



ドライバソース端子を有する 低インダクタンス表面実装パッケージを採用した SiC MOSFET (7pin SiC MOSFET)

はじめに

SiC MOSFET が、非常に高いスイッチング速度を実現し、パワーエレクトロニクス分野の電力変換においてエネルギー損失を大幅に削減できることは広く知られている。しかし、従来のパワーデバイスパッケージには制限があり、SiC デバイスの潜在能力を最大限に発揮しているとは必ずしも言えなかった。ここでは、まずパッケージによる制限について説明し、適切なパッケージを採用することで得られるメリットについて紹介する。また、最後にトータムポールトポロジを使用した 3.7 kW 単相 PFC における、パッケージレベルでの改善効果を示す。

従来のパワーデバイスパッケージにおけるスイッチング性能の制限

図 1 は、パワートランジスタ向けに最も広く使用されているパッケージの 1 つ、「TO-247N」である。図 1 左では、デバイスの各端子に寄生インダクタンス成分が存在することがわかる。また図 1 右は、非常にシンプルかつ典型的なゲート駆動回路例である。これらの図から、ドレイン端子およびソース端子のインダクタンス成分が、主電流がスイッチングしている回路網に加わることがわかる。また、これらのインダクタンスはターンオフ時に過電圧を発生させるため、ドレイン・ソース間の仕様を超えないようにスイッチング速度を制限する必要がある。

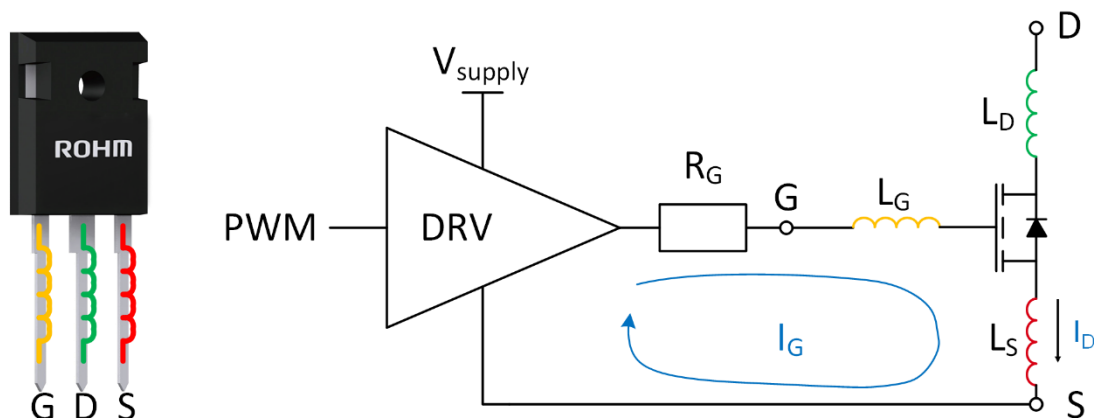


図 1：従来のパワーデバイスパッケージと寄生インダクタンス

ゲート端子とソース端子の寄生インダクタンスは、ゲート駆動回路網の一部に含まれるため、MOSFET を駆動する際に配慮する必要がある。また、このインダクタンスとゲート駆動回路の寄生容量との間で発振を起こす可能性がある。MOSFET がターンオンすると I_D が増加し、ソース端子のインダクタンス (L_S) に起電 (V_{LS}) が発生する。一方、ゲート端子には電流 (I_G) が流入し、ゲート抵抗 (R_G) で電圧降下が発生する。これらの電圧はゲート駆動回路網に含まれるため、MOSFET のターンオンに必要なゲート電圧を減少させてしまい、その結果ターンオン速度の低下を招く。これを図 2 に示す。

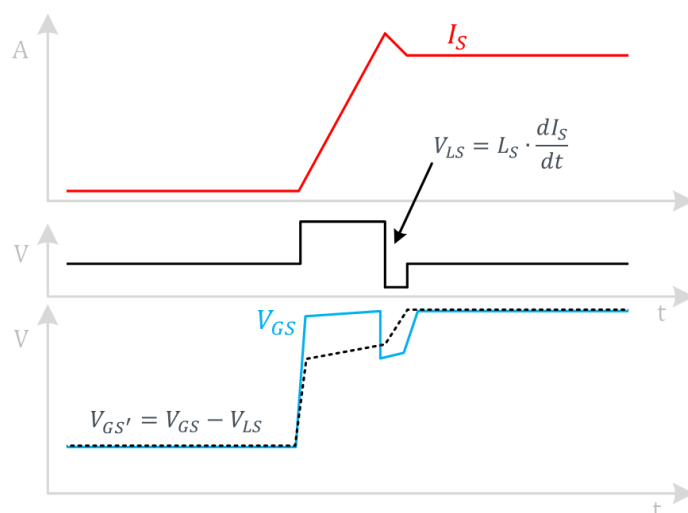


図 2 : L_S によるチップ上での V_{GS} 低下 (ターンオン時)

この問題を解決するアプローチのひとつが、いわゆる「ドライバソース」端子を備えたパワーデバイスパッケージの導入である。ソース端子とゲート駆動ループを分離するドライバソース端子を備えることで、ターンオン時のソースインダクタンス (L_S) によるゲート電圧への影響を無くすることができるため、電圧降下によるターンオン速度の低下がなくなり、ターンオン損失を大幅に削減可能になる。

TO-263-7L のスイッチング性能の改善

ロームは、TO-247-4L パッケージに加えて TO-263-7L 表面実装パッケージを開発し、SiC MOSFET のディスクリート品ラインアップを拡充している。TO-263-7L パッケージを採用することで、SiC MOSFET のソース端子へのケルビン接続が可能となる。そのメリットを図 3 に示す。メインのソース側にあるインダクタンス L_S は、ゲート駆動に関わる部分やメインの電流経路では使用されていないことがわかる。結果として、デバイスはより速くターンオンできるようになり、損失を低減できる。

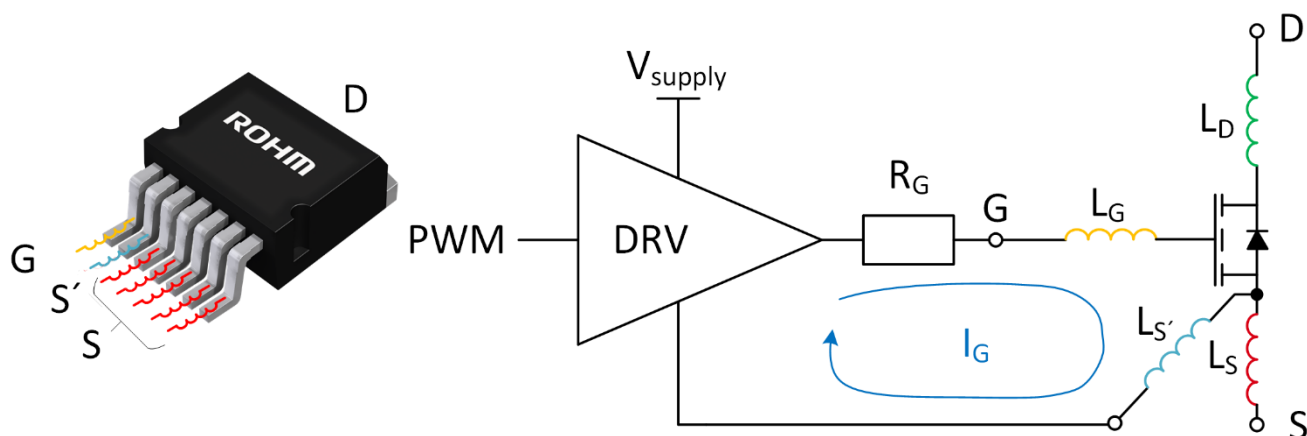


図 3 : TO-263-7L 表面実装パッケージとその寄生インダクタンス

TO-263-7L パッケージを採用するもうひとつのメリットは、TO-247N パッケージなどよりも、ドレイン端子やソース端子のインダクタンスがはるかに低い点である。ドレイン端子の接合面積が大きく、またソース端子は並列接続された複数の短いリード配線で構成できるため、パッケージのインダクタンス (L_D や L_S) を低減することが可能である。この新しいパッケージ採用によるデバイス性能のメリットを定量化するために、同じ SiC MOSFET チップを 2 つの異なるパッケージに搭載させ、ターンオン時、ターンオフ時のスイッチング動作を比較した (図 4)。

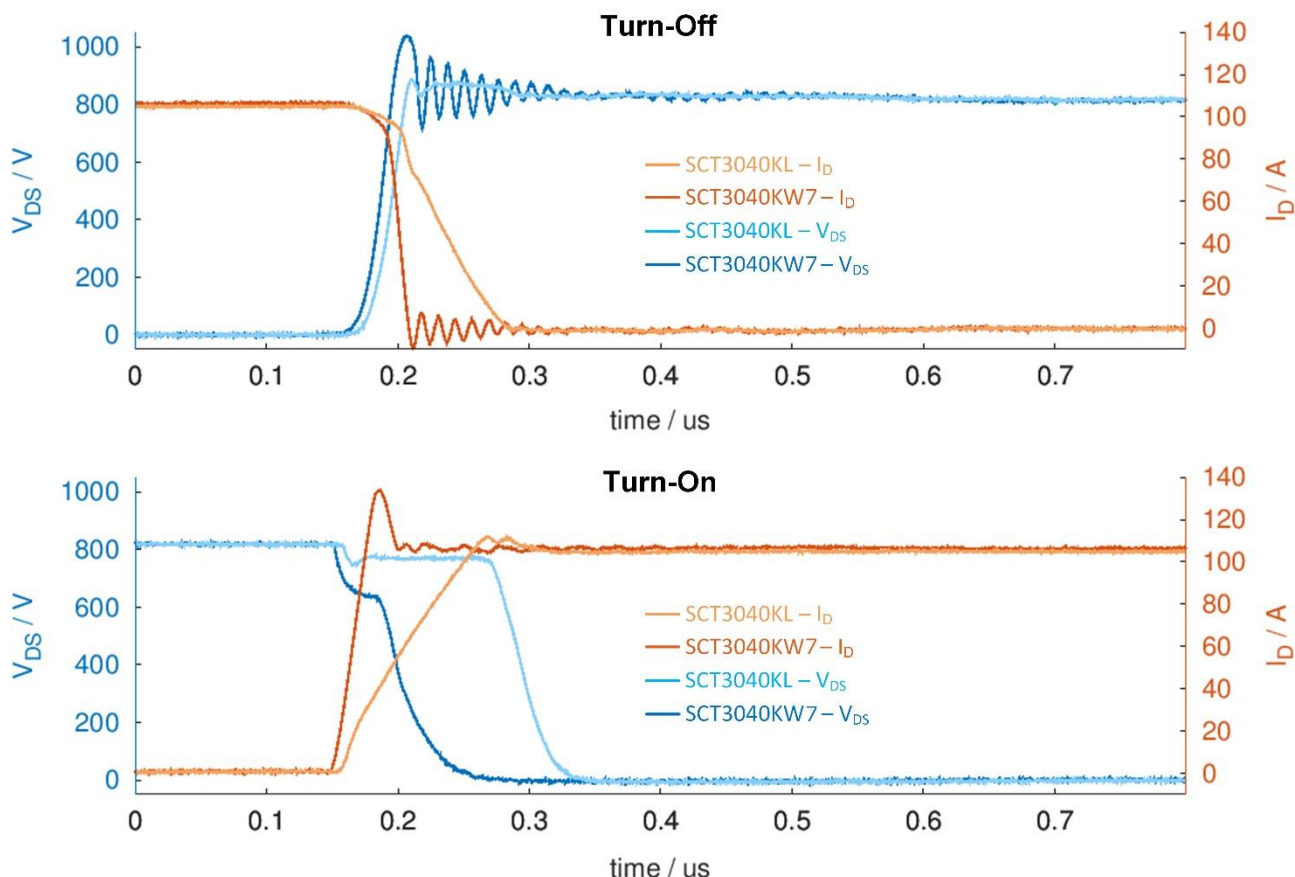


図 4 : 1200V/40mΩ SiC MOSFET のスイッチング動作比較
(TO-247N : SCT3040KL、TO-263-7L : SCT3040KW7、 $V_{DS}=800V$)

ターンオン時のスイッチングトランジェントでは、3 端子パッケージ (TO-247N) を採用した「SCT3040KL」のスイッチング速度が制限されていることがわかる。これはソース端子の起電により実効ゲート電圧が減少し、電流変化時間が長くなるからであり、ターンオン損失を増加させる要因のひとつとなっている。一方、ドライバソースを備えた表面実装パッケージ (TO-263-7L) 「SCT3040KW7」の場合、電流変化時間が非常に短くなり、ターンオン損失を減少させることが可能となる。またターンオフ時も、TO-263-7L パッケージを使用した場合、寄生インダクタンスの減少により、はるかに高い dI / dt が達成できることを示している。したがって、ターンオフ損失も TO-247N パッケージに比べて小さくなる。

次の図は、両パッケージで実現するスイッチング損失とスイッチ電流の関係を示している。特に大電流領域において、TO-263-7L デバイスのターンオン速度の増加が、スイッチング損失の削減に貢献していることが明らかである。

ドライバソース端子を有する表面実装パッケージ採用の SiC MOSFET White Paper

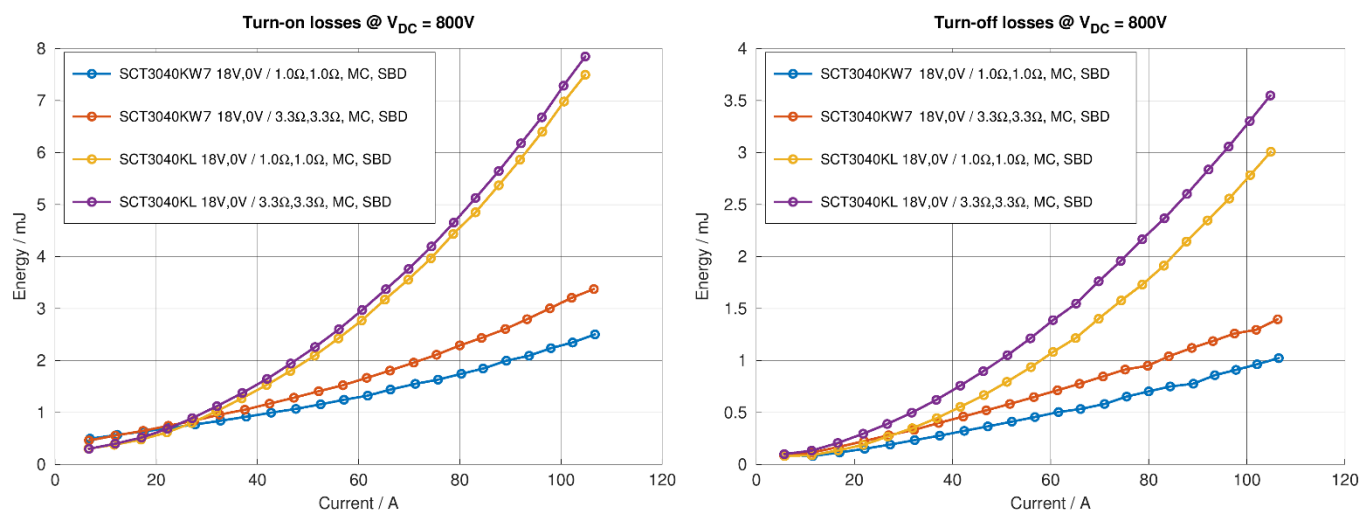


図 5：TO-247N パッケージおよび TO-263-7L パッケージの 1200V/40mΩ SiC MOSFET におけるスイッチング損失比較

(ゲート駆動回路：ミラークランプ（MC）とサージクランプ用のショットキーバリアダイオードを使用)

上記の比較データが示すように、ゲート駆動ループへ接続可能なドライバソース端子を備え、寄生インダクタンスを低減できるパッケージの性能は、特に大電流領域で発揮される。これにより、同じスイッチング周波数の場合は全体の損失を低減でき、また損失削減が主な目的ではない場合、スイッチング周波数の増加が可能となる。

新しい表面実装パッケージ品のラインアップ

ロームは、前述した 1200V/40mΩ 品に加え、定格電圧 650V および 1200V で TO-263-7L パッケージの SiC MOSFET をラインアップしている（表 1）。また、車載信頼性規格に準拠した車載品の開発も計画している。

耐圧	品番	30mΩ	40mΩ	60mΩ	80mΩ	105mΩ	120mΩ	160mΩ
650V	SCT30xxAW7	✓		✓	✓		✓	
1200V	SCT30xxKW7		✓		✓	✓		✓

表 1：TO-263-7L パッケージのトレンチ SiC MOSFET ラインアップ

車載充電器（OBC）における、表面実装パッケージ SiC MOSFET の適用性

表面実装パッケージ SiC MOSFET で達成できる性能を示すために、ここでは 3.7kW の単相 PFC 回路を応用例として検討する。このような電力クラスの単相 PFC は、単相 3.7kW 車載充電器の入力段や、11 kW 車載充電システムを構成する 1 つのブロックとして用いられる。後者の場合、スイッチングマトリックスを使用し、3 つの単相 PFC を組み合わせることで、単相駆動もしくは最大 11kW の 3 相駆動を可能にする。この応用例を図 6 のブロック図に示す。

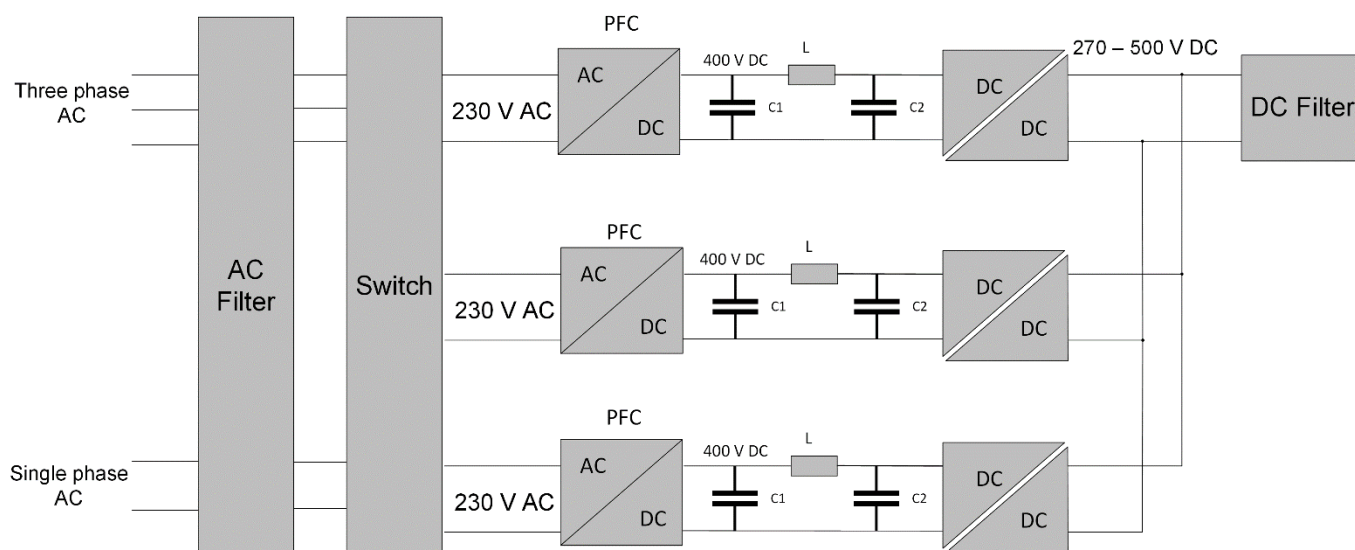


図 6：複数の 3.7kW PFC で構成される 11kW OBC のブロック図

また、図 7 に応用可能な PFC 回路のトポロジを示す。従来のブースト PFC では、入力にダイオード整流回路が存在するため、高効率を実現するには課題があった。また、2 相ブリッジレス PFC およびトータムポール PFC では、ダイオード整流回路を削減できるため、全体の導通損失を低減できる。ただし 2 相ブリッジレス PFC は、高効率を実現できるが、各フェーズレグが入力サイクルの半分でしか活用されないという欠点があるため、各デバイスのピーク電流と実効値電流の比率（いわゆる波高率）が高くなり、パワー半導体に大きなパワーサイクルストレスがかかることに注意が必要である。

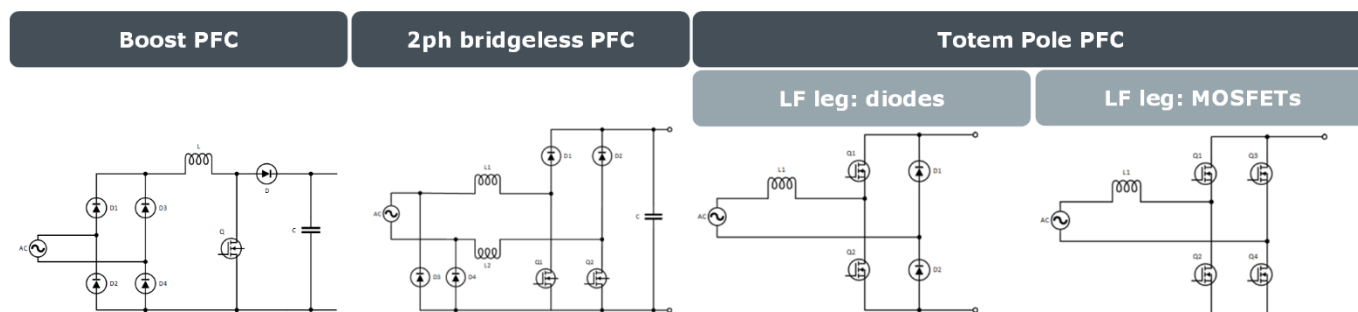


図 7：単相 PFC 概念図

トータムポール PFC には 2 種類の異なるタイプがあり、最もシンプルなもの、2 つの MOSFET と 2 つのダイオードを使用したタイプがある。ダイオードは低周波数でスイッチングするため、順方向電圧降下の少ないデバイスが選ばれる。一方、MOSFET のボディダイオードは転流用途で使用されるため、優れたボディダイオード特性を備えたデバイスを選定することが重要である。また、SiC MOSFET など最新のワイドバンドギャップ半導体においては、ハードスイッチングに対応できるボディダイオードを有するため、このようなアプリケーションに非常に適している。最後に、可能な限り最高の性能を望む場合は、低周波でスイッチングするダイオードを SJ MOSFET のようなアクティブスイッチに置き換えることにより、損失をさらに減らすことができる。

トータムポール PFC で実現可能ないくつかの性能を示すため、シミュレーションを実施した。このシミュレーションでは、TO-263-7L パッケージを使用した 650V/60mΩ SiC MOSFET のスイッチング損失の測定値を

ドライバソース端子を有する表面実装パッケージ採用の SiC MOSFET White Paper

検討した。スイッチング周波数は 100 kHz を想定し、高周波側のレグと低周波側のレグの半導体損失がモデル化されている。低周波レグでは、スイッチング損失の影響は極めて小さいため、60mΩ 品の導通損失のみを考慮した。

本シミュレーション結果を図 8 に示す。図から分かるように、最大効率 は公称出力電力の約 60% で、98.7% の領域にある。この段階では、追加の損失はモデル化されていない。もちろん、完璧な解析を行うには、制御回路やゲート駆動回路だけでなく、インダクタやその他の受動部品の損失も考慮する必要がある。しかしながら、650V SiC MOSFET を使用したトータムポール PFC において、高性能な PFC 回路を実現できることが明らかになった。

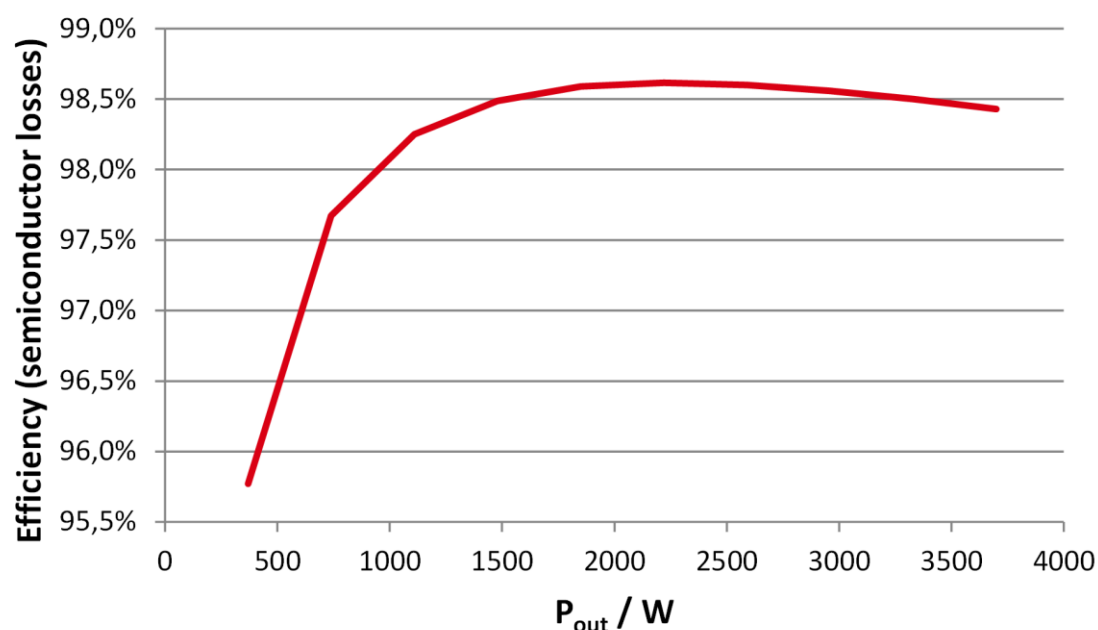


図 8：半導体損失のみを考慮したトータムポール PFC の推定効率

($V_{in}=230V$ 、 $V_{out}=400V$ 、 $f_{SW}=100kHz$ 、高周波側レグ：SCT3060AW7、低周波側レグ：60mΩ 品)

おわりに

今回、SiC MOSFET に最適なドライバソース端子を備えた低インダクタンスの表面実装パッケージ採用による、性能メリットを紹介した。特に大電流領域における表面実装パッケージのターンオン時スイッチングでは、ゲートループが dI / dt およびソース端子インダクタンスでの電圧降下の影響を受けないため、ターンオン損失を大幅に減少することが確認できた。パッケージのインダクタンスが全体的に減少することにより、SiC MOSFET のターンオフ速度も上げることができる。両方のメリットにより、ターンオンおよびターンオフ時のスイッチング損失を大幅に削減することが可能である。システム側では、トータムポール PFC において、 $R_{DS(on)}$ 値 60mΩ の 650V SiC MOSFET を採用した場合、約 98% を超える変換効率をもたらすことがわかった。これにより非常にコンパクトな設計が可能となるため、車載充電器などの車載アプリケーション開発において、特に重要なポイントと言うことができる。

本資料に記載されている内容はロームの製品（以下「ローム製品」といいます）のご紹介を目的としています。ローム製品のご使用にあたりましては、別途最新の仕様書およびデータシートを必ずご確認ください。本資料に記載されております情報は、何ら保証なく提供されるものです。万が一、当該情報の誤りまたは使用に起因する損害がお客様または第三者に生じた場合においても、ロームは一切の責任を負うものではありません。本資料に記載されておりますローム製品に関する代表的動作および応用回路例は、一例を示したものであり、これらに関する第三者の知的財産権およびその他の権利について権利侵害がないことを保証するものではありません。上記技術情報の使用に起因して紛争が発生した場合、ロームはその責任を負うものではありません。ロームは、ロームまたは他社の知的財産権その他のあらゆる権利について明示的にも黙示的にも、その実施または利用を許諾するものではありません。本資料に記載されております製品および技術のうち、「外国為替及び外国貿易法」その他の輸出規制に該当する製品または技術を輸出する場合、または国外に提供する場合には、同法に基づく許可が必要です。本資料の記載内容は 2021年 1月 現在のものであり、予告なく変更することがあります。

