COT 方式リプル制御電源における4相化シミュレーション検討

熊 軼[†] 浅石 恒洋 三木 夏子 孫 逸菲 築地 伸和 小堀 康功 小林 春夫 [†]群馬大学理工学府 〒376-0052 群馬県桐生市天神町 1-5-1 E-mail: [†]T161D601@gunma-u.ac.jp

あらまし 一定のオン時間(COT) 方式を備えたリプル制御 DC-DC 電源におけるマルチフェーズバックコンバータ をシミュレーションにより検討した。リプル制御電源では、動作周期の変動により固定周波数のクロックを使用し ないので、鋸歯状波利用によるピーク電圧ホールド方式により変動周期を検出した。4 相化方式として、このピー ク電圧を4等分して鋸歯状波と比較することにより、良好な4相クロックを発生して安定な電流バランスと優れた 応答特性を得た。単相コンバータに比べて高速応答が可能であり、低出力リプルと良好な過渡応答を示した。この 結果、出力電圧リップルの大幅低減や大出力電流の供給を確認した。また、電流バランスの素子感度を確認し、主 制御スイッチ信号のオンタイム誤差の感度が高く、他の素子ばらつきの影響は小さいことが判明した。 **キーワード** リプル制御電源, COT 方式, クロックレス電源, 4相化制御, 電流バランス, 素子感度

Examination of Multi-phase Ripple-based Converter with Constant On-Time Control

Yi XIONG[†] Koyo ASAISHI Natsuko MIKI Yifei SUN Nobukazu TSUKIJI Yasunori KOBORI and Haruo KOBAYASHI[‡]

† Division of Electronics and Informatics, Graduate School of Science and Technology, Gunma University

1-5-1 Tenjin-cho, Kiryu-shi, Gunma, 376-8515 Japan E-mail: †T161D601@gunma-u.ac.jp,

Abstract We investigated multiphase buck converter in ripple control DC - DC power supply with constant on - time (COT) control by simulation. In the ripple control power supply, since there is no fixed clock inside due to the fluctuating cycle, the period is detected by the peak hold voltage based on a saw-tooth wave circuit. As a four-phase system, by quartering the peak voltage and comparing the quartered voltage with the saw-tooth wave, a set of four-phase PWMs is generated to obtain stable current balance and excellent response characteristics. Compared to single phase converter, low output ripple and fast transient response are shown. As a result, the output voltage ripple was greatly reduced and the supply of large output current was confirmed. Moreover, we confirmed the element sensitivity of the current balance, it turned out that the sensitivity of the on time error of the main control PWM signal was high and the influence of the other element variation was small.

Keywords ripple control converter, COT, clock-less converter, four-phase control, current balance, element sensitivity

1. はじめに

今日、多くの電子機器は小型・高速化とともに大電 流化が求められている。高速制御の代表的な制御方式 としてリプル制御(ヒステリシス制御)方式スイッチ ング DC-DC 電源が知られている。この方式は固定周 波数のクロックを使用せず、出力電圧と基準電圧を直 接比較して、高速なスイッチング制御を可能としてい る。反面、このリプル制御電源では、負荷電流の変化 により制御周波数が大きく変動する欠点がある。この 欠点を補足する方式として、スイッチング制御パルス の ON 時間を一定として、制御周波数の高速化を制限 する COT (Constant On Time)方式が提案されている。 このような COT 方式の採用により制御周波数をスイ ッチング素子の限界動作速度に設定できるが、さらな る高速化・大電流化求められている。

一方、スイッチング電源の高速化・大電流化にはマ

ルチフェーズ化が知られているが、この方式は固定ク ロック方式の降圧形電源等には有効な方式であるが、 固定クロックを使用しないソフト・スイッチング電源 やリプル制御電源では、これまで多相化は困難な技術 であった。

2. COT 方式リプル制御電源

2.1. 動作原理

図1に COT 方式リプル制御スイッチング電源の構成を、図2にその動作波形を示す。この回路は、通常のリプル制御電源の制御パルスの出力段に、固定時間幅パルスの発生回路を備えた構成である。パワーステージ部には一般に降圧形電源が使用され、パワースイッチ、インダクタ、還流ダイオードおよび出力コンデンサで構成される。制御部では、出力電圧 Vo と基準電圧 Vrefを比較するコンパレータ、フリップフロップ FF および COT パルス発生用タイマーで構成される。

次に動作を簡単に説明する。まず、制御部からのパ ルス幅変調 PWM (Pulse Width Modulation) パルススイ ッチSが ON/OFF 制御される。SW が ON の状態では、 入力電源 Vin からインダクタ L を介して電流がコンデ ンサ C および負荷抵抗に供給されるとともに、出力電 圧はわずかに上昇する。このスイッチの ON 時間 Ton は COT タイマーで制限され、その後にスイッチは OFF に転じる。この結果、出力電圧は負荷電流 Io により 徐々に低下して、ついには基準電圧より達する。この 結果、コンパレータの出力は H に転じ、FF はその Q 出力を H に反転させる。同時にスイッチは ON すると ともに、COT タイマーが起動して、Ton にリセット端 子 R をトリガして PWM パルスは L に転じる。

なお、近年の DC-DC スイッチング電源では、出力コ ンデンサの等価直列抵抗 ESR が著しく小さくなり、出 力電圧のリプル検出が困難になってきた。この対策と して、インダクタの両端電圧を CR 積分して、この三 角波を出力リプルに加えるリプル注入方式が採用され ることが多い。



図1 COT 方式リプル制御降圧形電源の構成

表1 COT 方式電源のパラメータ

V_{in}	10 [V]
V_o	3 [V]
L	10 [uH]
С	200[uF]
R_f	220[K]
C_{f}	1 [nF]
R_1	3.9 [kΩ]
R_2	470[kΩ]
R_L	0.6 [Ω]



図 2 COT 方式リプル制御電源の動作波形

2.2. シミュレーション結果

図1の回路について、表1のパラメータでシミュレ ーションした結果の動作波形を図3に示す。入力電圧 Vin=10V、出力電圧 Vo=3.0V、出力電流 Io=5.0A とし、 COT パルス幅 Tcor=0.875us に設定した。このときの動 作周波数は、理論的に次式のように求まる。

$$F_{OP} = (Vin/V_0)/T_{COT} = \frac{10}{3} \times \frac{1}{0.875 \times 10^{-6}} = 3.81[MHz] (1)$$

シミュレーション時の動作周波数はFop=3.81MHzで あり、一巡ループ遅延時間や電圧変換率の誤差による 影響で、シミュレーション結果は少し遅くなっている。

図3において、PWM パルスに応じてインダクタ電流 IL は増減し、出力電圧リプル波形も同様の波形となっている。なお、Vo が低下して Vo=Vref になると同時に、PWM パルスは H に転じている。



2.3. COT 方式リプル制御電源の4相化方式

リプル制御電源においては、先述の様に固定された クロックは無く、周波数や位相がわずかに変化する PWM パルスが中心となる信号である。この周波数の 変化するメインの PWM パルスを基準にして、図4の 回路構成により移相変化に追従する図5のような他の 3相パのルスを発生する必要がある。一般的には PLL

(Phase Locked Loop)回路による4相信号が考えられ るが、シミュレーションの結果では、負荷変動による 過度時の整定時間が遅く追従性がやや悪い。今回、新 たに毎周期の検出による4相化パルスの発生方式を検 討した。



図 4 COT 方式電源の 4 相化方式構成



3. リプル制御電源の4相化検討

3.1. 鋸歯状波信号による周期検出方式

使用したピークホールド回路を図6に示す。図1の コンパレータ出力 Vcompのエッジより、サンプリング パルスとトリガパルスを生成する。発生する鋸歯状波 は電圧フォロアを介してグスイッチに供給され、サン プリンパルスにより瞬時にスイッチをオンしてコンデ ンサCに保持される。サンプリング後、トリガパルス により瞬時オンして、鋸歯状波発生回路をリセット/ スタートさせる。 シミュレーション結果を図7 に示 す。







3.2. 電圧分割による4相化パルス発生方式

上記の Vcomp により生成された鋸歯状波は、図4の PWM1 である。 次に分圧器を使用して鋸歯状波のピ ークホールド電圧を四等分に分割し、各分圧電圧と使 用した鋸歯状波とを比較して他の3位相のパルスを生 成する。 図9に示すシミュレーション結果では、生成 された3位相パルスは規則的に位相差を保持している。



図8 4相化パルス発生方式



4.4相化リプル制御電源

4.1. 4相化電流バランスの確認

図 10 に各相における電流バランスを示す。出力電 流が Io = 5.06A の場合、各相のインダクタ電流 I_L は 1.26A とほぼ等しく、良好な電流バランスである。



4.2. 出力電圧リプルと過渡応答特性の比較

図 11 に負荷電流が 5A 時の定常出力電圧リプル を、単相電源と4 相電源の場合を比較して示す。ま た、出力電流変化 △Io=10A 時の過渡応答特性を図 12 に示す。図 11 における 4 相電源の特性は、単相に比 較して出力電圧リップルは △Vo=1.2mVpp の 57%に減 少し、過渡応答ではアンダーシュートで △Vun=0.2V の 70%、オーバシュートで △Vov=0.3V の 59%の低減 であった。また整定時間は、両方とも △Ts=32ns と元 の 1/5 と高速応答であった。



図 11 出力電圧リプルの比較



4.3. 負荷電流の増加と電流バランス

大負荷電流時の電流バランスのシミュレーション 結果を図 13 に示す。 負荷電流が 55A 時にも出力リプ ルは問題なく同等であり、4 相化電源の電流バランス も安定であった。



図 13 大負荷電流時の電流バランス

4.4. 電流バランスの素子感度

マルチフェーズ電源の各相間の電流バランス は、素子定数により変化しやすい。そこで、主電 源の PWM1 に関する各素子に対する素子感度を調 べた。図 14 および図 15 に、PWM1 のオン時間およ び主インダクタ L1 の ESR などのパラメータ誤差 に伴う電流バランスを示す。図 14 において、PWM1 のオン時間が 1%だけ増加すると、主電源のイン ダクタ電流 I_{L1}は 100%以上増加し、感度が非常に 高いことが分かった。この結果、COT パルス幅の 発生回路には細心の注意を払う必要がある。一方、 インダクタ L1 の ESR:R_{L1} の素子感度では、R_{L1}の 増加に伴い I_{L1} は直線的に減少するが、他の電流 は反対に増加する。 $\triangle R_{L1}$ =1%に対して、電流変化 は 0.5%と小さい。



図 14 COT パルス幅変化に対する電流バランス



図 15 インダクタ ESR 変化に対する電流バランス

5. まとめ

固定クロックを使用しないリプル制御電源におい て、一定のオンタイム COT 方式による4相化電源を 提案した。鋸歯状波信号のピーク電圧ホールド回路に より周期検出し、このホールド電圧の4等分電圧と鋸 歯状波を比較して4相の PWM信号を生成した。この 結果、単相電源に比較して4相電源では、定常時の出 力電圧リプルを57%に減少し、過渡応答ではアンダ ーシュートで70%、オーバシュートで59%の低減を 実現した。また負荷変動時の整定時間は、約1/5と短 縮でき高速応答を実現した。一方、素子感度による電 流バランスを検討し、主電源のPWM1のオン時間に 敏感であることを確認した。

文 献

- [1] 須永 祥希,浅石 恒洋,築地 伸和,三木 夏子, 櫻井 翔太郎,マニメル サハン,小堀 康功, 高井 伸和,小林 春夫, "ZVS-PWM 昇圧型 DC-DC 電源における二相化制御方式の検討"電子情 報通信学会,回路とシステム(CAS)研究会 (2017.1)
- [2] 浅石 恒洋,築地 伸和,小堀 康功,須永 祥希, 高井 伸和,小林 春夫, "入出力電圧に依存しな い一定スイッチング周波数ヒステリシス制御電 源の検討",平成28年電気学会産業応用部門大会 (2016.8)
- [3] Y. Xiong, Y. Sun, N. Tsukiji, Y. Kobori, H. Kobayashi, "Two-phase Soft-switching DC-DC Converter with Voltage-mode Resonant Switch", IEEE International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems 2017 (ISPACS), Xiamen, China (Nov. 2017)
- [4] Y. Xiong, Y. Sun, N. Tsukiji, Y. Kobori, H. Kobayashi, "Constant On-Time Controlled Four-phase Buck Converter via Two Ways of Saw-tooth-wave Circuit and PLL Circuit ", IEEE International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems 2017 (ISPACS), Xiamen, China (Nov. 2017)