

第57回 自動制御連合講演会

オーガナイズ・セッション

アナログ電子回路・電源回路と制御工学

アナログ回路におけるフィードバック制御

—スイッチング電源と直流モータ駆動における自動制御—

小堀 康功 (小山工業高等専門学校)
(群馬大学 非常勤講師)

アウトライン

1. スイッチング電源における自動制御

1-1 スイッチング電源の概要

1-2 スイッチング電源の伝達関数

1-3 シミュレーションによる伝達特性解析

2. 直流モータ駆動における自動制御

2-1 直流モータの概要

2-2 速度制御回路と伝達特性

2-3 位相制御回路と伝達特性

3. 位相補償と制御特性(シミュレーション検討)

3-1 位相進み補償と制御特性

3-2 位相遅れ補償と制御特性

アウトライン

1. スイッチング電源における自動制御

1-1 スイッチング電源の概要

1-2 スイッチング電源の伝達関数

1-3 シミュレーションによる伝達特性解析

2. 直流モータ駆動における自動制御

2-1 直流モータの概要

2-2 速度制御回路と伝達特性

2-3 位相制御回路と伝達特性

3. 位相補償と制御特性(シミュレーション検討)

3-1 位相進み補償と制御特性

3-2 位相遅れ補償と制御特性

1. スイッチング電源における自動制御

1-1 スイッチング電源の概要 (降圧形)

● 降圧形電源の電圧変換率の算出

$V_i > V_o$ 、電圧変換率: $M=D$

【SW: ON時】

$$* V_i - V_o - I_L(r_s + r_L) = L \cdot (\Delta I / \Delta t) \quad (1-1)$$

$$\therefore I(t) = \{V_i - V_o - I_L(r_s + r_L)\} \cdot t / L + I_L$$

$$t = T_{ON} \text{ では } I_H = \{V_i - V_o - I_L(r_s + r_L)\} \cdot T_{ON} / L + I_L \quad (1-2)$$

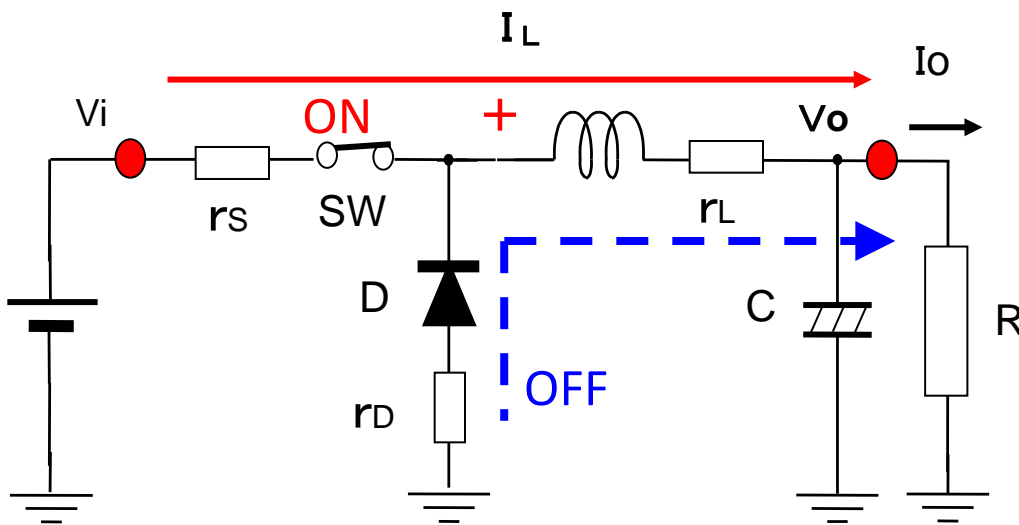


図1-1 降圧形電源

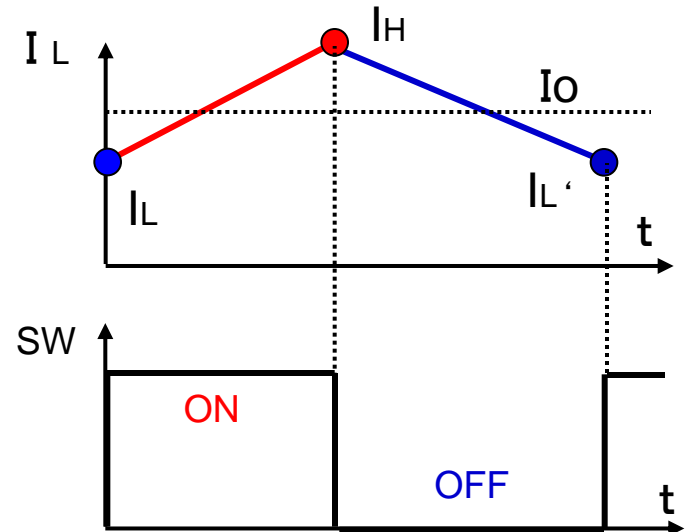


図1-2 インダクタ電流

1. スイッチング電源における自動制御

【SW:OFF時】

$$* -V_o - I_L(r_D + r_L) = L \cdot (\Delta I / \Delta t) \quad (1-3)$$

$$\therefore I(t) = \{-V_o - I_L(r_D + r_L)\} \cdot t / L + I_H$$

$$t = T_{OFF} \text{ では } I_L' = I(T_{OFF}) = \{-V_o - I_L(r_D + r_L)\} \cdot T_{OFF} / L + I_H \quad (1-4)$$

● 電圧変換率の算出

(1-12) \Rightarrow (1-14) 代入

$$I_L' = \{-V_o - I_L(r_D + r_L)\} \cdot T_{OFF} / L + \{V_i - V_o - I_L(r_s + r_L)\} \cdot T_{ON} / L + I_L$$

定常時 $I_L' = I_L$ 、 T_{ON} 、 T_{OFF} を D 、 D' に置き換えてまとめると

$$V_o = D \cdot V_i - (r_L + D \cdot r_s + D' \cdot r_D) I_L = D \cdot V_i - r \cdot (V_o / R) \quad (1-5)$$

$$\therefore I_L = I_o = V_o / R \quad (R: \text{負荷抵抗})、\quad \underline{r = r_L + D \cdot r_s + D' \cdot r_D} \quad (1-6)$$

よって $(1 + r/R)V_o = D \cdot V_i$ 、理想変換率: $M = D$ より

$$\therefore M' = V_o / V_i = \frac{D}{1 + r/R} = \frac{M}{1 + Z_o/R} \quad \text{ただし } Z_o = r \quad (1-7)$$

1. スイッチング電源における自動制御

● 電圧変換率の算出(降圧形)

ここで 式(1-17)の意味すること

$$V_o/V_i = \frac{M}{1+Z_o/R} = \frac{R \cdot M}{R+Z_o} \quad \therefore V_o = \frac{R}{R+Z_o} \cdot (M \cdot V_i) \quad (1-8)$$

Z_o : 出カインピーダンス

$$(\text{=内部抵抗: } r = r_L + D \cdot r_S + D' \cdot r_D) \quad (1-9)$$

$E = (M \cdot V_i)$: 理想出力電圧 [理想電源]

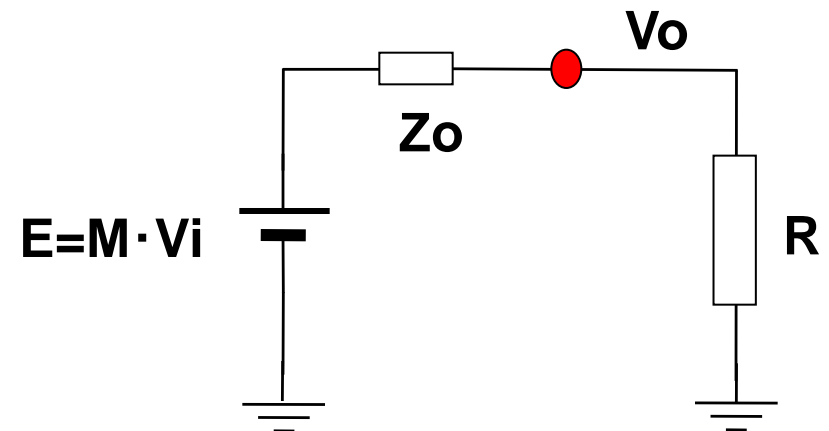


図1-3 等価電源

1. スイッチング電源における自動制御

● 昇圧形電源の場合

降圧形と同様の解析により

$$M' = \frac{1/D'}{1 + (r/D'^2)/R} = \frac{M}{1 + Z_o/R} \quad (1-10)$$

$$V_i < V_o, \quad I_L \neq I_o$$

ただし $M = 1/D'$
 $Z_o = r/D'^2 \quad (1-11)$

Z_o は 昇圧率の2乗に比例！

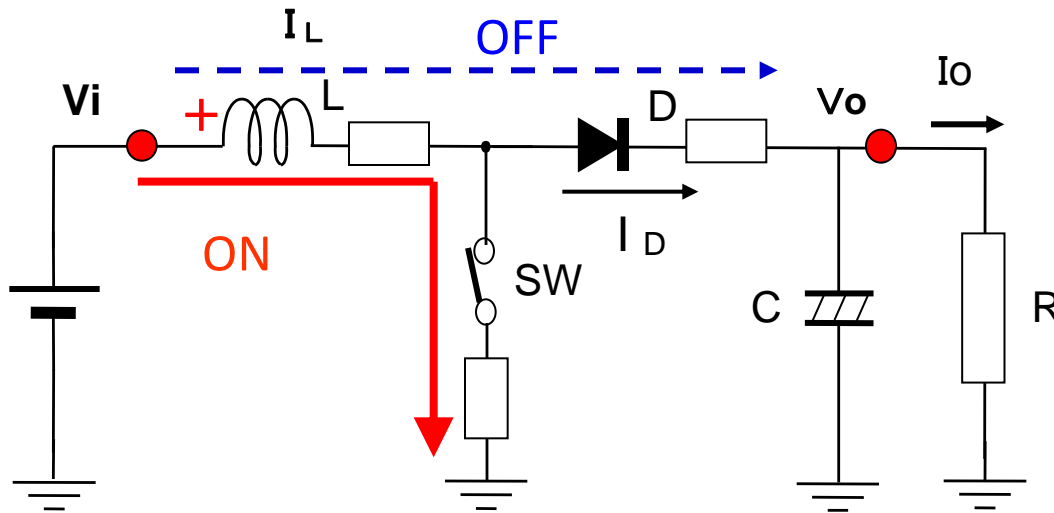


図1-4 昇圧形電源の構成

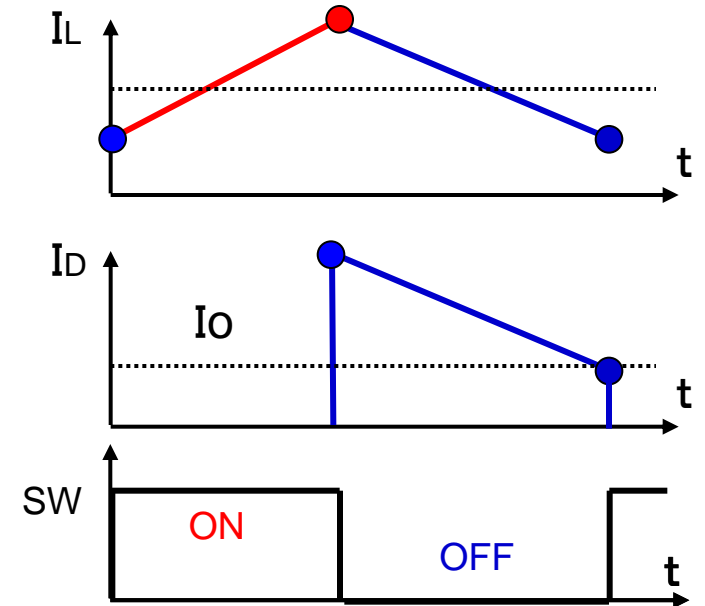


図1-5 インダクタ電流

アウトライン

1. スイッチング電源における自動制御

1-1 スイッチング電源の概要

1-2 スイッチング電源の伝達関数

1-3 シミュレーションによる伝達特性解析

2. 直流モータ駆動における自動制御

2-1 直流モータの概要

2-2 速度制御回路と伝達特性

2-3 位相制御回路と伝達特性

3. 位相補償と制御特性(シミュレーション検討)

3-1 位相進み補償と制御特性

3-2 位相遅れ補償と制御特性

1. スイッチング電源における自動制御

1-2 スイッチング電源の伝達関数

● 状態平均化法と状態方程式

* 状態変数: $X = \begin{bmatrix} i_L \\ V_C \end{bmatrix}$

* 状態方程式: $dX/dt = A \cdot X(t) + B \cdot V_i$ (1-12)

$y(t) = C \cdot X(t)$ (1-13)

$V_o = V_C$ より 式(1-12)のみ考慮

★ ON:OFF で独立に状態方程式を立て、
各係数をデューティ比率で加算

つまり $A = D \cdot A_1 + D' \cdot A_2$
 $B = D \cdot B_1 + D' \cdot B_2$ (1-14)

1. スイッチング電源における自動制御

● 状態方程式 (降圧形)

[状態1: SW ON] $V_C=V_O$ 、 $V_D=0$ とする

* 電圧法則

$$L \cdot di_L/dt = (V_i - V_o) - (r_s + r_L) \cdot i_L$$

$$\therefore di_L/dt = -(r_s + r_L)/L \cdot i_L - V_o/L + V_i/L$$

* 電流法則

$$i_L - V_o/R = C \cdot dV_o/dt \quad (\text{Cの充電})$$

$$\therefore dV_o/dt = i_L/C - V_o/CR$$

$$\begin{pmatrix} \frac{di_L}{dt} \\ \frac{dV_o}{dt} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{r_L+r_s}{L} & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_L \\ V_o \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{pmatrix} V_i \quad (1-15)$$

\parallel
 dX/dt

\parallel
 A_1

\parallel
 X

\parallel
 B_1

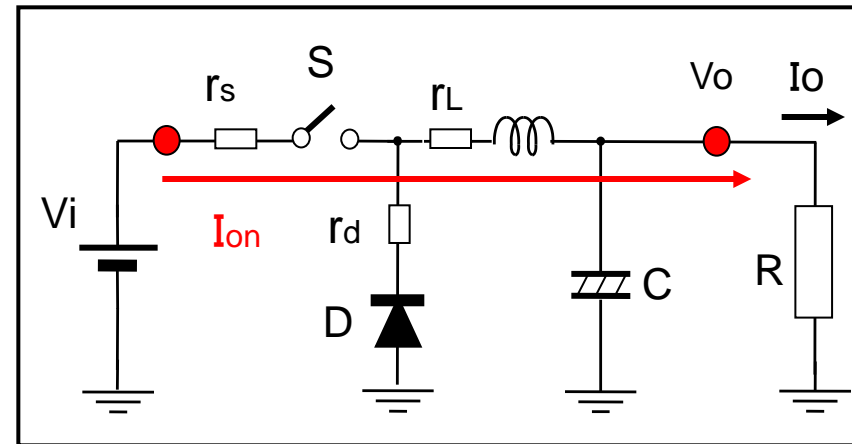


図1-6 降圧形電源の等価回路

1. スイッチング電源における自動制御

[状態2: SW OFF]

* 電圧法則

$$-L \cdot di_L/dt = v_o + (r_d + r_L) \cdot i_L$$

$$\therefore di_L/dt = -(r_d + r_L)/L \cdot i_L - v_o/L$$

* 電流法則

$$i_L - v_o/R = C \cdot dv_o/dt$$

$$\therefore dv_o/dt = i_L/C - v_o/CR$$

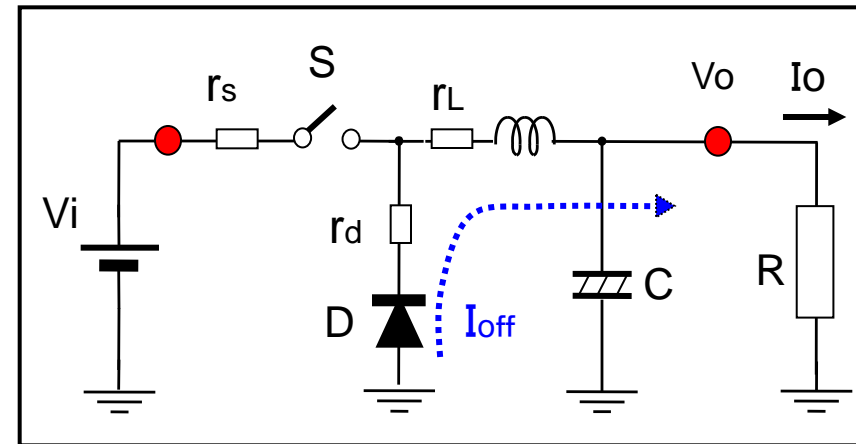


図1-7 降圧形電源の等価回路

$$\begin{pmatrix} \frac{di_L}{dt} \\ \frac{dv_o}{dt} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{r_L + r_d}{L} & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{CR} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_L \\ v_o \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} V_i \quad (1-16)$$

\parallel
 dX/dt \parallel A_2 \parallel X \parallel B_2

1. スイッチング電源における自動制御

* 状態平均化方程式 (降圧形)

$$dX/dt = (DA_1 + D'A_2)X + (DB_1 + D'B_2)V_i = \mathbf{A} \cdot X + \mathbf{B} \cdot V_i$$

$$\mathbf{A} = D \begin{pmatrix} -\frac{r_L + r_s}{L} & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{pmatrix} + D' \begin{pmatrix} -\frac{r_L + r_d}{L} & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{CR} \end{pmatrix} = \underline{\underline{\begin{pmatrix} -\frac{r}{L} & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{pmatrix}}}$$

$$\mathbf{B} = D \begin{pmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{pmatrix} + D' \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \underline{\underline{\begin{pmatrix} \frac{D}{L} \\ 0 \end{pmatrix}}}$$

ただし $r = r_L + D \cdot r_s + D' \cdot r_d$

よって

$$\begin{pmatrix} \frac{di_L}{dt} \\ \frac{dv_o}{dt} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{r}{L} & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_L \\ v_o \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{D}{L} \\ 0 \end{pmatrix} V_i \quad (1-17)$$

1. スイッチング電源における自動制御

* 状態平均化方程式(昇圧形)

同様にして、

$$A = D \begin{bmatrix} -\frac{r_L + r_s}{L} & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} + D' \begin{bmatrix} -\frac{r_L + r_d}{L} & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{CR} \end{bmatrix}$$

$$B = D \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} + D' \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix}$$

よって

$$\begin{bmatrix} \frac{di_L}{dt} \\ \frac{dv_o}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{r}{L} & -\frac{D'}{L} \\ \frac{D'}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L \\ v_o \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} V_i \quad (1-18)$$

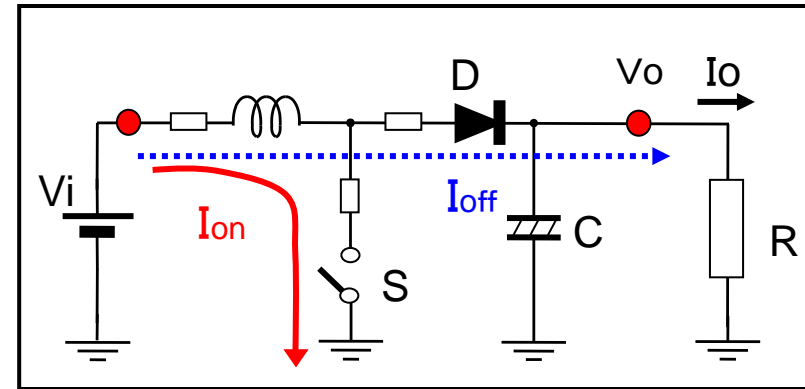


図1-12 昇圧形電源

1. スイッチング電源における自動制御

1-2 スイッチング電源の伝達関数

● 微小変動に対する伝達関数

* 状態平均化方程式 $dX/dt=A \cdot X+B \cdot Vi$ (1-19)

微小変動 ΔD , ΔR , ΔVi に対する状態変数 X の変化

$$d\Delta X/dt = A\Delta X + \left(\frac{\partial A}{\partial D} \cdot \Delta D + \frac{\partial A}{\partial R} \cdot \Delta R \right) X + B\Delta Vi + \frac{\partial B}{\partial D} \cdot Vi\Delta D$$

$$\therefore (sI - A)\Delta X = \left\{ \frac{\partial A}{\partial D} \cdot X + \frac{\partial B}{\partial D} \cdot Vi \right\} \Delta D + \frac{\partial A}{\partial R} \cdot X \Delta R + B\Delta Vi \quad (1-20)$$

ただし I : 単位行列

よって $\Delta X = (sI - A)^{-1} \left\{ \frac{\partial A}{\partial D} \cdot X + \frac{\partial B}{\partial D} \cdot Vi \right\} \Delta D + \frac{\partial A}{\partial R} \cdot X \Delta R + B\Delta Vi$ (1-21)

ここで $P(s) = (sI - A)^{-1} = \frac{1}{\Delta} \begin{pmatrix} s-a_{22} & a_{12} \\ a_{21} & s-a_{11} \end{pmatrix} = \frac{1}{\Delta} \{s^2 - (a_{11} + a_{22})s + \Delta\}$

$$= 1 + 2\delta (s/\omega_n) + (s/\omega_n)^2$$

2次式

$$(1-22)$$

1. スイッチング電源における自動制御

● PWM制御方式の回路構成

* 制御回路：誤差電圧を増幅し、PWM信号に変換

* PWM変換式： $G_{PWM}(s) = \Delta D / \Delta V = K$ (1-23)

* オペアンプ特性： $G_{OP}(s) = R2 / R1$ (1-24)

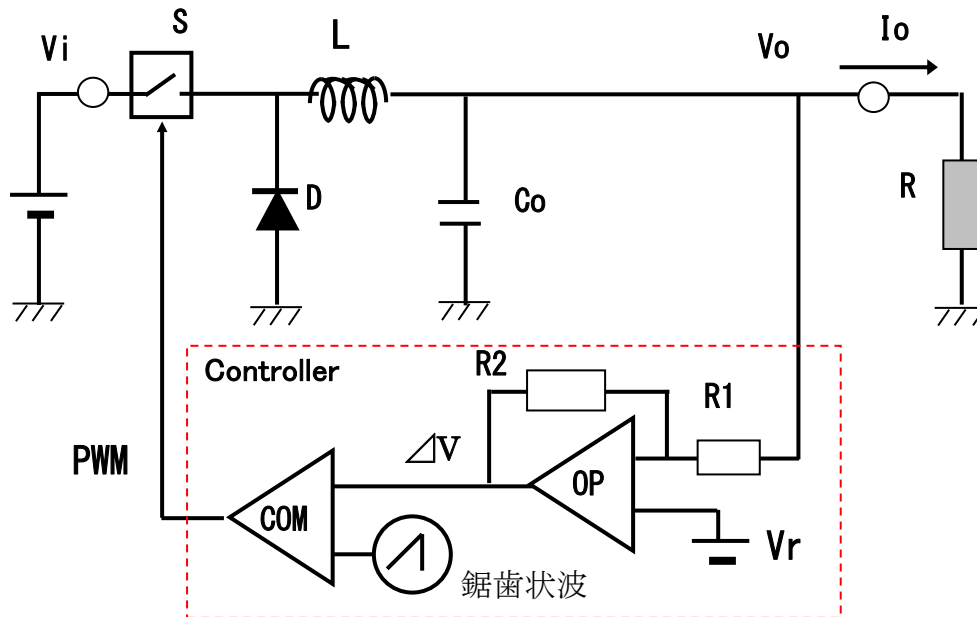


図1-13 降圧形電源の制御回路

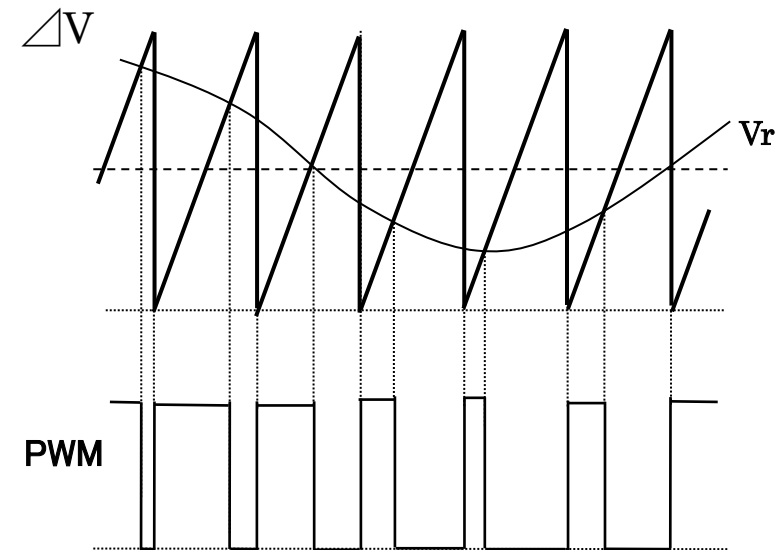


図1-14 制御回路波形

1. スイッチング電源における自動制御

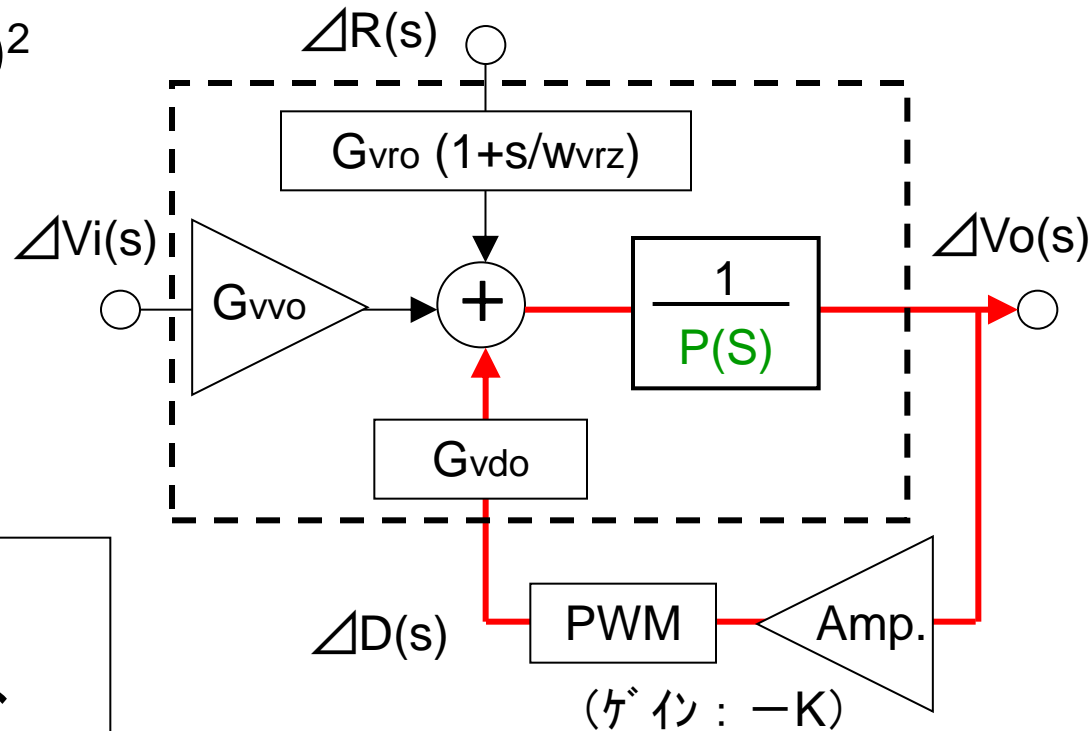
● 伝達関数: $V_r \Rightarrow V_o$

* 伝達関数:
$$G(s) = \frac{K \cdot G_{vdo}}{1 + K \cdot G_{vdo} \cdot P(s)} = \frac{K \cdot G_{vdo}}{(1 + K \cdot G_{vdo}) \cdot P'(s)} \quad (1-25)$$

ただし

$$P'(s) = 1 + 2\delta'(s/w'_n) + (s/w'_n)^2$$

$$\begin{cases} W'_n = W_o \sqrt{1 + KG_{vdo}} & (> W_o) \\ \delta' = \delta / \sqrt{1 + KG_{vdo}} & (< \delta) \end{cases} \quad (1-26)$$



【降圧形の場合】

>0 で理論的に安定だが、
その他の遅延で不安定になる

図1-15 降圧形電源のブロック図

アウトライン

1. スイッチング電源における自動制御

1-1 スイッチング電源の概要

1-2 スイッチング電源の伝達関数

1-3 シミュレーションによる伝達特性解析

2. 直流モータ駆動における自動制御

2-1 直流モータの概要

2-2 速度制御回路と伝達特性

2-3 位相制御回路と伝達特性

3. 位相補償と制御特性(シミュレーション検討)

3-1 位相進み補償と制御特性

3-2 位相遅れ補償と制御特性

1. スイッチング電源における自動制御

1-3 シミュレーションによる伝達特性解析

● 2次式の伝達特性

$$* G(s) = \frac{1}{1+2\delta(s/\omega_n)+(s/\omega_n)^2} = \frac{\omega_n^2}{s^2+2\delta\omega_n \cdot s+\omega_n^2} \quad (1-27)$$

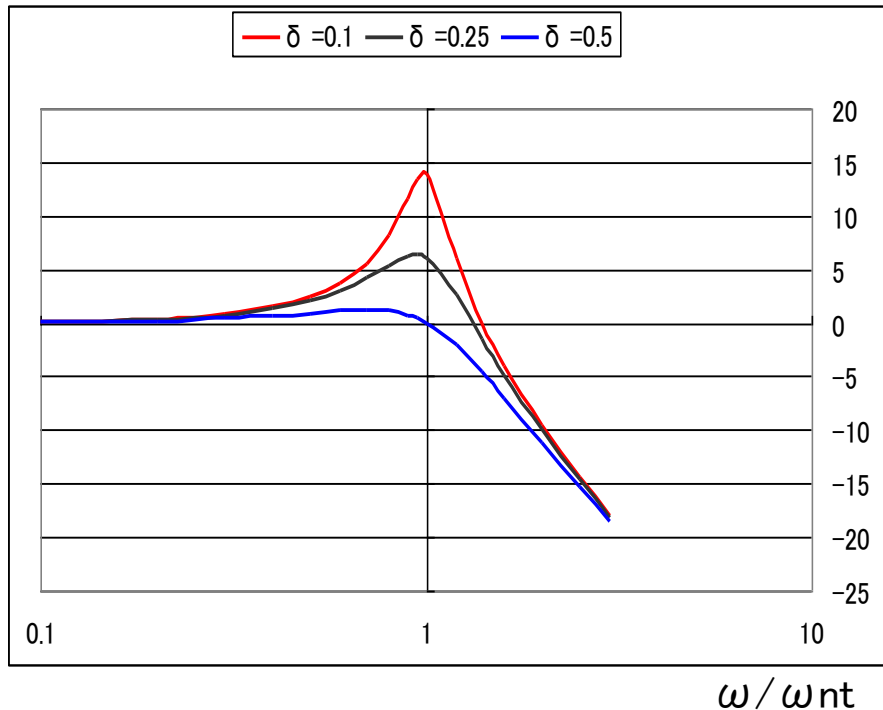


図1-16 周波数特性

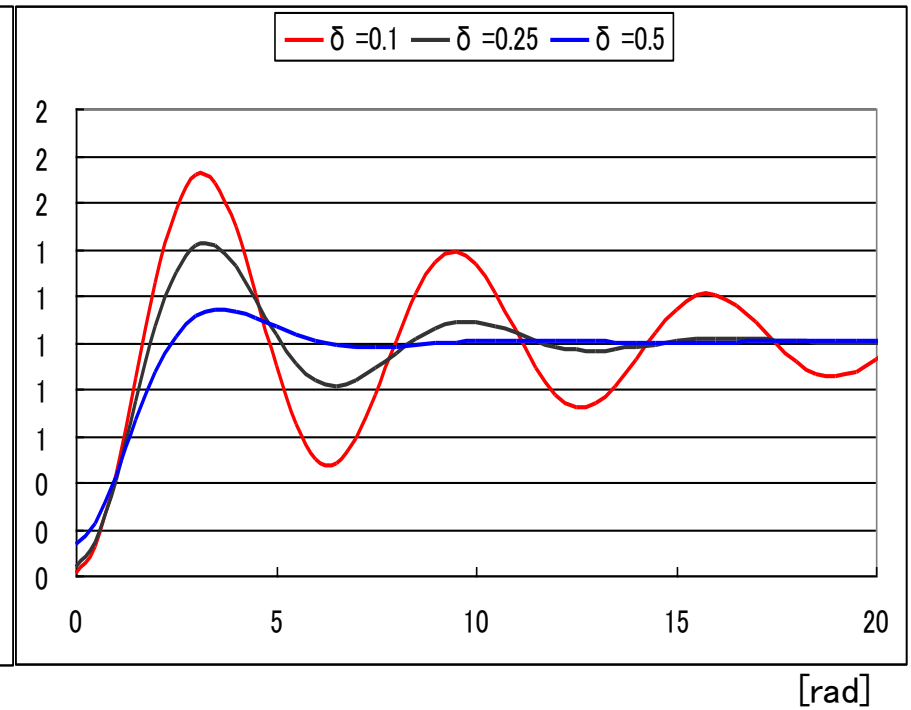


図1-17 ステップ応答

1. スイッチング電源における自動制御

● シミュレーションによる動作確認

1) 条件: $V_i=12V$, $V_o=5.0V$, $I_o=0.5 \leftrightarrow 1.0A$, $f_{ck}=200kHz$

$L=20\mu H$, $C=200\mu F$, $r_c=10m\Omega$

2) 結果: 出力リップル=0.5mVpp, 過度応答= $\pm 50mV$, オフセット=18mV

リップル $\Delta V_o = \frac{1}{C} \int I dt \propto k t^2$

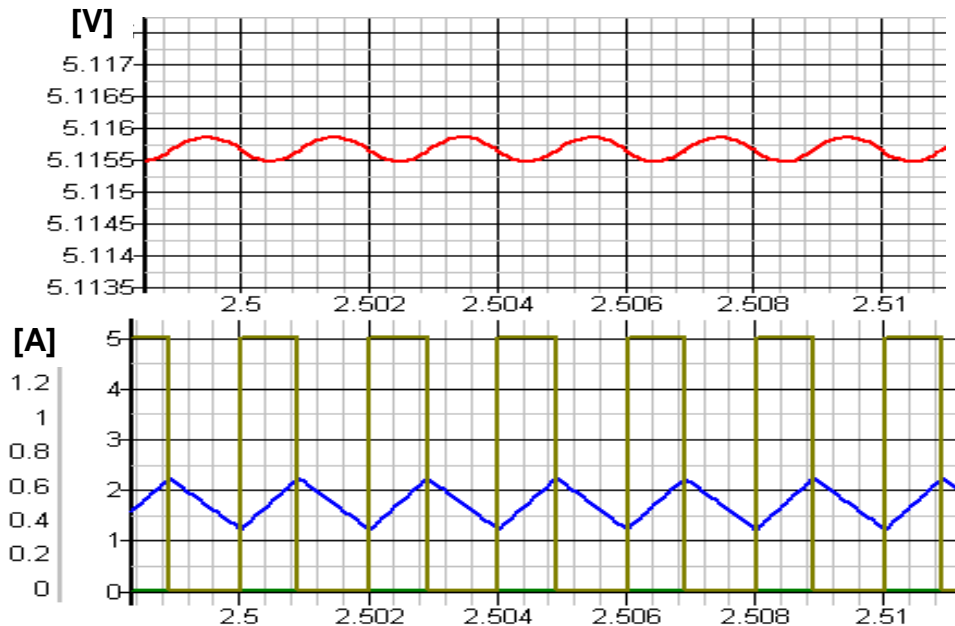


図1-18 定常特性(出力リップル、電流)

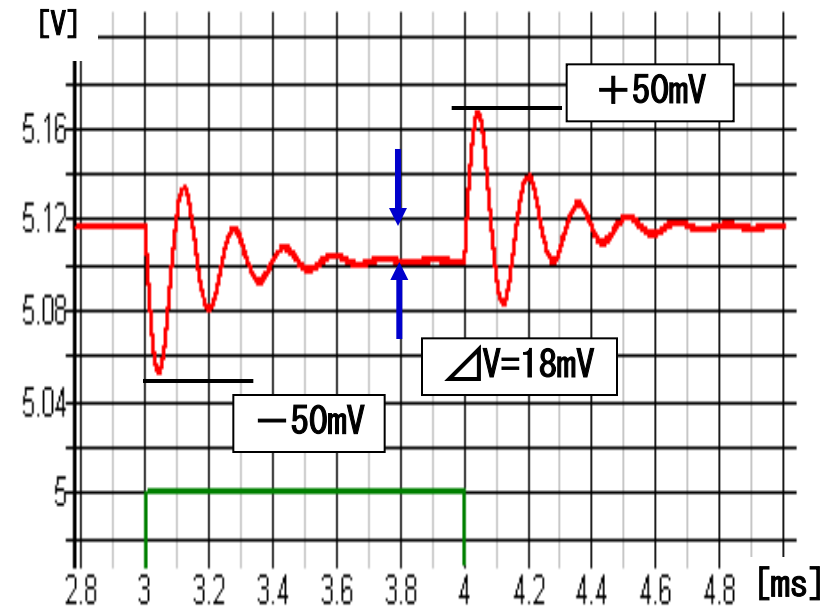


図1-19 過渡応答特性

1. スイッチング電源における自動制御

● シミュレーションによる伝達特性

1) 条件1: $L=20\mu\text{H}$, $C=200\mu\text{F}$, $r_c=10\text{m}\Omega$

2) 結果1: $f_p=2.5\text{kHz}$, $M_p=22\text{dB}$, $G(0)=16\text{dB}$, $f_c=7.5\text{kHz}$

位相余裕 $=25^\circ \Rightarrow$ 少ない

★ $f > 20\text{kHz}$ で位相進み

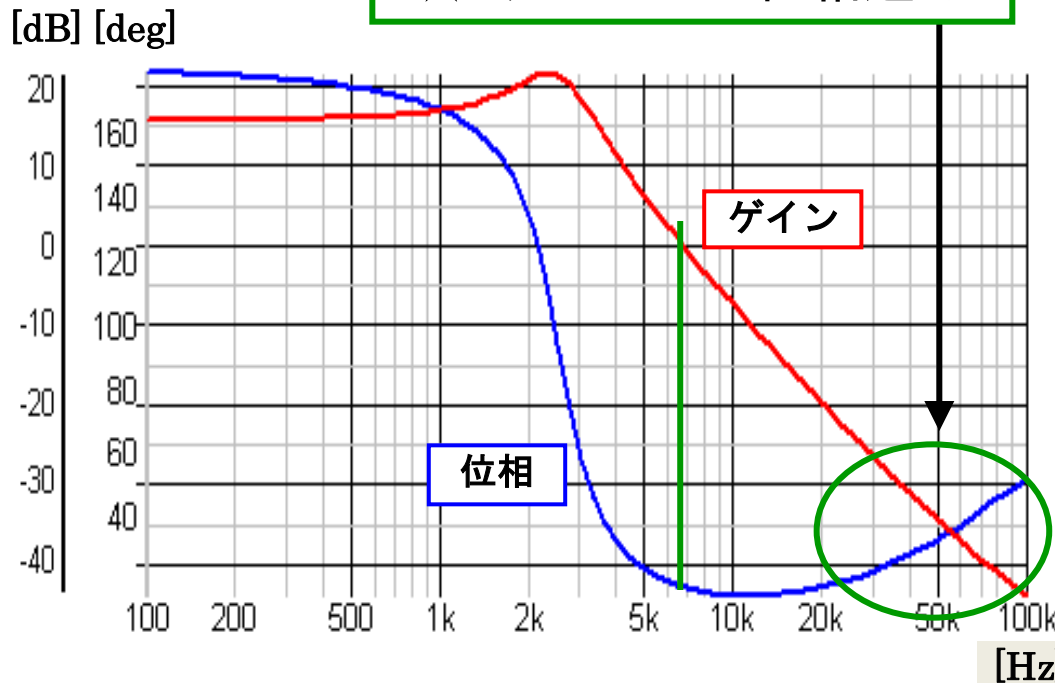


図1-20 周波数特性

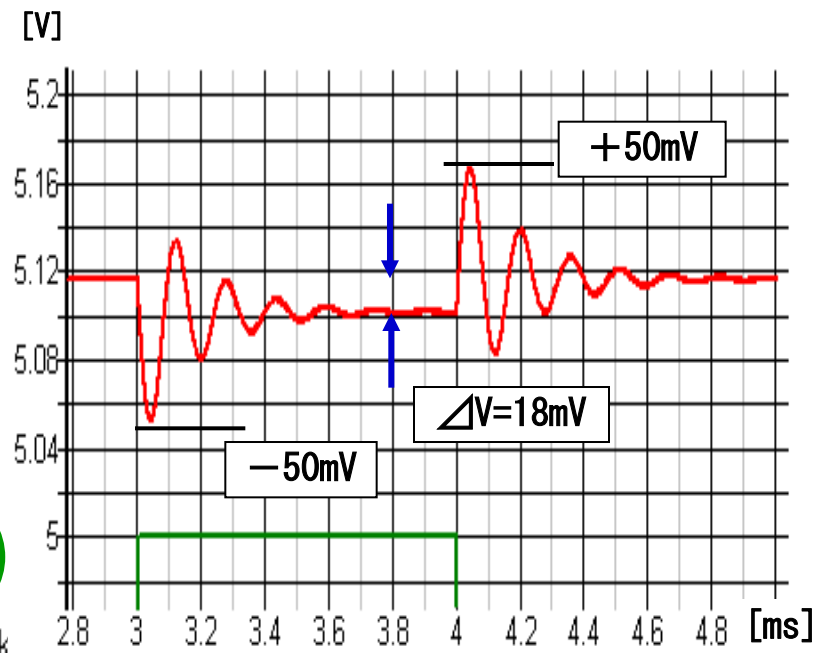


図1-21 過渡応答特性

1. スイッチング電源における自動制御

● シミュレーション回路

- 1) 応答特性測定回路
- 2) 伝達特性測定回路

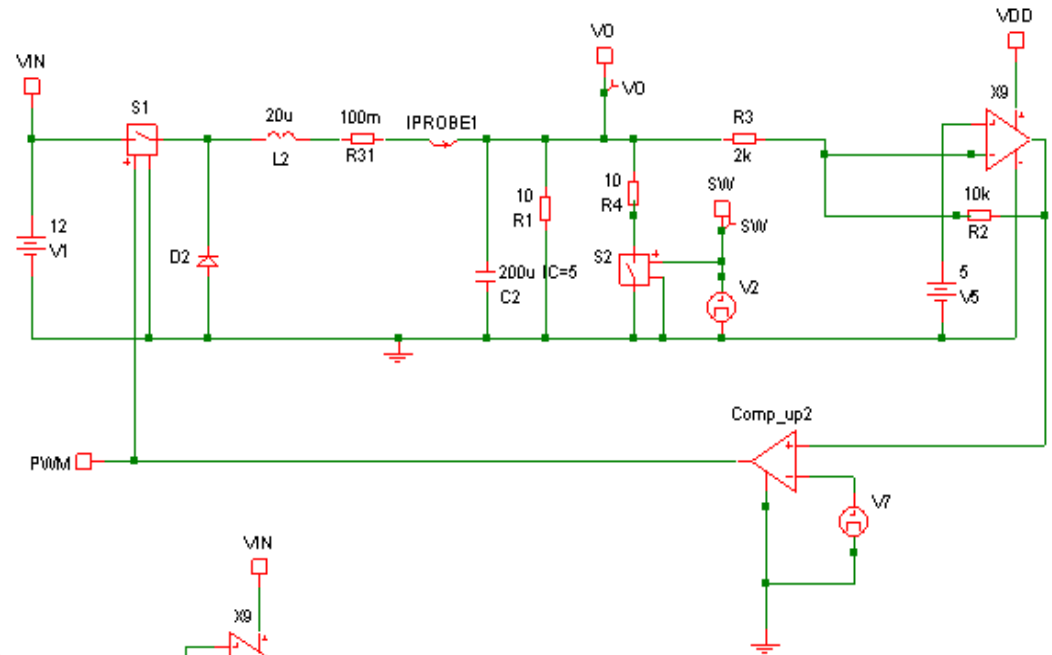


図1-23 応答特性測定回路

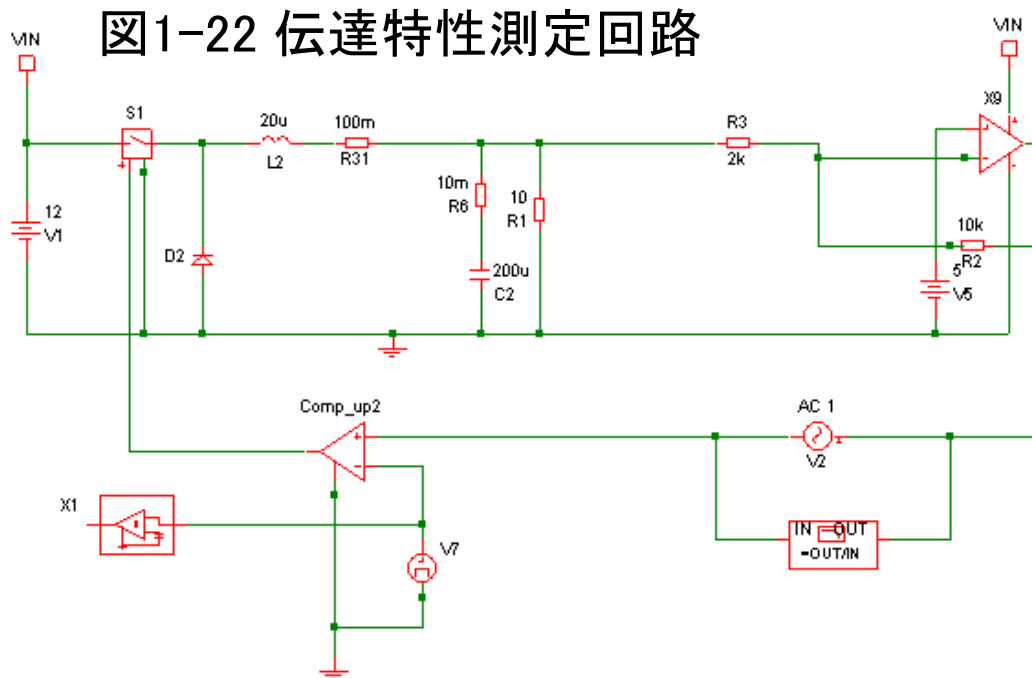


図1-22 伝達特性測定回路

1. スイッチング電源における自動制御

● 出力コンデンサのESRの影響

ESR: 等価直列抵抗
(Equivalent Serial Resistance)

1) 条件: $C=200\mu\text{F}$, $r_c=10\text{m}\Omega$

2) 伝達関数: ($R_o \gg r_L, r_c$ とする)

$$Z(s)=V_o/V_i=\frac{1+C r_c \cdot s}{1+\{C(r_L+r_c)+L/R\} \cdot s+L C \cdot s^2}=\frac{1+s/w_{\text{esr}}}{1+2 \delta (s/w_n)+(s/w_n)^2} \quad (1-28)$$

ただし $w_{\text{esr}}=1/(C r_c)$ 、 $w_n=1/\sqrt{L C}$ (1-29)

★ $f=1/2 \pi C r_c$ にゼロ点を持つ
(位相が 90° 進む)

★ただし、クロック周波数に近づくと
アンプの遅れ、サンプリングの影響で
再び 位相は遅れ始める

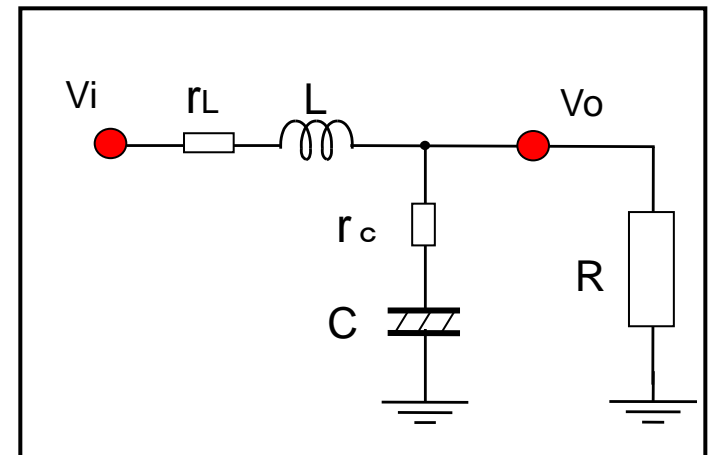


図1-24 ESRを含む等価回路

アウトライン

1. スイッチング電源における自動制御
 - 1-1 スイッチング電源の概要
 - 1-2 スイッチング電源の伝達関数
 - 1-3 シミュレーションによる伝達特性解析
2. 直流モータ駆動における自動制御
 - 2-1 直流モータの概要
 - 2-2 速度制御回路と伝達特性
 - 2-3 位相制御回路と伝達特性
3. 位相補償と制御特性(シミュレーション検討)
 - 3-1 位相進み補償と制御特性
 - 3-2 位相遅れ補償と制御特性

アウトライン

1. スイッチング電源における自動制御
 - 1-1 スイッチング電源の概要
 - 1-2 スイッチング電源の伝達関数
 - 1-3 シミュレーションによる伝達特性解析
2. 直流モータ駆動における自動制御
 - 2-1 直流モータの概要
 - 2-2 速度制御回路と伝達特性
 - 2-3 位相制御回路と伝達特性
3. 位相補償と制御特性(シミュレーション検討)
 - 3-1 位相進み補償と制御特性
 - 3-2 位相遅れ補償と制御特性

2. 直流モータ制御における自動制御

2-1 直流モータの概要 (三相ブラシレス・モータも含む)

●モータの等価回路

・モータ電流 (= 電機子電流):

$$I_a = (V_m - V_E) / Z_a \text{ [A]} : Z_a = R + j\omega L \doteq R \text{ (電機子抵抗)}$$

・発生トルク:

$$T = k_T \cdot I_a \text{ [Nm]} : k_T : \text{トルク定数 [Nm/A]}$$

・回転速度:

$$\Omega = \int T dt / J = T / j\omega J \text{ [rad/s]} : J : \text{慣性モーメント (イナーシャ) [kg \cdot m^2]}$$

・逆起電力:

$$V_E = k_E \cdot \Omega \text{ [V]} : k_E : \text{逆起電力定数 [V \cdot s/rad]}$$

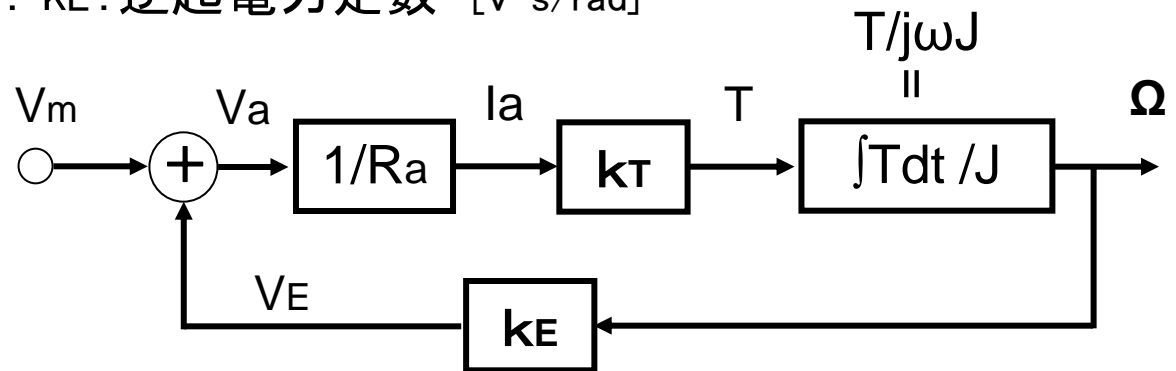


図2-1 直流モータの等価回路

2. 直流モータ制御における自動制御

2-1 直流モータの概要

● 伝達関数

$$\begin{aligned}
 G_M(j\omega) &= \Omega(j\omega) / V_m(j\omega) \\
 &= (k_T / j\omega J R) / \{1 + k_E k_T / j\omega J R\} \\
 &= \frac{k_T}{k_E k_T + j\omega J R} \\
 &= \frac{K_m}{1 + j\omega T_m} \quad (2-1)
 \end{aligned}$$

ただし $K_m = 1 / k_E$
 $T_m = J R / k_E k_T$ (2-2)
 : 機械的時定数

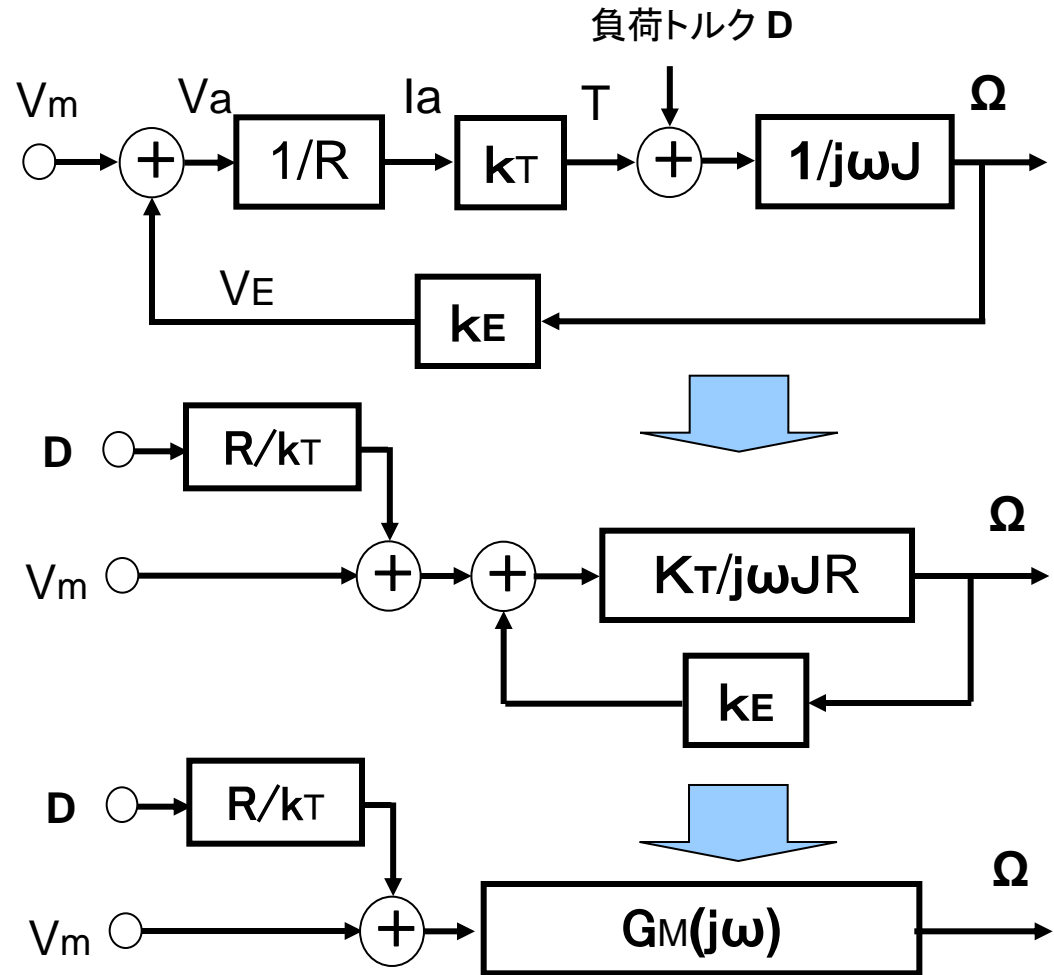


図2-2 直流モータの伝達関数

2. 直流モータ制御における自動制御

2-1 直流モータの概要

● 負荷特性

- * 電圧－電流－トルク－回転数 の特性
- * **τ - N 特性** : 傾きが小さい(水平な)ほど、
負荷に対して速度変動は少ない
- * **電流特性** : 傾き = $1 / \text{トルク定数}$

表2-1 モータ特性例

使用モータ: 6W モータ	
$R=2.4$	[Ω]
$k_E=0.0192$	[V/rad/s]
$k_T=0.115$	[Nm]
$J=4.9 \cdot 10^{-5}$	[kgm ²]
軸半径: 0.4 cm	

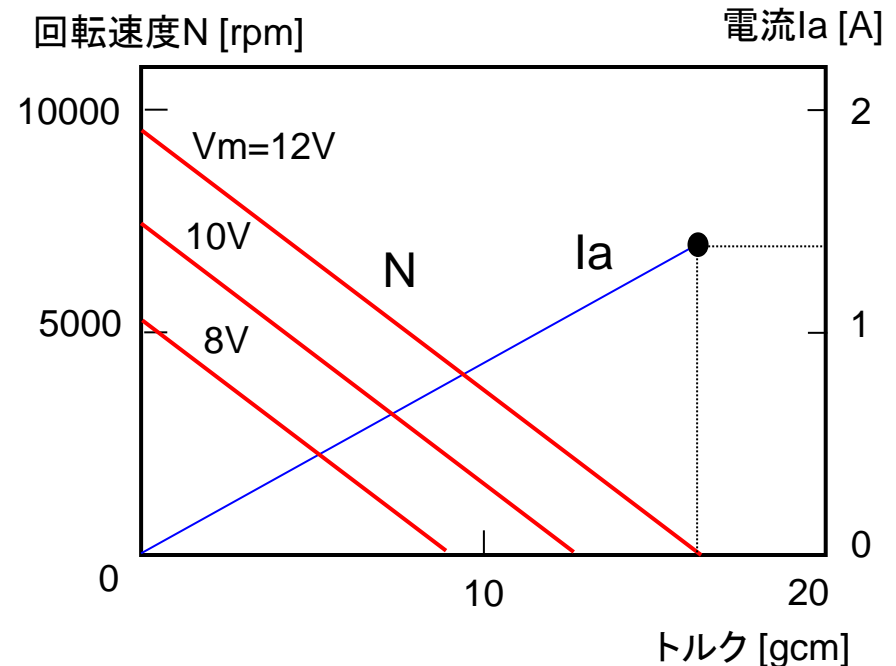


図2-3 負荷特性 (τ - N 特性) 27

2. 直流モータ制御における自動制御

2-1 直流モータの概要

● 負荷特性と効率

* 効率 η [%] : 低電流領域でピーク

* 最大出力 $\doteq N_{\max} / 2$

- * 銅損:
巻線抵抗による損失
- * 鉄損:
磁気ヒステリシス損
渦電流損失
- * 風損: 回転風による抵抗
- * その他: 回転摩擦など

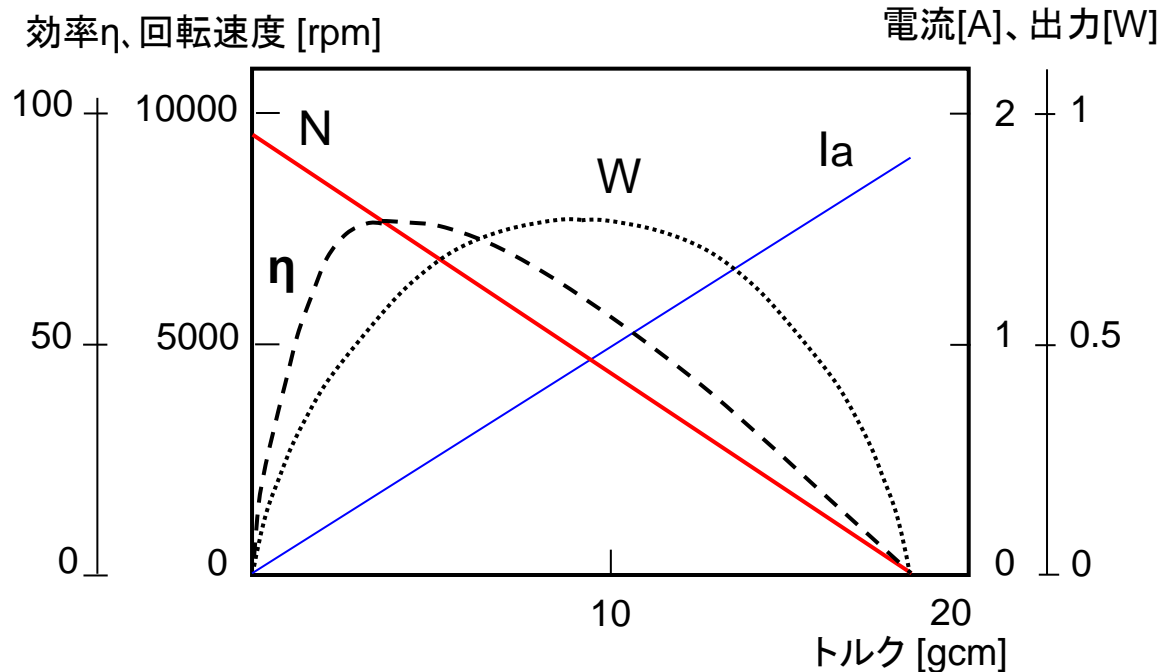


図2-4 負荷特性 (τ - N 特性)

アウトライン

1. スイッチング電源における自動制御
 - 1-1 スイッチング電源の概要
 - 1-2 スイッチング電源の伝達関数
 - 1-3 シミュレーションによる伝達特性解析
2. 直流モータ駆動における自動制御
 - 2-1 直流モータの概要
 - 2-2 速度制御回路と伝達特性
 - 2-3 位相制御回路と伝達特性
3. 位相補償と制御特性(シミュレーション検討)
 - 3-1 位相進み補償と制御特性
 - 3-2 位相遅れ補償と制御特性

2. 直流モータ制御における自動制御

2-2 速度制御回路と伝達関数

● 伝達関数

$$G_M(j\omega) = \frac{k_m}{1+j\omega T_m}$$

$$\begin{aligned} G'_M(j\omega) &= \frac{K_F G_M}{1+K_F G_M} = \frac{K_m}{(1+K_F k_m)+j\omega T_m} \\ &= \frac{K_F k_m}{1+K_F k_m} \cdot \frac{1}{1+j\omega T'_m} \doteq \frac{1}{1+j\omega T'_m} \quad (\because K_F k_m \gg 1) \quad (2-3) \end{aligned}$$

ただし $T'_m = T_m / (1 + K_F k_m)$
 $\doteq T_m / K_F k_m < T_m \quad (2-4)$

ゲイン K_F を上げれば、 T'_m は小さくなり、
 折点周波数は高く、応答速度は速くなる

- F/V変換器 (ディスクリミネータ)
 周波数に比例した電圧を出力: K_F [V/rad/s]

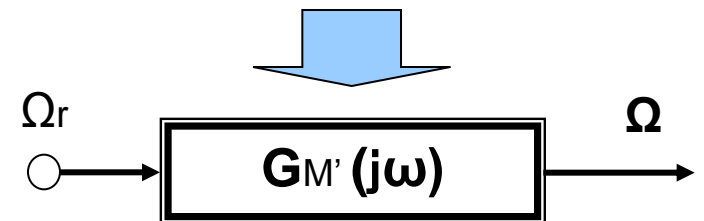
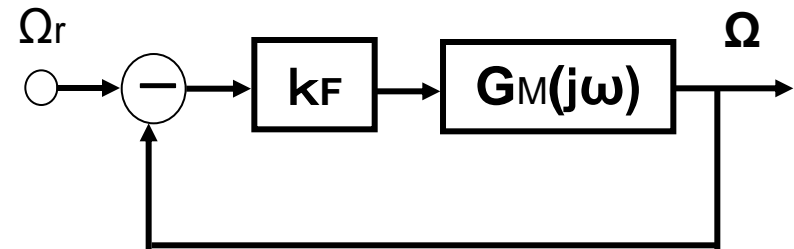


図2-5 速度制御の伝達特性

2. 直流モータ制御における自動制御

2-2 速度制御回路と伝達関数

● ボード線図

* モータ特性: LPF特性

折点周波数: $F_c = 1 / (2\pi T_m)$

* 速度制御特性(開ループ特性)

$$\cdot G'_o(j\omega) = K_F \cdot G_M(j\omega) = \frac{K_F K_m}{1 + j\omega T_m} \quad (2-5)$$

: DCゲイン アップ

* 伝達特性(閉ループ特性)

$$\cdot G'_M(j\omega) = \frac{1}{1 + j\omega T'_m} \quad (2-6)$$

ただし $T'_m \doteq T_m / K_F K_m (< T_m)$

★ 折点周波数は、 $K_F K_m$ 倍に高まる

$$G_M(j\omega) = \frac{K_m}{1 + j\omega T_m}$$

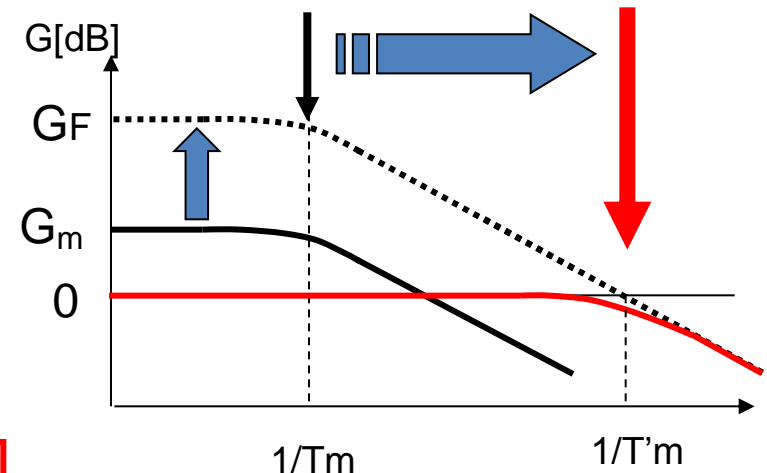


図2-6 速度制御のボード線図

2. 直流モータ制御における自動制御

2-2 速度制御回路と伝達関数

● 直流負荷特性 (τ -N特性)

* 負荷に対する伝達特性

$$\Omega / D(j0) = (R/K_T)K_m$$

$$\Rightarrow (R/K_T)K_m' / K_F = (R/K_T)/K_F$$

ゲイン K_F を上げれば、
負荷変動に対して
速度変化は小さくなる

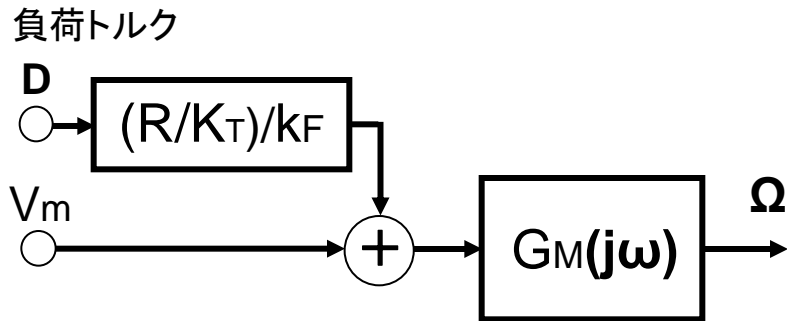


図2-7 負荷変動に対する伝達特性

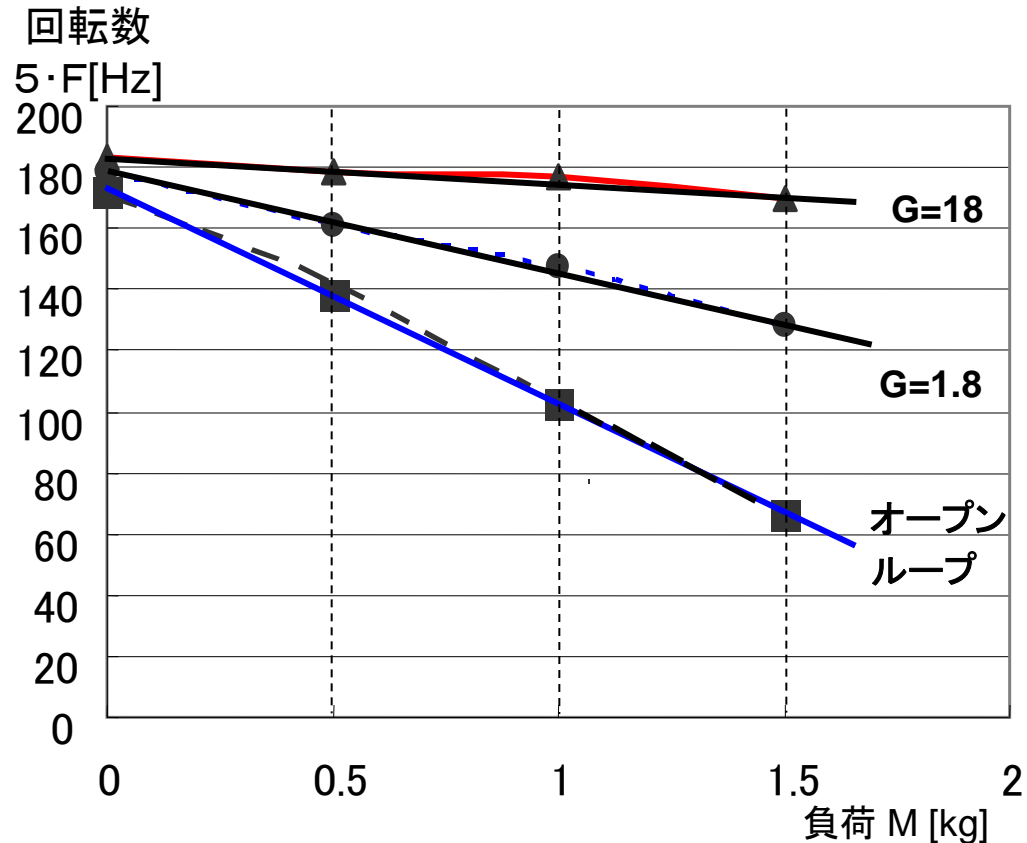


図2-8 負荷変動に対する速度変化

2. 直流モータ制御における自動制御

2-2 速度制御回路と伝達関数

● 速度センサの種類

- * 速度発電器 : 回転速度に比例した電圧を発生 : 高価
- * 周波数発電器 : 回転速度に比例した周波数を発生

● 周波数発電型速度センサの分類

- * エンコーダ型 : 非積分型 (1点検出) : 低価格、高精度必要
- * 速度発電型 : 積分型 (多数コイル) : 高価、積分効果による精度向上

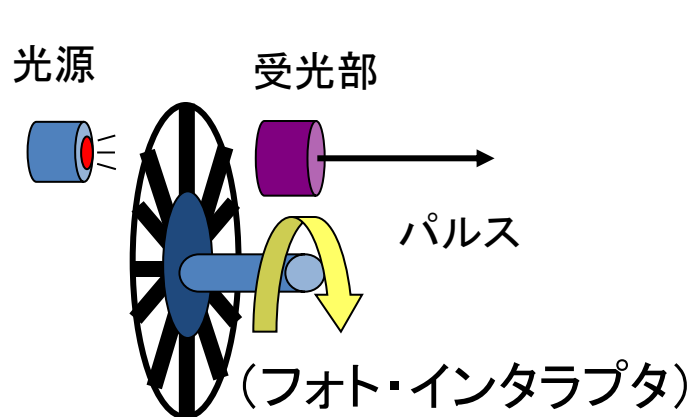


図2-9 (A) エンコーダ型
(光スリット方式)

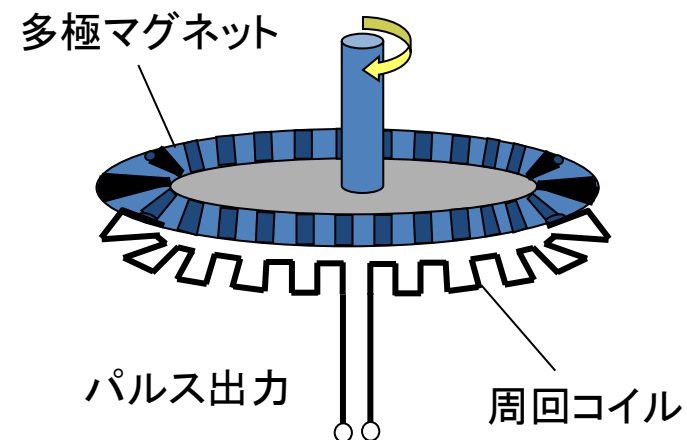


図2-9 (B) 積分型
(多極マグネット-コイル方式)

2. 直流モータ制御における自動制御

2-2 速度制御回路と伝達関数

●F/V変換方式:

(1) パルス幅変換+LPF

原理: 検出パルス=入力パルスT-固定パルス T_0

LPFにより直流電圧 V_d を検出 $V_d = V_{cc} \cdot T_0 / T = F \cdot (E \cdot T_0)$ (2-7)

特性: 線形特性 ただし、 $T < T_0$ では折返し発生

電氣的制限回路が必要・・・ $F_0 = 1/T_0$ で速度リミット

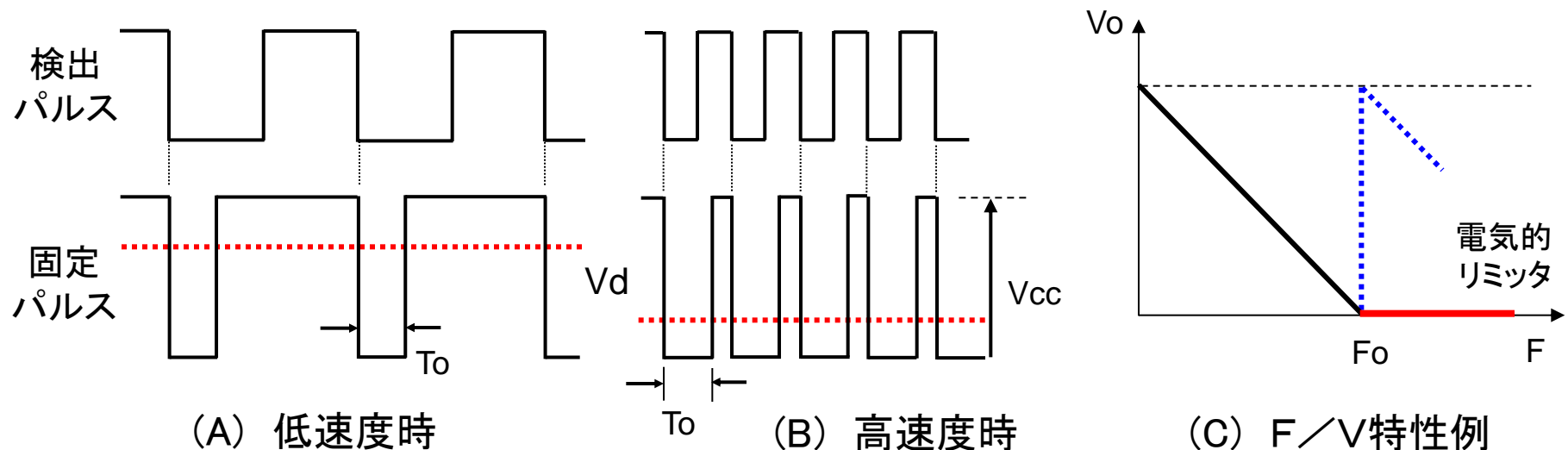


図2-10 F/V変換方式(1)の概要

2. 直流モータ制御における自動制御

● F/V変換方式:

(2) ランプ信号+ピーク検出

原理: 周期毎のランプ信号+ピーク検出: サンプル/ホールド(S/H)方式
片エッジで、S/H後、リセット・スタート

特性: 回路は複雑だが、折返し弊害はない
遅延+ランプ信号 による高ゲイン化も可能

出力電圧: $V_o = k_r \cdot T = k_r / F$

k_r : ランプ信号の傾き [V/ms] (2-8)

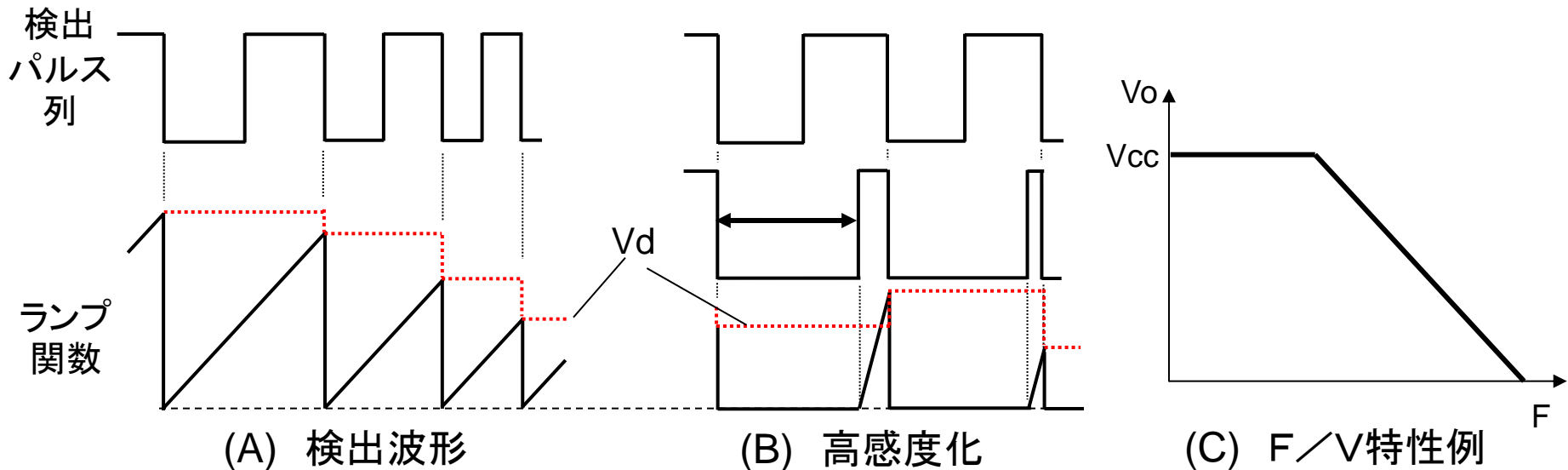
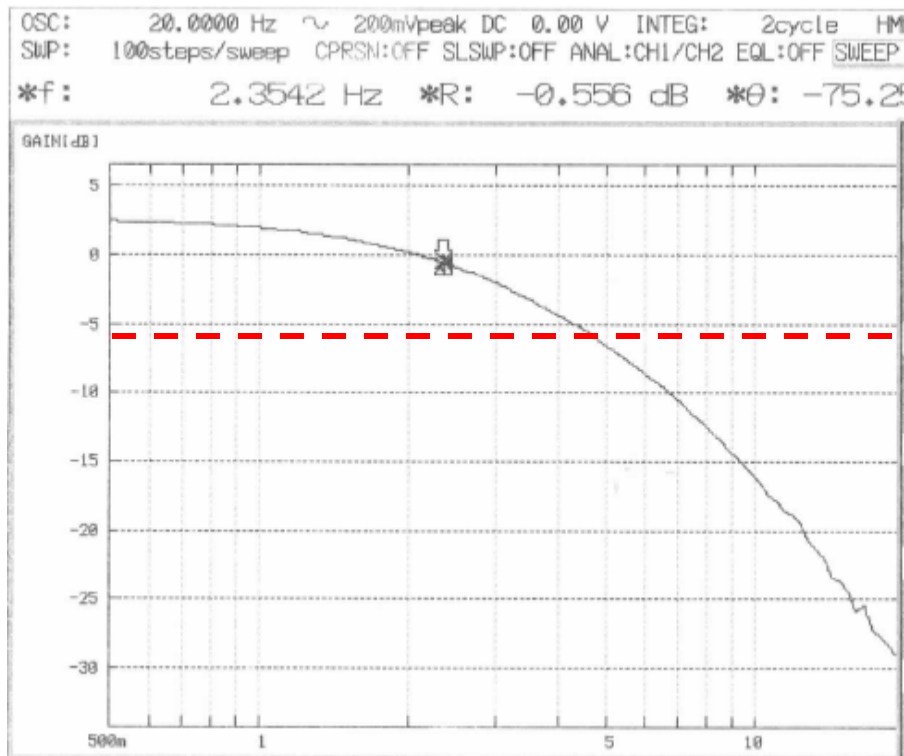


図2-11 F/V変換方式(2)の概要

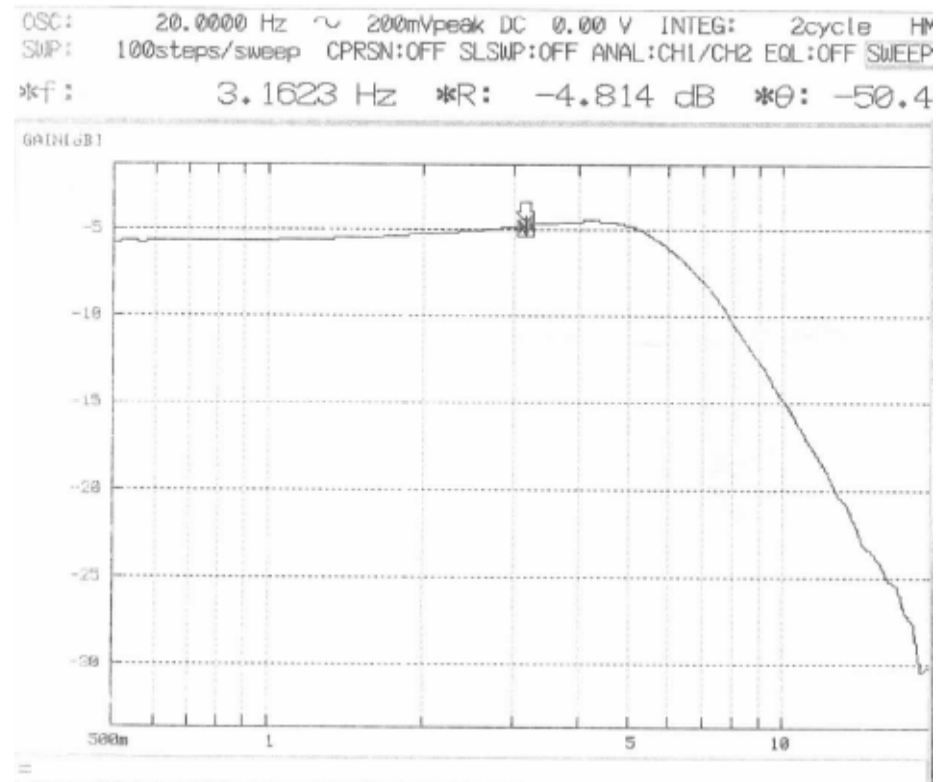
2. 直流モータ制御における自動制御

● 周波数特性の実測

開ループ特性 ⇔ 閉ループ特性 (自動変換)



(A) 開ループ特性: $F_c=2.4\text{Hz}$



(B) 閉ループ特性: $F_c=7.8\text{Hz}$

図2-12 伝達関数の実測例

アウトライン

1. スイッチング電源における自動制御
 - 1-1 スイッチング電源の概要
 - 1-2 スイッチング電源の伝達関数
 - 1-3 シミュレーションによる伝達特性解析
2. 直流モータ駆動における自動制御
 - 2-1 直流モータの概要
 - 2-2 速度制御回路と伝達特性
 - 2-3 位相制御回路と伝達特性
3. 位相補償と制御特性(シミュレーション検討)
 - 3-1 位相進み補償と制御特性
 - 3-2 位相遅れ補償と制御特性

2. 直流モータ制御における自動制御

2-3 位相制御回路と伝達関数

$$G_M(s) = \frac{k_m}{1+sT_m}$$

● 伝達関数 (ラプラス変換で検討)

* 速度と位相の関係: $\omega(t) = \frac{d}{dt}\theta(t)$ より $\Omega(s) = s\Theta(s)$

$$G'_M(j\omega) = \frac{K_F G_M/s}{1 + K_P G_M/s} = \frac{K_P K_m}{T_m s^2 + s + K_P K_m} = \frac{(k_P k_m / T_m)}{s^2 + (1/T_m)s + (k_P k_m / T_m)} \quad (2-9)$$

$$= \frac{(\omega_n)^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + (\omega_n)^2} \quad (2-10)$$

ただし

$$\begin{cases} \omega_n = \sqrt{k_P k_m / T_m} & \dots \text{固有周波数} \\ \zeta = \frac{1}{2\sqrt{k_P k_m T_m}} & \dots \text{減衰係数} \end{cases}$$

$$(2-11)$$

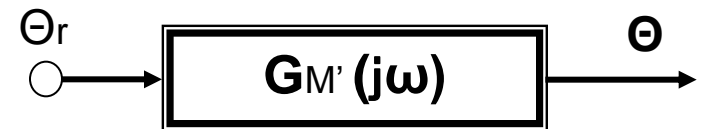
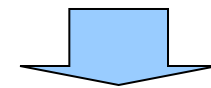
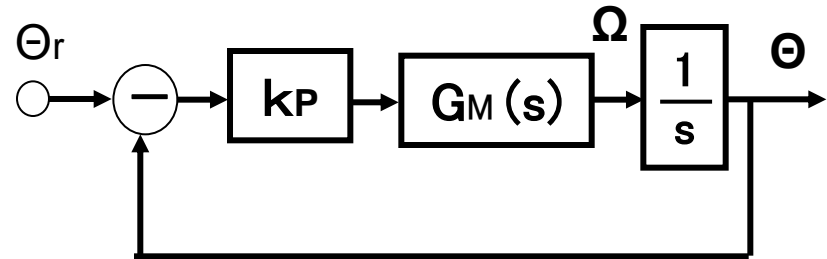


図2-13 位相制御の伝達関数 38

2. 直流モータ制御における自動制御

2-3 位相制御回路と伝達関数

● (速度制御+位相制御)の伝達関数

* [速度制御ループによるモータ特性改善]+位相制御 と考える
(フィードバック補償 と呼ぶこともある)

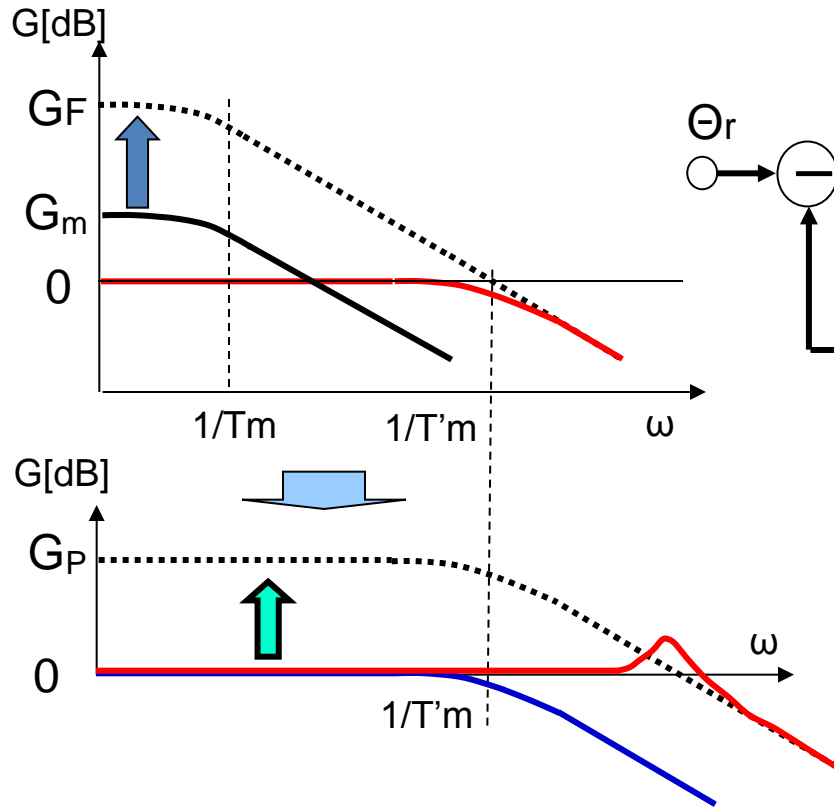


図2-14 速度+位相制御のボード線図

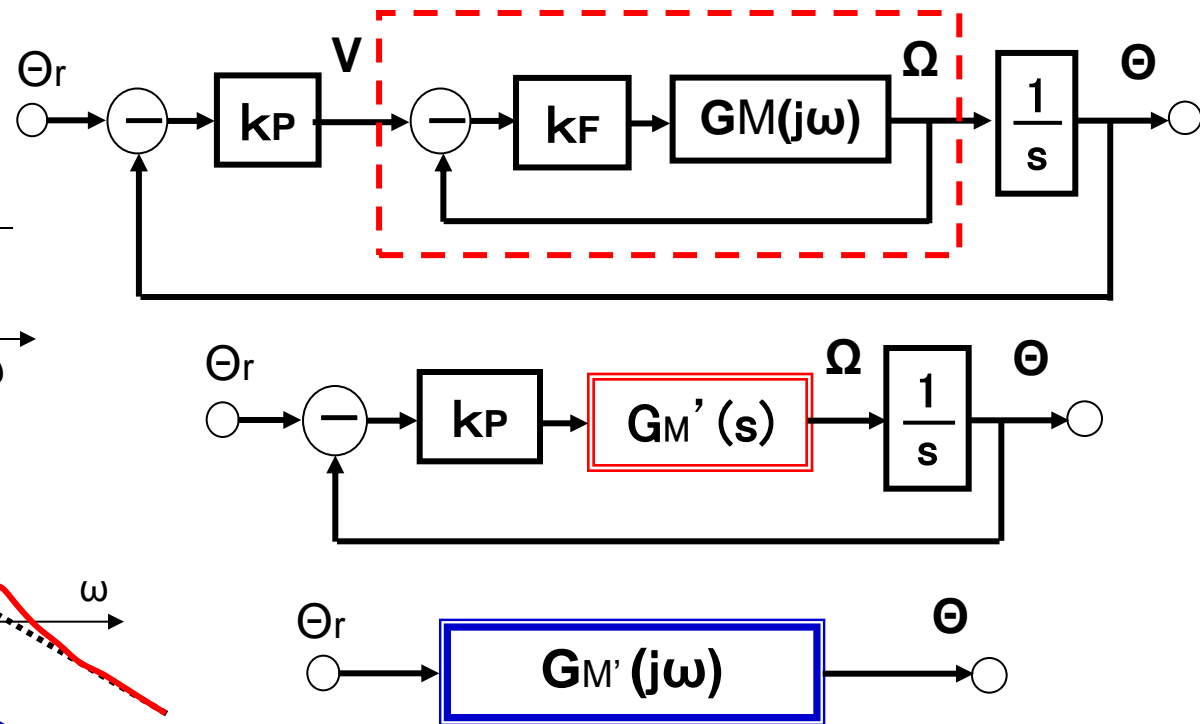


図2-15 速度+位相制御の伝達関数 39

2. 直流モータ制御における自動制御

2-3 位相制御回路と伝達関数

● 位相比較器(高利得回路)

(1) 位相比較(サンプリング・ホールド方式)

* 基準信号 : 台形波信号

* フィードバック信号: サンプリング信号

● 台形波発生回路(Trapezoid):

(1) 電流源+積分器: IC化に適する

1ピン: 積分用コンデンサ

(2) ブート・ストラップ回路: ディスクリート回路に好適

フィードバック用コンデンサ: 大きめに
(電源用ブートストラップと原理は同じ)

★ デューティは ほぼ50% に設定
⇒ キャプチャー・レンジ性能に影響

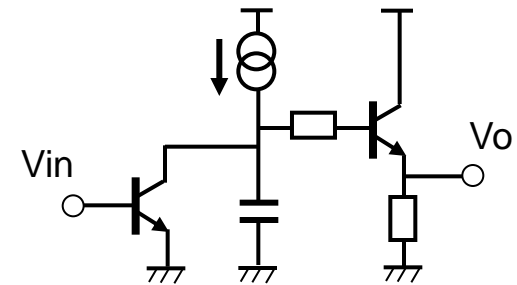


図2-16 台形波発生回路

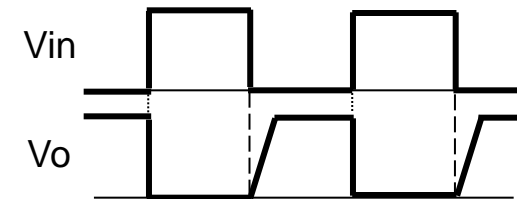


図2-17 各部信号波形

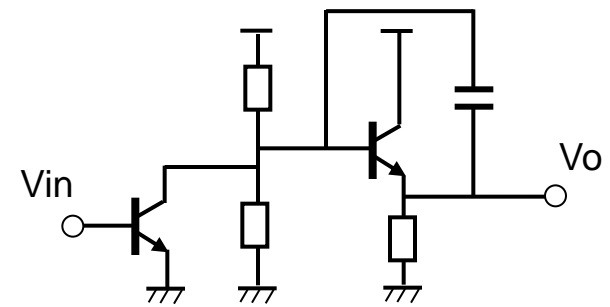


図2-18 ブートストラップ回路

2. 直流モータ制御における自動制御

2-3 位相制御回路と伝達関数

● 制御特性

(1) キャプチャレンジ(ロックイン・レンジ)

- * 目標周波数からずれた基準信号に対して、どれだけの差分まで引き込めるかの指標
(基準信号のずれに対する引き込み能力)
- * 伝達特性の周波数範囲、ダイナミックレンジ、台形波バランス等に依存

$$R_c = \frac{\pm \Delta f}{f_0} \times 100 = \pm 2 [\%] \quad (2-12)$$

(2) ロックレンジ

- * 一旦、ロックインした状態から、基準周波数がどこまでずれてもロックしているかの指標
(基準信号のゆれに対する耐性)
- * 主に回路のダイナミックレンジに依存

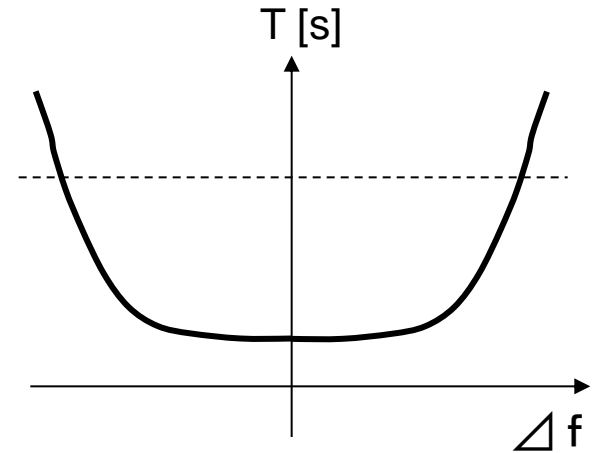


図2-19 キャプチャレンジ測定例

アウトライン

1. スイッチング電源における自動制御
 - 1-1 スイッチング電源の概要
 - 1-2 スイッチング電源の伝達関数
 - 1-3 シミュレーションによる伝達特性解析
2. 直流モータ駆動における自動制御
 - 2-1 直流モータの概要
 - 2-2 速度制御回路と伝達特性
 - 2-3 位相制御回路と伝達特性
3. 位相補償と制御特性(シミュレーション検討)
 - 3-1 位相進み補償と制御特性
 - 3-2 位相遅れ補償と制御特性

アウトライン

1. スイッチング電源における自動制御
 - 1-1 スイッチング電源の概要
 - 1-2 スイッチング電源の伝達関数
 - 1-3 シミュレーションによる伝達特性解析
2. 直流モータ駆動における自動制御
 - 2-1 直流モータの概要
 - 2-2 速度制御回路と伝達特性
 - 2-3 位相制御回路と伝達特性
3. 位相補償と制御特性(シミュレーション検討)
 - 3-1 位相進み補償と制御特性
 - 3-2 位相遅れ補償と制御特性

3. 位相補償と制御特性(シミュレーション検討)

● 位相進み補償と制御特性 (f_p を下げないで安定化)

* 位相進み補償回路 ($0 < \alpha < 1$)

$$G(s) = A \cdot \frac{1 + T_o \cdot s}{1 + \alpha T_o \cdot s} \quad \theta = \sin^{-1} \frac{1 - \alpha}{1 + \alpha} = \tan^{-1} \frac{1 - \alpha}{2\sqrt{\alpha}} \quad (3-1)$$

・ $\alpha = 0.1$ のとき $\theta = 55^\circ$

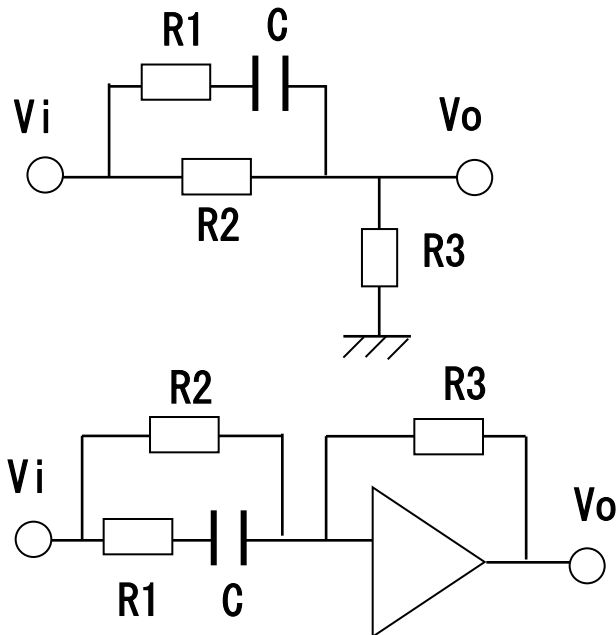


図3-1 位相進み補償回路

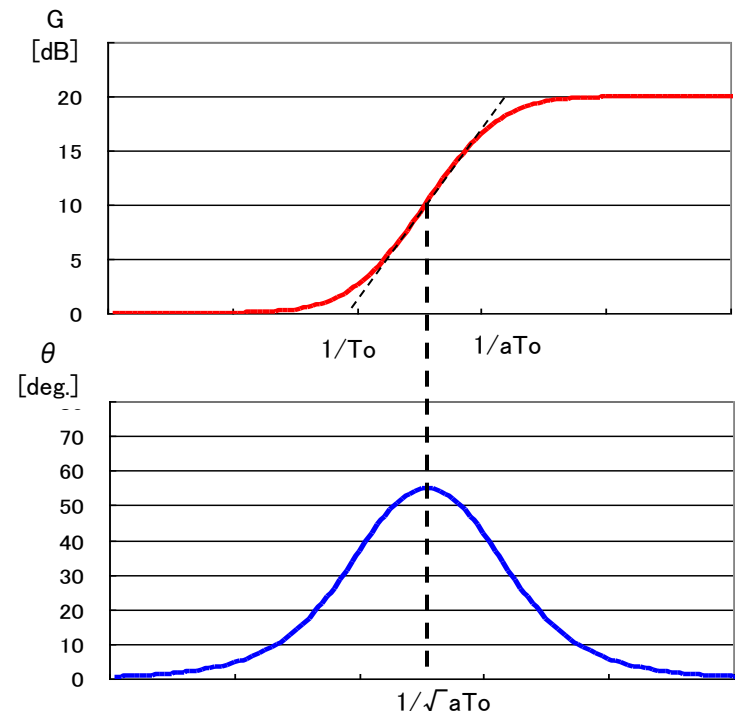


図3-2 進み補償の伝達関数

3. 位相補償と制御特性

● シミュレーション結果(位相進み補償)

* 位相進み補償回路

$$G(s) = A \cdot \frac{1 + T_o \cdot s}{1 + \alpha T_o \cdot s}$$

時定数調整: $T_o = CR = 2.0 \text{ us}$, $\alpha = 0.1$

DCゲインアップ: $A = 50k \leftarrow 10k$

整定時間、減衰係数の改善
オフセット改善: $6\text{mV} \leftarrow 18\text{mV}$

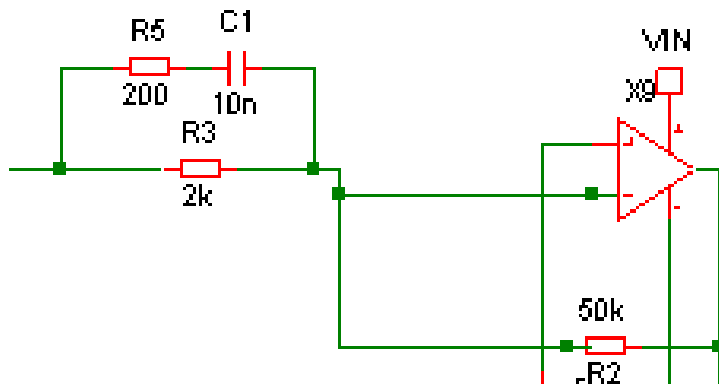


図3-3 位相進み補償回路

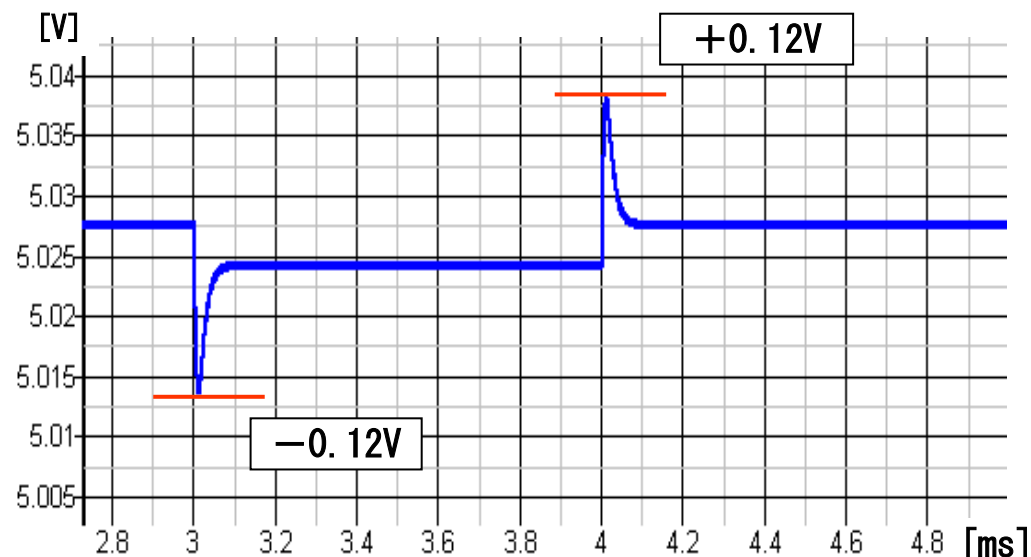


図3-4 過渡応答特性(進み補償)

3. 位相補償と制御特性

● シミュレーション結果(位相進み補償)

* 位相進み補償回路

DCゲインアップ: 5倍 \Rightarrow +14dB
位相余裕 \doteq 70° ($+45^\circ$)

$f_c=24\text{kHz}$
ゲイン: +14dBアップ

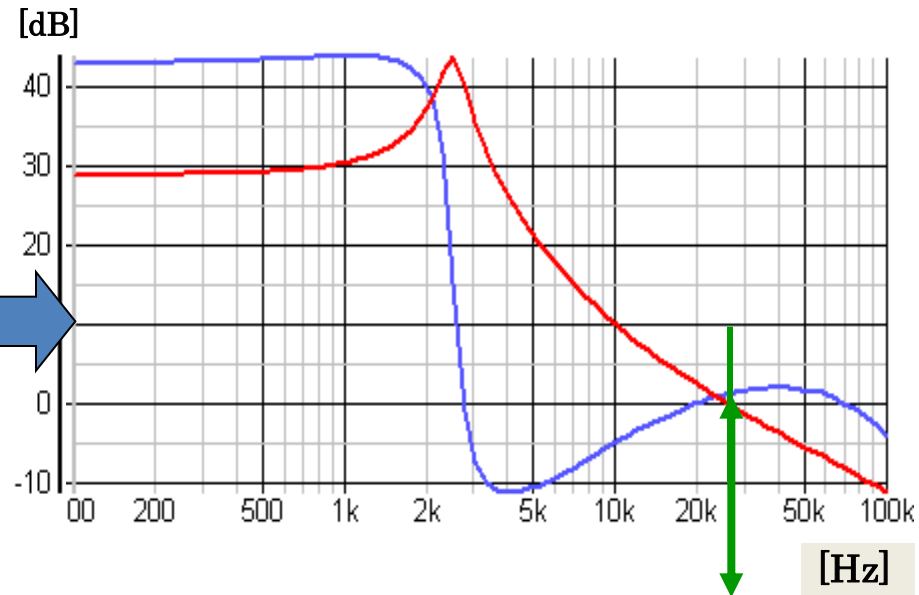
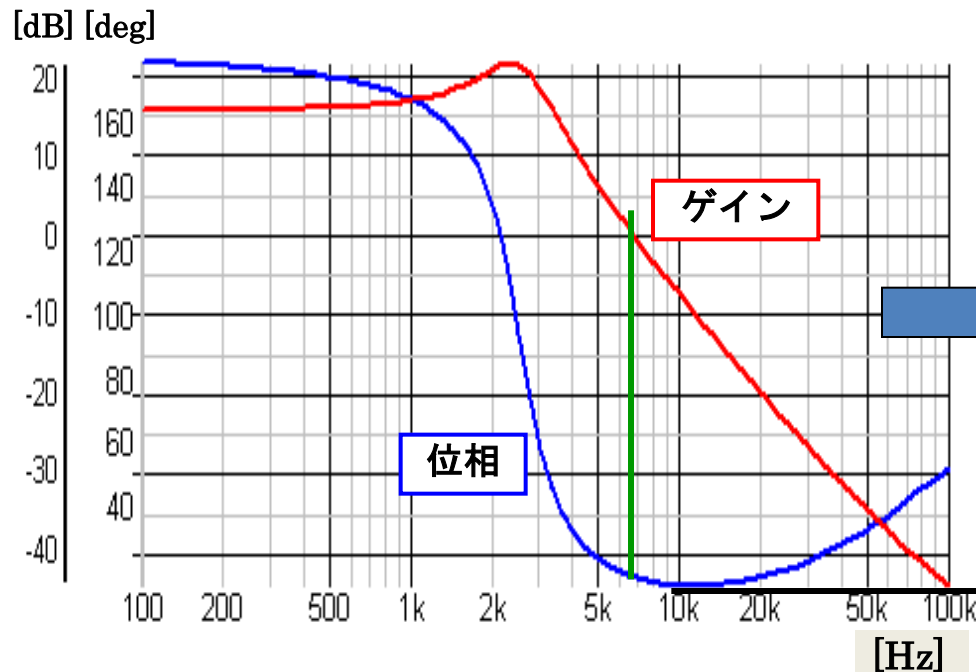


図3-5 [再掲]周波数特性(補償無)

図3-6 周波数特性(進み補償)

3. 位相補償と制御特性

● 位相遅れ補償による特性改善（オフセット改善）

* 位相遅れ補償回路(1) ($\alpha > 1$)

$$G(s) = A \cdot \frac{1 + T_o \cdot s}{1 + \alpha T_o \cdot s} \quad \theta : \text{位相進み補償と同様} \quad (3-2)$$

・ $\alpha = 10$ のとき $\theta = 55^\circ$

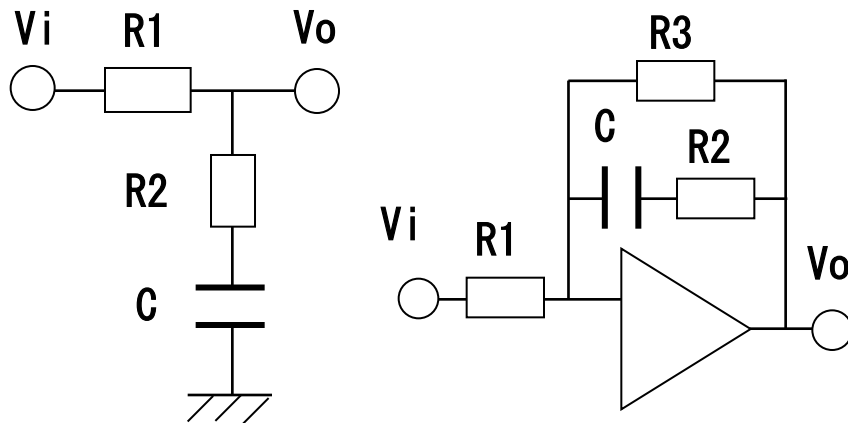


図3-7 位相遅れ補償回路

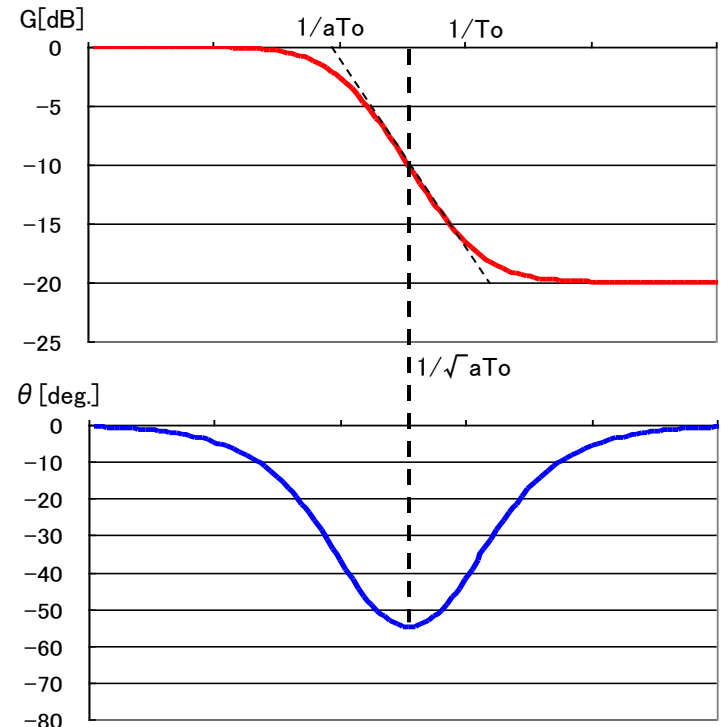


図3-8 遅れ補償の伝達関数

アウトライン

1. スイッチング電源における自動制御
 - 1-1 スイッチング電源の概要
 - 1-2 スイッチング電源の伝達関数
 - 1-3 シミュレーションによる伝達特性解析
2. 直流モータ駆動における自動制御
 - 2-1 直流モータの概要
 - 2-2 速度制御回路と伝達特性
 - 2-3 位相制御回路と伝達特性
3. 位相補償と制御特性(シミュレーション検討)
 - 3-1 位相進み補償と制御特性
 - 3-2 位相遅れ補償と制御特性

3. 位相補償と制御特性

● 位相遅れ補償による特性改善（オフセット改善）

* 位相遅れ補償回路(2)

$$G(s) = \frac{1 + T_o \cdot s}{T_o \cdot s} \quad \theta = -90 + \tan^{-1} \omega T_o \quad (3-3)$$

* $G(0) = \text{無限大} \Rightarrow \text{オフセット解除}$

* T_o : 安定性、 M_p に影響しない程度に小さくする

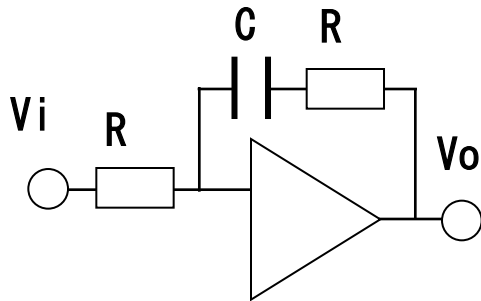


図3-9 位相遅れ補償回路(2)

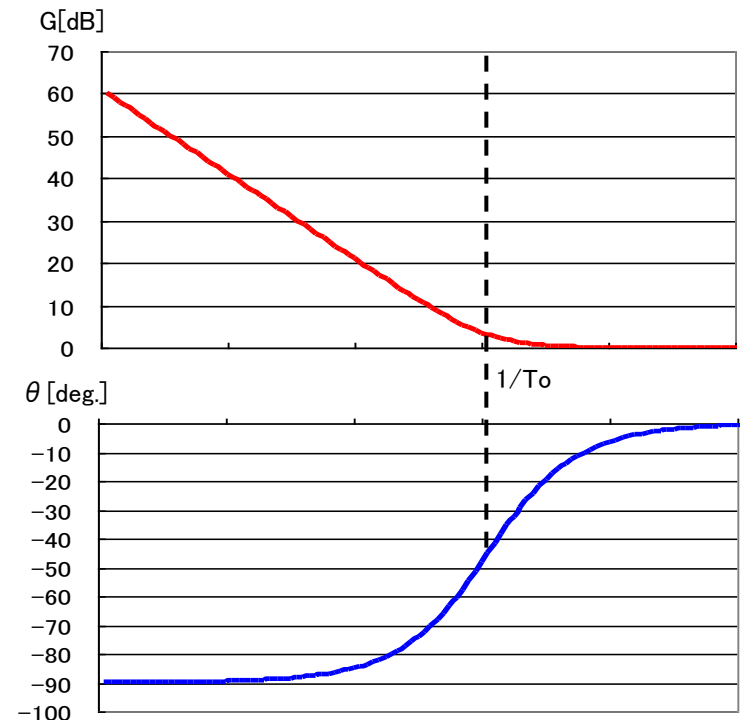


図3-10 遅れ補償の伝達関数 49

3. 位相補償と制御特性

- シミュレーション結果(位相遅れ補償+位相進み補償)
 - * +位相遅れ補償回路1

時定数変化: $T_o=CR=5.0\sim 25\text{ ms}$, $\alpha=10$
DCゲイン: $A=250\sim 25$

$$G(s)=A \cdot \frac{1+T_o \cdot s}{1+\alpha T_o \cdot s} \quad (3-4)$$

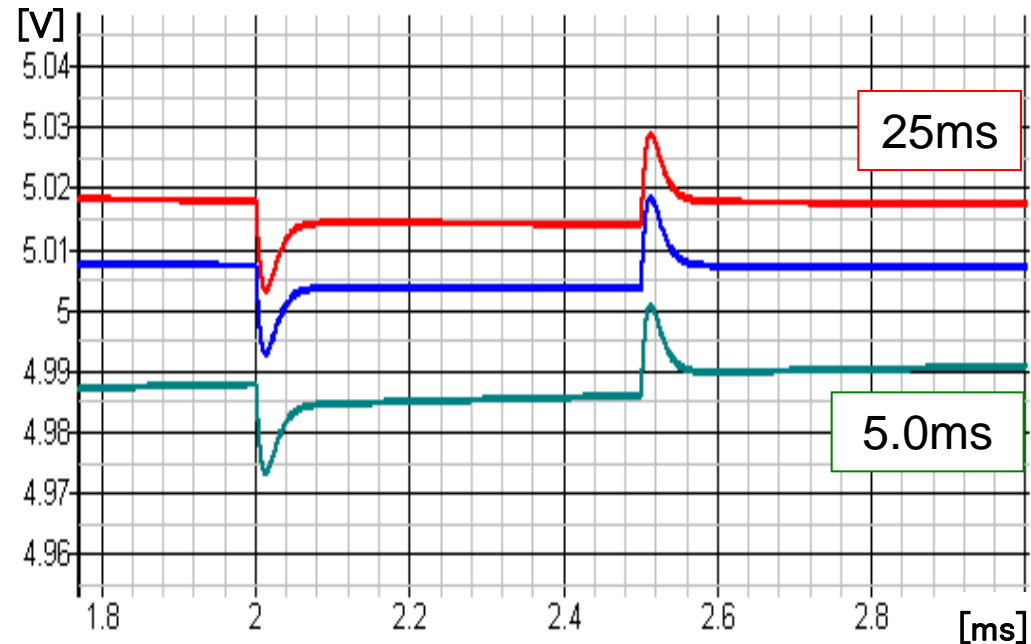
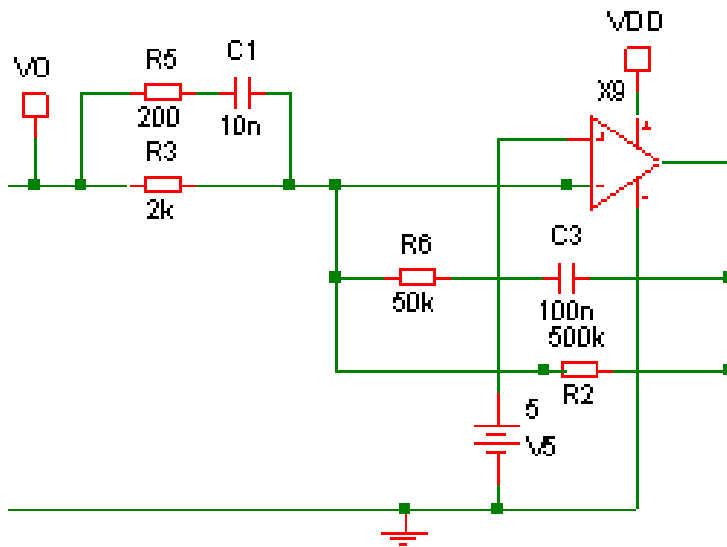


図3-11 位相遅れ補償回路1

図3-12 過渡応答特性(遅れ補償1)

3. 位相補償と制御特性

● シミュレーション結果(位相遅れ補償+位相進み補償)

* +位相遅れ補償回路1

- ・時定数: $T_o=CR=$ (1)5.0 ms, (2)11 ms, (3)25 ms
- ・時定数は、安定範囲で小さいほうが望ましい

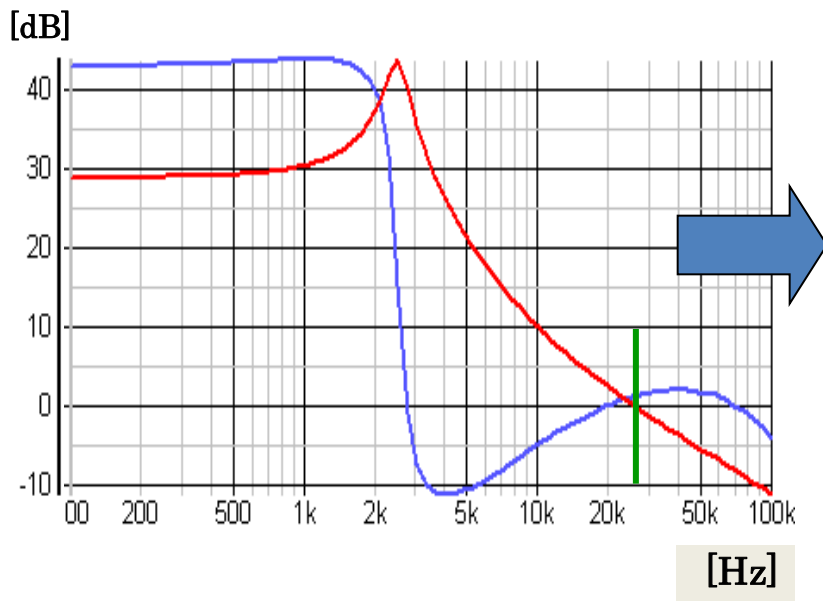


図3-13 [再掲]周波数特性(進み補償)

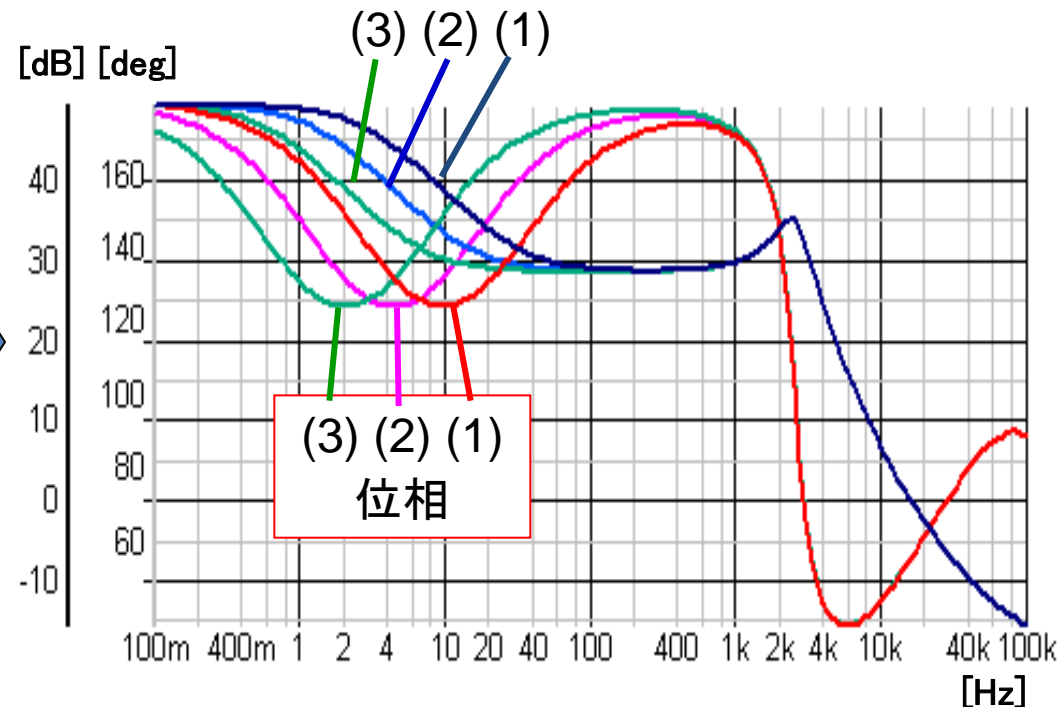


図3-14 周波数特性(遅れ補償1)

3. 位相補償と制御特性

- シミュレーション結果 (位相遅れ補償+位相進み補償)
- * +位相遅れ補償回路2

・時定数で改善: $T_o=CR=25\sim 100\ \mu\text{s}$
 (DCゲイン: $G=70\text{dB}$ で飽和)

$$G(s)=A \frac{1+T_o \cdot s}{T_o \cdot s} \quad (3-5)$$

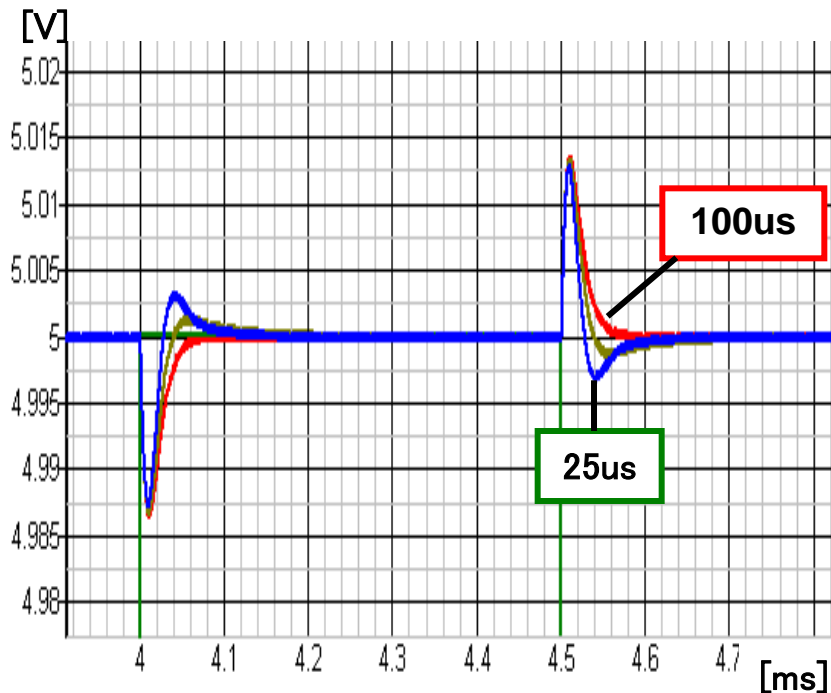


図3-15 過度応答特性(遅れ補償2)

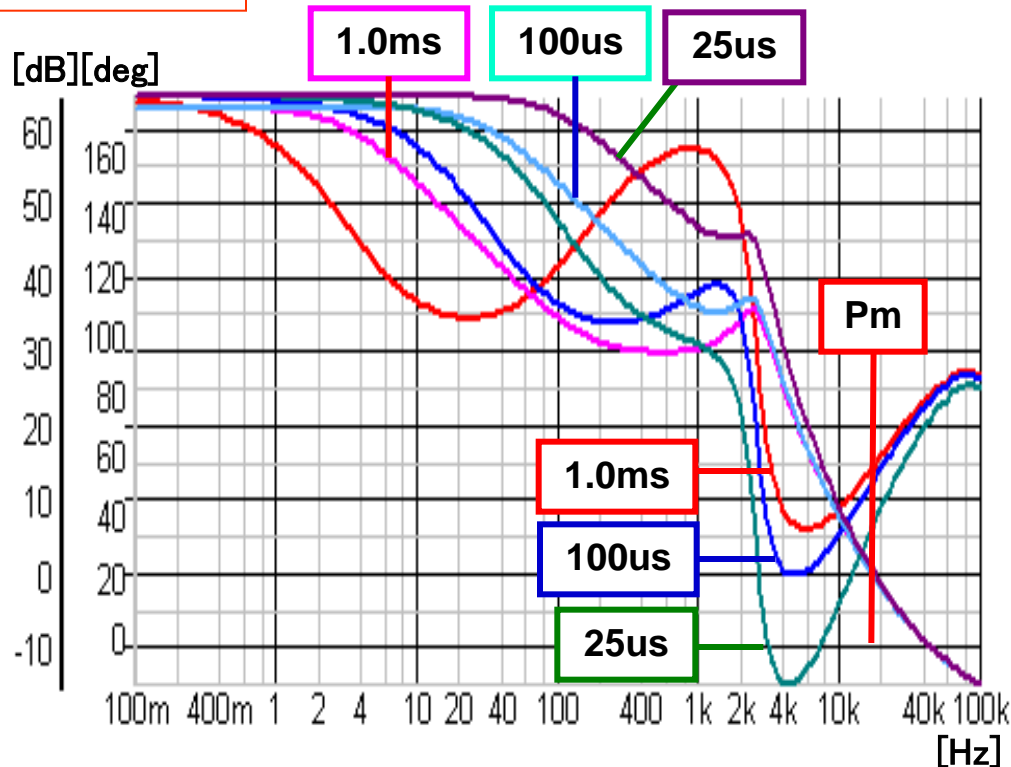


図3-16 周波数特性(遅れ補償2)

3. 位相補償と制御特性

- 【参考】 * DCゲインアップによる応答特性の改善
* DCゲイン飽和の解析

(左図) Rの変更 (CR:一定)
・R = 50k \Rightarrow 100k Ω

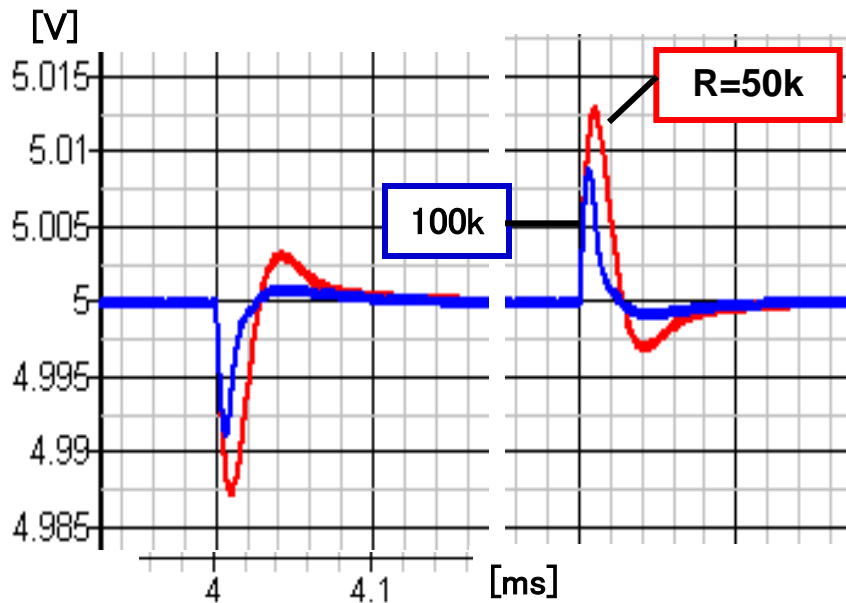


図3-17 [再掲]周波数特性(進み補償)

(右図)位相進み補正の削除
・低域のゲインアップ(+40dB)
(100dB で飽和: OPアンプ特性)

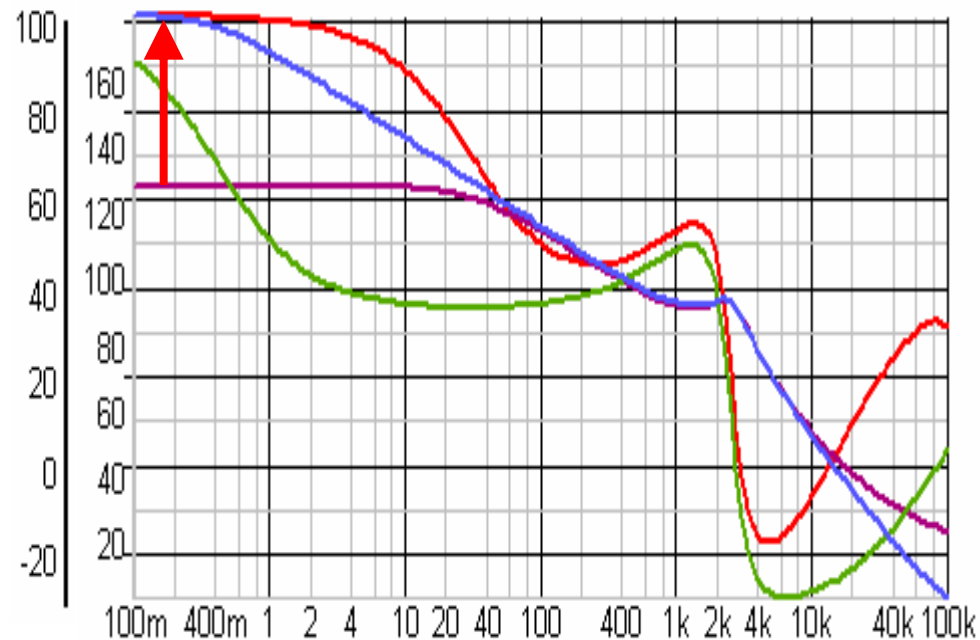


図3-18 低域ゲイン特性(遅れ補償2)

3. 位相補償と制御特性

● シミュレーション結果 (位相遅れ補償+位相進み補償)

* +位相遅れ補償回路1

- ・時定数: $T_o=CR=$ (1)5.0 us, (2)11 us, (3)25 us
- ・時定数は、安定範囲で小さいほうが望ましい

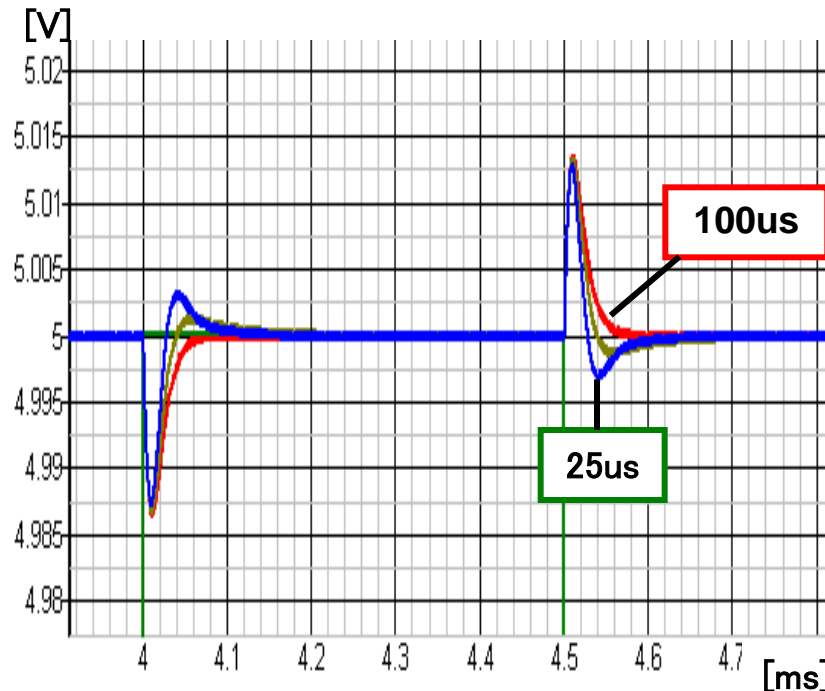


図3-19 [再掲]周波数特性(進み補償)

図3-20 周波数特性(遅れ補償1)

3. 位相補償と制御特性

● 実際の電源特性

1) サンプリングによる位相遅れ (T: クロック周期)

$$H(s) = \frac{1}{s} - \frac{1}{s} e^{-sT} = \frac{(1 - e^{-sT})}{s} \quad (3-6)$$

$$|H(j\omega)| = T \cdot \left| \frac{\sin(\omega T/2)}{(\omega T/2)} \right|, \quad \angle H(j\omega) = -\frac{\omega T}{2} = -\pi \frac{f}{f_{ck}} \quad (3-7)$$

($f = f_{ck}/10$ で、 $\theta = -18^\circ$)

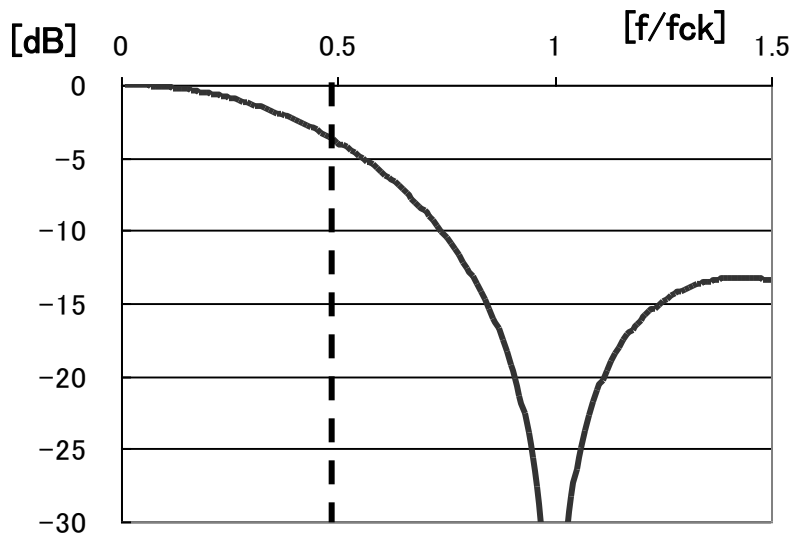


図3-21(a) SINC関数[ゲイン]

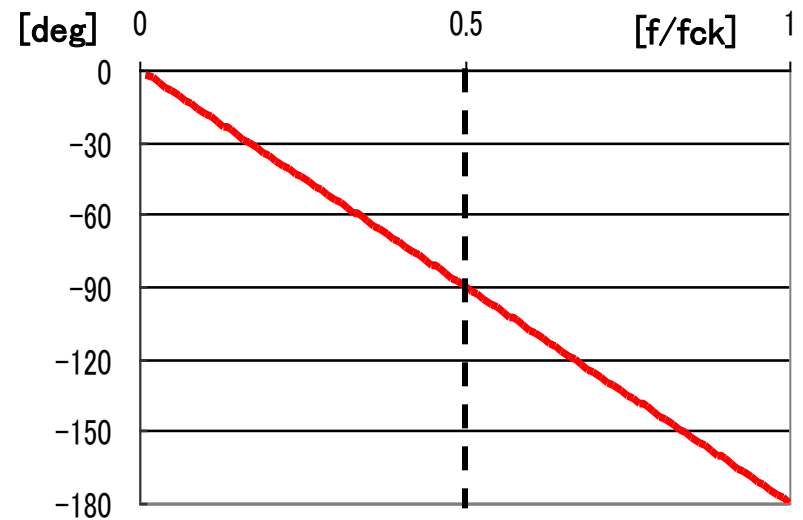


図3-21(b) SINC関数[位相]

3. 位相補償と制御特性

● 実際の電源特性

2) オペアンプ等の位相遅れ (1次遅れで近似)

GBP=3MHz、 Gain=30dB (fc=100kHz) のとき

$$G(j\omega) = \frac{1}{1+j\omega T} = \frac{1}{1+j f / f_c} \quad (\theta = -5.7^\circ @ 10\text{kHz}) \quad (3-8)$$

★ 等価回路に表われない「位相遅れ」に注意！

ご静聴 ありがとうございます。

アナログ回路におけるフィードバック制御
—スイッチング電源と直流モータ駆動における自動制御—

小堀 康功 (小山工業高等専門学校)
(群馬大学 非常勤講師)

(3) 伝達関数と応答特性

(A) 伝達関数の表し方

1) **ボード線図**: 最も一般的

* 構成: 周波数に対する2曲線(ゲイン、位相)で表示

横軸=対数周波数: $\log_{10}(f)$ 、縦軸=ゲイン(dB)、位相

* 特徴: 周波数特性を重視

2) **ニコルス線図**(ゲイン・位相線図): $G_c(s) \Leftrightarrow G_o(s)$ 変換

* 構成: 位相とゲイン(dB)で表示

横軸: 位相(度)、縦軸: ゲイン(dB)

* 特徴: 安定性の評価容易(余裕度、ピークレベル)

曲線上に周波数を記入。局所的な拡大表示困難

3) **ベクトル軌跡**(複素平面):

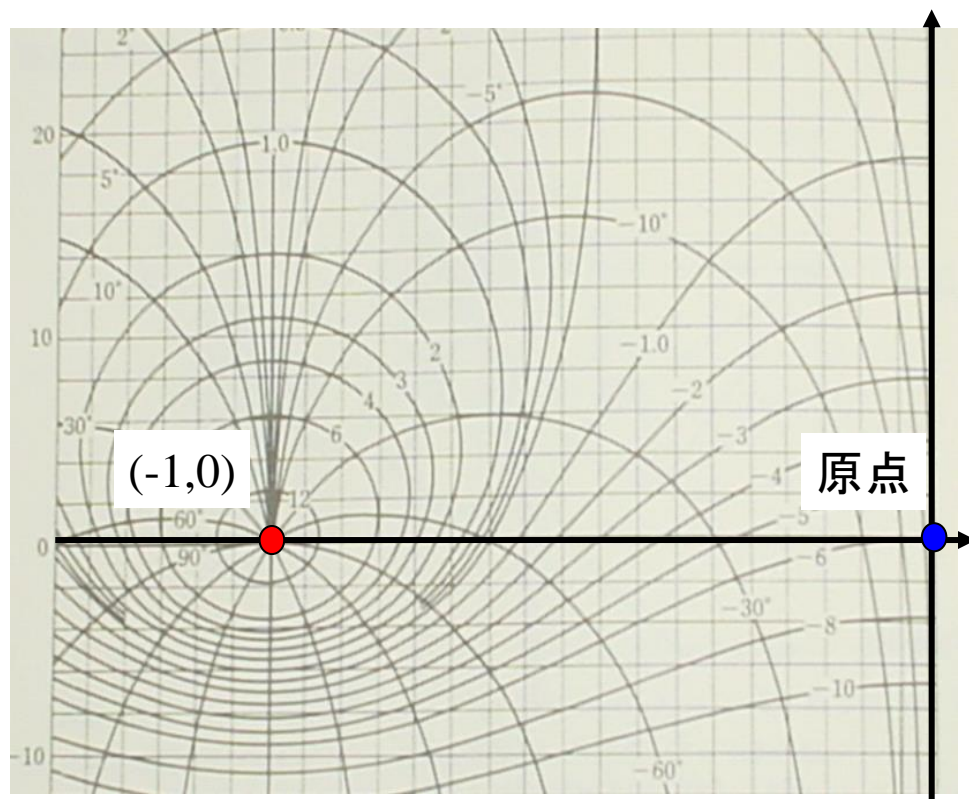
* 構成: 実数軸+虚数軸で表示

横軸: 実数軸、縦軸: 虚数軸 $\dots |G(j\omega)|$ 、 $\angle G(j\omega)$

* 特徴: ニコルス線図と類似

(3) 伝達関数と応答特性

●ニコルス線図とベクトル軌跡



(A) ニコルス線
図

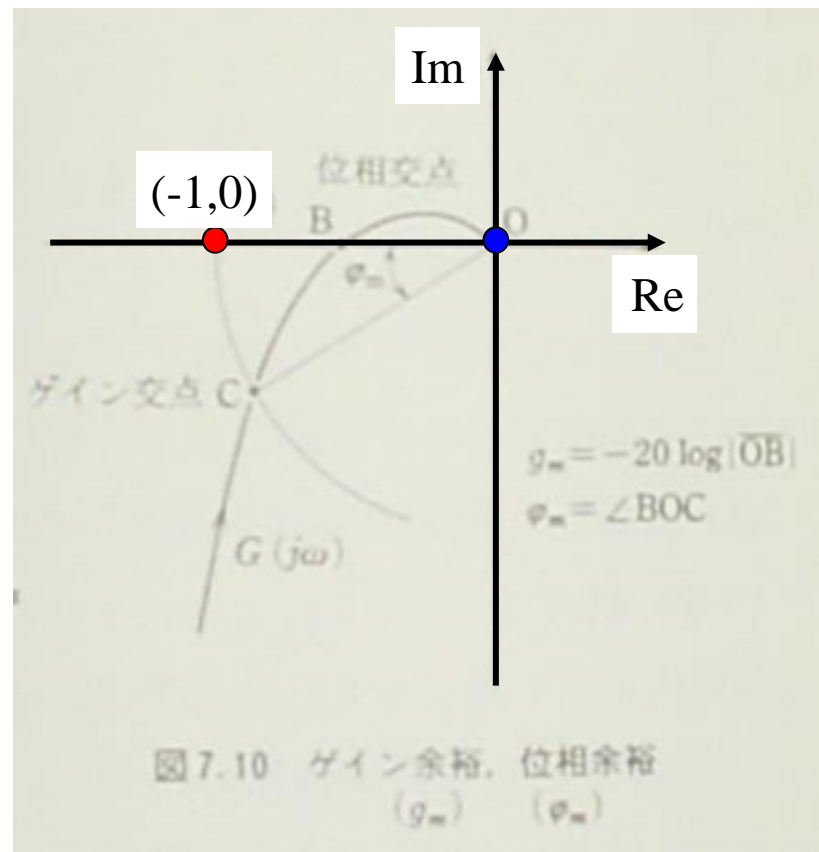


図 7.10 ゲイン余裕、位相余裕
(g_m) (φ_m)

(B) ベクトル軌跡

2. 直流モータ制御における自動制御

2-3 位相制御回路と伝達関数

● 位相比較器(高利得回路)

(1) 位相比較(サンプリング・ホールド方式)

* 基準信号 : 台形波信号

* フィードバック信号: サンプリング信号

● 台形波発生回路(Trapezoid):

(1) 電流源+積分器: IC化に適する

1ピン: 積分用コンデンサ

(2) ブート・ストラップ回路: ディスクリート回路に好適

フィードバック用コンデンサ: 大きめに

★ デューティは ほぼ50% に設定
⇒ キャプチャー・レンジ性能に影響

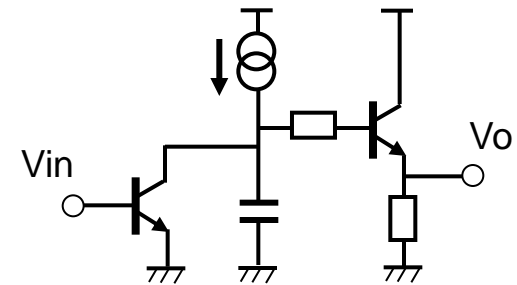


図2-16 台形波発生回路

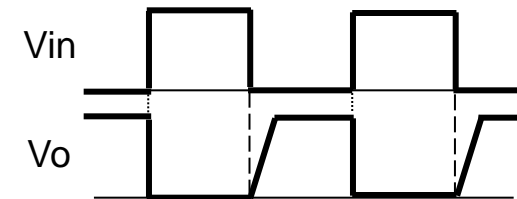


図2-17 各部信号波形

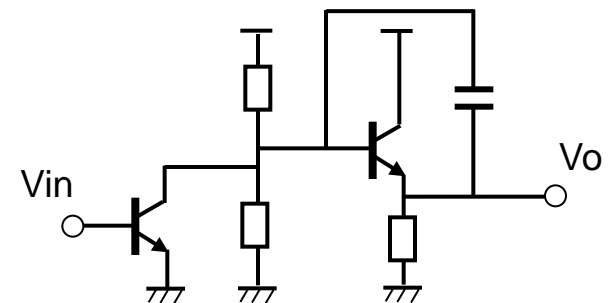


図2-18 ブートストラップ回路

2. 直流モータ制御における自動制御

2-3 位相制御回路と伝達関数

● サンプルング・ホールド回路

(1) 位相比較(サンプリング・ホールド方式)

* 基準信号: 台形波信号

* 比較信号: サンプルング信号

(2) サンプルング・パルス幅

$T > CR$ * $R = \text{出力}R + \text{導通}R$

(3) スイッチ回路

NMOS (or 双方向NPNTランジスタ)

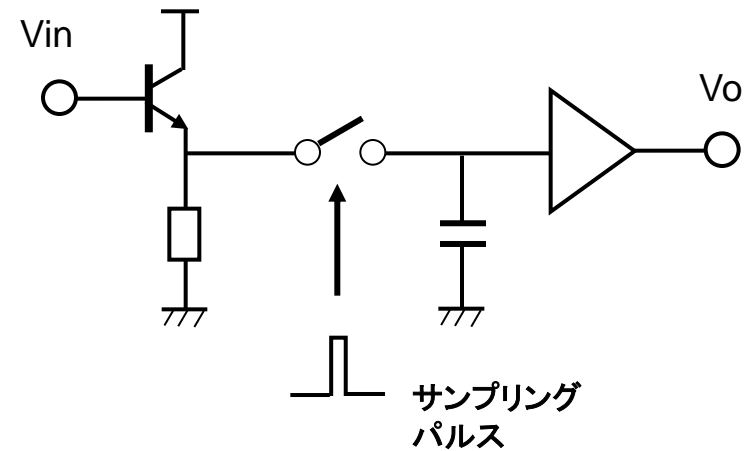


図2-19 S/H回路

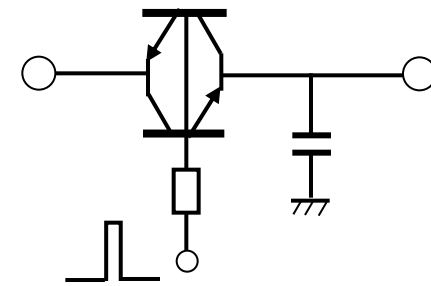


図2-20 スイッチ回路例