650 V CoolMOS™ CFD7A for on-board chargers and DC-DC converters

High performance Superjunction MOSFETs for HEV and EVs

本書について

適用範囲と目的

本書では、インフィニオンの高電圧（HV）車載充電器、および車載 DC-DC システム向け自動車パワーデバイスの使用方法について解説しています。本書では特に、プラグインハイブリッド、ハイブリッド、燃料電池、バッテリー搭載自動車などの電気自動車における力率改善（PFC）および DC-DC ステージでの CoolMOS™ CFD7A（最新のスーパージャンクション（SJ）パワーMOSFET シリーズ）の使用について詳しく解説しています。

さらに本書では、CoolMOS™ CFD7A 技術の概要を示し、弊社に追随する二番手の競合他社の製品にはない一般的な用途における利点の数々について紹介しています。

対象者

本書は、車載パワーエレクトロニクスに向けた最適な HV パワーデバイスを選定する設計エンジニアの方々、ならびに、現在、車載充電器や車載 HV-LV DC-DC コンバーターおよび、放電回路用途において、回路構想や設計の作業に取り組んでいるエンジニアの方々を対象としています。

目次

本書について 1

目次 1

1 はじめに 3

1.1 トポロジーの概要とパワー半導体に関する提案事項 5

2 車載充電器システム 8

2.1 力率改善（PFC）ステージ 9

2.1.1 クラシックブースト PFC 10

2.1.2 デュアルブースト PFC 11

2.1.3 トーテムポール PFC 13

2.2 DC-DC コンバーターステージ 14

2.2.1 位相シフトフルブリッジ（PSFB） 15

2.2.2 LLC トポロジー 16

2.2.3 CLLC トポロジー 17

2.3 3 相 AC 入力を伴う車載充電器 18
2.3.1 3 相 PFC 18
2.3.1.1 多重シングルステージモジュール 18
2.3.1.2 3 相フルブリッジ PFC 20
2.3.1.3 Vienna 整流器 21
3 HV-LV DC-DC コンバーター 24
4 CoolMOS™ CFD7A の製品性能 27
4.1 C_{oss} および E_{oss} の低減 28
4.2 ゲート電荷の低減 31
4.3 CoolMOS™ CFD7A の高速ボディダイオードの特性 33
4.4 広い沿面距離の SMD パッケージ 34
4.5 静電放電（ESD）に対する堅牢性 35
4.6 PFC および DC-DC ステージにおける効率特性 35
4.6.1 CCM PFC における効率特性 35
4.6.2 ソフトスイッチング LLC における効率特性 39
4.7 一般的な設計とレイアウトに関する推奨事項 40
5 参考文献 42
改定履歴 44

1 はじめに

モビリティ（移動性、可動性）の世界は今、変化を遂げようとしています。これまで一世紀以上にわたり内燃機関は最新鋭のソリューションとして君臨してきましたが、今やエレクトロモビリティ（eMobility）が私たちの未来の移動手段に革命をもたらしつつあります。

自動車産業のいくつかの大手メーカーは eMobility について懐疑的ではあるものの、大多数のメーカーはさまざまな政府機関が定めている CO_2 排出目標値を達成するためにこの技術が不可欠であると考えています。

電気自動車がもたらす主な利点の 1 つが、駆動系（動力伝達装置）の簡素化です。電気自動車の駆動系（動力伝達装置）は数多くの機械的部品で構成されるものではなく、単純に電気エンジン（モーターまたはジェネレータとしての役割を果たす）、インバーター（パワーエレクトロニクスシステム）、ならびにエネルギー供給源（一般的には伝導機構内のけん引用蓄電池、燃料電池スタック（積み重ね）、もしくは内燃機関）のみで構成されています。

電気自動車における動力の流れの管理において、半導体が重要な役割を果たします。パワー半導体は、電気自動車の全体にわたって採用されています。具体的には、エンジンを制御するトラクションインバーターシステム、バッテリーを再充電するために必要な量のエネルギーを供給する車載充電器、ならびに車両の HV と LV のドメイン間において安定した電力を供給する車載 DC-DC コンバーターに搭載されています。

インフィニオンは、最先端の半導体技術を提供することで包括的なソリューションの実現を可能にしています。新しい自動車向け 650 V SJ MOSFET 技術である CoolMOS™ CFD7A が、車載充電器と車載 DC-DC システムにおいて次なる水準の品質、信頼性、ならびに性能を実現します。

図 1 に、「電気自動車」システム、ならびにインフィニオンのパワー半導体技術の採用に関する概要を示します。

Note: *デザインインに関するその他の裏付け資料については、「インフィニオンの高速スーパージャンクション MOSFET デバイスを使用するための一般的な設計上の検討事項」、および「650 V CoolMOS™ CFD7A for on-board chargers and DC-DC converters 」を参照するほか、弊社の技術センター（https://www.infineon.com/cms/en/about_infineon/company/contacts_/product-support-form/）の専門技術者にお問い合わせください。*

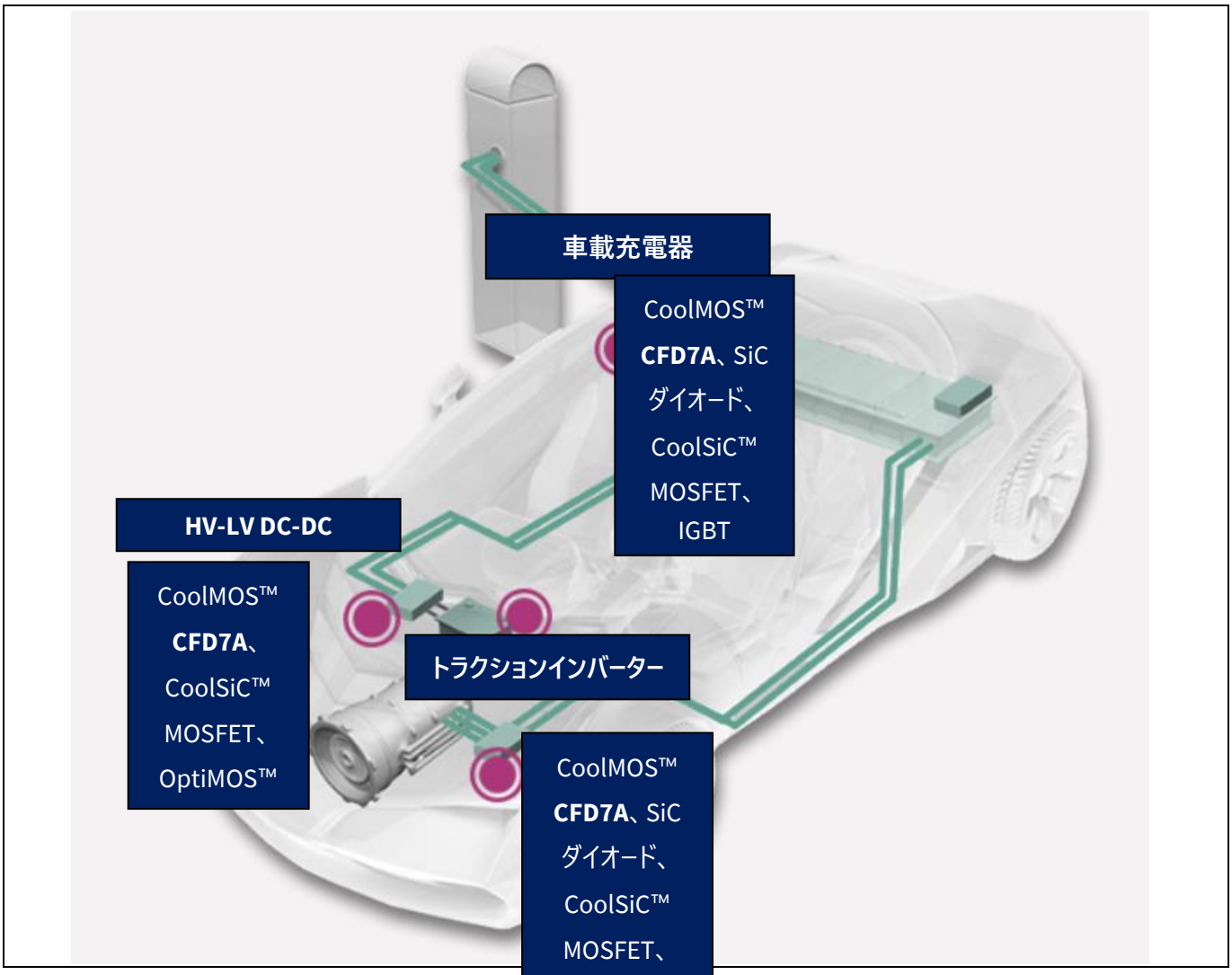


Figure 1 インフィニオンのディスクリートパワー ドバッテリー搭載自動車（BEV）サブシステム

図 2 は、電気自動車の最も重要な HV サブシステムを示す基本的なブロック図です。

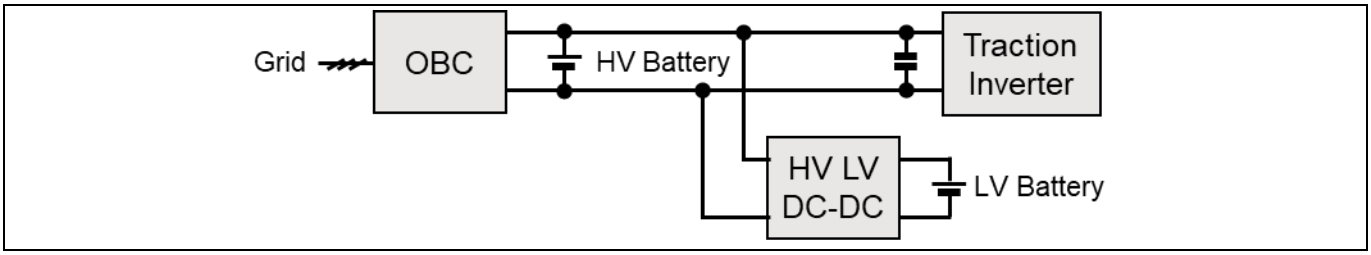


Figure 2 **電気自動車の最も重要なサブシステムを示すブロック図。HV ドメインでの電圧は最大 500 V に達し、LV ドメインでの電圧は通常 12 V（定格）。**

本書では、プラグインハイブリッド車および BEV に向けた車載充電器（OBC）および車載 DC-DC コンバーターについても詳しく解説しています。

図 1 に、さまざまなトポロジーにおける正しい半導体の使用方法について簡潔に示しています。第 1 章では、さまざまな用途とデバイスの使用に関して詳しく解説しています。

第 2 章には、CoolMOS™ CFD7A 技術の特性と利点に関する概要、ならびに正しく使用するための手引きを示しています。

他のサブシステムに適したインフィニオンのソリューション（トラクションインバーター、補助電源装置、ProFET、その他の自動車向けソリューションなど）については、ウェブページ（https://www.infineon.com/automotive/）をご覧ください。

1.1 トポロジーの概要とパワー半導体に関する提案事項

Table 1 **トポロジーの概要**

システム	トポロジーPFC ステージ	トポロジーDC-DC ステージ
システム電圧が最大 500 V の単相 OBC（単一方向）	650 V Infineon TRENCHSTOP™ 5（H5）もしくは、650 V CoolMOS™ CFD7A と 650 V 第 5 世代 SiC ダイオードで構成したクラシックブースト 650 V Infineon TRENCHSTOP™ 5（H5）もしくは、650 V CoolMOS™ CFD7A と 650 V 第 5 世代 SiC ダイオードで構成したデュアルブースト PFC 650 V Infineon TRENCHSTOP™ 5（H5）で構成した トーテムポール PFC	一次側を 650 V CoolMOS™ CFD7A、二次側を HV ダイオード、もしくは 650 V CoolMOS™ CFD7A で構成した位相シフトフルブリッジ（PSFB） 一次側を 650 V CoolMOS™ CFD7A、二次側を HV ダイオード、もしくは 650 V CoolMOS™ CFD7A で構成した LLC

システム	トポロジーPFC ステージ	トポロジーDC-DC ステージ
システム電圧が最大 500 V の単相 OBC（双方向）	650 V Infineon TRENCHSTOP™ 5（H5）で構成した トーテムポール PFC	一次側および二次側を 650 V CoolMOS™ CFD7A で構成した PSFB 一次側および二次側を 650 V CoolMOS™ CFD7A で構成した CLLC
システム電圧が最大 500 V の 3 相 4 線方式 OBC（単一方向）	多重アプローチ： 650 V Infineon TRENCHSTOP™ 5（H5）もしくは、650 V CoolMOS™ CFD7A と 650 V 第 5 世代 SiC ダイオードで構成したクラシックブースト 650 V Infineon TRENCHSTOP™ 5（H5）もしくは、650 V CoolMOS™ CFD7A と 650 V 第 5 世代 SiC ダイオードで構成したデュアルブースト PFC 650 V Infineon TRENCHSTOP™ 5（H5）で構成した トーテムポール PFC 専用アプローチ： 1200 V CoolSiC™ MOSFET で構成した B8	多重アプローチ： 一次側を 650 V CoolMOS™ CFD7A、二次側を HV ダイオード、もしくは 650 V CoolMOS™ CFD7A で構成した PSFB 一次側を 650 V CoolMOS™ CFD7A、二次側を HV ダイオード、もしくは 650 V CoolMOS™ CFD7A で構成した LLC 専用アプローチ： 一次側を 1200 V CoolSiC™ MOSFET、二次側を HV ダイオード、もしくは 650 V CoolMOS™ CFD7A で構成した PSFB 一次側を 1200 V CoolSiC™ MOSFET、二次側を HV ダイオード、もしくは 650 V CoolMOS™ CFD7A で構成した LLC
システム電圧が最大 500 V の 3 相 4 線方式 OBC（双方向）	多重アプローチ： 低速スイッチングレッグを 650 V Infineon TRENCHSTOP™ 5（H5）もしくは、CoolMOS™ CFD7A で構成した トーテムポール PFC 専用アプローチ： 1200 V CoolSiC™ MOSFET で構成した B8	多重アプローチ： 一次側および二次側を 650 V CoolMOS™ CFD7A で構成した PSFB 一次側および二次側を 650 V CoolMOS™ CFD7A で構成した CLLC 専用アプローチ： 一次側を 1200 V CoolSiC™ MOSFET、二次側を 650 V CoolMOS™ CFD7A で構成した PSFB

システム	トポロジーPFC ステージ	トポロジーDC-DC ステージ
		一次側を 1200 V CoolSiC™ MOSFET、二次側を 650 V CoolMOS™ CFD7A で構成した CLLC
電圧が 500 V 未満のバッテリー	上記参照	上記参照に以下変更を伴います。二次側に 1200 V ダイオードまたは 1200 V CoolSiC™ MOSFET

Note: *本書で採用しているトポロジーの図は、読み取りやすさを念頭に置いて作成されています。つまり、トポロジーを示す図では、突入電流の管理、厳格な EMI 要件を満たすために必要な入出力フィルターなど、実際のシステムで求められるコンポーネントが省略されています。個々の電力変換トポロジーの主要な概念を読み取りやすくするために、意図的にこのような図を採用しています。*

2 車載充電器システム

車載充電器システムは、すべてのプラグインハイブリッド車および BEV において必要不可欠なサブシステムです。このシステムはその名前の通り、AC グリッドによりエネルギーが供給されることで高電圧バッテリーを充電する役割を担います。

図 3 に、基本的に AC-DC 変換器である車載充電器トポロジーを示します。これは、PFC ステージ、および DC-DC ブロックで構成されます。

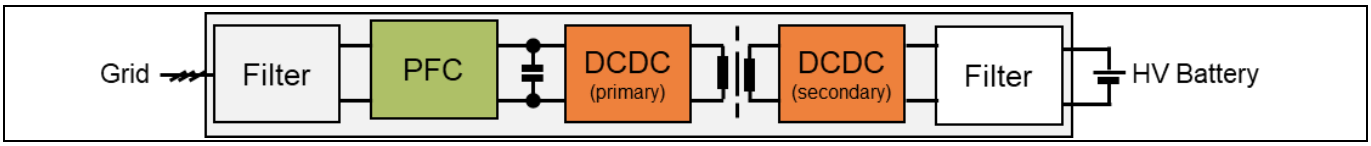


Figure 3 PFC ステージ、および DC-DC ステージで構成される一般的な車載充電器システム

今日の車載充電器の多くは、電気的に絶縁された AC-DC 変換器となっており、これらは電力クラスに関するモジュール方式、ならびに世界中のさまざまな AC グリッドとの相互運用性をもたらします。この結果、さまざまなトポロジーとコンセプトが市場に出回っています。

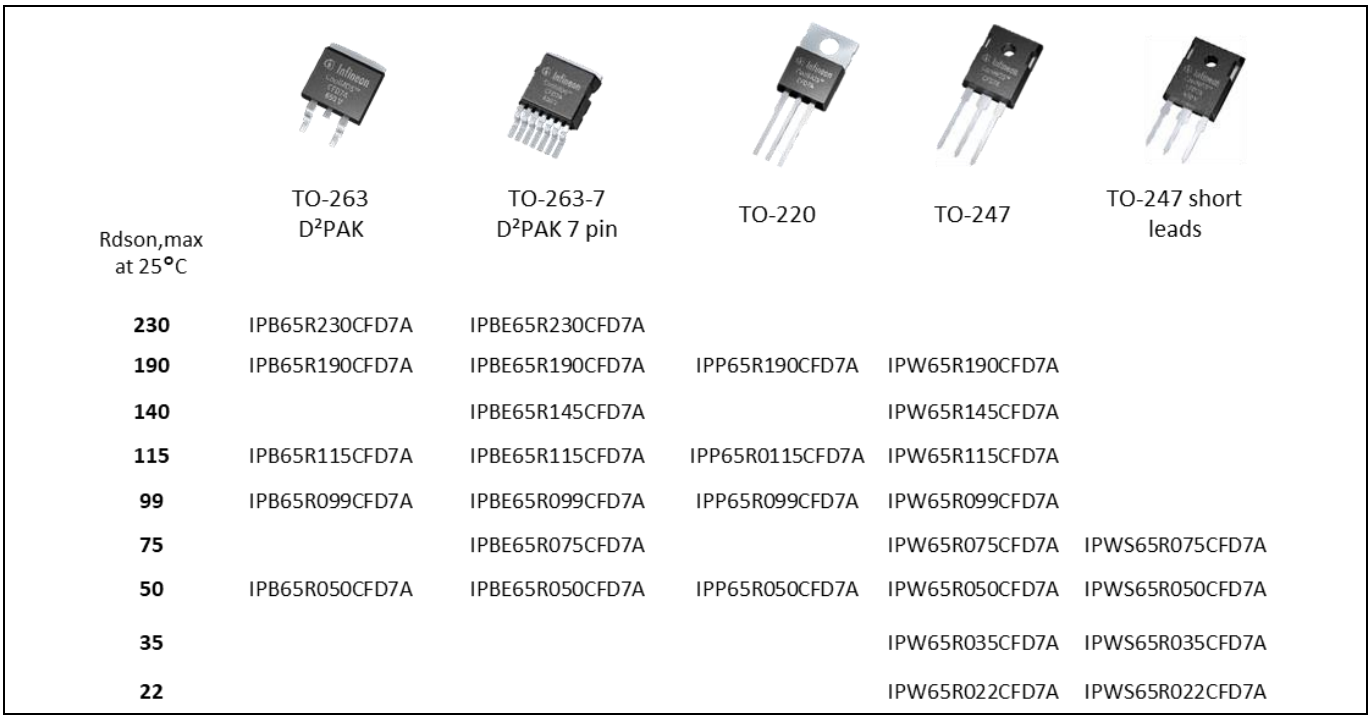
車載充電器システムの重要な要件の 1 つとして、電力損失を最小限に抑えることで高い電力変換効率達成することが挙げられます。これにより、2 つの利点がもたらされます。1 つ目の利点として、高効率化によって、より多くのエネルギーがバッテリーに供給され、充電時間の短縮に貢献します。2 つ目の利点として、高効率化によって電力損失がより低くなります。このことは最終顧客だけでなく、車載充電器のメーカーにもメリットをもたらします。なぜなら、システムをさらにコンパクトに構築することが可能で、その結果、電力密度の向上を実現できるからです。

変換効率は、双方向の車載充電器システムにとって特に重要です。双方向充電システムの場合、高電圧バッテリーの充電のほかに、外部負荷や AC グリッドへの電気エネルギーの供給にも充電器が使用されます。このため、バッテリーと AC グリッドの間をエネルギーが複数回流れ、双方向での変換効率をより高める必要性が生じます。

もう 1 つの主な要件は、高い電力密度です。車載充電器は、小型でコンパクトである必要がある一方で、高い電力を扱うことができなければなりません。最近の業界の傾向として、ある一定の電力レベルに対して充電器がより小型化し、あるいは物理的な寸法が同じ充電器でも電力レベルが増しています。

高い変換効率、および電力密度は、インフィニオンの最も新しい世代の CoolMOS™ CFD7A を使用して達成することができます。CoolMOS™ CFD7A シリーズは、自動車産業のニーズに併せて柔軟に採用することができる技術で、車載充電器システムと DC-DC コンバーターの PFC ステージおよび DC-DC ステージに採用できます。

CoolMOS™ CFD7A は、最大 470 V DC のシステム電圧との互換性を備えています（「LV123：道路車両の高電圧コンポーネントの電気的特性と電気的安全性」の電圧クラス「HV_2b」に準じる）。



Rdson,max at 25°C	TO-263 D²PAK	TO-263-7 D²PAK 7 pin	TO-220	TO-247	TO-247 short leads
230	IPB65R230CFD7A	IPBE65R230CFD7A			
190	IPB65R190CFD7A	IPBE65R190CFD7A	IPP65R190CFD7A	IPW65R190CFD7A	
140		IPBE65R145CFD7A		IPW65R145CFD7A	
115	IPB65R115CFD7A	IPBE65R115CFD7A	IPP65R0115CFD7A	IPW65R115CFD7A	
99	IPB65R099CFD7A	IPBE65R099CFD7A	IPP65R099CFD7A	IPW65R099CFD7A	
75		IPBE65R075CFD7A		IPW65R075CFD7A	IPWS65R075CFD7A
50	IPB65R050CFD7A	IPBE65R050CFD7A	IPP65R050CFD7A	IPW65R050CFD7A	IPWS65R050CFD7A
35				IPW65R035CFD7A	IPWS65R035CFD7A
22				IPW65R022CFD7A	IPWS65R022CFD7A

Figure 4　　自動車向け CoolMOS™ CFD7A $R_{ds(on)}$とパッケージポートフォリオ

2.1　　力率改善（PFC）ステージ

相互運用性に関して各種要件が存在するため、業界では実にさまざまな PFC トポロジーが採用されています。

OBC における PFC ステージの大部分は、直流モード（CCM）が採用されています。このため、それらのボディダイオードのハードコミュテーションに対して堅牢性を発揮する半導体が必要となります。CoolMOS™ CFD7A シリーズなどの SJ デバイスは、SiC ダイオードと共に CCM PFC ステージを構成することができます（図 6c）。代替的な方法として、TRENCHSTOP™ 5 IGBT（F5）または CoolSiC™ ワイドバンドギャップ（WBG）MOSFET を CCM PFC で使用することができます。なぜなら、これらの技術は本質的に、ハードコミュテーションに対して堅牢性を備えているためです。この場合、2 つのスイッチをハーフブリッジの構成で使用することができます。SJ MOSFET を使用する場合は、SiC ダイオードと組み合わせた状態でのみ動作します。

本書では、最も一般的な PFC トポロジー、それらの主な性能パラメーター、ならびに車載充電器システムのディスクリートパッケージにおける HV 電源スイッチに向けた最適な技術の選定に関する概要を示しています。

2.1.1 クラシックブースト PFC

PFC の回路構成をする上で、最も単純なトポロジーは、図 5 に示すようにブーストコンバータートポロジーを採用することで実現できます。このトポロジーは、「クラシック PFC」または「クラシックブースト PFC」としても知られています。

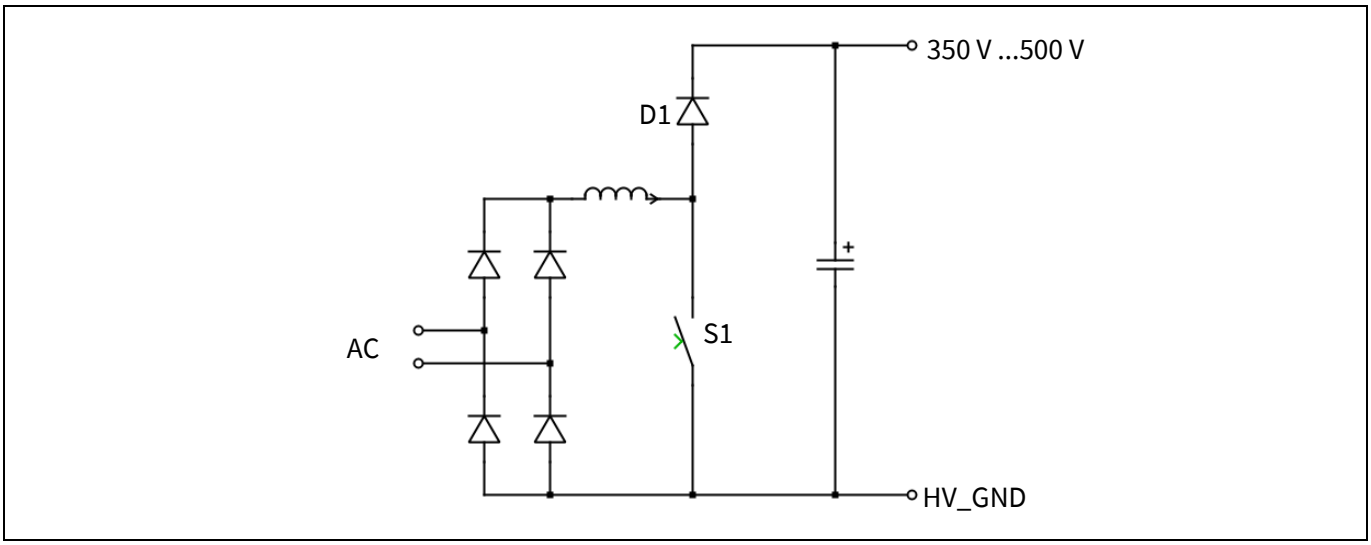


Figure 5 ブースト PFC の動作原理（わかりやすいように、S1 のダイオード成分を省略）

このシンプルな回路は、AC 入力側のスイッチとダイオード、インダクターそれぞれ 1 つ、ならびにダイオードブリッジ整流器で作られるハーフブリッジ構成となっています。DC 出力側では、一般的にバルクコンデンサが使用されて出力電圧の安定化を図っています。高い力率を達成する最も一般的な動作モードは、直流モード（CCM）です。これは、スイッチとダイオードの間のハードコミュテーションにより実現します。

このトポロジーは、AC 入力から DC 出力への単一方向の電力の流れをもたらします。ブースト PFC ステージを設計する方法の詳細については、[1] を参照してください。

上に述べたように、ハーフブリッジにおいてハードコミュテーションが発生します。このため、必要条件として、使用される半導体が連続的なコミュテーションに耐えることができなければなりません。

したがいまして D1 には、第 5 世代自動車向け SiC ダイオードを使用することが望ましいです。インフィニオンの 650 V 第 5 世代自動車向け SiC ダイオードの概要を、[2] に示しています。

PFC ステージでは、さまざまな半導体スイッチを電源スイッチとして使用することができます。図 6 に、さまざまなソリューションの概要を示します。

インフィニオンの自動車専用 TRENCHSTOP™ 5 IGBT は、650 V のブレークダウン電圧で高速スイッチング動作が可能です。AEC Q101 の条件を満たす IGBT の概要を、[3] に示します。IGBT は、単一の IGBT 製品と、Si または SiC ダイオードと IGBT を一緒に封止した製品があります。単一の IGBT が使用されるときは、IGBT での負電圧ノイズの発生を回避するため、エミッターノードの間に小型の逆並列 PN ダイオードを使用するよう弊社では推奨します。

シンプルな PFC トポロジーで最高水準の効率を達成するため、IGBT に代えて MOSFET を使用するよう弊社は推奨します。SiC ダイオードの使用を検討される場合、インフィニオンの最新の自動車向け CoolMOS™（CoolMOS™ CFD7A）はこのトポロジーに極めて適します。MOSFET には、チャネルの中で抵抗としてのふるまいを持つ利点があるほか、テール電流の影響を受けないため、IGBT と比較してより低いスイッチング損失を実現することができます。これらすべての利点はより低い電力損失につながり、これにより変換効率がさらに向上します。

Note: *ハードスイッチング（CCM）PFC において、SJ MOSFET でのハーフブリッジ構成はしないでください。*

もう 1 つの手段として、クラシックブースト PFC 内で WBG MOSFET を使用することが可能です。しかし、このトポロジーにおいて、WBG MOSFET は WBG の素材の利点を十分に活用することができないため、効率は向上しません。インフィニオンの自動車向け WBG デバイスの概要を、[4] に示します。

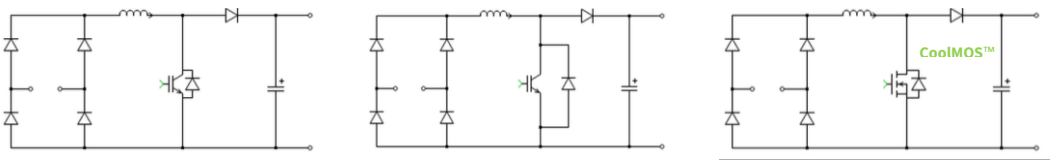


Figure 6 **単相車載充電器向け PFC ステージの例：a) SiC ダイオード内蔵 IGBT、b) 単相 IGBT に外部逆並列ダイオード、c) MOSFET CFD7A（ボディダイオード）**

2.1.2 デュアルブースト PFC

性能を最大限に活用するために魅力あるトポロジーの 1 つとして、「ブリッジレス」PFC トポロジーがあります。このトポロジーは、その名前が示唆するように、AC 入力側でダイオードブリッジを使用せず、半導体スイッチを使用することで効率を高めます。**図 6** に、ブリッジレス PFC 整流器の代表的な例である「デュアルブースト PFC トポロジー」を示します。

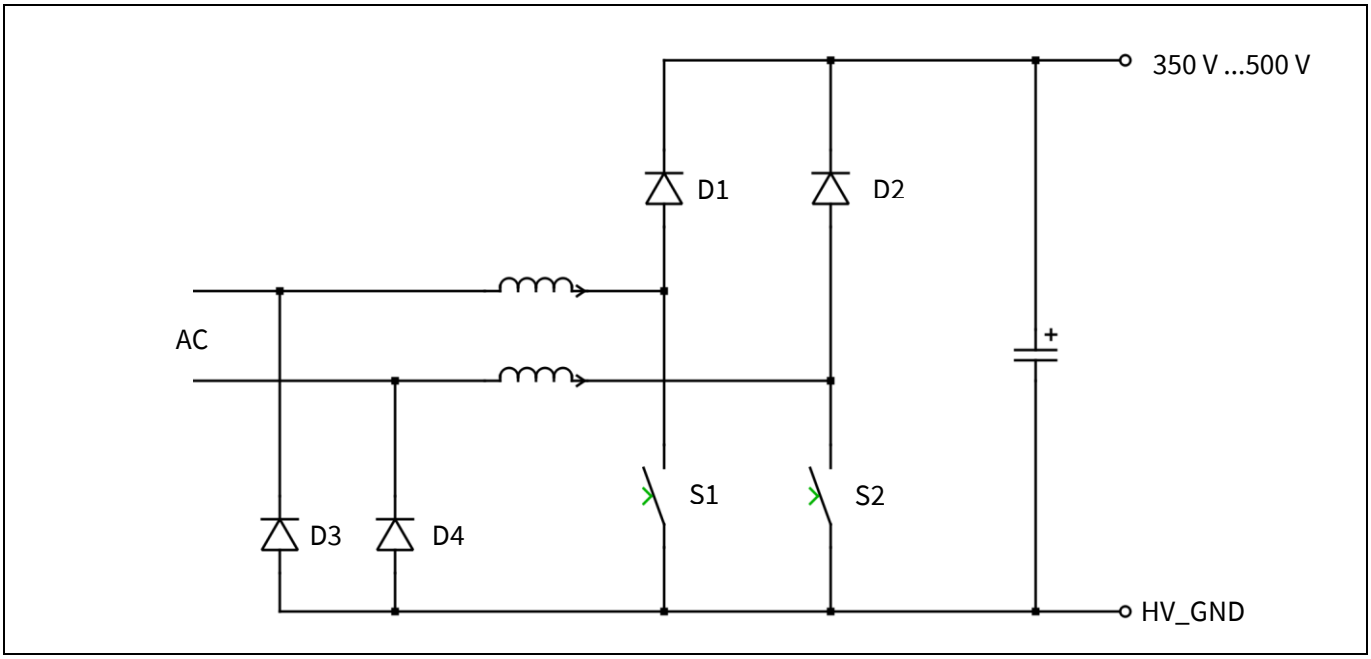


Figure 7 「ブリッジレス」PFC トポロジーの代表例としてのデュアルブーストトポロジー

デュアルブーストトポロジーの動作原理は、クラシックブースト PFC に非常に類似しています。このため、半導体コンポーネントの選定もまた、クラシックブースト PFC と類似しています。トポロジーのレベルでの明確な違いとして、それぞれの AC セミサイクルが、前述のダイオード整流ではなく、ハーフブリッジで扱われることが挙げられます。これにより、スイッチの数が増加しますが、入力にダイオード整流器が存在しないことで変換効率が高まります。

インフィニオンの TRENCHSTOP™ 5 IGBT または CoolMOS™ CFD7A は、S1 と S2 にとって最適な選択肢となります。D1 と D2 には、第 5 世代 SiC ダイオードを推奨します。一方、D3 と D4 は PN 整流ダイオードをお使いいただけます。効率を高めるためのもう 1 つの方法として、整流のための D3 と D4 に並行してスイッチを使用することが挙げられます。この概念に関する詳細については、[5] をご覧ください。

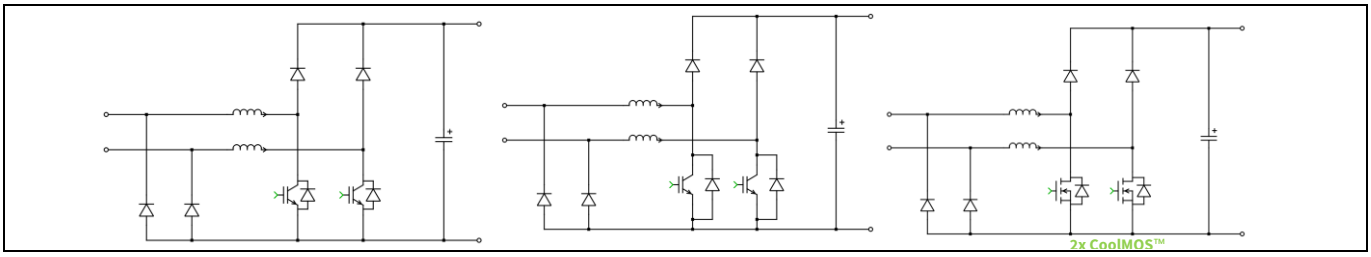


Figure 8 a) 集積 SiC D を搭載する IGBT、b) 外部 PN ダイオードを搭載する IGBT H5、および c) CoolMOS™ CFD7A を備えたデュアルブーストトポロジー

2.1.3 トーテムポール PFC

双方向の車載充電器のための一般的なトポロジーは、いわゆる「トーテムポール」と呼ばれる PFC トポロジーです。このトポロジーの概念では、すべてのダイオードをスイッチと置き換えて、双方向の電力伝送を可能にしています。図 9 にこのトポロジーの概念図を示します。

ダイオードに代えてスイッチを使用することのもう 1 つの利点が、やはり効率が高まることです。しかし、この改変により回路内で複数のパワー半導体を制御することが必要となることから、複雑性も増します。

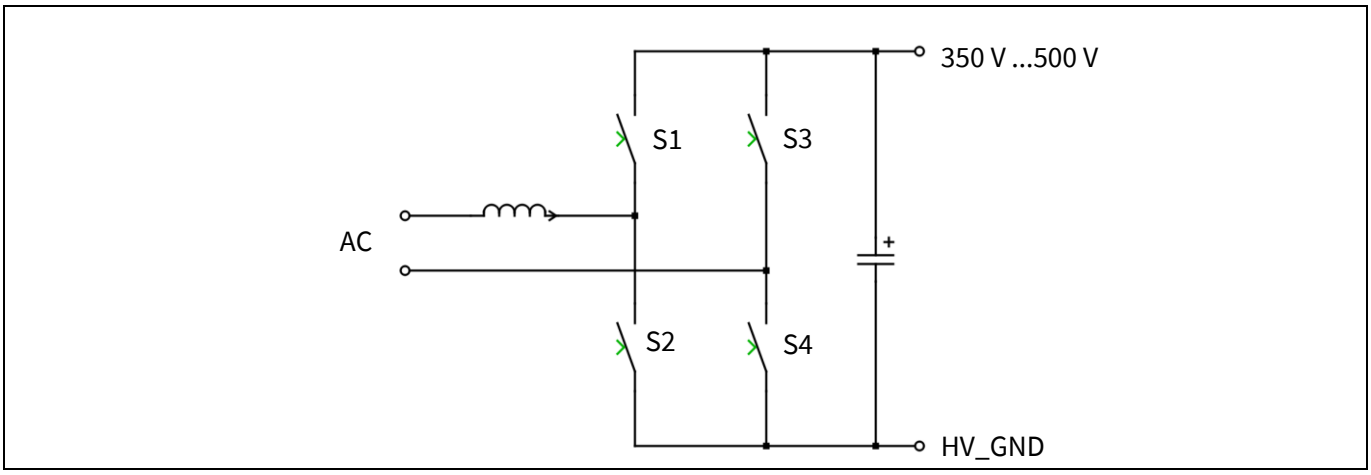


Figure 9　トーテムポール PFC トポロジー

Note:　トーテムポール PFC は、フルブリッジ PFC としても知られています。

トーテムポール PFC は、高速スイッチングレッグ（S1 と S2）1 つ、および低速スイッチングレッグ（S3 と S4）1 つで構成されます。S1 と S2 は、高周波の 2 つのスイッチ間の負荷電流のハードコミュテーションに耐えることができる半導体を必要とします。このため、S1 と S2 にとって最良の選択肢は、インフィニオンの TRENCHSTOP™ 5 IGBT（H5）、もしくはインフィニオンの CoolSiC™ MOSFET を使用することとなります。

Note:　SJ MOSFET は、トーテムポール PFC での高速スイッチングレッグ（S1 と S2）には適していません。これは、ボディダイオードの Q_{rr} が相対的に大きいことによるものです。しかし、これらは低速スイッチングレッグ（S3 と S4）に極めて適しています。

低速スイッチングレッグ（S3 と S4）内のスイッチは、整流としての機能を果たしています。このため、これらは AC 入力のゼロクロス（ゼロ電圧スイッチング：ZVS）の間に AC 周波数で ON/OFF の切り替えが行われます。

トーテムポール PFC を実現するための一般的な方法の 1 つとして、ポジション S1、S2、S3、および S4 に IGBT スイッチを使用します。インフィニオンの TRENCHSTOP™ 5 IGBT は、車載充電器システムに最適です。

効率をさらに向上するために、低速ハーフブリッジ（S3 と S4）に CoolMOS™ CFD7A を使用することが推奨されます。AC 周波数でのソフトスイッチングにつき、SJ MOSFET を使用することが可能です。

インフィニオンの SiC MOSFET は、極めて優れた逆回復特性を伴う WBG デバイスです。このため、これらのデバイスを使用して、4 つの SiC MOSFET で構成されたハードスイッチングトーテムポール PFC を実現することができます。インフィニオンの SiC MOSFET がもたらすもう 1 つの利点が、1200 V のブレークダウン電圧に対応した製品があることです。これにより、より高い DC リンク電圧（650 V を超える）をサポートすることが可能となります。

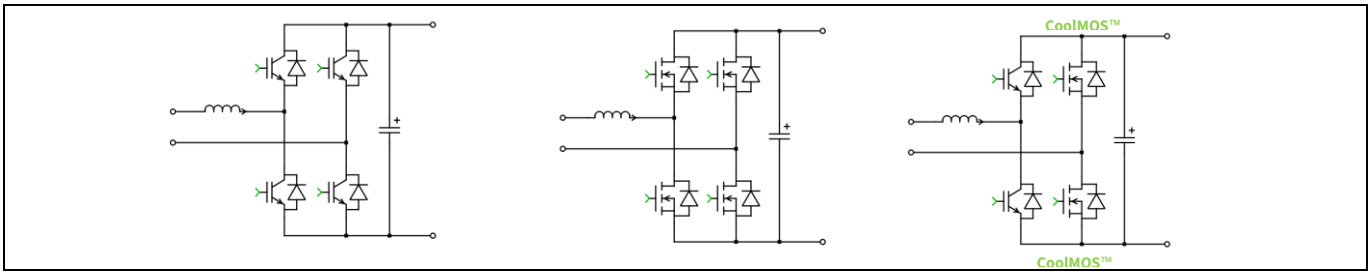


Figure 10　トーテムポール PFC a) IGBT b) SiC MOSFET c) IGBT と CoolMOS™ CFD7A（整流側）

ソフトスイッチングの技術が利用されれば、変換効率の向上を達成することができます。ソフトスイッチングにより、（**図 10b** に示すように）CoolMOS™パワー半導体をフルブリッジトポロジーで使用することも可能になります。これらの PFC ステージは一般的に、「三角電流モード」PFC として知られています。このアプローチのデメリットとして、ステージを制御するために可変周波数が必要となること、ならびに力率が CCM PFC と比較して低下することが挙げられます。これは、複数のソフトスイッチング PFC ステージをインターリーブすることによって補間することができます。ソフトスイッチング PFC ステージの詳細については、[6] をご覧ください。

2.2　DC-DC コンバーターステージ

図 2 に示されるように、絶縁と安全性に関する必要条件を満たすため、一般的な車載充電器システムは絶縁 DC-DC ブロックが構成されています。さらに、このステージは、高電圧バッテリーの状態に応じた、充電電圧を制御する役割も担っています。

最も一般的なトポロジーは、ソフトスイッチング PSFB コンバーター、ならびに LLC コンバーターです。優れたスイッチング特性により、MOSFET は近代的な DC-DC コンバーターにおいて支配的な役割を果たしています。インフィニオンの最新の車載 CoolMOS™（CoolMOS™ CFD7A シリーズ）は、ソフトスイッチング DC-DC コンバーターステージで使用するため完全に最適化されています。

2.2.1 位相シフトフルブリッジ（PSFB）

市場に出回っている一般的な DC-DC トポロジーは、図 11 に示すように、いわゆる「位相シフトフルブリッジ」トポロジーです。これは、DC-DC コンバーターの一次側のフルブリッジ、共振インダクター、絶縁トランス、および二次側の整流によって構成されています。

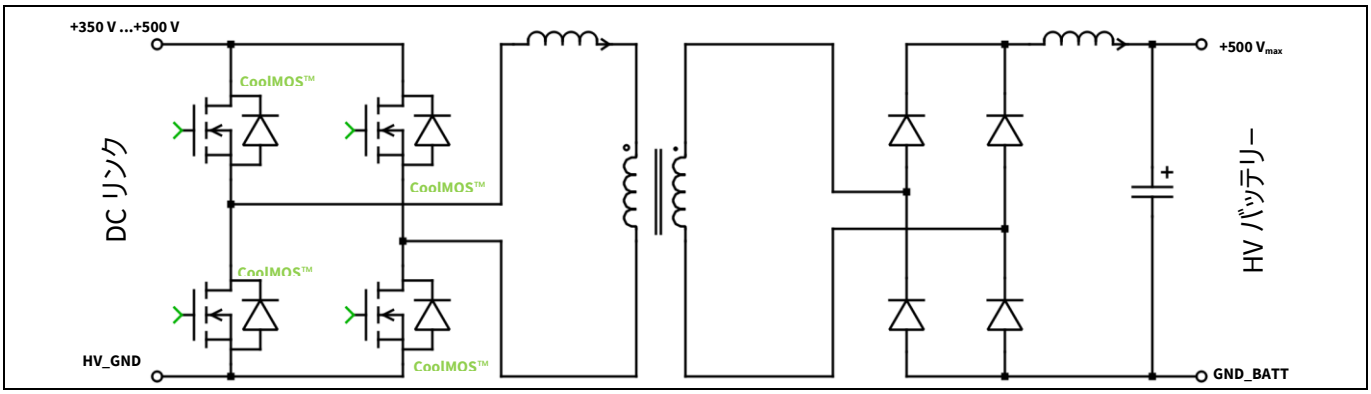


Figure 11 二次側をダイオードで構成した PSFB トポロジー

このトポロジーの大きな利点の 1 つとして、ソフトスイッチングモードで幅広い負荷範囲にわたり動作することができるという高い効率性を挙げることができます。これは、MOSFET の寄生容量に充電されているエネルギーをリサイクルすることができ、これにより電力損失を抑え、放熱を抑え、変換効率を高めることができることを意味します。一次側のインダクター（Lr）は、コントローラーと共に MOSFET のソフトスイッチングを確実なものにします。しかし、このトポロジーの本来の性質により、出力範囲全体にわたりすべての MOSFET のために完全な ZVS を達成することはできません。一般的に、さまざまな MOSFET のハードスイッチングが軽負荷の条件において発生します（共振エネルギーが ZVS を維持するのに十分に大きくないとき）。このハードスイッチングの現象も、インフィニオンが、長期的に信頼性の高い動作を保証する CoolMOS™ CFD7A など、高速ダイオード特性を持つシリコン MOSFET、あるいはインフィニオンの自動車用途向け CoolSiC™シリーズなどの WBG MOSFET を推奨する理由です。

このトポロジーのもう 1 つの利点として、制御する手間が LLC コンバーターと比較して少ないという点を挙げることができます。電力伝送の制御は、周波数やデューティサイクルを改変することなく、2 つハーフブリッジレッグ間の位相シフトをコントロールすることで行えます。さらに、PSFB トポロジーは、LLC コンバーターよりも広い変換率を達成することができます。

二次側には、一次側から送られたエネルギーの整流を行うというタスクがあります。これを達成する方法は、複数存在します。1 つの方法として、フルブリッジ整流（図 11 に示す通り）、またはセンタータップを施したトランスを使用することを挙げることができます。いずれの場合においても、ダイオード、もしくは MOSFET スイッチが一般的に使用されます。

PSFB DC-DC コンバーターの設計の詳細については、[7] をご覧ください。

最先端の車載充電器は、Si または SiC を基盤とする MOSFET を使用しています。IGBT は、コンパクトな DC-DC コンバーターに向けた高いスイッチング周波数の必要条件を理由に、一般的に使用されません。

インフィニオンは、このトポロジーのために発揮される優れた性能と共に、高速ボディダイオードを備える CoolMOS™ CFD7A を提供します。WBG デバイスが好まれる場合、インフィニオンの CoolSiC™ファミリーの MOSFET が最良の選択肢となります。

PSFB トポロジーはまた、DC-DC の「二次」側にスイッチを使用し、適切なスイッチング制御が適用される場合、双方向の車載充電器のために使用することもできます。**図 12** に、双方向の PSFB の概念図を示します。図に示すように、ハードウェアのコンポーネントをさらに改変して双方向の電力伝送をサポートする必要はありません。

双方向の PSFB で CoolMOS™を使用する完全な形で動作する評価基板を、[8] に示します。

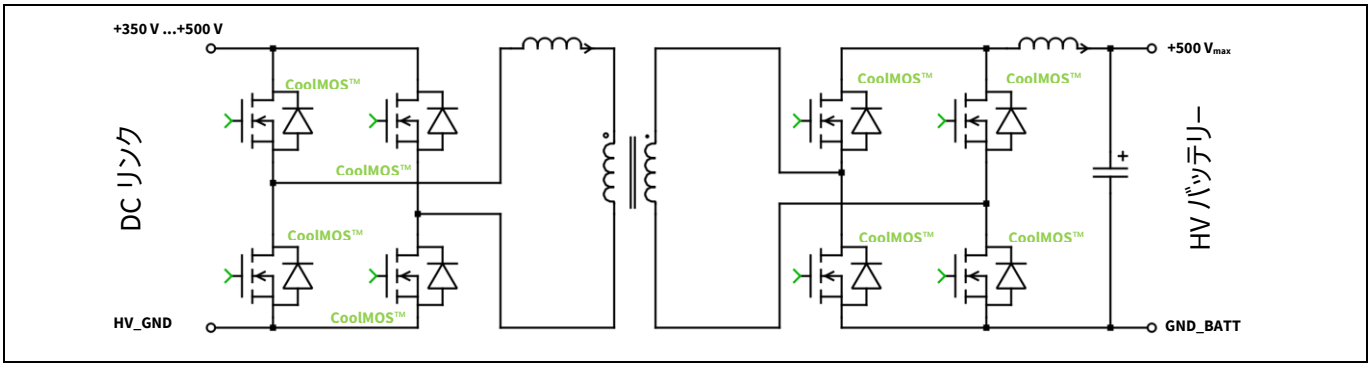


Figure 12　双方向の用途向け PSFB トポロジー

2.2.2　LLC トポロジー

LLC トポロジーは、最高水準の効率を実現する理想的なトポロジーです。PSFB と比較して、このトポロジーはさらに高い効率を達成することができるため、動作時の損失がより低くなります。これにより、電力密度がさらに高いコンバーターを実現することができます。

車載充電器で使用される多くの LLC コンバーターは、フルブリッジ LLC コンバーターです。一次側のフルブリッジ構成は、電源スイッチを通る電流を低減させるのに役立ちます。これは、トランスの一次側の巻線に、ハーフブリッジ LLC コンバーターと比較してより高い（2 倍の）電圧がかかるためです。2 倍の電圧がかかるため、1 つのトランスに 2 倍の電力を送ることが可能となります。この原理はすべてのハーフ/フルブリッジコンバーターにとって有効で、LLC コンバーターの固有の特性ではありません。しかし、電力がより低い用途にハーフブリッジ LLC コンバーターを使用するのがより一般的です。

優れた設計の LLC トポロジーのもう 1 つの利点は、全負荷の範囲にわたり ZVS を達成することができることです。しかしながら、MOSFET のハードスイッチングは、起動時といくつかの条件下でのみ起きる傾向があります（たとえば、「容量モード」での動作時など）。このため、高速ボディダイオードを伴う MOSFET を使用して長期間にわたる信頼性を確保することを

弊社では推奨します。インフィニオンの自動車向け CoolMOS™ CFD7A はコミュテーションに対して卓越した堅牢性を備えているため、このトポロジーにとって完璧な選択肢です。

LLC トポロジーの欠点としては、電力伝送が可変デューティサイクルではなく可変周波数で制御されることが挙げられます。求められる周波数の範囲により、EMI フィルターの設計がより難しくなる可能性があります。さらに、LLC コンバーターの並行ステージの同期化がより複雑になります。ならぜなら、電流共有が難しいからです。また、LLC トポロジーは変換率が限られるため注意が必要です。

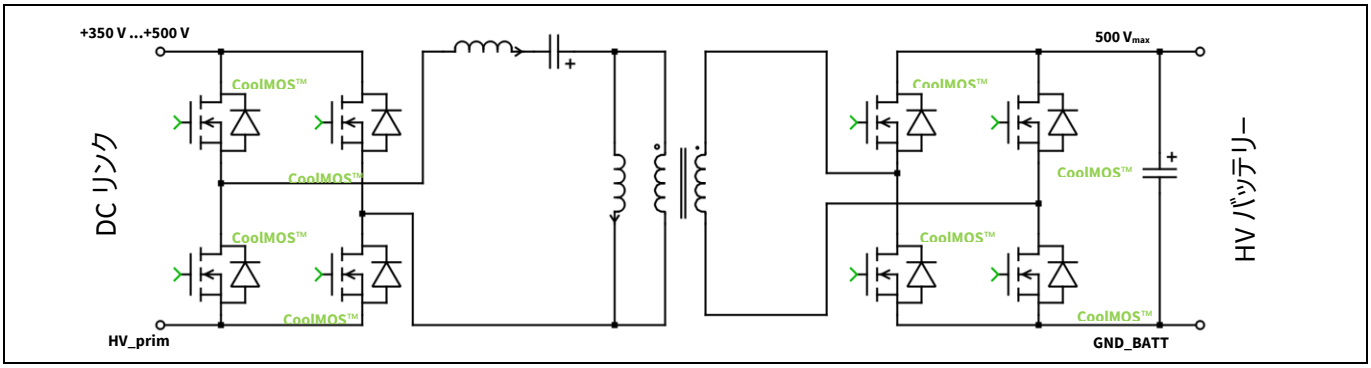


Figure 13　単一方向動作向けフルブリッジ LLC コンバーター（二次側：同期整流の場合）

図 13 に、車載充電器で使用される一般的なフルブリッジ LLC コンバーターを示します。コンバーターの二次側も、フルブリッジとして設計されています。最善の性能を発揮させるためには、二次側はダイオードではなく CoolMOS™ CFD7A MOSFET を配置するべきです。

2.2.3　CLLC トポロジー

車載充電器が双方向の電力伝送をサポートしなければならない場合、共振タンクに小規模な改変を加える必要があります。すなわち、二次側にコンデンサーを追加し共振タンクを対称的に配置します。

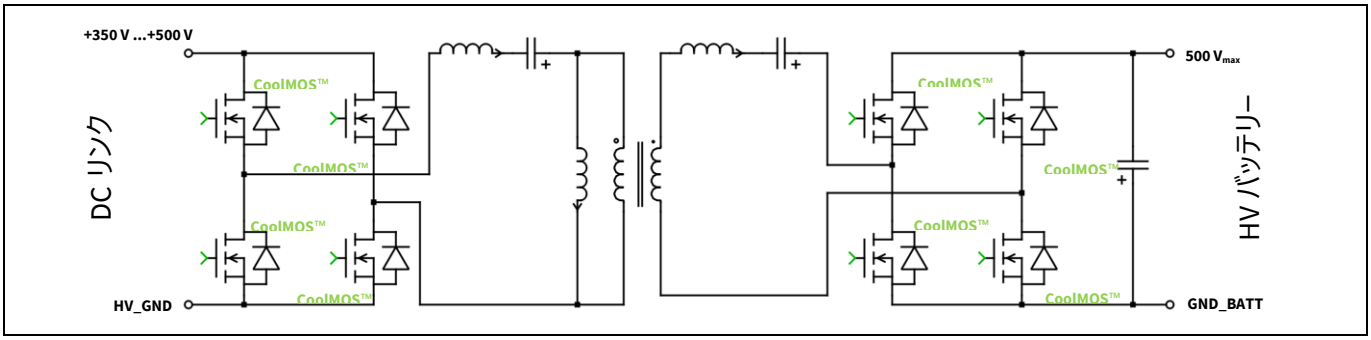


Figure 14　双方向動作向けフルブリッジ CLLC コンバーター

2.3 3 相 AC 入力を伴う車載充電器

前に言及したように、世界中にさまざまな AC インフラが存在し、OBC はさまざまな AC 電圧と相数に対応する柔軟性を必要としました。原則として、上記で述べたすべてのトポロジーは、上記で想定されるシステム電圧を考慮に入れる限りにおいては、単相および 3 相 AC 入力に使用することが可能です。

2.3.1 3 相 PFC

3 相 PFC システムは、電力クラスがより高い車載充電器に使用されます。3 相 AC 入力のために PFC を実装する方法は、複数存在します。以降の章に、最も一般的な技術の概要を示します。

2.3.1.1 多重シングルステージモジュール

3 相サポートを実現するための一般的な方法の 1 つとして、個々の単相モジュールを積み重ねる方法があります。これは、各交流（AC）位相を入力側の中性線に差し向けることで達成されます。

図 15 に、この積み重ねの一例を示します。この図には、拡張可能な 3 相 PFC を形成している 3 つの単相クラシックブースト PFC ステージを示します。しかし、この概念は**図 16** に示すように、デュアルブースト PFC やトーテムポール PFC など、他の単相 PFC トポロジーにも適用されます。

この概念の大きな利点は、単相および 3 相の動作をサポートすることができることです。すなわち、AC 入力側の位相切り替えで単相の並列動作もしくは、3 相動作に切り替えができます。また、DC リンクの電圧は 400 V の範囲に抑えられ、650 V デバイスを次ステージの DC-DC に使用することを可能にします。

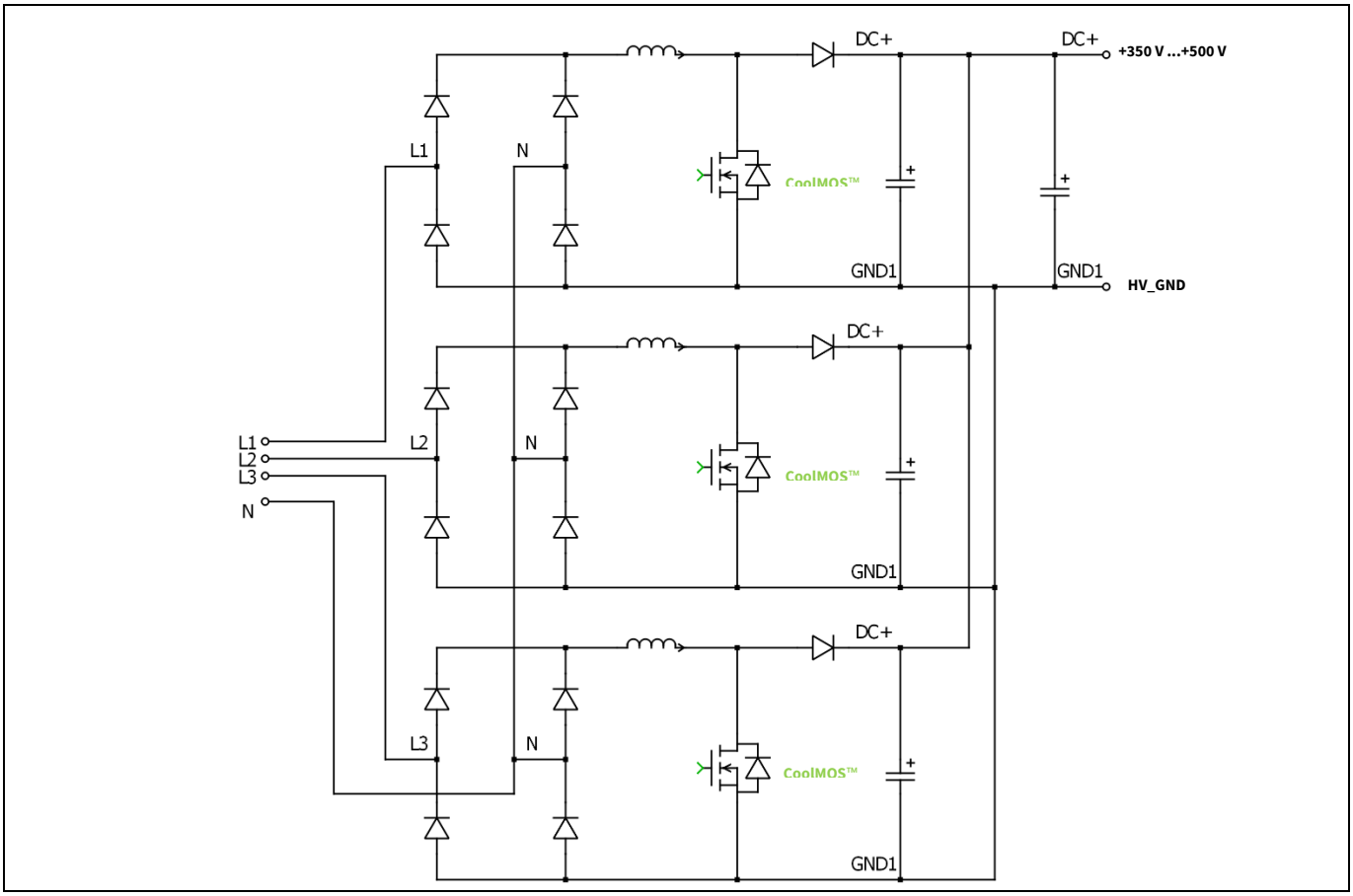


Figure 15 **3 つの単相 PFC ステージを多重化することにより実現する 3 相 PFC ステージ。各ステージは、複数の CoolMOS™ CFD7A で構成されるクラシックブースト PFC です。**

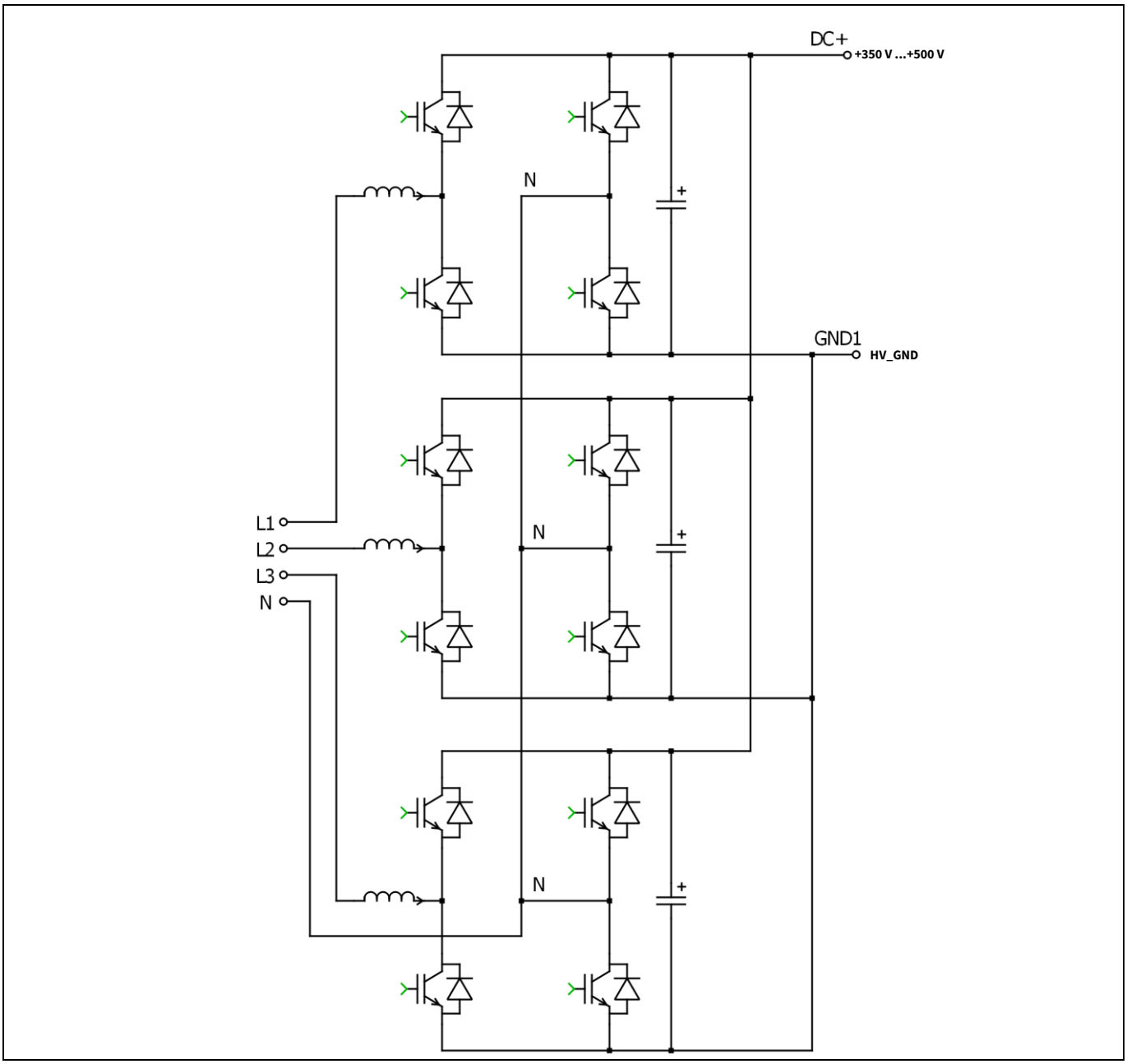


Figure 16　　3 つトーテムポールステージを多重化することにより実現する 3 相 PFC

2.3.1.2　　3 相フルブリッジ PFC

3 相 AC グリッド向けの分かりやすいトポロジーとして、3 相フルブリッジ PFC があります。このトポロジーは、B6、もしくは「3 レッグブリッジ」としても知られています。**図 17** に、3 相 AC 入力での動作のみに向けたこのトポロジーを示します。追加で単相動作も対応が必要なときは、中性線を組み込んで、トポロジーを容易に拡張することができます。**図 18** に、この拡張版を示します。

一般的に、動作モードは CCM です。このため、連続的なハードコミュテーションに耐えるために SiC MOSFET などの半導体が必要となります。

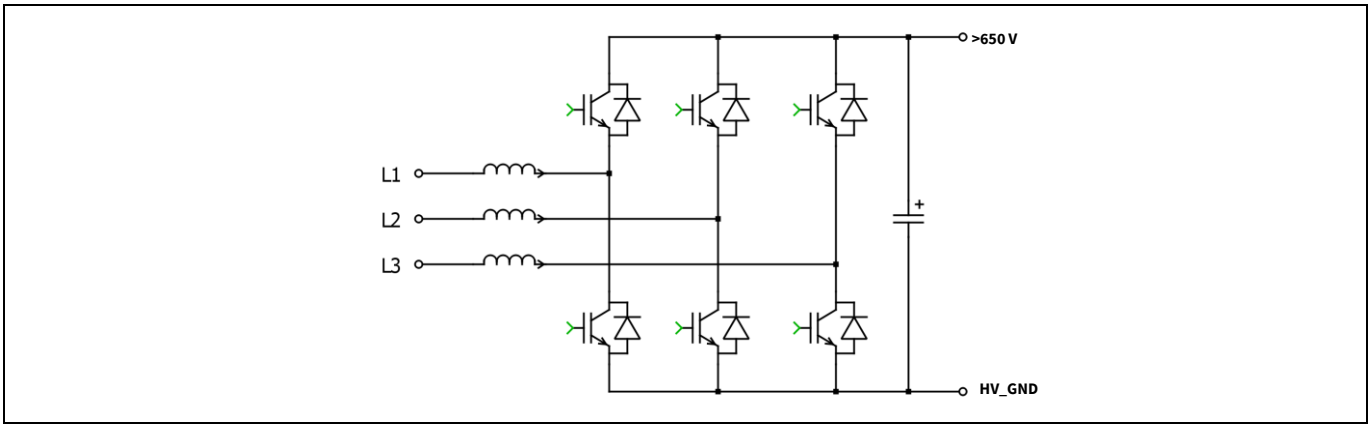


Figure 17　「真の」3 相 PFC トポロジー（中性線の使用なし）

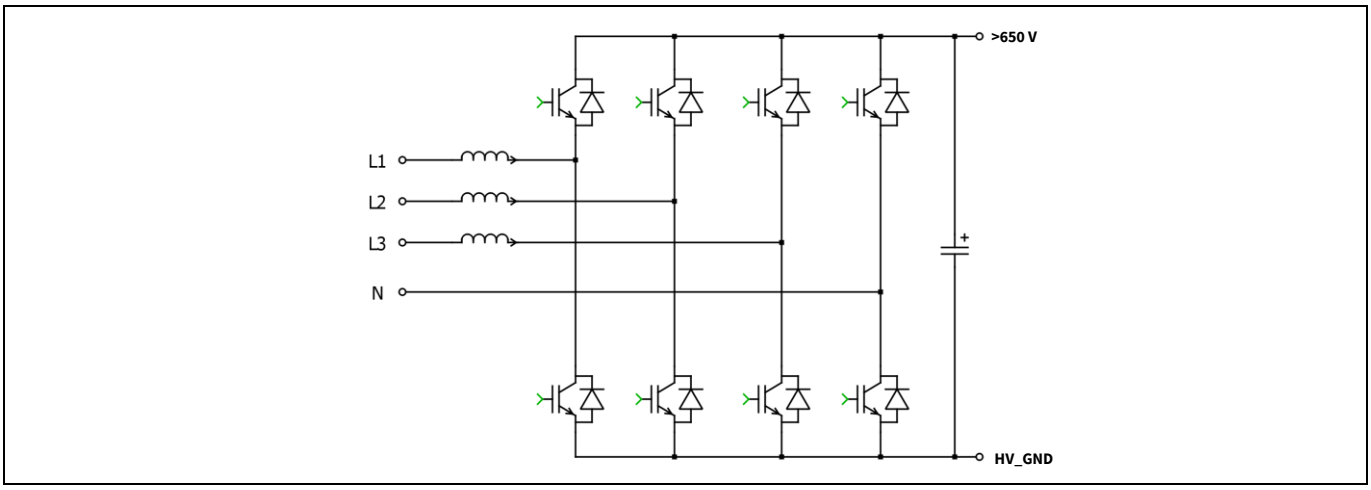


Figure 18　中性線で構成される単相動作対応 3 相 PFC トポロジー

多重トポロジーとの最も著しい違いは、これらのトポロジーの DC リンク電圧がより高くなければならないことです。これは、交流（AC）位相間の電圧がより高いことにより引き起こされます。一般的な DC リンクの電圧はおよそ 650 V で、この電圧により半導体に関する電圧要件が引き上げられます。インフィニオンは、これらの PFC ステージのために 1200 V CoolSiC™ファミリーを推奨しています。

2.3.1.3　Vienna 整流器

これらのトポロジーのほかに、3 相 AC システム専用のトポロジーを使用することもできます。Vienna 整流器トポロジーは、「真の 3 相」トポロジーのよく知られた一例です。

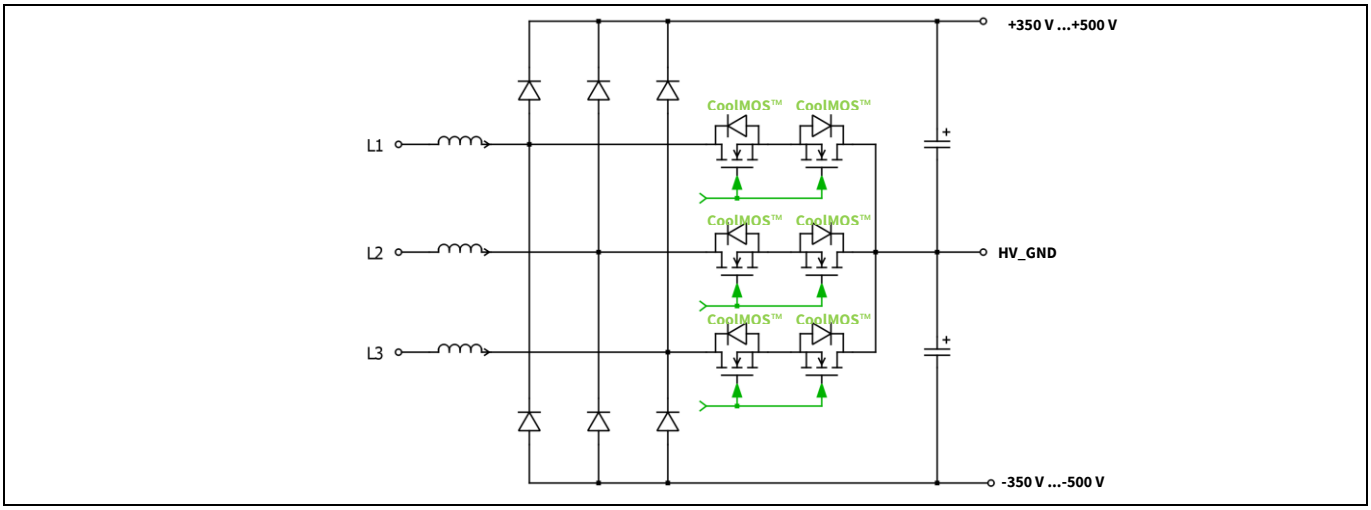


Figure 19　「真の 3 相」PFC トポロジーの代表例である Vienna 整流器トポロジー

今日、Vienna 整流器トポロジーは 3 相交流（AC）インフラが広範囲に利用可能になりつつあることから、EV 充電ステーションの PFC として使用され始めています。しかし、これは車載充電器にも使用することが可能です。

このトポロジーは、逆並列の構成の 650 V 半導体スイッチ、ならびに 650 V を超えるブロッキング電圧を伴う SiC ダイオードを使用します。インフィニオンは、自動車向け TRENCHSTOP™ 5 IGBT（F5）または自動車向け CoolMOS™ CFD7A を電源スイッチとして使用し、CoolSiC™ファミリーの 1200 V 第 5 世代 SiC ダイオードを使用して、半導体のコストを低く抑えて最良の性能を発揮させることを推奨しています。

Vienna 整流器のもう 1 つの利点は、DC リンク電圧を DC 側で半分に分割して追加の端子を設けることができます。この中心の接続により、DC-DC ステージは 650 V CoolMOS™ CFD7A デバイスを使用することもできます。**図 20** に、この構成を示します。

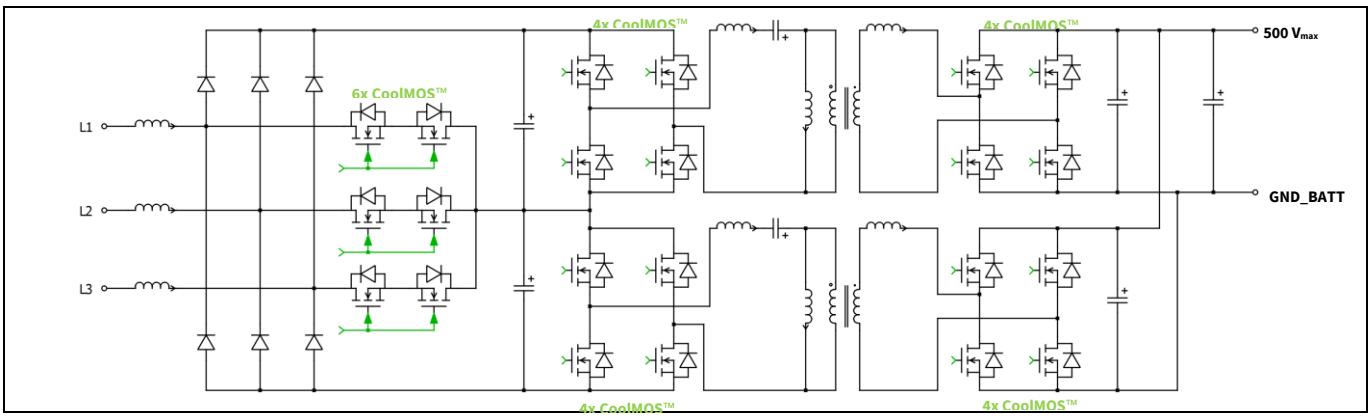


Figure 20　3 相車載充電器：後続の LLC ステージを伴う Vienna 整流器

3 HV-LV DC-DC コンバーター

高電圧バッテリーを伴う純粋なバッテリー搭載自動車（BEV）でも、従来の鉛蓄電池を使用します。この電圧クラスに向けて、自動車産業には大変に数多くのコンポーネントが存在しています。また、追加的な安全上の必要条件により、2 つ目の独立したエネルギー供給源（LV バッテリーなど）を持つことは有益です。このバッテリーの公称電圧は通常、12 V です。

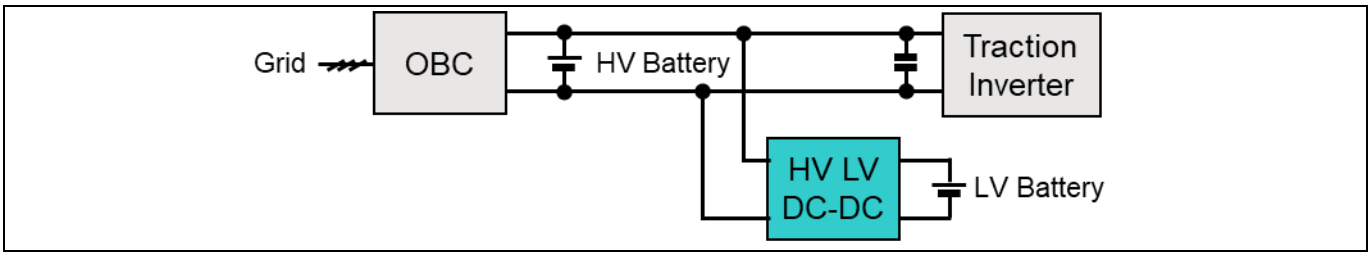


Figure 21 HV バッテリーを LV バッテリーに接続する HV-LV DC-DC コンバーター

近代的な電気自動車では、高電圧から低電圧への DC-DC コンバーターを使用して、HV を LV ドメインに接続します。その名前が示す通り、（一次側の）HV は（二次側の）LV に変換されます。このため、必要条件は、車載充電器の DC-DC ステージにかなり類似しています。この結果、業界全体にわたり類似したトポロジーが確立されています。

これにより、一次側の MOSFET の必要条件もかなり類似しています。OBC では、最先端の HV-LV DC-DC コンバーターがソフトスイッチングの技術を利用して損失を最小限に抑え、性能を高めます。CoolMOS™ CFD7A は、バッテリー電圧が最大 500 V の一次側に向けた最良の選択肢です。さらに高いバッテリ電圧が必要とされる場合、CoolSiC™シリーズを使用することができます。

二次側では、同期整流を行うために LV MOSFET が必要となります。出力電流が高いため、整流にダイオードを使用することは推奨できません。推奨できるのは、インフィニオンの OptiMOS™ 5 自動車向けシリーズをアクティブな整流器として使用することです。

近代的な HV-LV DC-DC コンバーターは、単一方向、または双方向のコンバーターとして実現されています。

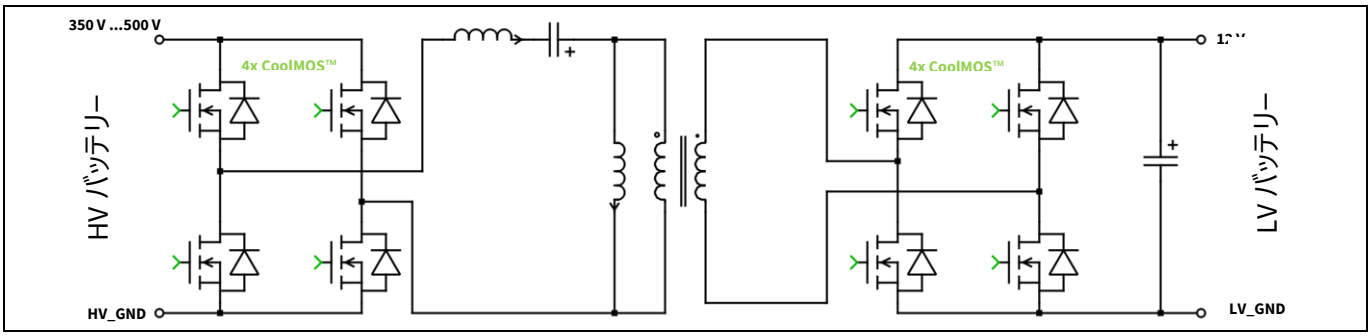


Figure 22 LLC トポロジーにおける CoolMOS™ CFD7A を伴う車載 HV-LV DC-DC コンバーターの一例

Note: 異なる回路構成（二次側）で実現することも可能です（たとえば、センタータップ方式や、単一方向であればダイオードを使用など）。

HV-LV DC-DC コンバーター

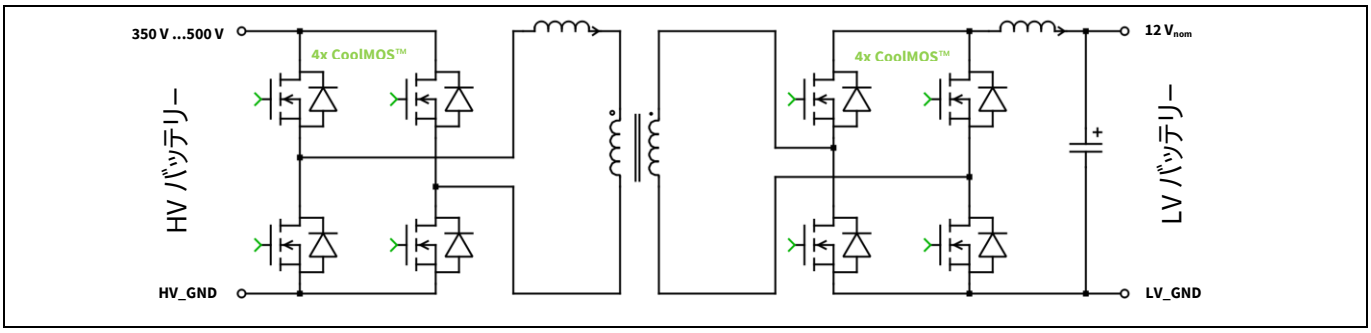


Figure 23 単一方向、または双方向の HV-LV DC-DC コンバーターに向けた PSFB トポロジー

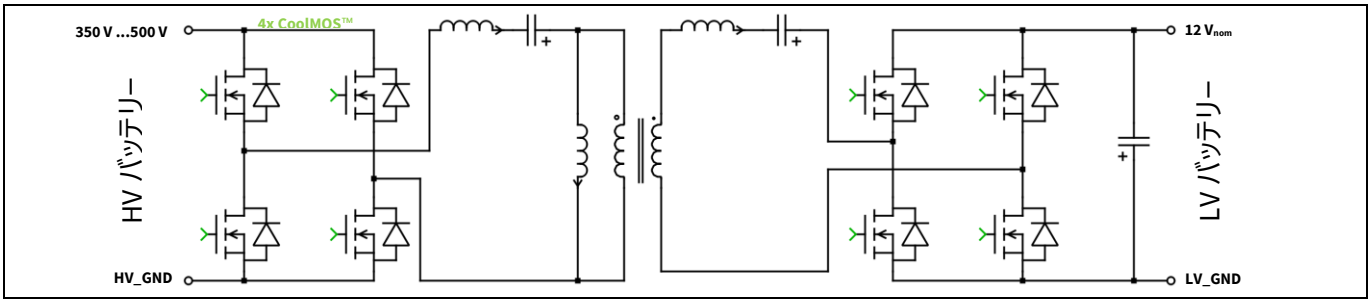


Figure 24 双方向の HV-LV DC-DC コンバーターに向けたフルブリッジ CLLC コンバーター

4 CoolMOS™ CFD7A の製品性能

CoolMOS™ CFD7A 技術は、高い効率の HV 自動車向け車載電子動力システムのニーズを満たすように設計されたシリコンベースの SJ MOSFET 技術です。

CoolMOS™ CFD7A が利用する主な取り組みが 2 つ存在します。1 つ目は、SJ トランジスタで、主要な電流路が従来の MOSFET のそれよりも多く不純物が添加されています。これにより、チャネル内の伝導性がより良好になり、オン状態の抵抗が低く抑えられます。

しかし、この改変だけでは、高電界に対する阻止能力は発揮されません。このため、2 つ目の取り組みとして、「p カラム」を用いて電界に対して垂直の補償構造を作り出します。この結果、CoolMOS™ CFD7A シリーズが誇る卓越した相互コンダクタンスと HV 阻止能力を伴う、多くの不純物が添加された電流路が誕生しました。SJ MOSFET の原理に関する詳細は、[9] を参照してください。

自動車向け CoolMOS™ CFD7A シリーズはこの卓越した性能に加え、シリコン半導体技術のコスト面の利点と共に、高水準の堅牢性をもたらします。

製品パラメータの比較は、以下の AECQ101 デバイスの最新のデータシートに基づいています。それらのデータシートに示されていないパラメータは、インフィニオンの標準的な特性測定法を通して得られています。

1. *IPB65R115CFD7A：高速ボディダイオードが組み込まれたインフィニオンの最新の 650 V SJ MOSFET 技術 [10]*
2. *IPB65R110CFDA：インフィニオンの以前の SJ MOSFET の技術からの 650 V MOSFET [11]*
3. *STB37N60DM2AG：STMicroelectronics の 600 V MOSFET [12]*
4. *NVHL110N65S3F：ON Semiconductor の 650 V MOSFET [13]*
5. *FCH104N60F_F085：ON Semiconductor の 600 V MOSFET [14]*

図 25 に、AEC Q101 の条件を満たす比較可能な HV SJ MOSFET の最も重要なフィギュア・オブ・メリット（FoM）パラメータを示します。一般的に、値が小さければ小さいほど、デバイスの性能は良好となります。これらの比較の基盤は、個々のデータシートにおいて指定されるパラメータです。

「ゲート電荷のフィギュア・オブ・メリット（FoM）」は**図 25a** に示す通りで、以下のように定義されます。

$$FoM_{Qg} = Q_{g,typ} \frac{R_{dson,max}}{V_{(BR)dss}}$$

このとき、$Q_{g,typ}$ はパラメータのゲート電荷全体の標準値で、$R_{dson(max)}$は 25°C における最大のチャネル上の抵抗で、$V_{(BR)dss}$ は個々のデータシートにおいて定義される絶縁破壊電圧です。FoM_{Qg}の単位は、nC*mΩ/V です。

図 25b に、「出力エネルギーのフィギュア・オブ・メリット（FoM）」を示します。これは、以下のように定義されます。

$$FoM_{Eoss} = E_{oss@400V} \frac{R_{dson,max}}{V_{(BR)dss}}$$

CoolMOS™ CFD7A の製品性能

E_{oss} は、ドレインソース電圧 400 V で寄生出力容量に保存される単位マイクロジュールのエネルギーです。この E_{oss} の値は、それぞれのデータシートにおいて指定される標準値です。これは、個々の MOSFET の C_{oss} 曲線に基づいて計算されます。

FoM_{Eoss} の単位は、uJ*mΩ/V です。

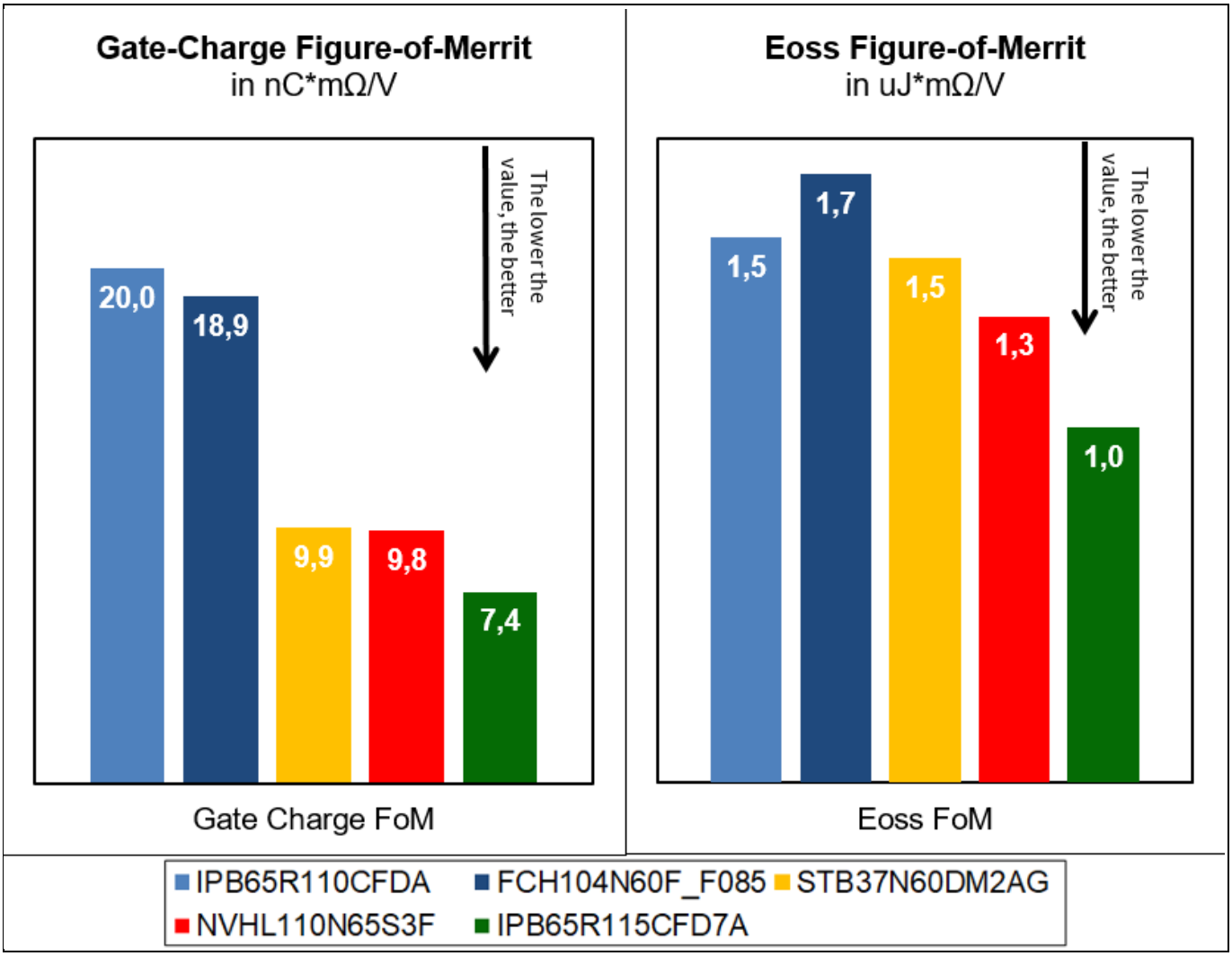


Figure 25 **自動車向けとしての条件を満たし、高速ボディダイオードを伴う弊社に追随する二番手の競合他社の製品と比較した、CoolMOS™ CFD7A 115 mΩの最も重要な電気的パラメータの概要**

4.1 C_{oss} および E_{oss} の低減

HV MOSFET における支配的な寄生容量は、出力容量（C_{oss}）です。C_{oss} は、非線形容量です。C_{oss} の値は、CCM PFC トポロジーなどのハードスイッチングの用途における損失に大きく貢献します（図 6 に示す）。

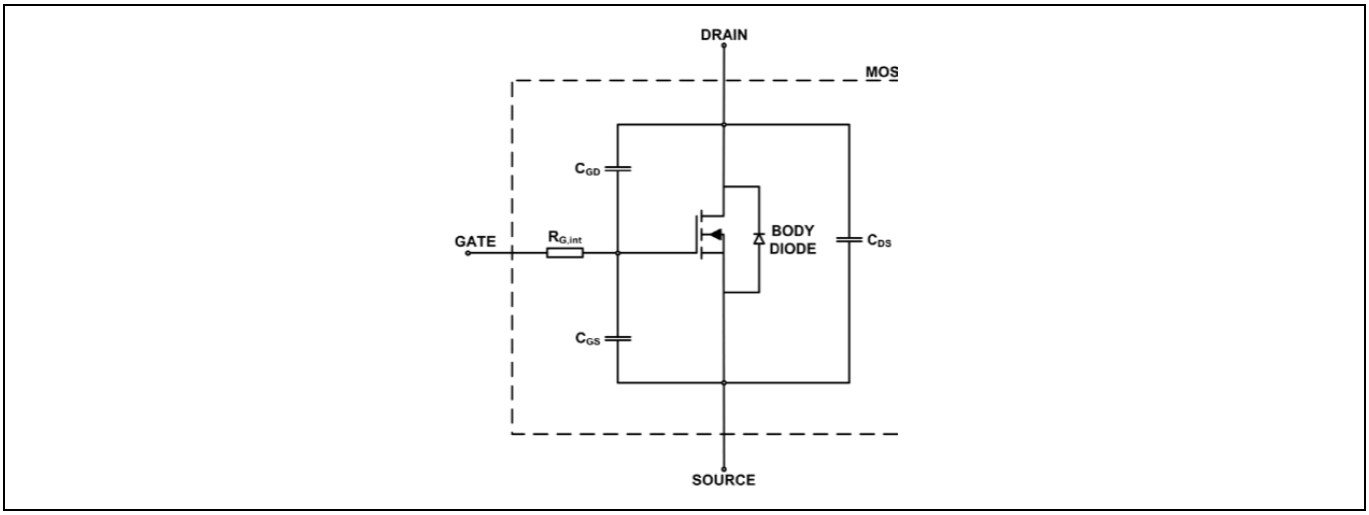


Figure 26　　最も重要な寄生要素を示すパワーMOSFET の等価回路

V_{ds} 電圧の 2 乗における MOSFET の C_{oss} の積分の半分が、オフステージの間に MOSFET に保存されるエネルギー（E_{oss}）を定義します。

$$E_{oss}(V_{ds}) = \int_0^{V_{ds}} C_{oss}(v) \times v \times dV$$

E_{oss} の値が低ければ低いほど、より小さいエネルギーが MOSFET のハードターンオンの間にチャネルの中で熱に分散します。

図 27 と**図 28** に示されるように、CoolMOS™ CFD7A の技術は自動車産業においてクラス最高の E_{oss} パラメータを提供します。この結果、車載充電器におけるハードスイッチングの PFC ステージの効率性を高めることができます。**図 33** に、ハードスイッチングの PFC ステージにおいて CoolMOS™ CFD7A がもたらすこの利点について示しています。

CoolMOS™ CFD7A のこの利点は、スイッチング周波数が高ければ高いほど特に重要となります。なぜなら、AC-DC コンバーターにおけるスイッチング損失が周波数と共に上昇するからです。

CoolMOS™ CFD7A の製品性能

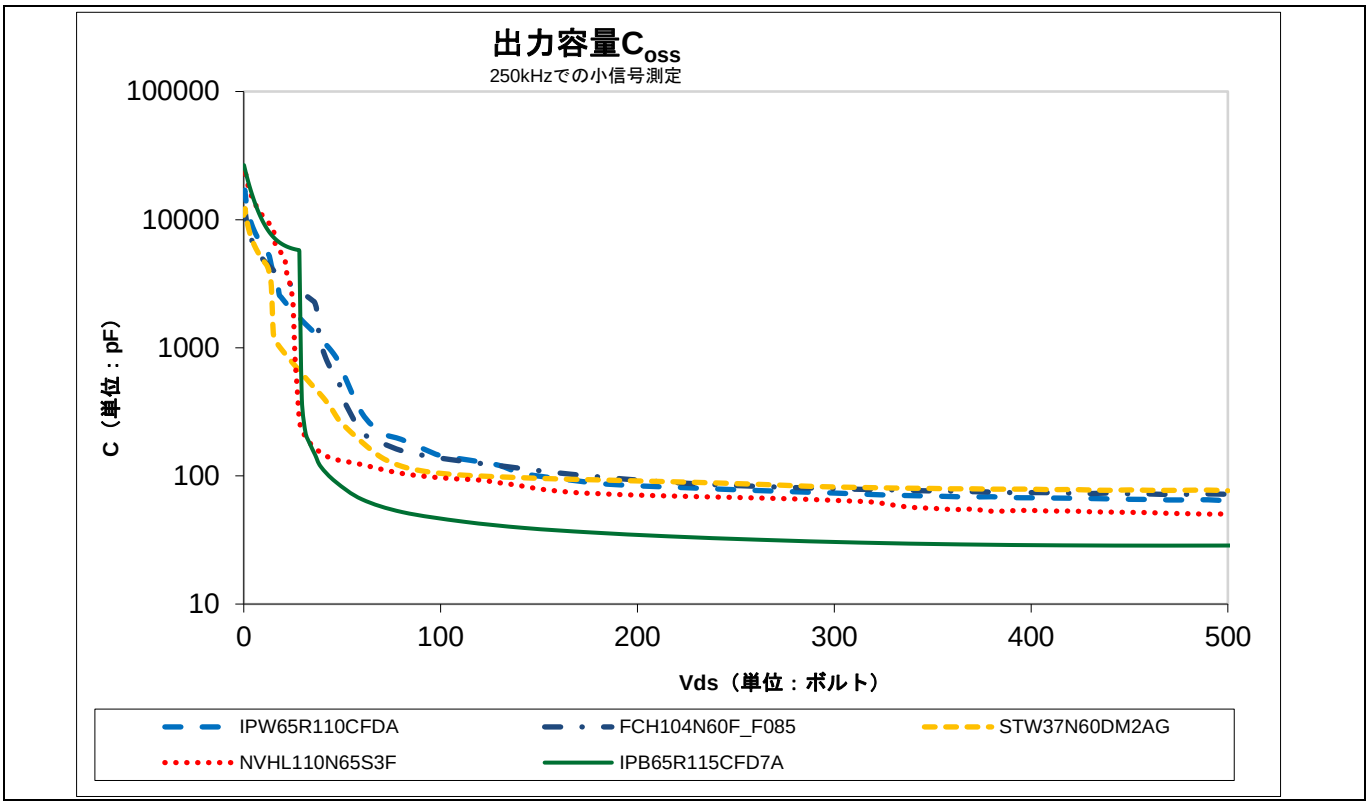


Figure 27　競合他社の MOSFET と比較した CoolMOS™ CFD7A（緑色の曲線）の C_{oss} 特性

CoolMOS™ CFD7A の製品性能

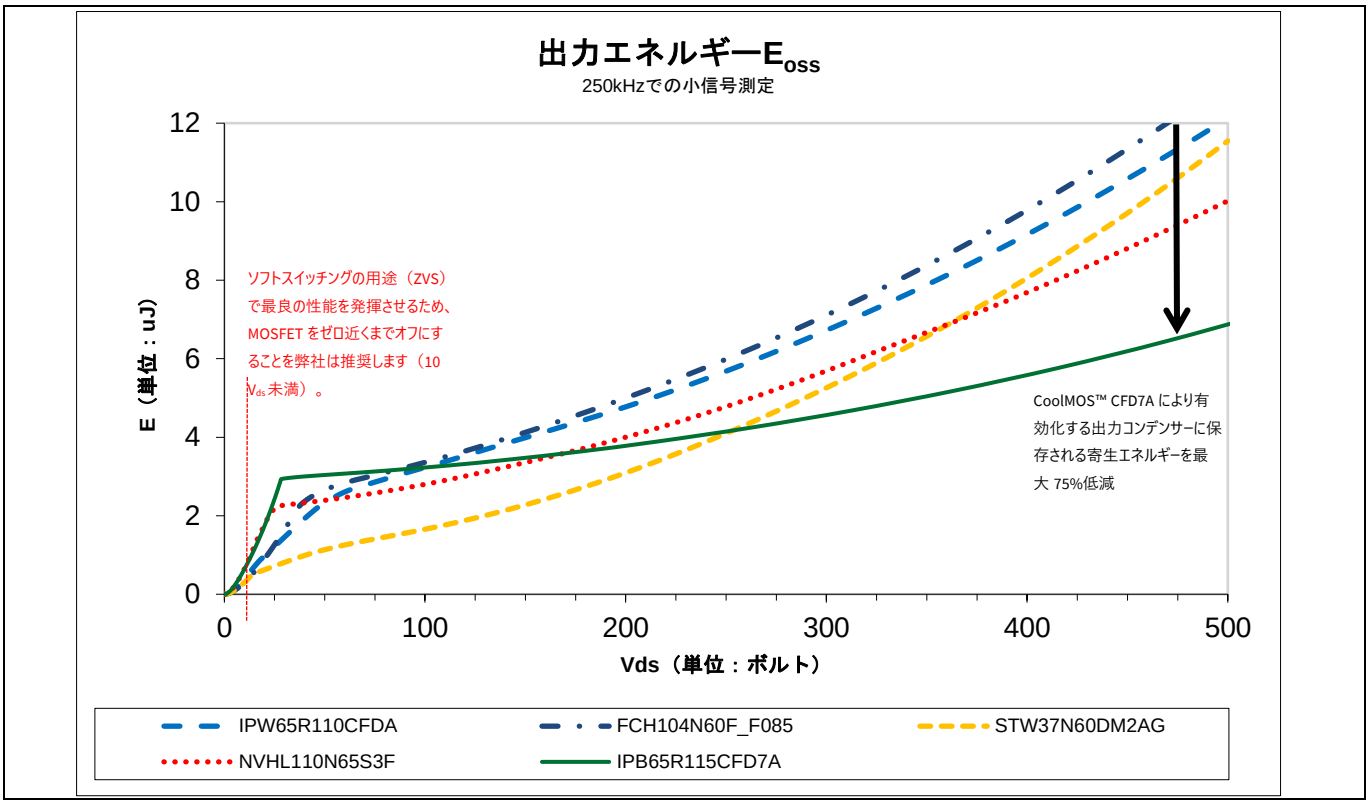


Figure 28　CoolMOS™ CFD7A（緑色の曲線）に保存される寄生エネルギーは、他のデバイスと比較して、高い DC リンク電圧において著しく低くなる

4.2　ゲート電荷の低減

新しい CoolMOS™ CFD7A 技術のもう 1 つの卓越した特性は、CoolMOS™ CFDA と比較して全ゲート電荷（Q_g）が大きく低減されることです。

CoolMOS™ CFD7A の製品性能

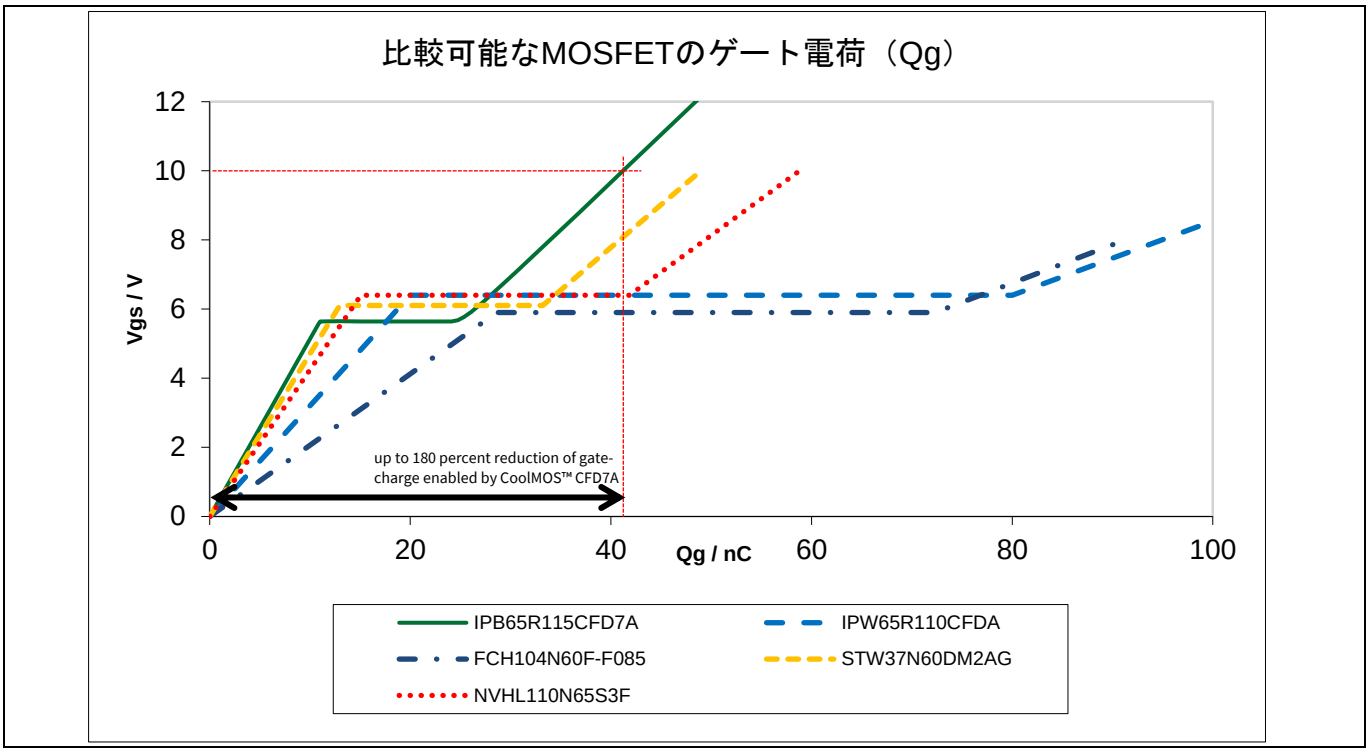


Figure 29　CoolMOS™ CFD7A は、比較可能なすべてのデバイスの間で最も低いゲート電荷を実現

このゲート電荷の低減により、複数の利点を手にすることができます。

第一に、デバイスのより高速なスイッチングが可能になります。これは、同じ駆動能力のゲートゲートドライバにおいても、ゲートへの充放電が迅速に行われるため、ターンオン、ターンオフが速くなります。言い換えれば、スイッチング特性を維持しながら、電流容量がより低いゲートドライバを使用することが可能となります。この依存性は、次の公式で表されます。

$$I_{GDRV} = \frac{Q_G}{t_{g,sw}}$$

第二に、ゲートを稼働させるために必要な全消費電力も、Q_gの低下で低減されます。

$$P_{GDRV} = Q_G \times V_G \times f_{sw}$$

Q_gが低いため、CoolMOS™ CFD7A は高速スイッチングの車載充電器システムにおいてより高い効率性を実現するための第一の選択肢となります。

4.3 CoolMOS™ CFD7A の高速ボディダイオードの特性

SJ パワーMOSFET は標準的な MOSFET と比較して卓越した特性をもたらしますが、SJ の原理には欠点が 1 つあります。これは、順方向バイアスを伴うボディダイオード（Q_{rr}）を阻止するために必要な電荷が比較的高いという点です。このような事実があるため、大電流で高速動作時に SJ MOSFET のボディダイオード上で連続的なコミュテーションを生じさせることは推奨されません。これは、パワーMOSFET における応力条件を著しく高めてしまうためです。これについて説明するパラメータは、逆回復電荷充電、Q_{rr} と呼ばれます。

新しい自動車向け CoolMOS™ CFD7A 技術は、高速ボディダイオードを提供します。これは、Q_{rr} が従来的な SJ MOSFET と比較して相当に小さく、MOSFET がボディダイオード上のスプリアス（疑似）ハードコミュテーションに対して堅牢性を有していることを意味します。

しかしながら、連続的なハードコミュテーション、および大電流がそれぞれのスイッチングサイクルで生じる用途（CCM PFC など）で、CoolMOS™ CFD7A を使用される場合は、自動車向け第 5 世代 SiC ダイオードをコミュテーションパートナーとして使用することを弊社は推奨します。

あるいは、トーテムポール PFC やインバーターの用途など、ハードコミュテーションの用途では、自動車向け高速 TRENCHSTOP™ 5 IGBT または CoolSiC™ MOSFET を使用することを弊社は推奨します。

ソフトスイッチングが適用される場合、ボディダイオードの Q_{rr} を無視することができます。これは、MOSFET がゼロ電圧の条件でオンに切り替えられるためです。 このため、SJ MOSFET はソフトスイッチングでハーフおよびフルブリッジの構成で完璧に利用することができます。ソフトスイッチングは、同時に損失を低減することでスイッチング周波数を高めることを可能にすることから、近代的な DC-DC コンバータの標準的な方法となっています。

しかし、弊社は、DC-DC コンバータにおけるスプリアス（疑似）ハードコミュテーションの場合により高い堅牢性を発揮できるように、高速ダイオードの特性を伴う CoolMOS™（CoolMOS™ CFD7A）を使用することを推奨します。CoolMOS™ CFD7A は、以前の世代と比較してかなり低い Q_{rr} の値をもたらします。結果的に逆回復時間（t_{rr}）が短縮され、逆回復電流（I_{rrm}）も低くなり、ボディダイオードのハードコミュテーションにより高いマージンがもたらされることになります。これにより、システムの信頼性も高まる可能性があります。高速ボディダイオードの利点の原理を、**図 30** に示します。高速ボディダイオードを伴う CoolMOS™ファミリーの挙動は、赤色の曲線で表されます。Q_{rr}、t_{rr}、および I_{rrm} は、従来的な SJ MOSFET（青色の曲線）の場合と比較して著しく低くなっています。

CoolMOS™ SJ MOSFET の高速ボディダイオードがもたらす利点に関する詳細については、[15] を参照してください。

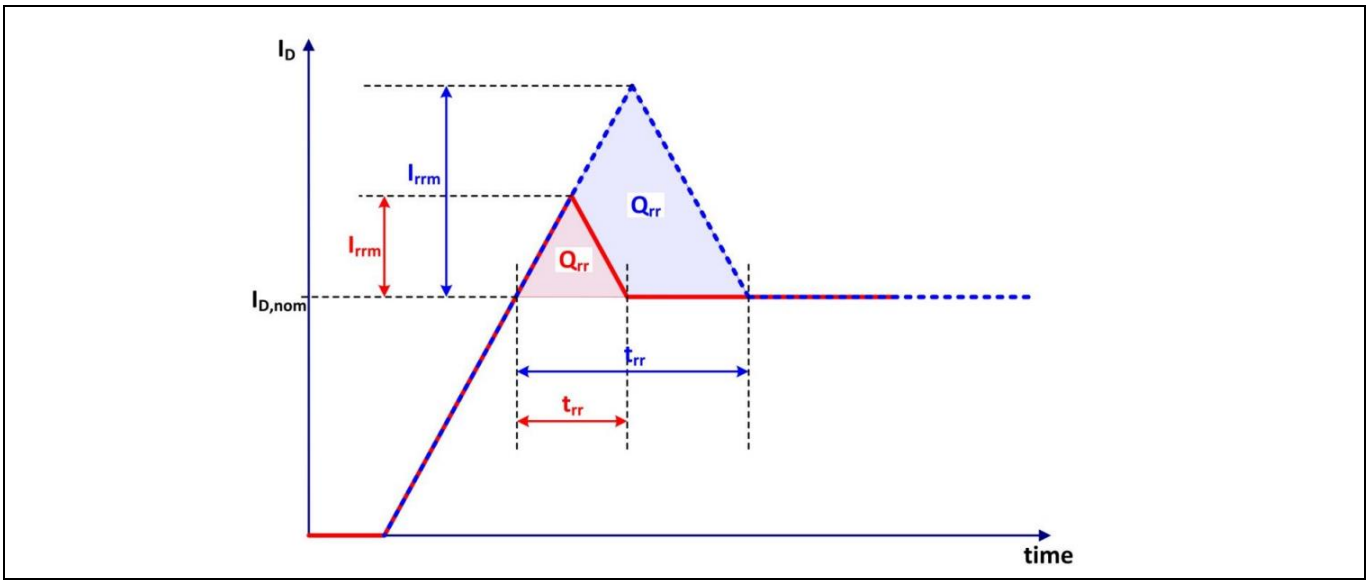


Figure 30　高速ボディダイオードを伴う CoolMOS™の利点（CFD7A、赤色曲線）と従来型 SJMOSFET（青色曲線）の Qrr 比較

4.4　広い沿面距離の SMD パッケージ

CoolMOS™ CFD7A は、さまざまな標準パッケージ、および $R_{ds(on)}$クラスを提供します。さらに、インフィニオンは、より高いシステム電圧でも高度な信頼性を約束する D2PAK 7 ピン（TO263-7-11）という新しい沿面距離が広い SMT パッケージを提供します。これは、自動車産業において新規性のある製品です。

図 31 に、この D2PAK 7 ピンパッケージを示します。4.3 mm の沿面距離のほかに、このパッケージはパワーMOSFET の高度な駆動を可能にする、「センスソース」接続と呼ばれるドライバリファレンス端子を設けています。このセンスソースピンが MOSFET ドライバリファレンスとして使用される場合、リンギングを軽減することができます。インフィニオンは、可能なときはいつでもセンスソース設定を使用することを推奨しています。

この原理を、図 32 に示します。詳細は、[16] を参照してください。

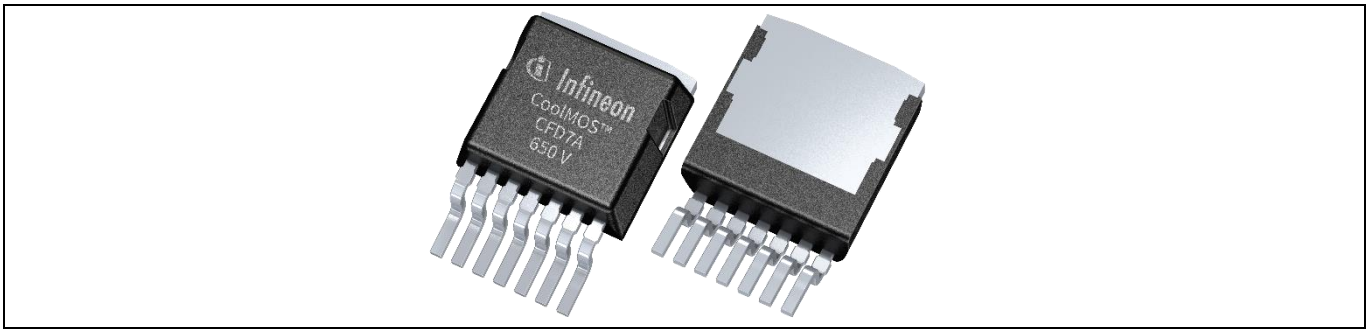


Figure 31　より高いシステム電圧と高度なゲート稼働のための TO263-7-11 パッケージの CoolMOS™ CFD7A

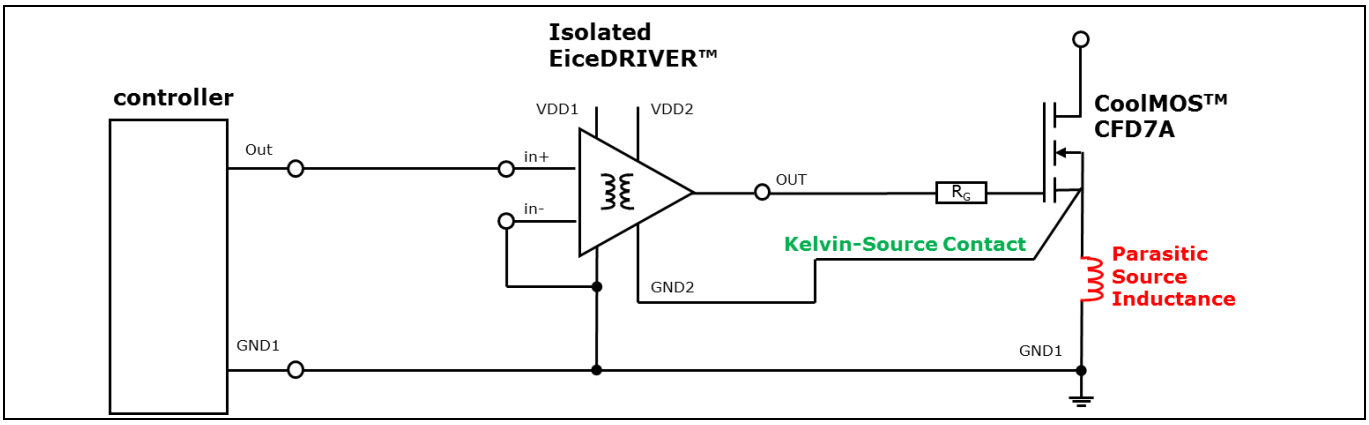


Figure 32　TO263-7-11 がもたらす CoolMOS™ CFD7A およびケルビンソース接点を伴う高度なゲート稼働

4.5　静電放電（ESD）に対する堅牢性

すべての CFD7A デバイスは、ゲート上で±2000 V ESD のパルスに耐えることができます（IEC 61000-4-2 の基準のクラス 2 HBM に準拠）。これは、チップの設計により統合化された ESD 保護および本来の耐性によって達成されます。

これには、製造工程の間に CoolMOS™ CFD7A の堅牢性を高めるという利点があります。

4.6　PFC および DC-DC ステージにおける効率特性

上に示すように、CoolMOS™ CFD7A のデバイスを PFC および DC-DC のステージで使用することができます。本章に、ラボ測定を通して得られた実験結果をいくつか示します。

4.6.1　CCM PFC における効率特性

図 33 は、ハードスイッチングの PFC ステージにおける CoolMOS™ CFD7A の性能を示しています。変換効率の結果は、インフィニオンのデモボート上で行ったラボ測定を通して得られました。デモボードを、**図 33** に示します。SJ MOSFET を、CCM で運用されるクラシックブースト PFC トポロジーを形成する第 5 世代の SiC ダイオードを組み合わせて使用しました。このトポロジーを、**図 6c** に示します。PFC デモボードの詳細は、[17] を参照してください。デモボードは、ウェブサイト（www.infineon.com）[18] で発注することができます。

このボードは、入力電圧 230 V_{rms} で動作します。スイッチング周波数は、100 kHz に設定されています。変換効率とは、高精度のパワーアナライザにより得られた AC-DC 効率の全体をいいます。ゲート抵抗器（デバイスのスイッチング速度を決める）は、用途のレベルで公正な比較を得るために、個々のデバイスのデータシートに完全に準じて選定されます。さらに、さまざまなパッケージからの属性からの影響を除去するために、TO263（D2PAK）内のデバイスのみが選定されています。これらのデバイスは、TO247 のプリント基板（PCB）の実装面積に合わせて小型の PCB にはんだ付けされています。

CoolMOS™ CFD7A の製品性能

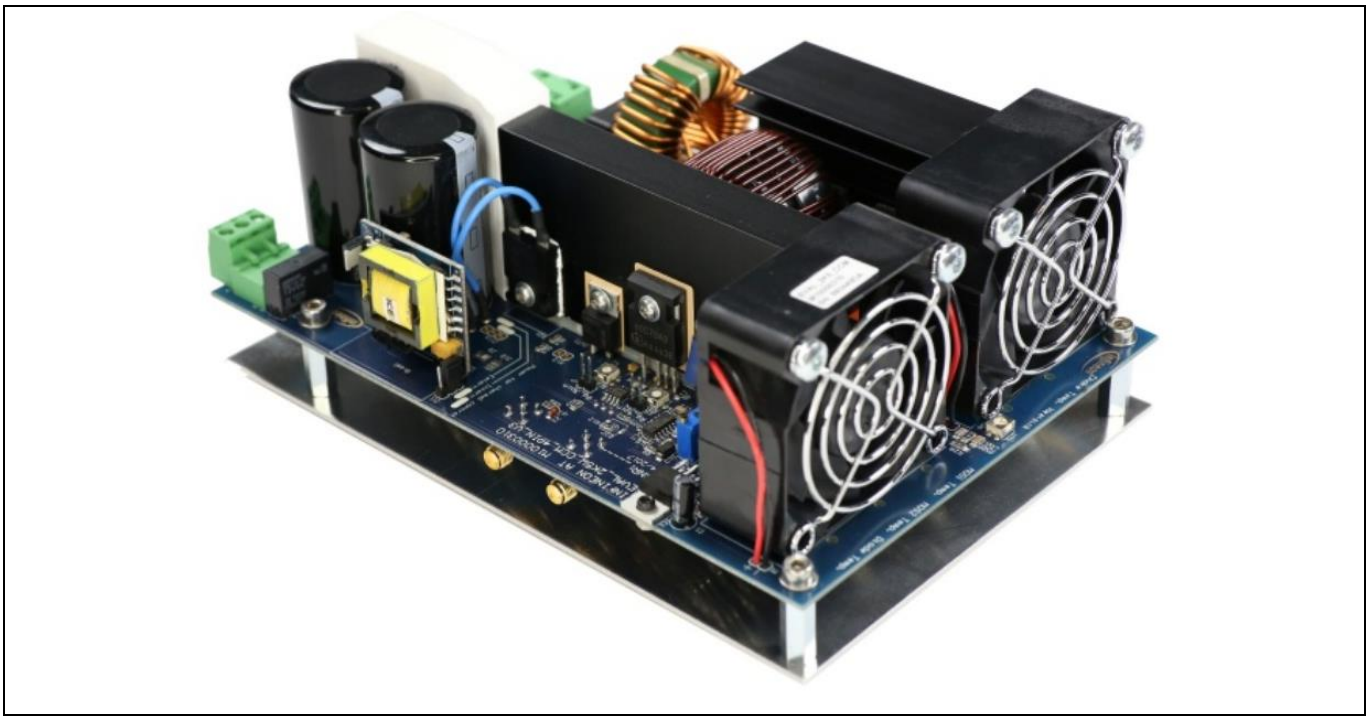


Figure 33　示された効率性の測定値を判断するために使用された PFC の評価基板の写真このデモボードは、ウェブサイト（www.infineon.com）[18] で「EVAL_2k5W_CCM_4P_V3」として発注することができます。

図 34 に、変換効率の測定結果を示します。CoolMOS™ CFD7A デバイスは、負荷範囲全体にわたり最良の性能をもたらします。効率性は、再現性を実現するため、標準化されたセットアップにおいて高精度のパワーアナライザを通して得られています。効率性の結果について見積られる測定値の誤差は、0.1%未満（ワーストケース）です。

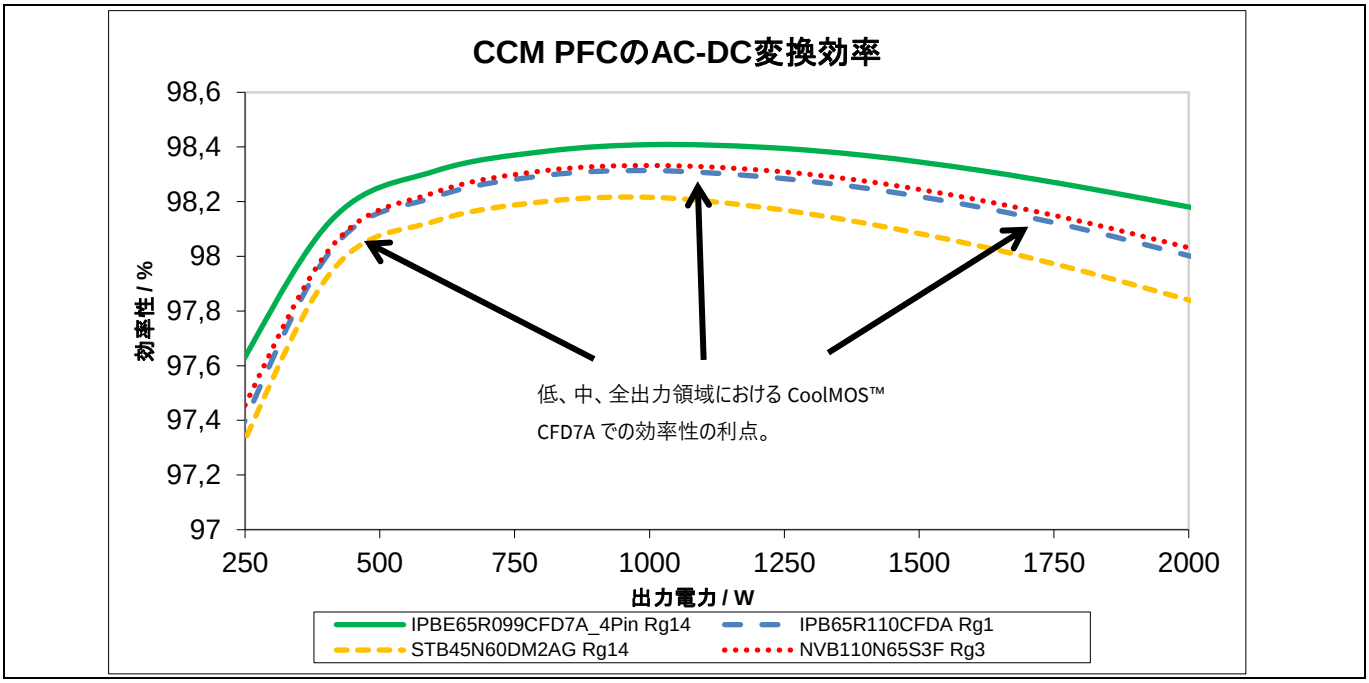


Figure 34　230 V AC、f_{pwm} = 100 kHz でのクラシック PFC ステージの全効率性：CoolMOS™ CFD7A は、負荷範囲全体にわたり最も高い変換効率に到達します。

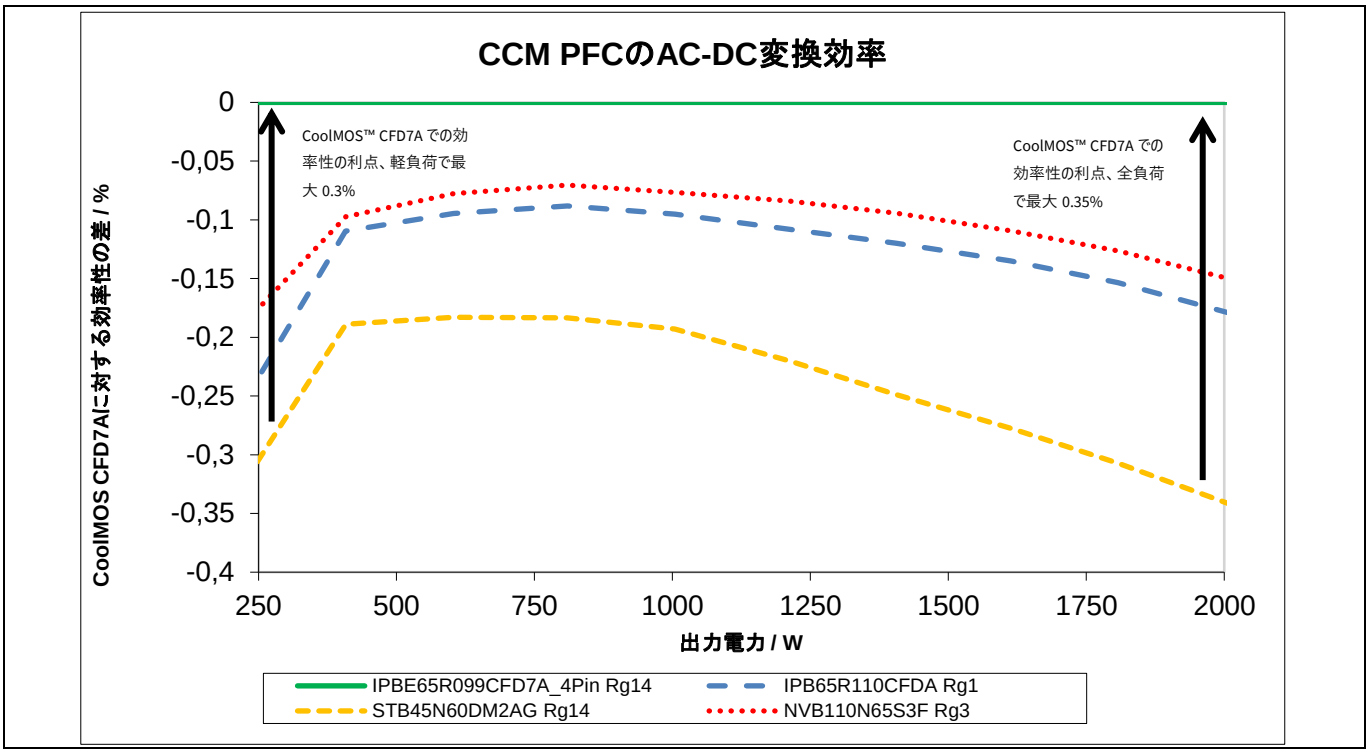


Figure 35　PFC の相対的な効率性（図 34 に示すものと同じ試験条件における CoolMOS™ CFD7A と比較）

図 36 に、PFC ステージで発生する電力損失を示します。電力損失は、コンポーネントの寄生要素によって引き起こされます。電力損失が低ければ低いほど、電子動力システムを容易に冷却することができます。CoolMOS™ CFD7A デバイスは、負荷範囲全体にわたり最も低い電力損失を呈します。

CoolMOS™ CFD7A の製品性能

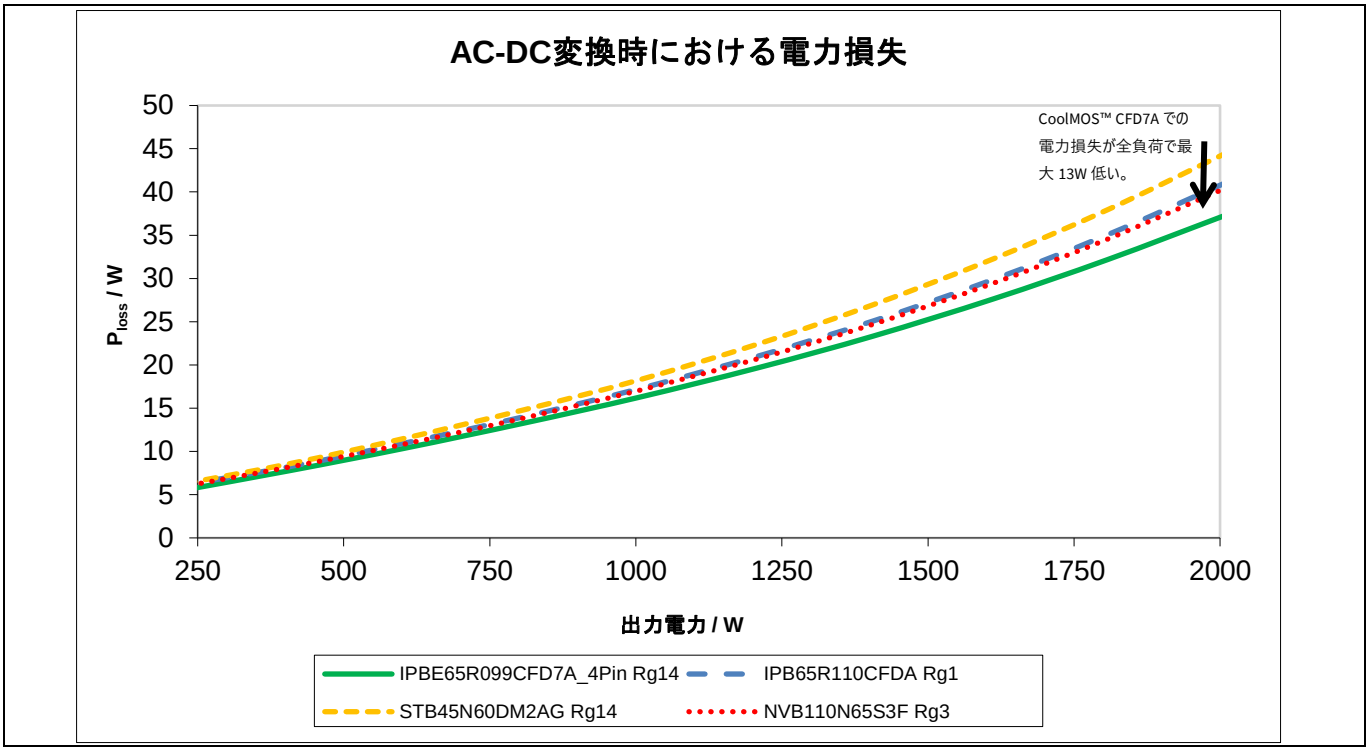


Figure 36　変換時における電力損失（CoolMOS™ CFD7A の損失は、負荷範囲全体にわたり最も低い）

図 37 に、PFC ステージにおける MOSFET の温度を示します。CoolMOS™ CFD7A デバイスは、全負荷で最高およそ 71°C に達します。この温度は、選定されたすべてのパワーMOSFET の中で最も低いデバイス温度です。最も高温のデバイスは STB45N60DM2AG で、最高およそ 79°Cにまで達します。これは、CoolMOS™ CFD7A のデバイスよりもおよそ 10%高い温度です。

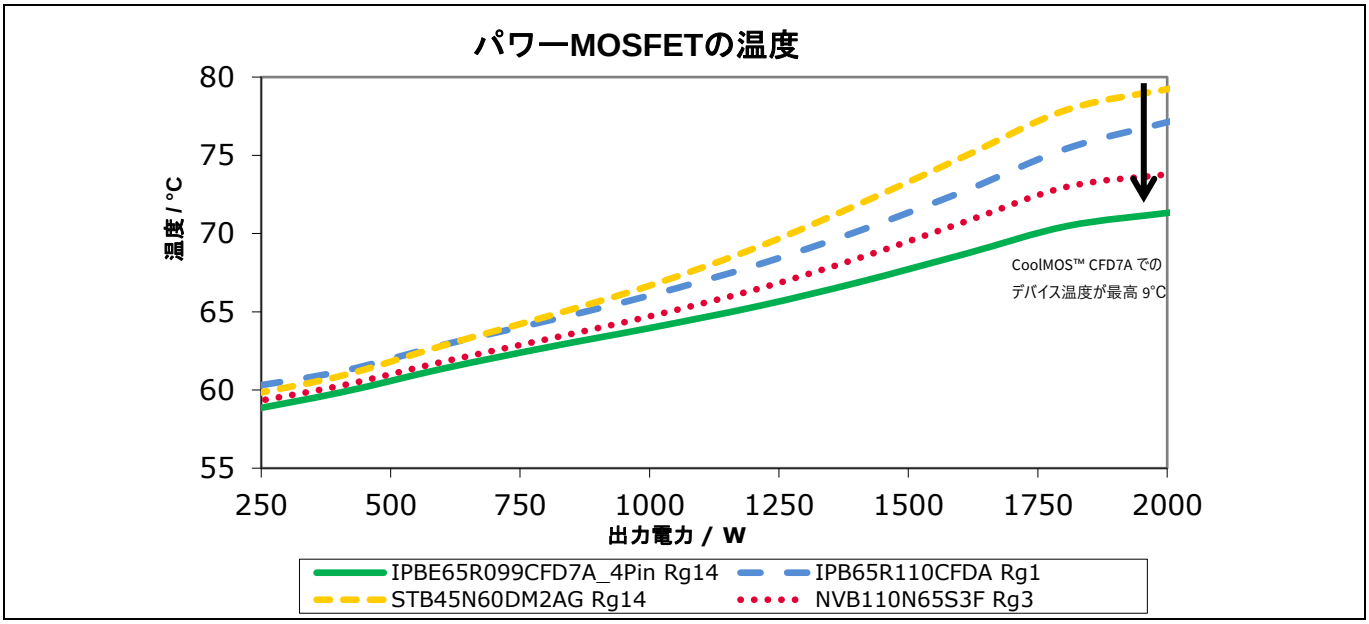


Figure 37　力率改善（PFC）時におけるパワーデバイス温度：CoolMOS™ CFD7A は、最も温度が低いデバイスです。

4.6.2 ソフトスイッチング LLC における効率特性

4.6.1 に示す測定値のように、LLC における性能はソフトスイッチング DC-DC コンバータートポロジーの代表値として採用されています。

図 37 に、この測定の結果を示します。比較のための基準値は、ON Semiconductor の NVHK110N65S3F デバイスでの効率です。他のすべての比較デバイスはより良い効率を得られているため、これらの効率曲線は、基準線よりも上に位置しています。CoolMOS™ CFD7A は負荷範囲全体にわたり他のすべてのデバイスよりも優れた性能を発揮し、軽負荷と全負荷での利点を伴います。デッドタイムの設定値は、個々のデバイスが ZVS を達成できるよう適応されています（Miller プラトーは見えません）。ゲート抵抗は、始動時のピーク電圧が個々のデバイスのデータシートを超えることがないようにセットアップされています。残りのハードウェア（共振タンク、磁石など）は、すべて同じ条件です。

このデモボードは、共振周波数が 130 kHz のデュアルフェーズ LLC コンバーターです。これは、図 38 に示されています。このボードは、ウェブサイト（www.infineon.com）[19] で「EVAL_3KW_2LLC_CFD7」として発注することができます。

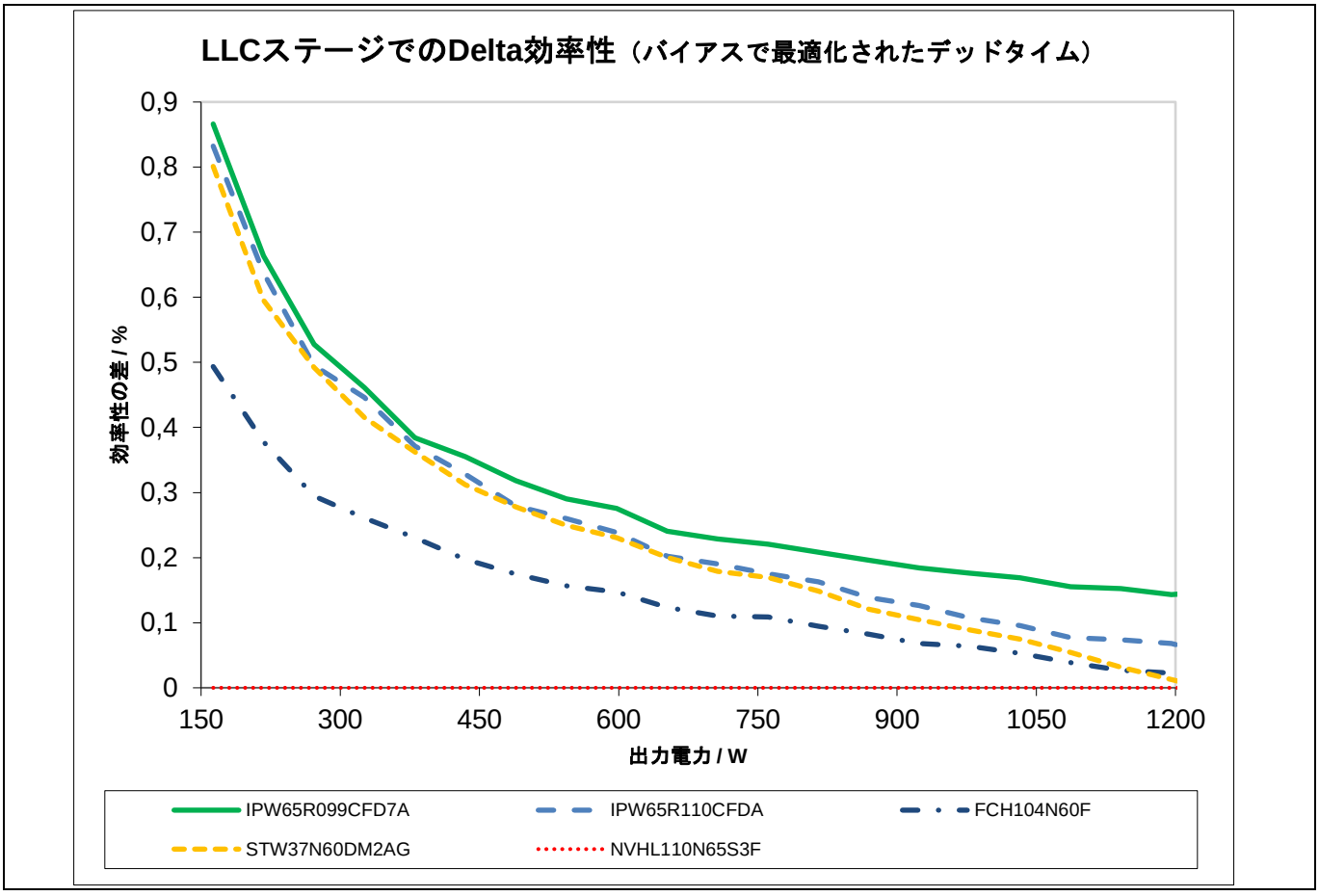


Figure 38　ソフトスイッチング LLC コンバーターでの比較可能なパワーMOSFET デバイスの効率性

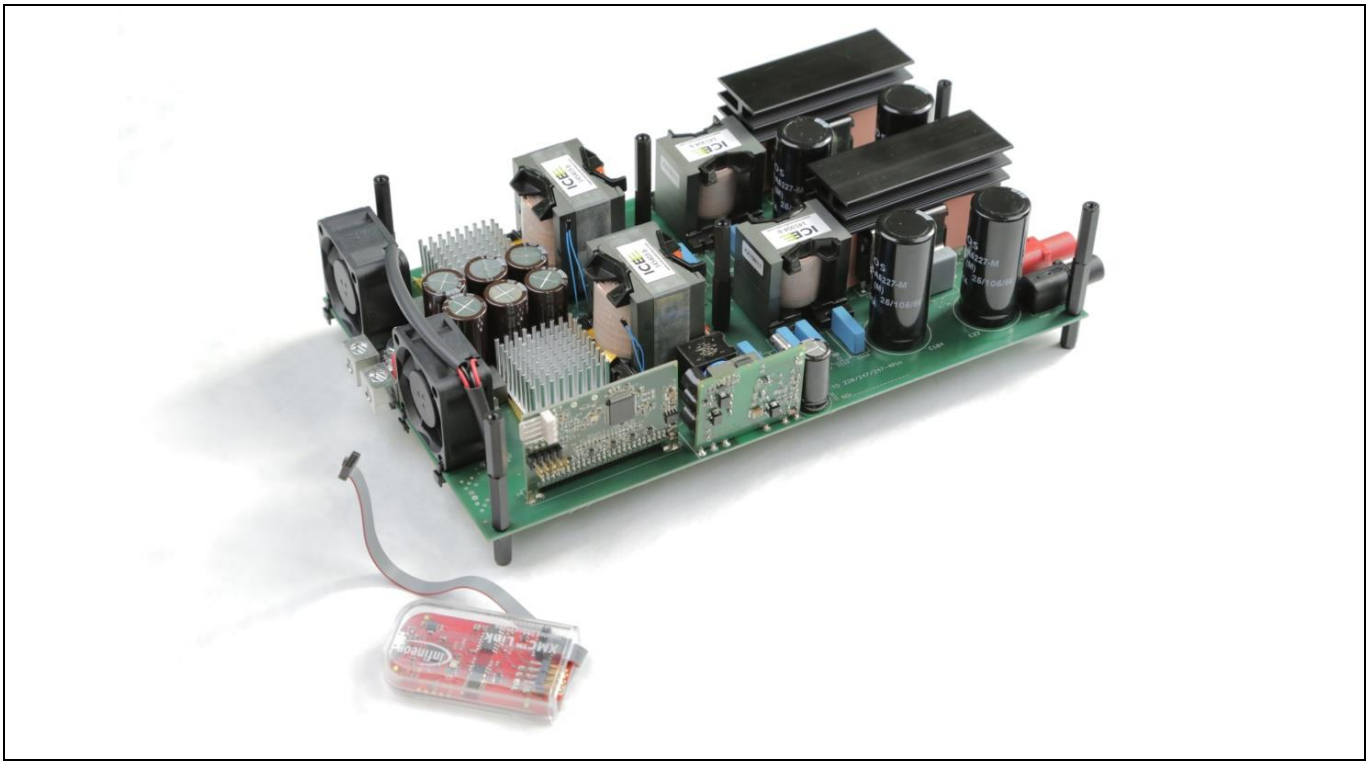


Figure 39　図 38 に示す効率性グラフを集めるために用いられた 3 kW 二重相 LLC コンバーターのデモボード

4.7　一般的な設計とレイアウトに関する推奨事項

CoolMOS™ CFD7A は、車載充電器で最高度の性能を発揮させる極めて超高速スイッチングデバイスです。インフィニオンとしては、特に CoolMOS™ CFD7A について一般的な設計とレイアウトに関する推奨事項を考慮するようお勧めします。

インフィニオンのアプリケーションノートには、ゲートドライブ、PCB レイアウト、および MOSFET の並列接続において CoolMOS™を最も効率的に利用するために役立つ情報が示されています。「インフィニオンの高速スーパージャンクション MOSFET デバイスを使用するための一般的な設計上の検討事項」および「650 V CoolMOS™ CFD7A for on-board chargers and DC-DC converters 」と題するアプリケーションノートには特に、CoolMOS™を最適に使用する方法に関する手引きが示されています。

さらに [9] および [20] には、高速 MOSFET に一般的に適用できるため、CoolMOS™ CFD7A ファミリーに直接転用可能な手引きが示されています。

Note:　*インフィニオンは、お客様の用途に合った技術支援を提供いたします。弊社の技術支援センターのウェブサイト（https://www.infineon.com/cms/en/about-infineon/company/contacts/product-support-form/）よりお問い合わせください。*

CoolMOS™ CFD7A の製品性能

5 参考文献

[1] インフィニオンのアプリケーションノート「PFC ブーストコンバーター設計ガイド」：
https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-ApplicationNote_PFCCCMBoostConverterDesignGuide-AN-v02_00-EN.pdf?fileId=5546d4624a56eed8014a62c75a923b05

[2] インフィニオンの「CoolSiC™ショットキーダイオード」のランディングページ：
https://www.infineon.com/cms/en/product/power/wide-band-gap-semiconductors-sic-gan/silicon-carbide-sic/coolsic-schottky-diode/

[3] インフィニオン「自動車専用 IGBT」のランディングページ：
https://www.infineon.com/cms/en/product/power/igbt/automotive-qualified-igbts/

[4] インフィニオンの「炭化ケイ素 MOSFET ディスクリート」のランディングページ：
https://www.infineon.com/cms/en/product/power/mosfet/silicon-carbide/discretes/

[5] インフィニオンのアプリケーションノート「高効率 3 kW ブリッジレスデュアルブースト PFC デモボード」：
https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-EVAL_3KW_DB_PFC_C7-AN-v01_00-EN.pdf?fileId=5546d4625e37f35a015e579000a65d7d

[6] 「IEEE Transactions on Power Electronics」誌、第 29 号、No. 2、pp. 873–882、2014 年 2 月：「Ultraflat Interleaved Triangular Current Mode（TCM）単相整流器」：https://www.pes-publications.ee.ethz.ch/uploads/tx_ethpublications/02_Ultraflat_Interleaved_Triangular_Marxgut_01.pdf

[7] インフィニオンのアプリケーションノート「ZVS 位相シフトフルブリッジ」：https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-ApplicationNote_EvaluationBoard_EVAL_2KW_ZVS_FB_CFD2%20ZVS-AN-v01_00-EN.pdf?fileId=db3a30433f9a93b7013f9f582ddb1fd9

[8] インフィニオンのアプリケーションノート「600 V CoolMOS™ CFD7 および XMC™での 3300 W 54 V 双方向位相シフトフルブリッジ」：https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-Application%20Note%20EVAL_3K3W_BIDI_PSFB%20AN_1809_PL52_1809_081412_Bidirectional_PSFB_3k3W_10-AN-v01_00-EN.pdf?fileId=5546d46267354aa00167404c69bb7b8c

[9] インフィニオンのアプリケーションノート「CoolMOS™ C7：迅速さの技術を習得する」：
https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-ApplicationNote_650V_CoolMOS_C7_Mastering_the_Art_of_Quickness-AN-v01_00-EN.pdf?fileId=db3a30433e5a5024013e6a966779640b

[10] パワーMOSFET「IPB65R115CFD7A」に関するインフィニオンのデータシート、版 2.0、2018-12-17：
https://www.infineon.com/cfd7a

[11] パワーMOSFET「IPB65R110CFDA」に関するインフィニオンのデータシート」、版 2.0、2012-03-28：
https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-IPX65R110CFDA-DS-v02_00-en.pdf?fileId=db3a304336797ff90136ba7c820925a5https://www.infineon.com/cfd7a

[12] パワーMOSFET「STB37N60DM2AG」に関するデータシート：
https://www.st.com/resource/en/datasheet/stb37n60dm2ag.pdf

参考文献

[13] パワーMOSFET「NVHL110N65S3F」に関するデータシート：
https://www.onsemi.com/pub/Collateral/NVHL110N65S3F-D.PDF

[14] パワーMOSFET「FCH104N60F_F085」に関するデータシート：
https://www.mouser.com/datasheet/2/149/FCH104N60F_F085-748720.pdf

[15] インフィニオンのアプリケーションノート「600 V CoolMOS™ P7」https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-ApplicationNote_MOSFET_CoolMOS_P7_600 V-AN-v02_01-EN.pdf?fileId=5546d4625b10283a015b14659d2d0e39

[16] インフィニオンのアプリケーションノート「ケルビンソース構成の CoolMOS™ C7 650 V スイッチ」：
https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-ApplicationNote_MOSFET_CoolMOS_C7_650 V_in_TO-247_4pin-AN-v01_00-EN.pdf?fileId=db3a30433e5a5024013e6a9908a26410

[17] インフィニオンのアプリケーションノート「CCM PFC コントローラ ICE3PCS01G を伴う 2.5 kW PFC 評価基板」：
https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-ApplicationNote_EVAL_2.5KW_CCM_4PIN-ApplicationNotes-v01_00-EN.pdf?fileId=5546d4624fb7fef2014fd65081616257

[18] インフィニオンの評価基板「CCM PFC コントローラ ICE3PCS01G を伴う 2.5 kW PFC 評価基板」：
https://www.infineon.com/cms/en/product/evaluation-boards/eval_2k5w_ccm_4p_v3/

[19] インフィニオンの評価基板「600 V CoolMOS™ CFD7 SJ MOSFET を伴う 3kW 二重相 LLC 評価基板」：
https://www.infineon.com/cms/en/product/evaluation-boards/eval_3kw_2llc_cfd7/

[20] インフィニオンのアプリケーションノート「CoolMOS™ CFDA」：https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-ApplicationNote_650 V_CoolMOS_CFDA-AN-v05_00-EN.pdf?fileId=db3a304340155f3d014034da2d844b41https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-ApplicationNote_MOSFET_CoolMOS_C7_650V_in_TO-247_4pin-AN-v01_00-EN.pdf?fileId=db3a30433e5a5024013e6a9908a26410

改定履歴

版	発行日	変更の説明
V 1.0	02-04-2020	初版

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

版 2020-04-02
発行元
Infineon Technologies AG
81726 Munich, Germany

© 2020 Infineon Technologies AG
All Rights Reserved.

本書について、ご不明な点はございませんか？

メール： erratum@infineon.com

AN_1811_PL52_1902_075315
文書リファレンス

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.