



非絶縁型降圧DC/DCコンバータの 制御システム設計

群馬大学大学院理工学府
理工学専攻電子情報数理領域
小林研究室 博士後期課程 1年
○築地 伸和 小林春夫

OUTLINE

- 背景
- 目的
- 電流モード制御方式の理解
 - 一巡伝達関数の導出
 - 補償器の設計
 - 実機検証
- まとめ

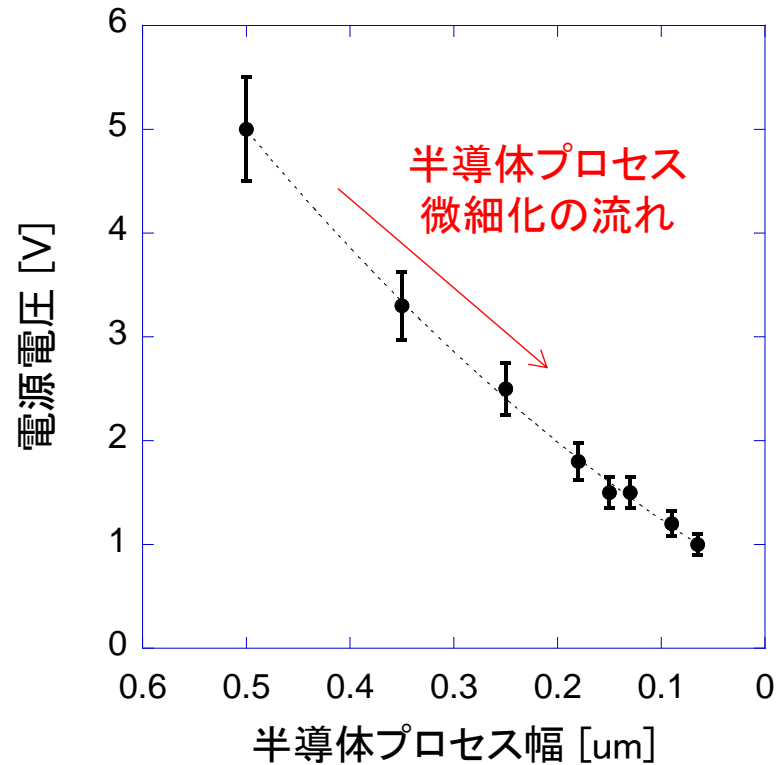
OUTLINE

- 背景
- 目的
- 電流モード制御方式の理解
 - 一巡伝達関数の導出
 - 補償器の設計
 - 実機検証
- まとめ

背景

○ 半導体プロセス微細化による供給電源の低電圧・大電流化

※Xilinx社FPGAのプロセス幅と電源電圧の変遷



例: 許容電圧変動±10%の場合

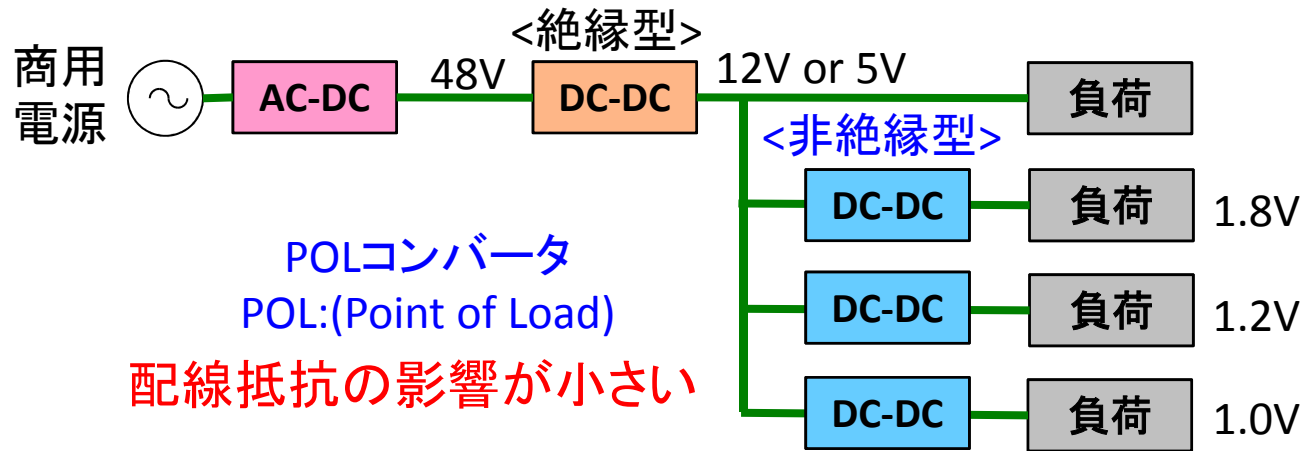
電源電圧	プロセス幅	許容電圧変動
5V	0.5um	±500mV
1V	0.065um	± <u>100mV</u>



電源配線の抵抗成分による
電圧降下も無視できない問題へ

POLコンバータ

○ 分散電源システム



集積回路化(電源IC)



選定基準

- ・応答性能
- ・効率
- ・コスト

POLコンバータ
主流タイプ

絶縁/非絶縁	出力形式	制御方式
非絶縁型	降圧	電流モード制御

OUTLINE

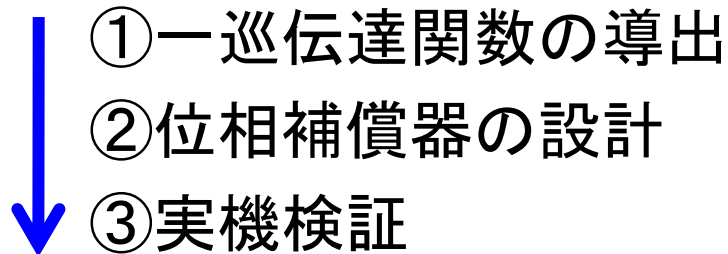
- 背景
- 目的
- 電流モード制御方式の理解
 - 一巡伝達関数の導出
 - 補償器の設計
 - 実機検証
- まとめ

目的

POLコンバータ主流タイプ

- 目的 { 非絶縁型降圧DC/DCコンバータの
電流モード制御システムを理解すること }

- 理解のためのステップ



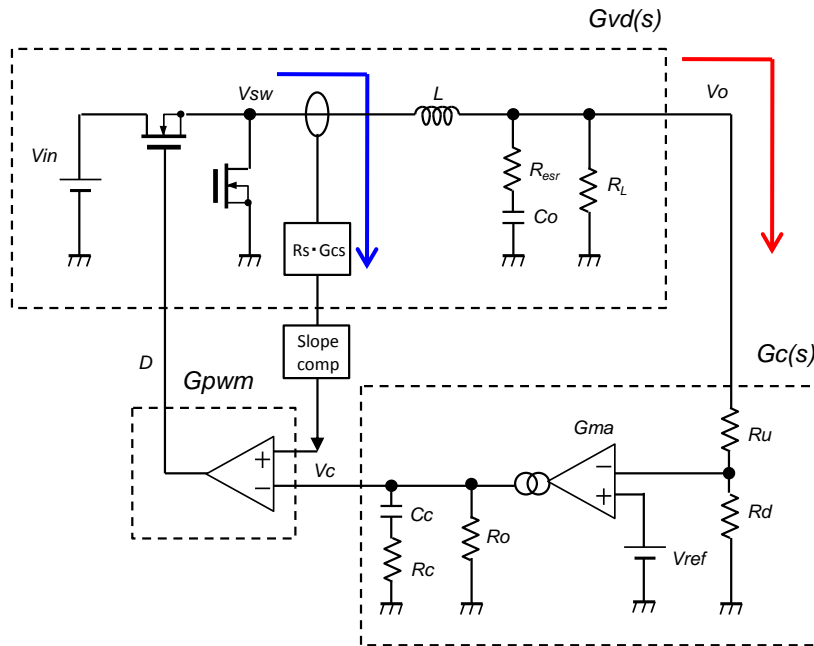
- ①～③を通じて全体像を把握

OUTLINE

- 背景
- 目的
- 電流モード制御方式の理解
 - 一巡伝達関数の導出
 - 補償器の設計
 - 実機検証
- まとめ

一巡伝達関数の導出

全体回路図

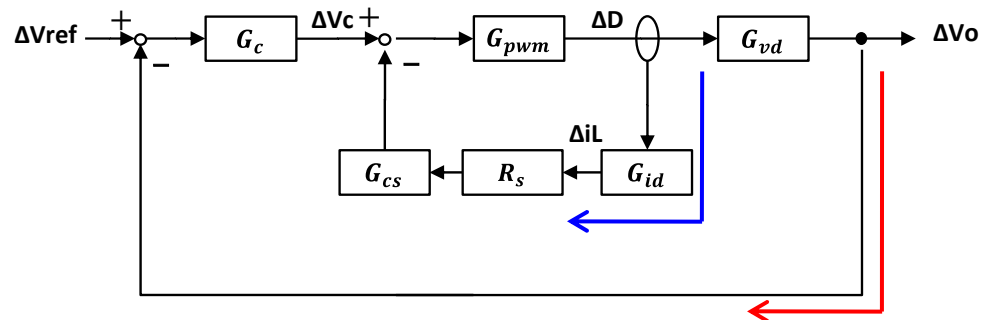


— 電流ループ
— 電圧ループ

主要ブロック

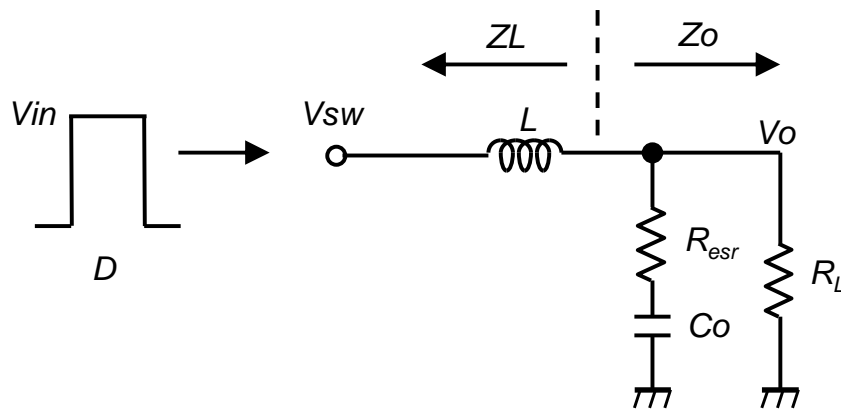
- ・LCフィルタ
- ・誤差増幅器(補償器)
- ・PWM変調

制御ブロック図



LCフィルタの伝達関数

- $G_{vd}(s) : \Delta D \rightarrow \Delta V_o$
 $G_{id}(s) : \Delta D \rightarrow \Delta I_L$



$$G_{vd}(s) = \frac{\Delta V_o}{\Delta D} = \frac{\Delta V_o}{\Delta V_{sw}} \cdot \frac{\Delta V_{sw}}{\Delta D} = V_{in} \cdot \frac{Z_o}{Z_L + Z_o}$$

$$= V_{in} \cdot \frac{1 + \frac{s}{\omega_{esr}}}{1 + \frac{s}{\omega_0 Q_{ps}} + \left(\frac{s}{\omega_0}\right)^2}$$

$$G_{id}(s) = \frac{\Delta I_L}{\Delta D} = \frac{\Delta I_L}{\Delta V_{sw}} \cdot \frac{\Delta V_{sw}}{\Delta D} = V_{in} \cdot \frac{1}{Z_L + Z_o}$$

$$= \frac{V_{in}}{R_L} \cdot \frac{1 + \frac{s}{\omega_{p2}}}{1 + \frac{s}{\omega_0 Q_{ps}} + \left(\frac{s}{\omega_0}\right)^2}$$

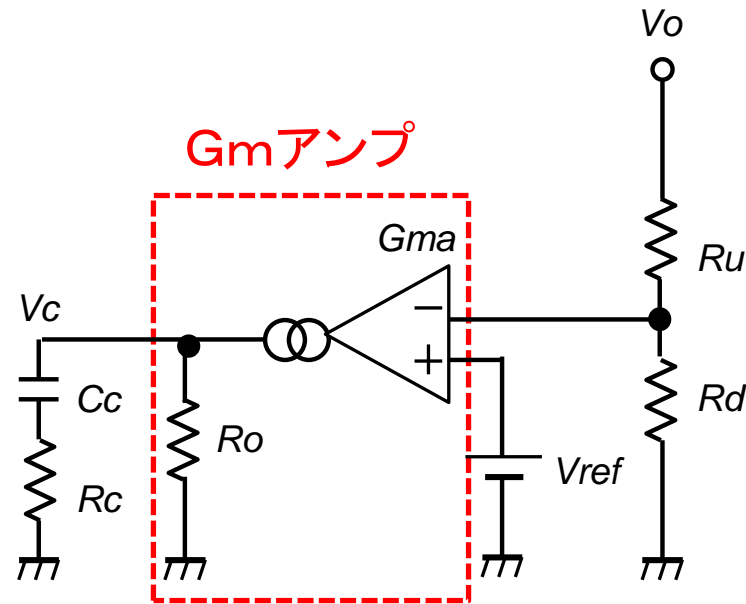
分母は共通
(2次ポール)

各定数(定義)

$$\left(\begin{array}{l} \omega_{esr} = 1/C_0 R_{esr} \quad \omega_0 = 1/\sqrt{LC_0} \\ \omega_{p2} = 1/C_0 R_L \quad Q_{ps} = R_L \sqrt{C_0/L} \end{array} \right)$$

誤差増幅器(補償器)の伝達関数

○ $G_c(s) : \Delta V_o \rightarrow \Delta V_c$



R_o : 出力インピーダンス

$$G_c(s) = \frac{\Delta V_c}{\Delta V_o} = \frac{\Delta V_c}{\Delta V_{FB}} \cdot \frac{\Delta V_{FB}}{\Delta V_o}$$

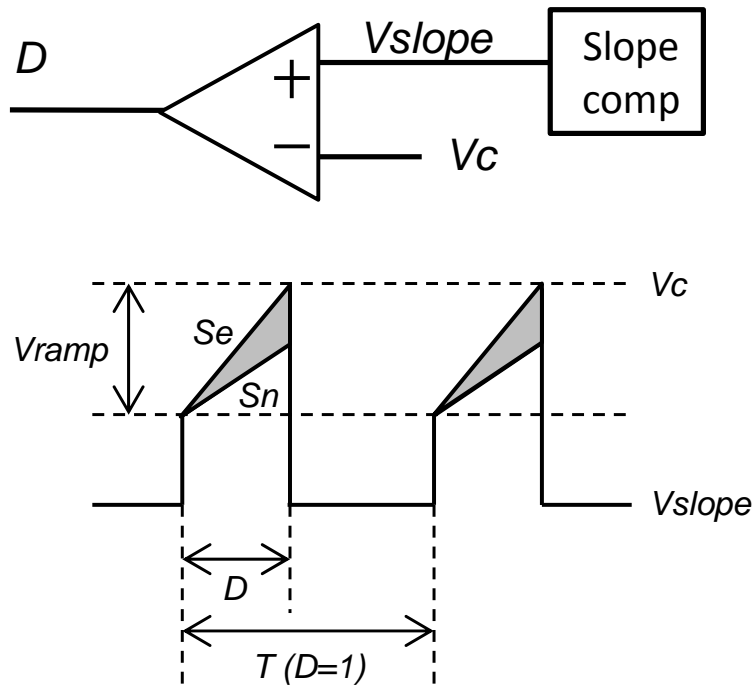
$$= \frac{V_{ref}}{V_o} \cdot G_{ma} R_o \cdot \frac{1 + s/\omega_{z1}}{1 + s/\omega_{p1}}$$

各定数(定義)

$$\left(\begin{array}{l} \omega_{z1} = 1/C_c R_c \\ \omega_{p1} = 1/C_c R_o \\ R_o = DCgain/G_{ma} \end{array} \right)$$

PWM変調部の伝達関数

- $G_{pwm} : \Delta V_c \rightarrow \Delta D$

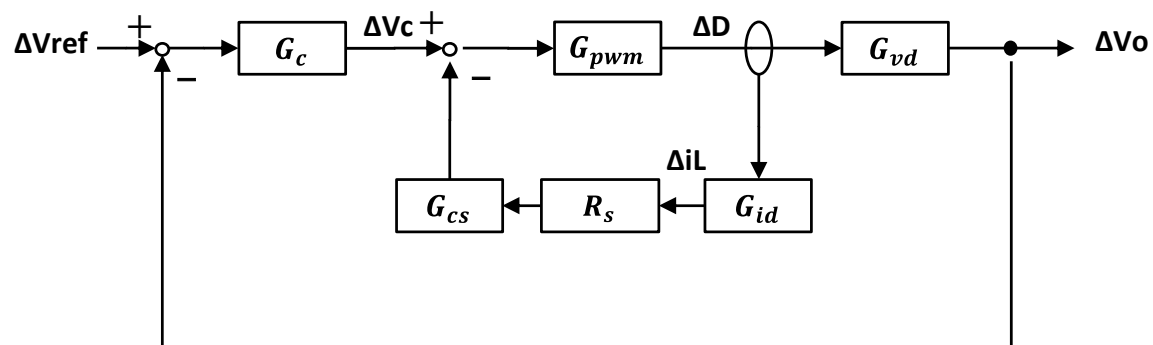


$$G_{pwm} = \frac{\Delta D}{\Delta V_C} = \frac{D}{V_{ramp}} = \frac{1}{(S_n + S_e) \cdot T}$$

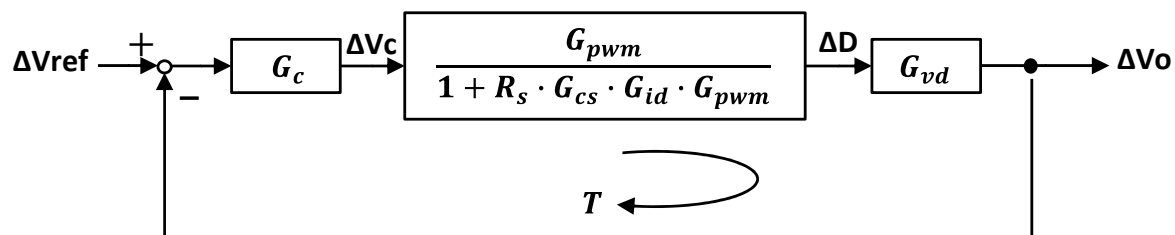
各定数(定義)

- S_n : 補償電圧の傾き[V/s]
- S_e : 電流センスの傾き[V/s]

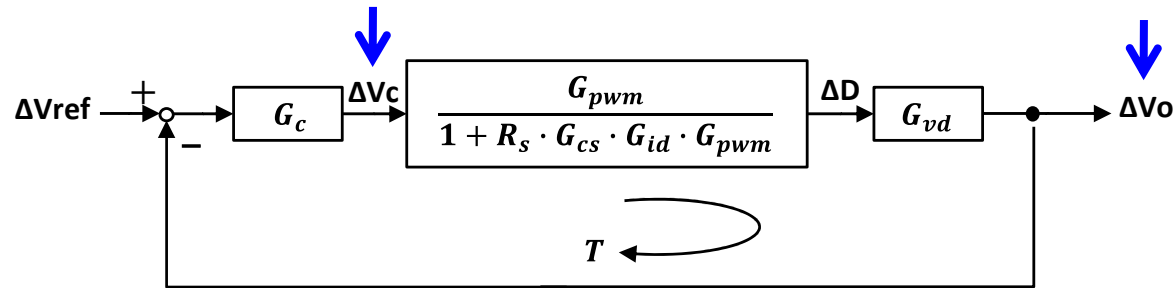
ブロック線図の簡略化



電流ループをまとめる



ブロック線図の簡略化②



$\Delta V_c \rightarrow \Delta V_o$ の伝達関数

$$\frac{\Delta V_o}{\Delta V_c} = \frac{G_{pwm}}{1 + R_s \cdot G_{CS} \cdot G_{id} \cdot G_{pwm}} \cdot G_{vd}$$

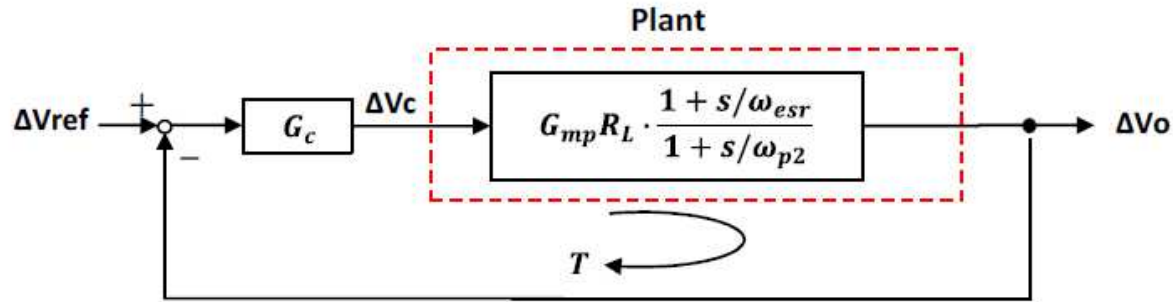
↓ $1 \ll R_s \cdot G_{CS} \cdot G_{id} \cdot G_{pwm}$ ならば

$$\frac{\Delta V_o}{\Delta V_c} = \frac{G_{vd}}{R_s \cdot G_{CS} \cdot G_{id}} = G_{mp} \cdot \frac{G_{vd}}{G_{id}} \quad \left(G_{mp} \triangleq \frac{1}{R_s G_{CS}} \right)$$

↓ G_{vd}, G_{id} を代入すると

$$\frac{\Delta V_o}{\Delta V_c} = G_{mp} R_L \cdot \frac{1 + s/\omega_{esr}}{1 + s/\omega_{p2}} \quad \text{LCフィルタによる} \\ \text{2次ポールがキャンセル}$$

ブロック線図の簡略化③



(ESRは十分小さく $\omega_{esr} \gg \omega_{crs}$ とし1次ゼロは無視)

電流モード制御の対象(Plant)は1次ポールのみ

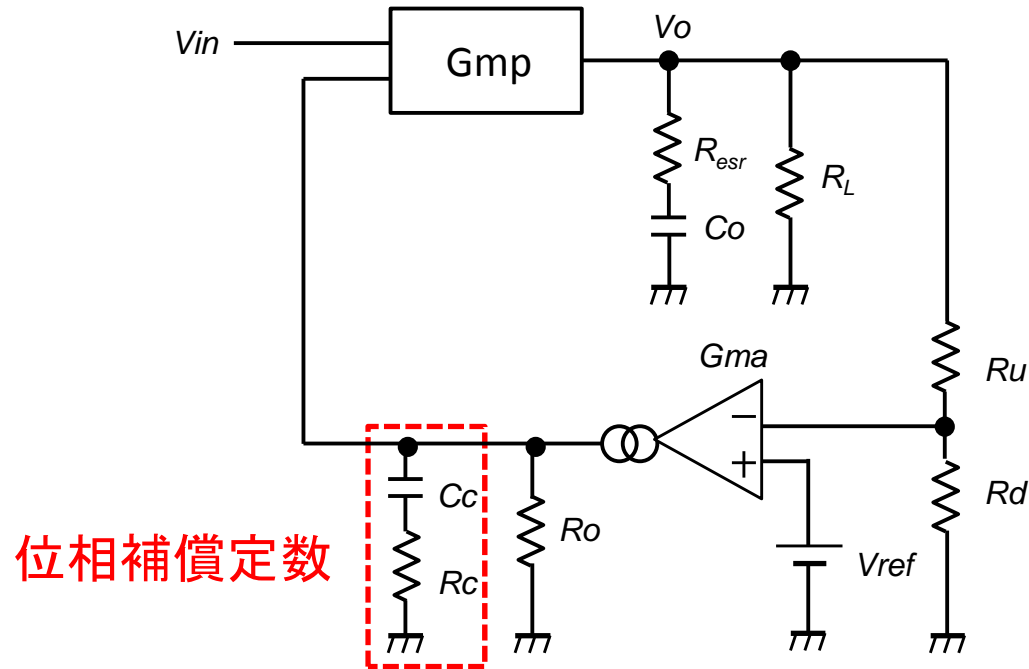
$$\frac{\Delta V_o}{\Delta V_c} = G_{mp} R_L \cdot \frac{1 + s/\omega_{esr}}{1 + s/\omega_{p2}} \quad \left(\begin{array}{l} \omega_{p2} = 1/C_o R_L \quad RL: \text{負荷抵抗} \\ \text{Co: 出力容量} \end{array} \right)$$

電流モード制御の一巡伝達関数
(2ポール・1ゼロのシステム)

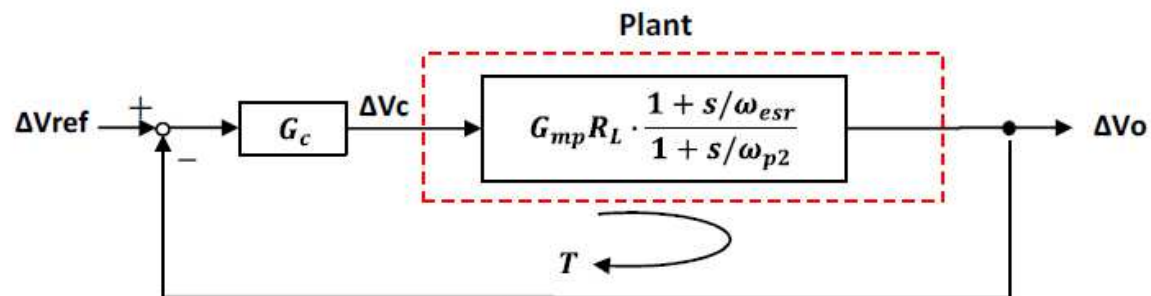
$$T(s) = \underbrace{\frac{V_{ref}}{V_o} \cdot G_{ma} R_o \cdot G_{mp} R_L}_{\text{DCゲイン}} \cdot \underbrace{\frac{1 + s/\omega_{z1}}{(1 + s/\omega_{p1})(1 + s/\omega_{p2})}}_{\text{位相特性}}$$

簡略化した電流モード制御回路

○ 全体回路図



○ 制御ブロック図



OUTLINE

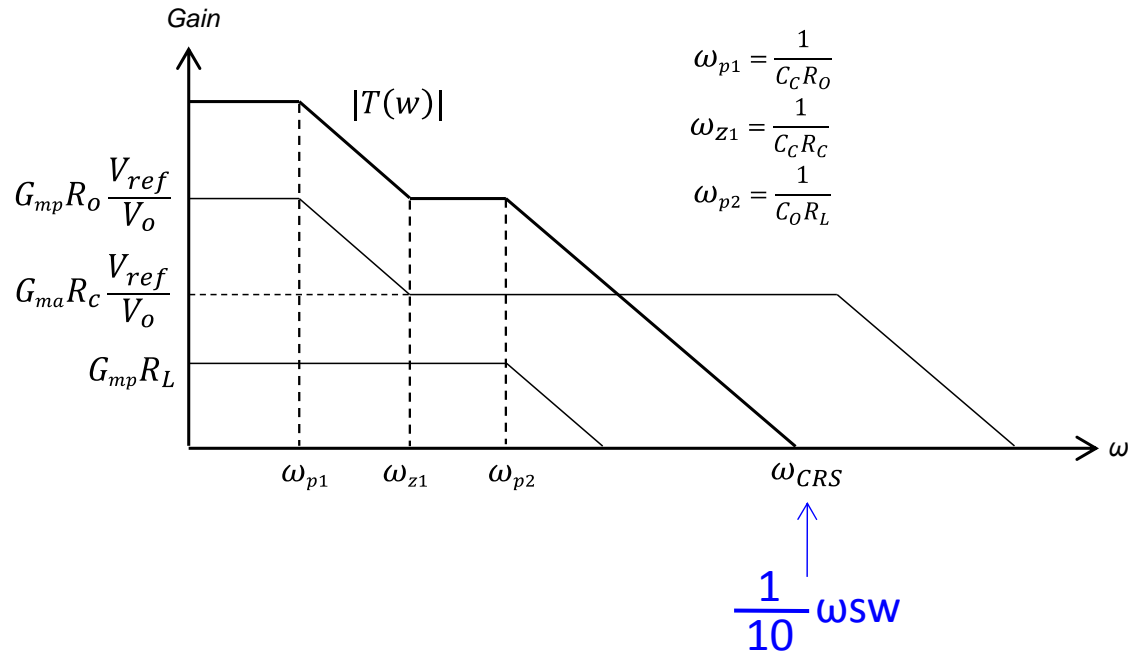
- 背景
- 目的
- 電流モード制御方式の理解
 - 一巡伝達関数の導出
 - 補償器の設計
 - 実機検証
- まとめ

設計手順

①クロスオーバー周波数 ω_{crs} の設定

ここでは目標をスイッチング周波数の1/10に設定

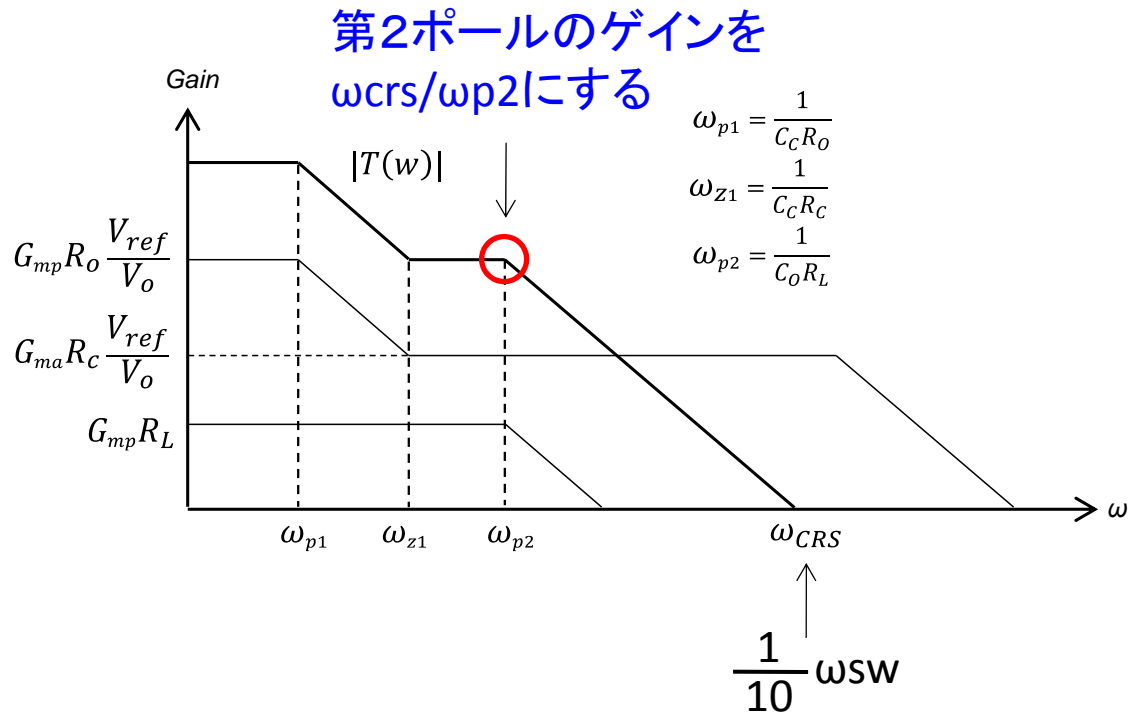
$$\omega_{crs} = \frac{1}{10} \omega_{sw}$$



設計手順

②位相補償抵抗Rcの設定

$$\underbrace{G_{mp}R_L \cdot G_{ma}R_C}_{\text{ゲイン}} \cdot \frac{V_{ref}}{V_o} = \underbrace{\frac{\omega_{SW}C_O R_L}{10}}_{\omega_{CRS}/\omega_{p2}} \Rightarrow R_C = \frac{\omega_{SW}C_O V_o}{10G_{mp}G_{ma}V_{ref}}$$

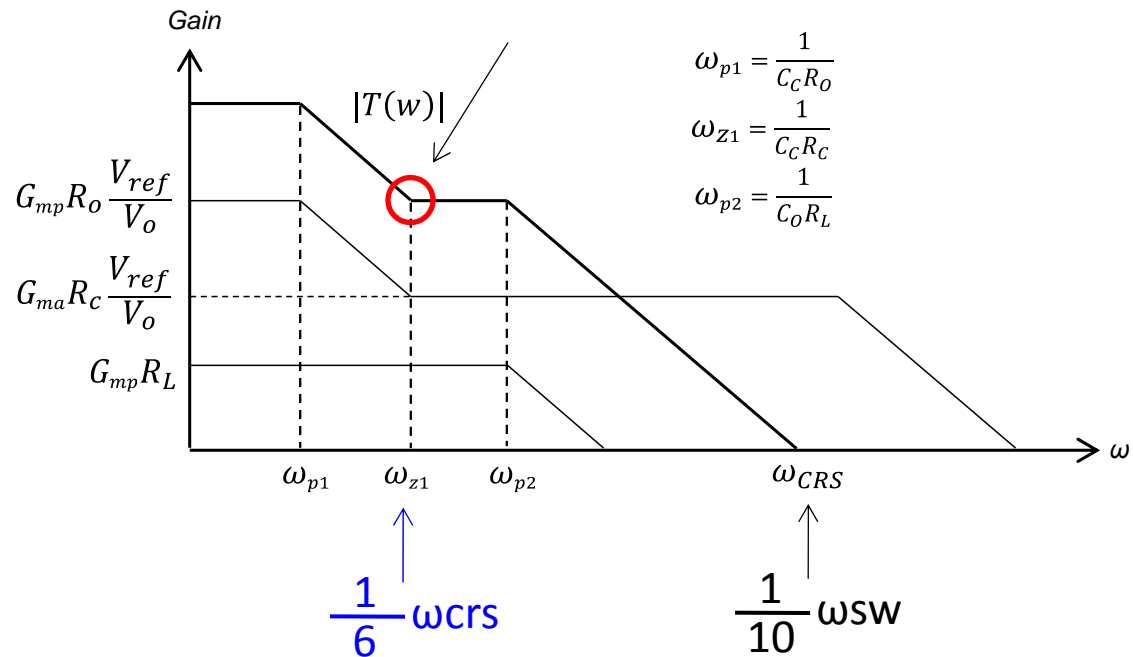


設計手順

③位相補償容量Ccの設定

$$C_C = \frac{1}{\omega_{z1} R_C} = \frac{6}{\omega_{CRS} R_C}$$

ωz1 の位置を
ωcrsの1/6に設定



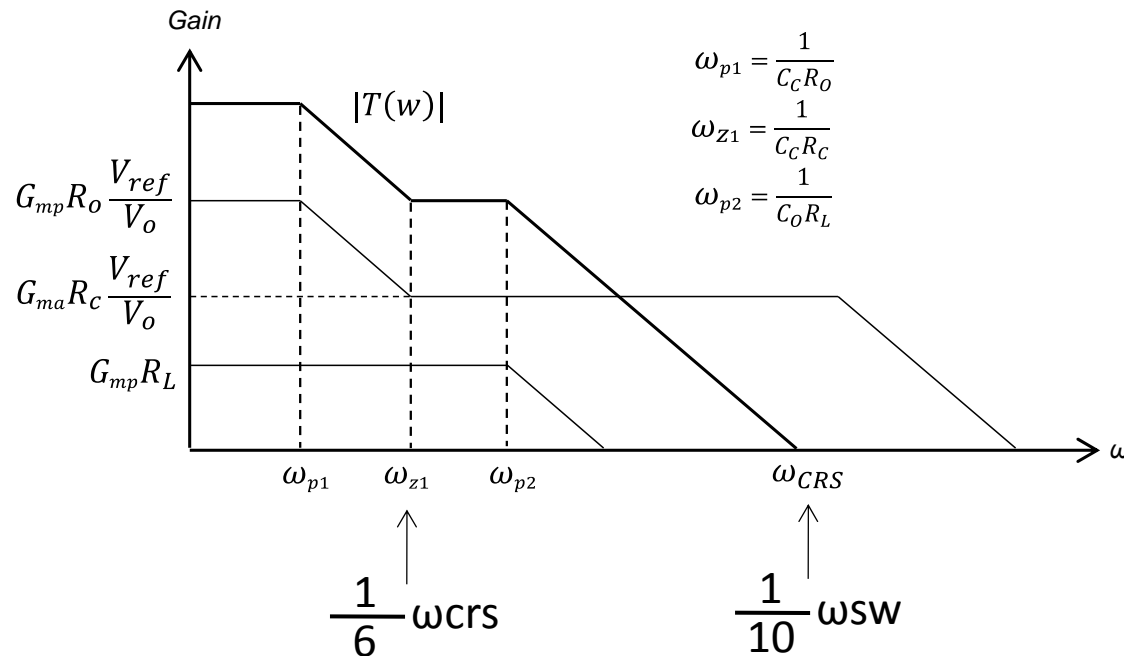
設計手順まとめ

設計値

- ① $\omega_{crs} = \frac{1}{10} \omega_{sw}$
- ② $R_C = \frac{\omega_{sw} C_O V_O}{10 G_{mp} G_{ma} V_{ref}}$
- ③ $C_C = \frac{1}{\omega_{z1} R_C} = \frac{6}{\omega_{CRS} R_C}$



理論的には位相余裕90deg
 実際は制御遅延等により90deg以下
 一般に45deg以上あれば安定と判別



OUTLINE

- 背景
- 目的
- 電流モード制御方式の理解
 - 一巡伝達関数の導出
 - 補償器の設計
 - 実機検証
- まとめ

実機検証

- 使用IC:BD9329A(Rohm社)
 - 同期整流型降圧コンバータ(電流モード)
 - NF社FRAを用いて周波数特性測定



評価基板

設計値

$$\begin{cases} \textcircled{1} \omega_{crs} = \frac{1}{10} \omega_{sw} = 38\text{kHz} \\ \textcircled{2} R_C = \frac{\omega_{sw} C_O V_O}{10 G_{mp} G_{ma} V_{ref}} = 7.5\text{Kohm} \\ \textcircled{3} C_C = \frac{1}{\omega_{z1} R_C} = \frac{6}{\omega_{crs} R_C} = 3300\text{pF} \end{cases}$$

↓ 計算結果

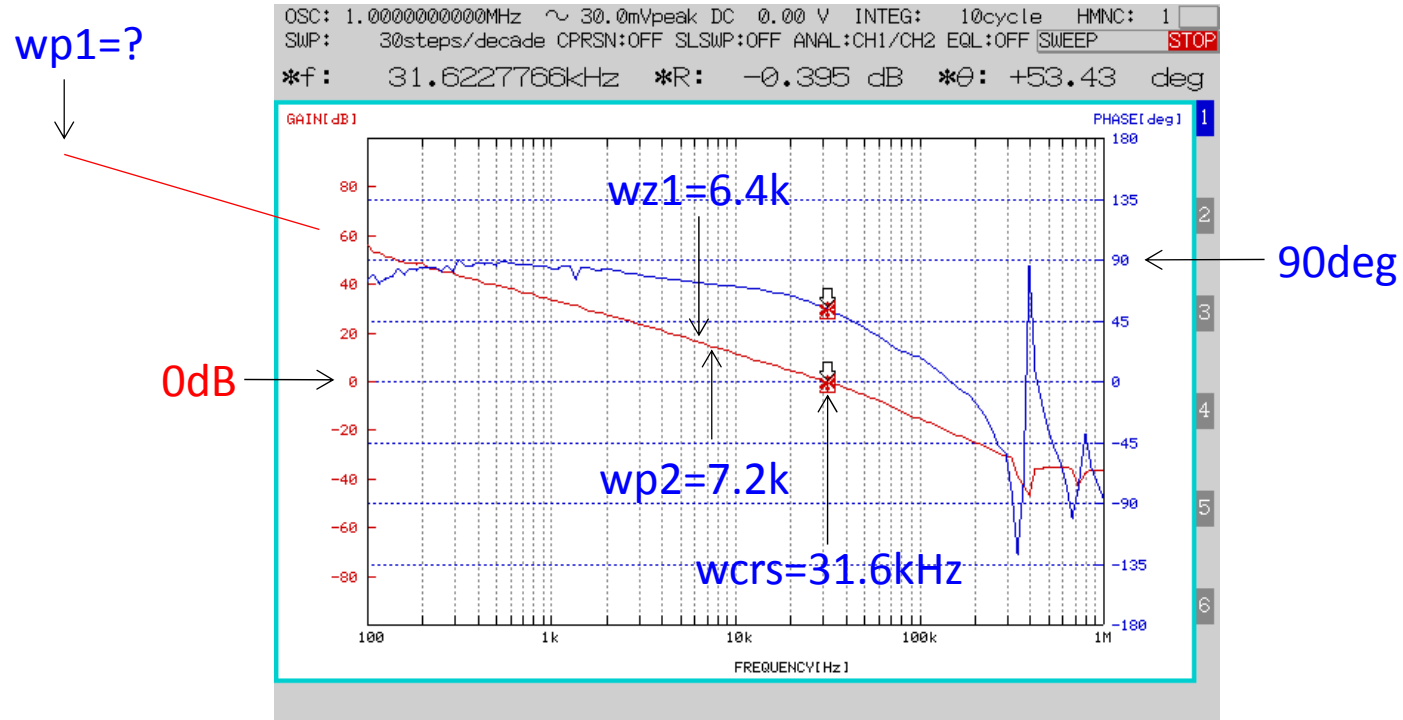
$$\begin{aligned} \omega_{p1} &= \frac{1}{C_C R_O} = \text{計算不可 (Ro不明)} \\ \omega_{z1} &= \frac{1}{C_C R_C} = 6.4\text{kHz} \\ \omega_{p2} &= \frac{1}{C_O R_L} = 7.2\text{kHz} \end{aligned}$$

検証パラメータ

Vin	12V
Vo	3.3V
RL	1.1ohm
L	10uH
Co	20uF
Gma	300uA/V
Gmp	7.8A/V
Vref	0.9V
Fsw	380kHz

結果


$$\omega_{crs}=31.6\text{kHz} \cdot \text{位相余裕} = 53\text{deg}$$



- ・位相余裕45deg以上を確認
- ・ w_{crs} はほぼ狙い通り(16%ずれ)
- ・ w_{p2} と w_{z1} はほぼ同じ位置(ゲイン20dB/decで直性)

まとめ

- 非絶縁型降圧DC/DCコンバータの電流モード制御システムの理解を目的とし、以下の①～③を行った。

- 
- ①一巡伝達関数の導出
 - ②位相補償器の設計
 - ③実機検証

③にて期待どおりのクロスオーバー周波数を確認し、45度以上の位相余裕も確認することができた。