●平成20年度第二種電気主任技術者二次試験標準解答

配点：一題当たり 30 点

電力・管理科目　4 題× 30 点＝ 120 点

機械・制御科目　2 題× 30 点＝　60 点

＜電力・管理科目＞

〔問１の標準解答〕

(1)　計算式

・水圧変動率 δ_P〔%〕は

$$\delta_P=\frac{H_{max}-H_{st}}{Z_1-Z_2}\times 100〔\%〕$$

・速度変動率 δ_n〔%〕は

$$\delta_n=\frac{n_{max}-n_1}{n_n}\times 100〔\%〕$$

・速度調定率 R〔%〕は

$$R=\left(\frac{n_2-n_1}{n_n}\bigg/\frac{P_1-P_2}{P_n}\right)\times 100〔\%〕$$

・電圧上昇率 δ_v〔%〕は

$$\delta_v=\frac{V_{max}-V}{V_n}\times 100〔\%〕$$

・比速度の上限値　N_s〔m･kW〕は

$$N_s=\frac{23\,000}{Z_1-Z_2-H_L+30}+40〔\mathrm{m\cdot kW}〕$$

「JEC-4001-2006　水車およびポンプ水車」

ただし，旧規格を用いた場合も正解とする。

$$N_s=\frac{21\,000}{Z_1-Z_2-H_L+25}+35〔\mathrm{m\cdot kW}〕$$

「JEC-4001-1992　水車およびポンプ水車」

(2) 計算値

・水圧変動率 δ_P〔%〕は $\delta_P = \dfrac{138-120}{362-242} \times 100 = 15.0$〔%〕

・速度変動率 δ_n〔%〕は $\delta_n = \dfrac{366-300}{300} \times 100 = 22.0$〔%〕

・速度調定率 R〔%〕は $R = \left(\dfrac{309-300}{300} \Big/ \dfrac{20\,000-0}{20\,000} \right) \times 100 = 3.0$〔%〕

・電圧上昇率 δ_v〔%〕は $\delta_v = \dfrac{12.5-11.4}{11.0} \times 100 = 10.0$〔%〕

・比速度の上限値 N_s〔m･kW〕は

$$N_s = \frac{23\,000}{362-242-5+30} + 40 = 198.62 \rightarrow 198 \text{〔m･kW〕}$$

「JEC-4001-2006　水車およびポンプ水車」

ただし，旧規格を用いた場合も正解とする。

$$N_s = \frac{21\,000}{362-242-5+25} + 35 = 185.0 \rightarrow 185 \text{〔m･kW〕}$$

「JEC-4001-1992　水車およびポンプ水車」

〔問 2 の標準解答〕

（1）A．過渡安定度と定態安定度の両方に有効な安定化対策技術

PSS 付高速 AVR，SVC，多導体方式，直列コンデンサ

B．過渡安定度対策のみに有効な安定化対策技術

制動抵抗，タービン高速バルブ制御，高速度遮断

C．安定化対策としてはあまり効果を期待できない技術

並列コンデンサ，並列リアクトル，自動電圧調整器付変圧器

（2）各技術の概要と安定化の原理

（A に属す候補技術）

● PSS 付高速 AVR：

〔概要〕頂上電圧が高く応答の速い超速応励磁制御装置（高速 AVR）に系統安定化のための系統安定化制御装置（PSS）といわれる補助制御装置を付加した発電機の励磁制御装置である。

〔原理〕高速 AVR により事故発生後の発電機端子電圧の低下が抑制され発電機の同期化力を強くする。これに加えて，PSS は発電機の出力や回転速度，周波数などを制御入力信号とし，その位相の進み遅れを調整した制御信号を AVR に入力し, 主に発電機の制動力を強める。

● SVC：

〔概要〕サイリスタ制御リアクトル（あるいは可飽和リアクトル）と電力用コンデンサを並列に接続し，無効電流の変化に対してサイリスタの制御（可飽和リアクトルの飽和特性）により，無効電流の変化に対し電圧の変化が小さくなる特性（dV/dI が小さくなる）を持たせる。

〔原理〕これにより接続端子の電圧を一定に維持することが可能となり，発電機の同期化力を強めることができる。

●多導体方式：

〔概要〕送電線において，複数個の素導体を適当なスペーサで束導体（多導体化）とすること。2 導体，4 導体，6 導体，8 導体などがある。

〔原理〕これにより電線の等価半径を大きくでき，送電線の直列リアクタンスを小さくすることができるので，同期化力を強くすることができる。

●直列コンデンサ：

〔概要〕送電線に直列にコンデンサを挿入する。故障電流による過電圧からコンデンサを保護するため，ギャップ付き避雷器や酸化亜鉛避雷器を設置する。なお，低周波軸ねじれ現象の発生防止に留意する必要がある。

〔原理〕これにより送電線の合成リアクタンスを小さくすることができ，同期化力を強くすることができる。

（B に属す候補技術）

●制動抵抗：

〔概要〕発電機又は発電所の出力側に遮断器を通じて負荷抵抗を接続する。

〔原理〕発電機の過渡安定度が失われるのは，送電線の短絡事故・地絡故障により電気出力が小さくなり発電機が加速するためである。発電機が加速中に制動抵抗をつないで発電機の電気出力を増加するようにし発電機の加速を抑制することができる。なお，効果的に用いるには投入時間を的確に選定する必要がある。

●タービン高速バルブ制御：

〔概要〕汽力発電所のタービンの蒸気入口に高速で動作する蒸気加減弁を設置し，併せて，バイパス通路を設ける。

〔原 理〕 系統での短絡・地絡故障発生後の発電機の加速を抑制するため機械入力（タービンへの入力エネルギー）を制限する。そのため，事故後速やかに，タービンへのバルブを急速に閉めると同時に，バイパス通路のバルブを開けて蒸気を逃がしてやる。

●高速度遮断：

〔概要〕故障電流を高速に検出する保護リレーと高速動作の遮断器を送電線に設置する。

〔原理〕高速度遮断は，送電線に故障が発生したときにできるだけ早く検出し，できるだけ早く遮断器を動作させ事故部を除去する方式である。これにより，より早く電圧を回復し電気出力を回復することができるので加速エネルギーを抑制し，相差角の変動を小さく抑えることができる。

〔問 3 の標準解答〕

（1）GPT の等価中性点抵抗 R_n は，変圧器巻線比を n とすると，図 1 に示すように

$R_n = \frac{1}{3} \cdot \left(\frac{25}{3} \right) \cdot n^2$　となる。したがって，各数値を入れると

$R_n = \frac{25}{9} \times \left(\frac{6\,600}{110} \right)^2 = 10\,000$〔Ω〕 となる。

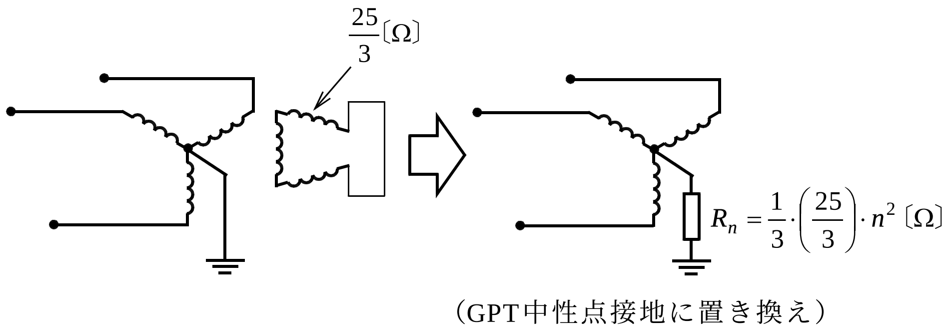


図 1

（2）等価回路を図 2 に示す。

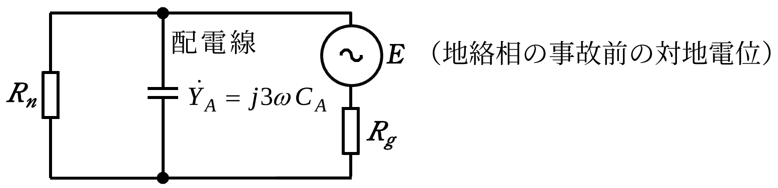


図 2

（3）GPT（3 相一括）を流れる電流 I_n，配電線の C に流れる電流を I_c とすると，

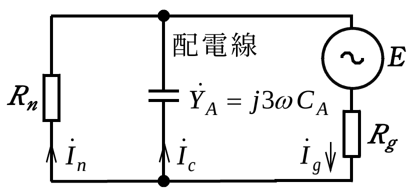


図 3

ここで，それぞれに流れる電流は，以下のように示される。

$$\dot{I}_c=(E-\dot{I}_g\cdot R_g)\times j3\omega C_A$$

$$\dot{I}_n=\frac{1}{R_n}\times(E-\dot{I}_g\cdot R_g)$$

図 3 より，$\dot{I}_g=\dot{I}_n+\dot{I}_c$ となる。

ここで，単相変圧器二次側に生じる対地電圧 V_g を 150〔V〕以内に抑えるには $\left|\dot{I}_g\right|R_g$ を 150〔V〕以下とすればよい。$\left|\dot{I}_g\right|R_g=150$〔V〕を代入すると以下のようになる。

$|E|\gg\left|\dot{V}_g\right|$ を考慮すると

$$\dot{I}_c=(E-\dot{I}_g\cdot R_g)\times j3\omega C_A \quad (E-\left|\dot{I}_g\right|\cdot R_g)\times j3\omega C_A$$

ここで，$C_A=0.01\times10\times10^{-6}=1\times10^{-7}$〔F〕より

$$\dot{I}_c=\left(\frac{6\,600}{\sqrt{3}}-150\right)\times j3\times2\pi\times50\times1\times10^{-7}=j0.3449〔\mathrm{A}〕\rightarrow j0.345〔\mathrm{A}〕$$

$$\dot{I}_n=\frac{1}{R_n}\times(E-\dot{I}_g\cdot R_g) \quad \frac{1}{R_n}\times(E-\left|\dot{I}_g\right|\cdot R_g)=\left(\frac{\frac{6\,600}{\sqrt{3}}-150}{10\,000}\right)=0.366〔\mathrm{A}〕$$

したがって，

$$\left|\dot{I}_g\right|=\left|\dot{I}_n+\dot{I}_c\right|=|0.366+j0.345|=\sqrt{0.366^2+0.345^2}=0.5029〔\mathrm{A}〕$$

$$\therefore R_g=\frac{V_g}{\left|\dot{I}_g\right|}=\frac{150}{0.5029}=298.27\rightarrow298〔\Omega〕$$

R_g は，298〔Ω〕以下にすればよい。

そのとき流れる電流 I_g は，$I_g=\dfrac{150}{298}=0.503$〔A〕となる。

〔問４の標準解答〕

（1）電線のたるみは近似的には，電線の単位長さ当たりの荷重に比例し，径間長の二乗に比例する。また，張力に反比例する。

（2）電線にかかる荷重は，夏季においては電線の自重によるものと風圧荷重を考慮する。冬季においてはこれらに加えて氷雪荷重，氷雪が付着したときの風圧荷重を考慮する。

（3）電線は温度によって伸びるため，たるみが大きくなる夏季において最低地上高を確保する必要がある。夏季にたるみを小さく選びすぎると冬季の張力が大きくなって断線の恐れが生じる。

〔問５の標準解答〕

発電機の出力：P_G〔MW〕は次式で表される。

$$P_G = 9.8 Q_T H_T \eta_T \eta_G \times 10^{-6} \quad \cdots\cdots ①$$

Q_T：発電流量〔kg / s〕,

H_T：有効落差〔m〕,

η_T：水車効率,

η_G：発電機効率

電動機の入力：P_M〔MW〕は次式で表される。

$$P_M = \frac{9.8 Q_P H_P}{\eta_P \eta_M} \times 10^{-6} \quad \cdots\cdots ②$$

Q_P：揚水流量〔kg / s〕,

H_P：有効揚程〔m〕,

η_P：ポンプ効率,

η_M：電動機効率

(1) 揚水量

揚水時の流量は，②式より

$$Q_P = \frac{P_M \eta_P \eta_M}{9.8 H_P} \times 10^6$$

有効揚程は，H_P = 150 + 10 = 160〔m〕なので，

$$Q_P = \frac{100 \times 0.85}{9.8 \times 160} \times 10^6 = 54.209 \times 10^3 \text{〔kg / s〕}$$

この流量で 8 時間揚水するので，上部調整池の貯水量：V〔m^3〕は，

$$V = \frac{Q_P \times 8 \times 3600}{1000} = \frac{54.209 \times 10^3 \times 8 \times 3600}{1000}$$
$$= 1.5612 \times 10^6 \quad \rightarrow \quad 1.56 \times 10^6 \text{〔m}^3\text{〕}$$

（2）発電出力

上部調整池の貯水量を 6 時間で一定放流するときの発電流量は，

$$Q_T = \frac{V \times 1000}{6 \times 3600} = \frac{1.5612 \times 10^6 \times 1000}{6 \times 3600} = 72.277 \times 10^3 \ 〔\mathrm{kg/s}〕$$

発電時の有効落差は，H_T = 150 - 5 = 145〔m〕なので，発電出力は①式より，

$$P_G = 9.8 Q_T H_T \eta_T \eta_G \times 10^{-6} = 9.8 \times 72.277 \times 10^3 \times 145 \times 0.9 \times 10^{-6}$$
$$= 92.435 \quad \rightarrow \quad 92.4 〔\mathrm{MW}〕$$

（3）総合効率

揚水発電所の総合効率：η は，

$$\eta = \frac{発電機出力電力量}{電動機入力電力量} \times 100 = \frac{92.435 \times 6}{100 \times 8} \times 100 = 69.326 \quad \rightarrow \quad 69.3 〔\%〕$$

〔問６の標準解答〕

A：ガスタービン

B：一般の汽力発電の熱効率向上を目指した高温化に伴う熱的制約を克服し，大幅な出力調整が可能となり，電力需要の変動にも迅速に対応することができる。

C：短時間での起動停止が可能で機動性が高い。

D：運転台数

E：地球温暖化

＜機械・制御科目＞

〔問１の標準解答〕

(1) 滑り

同期速度 n_s は,

$$n_s = \frac{120f}{2p} = \frac{120\times 50}{4} = 1500〔\mathrm{min}^{-1}〕$$

回転速度 1 470〔min^{-1}〕のときの滑りは,

$$s = \frac{1500-1470}{1500} = 0.02$$

抵抗挿入後の回転速度は 1 380〔min^{-1}〕になるので，このときの滑り s' は,

$$s' = \frac{1500-1380}{1500} = 0.08$$

すなわち，抵抗 R 挿入後の滑りは，8〔%〕となる。

(2) 挿入した抵抗 R

一次巻線抵抗値を r_1〔Ω〕, 一次と二次を合計した漏れリアクタンスを x〔Ω〕(一次側に換算した値)とし，一相分に加わる電源電圧を E〔V〕とすれば，抵抗 R 挿入前の電流 I〔A〕は,

$$I = \frac{E}{\sqrt{\left(r_1 + \frac{r_2}{s}\right)^2 + x^2}}$$

となり，抵抗 R 挿入後の電流 I'〔A〕は,

$$I' = \frac{E}{\sqrt{\left(r_1 + \frac{r_2 + R}{s'}\right)^2 + x^2}}$$

となる。題意より，$I = I'$ であるから,

$$\frac{r_2}{s} = \frac{r_2 + R}{s'}$$

これより，挿入した抵抗 R は，

$$R = \frac{r_2 s'}{s} - r_2 = \frac{0.12 \times 0.08}{0.02} - 0.12 = 0.36 \text{〔}\Omega\text{〕}$$

(3) 機械的出力

定格出力を P_0〔kW〕，二次側に抵抗 R を挿入した後の機械的出力を $P_0{}'$〔kW〕，二次入力を P_2〔kW〕とする。題意より，抵抗 R の挿入前後で電流は同じという条件なので，二次入力はどちらも等しく，

$$P_2 = \frac{P_0}{1-s} = \frac{P_0{}'}{1-s'}$$

の関係が成り立ち，機械的出力は次のように求められる。

$$P_0{}' = \frac{1-s'}{1-s} P_0 = \frac{1-0.08}{1-0.02} \times 100 = \frac{0.92}{0.98} \times 100 = 93.877 \quad \to \quad 93.9 \text{〔kW〕}$$

(4) 発生トルク

発生トルク T〔N・m〕は，次のように求められる。

$$T = \frac{P_0{}'}{2\pi \cdot \dfrac{n}{60}} = \frac{93.877 \times 10^3}{2 \times 3.14 \times \dfrac{1380}{60}} = \frac{93.877 \times 10^3}{144.44} = 649.93 \quad \to \quad 650 \text{〔N・m〕}$$

〔問 2 の標準解答〕

（1）低圧側電流

変圧比が $\dfrac{33000}{6600}=5$ なので， $I_L=15.5\times 5=77.5$〔A〕

（2）短絡インピーダンス

$\dot{Z}_H=8.5+j30.5$〔Ω〕を変圧比を用いて低圧側電圧基準 $\dot{Z}_H{}'$ に変換すると，

$$\dot{Z}_H{}'=\frac{8.5}{5^2}+j\frac{30.5}{5^2}=0.34+j1.22\text{〔Ω〕}$$

これと $\dot{Z}_L=0.08+j1.36$〔Ω〕を用いて，

$$\dot{Z}=\dot{Z}_L+\dot{Z}_H{}'=(0.08+0.34)+j(1.36+1.22)=0.42+j2.58\text{〔Ω〕}$$

したがって，

抵抗　　　　　：$R_T=0.42$〔Ω〕

リアクタンス：$X_T=2.58$〔Ω〕

6 600〔V〕，1 000〔kV･A〕の基準インピーダンス値 Z_B〔Ω〕は，

$$Z_B=\frac{6600^2}{1000\times 10^3}=43.56\text{〔Ω〕}$$

一方，$\left|\dot{Z}\right|$ は，

$$\left|\dot{Z}\right|=\sqrt{0.42^2+2.58^2}=2.6139\text{〔Ω〕}$$

したがって，自己容量基準での短絡インピーダンス Z_T〔%〕は，

$$Z_T=\frac{\left|\dot{Z}\right|\times 100}{Z_B}=\frac{2.6139\times 100}{43.56}=6.0006\ \rightarrow\ 6.0\text{〔%〕}$$

（3）端子電圧及び定格容量

この変圧器の低圧側に 6 600〔V〕を加えたときに 77.5〔A〕が流れたので，電圧印加点からみた回路のインピーダンス $\left|\dot{Z}_S\right|$ は，

$$\left|\dot{Z}_S\right| = \frac{6600}{77.5} = 85.161 \text{〔}\Omega\text{〕}$$

このインピーダンスのうち，変圧器のインピーダンスは $\dot{Z} = 0.42 + j2.58$〔Ω〕なので，高圧側に接続されたコンデンサのインピーダンスの 6 600〔V〕基準の値を X_C〔Ω〕とすると，

$$\dot{Z}_S = \dot{Z} - jX_C = 0.42 + j(2.58 - X_C)$$

$\left|\dot{Z}_S\right| = 85.161$〔Ω〕より，

$$(2.58 - X_C)^2 = 85.161^2 - 0.42^2$$

$$\therefore \quad X_C = 87.739 \text{〔}\Omega\text{〕}$$

したがって，高圧側端子電圧 V_H は

$$V_H = 87.739 \text{〔}\Omega\text{〕} \times 77.5 \text{〔A〕} \times \frac{33000}{6600} = 33998 \rightarrow 34000 \text{〔V〕}$$

接続されたコンデンサの定格容量 Q_C は，静電容量を C〔F〕，角周波数を ω〔rad / s〕とすると，

$$Q_C = \omega C V^2$$

で表され，容量は印加電圧の 2 乗に比例して増減する。題意より，33 998〔V〕の電圧のとき，電流値が 15.5〔A〕であり，接続したコンデンサの定格電圧が 33 000〔V〕なので，

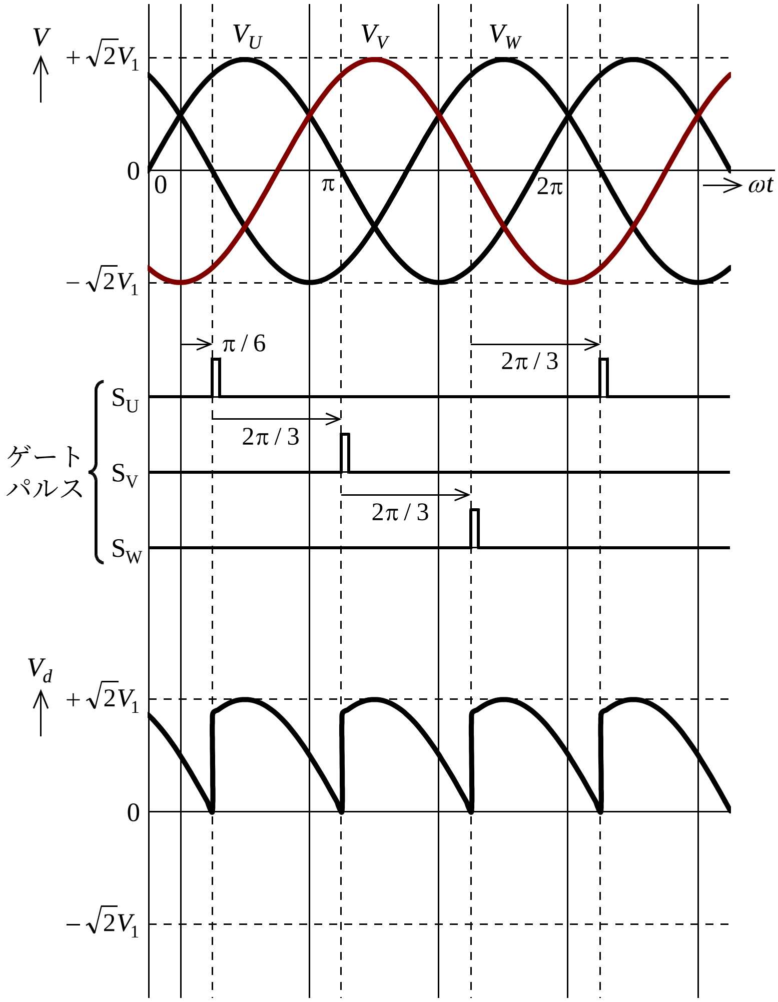
$$Q_C = 15.5 \text{〔A〕} \times 33998 \text{〔V〕} \times \left(\frac{33000}{33998}\right)^2 \times 10^{-3} = 496.48 \rightarrow 496 \text{〔kvar〕}$$

〔問３の標準解答〕

(1) ゲートパルス及び直流電圧の波形

三相半波整流回路を運転したときのサイリスタ S_V 及び S_W のゲートパルスのタイミング並びに負荷に印加される直流電圧 V_d〔V〕の波形は以下の通りになる。

サイリスタ S_V 及び S_W のゲートパルスのタイミングは，サイリスタ S_U のゲートパルスに対して $\frac{2\pi}{3}$ ずつ遅れた位置となる。また，このタイミングで導通したサイリスタの相電圧が直流電圧 V_d〔V〕の波形として表れる。



(2) 直流電圧の平均値

交流電源の相電圧の実効値は V_1〔V〕であるので，U 相を例にとれば，相電圧 V_U〔V〕は，次のように表される。

$$V_U = \sqrt{2}\,V_1 \sin\omega t \text{〔V〕}$$

ωt〔rad〕が $\left(\dfrac{\pi}{6}+\alpha\right)$〔rad〕から $\left(\dfrac{5\pi}{6}+\alpha\right)$〔rad〕の間に相電圧 V_U〔V〕が出力される直流電圧 V_d〔V〕として現れるので，その平均値 E_d〔V〕は次のように求められる。

$$E_d = \frac{1}{\frac{2\pi}{3}}\int_{(\pi/6)+\alpha}^{(5\pi/6)+\alpha} V_U \mathrm{d}(\omega t) = \frac{3\sqrt{2}}{2\pi}V_1\left[-\cos\omega t\right]_{(\pi/6)+\alpha}^{(5\pi/6)+\alpha} = \frac{3\sqrt{6}}{2\pi}V_1\cos\alpha \text{〔V〕}$$

(3) 制御遅れ角と，その理由

直流電流 I_d〔A〕が一定で増加も減少もしないということは，負荷のインダクタンス L にかかる電圧の平均値が 0〔V〕であることを意味する。したがって，直流電圧 V_d〔V〕の平均値 E_d〔V〕はすべて負荷の抵抗 R に印加されている。抵抗値が 0〔Ω〕になることは平均値 E_d〔V〕が 0〔V〕になることである。このことから，

$$E_d = \frac{3\sqrt{6}}{2\pi}V_1\cos\alpha = 0 \text{〔V〕}$$

を満たす制御遅れ角 α〔rad〕は $\dfrac{\pi}{2}$〔rad〕である。

〔問４の標準解答〕

（1）伝達関数及び減衰定数

図のブロック線図より，

$$G(s)=\frac{Y(s)}{R(s)}=\frac{\dfrac{6}{s(s+5)}}{1+\dfrac{6}{s(s+5)}}=\frac{6}{s^2+5s+6}=\frac{6}{(s+2)(s+3)} \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots ①$$

これより， $2\zeta\omega_n=5$, $\omega_n{}^2=6$ を解くと，

$$\zeta=\frac{5}{2\sqrt{6}} \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots ②$$

が得られる。

（2）時間応答(ステップ応答)

上記(1)より，

$$Y(s)=\frac{6}{s^2+5s+6}\cdot\frac{1}{s}=\frac{6}{s(s+2)(s+3)} \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots ③$$

が得られる。ラプラス逆変換をするため，次のように部分分数展開を行う。

$$Y(s)=\frac{a}{s}+\frac{b}{s+2}+\frac{c}{s+3}$$

上式を通分すると，

$$\frac{a(s+2)(s+3)+bs(s+3)+cs(s+2)}{s(s+2)(s+3)}=\frac{(a+b+c)s^2+(5a+3b+2c)s+6a}{s(s+2)(s+3)}$$

となる。上式の分子多項式が③式の分子と一致するように，s のべき乗の係数比較をすると，

$a+b+c=0$, $5a+3b+2c=0$, $6a=6$

より，$a=1$, $b=-3$, $c=2$ が得られ，

$$Y(s)=\frac{1}{s}-\frac{3}{s+2}+\frac{2}{s+3} \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots ④$$

となる。

④式をラプラス逆変換することにより，次の答が得られる。

$y(t) = 1 - 3e^{-2t} + 2e^{-3t}$ ， $t \geqq 0$

(3) 偏差の振幅

図より，

$$H(s) = \frac{E(s)}{R(s)} = \frac{1}{1 + \dfrac{6}{s(s+5)}} = \frac{s(s+5)}{(s+2)(s+3)} \quad \cdots\cdots ⑤$$

$H(s)$の周波数特性 $H(j\omega)$は⑤式より，

$$H(j\omega) = \frac{j\omega(j\omega+5)}{(j\omega+2)(j\omega+3)} \quad \cdots\cdots ⑥$$

となる。このゲイン(絶対値)特性を求めると

$$|H(j\omega)| = \left|\frac{j\omega(j\omega+5)}{(j\omega+2)(j\omega+3)}\right| = \frac{\omega\sqrt{\omega^2+25}}{\sqrt{(\omega^2+4)(\omega^2+9)}} \quad \cdots\cdots ⑦$$

となる。$\omega \to \infty$とすると， $|H(j\omega)| \to 1$ となるので，偏差の振幅は 1 となる。

(4) ω = 1 のときの偏差の振幅

ω = 1 を⑦式へ代入すると，

$$|H(j1)| = \frac{\sqrt{26}}{\sqrt{5\times10}} = \frac{\sqrt{26}}{\sqrt{50}} = \frac{\sqrt{26}}{5\sqrt{2}} = \frac{\sqrt{13}}{5}$$

となり，振幅は， $\dfrac{\sqrt{13}}{5}$ となる。