TND6317JP/D
Rev. 2, August – 2021

マイルドハイブリッド電気自動車における電力変換

© Semiconductor Components Industries, LLC, 2019

August, 2021 – Rev. 2
Publication Order Number:
TND6317JP/D

マイルドハイブリッド電気自動車における電力変換

概要

最新のマイルドハイブリッド電気自動車(Mild Hybrid Electric Vehicles、MHEV)は、わずかにコストが増加し複雑になるだけで、フルハイブリッド電気自動車の燃費上の利点の多くを提供するように設計されています。48 Vバッテリを追加することは、MHEVがデュアル電圧車両になることを意味しており、それによって独自の設計課題が生じます。これらの設計課題への取り組みは、システム全体の効率を最高に維持しながら、デュアルバッテリシステムの充放電サイクルを管理することに重点が置かれています。

本資料では、コスト効率を最大化するためのサブシステム設計に関する詳細を含め、これらの設計課題を克服する方法について取り上げます。また、車載パワーモジュール(Automotive Power Module、APM)とGaNデバイスを用いたパワーコンバータの実現についても検討します。

このトピックは、優れたコンバータ設計をMHEVに取り入れる際の諸問題について理解したいと考えているエンジニアにとって興味深いものです。

はじめに

世界の多くの地域で、環境条件、特に大気の質に対する懸念が高まっており、車両の平均燃料消費量を低減することによりCO_2排出量を削減する必要に迫られています。これを実現する1つの方法は、従来の内燃機関(Internal Combustion Engines、ICE)を動力とする車両にハイブリッド化を加えることです。

一般的な車両では、トラクションパワーシステムが非常に広い範囲の車両用動力と速度の条件で動作できる必要があり、これは車両のトルク–速度範囲として表すことができます。車両のハイブリッド化は、第2の動力源を追加するプロセスであり、その動力源として最も可能性が高いのは第2のバッテリで駆動される電気モータです。

ハイブリッド化されたパワートレインを使用すると、システム設計者は異なるトルク–速度範囲部分に2つの動力源を最適化する方法で自由に配置できます。電気機械は非常に大きなトルクを発生できるため車両の加速時には役立ちますが、このトルクは限られた時間しか利用できません。利用可能な時間はバッテリのサイズと電気機械のトルク出力の両方に依存します。高トルクの動力源を追加すると、ICEの大幅な小型化が可能になり、車両全体の燃費を大幅に向上させることができます。しかし、電源を追加することは些細な技術上の問題ではなく、車両システムの多くに与える影響を考慮した設計手法が必要になります。

従来の電動化は、通常300 V～400 Vの範囲の高電圧バッテリと、ICEパワートレインに直結された高性能な電気機械を追加することで実現されてきました。これらの「フル」ハイブリッド車は低燃費車のクラスを代表するもので、効率向上の観点から非常に魅力的です。しかし、そのために車両でかなりのコストと重量が増加します。

48 V車のシステムアーキテクチャは最近かなり注目を集めています。このシステムは、フルハイブリッド車に向けた部分的なステップと考えられます。これらは「マイルドハイブリッド」と呼ばれ、比較的小型の48 Vバッテリシステム、高性能の電気機械、1つまたは複数の追加の48 V電動化サブシステムを使用して構築されています。48 Vシステムの低コスト化は、多くの自動車OEMの注目を集めており、近いうちにすべての自動車メーカのポートフォリオに加わる可能性があります。

48 Vアーキテクチャ

48 Vアーキテクチャの選択肢は非常に多く、増え続けています。最も基本的なシステムには、バッテリ、統合スタータジェネレータ(integrated starter−generator、ISG)、48 Vから12 Vへのコンバータ、1つ以上の48 V負荷などが含まれます。48 V車には12 Vバッテリと複数の12 V負荷がまだ残っているため、これらのシステムはしばらくの間、デュアル電圧アーキテクチャとして存続する可能性が高いといえます。

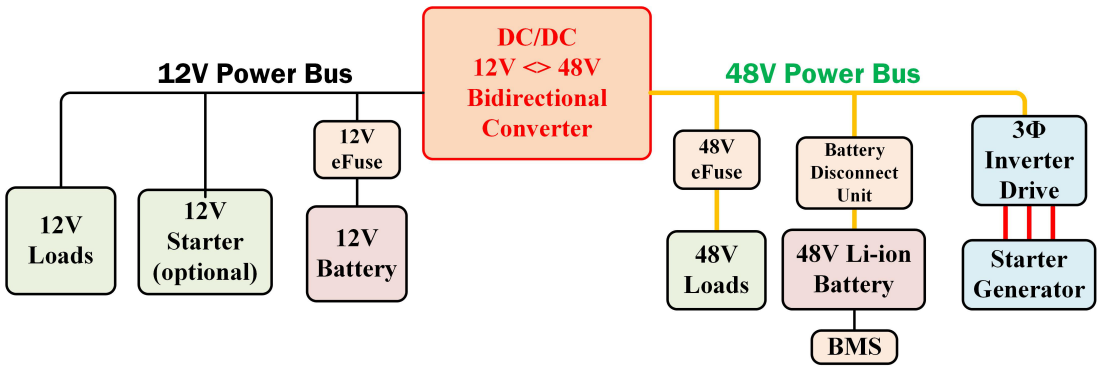


Figure 1. A 48 V Mild Hybrid Electrical System

これらデュアル電圧システムでは、数多くの新しい構成が可能です。48 Vシステムは基本的に高い電力レベルを供給できるため、48 Vの電動ターボ(E−Turbo)や48 Vの電動ロール(E−Roll)スタビライザーシステムのような周辺機器に電力を供給できます。

48 Vシステム側ではISGが主要構成部品であり、これが車両のすべての電力発生とともに車両の始動も担っています。また、ISGは車両のブレーキ期間に回生エネルギーの回収も行います。ISGには多くの構成と電力レベルがあり、それぞれに固有の実装目標があります。

現在のところ、デュアル電圧システムの12 Vバッテリ側には、12 Vのオルタネータ以外はそのまま残っています。12 V電力の発生源がないため、48 Vで発生した電力を12 Vシステムに伝送するためのコンバータが必要です。コンバータは高効率設計になっているとはいえ、電力がコンバータを介して供給されるため、12 V負荷すべてで損失が生じます。

48 Vから12 Vへのパワーコンバータは、MHEVのデュアル電圧システムに必要な追加機能です。両方向への電力供給が必要になるため、このコンバータは双方向で機能するように設計する必要があります。これらのコンバータの標準的な電力範囲は1 kW～3 kWであり、この広い電力範囲全体で高効率を維持するには、現在マルチステージインタリーブ型バックブーストコンバータが最もよく使用されているトポロジの選択肢です。バックトポロジにより、電力を高電圧側から低電圧側へ流すことができます。同様に、ブーストトポロジにより電力を逆方向に流すことができます。多相インタリーブ方式の設計を用いることにより、多くの個々のコンバータの相を1つの高電力コンバータに統合する機能を実現できます。

コンバータが重負荷条件下にある場合は、すべての相を使用しますが、軽負荷の期間には一部の相をオフにして損失を抑え、効率を高めることができます。

コンバータのトポロジ

MHEVアプリケーションに必要な双方向コンバータは、いくつかの異なるトポロジを用いて構成できます。最も一般的なトポロジは、インタリーブ型同期バックブースト双方向電圧コンバータです。このタイプのコンバータは、複数の同一の相をそれぞれ並列に接続して、はるかに大きなコンバータとして機能するように設計します。これらの「インタリーブされた」相は一体となって動作しますが、必要に応じてディセーブルできます。このコンバータの1相分の回路図をFigure 2に示します。

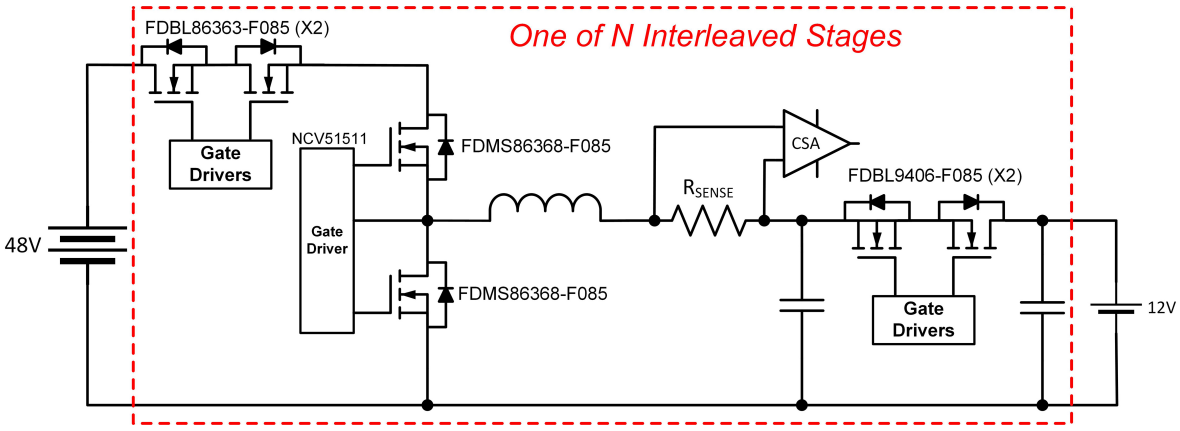


Figure 2. Bidirectional Converter – Single Phase

このコンバータを構成する主なブロックは、電源切断スイッチ、バックブーストハーフブリッジ、電流センスステージ、主インダクタ、負荷切断スイッチです。

電源切断スイッチは、コンバータの各相を48 Vバッテリから切り離すために使用します。

主回路は同期トポロジで構成されているバックブーストコンバータで、高効率化や双方向動作が必要な場合に使用されます。同期トポロジでは、導通期間と再循環期間の両方の大部分でパワースイッチがフルオン状態になるように制御すると、回路の効率が向上します。

同期バックブーストコンバータは、実際には2つのスイッチング回路を単一ステージに結合したものです。パワースイッチは、主要エネルギー変換部品であるインダクタの電流の流れを制御します。インダクタ電流は、システム精度を高く維持するために最も重要なため、コンバータ全体で制御する必要がある主要変数です。

インダクタ電流の方向で電力の流れる方向が決まるため、どちらのバッテリが他方から電流を受け取るかが決まります。システムコントローラは、目的とする電流の方向を与えるための適切なスイッチパターンを発生することにより、電流の方向を決定します。例えば、12 Vバッテリが充電を必要としている場合、Figure 3のバックモードの例に示す向きに電流を流すようにスイッチパターンを制御します。48 Vバッテリが充電を必要としている場合、Figure 3のブーストモードの例に示す向きに電流を流すようにスイッチパターンを制御します。

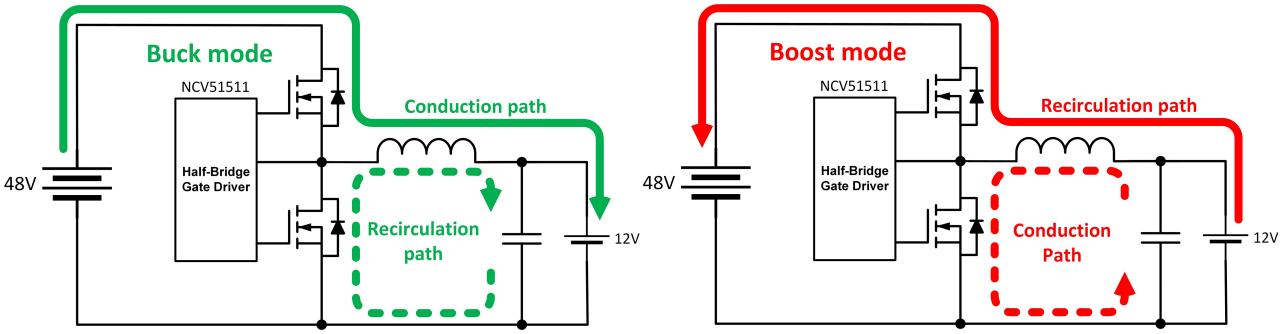


Figure 3. Buck−Boost Conversion

電流センスステージはインダクタ電流を監視し、その値をシステムコントローラに伝達する役割を担っています。高精度シャント抵抗の使用がよく用いられている電流センス方法です。シャント抵抗はインダクタ電流経路に配置され、オームの法則の原理に基づき、電流の変化によってシャント抵抗両端の電圧が変化します。電流センスアンプ(Current Sense Amplifier、CSA)は、シャント抵抗の2端子間の電圧を監視するために使用されます。CSAはシャント電圧をシステムコントローラのアナログ−デジタルコンバータ(analog to digital converter、ADC)への入力に適した信号レベルに増幅します。

通常動作中、シャント電圧はグラウンドに対してゼロから48 Vまで変化する可能性があります。加えて、シャント抵抗の差動電圧は非常に小さく、数十から数百ミリボルト程度です。所要電圧とそれ以外の電圧の信号レベルにこのような大きな差があるため、大部分のアンプでは厄介な問題が生じます。アンプは小さな差動信号を増幅し、高いコモンモード電圧除去能力を備えていると同時に、最大80Vの過渡電圧に耐える必要があります。この問題に対処するには、以下に示すアンプの3つの仕様を慎重に選択する必要があります。

- コモンモード電圧範囲(広いほどよい)
- 入力オフセット電圧(小さいほどよい)
- コモンモード除去比(高いほどよい)

l従来のオペアンプでは、入力端子の電圧は電源レール±0.6 Vまでに制限されているため、コモンモード電圧範囲には大きな制限がありました。最近では、専用の電流センスアンプが、最大80 Vという大きなコモンモード電圧範囲を備えています。また、オフセット電圧が10 μVと低く高精度でもあります。これによって、システム設計者は高精度で高速な電流監視システムを実現できます。

コンバータの単相表現をFigure 2に示します。これは48 Vから12 Vへのパワーコンバータ全体を構築するのに必要な多くの相のうちの1つです。複数の同一相を並列接続することにより、高レベルの電力供給能力を持つコンバータを構成できます。インタリーブ方式として知られている構成では、各相が独立して動作できますが、その出力を結合することにより、通常であれば相当に大きなコンバータが必要になるほどの出力が得られます。個々の相は、それぞれ他の各相に対してわずかに異なる位相角で出力電流を発生するように構成されています。また、このように位相角をずらすことで出力コンデンサのリップルを低減することもできます。

単一の大きなコンバータを設計するのではなく、インタリーブ方式を使用することには、いくつかの理由があります。第一に、各相の電流レベルを低減して、パワースイッチ、導体、インダクタにかかるストレスを軽減します。各相は必要に応じて独立に切り離すことができるため、コンバータの電力レベルの設計をモジュール化できます。

4相コンバータに使用する相互接続方式をFigure 4に示します。

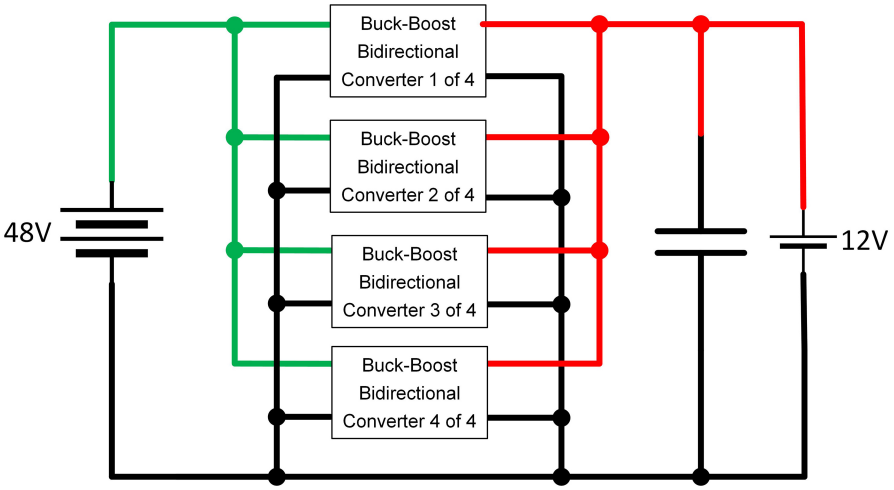


Figure 4. Interleaved Phase Configuration

標準的な車両の動作中、12 Vシステムの電力要件は、様々な車両の動作モードに基づいて時間とともに変動します。車両の動作モードには、全電力が必要な場合がある一方、他の時間には少量の電力で十分な場合もあります。コンバータの全体的な効率を向上するため

に、インタリーブ型コンバータでは相を一時的にディセーブルでき、それによりコントローラが動作中の相数を必要な電力量に厳密に一致させることができます。電力必要量が少ない場合、バッテリ切断スイッチを使用して複数の相をオフにすることができます。さらに電力必要量が少ない期間中、いくつかの相をオフにしている状態でコンバータのコントローラは前にオフにしていた相をオンにし、全相に熱負荷を均等に分散できます。

負荷切断スイッチのステージの役割は、各相を12 Vバッテリに電気的に接続/切断することです。これらのステージは、定格が相の出力電流レベルであるバックツーバックのパワーMOSFETで構成されています。これらのスイッチは連続的に動作する必要があるため、100%のオン時間で動作できるゲートドライバが必要となります。

一部の故障モード期間には、これらのMOSFETをオフして故障したステージの動作をディセーブルすることが必要です。また、故障した回路を完全に分離するために、対応する電源切断スイッチも切断する必要があります。

コンバータの動作

双方向コンバータは、特定の車両動作モードに基づいて複数の異なる動作モードを備えています。車両の始動時には、ISGへの電流は48 Vバッテリから供給されます。48 Vバッテリの充電状態が不十分な場合には、コンバータを昇圧モードで動作するように構成し、12 Vバッテリから始動電流を追加供給します。Liイオンバッテリは低温での電力性能が低下することが一般的で、そのような場合には車両の始動に12 Vバッテリからの電力が必要になる可能性があります。この場合は、コンバータを12 Vバッテリから電流を供給するように構成し、車両の始動時に48 Vバッテリを補助します。通常、全システムが通常動作温度に達するまでエンジンの始動/停止機能は抑制され、その時点で通常の車両の再始動が開始されます。

車両が暖機状態で走行しているが余分に加速する必要がない期間中、コンバータは降圧モードで動作します。このモードではコンバータは48 Vバッテリから12 Vバッテリに電流を供給するように構成されます。コンバータは12 V負荷すべてに供給するのに必要な電流を供給するとともに、必要に応じて12 Vバッテリの充電も行います。

車両が通常走行モードで動作していて追加の加速が必要な場合、コンバータは昇圧モードに切り替わってISGのモータに追加電流を供給し、車両の加速を補助します。加速動作の後、システムは通常走行モードに戻り、コンバータを降圧モードに切り替えます。様々な車両とコンバータの動作モードを示したTable 1を参照してください。

Table 1. OPERATING MODES

Vehicle Mode	Converter Mode	Current Direction
Cold Starting	Boost mode	12 V battery → 48 V battery
Vehicle Acceleration	Boost mode	12 V battery → 48 V battery
Vehicle Driving	Buck mode	48 V battery → 12 V battery

コンバータの設計

このコンバータの各ステージを実現するのに使用する主な回路構成部品をTable 2に示します。

Table 2. DESIGN REQUIREMENTS

Converter Stage	Components Required
Source−disconnect	− 80 V/100 V trench power MOSFET's − High−side gate driver
Synchronous buck/boost	− 80 V/100 V trench power MOSFET's or APM − High−side & low−side gate drive − Power inductor
Current sense amp	− Current sense amplifier − Shunt resistor
Load−disconnect	− 40 V trench power MOSFET's − High−side gate driver

電源切断ステージの設計に使用する半導体部品は、ディスクリートMOSFETまたは集積化MOSFETパワーモジュールを使うことによって実現できます。電源切断ステージには、一般的に80 Vまたは100 VのトレンチMOSFETデバイスが使用されます。このステージの主な目的は、インタリーブされた各ステージの入力を他のステージと48 Vバッテリから分離することです。各相の接続/切断には、バックツーバックのスイッチ構成が使用されます。バックツーバック構成を選択するのは、回路を両方向の導通から分離するためです。これらのMOSFETはフローティング電位で動作するため、各デバイスはハイサイド駆動能力を備えたゲートドライバで制御する必要があります。これらのデバイスはいったん動作すると長時間の導通維持が必要になる可能性があります。これは100%オン時間導通も可能でなければならないことを意味します。

バックブーストステージはコンバータの心臓部です。各バックブーストステージは、パワーインダクタに接続されたハーフブリッジ構成の2個のMOSFETデバイスで構成されています。これらのデバイスは通常80 Vまたは100 VのトレンチMOSFETです。これらのMOSFETはハイサイド/ローサイドゲートドライバで制御する必要がありますが、単独パッケージでも共通パッケージのデュアルドライバICのいずれでもかまいません。

あるいは、このステージはFigure 5に示すような非常に小型の車載パワーモジュール(Automotive Power Module、APM)を使って実現することもできます。

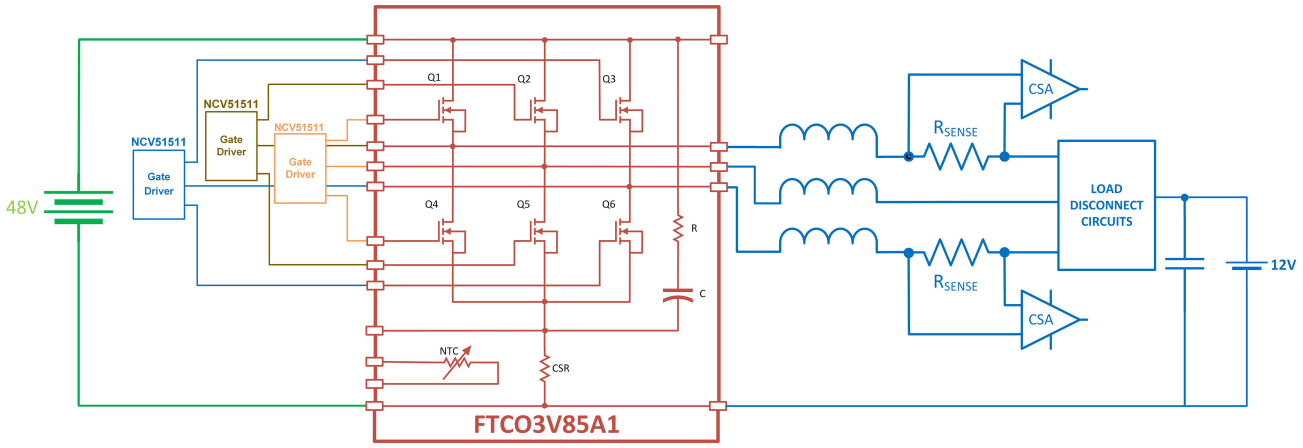


Figure 5. Automotive Power Module Based Design

このオンセミの集積化パワーモジュールには、低熱抵抗、低内部電気抵抗、改善されたEMI性能、AEC規格に準拠した小型パッケージでの実装といった特徴があります。この実装では、電源切断回路を使用せず、個々の相の分離には負荷切断回路を使用できます。

主パワーインダクタは、コンバータの各相のエネルギーを蓄積するように設計されています。この回路は、電流の向きに応じて、コンバータのコントローラのコマンドに基づき、必要なエネルギーをどちらかのバッテリに供給します。コンバータコントローラは、コンバータの電力の流れの向きを決める2つの主スイッチを制御するためのコマンドを発行します。このステージを正しく動作させるには、電流を正確に測定して主インダクタの電流を適切に調整する必要があります。電流センスアンプは誤差が極めて低い設計になっているので、これを用いるのが理想的です。

各負荷切断ステージに対するパワー半導体設計は、ディスクリートMOSFETまたは集積化MOSFETパワーモジュールを使用して実現できます。負荷切断ステージには40 Vのトレンチ MOSFETデバイスを使用します。このステージの主な目的は、インタリーブされた各相の出力を他のステージと12 Vバッテリから分離することです。バックツーバックのスイッチ構成を使用して、電源切断ステージに実装されているのと同じ分離機能を実行します。これによって両方向導通が可能となり、かつ両方向導通の遮断も可能になります。また、これらのデバイスもハイサイド駆動能力を備えており、100%オン時間動作が可能なゲートドライバで制御する必要があります。

GaNを使用したコンバータの設計

サイズと効率両方の改善に対する要求がかつてないほど高まっている車載アプリケーションの場合、ワイドバンドギャップ(WBG)デバイスを標準シリコンデバイスの代わりに使用できます。窒化ガリウム(GaN)デバイスは、効率向上と小型化のための魅力的な代替品である一方、システム全体のコストを低減できる可能性があります。

GaNデバイスによりスイッチング損失を大幅に低減できるため、GaNを使用したバックコンバータでは、標準的なシリコンパワートランジスタに比べ何倍も高速にスイッチングす

ることができます。さらに、GaNトランジスタには逆回復損失がないため、ハードスイッチング遷移中の大電流スパイクと電力損失が発生しません。

小型化に加え、スイッチングの高速化により、車載アプリケーションでは別のメリットが得られる可能性があります。車載ラジオとの干渉を避けるには、540〜1600 kHzのAMラジオ帯域外のスイッチング周波数を使用する必要があります。

発売前に車両全体が厳しい電磁妨害放射試験に合格する必要があるため、車載アプリケーションではEMIを最小限に抑えることが非常に重要です。通常、コンバータのスイッチング周波数は、RFラジオ周波数よりはるかに低くくなりますが、その高調波は受信への干渉を起こすのに十分なエネルギーを内包したまま非常に高い周波数まで広がる可能性があります。より高い周波数でスイッチングすると、高調波がさらに離れた周波数で発生するような形で、コントローラは自由に動作できます。これはパルススキッピングや周波数ホッピングなど、様々な手法で達成できます。GaNベース回路は効率が高いので、高周波バックコンバータはEMIの影響を受けやすいアプリケーションに最適です。

オンセミは、シリコンカーバイド(SiC)やGaNトランジスタなど、WBGパワーデバイスの世界的メーカです。これらのデバイスは、標準的なシリコンパワースイッチを使用して製作したものより、はるかに高効率のパワーコンバータを実現する新規設計に対応できます。

まとめ/結論

多くの新型マイルドハイブリッド電気自動車の急増に伴い、世界の自動車メーカはこれらの新しいトポロジが、彼らの全車両モデルの燃費にプラスの影響をもたらしてくれることに大きな期待をかけています。各企業は、車両のグリーンフットプリント向上の取り組みにおける各自動車メーカの進捗を測定するために使われる企業平均燃費(Corporate Average Fuel Economy、CAFÉ)と呼ばれる指標で評価されます。MHEVの普及による直接的な結果は48 Vバッテリサブシステムの増加ですが、12 Vの電装品を使い続ける限り48 Vから12 Vへのコンバータが必要になります。

このコンバータ向けには様々なトポロジを想定できます。双方向インタリーブ型同期バックブーストコンバータのトポロジが、シンプルさと高効率のため最も広く普及しています。また、このトポロジは複数のインタリーブ相での設計が可能で、広い動作範囲にわたって高効率で対応できるという理由からも選択されています。12 Vの車両負荷は時間によって大きく変動し、コンバータが最大負荷点で機能する必要があるとしてもその状態に長くとどまることはめったにないため、この点は重要です。負荷が軽い場合、コンバータは切断スイッチを使って不必要なインタリーブ相を減らし、損失を低減して高効率を維持します。

したがって、このコンバータのコストは、48 Vバッテリサブシステムを車両に追加する結果であると考えられます。今後の車両設計では、追加のシステム構成部品が48 Vバスへ移行するため、コンバータの容量とコストは低下する可能性があります。

onsemi, ONSEMI , and other names, marks, and brands are registered and/or common law trademarks of Semiconductor Components Industries, LLC dba "**onsemi**" or its affiliates and/or subsidiaries in the United States and/or other countries. **onsemi** owns the rights to a number of patents, trademarks, copyrights, trade secrets, and other intellectual property. A listing of **onsemi's** product/patent coverage may be accessed at www.onsemi.com/site/pdf/Patent−Marking.pdf. **onsemi** reserves the right to make changes at any time to any products or information herein, without notice. The information herein is provided "as−is" and **onsemi** makes no warranty, representation or guarantee regarding the accuracy of the information, product features, availability, functionality, or suitability of its products for any particular purpose, nor does **onsemi** assume any liability arising out of the application or use of any product or circuit, and specifically disclaims any and all liability, including without limitation special, consequential or incidental damages. Buyer is responsible for its products and applications using **onsemi** products, including compliance with all laws, regulations and safety requirements or standards, regardless of any support or applications information provided by **onsemi**. "Typical" parameters which may be provided in **onsemi** data sheets and/or specifications can and do vary in different applications and actual performance may vary over time. All operating parameters, including "Typicals" must be validated for each customer application by customer's technical experts. **onsemi** does not convey any license under any of its intellectual property rights nor the rights of others. **onsemi** products are not designed, intended, or authorized for use as a critical component in life support systems or any FDA Class 3 medical devices or medical devices with a same or similar classification in a foreign jurisdiction or any devices intended for implantation in the human body. Should Buyer purchase or use **onsemi** products for any such unintended or unauthorized application, Buyer shall indemnify and hold **onsemi** and its officers, employees, subsidiaries, affiliates, and distributors harmless against all claims, costs, damages, and expenses, and reasonable attorney fees arising out of, directly or indirectly, any claim of personal injury or death associated with such unintended or unauthorized use, even if such claim alleges that **onsemi** was negligent regarding the design or manufacture of the part. **onsemi** is an Equal Opportunity/Affirmative Action Employer. This literature is subject to all applicable copyright laws and is not for resale in any manner.

PUBLICATION ORDERING INFORMATION

LITERATURE FULFILLMENT:
Email Requests to: orderlit@onsemi.com

onsemi Website: www.onsemi.com

TECHNICAL SUPPORT
North American Technical Support:
Voice Mail: 1 800−282−9855 Toll Free USA/Canada
Phone: 011 421 33 790 2910

Europe, Middle East and Africa Technical Support:
Phone: 00421 33 790 2910
For additional information, please contact your local Sales Representative

◊