令和３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) 媒じん

発生原因：燃料に含まれる灰分が燃焼することで生成される

対策装置(設備)：電気集じん機(媒じん除去装置)を使用する

原理：(電気集じん機)媒じんを帯電させて静電気力により排ガスより分離捕集を行う

(2) 硫黄酸化物(SOx)

発生原因：燃料中に含まれる硫黄分が燃焼することで生成される

対策装置(設備)：脱硫装置を使用する

原理：(脱硫装置)石灰石—石膏法にて排ガス中の亜硫酸ガスを石灰(石灰スラリー)に吸収させ亜硫酸カルシウムとして除去する。これを空気で酸化することで石膏が生成される

(3) 窒素酸化物(NOx)

以下の発生原因の中から一つ，対策装置(設備)の中から一つ及びその原理が記載されていればよい。

発生原因：燃焼空気中の窒素が高温条件下で酸素と反応して生成される

燃料中に含まれる窒素分が燃焼により酸化され生成される

対策装置(設備)：低 NOx バーナー，排ガス混合法，ボイラ二段燃焼，脱硝装置を使用する

原理：(低NOxバーナー)燃焼方法(燃焼温度低下)の改善により生成量を減らす

(排ガス混合法)ガス混合機により排ガスを燃焼空気に混合して低酸素燃焼を行う

（ボイラ二段燃焼）バーナー周りの空気比を下げ NOx の生成を抑制させ未燃分を後流から注入した空気で再燃焼させる

（脱硝装置）アンモニア接触還元法にて還元剤としてアンモニアを加え混合したのち触媒層に通すことで NOx とアンモニアが還元反応して窒素と水蒸気に分解される

〔問２の標準解答〕

(1) 変電所の変圧器や開閉器などの電力機器を雷の直撃に耐えるように絶縁することは極めて困難であるため，架空地線と避雷鉄塔による変電所内の遮へいと接地を施して，直撃雷の発生を防止する。

(2) 送電線への直撃雷，鉄塔フラッシオーバ，誘導雷がある。いずれの場合も避雷器を変圧器付近，母線，線路引き込み口，あるいはそれらを組み合わせて設置して，雷サージの低減を行うことにより，保護する機器の絶縁レベルとの協調を行う。

(3)

・金属シース付き低圧制御ケーブルを採用しシースを接地する。

・低圧制御ケーブルを高電圧ケーブルから離す。

〔問３の標準解答〕

(1)

ａ） $I_{\mathrm{B}} = \dfrac{100}{\sqrt{3}\times 154} = 0.374\,90 = 0.375\,\mathrm{kA}$ ・・・（答）

ｂ） $Z_{\mathrm{B}} = \dfrac{\dfrac{154}{\sqrt{3}}}{0.374\,90} = 237.16 \fallingdotseq 237\,\Omega$ ・・・（答）

(2)

ａ） $Z = \mathrm{j}\dfrac{0.40\times 20}{237.16} = \mathrm{j}0.033733 \fallingdotseq \mathrm{j}0.0337\ \mathrm{p.u.}$ ・・・（答）

ｂ） $Z = \mathrm{j}\dfrac{10}{100}\times\dfrac{100}{150} = \mathrm{j}0.066\,667 \fallingdotseq \mathrm{j}0.066\,7\ \mathrm{p.u.}$ ・・・（答）

c）(1)a)の基準電流値を用い，下式より求められる。

$$\frac{25}{0.374\,90\times\dfrac{154}{66}}=28.579≒28.6\ \text{p.u.}\ \cdots(答)$$

(3) 発電機の最大容量を S[MV･A]とすると，短絡電流 I_S は下式で計算できる。

$$\begin{aligned}I_\mathrm{S}&=\frac{\dfrac{154}{154}}{\mathrm{j}\dfrac{0.033\,733}{2}+\mathrm{j}0.066\,667}+\frac{\dfrac{66}{66}}{\mathrm{j}0.30\times\dfrac{100}{S}}\\&=-\mathrm{j}\frac{1}{0.083\,534}-\mathrm{j}0.033\,333S\\&=-\mathrm{j}\left(11.971+0.033\,333S\right)\mathrm{p.u.}\end{aligned}$$

この短絡電流が 25 kA(28.6 p.u.)を上回らないためには，S は次の値以下である必要がある。

$$\begin{aligned}&11.971+0.033\,333S=28.579\\&\therefore S=498.24\ \mathrm{MV\cdot A}\end{aligned}$$

したがって，求める発電機の最大容量は 498 MV･A ･･･(答)

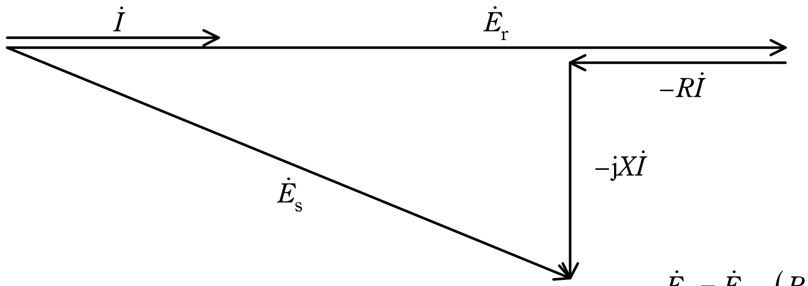
〔問４の標準解答〕

(1) 抵抗を R，リアクタンスを X，線路電流を $\dot{I}$ とすると，需要家から逆潮流があるので，相電圧 $\dot{E}_\mathrm{r}$ を基準に取ると，$\dot{E}_\mathrm{r}-\left(R+\mathrm{j}X\right)\dot{I}=\dot{E}_\mathrm{s}$ であることから，

$\dot{E}_\mathrm{r}=\dot{E}_\mathrm{s}+\left(R+\mathrm{j}X\right)\dot{I}$ ･･･ ①
･･･(答)

①式が得られる。

ベクトル図は以下のとおりとなる。



$\dot{E}_\mathrm{s}=\dot{E}_\mathrm{r}-\left(R+\mathrm{j}X\right)\dot{I}$

解図　$\dot{E}_\mathrm{r}$と$\dot{E}_\mathrm{s}$の関係を示すベクトル図

(2) ベクトル図から，次式が成立する。

$$E_s{}^2 = (E_r - RI)^2 + (XI)^2 \cdots\cdots ②$$

逆潮流は $P = 3E_r I$，つまり $I = \dfrac{P}{3E_r}$ であるから，②式は，

$$E_s{}^2 = \left(E_r - \frac{PR}{3E_r}\right)^2 + \left(\frac{PX}{3E_r}\right)^2 \cdots\cdots ③$$

となる。②式で電圧を[kV]にとると，P は[MW]になるから，

題意の $P = 1.0$ MW，$R = 3\ \Omega$，$X = 3\sqrt{3}\ \Omega$，$E_s = \dfrac{6.6}{\sqrt{3}}$ kV を②式に代入する。

$$\left(\frac{6.6}{\sqrt{3}}\right)^2 = \left(E_r - \frac{1.0\times 3}{3E_r}\right)^2 + \left(\frac{1.0\times 3\sqrt{3}}{3E_r}\right)^2 \cdots\cdots ④$$

$$\left(\frac{6.6}{\sqrt{3}}\right)^2 = E_r{}^2 - 2 + \frac{1}{E_r{}^2} + \frac{3}{E_r{}^2}$$

$$16.52 = E_r{}^2 + \frac{4}{E_r{}^2}$$

$$E_r{}^4 - 16.52E_r{}^2 + 4 = 0 \cdots\cdots ⑤$$

⑤式より，

$$E_r{}^2 = \frac{16.52 \pm \sqrt{16.52^2 - 4\times 4}}{2} \fallingdotseq 16.274,\ 0.246$$

となるが，明らかに 0. 246 は不適である。

よって，需要家端の線間電圧の大きさ V_r は以下のとおりとなる。

$V_r = \sqrt{3}E_r = 6.987\ 3\ \mathrm{kV} \fallingdotseq 6\ 990\ \mathrm{V}$ ・・・(答)

〔問５の標準解答〕

(1) 絶縁劣化診断法

(A)：高調波

(B)：残留

(C)：直流

(D)：交流

(2) 事故点測定法

(E)：ホイートストンブリッジ

(F)：1 線

(G)：断線

(H)：三相

(Ｉ)：反射

〔問６の標準解答〕

(1) 発電機 A の速度調定率を x[%]とする。次の方程式が成り立たなければならない。

$$50.50 = 50.00 + 50 \times \frac{x}{100} \times \frac{40}{120}$$

これを解くと，$x=3$

発電機 A の速度調定率は，3.0 %である。

(2) 系統負荷が 30 MW 減少したときの発電機 A の出力を P_A[MW]，発電機 B の出力を P_B[MW]，系統周波数を f[Hz]とする。次の連立方程式が成り立たなければならない。

$$\begin{cases} P_A + P_B = 180 - 30 \\ f = 50.00 + 50 \times \dfrac{3}{100} \times \dfrac{100 - P_A}{120} \\ f = 50.00 + 50 \times \dfrac{4}{100} \times \dfrac{80 - P_B}{80} \end{cases}$$

これを解くと，$P_A=80$，$P_B=70$，$f=50.25$

発電機 A の出力は 80 MW，発電機 B の出力は 70 MW，系統周波数は 50.25 Hz となる。

＜機械・制御科目＞

〔問１の標準解答〕

(1) 入力電流 I_1 は，この場合，等価回路の励磁コンダクタンス g_0 及び励磁サセプタンス b_0 は無視できるので，以下の式となる。

$$I_1 = \frac{V_1}{\sqrt{\left(r_1 + \dfrac{r_2'}{s}\right)^2 + x^2}} \quad \cdot\cdot\cdot \ （答）$$

(2) 二次（回転子）回路に流れる電流の一次側換算値を I_2' とすると，g_0 及び b_0 は無視できるので $I_2' = I_1$ であるから，機械的出力 P_o の式は以下となる。

$$P_o = 3\frac{1-s}{s} r_2' I_2'^2 = 3\frac{1-s}{s} r_2' I_1{}^2 = 3\frac{1-s}{s} r_2' \cdot \frac{V_1^2}{\left(r_1 + \dfrac{r_2'}{s}\right)^2 + x^2} \quad \cdot\cdot\cdot \ （答）$$

(3) f 及び p を用いて ω_s の式を表すと以下となる。

$$\omega_s = \frac{2\pi f}{p} \quad \cdot\cdot\cdot \ （答）$$

(4) 誘導電動機の発生トルク T は，以下の式となる。

$$T = \frac{P_o}{(1-s)\omega_s} = \frac{p}{(1-s)2\pi f} \cdot 3\frac{1-s}{s} r_2' \cdot I_2{}^2 = \frac{3p}{2\pi f} \cdot \frac{r_2'}{s} I_1{}^2$$

$$= \frac{3p}{2\pi f} \cdot \frac{r_2'}{s} \cdot \frac{V_1{}^2}{\left(r_1 + \dfrac{r_2'}{s}\right)^2 + x^2} \quad \cdot\cdot\cdot \ （答）$$

(5) 上記(4)の式から，分母を s について整理して，

$$T = \frac{3p}{2\pi f} \cdot \frac{r_2'}{s} \cdot \frac{V_1{}^2}{r_1{}^2 + 2\dfrac{r_1 r_2'}{s} + \left(\dfrac{r_2'}{s}\right)^2 + x^2} = \frac{3p}{2\pi f} \cdot \frac{r_2' V_1{}^2}{s\left(r_1{}^2 + x^2\right) + 2r_1 r_2' + \dfrac{r_2'^2}{s}} \quad \cdots\cdot \ ①$$

①式において，最大トルク T_m を求めるために，変数を滑り s として分母を s で微分し，分母の最小条件（極値となる条件）を求める。

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}s}\left[s\left(r_1{}^2+x^2\right)+2r_1r_2'+\frac{r_2'^2}{s}\right]=r_1{}^2+x^2-\frac{r_2'^2}{s^2}=0$$

$$\therefore \quad r_1{}^2+x^2=\frac{r_2'^2}{s^2}\,, \qquad s^2=\frac{r_2'^2}{r_1{}^2+x^2}$$

$$s=\pm\sqrt{\frac{r_2'^2}{r_1{}^2+x^2}}=\pm\frac{r_2'}{\sqrt{r_1{}^2+x^2}}$$

電動機の場合，$0<s<1$ であるから，滑りの符号は正である。

したがって，T_m のときの滑り s_m は次式となる。

$$s_\mathrm{m}=\frac{r_2'}{\sqrt{r_1{}^2+x^2}} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad ②$$

・・・(答)

(6) ②式を①式の s に代入し，T_m を求めると，

$$T_\mathrm{m}=\frac{3p}{2\pi f}\cdot\frac{r_2'V_1{}^2}{\frac{r_2'}{\sqrt{r_1{}^2+x^2}}\left(r_1{}^2+x^2\right)+2r_1r_2'+r_2'^2\frac{\sqrt{r_1{}^2+x^2}}{r_2'}}$$

$$=\frac{3p}{2\pi f}\cdot\frac{V_1{}^2}{\sqrt{r_1{}^2+x^2}+2r_1+\sqrt{r_1{}^2+x^2}}=\frac{3p}{2\pi f}\cdot\frac{V_1{}^2}{2r_1+2\sqrt{r_1{}^2+x^2}}$$

$$=\frac{3p}{4\pi f}\cdot\frac{V_1{}^2}{r_1+\sqrt{r_1{}^2+x^2}}$$ ・・・(答)

〔問２の標準解答〕

（1） 短絡インピーダンスの抵抗分を R［Ω］とすると，％r［%］は次式で定義される。ここに P_{loss} = 二次短絡試験の電力， P_0 = 変圧器定格容量， V_1 = 変圧器一次定格電圧， I_1 = 変圧器一次定格電流

$$\%r = \frac{R\times I_1}{V_1}\times 100 = \frac{R\times I_1^2}{V_1\times I_1}\times 100 = \frac{P_{\mathrm{loss}}}{P_0}\times 100 = \frac{1.5}{200}\times 100 = 0.75$$

$$\therefore\quad \%x = \sqrt{\%z^2 - \%r^2} = \sqrt{4.5^2 - 0.75^2} = \sqrt{20.25 - 0.562\,5} \fallingdotseq 4.437\,1$$

答え　％r＝0.75 %，％x＝4.44 %

（2） Z：

％z と実インピーダンス Z［Ω］の関係は定格電圧と定格容量により次式で示される。

$$Z = \%z\times\frac{1}{100}\times\frac{V_1^2}{P_0}$$

ここでは一次換算を求めるので， V_1 を一次電圧， P_0 を変圧器容量として以下となる。

$$Z = 4.5\times\frac{1}{100}\times\frac{11\,000^2}{200\,000} = 27.225$$

答え　Z=27.2 Ω

（3） R，X：

小問(1)で求めた抵抗分とリアクタンス分のパーセント値及び小問(2)の $Z = 27.225$ Ωを使って，次式のように求められる。

$$R = \frac{\%r}{\%z}\times Z = \frac{0.75}{4.5}\times 27.225 = 4.537\,5$$

$$X = \frac{\%r}{\%z}\times Z = \frac{4.437}{4.5}\times 27.225 \fallingdotseq 26.844$$

答え　R=4.54 Ω，　X=26.8 Ω

（4） 二次電圧，リアクトル無効電力（V_2， Q_{L}）

変圧器の一次，二次の巻数比は a=25（11 000：440）であるので，一次電流 I_1 は

$$I_1 = \frac{1}{a} \times I_2 = \frac{1}{25} \times 400 = 16\ \mathrm{A}$$

皮相電力　$S = 11\,000 \times 16 = 176\,000\ \mathrm{V{\cdot}A}$

負荷リアクトルの抵抗は 0 Ωであるので，回路の有効電力は巻線の抵抗による分の次式で示される。

変圧器巻線の有効電力 $P_\mathrm{c} = R \times 16^2 = 4.537\,5 \times 16^2 = 1161.6\ \mathrm{W}$

変圧器巻線による無効電力は次式で示される。

変圧器巻線の無効電力 $Q_\mathrm{c} = X \times 16^2 = 26.844 \times 16^2 = 6\,872.1\ \mathrm{var}$

二次側負荷リアクトルの無効電力を Q_L [var]とすると次式が成立し，これを解いて，Q_L を求める。

$$S = \sqrt{P_\mathrm{c}^2 + \left(Q_\mathrm{c} + Q_\mathrm{L}\right)^2}$$

$$Q_\mathrm{L} = \sqrt{S^2 - P_\mathrm{c}^2} - Q_\mathrm{c} = \sqrt{\left(176\,000\right)^2 - \left(1161.6\right)^2} - 6\,872.1$$

$$= 169\,120\ \mathrm{var} \fallingdotseq 169\ \mathrm{kvar}$$

二次電圧 V_2 は

$$V_2 = \frac{169\,120}{400} = 422.8 \fallingdotseq 423$$

答え　$V_2 = 423\ \mathrm{V}$，$Q_\mathrm{L} = 169\ \mathrm{kvar}$

〔問３の標準解答〕

(1)　(例 1) 入力 V_in よりも出力 V_out が大きい。太陽光発電で発電した直流電圧をより高い電圧のバッテリに充電するから。（例 2）$V_\mathrm{in} < V_\mathrm{out}$ である。系統の電圧波高値が太陽光発電の電圧よりも高いことがあるから。

(2)　リアクトルには電源の直流電圧 V_in が直接印加される。リアクトルの電圧は

$v_L = V_\mathrm{in} = L\dfrac{\mathrm{d}i_\mathrm{in}}{\mathrm{d}t} > 0$ となる。したがって，電流 i_in は増加する。

(3) デバイスSをオフしても電流は流れ続ける。ダイオードDが導通する。リアクトルの電圧は$v_L = V_{\mathrm{in}} - V_{\mathrm{out}} = L\dfrac{\mathrm{d}i_{\mathrm{in}}}{\mathrm{d}t} < 0$となる。したがって，電流$i_{\mathrm{in}}$は減少する。

(4) 電流I_{in}がダイオードDを流れるのはスイッチSがオフの期間T_{off}だけであり，その大きさはI_{in}である。スイッチSがオンの期間T_{on}にダイオードDを流れる電流はゼロである。したがって，平均値I_{D}は，$I_{\mathrm{D}} = I_{\mathrm{in}}\left(\dfrac{T_{\mathrm{off}}}{T_{\mathrm{on}} + T_{\mathrm{off}}}\right)$

(5) 電源からチョッパへの入力電力$V_{\mathrm{in}} \times I_{\mathrm{in}}$と，チョッパから負荷への出力電力$V_{\mathrm{out}} \times I_{\mathrm{D}}$は等しく，また小問(4)より$V_{\mathrm{out}} = V_{\mathrm{in}}\left(\dfrac{T_{\mathrm{on}} + T_{\mathrm{off}}}{T_{\mathrm{off}}}\right)$

〔問4の標準解答〕

(1) まず，内側のフィードバック結合を等価変換すると

$$\frac{\dfrac{1}{s(2s+1)}}{1+\dfrac{1}{s(2s+1)}\cdot s} = \frac{1}{s(2s+2)}$$

となる。したがって，開ループ伝達関数$G(s)$は，次のように求められる。

$$G(s) = \frac{K}{Ts+1}\cdot\frac{1}{s(2s+2)}$$

$$= \frac{K}{s(Ts+1)(2s+2)} \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \text{①}$$

・・・(答)

(2) 閉ループ伝達関数$W(s)$は，小問(1)で求めた$G(s)$を使って

$$W(s) = \frac{G(s)}{1+G(s)} \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \text{②}$$

で計算することができる。②式に①式を代入すると

$$W(s)=\frac{\dfrac{K}{s(Ts+1)(2s+2)}}{1+\dfrac{K}{s(Ts+1)(2s+2)}}$$

$$=\frac{K}{2Ts^3+(2T+2)s^2+2s+K} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad ③$$

・・・(答)

となる。

(3) ③式に$T=0$を代入すると閉ループ伝達関数$W(s)$は

$$W(s)=\frac{K}{2s^2+2s+K} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad ④$$

となる。④式から，この制御系の系の特性方程式は

$$2s^2+2s+K=0 \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad ⑤$$

であることがわかる。

目標値のステップ状変化に対する制御量の時間応答$y(t)$が振動的になるのは，⑤式の根が複素数になる場合である。すなわち，⑤式の判別式Dが$D<0$となる条件

$$4-8K<0$$

を解いて

$$K>0.5 \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad ⑥$$

・・・(答)

を得る。

(4) ④式で$K=1$とおくと次のようになる。

$$W(s)=\frac{Y(s)}{R(s)}=\frac{1}{2s^2+2s+1} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad ⑬$$

目標値は単位インパルス関数なので，$R(s)=1$である。したがって，

$$Y(s)=\frac{1}{2s^2+2s+1}=\frac{0.5}{s^2+s+0.5} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad ⑭$$

を逆ラプラス変換することで単位インパルス応答$y(t)$を得ることができる。

$$y(t) = \mathcal{L}^{-1}\left[\frac{0.5}{s^2 + s + 0.5}\right] = \mathcal{L}^{-1}\left[\frac{0.5}{(s+0.5)^2 + 0.5^2}\right]$$

$$= \mathrm{e}^{-0.5t}\sin 0.5t \quad \cdots\cdots \quad ⑮$$

・・・(答)

(5) ③式に$T = 2$を代入すると閉ループ伝達関数$W(s)$は

$$W(s) = \frac{K}{4s^3 + 6s^2 + 2s + K} \quad \cdots\cdots \quad ⑱$$

となる。この制御系の特性方程式

$$4s^3 + 6s^2 + 2s + K = 0 \cdots\cdots \quad ⑲$$

を使ってラウス表を作ると次のようになる。

s^3 行	4	2	0
s^2 行	6	K	0
s^1 行	$\dfrac{12-4K}{6}$	0	
s^0 行	K		

このシステムが安定となる必要十分条件は，次式が成立することである。

$$12 - 4K > 0 \cdots\cdots \quad ⑳$$

$$K > 0 \quad \cdots\cdots \quad ㉑$$

⑳式と㉑式から

$$0 < K < 3 \cdots\cdots \quad ㉒$$

・・・(答)

を得る。