参考資料

Application Note

昇圧コンバータの電力段に関する基本的な計算

Brigitte Hauke

Low Power DC/DC Application

概要

このアプリケーション・ノートは、連続導通モード (CCM) で動作するスイッチ内蔵 IC を使用して昇圧コンバータを製作する際に、電力段を計算するための複数の式を紹介します。昇圧コンバータの機能の詳細 (関連資料 1 を参照) や、コンバータの補償方法については説明しません。詳細情報が必要な場合は、このドキュメントの末尾にある関連資料を参照してください。

説明のない式については、セクション 8 を参照してください。

目次

1 昇圧コンバータの基本構成....2
1.1 電力段に必要なパラメータ....2
2 最大スイッチ電流の計算....2
3 インダクタの選択....4
4 整流ダイオードの選択....4
5 出力電圧設定....5
6 入力コンデンサの選択....6
7 出力コンデンサの選択....6
8 昇圧コンバータの電力段を計算する式....7
9 関連資料....9
10 改訂履歴....9

English Document: SLVA372

Copyright © 2022 Texas Instruments Incorporated

1 昇圧コンバータの基本構成

昇圧コンバータの基本構成を、図 1-1 に示します。スイッチは使用する IC に内蔵されています。低電力のコンバータでは多くの場合、ダイオードが、コンバータに内蔵された 2 番目のスイッチに置き換えられます。この場合、このドキュメントに記載されている式は、ダイオードの消費電力の式以外はすべて適用されます。

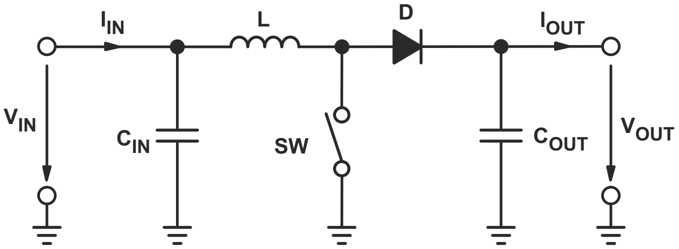

図 1-1. 昇圧コンバータの電力段

1.1 電力段に必要なパラメータ

電力段を計算するには、次の 4 つのパラメータが必要です。

1. 入力電圧範囲:$V_{IN(min)}$ および $V_{IN(max)}$
2. 公称出力電圧:V_{OUT}
3. 最大出力電流:$I_{OUT(max)}$
4. 昇圧コンバータの構築に使用する IC。計算に使ういくつかのパラメータを、データシートから抽出する必要があります。

これらのパラメータが判明していれば、電力段の計算を実行できます。

2 最大スイッチ電流の計算

スイッチ電流を計算する最初の手順は、最小入力電圧に対するデューティ・サイクル D を決定することです。ここで最小入力電圧を使用するのは、このときスイッチ電流が最大になるためです。

$$D = 1 - \frac{V_{IN(min)} \times \eta}{V_{OUT}} \quad (1)$$

$V_{IN(min)}$=最小入力電圧
V_{OUT}=目的の出力電圧
η=コンバータの効率 (例:推定値 80%)

コンバータは消費されるエネルギーも供給する必要があるため、デューティ・サイクルの計算には効率が追加されます。この計算により、効率係数を使用しない場合の式よりも現実的なデューティ・サイクルが得られます。

推定の係数として、たとえば 80% を使用するか (昇圧コンバータのワーストケース効率としては非現実的な数値ではありません)、選択したコンバータのデータシートの「代表的特性」セクションに記載されている数値を調べてください (関連資料 3 および 4)。

最大スイッチ電流を計算する次の手順は、インダクタのリップル電流を決定することです。コンバータのデータシートでは一般に、IC で使用するために特定の、または一連のインダクタが指定されています。したがって、推奨されるインダクタの値を使用してリップル電流を計算するか、推奨される範囲の中央をインダクタの値にするか、データシートに値が記載されていない場合は、このアプリケーション・ノートの「インダクタの選択」セクションで計算した値を使用します。

$$\Delta I_L = \frac{V_{IN(min)} \times D}{f_S \times L} \quad (2)$$

$V_{IN(min)}$=最小入力電圧
D=式 1 で計算されたデューティ・サイクル
f_S=コンバータの最小スイッチング周波数

English Document: SLVA372
Copyright © 2022 Texas Instruments Incorporated

L=選択したインダクタの値

次に、選択した IC が最大出力電流を供給できるかどうかを判定する必要があります。

$$I_{MAXOUT} = \left(I_{LIM(min)} - \frac{\Delta I_L}{2}\right) \times (1-D) \tag{3}$$

$I_{LIM(min)}$=内蔵スイッチの電流制限の最小値 (データシートに記載)
ΔI_L=式 2 で計算されたインダクタ・リップル電流
D=式 1 で計算されたデューティ・サイクル

選択した IC の最大出力電流の計算値 I_{MAXOUT} が、システムで必要とされる最大出力電流を下回っている場合は、より高いスイッチ電流制限を持つ別の IC を使用する必要があります。

I_{MAXOUT} の計算値が必要な値よりわずかに小さい場合のみ、選択した IC をインダクタンスの大きいインダクタとともに使用できますが、そのインダクタンスは推奨範囲内の必要があります。インダクタンスが大きいほどリップル電流が減少するため、選択した IC での最大出力電流が増加します。

計算値がアプリケーションの最大出力電流を上回っている場合、システムの最大スイッチ電流は次の式で計算されます。

$$I_{SW(max)} = \frac{\Delta I_L}{2} + \frac{I_{OUT(max)}}{1-D} \tag{4}$$

ΔI_L=式 2 で計算されたインダクタ・リップル電流
$I_{OUT(max)}$=アプリケーションで必要な最大出力電流
D=式 1 で計算されたデューティ・サイクル

インダクタ、内蔵スイッチ、外付けダイオードは、このピーク電流に耐える必要があります。

Copyright © 2022 Texas Instruments Incorporated

3 インダクタの選択

多くの場合、データシートには推奨インダクタ値の範囲が記載されています。そのような場合は、その範囲のインダクタを選択することをお勧めします。インダクタの値が大きいほど、リップル電流が減少するため、最大出力電流は大きくなります。

インダクタの値が小さいほど、ソリューション・サイズは小さくなります。インダクタンスが減少すると電流が増加するため、インダクタの電流定格は、常に 式 4 で与えられる最大電流よりも高い必要があることに注意してください。

インダクタの範囲が与えられていない部品の場合、次の式を使用して適切なインダクタの妥当な値を推定できます。

$$L = \frac{V_{IN} \times (V_{OUT} - V_{IN})}{\Delta I_L \times f_S \times V_{OUT}} \quad (5)$$

V_{IN}=標準入力電圧
V_{OUT}=目的の出力電圧
f_S=コンバータの最小スイッチング周波数
ΔI_L=推定インダクタ・リップル電流、以下を参照してください

インダクタが不明なため、インダクタのリップル電流は 式 1 で計算できません。インダクタのリップル電流は、出力電流の 20%～40% と推定するのが妥当です。

$$\Delta I_L = (0.2 \text{ to } 0.4) \times I_{OUT(max)} \times \frac{V_{OUT}}{V_{IN}} \quad (6)$$

ΔI_L=推定インダクタ・リップル電流
$I_{OUT(max)}$=アプリケーションで必要な最大出力電流

4 整流ダイオードの選択

損失を低減するには、ショットキー・ダイオードを使用します。必要な順方向電流定格は、最大出力電流と同じです。

$$I_F = I_{OUT(max)} \quad (7)$$

I_F=整流ダイオードの平均順方向電流
$I_{OUT(max)}$=アプリケーションに必要な最大出力電流

ショットキー・ダイオードは、平均定格よりもはるかに高いピーク電流定格を備えています。したがって、システムのピーク電流が高くても問題になりません。

チェックする必要があるもう 1 つのパラメータは、ダイオードの消費電力です。次のパラメータを確認する必要があります。

$$P_D = I_F \times V_F \quad (8)$$

I_F=整流ダイオードの平均順方向電流
V_F=整流ダイオードの順方向電圧

English Document: SLVA372
Copyright © 2022 Texas Instruments Incorporated

5 出力電圧設定

ほとんどのコンバータは、抵抗分割器ネットワーク (固定出力電圧コンバータには内蔵されています) を使用して出力電圧を設定します。

与えられた帰還電圧、V_{FB}、および帰還バイアス電流 I_{FB} から、分割電圧を計算できます。

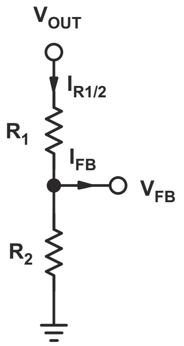

図 5-1. 出力電圧を設定する抵抗分割器

抵抗分割器を通過する電流は、帰還バイアス電流の 100 倍以上にする必要があります。

$$I_{R1/2} \geq 100 \times I_{FB} \quad (9)$$

$I_{R1/2}$=抵抗分割器を追加して GND に流れる電流
I_{FB}=データシートに記載されている帰還バイアス電流

これによる電圧測定の精度の低下は 1% 未満です。この電流を大幅に増やすこともできます。抵抗の値を小さくする唯一の欠点は、抵抗分割器での電力損失が大きくなることで、これによって精度が多少向上します。

上記の前提から、抵抗は次のように計算されます。

$$R_2 = \frac{V_{FB}}{I_{R1/2}} \quad (10)$$

$$R_1 = R_2 \times \left(\frac{V_{OUT}}{V_{FB}} - 1 \right) \quad (11)$$

R_1、R_2=抵抗分割器、図 5-1 を参照してください。
V_{FB}=データシートに記載されている帰還電圧
$I_{R1/2}$=式 9 で計算される、抵抗分割器を経由して GND に流れる電流
V_{OUT}=目的の出力電圧

Copyright © 2022 Texas Instruments Incorporated

6 入力コンデンサの選択

入力コンデンサの最小値は通常、データシートに記載されています。この最小値は、スイッチング電源のピーク電流要件を満たすよう入力電圧を安定させるために必要です。ベスト・プラクティスとして、低 ESR (等価直列抵抗) のセラミック・コンデンサを使用します。誘電体の材質には X5R、またはそれより上のものを使用します。これを満たさないと、DC バイアスや温度の関係で、容量の多くが失われる可能性があります (関連資料 7 および 8 を参照)。

入力電圧のノイズが多い場合は、この値を増やしてもかまいません。

7 出力コンデンサの選択

ベスト・プラクティスとして、出力電圧のリップルを最小限に抑えるため、低 ESR のコンデンサを使用します。セラミック・コンデンサは、誘電体材料が X5R 以上なら適しています (関連資料 7 および 8 を参照)。

コンバータに外部補償があれば、データシートで推奨される最小値を上回る任意の値のコンデンサを使用できますが、使用する出力容量に応じて補償を調整する必要があります。

内部補償型コンバータでは、推奨されるインダクタおよびコンデンサの値を使用するか、データシートに記載されている、出力コンデンサをアプリケーションに合わせて調整するための推奨事項に従って、L × C の比率を決定する必要があります

外部補償を使用するときは、次の式を使用して、目的の出力電圧リップルに合わせて出力コンデンサの値を調整できます。

$$C_{OUT(min)} = \frac{I_{OUT(max)} \times D}{f_S \times \Delta V_{OUT}} \tag{12}$$

$C_{OUT(min)}$=最小出力容量
$I_{OUT(max)}$=アプリケーションの最大出力電流
D=式 1 で計算されたデューティ・サイクル
f_S=コンバータの最小スイッチング周波数
ΔV_{OUT}=目的の出力電圧リップル

出力コンデンサの ESR によってもリップルが増え、その量は次の式で与えられます。

$$\Delta V_{OUT(ESR)} = ESR \times \left(\frac{I_{OUT(max)}}{1-D} + \frac{\Delta I_L}{2} \right) \tag{13}$$

$\Delta V_{OUT(ESR)}$=コンデンサの ESR による追加の出力電圧リップル
ESR=使用される出力コンデンサの等価直列抵抗
$I_{OUT(max)}$=アプリケーションの最大出力電流
D=式 1 で計算されるデューティ・サイクル
ΔI_L=式 2 または 式 6 で計算されるインダクタのリップル電流

Copyright © 2022 Texas Instruments Incorporated

8 昇圧コンバータの電力段を計算する式

$$\text{Maximum Duty Cycle: } D = 1 - \frac{V_{IN(min)} \times \eta}{V_{OUT}} \tag{14}$$

$V_{IN(min)}$=最小入力電圧
V_{OUT}=目的の出力電圧
η=コンバータの効率 (例:推定値 85%)

$$\text{Inductor Ripple Current: } \Delta I_L = \frac{V_{IN(min)} \times D}{f_S \times L} \tag{15}$$

$V_{IN(min)}$=最小入力電圧
D=式 14 で計算されたデューティ・サイクル
f_S=コンバータの最小スイッチング周波数
L=選択したインダクタの値

$$\text{Maximum output current of the selected IC: } I_{MAXOUT} = \left(I_{LIM(min)} - \frac{\Delta I_L}{2}\right) \times (1 - D) \tag{16}$$

$I_{LIM(min)}$=内蔵スイッチの電流制限の最小値 (データシートに記載)
ΔI_L=式 15 で計算されたインダクタ・リップル電流
D= 式 14 で計算されたデューティ・サイクル

$$\text{Application specific maximum switch current: } I_{SW(max)} = \frac{\Delta I_L}{2} + \frac{I_{OUT(max)}}{1 - D} \tag{17}$$

ΔI_L=式 15 で計算されたインダクタ・リップル電流
$I_{OUT(max)}$=アプリケーションで必要な最大出力電流
D=式 14 で計算されたデューティ・サイクル

$$\text{Inductor Calculation: } L = \frac{V_{IN} \times (V_{OUT} - V_{IN})}{\Delta I_L \times f_S \times V_{OUT}} \tag{18}$$

V_{IN}=標準入力電圧
V_{OUT}=目的の出力電圧
f_S=コンバータの最小スイッチング周波数
ΔI_L=推定インダクタ・リップル電流、式 19 を参照してください

$$\text{Inductor Ripple Current Estimation: } \Delta I_L = (0.2 \text{ to } 0.4) \times I_{OUT(max)} \times \frac{V_{OUT}}{V_{IN}} \tag{19}$$

ΔI_L=推定インダクタ・リップル電流
$I_{OUT(max)}$=アプリケーションで必要な最大出力電流

$$\text{Average Forward Current of Rectifier Diode: } I_F = I_{OUT(max)} \tag{20}$$

$I_{OUT(max)}$=アプリケーションに必要な最大出力電流

$$\text{Power Dissipation in Rectifier Diode: } P_D = I_F \times V_F \tag{21}$$

Copyright © 2022 Texas Instruments Incorporated

I_F=整流ダイオードの平均順方向電流
V_F=整流ダイオードの順方向電圧

$$\text{Current Through Resistive Divider Newtwork for Output Voltage Setting: } I_{R1/2} \geq 100 \times I_{FB} \tag{22}$$

I_{FB}=データシートに記載されている帰還バイアス電流

$$\text{Value of Resistor Between FB Pin and GND: } R_2 = \frac{V_{FB}}{I_{R1/2}} \tag{23}$$

$$\text{Value of Resistor Between FB Pin and } V_{OUT}\text{: } R_1 = R_2 \times \left(\frac{V_{OUT}}{V_{FB}} - 1\right) \tag{24}$$

V_{FB}=データシートに記載されている帰還電圧
$I_{R1/2}$=式 22 で計算される、抵抗分割器を経由して GND に流れる電流
V_{OUT}=目的の出力電圧

$$\text{Minimum Output Capacitance, if not given in the data sheet: } C_{OUT(min)} = \frac{I_{OUT(max)} \times D}{f_S \times \Delta V_{OUT}} \tag{25}$$

$I_{OUT(max)}$=アプリケーションの最大出力電流
D=式 14 で計算されたデューティ・サイクル
f_S=コンバータの最小スイッチング周波数
ΔV_{OUT}=目的の出力電圧リップル

$$\text{Additional Output Voltage Ripple due to ESR: } \Delta V_{OUT(ESR)} = ESR \times \left(\frac{I_{OUT(max)}}{1-D} + \frac{\Delta I_L}{2}\right) \tag{26}$$

ESR=使用される出力コンデンサの等価直列抵抗
$I_{OUT(max)}$=アプリケーションの最大出力電流
D=式 14 で計算されたデューティ・サイクル
ΔI_L=式 15 または 式 19 から得られるインダクタのリップル電流

Copyright © 2022 Texas Instruments Incorporated

9 関連資料

1. 『スイッチモード電源の昇圧電力段について』(SLVA061)
2. 『TPS61030 を使用する電圧モード昇圧コンバータの小信号ループの分析』(SLVA274)
3. TPS65148 のデータシート (SLVS904)
4. TPS65130 および TPS65131 のデータシート (SLVS493)
5. Robert W. Erickson 著:『電力エレクトロニクスの基本』、Kluwer Academic Publishers、1997 年
6. Mohan/Underland/Robbins 共著:『電力エレクトロニクス』、John Wiley & Sons Inc.、第 2 版、1995 年
7. Panasonic の George M. Harayda、Akira Omi、Axel Yamamoto 共著、『大容量の多層セラミック・チップ (MLCC) コンデンサによる設計の改善』
8. AVX Corporation の Ph.D. Jeffrey Cain 著、『多層セラミックおよびタンタル・コンデンサの比較』

10 改訂履歴

Changes from Revision C (January 2014) to Revision D (November 2022)	Page
• 文書全体にわたって表、図、相互参照の採番方法を更新	1

Changes from Revision B (July 2010) to Revision C (January 2014)	Page
• 図 5-1 で V_{IN} を V_{OUT} に変更	5

Changes from Revision A (April 2010) to Revision B (July 2010)	Page
• 式 12 で $I_{OUT(max)} \times (1-D)$ を $I_{OUT(max)} \times D$ に変更	6
• 式 25 で $I_{OUT(max)} \times (1-D)$ を $I_{OUT(max)} \times D$ に変更	7

Changes from Revision * (November 2009) to Revision A (April 2010)	Page
• 式 6 に V_{OUT}/V_{IN} (標準値) を追加	4
• 式 19 に V_{OUT}/V_{IN} (標準値) を追加	7

Copyright © 2022 Texas Instruments Incorporated

重要なお知らせと免責事項

TI は、技術データと信頼性データ (データシートを含みます)、設計リソース (リファレンス・デザインを含みます)、アプリケーションや設計に関する各種アドバイス、Web ツール、安全性情報、その他のリソースを、欠陥が存在する可能性のある「現状のまま」提供しており、商品性および特定目的に対する適合性の黙示保証、第三者の知的財産権の非侵害保証を含むいかなる保証も、明示的または黙示的にかかわらず拒否します。

これらのリソースは、TI 製品を使用する設計の経験を積んだ開発者への提供を意図したものです。(1) お客様のアプリケーションに適した TI 製品の選定、(2) お客様のアプリケーションの設計、検証、試験、(3) お客様のアプリケーションに該当する各種規格や、その他のあらゆる安全性、セキュリティ、規制、または他の要件への確実な適合に関する責任を、お客様のみが単独で負うものとします。

上記の各種リソースは、予告なく変更される可能性があります。これらのリソースは、リソースで説明されている TI 製品を使用するアプリケーションの開発の目的でのみ、TI はその使用をお客様に許諾します。これらのリソースに関して、他の目的で複製することや掲載することは禁止されています。TI や第三者の知的財産権のライセンスが付与されている訳ではありません。お客様は、これらのリソースを自身で使用した結果発生するあらゆる申し立て、損害、費用、損失、責任について、TI およびその代理人を完全に補償するものとし、TI は一切の責任を拒否します。

TI の製品は、TI の販売条件、または ti.com やかかる TI 製品の関連資料などのいずれかを通じて提供する適用可能な条項の下で提供されています。TI がこれらのリソースを提供することは、適用される TI の保証または他の保証の放棄の拡大や変更を意味するものではありません。

お客様がいかなる追加条項または代替条項を提案した場合でも、TI はそれらに異議を唱え、拒否します。

郵送先住所：Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265
Copyright © 2022, Texas Instruments Incorporated