

疑似連続モードを用いた 単一インダクタ正負2出力 DC-DCコンバータの検討

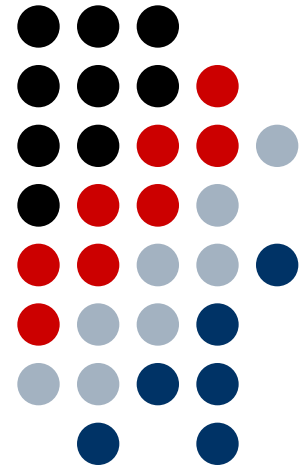
群馬大学大学院 電気電子工学専攻

SANTHOS ARIO WIBOWO ○津志田 健吾

森 偉文樹 美和 俊介 小林 春夫

旭化成東光パワーデバイス株式会社

小田口貴宏 高山茂樹 鈴木聡 深井功 松田順一



Outline

1. 研究背景と目的
2. DC-DCコンバータの原理
3. 単一インダクタ2出力DC-DCコンバータの考察
4. 単一インダクタ正負2出力DC-DCコンバータの提案回路
5. シミュレーションによる動作確認
6. まとめ

Outline

1. **研究背景と目的**
2. DC-DCコンバータの原理
3. 単一インダクタ2出力DC-DCコンバータの考察
4. 単一インダクタ正負2出力DC-DCコンバータの提案回路
5. シミュレーションによる動作確認
6. まとめ

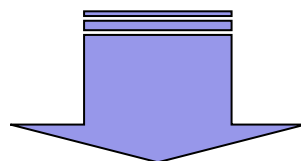
研究背景と目的

□ 正電圧と負電圧が提供可能な電源の要求:

- 有機ELディスプレイ、LCD、CCDバイアス電圧、PDA、ポケットPC

□ 低コスト化への要求

- ・単一インダクタ(低コスト)
- ・昇圧型(正)+昇降圧型(負)

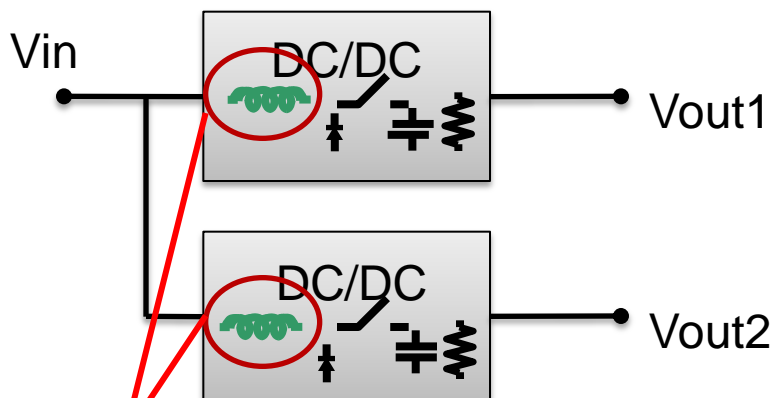


- ・正負2出力DC-DCコンバータの提案

単一インダクタDC-DCコンバータ

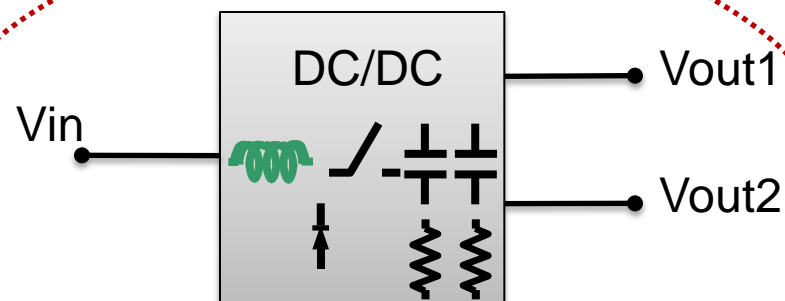
各回路の駆動にそれぞれ独立した電源を必要

従来の多出力DC-DCコンバータ



サイズ、コスト大

単一インダクタ多出力DC-DCコンバータ



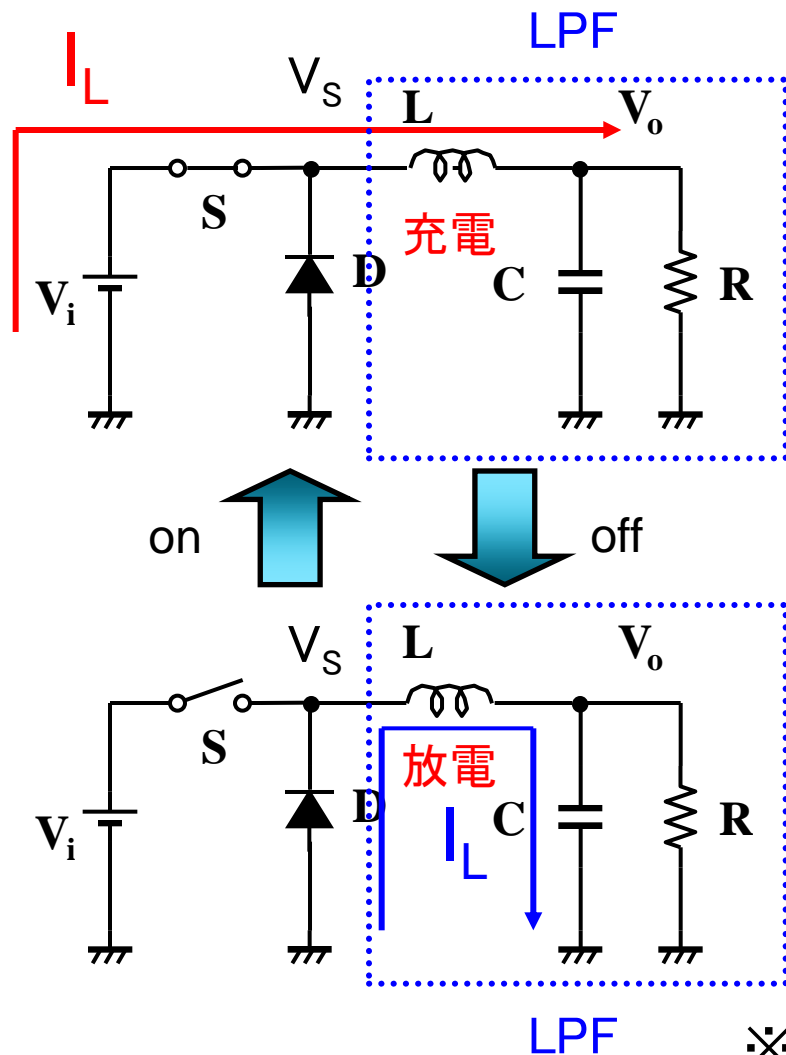
近年産業界で強い関心
チップ面積縮小、低コスト化

日本での研究発表例なし(欧米、アジア諸国から発表)

Outline

1. 研究背景と目的
2. DC-DCコンバータの原理
3. 単一インダクタ2出力DC-DCコンバータの考察
4. 単一インダクタ正負2出力DC-DCコンバータの提案回路
5. シミュレーションによる動作確認
6. まとめ

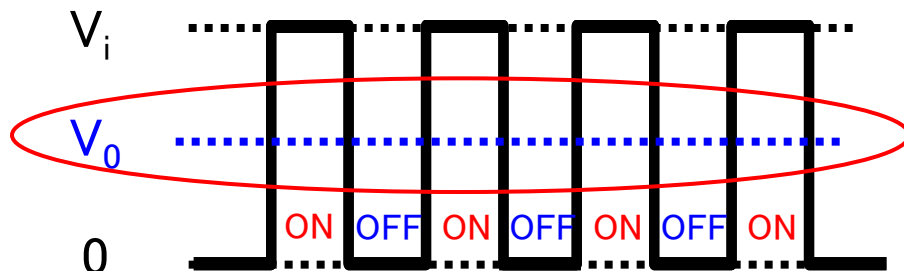
降圧型DC-DCコンバータの原理



スイッチをクロックによりon/off

LPFで V_S を平滑化

コイルにエネルギーを充放電

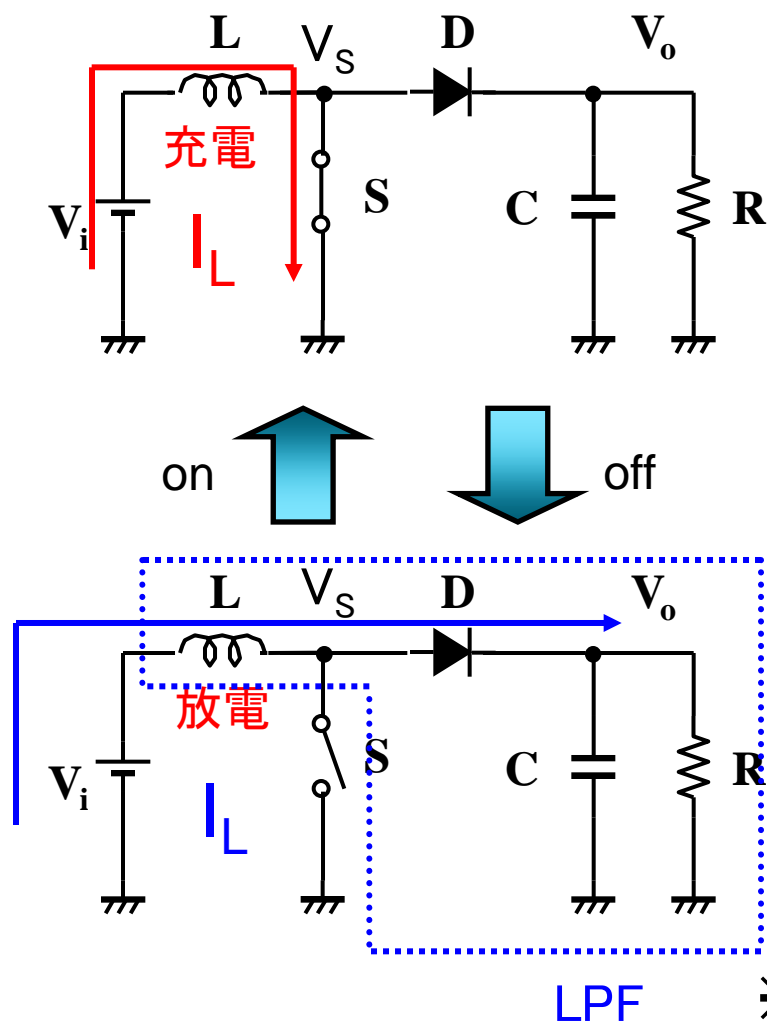


V_S の電圧波形(Duty=0.5のとき)

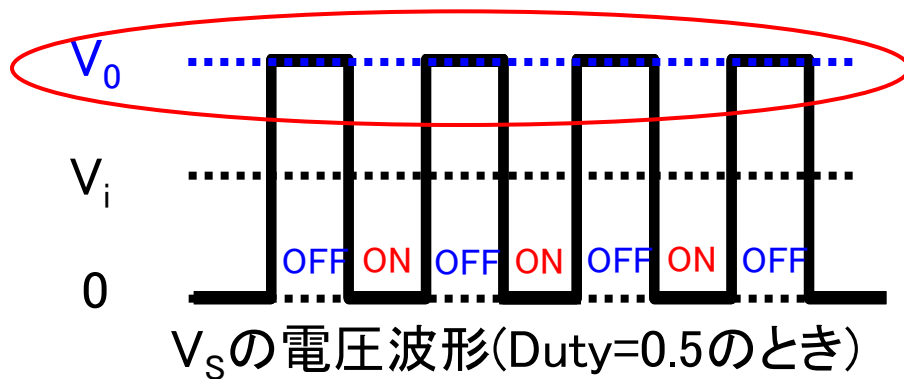
$$V_o = \frac{T_{ON}}{T} \times V_i$$

※ $T = T_{ON} + T_{OFF}$

昇圧型DC-DCコンバータの原理



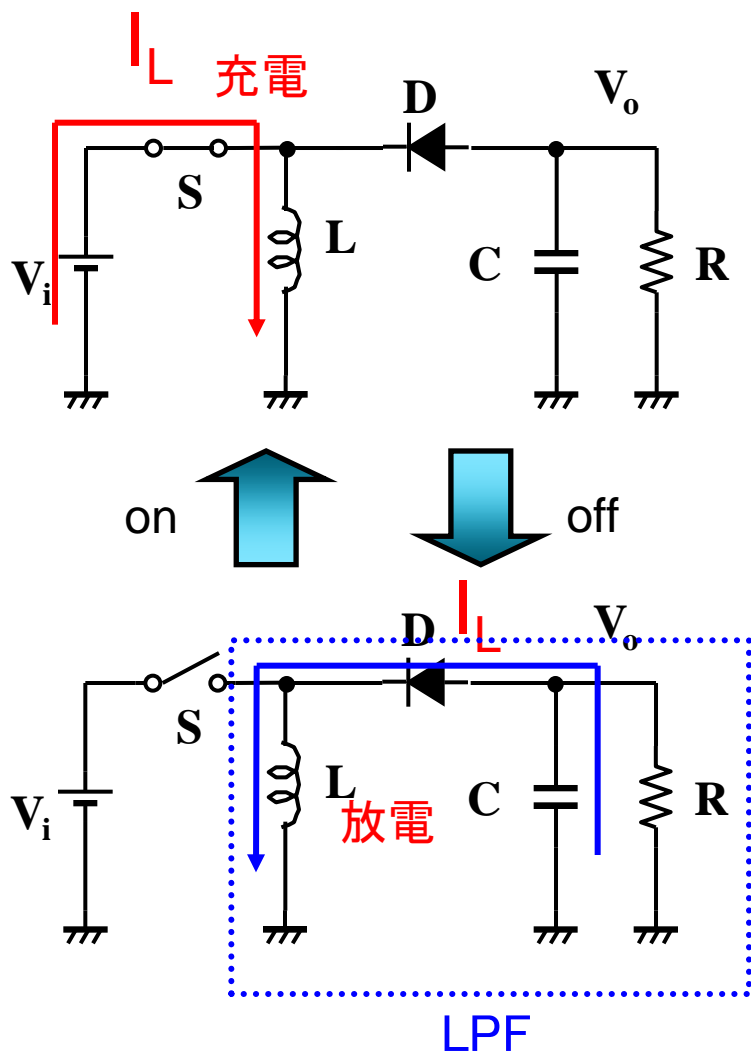
スイッチをクロックによりon/off
 LPFでSがOFFの
 V_S を平滑化
 コイルにエネルギーを充放電



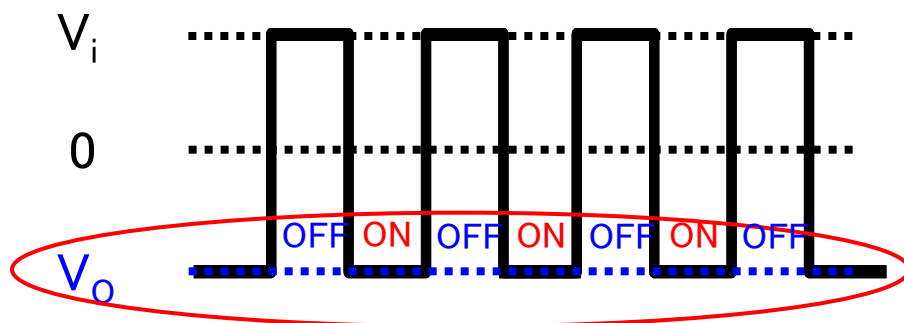
$$V_o = \frac{T}{T_{OFF}} \times V_i$$

※ $T = T_{ON} + T_{OFF}$

昇降圧型DC-DCコンバータの原理



スイッチをクロックによりon/off
 LPFでSがOFFの
 V_S を平滑化
 コイルにエネルギーを充放電



V_S の電圧波形(Duty=0.5のとき)

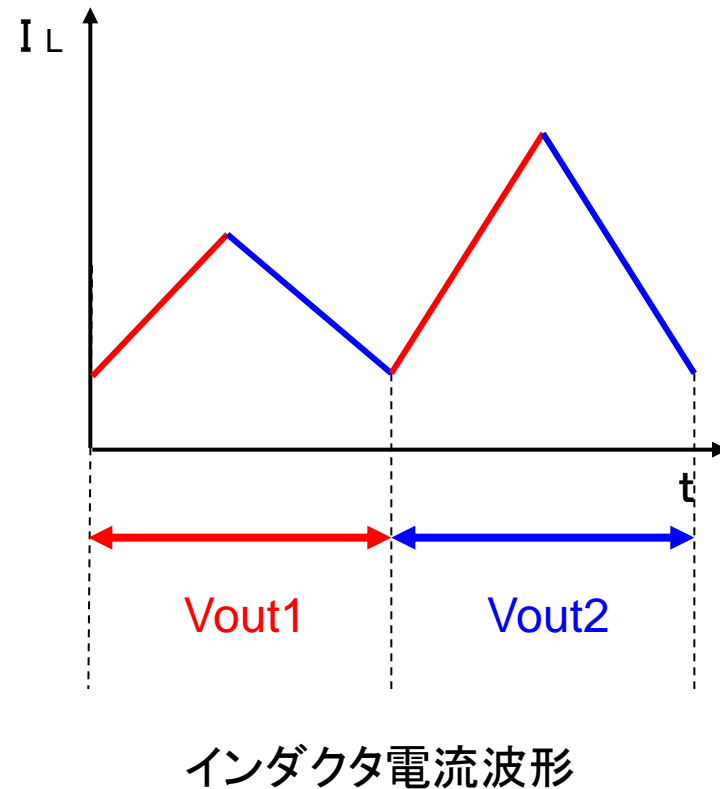
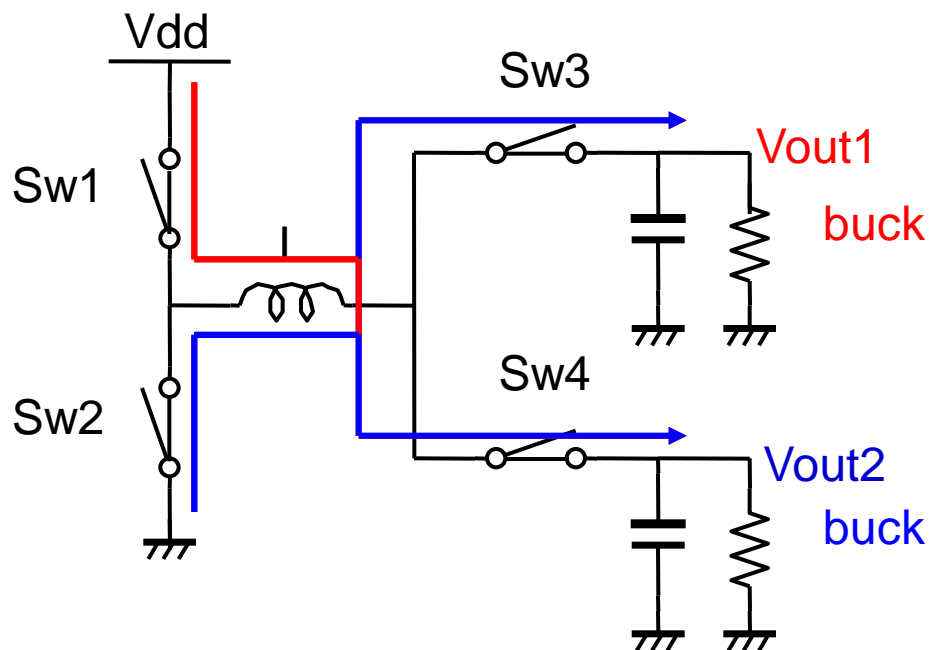
$$V_o = -\frac{T_{ON}}{T_{OFF}} \times V_i$$

Outline

1. 研究背景と目的
2. DC-DCコンバータの原理
3. **単一インダクタ2出力DC-DCコンバータの考察**
4. 単一インダクタ正負2出力DC-DCコンバータの提案回路
5. シミュレーションによる動作確認
6. まとめ

単一インダクタ2出力 (降圧) の原理

降圧型を2出力する場合



コイルを時分割して2つの出力を得る

クロスレギュレーションによる 他方の電源への影響

□ クロスレギュレーション

多出力電源において、ある負荷が変動した
際の他の出力電圧変動

他方への影響への対策:

クロスレギュレーションを抑制する制御回路

⇒コストの観点から×

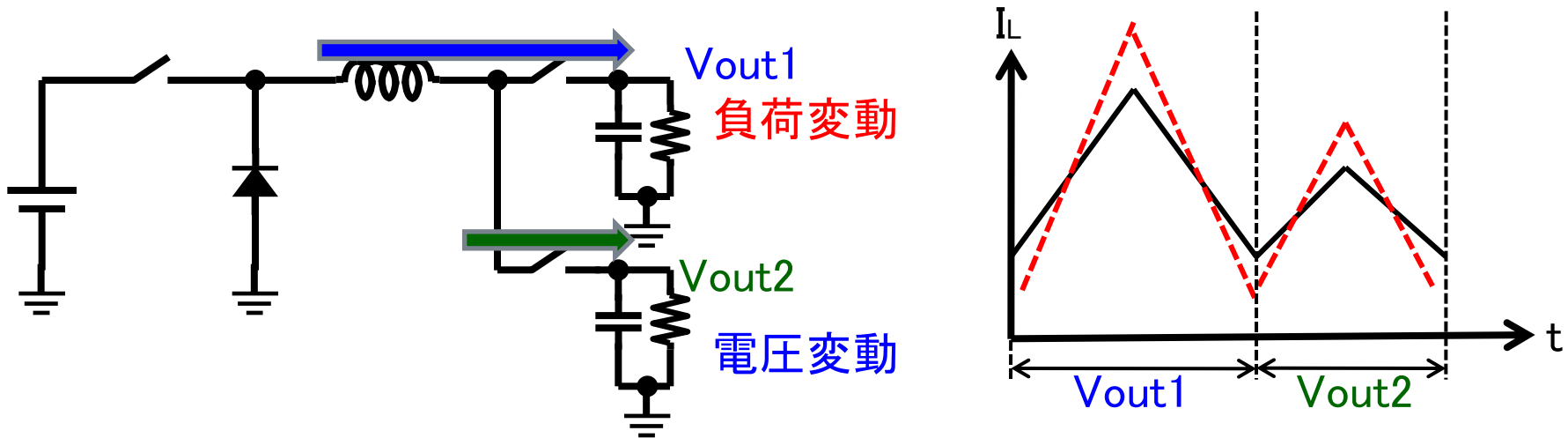


電流のモードを変えることでクロスレギュレーションを低減

連続モードとクロスレギュレーション

□ 連続モード

インダクタに流れる電流がいかなる時刻においても
零にならない動作モード  電流リップル小

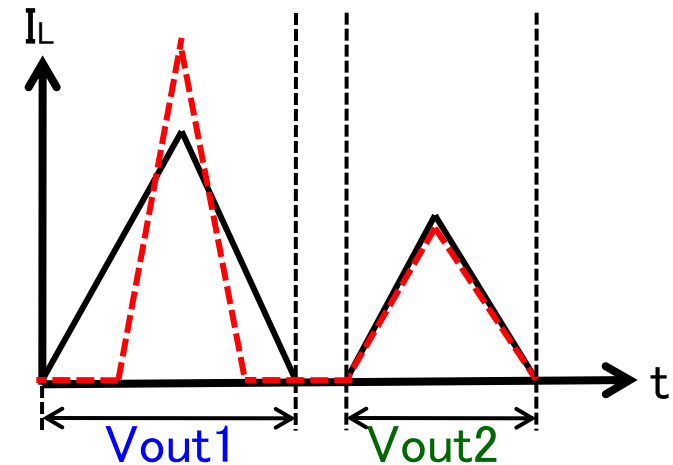
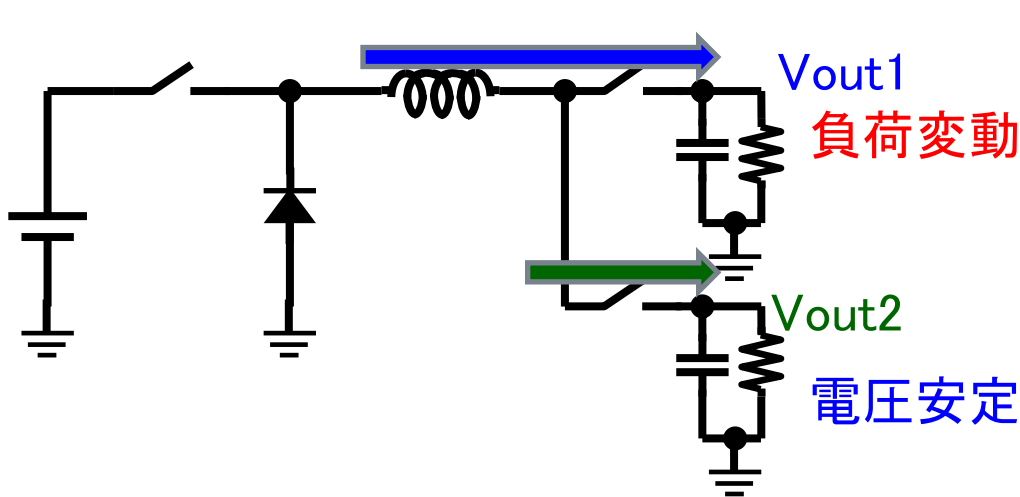


クロスレギュレーション×

不連続モードとクロスレギュレーション

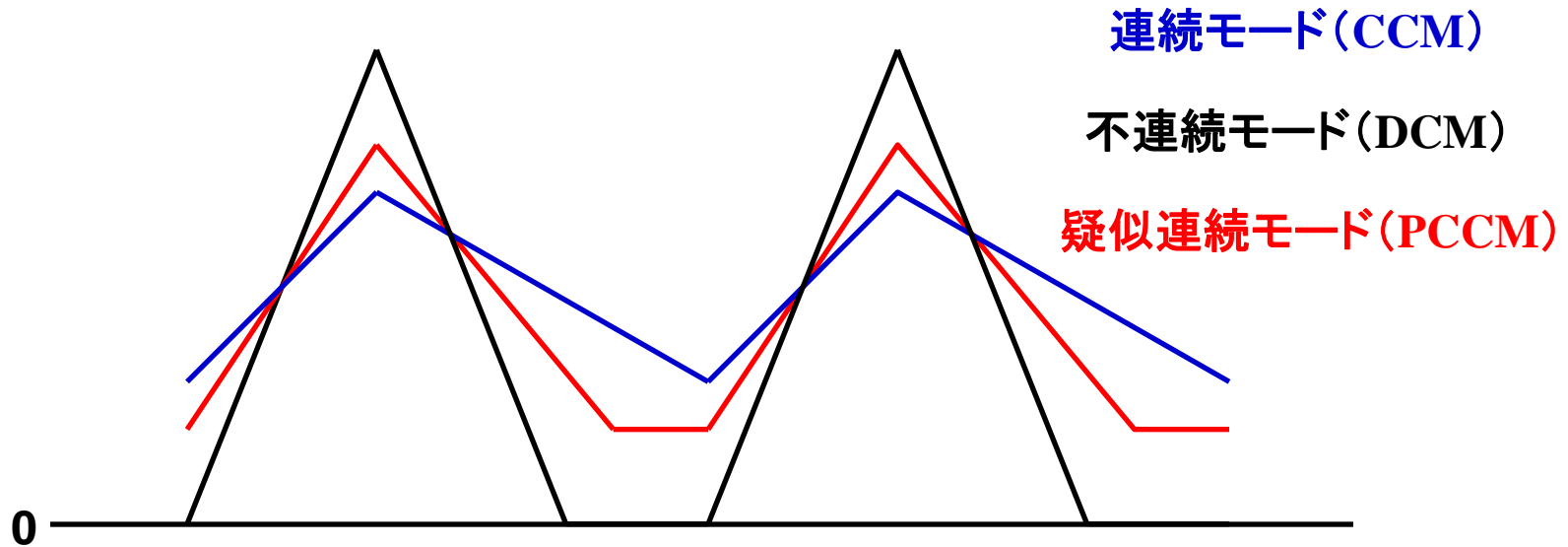
□ 不連続モード

インダクタに流れる電流が零になる期間が存在する
動作モード  電流リップル大

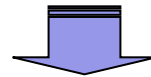


クロスレギュレーション○

疑似連続モード



単一出力での各モードにおけるインダクタ電流の波形



疑似連続モードで動作する降圧型コンバータ:

- ・ 連続モードに比べて、**応答が速い**
- ・ 不連続モードに比べて、**電流リップルが小さい**

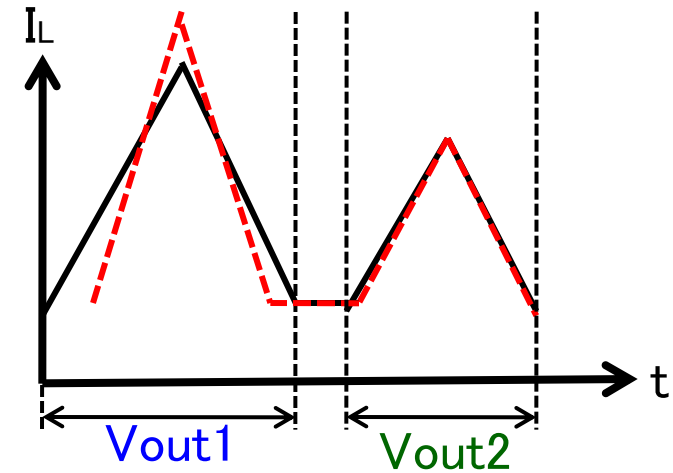
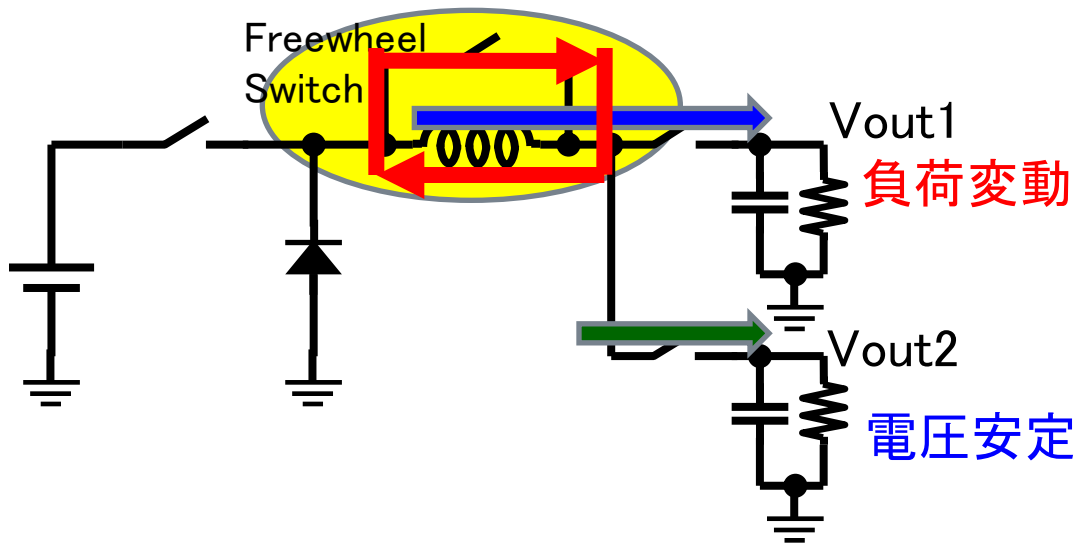
(A Pseudo-CCM buck Converter with Freewheel Switching Control, Zongqi Hu and Dongseng Ma, University of Arizona)

擬似連続モードとクロスレギュレーション

□ 擬似連続モード

フリーホイールスイッチングを用いることでインダクタ電流を保持

電流リップル小



クロスレギュレーション○

単一インダクタ2出力電源における 連続モード、不連続モード、疑似連続モードの比較

連続モード： 一方の負荷が変化すると

他方の出力電圧へ影響**大**

(クロスレギュレーション**劣**)

大電流が**とれる**

不連続モード： 一方の負荷が変化しても

他方の出力電圧への影響**小**

(クロスレギュレーション**良**)

大電流が**とれない**

疑似連続モード： 一方の負荷が変化しても

他方の出力電圧への影響**小**

(クロスレギュレーション**良**)

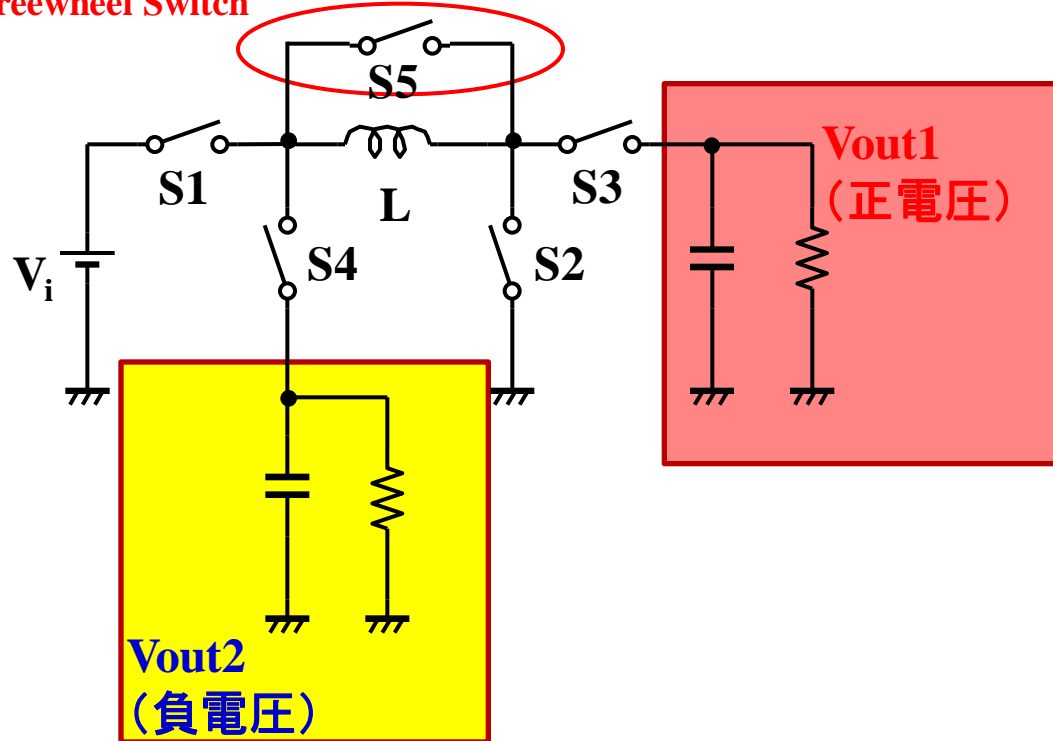
大電流が**とれる**

Outline

1. 研究背景と目的
2. DC-DCコンバータの原理
3. 単一インダクタ2出力DC-DCコンバータの考察
4. **単一インダクタ正負2出力DC-DCコンバータの提案回路**
5. シミュレーションによる動作確認
6. まとめ

疑似連続モードを用いた 正負2出力DC-DCコンバータ

Freewheel Switch



- ✓昇圧型と昇降圧型コンバータの組合せ
- ✓単一コイル2出力提供
- ✓疑似連続モード

- ✓+ & -出力を提供
- ✓低コスト、チップ面積縮小
- ✓クロスレギュレーション良好

正電圧発生動作（昇圧動作T1）

□ T1: S1,S2 ⇒ ON

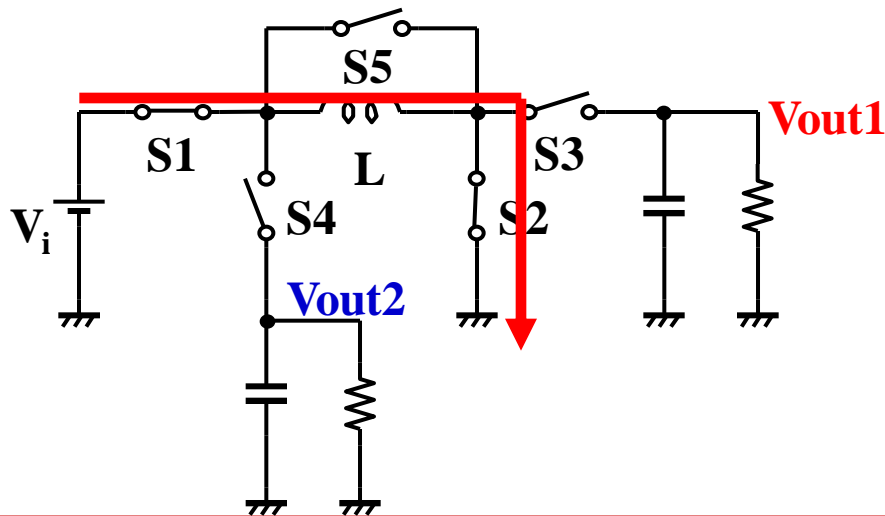
$$L \frac{dI_L}{dt} = V_L = V_i$$

$$I_L = I_B + \frac{V_i}{L} t$$

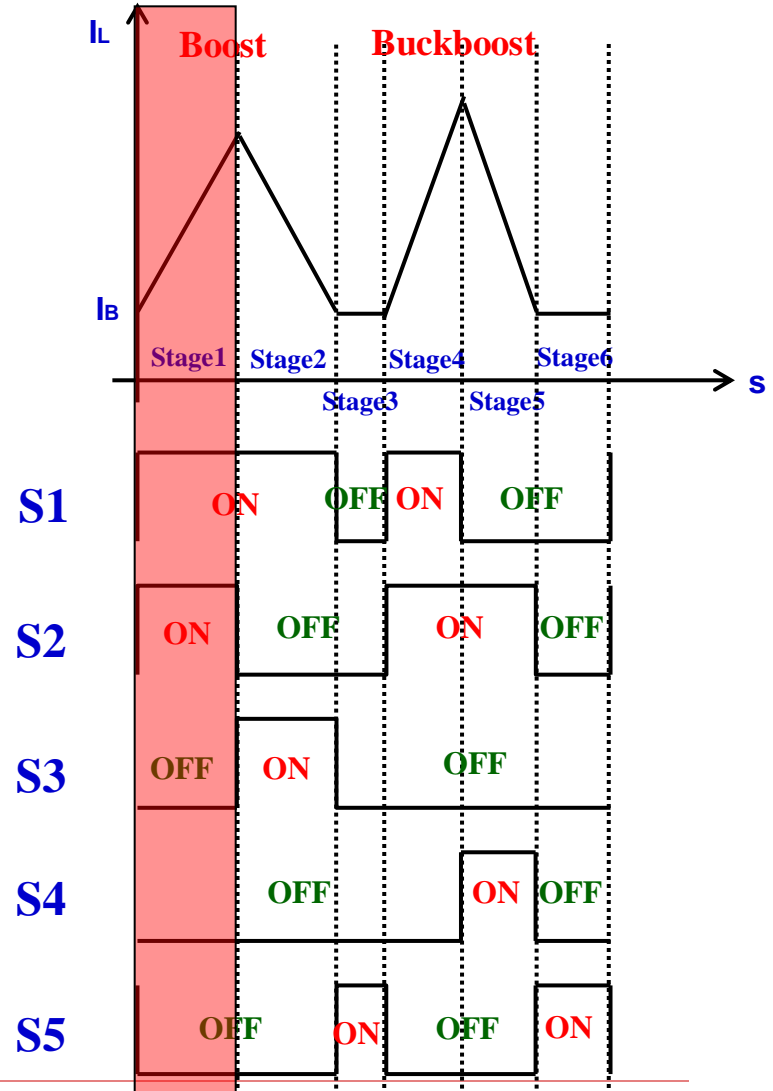
$$= I_B + \frac{(I_{P1} - I_B)}{T_1} t$$

$$\Rightarrow \frac{V_i}{L} = \frac{(I_{P1} - I_B)}{T_1}$$

I_L ↑



Inductor current waveform



正電圧発生動作（昇圧動作T2）

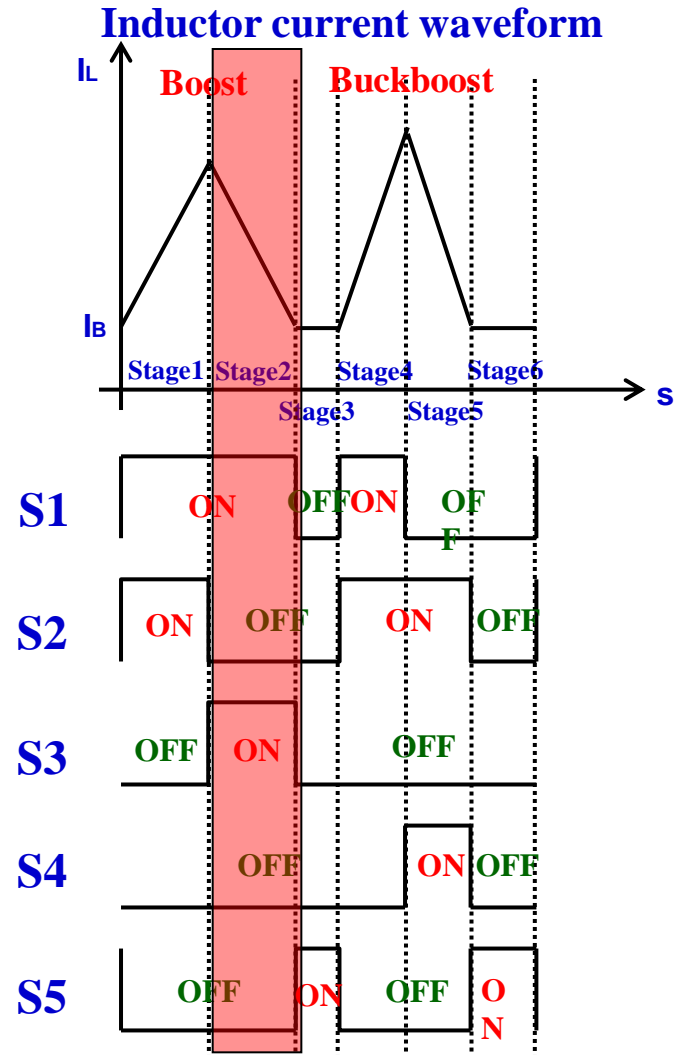
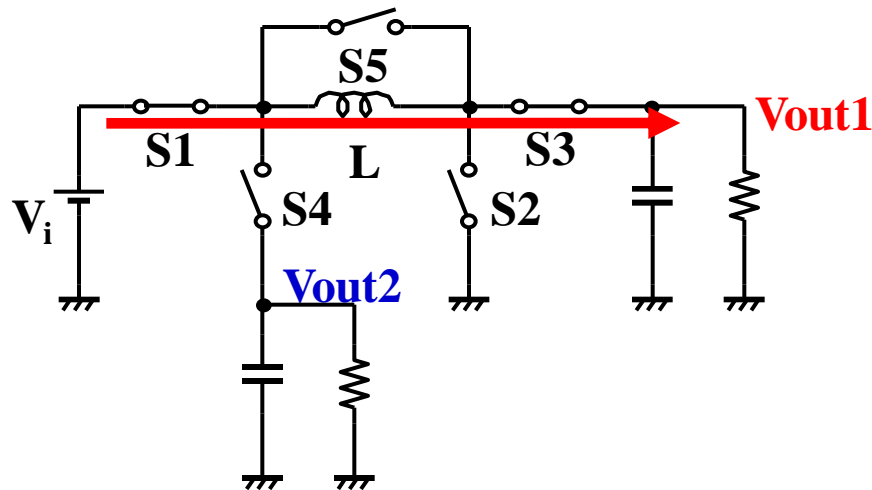
□ T2: S1,S3 ⇒ ON

$$L \frac{dI_L}{dt} = V_L = V_i - V_{out1}$$

$$I_L = I_{P1} + \frac{V_i - V_{out1}}{L} t$$

$$= I_{P1} - \frac{(I_{P1} - I_B)}{T_2} t$$

$$\Rightarrow \frac{V_{out1} - V_i}{L} = \frac{(I_{P1} - I_B)}{T_2}$$

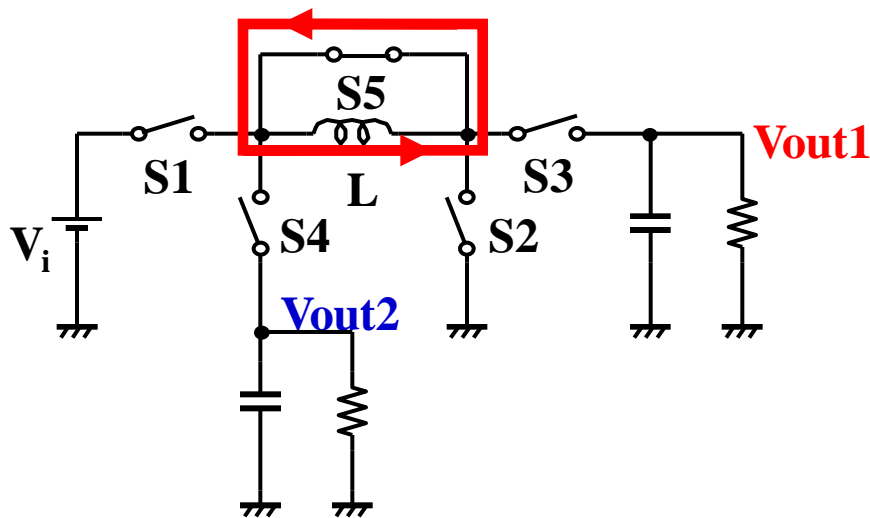


フリーホイール動作（動作T3,T6）

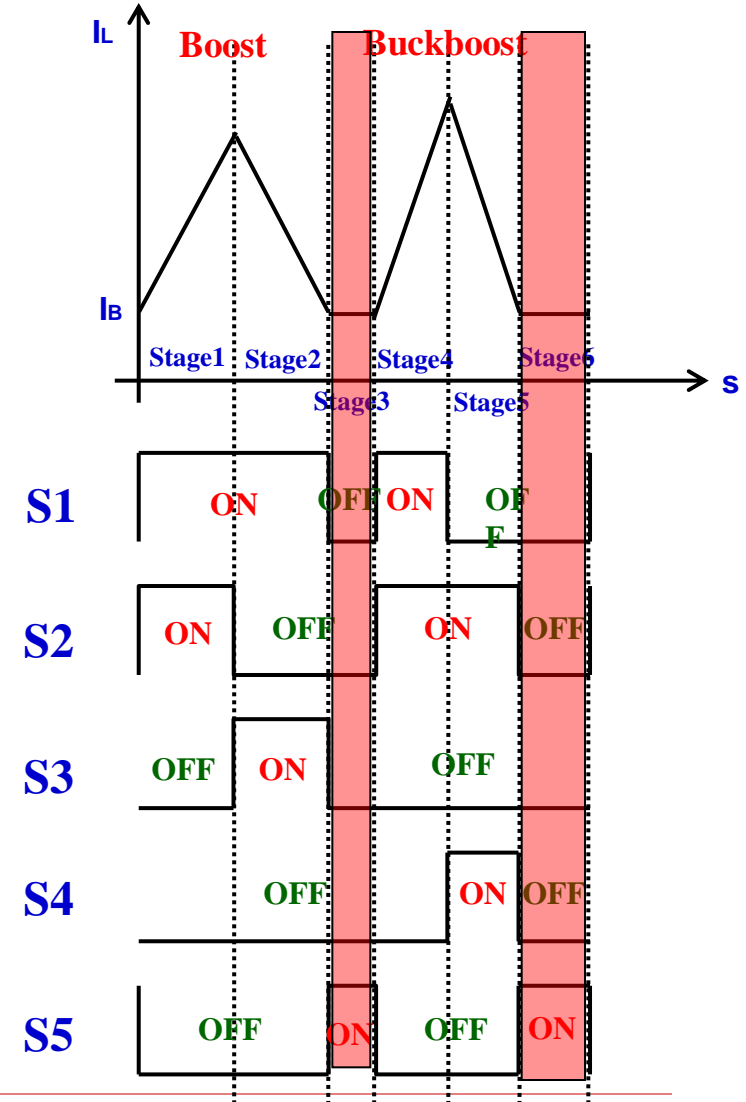
□ T3,T6: S5 ⇒ ON

フリーホールスイッチング
(Free Wheel Switching)

インダクタ電流は I_B にて一定



Inductor current waveform



負電圧発生動作（昇降圧動作T4）

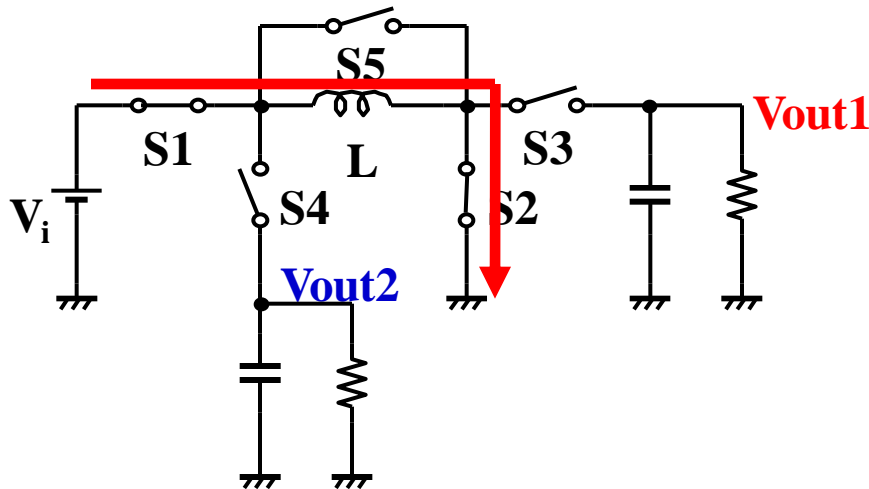
□ T4: S1,S2 ⇒ ON

$$L \frac{dI_L}{dt} = V_L = V_i$$

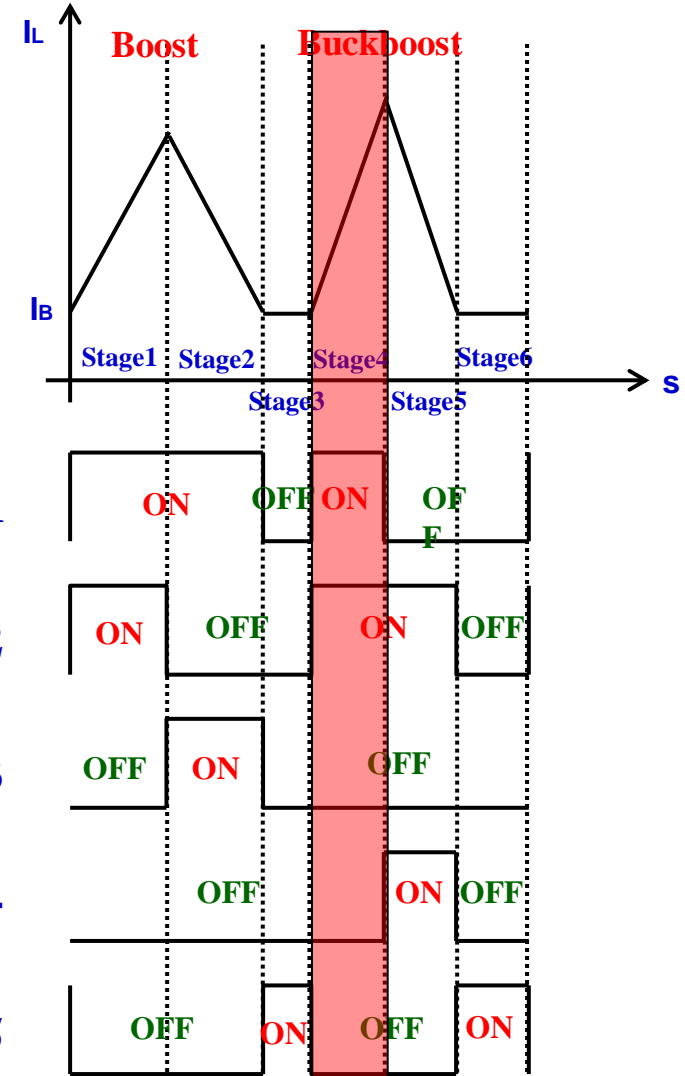
$$I_L = I_B + \frac{V_i}{L} t$$

$$= I_B + \frac{(I_{P2} - I_B)}{T_4} t$$

$$\Rightarrow \frac{V_i}{L} = \frac{(I_{P2} - I_B)}{T_4}$$



Inductor current waveform



負電圧発生動作（昇降圧動作T5）

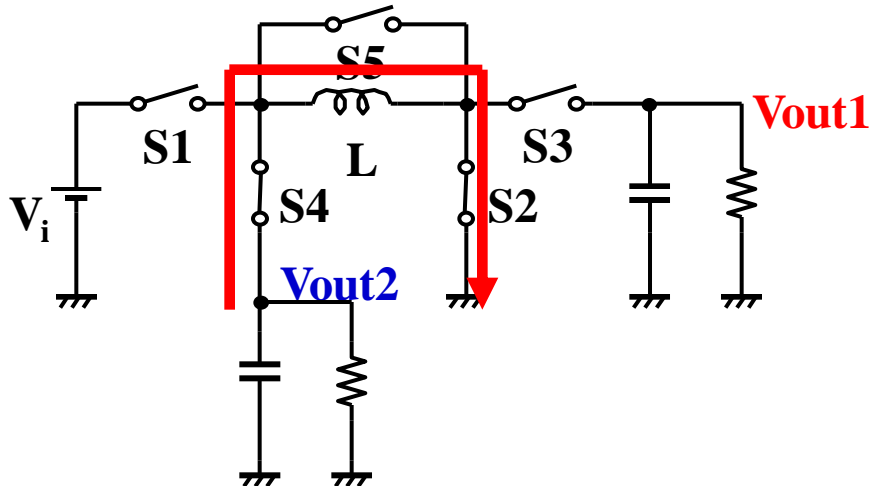
□ T5: S2,S4 ⇒ ON

$$L \frac{dI_L}{dt} = V_L = V_{out2}$$

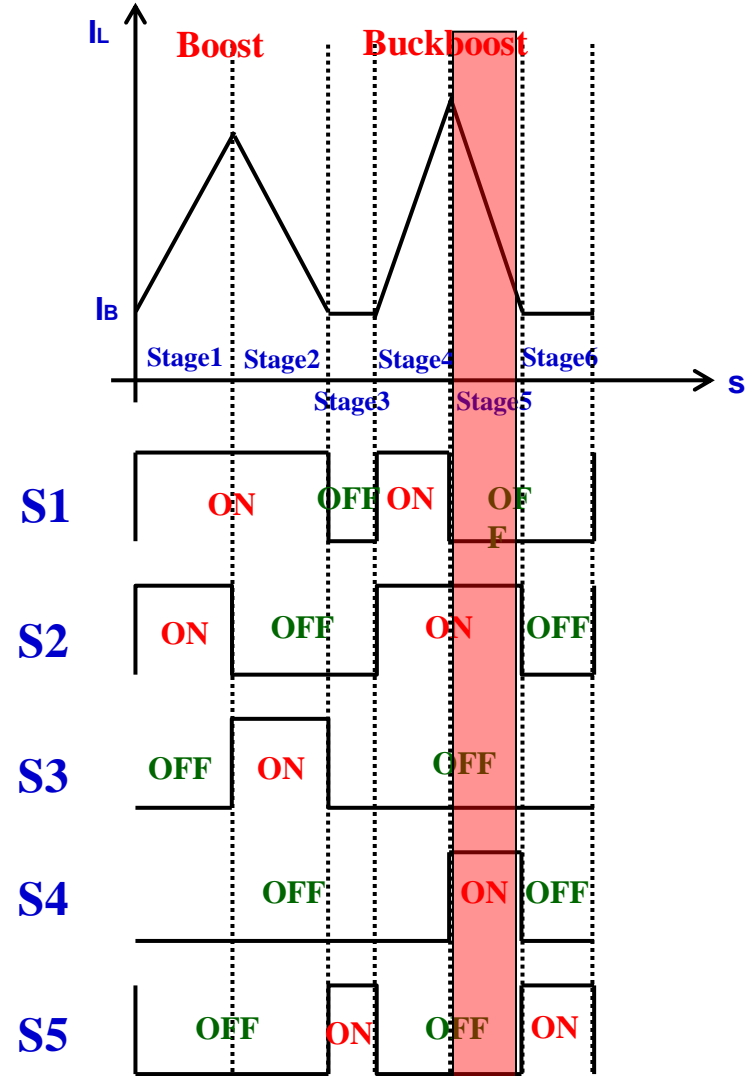
$$I_L = I_{P2} + \frac{V_{out2}}{L} t$$

$$= I_{P1} - \frac{(I_{P2} - I_B)}{T_5} t$$

$$\Rightarrow \frac{-V_{out2}}{L} = \frac{(I_{P2} - I_B)}{T_5}$$



Inductor current waveform



出力電圧の導出

□ **正電圧出力（昇圧型）** ～ T1&T2 ～

$$\frac{V_i \cdot D_1}{L} = \frac{V_{out1} \cdot D_2 - V_i \cdot D_2}{L}$$

$$V_{out1} = \frac{(D_1 + D_2)}{D_2} V_i$$

□ **負電圧出力（昇降圧型）** ～ T4&T5 ～

$$\frac{V_i \cdot D_4}{L} = \frac{-V_{out2} \cdot D_5}{L}$$

$$V_{out2} = -\frac{D_4}{D_5} V_i$$

V_{out1} と V_{out2} がそれぞれ独立 ⇒ クロスレギュレーション良

スイッチ オン抵抗を考慮した出力電圧の導出

□ 正電圧出力（昇圧型） ～ T1&T2 ～

$$\{V_i - (R_{on1} + R_{on2})I_L\}D_1 = \{V_{out1} + (R_{on1} + R_{on3})I_L - V_i\}D_2$$

$$V_{out1} = \frac{-\{(R_{on1} + R_{on2})D_1 + (R_{on1} + R_{on3})D_2\}I_L + (D_1 + D_2)V_i}{D_2}$$

□ 負電圧出力（昇降圧型） ～ T4&T5 ～

$$\{V_i - (R_{on1} + R_{on2})I_L\}D_4 = \{-V_{out2} + (R_{on2} + R_{on5})I_L\}D_5$$

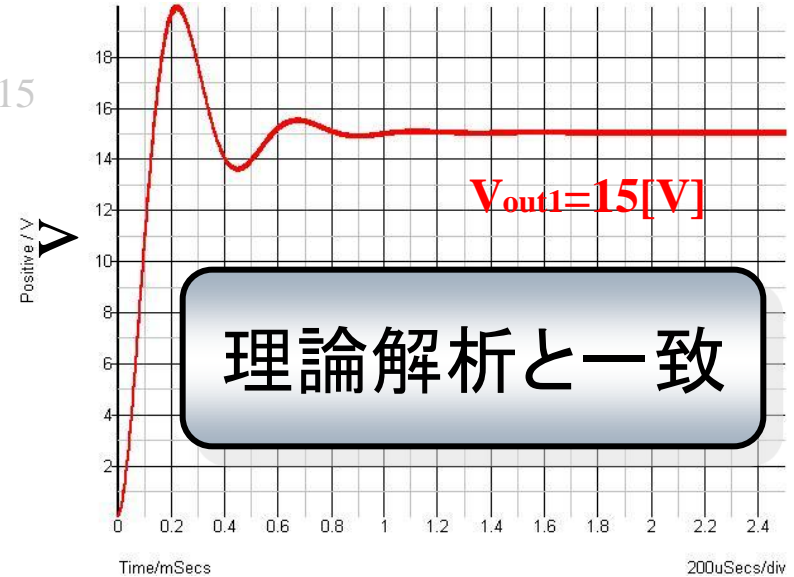
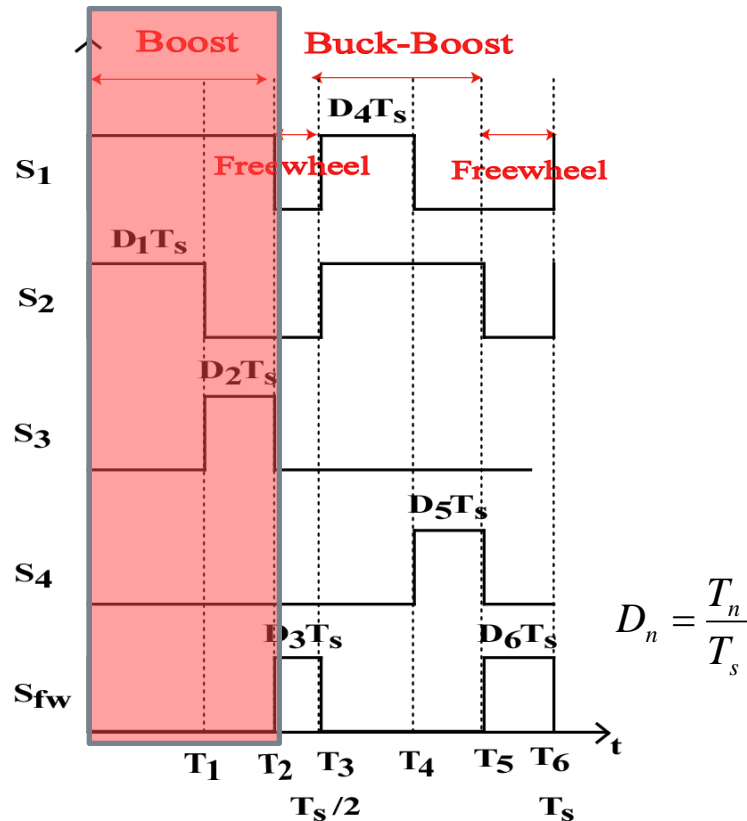
$$V_{out2} = -\frac{D_4 \cdot V_i - \{(R_{on1} + R_{on2})D_4 + (R_{on2} + R_{on5})D_5\}I_L}{D_5}$$

Outline

1. 研究背景と目的
2. DC-DCコンバータの原理
3. 単一インダクタ2出力DC-DCコンバータの考察
4. 単一インダクタ正負2出力DC-DCコンバータの提案回路
5. シミュレーションによる動作確認
6. まとめ

シミュレーション結果（正電圧）

$$V_{out1} = \frac{-\{(R_{on1} + R_{on2})D_1 + (R_{on1} + R_{on3})D_2\}I_L + (D_1 + D_2)V_i}{D_2} = 15$$



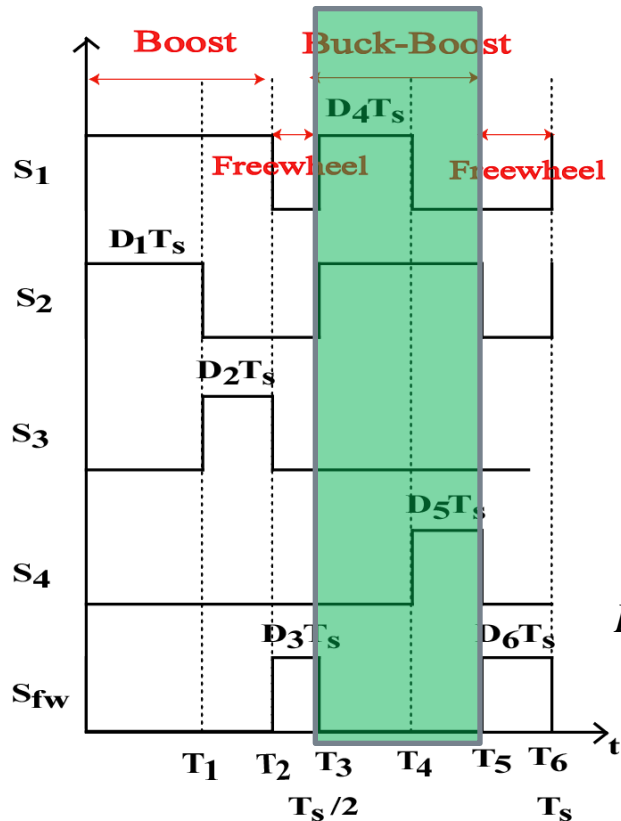
※SIMetrixによる解析

Fsw	500kHz
Vi	5V
L	100uH
Cout1,2	100uF
Ron1~5	4mΩ

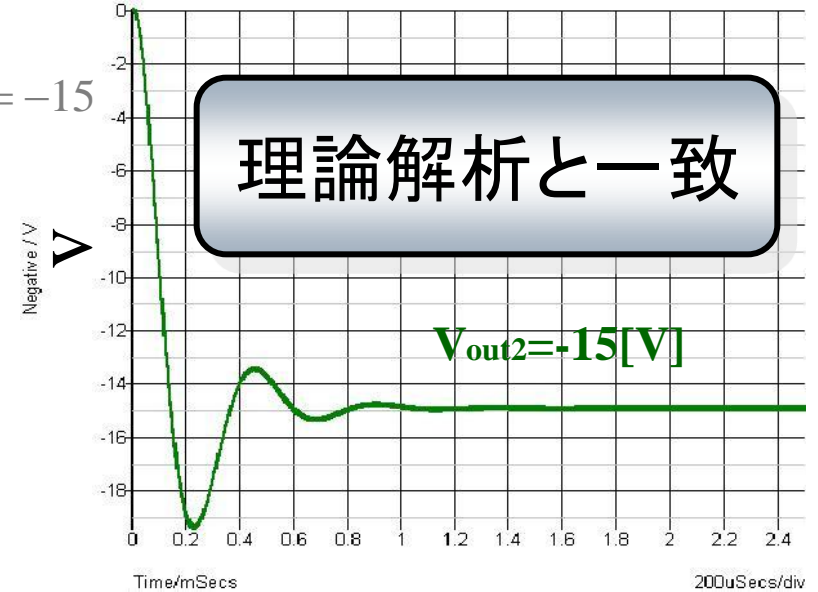
T1	460ns
T2	200ns
T3	340ns
T4	680ns
T5	200ns
T6	120ns

シミュレーション結果（負電圧）

$$V_{out2} = -\frac{D_4 \cdot V_i - \{(R_{on1} + R_{on2})D_4 + (R_{on2} + R_{on5})D_5\}I_L}{D_5} = -15$$



$$D_n = \frac{T_n}{T_s}$$

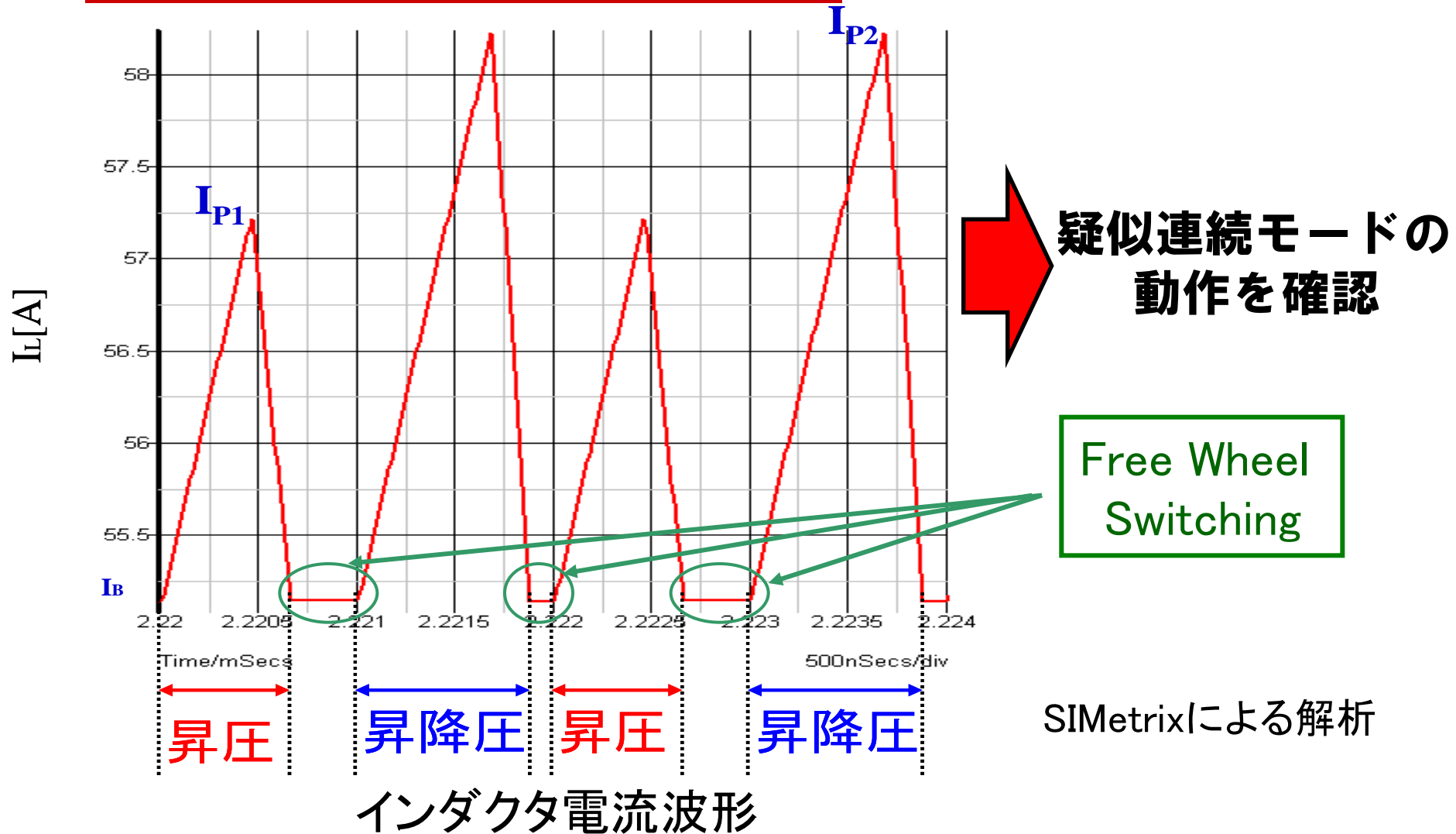


※SIMetrixによる解析

Fsw	500kHz
Vi	5V
L	100uH
Cout1,2	100uF
Ron1~5	4mΩ

T1	460ns
T2	200ns
T3	340ns
T4	680ns
T5	200ns
T6	120ns

シミュレーション結果（インダクタ電流）



インダクタ電流波形

Outline

1. 研究背景と目的
2. DC-DCコンバータの原理
3. 単一インダクタ2出力DC-DCコンバータの考察
4. 単一インダクタ正負2出力DC-DCコンバータの提案回路
5. シミュレーションによる動作確認
6. まとめ

まとめ

- **疑似連続モードを用いた単一インダクタ正負2出力DC-DCコンバータの提案：**
 - ✓ **+と-出力電圧を提供.**
 - ✓ **クロスレギュレーション 良（各出力：独立）**
 - ✓ **不連続モードの場合に比べて、低電流リップル.**

- **スイッチ オン抵抗を含めた解析による出力電圧式の導出**

- **シミュレーションによる動作確認**

まとめ

今後の課題

- 制御部を含めた全体回路の完成
- スイッチ数増加による効率低下に対する対策
- 突入電流による電圧変動に対する安定出力の対策