●平成25年度第一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〕

計算式で与えられた前提条件をグラフ化すると図のとおり。

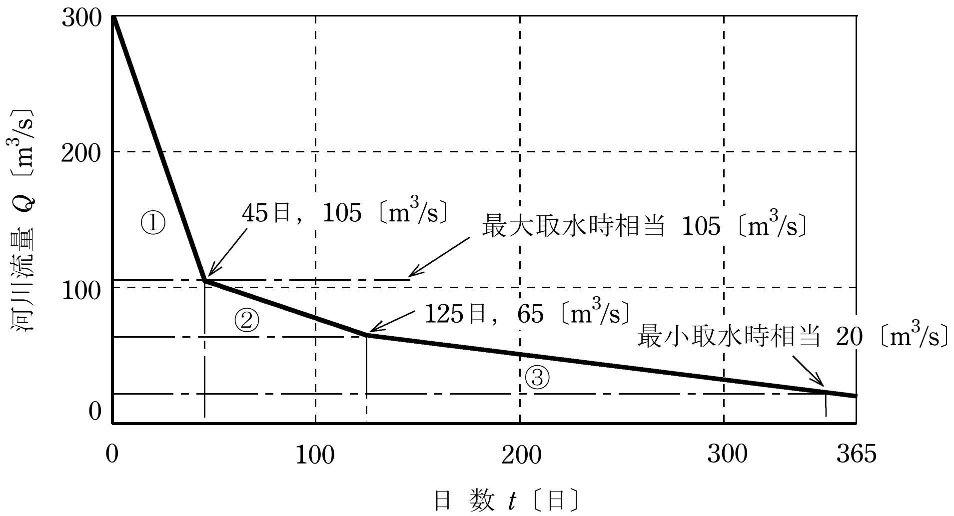


図 1　流況曲線

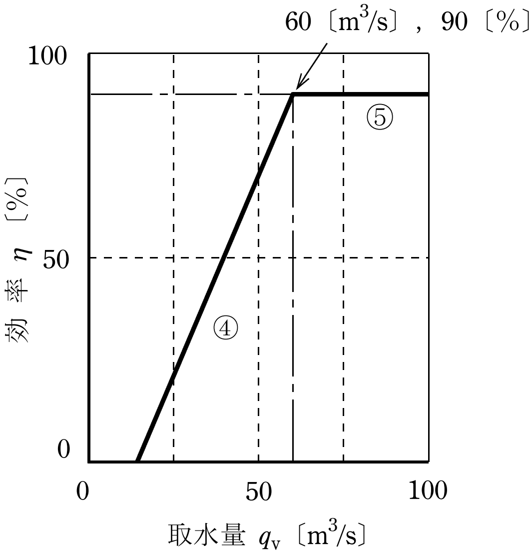


図 2　総合効率

(1)　最大取水量 100〔m^3/s〕以上が確保できる日数は，河川維持流量 5〔m^3/s〕を加味すると，Q ＝ 105 に該当する日数となり，

②式より　$105 = -0.5t + 127.5$　なので，

t ＝ 45〔日〕（①，③式とも条件外）…（答）

最小取水量 15〔m^3/s〕を確保できる日数は，河川維持流量 5〔m^3/s〕を加味すると，Q ＝ 20 に該当する日数となり，

③式より $20 = -0.2t + 90$　なので，

t ＝ 350〔日〕（①，②式とも条件外）…(答)

(2)　有効落差 H〔m〕での発電電力 P〔kW〕は，$P = g\rho q_v H \times \dfrac{\eta}{100} \times \dfrac{1}{1000}$ なので，

最大取水量で発電できる期間の発電電力 P_1 と発電電力量 W_1 は，

η には⑤式を適用し，$P_1 = 9.8 \times 1000 \times 100 \times 50 \times \dfrac{90}{100} \times \dfrac{1}{1000} = 44100$〔kW〕

$W_1 = P_1$〔kW〕$\times 24$〔h / 日〕$\times 45$〔日〕

$= 47628000$〔kW･h〕$\rightarrow$ 47600000〔kW･h〕…（答）

(3) a．最大取水量未満で発電できる期間の内，45 日～ 125 日の期間の河川流量を Q_2〔$\mathrm{m^3/s}$〕，そのときの発電電力を P_2〔kW〕，期間中の発電電力量を W_2〔kW·h〕とすると，②式から，$Q_2-5>-0.5\times125+127.5-5=60$ なので，η には⑤式を適用し，

$$P_2=9.8\times1000\times(Q_2-5)\times50\times\frac{90}{100}\times\frac{1}{1000}$$
$$=9.8\times1000\times[(-0.5t+127.5)-5]\times50\times\frac{90}{100}\times\frac{1}{1000}$$
$$=\frac{9.8\times1000\times(-0.5t+122.5)\times50\times90}{100\times1000}$$
$$=-220.5t+54\,022.5\ \text{〔kW〕}$$

$$W_2=\int_{45}^{125}P_2\mathrm{d}t\ \text{〔kW・日〕}\times24\ \text{〔h/日〕}$$
$$=\int_{45}^{125}(-220.5t+54\,022.5)\mathrm{d}t\times24$$
$$=\left[-2\,646t^2+1\,296\,540t\right]_{45}^{125}$$
$$=67\,737\,600\ \text{〔kW·h〕}$$

b．125 日～ 350 日の期間の河川流量を Q_3〔$\mathrm{m^3/s}$〕，そのときの発電電力を P_3〔kW〕，期間中の発電電力量を W_3〔kW·h〕とすると，③式から，$Q_3-5\leqq-0.2\times125+90-5=60$ なので，η には④式を適用し，

$$P_3=9.8\times1000\times(Q_3-5)\times50\times\frac{2\times(\mathrm{Q}_3-5)-30}{100}\times\frac{1}{1000}$$
$$=9.8\times1000\times[(-0.2t+90)-5]\times50\times\frac{\{2\times[(-0.2t+90)-5]-30\}}{100}\times\frac{1}{1000}$$
$$=\frac{9.8\times1000\times(-0.2t+85)\times50\times(-0.4t+140)}{100\times1000}$$
$$=0.392t^2-303.8t+58\,310\ \text{〔kW〕}$$

$$W_3=\int_{125}^{350}P_3\mathrm{d}t\ \text{〔kW・日〕}\times24\ \text{〔h/日〕}$$
$$=\int_{125}^{350}(0.392t^2-303.8t+58\,310)\mathrm{d}t\times24$$
$$=\left[3.136t^3-3\,645.6t^2+1\,399\,440t\right]_{125}^{350}$$
$$=53\,581\,500\ \text{〔kW·h〕}$$

ｃ．最大取水量未満での発電電力量は，上記ａとｂの合計なので，

$$W_2 + W_3 = 67\,737\,600 + 53\,581\,500$$
$$= 121\,319\,100 \ \rightarrow\ 121\,000\,000 \text{〔kW・h〕} \cdots \text{(答)}$$

(4) 以上より，年間発電電力量は，

$$W_1 + W_2 + W_3 = 47\,628\,000 + 121\,319\,100$$
$$= 168\,947\,100 \ \rightarrow\ 169\,000\,000 \text{〔kW・h〕} \cdots \text{(答)}$$

年間設備利用率は，最大出力で 365 日間運転した場合の発電電力量 W_0〔kW・h〕に対する比率なので，

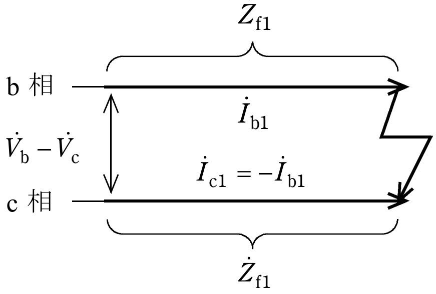
$W_0 = P_1 \times 365 \times 24 = 44\,100 \times 365 \times 24 = 386\,316\,000$〔kW・h〕から，

$$\text{年間設備利用率} = \frac{(W_1 + W_2 + W_3)}{W_0} \times 100 \text{〔\%〕}$$
$$= \frac{168\,947\,100}{386\,316\,000} \times 100 = 43.732 \ \rightarrow\ 43.7 \text{〔\%〕} \cdots \text{(答)}$$

〔問２の標準解答〕

(1)　$\dot{V}_{\mathrm{b}}-\dot{V}_{\mathrm{c}}$ は bc 相の線間電圧である。下図より，bc 相の線間電圧は以下の式となる。

$$\dot{V}_{\mathrm{b}}-\dot{V}_{\mathrm{c}}=\dot{Z}_{\mathrm{f1}}\cdot\dot{I}_{\mathrm{b1}}-\dot{Z}_{\mathrm{f1}}\cdot\dot{I}_{\mathrm{c1}}=\dot{Z}_{\mathrm{f1}}\cdot\left(\dot{I}_{\mathrm{b1}}-\dot{I}_{\mathrm{c1}}\right)=2\dot{Z}_{\mathrm{f1}}\cdot\dot{I}_{\mathrm{b1}}\qquad\left(\because\dot{I}_{\mathrm{c1}}=-\dot{I}_{\mathrm{b1}}\right)\quad\cdots(答)$$



したがって，距離リレーのみるインピーダンスは以下の式となる。

$$\frac{\dot{V}_{\mathrm{b}}-\dot{V}_{\mathrm{c}}}{\dot{I}_{\mathrm{b1}}-\dot{I}_{\mathrm{c1}}}=\frac{2\dot{Z}_{\mathrm{f1}}\cdot\dot{I}_{\mathrm{b1}}}{2\dot{I}_{\mathrm{b1}}}=\dot{Z}_{\mathrm{f1}}\qquad\left(\because\dot{I}_{\mathrm{c1}}=-\dot{I}_{\mathrm{b1}}\right)\quad\cdots(答)$$

(2)　(1) と同様に考えると bc 相の線間電圧は以下の式となる。

$$\begin{aligned}\dot{V}_{\mathrm{b}}-\dot{V}_{\mathrm{c}}&=\dot{Z}_{2}\cdot\left(\dot{I}_{\mathrm{b1}}-\dot{I}_{\mathrm{c1}}\right)+\dot{Z}_{\mathrm{f2}}\cdot\left[\left(\dot{I}_{\mathrm{b1}}-\dot{I}_{\mathrm{c1}}\right)+\left(\dot{I}_{\mathrm{b2}}-\dot{I}_{\mathrm{c2}}\right)\right]\\&=2\dot{Z}_{2}\cdot\dot{I}_{\mathrm{b1}}+2\dot{Z}_{\mathrm{f2}}\cdot\left(\dot{I}_{\mathrm{b1}}+\dot{I}_{\mathrm{b2}}\right)\\&\qquad\qquad\left(\because\dot{I}_{\mathrm{c1}}=-\dot{I}_{\mathrm{b1}},\ \dot{I}_{\mathrm{c2}}=-\dot{I}_{\mathrm{b2}}\right)\quad\cdots(答)\end{aligned}$$

したがって，距離リレーのみるインピーダンスは以下の式となる。

$$\begin{aligned}\frac{\dot{V}_{\mathrm{b}}-\dot{V}_{\mathrm{c}}}{\dot{I}_{\mathrm{b1}}-\dot{I}_{\mathrm{c1}}}&=\frac{2\dot{Z}_{2}\cdot\dot{I}_{\mathrm{b1}}+2\dot{Z}_{\mathrm{f2}}\cdot\left(\dot{I}_{\mathrm{b1}}+\dot{I}_{\mathrm{b2}}\right)}{2\dot{I}_{\mathrm{b1}}}\qquad\left(\because\dot{I}_{\mathrm{c1}}=-\dot{I}_{\mathrm{b1}}\right)\\&=\dot{Z}_{2}+\dot{Z}_{\mathrm{f2}}+\dot{Z}_{\mathrm{f2}}\cdot\frac{\dot{I}_{\mathrm{b2}}}{\dot{I}_{\mathrm{b1}}}\end{aligned}$$

線路のインピーダンス比より，

$$\dot{I}_{\mathrm{b1}}:\dot{I}_{\mathrm{b2}}=\left(\dot{Z}_{3}+\dot{Z}_{4}\right):\dot{Z}_{2}$$

なので，

$$\frac{\dot{I}_{\mathrm{b2}}}{\dot{I}_{\mathrm{b1}}}=\frac{\dot{Z}_{2}}{\dot{Z}_{3}+\dot{Z}_{4}}$$

となるため，以下のとおりとなる。

$$\frac{\dot{V}_{\mathrm{b}}-\dot{V}_{\mathrm{c}}}{\dot{I}_{\mathrm{b1}}-\dot{I}_{\mathrm{c1}}}=\dot{Z}_{2}+\dot{Z}_{\mathrm{f2}}+\dot{Z}_{\mathrm{f2}}\cdot\frac{\dot{Z}_{2}}{\dot{Z}_{3}+\dot{Z}_{4}}\qquad\cdots\cdots\cdots\cdots\quad①\quad\cdots(答)$$

(3) (2)の①式に問の諸元を代入する。

$$\frac{\dot{V}_{\mathrm{b}}-\dot{V}_{\mathrm{c}}}{\dot{I}_{\mathrm{b1}}-\dot{I}_{\mathrm{c1}}}=\dot{Z}_2+\dot{Z}_{\mathrm{f2}}+\dot{Z}_{\mathrm{f2}}\cdot\frac{\dot{Z}_2}{\dot{Z}_3+\dot{Z}_4}$$

$$=\mathrm{j}3.5+\mathrm{j}2.5+\mathrm{j}2.5\cdot\frac{\mathrm{j}3.5}{\mathrm{j}2.0+\mathrm{j}1.0}$$

$$=\mathrm{j}8.92\,〔\Omega〕$$

よって，

$$\left|\frac{\dot{V}_{\mathrm{b}}-\dot{V}_{\mathrm{c}}}{\dot{I}_{\mathrm{b1}}-\dot{I}_{\mathrm{c1}}}\right|=8.92\,〔\Omega〕$$

この値は一次側換算値であるため，二次側の値は以下のようになる。

$$8.92\cdot\left(\frac{110}{77000}\Big/\frac{5}{600}\right)=1.53\,〔\Omega〕\leqq 5.0\,〔\Omega〕\quad\cdots(\text{答})$$

したがって，この距離リレーは整定値 5〔Ω〕以下なので，動作域にある。

…(答)

〔問３の標準解答〕

(1) 直列機器としての電流協調：

① 定常及び過負荷運転時の電流協調：

遮断器の定常運転中に連続的に流れる電流の許容値は，「定格電流」で表される。例えば，500〔kV〕や 275〔kV〕の送電線用遮断器では 2〔kA〕から 8〔kA〕である。

過負荷時の遮断器の電流容量は，直前の通過電流が定格電流以下であれば，短時間の過負荷は可能である。この際，遮断器の温度上昇の時定数は，油入変圧器に比べると小さく，直列機器として許容できる過負荷電流及び時間は，遮断器で決まるので，遮断器の定格電流は，油入変圧器などの過負荷運用の支障にならないように選定することが必要である。

② 系統事故時の電流協調：

系統の短絡や地絡事故時に流れる事故電流の許容値は，遮断器などの直列機器では「定格短時間耐電流（定格短時間電流でも正解とする）」で表される。事故継続時間中，閉路している遮断器も含めて，直列機器は定格短時間耐電流に耐えなければならない。

定格短時間耐電流は，定格遮断電流と同じ値が標準として規定される。例えば，500〔kV〕や 275〔kV〕では，50〔kA〕，63〔kA〕が多く採用されている。また，継続時間は，最終段保護による事故除去時間も考慮し，2 秒と規定している。

特に直接接地系では，地絡や短絡事故時には事故電流が大きく，変圧器巻線などへ大きな電磁力が発生することから，事故除去が遅れると過熱損傷の恐れがある。このため，保護・制御装置の信頼度向上を図り，遮断器による確実かつ早期の事故除去により，事故の局限化を図る必要がある。

(2) 事故電流の遮断現象：

近距離線路故障遮断（SLF）は，遮断器に近く，およそ数〔km〕から 10〔km〕位までの範囲の距離で起こった線路事故（通常は１線地絡事故を対象）時の電流を遮断する現象である。

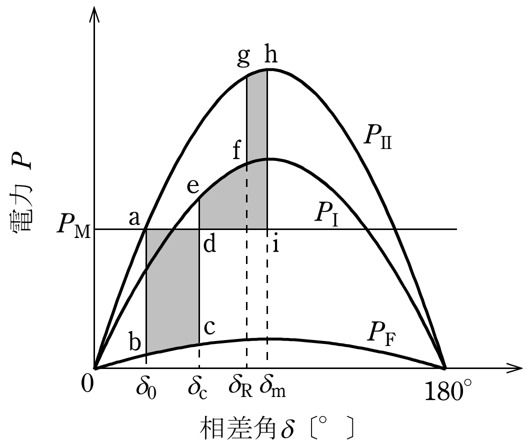
近距離線路故障電流遮断時には，電流遮断後の過渡回復電圧は端子短絡故障（BTF)に比べ低いが，開放状態にある遮断器線路側端子と地絡点との間の線路上で往復反射現象を起こすため，遮断器極間には電源電圧のほかに，この往復反射現象による三角波形の電圧が印加される。このようにして発生した過渡回復電圧の，特に初期の部分の立ち上がりが急峻であり，遮断器極間の絶縁回復速度との競合という面から見て，遮断条件は非常に厳しいものとなる。

(3) 送電線事故時の系統安定度の向上：

2 回線送電線の 1 回線三相地絡事故時における高速度再閉路実施時の系統安定度向上の例を示す。図に示す電力相差角曲線で，P_{I} は 1 回線送電中，P_{II} は 2 回線送電中，P_{F} は事故発生中の送電電力曲線を表す。

電力 P_{M} を送電し，電気角 δ_0 の交点 a で運転されている平常時から，事故が発生すると，送電電力は瞬時に点 b へ変化し，さらに発電機が加速することにより，相差角 δ は増加する。相差角 δ_{c} のところで事故回線の両端の遮断器が遮断したとすると，送電電力は点 e に変化する。さらに相差角 δ は増加するが，相差角 δ_{R} で遮断器が再閉路すれば電力曲線は再び P_{II} となって点 g に変化し，δ_{m} まで加速後，減速して点 a に戻り安定状態になる。

電力相差角曲線においては，事故除去されるまでに動いた δ_{c} までに系統に与えられる加速エネルギー分が面積 a b c d で表され，事故除去後の減速エネルギーが d e f g h i に相当する。



電力相差角曲線

〔問４の標準解答〕

（1） 1 回線 100〔km〕であるから

L=80〔mH〕，C=1〔μF〕つまり $\dfrac{C}{2}=0.5$〔μF〕

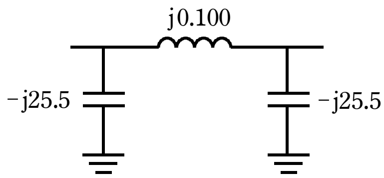
周波数は 50〔Hz〕なので，$\omega=2\pi\times 50=314$〔rad/s〕となりインピーダンスは次のとおり。

$X_{\mathrm{L}}=314\times 0.08=25.12$〔Ω〕　$X_{\mathrm{C}}=\dfrac{1}{314\times 0.5\times 10^{-6}}=6369.4267$〔Ω〕（片端分）

単位法における基準インピーダンスは，$\dfrac{(500\times 10^{3})^{2}}{1000\times 10^{6}}=\dfrac{(5\times 10^{2})^{2}}{1000}=250$〔Ω〕

であるから単位法表現では　$X_{\mathrm{L}}=0.10048$〔p.u.〕　$X_{\mathrm{C}}=25.4777068$〔p.u.〕

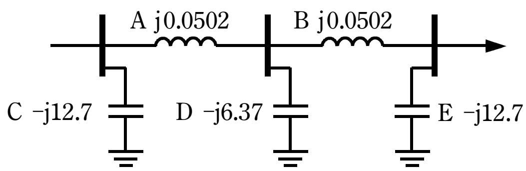
であり等価回路は図のとおり



…（答）

図１　送電線 1 回線 1 区間（100〔km〕）当たりの π 形等価回路

また，全系統を表現すると 2 回線であることも考慮すると，調相設備分を除いて次のとおり。



…（答）

図２　送電系統の等価回路（全てインピーダンスで表現）

(2) 受電端電圧を位相基準に選ぶと，負荷の複素電力が 0.8 ＋ j0.6〔p.u.〕であることにより負荷電流は $\dot{I}_{\mathrm{L}} = 0.8 - \mathrm{j}0.6$ である。受電端調相設備のサセプタンスを B とすると（「送電系統全体」図中 E のサセプタンスも含む）ここに流れる電流は jB と表せ(1)の「送電系統全体の等価回路図」の B の部分を流れる電流は $0.8 + \mathrm{j}(B - 0.6)$ である。よって中間開閉所電圧は

$$1.0 + \mathrm{j}\,0.05024\left[0.8 + \mathrm{j}(B - 0.6)\right] = 1.030144 + \mathrm{j}\,0.040192 - 0.05024 \times B \qquad \cdots ①$$

この電圧によって中間開閉所部の C 分に流れる全電流は，そのサセプタンスを B' として（ B' に充電容量分も含む）

$$\mathrm{j}\,B'(1.030144 - 0.05024 \times B + \mathrm{j}\,0.040192)$$

であるから「送電系統全体の等価回路図」の A 部を流れる電流は

$$\begin{aligned} &0.8 + \mathrm{j}(B - 0.6) - 0.040192B' + \mathrm{j}(1.030144 - 0.05024 \times B)B' \\ &= (0.8 - 0.040192B') + \mathrm{j}(B - 0.6 + 1.030144B' - 0.05024 \times BB') \end{aligned}$$

よって送電端電圧は

$$\begin{aligned} &(1.030144 - 0.05024 \times B) + \mathrm{j}\,0.040192 \\ &\qquad + \mathrm{j}\,0.05024\left[(0.8 - 0.040192B') + \mathrm{j}(B - 0.6 + 1.030144B' - 0.05024 \times BB')\right] \end{aligned} \qquad \cdots ②$$

まず，中間開閉所電圧が 1.02〔p.u.〕ということにより，①を式を用いて

$$(1.030144 - 0.05024 \times B)^2 + 0.040192^2 = 1.02^2$$

すなわち

$$1.06119666 - 0.10350887B + 0.0025240576 \times B^2 + 0.001615397 = 1.0404$$

$$0.0025240576 \times B^2 - 0.10350887 \times B + 0.022412057 = 0$$

$$B^2 - 41.008917546B + 8.8793762076 = 0$$

よって

$$\begin{aligned} B &= \frac{41.008917546 \pm \sqrt{41.008917546^2 - 4 \times 8.8793762076}}{2} \\ &= \frac{41.0089175 - 40.573543}{2} \\ &= 0.217687 \end{aligned}$$

（複合は－を用いる。＋は不安定根のため不採用。）

これを②式に代入して

$$1.0192074+\mathrm{j}0.040192+\mathrm{j}0.05024\times\left[(0.8-0.040192B')+\mathrm{j}(-0.382313+1.030144B'-0.0109366B')\right]$$
$$=1.0192074+\mathrm{j}0.040192+\mathrm{j}0.05024\times\left[(0.8-0.040192B')+\mathrm{j}(1.0192074B'-0.382313)\right]$$
$$=1.0192074+\mathrm{j}0.040192+\mathrm{j}(0.040192-0.002019246B')-(0.05120498B'-0.0192074)$$
$$=(1.0384148-0.05120498B')+\mathrm{j}(0.080384-0.002019246B')$$

この大きさが 1.03〔p.u.〕であるから

$$(1.0384148-0.05120498B')^2+(0.080384-0.002019246B')^2=1.03^2=1.0609$$

すなわち

$$0.0026260273\times(B')^2-0.10666865\times(B')+1.08476683=1.0609$$

つまり

$$(B')^2-40.6197795(B')+9.088589=0$$

これを解くと，$B'=\dfrac{40.6197795\pm\sqrt{40.6197795^2-4\times9.088589}}{2}=0.224994$

（複合は－を用いる。＋は不安定根のため不採用。）

以上より，送電線の対地静電容量分を差し引けば，

受電端の調相設備容量は，$0.217687(※)-\dfrac{1}{12.73885}=0.139187$〔p.u.〕

つまり 139〔MV･A〕（進み）となる。…（答）

中間開閉所の調相設備容量は，$0.224994-\dfrac{1}{6.36943}=0.067994$〔p.u.〕

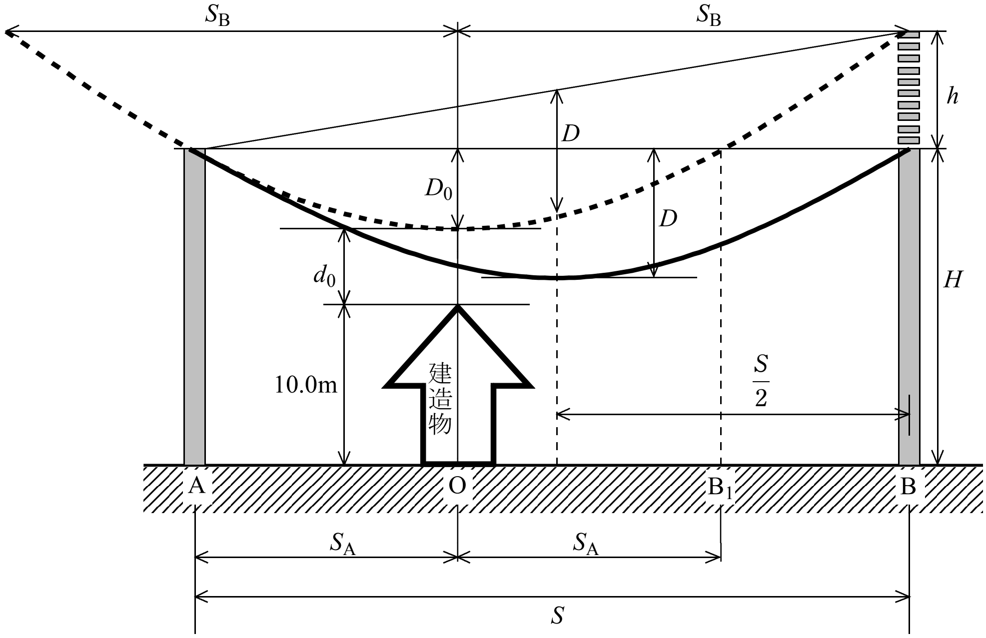
つまり 68.0〔MV･A〕（進み）。…（答）

※　誤記載により修正

誤）0.2187687

正）0.217687

〔問５の標準解答〕



(1) 図のように，B_1 をとると，AB_1 の水平たるみの D_0 は

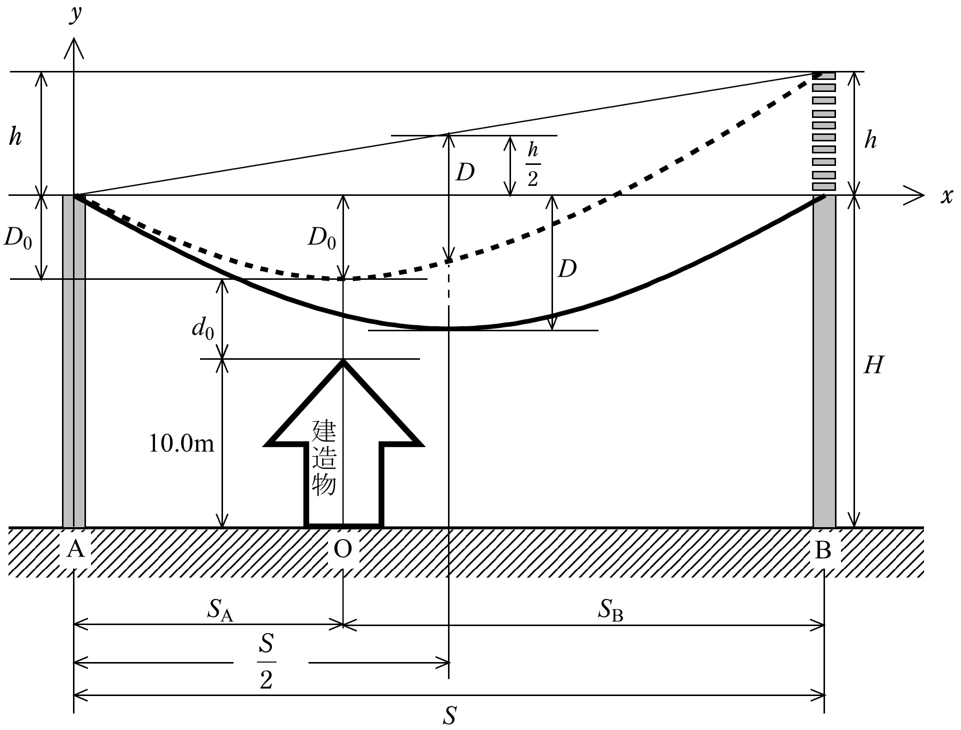
$$D_0 = \frac{W(2S_A)^2}{8T} = \frac{W}{T}\frac{{S_A}^2}{2}$$

$S_A = \frac{S}{2}\left(1 - \frac{h}{4D}\right)$ と, $D = \frac{WS^2}{8T}$ を変形した $\frac{W}{T} = \frac{8D}{S^2}$ を代入して,

$$D_0 = \frac{W}{T}\frac{{S_A}^2}{2} = \frac{8D}{S^2}\frac{\left[\frac{S}{2}\left(1 - \frac{h}{4D}\right)\right]^2}{2} = D\left(1 - \frac{h}{4D}\right)^2$$

$$D_0 = D\left(1 - \frac{h}{4D}\right)^2 \quad \cdots（答）$$

【別解】



（1）図のように，A 側の電線支持点を原点として xy 座標をとると，点線で示される放物線は

$$y=\frac{4D}{S^2}x^2-\frac{4D}{S}\left(1-\frac{h}{4D}\right)x$$

$x=S_A=\dfrac{S}{2}\left(1-\dfrac{h}{4D}\right)$を代入して求めた$y$が$-D_0$であるので

$$D_0=D\left(1-\frac{h}{4D}\right)^2$$ …（答）

(2) 最低嵩上げ量 h_0 時の電線水平たるみ D_0 は，

$$D_0 = D\left(1 - \frac{h_0}{4D}\right)^2$$ である。

また，電線の最低地上高となる地点 O では図のように，H=D_0+d_0+10.0 であるから，

これに $D_0 = D\left(1 - \frac{h_0}{4D}\right)^2$ を代入して，

$$H = D\left(1 - \frac{h_0}{4D}\right)^2 + d_0 + 10.0$$

d_0 =4.80 と H = 16.0，D = 3.80 を代入して，

$$16.0 = 3.80\left(1 - \frac{h_0}{4 \times 3.80}\right)^2 + 14.80$$

$$1.20 = 3.80\left(1 - \frac{h_0}{4 \times 3.80}\right)^2$$

$$\frac{h_0}{15.20} = 1 \pm \sqrt{\frac{1.20}{3.80}}$$

$$h_0 = \left(1 \pm \sqrt{\frac{1.20}{3.80}}\right) \times 15.20$$

ここで h_0 は最低嵩上げ量であるので小さい値をとり

$$h_0 = \left(1 - \sqrt{\frac{1.20}{3.80}}\right) \times 15.20$$

=0.4380 × 15.20

= 6 .66〔m〕…（答）

(3) 特別高圧架空電線と第 2 次接近状態にある建造物の主要な上部造営材（屋根等）の適合条件は，電気設備技術基準の解釈第 97 条より

・不燃性又は自消性のある難燃性の建築材料により造られたもの

・金属製の部分に，D 種接地工事が施されたもの

〔問６の標準解答〕

(1) 安定度及び電圧安定性

ループ系統では，

・送電ルートが複数あるため，安定度，電圧安定性が高く，送電可能電力（送電能力）が大きい。

放射状系統では，

・送電ルートが一つしかないため，安定度，電圧安定性はループ系統ほど高くなく，送電可能電力（送電能力）も大きくない。

(2) 信頼度

ループ系統では，

・片方のルートが使えなくなっても，残りのルートで送電でき，信頼度が高い。

・保護システムが適切でないと，事故が系統全体に波及し，広域停電に至る可能性がある。

放射状系統では，

・ルート断により下位系統への送電が完全にできなくなるので，ループ系統ほど信頼度は高くない。

・回線数を増やすことでルート断を防ぐ，あるいは，構成上はループ系統とし，常時運用は放射状系統で事故時に系統切換えを行うことで，信頼度低下を抑えることができる。

・事故が系統全体に波及することはない。

(3) 潮流運用

ループ系統では，

・ループ間の潮流を制御することが難しい。

・片方のループが使えなくなったとき，潮流分布が大きく変化する。

放射状系統では，

・潮流制御の必要がない。

・事故時を含み，潮流状況の把握が容易である。

(4) 短絡電流

ループ系統では,

・短絡電流が大きくなりやすく，上位定格の遮断器の採用，あるいは，高インピーダンス機器，限流リアクトルなどの採用，上位電圧，母線分割の採用による系統分割などの抑制策が必要となることがある。

放射状系統では,

・短絡電流はループ系統ほど大きくならない。

＜機械・制御科目＞

〔問１の標準解答〕

(1) 滑り s のときのトルクは

$$T=\frac{3}{\omega_0}\frac{r_2}{s}I_2{}^2=\frac{3}{\omega_0}\frac{r_2}{s}\frac{E_2{}^2}{\left(\frac{r_2}{s}\right)^2+x_2{}^2}\quad\cdots\cdots①$$

始動時は $s=1$ であるから

$$T_{\mathrm{s}}=\frac{3}{\omega_0}r_2\frac{E_2{}^2}{r_2{}^2+x_2{}^2}\quad\cdots\cdots②$$

…（答）

(2) T_{s} が最大となるときは，$\frac{\partial T_{\mathrm{s}}}{\partial r_2}=0$ であるから

$$\frac{\partial T_{\mathrm{s}}}{\partial r_2}=\frac{3E_2{}^2}{\omega_0}\left[\frac{1}{r_2{}^2+x_2{}^2}+r_2\frac{-2r_2}{(r_2{}^2+x_2{}^2)^2}\right]=\frac{3E_2{}^2}{\omega_0}\frac{r_2{}^2+x_2{}^2-2r_2{}^2}{(r_2{}^2+x_2{}^2)^2}$$

$$=\frac{3E_2{}^2}{\omega_0}\frac{x_2{}^2-r_2{}^2}{(r_2{}^2+x_2{}^2)^2}=0\quad\cdots\cdots③$$

したがって，$r_2>0$ を考慮すると

$$r_2=x_2\quad\cdots\cdots④$$

…（答）

となる。また，④を①に代入すると

$$T_{\mathrm{sm}}=\frac{3E_2{}^2}{\omega_0}\frac{r_2}{r_2{}^2+x_2{}^2}=\frac{3E_2{}^2}{\omega_0}\frac{1}{2x_2}\quad\cdots\cdots⑤$$

を得る。 …（答）

(3) 滑り s のときのトルク T は①式であり，$r_2=x_2$ とすれば

$$T=\frac{3}{\omega_0}\frac{r_2}{s}\frac{E_2{}^2}{\left(\frac{r_2}{s}\right)^2+x_2{}^2}=\frac{3E_2{}^2}{\omega_0}\frac{x_2}{s}\frac{s^2}{x_2{}^2}\frac{1}{1+s^2}=\frac{3E_2{}^2}{\omega_0}\frac{1}{x_2}\frac{s}{1+s^2}\quad\cdots⑥$$

したがって，⑤と⑥から

$$\frac{T}{T_{\mathrm{sm}}}=2x_2\frac{1}{x_2}\frac{s}{1+s^2}=\frac{2s}{1+s^2}\quad\cdots\cdots⑦$$

となり

$$T=\frac{2s}{1+s^2}T_{\mathrm{sm}}\quad\cdots（答）$$

となる。

〔問２の標準解答〕

（1）

ａ．V_{L}：母線電圧（線間電圧）とする。

負荷電力

$$P_{\mathrm{L}}=\sqrt{3}V_{\mathrm{L}}I_{\mathrm{L}}\cos\phi_{\mathrm{L}}\times10^{-3}=\sqrt{3}\times6\,600\times I_{\mathrm{L}}\times0.9\times10^{-3}=12\,000\text{〔kW〕}$$

$$I_{\mathrm{L}}=\frac{12\,000}{0.9\times\sqrt{3}\times6\,600\times10^{-3}}=1166.4\ \rightarrow\ 1170\text{〔A〕}\ \cdots\text{（答）}$$

Ａ機負荷電力

$$P_{\mathrm{A}}=\sqrt{3}V_{\mathrm{L}}I_{\mathrm{A}}\cos\phi_{\mathrm{A}}\times10^{-3}=\sqrt{3}\times6\,600\times I_{\mathrm{A}}\times0.95\times10^{-3}$$
$$=\frac{12\,000}{2}=6\,000\text{〔kW〕}$$

$$I_{\mathrm{A}}=\frac{6\,000}{0.95\times\sqrt{3}\times6\,600\times10^{-3}}=552.49\ \rightarrow\ 552\text{〔A〕}\cdots\text{（答）}$$

Ｂ機負荷電力

$$P_{\mathrm{B}}=\sqrt{3}V_{\mathrm{L}}I_{\mathrm{B}}\cos\phi_{\mathrm{B}}\times10^{-3}=\sqrt{3}\times6\,600\times I_{\mathrm{B}}\times\cos\phi_{\mathrm{B}}\times10^{-3}$$
$$=\frac{12\,000}{2}=6\,000\text{〔kW〕}$$

$$I_{\mathrm{B}}\cos\phi_{\mathrm{B}}=\frac{6\,000}{\sqrt{3}\times6\,600\times10^{-3}}=524.86\text{〔A〕}$$

一方，無効分の電流は次の式となる。

$$I_{\mathrm{A}}\sin\phi_{\mathrm{A}}+I_{\mathrm{B}}\sin\phi_{\mathrm{B}}=I_{\mathrm{L}}\sin\phi_{\mathrm{L}}$$

$$\begin{aligned}I_{\mathrm{B}}\sin\phi_{\mathrm{B}}&=I_{\mathrm{L}}\sin\phi_{\mathrm{L}}-I_{\mathrm{A}}\sin\phi_{\mathrm{A}}\\&=I_{\mathrm{L}}\sqrt{1-\cos^2\phi_{\mathrm{L}}}-I_{\mathrm{A}}\sqrt{1-\cos^2\phi_{\mathrm{A}}}\\&=1166.4\times\sqrt{1-0.9^2}-552.49\times\sqrt{1-0.95^2}\\&=335.91\text{〔A〕}\end{aligned}$$

$$I_{\mathrm{B}}=\sqrt{(I_{\mathrm{B}}\cos\phi_{\mathrm{B}})^2+(I_{\mathrm{B}}\sin\phi_{\mathrm{B}})^2}$$
$$=\sqrt{524.86^2+335.91^2}=623.15\ \rightarrow\ 623\text{〔A〕}\ \cdots\text{（答）}$$

$$\cos\phi_B = \frac{I_B\cos\phi_B}{I_B}$$

$$= \frac{524.86}{623.15} = 0.84227 \;\rightarrow\; 0.842 \quad \cdots(\text{答})$$

b．A 機定格電流 $= \dfrac{8\,000}{\sqrt{3}\times 6\,600\times 10^{-3}} = 699.82$〔A〕

A 機の基準インピーダンス $= \dfrac{6\,600}{\sqrt{3}\times 699.82} = 5.4450$〔Ω〕

$X_A = 1.7\times 5.4450 = 9.2565 \rightarrow 9.26$〔Ω〕 $\cdots$(答)

B 機定格電流 $= \dfrac{10\,000}{\sqrt{3}\times 6\,600\times 10^{-3}} = 874.77$〔A〕

B 機の基準インピーダンス $= \dfrac{6\,600}{\sqrt{3}\times 874.77} = 4.3560$〔Ω〕

$X_B = 1.7\times 4.3560 = 7.4052 \rightarrow 7.41$〔Ω〕 $\cdots$(答)

母線電圧（相電圧） $V_{LP} = \dfrac{6\,600}{\sqrt{3}} = 3810.5$〔V〕として，

$I_A X_A \cos\phi_A = 552.49\times 9.2565\times 0.95 = 4\,858.4$

$V_{LP} + I_A X_A \sin\phi_A = 3\,810.5 + 552.49\times 9.2565\times 0.31225 = 5\,407.4$

$$E_A = \sqrt{(I_A X_A\cos\phi_A)^2 + (V_{LP} + I_A X_A\sin\phi_A)^2}$$

$$= \sqrt{4\,858.4^2 + 5\,407.4^2} = 7\,269.4 \rightarrow 7\,270\text{〔V〕}\cdots(\text{答})$$

$I_B X_B \cos\phi_B = 623.15\times 7.4052\times 0.84227 = 3\,886.7$

$V_{LP} + I_B X_B \sin\phi_B = 3\,810.5 + 623.15\times 7.4052\times 0.53906 = 6\,298.0$

$$E_B = \sqrt{(I_B X_B\cos\phi_B)^2 + (V_{LP} + I_B X_B\sin\phi_B)^2}$$

$$= \sqrt{3\,886.7^2 + 6\,298.0^2} = 7\,400.8 \rightarrow 7\,400\text{〔V〕}\cdots(\text{答})$$

(2) A 機と B 機の誘導起電力が同位相であり，$\delta_{\mathrm{A}}=\delta_{\mathrm{B}}=\delta$ とする。

A 機の出力 $P_{\mathrm{A}}=\dfrac{3E_{\mathrm{A}}V_{\mathrm{LP}}\sin\delta}{X_{\mathrm{A}}}\times 10^{-3}$

B 機の出力 $P_{\mathrm{B}}=\dfrac{3E_{\mathrm{B}}V_{\mathrm{LP}}\sin\delta}{X_{\mathrm{B}}}\times 10^{-3}$

$$P_{\mathrm{A}}=\frac{3\times 7\,269.4\times 3\,810.5\times\sin\delta}{9.2565}\times 10^{-3}=8\,977.5\times\sin\delta$$

$$P_{\mathrm{B}}=\frac{3\times 7\,400.8\times 3\,810.5\times\sin\delta}{7.4052}\times 10^{-3}=11\,425\times\sin\delta$$

$$P_{\mathrm{L}}=P_{\mathrm{A}}+P_{\mathrm{B}}=(8\,977.5+11\,425)\times\sin\delta=20\,403\times\sin\delta=15\,000\ \text{〔kW〕}$$

$$\sin\delta=\frac{15\,000}{20\,403}=0.73519\rightarrow 0.735 \quad \cdots(\text{答})$$

$$P_{\mathrm{A}}=8\,977.5\times 0.73519=6\,600.1\rightarrow 6\,600\ \text{〔kW〕}\quad \cdots(\text{答})$$

$$P_{\mathrm{B}}=11\,425\times 0.73519=8\,399.5\rightarrow 8\,400\ \text{〔kW〕}\quad \cdots(\text{答})$$

〔問３の標準解答〕

（1） 転流は，二つの相の X を介して行われる（転流リアクタンスは $2X$ となる）。

転流電圧は $\sqrt{2}V_L \sin\theta$ であり，I_d は一定なので，次の式が成り立つ。

$$2X\frac{\mathrm{d}i_c}{\mathrm{d}\theta}=\sqrt{2}V_L\sin\theta$$

積分して i_c を求める。$\theta=\alpha$ のときに $i_c=0$ であることから

$$i_c=\frac{V_L}{\sqrt{2}X}(\cos\alpha-\cos\theta)$$

$\theta=\alpha+\mu$ で $i_c=I_d$ となることから

$$I_d=\frac{V_L}{\sqrt{2}X}\left[\cos\alpha-\cos(\alpha+\mu)\right]$$

$$\therefore\cos(\alpha+\mu)=\cos\alpha-\frac{\sqrt{2}X}{V_L}I_d \quad\cdots(\text{答})$$

（2） 重なり角の間，直流電圧は転流電圧の $\frac{1}{2}$，$\frac{\sqrt{2}V_L}{2}\sin\theta$ だけ低下する。0 ～ $\frac{\pi}{3}$〔rad〕の期間における電圧低下の平均値 V_{dd} は

$$V_{dd}=\frac{3}{\pi}\int_{\alpha}^{\alpha+\mu}\frac{\sqrt{2}V_L}{2}\sin\theta\,\mathrm{d}\theta=\frac{3}{\pi}\frac{\sqrt{2}V_L}{2}\left[\cos\alpha-\cos(\alpha+\mu)\right]$$

したがって直流電圧は

$$V_d=\frac{3\sqrt{2}}{\pi}V_L\cos\alpha-V_{dd}=\frac{3\sqrt{2}}{\pi}V_L\frac{\cos\alpha+\cos(\alpha+\mu)}{2}$$

(1)の結果を代入して

$$V_d=\frac{3\sqrt{2}}{\pi}V_L\cos\alpha-\frac{3X}{\pi}I_d \quad\cdots(\text{答})$$

(3)

a．変換装置 1 の入力基本波皮相電力は，電圧が V_{L}〔V〕で電流が

$I_{\mathrm{L}}=\dfrac{\sqrt{6}}{\pi}I_{\mathrm{d}}$〔A〕であるので

$$S_1=\sqrt{3}V_{\mathrm{L}}\frac{\sqrt{6}}{\pi}I_{\mathrm{d}}=\frac{3\sqrt{2}}{\pi}V_{\mathrm{L}}I_{\mathrm{d}}=500\times1=500\text{〔kV·A〕}$$

である。入力有効電力は，損失がないことから出力電力に等しく

$P_1=400\times1=400$〔kW〕 …(答)

である。入力の基本波無効電力は

$Q_1=\sqrt{S_1{}^2-P_1{}^2}=\sqrt{500^2-400^2}=300$〔kvar〕（遅れ）…(答)

である。

同様に変換装置 2 では，入力有効電力は $P_2=-300$〔kW〕，入力の基本波無効電力は $Q_2=400$〔kvar〕（遅れ）である。 …(答)

交流入力における合計の入力有効電力は $P=P_1+P_2=100$〔kW〕，基本波無効電力は $Q=Q_1+Q_2=700$〔kvar〕である。 …(答)

b．全体での基本波皮相電力は

$S=\sqrt{P^2+Q^2}=\sqrt{100^2+700^2}=707.11$〔kV·A〕

したがって基本波力率は，

$\cos\phi_1=\dfrac{P}{S}=\dfrac{100}{707.11}=0.14142\to0.141$ ･･･(答)

〔問４の標準解答〕

（1） 図２より，

$$\dot{x}_1(t) = x_2(t)$$

$$\dot{x}_2(t) = -2x_1(t) - 4x_2(t) + u(t)$$

$$y(t) = x_1(t)$$

と表せるので，状態空間表現（$\boldsymbol{A}$, $\boldsymbol{b}$, $\boldsymbol{c}^{\mathrm{T}}$）で表現すると

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -2 & -4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u(t)$$

$$y(t) = [1 \quad 0] \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix}$$

となり，$\boldsymbol{A}$, $\boldsymbol{b}$, $\boldsymbol{c}^{\mathrm{T}}$ は次式で与えられる。

$$\boldsymbol{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -2 & -4 \end{bmatrix}, \boldsymbol{b} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \boldsymbol{c}^{\mathrm{T}} = [1 \quad 0] \quad \cdots (\text{答})$$

次に可制御性及び可観測性について調べると

$$\mathrm{rank}\begin{bmatrix} \boldsymbol{b} & \boldsymbol{A}\boldsymbol{b} \end{bmatrix} = \mathrm{rank}\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & -4 \end{bmatrix} = 2 \quad \rightarrow \quad \text{可制御である。} \quad \cdots (\text{答})$$

$$\mathrm{rank}\begin{bmatrix} \boldsymbol{c}^{\mathrm{T}} \\ \boldsymbol{c}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{A} \end{bmatrix} = \mathrm{rank}\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = 2 \quad \rightarrow \quad \text{可観測である。} \quad \cdots (\text{答})$$

（2） 制御入力

$$u(t) = -\boldsymbol{f}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{x}(t) + v(t) = -f_1 x_1(t) - f_2 x_2(t) + v(t)$$

を①式へ代入すると

$$\dot{\boldsymbol{x}}(t) = \boldsymbol{A}\boldsymbol{x}(t) - \boldsymbol{b}\boldsymbol{f}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{x}(t) + \boldsymbol{b}\,v(t) = [\boldsymbol{A} - \boldsymbol{b}\boldsymbol{f}^{\mathrm{T}}]\ \boldsymbol{x}(t) + \boldsymbol{b}\,v(t)$$

となる。$\boldsymbol{A} - \boldsymbol{b}\boldsymbol{f}^{\mathrm{T}}$ を求めると

$$\boldsymbol{A} - \boldsymbol{b}\boldsymbol{f}^{\mathrm{T}} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -2 & -4 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} [f_1 \quad f_2] = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -2 - f_1 & -4 - f_2 \end{bmatrix}$$

となり，$\boldsymbol{A} - \boldsymbol{b}\boldsymbol{f}^{\mathrm{T}}$ の特性多項式を計算すると

$$\det\left[s\boldsymbol{I}-(\boldsymbol{A}-\boldsymbol{b}\boldsymbol{f}^{\mathrm{T}})\right]=\det\begin{bmatrix} s & -1 \\ 2+f_1 & s+4+f_2 \end{bmatrix}$$
$$=s^2+(f_2+4)s+f_1+2 \qquad \cdots(答)$$

となる。

ここで，特性根 $-5\pm \mathrm{j}10$ をもつ特性方程式は

$$(s+5+\mathrm{j}10)(s+5-\mathrm{j}10)=s^2+10s+125$$

となるので，上式の係数比較を行うことにより，

$f_1=123$，$f_2=6$ …(答)

が得られる。

(3) ブロック(B)の入力 $v(t)$ から出力 $y(t)$ までの伝達関数を求めると

$$G_{\mathrm{f}}(s)=\boldsymbol{c}^{\mathrm{T}}\left[s\boldsymbol{I}-(\boldsymbol{A}-\boldsymbol{b}\boldsymbol{f}^{\mathrm{T}})\right]^{-1}\boldsymbol{b}$$
$$=\begin{bmatrix}1 & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix} s & -1 \\ 2+f_1 & s+4+f_2 \end{bmatrix}^{-1}\begin{bmatrix}0\\1\end{bmatrix}$$
$$=\frac{1}{\det[s\boldsymbol{I}-(\boldsymbol{A}-\boldsymbol{b}\boldsymbol{f}^{\mathrm{T}})]}\begin{bmatrix}1 & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix} s+4+f_2 & 1 \\ -2-f_1 & s \end{bmatrix}\begin{bmatrix}0\\1\end{bmatrix}$$
$$=\frac{1}{s^2+(f_2+4)s+f_1+2}=\frac{1}{s^2+10s+125} \qquad \cdots(答)$$

となる。

(4) 制御系全体の伝達関数の特性方程式は，

$$1+\frac{K}{s}\cdot\frac{1}{s^2+10s+125}=0 \ \rightarrow \ s^3+10s^2+125s+K=0$$

となる。ここで，安定限界を与える K を K_{C}，このときの持続振動の角周波数を ω_{C} とおくと，安定限界では，開ループ特性のベクトル軌跡が -1 となることから

$$\frac{K_{\mathrm{C}}}{\mathrm{j}\omega_{\mathrm{C}}}\cdot\frac{1}{(\mathrm{j}\omega_{\mathrm{C}})^2+\mathrm{j}10\omega_{\mathrm{C}}+125}=-1$$

が成り立つ。上式を整理すると

$$(K_{\mathrm{C}}-10\omega_{\mathrm{C}}{}^2)+\mathrm{j}(-\omega_{\mathrm{C}}{}^3+125\omega_{\mathrm{C}})=0$$

となり，

$$K_{\mathrm{C}}-10\omega_{\mathrm{C}}{}^2=0,\ -\omega_{\mathrm{C}}{}^2+125=0$$

が得られる。これを解くと

$$K_C = 1\,250,\ \omega_C = 5\sqrt{5}$$

が得られるので，二つの閉ループ極は，$j5\sqrt{5}$ と $-j5\sqrt{5}$ である。もう一つの閉ループ極を $-\alpha$ とおくと

$$(s^2+125)(s+\alpha) = s^3+10s^2+125s+1\,250$$

が成り立つことから，$\alpha = 10$ が得られる。以上をまとめると，安定限界を与える K の値は $K_C = 1\,250$ となる。このとき，三つの閉ループ極は，

$$j5\sqrt{5},\ -j5\sqrt{5},\ -10 \quad \cdots(答)$$

となる。