

IMA用小型高出力DC-DCコンバータの開発

Development of High Power Density DC-DC Converter for IMA

嶋根 岩 夫*
Iwao SHIMANE

小栗 浩 輔*
Kosuke OGURI

要 旨

小型・高出力化を目標にIntegrated Motor Assist(IMA)システム用 12V DC-DC コンバータを開発した。エネルギー損失を低減するために、高効率なソフトスイッチング回路に加え、低耐圧 FET およびビームリード実装構造のダイオードモジュールにより、コンバータ効率を高めた。また、放熱シミュレーションをおこない効率的に冷却できる部品配置とした。制御部ではデジタルシグナルプロセッサを使ったデジタル制御化により部品を削減し制御部基板を40%小型化した。これらの技術により、従来の DC-DC コンバータに対し出力電流の 60%増加と容積の 17%削減を同時に実現した。

ABSTRACT

A smaller and more powerful 12V DC-DC converter has been developed for Honda's Integrated Motor Assist (IMA) system. Low breakdown voltage FETs and a beam lead diode module in combination with high-efficiency soft switching circuits have reduced energy loss to increase the efficiency of the unit. Heat dissipation simulations were employed to optimize the component layout for efficient cooling. The new unit employs a digital signal processor, and the reduction in component numbers enabled by digital control has resulted in a 40% reduction in the size of the circuit board of the control section. The application of these technologies has enabled the unit volume to be decreased by 17% while output current has been increased by 60% against the former model.

1. まえがき

地球環境の改善や化石燃料節約の観点から自動車に対する低燃費化および低エミッション化の要求がますます強まってきており、これらの要求に応えるために、軽量、コンパクトなIntegrated Motor Assist(IMA)システムを搭載したクリーンで低燃費なハイブリッドカーを世に送り出してきた。1999 年の Insight⁽¹⁾、2001 年の CIVIC Hybrid⁽²⁾に続き、更に性能を向上させた IMA システムを ACCORD に搭載して2004年12月北米で発売した。本稿では、ACCORD Hybrid に搭載した IMA システム用 DC-DC コンバータの小型・高出力化技術について紹介する。

DC-DC コンバータは Power Control Unit(PCU)の一部として高電圧の電力を 12V に変換する役割を担っており、

Fig. 1 のように、高電圧バッテリーと共に車両後部の Integrated Power Unit(IPU)内に配置されている。

通常のガソリン車では、エンジンで駆動されるオルタネータによって発電した電力を、灯火類、オーディオ、ECU などの 12V 電装負荷に供給する。これに対し IMA システムでは、Fig. 2 に示すように DC-DC コンバータを用いて高電

圧の電力を 12V に変換して供給している。車両の減速時には、IMA モータによる回生電力を Power Drive Unit(PDU)で直流にし、DC-DC コンバータで電圧変換して電装負荷に供給する。また、アイドルストップでエンジンが停止した場合でも、高電圧バッテリーからの電力供給が可能である。

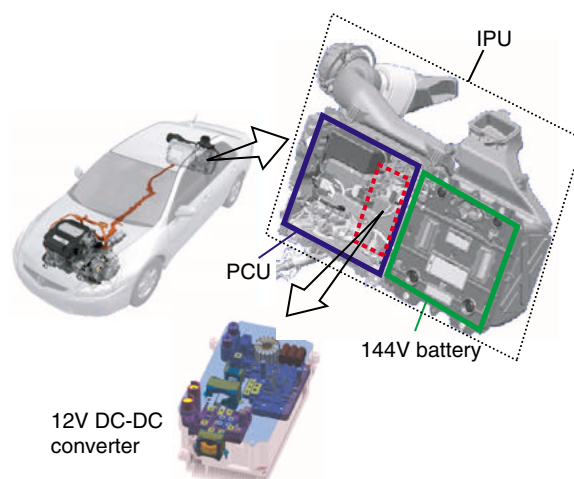


Fig. 1 Layout of DC-DC converter

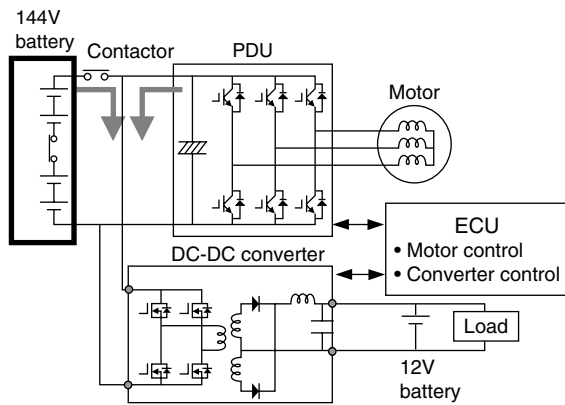


Fig. 2 IMA system

2. 開発目標と達成手法

2.1. 開発目標

ACCORD Hybrid 用 IMA システムの DC-DC コンバータは、低燃費に貢献する電子デバイスや車格にふさわしい快適装備を充実させるために、より大きな出力を求められる。また、ガソリン車と同じボデーに搭載するためコンパクトであることも要求される。そこで、従来の CIVIC Hybrid 用 DC-DC コンバータをベースに、開発目標を下記のように定めた。

- (1) 出力電流 + 60%
- (2) 容積 - 15%

2.2. 達成手法

DC-DCコンバータの小型高出力化を達成するために、以下の手法を検討した。

(1) 素子の損失低減による高出力化

素子の損失を低減することにより同一電流に対するジャンクション温度が低下するため、許容電流を増すことができ高出力化できる。

(2) 冷却性能向上による小型化

素子からの熱を放散するヒートシンクの冷却性能を向上させることにより、発熱部品の集中配置を可能にして小型化を図る。

(3) 部品削減と高密度パッケージによる小型化

制御回路方式やラジオノイズ抑制方法を変更することにより、部品数を削減するとともに素子の実装密度を上げて小型化を図る。

3. 小型高出力化技術

3.1. 素子の損失低減による高出力化

3.1.1. スイッチング用 FET

高圧バッテリーと PDU に並列に接続されている Hブリッ

ジ構成のスイッチング回路には Field Effect Transistor (FET)を採用している。この FET は耐圧が低いほどオン抵抗が小さく、損失を小さくできる。しかし、FET の耐圧を下げると、モータで発生する誘起電圧が上昇した場合に FET に印加される電圧が素子耐圧を超えてしまう恐れがある。これを解決するために過電圧保護回路の高速化を図った。

Fig. 3 に DC-DC コンバータへ入力される電圧波形と FET のスイッチング波形を示す。入力電圧が過電圧保護回路の作動電圧まで上昇すると、回路の応答時間を経て FET のスイッチングが停止する。

過電圧保護回路において、スイッチングノイズに対するタフネスを向上した基板設計とフィルタ定数の見直しをおこない応答時間の短縮を図った。その結果、スイッチング電圧の上昇を抑えることができ、低損失な特徴を持つ低耐圧素子を使用することが可能となった。FET のオン抵抗を Fig. 4 に示すように、従来に対し 47%低減し、これに比例する損失を下げることができた。

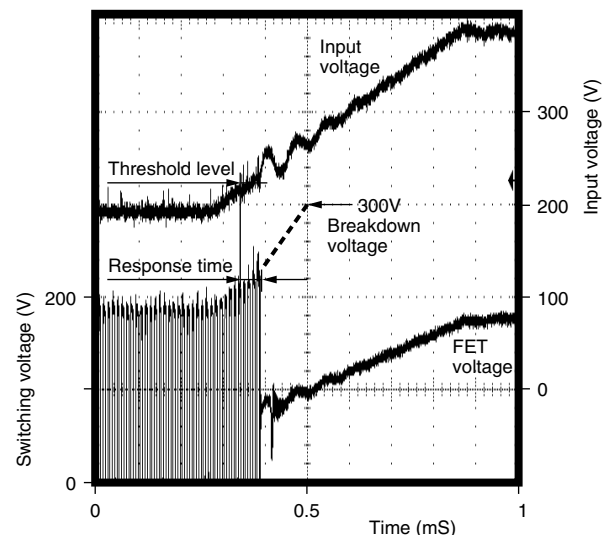


Fig. 3 Waveform of FET showing operation of voltage protection

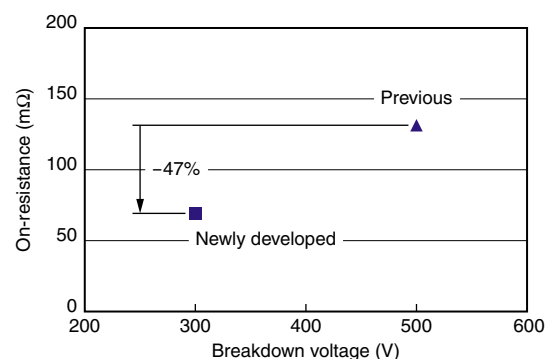


Fig. 4 Reduction of on-resistance

3.1.2. 出力整流ダイオード

出力ダイオードはチップサイズをモジュールに搭載できる限界まで拡大することで電流密度を下げるができる。この技術により順方向電圧は同一電流において従来品の0.95 V から 0.85 V まで小さくすることができ、Fig. 5 に示すようにダイオードモジュールの損失は 11%低減した。ダイオードの損失は順方向電圧と出力電流の積で表せることから、順方向電圧の低減は素子の発熱を少なくできモジュールを小型化することができる。

更にダイオードモジュールは、Fig. 6 に示すビームリード構造による実装をおこなった。ダイオードチップのアノードとアノード端子との接続をワイヤーボンディングからビームリード方式にすることで薄い銅板で大電流を均一に流し、ワイヤの場合に比べてチップの鉛直方向の高さを抑えることができた。

以上のように低耐圧のFETの採用とダイオードのチップサイズ拡大で損失を低減することにより発熱を抑え出力電流を増すことができた。ビームリード構造の効果も合わせて、従来と同一のモジュールサイズで出力電流を 75A から 120 A へ向上することができた。

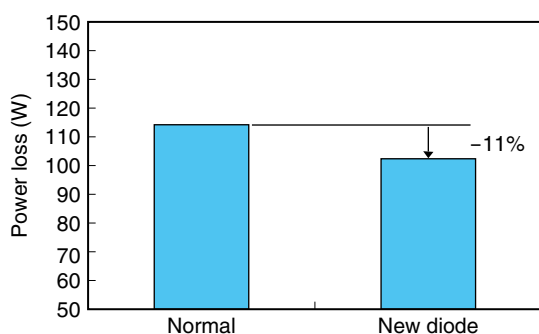


Fig. 5 Power loss characteristics of diode

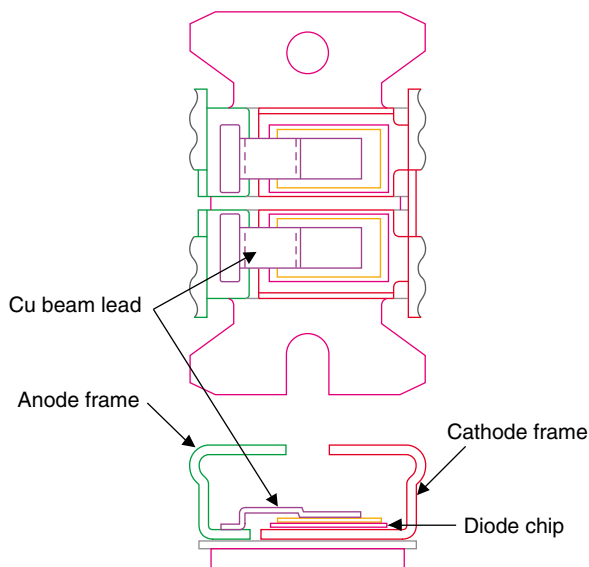


Fig. 6 Structure of diode module

3.2. 冷却性能の向上

冷却性能の向上を目的として発熱体の配置およびヒートシンクの形状を検討した。

3.2.1. 発熱体の配置

冷却を要するデバイスは、スイッチング素子であるFET、部分共振制御に必要な共振チョーク、電流経路となるメイントランス、出力ダイオード、出力チョークである。これらの部品のヒートシンクへのレイアウト、ヒートシンクベースの厚さ、フィン長さ、およびフィンピッチが放熱性に与える影響についてシミュレーションをおこない、熱抵抗の低減を検討した。

Fig. 7 に DC-DC コンバータを上面から見た熱分布を示す。FET は4つの素子の間隔を互いの熱が干渉しないように配置し、温度上昇を抑えた。また、出力ダイオードは、フィンを有効に活用するため、風上側へ配置した。なお、出力ダイオードについては熱を分散させるために、ヒートスプレッタをモジュール下面に配し、放熱能力を向上させた。

3.2.2. ヒートシンクの形状

ダイカストにより成型されるヒートシンクは、放熱性能を高めるために、放熱フィンの表面積を従来に対し 30%拡大した。また、ラジオノイズ対策と組立工数削減を目的として、ケースとフィンの一体化を図った。この結果、Fig. 8 のようにヒートシンク金型深さが 2 倍以上となり、成型時に気泡の発生が予測された。

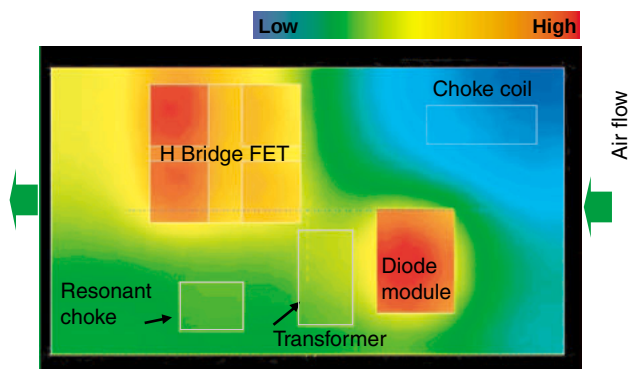


Fig. 7 Simulation of temperature distribution

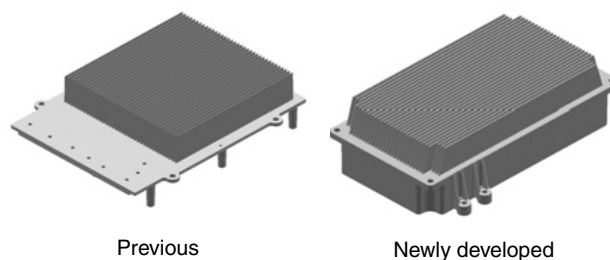


Fig. 8 Case design

Fig. 9 に湯流れのシミュレーション結果を示す。対策前では、湯が壁に集中して流れることから湯路が長くなり、フィンの一部へ湯が回らず空気層が発生することが確認できる。これに対し、ゲート形状の変更と、フィンの両端にスロープを設けることにより、湯流れが改善されている。

3.3. デジタル制御による小型化

従来から採用している高効率なソフトスイッチング方式⁽³⁾の制御を Digital Signal Processor(DSP)を用いてデジタル化⁽⁴⁾することで制御基板を小型化した。

3.3.1. 位相シフト制御

DC-DC コンバータは Fig. 10 に示すように、軽負荷から定格出力 120A までは定電圧制御、120 A 以上の過電流領域は出力電圧を小さくするように電圧垂下制御をおこなう。各電圧制御は ECU からの指令に基づいて、目標出力電圧を決定し、その電圧になるように PID 制御で FET(Q1 から Q4)をスイッチングする。制御回路は Fig. 11 に示すように 4 個の FET を H ブリッジに構成している。Q1 のスイッチング位相を基準に Q4 の位相をシフト⁽⁵⁾、⁽⁶⁾す

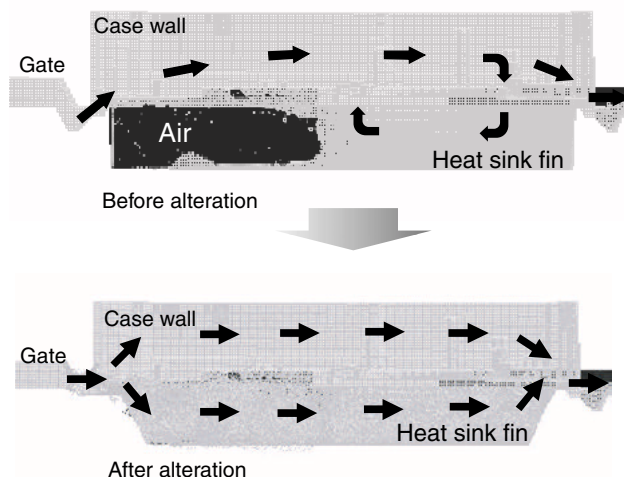


Fig. 9 Flow simulation of molten model

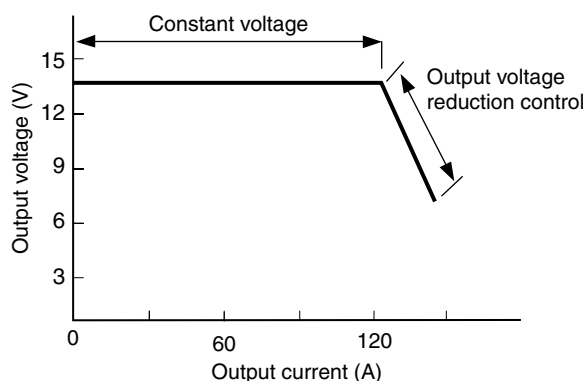


Fig. 10 Output characteristics

ることで、電流は Q1 から Q4 ヘトランスを介して流れる。Q2, Q3 も Fig. 12 に示すタイミングで動作しトランスに電圧を発生させる。この電圧を出力ダイオードによって全波整流することで直流出力を得る。このように出力の電圧・電流の状況を把握して、電圧制御、電流制御をおこなっている。

3.3.2. デジタル化

これらの制御を汎用のアナログ位相シフト電源 IC で構成すると、自己保護が働いた場合にラッチ動作のため停止状態から復帰しないなど車両用として使用するのには不都合があった。この場合ラッチ解除回路を追加するなど、外付け部品が増加してしまう。このためカスタムで専用の IC を製作する必要があった。DSP を用いて位相シフト制御をおこなう場合、出力電圧・電流を AD コンバータから入力し、目標の出力電圧になるように FET の位相をデジタル制御する。

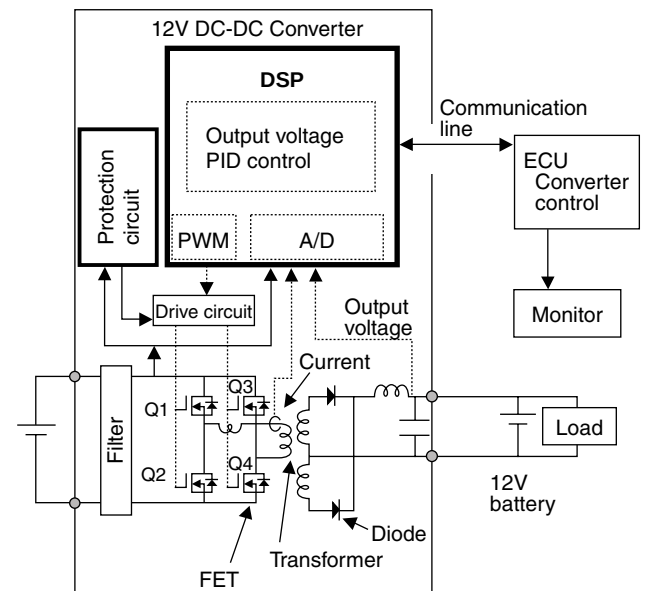


Fig. 11 Control block

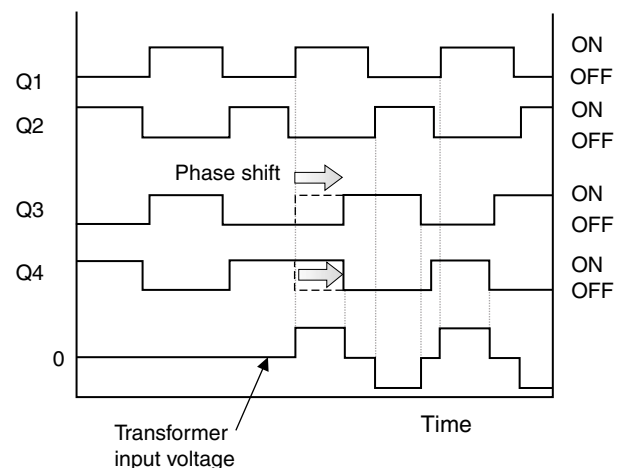


Fig. 12 FET switching pattern of phase shift control

そのほかにアナログ回路では外付け部品で構成することが必要であった車両 ECU からの指令に基づくシーケンス動作、ECU への冷却要求、警告灯点灯要求などの情報通信や保護動作を DSP によりプログラムでおこなうことができる。

更に DC-DC コンバータの起動時、停止時の電流の変化率あるいは電圧の変化率を自由に設定でき、車両の高圧バッテリーのマネジメントに合わせた自在なセッティングが可能となった。Fig. 13 にソフトスタート、ソフトストップの電流波形を示す。

なお、アナログ回路で車両用電源システムとしての必要な動作を構成すると、回路部品の定数バラツキや温度特性などを考慮することで回路規模が大きくなっていた。デジタル制御はアナログ回路で構成した場合に比べ、簡便な回路で多様な動作を精度良く実現できる。同一の制御仕様で比較すると、アナログの約500点に対しデジタルでは約300点で済むことになる。以上の部品点数削減によりFig. 14 のように基板を小型化することができた。

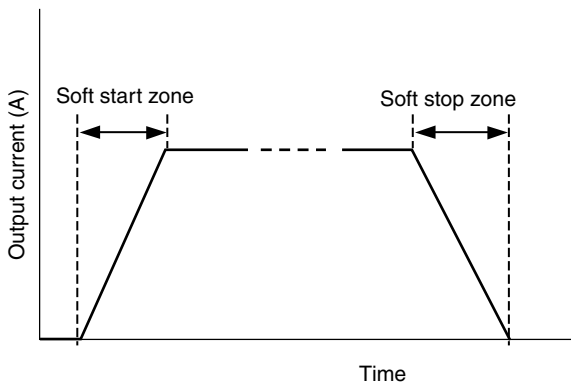


Fig. 13 Start-stop characteristics

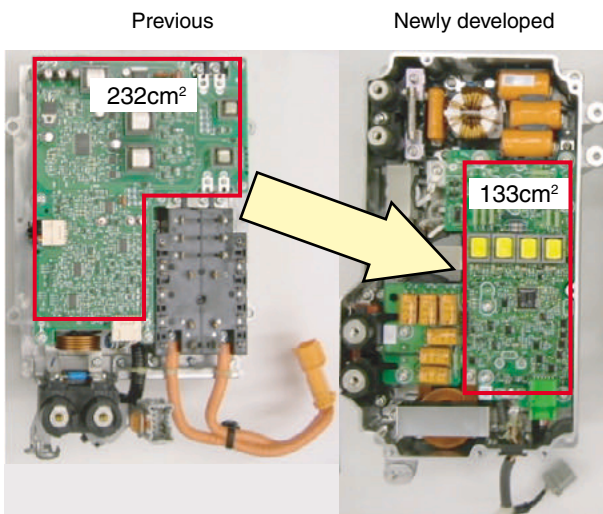


Fig. 14 Reduction of circuit board size

3.4. ラジオノイズ防止フィルタの小型化

DC-DCコンバータのスイッチングノイズが車載ラジオに与える影響を最小限としてノイズフィルタを削減するために、スイッチングノイズの高調波を AM ラジオの放送搬送波に一致させる構成とした。スイッチング周波数は国内外の放送搬送波と合致させている。Fig. 15 に放送搬送波と妨害波を合致させた模式図を示す。ノイズの周波数が放送搬送波のキャリアと同一であればラジオはノイズを検波しないので音声信号にノイズが混入することはない。また、スイッチング周波数はDSPで使用しているクロック周波数36 MHzを分周しているため高精度であり、放送搬送波から外れることによるラジオの音声への影響をなくしている。以上より、フィルタへの依存度を下げることができ、大型のノイズフィルタ部品を削減することができた。

4. 小型高出力化の効果

DC-DC コンバータの小型高出力化の結果を Table 1 に示す。出力電流を60%増加させた上で、容積は逆に17%削減することができた。また Fig. 16 に示すように、従来に比較して常用域で約 1.5%効率を向上している。

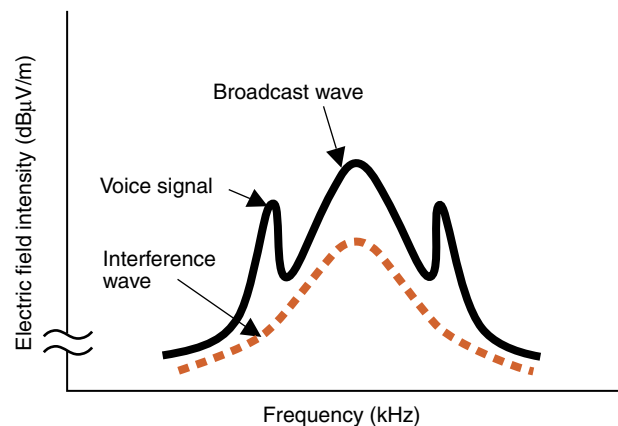


Fig. 15 Interference wave characteristics

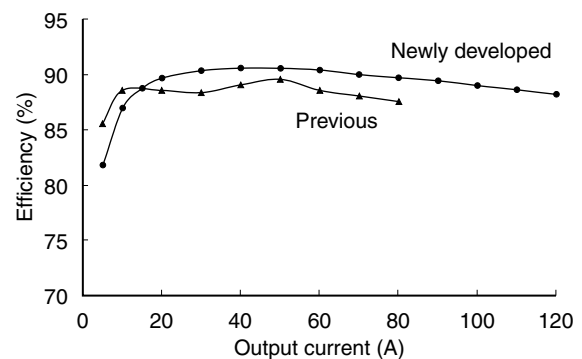


Fig. 16 12V DC-DC converter efficiency

Table 1 Specifications of DC-DC converter

	Previous	Newly developed
Output current (A)	75	120
Dimensions (mm)	178 × 60 × 235	150 × 50 × 250
Volume (cm ³)	2510	2100
Current density (mA/cm ³)	30	57

5. まとめ

ACCORD Hybrid の IMA システム用 DC-DC コンバータの開発にあたり、以下のように小型高出力化を図った。

- (1) 低耐圧 FET およびビームリード構造のダイオードモジュールによりコンバータ効率を高めた。
- (2) 放熱シミュレーションをおこない効率的に冷却できる部品配置とした。
- (3) DSP を使ったデジタル制御化により部品を削減し制御部基板を 40% 小型化した。
- (4) スイッチングノイズの高調波を AM ラジオの搬送波と一致させ音声信号への影響を最小にすることによりフィルタ部品を削減した。

その結果、従来の DC-DC コンバータに対し、出力電流の 60% 増加と容積の 17% 削減を同時に実現した。

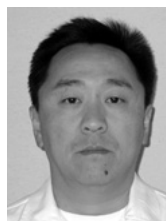
謝 辞

本開発にあたり、新電元工業株式会社のご協力を頂きましたことを紙面を借りて厚く御礼申し上げます。

参考文献

- (1) 福尾幸一, 藤村 章, 斉藤政昭, 角田和彦, 瀧口士郎: 超低燃費ハイブリッドカー「インサイト」の開発, HONDA R&D Technical Review, Vol.11, No.2, p.1-8
- (2) 松木正人, 若城輝男, 神山敏宏, 佐藤利行, 賀来嘉昭, 神田正浩: ハイブリッドカー「Civic Hybrid」用パワートレインの開発, Honda R&D Technical Review, Vol.14, No.1, p.39-48
- (3) 相高和彦, 細田正晴, 野村拓哉: Civic Hybrid 用小型インテリジェントパワーユニットの開発, Honda R&D Technical Review, Vol.14, No.2, p.83-90
- (4) 押方哲也: DSP によるデジタル電源の実現, 新電元工業 技術情報ファイル「PASSWORD」, Vol.04-13(2004)
- (5) 松田善秋: 高効率フルブリッジ型 DC/DC コンバータ, 新電元工業 技術情報ファイル「PASSWORD」, Vol.02-15(2002)
- (6) 原田耕介, 二宮 保, 顧 文建: 位相制御コンバータ, スイッチングコンバータの基礎, 東京, コロナ社, 1999, p.38

■ 著 者 ■



嶋根 岩夫



小栗 浩輔