶縁型1/4ブリックDC-DCコンバーターの一晩稼働後の熱画像

2.1.5.3 おわりに

熱測定では、OptiMOS™ 6 ISC060N10NM6によって実現された全体的な効率向上が反映されています。すべてのラインおよび負荷条件で一次側MOSFETの温度が低下する一方で、この利点はシステムレベルでも反映されており、ゲートドライバーおよびオンボードバイアスレギュレーターの熱応力が低減されています (バイアス損失の低減)。通信機器用の電源には、システムの信頼性を示す指標である平均故障間隔 (MTBF: Mean Time Between Failures) に対する厳しい要求を満たす必要があります。平均故障間隔は一般的に時間 (h) で表され、温度に反比例します。一般的に、信頼性に対する温度の影響は指数関数で表されるため、熱的余裕があることは望ましいことです。システム全体の故障率は、個々の部品の故障率が複雑に重なり合ったものですが、重要なメッセージは、1度上がるごとにシステムの寿命が数十時間延びる可能性があるということです。

低$R_{DS(on)}$、低Q_g、低Q_{gd}、Q_{oss}といった製品レベルでの最適化の結果であるシステム効率の向上は、電力密度を高め続けるための基本的な対策であると同時に、通信用電源モジュールに課せられる厳しい信頼性要件を満たすものでもあります。新しいOptiMOS™ 6 100 Vファミリーは、究極の効率を誇る電力変換改善を可能にし、電源設計者が設計要件を満たすことを支援し、生活をより快適にします。

2.1.6 動作波形

比較の結論として、インフィニオン600W FB-FB 36～75V→12Vの絶縁型クオーター ブリックDC-DCコンバーターで異なるDUT (被測定物) について波形を取得しています。公称線間電圧 (V_{in} = 48 V) および全負荷 (I_{out} = 50 A) において、異なるDUTの一次側定常波形 (ゲート ソース間電圧およびドレイン ソース間電圧) を取得しました。

図23に、1次側と2次側のブリッジを制御するために採用した制御信号の概略を示します。図 24には、1次側ブリッジの汎用MOSFETのドレイン-ソース間電圧とゲート-ソース間電圧の理想的な波形を示します。

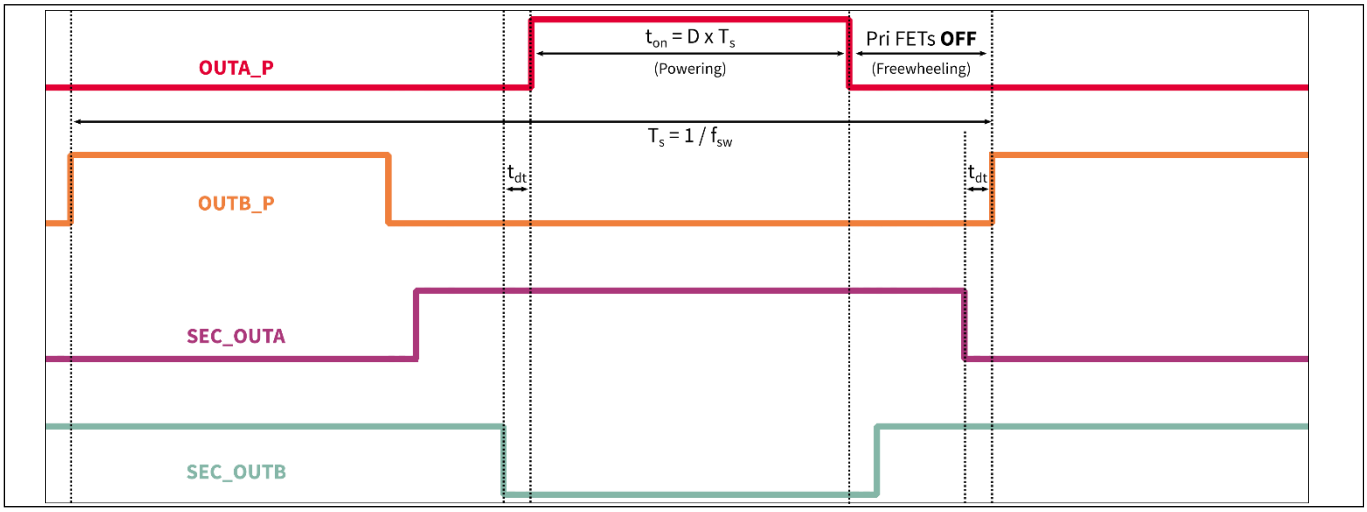
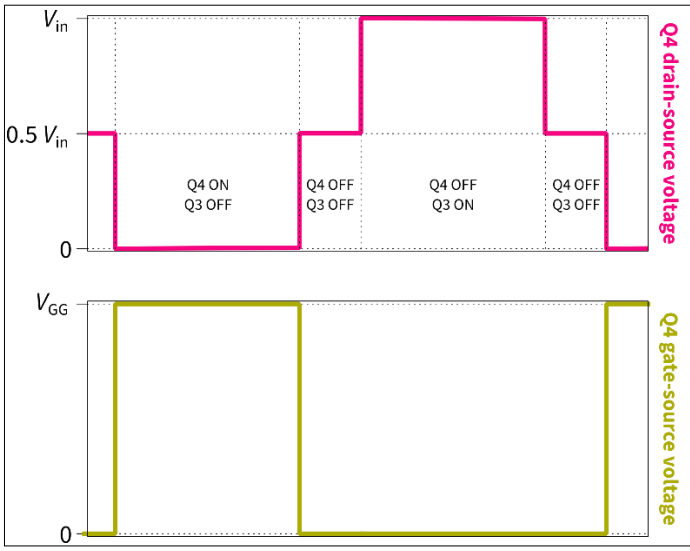


図 23 FB-FBパワーステージの制御に適用されるゲーティング信号の模式図



◀ *During the freewheeling phase, where all of the primary MOSFETs are controlled to be off, the midpoint voltage of each half-bridge is determined by a capacitive divider of the input voltage with the FETs' output capacitances, ideally to one-half of the line voltage. Actually, any deviation from the ideal switching in a full-bridge diagonal (driver propagation delays mismatch, different strength of the high-side driver, spread in $V_{GS(th)}$, …) will affect the charge-sharing process, moving the midpoint above or below. The behavior also changes with the line voltage, due to the voltage dependence of C_{oss}. This behavior does not affect the operation of the converter.*

図 24 提案する制御方式における理想的な一次側MOSFETの電圧波形のイメージ図

インフィニオンのOptiMOS™ 5 BSC050N10NS5と新製品OptiMOS™ 6 ISC060N10NM6の取得波形を図 25と図 26に示します。



図 25 インフィニオン OptiMOS™ 5 BSC050N10NS5の一次側定常波形

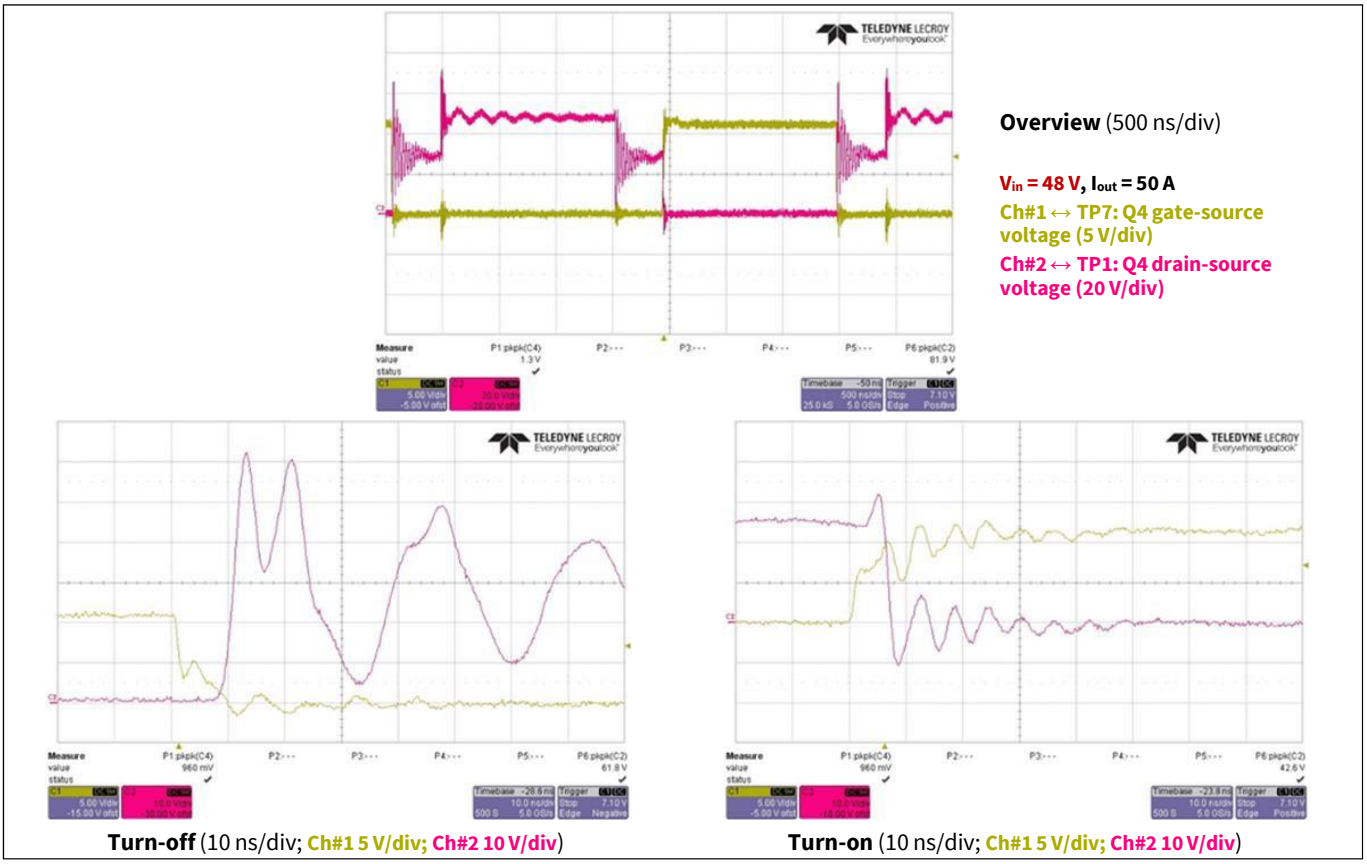


図 26　インフィニオン OptiMOS™ 6 ISC060N10NM6の一次側定常波形

2.1.7　インフィニオン OptiMOS™ 6 100 Vが実現するエネルギー効率の複数のメリットの定量化

2.1.7.1　運用支出 (OPEX) における節約額の見積もり

新しいOptiMOS™ 6 100 Vが、従来のインフィニオンOptiMOS™ 5 100 VファミリーのMOSFETを置き換えるドロップインとしてもたらすシステム効率の著しい向上は、電源業界が究極の信頼性と電力密度の高いソリューションを市場にもたらすことを可能にする一方で、エンドユーザーにとっても有益です。

モバイルネットワーク事業者 (MNO) にとって、エネルギー消費は歴史的に重要な問題でした。エネルギーコストは、総コストの90%以上を占め、最も高い営業費用 (OPEX) の一つです。携帯電話会社の売上高の10%に相当し、売上高の約9%がエネルギー（電気/燃料）に費やされていることになります。エネルギーの多くは無線アクセスネットワーク（RAN）のために使われ、バックホール (ファイバーインフラやデータセンター) のために使われる割合は少ない。

5Gモバイルネットワークの展開に伴い、携帯電話会社は莫大な資本支出 (CAPEX) を余儀なくされるとともに、OPEXの大幅な増加に直面することになります。後者の理由は、5Gの新無線（5G NR）ではスモールセルを高密度に配置する必要があるため、多数の新しいサイトに電力を供給する必要があることと、既存のマクロ基地局の消費電力の増加（当初は70%～100%と見積もられていた）に直面するためです[4], [5], [6]。5Gサイトの消費電力が2倍になることが予想されるため、サイトの冷却要件も増加することが予想されます。ほとんどのサイトでは、キャビネット内の温度を制御された範囲内に保つために空調 (A/C) に依存しているため、設置された電力が増えれば、取り出される熱も増え、したがってA/Cが消費する電力も増えます。

これらの事実は、エネルギーコストの上昇とともに、電力変換において最高の効率を達成できることは、

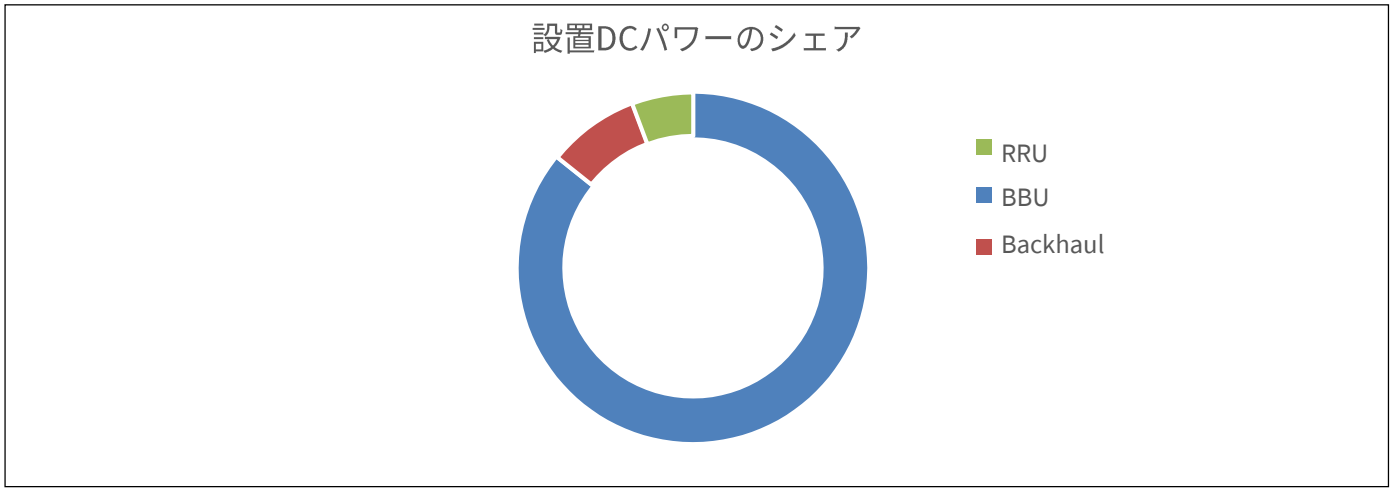
実験結果

必要不可欠な機能ではなく、5Gへの移行において携帯電話会社がサービスの総所有コストを下げるために必要不可欠な機能であることを意味しています。新しいインフィニオンOptiMOS™ 6 100Vは、典型的なDC-DC 600W IBCに採用された場合、従来のOptiMOS™ 5テクノロジーと比較して、公称ライン電圧での半負荷時の効率を+0.2%向上させ、高ラインおよび全負荷条件では最大+0.4%の効率向上を実現します。この効率向上は、モバイルネットワーク事業者が節約したエネルギーとして定量化することができます。これは、典型的な通信用無線基地局の平均的なDC負荷プロファイルの知識とともに、負荷間のシステム効率曲線を分析することで定量的に行うことができます。

以下は、いくつかの単純化された仮定の下で実施されたOPEXの節約の見積もりです。

- 人口8,000万人以上のヨーロッパの国を想定して計算しています。
- ~84,000台のマルチバンド (2G、3G、4G) ベーストランシーバーステーション (BTS) が国内に設置されています (推定)。
- 各サイトの最大消費電力 (A/Cを除く) は、平均して約7kWと想定されています。この電力の約90%は、リモートラジオユニット (RRU) のRFパワーアンプに供給するために必要です。
- これらのサイトは、それぞれ1台のBBUによって提供されることになっています。BBUから吸収される最大電力は600Wです。この電力は絶縁されたIBC (-48V-12 Vの1/4ブリック コンバーター) によって供給され、サイトが必要とする全体のDC電力のごく一部を占めるに過ぎない。大半の電力はRRUへの電力供給に必要であり、別のDC-DCコンバーターによって供給される (図27)。RRUに供給されるDC電力の一部は、通常、150 V定格のデバイスでカバーされます。新しいOptiMOS™ 6 150 Vがこのアプリケーションにもたらす利点については、今後も注目してください。
- IBCで考慮している公称ライン電圧はV_{in} = -48 Vです。
- 計算に採用された効率曲線は、インフィニオン600W FB-FB 36～75 V→12 V絶縁型1/4ブリックDC-DCコンバーターの代表的なもので、図 16に報告されています。このアプリケーションでは、長期間にわたって平均化されたDC負荷プロファイル (12 Vバス) が考慮されました。効率と負荷プロファイルを併用することで，システムの加重効率が得られます
- この計算で考慮した基本電力料金は、2020年下半期を基準としたもので、非家庭の消費者 (本アプリケーションに合致した年間消費量のkWh) に対する1kWhあたりのユーロ (€/kWh) で示され、回収不能なすべての税金が含まれます。過去10年間の傾向に従い、年率2%の平均的な価格上昇を考慮しています。 [9]
- この計算では、電力の二重関税制度の存在を想定していません。二重関税制度は、22時から6時の間にエネルギーコストが低くなるヨーロッパ諸国によく見られるものです。また、ピークカットも考慮していません。
- AC-DCステージの効率は一定で、$\eta_{AC/DC}$ = 98 %となります。

図 27　BTSサイトにおける総設置DCパワーの典型的なシェア



上記の仮定に基づき、OPEXの全体的な節約は、一般的にプラントの予想寿命に相当する10年のスパンで見積もられています。

注: ここでの試算は、BBU専用のIBC用既存プラットフォームを、一次側でインフィニオン OptiMOS™ 5 100 Vから最新のインフィニオン OptiMOS™ 6 100Vにアップグレードした結果です。

表 8 最新のインフィニオンOptiMOS™ 6 100 Vテクノロジーを採用した場合の10年間でのOPEX節約額 (BBUのみのDC電源) の見積もり

タイムスパン	重量効率の向上	毎年のエネルギーコストの削減	全体的な節約額 (€) を時間軸で見ると
10年	+0.26 %	-0.24 %	101万€

全体で100万ユーロを超える節約になったことは、工場の総所有コストの観点からも貴重な結果です。ただし、この試算では、より多くの直流電力を使用するBBUの設置やアップグレードが必要となる5G技術の展開を無視しているため、実際の節約額は過小評価される可能性があります。筆者の知る限り、利用可能なデータが少なすぎることと、本稿執筆時点では業界の動向が予測不可能であることから、マクロステーションに限定して5Gを含めた試算を行うことは、純粋な憶測となります。実際には、5Gの普及に伴い、レガシーネットワークの (一部) が廃止され、全体の消費電力が一部相殺されることになると思われます。

2.1.7.2 環境問題：さらに環境に配慮した生活にするには

コストだけが変化の原動力ではありません。通信業界は、気候変動の緩和に関する2015年のパリ協定以降 [7] 、地球温暖化を工業化以前の水準よりも1.5°Cに抑えることに合わせて科学的根拠に基づく目標 (SBT) を徐々に約束することで、カーボンニュートラルへの流れをリードする民間セクターの一つであることを証明しています [8]。新しいインフィニオンOptiMOS™ 6 100 Vは、効率性向上の傾向をサポートし、通信業界の顧客が排出量をネット ゼロまで削減し、より環境に優しい生活を送れるよう支援します。

2.2 ZVSバック-ブースト型-(36...60)V-12 V DC-DCコンバーター

2.2.1 はじめに

通常の反転バック-ブースト型トポロジーは，RFパワーアンプ (RFP) を供給するDC-DCコンバーターとして通信用電源システムで注目されています。RFPAには、+28 V (LDMOS RFPA) から+50 V (GaN RFPA) までの電圧を、可能な限り高い効率で供給する必要があります。インフィニオン社は、インターリーブ型 (2相) 反転バック-ブーストを採用し，制限された-(36...60) Vの入力範囲から+28 VのDC出力電圧で最大780Wを実現する評価ユニットを開発しました [11]。出力電圧は最大で+56Vまで調整可能で、出力電流をディレーティングして電力を一定に保つことができます。また、インフィニオンは、新しいアクティブクランプ補助回路を導入しました。この回路は、SR MOSFETから回収された電荷Q_{rr}を非散逸的に出力に向けて転送することを可能にし、これにより制御スイッチのZVSターンオンを実現します。このアクティブクランプ回路は、ユニット全体のスイッチング損失を効果的に低減し、BiC (最低$R_{DS(on)}$) デバイスの使用を可能にし、電力密度を飛躍的に向上させています。

インフィニオンは、+28 V出力に加え、機能絶縁を必要としないRPFA以外の通信機器に適した、+12 V出力の評価ユニットを開発しました。出力電圧の低減に伴い、本ユニットの定格出力は600 Wに低下しています。

出力電圧を下げることで、100V定格のMOSFETを使用することができます。このように構成されたインフィニオン ZVS降圧評価ボードは、SuperSO8 (PQFN 5 x 6) にパッケージされた新しいBiC OptiMOS™ 6 100 Vが達成する性能を紹介するための優れたプラットフォームとなります。

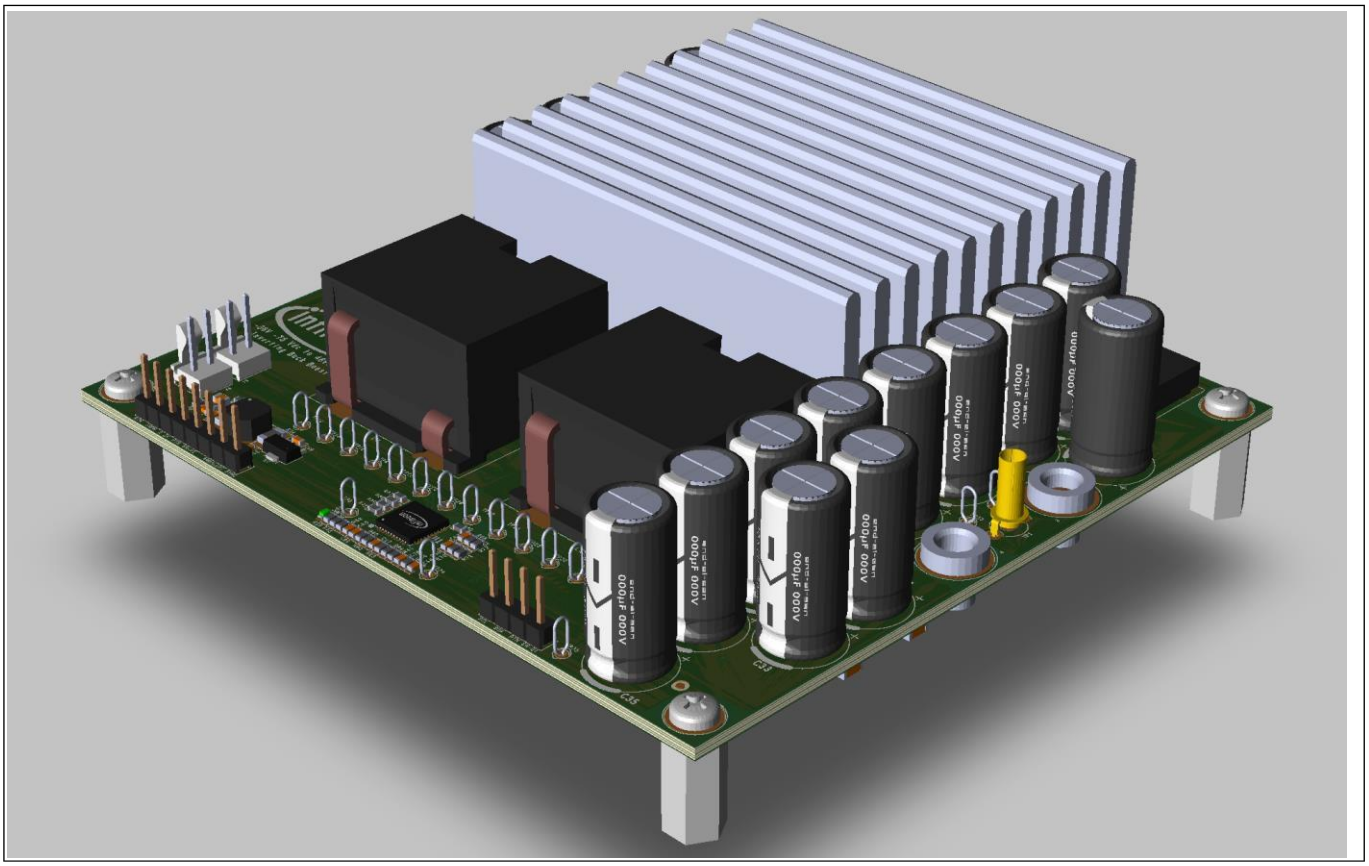


図 28　インフィニオン製600 W反転バック-ブースト(36...60)V-12 V DC-DCコンバーターの3D図

2.2.2 システムの説明

通常の反転降圧型トポロジーは、基本トポロジーをカスケード接続することで得られます。この接続は、通常、ソーラーオプティマイザーのMPPT (最大電力点追従) を行うために採用されている4スイッチのバックブースト (非反転) に直結します。出力電圧の極性を反転させることができれば、トポロジーを再構成することができ、4つのスイッチのうち2つを削除して、パワーステージと駆動力を大幅に簡素化することができます。この構成は「反転降圧型ブースト」と呼ばれ、その構成要素 (降圧型と昇圧型) と同様に、入力電圧を降圧/昇圧する機能を持っています。このアプリケーションでは、コンバーターは-(36...60) Vから12 Vに降圧して動作します。

出力電圧は、インフィニオンXDP™ 統合デジタル電源コントローラでサポートされているデジタルコンペンセーターによって、クローズドループで調整されています。XDPP1100は、高集積 (高性能アナログフロントエンド (AFE)、ステートマシンベースのデジタル制御ループ、およびマイクロコントローラー) かつプログラマブルなデジタル電源コントローラーです。このデバイスは、さまざまなDC-DC電源アプリケーションに対応する高度な電源制御ソリューションを提供し、さまざまな絶縁および非絶縁トポロジーをサポートします [10]。

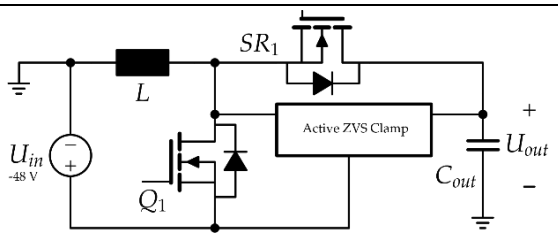
パワーステージは2つのフェーズで構成され、180度のインターリーブ角度で動作します。パワーステージのインターリーブにはいくつかの利点があります。まず、コンバーター全体のサイズを小さくすることができます。インターリーブ角度によって高調波のキャンセルが可能になり、フィルタリング要件が緩和されます。次に、処理された電力が複数の相に分割され、電力損失も電力段に分散されるという利点があります。この方法は、大電力に対応できる唯一の方法かもしれませんし、少なくとも、複数の半導体を並列接続したり、大型の受動素子を採用したりする場合に比べて、何らかの利点があるかもしれません。反転降圧型ブーストは、降圧時には不連続な入力電流を、昇圧時には不連続な出力コンデンサの電流を共有します。これらの量のRMS値は、パワーステージを適切にインターリーブすることで減少させることができます。デューティサイクルに応じて、入力コンデンサと出力コンデンサの電流は、インターリーブ方式を利用することができます。

二相の電流測定は、相対するインダクタのDCR検出によって行われます。差動増幅器は各インダクタの近くに配置され、その出力はXDPP1100 AFEで処理されます。電流センシングは、過電流保護(OCP) と、インターリーブされた2つの相の電流バランス制御のために必要です。電流バランスの調整は、インフィニオンのXDP™統合デジタル電源コントローラに独自のハードウェアで実装された機能です。

入力電圧は，低電圧誤動作防止（UVLO）のため，およびテレメトリのために検出されます。入力電圧がUVLOリミット以下になると、モジュールの動作は無効になります。

この基板は、テスト用プラットフォームとして設計されており、プローブテストポイントへのアクセスが容易で、部品の再加工/交換も容易です。このモジュールには、必要なバイアスを供給するための補助ハウスキーピング電源が搭載されています。インフィニオン製600W反転バックブースト　-(36...60)V-12 V DC-DCコンバーターは、強制冷却を必要とせずに動作するように設計されています。本機には、メインPCB基板にネジ止めされたヒートシンクが付属しており、パワーMOSFETの追加冷却を行っている [11]。

表 9　転昇降圧型トポロジー基本図

トポロジー	回路図	コスト/複雑さ
反転型ZVSバック-ブースト		少ない部品点数で低コストを実現。必要なハーフブリッジドライバーは1台。非絶縁型なので、制御が簡単です。

2.2.2.1 PCBの説明

図 29は、インフィニオン600 W反転バックブースト -(36...60)V-12V DC-DCコンバーター上の各部品と測定テストポイントの配置を示したものです。ヒートシンクを除く基板の外形寸法は、108 mm x 102 mm x 22 mm (4.25 インチ x 4 インチ x 0.87 インチ) です。PCBは6層基板で構成されています。内部の層はすべて5オンス銅 (6.88mil、0.174mm) の厚さで、最上層と最下層は4オンス銅 (5.5mil、0.140mm) の厚さとなっています。基板の総厚さは67mil (1.7mm) です。

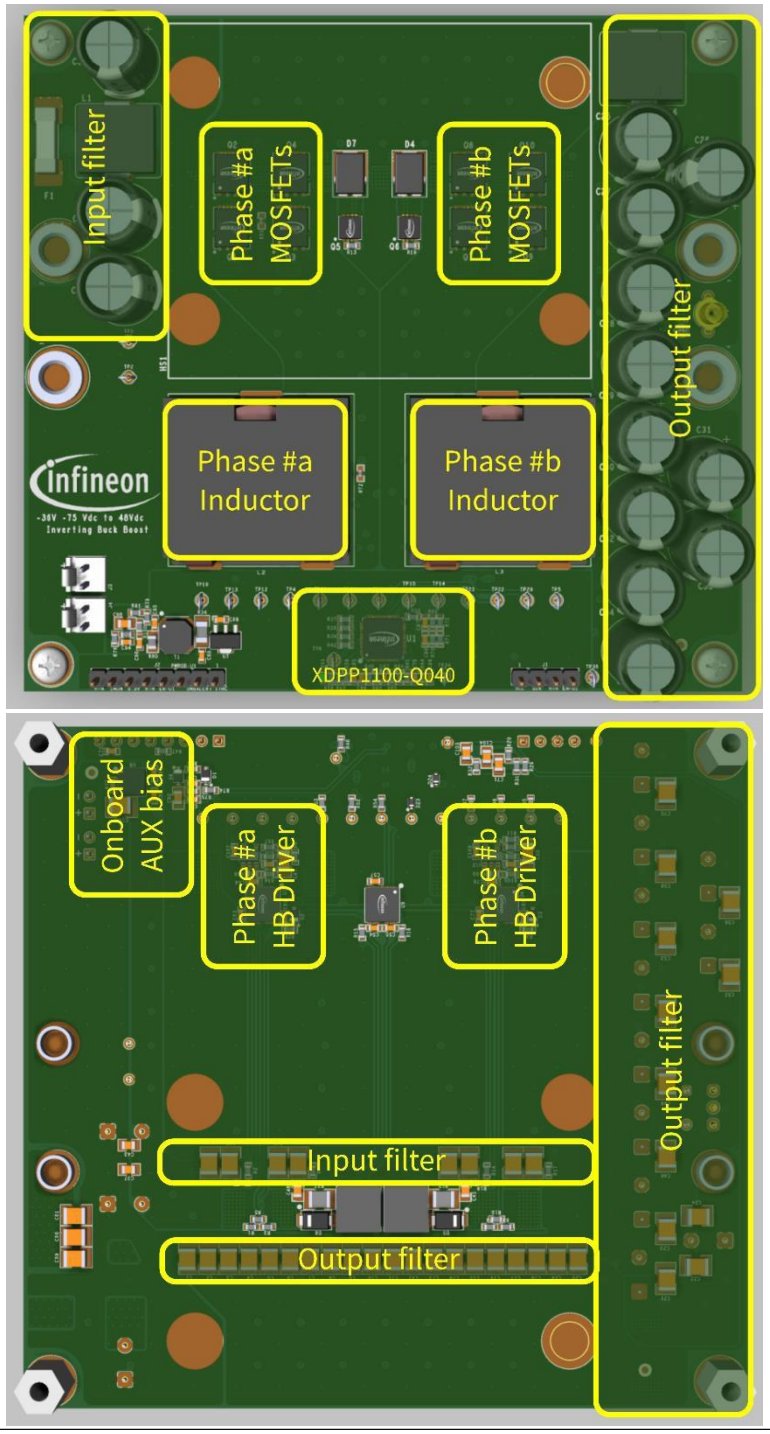


図 29　インフィニオン600W反転バックブースト　-(36..60)V-12 V DC-DCコンバーターの上面図と下面図 (最重要部品の配置をハイライト表示)

2.2.2.2 基板仕様

インフィニオン600W反転バックブースト -(36...60)V-12V DC-DCコンバーターの仕様を**表 10**に示します。

表 10　インフィニオン600W 反転降圧型-(36...60)V-12 V DC-DCコンバーターの仕様

パラメータ	記号	値			単位	備考/テスト条件
		Min.	Typ.	Max.		
動作入力電圧	V_{in}	-60	-48	-36	V	
起動時の電圧閾値	$UVLO_{(on)}$		33			
起動後の最低動作電圧	$UVLO_{(off)}$		30			
消費電力	P_{out}	0		600	W	
効率	η	95.5%				V_{in} = -48 V, P_{out} = 360 W
出力電圧設定値	$V_{out,nom}$		12		V	
相対的な出力電圧変動 (負荷)	$\Delta V_{out}/V_{out}$			2	%	
出力DC電流	I_{out}			50	A	
スイッチング周波数	f_{sw}		200		kHz	
気流速度	v_{air}	300 1.5			LFM m/s	

2.2.2.3 基板の回路図

図 30 インフィニオン600W反転バックブースト-(36...60)V-12V DC-DCコンバーターの簡略化された回路図は、インフィニオンの600 W反転バックブースト -(36...60)V-12 V DC-DCコンバーターの簡略化した回路図です。

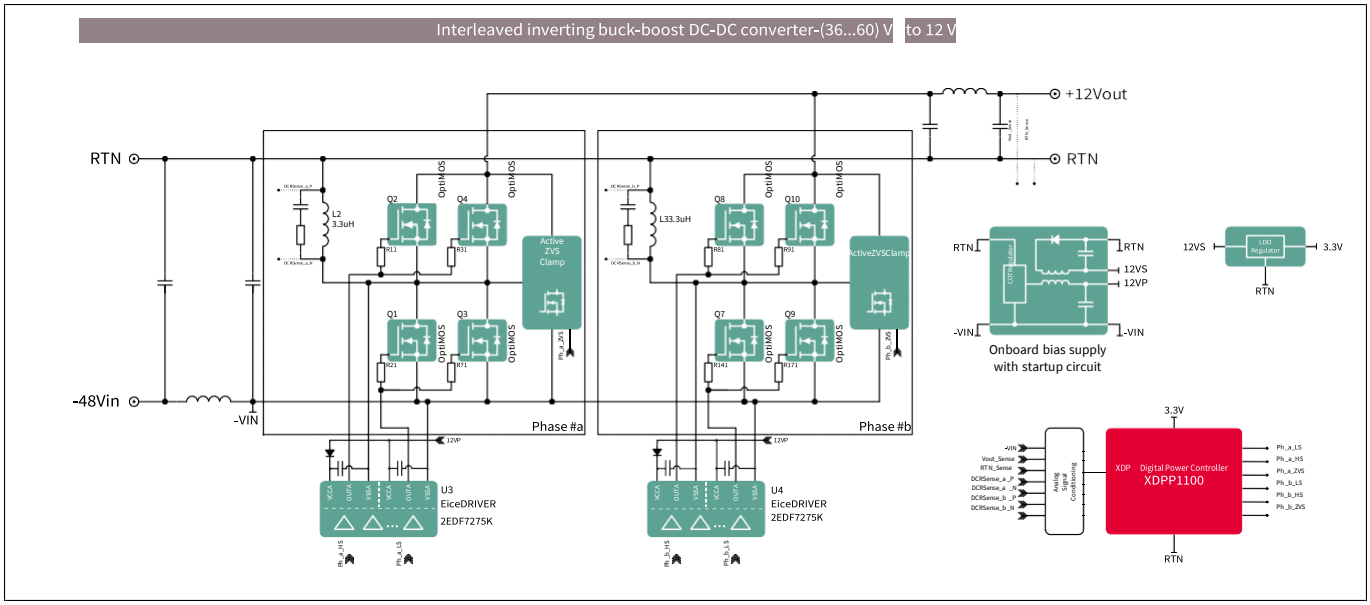


図 30　インフィニオン600W反転バックブースト-(36...60)V-12V DC-DCコンバーターの簡略化された回路図

2.2.3 テスト装置の説明

ここでは、 図 31に示したテスト装置について、詳しく説明します。実際のテスト装置を図 32に示します。

電圧源

- 少なくとも700 W、最大80 VのDCを供給可能なDC PSU

アクティブ負荷

- 低電圧/大電流 (50 A以上) の電子負荷 (定電流モードで動作)

計測機器

- 入力電流精密電流シャント抵抗 (20A、0.1%)
- 出力電流精密電流シャント抵抗 (100A、0.1%)
- 入力電圧、出力電圧、シャント電圧測定用の6½桁DMMを4台搭載
- 高帯域 (500MHz以上) DSOとパッシブ電圧プローブ
- サーマルカメラと熱電対を使って、基板上とヒートシンク下の温度を測定

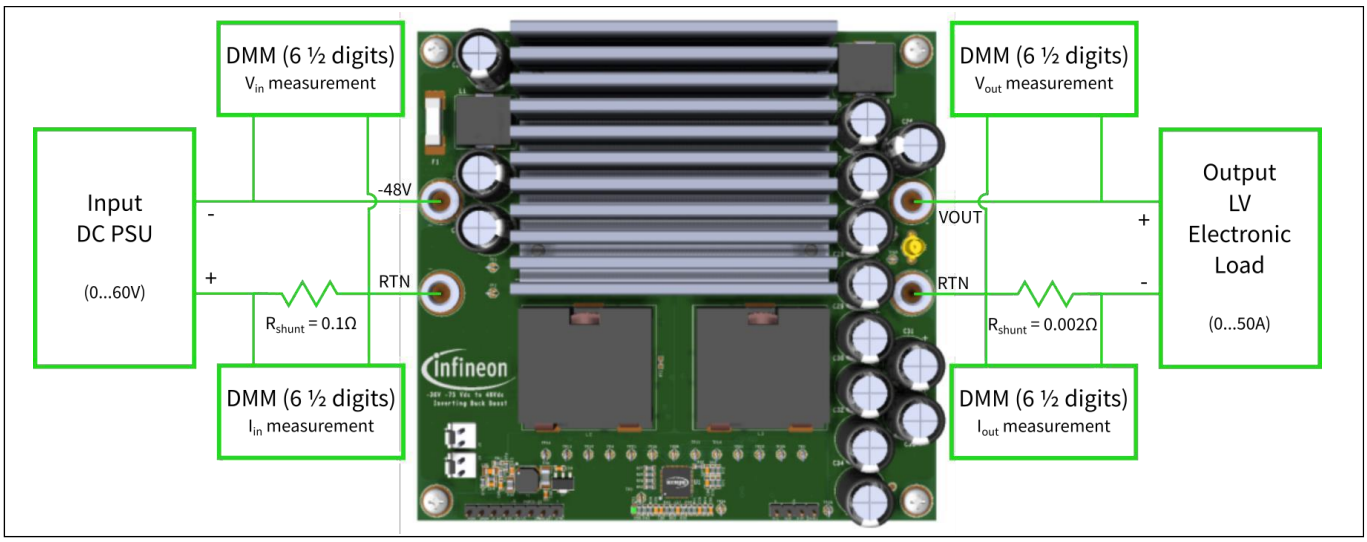


図 31 基板の上面図 (テスト装置の接続を模式的に示す)

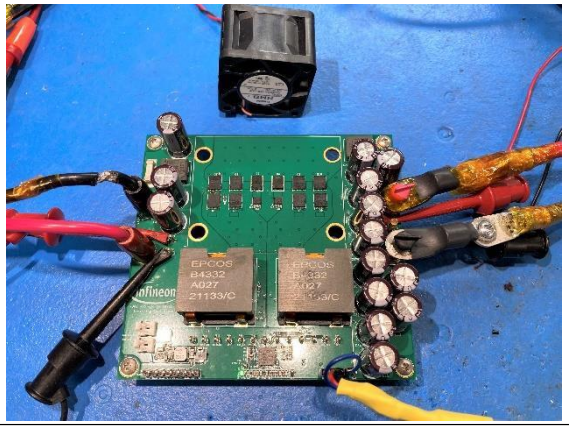


図 32 実際のテスト装置

2.2.4 効率テスト

2.2.4.1 はじめに

Error! Reference source not found. で紹介したテストセットアップに基づき、インフィニオンの600W反転バックブースト　-(36...60)V-12 V DC-DCコンバーターの効率テストを実施しました。

2.2.1「はじめに」説明したように、インフィニオンの600W反転バックブースト　-(36...60)V-12 V DC-DCコンバーターには、新しいアクティブ クランプ補助回路が搭載されており、SR MOSFETから回収した電荷Q_{rr}を無損失で出力に移し、制御スイッチのZVSターンオンを実現しています。アクティブクランプ回路は、ユニット全体のスイッチング損失を効果的に低減し、BiC (もっとも低い$R_{DS(on)}$) デバイスの使用を可能にし、電力密度を飛躍的に向上させます。

この入力と出力の範囲では、100V定格のMOSFETを使用できます。こうして構成されたインフィニオンZVS降圧評価ボードは、SuperSO8 (PQFN 5 x 6) に封止された新しいBiC OptiMOS™ 6 100 Vの性能を紹介する優れたプラットフォームとなります。

PQFN 5 x 6パッケージのBiCデバイスでは、インフィニオンの新しいOptiMOS™ 6 ISC022N10NM6とOptiMOS™ 5 BSC027N10NS5について効率を測定しました。表 11は、DUTの概要とその位置を示しています。

表 11 DUT –図 30の回路図ファイルを参照

DUTのポジション	DUT #1	DUT #2
パワーステージの主要MOSFET: Q1, Q2, Q3, Q4 Q7, Q8, Q9, Q10	インフィニオン **OptiMOS™ 6** **100 V, 2.2 mΩ** ISC022N10NM6	インフィニオン **OptiMOS™ 5** **100 V, 2.7 mΩ** BSC027N10NS5

注：　効率を得るために、 インフィニオンの600 W反転バック-ブースト(36...60)V-12 V DC-DCコンバーターと同じユニットを使用しました。効率は、まずインフィニオン OptiMOS™ 6 100 V ISC022N10NM6を一次側のMOSFETとして使用した新品のユニットで取得し、その後、他のDUTで効率を取得するために再調整しています。これにより、DUT間の公平な比較が可能になります。

2.2.4.2 V_{in} = -36 Vでの効率比較

表 12は、さまざまなDUTの低ライン電圧（Vin = -36 V）で取得した効率をまとめたものです。また、効率曲線を

図 33に示します。.

表 12 低電圧V_{in} = -36 Vでの効率 (%) の測定値

出力電流	インフィニオン OptiMOS™ 6 100 V, 2.2 mΩ ISC022N10NM6	インフィニオンOptiMOS™ 5 100 V, 2.7 mΩ BSC027N10NS5
10 A	94.88	93.77
20 A	96.34	95.56
30 A	96.38	95.59
40 A	95.96	95.13

実験結果	50 A	95.34	94.44

2.2.4.3 V_{in} = -48 Vでの効率比較

表 13 公称電圧レベル Vin = -48 Vでの効率 (%) の測定値は、さまざまなDUTの公称線間電圧 (V_{in} = -48 V) で得られた効率をまとめたものです。また、効率曲線を図 34に示します。

表 13 公称電圧レベル Vin = -48 Vでの効率 (%) の測定値

出力電流	インフィニオン OptiMOS™ 6 100 V, 2.2 mΩ ISC022N10NM6	インフィニオン OptiMOS™ 5 100 V, 2.7 mΩ BSC027N10NS5
10 A	93.96	92.65
20 A	95.77	94.96
30 A	95.96	95.20
40 A	95.72	94.88
50 A	95.27	94.26

2.2.4.4 V_{in} = -56 Vでの効率比較

表 14 公称電圧レベルVin = -56 Vでの効率（%）の測定値は、さまざまなDUTの高ライン電圧（V_{in} = -56 V）で得られた効率をまとめたものです。また、効率曲線を図 35に示します。

表 14 公称電圧レベルV_{in} = -56 Vでの効率（%）の測定値

出力電流	インフィニオン OptiMOS™ 6 100 V, 2.2 mΩ ISC022N10NM6	インフィニオン OptiMOS™ 5 100 V, 2.7 mΩ BSC027N10NS5
10 A	93.28	91.85
20 A	95.36	94.49
30 A	95.71	94.88
40 A	95.54	94.66
50 A	95.14	94.09

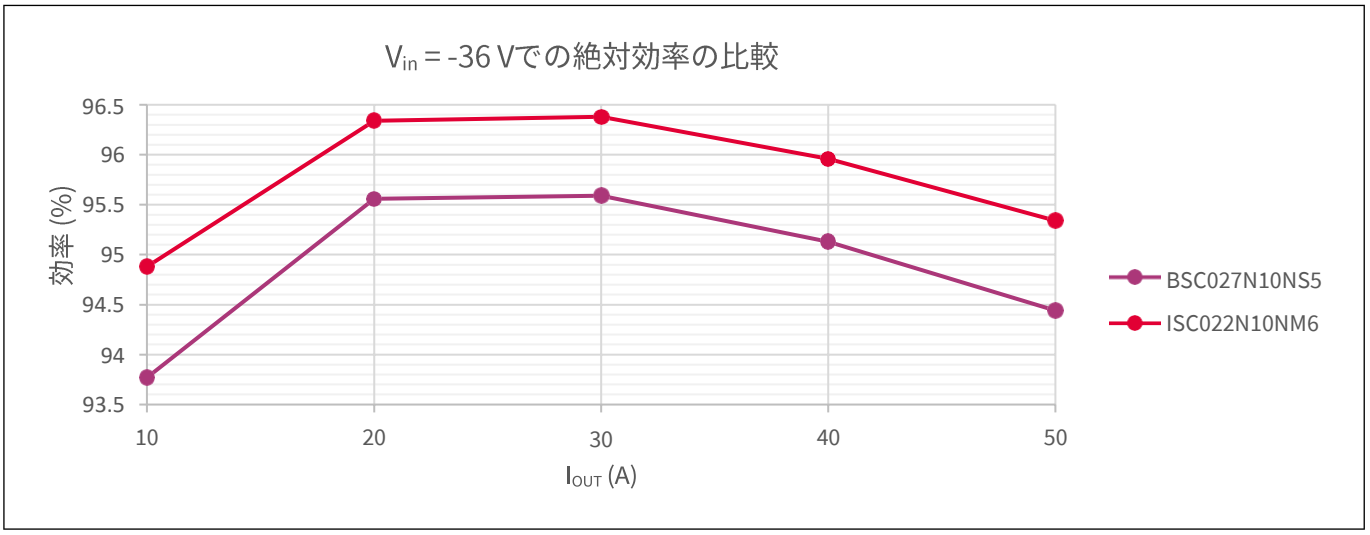


図 33 Vin = -36 Vでの絶対効率の比較

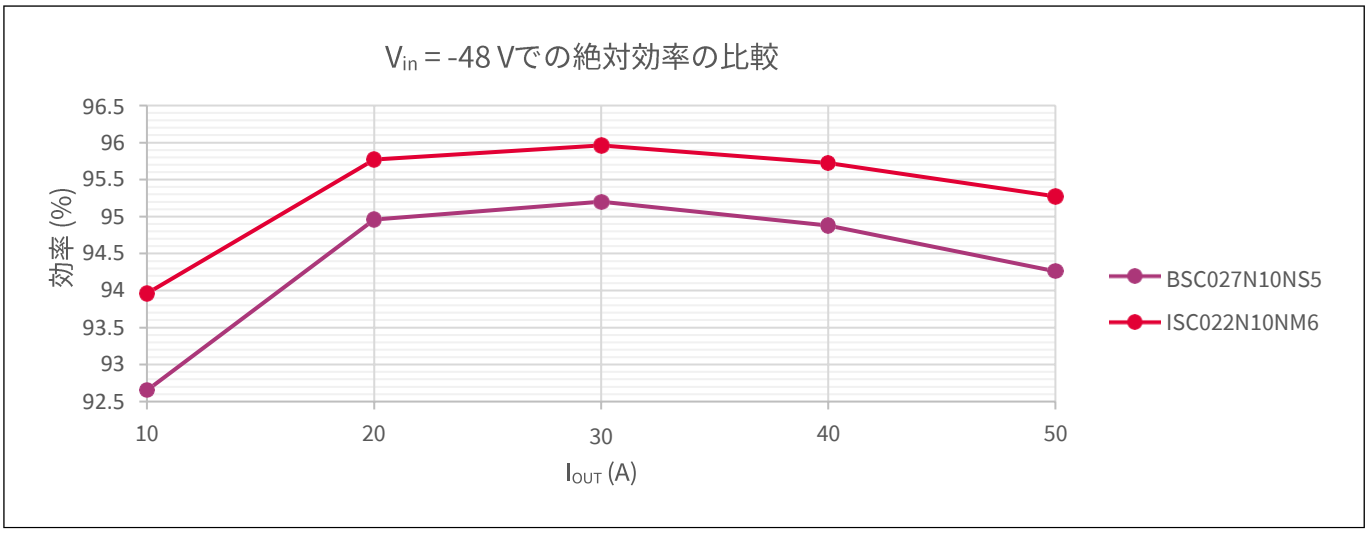


図 34　V_{in} = -48 Vでの絶対効率の比較

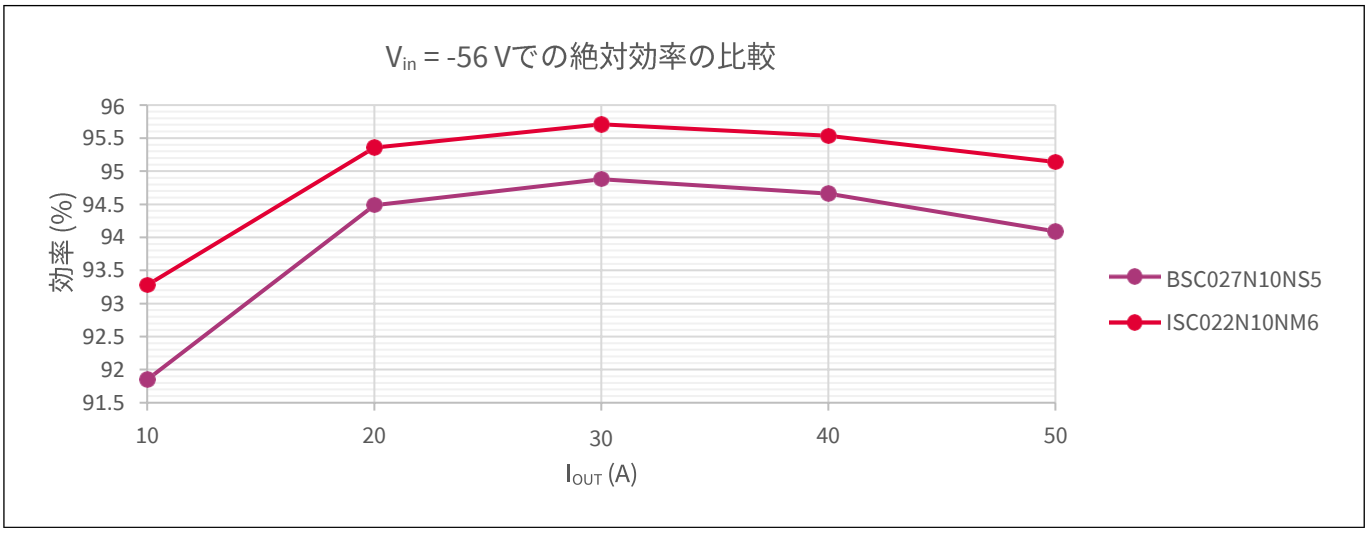


図 35　Vin = -56 Vでの絶対効率の比較

2.2.4.5　おわりに

図 33、図 34、図 35の効率プロットは、インフィニオンの新しいOptiMOS™ 6 100 Vと、以前のOptiMOS™ 5 BiCデバイスとの比較における改善を示しています。効率の向上は、公称電圧レベルおよびすべての負荷条件で約1%と定量化されています。

アクティブクランプ回路は、SRスイッチの逆回復に伴うスイッチング損失を軽減し、ZVSでの制御スイッチのオンを可能にしています。効率の向上は、Q_gの約20% (typ.) 低下により駆動損失が低減し、Q_{gd}の低下によりターンオフ損失が低減 (40%弱の改善)し、また$R_{DS(on)}$が18%低下したことにより導通損失が低減したこと、これら全てによるものであると説明できます。また、制御用MOSFETのZVS化により、Q_{oss}に起因する損失を低減しています。

Q_{oss}は、クランプの共振電流の振幅にわずかな影響を与えるだけです。

実験結果は、FOMが改善され、$R_{DS(on)}$が18%低下した新しいインフィニオンOptiMOS™ 6 100V BiCデバイスISC022N10NM6が、高周波数でソフトスイッチされたSMPSのように、ほとんどの負荷条件で最高の効率を得るために導通損失が重要な役割を果たすアプリケーションで、いかに優れるかを示しています。

2.2.5 熱の比較

効率テストと同時に、インフィニオン社製600W反転式降圧型-(36...60)V-12V DC-DCコンバータの熱データも取得しました。ユニットの温度取得を容易にするため、ヒートシンクを取り外し、ファンで400LFM (2m/s) のエアフローを供給しました。温度が定常状態に達した後、FLIR E6390サーモグラフィーを用いて基板全体の温度を測定しました。

熱画像は、公称線間電圧 (V_{in} = -48 V) 且つ全負荷 (I_{out} = 50 A) で撮影しました。図 36では、異なるDUTについて、基板内で記録された温度を比較しています。ホットスポットの温度は、アクティブなZVSクランプFETとダイオードに対応しています (2つのテストでは同じにしています)。最も低いホットスポット温度 (OptiMOS™ 5 100 Vと比較して5.6°C低温) は、新しいOptiMOS™ 6 100 Vを使用したセットアップで記録されており、ハイサイド スイッチング デバイスから発生する総回収電荷が減少した結果となっています。

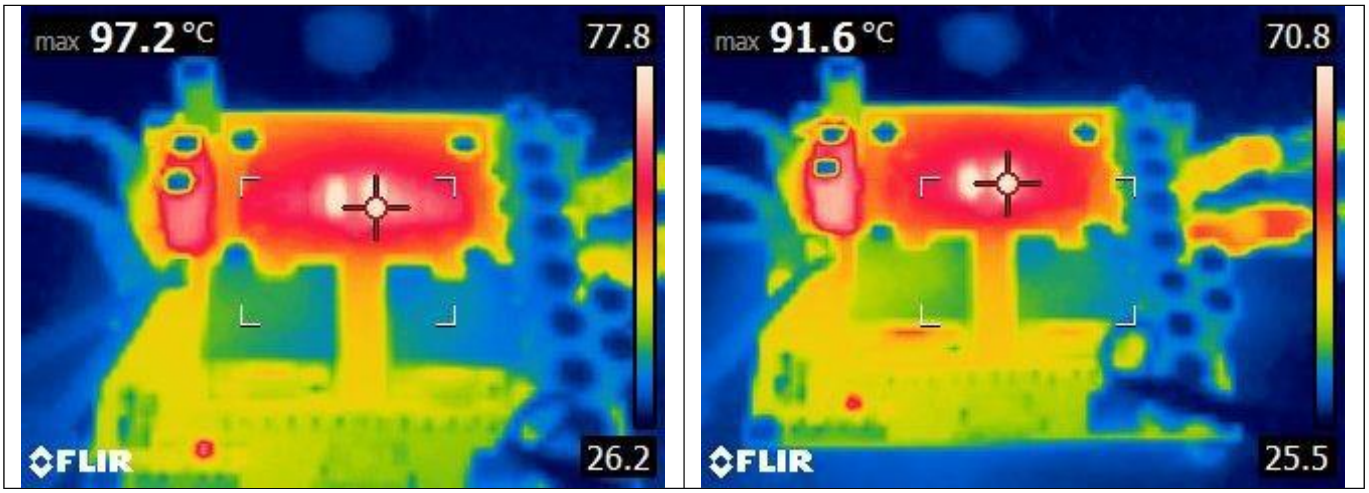


図 36 基板の熱画像 左：OptiMOS™ 5 100 V BSC027N10NS5。右：OptiMOS™ 6

2.2.6 動作波形

比較の最後に、インフィニオンの600W反転降圧型-(36...60)V-12V DC-DCコンバーターの異なるDUTについて波形を取得しました。コンバーターの位相#aの異なるDUTについて、定常状態の波形（ドレイン/ソース間電圧）を取得しました。比較のため，公称入力ライン (V_{in} = -48 V) 且つ全負荷 (I_{out} = 50 A) で波形を取得しました。

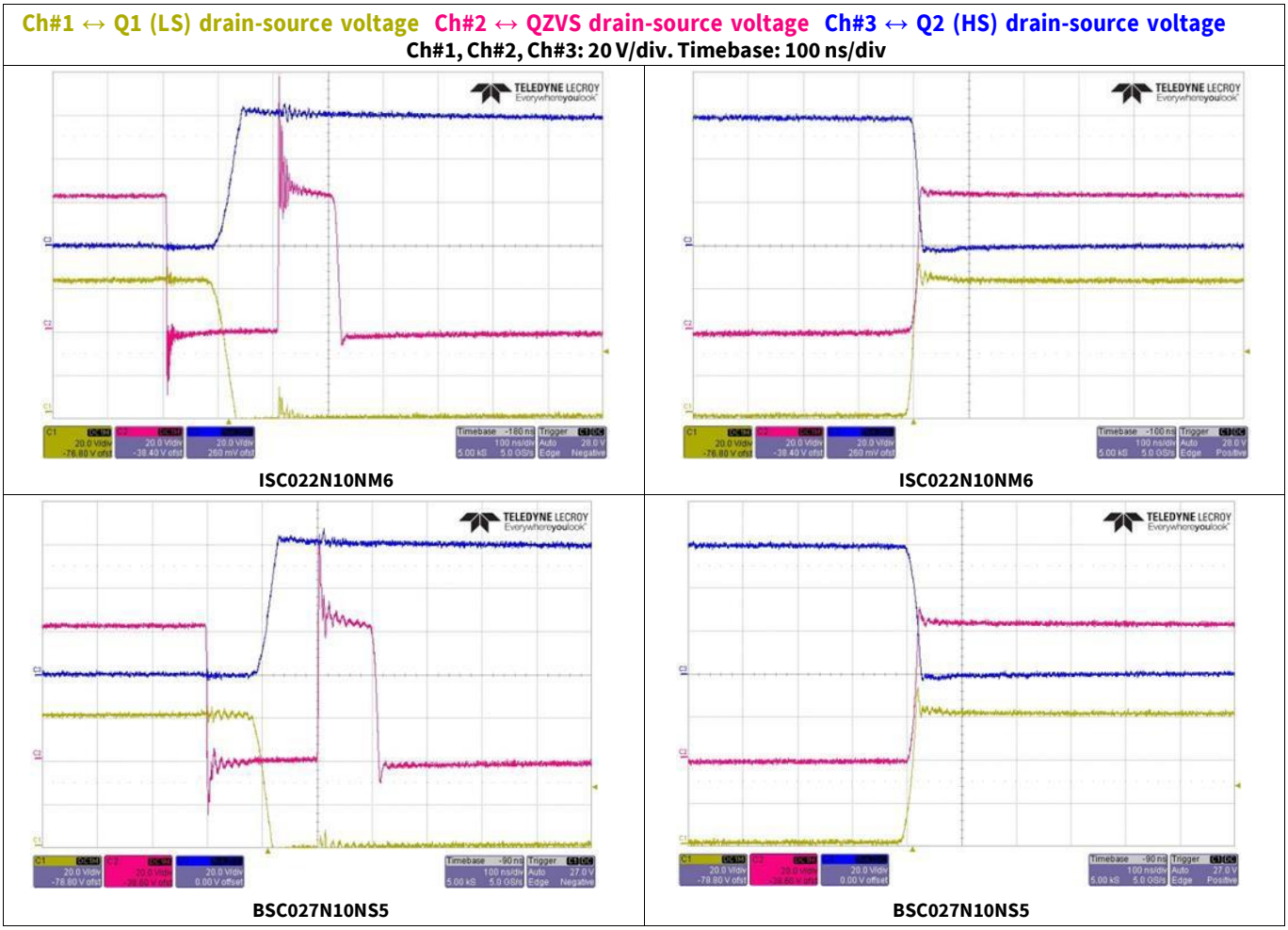


図 37　インフィニオン600 W反転降圧型-(36...60)V-12V DC-DCコンバータのフェーズ#aの定常状態の波形

3 製品ラインアップ

新しいOptiMOS™ 6 100 Vには、幅広い$R_{DS(on)}$レンジが用意されており、パッケージはSuperSO8とPQFN 3.3 x 3.3（すなわち、小型SuperSO8 (略称S3O8) です。幅広いラインアップは、システム設計者の負担を軽減します。高い粒度の$R_{DS(on)}$により、可能な限り広範なアプリケーションをカバーするように設計を最適化することができます。

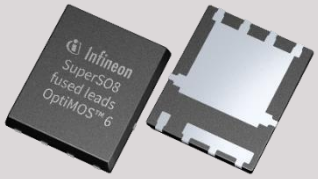
Package	Sales name	$R_{DS(on),max}$ [mΩ] @V_{GS}=10 V
SuperSO8 5x6 	ISC022N10NM6	2.2
	ISC027N10NM6	2.7
	ISC030N10NM6	3.0
	ISC060N10NM6	6.0
	ISC080N10NM6	8.0
	ISC230N10NM6	22.0
PQFN 3.3x3.3 	ISZ080N10NM6	8.0
	ISZ230N10NM6	22.0

図 38 OptiMOS™ 100 V 製品のラインアップ

4 まとめ

本資料では、新しいOptiMOS™ 6 100 VファミリーのMOSFETを紹介します。この新技術は、高度なトレンチMOSFET設計におけるインフィニオンの20年以上の経験の成果であり、完全に再設計されたセルを備え、業界最高のFOMを示しています。最新のOptiMOS™テクノロジーの最も関連性の高いFOMはすべて改善されており、その結果、高スイッチング周波数のSMPSアプリケーションに特に最適化されたデバイスとなっています。

新製品OptiMOS™ 6 100 Vは、デバイスレベルでの優れた改善により、システムの効率と信頼性を大幅に向上させる傾向をサポートします。特に重要なのは、比オン抵抗と比ゲート電荷の大幅な低減です。最小の出力電荷とともに、OptiMOS™ 6 100 Vは、最小のスイッチング損失を提供し、すべてのラインおよび負荷条件にわたってシステム効率を向上させ、通信電力分野の厳しい要件を満たすための大きなマージンを提供します。新しいOptiMOS™ 6 100 Vは、最適化された伝達特性を示し、低い温度係数を実現します。この特徴は、より広いSOAの利点をもたらし、最終的に、最新のトレンチMOSFET技術を、BPAのバッテリーディスコネクトスイッチなどのアプリケーションの有効な候補とします。

OptiMOS™ 6 100 Vには、幅広い$R_{DS(on)}$とSuperSO8およびPQFN 3.3 x 3.3の2つのパッケージソリューションからなる豊富なポートフォリオが用意されています。これにより、新規設計に柔軟性を持たせることができ、また、既存の設計においても、既存のMOSFETソリューションのドロップイン リプレースメントとして採用することで、効率の向上と熱管理の容易さを実現し、性能をアップさせることができます。

5 クレジット

本書で紹介されているテストプラットフォームの開発、アプリケーションでの比較テストの実施、および相対的な測定データの提供を担当したインフィニオンのテレコム アプリケーション エンジニアリング グループ (カリフォルニア州エルセグンド) に感謝します。

[1] Infineon Technologies AG. (2017, 5.) アプリケーションノート: “Linear mode operation and safe operatingdiagram of power MOSFETs”.

[2] Infineon Technologies AG. (2017, 7.) アプリケーションノート: “Linear FET combines advantages of planar andtrench MOSFETs”.

[3] ETSI. (2016, 10.) EN 300 132-2 Power supply interface at the input to telecommunications and datacom(ICT) equipment; Part 2: Operated by -48 V direct current (DC).

[4] GSMA Intelligence. (2020, 11.) 5G energy efficiencies: green is the new black.

[5] MTN Consulting, LLC. (2020, 03.) Operators facing power cost crunch.

[6] Huawei Technologies Co., Ltd. (2019, 02.) 5G power whitepaper.

[7] The Paris Agreement: https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement.

[8] GSMA. (2021, 04.) Mobile Net Zero: State of the Industry on Climate Action 2021.

[9] 出典: Eurostat

[10] Infineon Technologies AG. (2020, 6.) Application note: “The XDPP1100 digital power supply controller”.

[11] Infineon Technologies AG. (2021, 8.) Application note: “XDPP1100 two-phase interleaved buck-boost”.

改訂履歴

ドキュメントバージョン	発売日	変更内容
V 1.0	2021-12-13	初版

Trademarks

All referenced product or service names and trademarks are the property of their respective owners.

Edition 2021-12-13

Published by

Infineon Technologies AG

81726 Munich, Germany

© 2021 Infineon Technologies AG. All Rights Reserved.

Do you have a question about this document?

Email: erratum@infineon.com

Document reference
AN_2111_PL51_2111_105141

IMPORTANT NOTICE

The information contained in this application note is given as a hint for the implementation of the product only and shall in no event be regarded as a description or warranty of a certain functionality, condition or quality of the product. Before implementation of the product, the recipient of this application note must verify any function and other technical information given herein in the real application. Infineon Technologies hereby disclaims any and all warranties and liabilities of any kind (including without limitation warranties of non-infringement of intellectual property rights of any third party) with respect to any and all information given in this application note.

The data contained in this document is exclusively intended for technically trained staff. It is the responsibility of customer's technical departments to evaluate the suitability of the product for the intended application and the completeness of the product information given in this document with respect to such application.

For further information on the product, technology, delivery terms and conditions and prices please contact your nearest Infineon Technologies office (**www.infineon.com**).

WARNINGS

Due to technical requirements 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 Infineon Technologies in a written document signed by authorized representatives of Infineon Technologies, Infineon Technologies' products may not be used in any applications where a failure of the product or any consequences of the use thereof can reasonably be expected to result in personal injury.