

進化するEVシステムアーキテクチャに向けた 電力供給の再考

Mark Anthony Manabat & Andy Smith | Power Integrations, USA



電気自動車の効率は向上し続けており、それに伴い電気系統の複雑化が進んでいます。ほとんどのプラットフォームでは、元々は内燃機関車両のシステムをサポートするために採用された、従来型の 12V 補機用バッテリーが依然として搭載されています。EV アーキテクチャが、トラクション インバータ向けのより高いバス電圧、常時接続機能、ゾーン型配電、および増加する補機システムを採用するにつれて、従来の 12V 補機用バッテリーの適合性がますます疑問視されるようになってきています。

本稿では、現代の EV における 12V 補機用バッテリーのアーキテクチャ上の役割を検討し、その継続的な使用を支える技術的、安全性、およびシステムレベルの背景を概説するとともに、本質的な限界についても明らかにします。補機負荷が断続的な動作から連続的な動作に移行するにつれて、待機効率、機能安全性のカバレッジ、およびシステムの信頼性が設計上の主要な考慮事項となり、従来の補機用バッテリー方式の欠点が浮き彫りになっています。

本稿では次に、12V バッテリーを完全に廃止するために必要な事項を検討し、代替となる電源アーキテクチャに求められる電気的および安全上の要件を明確化します。このような背景において、高集積マイクロ DC-DC (μ DC-DC) コンバータが実現可能な代替手段として提示されており、これは 通常動作時、待機時、故障時において、高電圧バッテリー スタックから低電圧領域に直接電力を供給することが可能です。

μ DC-DC アーキテクチャは、ワイドバンドギャップ デバイス、平面磁性部品、およびスケラブルなフライバックベースのトポロジを活用することで、広い入力電圧範囲での動作をサポートし、負荷条件に関わらずコスト効率よく高効率を実現できます。また、超低待機電力消費、小型化、電力段の並列化や冗長化への道を切り開きます。これらの特性は、ゾーン型配電やバッテリーレス補機電源戦略など、次世代 EV アーキテクチャと高い親和性を持っています。

結局のところ、12V 補機用バッテリーの廃止とは、単に部品を取り除くことではなく、責任の所在が変わることを意味します。本稿では μ DC-DC を中心とした電源アーキテクチャを、実用的かつ技術的に信頼できる今後の道筋として位置づけるとともに、安全性、信頼性、および車両全体の効率性を確保するために必要な設計上の考慮事項を明らかにします。

電気自動車における 12V 補機バッテリーの廃止：アーキテクチャ、課題、および設計上の考慮事項

リチウムイオン電池技術の継続的な進歩により、電気自動車はかつてないほどの長い航続距離、高い加速性能、そして高い出力を実現しています。これらの改良は主に、エネルギー密度の高いセル、トラクションバッテリーの高電圧化、および高効率なパワー エレクトロニクスによってもたらされており、最新の EV プラットフォームは内燃機関 (ICE) 車両の性能に匹敵、あるいはそれを上回る性能を実現しています。

しかし、現在路上を走っている電気自動車のほとんどは、待機電力供給のために 12V 鉛蓄電池に依然として依存しています。この補機バッテリーは、トラクション バッテリーが非動作状態または切り離されている場合に、低電圧サブシステムに電力を供給します。これは、電動ドライブトレイン システムが登場する以前の従来型の車両設計から引き継がれたアーキテクチャです。



図 1 – 12V 鉛蓄電池

鉛蓄電池のレガシー

安価で信頼性の高い鉛蓄電池は、1890年代の初期の電気自動車を含め、100年以上にわたって使用されてきました。

高いピーク電流を供給でき、過酷な使用条件にも耐え、広い温度範囲で動作できる能力を備えていたため、現代のパワーエレクトロニクスが登場するずっと以前から、自動車用途に最適とされてきました。これらは、内燃機関を始動するために必要な大電流 (低温環境下で最大 $500A_{PK}$ を最大 5 秒間) 供給できます。エンジン始動に加えて、ICE 車両の低電圧電気アーキテクチャ全体は、エンジン停止時に 12V バッテリーから電力を供給されるように設計されていました。その結果、車両照明、ボディエレクトロニクス、制御モジュール、安全システムは、長年にわたり 12V 電源を前提として最適化されてきました。

自動車業界が ICE 車両からハイブリッド車やプラグインハイブリッド車へと移行する中で、内燃機関を始動させる必要性は残り続けており、鉛蓄電池の補機バッテリーが継続して使用されることとなりました。

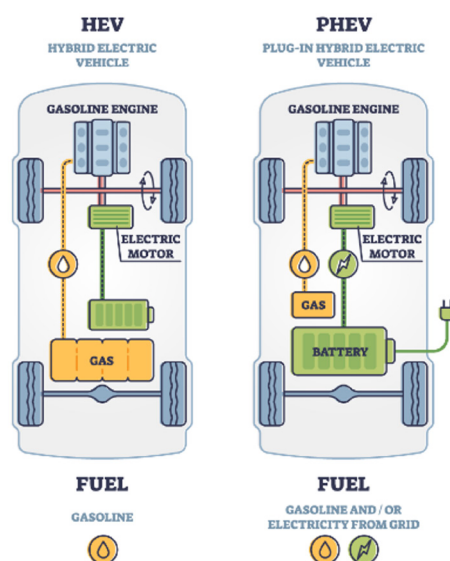


図 2 - HEV および PHEV の電源アーキテクチャ

ICE を搭載していない車両ではどうでしょうか？

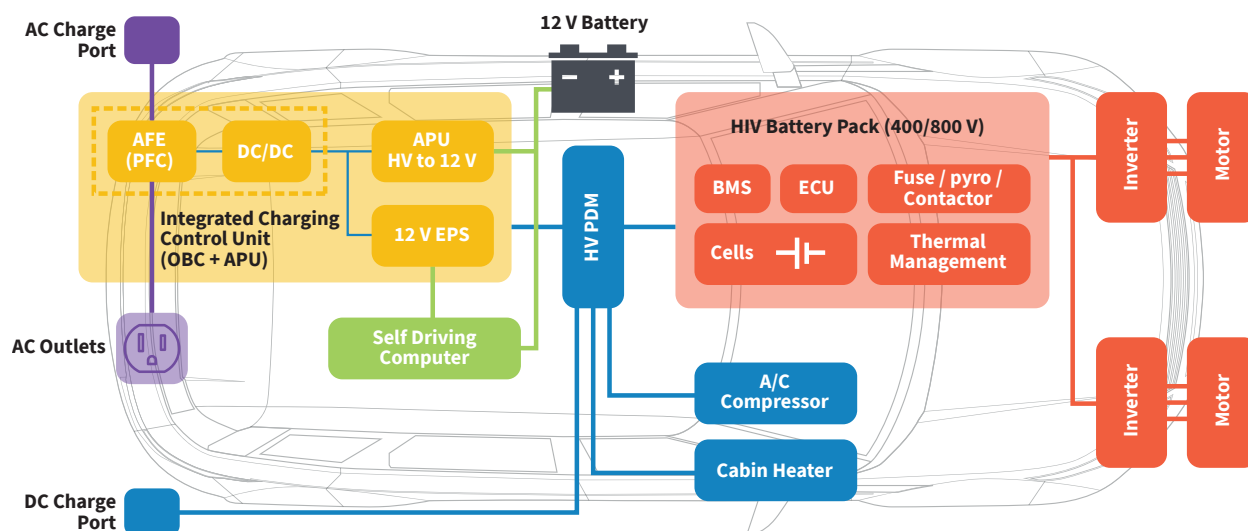


図3 - EVの電力分配アーキテクチャ

メイン DC-DC／補助動力装置 (APU) の役割

初期世代のEVアーキテクチャでは、12Vシステムはもはや独立して動作していません。その代わりに、補助動力装置 (APU) を介して高電圧トラクションシステムと密接に連携されています。APUは通常、高電圧から低電圧へのDC-DCコンバータとして実装されます。APUは、車両のサブシステムに安定化された12V電源を供給する上で中心的な役割を果たし、12V鉛蓄電池と連携して動作します。

通常の車両走行時APUは12Vバッテリーの充電状態を維持しながら、すべての低電圧サブシステムに安定化された12V電源を供給します。バッテリーはバッファとして機能し、負荷の急激な変動を吸収するとともに、電力需要の急激な変化時でも電力供給が途切れないようにしています。

車両が停止し、高電圧 (HV) システムが非動作状態の場合、APUと12Vバッテリー間の連携が非常に重要になります。多くの電気サブシステムにおいて、継続的な低電力動作または高速起動機能が必要とされるようになってきており、これには以下のようなものがあります。

- 迅速な起動が求められるソフトウェア駆動型モジュール
- キャビンHVACおよびプレコンディショニング機能
- バッテリー マネジメント システム (BMS)
- テレマティクス、コネクティビティ、および車両セキュリティ システム
- セントリー モード (監視モード) および同様の監視機能

こうしたモードでは、車両のほとんどの機能は12Vバッテリーによって駆動され、必要に応じて、HVパックからバッテリーを再充電するためにAPUが定期的に再起動されます。この協調的な制御戦略により、EVは最新の「常時接続」または「常時オン」機能をサポートしつつ、HVシステムの稼働時間とそれに伴う損失を最小限に抑えることができます。

依然として EV に 12V バッテリーが使われている理由

完全な電気自動車 (BEV) は内燃機関を搭載していないため、エンジン始動時に必要となる大電流も不要となります。その代わりに、通常400V～800Vで動作する高電圧 (HV) トラクションバッテリーを動力源とする完全電動の駆動系によって走行します。

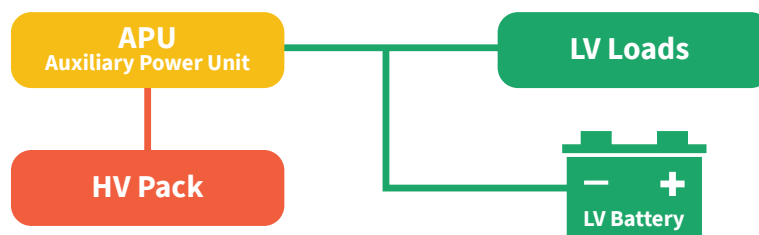


図4 - LV バッテリーが LV 負荷をサポートする集中型 APU アーキテクチャ

こうした変化にもかかわらず、従来型の 12V 補助バッテリーは、特にトラクション システムが非作動状態のときに車両の重要なサブシステムに電力を供給するため、依然として搭載されています。その結果、ほとんどの EV プラットフォームでは、いくつかの重要な理由から、12V の補助バッテリーが搭載され続けています。

安全性:

ほとんどの低電圧システムは、車両乗員の近くに設置されています。こうした電源を 400V または 800V の電源から直接供給することは、特に交通事故で車両構造が損傷する可能性がある状況では、さらなる安全上の懸念を生じさせます。12V バッテリーを使用することで、高電圧システムを重要なサブシステムから隔離できます。一方で、車室内で高電圧を扱う場合には、多重の保護が必要になります。

機能安全: 12V バッテリーは独立した電源としても機能し、故障、シャットダウン、またはメンテナンスのために高電圧バッテリーが切断された場合でも、重要なシステムへの電力供給を維持します。これは、ISO 26262 などの規格で定められた機能安全および障害復旧要件をサポートし、障害発生時においても、安全関連の電子制御ユニットがシステムの可用性を維持しながら、安全な状態を達成および維持することを可能にします。

しかしながら、重量のある 12V 鉛蓄電池の欠点は、その利点を上回り始めています。その結果、最近の一部の EV 設計では、鉛蓄電池をより小型軽量なリチウム系の低電圧バッテリーに置き換え始めていますが、利用できるピーク出力電流は低下します。

EV における 12V 補助バッテリーの限界とは？

小型の補機バッテリーはシステム設計を簡素化できる一方で、EV プラットフォームの進化や電気負荷の増加に伴い、以下のような欠点がより顕在化します。

- **重量および搭載スペース：**小型の補機バッテリーであっても重量増加につながり、限られた車両スペースを占有します。
- **寿命の短さ：**鉛蓄電池は、EV では一般的な部分充電状態での動作にはあまり適しておらず、耐用年数が短くなります (通常は 3 ～ 5 年程度)。
- **保守および交換：**補機バッテリーの故障は、依然として車両整備が必要となる主な原因のひとつであり、信頼性や顧客満足度に影響を与えています。
- **寄生電力損失：**継続的な待機時電力消費はバッテリーの劣化を加速させ、長期間車両を使用しない場合の稼働状況に影響を与える可能性があります。

こうした制約が、補機バッテリーを完全に廃止しようとする動きを促しています。

12V バッテリーを廃止するために必要なこと

12V バッテリーを廃止するには、高電圧のトラクション バッテリー パックから効率的かつ確実に電力を取り出すことができる、堅牢な電源が必要になります。この電源は、通常の動作時、故障時、起動時において、追加の蓄電エネルギーに頼ることなく、すべての低電圧車両サブシステムを継続的にサポートする必要があります。

また、公称電圧 400V および 800V のバッテリー双方のアーキテクチャに対応するため、理想的には 30VDC から 1000VDC までの広い入力電圧範囲を備える必要があります。さらに、重大なシステム障害によって HV バスが遮断された場合でも、安全上重要な機能をサポートするために、入力電圧が低下した状態でも動作を継続できる必要があります。代替となる電源には、車両輸送時や保管時などの長時間のアイドル期間において、熱ストレスを最小限に抑え、トラクション バッテリーの放電を低減するために、高い効率が求められます。部品点数を少なくすることも同様に重要であり、サイズの縮小、信頼性の向上、システム コストの削減につながります。

電気自動車における 12V 補機バッテリーの代替としての μ DC-DC

このアーキテクチャでは、コンバータがすべての動作モードにおける低電圧電力供給の全責任を担います。高集積 μ DC-DC ソリューションは、こうした要件を満たすのに適しています。

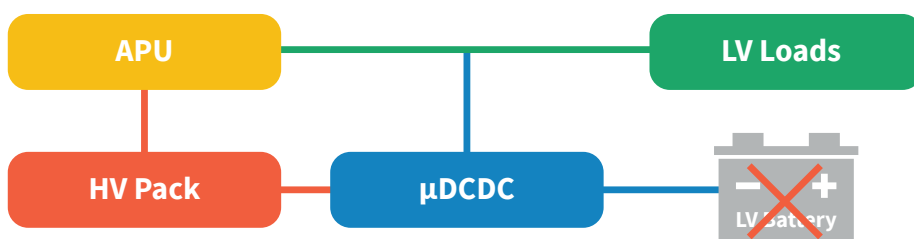


図 5 - バッテリー サポートなしの APU および μ DC-DC LV 電源アーキテクチャ

μDC-DC コンバータは通常、高集積のフライバック電源として実装され、統合された一次側スイッチ、二次側同期整流 (SR)、および疑似共振 (QR) 動作を備えています。この方式により、高効率、高電圧動作、低電磁波放射、および最小限の外付け部品による小型化を実現できます。機能面では、このトポロジは Power Integrations の InnoSwitch™ ファミリーなどで使用されている実績のあるフライバック アーキテクチャをベースとしつつ、EV のトラクション バッテリー電圧から直接動作できるように機能を拡張し、車載グレードの要件を満たすようにしています。

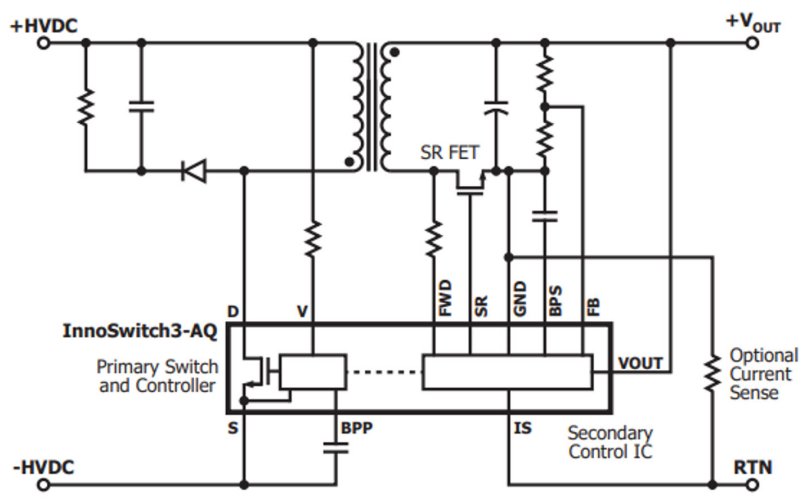


図 6 - InnoSwitch3-AQ フライバック コンバータ

ワイドバンドギャップ デバイスを用いた広入力電圧動作

前述のとおり、補機バッテリーレスアーキテクチャの基本的な要件は、現在および将来のトラクション バッテリー プラットフォームの両方に対応する広い入力電圧範囲で動作できることです。μDC-DC の設計では、コンバータに統合されたワイドバンドギャップ (WBG) パワー スイッチにより、この要件に対応しています。

- 900V GaNデバイスにより、公称電圧400Vのシステムから直接動作が可能
- 1700V SiC MOSFETにより、公称電圧800Vのシステムから直接動作が可能

一次側スイッチを統合することで、μDC-DC 設計では、30VDC から 1000VDC 近くまでの入力電圧で安全に動作できます。この機能により、異常時や劣化した動作状態でも電力供給を継続することが可能になり、機能安全要件および故障復旧モードをサポートできます。

電力性能および効率

μDC-DC コンバータは、補機システムや制御系システムに適しており、通常は最大 100W の出力電力を供給し、定格動作条件下では負荷範囲全体で最大 93% の効率を実現します。

EV 用途においては、常時オンの電子機器の利用が増加しているため、軽負荷時および待機時の効率も同様に重要です。QR 動作では、低電圧時に一次側パワー スイッチをオンにすることでスイッチング損失を低減し、SR 動作では二次側の導通損失を最小限に抑えます。こうした技術を組み合わせることで、幅広い負荷範囲で高い効率を実現し、待機時の電力消費を大幅に削減できます。

QR フライバック コンバータが達成できる以上の高効率が求められる場合は、ゼロ電圧スイッチング (ZVS) を備えたアクティブクランプ フライバック アーキテクチャを採用できます。ZVS を採用することで、補助バッテリー不要の EV 電源アーキテクチャに求められるシンプルさ、絶縁性、および広入力電圧範囲への対応能力を維持しながら、スイッチング損失をさらに低減できます。

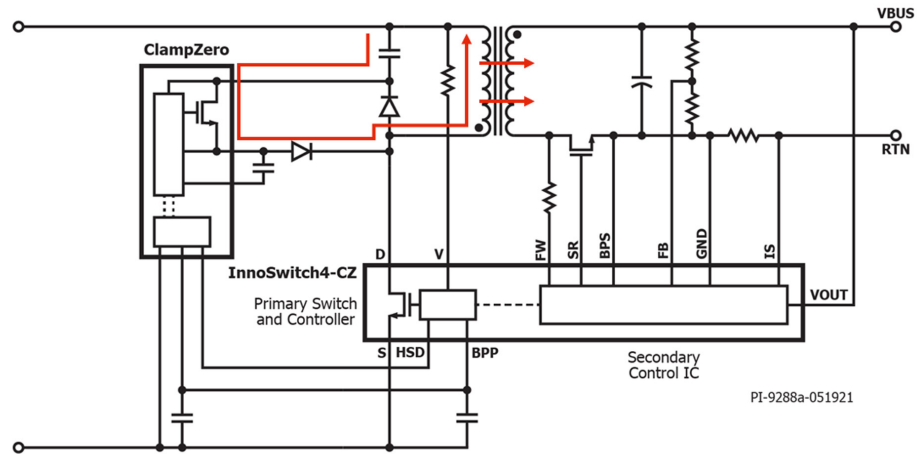


図 7 - ClampZero 搭載 InnoSwitch4-CZ フライバック コンバータ

トランス技術：平面磁性部品の役割

電力密度、製造性、熱特性をさらに向上させるために μ DC-DC コンバータでは平面トランス技術を活用できます。従来の巻線トランスと比較して、平面トランスには以下の利点があります。

- 低背化、小型化により、コンパクトな電源モジュールに対応
- PCB の銅箔層による熱拡散の改善により、熱特性が向上
- パラメータ制御の精度が高く、製品の均一性向上や製造時のばらつき低減につながる
- 自動組み立てに対応しており、大量生産が求められる車載機器の製造に適している

電源がコアサブシステムとなるバッテリーレスアーキテクチャでは、平面磁性部品の機械的な堅牢性と再現性により、システムレベルの信頼性においてさらなる利点が得られます。

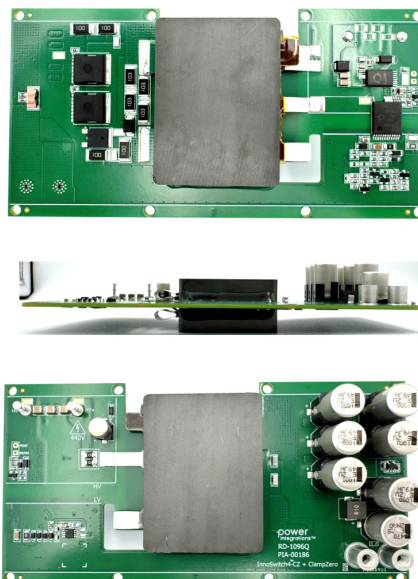


図 8 - 平面トランスベースの μ DC-DC

μDC-DC 中心アーキテクチャのシステムレベルでの利点

補機バッテリーの排除に伴う電気的および安全上の要件に対応することで μDC-DC アーキテクチャは、システムレベルで以下のような利点をもたらします。

- **車両効率の向上:** マルチギガバイト規模の OTA (Over-The-Air) アップデート、常時稼働する映像ベースのセキュリティ機能、リアルタイムのリモート ユーザー インタラクションなどの待機負荷の増加に伴い、アイドル動作時のエネルギー消費に対する要求が高まっています。超低待機消費電力と高い軽負荷効率を備えた μDC-DC コンバータにより、こうしたモードでのエネルギー損失を大幅に削減します。

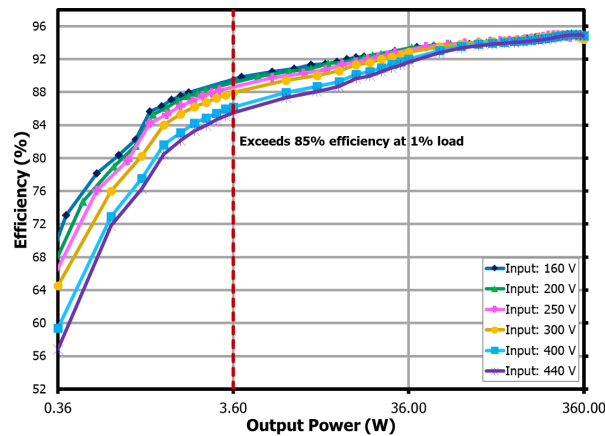


図 9 - 1% 負荷時で 85% を上回る効率:360W フライバック (InnoSwitch4-CZ + ClampZero)

- **低電圧システムへの直接給電:** 広い入力電圧への対応、高速起動、高効率により μDC-DC コンバータは、低電圧システムに完全に電力を供給でき、集中型の補機電源への依存を解消できます。
- **ゾーンアーキテクチャとの適合性:** 車両がゾーン電気アーキテクチャに移行するにつれて、小型の μDC-DC モジュールを車両の各負荷の近くに分散配置できるようになります。これにより配線の複雑さと重量が軽減され、電力分配時の損失も最小限に抑えられます。
- **冗長性および機能安全への対応:** μDC-DC コンバータは、冗長構成またはセグメント構成で実装することができ、機能安全目標をサポートすると同時に、故障時やシャットダウン時におけるシステム動作の制御を可能にします。

従来の APU を超える進化 – 待機時の高効率化

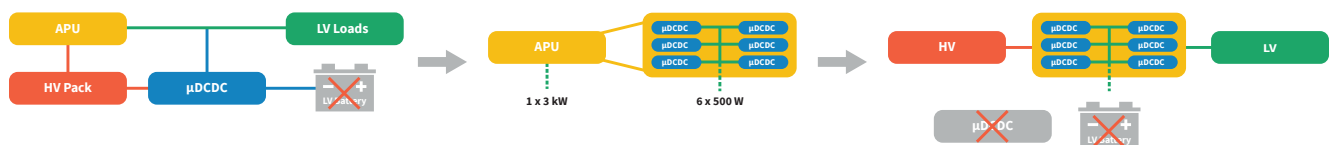


図 10 - 集中型 APU から分散型 μDC-DC アーキテクチャへの移行

従来の補助動力装置 (APU) は、多くの場合 LLC 共振コンバータであり、中～高電力レベル (通常 3kW 程度) 向けに最適化されています。EV の電力負荷が増え続ける中、APU が 5～6kW へ拡張することへの期待が高まっています。集中型アーキテクチャやアクティブドライビングモードには適しているものの、高出力の APU は大型化し、柔軟性が低下し、軽負荷時には効率が著しく低下する傾向があります。特に EV が寿命の大部分を費やすキーオフ時や待機動作時にその傾向が強くなります。

車両の電気アーキテクチャが進化するにつれて、単一の集中型 APU を、並列動作する複数の μ DC-DC コンバータに置き換えることがますます現実的になってきています。この分散型アプローチには、いくつかの利点があります。

- ・ **小型、モジュール式の電源ユニット:** 小型のコンバータは負荷の近くに設置でき、ゾーンアーキテクチャに自然に統合できるため、配電距離とそれに伴う損失を削減できます。
- ・ **あらゆる動作モードでの効率の向上:** 特に待機時と部分負荷動作時において、システム効率が改善されます。必要な数の μ DC-DC 段のみが、その時々に応じて動作するため、軽負荷時に過剰な容量のコンバータを動作させることによる非効率を回避できます。

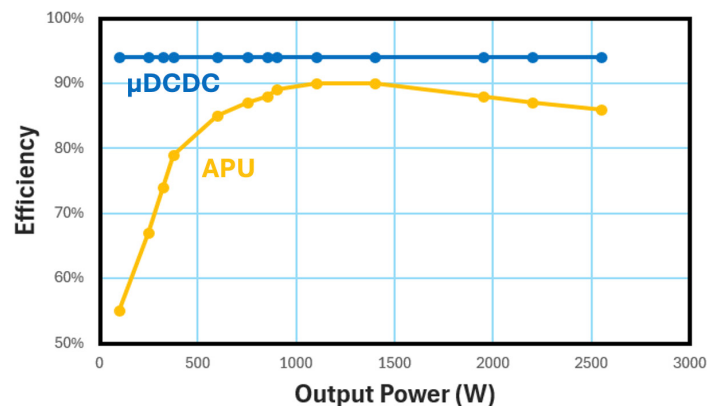


図 11 - μ DC-DC は広い負荷範囲にわたり高効率を維持

- ・ **負荷分散による拡張性:** コンバータの追加により、電力供給能力を段階的に増加させることができ、単一の集中型ユニットを過剰に大型化する必要がなくなります。
- ・ **本質的に備わる冗長性:** 並列アーキテクチャにより、システムの可用性と耐故障性が向上します。
- ・ **システムコストの削減:** 過剰設計を最小限に抑え、共通の構成要素を再利用することで、コスト削減を実現します。

補助電力供給を並列の μ DC-DC コンバータに分散することで、EV アーキテクチャでは、アクティブ状態とキーオフ状態の両方で高効率を維持しつつ、大型化し続ける集中型 APU に伴うデメリットを回避することができます。

アーキテクチャ上の意義

12V 補助バッテリーを排除した EV プラットフォームでは、電源は補助的な要素からアーキテクチャの中核をなす機能へと移行します。高集積化されたワイドバンドギャップ (WBG) フライバックアーキテクチャに基づく μ DC-DC ソリューションは、平面磁性部品と拡張可能な並列展開を組み合わせることで、効率の向上、信頼性の向上、本質的に備わる冗長性、そして次世代のゾーン車両アーキテクチャとのシームレスな適合を実現するための実用的な道筋を提供します。

詳細は
power.comTM
をご覧ください



© 2026 Power Integrations | Power Integrations, the Power Integrations logo, power.com, PowiGaN, and InnoMux are trademarks or registered trademarks of Power Integrations, Inc., in the U.S. and/or other countries. NVIDIA, Google, Microsoft and Meta are trademarks of their respective owners.