

マルチフェーズ降圧形スイッチング電源における 可変負荷対応順次フェーズ切換え方式

小堀康功* 孫逸菲 熊軼 築地伸和 高井伸和 小林春夫 (群馬大学)

Multi-Phase Buck Type Switching Converter
with Adaptive Phase Chang according to Output Current

Yasunori Kobori*, Yifei Sun, Yi Xiong, Nobukazu Tsukiji, Nobukazu Takai, Haruo Kobayashi
(Gunma University)

Abstract

We have proposed the new multi-phase buck-type switching converter with adaptive phase-chang according to the output current. Providing priority in a activity order of each phase converter, the secondary priority phase-converter operates after current saturation of the first priority phase-converter. Each phase-converter is controlled with the inductor current and the output voltage. When the output current is smaller than the saturation current of the first priority phase-converter, only the first priority phase-converter operates.

キーワード：マルチフェーズ電源, スwitching電源, 電流電圧制御, 高効率

(Keywords: Multi-Phase Converter, Switching Converter, Current and Voltage Control, High Efficiency)

1. はじめに

昨今の電子情報機器では、高機能・高速化等により使用電力がますます増大している。特にサーバー用のCPUにおいては100A以上の電流が要求され、使用されるスイッチング電源は、マルチフェーズ化されるのが一般的である。このような大電流を必要とする機器においては、最大電力の必要性は瞬時的なことが多く、通常は低電力であることが一般的である。

このような大電力対応のマルチフェーズ電源においては、出力電流の連続的な大変化に応じて各フェーズ(相)電源の動作を切換えることは、出力電圧リプルの観点から好ましくなかった。なお、低負荷時の省電力化の一手法としてサブ電源を有し、出力電流の変化に応じて切換え操作する方式も提案されているが、連続的な切換え手法については明確でない。

今回、マルチフェーズ電源の代表として、4相降圧形DC-DCスイッチング電源を検討した。新たに各相電源に優先順序を施し、負荷電流に応じて、高位優先順序の相電源のインダクタ電流が目標電流に達すると、次優先の相電源が起動する方式とし、各相電源間の切換え方式を工夫して滑らかな相間切換え方式を検討した。なお、シミュレーションにはSIMPISを用いた。

2. 従来マルチフェーズ電源の概要

2-1. 従来4相スイッチング電源の構成

一般的な降圧形電源による4相スイッチング電源の構成を図1に、その動作波形を図2に示す。図1において、各相は降圧形DC-DCコンバータによるパワーステージPSと、メインスイッチを制御するPWM(Pulse Width Modulation)を生成するコンパレータで構成される。さらに共通の構成部品として、出力電圧誤差増幅器および鋸歯状波発生部で構成される。

パワーステージ部およびコンパレータは通常の降圧形電源の構成であり、一般に半導体部品およびインダクタは同一部品で構成される。各コンパレータでは出力誤差増幅電圧 ΔV_o を共通入力として、位相の異なる鋸歯状波SAW(saw-tooth)信号と比較する。

2-2. 4相スイッチング電源の特徴

マルチフェーズ電源の大きな特徴の一つは、出力大電流を等分して各スイッチに流すことにより、半導体MOSFETの許容電流を低減できることにある。この結果、個々のMOSFETを小型化できることにより、ゲート等の浮遊容量を低減して高速スイッチング動作が可能となる。

一方、図1の各相のコンパレータ comp に供給される SAW 信号は等間隔に配分した信号であり、したがって PWM 信号も図2のように 90° 毎の位相差信号となる。この結果、各相のインダクタ電流 IL は、同図のように等価的に4倍に高周波化されると共に、コンデンサへの注入電流は平均化される。この結果、出力電圧リップルは 2mVpp 以下と小さく、単相電源と比較して 1/4 に低減されている。これにより、LC 素子値を大きくすることなく、出力電圧リップルを低減できる。

このようにマルチフェーズ電源は大負荷電流には好適であるが、一方、図3のように負荷電流変動時にも全ての相電源が同程度に動作する。この結果、低負荷時にも全相電源が動作することより、効率改善は著しく厳しかった。

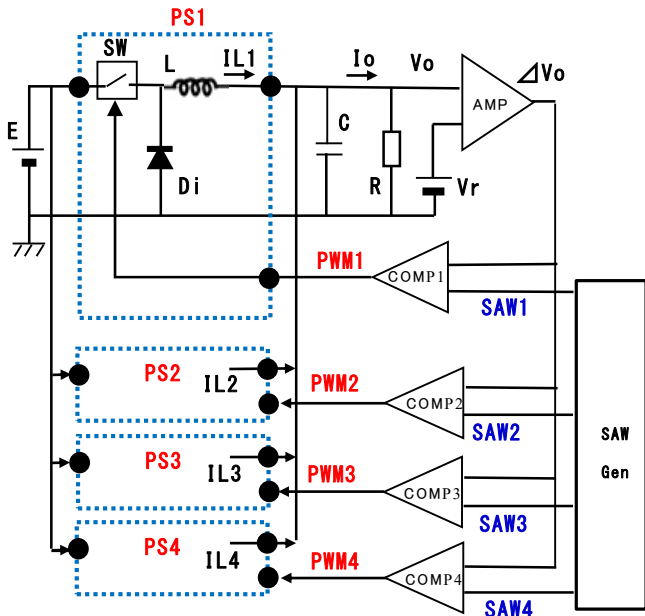


図1 従来4相スイッチング電源の構成
Fig. 1 Conventional four-phase switching converter

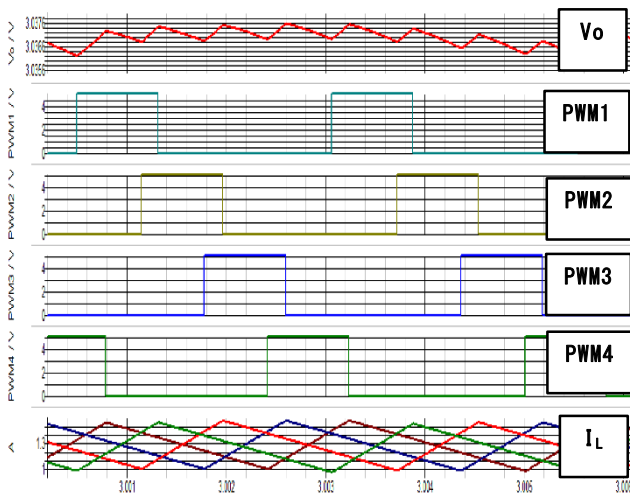


図2 従来4相電源の各制御信号
Fig. 2 Control signals of four-phase converter

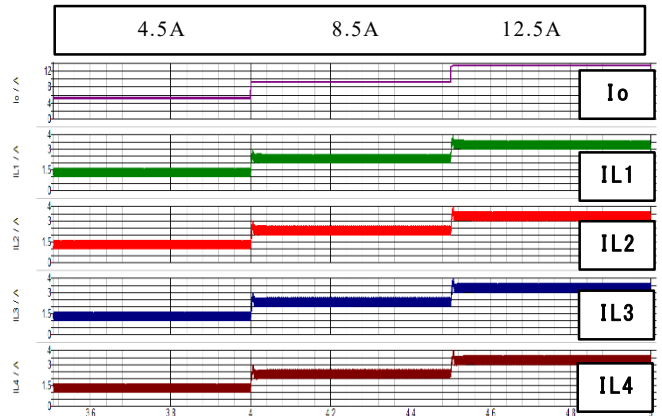


図3 従来4相電源の負荷電流変化への応答
Fig. 3 Step response to output current change

3. 提案マルチフェーズ電源

3-1. 提案4相スイッチング電源の概要

提案するマルチフェーズ電源の動作概念を図4により説明する。4つの相電源に優先順序を設けて、負荷電流に応じて動作する相電源を順次増加させる。各相電源に電流電圧制御を施し、最大電流を設定する。低負荷電流時には最優先相電源のみを動作させ、負荷電流の増加に伴い順次 各相電源を追加動作させる。

基本的には、最優先の第1相電源が常に動作する。低負荷時にはこの相電源のみが動作し、負荷電流の増加に応じてそのインダクタ電流 IL1 が目標最大電流に達すると、次優先の第2相電源を動作させる。さらなる電流増加に対して、第2相電流 IL2 が増加し最大電流に達すると第3相電源が起動し、第3相電流が最大電流に達すると第4相電源が起動される。なお、最終優先の第4相電源では、目標電流の設定をせず、システムの最大電流を、仕様値により制限する。

このような順次動作構成にすると、大負荷電流時には全ての相電源が動作して、従来のマルチフェーズ電源と同様な動作性能を示す。また、低負荷時には、第1相電源のみが動作して、不要なスイッチング素子の消費電力を低減でき、高効率を図れる。

3-2. 提案4相スイッチング電源の構成

提案する4相スイッチング電源の一相分の構成を図5に、そのシミュレーション波形を図6に、回路パラメータを表1に示す。図5の構成において、優先順序の設定方式として、第1相のインダクタ電流 IL1 を検出し、この電流が目標電流 Ir1 に達した時に Cont2 信号を出力して第2相電源を動作させる。この優先順序信号 Cont を順次各相で設けていることにより、負荷電流 Io が徐々に増加した場合、第1相電源に加え順次各相の電源が動作する。逆に負荷電流が減少する状態では、第4相電源より徐々に動作を停止する。

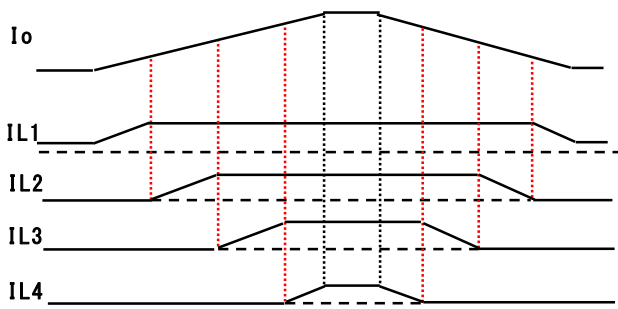


図4 提案マルチフェーズ電源の動作原理
Fig. 4 Principle of proposed multi-phase converter

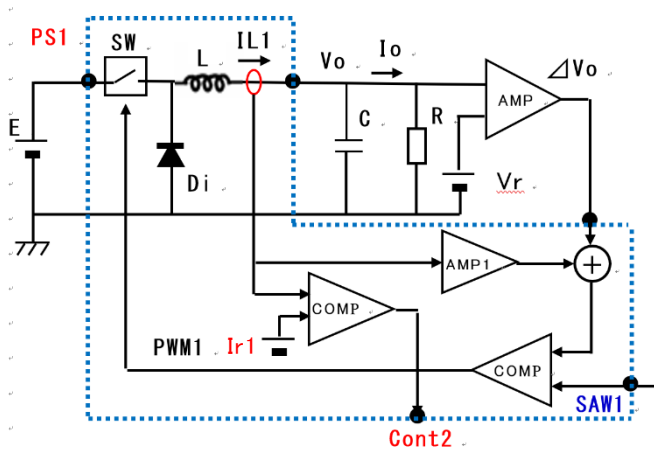


図5 提案4相スイッチング電源の構成
Fig. 5 Proposed four-phase switching converter

以上において、負荷電流は細かく変動することより、インダクタ電流の検出電圧にLPFを施した信号と基準電流値 I_{r1} をヒステリシスを設けて比較する。また、メインスイッチを制御するPWM信号の発生には、電圧誤差増幅信号 ΔV_o と各フェーズの電流誤差増幅信号 ΔI_L を適時加算して鋸歯状波信号SAWと比較する。

4. 提案4相電源のシミュレーション結果

提案する4相電源の特徴は、各相電源を順次動作させるとともに、各相最大電流を維持した状態で次相の電源を動作させることにある。まず、負荷電流 I_o のステップ状変化に対する各相電流変化および出力電圧リップルを検討する。次にランプ状に変化する負荷電流に対する応答特性を確認する。

4-1. ステップ状負荷電流に対する応答

ステップ状に負荷電流を増加させた場合のシミュレーションにおいて、負荷電流変化に対する各相のインダクタ電流 I_L および出力電圧リップルを図6に示す。初期の負荷電流を $I_o=0.5A$ とし、ステップ増加電流を $\Delta I_o=1.0A$ として最大電流 $I_o=4.5A$ まで変化させた。

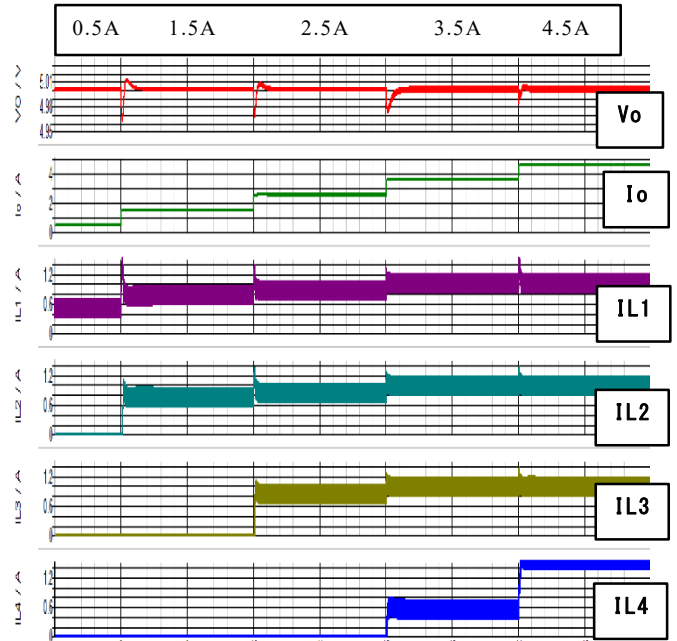


図6 ステップ電流時のシミュレーション結果
Fig. 6 Simulation results of proposed converter (step)

表1 提案4相電源のパラメータ

Table 1 Simulation parameters of proposed converter

V_{in}	10 [V]
V_o	5.0 [V]
I_o	0.2~4.2 [A]
dI/dt	1.0 [A/us]
L	50 [uH]
C	220[uF]
F_{ck}	200 [kHz]

また、各相の目標最大電流を $I_r=1.0A$ に設定している。このとき各相のインダクタ電流 I_L は順次発生しているが、最大電流は $I_L=0.8\sim 1.0A$ と少し誤差が発生している。第4相の最大電流には制限が無いので、最大 $I_{L4}=1.3A$ に達する。

提案する4相電源では、従来電源と同様に、鋸歯状波SAW信号は等間隔の位相差を設けてある。したがって、出力電圧リップルは単相電源の約1/4に低減され、最大電流時においても、 $\Delta V_o=5mV_{pp}$ と出力電圧の0.1%と十分に小さい。またステップ状負荷電流変化 $\Delta I_o=1.0A$ における過渡応答特性は、 $\Delta V_o=-25mV$ のアンダershootである。

4-2. ランプ状負荷電流に対する応答

負荷電流をランプ上に増減させたときの、各相のインダクタ電流と出力リップルを図7に示す。各相の切換え区間に応じて、以下のモードで展開される。

- 1) 区間 $I_o < 1A$ では, $IL1$ のみが流れる.
- 2) 区間 $1A < I_o < 2A$ では, $IL1 \approx 1A$ となり, $IL2$ が増加し始める.
- 3) 区間 $2A < I_o < 3A$ では, 同様に $IL2 \approx 1A$ となり, $IL3$ が増加し始める.
- 4) 区間 $3A < I_o$ では, $IL3 \approx 1A$ となり, $IL3$ が増加し始めて $IL4 = 2.4A$ に達する.

なお, 電流減少時に電流切換え状態に少し乱れが発生している. 各相間の動作を制御する Cont 信号の発生に課題があると思われる, 今後に詳細検討する.

一方, このときの出力電圧リプル V_o は図 7 のように, 電流増加時の各相間動作が滑らかなことより, アンダーシュートは $5mV$ 程度と十分に小さい. しかし, 電流減少時は各相間の接続に少し乱れがあり, 出力電圧のシュートは $\pm 30mV$ 程度に達している.

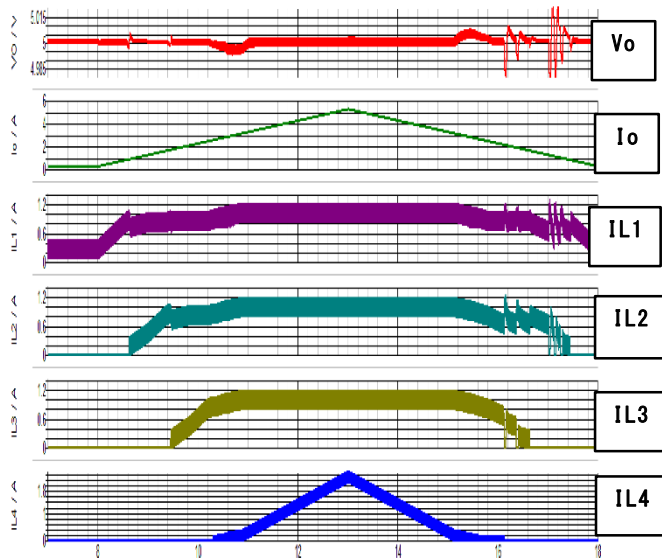


図 7 ランプ電流時のシミュレーション結果
Fig. 7 Simulation results of proposed converter (lamp)

4-3. ランダム状負荷電流に対する応答

負荷電流をランダムなステップ状に切換えた時の, 各相の電流応答を図 8 に示す. 負荷電流値の設定は, $1A$ きざみで離散的に切換えている. このときの各相の最大電流値のばらつきは, $\Delta IL = \pm 0.1A$ 程度と比較的小さなばらつきである. 各負荷電流値において, 動作している電源の数は変化しており, 常に上位の優先度電源から順次動作していることが確認できる. $I_o < 1A$ では $IL1$ のみが, $1A < I_o < 2A$ では $IL1 + IL2$ が, $I_o < 3A$ では $IL1 \sim IL3$ が動作している. $I_o > 3A$ では全ての相電源が動作し, 第 4 相電源のみが $IL4 > 1A$ と電流制限されていないことが確認できる. 以上のように, 多種の負荷変動に対しても問題なく切換え動作が実現されている.

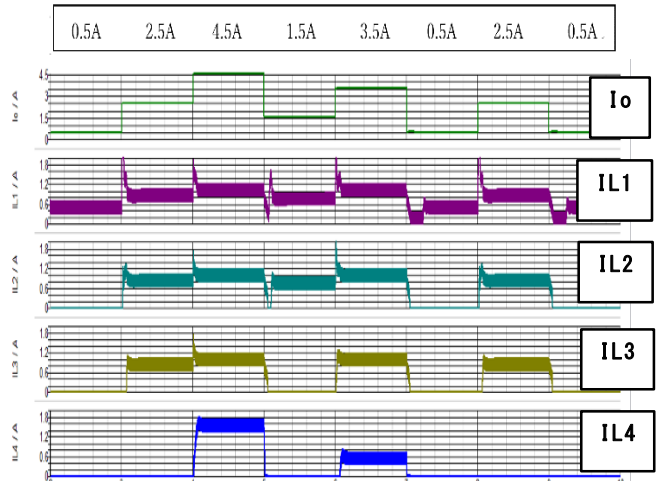


図 8 ランダム電流時のシミュレーション結果
Fig. 8 Simulation results of proposed converter (Random)

3. まとめ

マルチフェーズ電源において, 各相電源に電流制御を施すとともに, その最大電流に制限を設けた. さらに, 各相電源に優先順序を設けて, 負荷電流量に応じて順次 相電源を動作させる方式を提案する. この方式により, 大負荷電流時は全相電源が動作し, 小電流時には最優先の相電流のみが動作する. 今後, 小電流時の効率を大幅に改善できるマルチフェーズ電源へと展開できる.

文 献

- [1] T.Sato, T.Nabeshima, K.Nishijima and T.Nakano, "Multi-Phase Converter Controlled by Hysteretic PWM Method", Power Conversion Conference PCC Nagoya, Japan, (Apr. 2007)
- [2] P. Zumel, C. Fernandez, A. de Castro, and O. Garcia, "Efficiency improvement in multiphase converter by changing dynamically the number of phases," Power Electronics Specialists Conference (PESC) IEEE, (Jun. 2006)
- [3] Y. Sunaga, K. Asaishi, N. Tsukiji, N. Miki, S. Sakurai, M. W. Sahan Dulara, Y. Kobori, N. Takai, H. Kobayashi, "Examination of Tow-phase DC-DC converter with ZVSPWM Control," IEICE technical report 116(421) (Jan. 2017)
- [4] Yi Xiong, Yifei Sun, Nobukazu Tsukiji, Yasunori Kobori, Haruo Kobayashi, "Two-Phase Soft-Switching DC-DC Converter with Voltage-mode Resonant Switch," IEEE International Symposium on Intelligent Signal Processing And Communication Systems (ISPACS), Xiamen, China (Nov. 2017)
- [5] Yi Xiong, Koyo Asaishi, Natsuko Miki, Yifei Sun, Nobukazu Tsukiji, Yasunori Kobori, Haruo Kobayashi, "Constant On-time Controlled Four-phase Buck Converter via Saw-tooth-wave Circuit and its Element Sensitivity", Proceedings of International Conference on Mechanical, Electrical and Medical Intelligent System (ICMEMIS), Kiryu, Japan (Nov. 2017)