平成 30 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) 「ボイラ排ガス中の酸素濃度」（＝過剰空気率）

過剰空気率が適正であるときは燃料が完全燃焼するため効率が高まる。大きすぎるとボイラ内の燃焼温度が下がり，排ガス損失が増加する。小さすぎると不完全燃焼となり未燃損失が増加する。

(2) 「空気予熱器出口排ガス温度」（＝排ガス温度）

空気予熱器で燃焼用空気を予熱すれば炉内温度が高くなり，燃料の蒸発量，燃焼速度が増加するため，燃料が完全燃焼し効率が高まるとともに，排ガスの熱を利用して空気を加熱することで効率は上昇する。また，排ガスの熱を利用し，節炭器で給水を加熱すると効率を向上することができる。排ガス温度が高くなると排出エネルギーが増加し，低すぎると空気予熱器や節炭器の低温部腐食が多くなる。

(3) 「復水器真空度」（＝真空度）

復水器の真空度を増加させればタービン出口蒸気の排気圧が低くなり排出エネルギーが小さくなるため，タービンの熱落差を増加させることとなり，効率は向上する。真空度を高めれば効率は上昇するが，復水が過剰に冷却されるため，効率は低下する。他にも真空度が高いことによるタービン振動の増加も懸念される。

〔問２の標準解答〕

(1) 送電線等の過負荷

事故により送電線や変圧器が停止し，他の健全設備の過負荷が発生した場合，過負荷になった設備の損壊等による事故の発生，又は，損壊等を回避するための設備停止によって，大規模な停電に至る可能性がある。また，ループ状やメッシュ状の系統では，過負荷になった設備の停止により，他の設備が過負荷となり，次々と設備停止を余儀なくされる可能性もある。

このような事故波及を防止するため，発電機出力又は負荷の抑制や遮断によって，送電線や変圧器を通過する電流を抑制する。

(2) 周波数低下

系統事故(及びその波及)により大量の電源が脱落し，大幅な需給アンバランスが生じた場合には，通常の制御では対処できない急激かつ大幅な周波数低下が発生し，これが発電プラントの安定運転限界を超過すると，連鎖的な発電機の脱落に繋がる可能性がある。

このような事故波及を防止するため，一部の負荷を遮断することで周波数の維持を図る。さらに，この対策によっても周波数の回復が困難で周波数低下状態が継続する場合には，連系系統を分離したり，適当な近傍負荷を有する局地火力系統を分離して単独系統として安定運転を維持させたりするなどにより，事故の影響による停電等が電力系統全体に及ぶことを回避する対策も採用されている。

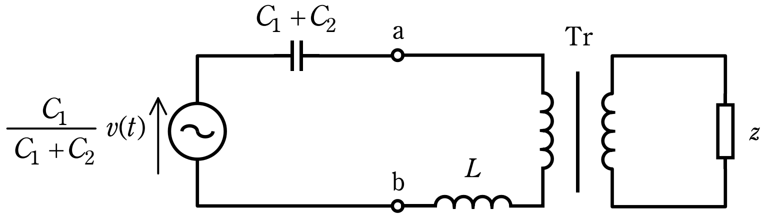
(3) 発電機の脱調

事故除去の遅延や失敗によって発電機が脱調に至った場合，脱調の電気的中心付近の電圧が大きく低下することから，これを放置すると，他の発電機の電気出力の低下により次なる脱調が起こるという連鎖的な脱調現象が発生する可能性がある。

このような事故波及を防止するため，発電機の脱調が予測される場合に一部の電源の遮断を行って脱調現象の発生を防止する，又は，発電機の脱調が発生した後にこれを速やかに検出して脱調の電気的中心の両端で系統を分離することでそれ以上の進展を防止するといった制御を行う。

〔問３の標準解答〕

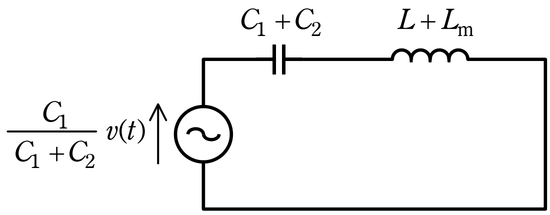
(1) テブナンの等価回路は，$\dfrac{C_1}{C_1+C_2}v(t)$ が背後電圧，C_1+C_2 が等価キャパシタンスであるので，次のようになる。



(2) 二次負担の大きさ，力率等にかかわらず常に Tr に電圧 $\dfrac{C_1}{C_1+C_2}v(t)$ がかかるということは，小問(1)で求めた等価回路の LC 直列部分に電圧がかからない，つまりこれらが直列共振の状態にあることを意味している。したがって条件は，

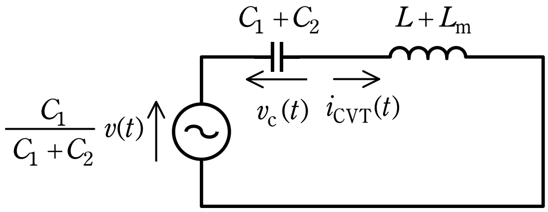
$(2\pi f)^2 L(C_1+C_2)=1$　・・・(答)

(3) 条件より二次負担 z は削除でき，漏れインダクタンスも無視できるので，端子 a - b から右側では，補助 VT の励磁インダクタンスと L が直列回路で残るのみであるから，等価回路は次のようになる。



(4) 下図において，インダクタンスにかかる電圧は，$(L+L_{\mathrm{m}})\dfrac{\mathrm{d}i_{\mathrm{CVT}}(t)}{\mathrm{d}t}$ であるから，キルヒホッフの電圧法則を用いると次の微分方程式が得られる。

$$(L+L_{\mathrm{m}})(C_1+C_2)\frac{\mathrm{d}^2 v_{\mathrm{c}}(t)}{\mathrm{d}t^2}+v_{\mathrm{c}}(t)=\frac{C_1}{C_1+C_2}V\sin\omega t \quad \cdots (答)$$



(5) 回路は線形であるので，ヒントも利用して初期条件として，$v_{\mathrm{c}}(0)=0$，$\dfrac{\mathrm{d}v_{\mathrm{c}}(0)}{\mathrm{d}t}=0$ であることを考慮して解くと，

$$v_{\mathrm{c}}(t)=\frac{V}{1-\omega^2(L+L_{\mathrm{m}})(C_1+C_2)}\frac{C_1}{C_1+C_2}\left(\sin\omega t-\frac{\omega}{\omega'}\sin\omega' t\right) \quad \cdots (答)$$

ただし，ここに $\omega'^2(L+L_{\mathrm{m}})(C_1+C_2)=1$

(6) 小問(1)で得たように CVT の回路はコンデンサとコイルを含んでおり，小問(5)の結果から分かるように $L+L_{\mathrm{m}}$ と C_1+C_2 による直列共振成分を生じる。このため二次側には，この共振周波数電圧成分が生じる。小問(5)から分かるようにその周波数は系統周波数より低く，$\dfrac{\omega}{\omega'}>1$ であるからコンデンサに生じる電圧の主要な成分であるといってよい。

ただし，非飽和時 L_{m} は L に比べて非常に大きい。小問(5)の結果から分かるように，コンデンサ電圧は，

$$v_{\mathrm{c}}(t)\fallingdotseq\frac{V}{-\omega^2 L_{\mathrm{m}}(C_1+C_2)}\frac{C_1}{C_1+C_2}\left(\sin\omega t-\frac{\omega}{\omega'}\sin\omega' t\right)$$

と書け，この大きさは L_{m} に反比例するので，あまり大きくない。無電圧から電圧を印加するなど，補助 VT の磁束に直流成分が重畳する場合に磁気飽和が生じると，L_{m} は等価的に減少するため，低周波数電圧成分も大きくなり，それが補助 VT を介して二次側に生じる。

〔問４の標準解答〕

（1）

$\theta = \theta_A - \theta_B$ とする。

【近似値】

$$\frac{\pi}{12} = \frac{3.141\,6}{12} = 0.261\,8$$

$$\therefore P_1 = \frac{0.261\,8}{x_1} = 2.62 \qquad \cdots（答）$$

【真値】

$$\sin^2\theta = \frac{1-\cos 2\theta}{2}$$

$$\cos 2\theta = \cos\frac{\pi}{6} = \frac{\sqrt{3}}{2}$$

より，

$$\sin^2\theta = \frac{2-\sqrt{3}}{4} = 0.066\,99$$

$$\therefore \sin\theta = 0.258\,8$$

$$(\because \sin\theta > 0)$$

$$\therefore P_1 = \frac{\sin\theta}{x_1} = 2.59 \qquad \cdots（答）$$

（2）

$$\theta_B = 0$$

$$P_A = P_1 + P_2 = \frac{\theta_A}{x_1} + \frac{\theta_A - \theta_C}{x_2} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots \quad ①$$

$$P_C = -P_2 + P_3 = -\frac{\theta_A - \theta_C}{x_2} + \frac{\theta_C}{x_3} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots \quad ②$$

よって，

$$P_A = \frac{\theta_A}{x_1} + \frac{\theta_A - \theta_C}{x_2} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots \quad ①'$$

$\cdots$(答)

$$P_C = -\frac{\theta_A - \theta_C}{x_2} + \frac{\theta_C}{x_3} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots \quad ②'$$

$\cdots$(答)

(3)

①'及び②'式を解く。

$$x_1 x_2 P_A = (x_1 + x_2)\theta_A - x_1\theta_C$$

$$x_2 x_3 P_C = -x_3\theta_A + (x_2 + x_3)\theta_C$$

$$D \equiv (x_1 + x_2)(x_2 + x_3) - x_1 x_3 = x_2(x_1 + x_2 + x_3)$$

$$D\theta_A = x_1 x_2 (x_2 + x_3) P_A + x_2 x_3 x_1 P_C$$

$$\therefore \theta_A = \frac{x_1(x_2 + x_3)P_A + x_3 x_1 P_C}{x_1 + x_2 + x_3} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad ③$$

$$D\theta_C = x_2 x_3 (x_1 + x_2) P_C + x_1 x_2 x_3 P_A$$

$$\therefore \theta_C = \frac{x_3(x_1 + x_2)P_C + x_1 x_3 P_A}{x_1 + x_2 + x_3} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad ④$$

③及び④式に数値を代入して,

$$\left.\begin{aligned}
&\theta_A = 0.34 \\
&\theta_C = 0.276 \\
&P_1 = \frac{0.34}{0.05} = 6.8 \\
&P_2 = \frac{0.34 - 0.276}{0.02} = 3.2 \\
&P_3 = \frac{0.276}{0.03} = 9.2
\end{aligned}\right\} \cdots (\text{答})$$

(4)

$\theta_B = 0$ とする。

$P_1 = 6$ なので,

$$\theta_A = 6 \times 0.05 = 0.3$$

θ_C は母線 C での関係を用いて求める。

$$\begin{aligned}
P_C = 6 &= P_3 - P_2 \\
&= \frac{\theta_C}{0.03} - \frac{\theta_A - \theta_C}{0.02}
\end{aligned}$$

より, $\theta_C = 0.252$

よって,

$$P_2 = \frac{0.3 - 0.252}{0.02} = 2.4$$

$$P_3 = \frac{0.252}{0.03} = 8.4$$

$$P_A = 6 + 2.4 = 8.4$$

$P_B = -6 - 8.4 = -14.4$

したがって，

$$\left.\begin{aligned} G_A &= 18.4 \\ G_B &= 31.6 \end{aligned}\right\} \quad \cdots（答）$$

〔問５の標準解答〕

(1) 瞬時電圧低下とは，落雷などにより電力系統に事故が発生すると，事故点を中心に電圧が低下して事故点を電力系統から切り離すまでの短い時間，電圧低下が継続することをいう。需要家にとっては，系統電圧が突然低下した後に短時間で復帰する現象で，コンピュータシステムや自動化が進んだ生産設備の停止等，様々な障害のきっかけとなる。

(2) 需要家の負荷のインピーダンスを $Z = R + \mathrm{j}X$ [Ω] とおく。

受電電圧が 60 kV のときに負荷電力が 48 000 kV·A であるから，

$$48\,000\,000 = \frac{60\,000 \times 60\,000}{\sqrt{R^2 + X^2}} \quad [\mathrm{V \cdot A}]$$

したがって，

$$\sqrt{R^2 + X^2} = 75\ \Omega$$

また，力率は遅れ 0.8 であるから，次式が成り立つ。

$$\frac{R}{\sqrt{R^2 + X^2}} = 0.8$$

したがって，抵抗分 $R = 60\ \Omega$，リアクタンス分 $X = 45\ \Omega$ である。･･･ （答）

(3) 147 kV/63 kV 変圧器の低圧側換算のインピーダンスを求める。

$$\mathrm{j}0.151\,2\times\frac{63\times63}{200}=\mathrm{j}3.000\,6\ \Omega$$

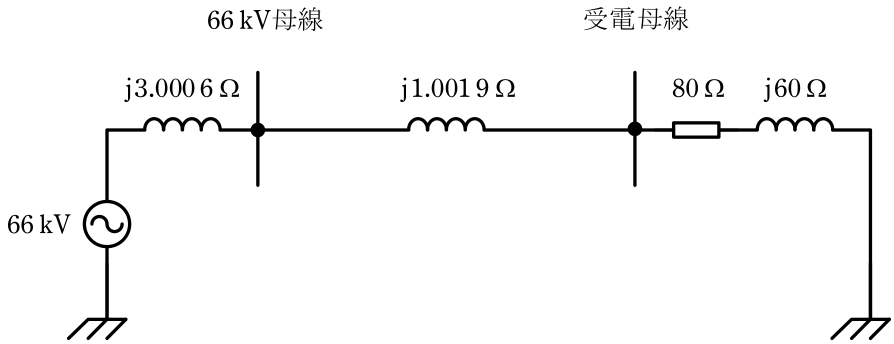
66 kV 送電線 1 回線のインピーダンスを求める。

$$\mathrm{j}0.046\times\frac{66\times66}{100}=\mathrm{j}2.003\,8\ \Omega$$

147 kV/63 kV 変圧器の低圧側無負荷電圧は，次式から 66 kV である。

$$154\times\frac{63}{147}=66\ \mathrm{kV}$$

したがって，正常時の受電回路は，次のようになる。

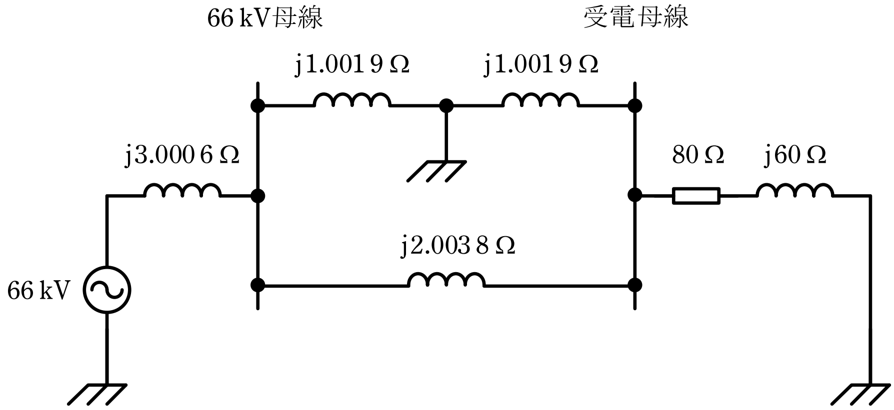


受電母線電圧の大きさは，

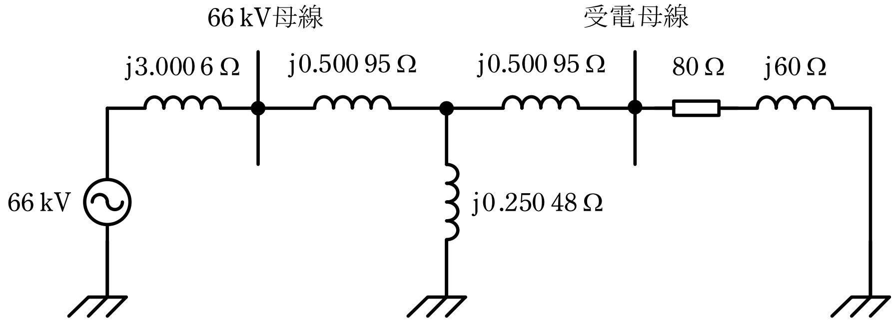
$$66\times\frac{|80+\mathrm{j}60|}{|80+\mathrm{j}64.002\,5|}=64.421\ \mathrm{kV}$$

正答は，64.4 kV である。　・・・（答）

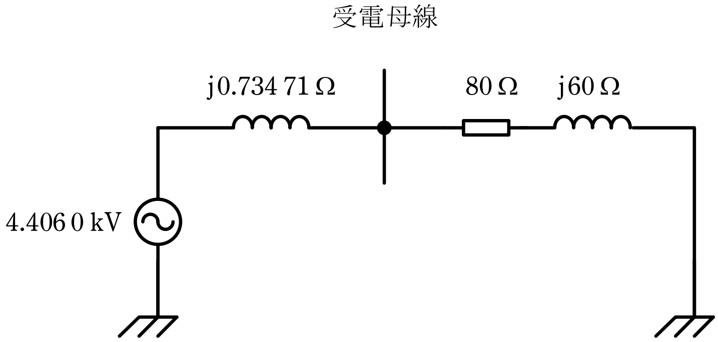
(4) 1 号線の中間地点で三相短絡したときの等価回路は，次のようになる。



送電線の部分をΔ−Y 変換すると，上図は次のようになる。



テブナンの定理から上図は，次のように等価変形できる。



ただし，

$$\mathrm{j}0.500\ 95+\frac{1}{\dfrac{1}{\mathrm{j}(3.000\ 6+0.500\ 95)}+\dfrac{1}{\mathrm{j}0.250\ 48}}=\mathrm{j}0.500\ 95+\mathrm{j}0.233\ 76=\mathrm{j}0.734\ 71\ \Omega$$

$$66\times\frac{\mathrm{j}0.233\ 76}{\mathrm{j}(3.000\ 6+0.500\ 95)}=4.406\ 1\ \mathrm{kV}$$

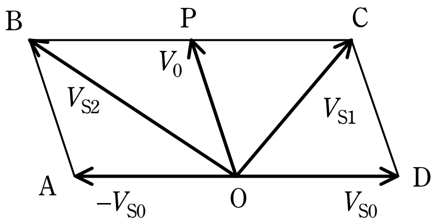
したがって，このときの受電母線電圧の大きさは，

$$4.406\ 1\times\frac{|80+\mathrm{j}60|}{|80+\mathrm{j}60.734\ 71|}=4.386\ 7\ \mathrm{kV}$$

正答は，4.39 kV である。　・・・（答）

〔問 6 の標準解答〕

(1) 求める変電所の接地抵抗値を R とし，$V_{S0}=R\times I$ とすると，V_{S1} は V_0 と V_{S0} の，V_{S2} は V_0 と $-V_{S0}$ のそれぞれ合成電圧となるから，V_0，V_{S0}，V_{S1}，V_{S2} の関係は下図のような平行四辺形 ABCD で表されることになる。



ここで ∠OPB を α，∠OPC を β とすると，

$$V_{S1}{}^2=V_0{}^2+V_{S0}{}^2-2\times V_0\times V_{S0}\cos\beta$$

$$V_{S2}{}^2=V_0{}^2+V_{S0}{}^2-2\times V_0\times V_{S0}\cos\alpha$$

となる。両式の左辺と右辺をそれぞれ加算すると，

$$V_{S1}{}^2+V_{S2}{}^2=2\times V_0{}^2+2\times V_{S0}{}^2-2\times V_0\times V_{S0}(\cos\alpha+\cos\beta)$$

$$=2\times V_0{}^2+2\times V_{S0}{}^2\ (\because\ \alpha+\beta=180^\circ\ \text{より}\ \cos\alpha+\cos\beta=0)$$

$$\therefore\ V_{S0}=\sqrt{\frac{V_{S1}{}^2+V_{S2}{}^2-2\times V_0{}^2}{2}}$$

$$\therefore\ R = \frac{V_{S0}}{I} = \frac{\sqrt{\dfrac{{V_{S1}}^2 + {V_{S2}}^2 - 2 \times {V_0}^2}{2}}}{I}$$

となる。そこで，$V_0 = 1.10$，$V_{S1} = 4.00$，$V_{S2} = 5.20$，$I = 20.0$ を代入して計算すると求める接地抵抗値は，

$R = 0.225\ \Omega$　・・・（答）

となる。

(2)

a　講じるべき措置は次の二つである。

立入禁止等危険である旨を表示すること及び施錠装置を施設して施錠する等，取扱者以外の者の出入りを制限する措置を講じることである。

b

①　試験回路において，二次巻線の wu 相を短絡接地しているので，v 相に電圧を印加すると vu 相と vw 相には同じ電圧が印加されることになる。すると一次巻線の OU 相と VO 相にも変圧比倍の同じ電圧が誘起される。試験回路では一次巻線 U 相が接地されていることから，一次側 V 相に発生する対地電圧は OU 相と VO 相を加えた電圧となり，二次側 v 相に印加した電圧の変圧比 $\dfrac{300}{\sqrt{3} \times 77}$ の 2 倍となる。したがって，

$\dfrac{300}{\sqrt{3} \times 77} \times 2 = 4.50$　・・・（答）

となる。

②　使用電圧が 275 kV の最大使用電圧は，使用電圧に係数 $\dfrac{1.15}{1.1}$ を乗じた電圧であるから，$275 \times \dfrac{1.15}{1.1} = 287.5\ \text{kV}$ となる。

印加すべき試験電圧は，中性点を直接接地する最大使用電圧 170 000 V を超える変圧器の場合，最大使用電圧の 0.64 倍の電圧である。

したがって，

$287.5 \times 0.64 = v \times 2 \times \dfrac{300}{\sqrt{3} \times 77}$ より，

$v = 40.9\ \text{kV}$　・・・（答）

となる。

c　重要な要件は次の二つである。

当該変圧器が，規格に定める交流耐電圧試験を工場において実施し，絶縁性能が確認されていること。

もう一つは，現地で変圧器に常規対地電圧を絶縁性能に影響がないことが確認できる一定時間(10 分間)印加すること。

＜機械・制御科目＞

〔問１の標準解答〕

(1) 電動機の同期速度 N_s は，定格周波数を f，極数を p とすると，

$$N_s = \frac{120f}{p} = \frac{120 \times 60}{6} = 1\ 200\ \mathrm{min}^{-1} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots \quad ①$$

定格出力時の回転速度 $N = 1\ 140\ \mathrm{min}^{-1}$ のときの滑り s は，

$$s = \frac{N_s - N}{N_s} = \frac{1\ 200 - 1\ 140}{1\ 200} = \frac{60}{1\ 200} = 0.05 \quad \cdots（答）$$

定格出力時のトルク T は，回転角速度を ω とすると，$P = \omega T$ の関係から，

$$T = \frac{P}{\omega} = \frac{P}{\frac{2\pi}{60}N} = \frac{15 \times 10^3}{\frac{2\pi}{60} \times 1\ 140} = 125.65 \ \rightarrow\ 126\ \mathrm{N \cdot m} \quad \cdots（答）$$

(2) 定格出力時の二次入力 P_2 は，$P = (1-s)P_2$ から，

$$P_2 = \frac{P}{1-s} = \frac{15 \times 10^3}{1-0.05} = 15\ 789 \ \rightarrow\ 15\ 800\ \mathrm{W} \quad \cdots（答）$$

また，定格出力時の二次銅損 P_{c2} は，$P_{c2} = sP_2$ から，

$$P_{c2} = \frac{sP}{1-s} = \frac{0.05 \times 15 \times 10^3}{1-0.05} = 789.47\ \mathrm{W}$$

一次銅損 P_{c1} は，題意から全銅損が $P_c = 1\ 230\ \mathrm{W}$ であるので，

$$P_{c1} = P_c - P_{c2} = 1\ 230 - 789.47 = 440.53 \ \rightarrow\ 441\ \mathrm{W} \quad \cdots（答）$$

(3) 題意から滑り s とトルク T は比例するので，その比例定数を K とすれば，$T = Ks$ から，

$$K = \frac{T}{s} = \frac{125.65}{0.05} = 2\ 513\ \ \mathrm{N \cdot m} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots \quad ②$$

電動機の 75 %出力を P' とすれば，

$$P' = 0.75P = 0.75 \times 15 = 11.25\ \mathrm{kW} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots \quad ③$$

となる。また，このときの滑りを s'，トルクを T'，角速度を ω' とすると，ここでも $T' = Ks'$ の関係が成り立つので，

$$P' = \omega' T' = (1-s')\omega_s \cdot Ks'$$

これを滑り s' について整理すると，

$$K\omega_s s'^2 - K\omega_s s' + P' = 0$$

$$\therefore \quad s'^2 - s' + \frac{P'}{K\omega_s} = 0 \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad ④$$

ここで，電動機の同期角速度 ω_s は，

$$\omega_s = \frac{4\pi f}{p} = \frac{4\pi \times 60}{6} = 40\pi \text{ rad/s}$$

であるから，②，③式の関係を用いると，

$$\frac{P'}{K\omega_s} = \frac{11.25 \times 10^3}{2\,513 \times 40\pi} = 0.035\,625$$

この数値を④式に代入して，

$$s'^2 - s' + 0.035\,625 = 0 \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad ⑤$$

となる。⑤式を s' について解くと，

$$s' = \frac{1 \pm \sqrt{1^2 - 4 \times 0.035\,625}}{2} = \frac{1 \pm 0.926\,01}{2} = 0.963\,01,\ 0.036\,995$$

と二つの解が得られるが，定格出力時の滑り $s = 0.05$ から考えると $s' = 0.036\,995$ となる。よって，$s' = 0.036\,995 \ \rightarrow\ 0.037\,0$ ・・・(答)

上記の場合のトルク T' は，

$$T' = K s' = 2\,513 \times 0.036\,995 = 92.968 \ \rightarrow\ 93.0 \text{ N·m} \quad \cdots \text{(答)}$$

(4) 75 %出力時の二次入力を P_2' とすると $P' = (1 - s')P_2'$ から，

$$P_2' = \frac{P'}{1 - s'} = \frac{11.25 \times 10^3}{1 - 0.036\,995} = 11\,682 \ \rightarrow\ 11\,700 \text{ W} \quad \cdots \text{(答)}$$

75 %出力時の二次銅損 P_{c2}' は，$P_{c2}' = s'P_2'$ から，

$$P_{c2}' = \frac{s'P'}{1 - s'} = \frac{0.036\,995 \times 11.25 \times 10^3}{1 - 0.036\,995} = 432.18 \ \rightarrow\ 432 \text{ W} \quad \cdots \text{(答)}$$

(5) L 形等価回路において一次電流を I_1 とすると一次銅損は $P_{c1} = 3r_1 I_1{}^2$，二次銅損は $P_{c2} = 3r_2 I_1{}^2$ で表されるので，75 %出力時の一次銅損 P_{c1}' は，先に求めた P_{c1}，P_{c2} 及び P_{c2}' の比率関係から，

$$P'_{c1} = P_{c1} \times \frac{P'_{c2}}{P_{c2}} = 440.53 \times \frac{432.18}{789.47} = 241.16\ \mathrm{W}$$

ゆえに，全銅損 P'_c は，

$$P'_c = P'_{c1} + P'_{c2} = 241.16 + 432.18 = 673.34\ \mathrm{W}$$

求める 75 ％出力時の効率 η は，鉄損を $P_i = 430\ \ \mathrm{W}$ とすると

$$\eta = \frac{P'}{P' + P_i + P'_c} = \frac{11.25 \times 10^3}{11.25 \times 10^3 + 430 + 673.34} = 0.910\,68 \ \rightarrow\ 91.1\ \% \qquad \cdots(答)$$

〔問２の標準解答〕

(1) 同期リアクタンス

ａ．単位法では同期リアクタンスは短絡比の逆数である。

Ａ機

同期リアクタンス X_{SA} $\qquad X_{SA} = \frac{1}{0.5} = 2.000\,0 \ \rightarrow\ 2.00\ \mathrm{p.u.}\ \cdots$(答)

Ｂ機

同期リアクタンス X_{SB} $\qquad X_{SB} = \frac{1}{0.6} = 1.666\,7 \ \rightarrow\ 1.67\ \mathrm{p.u.}\ \cdots$(答)

ｂ．　無負荷誘導起電力 E の式

$$E = \sqrt{V^2 + 2V\sin\phi X_s I + (X_s I)^2}$$

Ａ機の無負荷誘導起電力 E_A

$$\sin\phi = \sqrt{1 - (\cos\phi)^2} = \sqrt{1 - 0.9^2} = 0.435\,89$$

$$\begin{aligned} E_A &= \sqrt{1.000\,0^2 + 2 \times 1.000\,0 \times 0.435\,89 \times 2.000\,0 \times 1.000\,0 + (2.000\,0 \times 1.000\,0)^2} \\ &= \sqrt{6.743\,6} \\ &= 2.596\,8 \rightarrow 2.60\ \mathrm{p.u.}\ \cdots(答) \end{aligned}$$

Ｂ機の無負荷誘導起電力 E_B

$$\sin\phi = \sqrt{1 - (\cos\phi)^2} = \sqrt{1 - 0.9^2} = 0.435\,89$$

$$E_{\mathrm{B}} = \sqrt{1.000\ 0^2 + 2\times 1.000\ 0\times 0.435\ 89\times 1.666\ 7\times 1.000\ 0 + (1.666\ 7\times 1.000\ 0)^2}$$
$$= \sqrt{5.2309}$$
$$= 2.2871 \ \rightarrow\ 2.29\ \text{p.u.}\quad \cdots(答)$$

(2) 単位法における発電機の出力 P の式

$$P = \frac{EV}{X_{\mathrm{s}}}\sin\delta\ [\text{p.u.}]$$

A 機及び B 機の出力の式を求める。

A 機の出力の式　$P_{\mathrm{A}} = \dfrac{2.596\ 8\times 1.000\ 0}{2.000\ 0}\sin\delta_{\mathrm{A}} = 1.298\ 4\sin\delta_{\mathrm{A}}$

B 機の出力の式　$P_{\mathrm{B}} = \dfrac{2.287\ 1\times 1.000\ 0}{1.666\ 7}\sin\delta_{\mathrm{B}} = 1.372\ 2\sin\delta_{\mathrm{B}}$

$\delta_{\mathrm{A}} = \delta_{\mathrm{B}} = \delta$ のため, 並列運転による負荷への有効電力の合計 P_{T} は次の式となる。

$$P_{\mathrm{T}} = (1.298\ 4 + 1.372\ 2)\sin\delta = 2.670\ 6\sin\delta$$

合計有効電力が 16 000 kW であるため, $P_{\mathrm{T}} = \dfrac{16\ 000}{10\ 000} = 1.600\ 0$ p.u. となり, $\sin\delta$ は次の数値となる。

$$\sin\delta = \frac{1.600\ 0}{2.670\ 6} = 0.599\ 12 \ \rightarrow\ 0.599 \quad \cdots(答)$$

A 機及び B 機が分担する有効電力は次の数値となる。

$$P_{\mathrm{A}} = 1.298\ 4\sin\delta = 1.298\ 4\times 0.599\ 12 = 0.777\ 90\ \text{p.u.}$$
$$P_{\mathrm{A}} = 0.777\ 90\times 10\ 000 = 7\ 779.0 \ \rightarrow\ 7\ 780\ \text{kW} \quad \cdots(答)$$
$$P_{\mathrm{B}} = 1.372\ 2\sin\delta = 1.372\ 2\times 0.599\ 12 = 0.822\ 11\ \text{p.u.}$$
$$P_{\mathrm{B}} = 0.822\ 11\times 10\ 000 = 8\ 221.1 \ \rightarrow\ 8\ 220\ \text{kW} \quad \cdots(答)$$

また, 次の式が成り立つ。

$$E\sin\delta = X_{\mathrm{S}} I\cos\phi$$
$$E\cos\delta = V + X_{\mathrm{S}} I\sin\phi$$

これらの式から, 次の式により相電流 I が求まる。

$$I = \frac{1}{X_{\mathrm{S}}}\sqrt{E^2 - 2EV\cos\delta + V^2}$$
$$\cos\delta = \sqrt{1-(\sin\delta)^2} = \sqrt{1-(0.599\ 12)^2} = 0.800\ 66$$

A 機の相電流 I_A は次のようになる。

$$I_A = \frac{1}{2.000\,0}\sqrt{2.596\,8^2 - 2\times 2.596\,8\times 1.000\,0\times 0.800\,66 + 1.000\,0^2}$$
$$= 0.946\,71 \rightarrow 0.947\ \text{p.u.} \quad \cdots (答)$$

A 機の力率 $\cos\phi_A$ は次のようになる。

$$\cos\phi_A = \frac{0.777\,90}{1.000\,0\times 0.946\,71} = 0.821\,69 \rightarrow 0.822 \quad \cdots (答)$$

〔問 3 の標準解答〕

(1) インバータが停止している場合，直流コンデンサは三相交流電源の線間電圧波高値まで充電される。したがって，

$V_d = \sqrt{2}V_s$ ・・・(答)

(2) インバータが動作中は，インダクタに一定の電流が流れる。インダクタ電圧の平均値は零であるので，コンデンサ電圧は三相ブリッジ整流波形の平均電圧となる。したがって，

$$V_d = \frac{3\sqrt{2}}{\pi}V_s \quad \cdots (答)$$

(3) キャリア波 v_{tri} の波高値が 1 V であるので，$A=1$ の場合に v_{un} の基本波波高値は $\frac{V_d}{2}$ となる。このときの実効値は $\frac{V_d}{2\sqrt{2}}$ である。線間電圧基本波実効値は，

$$V_{1uv} = \sqrt{3}\times\frac{V_d}{2\sqrt{2}} = \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}}V_d \quad \cdots (答)$$

(4) ②式の信号波 v_u^* を θ で微分すると，

$$\frac{\partial v_u^*}{\partial\theta} = \frac{\partial}{\partial\theta}A\left(\sin\theta + \frac{1}{6}\sin 3\theta\right) = A\left(\cos\theta + \frac{1}{2}\cos 3\theta\right)$$
$$= A\left[\cos\theta + \frac{1}{2}(4\cos^3\theta - 3\cos\theta)\right] = A\left(2\cos^3\theta - \frac{1}{2}\cos\theta\right)$$
$$= A\cos\theta\left(2\cos^2\theta - \frac{1}{2}\right) = 0$$

したがって， $\theta = \pm\frac{\pi}{3}$，$\pm\frac{\pi}{2}$，$\pm\frac{2\pi}{3}$ で極値となる。このうち，最大値が現れる位相

は，

$$\theta = \frac{\pi}{3}, \frac{2\pi}{3} \quad \cdots (答)$$

また，位相が $\theta = \frac{\pi}{3}, \frac{2\pi}{3}$ での信号波 ${v_u}^*$ は，

$${v_u}^*\left(\frac{\pi}{3}\right) = A\left(\sin\frac{\pi}{3} + \frac{1}{6}\sin\pi\right) = \frac{\sqrt{3}}{2}A$$

したがって，${v_u}^*$ の最大値は ${v_u}^* = \frac{\sqrt{3}}{2}A \quad \cdots$(答)

(5) 信号波 ${v_u}^*$ の最大値が 1 を超えなければよいので，小問(4)より，

$${v_u}^* = \frac{\sqrt{3}}{2}A \leqq 1$$

となり，$A \leqq \frac{2}{\sqrt{3}}$ が V_{1uv} が A に比例する条件となる。$A \leqq \frac{2}{\sqrt{3}}$ のときの V_{1uv} は，

小問(3)の $\frac{2}{\sqrt{3}}$ 倍となるので，

$$V_{1uv} \leqq \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}}V_d \times \frac{2}{\sqrt{3}} = \frac{V_d}{\sqrt{2}}$$

したがって，V_{1uv} の最大値は $\frac{V_d}{\sqrt{2}}$ である。 $\cdots$(答)

○問題本文の訂正

第一種 機械・制御科目 問４において，問題本文中に不適切な表記がございました。つきましては，該当箇所を下記のように訂正いたします。

訂正箇所	訂正前の表記	訂正後
小問(2)７行目	$\bar{\boldsymbol{x}}(t)=\left[\boldsymbol{x}(t)\quad z(t)\right]^T$	$\bar{\boldsymbol{x}}(t)=\left[x_1(t)\quad x_2(t)\quad z(t)\right]^T$

〔問４の標準解答〕

(1) 図２から，$X_1(s)=\dfrac{1}{s+3}X_2(s)$，$X_2(s)=\dfrac{1}{s+2}U(s)$，$Y(s)=X_1(s)$が成り立つ。

これから，$\dot{x}_1(t)=-3x_1(t)+x_2(t)$，$\dot{x}_2(t)=-2x_2(t)+u(t)$，$y(t)=x_1(t)$となる。

これらを状態空間表現すると，

$$\begin{bmatrix}\dot{x}_1(t)\\ \dot{x}_2(t)\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}-3 & 1\\ 0 & -2\end{bmatrix}\begin{bmatrix}x_1(t)\\ x_2(t)\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}0\\ 1\end{bmatrix}u(t) \qquad \cdots\cdots ①$$

$$y(t)=\begin{bmatrix}1 & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}x_1(t)\\ x_2(t)\end{bmatrix} \qquad \cdots\cdots ②$$

が得られる。したがって，

$$\mathbf{A}=\begin{bmatrix}-3 & 1\\ 0 & -2\end{bmatrix},\quad \mathbf{b}=\begin{bmatrix}0\\ 1\end{bmatrix},\quad \mathbf{c}=\begin{bmatrix}1 & 0\end{bmatrix} \qquad \cdots\cdots ③$$

・・・(答)

となる。

(2) 次の三つの式が成立している。

$$\dot{\boldsymbol{x}}(t)=\mathbf{A}\boldsymbol{x}(t)+\mathbf{b}u(t) \qquad \cdots\cdots ④$$

$$\dot{z}(t)=-\mathbf{c}\boldsymbol{x}(t)+r(t) \qquad \cdots\cdots ⑤$$

$$u(t)=-\mathbf{f}\boldsymbol{x}(t)+kz(t) \qquad \cdots\cdots ⑥$$

⑥式を④式に代入する。

$$\dot{\boldsymbol{x}}(t)=\mathbf{A}\boldsymbol{x}(t)+\mathbf{b}\left[-\mathbf{f}\boldsymbol{x}(t)+kz(t)\right]=(\mathbf{A}-\mathbf{bf})\boldsymbol{x}(t)+\mathbf{b}kz(t) \qquad \cdots\cdots ⑦$$

⑦式と⑤式を状態空間表現すると，

$$\begin{bmatrix}\dot{\boldsymbol{x}}(t)\\ \dot{z}(t)\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\mathbf{A}-\mathbf{bf} & \mathbf{b}k\\ -\mathbf{c} & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\boldsymbol{x}(t)\\ z(t)\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}\mathbf{0}\\ 1\end{bmatrix}r(t) \quad \cdots\cdots \quad ⑧$$

が得られる。また，

$$y(t)=\begin{bmatrix}\mathbf{c} & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\boldsymbol{x}(t)\\ z(t)\end{bmatrix} \quad \cdots\cdots \quad ⑨$$

である。したがって，

$$\overline{\mathbf{A}}=\begin{bmatrix}\mathbf{A}-\mathbf{bf} & \mathbf{b}k\\ -\mathbf{c} & 0\end{bmatrix},\quad \overline{\mathbf{b}}=\begin{bmatrix}\mathbf{0}\\ 1\end{bmatrix},\quad \overline{\mathbf{c}}=\begin{bmatrix}\mathbf{c} & 0\end{bmatrix} \quad \cdots\cdots \quad ⑩$$

・・・(答)

となる。

(3) ⑩式より

$$\overline{\mathbf{A}}=\begin{bmatrix}\mathbf{A}-\mathbf{bf} & \mathbf{b}k\\ -\mathbf{c} & 0\end{bmatrix}$$

$$=\begin{bmatrix}\begin{bmatrix}-3 & 1\\ 0 & -2\end{bmatrix}-\begin{bmatrix}0\\ 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}1 & 1\end{bmatrix} & \begin{bmatrix}0\\ 1\end{bmatrix}1\\ -\begin{bmatrix}1 & 0\end{bmatrix} & 0\end{bmatrix}$$

$$=\begin{bmatrix}-3 & 1 & 0\\ -1 & -3 & 1\\ -1 & 0 & 0\end{bmatrix}$$

となるので，$\overline{\mathbf{A}}$ の固有値を与える多項式は以下となる。

$$\left|sI-\overline{\mathbf{A}}\right|=\begin{vmatrix}s+3 & -1 & 0\\ 1 & s+3 & -1\\ 1 & 0 & s\end{vmatrix}$$

$$=s(s+3)^2+1+s$$

$$=s(s^2+6s+9)+1+s$$

$$=s^3+6s^2+10s+1$$

・・・(答)

(4) 図 1 において内側からのマイナーループから順次，閉ループ伝達関数を求めると，

$$\frac{\frac{1}{s+2}}{1+\frac{1}{s+2}}=\frac{1}{s+3} \qquad \cdots\cdots\cdots ⑪$$

$$\frac{\frac{1}{(s+3)(s+3)}}{1+\frac{1}{(s+3)(s+3)}}=\frac{1}{s^2+6s+10} \qquad \cdots\cdots\cdots ⑫$$

となり，最終的に

$$\frac{Y(s)}{R(s)}=\frac{\frac{1}{s(s^2+6s+10)}}{1+\frac{1}{s(s^2+6s+10)}}$$

$$=\frac{1}{s^3+6s^2+10s+1} \qquad \cdots\cdots\cdots ⑬$$

・・・(答)

が得られる。