

# 新型NOAH/VOXY HEV向け DC-DCコンバータの開発 Development of DC-DC Converter for the New NOAH/VOXY HEV

種谷 公作<sup>\*1</sup> 平林 信夫<sup>\*1</sup> 初井 知康<sup>\*1</sup> 成瀬 英典<sup>\*1</sup>  
Kosaku Taneya Nobuo Hirabayashi Tomoyasu Momii Hidenori Naruse

\*1 エレクトロニクス事業部 技術部

**要旨** 電子化、電動化の進展に伴う消費電力増に貢献するため、「大電流」、「小型」をコンセプトとした次世代DC-DCコンバータを開発した。また従来車両側で有していた「プリチャージ機能」をDC-DCコンバータ内に追加することでシステムコストダウンに貢献した。その概要について紹介する。

キーワード: 大電流、小型、プリチャージ機能

**Abstract** We have developed a next-generation DC-DC converter with the concepts of "Larger current" and "Smaller" in order to contribute to the increase in power consumption accompanying the progress of computerization and electrification. In addition, adding the "Pre-charge function" normally installed on the vehicle to the DC-DC converter contributes to system cost reduction. In this article describes the outline of this development.

Keywords: large current, down-sizing, pre-charge function

## 1 はじめに

年々厳しくなる各国の環境規制に対応するため、各自動車メーカーは、ハイブリッド車(HEV)や電気自動車(BEV)などの電動車開発に力を入れている。

その中で、満を持してトヨタ自動車(株)からMサイズミニバン 新型 NOAH/VOXY が市場に投入された。新型NOAH/VOXYは、Mサイズミニバンで23.4km/L(WLTCモード<sup>\*</sup>)の世界トップクラス(当社調べ)の低燃費と高出力の動力性能、先進装備を投入し、安全性能の充実が特徴である。

開発当初から燃費性能と自動車の電子化と電動化の進展に伴う消費電力増に貢献するため、「小型」「大電流」をコンセプトとして技術開発に取り組み、従来品に比べ大幅な性能向上を達成した(表1)。また従来車両側に搭載されていた車両起動時に発生する過電流からハイブリッドシステムの回路を保護するための「プリチャージ機能」をDC-DCコンバータに追加することでシステムコストダウンに貢献した。

本稿ではこれらを達成した技術アイテムについて紹介する。

<sup>\*</sup>燃費を計測する世界統一試験サイクル(World wide-harmonized Light vehicles Test Cycle)

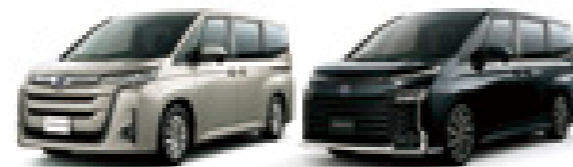


写真1 新型NOAH/VOXY外観<sup>[1]</sup>  
Photo1 Appearance of New NOAH/VOXY

表1 従来品との性能比較  
Table1 Comparison of main performance

	従来品	YARIS HEV	開発品	向上率 (従来品比)
コンバータ世代	Gen4	Gen5	Gen5	—
出力電流	100A	100A	150A	50%向上
重量	416g/kW	334g/kW	333g/kW	20%減
体積	0.5L/kW	0.29L/kW	0.33L/kW	34%減
プリチャージ機能	なし	なし	あり	—

## 2 DC-DCコンバータとは

DC-DCコンバータとは、高圧バッテリーを14Vに変換し低圧バッテリーとアクセサリへ電力供給する電動車特有の電源装置である。



図1 DC-DCコンバータの機能  
Fig.1 Function of DC-DC Converter

## 3 大電流、小型化

DC-DCコンバータ開発において大電流、小型化を実現するためには熱、電磁ノイズ<sup>\*</sup>の課題を解決する必要がある。

2020年にDC-DCコンバータのGen5の最初の製品として量産化したYARIS HEV向けDC-DCコンバータで大電流通電部の銅板厚を最適化する技術(部分厚銅)を確立した。本開発ではその技術の継承と放熱性能アップにより、従来品の100Aから150Aへの大電流化を実現した。

電磁ノイズ性能においてはノイズ影響を受けにくい出力部の配線を検討し、ノイズ抑制を実現した。

以降で詳細について紹介する。

<sup>\*</sup>DC-DCコンバータから発生する電磁ノイズで、ラジオ放送波に混信することでラジオ聴感の悪化を招く

### 3.1 発熱の抑制

大電流化に伴い大電流通電部の発熱が問題となる。

本開発では、YARIS HEV向けで開発した部分厚銅技術を応用し、大電流が流れる厚銅部の断面積を最適化することで、発熱を抑制した。またトランス、コイルは厚銅部をコアで挟むことで構成しており、厚銅部の投影面積を小さくすることでトランス、コイルのサイズアップを最小に抑えることができた(図2)。厚銅部分はアルミダイカストケースに放熱シートを介して放熱させるため(図3)、放熱シートの性能アップにより100A製品と同等体格にて150A製品を実現した。

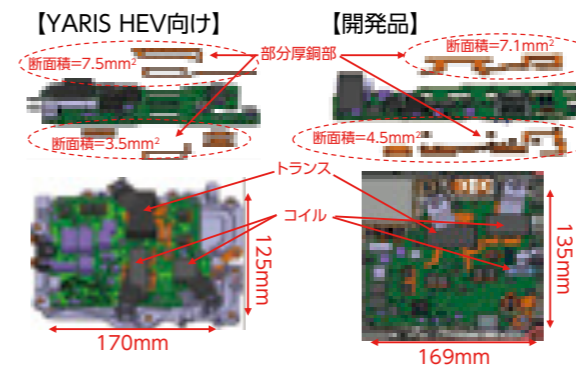


図2 YARIS HEV向けと開発品の構造比較  
Fig.2 Structure for YARIS HEV and developed products

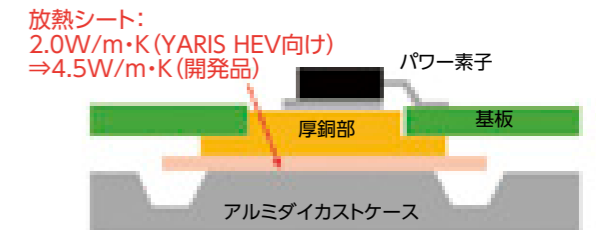


図3 放熱構造  
Fig.3 Heat dissipation structure

### 3.2 電磁ノイズレベルの抑制

大電流化により発生ノイズが大きくなり、ノイズ対策部品が大型化する。

本開発ではCAE<sup>\*</sup>を駆使し磁界を視える化し、最適レイアウトによる対策で体格アップを抑制した。

<sup>\*</sup>Computer Aided Engineering

#### 1) 伝導ノイズ

電磁ノイズは半導体のスイッチングにより発生し、交流成分が出力電流に重畳することで伝導ノイズとして車両に漏洩する。この伝導ノイズが車両アンテナに結合しラジオの聴感に悪影響を及ぼす。伝導ノイズの要因には、以下の2つが挙げられる。

- ・基板パターンを伝搬するノイズ……①
- ・磁界による空間結合により伝搬するノイズ……②(図4)

①は出力フィルタ(L1,C1,L2,C2)で交流成分を減衰させて対策できるが②は空間結合を回避するレイアウトが求められる。特に出力段ループ配線との結合はフィルタ後のため減衰ができず注意が必要である(図5)。

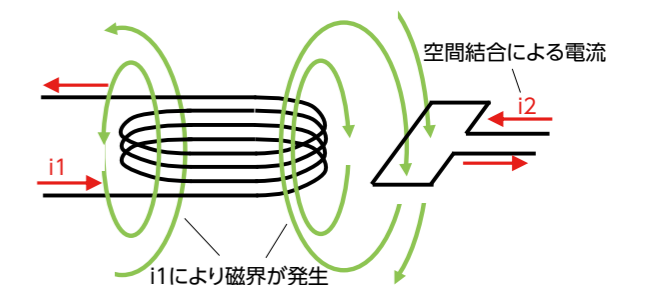


図4 磁界によるノイズ伝搬  
Fig.4 Noise propagation by magnetic field

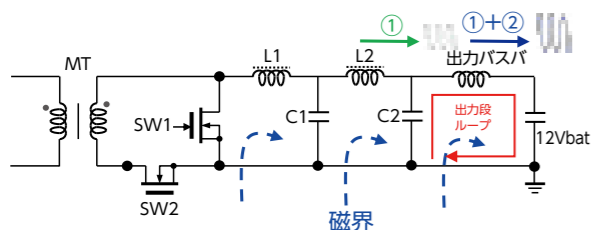


図5 出力フィルタ構成  
Fig.5 Output filter configuration

## 2) 磁界の見える化による最適レイアウト設計

3次元電磁界シミュレーションにより磁界を視える化し、伝導ノイズ発生要因の分析と対策検討を行った。

先行開発時の3次元磁場解析結果を図6に示す。

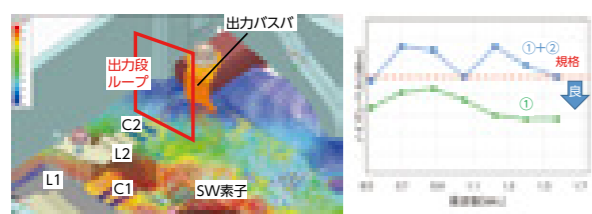


図6 3次元磁場解析結果(解析ソフト:HFSS)  
Fig.6 3D magnetic field analysis result

解析の結果、伝導ノイズは①のみでは規格を満足するも、②の重畳により8dB規格を未達。磁場解析結果より、スイッチング素子から出た磁束が出力フィルタ後の出力段ループ(赤枠線)に鎖交し、伝導ノイズが悪化することがわかる。

磁界結合はループ面積と鎖交磁束強度に比例するため、本開発ではバスバを磁界の弱いケースに併走し、出力段ループ面積を最小にする対策を実施した(図7)。

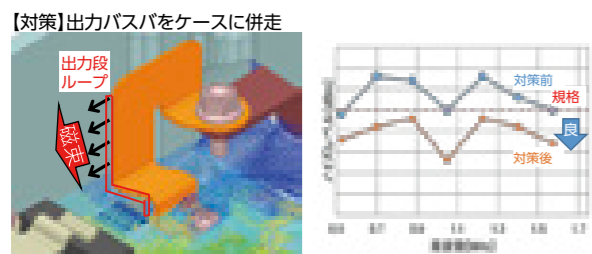


図7 3次元磁場解析結果(対策後)  
Fig.7 3D magnetic field analysis result "after measures"

対策の結果、10dB以上の効果を確認。実機でも同等の効果を確認でき、規格を達成した。

磁界の見える化からデッドスペース活用により、体格アップ無しで「小型化」に貢献し、バスバ形状変更のみで「低コスト」の対策を実現した。

## 4 双方向出力化によるプリチャージ機能の追加

プリチャージ機能とは車両起動時、高圧バッテリーとHEVシステムを接続する際に発生するPCUコンデンサへの突入電流から回路を保護するため、接続前に予めPCUコンデンサを高圧バッテリー電圧まで充電する機能である。

従来品では車両側J/B(ジャンクションボックス)内に抵抗/リレーを設け電流制限をかけながらPCUコンデンサを充電している(図8)。

開発品では同一機能をDC-DCコンバータに追加することで従来品の抵抗/リレーを削除しシステムコストダウン、J/B体格ダウンに貢献した(図9)。

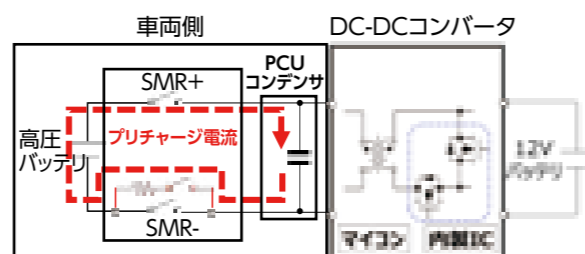


図8 プリチャージシステム(従来品)  
Fig.8 Pre-charge system (conventional vehicle)

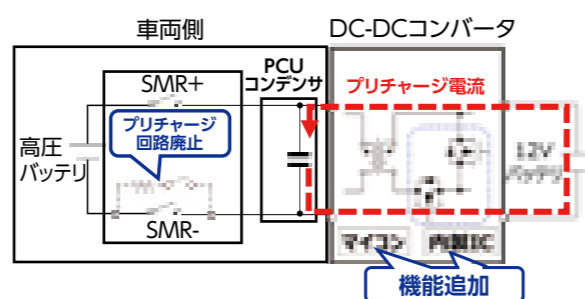


図9 プリチャージシステム(開発品)  
Fig.9 Pre-charge system (development vehicle)

## 4.1 昇圧機能

プリチャージを行うには、従来の降圧(高圧→低圧)動作に昇圧(低圧→高圧)動作を追加する必要がある。Gen4までの低圧出力側の整流部には、制御の容易性、体格とコスト低減の観点からダイオード整流を採用していた。このダイオードは単方向スイッチになるので、逆方向電流を流すことができない。しかし、一昨年に販売されたYARIS HEV向けに搭載されたDC-DCコンバータ以降は高効率化を果たすために、整流部への同期整流の採用により、双方向スイッチであるMOSFETへ変

更になった(図10)。つまり、電力変換に必要なアイテムが揃っているので、如何にコスト、体格アップ無しに制御できるかが課題となる。

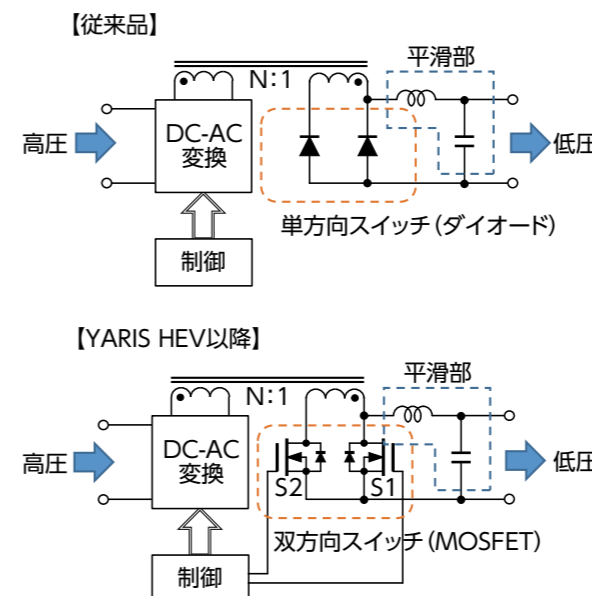


図10 整流部への双方向スイッチの採用  
Fig.10 Adoption of bidirectional switch in rectifier circuit

## 4.2 プリチャージ機能の特異性

プリチャージ動作の特異性は、単純な双方向の電力変換動作とは違い、走行系インバータの高容量コンデンサへの0Vから目標電圧への充電動作となるので、充電初期は出力短絡と同じ状態が継続する。そのため、通常の電流制限の制御では電流制限ができず、増大し続けて、最終的には素子を破損してしまう(図11)。また、低圧から入力される電流を制限する制御となるので、従来からの降圧動作で使用している電流検出が高圧側にあるのに対して、低圧側にも電流検出する機能を別に追加する必要がある。

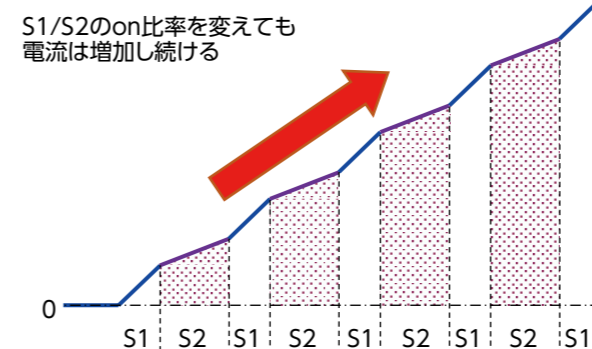


図11 低出力電圧時の平滑部のL電流  
Fig.11 Smooth part L current at low output voltage

## 4.3 動作モード

DC-DCコンバータの出力平滑(交流成分除去)部の動作モードとしては大きく以下の2つが挙げられる(図12)。

- ・不連続電流モード  
……動作周期毎に電流が0Aに戻る状態
  - ・連続電流モード  
……動作周期毎に電流が0A以上の電流値に戻る状態
- これらの動作モードの特徴を表2にまとめる。

表2 動作モードの特徴  
Table2 Features of operation mode

モード	メリット	デメリット
不連続電流	・制御速度の速さ不要 ・電流検出は条件次第で不要	・伝達電力が小さい ・電力変換効率が悪い
連続電流	・伝達電力が大きい ・電力変換効率が良い	・制御速度の速さが要求される ・電流検出が必須

プリチャージは限られたコンデンサ容量への充電のみなので、大きな伝達電力は必要ない。また、制御速度を上げるには、それに対応したハード構成とソフト側の処理の構成変更が必要になる。

これらの要件と先の課題を考慮して不連続電流の動作モードを採用することにした。

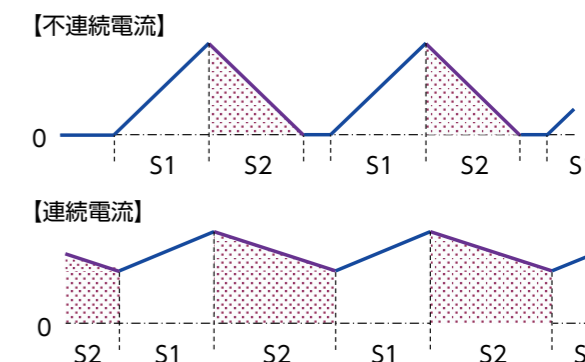
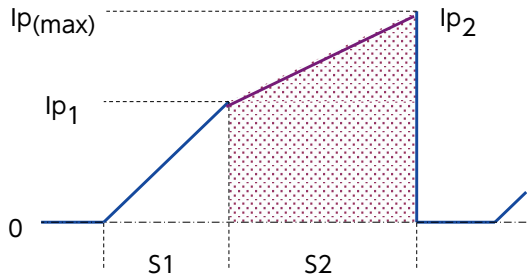


図12 出力平滑部のL電流の動作モード  
Fig.12 Operation mode of L current

## 4.4 不連続制御

プリチャージ動作は出力平滑部のLに低圧側からの充電→高圧側への放電を繰返すことで電力伝達を行っている。その充電過程で低圧側電圧と高圧側電圧の関係が常に変化するが、出力平滑部のLの電流波形を見ると、大きく2つの状態に分けられる(図13)。

【プリチャージ前期:  $0 \leq V_H / (N \cdot V_L) \leq 1, (I_{p1} < I_{p2})$ 】



【プリチャージ後期:  $1 < V_H / (N \cdot V_L), (I_{p1} > I_{p2})$ 】

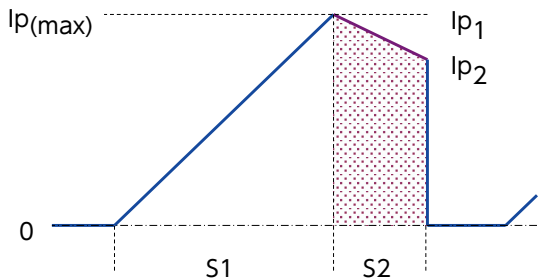


図13 高圧側電圧/低圧側電圧による平滑部のL電流の変化  
Fig.13 Change in L current of smooth part

- ・プリチャージ前期:  $0 \leq V_H / (N \cdot V_L) \leq 1 \Rightarrow$  電流増加
- ・プリチャージ後期:  $1 < V_H / (N \cdot V_L) \Rightarrow$  電流減少

先に述べたように、後期は高圧側へ放電する期間で電流は減少するのに対して、前期は増加し続けるので、動作周期毎に休止期間 (S1:off, S2:off) を設けることで確実に0Aに戻す不連続電流にする制御とした。

後期においても同様に休止期間を設けることで出力平滑部のLの電流は直流成分を持つことがなくなるため、S1、S2のon期間、休止期間のみで電流を管理することができ、低圧側の電流モニタを不要にすることができた。

#### 4.5 マップ制御

降圧動作時の制御は状況に合わせて常時行っているが、昇圧動作の内のプリチャージ動作に限定するならば、入力電圧や負荷変動の頻度が小さいので、常時行う必要性はない。制御ソフトのメモリ量が軽いマップ制御とした。予め低圧電圧、高圧電圧を条件に制御値 (S1のon期間、S2のon期間) を計算したマップを作成し、制御時に条件に合う制御値を読み込み制御する (図14)。

$V_L < V_L \leq U_L$	$d1(FWD)$	低圧制御Duty	$d2(FWD)$	0	1		
8.11	8.6	0.188	0.398	0.679	0.234	0.494	0.49
8.6	9.1	0.153	0.407	0.657	0.221	0.531	0.477
9.1	9.6	0.134	0.303	0.634	0.217	0.492	0.469
9.6	10.1	0.118	0.310	0.643	0.219	0.373	0.511

高圧電圧制御 S1制御Duty S2制御Duty

図14 制御マップ  
Fig.14 Control map

本開発の結果、従来回路のままコストアップ無しに「プリチャージ機能」を追加し、従来品の抵抗/リレー削除によるシステムコストダウン、J/B体格ダウンに貢献した。

## 5 まとめ

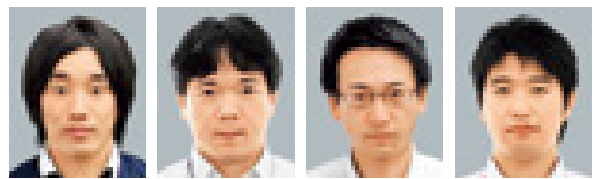
今回の開発では開発当初から「小型」「大電流」「プリチャージ機能追加」をコンセプトに技術開発を進めてきた結果、当初の目標を上回る性能を達成することができた。また今回開発した技術アイテムは今後のDC-DCコンバータにも展開される予定である。

最後に、本開発に当たり多大なご指導・ご協力をいただきましたトヨタ自動車(株)、(株)デンソーをはじめとする社内外の関係部署の皆様へ深く感謝いたします。

### ■参考文献

[1]トヨタ自動車(株)ホームページ

### ■著者紹介■



種谷 公作 平林 信夫 初井 知康 成瀬 英典

## 開発の経緯と開発者の思い

従来品から大幅な小型、大電流化を実現する必要があったため、要求性能成立に苦労しました。特にノイズ対策には体格、コストがアップするアイテムばかりの中、室全体で議論することで対策の方向性も定まり、体格、コストアップ無しで性能を満足することができました。

DC-DCコンバータへのプリチャージ機能追加はトヨタ自動車(株)でも初めての採用であるため、商品性を確保できる最適な要求仕様/制御を協業で開発することで機能を実現することができました。その甲斐もあり、トヨタ自動車(株)より「技術開発賞」を頂くことができ、技術貢献できたことを大変うれしく思っております。

今後もお客様に喜んでもらえる製品開発に取り組みたいと思います。