

# スイッチング電源回路のMEMS技術を用いた 低リップル・高速応答制御方式

光野 正志<sup>†</sup> 張 挺<sup>†</sup> 劉 愛燕<sup>†</sup>  
木村 圭吾<sup>†</sup> 小林 春夫<sup>†</sup> 小堀 康功<sup>†</sup>

<sup>†</sup> 群馬大学工学部電気電子工学科 〒376-8515 群馬県桐生市天神町 1-5-1  
E-mail: †{kono, k\_haruo}@el.gunma-u.ac.jp

あらまし この論文では次世代マイクロプロセッサ用の高速応答・低リップル電源を実現する制御・回路方式を提案する。(i) 負荷変動に応じてスイッチング電源回路内のインダクタンス値および容量値を可変にすることで、低リップル・高速応答を実現する。この可変インダクタ、可変容量をMEMS技術および回路技術で実現する方式を提案する。(ii) また、PWM制御の一部にサーボ制御を用いることで負荷変動に高速追従可能な手法を提案する。これらの提案手法は動作状態によりスイッチング電源回路内部の素子値を動的に変更することで定常特性・過渡特性両方の性能向上を図る方式である。シミュレーションによりこれらの原理確認を行った。

キーワード スwitching電源, マイクロプロセッサ, 可変インダクタ, 可変容量, MEMS技術

## Low-Ripple-Voltage and High-Speed Control System With MEMS Technology for Load Regulation of Switching Regulators

Masashi KONO<sup>†</sup>, Zhang TING<sup>†</sup>, Liu AIYAN<sup>†</sup>,

Keigo KIMURA<sup>†</sup>, Haruo KOBAYASHI<sup>†</sup>, and Yasunori KOBORI<sup>†</sup>

<sup>†</sup> Department of Electronic Engineering, Faculty of Engineering, Gunma University 1-5-1 Tenjin-cho  
Kiryu-shi Gunma 376-8515 Japan  
E-mail: †{kono, k\_haruo}@el.gunma-u.ac.jp

**Abstract** This paper presents new approaches to creating high-performance control systems for DC-DC converters (switching regulators) targeted for microprocessors power supply applications. Microprocessors power supply circuits demand both low-ripple-voltage in the steady state (stability) and fast response for large load changes. However, since in general stability and fast response are trade-off in control systems, it is difficult to satisfy both simultaneously with conventional approaches. (i) First we propose a completely different method which uses a variable inductor and a variable capacitor inside the regulator; the inductor and capacitor values are automatically varied so that they are large in the steady state to minimize ripple, and small for fast response when the load current changes rapidly. The variable inductor can be realized with parallel or series inductors connected a MOSFET switch. Also the variable inductor as well as the variable capacitor may be realized with MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) technology. The load regulation detection circuit (which senses load current change) uses a transformer, a diode-bridge and an operational amplifier. (ii) We also propose to use a servo control technique in a conventional PWM controller. We have performed SPICE and CoventorWare simulation, and examined the effectiveness of the proposed methods.

**Key words** Switching Regulator, Microprocessor, Variable Inductor, Variable Capacitor, MEMS

## 1. はじめに

スイッチング電源回路は、高効率で大電流出力が可能であり出力電圧が連続可変に出来るので、マイクロプロセッサ、携帯電話等に広く使用されている。その中でマイクロプロセッサ用のスイッチング電源回路はその性能要求はますます厳しくなっている [1]。その電源回路技術として、マイクロプロセッサに流れる大電流の負荷変動に対して適切な電力を供給するスイッチモード生成 DC 電力コンピュータシステム [2] や、ヒステリシスな PWM 制御方式 [3], [4]、マイクロプロセッサ用の電源回路モジュール (VRM: Voltage Regulator Module) [5] ~ [8] 等が知られている。マイクロプロセッサ用の電源回路には、負荷電流の変動が小さい定常状態時には低リップル電圧が要求され (安定性)、負荷電流の変動が生じた時にはそれに高速に応答することが要求される (速応性)。安定性と速応性は相反する制御技術課題であるが、この解決手法としてクロック周波数を高くしたオンチップ LC の利用 [9] や、DCM (Discontinuous-Conductions Mode) 用 CCR (CMOS-Control Rectifier) の利用等 [10] が報告されている。また最近では制御部をデジタル回路で実現する手法も報告されているが、ピン数、配線数の問題よりマイクロプロセッサ用の電源へは適用は現時点では難しい。

この論文では次世代マイクロプロセッサ用の降圧型電源を実現する低リップル・高速応答制御方式を提案し原理確認を行う。

1. 可変インダクタを利用した低リップル・高速応答化: スイッチング電源回路のインダクタ値のリップルと速応性のトレードオフの関係から、負荷電流がほぼ一定の場合はインダクタ  $L$  の値を大きくして低リップル化を、大きな負荷電流変動のときはインダクタ  $L$  の値を小さくして速応性を向上させる。この負荷電流変動に値を適応させる可変インダクタは MEMS 技術または複数のインダクタをスイッチ接続することで実現する。

2. 可変容量を利用した低リップル・高速応答化: 負荷変動時に出力容量の電荷量を可変にさせることによって負荷変動時の影響を小さくし低リップル・高速応答化を図る。この方式は MEMS 技術を用いた可変容量または負荷変動に応じて出力容量にかかる電圧を可変させる回路方式で実現する。

3. 制御部の工夫による高速応答化: 負荷変動に応じて制御部の参照電圧を可変にさせることによって高速応答化を図る。

また負荷電流変動検出回路はトランスとダイオード・ブリッジ回路等で実現できる。提案手法は動作状態により回路内部の素子値を変更することで定常特性・過渡特性両方の性能向上を図る。

## 2. 降圧型スイッチング電源回路の原理

図 1 に入力電圧  $V_{DD}$ 、パワー MOS スイッチ、チョークコイル ( $L$ )、容量 ( $C$ )、ダイオードから構成されたチョップパ型降圧型のスイッチング電源の構成を示す。この回路ではスイッチのオン・オフによって生じた電圧を LC フィルタで平滑化して、入力電圧より低い電圧を出力する。スイッチのオン・オフにより高い入力電圧 ( $V_{DD}$ ) が低い出力電圧 ( $V_{OUT}$ ) に高効率で変換され、また LC はローパスフィルタとして出力電圧を平滑化する。

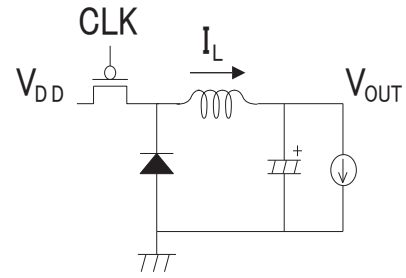


図 1 降圧型スイッチング電源回路。

Fig. 1 A switching regulator circuit (buck converter).

素子が理想的なものとすると、CLK がオンの時 ( $T_{ON}$ )、オフの時 ( $T_{OFF}$ ) に  $L$  に流れる電流の変化量 ( $\Delta I_{Lon}$ ,  $\Delta I_{Loff}$ ) はそれぞれ次式のように表される。

$$\Delta I_{Lon} = \frac{V_{DD} - V_{OUT}}{L} T_{ON}, \quad \Delta I_{Loff} = \frac{V_{OUT}}{L} T_{off}.$$

$L$  に流れる電流は連続的に変化するのでこの 2 つの電流変化量は等しくなり出力電圧は次のようになる。

$$V_{OUT} = \frac{T_{on}}{T_{on} + T_{off}} V_{DD}.$$

出力電圧はクロック・デューティ  $T_{on}/(T_{on} + T_{off})$  で決まるので出力電圧を連続に可変可能であることが分かる。出力負荷電流に変動がある場合も PWM を用いたフィードバック制御により一定出力電圧を保つことができる [11]。

## 3. インダクタと電源の応答・リップル特性

コイル (インダクタ  $L$ ) には、電流が流れ始めてからしばらくすると一定の電流が流れ続け、入力電源との接続を切ってもコイルは電流を流し続けようという性質がある。これは、電流が増えている間にコイルは電気エネルギーを磁気エネルギーとして蓄積し、電流が減る時にこの蓄積したエネルギーを放出するためである。このエネルギーの蓄積量はコイルのインダクタンスに比例している。インダクタはこの性質から負荷電流に変動が生じたときの高速応答を妨げる。

次に電源のリップル電圧の問題を考える。大きな値のインダクタ  $L$  を用いると低リップルになることが知られているが、上記のように大きな  $L$  は応答特性を劣化させる。すなわちインダクタ値  $L$  の観点からは高速応答と低リップルはトレードオフの関係にある。またリップル電圧を低く抑える一手段として ESR (等価直列抵抗) の小さい出力容量を用いることも行われるが、発振の可能性があるので回路の安定性の注意が必要である。

## 4. 高速応答・低リップルのための提案回路と原理

提案する回路ブロック図を図 2, 図 3 に示す。

図 2 の提案回路は、従来のスイッチング電源回路に、切り替えスイッチ付の 2 つの直列インダクタ、キャパシタの下側電極に電圧を印加する回路およびそれらの制御回路を付加することで実現する。切り替えスイッチ付の 2 つの直列インダクタで可変インダクタを実現するが、その原理は次のようになる。

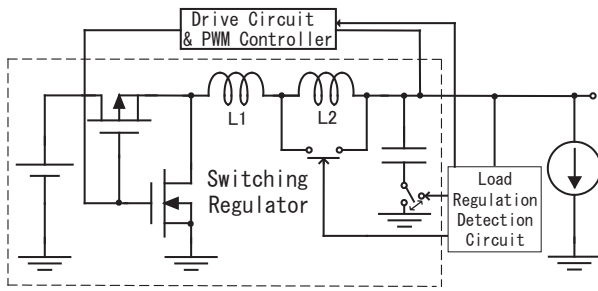


図 2 提案回路ブロック図 (回路的に実現する可変インダクタ, 可変容量使用).

Fig. 2 The proposed circuit with a variable inductor using series inductors and a switch, and a variable capacitor.

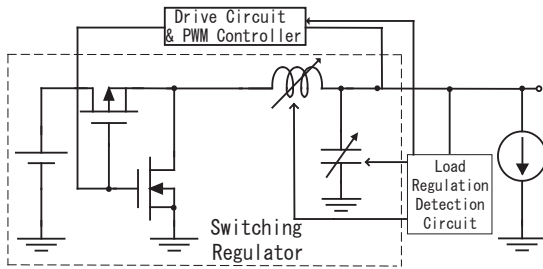


図 3 提案回路ブロック図 (MEMS による可変インダクタ, 可変容量使用).

Fig. 3 The proposed circuit with MEMS variable inductor and capacitor.

- スイッチが OFF の時: 二つのインダクタ  $L_1$ ,  $L_2$  (ここでは  $L_2 > L_1$  を想定している) が直列接続され合成インダクタンスは  $L_1 + L_2$  となり, 大きなインダクタンス値が得られる.
- スイッチが ON の時: スイッチ付きのインダクタが等価的に短絡され, 合成インダクタンスは  $L_1$  となり, 小さなインダクタンス値が得られる.

なお, 2つのインダクタを並列接続し値の大きい方の  $L$  に直列にスイッチをつけて可変インダクタを実現することもできる.

図 3 の提案回路は, 従来のスイッチング電源回路の平滑部に MEMS 技術を用いたインダクタの値が可変出来るインダクタ  $L$  と容量が可変出来る容量  $C$  を利用し, それらを制御するための制御回路と負荷電流変動検出回路を付加することで実現する.

負荷電流変動検出回路は出力負荷電流変動の絶対値と変化方向を検出する. 出力負荷電流の変動が小さい(一定)時にはインダクタンスの値を大きくしリップル電圧を低く抑え, 大きい時にはインダクタンスの値を小さくし高速応答を実現する. また負荷電流が急激に大きくなる時には出力容量に印加する電圧を持ち上げ, または MEMS 可変容量値を小さくすることで負荷回路に容量の電荷を供給し出力電圧降下を妨げる. 逆に負荷電流が急激に小さくなる時には出力容量に印加する電圧を引き下げ, または MEMS 可変容量値を大きくし, 負荷回路への電流を吸収し急激な出力電圧上昇を妨げる.

## 5. SPICE シミュレーションによる動作確認

図 2 の提案回路で出力負荷に変動を与えた時の過渡応答を SPICE シミュレーションで調べた.

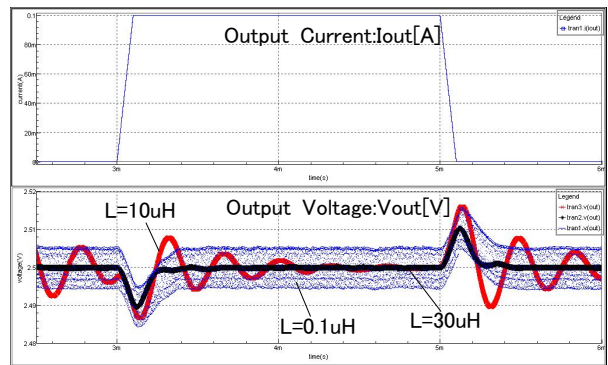


図 4 インダクタンス  $L$  値が  $0.1\mu H$ ,  $10\mu H$ ,  $30\mu H$  の時の, 負荷電流  $I_{out}$  の変動に対する出力電圧  $V_{out}$  の応答特性.

Fig. 4 Output voltage in response to load current change for  $0.1\mu H$ ,  $10\mu H$ ,  $30\mu H$ .

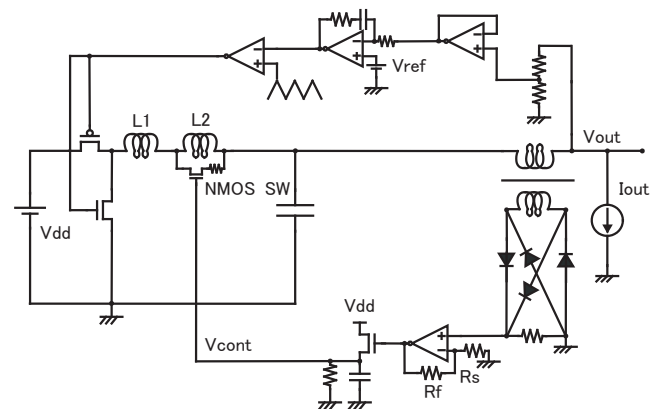


図 5 提案回路 (図 2) の詳細回路 (容量電極電位切り換えスイッチ部は含んでいない).

Fig. 5 The detailed circuit in Fig. 2 with a variable inductor but without a variable capacitor.

ここでは次に定義する「リップル電圧」, 「応答時間」を評価パラメータとした.

- リップル電圧: 出力電圧の揺れの最大電圧と最小電圧の差 ( $= V_{peak-to-peak}$ ).
- 応答時間: 変動時間から出力電圧の揺れがリップル電圧の  $\pm 3\%$  以内に収束するまでの時間.

### 5.1 インダクタ値と電源の応答特性

最初に従来のスイッチング電源回路で様々なインダクタの値の場合に負荷変動を与えた時の応答特性を調べた. インダクタ  $L$  の値を  $0.1\mu H$ ,  $10\mu H$ ,  $30\mu H$  とした時の, 出力負荷電流  $I_{out}$  を 0 から 100mA, 100mA から 0 まで変化させた時の応答特性のシミュレーション結果を図 4 に示す. このシミュレーション結果より「出力インダクタンス  $L$  の値が大きいほどリップル電圧は小さく, オーバースhoot 電圧は大きく過渡特性がよくない」という予期通りの動作を確認出来た.

### 5.2 可変インダクタを利用した高速応答化

次に図 2 の提案回路の可変インダクタによる高速応答動作確認のための構成図を図 5 に示す. インダクタ切り替えスイッチには NMOS を使用した. スイッチを OFF した時, 即ち合成インダクタンスが  $L_1 + L_2 = 30\mu H$  の時のリップル電圧は 3.1mV

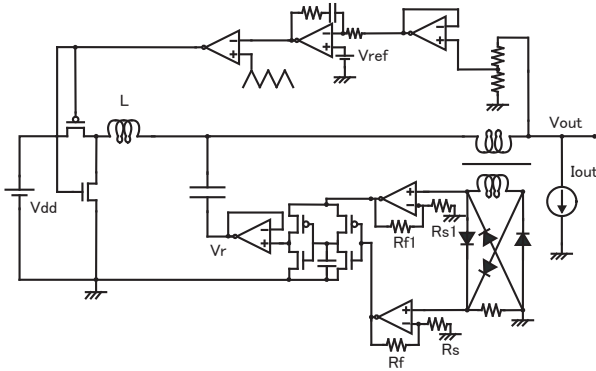


図 6 可変容量を用いた低リップル化の構成図.

Fig. 6 The proposed low-ripple realization with a variable capacitor.

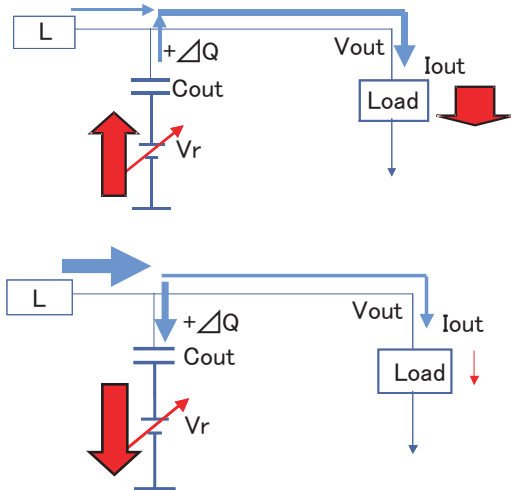


図 7 可変容量を用いた低リップル化の原理.

Fig. 7 Principle of the proposed low-ripple realization with a variable capacitor.

となり、 $L = 30\mu H$  で固定した時のリップル電圧  $1.8mV$  に比べ大きくなった。スイッチを ON させた時、即ち合成インダクタンスが  $L1$  の応答時間は  $0.7ms$  となり、 $L = 0.5\mu H$  で固定した時の応答時間  $0.5ms$  に近い値となっていることが確認出来た。即ち低リップルを実現する為にインダクタの値を大きくした時の回路と、高速応答を実現する為にインダクタの値を小さくした時の回路を、提案回路一つで実現することが出来る [12]。

### 5.3 可変容量を利用した低リップル化

前節で可変インダクタを用いて高速応答化の効果を確認できたが、過渡状態の  $L$  を小さくしているときに出力電圧リップルが増加してしまうという問題点が生じた。そこで可変容量を利用することにより、低リップルを実現する手法を提案する (図 6)。出力容量  $C_{out}$  の下部電極に負荷電流変動に応じた電圧  $V_r$  を印加し過渡状態でのリップル電圧を減少させる (図 7)。

図 7 にスイッチング電源の出力平滑回路部を示す。負荷電流 ( $I_{out}$ ) が急激に増大した時 (図 7 (上)),  $C_{out}$  の負極電極の電位を持ち上げて、容量に蓄えられていた電荷を負荷に供給し出力電圧ドロップを妨げる。また、負荷電流が急激に減少した時 (図 7 (下)),  $C_{out}$  の負極電極の電位を引き下げて、インダクタからのエネルギーを容量へ引き込み負荷への電荷供給を減少

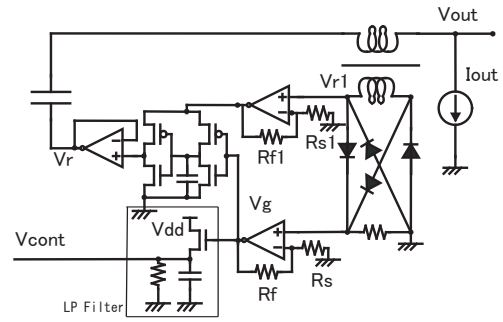


図 8 提案する負荷変動検出回路.

Fig. 8 Load current change detection circuit.

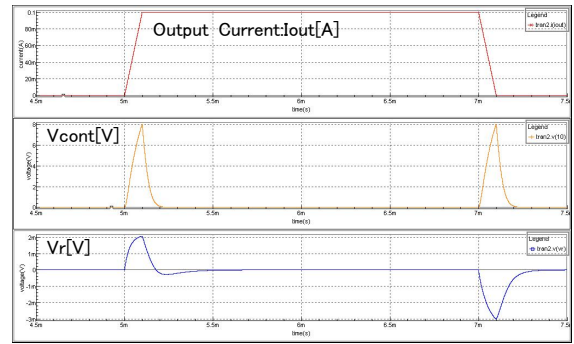


図 9 負荷電流変動検出回路の SPICE シミュレーション.

Fig. 9 SPICE simulation result of the load current change detection circuit.

させ、出力電圧上昇を妨げる。この原理により負荷電流変動時のリップル電圧を減少させる。提案回路のリップル電圧は  $0.6mV$  となり、 $L = 30\mu H$  で固定した時のリップル電圧  $1.8mV$  に比べ小さくなった。

### 5.4 負荷電流変動検出回路

図 8 に提案する負荷変動検出回路の回路図を、図 9 にその SPICE シミュレーション結果を示す。この回路の LPF を通した出力  $V_{cont}$  は可変インダクタのスイッチに接続され負荷電流変動の絶対値が大きいときは論理 1 を出力してスイッチをオンにする。小さいときは論理 0 を出力してスイッチをオフにする。LPF は時定数  $T = RC$  により、 $V_{cont}$  を“なだらか”に変化させスイッチのオン・オフ時のインダクタの電流変化を円滑に行わせる。この回路のもう一つの出力  $V_r$  は出力容量  $C_{out}$  の負電極に接続され、負荷電流が急激に増加したときは  $V_r$  は正電圧を出力し、急激に減少したときは負電圧を出力する。トランス、ダイオードブリッジ、非反転増幅器、マルチプレクサー部から構成される。図 9 の結果から負荷変動を検出し、 $V_{cont}$ 、 $V_r$  が原理通りの動作をしていることが確認出来る。

### 5.5 提案回路全体の構成

可変インダクタと可変容量を利用した提案方式 (図 2) の全体回路構成を図 10 に示す。負荷変動に応じてインダクタを可変させることで高速応答が可能となり、また負荷変動時に容量電極にかかる電圧を可変にすることで低リップルが実現出来る。即ち、高速応答かつ低リップルを同時に実現出来る。 $L$  の値を  $0.5\mu H$ 、 $30\mu H$  に固定した場合と比較すると、スイッチをオフした時、即ち合成インダクタンスが  $L1 + L2 = 30\mu H$  の時のリッ

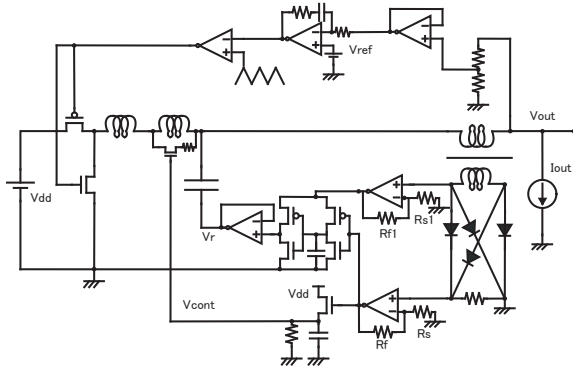


図 10 提案回路 (図 2) の全体回路図.

Fig. 10 Detailed description of the proposed circuit in Fig. 2.

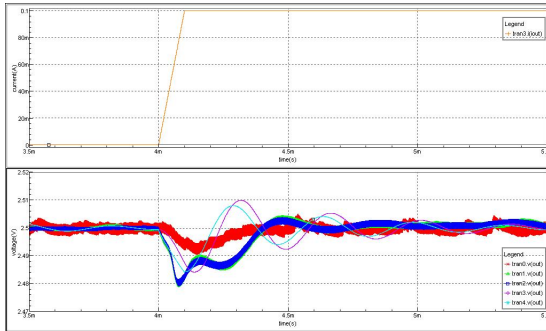


図 11 提案回路全体の SPICE シミュレーション結果.

Fig. 11 SPICE simulation result of the proposed circuit.

プル電圧は、 $2.0\text{mV}$  となり、 $L = 0.5\mu\text{H}$  で固定した時のリップル電圧  $7\text{mV}$  よりも小さくなる。また、スイッチをオンさせた時、即ち合成インダクタンスが  $L_1 = 0.5\mu\text{H}$  の応答時間は  $0.6\text{ms}$  となり、 $L = 30\mu\text{H}$  で固定した時の応答時間  $2.4\text{ms}$  より短くなることが確認出来た。使用する MOS スイッチ、及びその  $W, L$  サイズや回路定数によりこれらの特性は変化するので、最適設計法の開発が必要である。

## 6. MEMS 技術による可変インダクタ・容量

次世代マイクロプロセッサ用の電源回路の実現のため、PWM 制御周波数を上げて小さい値のインダクタ、キャパシタを利用することや複数チャネルインターリーブ方式、新しい制御方式を用いて性能向上を図る手法が提案されている [8] ~ [10]。しかしながら次世代マイクロプロセッサの要求を満たす電源回路方式の解は見つかっていない。そこで比較的小さい値のオンチップの (値が固定の)  $L, C$  を用いるということをさらに発展させ、その解の一つの可能性として、小型の可変インダクタ・キャパシタを MEMS 技術を用いて実現しスイッチング電源に用いることを検討している (図 3)。我々が考案した可変インダクタの構成を図 12 に、そのシミュレーション結果を図 13 にそれぞれ示す。インダクタンス値は  $216\text{nH}$ 、 $Q$  値は 4 程度のスパイラルインダクタを使用し、可変率は 20% 程度を実現している。アクチュエータの駆動周波数は  $1.5\text{kHz}$  である。また、可変キャパシタの構成を図 14、シミュレーション結果を図 15 に示す。容量可変幅は  $0.1\text{pF}$  から  $2.3\text{pF}$  であり、高い可変率 (95%) を実現出来た。シミュレーションには CoventorWare を用いた。これらの

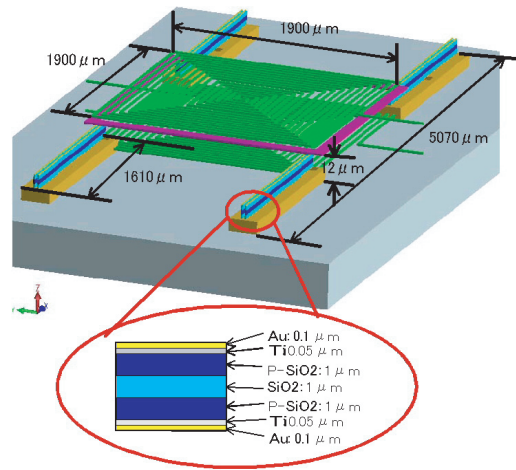


図 12 MEMS 技術による可変インダクタの構成.

Fig. 12 Proposed structure of a MEMS variable inductor.

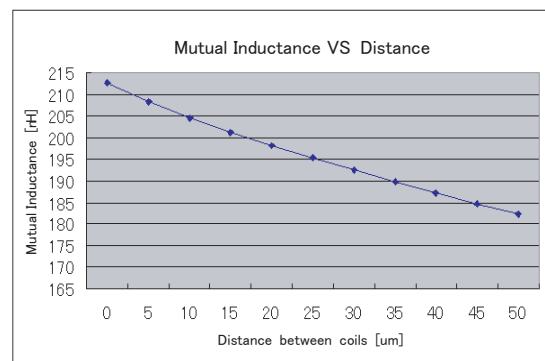


図 13 MEMS 技術による可変インダクタのシミュレーション結果.

Fig. 13 Simulation result of the MEMS variable inductor.

デバイスをスイッチング電源回路へ適用することで、提案手法 (図 3) を一つのデバイスで実現できる可能性がある。

## 7. サーボ制御を利用した高速応答方式の提案

通常のスイッチング電源の回路の PWM 制御では、出力電圧  $V_{out}$  が目標値 (参照電圧)  $V_{ref}$  より大きくなった場合は、PWM の出力は、デューティが小さいクロックが出力され、また、出力電圧が小さくなった場合は、デューティが大きいくロックが出力される。このとき目標値  $V_{ref}$  は一定であるレギュレータ制御である。ここでは負荷電流変動が起こったときに、その参照電圧  $V_{ref}$  を変化させて高速応答を実現することを提案する。(目標値を変化させるのでサーボ制御と言えよう。) その原理を図 16 に、シミュレーション結果を図 17 に示す。

負荷電流が増加した場合、参照電圧  $V_{ref}$  を  $0.625\text{V}$  から  $0.645\text{V}$  に増加させる。この時、出力電圧  $V_{out}$  は、負荷電流増加によって下がってしまう。しかし目的値である参照電圧  $V_{ref}$  は上がっているので、両者の差は大きくなり、PWM 制御は  $V_{ref}$  がもとの  $0.625\text{V}$  の場合に比べ、より大きなデューティ比のクロックを生成し、目標電圧へ短い時間で回復できる。負荷電流変動が小さくなったときにもとの参照電圧  $0.625\text{V}$  に戻す。また、逆に負荷電流が小さくなった場合、出力電圧は上がるので、参照電圧  $V_{ref}$  を下げることで  $V_{ref}$  がもとの  $0.625\text{V}$  の場合に比べ、

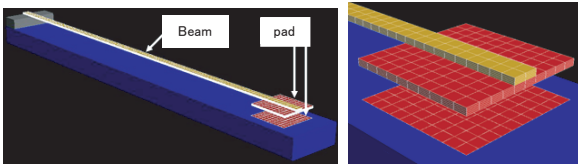


図 14 MEMS 技術を利用した可変容量の構成図.

Fig. 14 Proposed structure of an MEMS variable capacitor.

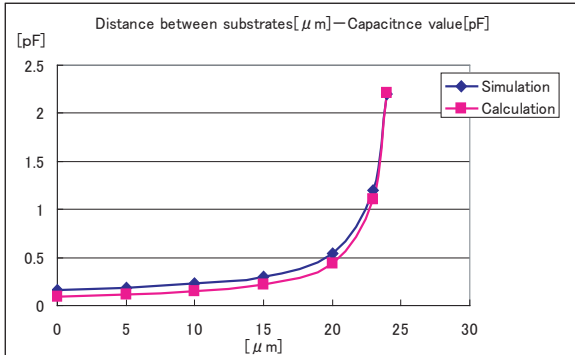


図 15 MEMS 技術を利用した可変容量のシミュレーション結果.

Fig. 15 Simulation result of the MEMS variable capacitor.

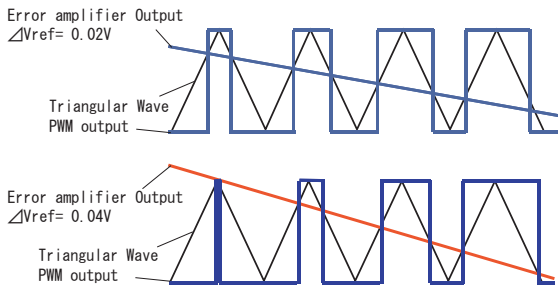


図 16 提案するサーボ制御の原理.

Fig. 16 The principle of the proposed servo control circuit.

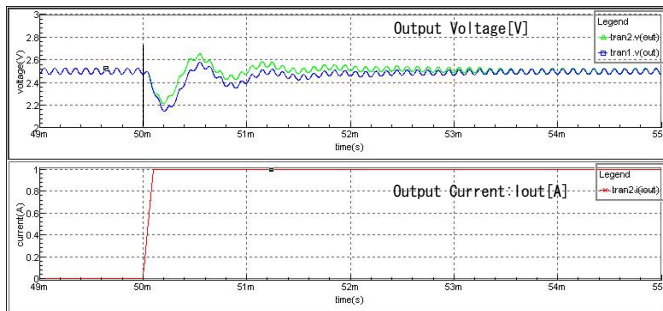


図 17 提案するサーボ制御のシミュレーション結果.

Fig. 17 SPICE simulation result of the servo control circuit.

より小さなデューティ比のクロックを生成する。一定期間後に、もとの参照電圧に戻し通常動作させる。以上により負荷変動時の高速応答を実現する。

提案手法で負荷電流増加、減少に対して 25%~60%の高速化効果を確認した。負荷変動  $\Delta I_{out}$  が 1A のとき、 $V_{ref}$  の値を 0.625V から 0.645V に変動させた場合の応答時間は 3.3ms となり、変動させない場合の応答時間 4.4ms と比べ 25%の高速化を確認出来た (図 17)。

## 8. まとめ

次世代マイクロプロセッサ用のスイッチング電源回路への応用を目的として、低リップル・高速応答を実現する回路構成を提案した。提案回路は可変インダクタ・キャパシタ、負荷変動検出回路を従来回路に付加して実現する。可変インダクタ、可変キャパシタを回路的および MEMS 技術を用いて実現することを検討した。負荷電流が一定のときはインダクタ値を大きくして低リップル化を実現し、大きな負荷電流変動のときにはインダクタ値を小さくし、かつキャパシタにかかる電圧を変動させることで、高速応答を実現する。また、制御回路の一部にサーボ制御を利用することで高速応答を実現する手法を提案した。提案回路の動作を SPICE シミュレーションによって確認した。

今後は、次世代マイクロプロセッサの電源回路の要求仕様を考慮した設計を検討していく。

謝辞 有意義なご議論をいただきましたルネサステクノロジ社恩田謙一氏、大分大学鍋島隆先生に謝意を表します。

## 文 献

- [1] <http://www.intel.com/design/Pentium4/guides/302356.htm>
- [2] 特表 2003-533754, “DC コンピュータ構成要素への電力送達を制御するシステム,” 日本 (2003 年 11 月 11 日).
- [3] T. Nabeshima et al., “Analysis and Design Considerations of a Buck Converter with a Hysteretic PWM Controller,” *35th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference*, pp.1711-1716, Aachen, Germany (2004).
- [4] J. Zhao et al., “Steady-State and Dynamic Analysis of a Buck Converter Using a Hysteretic PWM Control,” *35th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference*, pp.3654-3658, Aachen, Germany (2004).
- [5] X. Zhou et al., “Investigation of Candidate VRM Topologies for Future Microprocessors,” *Proc. of Applied Power Electronics Conference and Exposition*, pp.145-150, Anaheim, CA (Feb. 1998).
- [6] P-L. Wong et al., “VRM Transience Study and Output Filter Design for Future Processors,” *Proc. of VPEC Seminar*, pp.1-7, Blacksburg, VA (Sept. 1997).
- [7] X. Zhou, et al., “A High Power Density, High Efficiency and Fast Transient Voltage Regulator Module with a Novel Current Sharing Control Technique,” *Proc. of Applied power Electronics Conference and Exposition*, pp.289-294, Dallas, TX (Mar. 1999).
- [8] P. Hazucha, et al., “A 233 MHz 80%-87% Efficient Four-Phase DC-DC Converter Utilizing Air-Core Inductors on Package,” *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol.40, pp.837-845 (2005).
- [9] S. Abedinpour, et al., “A Multi-Stage Interleaved Synchronous Buck Converter with Integrated Output Filter in a 0.18μm SiGe Process,” *Tech. Digest of ISSCC*, (Feb.2006).
- [10] T.-Y. Man et al., “A CMOS-Control Rectifier for Discontinuous-Conduction Mode Switching DC-DC Converters,” *Tech. Digest of ISSCC*, (Feb. 2006).
- [11] T. Daimon, et al., “Spread-Spectrum Clocking in Switching Regulators for EMI Reduction,” *IEICE Trans. on Fundamentals*, vol. E86-A, no. 2, pp.381-386 (Feb. 2003).
- [12] 張挺 他, “スイッチング電源の負荷変動に対する高速応答制御方式,” 電気学会 電子回路研究会, ECT-05-53 (2005 年 7 月).
- [13] 光野正志 他, “MEMS 技術を用いた可変インダクタの設計,” 電子情報通信学会 第 18 回 回路とシステム (軽井沢) ワークショップ, pp.413-418 (2005 年 4 月).
- [14] M. Kono, et. al., “Designing Variable Inductors with MEMS Technology”, *IEEJ International Analog VLSI Workshop*, Bordeaux, France (Oct. 2005).