

チャージポンプ及び、村田製作所のチャージポンプモジュール

チャージポンプ(Charge pump)は、コンデンサと半導体スイッチを組み合わせることによって入力電圧を昇圧もしくは降圧、反転させることが可能な電圧変換方式である。

図1に一例として最も簡単な降圧形のチャージポンプを示す。図1に色分けされた各スイッチが交互に固定のオン時間でオン・オフすることで出力電圧(V_{OUT})= $1/2$ 入力電圧(V_{IN})の電圧変換可能である。この電圧変換比率は定倍であり、コンデンサとスイッチの接続数によって、電圧変換比率を変更することが可能である。

チャージポンプはオープンループ制御であり負荷電流の増加に伴い、出力電圧が低下するドループ特性を持つ。

また図1に示すようにインダクタを必要とせず、コンデンサと半導体スイッチによって回路を構成できる。

一般的に電源を構成する部品で磁性部品が最も背の高い部品となりやすいことや、電源サイズに対して占める割合が大きいため、インダクタを使用しないチャージポンプでは、小形、低背の電圧変換器が実現可能である。一方でチャージポンプは電荷を離散的に出力コンデンサ (COUT) に供給する方式であるため、定常的な出力負荷に対してはCOUTから電力を供給する期間が存在することになり、結果的に出力リップル電圧が大きくなる。これを解決するためには大形の大容量コンデンサもしくは多数のコンデンサを搭載する必要があり、部品点数の増加や電源回路面積の増加を招く。加えて、放電されたコンデンサに電荷を再充電する期間において過渡的なスパイク電流が流れるため各素子にストレスがかかる。また Charge re-distribution Loss というコンデンサ間の電荷伝送に伴うチャージポンプ特有の損失が発生するため、効率の低下を招く。

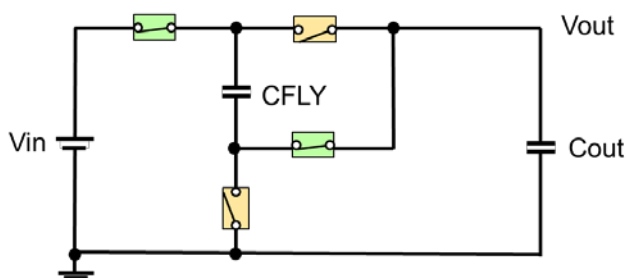


図1 チャージポンプ回路

上述の出力リップルの増加や電源の大形化、デバイスへの過渡的なストレスといったデメリットに対して、独自の技術を用いて対策を行った製品が UltraCPT™ シリーズのチャージポンプモジュールである。表1に示すように、村田製作所では MYC0409-NA を量産中である。

MYC0409-NA の入力電圧変換比率は $1/4$ であり、入力電圧が 48V の場合、約 12V の出力電圧を出力することが可能である。そのため、48V システムや 54V の電源システムから 12V 及び 13.5V の中間バス電圧を生成するために最適である。

本製品は村田製作所独自のチャージポンプ技術が活用されており、高効率を維持しつつもわずか 2.1mm の高さ、高い電力密度を有している。大形のインダクタを必要とせず、軽量で薄いチャージポンプシリーズは、実装スペース問題を回避するために、基板の裏面に搭載することも可能である。

表1 UltraCPT™ の製品概要

製品名	入力電圧 (V)	出力電圧 (V)	出力電流 (A)	サイズ (mm)	高さ (mm)	効率 (%)
MYC0409-NA	48 (20-60)	$V_{IN}/4$	6	11.5*9.5	2.1_max.	95.0 ($V_{IN}=48V/I_{OUT}=6A$)

降圧形コンバータとチャージポンプの違いとは？

図2に降圧形コンバータの回路図及び、動作波形を示す。降圧形コンバータは入出力コンデンサ、ハイサイド及びローサイドMOSFET、インダクタによって構成されている。MOSFETのオン時間を調節することによって、入力電圧より低い出力電圧を得る電圧変換方式である。このオン時間はフィードバック回路によって調節され、負荷に関わらず出力電圧を一定に保つことが可能である。

チャージポンプは前章で記載の通り、フィードバックを持たないため負荷電流の増加に伴い、出力電圧が低下する。また、電圧変換比は一定であるため、図3のような理想電圧変換器と出力等価抵抗（ROUT）の簡易モデルで示すことが可能である。定倍率の電圧変換及び、負荷電流に対する電圧低下をROUTによって表現している。図3より、チャージポンプの出力電圧は下記の式で表すことが可能である。

$$V_{OUT} = \frac{V_{IN}}{\text{巻き数比(DIV N)}} - R_{OUT} * I_{OUT}$$

次に降圧形コンバータの重要部品の1つであり、その選択により特性に大きな影響を及ぼすインダクタとコンデンサに関して説明を行う。降圧形コンバータとチャージポンプの動作を説明して、チャージポンプのメリットを明確にする。

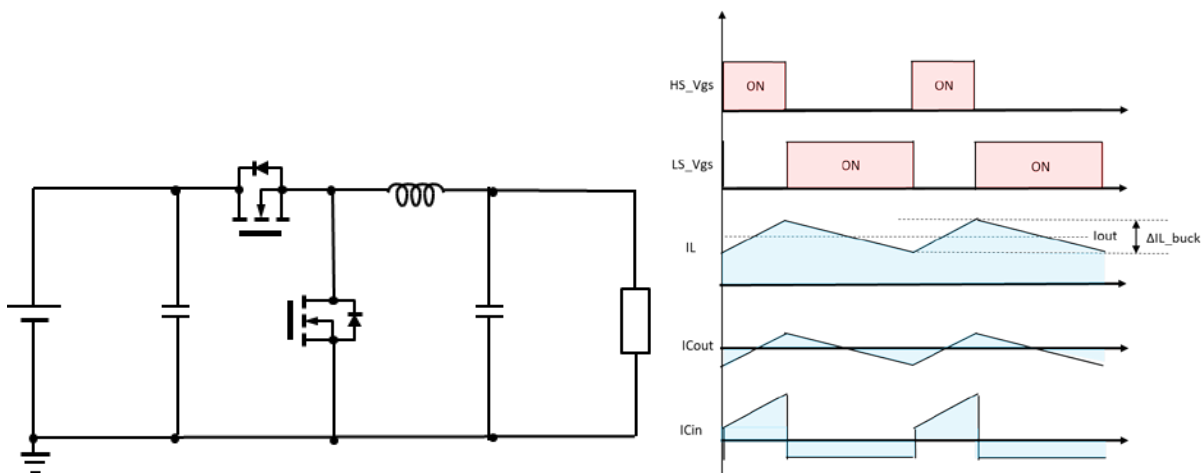


図2 降圧形コンバータ

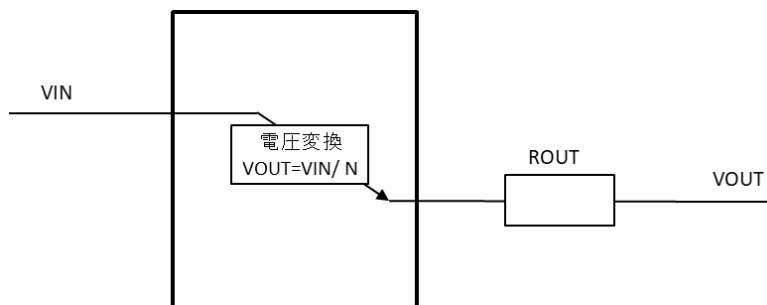


図3 チャージポンプの簡易モデル

インダクタのリプル電流

図4にハイサイドMOSFETがオンの時の状態を示す。図4より、インダクタの両端電圧には入力電圧（VIN）と出力電圧（VOUT）が印加されることがわかる。インダクタ電流はこの両端電圧とオン時間、インダクタンスによって決定される。そのため、降圧形コンバータのインダクタのリプル電流は次式で表すことができる。

$$\Delta I_{L_buck} = \frac{(V_{IN} - V_{OUT})}{L_{out}} * \frac{1}{f_{sw}} * D$$

ΔI_L : インダクタのリプル電流
 L_{out} : インダクタンス
 f_{sw} : スイッチング周波数
 D : 時比率（ V_{OUT}/V_{IN} ）

上式より、このリプル電流を小さくするためにはインダクタンスを高くする、もしくはスイッチング周波数を高周波化する必要がある。

インダクタンスを高くするためには、インダクタの巻き数を増やすもしくは、コア断面積を大きくする必要がある。前者は巻き数を増やすことによって配線が長くなることでDCRが大きくなり導通損失の増加を招く。損失の低減のために太い巻き線を使用する場合、巻き線を巻くための空間が必要になり大型のコアが必要になる。後者はコアの体積が大きくなるため、いずれの場合においても大電流の降圧形コンバータにおいて、インダクタを小形化することは困難である。スイッチング周波数を高周波化する場合、MOSFETのスイッチング損失につながるため、効率の低下を招く。

このようにインダクタが制限となって、小形、高効率かつ低背のコンバータの実現は困難である。

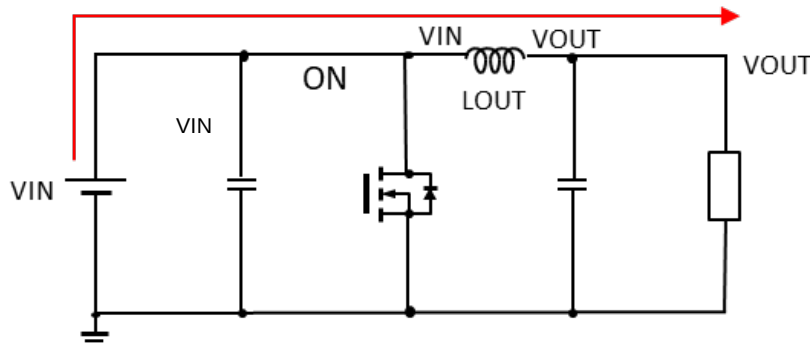


図4 降圧形コンバータ (State 1: ハイサイド ON)

一方でチャージポンプはコンデンサによって電力供給を行う。インダクタやトランスを用いて電圧変換を行う回路方式では、磁性部品が高さのボトルネックになることが一般的である。前述の通り、高さの低い磁性部品を使用することで効率の低下を招く。チャージポンプでは低背かつ高効率の電源が実現できる。また、コンデンサの電力密度はインダクタの電力密度と比較して高いため、高電力密度の電源が実現可能である。

村田製作所のチャージポンプでは小形のインダクタを使用している。このインダクタはチャージポンプの後段に接続されており、LCフィルタによって出力リプル電圧を減少させることが可能である。

図5の(b)より、インダクタの両端電圧の振幅は降圧形コンバータと比較して非常に小さいため、インダクタンスの低いインダクタを使用することが可能である。また、低インダクタンスのインダクタは巻き数が少ないため、低DCRのインダクタ選定することが可能であり、それによってインダクタによる導通損失も低い。

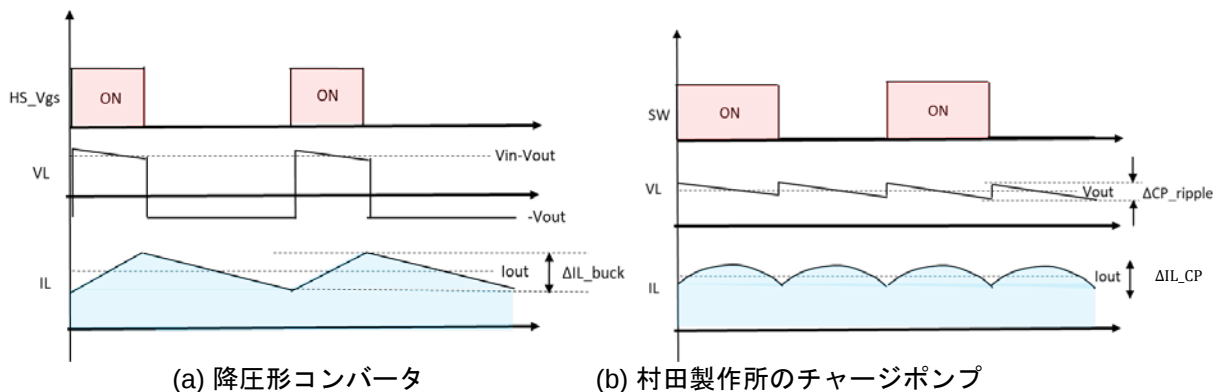


図5 インダクタの両端電圧及び、リップル電流

入力リップル電圧

降圧形コンバータの入力電流の平均値は、電圧変換比に比例して小さくなる。しかしながら、図4の状態1の時に出力電流と同等の電流を入力から供給する必要がある。これは入力コンデンサによって直流カットされるが、図2にICINとして示されているように、入力コンデンサに流れる交流リップル電流は出力のICOよりも高くなる。ICINのRMS値は、次式のように算出することができる。

$$I_{CIN} = \sqrt{\frac{V_{out}}{V_{in}} \left(I_{out} * (1 - D) + \frac{1}{12} * \Delta I_{L_{buck}}^2 \right)}$$

ムラタのチャージポンプでは時比率が50%固定で位相を180度ずらした2フェーズ構成を適用しており、入力電流は各周期で電力の供給を行う。したがって、入力コンデンサは過渡的な電流変化を生じない。入力コンデンサに流れるリップル電流は、インダクタ電流のN（電圧変換比率）分の1となり、少ない静電容量で低入力リップル電圧化を実現可能である。

アプリケーション

図6に1例として、スモールセルシステムに UltraCP™ シリーズを適応した場合のシステム図を示す。AC の電圧から 48V 電圧を生成した後段に MYC0409-NA を搭載しており、これによって 48V から 12V を生成している。その後段に 12V レギュレータを搭載することで I/O やコア電圧を生成している。UltraCP™ シリーズを適応することで高効率、小形のシステムが実現可能である。

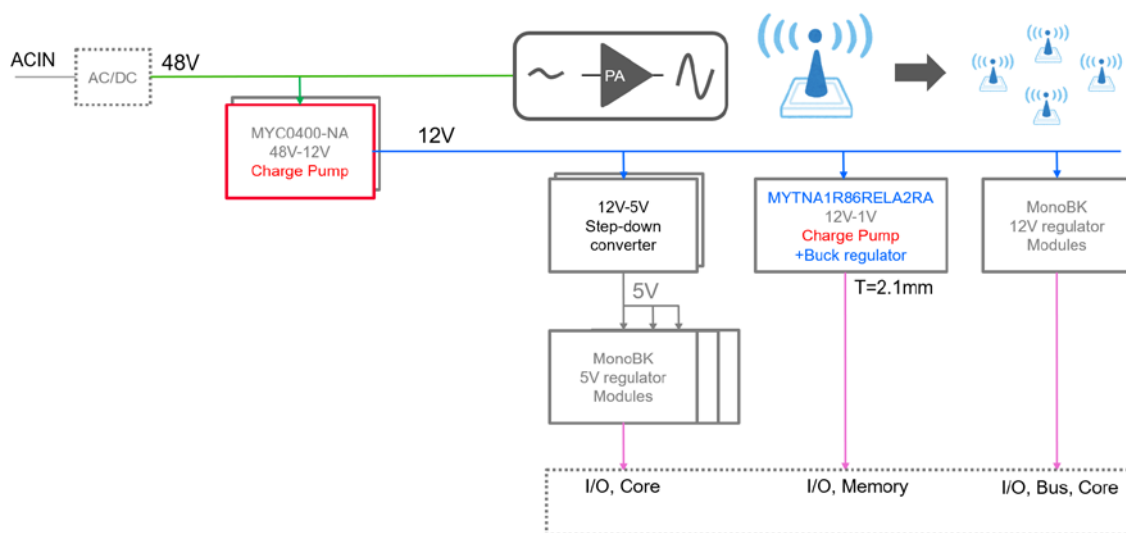


図 6 スモールセルシステム

特性およびサイズ比較

インダクタをエネルギー変換素子として利用する一般的な非絶縁降圧形DCDCコンバータモジュールと、チャージポンプモジュールであるMYC0409-NAとの特性比較結果を示す。本比較では、入力電圧を48V、出力電圧をおおよそ12Vとして評価を実施した。図7に効率特性、図8にソリューションサイズの比較、図9に温度特性の比較をそれぞれ示した。まず、効率特性は比較対象の最大定格電流である4Aの比較で5%以上の効率差がある。ソリューションサイズでは、外付けのコンデンサを含めてMYC0409-NAでは約20%程度の面積削減効果がある。さらにチャージポンプ技術の特徴として、製品高さが圧倒的に低い、かつ軽量であるため、裏面への搭載や低背要求のあるシステムに適応可能である。

温度特性では比較対象より評価基板の面積が小さいにもかかわらず、低損失であるため 34.7degC もの温度差が確認できる。

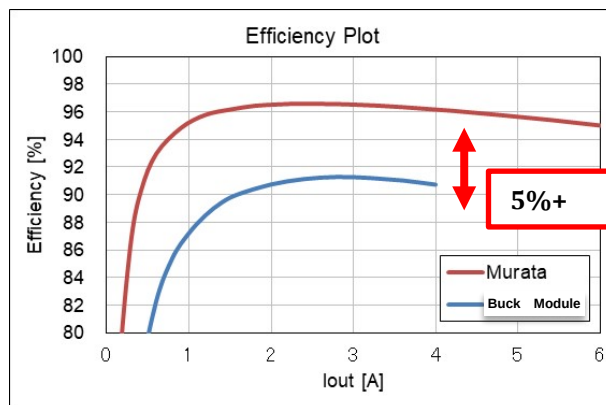


図 7 効率特性(VIN=48V, VOUT=12V)

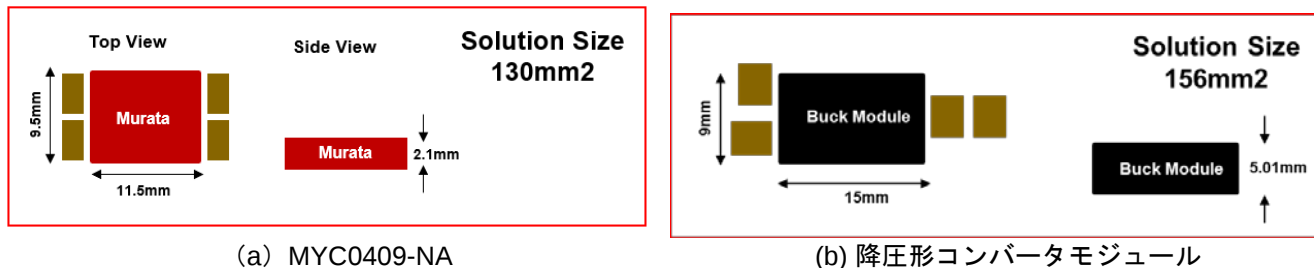


図 8 ソリューションサイズ比較

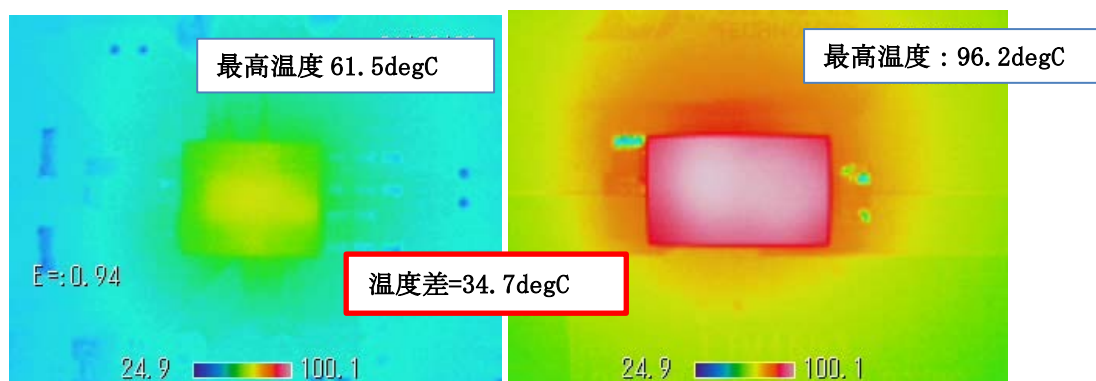


図 9 温度特性(VIN=48V, VOUT=12V, IOUT=4A)

まとめ

表 2 に村田製作所製のチャージポンプと降圧形コンバータについて整理を行う。

チャージポンプは特に低背が求められるアプリケーションで小形かつ高効率を実現可能な電圧変換方式である。レギュレーションは降圧形コンバータと比較して悪いというデメリットがあるため中間バスを生成して、後段に PoL (Point of load) で出力を安定させるようなアプリケーションに最適である。

表 2 チャージポンプ（村田製作所）と降圧形コンバータの比較

	チャージポンプ	降圧形コンバータ
出力電圧	$V_{IN} / \text{DIV N} - I_{OUT} \times R_{OUT}$	$V_{IN} \times D$
レギュレーション	×	○
効率	○	× - ○ (インダクタのサイズに依存)
面積	○	△
高さ	○	× - △ (インダクタのサイズに依存)

免責

- ・本資料に記載された情報は、当社製品を理解していただくためのものです。最終的には必ず納入仕様書をご確認下さい。
- ・本製品に関する情報等、本資料の掲載内容は、技術の進歩などにより予告なしに変更されることがあります。
- ・本資料に記載されております情報は、正確を期すため慎重に作成しておりますが、万が一、当該情報の誤り・誤植に起因する損害がお客様に生じた場合においても、当社はその責任を負うものではありません。
- ・本資料の情報を使用する場合、お客様の責任において、お客様の機器・システムを設計ください。これらの使用に起因して生じた損害（お客様または第三者いずれに生じた損害も含みます。以下同じです。）に関し、当社は、一切その責任を負いません。
- ・本資料に掲載してある技術情報は、製品の代表的動作・応用を説明するためのもので、その使用に際して当社及び第三者の知的財産権その他の権利に対する保証または実施権の許諾を行うものではありません
- ・文書による当社の事前の承諾なしに本資料の転載複製を禁じます。また、文書による当社の事前の承諾を得て本資料を転載複製する場合でも、記載内容に一切変更を加えたり、削除したりしないでください。

お問い合わせフォーム

<https://www.murata.com/contactform?Product=Power%20Device>

著作権および商標

当文書の情報は著作権法、商標法、その他の知的財産権関連法令で保護されています。
当社の承諾なく複写・転載することは法律で禁止されています。