

●平成27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) 空気と比較して水素ガスは密度が小さいため風損が小さく発電機効率を向上させることができるほか、熱伝導率、比熱が大きいので冷却効果が高く、発電機の小型化を図ることができる。さらに、加圧して用いることにより、熱容量、熱伝達率が大きくなり、より大きな冷却能力を発揮できる。また、水素ガスは不活性であるため、絶縁物の劣化影響が少ない。以上のように、発電機の機械寸法の大幅な増大を抑えることができるなどの利点があるため、大容量のタービン発電機では、水素冷却方式が採用される。

また、安全上留意すべき事項については以下のとおり。

火源があっても酸素がないと燃焼は起こらないが、水素と空気が混合した場合、ある水素濃度の範囲では爆発性になるので、これを防ぐため発電機内部の水素濃度をその範囲よりもある程度高く保つ必要がある。また、発電機内の水素ガスが軸に沿って機外に漏れないようにする必要があり、軸受内部に油膜によるシール機構を施し、ガス漏れを防いでいる。

(2) 水は空気や水素と比較して熱容量、熱伝達率が大きく冷却効果が高いので、大容量のタービン発電機では、固定子（電機子巻線）水冷却方式が採用される。

[問2の標準解答]

(1)

系統側：設置点の送電系統の事故時の電圧維持による同期安定性を向上させるため。

配電系統の末端など、電源系統の弱い地域において、負荷変動などに起因する電圧変動を抑制するため。

需要側：アーク炉、採石場のクラッシャー等の変動負荷による急激な電圧変動を抑制するため。

負荷で発生する無効電力をキャンセルして力率を改善するため。

(2)

- ・ TCR は、サイリスタを用いてリアクトル電流の位相制御を行う方式で、誘導性（遅れ）の無効電力を連続的に制御できる。また、並列にコンデンサを接続することにより、進みから遅れの領域にわたる無効電力を連続的に変化させることができる。

- ・ TSC は、サイリスタを用いてコンデンサの開閉を行う方式で、容量性（進み）の無効電力を制御できる。突入電流が流れない位相でオンオフ制御を行うため、無効電力は段階的にしか制御できない。

(3) STATCOM は、自己消弧素子を用いた自励式変換器を用いることにより、進みから遅れまでの幅広い無効電力補償を、連続かつ高速で行うことができる。TCR 方式の SVC に比較して、系統電圧の低下時にも高い補償能力が得られるため、電圧安定性を高める効果に優れる。

[問3の標準解答]

(1)

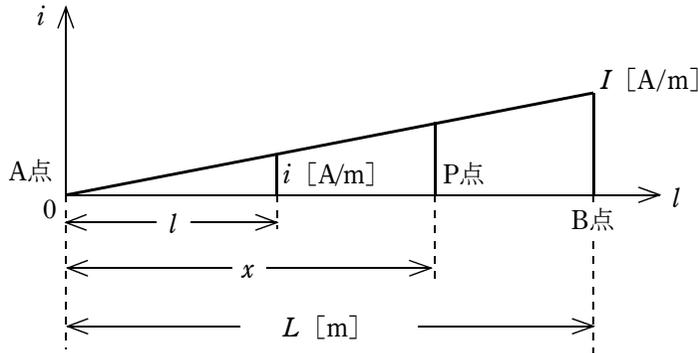


図1

a. 各点の線電流を式で表す。始めに P 点～ A 点までの線電流を求める。線電流は P 点から A 点に向かって負荷密度を積分して求める。

ここで、P 点～ A 点の距離を x とすると、図1の A 点から距離 l [m] 点の負荷密度 i は、図の比例関係から、

$$i = \frac{l}{L} I \text{ [A/m]} \quad \dots\dots\dots \text{①}$$

この距離 l [m] の点の線電流 i_ℓ は、

$$i_\ell = \int_0^l i \, dl = \int_0^l \frac{I}{L} l \, dl = \frac{I}{L} \left[\frac{l^2}{2} \right]_0^l = \frac{I}{2L} l^2 \text{ [A]} \quad \dots\dots\dots \text{②}$$

単位長さ当たりの等価抵抗が R [Ω /m] であるとする、距離 l [m] の点の微小長さ dl における電圧降下は、

$$dV_A = i_\ell R dl = \frac{I}{2L} R l^2 dl \text{ [V]}$$

P 点から A 点の間の電圧降下 V_A は、これを積分して次のように求まる。

$$V_A = \int_0^x dV_A = \frac{IR}{2L} \int_0^x l^2 \, dl = \frac{IR}{2L} \left[\frac{l^3}{3} \right]_0^x = \frac{IR}{6L} x^3 \text{ [V]} \quad \dots\dots\dots \text{③}$$

… (答)

b. 同様に、P点からB点の間の線電流の式を求める。

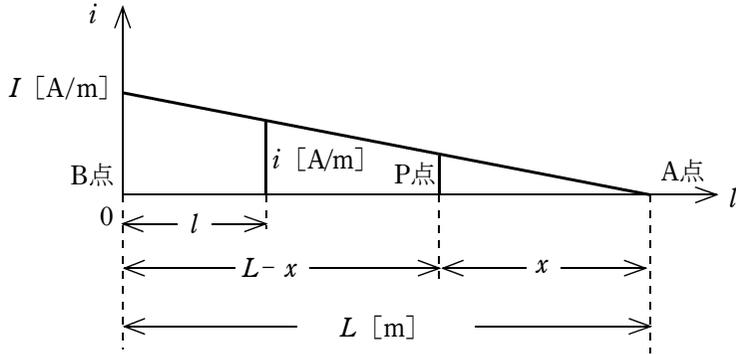


図2 P点～B点間の線電流を求めるための図

図2で、距離 l [m] の点の負荷密度 i は、

$$i = I \left(\frac{L-l}{L} \right) = I \left(1 - \frac{l}{L} \right) \text{ [A/m]}$$

この距離 l [m] の点の線電流 i_ℓ は、

$$i_\ell = \int_0^l i \, dl = I \int_0^l \left(1 - \frac{l}{L} \right) dl = I \left[l - \frac{l^2}{2L} \right]_0^l = \frac{I}{2L} (2Ll - l^2) \text{ [A]} \quad \dots\dots\dots \text{④}$$

したがって、P点からB点の電圧降下 V_B は、積分して次のように求まる。

$$\begin{aligned} V_B &= \int_0^{L-x} i_\ell R \, dl = \frac{IR}{2L} \int_0^{L-x} (2Ll - l^2) dl = \frac{IR}{2L} \left[Ll^2 - \frac{l^3}{3} \right]_0^{L-x} \\ &= \frac{IR}{6L} [3L(L-x)^2 - (L-x)^3] = \frac{IR}{6L} (L-x)^2 (2L+x) \text{ [V]} \quad \dots\dots\dots \text{⑤} \end{aligned}$$

… (答)

c. $V_A = V_B$ であれば、題意を満足する。③式及び⑤式より、

$$\begin{aligned} \frac{IR}{6L} x^3 &= \frac{IR}{6L} [(L-x)^2 (2L+x)] \\ x^3 &= [(L-x)^2 (2L+x)] = (2L+x)(L^2 - 2Lx + x^2) \\ (1-1)x^3 + (-2L+2L)x^2 + (-4L^2 + L^2)x + 2L^3 &= 0 \\ 3L^2 x &= 2L^3 \\ x &= \frac{2}{3} L \end{aligned}$$

A 点から $\frac{2}{3}L$ [m] の地点となる。… (答)

(2) B 点に変圧器を設置した際の B 点から A 点の電圧降下 V_{BA} は③式において $x=L$ とすれば求まる。

したがって、

$$V_{BA} = \frac{1}{6} IRL^2 \text{ [V]} \dots\dots\dots \text{⑥}$$

また、P 点から A 点の電圧降下 V_{PA} は③式において $x = \frac{2}{3}L$ とすれば求まる。

$$V_{PA} = \frac{4}{81} IRL^2 \text{ [V]} \dots\dots\dots \text{⑦}$$

ゆえに、 V_{PA} と V_{BA} の比は、

$$\frac{V_{PA}}{V_{BA}} = \frac{\frac{4}{81}}{\frac{1}{6}} = \frac{8}{27} = 0.29629 \doteq 29.6 \% \dots \text{ (答)}$$

[問4の標準解答]

(1) $\dot{V}_1 = \dot{V}_2 + (r + jx)\dot{I}$ ①
 ... (答)

(2) $P + jQ = \dot{V}_1 \bar{\dot{I}}$
 より,
 $\dot{I} = \frac{P - jQ}{\dot{V}_1}$ ②
 ... (答)

(3) ②式を①式に代入して,
 $\dot{V}_1 = \dot{V}_2 + (r + jx) \frac{P - jQ}{\dot{V}_1}$
 より,
 $V_1^2 = V_1 V_2 e^{-j\delta} + (r + jx)(P - jQ)$ ③
 ... (答)

(4) ③式の実数部と虚数部の式から,
 $Pr + Qx = V_1(V_1 - V_2 \cos \delta)$
 $-Qr + Px = V_1 V_2 \sin \delta$

したがって,
 $r = \frac{PV_1(V_1 - V_2 \cos \delta) - QV_1 V_2 \sin \delta}{P^2 + Q^2}$
 $x = \frac{PV_1 V_2 \sin \delta + QV_1(V_1 - V_2 \cos \delta)}{P^2 + Q^2}$

よって,
 $\left. \begin{aligned} \alpha &= V_1 V_2 \sin \delta \\ \beta &= V_1(V_1 - V_2 \cos \delta) \end{aligned} \right\} \dots \text{(答)}$

(5) $x = 0.228 \text{ p.u.}, r = 0.0275 \text{ p.u.}$... (答)

[問5の標準解答]

- (1) 需要設備 a, b, c の平均電力を, それぞれ $\overline{P}_a, \overline{P}_b, \overline{P}_c$ とすると,
平均電力 = 最大電力 × 負荷率の関係があるので,

$$\left. \begin{aligned} \overline{P}_a &= 5700 \times 0.7 = 3990 \text{ kW} \\ \overline{P}_b &= 3040 \times 0.8 = 2432 \text{ kW} \\ \overline{P}_c &= 2660 \times 0.6 = 1596 \text{ kW} \end{aligned} \right\} \dots (\text{答})$$

- (2) 配電線 A, B の最大電力を, それぞれ P_A, P_B とすると,
総合最大電力 = 合計最大電力 / 不等率の関係があるので,

$$\begin{aligned} P_A &= 5700 \text{ kW} \\ P_B &= \frac{3040 + 2660}{1.25} = 4560 \text{ kW} \end{aligned}$$

よって, 同様に, 変電所の総合最大電力 P_S は,

$$P_S = \frac{P_A + P_B}{1.1} = \frac{5700 + 4560}{1.1} \doteq 9327.27 \rightarrow 9327 \text{ kW} \quad \dots (\text{答})$$

- (3) 変電所の平均電力を \overline{P}_S とすると,

$$\overline{P}_S = \overline{P}_a + \overline{P}_b + \overline{P}_c$$

よって, (1) で示した関係式より, 変電所の総合負荷率 LF は,

$$\begin{aligned} LF &= \frac{\overline{P}_S}{P_S} \times 100 \\ &= \frac{3990 + 2432 + 1596}{9327} \times 100 \\ &\doteq 85.97 \rightarrow 86 \% \quad \dots (\text{答}) \end{aligned}$$

- (4) 需要設備 a, b, c の負荷力率を, それぞれ $\cos\theta_a, \cos\theta_b, \cos\theta_c$ とすると,
最大電力 = 設備容量 × 負荷力率 × 需要率

の関係があるので,

$$\left. \begin{aligned} \cos\theta_a &= \frac{5700}{7500 \times 0.80} \times 100 = 95 \% (\text{遅れ}) \\ \cos\theta_b &= \frac{3040}{4000 \times 0.80} \times 100 = 95 \% (\text{遅れ}) \\ \cos\theta_c &= \frac{2660}{3500 \times 0.80} \times 100 = 95 \% (\text{遅れ}) \end{aligned} \right\} \dots (\text{答})$$

(5) 必要なコンデンサ容量を Q_c , 変圧器定格容量を S , 変電所の総合負荷力率を $\cos\theta$ とすると,

$$P_S^2 + (P_S \tan\theta - Q_c)^2 \leq S^2$$

を満足しなければならない。

$$\cos\theta = \cos\theta_a = \cos\theta_b = \cos\theta_c = 0.95$$

であり, 遅れ力率より $\tan\theta > 0$ なので,

$$\begin{aligned} Q_c &\geq P_S \tan\theta - \sqrt{S^2 - P_S^2} \\ &= P_S \sqrt{\sec^2\theta - 1} - \sqrt{S^2 - P_S^2} \\ &= 9\,327.27 \sqrt{\frac{1}{0.95^2} - 1} - \sqrt{9\,500^2 - 9\,327.27^2} \\ &\doteq 1\,262.38 \rightarrow 1\,262 \text{ kvar} \end{aligned}$$

よって, Q_c の最小値は, 1 262 kvar …… (答)

[問6の標準解答]

(1) CVケーブルの絶縁体内に水分が多く含まれている状態で電圧が印加されると、突起周辺など電界集中部に水分が集まり凝集し、樹枝状の劣化が進むが、この劣化痕を水トリーと呼ぶ。水トリー内部は、健全部分に比べて導電率はけた違いに高く電界は低くなるので、水トリーが発生しても、電気トリーとは異なり部分放電は観測されない。このため、水トリーの発生は検知しにくい。うえに、水トリー先端の電界が高い部分より電気トリーが発生すると短時間で絶縁体の全路破壊に結びつくことが多い。

(2)

- a. 損失電流法：ケーブル絶縁体に流れる充電電流から課電電圧と同位相の電流成分（損失電流成分）を抽出し、その中に含まれる高調波電流（主に第三高調波電流）を劣化信号として用いる。
- b. 残留電荷法：水トリー劣化部に蓄積された電荷の放出状況を評価して劣化状況を診断する。具体的には、直流電圧をケーブルに課電し、接地後、水トリー劣化部に蓄積された電荷を、交流電圧を印加することにより放出させて診断する。
- c. 耐電圧法：水トリー劣化ケーブルのスクリーニングを目的とし、常規電圧よりも高い電圧をケーブル線路に課電する。スクリーニングする劣化レベルに応じて試験電圧や、効果的な試験電圧種類（商用周波、超低周波、可変周波）を選定する。
- d. 直流漏れ電流測定：ケーブルの導体-シース間に一定の直流電圧を印加し、漏れ電流の大きさ・変化・三相不平衡などを時間で整理し、その形状や値から絶縁状態を調査する。

< 機械・制御科目 >

[問 1 の標準解答]

- (1) 同期発電機の損失を無視すれば、機械的入力 P_0 は電氣的出力に等しいので、
無負荷誘導起電力を E とすると、

$$P = 3 \frac{VE}{X_s} \sin \delta$$

である。 $V=V_0$ 、 $\delta_0 = 45^\circ$ のときの出力電力 P_0 は、

$$P_0 = 3 \frac{V_0 E}{X_s} \sin 45^\circ = 3 \times \frac{V_0 E}{X_s} \times \frac{1}{\sqrt{2}} = \frac{3V_0 E}{\sqrt{2} X_s}$$

である。このとき、発電機端子の相電圧は、

$$V_0 = \frac{\sqrt{2} X_s}{3E} P_0$$

となる。

- a. $\delta_1 = 30^\circ$ のときの機械的入力電力 P_1 は、

$$P_1 = 3 \frac{V_0 E}{X_s} \sin 30^\circ = 3 \times \frac{V_0 E}{X_s} \times \frac{1}{2} = \frac{3V_0 E}{2X_s}$$

である。したがって、機械的入力の比は、

$$\frac{P_1}{P_0} = \frac{\frac{3V_0 E}{2X_s}}{\frac{3V_0 E}{\sqrt{2} X_s}} = \frac{\sqrt{2}}{2} = 0.70710 \rightarrow 0.707 \dots \text{ (答)}$$

- b.リアクトル $X_2 = X_s$ を挿入し、 $\delta_2 = 45^\circ$ で動作したときの機械的入力 P_2 は、

$$P_2 = 3 \frac{V_0 E}{X_2 + X_s} \sin 45^\circ = 3 \times \frac{V_0 E}{2X_s} \times \frac{1}{\sqrt{2}} = \frac{3V_0 E}{2\sqrt{2} X_s}$$

となる。したがって、出力電力の比は、

$$\frac{P_2}{P_0} = \frac{\frac{3V_0 E}{2\sqrt{2} X_s}}{\frac{3V_0 E}{\sqrt{2} X_s}} = \frac{X_s}{2X_s} = \frac{1}{2} = 0.5 \dots \text{ (答)}$$

(2)

c. 機械的入力が $P_3 = P_0$ で、 $\delta_3 = 60^\circ$ のとき、

$$P_3 = P_0 = 3 \frac{V_3 E}{X_s} \sin 60^\circ = 3 \times \frac{V_3 E}{X_s} \times \frac{\sqrt{3}}{2} = \frac{3\sqrt{3}V_3 E}{2X_s}$$

となるので、

$$V_3 = \frac{2X_s}{3\sqrt{3}E} P_0$$

したがって、

$$\frac{V_3}{V_0} = \frac{\frac{2X_s}{3\sqrt{3}E} P_0}{\frac{\sqrt{2}X_s}{3E} P_0} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} = \frac{1.4142}{1.7321} = 0.81647 \rightarrow 0.816 \quad \dots (\text{答})$$

d. 抵抗器を接続した場合、力率 1 であるので、発電機電流を I_3 とすれば、

$$V_3 = RI_3 = E \cos \delta_3 = E \cos 60^\circ = \frac{E}{2}$$

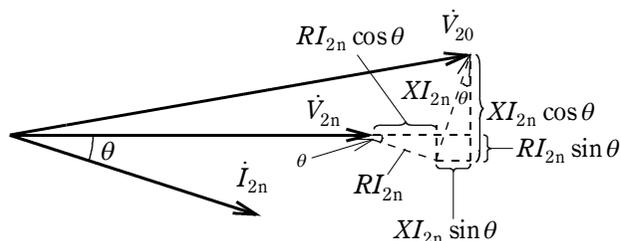
$$X_s I_3 = E \sin 60^\circ = \frac{\sqrt{3}}{2} E$$

したがって、

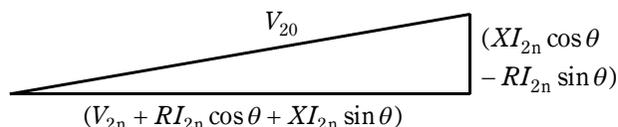
$$\frac{R}{X_s} = \frac{\frac{E}{2}}{\frac{\sqrt{3}}{2} E} = \frac{1}{\sqrt{3}} = \frac{1}{1.7321} = 0.57733 \rightarrow 0.577 \quad \dots (\text{答})$$

である。

(5) 二次側に換算した諸量のベクトル図を用いて、



電圧成分について抜き出すと



ベクトル図より

$$V_{20} = \sqrt{(V_{2n} + RI_{2n} \cos \theta + XI_{2n} \sin \theta)^2 + (XI_{2n} \cos \theta - RI_{2n} \sin \theta)^2}$$

と表せる。したがって、

$$\frac{V_{20}}{V_{2n}} = \sqrt{1 + 2(q_R \cos \theta + q_X \sin \theta) + q_R^2 + q_X^2}$$

$q_R \ll 1$, $q_X \ll 1$ なので、

$$|\delta| = |2(q_R \cos \theta + q_X \sin \theta) + q_R^2 + q_X^2| < 1$$

とし、二項定理を用いて展開すると、

$$\frac{V_{20}}{V_{2n}} = \sqrt{1 + \delta} = 1 + \frac{1}{2}\delta - \frac{1}{8}\delta^2 + \dots$$

となり、 q_R , q_X の2次以上の項を省略すれば、

$$\frac{V_{20}}{V_{2n}} \doteq 1 + q_R \cos \theta + q_X \sin \theta$$

とできる。したがって、

$$\varepsilon = \frac{V_{20} - V_{2n}}{V_{2n}} \times 100 \doteq (q_R \cos \theta + q_X \sin \theta) \times 100 [\%] \quad \dots \text{ (答)}$$

となる。

[問3の標準解答]

(1) (a) 実用的な出力周波数の上限は、電源周波数の $\frac{1}{2} \sim \frac{1}{3}$ 程度である。(b) 出力交流電流の方向が切り換わるときに電源を短絡しないように電流を零としておく期間が必要である。このため、出力周波数が高くなると波形のひずみが大きくなるので出力周波数に上限がある。

(2) 正群コンバータの出力電圧 v は、制御遅れ角 α が0の時点を基準にした電気角 θ で表すと、 θ が α から $\alpha + \frac{\pi}{3}$ の期間、 $v = \sqrt{2}E \cos\left(\theta - \frac{\pi}{6}\right)$ となるので、平均電圧 V_d はそれを平均して次となる。

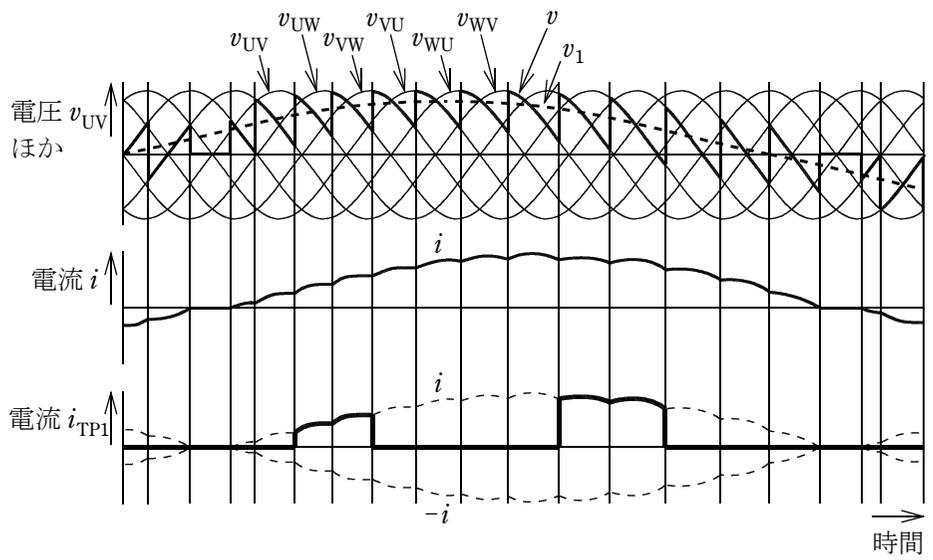
$$\begin{aligned} V_d &= \frac{3}{\pi} \int_{\alpha}^{\alpha + \frac{\pi}{3}} \sqrt{2}E \cos\left(\theta - \frac{\pi}{6}\right) d\theta = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} E \left[\sin\left(\theta - \frac{\pi}{6}\right) \right]_{\alpha}^{\alpha + \frac{\pi}{3}} \\ &= \frac{3\sqrt{2}}{\pi} E \left[\sin\left(\alpha + \frac{\pi}{6}\right) - \sin\left(\alpha - \frac{\pi}{6}\right) \right] = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} E \cos \alpha \quad \text{又は} \quad 1.35E \cos \alpha \quad \dots \quad (\text{答}) \end{aligned}$$

(3) 出力基本波電圧を $v_1 = \sqrt{2} \times 0.8E \sin(2\pi f_1 t)$ とするには、正群コンバータでは制御遅れ角 $\alpha(t)$ を次のようにすればよい。

$$\begin{aligned} \frac{3\sqrt{2}}{\pi} E \cos \alpha(t) &= \sqrt{2} \times 0.8E \sin(2\pi f_1 t) \\ \cos \alpha(t) &= \frac{\pi}{3} \times 0.8 \sin(2\pi f_1 t) \\ \therefore \alpha(t) &= \cos^{-1} \left[\frac{4}{15} \pi \sin(2\pi f_1 t) \right] \quad \text{又は} \quad \alpha(t) = \cos^{-1} [0.838 \sin(2\pi f_1 t)] \quad \dots \quad (\text{答}) \end{aligned}$$

(4) T_{P1} がオンすると T_{P5} に流れていた電流が T_{P1} に転流し、 $T_{P6} \rightarrow V$ 相 $\rightarrow U$ 相 $\rightarrow T_{P1}$ を通电して出力されるので、 v_{UV} の電圧が出力される。… (答)

(5) T_{P1} がオンすると v_{UV} の電圧が出力され、それから T_{P3} がオンするまで通电するので次の図となる。



[問 4 の標準解答]

(1) 内側のフィードバックループを一つのブロックで表すと,

$$\frac{G(s)}{1+G(s)F(s)} = \frac{\frac{1}{h(s)}}{1+\frac{1}{h(s)}F(s)} = \frac{1}{h(s)+F(s)}$$

となる。よって、フィードバック制御系の目標値から制御量までの伝達関数 $W(s)$ は,

$$W(s) = \frac{k}{1 + \frac{k}{s[h(s)+F(s)]}} = \frac{1}{1 + \frac{s}{k}[h(s)+F(s)]} \dots\dots\dots \textcircled{1}$$

... (答)

である。

(2) ①式と問題中の

$$W_d(s) = \frac{1}{1 + \sigma s + \alpha_2 \sigma^2 s^2 + \alpha_3 \sigma^3 s^3} \dots\dots\dots \textcircled{2}$$

とを等しいとおくことによって、次の関係式を得る。

$$1 + \frac{s}{k}[h(s)+F(s)] = 1 + \sigma s + \alpha_2 \sigma^2 s^2 + \alpha_3 \sigma^3 s^3$$

$$\therefore 1 + \frac{s}{k}(h_0 + f_0 + h_1 s + h_2 s^2) = 1 + \sigma s + \alpha_2 \sigma^2 s^2 + \alpha_3 \sigma^3 s^3$$

上式は s に関する恒等式であるから、パラメータ σ と制御定数 k , f_0 が満たさなくてはならない連立方程式は係数比較法によって次となる。

$$\frac{h_0 + f_0}{k} = \sigma \dots\dots\dots \textcircled{3}$$

$$\frac{h_1}{k} = \alpha_2 \sigma^2 \dots\dots\dots \textcircled{4}$$

$$\frac{h_2}{k} = \alpha_3 \sigma^3 \dots\dots\dots \textcircled{5}$$

... (答)

(3) ④式と⑤式から

$$\sigma = \frac{\alpha_2 h_2}{\alpha_3 h_1} \dots \text{(答)}$$

を得る。

(4) ④式から

$$k = \frac{h_1}{\alpha_2 \sigma^2} \dots (\text{答})$$

を得る。

(5) ③式から

$$f_0 = k\sigma - h_0 \dots (\text{答})$$

を得る。