

広負荷電力範囲で高い変換効率を実現した IoT 機器向け SIMO 型 DC-DC コンバーター

SIMO DC-DC Converter with High Efficiency over Wide Load Range for IoT Devices

山田 学 チャン ナム ビン 宮崎 隆行

■ YAMADA Manabu

■ TRAN Nam Binh

■ MIYAZAKI Takayuki

あらゆるモノがネットワークにつながるIoT (Internet of Things) 分野で用いられる無線センサーノードは、データ通信のため間欠的に数十 mW のアクティブモードで動作するが、大部分の時間は 1 mW 以下のスタンバイモードで待機している。そのため、IoT 機器向け SIMO (Single-Inductor Multiple-Output) 型 DC (直流) -DC コンバーターには、広い負荷電力範囲にわたって高い変換効率が求められている。

東芝デバイス&ストレージ (株) は、このような市場ニーズに応じて、新たに MOT (最大オン時間) 制御技術と CCMS (チャネル連結多重スイッチング) 制御技術を搭載した SIMO 型 DC-DC コンバーターを開発している。試作により、最大 86.3 % の変換効率と、1 μ W から 50 mW の広負荷電力範囲において 65.3 % 以上の変換効率を達成し、コイン型リチウム電池で駆動する IoT 機器の電池寿命を大きく改善できることを確認した。

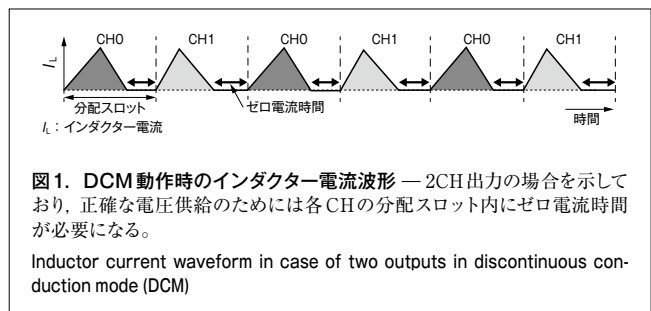
A wireless sensor node for Internet of Things (IoT) devices is mostly in standby mode, in which its power consumption is less than 1 mW, and only enters active mode intermittently when performing data communication, at which time its power consumption increases to several tens of mW. Hence, single-inductor multiple-output (SIMO) DC-DC converters for IoT devices must achieve high conversion efficiency over a wide range of loads.

In response to this market requirement, Toshiba Electronic Devices & Storage Corporation has been developing a SIMO DC-DC converter equipped with two new technologies: (1) a maximum-on-time (MOT) control technology, and (2) a channel-consolidated multiple-switching (CCMS) control technology. Experiments on a prototype chip fabricated using 65 nm complementary metal-oxide semiconductor (CMOS) process technology have verified that its peak conversion efficiency is 86.3%, while its conversion efficiency over a wide load range from 1 μ W to 50 mW is 65.3% or more. The new SIMO DC-DC converter is expected to contribute to lengthening of the operating time of IoT devices powered by coin type lithium-ion batteries.

1 まえがき

近年、様々な IoT 用途に無線センサーノードが使用されるようになった。IoT 機器に組み込まれる IC はコイン型リチウム電池などで駆動されるため、各回路は必要最小限の電圧で低電力動作することが求められる。そこで、一つのインダクターで複数電圧を出力でき、機器の小型化やコスト低減に寄与する SIMO 型 DC-DC コンバーター (以下、SIMO-DCDC と略記) が注目されている。

一般に、無線センサーノードは消費電力が異なるアクティブモードとスタンバイモードを持つため、SIMO-DCDC には広負荷電力範囲で実用的な変換効率が求められる。重負荷時のアクティブモードでは、電源電圧が変動するとセンシング精度が低下するため、正確な電圧供給が必要である。電流不連続モード (DCM) は、図 1 に示すように、ゼロ電流時間が SIMO-DCDC の出力チャネル (CH) 同士を分離して電圧変動を防ぐことができるが、ゼロ電流時間が長いほど出力電力の上限が小さくなるという問題があった。一方、軽負荷時のスタンバイモードでは、消費電力が 1 μ W 程度まで下がる。センサーノードは間欠的なアクティブモード以外ではスタンバイモードで待機しており、軽負荷時の SIMO-DCDC の変換効率が電池寿命



を大きく左右するが、従来技術の軽負荷時の変換効率は実用的とは言えなかった^{(1), (2)}。

そこで、広負荷電力範囲で実用的な変換効率を持つ SIMO-DCDC を実現するため、重負荷時に出力電力の上限を最大化する MOT 制御技術と、軽負荷時に変換効率を改善する CCMS 制御技術を開発した。

ここでは、開発している SIMO-DCDC の概要と、オンチップデジタル制御の試作品により評価した結果について述べる。

2 SIMO-DCDC の概要

開発している SIMO-DCDC は、図 2 に示すように、入力電圧

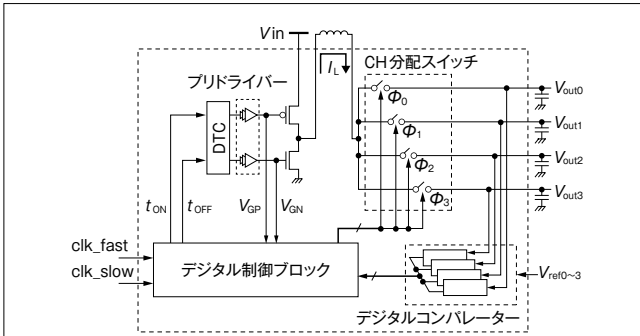


図2. 開発しているSIMO-DCDCのブロック図 — デジタル制御による4出力CHの降圧型SIMO-DCDCを開発している。
Block diagram of prototype SIMO DC-DC converter

(V_{in}) から四つの出力電圧 ($V_{out0} \sim V_{out3}$) を生成する。各出力電圧は参照電圧 ($V_{ref0} \sim V_{ref3}$) とデジタルコンパレータで比較され、参照電圧より低下すると、DTC (Digital-to-Time Converter) とブリドライバがp型MOS (金属酸化膜半導体) トランジスタ (PMOS) とn型MOSトランジスタ (NMOS) をそれぞれオン、オフのタイムコード (t_{ON} , t_{OFF}) に従って駆動する。PMOSとNMOSのスイッチング動作の1サイクルごとに、CH分配スイッチの駆動信号 ($\Phi_0 \sim \Phi_3$) に従ってインダクター電流 (I_L) がCHの一つに供給される。広負荷電力範囲で高い変換効率を保つため、重負荷時と軽負荷時のそれぞれで外部から供給する高速クロック (clk_fast) と低速クロック (clk_slow) が使用される。

2.1 重負荷時に出力電力の上限を改善するMOT制御技術

DCM動作のSIMO-DCDCで出力電力の上限を大きくするには、ゼロ電流時間を最小化する必要がある。それには、各CH分配スロットの終わりで I_L がゼロになるようにオン時間を調整すればよい。このようなDCM動作は電流臨界モード (BCM) と呼ばれている。従来、BCM動作のためのオン時間制御にはアナログ回路を用いており⁽³⁾、ゼロ電流時間を直接フィードバック制御していないため、プロセスや温度のばらつきでゼロ電流時間が変動して常に最小化することはできなかった。

そこで今回、正確なBCM動作を実現するためにMOT制御技術を開発した。図3に示すように、 I_L が各CH分配のスロット境界以前にゼロになった場合、オン時間のタイムコードを1ステップ増やす。一方、スロット境界から1ステップ前 (数ns相当) までに I_L がゼロにならなかった場合は、オン時間を1ステップ減らす。この動作をスイッチングサイクルごとに繰り返すと、最小のゼロ電流時間に収束する。デジタル回路を用いてゼロ電流時間をフィードバックするため、外付け素子や、入出力電圧、プロセス、温度などのばらつきによらず重負荷時に出力電力の上限を最大化できる。

2.2 軽負荷時に変換効率を改善するCCMS制御技術

軽負荷時に支配的な電力損失のうち、デジタルコンパレー

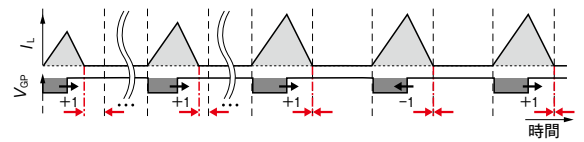


図3. 重負荷時のMOT制御の動作タイミング — PMOSのゲート電圧 (V_{GP}) がローレベルのときにオン時間で、これを調整して最小のゼロ電流時間に徐々に収束させる。
MOT control to minimize zero-current intervals under heavy load

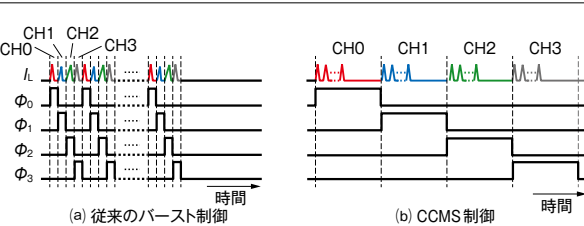


図4. 軽負荷時のCCMS制御の動作タイミング — 従来のバースト制御に比べ、CCMS制御の方がCH分配スイッチの制御信号の切り替え頻度が少ないため、切り替え時の電力損失を低減できる。
CCMS control to reduce channel distribution switching frequency under light load

ターに起因するものはバースト制御で動作頻度を下げることにより低減できる。SIMO-DCDCでは、更にCH分配スイッチの駆動電力を減らすことが必要だが、従来のバースト制御をSIMO-DCDCで行うと、 I_L の供給1回ごとにCH分配スイッチが駆動されて電力損失となる (図4(a))。これに対して新開発のCCMS制御では、CH分配順序を変更し、 I_L を特定CHに連続で供給することで、CH分配スイッチの駆動回数を大幅に減らして電力損失を低減できる (図4(b))。

3 試作品による評価

MOT制御技術とCCMS制御技術を搭載したオンチップデジタル制御SIMO-DCDCを65nm標準CMOS (相補型MOS) プロセスで試作し、評価を実施した。

各CHの負荷電流が3mAのときの重負荷時における I_L と各出力電圧の波形を図5(a)に示す。このとき、 $V_{out0} \sim V_{out3}$ は順に1.3V, 1.2V, 1.1V, 及び1.0Vに設定した。MOT制御によってBCM動作しており、1回の I_L 供給量が最大化され、不要なパルスがスキップされ、PMOSとNMOSの駆動電力も削減される。図5(b)には、各CHの負荷電流が50 μ Aのときの軽負荷時における各波形を示した。CCMS制御により16回の連続したスイッチングが起こり、対応するCHの電圧が上昇している。CH分配スイッチの動作頻度は従来技術に比べ1/16に抑えられた。

次に、 V_{in} が2.7Vのときの合計出力電力と変換効率の関係を図6に示す。重負荷時の出力電力の上限は53mWで、約

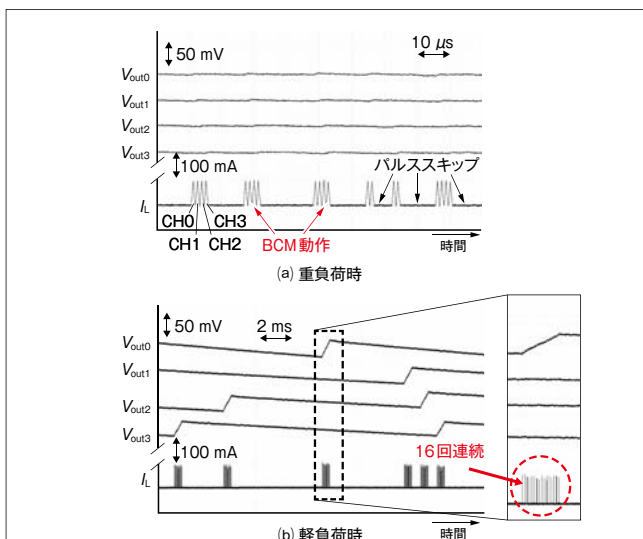


図5. 試作品の I_L と $V_{out0} \sim V_{out3}$ の測定波形 — 重負荷時にはMOT制御によりBCM動作が実現され、軽負荷時にはCCMS制御により各CHで連続スイッチングが起きていることが分かる。

Experimentally obtained waveform data at time of heavy-load and light-load operations

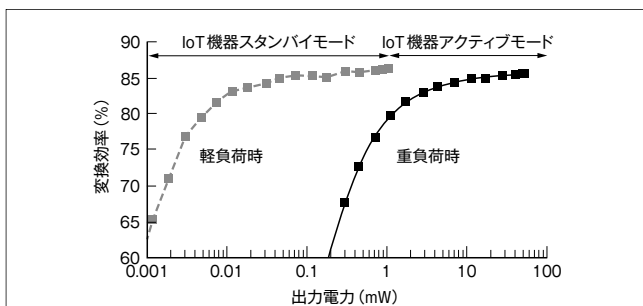


図6. 試作品の合計出力電力と変換効率の関係 — IoT機器の負荷領域において、重負荷時と軽負荷時の制御を使い分け、実用的な60%以上の変換効率を維持できている。

Relationship between conversion efficiency and total output power of prototype SIMO DC-DC converter

1 mWまで変換効率を80%以上に維持できた。軽負荷時の最大変換効率は86.3%で、 $5.2 \mu\text{W}$ まで80%以上、 $1.1 \mu\text{W}$ で65.3%であった。重負荷時と軽負荷時を使い分けることで、 $1 \mu\text{W}$ から50 mWまで変換効率を60%以上に維持できることを確認した。

開発しているSIMO-DCDCと、変換効率が60%以上で、かつ出力電力範囲が広い従来技術によるSIMO-DCDC^{(1), (2)}との性能比較を表1に示す。出力電力範囲が従来技術の水準に比べて2桁以上広いことが分かる。

4 あとがき

IoT機器向けに、新たに開発したMOT制御技術及びCCMS

表1. 従来技術によるSIMO-DCDCとの性能比較

Comparison of performance of conventional and prototype SIMO DC-DC converters

項目	性能諸元		
	試作品	従来技術A ⁽¹⁾	従来技術B ⁽²⁾
製造プロセス	65 nm CMOS	0.25 μm CMOS	65 nm CMOS
入力電圧 (V)	1.8~3.6	2.7~5.0	2.7~3.6
出力電圧 (V)	0.6~1.8	1.2 / 1.8	1.8 / 1.2
外付けインダクター (μH)	10	4.7	4.7
外付け容量 (μF)	47	47	4.7
最大変換効率 (%)	86.3	87	91
軽負荷効率 (%)	65.3 (1.1 μW)	60 (1.8 μW) ^{*1}	約62 (15 μW) ^{*1}
変換効率60%以上の出力電力範囲 (桁) ^{*2}	4.7 (1 μW ~50 mW)	2.7 ^{*1} (1.8 mW~840 mW)	1.8 ^{*1} (15 mW~900 mW)

*1: 公表データからの推計値

*2: 最大電力と最小電力の比の常用対数

制御技術を搭載したオンチップデジタル制御SIMO-DCDCを試作し、最大86.3%、 $1 \mu\text{W}$ から50 mWの広負荷電力範囲において65.3%以上という実用的な変換効率を達成できた。

電力をより効率的に利用できる技術として、Bluetooth[®] low energy (BLE)規格などをサポートするIoT機器向け低消費電力ICへの適用を検討しており、コイン型リチウム電池による駆動時間の延長に貢献していく。

文献

- Xu, W. et al. A Dual-Mode Single-Inductor Dual-Output Switching Converter with Small Ripple. IEEE Trans. Power Electron. 2010, 25, 3, p.614 - 623.
- Lee, Y. H. et al. Interleaving Energy-Conservation Mode (IECM) Control in Single-Inductor Dual-Output (SIDO) Step-Down Converters with 91% Peak Efficiency. IEEE J. Solid-State Circuits. 2011, 46, 4, p.904 - 915.
- Fu, W. et al. A DCM-only buck regulator with hysteretic-assisted adaptive minimum-on-time control for low-power microcontrollers. IEEE Trans. Power Electron. 2016, 31, 1, p.418 - 429.

• Bluetoothは、Bluetooth SIG, Inc.の登録商標。



山田 学 YAMADA Manabu

東芝デバイス&ストレージ(株)
半導体研究開発センター
先端回路技術開発部
Toshiba Electronic Devices & Storage Corp.



チャン ナム ビン TRAN Nam Binh

東芝デバイス&ストレージ(株)
半導体研究開発センター
先端回路技術開発部
Toshiba Electronic Devices & Storage Corp.



宮崎 隆行 MIYAZAKI Takayuki

東芝メモリ(株)
メモリ技術研究所 デバイス技術研究開発センター
IEEE会員
Toshiba Memory Corp.