

平成 30 年度

第 2 種

機械・制御

(第 2 時限目)

## 答案用紙記入上の重要事項及び注意事項

指示がありましたら答案用紙（記述用紙）2枚を引き抜いてください。答案用紙には、2枚とも直ちに試験地、受験番号及び生年月日を記入してください。

## 1. 重要事項

- a. 「選択した問の番号」欄には、必ず選択した問番号を記入してください。  
記入した問番号で採点されます。問番号が未記入のものは、採点されません。
- b. 計算問題では、解に至る過程を簡潔に記入してください。  
導出過程が不明瞭な答案は、0点となる場合があります。

## 2. 注意事項

- 記入には、濃度HBの鉛筆又はシャープペンシルを使用してください。
- 答案用紙は1問につき1枚としてください。
- 計算問題の答は、特に指定がない限り、有効数字は3桁です。なお、解答以外の数値の桁数は、誤差が出ないように多く取ってください。

例：線電流  $I$  は

$$I = \frac{P}{\sqrt{3}V \cos \theta} = \frac{10 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 200 \times 0.9} = 32.075 \text{ A} \quad (\text{答}) 32.1 \text{ A}$$

1線当たりの損失  $P_L$  は

$$P_L = I^2 R = 32.075^2 \times 0.2 = 205.76 \text{ W} \quad (\text{答}) 206 \text{ W}$$

- 記述問題については、問題の要求を逸脱しないでください。  
例：「問題文に3つ答えよ。」という要求で、4つ以上答えてはいけません。
- 氏名は記載しないでください。（答案用紙に氏名記載欄はありません。）

答案用紙は、白紙解答であっても2枚すべて提出してください。  
なお、この問題冊子についてはお持ち帰りください。

問 1～問 4 の中から任意の 2 問を解答すること。(配点は 1 問題当たり 30 点)

問 1 三相かご形誘導電動機の始動方式に関し、次の問に答えよ。

- (1) 数キロワット以上の中小容量の三相かご形誘導電動機を全電圧始動した場合、定格電流の 5～8 倍程度の始動電流が流れる。この始動電流によって電動機に関連する設備に生じる可能性がある問題点を二つ挙げよ。
- (2) スターデルタ始動方式を用いた場合、始動電流をほぼ $\frac{1}{3}$ にすることができる。その理由を述べよ。
- (3) スターデルタ始動方式を用いて始動電流を低減させた場合の問題点を二つ挙げよ。
- (4) インバータを用いて、周波数及び電圧を制御して始動し、定格速度まで連続的に加速するインバータ始動方式の優位な点を二つ挙げよ。

問2 図は、三相星形接続の円筒形同期発電機のフェーザ図である。この図を参照して次の間に答えよ。ただし、電機子抵抗による電圧降下及び磁気飽和は無視するものとする。

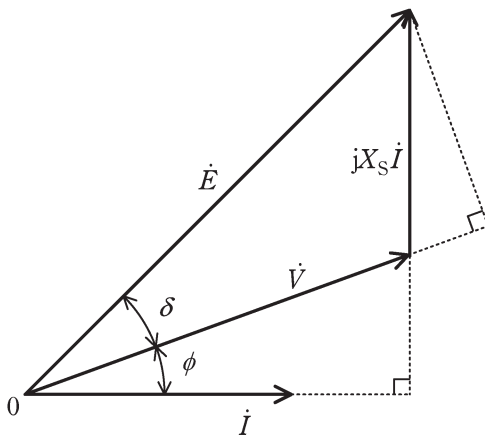
(1)  $E$  [V],  $V$  [V],  $\delta$  [rad],  $X_S$  [ $\Omega$ ]を用いて、発電機出力  $P$  [kW]を表す式を導出過程を含めて示せ。

(2) 定格皮相電力 30 000 kV・A, 定格端子電圧(線間電圧)6 600 V, 短絡比 0.5 の円筒形三相同期発電機において、次の a, b 及び c の間に答えよ。

a.  $X_S$  [ $\Omega$ ]の値を求めよ。

b. 三相平衡交流系統に接続して、 $E = 7\,000$  V,  $V = 3\,810$  V,  $\delta = \frac{\pi}{6}$  rad で運転しているときの  $P$  [kW],  $I$  [A], 力率 ( $\cos\phi$ ) の値を求めよ。

c. この発電機を三相平衡交流系統から切り離して、三相平衡抵抗器負荷に接続した。界磁電流を調整して  $V = 3\,700$  V,  $\delta = \frac{\pi}{3}$  rad で運転し、抵抗器負荷に電力を供給した。このときの  $P$  [kW],  $E$  [V],  $I$  [A], 力率 ( $\cos\phi$ ) の値を求めよ。



$\dot{E}$  : 無負荷誘導起電力 (相電圧)

$\dot{V}$  : 端子電圧 (相電圧)

$\dot{I}$  : 電機子電流

$X_S$  : 同期リアクタンス

$\delta$  : 内部相差角

$\phi$  : 力率角

$E, V, I$  : 各フェーザの大きさ

円筒形三相同期発電機のフェーザ図

問3 図1に三相サイリスタ変換器を2台使用した変換装置を示す。対称三相電圧の①系統、②系統に接続されている変換器をそれぞれ変換器1、変換器2とし、その直流電圧を $v_{dc1}$ 、 $v_{dc2}$ とする。①系統の相順は $u \rightarrow v \rightarrow w$ 相とし、変換器1のサイリスタの番号を図1に示す。直流リアクトル $L$ のインダクタンスは十分に大きく、直流電流 $I_d$ のリプルは無視できる。また、図示されていない回路内のインピーダンス及び回路内の損失も無視できるものとする。なお、 $I_d$ 、 $v_{dc1}$ 、 $v_{dc2}$ の極性は、図1に示す方向を正とする。動作は定常状態にあるものとして、次の問に答えよ。

- (1) ある時刻に変換器1のサイリスタ $T_1$ 及び $T_5$ がオンしていたとする。電気角で $120^\circ$ に相当する時間後に通電しているのはどのサイリスタであるかを示せ。
- (2) ①系統の三相交流線間電圧の実効値を $V_1$ とする。変換器1を図2に示す制御角 $\alpha_1$ で運転したときに、直流電圧 $v_{dc1}$ の平均値 $V_{dc1}$ を求める式を、 $V_1$ 及び $\alpha_1$ を用いて示せ。
- (3) 損失がないとしているので、この装置における①系統から入力される有効電力 $P_{ac1}$ と直流電力 $P_{dc}$ とは等しい。有効電力 $P_{ac1}$ を表す式を $V_1$ 、 $I_d$ 及び $\alpha_1$ を用いて示せ。
- (4) ①系統に流れる波高値 $I_d$ の交流の線電流は半サイクルで $120^\circ$ 通電の方形波となり、この波形に含まれる基本波実効値 $I_1$ は $\frac{\sqrt{6}}{\pi} I_d$ である。この基本波による①系統からの遅れの無効電力 $Q_{ac1}$ を表す式を、 $V_1$ 、 $I_d$ 及び $\alpha_1$ を用いて示せ。
- (5) 変換器2の直流電圧 $v_{dc2}$ の平均値を $V_{dc2}$ とする。①系統から②系統に電力を送る場合、電流 $I_d$ の極性は正、平均電圧 $V_{dc1}$ 、 $V_{dc2}$ の両方の極性とも正である。逆に、②系統から①系統に電力を送る場合に、電流 $I_d$ 、平均電圧 $V_{dc1}$ 、 $V_{dc2}$ の極性は正であるか負であるかを示せ。

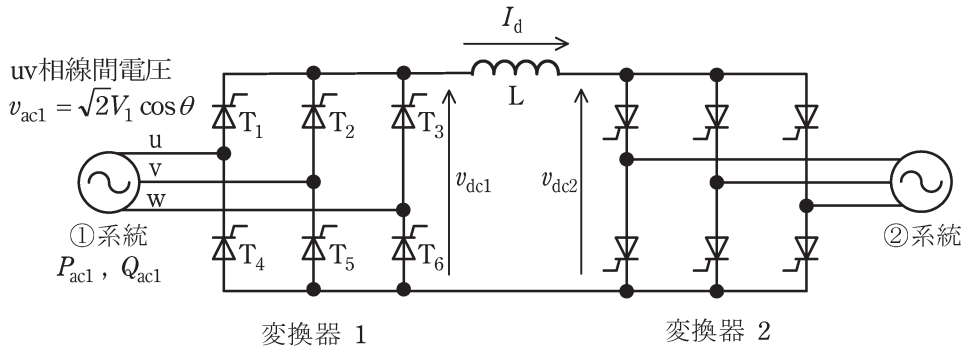


図 1 三相サイリスタ整流回路の変換器を2台使用した変換装置

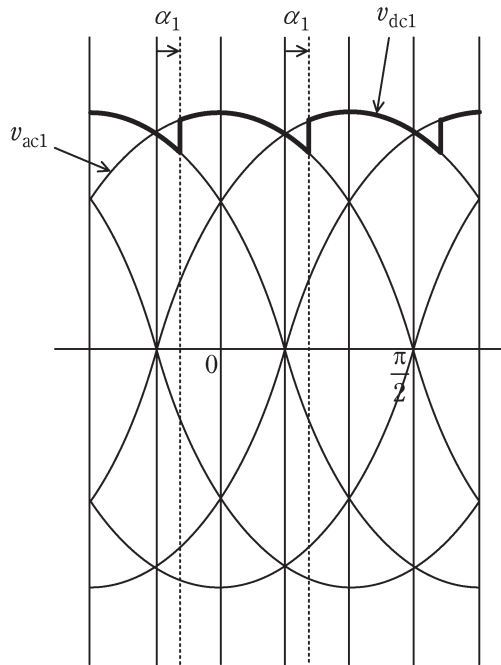


図 2 交流線間電圧と直流電圧の関係

問4 図1のような2自由度制御系がある。ここで $G(s)$ は制御対象、 $C(s)$ 及び $F(s)$ は補償器である。また、 $R(s)$ は目標値、 $D(s)$ は外乱、 $Y(s)$ は制御量、 $E(s)$ は制御偏差である。この制御系について、次の問に答えよ。

- (1) 図1に示すフィードバック補償器 $C(s)$ の係数 $K_P$ 及び $T_I$ の名称を答えよ。
- (2)  $K_P = 10$ 、 $T_I = 0.1$ のとき、 $C(s)$ の角周波数 $\omega$ [rad/s]に対するゲイン特性の概形を答案用紙に印刷されている図2に折れ線近似で図示せよ。
- (3)  $R(s) = 0$ として、外乱 $D(s)$ から制御偏差 $E(s)$ までの閉ループ伝達関数を求めよ。
- (4) 上記小問(3)で求めた閉ループ伝達関数において、固有角周波数が5 rad/s、減衰係数が0.7となるように、 $K_P$ と $T_I$ の値を定めよ。
- (5)  $D(s) = 0$ として、目標値 $R(s)$ から制御量 $Y(s)$ までの閉ループ伝達関数を $F(s)$ 、 $C(s)$ 、 $G(s)$ を用いて求めよ。
- (6) 上記小問(3)で求めた閉ループ伝達関数は $F(s)$ に依存しない。また、上記小問(5)で求めた閉ループ伝達関数は $C(s)$ に依存しない。これは制御系にどんな特長をもたらすか答えよ。この性質を利用しているのが2自由度制御系である。

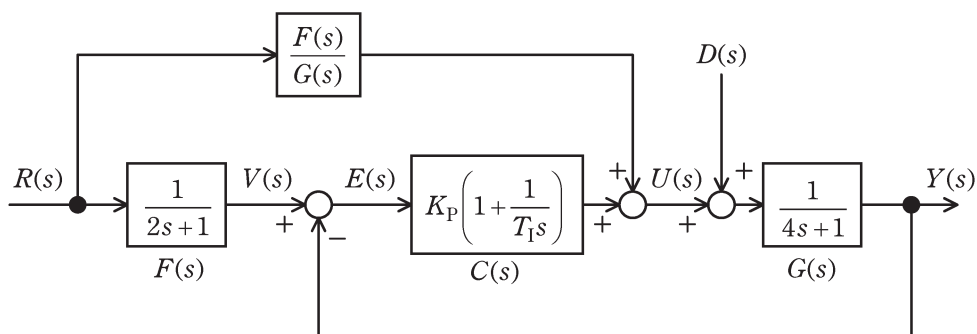


図1

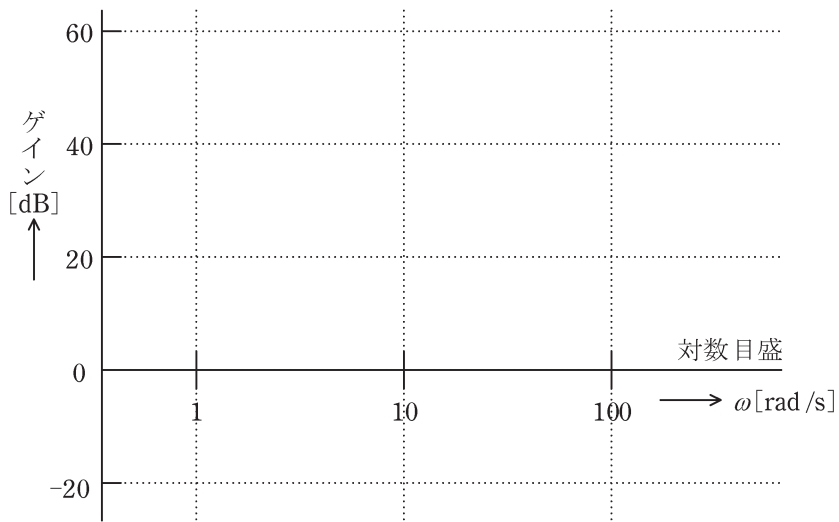


図 2



<機械・制御科目>

[問 1 の標準解答]

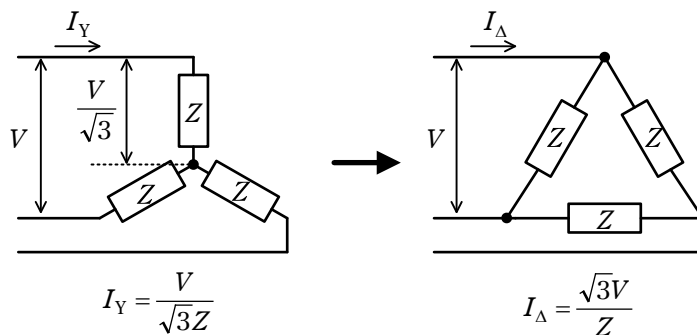
(1) 次の解答 a～f のうちいずれを解答してもよい。

三相かご形誘導電動機を全電圧始動した場合、次のような問題が生じる可能性がある。

- a. 過大な始動電流のため大きな電圧降下を生じる。
- b. 過大な始動電流のためブレーカの動作を招く。
- c. 電動機への配線の焼損の可能性がある。
- d. 始動電流に対応するため定格設備容量より過大な設備容量が必要となる。
- e. 始動時の機械的ショックが大きい。
- f. 始動電流値に対応する保護機器を選定すると適切な保護機能が得られない

(2)

スターデルタ始動方式は電動機の各相の巻線を、始動時にはスター結線とすることによって相電圧が  $\frac{1}{\sqrt{3}}$  となり、始動終了後デルタ結線に切り換えることによって電源電圧を各相に供給する方式である。スター結線時はデルタ結線時と比較して電源から見た見かけ上のインピーダンスが 3 倍となるので、線電流が  $\frac{1}{3}$  となる。



(別解) スター結線時は相電圧は線間電圧の  $\frac{1}{\sqrt{3}}$  となるので線電流も  $\frac{1}{\sqrt{3}}$  となる。デルタ結線時の線電流は相電流の  $\sqrt{3}$  倍となる。両者の比をとると、スター結線時の線電流はデルタ結線時の  $\frac{1}{3}$  となる。

(3) 次の解答 a～e のうちいずれを解答してもよい。

スターデルタ始動方式を用いた場合の問題点として次のようなものがある。

- a. 始動トルクが約  $\frac{1}{3}$  に低下するため適用できる負荷が限られる。
- b. 始動トルクが低下するので始動時間が長くなる。
- c. スターからデルタに切り換える際に過大な突入電流が生じることがある。
- d. 切換え時の電源位相によっては突入電流により、ブレーカの動作を招く。
- e. 切換え時の無電圧時間は電動機が空転するためデルタ投入時に機械的ショックを生じる。

(4) 次の方式 a～f のうちいずれを解答してもよい。

インバータを用いて、電動機の一次周波数を最低周波数から定格値まで順次上昇させ、電動機の同期速度を連続的に変えて加速する方式であり、次のような優位な点がある。

- a. 通常は  $\frac{V}{f}$  を基本とし、電圧特性に補正を施した制御を行うので低周波低電圧でも磁束が低下せず始動トルクが低下しない。
- b. 始動電流が定格電流の約 2 倍程度以下になる。
- c. 始動時間をインバータによって制御できる。
- d. 始動期間に生じる電動機の損失が少なく、発熱を抑制できる。
- e. ソフトスタートにより始動による機械的ショックが小さい。
- f. 始動電流や突入電流による他の機器への影響が少ない。

[問2の標準解答]

(1) 発電機出力  $P$

$$P = 3VI \cos \phi \times 10^{-3}$$

フェーザ図から、

$$X_S I \cos \phi = E \sin \delta$$

したがって、

$$P = 3V \frac{E \sin \delta}{X_S} \times 10^{-3} = \frac{3EV}{X_S} \sin \delta \times 10^{-3} \text{ [kW]} \quad \cdots (\text{答})$$

(2)

a. 単位法では、

$$X_{S(\text{p.u.})} = \frac{1}{\text{短絡比}} = \frac{1}{0.5} = 2.00 \text{ p.u.}$$

定格電機子電流  $I_R$

$$I_R = \frac{30\,000 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 6\,600} = 2\,624.3 \text{ A}$$

$$1 \text{ p.u. インピーダンス } Z_{\text{p.u.}} = \frac{6\,600}{2\,624.3} = 1.452\,0$$

$$X_S = 2.00 \times 1.452\,0 = 2.904\,0 \rightarrow 2.90 \, \Omega \quad \cdots (\text{答})$$

b.

$$P = \frac{3 \times 7\,000 \times 3\,810}{2.904\,0} \times \sin \frac{\pi}{6} \times 10^{-3} = 13\,776 \rightarrow 13\,800 \text{ kW} \quad \cdots (\text{答})$$

フェーザ図から、

$$\begin{aligned} IX_S &= \sqrt{E^2 - 2EV \cos \delta + V^2} \\ &= \sqrt{7\,000^2 - 2 \times 7\,000 \times 3\,810 \times \cos \frac{\pi}{6} + 3\,810^2} \\ &= \sqrt{1.732\,2 \times 10^7} \\ &= 4\,162.0 \end{aligned}$$

$$I = \frac{4\,162.0}{2.904\,0} = 1\,433.2 \rightarrow 1\,430 \text{ A} \quad \cdots (\text{答})$$

$$\cos\phi = \frac{P \times 10^3}{3VI} = \frac{13\,776 \times 10^3}{3 \times 3\,810 \times 1\,433.2} = 0.840\,95 \rightarrow 0.841 \quad \dots (\text{答})$$

c. 抵抗器負荷のため、 $\cos\phi = 1.00$ 、 $\phi = 0 \text{ rad}$  である。  $\dots (\text{答})$

フェーザ図から、

$$E \cos\delta = V + IX_S \sin\phi$$

$$E = \frac{1}{\cos\delta}(V + IX_S \sin\phi) = \frac{V}{\cos\delta} = \frac{3\,700}{0.5} = 7\,400.0 \rightarrow 7\,400 \text{ V} \quad \dots (\text{答})$$

$$P = 3V \frac{E \sin\delta}{X_S} \times 10^{-3} = \frac{3 \times 7\,400 \times 3\,700}{2.904\,0} \sin \frac{\pi}{3} \times 10^{-3} = 24\,496 \rightarrow 24\,500 \text{ kW}$$

$\dots (\text{答})$

$$I = \frac{P \times 10^3}{3V \cos\phi} = \frac{24\,496 \times 10^3}{3 \times 3\,700 \times 1.00} = 2\,206.8 \rightarrow 2\,210 \text{ A} \quad \dots (\text{答})$$

[問3の標準解答]

(1) 電気角で  $120^\circ$  に相当する時間後に通電しているのは、相順に従って、次のサイリスタ  $T_1 \rightarrow T_2$ 、 $T_5 \rightarrow T_6$  に転流しているので、サイリスタ  $T_2$  と  $T_6$  である。

(2) 直流電圧  $v_{dc1}$  の平均値  $V_{dc1}$  は、

$$V_{dc1} = \frac{1}{\frac{\pi}{3}} \int_{-\frac{\pi}{6} + \alpha_1}^{\frac{\pi}{6} + \alpha_1} \sqrt{2}V_1 \cos\theta d\theta = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} V_1 \cos\alpha_1 = 1.35V_1 \cos\alpha_1 \quad \dots (\text{答})$$

(3) ①系統の有効電力  $P_{ac1}$  は、直流電流  $i_d$  が一定値  $I_d$  とみなせるため、

$$\begin{aligned} P_{ac1} &= P_{dc} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} v_{dc1} \cdot i_d d\theta \\ &= V_{dc1} \cdot I_d = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} V_1 I_d \cos\alpha_1 = 1.35V_1 I_d \cos\alpha_1 \quad \dots (\text{答}) \end{aligned}$$

(4) ①系統の基本波皮相電力  $S_{ac1}$  は、線間電圧の実効値が  $V_1$ 、線電流の基本波実効値が  $I_1 = \frac{\sqrt{6}}{\pi} I_d$  であるので、

$$S_{ac1} = \sqrt{3}V_1 I_1 = \sqrt{3}V_1 \times \frac{\sqrt{6}}{\pi} I_d = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} V_1 I_d = \sqrt{P_{ac1}^2 + Q_{ac1}^2}$$

したがって、基本波による①系統からの遅れの無効電力  $Q_{ac1}$  は、

$$Q_{ac1} = \sqrt{S_{ac1}^2 - P_{ac1}^2} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} V_1 I_d \sin \alpha_1 = 1.35 V_1 I_d \sin \alpha_1 \quad \cdots (\text{答})$$

- (5) 電力の方向が②系統→①系統の場合、電流  $I_d$  の極性は正、電圧  $V_{dc1}$  の極性は負、電圧  $V_{dc2}$  の極性は負である。

[問 4 の標準解答]

- (1)  $K_P$  は比例ゲイン、 $T_I$  は積分時間。  $\cdots$  (答)  
 (2) 補償器  $C(s)$  の伝達関数を通分してから積の形に変換すると

$$C(s) = K_P \frac{1+T_I s}{T_I s} = K_P \cdot \frac{1}{T_I s} \cdot \frac{1+T_I s}{1}$$

であるから、この周波数伝達関数は、

$$C(j\omega) = K_P \cdot \frac{1}{jT_I \omega} \cdot \frac{1+jT_I \omega}{1}$$

となる。まず、定数  $K_P$  のゲイン特性は、

$$20 \log_{10} K_P = 20 \log_{10} 10 = 20 \text{ dB}$$

で一定値となる。また、周波数伝達関数  $\frac{1}{jT_I \omega}$  のゲイン特性は、勾配が  $-20 \text{ dB/dec}$  の直線であって、ゲインが  $0 \text{ dB}$  となるときの角周波数  $\omega$  は、 $\frac{1}{T_I} = \frac{1}{0.1} = 10 \text{ rad/s}$  と求められる。図 a に  $K_P$  と  $\frac{1}{jT_I \omega}$  のゲイン特性を示す。

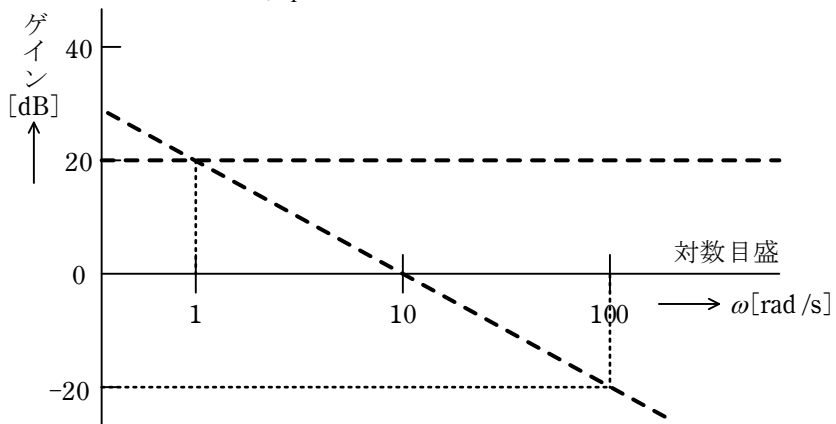


図 a

周波数伝達関数  $\frac{1+jT_1\omega}{1}$  については、 $\omega = \frac{1}{T_1} = 10 \text{ rad/s}$  が折れ点角周波数であり、 $\omega < 10$  の領域ではゲインは  $0 \text{ dB}$ 、 $\omega > 10$  の領域では  $20 \text{ dB/dec}$  の勾配をもつ直線に近似できる（図 b を参照）。

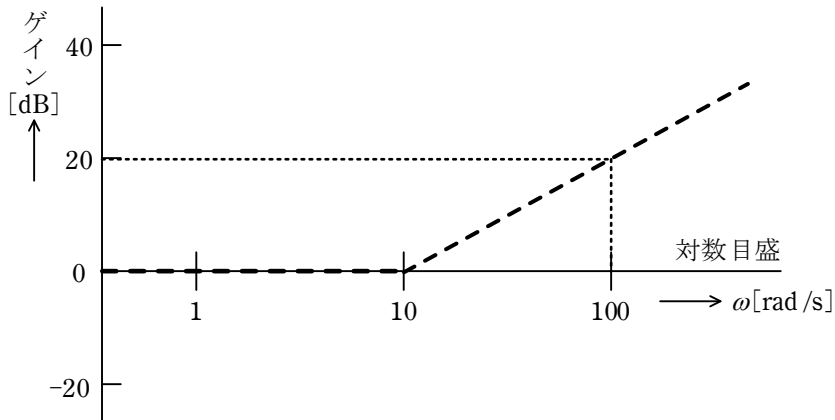


図 b

図 a と図 b のゲイン特性を図面上で加え合わせることで、補償器  $C(s)$  のゲイン特性は図 c のようになる。

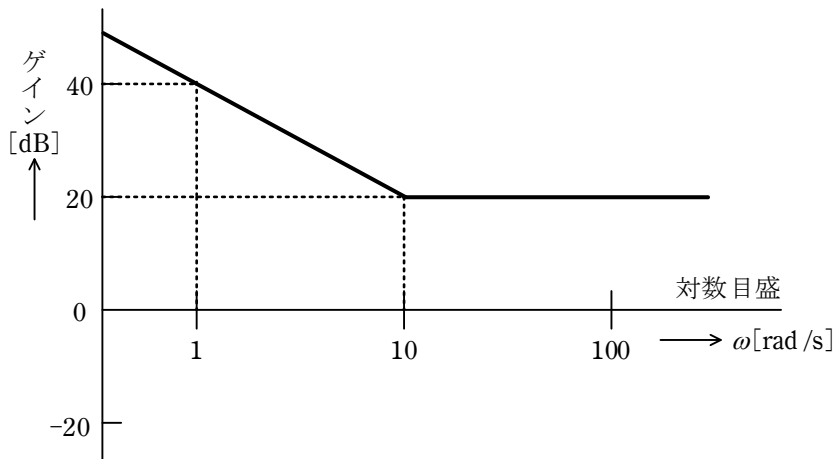


図 c

... (答)

(3) 図 1 において、 $D(s)$  から  $E(s)$  までの閉ループ伝達関数は、次のように計算される。

$$\frac{E(s)}{D(s)} = \frac{-G(s)}{1+C(s)G(s)} = \frac{-\frac{1}{4s+1}}{1+\frac{K_P(T_1s+1)}{T_1s(4s+1)}} = \frac{-T_1s}{4T_1s^2 + T_1(K_P+1)s + K_P} \quad \dots\dots\dots \textcircled{1}$$

. . . (答)

(4) 小問(3)で求めた閉ループ伝達関数①の分母多項式は、

$$s^2 + \frac{K_P+1}{4}s + \frac{K_P}{4T_1} \quad \dots\dots\dots \textcircled{2}$$

である。また、固有角周波数  $\omega_n = 5 \text{ rad/s}$ ，減衰係数  $\zeta = 0.7$  となる 2 次系の分母多項式は、

$$s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2 = s^2 + 7s + 25 \quad \dots\dots\dots \textcircled{3}$$

となるので、②式と③式の係数を比較することで、

$$K_P = 27, \quad T_1 = 0.27 \quad \dots\dots \text{(答)}$$

と求められる。

(5) 図 1 のブロック線図より次の関係式が成り立つ。

$$\left\{ [F(s)R(s) - Y(s)]C(s) + \frac{F(s)}{G(s)}R(s) \right\} G(s) = Y(s)$$

これを変形する。

$$\begin{aligned} \left[ F(s)R(s)C(s) - Y(s)C(s) + \frac{F(s)}{G(s)}R(s) \right] G(s) &= Y(s) \\ F(s)R(s)C(s)G(s) - Y(s)C(s)G(s) + F(s)R(s) &= Y(s) \\ [F(s) + F(s)C(s)G(s)]R(s) &= [1 + C(s)G(s)]Y(s) \end{aligned}$$

$$\therefore \frac{Y(s)}{R(s)} = F(s) \quad \dots\dots \text{(答)}$$

すなわち、 $G(s)$  及び  $C(s)$  の形によらず、 $R(s)$  から  $Y(s)$  までの目標値応答特性は  $F(s)$  となる。

(6) 目標値応答特性は  $F(s)$  で指定することができる。一方、外乱に対するフィードバック制御特性は  $C(s)$  で指定できる。このように、二つの補償器  $F(s)$  と  $C(s)$  を用いて、目標値応答特性とフィードバック制御特性を独立に指定できる特徴がある。