

簡単な位相補償で安定に動作する

電流モード制御 DC-DC コンバータの設計

マーク・ハートマン/訳 鈴木 秀彦
Mark Hartman/Hidehiko Suzuki

電流モード制御は、1970年代末ごろから電源に使われ始め、すでに20年以上の歴史があります。しかし、その動作と特性については、まだよく知られていません。

多くの技術者は電圧モード制御の電源については学習した経験はありますが、電流モード制御は高度な技術として敬遠され、学習しないままになっているのが現状ではないでしょうか。これはある意味で不幸なことです。

電源技術者は少なくとも電圧モード制御と電流モード制御の基本的な違いについての知識を身に付け、どのようなケースでそれぞれの制御方式を採用すべきかを判断できる能力をもつ必要があります。

電流モード制御には、次のような利点があります。

- ライン・レギュレーションが優れている
- 位相補償が簡単で、しかも電流連続モードと電流不連続モードの境界点でも安定に動作する
- インダクタの電流を常に検出しているため、それ自体に電流制限機能をもっている

本稿では、電流モード制御の構成、利点と欠点、そして実際のDC-DCコンバータに応用した例を紹介いたします。

電流モード制御とは

■ DC-DC コンバータの二つの帰還方式

電源の性能、例えば入力のライン・レギュレーション、入力ラインと負荷の変動応答特性などは、帰還ループの方式によって決まります。

帰還方式を大別すると、電圧モード制御と電流モード制御に分けることができます。

● 電圧モード制御

図1に示すのは、電圧モード制御のDC-DCコンバータの回路例です。一つの帰還ループが構成されており、入力に出力電圧が帰還されています。

誤差増幅器は、基準電圧 V_{ref} と分圧された出力電圧の差分を増幅します。その出力は、パルス幅変調器PWM(Pulse Width Modulation)に入力されます。

PWMコンパレータは、増幅された差成分信号と、内部で生成されたのこぎり波を比較してオン・デューティ (D_{on}) を可変し、PWM信号を出力します。

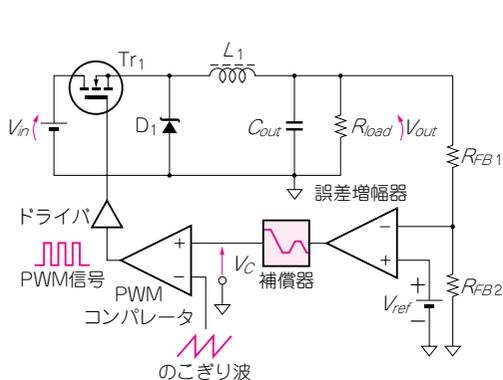


図1 電圧モード制御DC-DCコンバータの基本回路

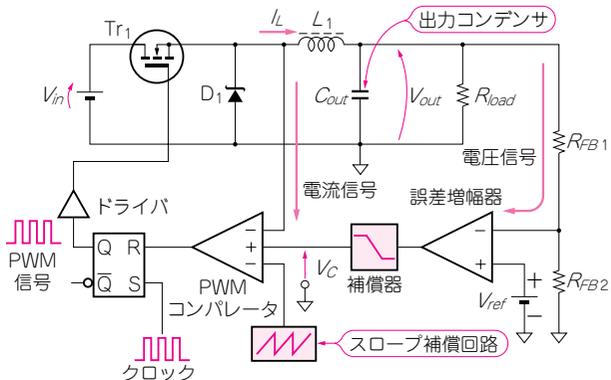


図2 電流モード制御のDC-DCコンバータの基本回路

● 電流モード制御

図2に示すのは、電流モード制御のDC-DCコンバータの回路例です。電圧帰還に、インダクタ電流を帰還するループが追加されています。

電流モード制御のDC-DCコンバータでは、オン・デューティを制御するPWMコンパレータに、インダクタに流れる電流も制御信号として入力されます。

電圧モードと基本的な構成の違い、つまり出力電圧だけでなくインダクタ電流も帰還しています。

電流モード制御のふるまい

■ 三つの電流制御方式

図2に示す電流モード制御のDC-DCコンバータにおいて、インダクタ電流を検出する方法に次の三つがあります。

- 平均電流モード制御
- 固定ON/OFF時間制御
- ピーク電流モード制御

● 平均電流モード制御

図3に示すのは、平均電流モード制御のDC-DCコンバータです。入力電流が入力電圧と同相になり、力率が改善されるように働きます。

● 固定ON/OFF時間制御

図4に示すのは、固定OFF時間制御の電流モードDC-DCコンバータです。

スイッチング素子Tr₁がターン・オンすると、インダクタ電流I_Lが増加します。

帰還されたインダクタ電流が制御信号より大きくなると、スイッチング素子は固定時間だけターン・オフ

します。固定のOFF時間の後、スイッチング素子は再びターン・オンします。結果的にスイッチング周波数は変化します。固定周波数タイプの電流モード制御よりも回路構成がシンプルになります。

● ピーク電流モード制御

一般的に使われている電流モード制御方式です。

図2においてスイッチング素子Tr₁がターン・オンするとインダクタ電流I_Lが増加します。I_Lが制御信号と一致すると、Tr₁は固定周期の残りの期間ターン・オフします。

ピーク電流モード制御は、優れたライン・レギュレーション特性が得られるため、入力電源に含まれる交流リプル成分による聴感周波数帯ノイズを除去できます。

また、電流連続モードでも電流不連続モードでも、同様な動作特性をもつため、広い負荷範囲で安定に動作するという特徴があります。補償も簡単です。

I_Lのピーク値は制御電圧、つまり出力電圧からの帰還信号によってコントロールされます。I_Lの検出信号は制御電圧V_Cと比較されます。検出されたI_LがV_Cと等しくなるまで、PWMコンパレータの出力は“H”(Tr₁はON)を保ち、等しくなれば“L”(Tr₁はOFF)になります。

次のサイクルは、固定周波数のクロック信号源でRSフリップフロップをセットすることで始まります。このように、I_Lのピーク値は制御電圧によって正確に制御されます。

I_Lは定電流源のようにふるまいます。これが電流モード制御の特性の多くを決める要素になります。

■ 各回路ブロックの働き

図5に示すのは、ピーク電流モード制御の小信号動作時のブロック・ダイアグラムです。

二つの帰還ループがあり、一つは外側の電圧帰還ル

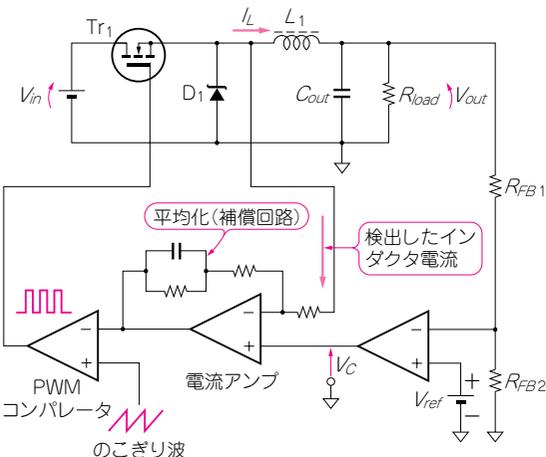


図3 平均電流モード制御のDC-DCコンバータの基本回路

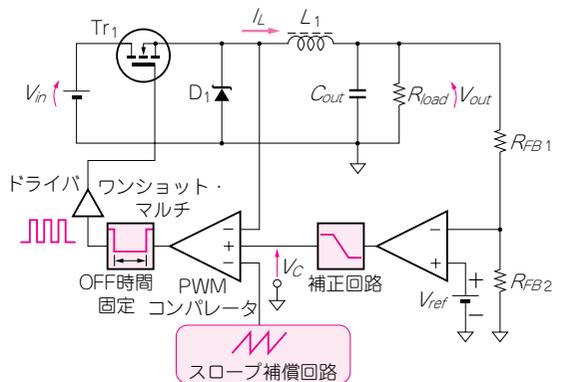


図4 固定OFF時間制御のDC-DCコンバータの基本回路