

# 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

浅石 恒洋\*、築地 伸和、小堀 康功  
須永 祥希、高井 伸和、小林 春夫 (群馬大学)

### Hysteresis Control Power Supply With Switching Frequency Insensitive to Input/Output Voltage Ratio

Koyo Asaishi\*, Nobukazu Tsukiji, Yasunori Kobori,  
Yoshiki Sunaga, Nobukazu Takai, Haruo Kobayashi(Gunma University)

This paper proposes a hysteresis control system buck converter with constant switching frequency. There even when input/output voltage ratio in the steady state changes, the switching frequency does not change (only on-time changes). When the load changes in the transient state, the switching frequency changes for quick response. We have designed the proposed circuit and simulated it to confirm its operation.

**キーワード** : スイッチング電源、ヒステリシス制御、一定スイッチング周波数制御、時比率

**(Keywords)**: Switching Converter, Hysteresis control, Constant Switching Frequency, Duty Ratio)

#### 1. はじめに

今日、主要な電子機器には、多くのスイッチング電源が設けられ、小型・軽量・低コストの検討がされている。最近の動向として低消費電力にするため CPU/MPU などでは待機状態から稼働状態に切り替えるということが頻繁に行われるため、高速な負荷応答特性が要求される。そのためヒステリシス制御方式が多用されている。この方式は出力電圧と基準電圧をコンパレータで直接比較することで高速応答を図っている。しかし、負荷電流の大きさによって動作周波数が変動してしまうという問題があった。その対策として COT(Constant On Time)制御方式が使われている。この方式を用いるとオン時間が一定になるため負荷電流の大きさによらず定常状態では動作周波数が一定となる。また、ヒステリシス制御は出力電圧のリプル成分を利用してコンパレータを駆動するため、リプル注入方式を併用することで ESR(Equivalent Series Resistance)の小さい出力コンデンサを使うことができ、出力電圧のリプルは小さくすることができる。しかしながら、これらの方式の場合、制御周波数は入出力電圧によって変化するため入出力電圧が変動すると制御周波数が変動し、制御特性に悪影響を及ぼすという問題がある。そこで入出力電圧に対しオン

時間を変化させることで制御周波数を一定にする方法を検討する。

#### 2. ヒステリシス制御方式

ヒステリシス制御降圧形電源の構成を図 1 に、動作原理波形を図 2 に示す。本方式の回路構成は、パワーステージの出力電圧  $V_o$  と基準電圧  $V_{ref}$  をヒステリシスコンパレータ  $comp1$  で直接比較する。 $comp1$  は 2 つの基準電圧  $V_{ref+}$  と  $V_{ref-}$  を持っており  $V_o$  が  $V_{ref+}$  より大きくなると PWM は L になり、 $V_{ref-}$  より小さくなると H になる。以上の動作を繰り返すことで  $V_o$  を制御している。しかし、本方式は負荷電流  $I_o$  の大きさによって動作周波数が変動してしまう問題がある。それを解決する方法を次節で説明する。

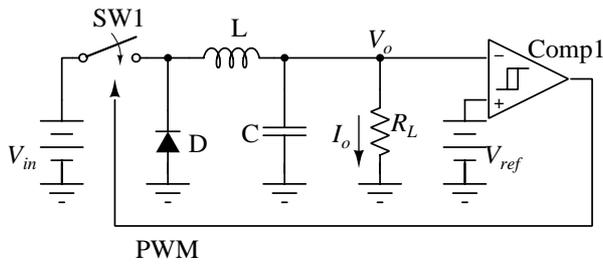


図 1. ヒステリシス制御降圧形電源  
Fig1. Hysteresis control buck converter

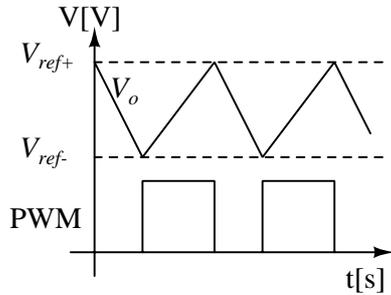


図 2. ヒステリシス制御時の動作原理波形  
Fig2. Waveforms during hysteresis control operation

### 3. COT 制御方式

#### (3-1) 回路構成と動作原理

検討する制御方式を用いた降圧形電源の構成を図 3 に、その動作原理波形を図 4 に示す。本方式の回路構成は、従来のパワーステージと  $R_f, C_f, C_b$  により構成する。リップル注入回路によって三角波リップルを作り出し  $V_o$  に注入することで  $V_r$  生成する。 $V_r$  と基準電圧  $V_{ref}$  をコンパレータで直接比較し、その出力をオン時間固定回路  $T_{on}$  によってオン時間一定にする制御をする。また、オン時間固定回路にはミニマムオフ時間も設定されており、負荷変動時はミニマムオフ時間となりオン時間は固定されているため動作周波数が早くし、応答速度を高めている。以下の図 4 の動作原理波形で定常状態での動作の説明をする。

#### state1 ( $t_0 \sim t_1$ )

$t_0$ にて PWM 信号が H から L に転じ、スイッチ SW はオフになる。インダクタ電流  $I_L$  は減少し始め、出力電流  $I_o$  より小さくなる。すると  $V_r$  も減少し始め  $V_{ref}$  の電圧より小さくなると PWM が H に転じる。

#### state2 ( $t_1 \sim t_2$ )

$t_1$ にて PWM が H になり SW はオンになる。 $I_L$  が上昇し、 $I_o$  より大きくなる。 $V_r$  も上昇し始め固定オン時間が経過した  $t_2$ にて PWM は L に転じる。以上の動作を繰り返すことで  $V_o$  を制御している。

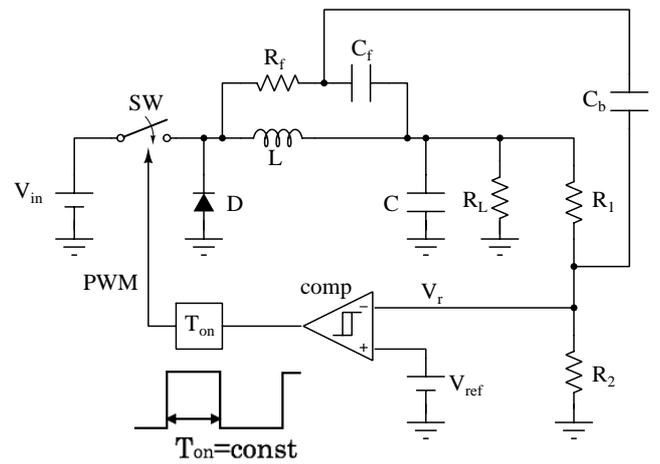


図 3. COT 制御方式降圧形電源  
Fig3. Buck converter with COT control

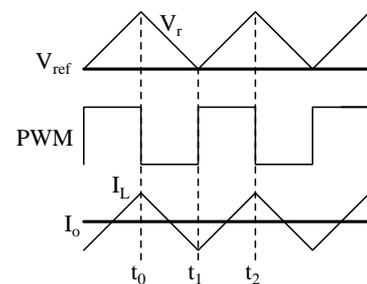


図 4. COT 制御時の動作原理波形  
Fig4. Waveforms during COT operation

#### (3-2) シミュレーション結果

図 3 の構成および表 1 のパラメータによるシミュレーションの結果を図 5、6 に示す。シミュレーションソフトはインターソフト社の SIMPLIS を用いた。動作周波数は 630kHz、オン時間は 800ns である。図 5 に定常状態での波形を表し、図 6 は負荷変動時の波形を表す。定常時のシミュレーション波形は動作原理波形と一致している。また、定常時の出力リップルは  $I_o$  が 1A のときは  $1mV_{pp}$  以下と十分小さく、負荷電流が 0.25A から 0.5A へ変動した時のアンダーシュート及びオーバーシュートは共に 10mV 程度であった。

表 1. COT 制御時の回路のパラメータ  
Table 1. Parameters in COT control circuit

$V_{in}$	10 V
$V_o$	5.0 V
L	22 $\mu$ H
C	470 $\mu$ F
$R_f$	30k $\Omega$
$C_f$	10nF
$C_b$	1nF
$R_1$	40k $\Omega$
$R_2$	10k $\Omega$

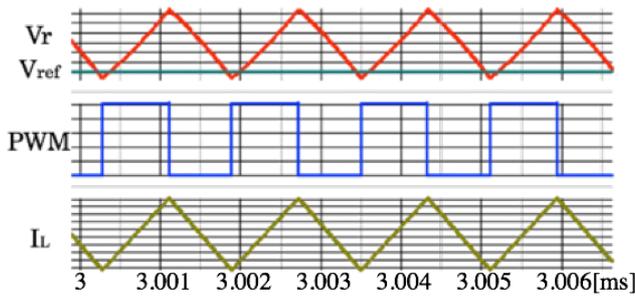


図 5. 定常状態のシミュレーション波形  
Fig5. Simulation waveforms in steady state

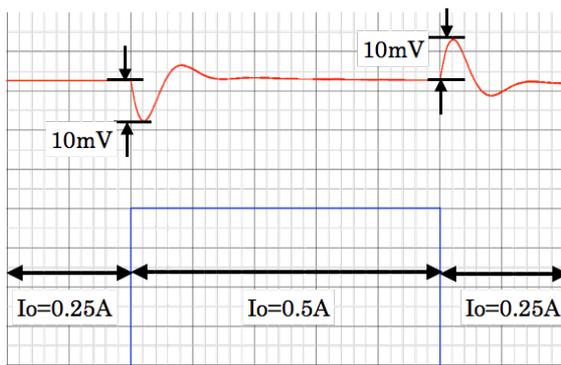


図 6. 負荷変動時のシミュレーション波形  
Fig6. Simulation waveforms in load change

4. 提案制御周波数一定 COT 方式電源

(4-1) 回路構成と動作原理

降圧形電源において定常時の時比率 D、周期  $T_s$  とすると

$$D = \frac{T_{on}}{T_s} = \frac{V_o}{V_{in}} \quad (1)$$

$$T_s = \frac{V_{in}}{V_o} T_{on} \quad (2)$$

となる。(2)式より COT 制御方式では  $T_{on}$  を一定である。したがって、使用する  $V_{in}$  や  $V_o$  の値によって  $T_s$  が変化してしまうという問題がある。この問題を解決するため  $V_{in}$  や  $V_o$  の変化に伴ってオン時間を可変する方式を提案する。提案回路の構成を図 7 に、オン時間を可変するための回路を図 8 に示す。図 8 の回路でオペアンプの入力が仮想短絡されていることを考慮するとコレクタ電流  $i_c$  は

$$i_c = \frac{R_2}{R_e(R_1 + R_2)} V_{in} \quad (3)$$

で表すことができる。式(3)より  $i_c$  と  $V_{in}$  が比例しているの、 $V_{in}$  の増加で  $i_c$  も比例して増加する。したがって図 9 のように SAW の傾きが大きくなるため  $V_+$  と比較するタイミングが早くなり PWM のオン時間は短くなる。また、SAW の波形は次式で表される。

$$SAW(t) = \frac{1}{C_c} \int i_c dt = \frac{1}{C_c} \frac{R_2}{R_e(R_1 + R_2)} V_{in} t \quad (4)$$

$V_o$ が増加した場合は同様の動作で PWM のオン時間が広くなる。この結果、両方の電圧の変化に比例した周期を持つ矩形波 PWM を出力できる。PWM の H/L が切り替わるのは  $V_+$  と SAW の電圧が一致する時なのでその時間  $t_p$  を求めると

$$t_p = \frac{R_{o2}}{R_{o1} + R_{o2}} \frac{R_e(R_1 + R_2)}{R_2} C_c \frac{V_o}{V_{in}} \quad (5)$$

となり、(5)式からも  $V_{in}$ 、 $V_o$  に比例することがわかる。なお、定常時の出力リップルや負荷変動による過渡応答は図 6 と同等であった。

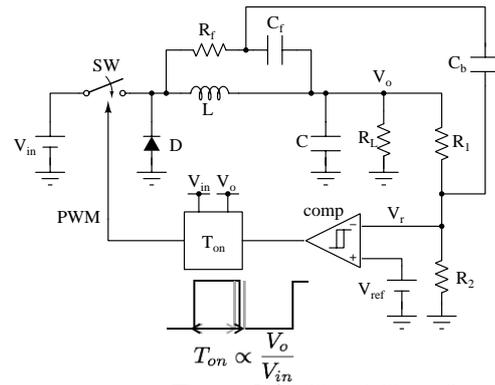


図 7. 提案回路の回路構成  
Fig7. Proposed circuit configuration

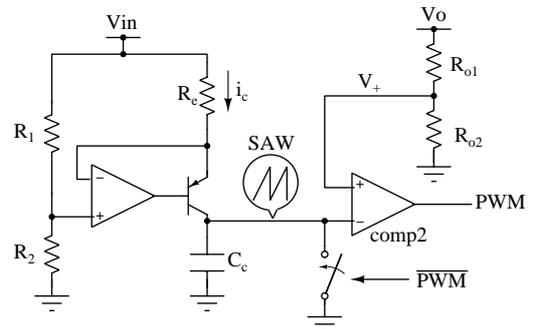


図 8. 提案パルス発生回路  
Fig8. Proposed pulse generator

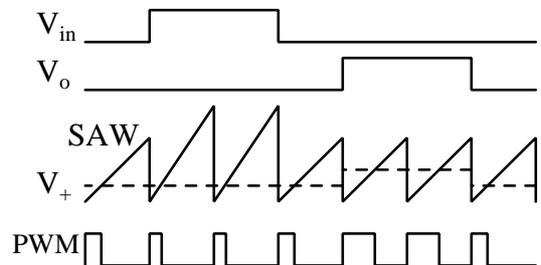


図 9. 入出力電圧が変化した時の PWM  
Fig9. PWM waveforms in response to input/output voltage changes

#### 4-2) 入出力電圧の変化と制御周波数の変化

従来の COT 制御方式と提案した制御方式において入出力電圧を変化させた時の制御周波数のシミュレーション結果を図 10,11 に示す。パラメータは表 1 と同じ値でシミュレーションした。図 10 は  $V_o$  を 5V 固定にして  $V_{in}$  を 10V から 24V の範囲で変動させた時のグラフで、従来方式では制御周波数が約 58%変動したが、提案回路では約 6%の変動に抑えることができた。図 11 は  $V_{in}$  を 10V 固定にして  $V_o$  を 2V から 5V の範囲で変動させた時のグラフである。従来方式では制御周波数が 66%変動したが、提案方式では 2%の変動に抑えることができた。従来方式と比較した場合は、入力電圧を変動させた時は 88%、出力電圧を変動させた時は 99%変動を抑えることができた。また、図 12 より従来方式と提案方式はどちらも負荷電流の変動による定常時の周波数変化は見られなかった。

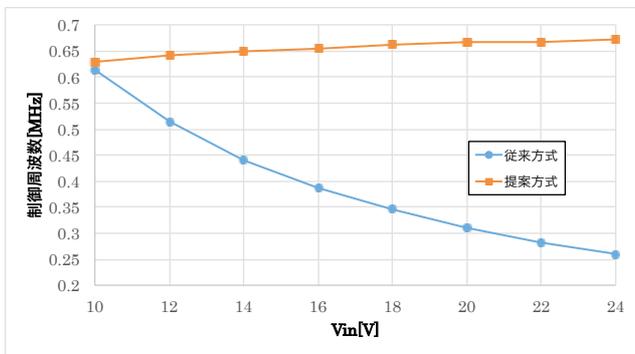


図 10.  $V_{in}$  変動時の制御周波数

Fig10. Control frequency and input voltage

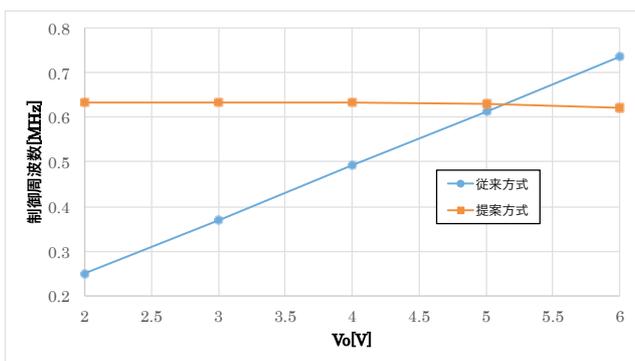


図 11.  $V_o$  変動時の制御周波数

Fig11. Control frequency and output voltage

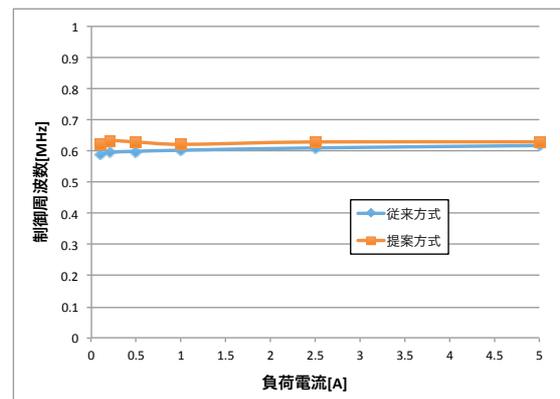


図 12. 負荷電流を変化させた時の制御周波数

Fig12. Control frequency and output current changed

#### 5. まとめ

入出力電圧の変化によって制御周波数の変化が小さい COT 制御方式を提案し、シミュレーションで検証した。定常時リップルや負荷変動時のアンダースhoot及びオーバースhootは従来方式も提案方式も同性能であり、 $V_{in}$  を変動させた時、動作周波数の変動を 6%に抑えることができ、 $V_o$  を変動させた時の動作周波数の変動を 2%に抑えることができた。従来方式と比較した場合、それぞれ 88%、99%動作周波数の変動を抑えることができた。

#### 文 献

- (1) 田中駿祐, 長島辰徳, 小堀康功, 金谷浩太郎, 岡田孝志, 堺昂浩, 高井伸和, 小林春夫, 小田口貴宏, 山口哲二, 上田公大, 松田順一, "ヒステリシス制御を用いた単一インダクタ 2 出力 DC-DC スイッチング電源," 電子情報通信学会 第26回 回路とシステムワークショップ, pp. 330-334, 淡路島 (2013 年 7 月) .
- (2) S. Tanaka, T. Nagashima, Y. Kobori, K. Kaneya, T. Sakai, B.S.Kumar, N. Takai, H. Kobayashi, "Design of Hysteresis Controlled Single-Inductor Multi-Output DC-DC Converter," Key Engineering Materials, 643, pp.69-78 (May 2015)
- (3) 鍋島隆, 佐藤輝被, 吉田信一, 恩田謙一"CR 積分回路を用いたヒステリシス PWM 制御による降圧形コンバータの制御特性" The transactions of the Institute of Electronics, Information and Communication Engineers. B J89-B(5), 664-672,(2006 年 5 月)
- (4) 鍋島隆, 佐藤輝被, 西嶋仁浩, 吉田信一"ヒステリシス PWM 制御を用いた昇圧形・昇降圧形コンバータの制御特性" Technical report of IEICE Energy engineering in electronics and communications 105(45), 29-34,(2005 年 5 月)