"高出力125Aも超低ノイズも" µModule® レギュレータの最新動向

著者：µModuleパワープロダクツ
プロダクトマーケティングリードエンジニア 岩崎 克　著

電源回路をシングル・パッケージに封止した「µModule」

「µModule」（マイクロ・モジュール）は、スイッチング・コントローラICを中心に、ハイサイドとローサイドのパワーMOSFET、出力インダクタ、バイパス・コンデンサ、補償用RC回路など、スイッチング電源回路の主要部分を単一パッケージに封止した、アナログ・デバイセズ独自の電源ソリューションです。

電圧設定抵抗や入出力コンデンサなど数点の外付け部品は必要ですが、主要部品の選定、基板レイアウトの実装設計、動作検証といった時間を要する設計工数の大幅な削減が図れるとともに、特性に優れた電源回路をコンパクトに実現できるなどのメリットをもたらします。

アナログ・デバイセズは、最初のµModule製品である「LTM4600」を2005年10月に発売して以来、さまざまな仕様のµModule製品を展開してきました。

そのメリットが認知されるにつれて、産業機器、通信機器、医療機器など、さまざまな分野で採用が拡大し、なかでも低電圧かつ大電流を必要とする高性能FPGAやSoCのコア電源として用いられる事例が増えています。

本稿では、µModuleの進化に触れながら、100Aクラスの大電流µModule製品、単一出力の小型µModule製品、データセンター向けの直接給電型µModule製品、低ノイズを特長とするµModule製品を中心に、2023年4月時点の動向を紹介します。

第4世代に進化したパッケージ技術で125A出力を実現

最初に100A電源を例にµModule の進化を説明します。

µModuleの進化は、すなわち、パッケージ技術の進化とも言えます（図1）。最初の第1世代（Gen 1）では、スイッチング・コントローラIC、ハイサイドとローサイドのMOSFET、出力インダクタ、および各種のコンデンサと抵抗をサブストレート上に実装して、そのままレジンで封止していました。

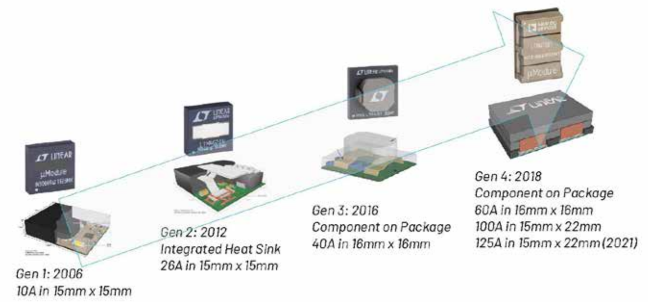


図1. 100A電源の実現を軸にしたµModuleパッケージの進化。
単純なモールドの第1世代からスタートし、ヒートシンクを上面に露出させた第2世代、
出力インダクタを2階建てにした第3世代、
さらに、2階部分を結ぶ銅板を側面に露出させた第4世代へと進化を遂げている。

2005年発売のLTM4600の場合で、パッケージ・サイズは15mm×15mm、最大出力電流は10Aでした。翌2006年に発売された改良版のLTM4601では、パッケージ・サイズは15mm×15mmのまま、最大出力電流は12Aに増大されましたが、入力12V、出力1.0V/100Aの電源を構成するには12個のLTM4601を並列動作させる必要がありました（※）。

次に開発したのが第2世代（Gen 2）のµModuleです。出力電流を律速していた熱の問題を解決するために、発熱の大きいハイサイドとローサイドのMOSFET、および出力インダクタの上面に金属プレート（ヒートシンク）を接触させ、そのプレートの一部をµModule上面に露出させる構造を開発しました。

放熱性能の改善によって最大出力も向上し、2012年には13A×2チャンネルのLTM4620を、2014年には18A×2チャンネルのLTM4630を、さらに2016年には25A×2チャンネルのLTM4650をそれぞれ発売し、出力1.0V/100Aの電源をわずか2個のLTM4650で実現できるまでになりました。

2016年に開発したパッケージが第3世代（Gen 3）です。それまで1階建てだった内部構造を2階建てに変更し、発熱の大きい出力インダクタを2階部分に実装したのが特徴で、当社ではCoP（コンポーネント・オン・パッケージ）と呼んでいます。第3世代の代表製品がLTM4636で、最大出力電流は40Aです。

2018年には第4世代（Gen 4）のLTM4700を発売しました。コンセプトは第3世代と同様に2階建てですが、ヒートシンクとなる銅板をパッケージ側面に露出させて、放熱性能のさらなる向上を図っています。

LTM4700は、パッケージ・サイズは15mm×22mm×高さ7.87mmとやや大きくなっていますが、最大出力電流は50A×2チャンネル、または100A×1チャンネルで、1個のLTM4700で出力1.0V/100Aの電源を実現できるまでに進化を遂げました。

さらに2021年には、125A×1チャンネルとしても構成できる31.25A×4チャンネルのLTM4681を発売しました（図2）。出力は、4チャンネル独立、2チャンネル並列+2チャンネル独立、4チャンネル並列など、複数のコンフィギュレーションに対応しています。

電流モード制御を採用していることもあって並列動作時の出力バランスに優れていて、たとえば4個のLTM4681で480A（120A×4）出力の電源を構成したときに、もっとも温度の高いLTM4681が99.5℃、もっとも温度の低いLTM4681が97℃と、わずか3℃の範囲に収まっていることが評価から確認されています。

また、PMBus準拠のI/Oを備えていますので、ホスト・マイコンから動作ステータスを読み出すなど、さまざまな制御が可能です。

以上の進化の詳細については、参考文献[*1]の「µModuleレギュレータの進化、100A出力を達成するまでの足跡をたどる」をご参照ください。

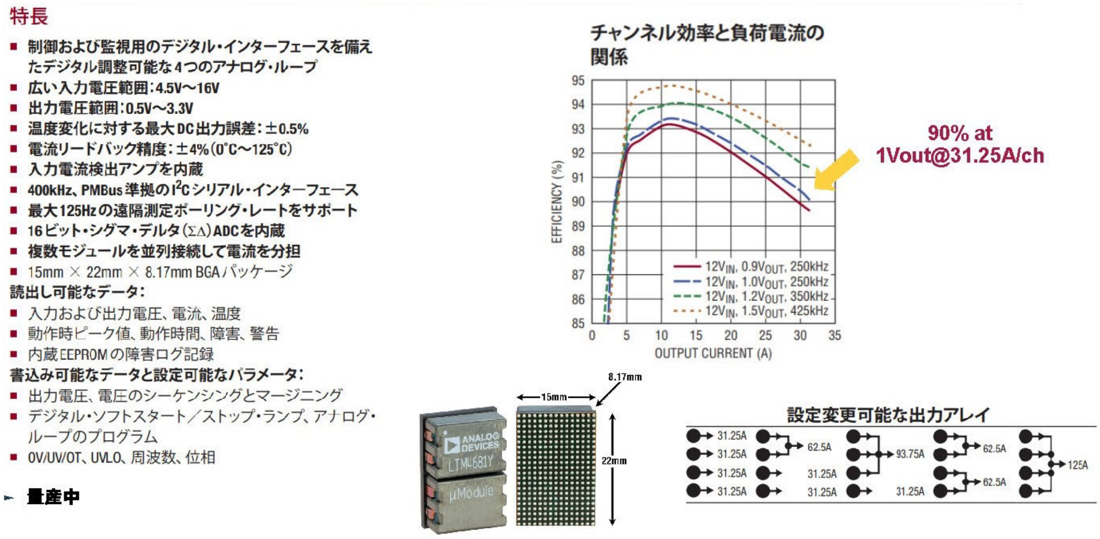


図2. 31.25A×4（計125A）出力を実現したµModule LTM4681の概略仕様。
銅板を側面に露出させた第4世代（Gen 4）パッケージを採用し、サイズは15mm×22mm×高さ8.17mmである。

※：LTM4600の最大出力は10A、LTM4601の最大出力は12Aですので、単純計算では10個または9個を並列にすれば100A電源を構成できます。ただし、複数のスイッチング・レギュレータを並列動作させる場合、位相をずらしたマルチフェーズ・クロックを与えて出力リップルを相殺する手法が一般的です。ここでは90°ずつ位相の異なる4系統のクロックをそれぞれ3個のLTM4601（またはLTM4600）に与える構成を仮定し、4×3=12個と求めています。

小型化と大電流化を両立したシングル出力µModule

100Aクラスではない中庸出力でも大電流化を進めています。LTM4657、LTM4626、LTM4638は第3世代のCoPを用いた単出力のµModule製品で、わずか6.25mm×6.25mmサイズのパッケージながら、それぞれ8A、12A、15A出力を実現しています（図3の赤枠）。いずれもピン互換です。

また、第3世代のCoPは2階部分に搭載された出力インダクタがヒートシンクの役割を担うため、これらの製品は放熱特性にも優れています。たとえば1.0V/15A出力のスイッチング電源をディスクリート部品で構成するとコントローラICのジャンクション温度は95.5℃に達しますが、LTM4638は77.3℃までしか上昇しません。

以上のファミリーのほか、9mm×15mmサイズで30A出力のLTM4647（第2世代パッケージ）、16mm×16mmサイズで40A出力の「LTM4636」（第3世代パッケージ）といった高出力品も提供中です。

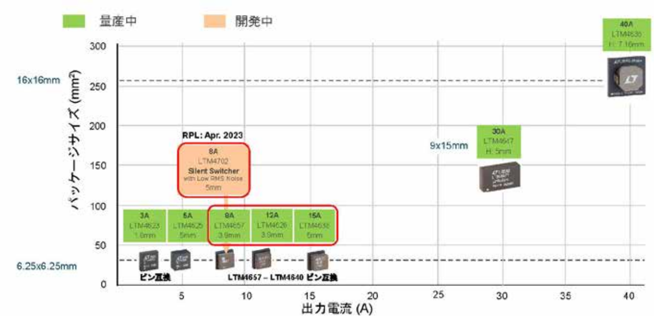


図3. 20V入力、シングル出力のµModule製品の代表的な品種。
右側は30A出力のLTM4647と40A出力のLTM4636。

48V/54Vから直接降圧を実現したデータセンター向け製品

クラウド・コンピューティングや5G通信網の利用拡大を背景に、データセンターで消費される電力は増加を続けていて、地球温暖化防止の観点からもその抑制が求められています。サーバーやネットワーク機器が消費する電力を抑えるために、交流ではなく直流を機器に供給する直流給電が広がりつつあり、機器内部の電源レールとしては通信機器で標準的な48Vが一般に採用されています。

こうした直流給電機器において、48VレールからFPGAやSoCのコア電源を得るには、48Vから12Vをまず生成し、その後段にPOL(ポイント・オブ・ロード)電源としてたとえば前述のLTM4700やLTM4681を階層的に配置する必要がありました。

アナログ・デバイセズは、データセンターの電力変換効率を向上させたいという機器メーカーのニーズに応えて、48V(または54V)レールから1.0V前後のコア電圧を直接生成するμModuleを開発しました。電源ツリーのうちもっとも電力の大きいコア電源を直接給電できるため、サーバーやネットワーク機器のエネルギー効率の向上が期待できます(図4)。

LTP8803-1Aは直接給電用の最初の製品で、入力電圧範囲は45V~65V、出力電圧範囲は0.5V~1.55V(最適値は1.2V)、最大出力電流は160A、最大変換効率は54V入力で1.2V出力のとき91.8%です(図5)。

パッケージはこれまでの第1世代から第4世代とは大きく異なり、図5のようにモールドなしのオープンフレームとして構成され、冷却用のヒートシンクが装着されています。サイズは22mm×24mm×高さ22mmです。なお上部に平面部分を設けてありますので、吸着ヘッドによるピック・アンド・プレースが可能です。

また、出力電圧範囲は0.5V~1.0V(最適値は0.8V)、出力電流は150Aまたは200Aの品種も開発中です。

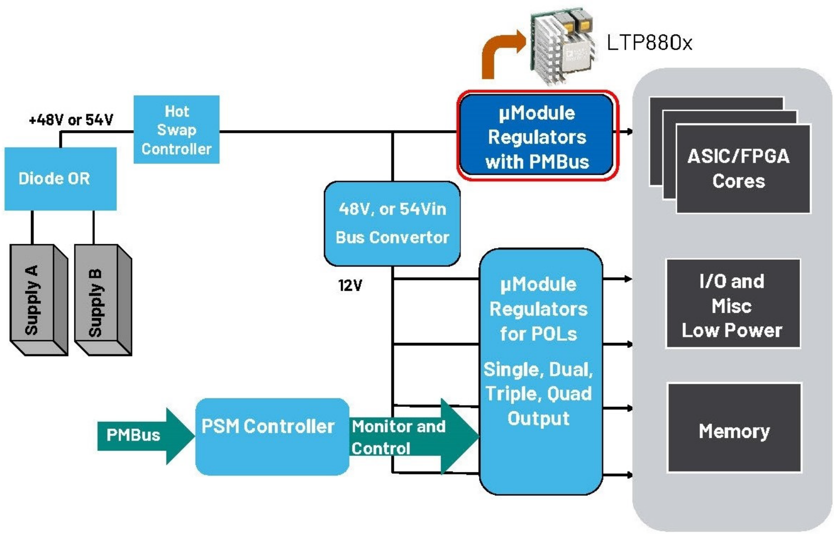


図4. 大電流を必要とするFPGAやSoCに直接給電可能なμModule(赤枠)を使った電源ツリーの構成例。
I/O電源などは従来のようにPOLレギュレータを使用する。

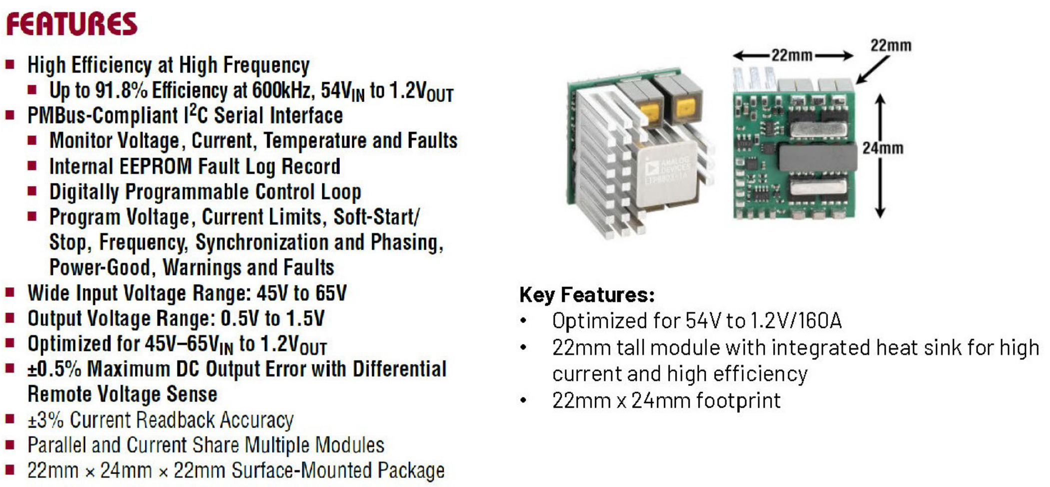


図5. 48Vレールまたは54Vレールから1.2Vを直接降圧できる出力160AのμModule「LTP8803-1A」。
これまでのμModule製品とは異なり、放熱を考慮してオープンフレームのヒートシンク付きパッケージングを採用している。

低EMIを特長とするSilent Switcher®のμModule製品も拡充

続いて、低ノイズを特長とするμModule製品を紹介します。アナログ・デバイセズでは、次のようなアプローチで低ノイズを実現した製品を展開しています。

❙高周波領域のノイズを抑制した製品

(1)Silent Switcher®アーキテクチャのスイッチング・コントローラICを搭載したμModule
(2)πフィルタ用インダクタやノイズ・キャンセリング回路などを内蔵したμModule

❙高周波ノイズに加えて低周波領域のノイズも抑制した製品

(3)スイッチング・レギュレータに加えてポスト・リニア・レギュレータをシングル・パッケージに封止したμModule
(4)低周波ノイズを抑制したSilent Switcher 3アーキテクチャのスイッチング・コントローラICを搭載したμModule

(1)のSilent Switcherは、スイッチング動作に伴って大きな電流変動が発生するホット・ループの端子をスイッチング・コントローラICの左右に対称に配置して、EMIノイズの原因となる磁界をパッケージ周囲に閉じ込めることによって、高周波領域(主に30MHz以上)のEMIノイズをおおむね10dB以上も抑制するアナログ・デバイセズ独自の技術です。

なお、Silent Switcherの詳細については、アナログ・デバイセズが公開しているさまざまなアーティクルで説明していますので、本稿では詳細は割愛します。

Silent Switcher®アーキテクチャのスイッチング・コントローラICを搭載した代表的な製品が、入力40VのLTM8074(出力1.2A)、LTM8063(出力2.0A)、LTM8065(出力2.5A)、LTM8053(出力3.5A)です(図6)。また、出力2チャンネルのLTM8078(出力1.4A×2)、LTM8024(出力3.5A×2)、出力4チャンネルのLTM8051(出力1.2A×4)、LTM8060(出力3.0A×4)などの多出力タイプもラインアップしています。

図6. 高周波ノイズの低減を図ったSilent SwitcherベースのμModule製品の一例。CISPR 22 Class B(現在はCISPR 32に統合)やCISPR 25 Class 5などのEMI規格を十分に満たす特性を実現している。

スイッチング・レギュレータはリニア・レギュレータに比べてEMIノイズが大きいため、ノイズに敏感なアナログ・デジタル・コンバータ(ADC)の電源には適さないと言われています。そこで、Silent SwitcherベースのμModuleがアプリケーション・レベルでどの程度の効果があるか、実際のADCを使って評価を行いました。

ADCとして、12ビット、2.6GSPSのAD9625を使用し、スイッチング・レギュレータADP2386、LCフィルタ、およびADP1741などのリニア・レギュレータを組み合わせた電源構成と、Silent Switcher®ベースのμModuleであるLTM8065を用いた電源構成を比較しました(後者はデジタルI/Oの電源であるDVDDIOピンのみリニア・レギュレータADP7118から給電)(図7)。

構成や評価の詳細については当社が公開している技術資料「従来の半分のスペースでGSPSサンプリングADCに低ノイズ電源を供給するSilent Switcher® μModuleレギュレータ」[*2]を参照していただくとして、結論だけを述べると、ポスト・リニア・レギュレータを配置した電源ツリー(図7左)と比べて、AD9625の主要な性能指標であるSNRFS(フルスケール信号入力時のSN比)は同等、SFDR(スプリアス・フリー・ダイナミック・レンジ)は逆にLTM8065のほうがやや優れるという結果が確認されました。

また、電源回路の面積はおよそ1/4に小型化され、電力変換効率は48%が78%に向上することも明らかになりました。

続いて、EMIフィルタを内蔵した(2)の製品としてはLTM4613、LTM4651、LTM8033などが挙げられます。これらはSilent Switcherアーキテクチャではありませんが、低EMIノイズのスイッチング・レギュレータ回路を実現できます。

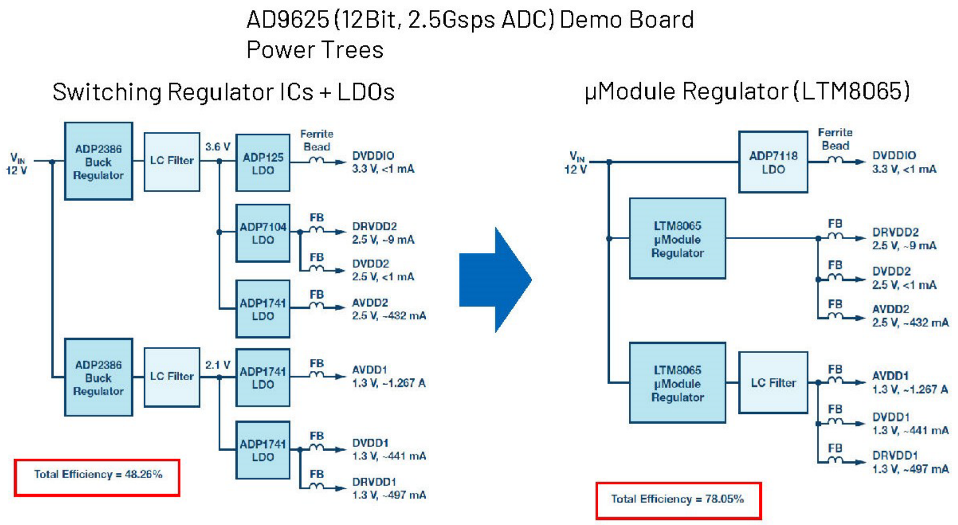


図7. 高速アナログ・デジタル・コンバータAD9625の電源ツリーを、スイッチング・レギュレータ+リニア・レギュレータで構成した例(左)と、Silent Switcher®ベースのμModuleで構成した例(右)。SNRFSおよびSFDRにおいて同等の特性が確認されている。

低周波ノイズを抑制した新たなµModuleを開発

最後に、前節で(3)および(4)として挙げた高周波ノイズに加えて低周波領域のノイズも抑制したµModule製品を取り上げます。

2023年3月に発売したLTM8080は、スイッチング・レギュレータと2組のリニア・レギュレータをシングル・パッケージに封止したµModule製品です(図8)

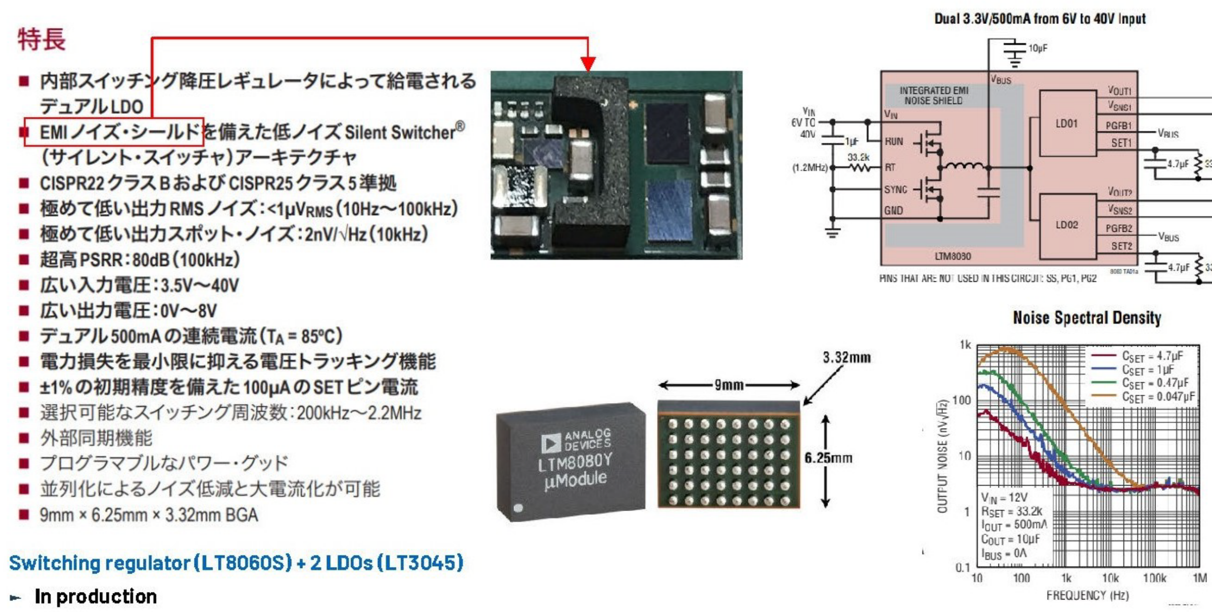


図8. スイッチング・レギュレータと2組のリニア・レギュレータをシングル・パッケージに封止した「LTM8080」。EMIシールドによって両者を電磁的に隔てることで、さらなる低ノイズ化を実現した。

スイッチング・レギュレータには高周波ノイズの少ないSilent Switcherアーキテクチャを採用。一方のリニア・レギュレータには、業界トップクラスのPSRR(電源電圧変動除去比)特性を誇るアナログ・デバイセズのLT3045を採用しています。

加えて、Silent Switcherによって低減を図った高周波EMIノイズの影響をさらに抑えるため、スイッチング・レギュレータとリニア・レギュレータの間にEMIシールドを配置しました。

EMIシールドの効果は大きく、Silent Switcher®のµModule製品LTM8074の後段にディスクリートのLT3045をEMIシールドなしで配置した場合に比べて、LTM8080の出力電圧リップルはおよそ71%も低いという評価結果も得られています。

LTM8080は、RMSノイズは1µVrms以下、スポット・ノイズは2nV/√Hz以下、PSSRは80dB以上など、優れた特性を実現しており、ADCやPLLといった高い精度が要求されるアナログ回路の給電に最適と言えます。サイズも9mm×6.25mm×高さ3.32mmと、非常にコンパクトです。

低周波ノイズを抑えたもうひとつの製品がLTM4702です(図9)。高精度な電圧リファレンス製品と同じ電流モード・リファレンスを採用したSilent Switcher 3アーキテクチャのµModule製品で、Silent Switcherがもともと持っていた高周波ノイズの低減と合わせ、10Hz〜100kHz帯の低周波ノイズの低減と過渡応答性能の向上を実現しています。なお、Silent Switcher®3の詳細は、参考文献[*3]の「さらなるノイズ低減を実現したSilent Switcher®3」を参照してください。

すなわちLTM4702は、Silent Switcherによる高周波ノイズの低減、Silent Switcher 3による低周波ノイズの低減と過渡応答特性の向上、および第3世代のCoPによる小型化(6.25mm ×6.25mm×高さ5.02mm)という三つの特長を合わせ持った製品と言えます。

入力電圧範囲は2.7V〜18V、出力電圧範囲は0V〜6V、最大出力電流は8Aです。

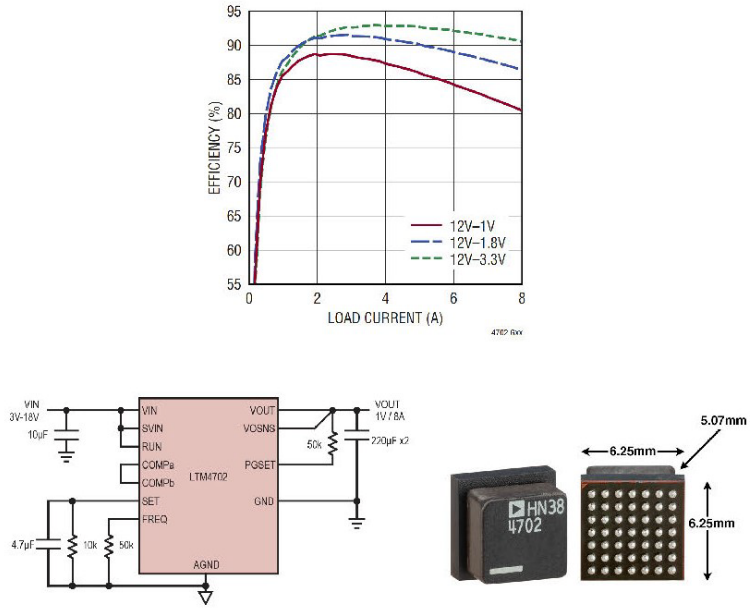
RMSノイズは4µVrms以下、スポット・ノイズは4nV/√Hz以下と、前述のLTM8080にはわずかに及びませんが、一般的なリニア・レギュレータに匹敵する十分なノイズ性能が得られています。高周波ノイズはCISPR 22 Class B(現在はCISPR 32に統合)を十分に満足しています。

以上、優れた特性をシングル・パッケージで実現したµModule製品の幅広いラインアップから、特徴的ないくつかの製品を取り上げました。同期整流型の降圧レギュレータのほかに、反転型(負電圧)、絶縁型、昇圧型、昇降圧型なども取り揃えているほか、LEDドライバ回路をシングル・パッケージ化した品種やバッテリ・チャージャをシングル・パッケージ化した品種なども展開しています。

スイッチング電源の設計工数を抑えたい、電源設計を専門とするエンジニアがいない、プリント基板の徹底的な小型化を図りたい、特性に優れた電源を使いたい、といったお客様の課題に、µModule製品は最適なソリューションと言えるでしょう。

FEATURES

- Complete Solution in <1cm^2 (Single-Sided PCB) or 0.5cm^2 (Dual-Sided PCB)
- Low Noise Silent Switcher®3 Architecture
- Ultralow EMI Emissions on Any PCB
- Ultralow RMS Noise (10Hz to 100kHz): 4μV_{RMS}
- Ultralow Spot Noise: 4nV/$\sqrt{Hz}$ at 10kHz
- Input Voltage Range: 2.7V to 18V
- Output Voltage Range: 0V to 6V
- 8A Maximum Continuous Output Current
- Fast Minimum Switch On-Time: 15ns
- Precision Current Reference: 100μA ±0.8% Over Temperature
- Fast Start-Up Capability
- Wide Frequency Range: 300kHz to 4MHz
- Multiphase Parallel with Current Sharing
- Programmable Power Good
- Wide Temperature Range: –55°C to 150°C
- 6.25mm × 6.25mm × 5.02mm BGA Package



- サンプル：供給中
- 量産開始予定: 2023年4月

図9. Silent Switcher®3アーキテクチャのスイッチング・コントローラICを搭載した「LTM4702」。Silent Switcher®が持つ高周波ノイズの低減に加え、10Hz～100kHz帯の低周波ノイズの低減と過渡応答性能の向上を実現したのが特長。ノイズに敏感な高精度アナログ回路の給電にも適する。

参考資料

[*1] μModuleレギュレータの進化、100A出力を達成するまでの足跡をたどる
https://www.analog.com/jp/analog-dialogue/articles/the-evolutionary-path-to-the-100a-micromodule-regulator.html

[*2] 従来の半分のスペースでGSPSサンプリングADCに低ノイズ電源を供給するSilent Switcher® μModuleレギュレータ」
https://www.analog.com/jp/technical-articles/silent-switcher-umodule-regulators-quietly-power-gsps-sampling-adcs-in-half-the-space.html

[*3] さらなるノイズ低減を実現したSilent Switcher® 3
https://www.analog.com/jp/technical-articles/ultra-low-noise-switch-mode-power-supply-with-adi-silent-switcher.html

著　岩崎 克

μModuleパワープロダクツ
プロダクトマーケティングリードエンジニア

※本稿は2023年4月時点の情報に基づいています。

P926750-6/23