平成 27 年度

第　2　種

機械・制御

（第 2 時限目）

第２種

機械・制御

答案用紙記入上の重要事項及び注意事項

指示がありましたら答案用紙（記述用紙）２枚を**引き抜いて**ください。答案用紙には，**２枚とも直ちに試験地，受験番号及び生年月日**を記入してください。

１．重要事項

ａ．「選択した問の番号」欄には，**必ず選択した問番号を記入**してください。

記入した問番号で採点されます。問番号が未記入のものは，採点されません。

ｂ．計算問題では，**解に至る過程を簡潔に記入**してください。

導出過程が不明瞭な答案は，０点となる場合があります。

２．注意事項

○ 記入には，**濃度ＨＢの鉛筆又はシャープペンシルを使用してください。**

○ 答案用紙は１問につき１枚としてください。

○ 計算問題の答は，特に指定がない限り，有効数字は３桁です。なお，解答以外の数値の桁数は，誤差が出ないよう多く取ってください。

例：線電流 I は

$$I=\frac{P}{\sqrt{3}V\cos\theta}=\frac{10\times10^{3}}{\sqrt{3}\times200\times0.9}=32.075\ \mathrm{A}\quad(\text{答})\ 32.1\ \mathrm{A}$$

１線当たりの損失 P_{L} は

$$P_{\mathrm{L}}=I^{2}R=32.075^{2}\times0.2=205.76\ \mathrm{W}\quad(\text{答})\ 206\ \mathrm{W}$$

○ 記述問題については，問題の要求を逸脱しないでください。

例：「問題文に３つ答えよ。」という要求で，４つ以上答えてはいけません。

○ 氏名は記載しないでください。（答案用紙に氏名記載欄はありません。）

答案用紙は，白紙解答であっても２枚すべて提出してください。
なお，この問題冊子についてはお持ち帰りください。

第 2 種

機械・制御

問１～問４の中から任意の２問を解答すること。（配点は１問題当たり 30 点）

問１　同期リアクタンス X_s［Ω］の同期発電機をインピーダンスが十分に小さい相電圧 V_0［V］の三相交流系統に接続し，発電機に P_0［W］の機械的入力を加えたとき，内部相差角は $\delta_0 = 45°$ で動作した。界磁電流及び回転速度は一定で，発電機の突極性及び損失は無視できるものとする。

(1) 同期発電機を相電圧 V_0 の三相交流系統に接続した場合について，以下のａ．及びｂ．に答えよ。

ａ．発電機に加える機械的入力を P_1［W］にすると，内部相差角は $\delta_1 = 30°$ となった。機械的入力の比 $\dfrac{P_1}{P_0}$ を求めよ。

ｂ．発電機と交流系統の間に $X_2 = X_s$ のリアクトルを挿入した。P_2［W］の機械的入力を加えると，交流系統電圧と無負荷誘導起電力の間の位相角が $\delta_2 = 45°$ に増加した。このときの機械的入力の比 $\dfrac{P_2}{P_0}$ を求めよ。

●S2－K008

(2) 同期発電機を三相交流系統から切り離して R［Ω］の抵抗器を Y 結線して接続し，抵抗器だけに電力を供給する。ここで，$P_3 = P_0$［W］の機械的入力を加えたところ，発電機端子の相電圧は V_3［V］，内部相差角は $\delta_3 = 60°$ となった。抵抗器だけを接続した場合について，以下の a．及び b．に答えよ。

a．発電機端子の相電圧の比 $\dfrac{V_3}{V_0}$ を求めよ。

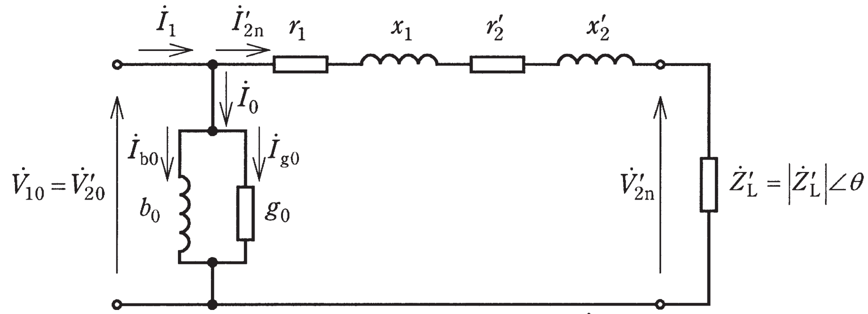
b．同期リアクタンス X_s に対する抵抗 R の比 $\dfrac{R}{X_s}$ を求めよ。

問２　変圧器の特性に関して，次の問に答えよ。

(1)　定格容量 $S_{\mathrm{n}} = 100\,\mathrm{kV{\cdot}A}$，定格一次電圧 $V_{1\mathrm{n}} = 6\,600\,\mathrm{V}$，定格二次電圧 $V_{2\mathrm{n}} = 210\,\mathrm{V}$，定格周波数 60 Hz の単相変圧器がある。巻数比 a，定格一次電流 $I_{1\mathrm{n}}$[A]を求めよ。

(2)　この変圧器の二次巻線端子を短絡し，一次巻線端子に定格周波数の電圧 $V_{1\mathrm{s}} = 218\,\mathrm{V}$ を印加したところ，二次側電流が定格電流となり，入力電力は，$P_{1\mathrm{s}} = 1\,200\,\mathrm{W}$ であった。短絡インピーダンスの大きさ［%］を求めよ。

(3)　図１は二次側の諸量を一次側に換算した変圧器の簡易等価回路である。上記(2)の条件から，図中の巻線の抵抗 $r = r_1 + a^2 r_2$［Ω］及び漏れリアクタンス $x = x_1 + a^2 x_2$［Ω］を求めよ。ただし，励磁アドミタンスは無視する。



$\dot{V}'_{20} = a\dot{V}_{20}$，　$\dot{V}'_{2\mathrm{n}} = a\dot{V}_{2\mathrm{n}}$，　$\dot{I}'_{2\mathrm{n}} = \dfrac{\dot{I}_{2\mathrm{n}}}{a}$，

$r'_2 = a^2 r_2$，　$x'_2 = a^2 x_2$，　$\dot{Z}'_{\mathrm{L}} = a^2 \dot{Z}_{\mathrm{L}}$

図１

●S2－K010

(4) 図 1 に示すように，二次巻線端子に力率 $\cos\theta$ の負荷（$\dot{Z}_{\mathrm{L}} = \left|\dot{Z}_{\mathrm{L}}\right|\angle\theta$）を接続して一次巻線電圧を V_{10} としたとき，負荷に定格電圧 $V_{2\mathrm{n}}$ が印加され定格電流 $I_{2\mathrm{n}}$ が流れた。図 2 は，このときの電圧電流ベクトル概略図の一部である。図 2 が答案用紙に印刷されているので，電圧 $\dot{V}'_{20}(=\dot{V}_{10})$ 及び電流 $\dot{I}_1$, $\dot{I}_{\mathrm{g}0}$, $\dot{I}_{\mathrm{b}0}$ のベクトルを書き足して，ベクトル図を完成させよ。巻線抵抗 r 及び漏れリアクタンス x による電圧降下の成分も図中に明示せよ。

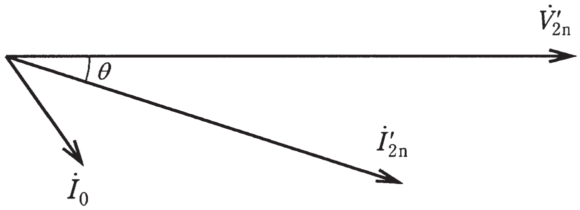


図 2

(5) 一次端子電圧を V_{10} のままにして，無負荷としたときの二次端子電圧を V_{20} とする。このとき，この変圧器の電圧の変動率 ε を，次式で表す。

$$\varepsilon = \frac{V_{20} - V_{2\mathrm{n}}}{V_{2\mathrm{n}}} \times 100\ [\%]$$

これは，次式で近似できることを示せ。

$$\varepsilon \fallingdotseq (q_{\mathrm{R}} \cos\theta + q_{\mathrm{X}} \sin\theta) \times 100\ [\%]$$

ただし，$R = \dfrac{r}{a^2}$, $X = \dfrac{x}{a^2}$, $q_{\mathrm{R}} = \dfrac{RI_{2\mathrm{n}}}{V_{2\mathrm{n}}} \ll 1$, $q_{\mathrm{X}} = \dfrac{XI_{2\mathrm{n}}}{V_{2\mathrm{n}}} \ll 1$ とする。また，必要に応じて，展開式 $\sqrt{1+\delta} = 1 + \dfrac{1}{2}\delta - \dfrac{1}{8}\delta^2 + \cdots$, $(|\delta| < 1)$ を用いよ。

●S2－K011

問３　図１は，三相交流電源から単相交流を出力するサイクロコンバータである。このサイクロコンバータに関する次の問に答えよ。ただし，交流電源のインピーダンス，及びコンバータでの電圧降下は無視する。また，負荷は誘導性である。

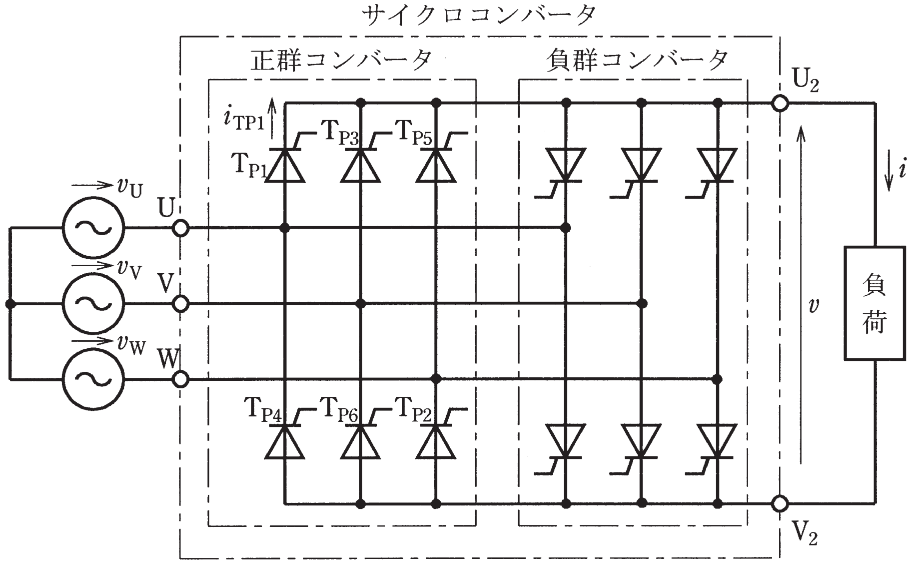


図１

(1) (a) このサイクロコンバータの実用的な出力周波数の上限は電源周波数に対して何分の１程度であるか，また，(b) どのような要因で上限が決まるかを全体で100字程度で説明せよ。

(2) 正群コンバータが，入力交流線間電圧実効値 E 及び制御遅れ角 α が一定で，連続した出力電流 i で定常的に動作しているときの出力電圧 v の平均値（直流電圧）V_d を求める式を示せ。

(3) サイクロコンバータから交流電圧を出力するには，制御遅れ角を時間関数 $\alpha(t)$ として変化させる必要がある。出力電圧 v の基本波電圧 v_1 を

$$v_1(t) = \sqrt{2} \times 0.8E \sin(2\pi f_1 t)$$

とするには，正群コンバータに対しては $\alpha(t)$ をどのように与えればよいかを数式で示せ。ここで，出力周波数 f_1 は電源周波数に比べて十分に低い値とする。また，電流の正負切換時の動作は考慮しない。

(4) 正群コンバータは，サイリスタが T_{P1}，T_{P2}，・・・，T_{P6}，T_{P1}，・・・と順番にオンされて動作する。T_{P1} がオンした直後に出力される電圧は，図 2 に示す v_{UV}，v_{UW}，v_{VW}，v_{VU}，v_{WU}，v_{WV} の 6 種類の交流線間電圧のうち，どの電圧となるか。なお，交流線間電圧の記号は，例えば v_{UV} は三相交流電源の V 相を基準とした U 相の電圧 $v_{UV}=v_U-v_V$ を表す。また，v は出力電圧，v_1 はその基本波電圧である。

(5) サイクロコンバータの出力には図 2 に示す電流 i が流れているものとする。図 2 が答案用紙に印刷されているので，このときに正群コンバータのサイリスタ T_{P1} に流れる電流 i_{TP1} の波形を太い線で明確に描け。

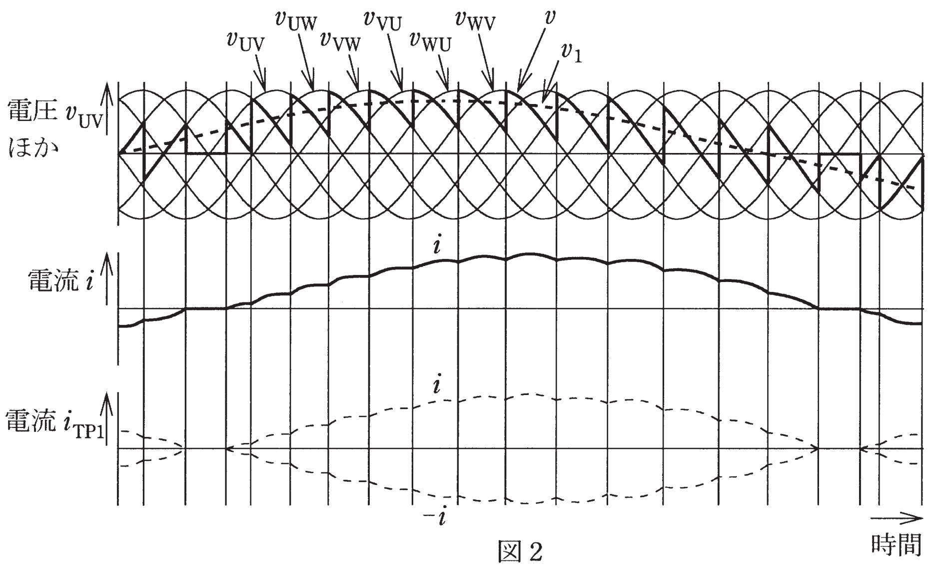


図 2

●S2－K013

問４　図に示すフィードバック制御系において，$R(s)$，$E(s)$，$U(s)$，$Y(s)$はそれぞれ，目標値 $r(t)$，制御偏差 $e(t)$，操作入力 $u(t)$，制御量 $y(t)$のラプラス変換を表している。また，$G(s)$は制御対象の伝達関数，$\dfrac{k}{s}$は積分動作の直列補償要素，$F(s)$はフィードバック補償要素を表している。

以下において，$\dfrac{k}{s}$ と $F(s)$とに含まれる制御定数を調整することで，フィードバック制御系の目標値$R(s)$から制御量$Y(s)$までの伝達関数を，望ましい動特性を実現する参照モデルの伝達関数に一致させることを考える。次の問に答えよ。

(1) 制御対象は零点をもたない遅れ系であって，多項式 $h(s)$を用いて次のように表されている。

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

フィードバック制御系の目標値 $R(s)$から制御量 $Y(s)$までの伝達関数 $W(s)$を s，k，$F(s)$，$h(s)$を用いて表せ。

(2) 制御対象は２次遅れ系

$$G(s)=\frac{1}{h(s)}=\frac{1}{h_0+h_1 s+h_2 s^2}$$

であるとする。また，フィードバック補償要素$f(s)$は定数であるとし，

$$F(s)=f_0$$

とおく。

次の参照モデルを導入する。

$$W_{\mathrm{d}}(s)=\frac{1}{1+\sigma s+\alpha_2\sigma^2 s^2+\alpha_3\sigma^3 s^3}$$

ここで，α_2及びα_3は時間応答の形を規定する係数であり，σは，その次数をsの次数と合わせているので，時間スケールのパラメータである。しかも，1次のモーメントに一致するので，立ち上がりの一つの特性値でもある。この σも設計時の計算において決定する。

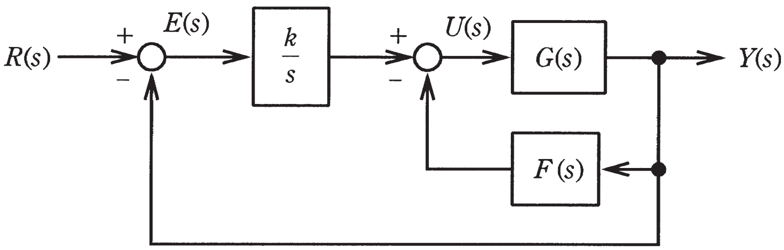
フィードバック制御系の目標値から制御量までの伝達関数 $W(s)$と参照モデル $W_{\mathrm{d}}(s)$を一致させるために，パラメータ σと制御定数k，f_0が満たさ

なくてはならない連立方程式を求めよ。

(3) 連立方程式を解いてパラメータ σ を α_2, α_3, h_1, h_2 を用いて表せ。

(4) 制御定数 k を求める式を α_2, h_1, σ を用いて表せ。

(5) 制御定数 f_0 を求める式を k, h_0, σ を用いて表せ。



＜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，機械的入力は電気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。$V=V_0$，$\delta_0 = 45°$ のときの出力電力 P_0 は，

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

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． $\delta_1 = 30°$ のときの機械的入力電力 P_1 は，

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

である。したがって，機械的入力の比は，

$$\frac{P_1}{P_0} = \frac{\dfrac{3V_0 E}{2X_s}}{\dfrac{3V_0 E}{\sqrt{2}X_s}} = \frac{\sqrt{2}}{2} = 0.707\,10 \rightarrow 0.707 \quad \cdots \text{（答）}$$

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

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

となる。したがって，出力電力の比は，

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

(2)

ｃ．機械的入力が $P_3 = P_0$ で，$\delta_3 = 60°$ のとき，

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

となるので，

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

したがって，

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

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，

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

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

したがって，

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

である。

〔問 2 の標準解答〕

（1）巻数比

$$a = \frac{V_{1n}}{V_{2n}} = \frac{6600}{210} = 31.429 \ \rightarrow \ 31.4 \quad ...（答）$$

定格一次電流

$$I_{1n} = \frac{S_n}{V_{1n}} = \frac{100000}{6600} = 15.152 \ \rightarrow \ 15.2 \ \mathrm{A} \quad ...（答）$$

（2）短絡インピーダンス［%］

$$\%Z_s = \frac{V_{1s}}{V_{1n}} \times 100 = \frac{218}{6600} \times 100 = 3.3030 \ \rightarrow \ 3.30 \ \% \quad ...（答）$$

（3）全交流抵抗

$$r = (r_1 + a^2 r_2) = \frac{P_{1s}}{I_{1n}^2} = \frac{1200}{(15.152)^2} = \frac{1200}{229.58} = 5.2269 \ \rightarrow \ 5.23 \ \Omega \quad ...（答）$$

漏れリアクタンス

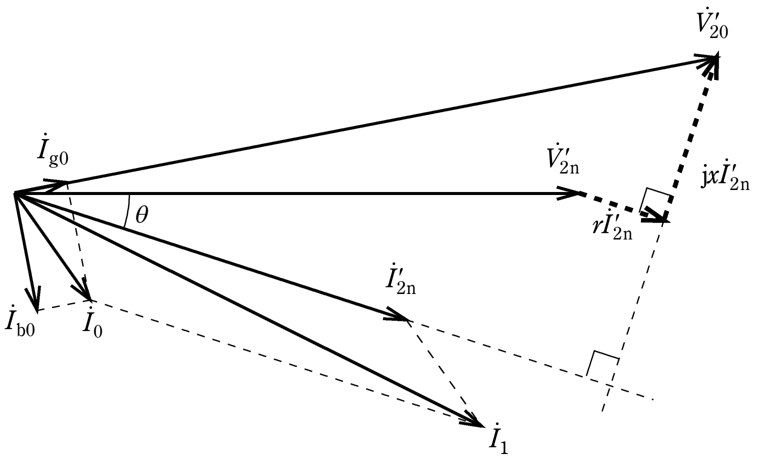
$$x = (x_1 + a^2 x_2)$$

$$= \sqrt{\left(\frac{V_{1s}}{I_{1n}}\right)^2 - \left(\frac{P_{1s}}{I_{1n}^2}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{218}{15.152}\right)^2 - \left(\frac{1200}{15.152^2}\right)^2}$$

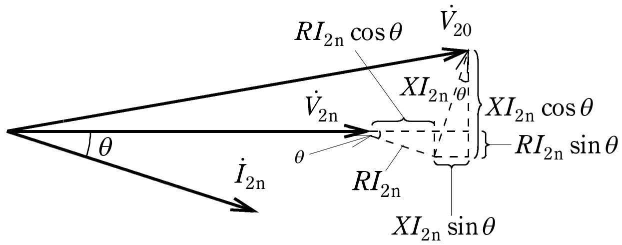
$$= \sqrt{(14.388)^2 - (5.2269)^2} = \sqrt{207.01 - 27.320} = \sqrt{179.69} = 13.405 \ \rightarrow \ 13.4 \ \Omega$$

...（答）

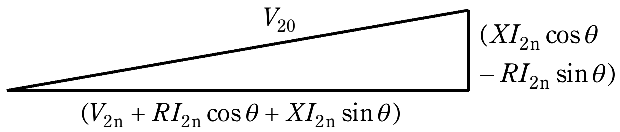
（4）概略ベクトル図



(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，

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

とし，二項定理を用いて展開すると，

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

となり，q_R，q_X の 2 次以上の項を省略すれば，

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

とできる。したがって，

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

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$\dfrac{1}{2}\sim\dfrac{1}{3}$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 $\alpha+\dfrac{\pi}{3}$ の期間，$v=\sqrt{2}E\cos\left(\theta-\dfrac{\pi}{6}\right)$ となるので，平均電圧 V_d はそれを平均して次となる。

$$V_\mathrm{d}=\frac{3}{\pi}\int_{\alpha}^{\alpha+\frac{\pi}{3}}\sqrt{2}E\cos\left(\theta-\frac{\pi}{6}\right)\mathrm{d}\theta=\frac{3\sqrt{2}}{\pi}E\left[\sin\left(\theta-\frac{\pi}{6}\right)\right]_{\alpha}^{\alpha+\frac{\pi}{3}}$$

$$=\frac{3\sqrt{2}}{\pi}E\left[\sin\left(\alpha+\frac{\pi}{6}\right)-\sin\left(\alpha-\frac{\pi}{6}\right)\right]=\frac{3\sqrt{2}}{\pi}E\cos\alpha \quad \text{又は} \quad 1.35E\cos\alpha$$ ・・・（答）

（3）出力基本波電圧を $v_1=\sqrt{2}\times0.8E\sin(2\pi f_1 t)$ 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。

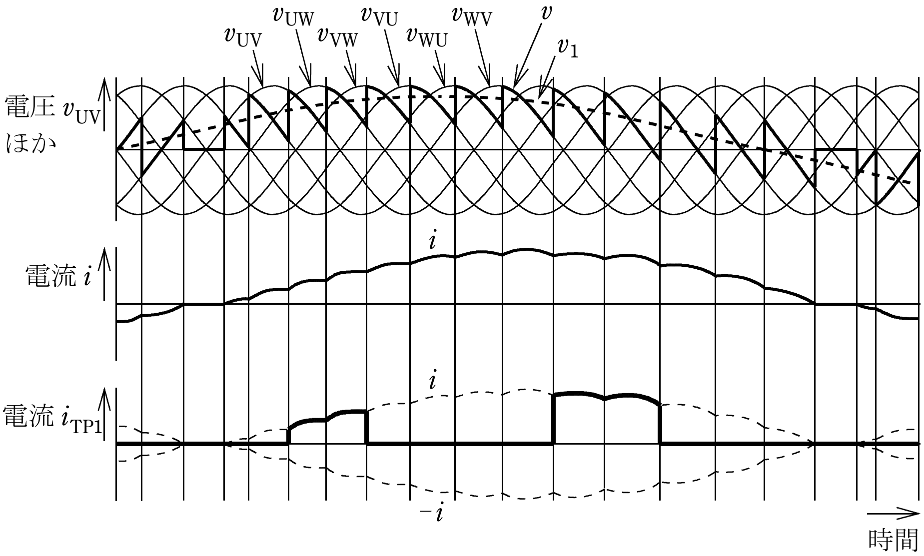
$$\frac{3\sqrt{2}}{\pi}E\cos\alpha(t)=\sqrt{2}\times0.8E\sin(2\pi f_1 t)$$

$$\cos\alpha(t)=\frac{\pi}{3}\times0.8\sin(2\pi f_1 t)$$

$$\therefore\alpha(t)=\cos^{-1}\left[\frac{4}{15}\pi\sin(2\pi f_1 t)\right] \quad \text{又は} \quad \alpha(t)=\cos^{-1}\left[0.838\sin(2\pi f_1 t)\right]$$ ・・・（答）

（4）$\mathrm{T_{P1}}$ がオンすると $\mathrm{T_{P5}}$ に流れていた電流が $\mathrm{T_{P1}}$ に転流し，$\mathrm{T_{P6}}$ → V 相→ U 相 → $\mathrm{T_{P1}}$ を通電して出力されるので，v_UV の電圧が出力される。・・・（答）

（5）$\mathrm{T_{P1}}$ がオンすると v_UV の電圧が出力され，それから $\mathrm{T_{P3}}$ がオンするまで通電するので次の図となる。



v_{UV}
v_{UW}
v_{VW}
v_{VU}
v_{WU}
v_{WV}
v
v_1
電圧 v_{UV} ほか
電流 i
i
電流 i_{TP1}
i
$-i$
時間

〔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，

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

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，

$$W(s)=\frac{\dfrac{k}{s\left[h(s)+F(s)\right]}}{1+\dfrac{k}{s\left[h(s)+F(s)\right]}}=\frac{1}{1+\dfrac{s}{k}\left[h(s)+F(s)\right]} \quad \cdots\cdots ①$$

・・・（答）

である。

(2) ①式と問題中の

$$W_{\mathrm{d}}(s)=\frac{1}{1+\sigma s+\alpha_2\sigma^2 s^2+\alpha_3\sigma^3 s^3} \quad \cdots\cdots ②$$

とを等しいとおくことによって，次の関係式を得る。

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

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

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。

$$\frac{h_0+f_0}{k}=\sigma \quad \cdots\cdots ③$$

$$\frac{h_1}{k}=\alpha_2\sigma^2 \quad \cdots\cdots ④$$

$$\frac{h_2}{k}=\alpha_3\sigma^3 \quad \cdots\cdots ⑤$$

・・・（答）

(3) ④式と⑤式から

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

を得る。

(4) ④式から

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

を得る。

(5) ③式から

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

を得る。