

●平成23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) 同期機の界磁巻線に直流電流を供給し、同期機の端子電圧を一定に保持あるいは調整する機能である。

(2) 静止形励磁方式（サイリスタ励磁方式）である。

理由：静止形励磁方式（サイリスタ励磁方式）は応答速度が速いことに加え、頂上電圧（界磁の印加最高電圧）を高くすることができるので、系統事故除去後の回復電圧を高くし、発電機の電気出力を大きくすることにより、過渡安定度の向上を図ることができる。

(3) 目的：高速高ゲインの励磁装置は過渡安定度の向上効果が高い反面、定態安定度（系統動揺の減衰）を悪くすることがあるので、これを改善するため。

基本機能：発電機出力偏差  $\Delta P$  や回転速度偏差  $\Delta \omega$  などを入力信号とし、発電機の動揺を抑制するように信号の位相と大きさを調整して、自動電圧調整装置（AVR）への信号を生成する。

[問2の標準解答]

(1) 事故点電流

非接地系統に一線地絡事故が発生した場合、中性点に電流が流れないため、事故電流は健全相と大地間の浮遊容量を介して流れる小さな電流となる。

これに対して抵抗接地系統では事故点までの線路、中性点接地抵抗、事故点抵抗による閉回路が構成されるため、大きな電流が流れる。

(2) 事故時の健全相電圧

非接地系統において一線地絡事故が発生したときは事故電流がほとんど流れないため、線間電圧は事故の影響を受けない。このため、事故相が大地電圧となり中性点電圧が事故相の分上昇し、健全相の相電圧は線間電圧がそのまま反映されることになる。すなわち、事故後の健全相の相電圧は電源電圧が対称三相の場合は事故前の  $\sqrt{3}$  倍となるが、更に大きな電圧が発生する場合もある。

これに対して抵抗接地系統に一線地絡事故が発生したときには、中性点の電圧上昇は事故電流と中性点接地抵抗の積によって与えられる値となるため、健全相の相電圧上昇は、接地抵抗値を小さくすることで抑えられる。

(3) 事故検出

非接地系統において一線地絡事故が発生したときは事故電流が小さく、通常の運用電流以下であるため、過電流リレーや方向距離リレーによる事故検出は不可能であり、地絡過電圧リレー、地絡方向リレーにより検出される。

これに対して抵抗接地方式では過電流リレーや方向距離リレーを含む各種のリレーが機能する。

(4) 誘導障害

非接地系統において一線地絡事故が発生したときは大地帰路電流が小さいため、他の通信線などへの誘導障害はほとんど起こらない。

これに対して抵抗接地系統に一線地絡事故が発生したときは、大きな事故電流が大地帰路電流として流れるため、誘導障害が発生する可能性がある。

[問3の標準解答]

$$(1) 0.15 \times \frac{66^2}{200} = 3.267 \rightarrow 3.27[\Omega]$$

(2) 線路の抵抗分は無視できるので、

受電端負荷の有効電力  $P_r = V_s \times V_r \times \frac{\sin \delta}{X}$  と表せる。

ここで、

$P_r = 93$  [MW],  $V_r = 68$  [kV],  $X = 4 + 3.267 = 7.267$  [ $\Omega$ ],  $\sin \delta = 0.15$  より、

$$V_s = 93 \times 10^6 \times \frac{7.267}{(68 \times 10^3 \times 0.15)} = 66.258 \times 10^3$$

$$\left( \times \frac{154}{66} \text{で換算すると} \right) 66.258 \text{ [kV]} \rightarrow 154.6 \text{ [kV]} \quad 155 \text{ [kV]}$$

したがって、負荷の遅れ無効電力  $Q_r = \frac{V_s \times V_r \times \cos \delta - V_r^2}{X}$  より、

$$Q_r = \frac{66.258 \times 10^3 \times 68 \times 10^3 \times \sqrt{1 - 0.15^2} - (68 \times 10^3)^2}{7.267}$$
$$= -23.316 \times 10^6 \rightarrow -23.3[\text{Mvar}]$$

(3) 調相設備を投入することで、電圧が低下し  $V_r' = 66$  [kV] となった場合においても、題意より、 $V_s$ 、負荷の消費電力  $P_r$ 、 $Q_r$  は一定である。調相設備投入後の一次母線と受電端との位相差を  $\delta'$  とすると、

$$\sin \delta' = \frac{93 \times 10^6 \times 7.267}{66.258 \times 10^3 \times 66 \times 10^3} = 0.15455$$

したがって、 $\cos \delta' = \sqrt{1 - 0.15455^2} = 0.9880$

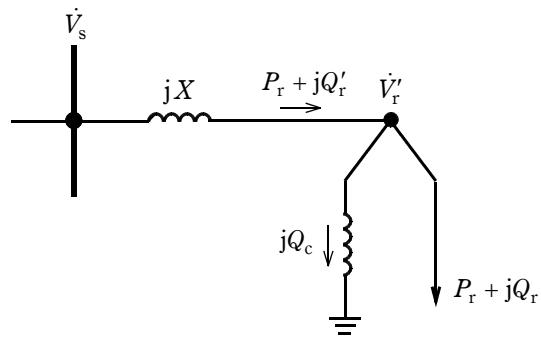
調相設備  $Q_c$  投入後の送電線から供給される無効電力  $Q_r'$  は、

$$Q_r' = Q_r + Q_c = \frac{V_s V_r' \cos \delta' - V_r'^2}{X} \quad \text{より、}$$

$$Q_r' = Q_r + Q_c = \frac{66.258 \times 10^3 \times 66 \times 10^3 \times 0.9880 - (66 \times 10^3)^2}{7.267} = -4.878 \times 10^6 [\text{var}]$$

$$Q_c = Q_r' - Q_r = -4.878 - (-23.316) = 18.438 [\text{Mvar}] \rightarrow 18.4 [\text{Mvar}]$$

$Q_c > 0$  なので、遅相設備である分路リアクトルを 18.4 [MV·A] 設置したことになる。



[問 4 の標準解答]

(1) 単相負荷の合計は，二つの単相負荷が同一のときに最大となることから問題は，図 1 の回路図で示すことができ，そのベクトル図は図 2 で表すことができる。これより，変圧器  $T_a$  には三相負荷電流のみが流れ， $T_b$  には三相負荷と単相負荷の合成電流が流れる。

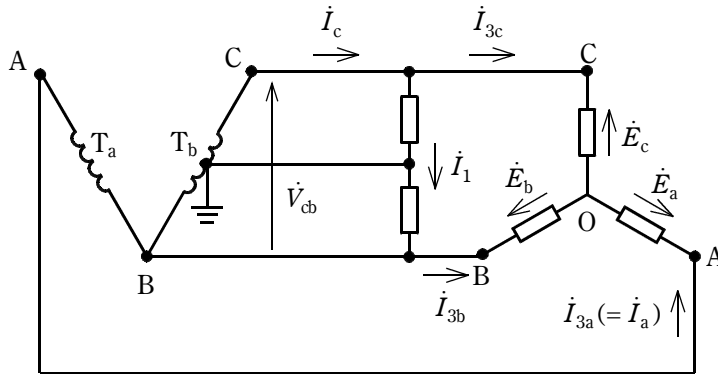


図 1

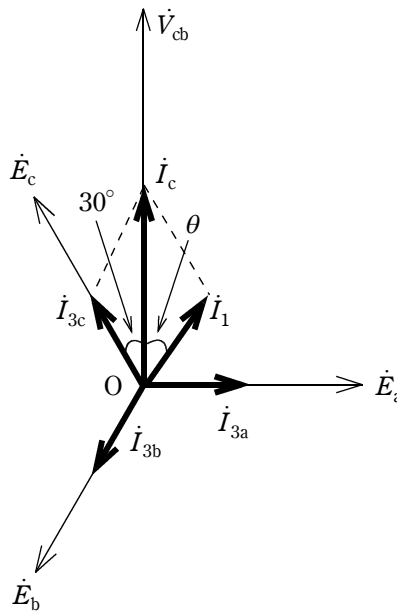


図 2

三相平衡負荷  $P_3$  は①式で表される。

$$P_3 = \sqrt{3}VI \cos \theta \quad \dots \textcircled{1}$$

①式が最大となるのは  $\cos \theta = 1$  のときで、また、変圧器  $T_a$  の容量  $30$  [kV·A] で制限されるので、最大負荷  $P_{3\max}$  は

$$P_{3\max} = \sqrt{3} \times 30 \times 1 = 51.96 \rightarrow 52.0[\text{kW}]$$

(2) 変圧器  $T_b$  には、平衡三相負荷電流  $\dot{I}_{3c}$  と単相負荷電流  $\dot{I}_1$  の和  $\dot{I}_c$  が流れるので、 $\dot{V}_{cb}$  と  $\dot{I}_c$  が同相のときに最大負荷となる。図 2 から、

$$\begin{aligned} I_c &= I_{3c} \cos 30^\circ + I_1 \cos \theta \\ V_{cb} I_c &= 50 = V_{cb} (I_{3c} \cos 30^\circ + I_1 \cos \theta) \\ &= V_{cb} I_{3c} \cos 30^\circ + V_{cb} I_1 \cos \theta \\ &= 30 \times \frac{\sqrt{3}}{2} + V_{cb} I_1 \cos \theta \end{aligned}$$

よって、単相の最大負荷  $P_{1\max}$  は

$$P_{1\max} = V_{cb} I_1 \cos \theta = 50 - 30 \times \frac{\sqrt{3}}{2} = 24.02 \rightarrow 24.0[\text{kW}]$$

(3) 変圧器の利用率  $\alpha$  は、

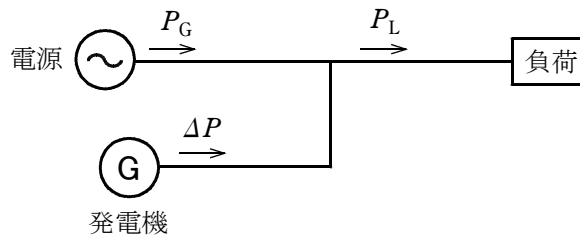
$$\alpha = \frac{51.96 + 24.02}{50 + 30} \times 100 = 94.97 \rightarrow 95.0[\%]$$

[問5の標準解答]

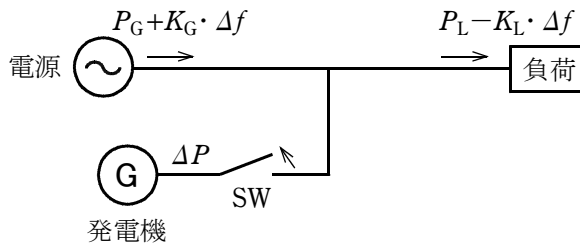
- (1) A : 加速  
B : 上昇  
C : ガバナ (調速機)  
D : 増加

(2) 図のように、電源と発電機の総発電電力  $P_G + \Delta P$  と、負荷電力  $P_L$  とが均衡している状態から、 $\Delta P$  が脱落して周波数が  $\Delta f$  低下したことにより、電源の発電電力が  $P_G + K_G \cdot \Delta f$  に増加し、負荷電力が  $P_L - K_L \cdot \Delta f$  に減少して、発電電力と負荷電力が均衡したとする。

発電機脱落下



発電機脱落后



上記条件より、

$$P_G + \Delta P = P_L \quad \dots \textcircled{1}$$

$$P_G + K_G \cdot \Delta f = P_L - K_L \cdot \Delta f \quad \dots \textcircled{2}$$

①式を②式に代入して、

$$K_G \cdot \Delta f = \Delta P - K_L \cdot \Delta f$$
$$\Delta f = \frac{\Delta P}{(K_G + K_L)} \quad \dots \textcircled{3}$$

③式に  $\Delta P = 5$  [% MW],  $K_G = 1.0$  [% MW/0.1Hz],  $K_L = 0.2$  [% MW/0.1Hz]

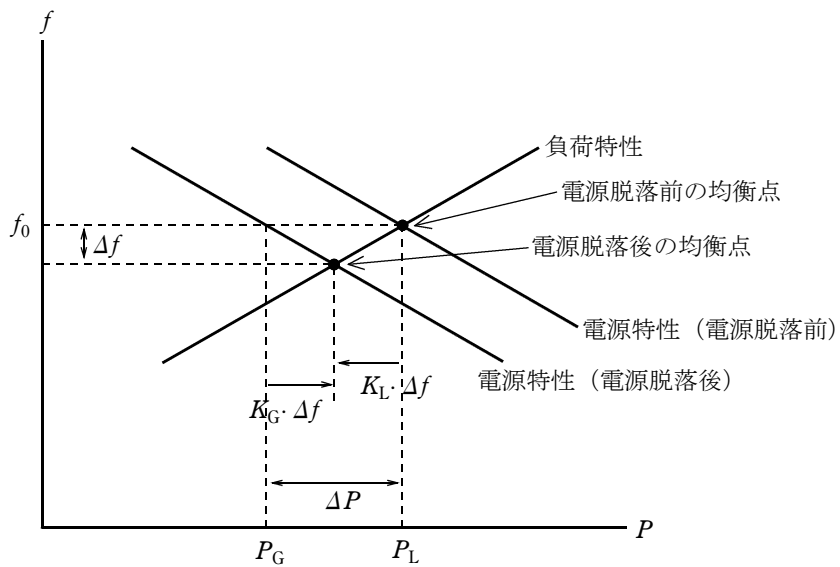
を代入して,

$$\begin{aligned} \Delta f &= \frac{5}{(1.0+0.2)} = 4.166 [\times 0.1\text{Hz}] \\ &= 0.417 [\text{Hz}] \end{aligned}$$

脱落后, 発電電力と負荷電力が均衡する周波数は,

$$\begin{aligned} 50.0 - \Delta f &= 50.0 - 0.417 \\ &= 49.583 [\text{Hz}] \end{aligned}$$

【参考】 電源と負荷の周波数特性





[問6の標準解答]

$$(1) \quad a. \quad \text{送電端負荷率} = \frac{\text{平均送電端電力}}{\text{最大送電端電力}} = \frac{(1+3+5+4+2)}{5} = 0.6$$

$$b. \quad \text{損失係数} = \frac{\text{平均損失電力}}{\text{最大損失電力}} = \frac{(1^2+3^2+5^2+4^2+2^2)R}{5^2 R} = \frac{11R}{25R} = 0.44$$

$$(2) \quad \frac{\text{kWh損失率}}{\text{kW損失率}} = \frac{\text{損失電力量} / \text{送電端電力量}}{\text{最大損失電力} / \text{最大送電端電力}}$$
$$= \frac{\text{平均損失電力} / \text{平均送電端電力}}{\text{最大損失電力} / \text{最大送電端電力}}$$
$$= \frac{\text{平均損失電力} / \text{最大損失電力}}{\text{平均送電端電力} / \text{最大送電端電力}}$$
$$= \frac{\text{損失係数}}{\text{送電端負荷率}}$$

< 機械・制御科目 >

[問 1 の標準解答]

(1) 二次電流の一次側換算値は,

$$I_2' = \frac{V_1}{\sqrt{\left(r_1 + \frac{r_2'}{s}\right)^2 + (x_1 + x_2')^2}} = \frac{\frac{200}{\sqrt{3}}}{\sqrt{\left(0.1 + \frac{0.15}{0.05}\right)^2 + (0.3 + 0.4)^2}}$$

$$= \frac{115.47}{\sqrt{3.1^2 + 0.7^2}} = 36.333 \text{ [A]}$$

である。ここで、 $V_1$  は相電圧実効値とする。

これより、トルクは

$$T = \frac{P_m}{\omega_m} = \frac{3}{2\pi f} I_2'^2 \frac{r_2'}{s} = \frac{3}{50\pi} \times 36.333^2 \times \frac{0.15}{0.05} = 75.673 \rightarrow 75.7 \text{ [N}\cdot\text{m]}$$

となる。ここで、 $p$  は極対数とする。

(2) トルクは,

$$T = \frac{3}{2\pi f} I_2'^2 \frac{r_2'}{s} = \frac{3}{2\pi f} \frac{V_1^2}{\left(r_1 + \frac{r_2'}{s}\right)^2 + (x_1 + x_2')^2} \frac{r_2'}{s}$$

であるので、最大トルクを得るには、 $\frac{\partial T}{\partial s} = 0$  となる滑り  $s$  を求めればよく、

$$\frac{\partial}{\partial s} \left[ \frac{3}{2\pi f} \frac{V_1^2}{\left(r_1 + \frac{r_2'}{s}\right)^2 + (x_1 + x_2')^2} \frac{r_2'}{s} \right]$$

$$= -\frac{3r_2'V_1^2}{2\pi f} \frac{r_1^2 + (x_1 + x_2')^2 - \left(\frac{r_2'}{s}\right)^2}{\left[ s \left( r_1 + \frac{r_2'}{s} \right)^2 + s(x_1 + x_2')^2 \right]^2} = 0$$

したがって、

$$r_1^2 + (x_1 + x_2')^2 = \left( \frac{r_2'}{s} \right)^2$$

$$s_{\max} = \frac{r_2'}{\sqrt{r_1^2 + (x_1 + x_2')^2}} = \frac{0.15}{\sqrt{0.1^2 + (0.3 + 0.4)^2}} = 0.21213 \rightarrow 0.212$$

(3) 逆相制動を開始する前の回転速度(同期速度)は、 $1500 [\text{min}^{-1}]$  であり、徐々に減速して  $0 [\text{min}^{-1}]$  になる。2 線を入れ替えた場合、回転磁界の回転方向と回転子の回転方向は逆であるので、このときの滑りは、

$$s = \frac{n_0 - n_2}{n_0} = \frac{1500 - (-1500)}{1500} = 2$$

であり、 $0 [\text{min}^{-1}]$  のときは、 $s = 1$  となる。

上記(2)より、最大トルクが得られる滑りは、 $s_{\max} = 0.212$  であるが、このとき回転子は既に逆回転していることになる。滑りが  $1 \sim 2$  の範囲で最大のトルクが得られるのは、 $s = 1$  であり、回転子の回転速度が  $0 [\text{min}^{-1}]$  のときに制動トルクが最大になる。

(4) 同期速度で回転しているとき、滑りは  $s = 2$  であるので二次電流の一次側換算値は、

$$I_2' = \frac{V_1}{\sqrt{\left( r_1 + \frac{r_2'}{s} \right)^2 + (x_1 + x_2')^2}} = \frac{\frac{200}{\sqrt{3}}}{\sqrt{\left( 0.1 + \frac{0.15}{2} \right)^2 + (0.3 + 0.4)^2}}$$

$$= \frac{115.47}{\sqrt{0.175^2 + 0.7^2}} = 160.03 \text{ [A]}$$

であり、このときのトルクは、

$$T = \frac{P_m}{\omega_m} = \frac{3}{2\pi f} I_2'^2 \frac{r_2'}{s} = \frac{3}{50\pi} \times 160.03^2 \times \frac{0.15}{2} = 36.701 \rightarrow 36.7 \text{ [N}\cdot\text{m]}$$

[問2の標準解答]

(1)

a. 主座変圧器の一次電圧は、線間電圧

$V_{WV} = 110$  [kV] である。

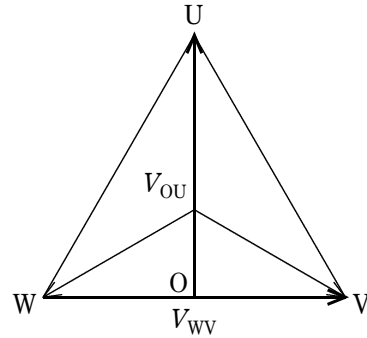
したがって、主座変圧器の巻数比  $a_m$  は、

$$a_m = \frac{110}{60} = 1.8333 \rightarrow 1.83$$

T座変圧器の一次巻線に印加される電圧  $V_{OU}$  は、線間電圧の  $\frac{\sqrt{3}}{2}$  倍であるので、 $V_{OU} = \frac{\sqrt{3}}{2} \times 110$  [kV] である。

したがって、T座変圧器の巻数比  $a_t$  は、

$$a_t = \frac{\sqrt{3}}{2} \times \frac{110}{60} = 1.5877 \rightarrow 1.59$$



b. 二次巻線に流れる電流は、主座変圧器、T座変圧器とも

$I_u = I_v = \frac{10000}{60}$  [A] である。

T座変圧器の一次巻線に流れる  $I_U$  は、二次電流  $I_u$  を巻数比  $a_t$  で除算して求められる。

$$I_U = \frac{I_u}{a_t} = \frac{10000}{60} \times \frac{2}{\sqrt{3}} \times \frac{60}{110} = 104.97 \rightarrow 105 \text{ [A]}$$

主座変圧器では、二次電流  $I_v$  による起磁力を打ち消すための一次巻線電流  $I_m'$  は、

$$I_m' = \frac{I_v}{a_m} = \frac{10000}{60} \times \frac{60}{110} = 90.909 \text{ [A]}$$

主座変圧器の一次巻線には、 $I_m'$ のほかに、位相が  $90 [^\circ]$  異なる T 座変圧器の電流  $I_U$  が V 相及び W 相に  $\frac{1}{2}$  ずつ分流する。一次巻線に流れる電流  $I_V$  は、 $I_m'$  と  $\frac{I_U}{2}$  との合成値であるので

$$I_V = \sqrt{I_m'^2 + \left(\frac{I_U}{2}\right)^2} = \sqrt{90.909^2 + \left(\frac{104.97}{2}\right)^2} = 104.97 \rightarrow 105 \text{ [A]}$$

なお、“三相側には平衡三相電流が流れるから  $I_U$  と同じ”として求めてもよい。

c. 主座変圧器の一次巻線の容量  $P_m$  は、

$$P_m = 110 \times 104.97 = 11547 \text{ [kV}\cdot\text{A]} \rightarrow 11.5 \text{ [MV}\cdot\text{A]}$$

T 座変圧器の一次巻線の容量  $P_t$  は、二次巻線の皮相電力と等しく  $10.0$  [MV·A]

(2) 総合での利用率は、二次巻線の合計皮相電力の一次巻線の合計容量に対する比であるので

$$\frac{10 \times 2}{11.547 + 10} = 0.92820 \rightarrow 0.928$$

[問3の標準解答]

- (1) 降圧チョップアとして動作するので、トランジスタ  $S_1$  がオン、オフ制御を行い、 $S_1$  と  $D_2$  に電流が流れる。直流電源電圧  $E_{p1}$  と二次電池電圧  $E_{b1}$  の関係は次のとおり。

$$E_{b1} = \frac{T_{on}}{T_{on} + T_{off}} E_{p1}$$

- (2) 昇圧チョップアとして動作するので、トランジスタ  $S_2$  がオン、オフ制御を行い、 $S_2$  と  $D_1$  に電流が流れる。直流負荷電圧  $E_{p2}$  と二次電池電圧  $E_{b2}$  の関係は次のとおり。

$$E_{p2} = \frac{T_{on} + T_{off}}{T_{off}} E_{b2}$$

- (3) 10 [A·h] の電池の 1C の充放電は、10 [A] の定電流で 1 [h] の充放電をする意味である。

したがって、1C 充電は 10 [A] で電流  $I_2$  の方向は正となる。一方、2C 放電は 20 [A] で電流  $I_2$  の方向は負となる。内部抵抗  $R_i = 0.005$  [ $\Omega$ ] であるので、充電開始時、充電完了時、放電開始時、放電終了時それぞれの二次電池電圧  $E_{b(t_0)}$ ,  $E_{b(t_1-)}$ ,  $E_{b(t_1+)}$ ,  $E_{b(t_2)}$  は次のとおりである。

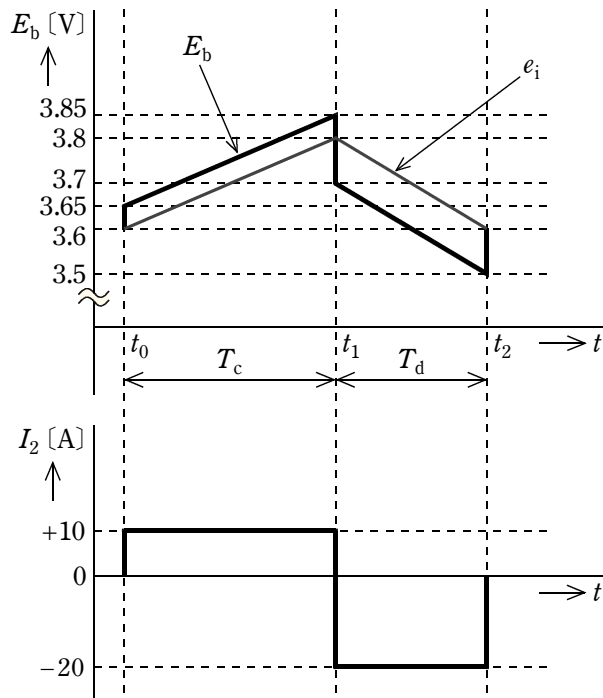
$$E_{b(t_0)} = 3.6 + 0.005 \times 10 = 3.65 \text{ [V]}$$

$$E_{b(t_1-)} = 3.8 + 0.005 \times 10 = 3.85 \text{ [V]}$$

$$E_{b(t_1+)} = 3.8 - 0.005 \times 20 = 3.7 \text{ [V]}$$

$$E_{b(t_2)} = 3.6 - 0.005 \times 20 = 3.5 \text{ [V]}$$

これを図示すると次の図となる。



また、1C 充電なので充電時間  $T_c$  は 1 [h] であり、2C 放電なので放電時間  $T_d$  は 0.5 [h] である。

- (4) 放電が進んで電圧が低くなった二次電池を充電する場合、電圧を高くしても電圧源との差の電圧が内部抵抗に印加されて、損失となる。したがって、極端に端子電圧を高くする定電流充電を除くと、定電圧充電よりも定電流充電の方がエネルギー効率がよい。

[問4の標準解答]

(1)  $D(s)$  から  $Y(s)$  までの伝達関数

図より,  $R(s) = 0$  のとき

$$U(s) = -K(s)Y(s) \quad \dots\dots\dots \textcircled{1}$$

$$Y(s) = G(s)U(s) + D(s) \quad \dots\dots\dots \textcircled{2}$$

が成り立つ。①式を②式へ代入し, 整理すると

$$Y(s) = -G(s)K(s)Y(s) + D(s)$$

となり, 整理すると, 答は

$$Y(s) = \frac{1}{1+G(s)K(s)} D(s) \quad \dots\dots\dots \textcircled{3}$$

で与えられる。

(2)  $R(s)$  から  $Y(s)$  までの伝達関数

図より,  $D(s) = 0$  のとき

$$U(s) = \frac{F(s)}{G(s)} R(s) + K(s)[F(s)R(s) - Y(s)] \quad \dots\dots\dots \textcircled{4}$$

$$Y(s) = G(s)U(s) \quad \dots\dots\dots \textcircled{5}$$

が成り立つ。④式を⑤式へ代入すると

$$\begin{aligned} Y(s) &= F(s)R(s) + G(s)K(s)[F(s)R(s) - Y(s)] \\ &= [F(s) + G(s)K(s)F(s)]R(s) - G(s)K(s)Y(s) \end{aligned}$$

となる。上式を整理すると, 答は

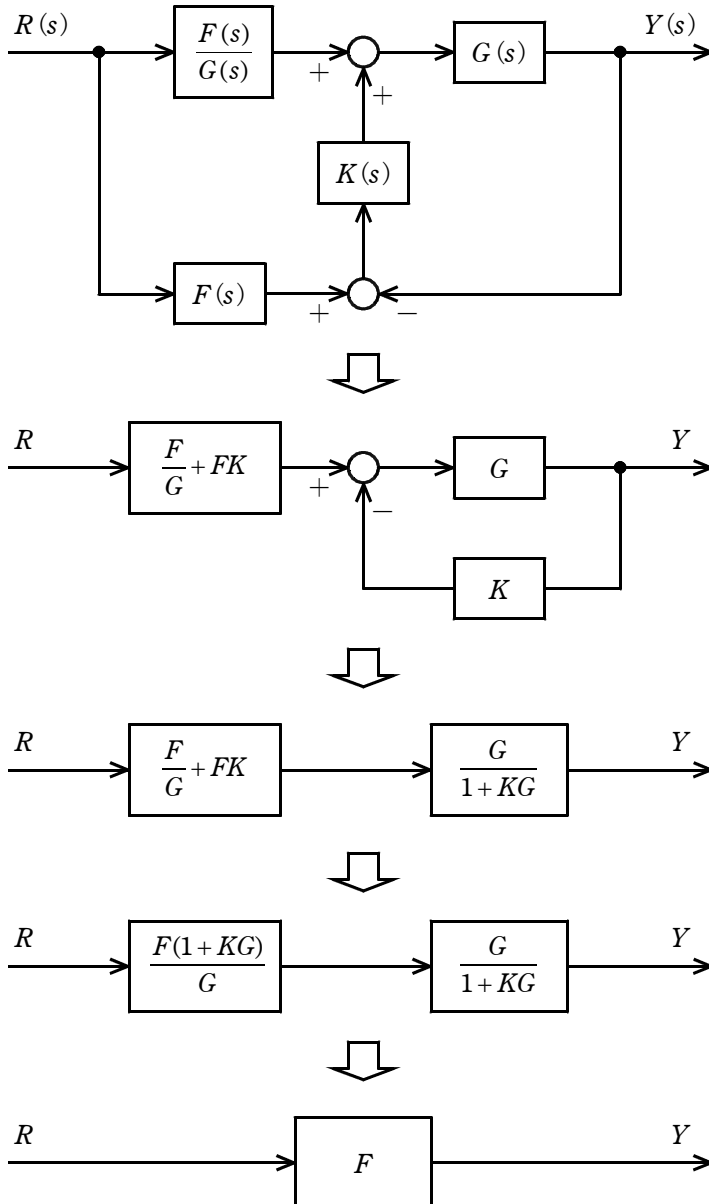
$$Y(s) = \frac{F(s) + G(s)K(s)F(s)}{1 + G(s)K(s)} R(s) = \frac{[1 + G(s)K(s)]F(s)}{1 + G(s)K(s)} R(s) = F(s)R(s) \quad \dots\dots \textcircled{6}$$

で与えられる。



〔(2)の別解〕

ブロック線図の変形によっても求めることができる。 $D(s) = 0$  のとき、



(3)  $F(s)$  の係数の計算

定常ゲインが 1 となり，減衰定数を  $\zeta$ ，固有角周波数を  $\omega_n$  とする 2 次系の伝達関数は，

$$F(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}$$

で与えられるので，求めるべき望ましい補償器  $F(s)$  は

$$F(s) = \frac{100}{s^2 + 16s + 100}$$

となるので，答は

$$a = 16, \quad b = 100, \quad c = 100$$

で与えられる。

(4) 補償器の名称など

補償器の名称は，PID 補償器(又は，PID 調節計，PID コントローラなど)である。また，各係数については， $K_p$  は比例ゲイン， $T_I$  は積分時間(リセットタイム)， $T_D$  は微分時間(レートタイム)という。

(5) 安定条件

特性方程式を求めると

$$1 + \frac{K_P}{s^3} \left( s + \frac{1}{T_I} + T_D s^2 \right) = 0$$

となる。これを整理すると

$$s^3 + K_P T_D s^2 + K_P s + \frac{K_P}{T_I} = 0 \quad \dots\dots\dots \textcircled{7}$$

仮定より、係数はすべて正、次にラウス表を作成すると

$s^3$	1	$K_P$
$s^2$	$K_P T_D$	$\frac{K_P}{T_I}$
$s^1$	$\frac{K_P^2 T_D - \frac{K_P}{T_I}}{K_P T_D}$	0
$s^0$	$\frac{K_P}{T_I}$	

となり、これより、 $K_P T_D - \frac{1}{T_I} > 0$ 、すなわち、答は

$$K_P T_I T_D > 1 \quad \dots\dots\dots \textcircled{8}$$

で与えられる。 $K_P T_I T_D = 1$  のとき、安定限界となる。