

平成 28 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]

(1)

図 1 排熱回収方式

図 2 排気再燃方式

(2)

- ・発電機を回す動力源として、蒸気タービンのみを利用する既設のコンベンショナル(従来型)火力のリパワリング(出力増強と熱効率改善)に適用できる。
- ・プラント出力に対する蒸気タービンの出力の割合が大きい、又はボイラの蒸気発生量が多い。
- ・蒸気タービンの単独運転が可能である(100%容量の押込通風機を設置した場合)。
- ・運転制御系が複雑となる。
- ・起動から定格負荷までの時間並びに定格負荷から停止までの時間が長い。
- ・ボイラに使用する燃料はガスタービンと無関係に選択できる。

などより四つを記載する。

[問2の標準解答]

単位長インピーダンス

$$\dot{z} = j\omega L = j2\pi \times 50 \times 1.6 \times 10^{-3} \doteq j0.50265 \text{ } \Omega/\text{km}$$

単位長アドミタンス

$$\dot{y} = j\omega C = j2\pi \times 50 \times 0.01 \times 10^{-6} \doteq j3.1416 \times 10^{-6} \text{ S/km}$$

こう長  $d=100 \text{ km}$  の2回線送電線のインピーダンス及びアドミタンスは以下のとおりとなる。

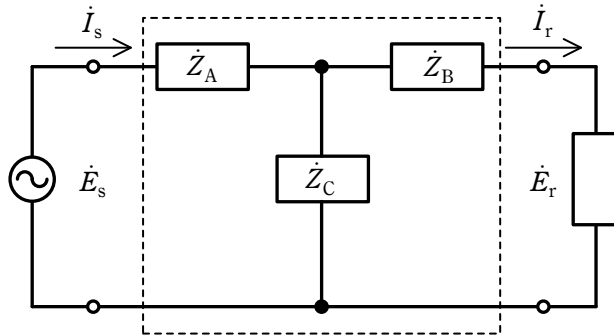
インピーダンス

$$\dot{Z} = \frac{\dot{z}d}{2} \doteq j25.133 \text{ } \Omega$$

アドミタンス

$$\dot{Y} = 2\dot{y}d \doteq j6.2832 \times 10^{-4} \text{ S}$$

(1) T形等価回路を図のように表すと、四端子定数  $\dot{A}$ 、 $\dot{B}$ 、 $\dot{C}$ 、 $\dot{D}$  は、以下のとおりとなる。



$$\begin{aligned} \dot{E}_s &= \dot{A}\dot{E}_r + \dot{B}\dot{I}_r \\ \dot{I}_s &= \dot{C}\dot{E}_r + \dot{D}\dot{I}_r \end{aligned}$$

T形等価回路

$$\dot{A} = \frac{\dot{Z}_A + \dot{Z}_C}{\dot{Z}_C} = 1 + \frac{\dot{Z}_A}{\dot{Z}_C}$$

$$\dot{B} = \frac{\dot{Z}_A\dot{Z}_C + \dot{Z}_A\dot{Z}_B + \dot{Z}_C\dot{Z}_B}{\dot{Z}_C}$$

$$\dot{C} = \frac{1}{\dot{Z}_C}$$

$$\dot{D} = \frac{\dot{Z}_B + \dot{Z}_C}{\dot{Z}_C} = 1 + \frac{\dot{Z}_B}{\dot{Z}_C}$$

$\dot{Z}_A, \dot{Z}_B, \dot{Z}_C$  から, 四端子定数  $\dot{A}, \dot{B}, \dot{C}, \dot{D}$  を求めると,

$$\begin{aligned} \dot{Z}_A = \dot{Z}_B &= \frac{\dot{Z}}{2} \doteq \frac{j25.133}{2} \\ \dot{Z}_C &= \frac{1}{\dot{Y}} \doteq \frac{1}{j6.2832 \times 10^{-4}} \\ \dot{A} = \dot{D} &= 1 + \frac{j25.133 \times j6.2832 \times 10^{-4}}{2} \\ &\doteq 0.9921 \rightarrow 0.992 \\ \dot{B} &= \dot{Z}_A + \dot{Z}_B + \frac{\dot{Z}_A \dot{Z}_B}{\dot{Z}_C} \\ &= j25.133 + \frac{j25.133 \times j25.133 \times j6.2832 \times 10^{-4}}{4} \\ &\doteq j25.034 \rightarrow j25.0 \Omega \\ \dot{C} &= \dot{Y} \doteq j6.2832 \times 10^{-4} \rightarrow j6.28 \times 10^{-4} \text{ S} \end{aligned} \left. \vphantom{\begin{aligned} \dot{Z}_A = \dot{Z}_B \\ \dot{Z}_C \\ \dot{A} = \dot{D} \\ \dot{B} \\ \dot{C} \end{aligned}} \right\} \dots (\text{答})$$

(2) 受電端の相電圧を基準ベクトルとする。  $\dot{E}_r = E_r$

受電端開放なので,  $\dot{I}_r = 0$  として,

$$\dot{E}_s = \dot{A}E_r$$

両辺を  $\sqrt{3}$  倍して絶対値をとると,

$$|\dot{V}_s| = |\dot{A}|V_r = 0.9921 \times 275 \doteq 272.83 \rightarrow 273 \text{ kV} \dots (\text{答})$$

(3) 受電端開放なので,  $\dot{I}_r = 0$  として,

$$\dot{I}_s = \dot{C}E_r$$

抵抗及び漏れコンダクタンスを無視しているため, 無効電力のみの供給となり,

$$\begin{aligned} Q_s &= 3 \times \text{Im}(\dot{E}_s \bar{\dot{I}}_s) \\ &= 3 \times \text{Im}(\dot{A} \bar{\dot{C}} E_r^2) \\ &= 3 \times 0.9921 \times (-6.2832 \times 10^{-4}) \times \left(\frac{275}{\sqrt{3}}\right)^2 \\ &\doteq -47.141 \rightarrow -47.1 \text{ Mvar} \dots (\text{答}) \end{aligned}$$

[問3の標準解答]

(1)

$$P_g + jQ_g = \dot{V}_g \bar{I} \quad \dots\dots\dots \textcircled{1}$$

$$\dot{V}_g = \dot{V}_i + jx_L \dot{I} \quad \dots\dots\dots \textcircled{2}$$

①式及び②式より、 $\dot{V}_i$ を基準とした $\dot{V}_g$ の相差角を $\delta$ として、

$$P_g + jQ_g = \dot{V}_g \frac{\bar{\dot{V}}_g - \bar{\dot{V}}_i}{-jx_L} = \frac{j}{x_L} [V_g^2 - V_g V_i (\cos \delta + j \sin \delta)]$$

よって、

$$P_g = \frac{V_g V_i}{x_L} \sin \delta$$

$$Q_g = \frac{V_g}{x_L} (V_g - V_i \cos \delta)$$

ただし、

$$\cos \delta = \sqrt{1 - \left( \frac{P_g x_L}{V_g V_i} \right)^2}$$

よって、

$$A = V_g, \quad B = V_i, \quad C = P_g x_L \quad \dots (\text{答})$$

①式及び<試験問題①式>より、

$$\dot{E}_f = \dot{V}_g + jx_g \frac{P_g - jQ_g}{\dot{V}_g}$$

これより、

$$E_f = \sqrt{\left( V_g + x_g \frac{Q_g}{V_g} \right)^2 + \left( x_g \frac{P_g}{V_g} \right)^2}$$

よって、

$$D = x_g \frac{Q_g}{V_g}, \quad F = x_g \frac{P_g}{V_g} \quad \dots (\text{答})$$

(2)  $Q_g \doteq 0.7137 \rightarrow 0.714, \quad E_f \doteq 2.7676 \rightarrow 2.77 \quad \dots (\text{答})$

(3)  $\dot{V}_i$  を基準とし,  $\dot{E}_f$  との相差角を  $\delta_f$  とする。

$$P_g = \frac{E_f V_i}{x_g + x_L} \sin \delta_f \text{ より } \sin \delta_f \text{ が求まる。}$$

発電機の内部の電流と流出する電流が同じなので,

$$\dot{E}_f = \dot{V}_i + j(x_g + x_L)\dot{I}$$

これより電流を下式に代入して,

$$\begin{aligned} \dot{V}_g &= \dot{V}_i + jx_L\dot{I} = \dot{V}_i + jx_L \frac{\dot{E}_f - \dot{V}_i}{j(x_g + x_L)} \\ &= \frac{x_g}{x_g + x_L} \dot{V}_i + \frac{x_L}{x_g + x_L} \dot{E}_f \end{aligned}$$

$$\dot{E}_f = E_f \cos \delta_f + jE_f \sin \delta_f \text{ なので,}$$

$$\begin{aligned} V_g^2 &= \frac{1}{(x_g + x_L)^2} \left[ (x_g V_i + x_L E_f \cos \delta_f)^2 + (x_L E_f \sin \delta_f)^2 \right] \\ &= \frac{1}{(x_g + x_L)^2} \left( x_g^2 V_i^2 + 2x_g x_L V_i E_f \cos \delta_f + x_L^2 E_f^2 \right) \end{aligned}$$

よって,

$$V_g = \frac{1}{x_g + x_L} \sqrt{x_g^2 V_i^2 + 2x_g x_L V_i E_f \cos \delta_f + x_L^2 E_f^2}$$

ただし,

$$\cos \delta_f = \sqrt{1 - \left[ \frac{P_g(x_g + x_L)}{E_f V_i} \right]^2}$$

よって,

$$G = x_g^2 V_i^2 + x_L^2 E_f^2, \quad H = 2x_g x_L V_i E_f, \quad J = \frac{P_g(x_g + x_L)}{E_f V_i} \quad \dots (\text{答})$$

(4) まず, <試験問題⑤, ⑥式>の解答から  $V_g$  を求め, この  $V_g$  を用いて, <試験問題②, ③式>の解答から  $Q_g$  を求める。

$$Q_g \doteq 0.3739 \rightarrow 0.374, \quad V_g \doteq 0.8930 \rightarrow 0.893 \quad \dots (\text{答})$$

[問4の標準解答]

(1) 内部異常電圧とは、外部より侵入する雷電圧(外雷又は外部異常電圧と呼ぶ。)と区別して、電力系統の内部的原因によって生じる異常電圧のことを意味し、開閉サージ、1線地絡時の健全相電圧上昇や負荷遮断時の異常電圧などがある。

開閉サージは、遮断器の開閉操作によって生じ、最大数ミリ秒程度継続する過渡的異常電圧である。開閉サージの大きさは、送電線のこう長や高さなど送電線路の静電容量の大きさ、再閉路時の残留電圧の有無などにより左右される。

1線地絡時の健全相電圧上昇は、1線地絡故障時に健全相に発生する商用周波数の過電圧である。電圧の大きさは、中性点接地方式などによって左右される。

負荷遮断時の電圧上昇は、遮断器などで負荷遮断時に発生する商用周波数の過電圧である。電圧の大きさは、負荷遮断前の潮流、発電機の定数、送電線の静電容量などによって左右される。

(2) がいし一連個数を決定する場合にも、内部異常電圧によってフラッシュオーバーが発生しないようにするという原則が有効である。154kV以下の電圧階級では、開閉サージ電圧波高値とがいし連の注水時の開閉サージ耐電圧特性及び持続性異常電圧実効値とがいし連の注水時の商用周波数耐電圧特性の二つから所要連結個数を計算する。両者の計算結果を比較すると後者の絶縁裕度の方が大きく、がいし個数は通常全て開閉サージによって決まる。

実際には、保守用がいしを通常1個多く設けることとして最終的な一連個数が決定される。また、臨海部などで塩害が甚だしい場合など、汚損条件下では耐圧特性が低下するので考慮が必要である。

[問5の標準解答]

- (1) 低圧電線路の絶縁性能は絶縁抵抗の値で規定され、絶縁抵抗測定により確認する。これに対し、高圧以上の電線路の絶縁性能は、試験電圧と試験時間とによって定められている絶縁耐力試験により確認する。

絶縁抵抗測定は、試験しようとする電線路の電線相互間及び電路と大地との絶縁抵抗が、規定値以上であることを確認する。絶縁抵抗測定が困難な場合においては、当該電線路の使用電圧が加わった状態における漏えい電流が、規定値以下であることを確認する。

絶縁耐力試験は、試験しようとする電線路の最大使用電圧を基準として、定められている試験電圧を電線路と大地との間に連続して一定時間加え、異常が生じないかを確認する方法である。

- (2) 長距離の電力ケーブルは対地静電容量が大きく、交流試験では所用電源容量、試験設備が大きくなり、その実施が困難である場合が多いため、比較的簡単に実施できる直流での耐压試験を行うことが認められている。

交流試験の試験電圧の2倍の直流電圧を、電路と大地との間(多心ケーブルにあっては、心線相互間及び心線と大地との間)に連続して10分間加えたとき、これに耐えられることを確認する方法である。

[問6の標準解答]

各電力システムの系統定数は、

$$K_A = 0.08 \times 5000 = 400 \text{ MW/Hz}$$

$$K_B = 0.1 \times 15000 = 1500 \text{ MW/Hz}$$

$$K_C = 0.12 \times 55000 = 6600 \text{ MW/Hz}$$

- (1) BC間の連系潮流を $P_{BC}$ (CからBの向きを正)とすると、Cの需給バランスより、

$$K_C \Delta F_C = P_{BC}$$

なので、

$$\Delta F_C = \frac{P_{BC}}{K_C} = \frac{214}{6600} \doteq 0.03242 \rightarrow 0.03 \text{ Hz} \quad \cdots(\text{答})$$

- (2) BC間は交流連系なので、

$$\Delta F_B = \Delta F_C \doteq 0.03242 \rightarrow 0.03 \text{ Hz} \quad \cdots(\text{答})$$

- (3) AB間の連系潮流 $P_{AB}$ (BからAの向きを正)は、Bの需給バランスより、

$$P_{AB} = K_B \Delta F_B + P_{BC} = 1500 \times 0.03242 + 214 \doteq 262.6 \rightarrow 263 \text{ MW} \quad \cdots(\text{答})$$

- (4) 電源脱落量を $\Delta G_A$ とすると、Aの需給バランスより、

$$K_A \Delta F_A + P_{AB} = \Delta G_A$$

なので、

$$\Delta F_A = \frac{\Delta G_A - P_{AB}}{K_A} = \frac{450 - 262.6}{400} \doteq 0.4685 \rightarrow 0.47 \text{ Hz} \quad \cdots(\text{答})$$

- (5) 以上の(2)、(3)及び(4)の結果より、 $\Delta F_A > \Delta F_B$ を考慮して、

$$R_{AB} = \frac{P_{AB}}{\Delta F_A - \Delta F_B} = \frac{262.6}{0.4685 - 0.0324} \doteq 602.1 \rightarrow 600 \text{ MW/Hz} \quad \cdots(\text{答})$$



<機械・制御科目>

[問1の標準解答]

(1) 二次電流は、 $\dot{E}_2$ を基準ベクトルとすると、

$$\dot{I}_2 = \frac{sE_2}{r_2 + jsx_2}$$

と表されるので、

$$|\dot{I}_2| = I_2 = \frac{sE_2}{\sqrt{r_2^2 + (sx_2)^2}} \quad \dots \text{(答)}$$

である。二次入力は、

$$P_2 = \operatorname{Re}[3E_2\dot{I}_2] = \operatorname{Re}\left[\frac{3sE_2^2}{r_2 + jsx_2}\right] = 3E_2^2 \frac{sr_2}{r_2^2 + (sx_2)^2} \quad \dots \text{(答)}$$

あるいは、

$$P_2 = 3|\dot{I}_2|^2 \frac{r_2}{s} = \frac{3(sE_2)^2}{r_2^2 + (sx_2)^2} \cdot \frac{r_2}{s} = 3E_2^2 \frac{sr_2}{r_2^2 + (sx_2)^2} \quad \dots \text{(答)}$$

(2) 同期ワットで表したトルク（二次入力）は、

$$P_2 = 3E_2^2 \frac{sr_2}{r_2^2 + (sx_2)^2}$$

であるから  $r_2 = sx_2$  のとき最大  $P_{2m}$  となる。

$$s_m = \frac{r_2}{x_2} = 0.2, \quad x_2 = 5r_2 \quad \dots \text{(答)}$$

$$P_{2m} = 3 \frac{E_2^2}{2x_2} = 3 \frac{E_2^2 s_m}{2r_2} = 0.3 \frac{E_2^2}{r_2} \quad \dots \text{(答)}$$

(3)  $x_2 = 5r_2$  の関係を用いて、 $s_1 = 0.02$  とし、

$$\begin{aligned} P_2 &= 3E_2^2 \frac{s_1 r_2}{r_2^2 + (s_1 x_2)^2} = 3E_2^2 \frac{0.02 r_2}{r_2^2 + (0.02 \times 5r_2)^2} = 3 \times \frac{0.02}{1.01} \times \frac{E_2^2}{r_2} \\ &\doteq 0.0594059 \frac{E_2^2}{r_2} \rightarrow 0.0594 \frac{E_2^2}{r_2} \quad \dots \text{(答)} \end{aligned}$$

二次入力  $P_2$  のうち、機械的出力  $(1-s_1)P_2$  を差し引いた残りの二次電力  $s_1 P_2$  は全て銅損  $P_{C2}$  となり、

$$P_{C2} = s_1 P_2 \doteq 0.00118812 \frac{E_2^2}{r_2} \rightarrow 0.00119 \frac{E_2^2}{r_2} \quad \dots \text{(答)}$$

(4) 負荷トルクは変わらないので、滑り  $s_2$  は、比例推移によって、

$$\frac{s_2}{s_1} = \frac{r_2 + R_2}{r_2} = 2$$

$$s_2 = 0.04 \quad \dots (\text{答})$$

二次側損失  $P_{w2}$  は、

$$P_{w2} = s_2 P_2 = \frac{s_2}{s_1} \times P_{C2} = 2 \times P_{C2} \doteq 0.002 \ 376 \ 24 \frac{E_2^2}{r_2} \rightarrow 0.002 \ 38 \frac{E_2^2}{r_2} \quad \dots (\text{答})$$

(5)  $|s_2 \dot{E}_2 - \dot{E}_B| = s_2 E_2 - E_B$  なので、 $\dot{E}_2$  を基準ベクトルとして、二次電流  $\dot{I}_2$  は、

$$\dot{I}_2 = \frac{s_2 E_2 - E_B}{r_2 + js_2 x_2}$$

と書ける。よって二次入力は、

$$P_2'' = \text{Re} [3E_2 \dot{I}_2] = \text{Re} \left[ 3E_2 \frac{s_2 E_2 - E_B}{r_2 + js_2 x_2} \right] = \frac{3E_2 (s_2 E_2 - E_B) r_2}{r_2^2 + (s_2 x_2)^2}$$

となる。 $s_2 = 0.04$ ,  $x_2 = 5r_2$  の関係を用いて、

$$P_2'' = 3E_2 \frac{0.04E_2 - E_B}{1.04r_2}$$

とできる。負荷トルクは一定 ( $P_2'' = P_2$ ) であるから、

$$P_2'' = 3E_2 \frac{0.04E_2 - E_B}{1.04r_2} = P_2 = 3 \times \frac{0.02}{1.01} \times \frac{E_2^2}{r_2}$$

よって、

$$E_B = E_2 \left( 0.04 - \frac{0.02 \times 1.04}{1.01} \right) \doteq 0.019 \ 405 \ 9 E_2 \rightarrow 0.019 \ 4 E_2 \quad \dots (\text{答})$$

銅損  $P_{C2}''$  は、

$$P_{C2}'' = 3|\dot{I}_2|^2 r_2 = 3 \left( \frac{0.04E_2 - E_B}{\sqrt{1.04r_2}} \right)^2 r_2 = 3 \frac{0.0205941^2}{1.04} \cdot \frac{E_2^2}{r_2}$$

$$\doteq 0.00122341 \frac{E_2^2}{r_2} \rightarrow 0.001 \ 22 \frac{E_2^2}{r_2} \quad \dots (\text{答})$$

となる。二次励磁回路へ返還する電力  $P_B$  は、

$$P_B = \text{Re} [3E_B \dot{I}_2] = \text{Re} \left[ 3E_B \frac{s_2 E_2 - E_B}{r_2 + js_2 x_2} \right] = 3E_B \frac{0.04E_2 - E_B}{1.04r_2}$$

$$\doteq 0.001 \ 152 \ 83 \frac{E_2^2}{r_2} \rightarrow 0.001 \ 15 \frac{E_2^2}{r_2} \quad \dots (\text{答})$$

すなわち,

$$P_{w2} = P'_{C2} + P_B$$

である。

[問2の標準解答]

(1) 図1のフェーザ図から、 $\dot{E}$ 、 $\dot{I}$ は以下のように表される。

$$\begin{aligned}\dot{E} &= \dot{V} - \dot{Z}_S \dot{I} \\ \dot{I} &= \frac{\dot{V} - \dot{E}}{\dot{Z}_S} = \frac{\dot{V} - \dot{E}}{Z_S e^{j\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right)}} \\ &= \frac{\dot{V}}{Z_S} e^{j\left(\alpha - \frac{\pi}{2}\right)} - \frac{\dot{E}}{Z_S} e^{j\left(\alpha - \frac{\pi}{2}\right)}\end{aligned}$$

電動機の出力  $P_{OP}$  は  $\dot{E}$  と  $\dot{I}$  との複素電力の式から求まる。

$$\begin{aligned}P_{OP} + jQ_{OP} &= \dot{E} \bar{\dot{I}} = \dot{E} \left[ \frac{\bar{\dot{V}}}{Z_S} e^{-j\left(\alpha - \frac{\pi}{2}\right)} - \frac{\bar{\dot{E}}}{Z_S} e^{-j\left(\alpha - \frac{\pi}{2}\right)} \right] \\ &= \frac{\dot{E} \bar{\dot{V}}}{Z_S} e^{-j\left(\alpha - \frac{\pi}{2}\right)} - \frac{E^2}{Z_S} e^{-j\left(\alpha - \frac{\pi}{2}\right)}\end{aligned}$$

$\dot{E}$  を位相基準にとり、 $\dot{E} = E$ 、 $\dot{V} = V e^{j\delta}$  とすると、

$$\begin{aligned}P_{OP} + jQ_{OP} &= \frac{EV}{Z_S} e^{-j\left(\delta + \alpha - \frac{\pi}{2}\right)} - \frac{E^2}{Z_S} e^{-j\left(\alpha - \frac{\pi}{2}\right)} \\ P_{OP} &= \frac{EV}{Z_S} \cos\left[-\left(\delta + \alpha\right) + \frac{\pi}{2}\right] - \frac{E^2}{Z_S} \cos\left[-\left(\alpha - \frac{\pi}{2}\right)\right] \\ &= \frac{EV}{Z_S} \sin(\delta + \alpha) - \frac{E^2}{Z_S} \sin \alpha\end{aligned}$$

問題に記載の電力の基準値とトルクの基準値から、この単位法において、定格回転速度では軸出力トルク  $T$  [p.u.] と出力  $P_{OP}$  [p.u.] とは同じ数値となる。

$$T = P_{OP} = \frac{EV}{Z_S} \sin(\delta + \alpha) - \frac{E^2}{Z_S} \sin \alpha \quad [\text{p.u.}] \quad \cdots (\text{答})$$

(2)

a. フェーザ図から、 $R_a = 0$  p.u. の場合の  $E$  の式は次のとおり。

$$E = \sqrt{(V - IX_S \sin \phi)^2 + (IX_S \cos \phi)^2}$$

定格運転状態では、力率  $\cos \phi = 1.0$  であり、 $\sin \phi = 0$  である。これらを代入する。

$$\begin{aligned}E &= \sqrt{(1 - 1 \times 1 \times 0)^2 + (1 \times 1 \times 1)^2} \\ &= \sqrt{2} \doteq 1.4142 \rightarrow 1.41 \text{ p.u.} \quad \cdots (\text{答})\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\delta &= \sin^{-1}\left(\frac{IX_S \cos \phi}{E}\right) = \sin^{-1} \frac{1}{\sqrt{2}} = \frac{\pi}{4} \\ &= \frac{3.1416}{4} = 0.78540 \rightarrow 0.785 \text{ rad} \cdots (\text{答})\end{aligned}$$

$R_a=0$  p.u.及び $\alpha=0$  rad の場合の定格回転速度時の軸出力トルクの式は、上記小問(1)で導出した式から、次のようになる。

$$T = \frac{EV}{X_S} \sin \delta \text{ [p.u.]}$$

定格運転状態の  $T$  は、以下のとおり。

$$T = \frac{1.4142 \times 1 \times \sin \frac{\pi}{4}}{1 \times 1} = 1.00 \text{ p.u.} \cdots (\text{答})$$

界磁電流が定格運転状態と同じであるため、 $E$  は前述の数値と同じである。

また、 $V=1$  p.u.である。軸トルクは $\delta = \frac{\pi}{2}$ のとき最大値となる。

脱出トルク  $T_{\max}$  は以下のとおりとなる。

$$T_{\max} = \frac{1.4142 \times 1}{1 \times 1} \sin \frac{\pi}{2} = 1.4142 \rightarrow 1.41 \text{ p.u.} \cdots (\text{答})$$

b. 定常状態にて、負荷トルクが $\delta = \frac{\pi}{2}$ の軸出力トルクの最大値以上になると

とき、脱調が起こる可能性がある。すなわち、 $\delta = \frac{\pi}{2}$ の軸出力トルクの最大値が定格運転状態の負荷トルクとなる  $V$  の数値を算出する。

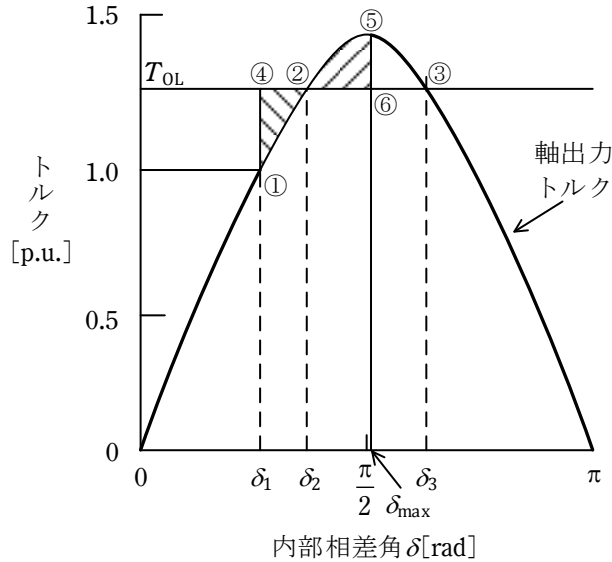
$$T = \frac{1.4142 \times V}{1 \times 1} \sin \frac{\pi}{2} = 1.0$$

$$V = \frac{1}{1.4142} \doteq 0.70711 \rightarrow 0.707 \text{ p.u.} \cdots (\text{答})$$

c. 界磁電流、回転速度及び  $V$  が定格運転状態と同じであるため、軸出力トルク  $T$  の式は次のようになる。

$$T = \sqrt{2} \sin \delta \text{ [p.u.]}$$

その軸出力トルク-内部相差角特性を下図に示す。



点①は、上記 a より  $\delta_1 = \frac{\pi}{4}$  rad となる。  $T_{OL} = 1.28$  p.u. のとき、上記の式から  $\sin \delta = \frac{1.28}{\sqrt{2}} = 0.90510$  となるので、点②は  $\delta_2 = 1.1316$  rad の点であり、点③は  $\delta_3 = 2.0100$  rad の点である。この  $\delta_3$  の点③が過渡安定性の臨界点である。図の内部相差点  $\delta$  が最大になる点⑤の  $\delta_{max}$  は、等面積法から、面積①④②と面積②⑤⑥が等しくなる点である。すなわち、以下の式が成立する点である。

$$\int_{\delta_1}^{\delta_{max}} (\sqrt{2} \sin \delta - 1.28) d\delta = 0$$

この  $\delta_{max}$  と臨界点  $\delta_3$  との関係を求めるために、仮に  $\delta_{max} = \delta_3$  として計算すると、

$$\begin{aligned} \int_{\frac{\pi}{4}}^{\delta_3} (\sqrt{2} \sin \delta - 1.28) d\delta &= \left[ -\sqrt{2} \cos \delta - 1.28\delta \right]_{\frac{\pi}{4}}^{\delta_3} \\ &= -\sqrt{2} \cos \delta_3 - 1.28\delta_3 + \sqrt{2} \cos \frac{\pi}{4} + 1.28 \frac{\pi}{4} \\ &= -\sqrt{2} \cdot \left[ -\sqrt{1 - (\sin \delta_3)^2} \right] - 1.28\delta_3 + \sqrt{2} \cos \frac{\pi}{4} + 1.28 \frac{\pi}{4} \\ &= -\sqrt{2} \cdot \left[ -\sqrt{1 - \left( \frac{1.28}{\sqrt{2}} \right)^2} \right] - 1.28 \times 2.0100 + \sqrt{2} \times \frac{1}{\sqrt{2}} + 1.28 \frac{\pi}{4} \\ &= 0.03383 > 0 \end{aligned}$$

以上から，図のように $\delta_{\max} < \delta_3$ となる。 $\delta$ は点③の過渡安定性の臨界点に到達せず， $\delta_{\max}$ にて折り返して， $\delta_2$ に向かう。

したがって，負荷トルクの瞬時上昇による $\delta$ の最初の過渡変化によって，脱調は起こらない。 …(答)

[問3の標準解答]

(1) 変圧器二次側の線間電圧実効値は  $V$  であるので、ブリッジ1の線間電圧を

$$v_{uv1} = \sqrt{2}V \cos \theta$$

とすれば、 $v_{d1}$  は  $60^\circ$  ごとの繰り返し波形で、 $\alpha - \frac{\pi}{6} < \theta < \alpha + \frac{\pi}{6}$  の期間では、 $v_{d1} = v_{uv1}$

であるので、 $v_{d1}$  の平均値は、

$$V_{d1} = \frac{3}{\pi} \int_{\alpha - \frac{\pi}{6}}^{\alpha + \frac{\pi}{6}} v_{uv1} d\theta = \frac{3\sqrt{2}V}{\pi} [\sin \theta]_{\alpha - \frac{\pi}{6}}^{\alpha + \frac{\pi}{6}} = \frac{3\sqrt{2}V}{\pi} \cos \alpha$$

$v_{d1}$  と  $v_{d2}$  の平均値は、等しいので、

$$V_d = V_{d1} + V_{d2} = \frac{6\sqrt{2}V}{\pi} \cos \alpha \dots (\text{答})$$

(2) 変圧器二次電圧の波高値は  $\sqrt{2}V$  であり、Y-Y 結線と  $\Delta$ -Y 結線の変圧器の間には  $30^\circ$  ( $\frac{\pi}{6}$  rad) の位相差があるので、制御角  $\alpha$  が  $15^\circ$  ( $\frac{\pi}{12}$  rad) 以下では  $v_d$  の最大値は、

$$\sqrt{2}V \times 2 \times \cos \frac{\pi}{12} = \sqrt{4 + 2\sqrt{3}}V$$

である。制御角  $\alpha$  が  $15^\circ$  以上では、 $v_d$  の最大値は余弦波状に低下する。したがって、 $\alpha = \frac{\pi}{3}$  の  $v_d$  の最大値は、

$$V_{\max} = \sqrt{4 + 2\sqrt{3}}V \cos \left( \frac{\pi}{3} - \frac{\pi}{12} \right) = \sqrt{4 + 2\sqrt{3}}V \cos \frac{\pi}{4} = \sqrt{2 + \sqrt{3}}V \dots (\text{答})$$

なお、 $\alpha > 15^\circ$  では、転流直後の電圧が最大となるので、そのときの出力電圧の和から求めることもできる。

(3) 変圧器二次電流の波高値は、すべて  $I_d$  である。Y-Y 結線変圧器の一次電流  $i_{U1}$  は二次電流  $i_{u1}$  に等しい。一方、巻数比を考慮すると、 $\Delta$ -Y 結線変圧器の一次の巻線電流  $i'_{u2}$ 、 $i'_{w2}$  の波高値は  $\frac{I_d}{\sqrt{3}}$  である。したがって、図2のように、一

次電流  $i_{U2}$  の波高値は  $\frac{2}{\sqrt{3}}I_d$  である。したがって、電源電流  $i_U$  の波高値は、

$$I_{\max} = I_d + \frac{2}{\sqrt{3}}I_d = \left( 1 + \frac{2}{\sqrt{3}} \right) I_d \dots (\text{答})$$



- (4) 図 2 のように、電源電流  $i_U$  は  $\pm \frac{1}{\sqrt{3}}I_d$ ,  $\pm \left(1 + \frac{1}{\sqrt{3}}\right)I_d$ ,  $\pm \left(1 + \frac{2}{\sqrt{3}}\right)I_d$  の 6 値の繰り返し波形である。波形の対称性から、正の 3 値の二乗平均値の平方根(実効値)を求めると、

$$I_U = \sqrt{\frac{\left(\frac{1}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(1 + \frac{1}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(1 + \frac{2}{\sqrt{3}}\right)^2}{3}} I_d = \sqrt{\frac{\frac{1}{3} + \left(1 + \frac{2}{\sqrt{3}} + \frac{1}{3}\right) + \left(1 + \frac{4}{\sqrt{3}} + \frac{4}{3}\right)}{3}} I_d$$

$$= \sqrt{\frac{4 + 2\sqrt{3}}{3}} I_d \cdots (\text{答})$$

- (5) 基本波電流実効値を  $I_{Uf}$  [A] とすると、三相電源からの電力は抵抗  $R$  の消費電力に等しいので、

$$\sqrt{3}VI_{Uf} \cos \alpha = V_d I_d = \frac{6\sqrt{2}VI_d}{\pi} \cos \alpha$$

となる。したがって、

$$I_{Uf} = \frac{2\sqrt{6}}{\pi} I_d \cdots (\text{答})$$

- (6) 高調波電流実効値は、 $\sqrt{I_U^2 - I_{Uf}^2}$  であるので、高調波ひずみ率  $D$  は、

$$D = \frac{\sqrt{I_U^2 - I_{Uf}^2}}{I_{Uf}} = \sqrt{\frac{I_U^2}{I_{Uf}^2} - 1} = \sqrt{\frac{2 + \sqrt{3}}{36} \pi^2 - 1} \cdots (\text{答})$$

[問4の標準解答]

(1)  $|s\mathbf{I} - \mathbf{A}| = \begin{vmatrix} s+1 & -2 \\ 0 & s-1 \end{vmatrix} = (s+1)(s-1) = 0$  から、固有値は  $\pm 1$  と求められる。安定

な固有値  $-1$  と不安定な固有値  $+1$  がひとつずつある。不安定な固有値を有するので、制御対象は不安定である。

(2) 可制御性行列  $\mathbf{U}_C$  は、 $\mathbf{U}_C = (\mathbf{b} \quad \mathbf{A}\mathbf{b}) = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix}$  と計算されるから、 $|\mathbf{U}_C| = 0$  となる。よって、制御対象は不可制御である。

(3)  $\mathbf{A} - \mathbf{b}\mathbf{f} = \begin{pmatrix} -1 & 2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} f_1 & f_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1-f_1 & 2-f_2 \\ -f_1 & 1-f_2 \end{pmatrix} \cdots$  (答)

(4)  $|s\mathbf{I} - \mathbf{A} + \mathbf{b}\mathbf{f}| = \begin{vmatrix} s+1+f_1 & -2+f_2 \\ f_1 & s-1+f_2 \end{vmatrix} = s^2 + (f_1+f_2)s + (-1+f_1+f_2)$

係数比較法を用いて、次の連立方程式を得る。

$$\left. \begin{array}{l} a_0 = -1 + f_1 + f_2 \\ a_1 = f_1 + f_2 \end{array} \right\} \cdots \text{(答)}$$

(5) この二本の方程式は、傾きが等しいので、軸切片が異なると解を持たない。解を持つには、 $a_1 = a_0 + 1$  が条件となる。

(6)  $a_1 = a_0 + 1$  を  $P(s)$  に代入すると、

$$P(s) = s^2 + (a_0 + 1)s + a_0 = (s+1)(s+a_0)$$

となる。このことから、 $f_1$  及び  $f_2$  を適切に選ぶことで安定な固有値  $-1$  はそのまま、不安定な固有値だけを実数の  $-a_0$  ( $a_0 > 0$ ) に移すことができることがわかる。すなわち、制御対象を安定化できる。

(7)  $a_0 = 2$  であるから、方程式は

$$f_1 + f_2 = 3$$

となる。よって、例えば  $\mathbf{f} = (1 \quad 2)$  とすれば制御対象を安定化できる。

$f_1$  と  $f_2$  を求める方程式が、1本だけなので、解は無数に存在する。