●平成16年度第二種電気主任技術者　追加二次試験標準解答

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)　設置目的

送電系統の事故波及や所内系統の事故等により発電機が停止し，同時に所内電源を喪失した場合，機器の安全停止，保安電源を確保するとともに，所内電源が復旧するまでの間，発電設備の早期再起動の準備に必要な機器や装置の電源を確保するため，非常用発電装置が設置されている。発電装置としては，通常ディーゼル発電機が用いられることが多い。

(2)　接続される機器

・タービンターニング装置

タービン停止後，軸の低速回転を行い，温度の不均等による軸の曲がりを防止する。

・ターニング油ポンプ

タービン軸のターニングを行うのに必要な軸受油を供給する。

・大型補機の潤滑油ポンプ

ポンプやファンが停止するまでの間，軸受油を供給する。

・発電機密封油ポンプ

水素冷却発電機の密封油を確保し，機内水素ガスの漏洩を防止する。

・計測制御装置

発電設備の監視，制御を行う計測機器，計算機等に必要な電源を確保する。

・蓄電池充電器

蓄電池の充電器に電力を供給し，操作用及び制御用の直流電源を確保する。

・通信装置

所内及び所外への通信に必要な電源を確保する。

・照明

安全停止及び再起動準備の監視，操作に必要な照明の電源を確保する。

〔問２の標準解答〕

(1) Y - Y - Δ 結線

この結線は Y - Y 結線に，Δ 結線をした三次巻線を設ける方式で，一次側，二次側ともに中性点を接地でき，地絡故障時の異常電圧を低減することが可能である。一次，二次間の各相電圧間に位相角変化がなく，三次 Δ 巻線に第 3 調波が還流するので，各相電圧の高調波を抑制できる。また，三次巻線には，1 線地絡時の零相電流も循環するので，変圧器の零相インピーダンスが減少する。このほか調相設備を接続したり所内負荷などの回路に必要な低電圧を供給できるなどの利点がある。この結線は 500〔kV〕変圧器から配電変電所用変圧器まで広く採用されている。

(2) Y - Δ（Δ - Y）結線

この結線は，Y 結線の中性点を接地でき，地絡故障時の異常電圧を低減することが可能で，また，Δ 巻線には第 3 調波が還流するので各相電圧の高調波を抑制できるが，一次，二次間の対応する相電圧に 30 °の位相差を生じる。

Y - Δ 結線は，変電所の降圧用変圧器（Δ - Y 結線は，発電所の昇圧用変圧器）として広く採用されている。

(3) Δ - Δ 結線

この結線は，第 3 調波の還流通路を持っているので波形ひずみは少なく，一次，二次間の対応する相電圧に位相角変化がない。一相が故障しても，バンクの構成によっては V 結線で運転できる利点を持つ。しかし，中性点を接地できないので地絡故障時には異常電圧を発生しやすい。また，二次側の地絡保護のため別に接地変圧器(接地変成器)を設ける必要があるので，主として 77〔kV〕以下の回路に使用される。

〔問３の標準解答〕

(1) 防災トラフ内への布設

外傷からのケーブル保護，外部火災からのケーブル保護，地絡時のケーブル延焼防止を目的として，防災トラフ内へケーブルを収容する。

(2) 延焼防止材料の使用

難燃材料のケーブルへの巻き付け，耐炎シール材の貫通口の目詰めなどによりケーブルの保護，延焼防止及び火災の局限化を図る。これらの対策は既設設備に容易に適用できる。

(3) 隔離板，隔離壁などの設置

ケーブル，接続部などを難燃性の板，耐火性の隔壁などで相互に隔離する。

(4) 自動消火装置の設置

発変電所近傍や布設条数の多い洞道部などに自動消火装置を設置する。

(5) 火災感知器の設置

感知線をケーブルに添って設置するなど，熱源発生箇所の早期発見を行う。

(6) ケーブルの難燃化

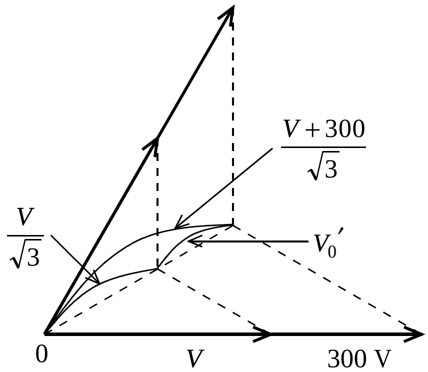
ケーブルシース，更には介在物などに難燃性を付与し，ケーブル自体の難燃化を図る。

〔問４の標準解答〕

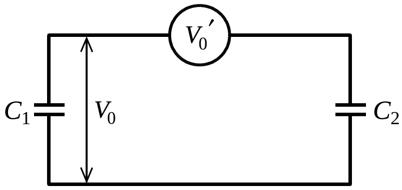
変電所側電圧は対称三相で線間電圧の大きさを V とする。

この配電線の零相電圧は昇圧器設置に起因するものであり，その一次側中性点を基準としたときの二次側中性点電圧 V_0' は下図より

$$V_0' = \frac{V+300}{\sqrt{3}} - \frac{V}{\sqrt{3}} = 100\sqrt{3}$$



一方，この配電線の零相等価回路は，変電所母線に発生する零相電圧を V_0，昇圧器二次側の中性点電圧を V_0' とすると，次のとおりとなる。



よって，変電所母線に発生する零相電圧 V_0 は，

$$V_0 = V_0' \times \left(\frac{C_2}{C_1 + C_2} \right) = 100\sqrt{3} \times \frac{0.1}{0.2+0.1} = 57.735 \rightarrow 57.7〔\mathrm{V}〕$$

〔問５の標準解答〕

(1) 雷

・　送電線や鉄塔, 架空地線に雷撃があった場合, 雷撃電流の波高値は平均で 30〔kA〕，最大 200〔kA〕程度に達するものが観測されている。

・　送電線に直撃雷を受けると，雷撃電流が送電線上を進行する。これによって送電線に発生する異常電圧が，がいしやアークホーンを持続性のアークで短絡する。これをフラッシオーバといい，1 線地絡事故となる。

・　鉄塔頭部又は架空地線へ直撃雷を受けると雷撃電流が鉄塔及び鉄塔の接地を通して大地に流れ，鉄塔の電位が異常に上昇する。この異常電圧が，がいしやアークホーンのフラッシオーバ電圧を超えると，鉄塔から送電線へ逆フラッシオーバが生じ，アークによって 1 線地絡事故となる。雷撃電流の大きさによっては 2 線地絡，3 線地絡事故になることもある。

・　架空地線に直撃雷を受けると，架空地線から空気の絶縁を破り，送電線へ向かう径間逆フラッシオーバを生じることがあり，1 線地絡事故となる。特に径間長が長く，かつ，送電線と架空地線との間隔が狭い場合に発生しやすい。

・　雷雲電荷によって送電線上に電荷が拘束されている状態で，雲間放電あるいは雲－大地間放電により雷雲電荷が失われると拘束がなくなり，電荷は送電線上を移動する。これが誘導雷サージである。誘導雷サージによる異常電圧の波高値は，大部分が 100〔kV〕以下とみなされており，超高圧送電線路においては誘導雷による事故発生は少ない。

(2) 雪

・ 送電線への着雪の発生は，気温・風速・降雪量などに左右され，これらの条件が整えばどこにでも発生する可能性がある。

・ 気温が低いときの雪は水分が少なく，比較的乾いているので，送電線に衝突しても着雪は少ない。また，送電線上に堆積しても風などの軽いショックで簡単に脱落する。

・ 気温が 0〔℃〕付近（0 ～＋2〔℃〕程度）の雪は水分が多く，水の表面張力で送電線に最も付着しやすい。また，＋2〔℃〕程度以上では雪が解けて雨となるため着雪とならない。

・ 送電線に雪が付着し，その断面が非対称になると風によって揚力を受けることがある。これにより送電線が振動して大きく揺れる現象がギャロッピングである。送電線に繰り返し応力が加わり断線事故となることがある。

・ 水分含有率の高い雪が送電線に付着すると，その膨らみはだんだん大きく成長する傾向にある。その重量のため，送電線の弛度が大きくなる。気温が上がる等の原因で送電線に付着した雪が一斉に落下すると，送電線はもとの弛度に戻ろうとして，上下に大きく振動する。この現象がスリートジャンプであり，他相の電線と接触すると相間短絡事故となる。

〔問６の標準解答〕

(1) 工場の負荷電流

工場で消費する無効電力 Q は,

$$Q = P \times \frac{\sin\theta}{\cos\theta} = P \times \frac{\sqrt{1-\cos^2\theta}}{\cos\theta}$$

$$= 20800 \times \frac{\sqrt{1-0.8^2}}{0.8}$$

$$= 15600 \text{〔kvar〕}$$

ここで，受電端電圧 $\dot{V}_r$ の位相を基準とすると,

$$P + jQ = \sqrt{3} V_r \bar{\dot{I}}_r$$

であるから,

$$\dot{I}_r = \frac{P - jQ}{\sqrt{3} V_r} = \frac{20800 - j15600}{\sqrt{3} \times 65} \quad 184.75 - j138.56 \rightarrow 185 - j139 \text{〔A〕}$$

(2) 送電端電圧

送電端電圧 $\dot{V}_s$ は，受電端電圧 $\dot{V}_r$ の位相を基準とすると,

$$\dot{V}_s = V_r + \sqrt{3}(r + jx)\dot{I}_r$$

$$= 65 + \sqrt{3} \times (2 + j4) \times (0.18475 - j0.13856)$$

$$= 65 + \sqrt{3} \times (1.5999 + j0.46188) = 66.599 + j0.7999 \rightarrow \ 66.6 + j0.8 \text{〔kV〕}$$

(3) 電力用コンデンサの容量〔kvar〕

電力用コンデンサ設置による電圧改善後の受電端電圧 $\dot{V}_r{}'$ の位相を基準とすると，

$$\dot{V}_s - V_r{}' = \sqrt{3}(r + jx)\dot{I}' \quad \cdots\cdots \quad ①$$

$$\dot{I}' = \frac{P - jQ'}{\sqrt{3}V_r{}'} \quad \cdots\cdots \quad ②$$

ここで，$\dot{I}'$ は電力用コンデンサ設置後の受電電流，Q' は電力用コンデンサ設置後の工場での消費無効電力である。

送電端電圧 $\dot{V}_s$ と受電端電圧の $\dot{V}_r$ 位相差を ϕ とすると，①，②式より

$$V_s\angle\phi = V_r{}' + \sqrt{3}(r + jx)\frac{P - jQ'}{\sqrt{3}V_r{}'}$$

$$V_sV_r'\angle\phi = V_r{}'^2 + (r + jx)(P - jQ')$$

$$V_sV_r{}'\cos\phi + jV_sV_r{}'\sin\phi = V_r{}'^2 + rP + xQ' + j(xP - rQ')$$

よって，

$$\begin{cases} V_sV_r{}'\cos\phi = V_r{}'^2 + rP + xQ' & \cdots\cdots \quad ③ \\ V_sV_r{}'\sin\phi = xP - rQ' & \cdots\cdots \quad ④ \end{cases}$$

③式と④式の両辺を 2 乗して加えると，$\cos^2\phi + \sin^2\phi = 1$ であるから，

$$V_s^2V_r{}'^2 = \left(V_r{}'^2 + rP + xQ'\right)^2 + \left(xP - rQ'\right)^2 \quad \cdots\cdots \quad ⑤$$

⑤式を Q' について整理すると，

$$\left(r^2 + x^2\right)Q'^2 + 2xV_r{}'^2Q' + \left(V_r{}'^2 + rP\right)^2 + x^2P^2 - V_s^2V_r{}'^2 = 0 \quad \cdots\cdots \quad ⑥$$

r = 2〔Ω〕，x = 4〔Ω〕，$V_s = \sqrt{66.599^2 + 0.7999^2}$〔kV〕，$V_r{}' = 65.5$〔kV〕，

P = 20.8〔MW〕を代入して⑥式を解くと，

$$\begin{aligned}\left(2^2 + 4^2\right)Q'^2 + 2\times4\times65.5^2\times10^6Q' + \left(65.5^2\times10^6 + 2\times20.8\times10^6\right)^2 + 4^2\times20.8^2\times10^{12} \\ -\left(66.559^2 + 0.7999^2\right)\times10^6\times65.5^2\times10^6 \\ = 20Q'^2 + 34322\times10^6Q' - 259988\times10^{12} = 0\end{aligned}$$

上記二次方程式式の解を求める。

$$Q' = \frac{-34322 \times 10^6 \pm \sqrt{\left(34322 \times 10^6\right)^2 + 4 \times 20 \times 259988 \times 10^{12}}}{2 \times 20}$$

$$= \frac{-34322 \times 10^6 \pm 34624 \times 10^6}{40} = 7.5500 \times 10^6 \ \text{or} \ -1723.6 \times 10^6$$

後者の解は不適なので，

$$Q' = 7.5500 \times 10^6 = 7.550 \text{〔Mvar〕} = 7\,550 \text{〔kvar〕}$$

よって，電力用コンデンサの必要容量 Q_c は，

$$Q_c = Q - Q' = 15\,600 - 7\,550 = 8\,050 \text{〔kvar〕}$$

＜機械・制御科目＞

〔問１の標準解答〕

(1) 滑り，出力及びトルク

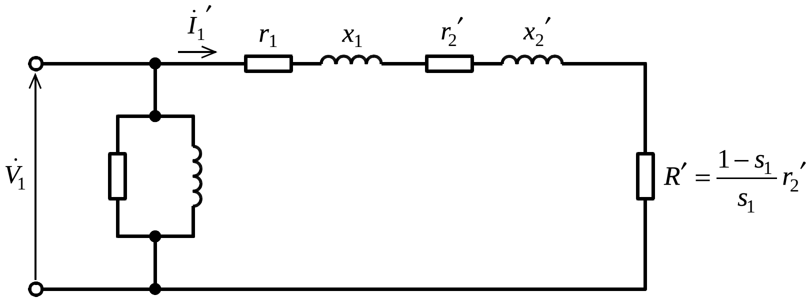


図１　一相分等価回路

ａ．滑り s_1

同期速度を n_0，回転速度を n，極数を $2p$，滑りを s_1 とすれば，

$$n_0 = \frac{120f}{2p} = \frac{120 \times 50}{4} = 1500〔\mathrm{min}^{-1}〕$$

$$s_1 = \frac{n_0 - n}{n_0} = \frac{1500 - 1455}{1500} = 0.03 \rightarrow 3〔\%〕$$

ｂ．出力 P

一次負荷電流は，図１の等価回路から次のようになる。

$$\dot{I}_1{}' = \frac{\dot{V}_1}{\dot{Z}} = \frac{\dot{V}_1}{\left(r_1 + \dfrac{r_2{}'}{s_1}\right) + j(x_1 + x_2{}')}$$

したがって，$I_1{}'$ は

$$I_1{}' = \frac{V_1}{\sqrt{\left(r_1 + \dfrac{r_2{}'}{s_1}\right)^2 + (x_1 + x_2{}')^2}}$$

一相分の出力は $R'I_1'^2$ なので，三相分では，

$$P = 3R'I_1'^2 \qquad \text{ここで，} R' = \frac{1-s_1}{s_1}r_2'$$

$$= 3\frac{1-s_1}{s_1}r_2'\frac{V_1^2}{\left(r_1+\frac{r_2'}{s_1}\right)^2+(x_1+x_2')^2}$$

$$= 3\times\frac{1-0.03}{0.03}\times 0.0823\times\frac{\left(\frac{200}{\sqrt{3}}\right)^2}{\left(0.0812+\frac{0.0823}{0.03}\right)^2+(0.184+0.278)^2}$$

$$= \frac{106441.3}{7.9779+0.21344} = 12994〔\mathrm{W}〕\rightarrow 13.0〔\mathrm{kW}〕$$

c．トルク T_1

回転角速度を ω とすれば，トルク T_1 は

$$T_1 = \frac{P}{\omega}$$

となる。回転角速度 ω は

$$\omega = 2\pi\frac{n}{60}$$

であるから，トルク T_1 は

$$T_1 = \frac{P}{\omega} = \frac{12994}{2\pi\times\frac{1455}{60}} = 85.280 \rightarrow 85.3〔\mathrm{N\cdot m}〕$$

(2) トルク及び抵抗値

d. トルク T_2

回転速度 1 155〔min^{-1}〕で運転するとき，定格一次周波数に対する滑り s_2 は

$$s_2 = \frac{1500 - 1155}{1500} = 0.23$$

題意より，負荷トルクは回転速度に比例するものとしているので，回転速度 1 155〔min^{-1}〕で運転するときのトルク T_2〔N･m〕は，次のようにして求められる。

図 2 において△ AGB と△ CGD が相似形なので，トルク T_1 のときの回転速度と滑りを n_1，s_1，トルク T_2 のときの回転速度と滑りを n_2，s_2 とすると，題意より

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{1 - s_2}{1 - s_1}$$

が成立する。したがって

$$T_2 = \frac{1 - s_2}{1 - s_1} T_1 = \frac{1 - 0.23}{1 - 0.03} \times 85.280 = 67.696 \rightarrow 67.7 \text{〔N･m〕}$$

ｅ．二次側に挿入する抵抗の値 r_x

題意より，図 2 で，△ AOB と△ EOF が相似形なので，s_3 は次のようになる。

$$\frac{T_2}{T_1}=\frac{\overline{\mathrm{EF}}}{\overline{\mathrm{AB}}}=\frac{\overline{\mathrm{OF}}}{\overline{\mathrm{OB}}}=\frac{s_3}{s_1}$$

$$s_3=\frac{T_2}{T_1}s_1=\frac{67.696}{85.280}\times 0.03=0.023814$$

したがって，挿入する抵抗 r_x は，比例推移から

$$\frac{r_2'+r_x}{s_2}=\frac{r_2'}{s_3}$$

$$\therefore\ r_x=\frac{s_2}{s_3}r_2'-r_2'=\frac{0.23}{0.023814}\times 0.0823-0.0823=0.71256\ \rightarrow\ 0.713\ 〔\Omega〕$$

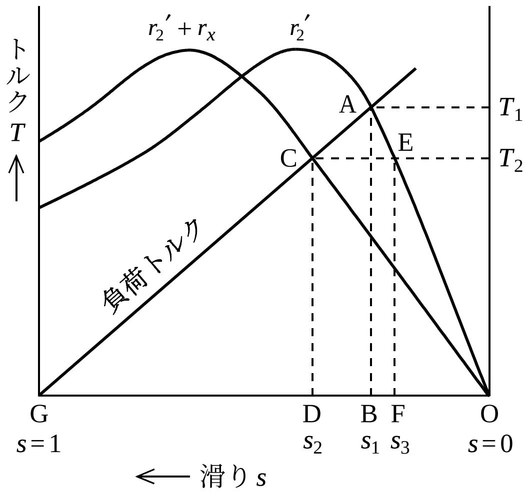


図 2　滑りとトルクの関係

〔問 2 の標準解答〕

（1）巻数比

図 2 のベクトル図の平衡条件より

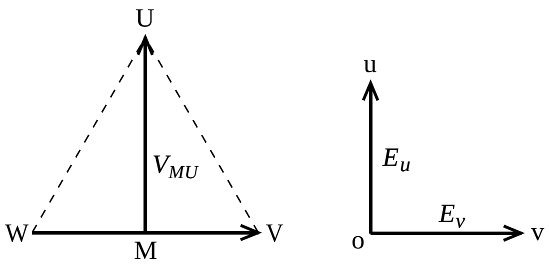
T_2 の巻数比　　$\dfrac{\sqrt{3}a}{2}:1$

（2）総合利用率

T 座変圧器の一次，二次の巻数をそれぞれ $\dfrac{\sqrt{3}}{2}w_1$，w_2，主座変圧器の一次，二次の巻数をそれぞれ w_1，w_2 とし，三相側の線間電圧の大きさを V_1 とすれば，T 座変圧器の二次誘起電圧 $\dot{E}_u$ と主座変圧器の二次誘起電圧 $\dot{E}_v$ は次式で与えられる。

$$\dot{E}_u=\frac{w_2}{\dfrac{\sqrt{3}}{2}w_1}\dot{V}_{MU}=\frac{2}{\sqrt{3}}\cdot\frac{w_2}{w_1}j\frac{\sqrt{3}}{2}\dot{V}_1=j\frac{w_2}{w_1}\dot{V}_1$$

$$\dot{E}_v=\frac{w_2}{w_1}\dot{V}_{WV}=\frac{w_2}{w_1}\dot{V}_1$$



ただし，$\dot{V}_{MU}$ は T 座変圧器の一次にかかる電圧で，主座変圧器の一次電圧 $\dot{V}_{WV}$ すなわち線間電圧 $\dot{V}_1$ と $\pi/2$ の位相差を有する。

二次に平衡した二相の負荷電流 $\dot{I}_u$，$\dot{I}_v$ が流れたとき，一次に流入する電流を $\dot{I}_U$， $\dot{I}_V$， $\dot{I}_W$ とすれば,

$$\dot{I}_u=j\,\dot{I}_v$$

$$\frac{\sqrt{3}}{2}w_1\dot{I}_U=w_2\dot{I}_u\quad,\quad\frac{w_1}{2}\left(\dot{I}_V-\dot{I}_W\right)=w_2\dot{I}_v$$

二相側皮相出力：$S_2 = 2E_u I_u = 2\left(\dfrac{w_2}{w_1}V\right)\left(\dfrac{\sqrt{3}w_1}{2w_2}I\right) = \sqrt{3}VI$

三相側容量　　　：$S_1 = 2VI$

以上の関係より

総合利用率　　　：$\dfrac{S_2}{S_1} = \dfrac{\sqrt{3}VI}{2VI} = 0.86602 \rightarrow 86.6$〔%〕

(3)

ａ．T_1の巻数比　　　　：$a_1 = \dfrac{6\,600}{200} = 33.0$

T_2の巻数比　　　　：$a_2 = 33 \times \dfrac{\sqrt{3}}{2} = 28.578 \rightarrow 28.6$

ｂ．二次電流　　　　　：$I_2 = \dfrac{80\times10^3}{2\times200} = 200$〔A〕

ｃ．一次電流　　　　　：$I_1 = \dfrac{80\times10^3}{\sqrt{3}\times6\,600} = 6.9981 \rightarrow 7.00$〔A〕

ｄ．単相変圧器の容量：$S = 7\times6\,600 = 46\,200 \rightarrow 46.2$〔kV・A〕

〔問３の標準解答〕

（1）直流出力電圧

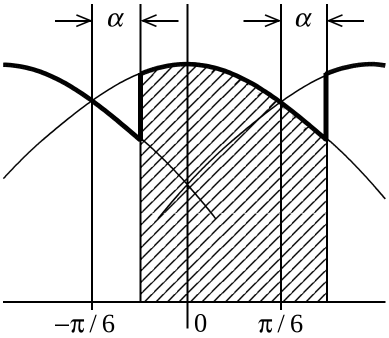
直流平均電圧 E_d は，図の斜線部の π / 3 期間の平均値を求めればよいので，

$$E_d = \frac{3}{\pi}\int_{-\pi/6+\alpha}^{\pi/6+\alpha} \sqrt{2}\, V_l \cos\theta \, \mathrm{d}\theta \quad \cdots\cdots ①$$

となる。これから，

$$E_d = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} V_l \left[\sin\theta\right]_{-\pi/6+\alpha}^{\pi/6+\alpha} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} V_l \left[\sin\left(\frac{\pi}{6}+\alpha\right) - \sin\left(-\frac{\pi}{6}+\alpha\right)\right]$$

$$= \frac{3\sqrt{2}}{\pi} V_l \times 2\sin\frac{\pi}{6}\cos\alpha = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} V_l \cos\alpha \quad \cdots\cdots ②$$



（2）

ａ．電機子誘導起電力

位相制御角を α とした三相全波位相制御回路の直流出力電圧 E_d は，

$$E_d = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} V_l \cos\alpha \quad \cdots\cdots ③$$

電機子回路の全抵抗は $R + R_a$ であるから，電機子誘導起電力 E_a は，

$$E_a = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} V_l \cos\alpha - (R + R_a) I_a \quad \cdots\cdots ④$$

となる。これに数値を代入すれば，

$$E_a = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \times 200 \times \frac{\sqrt{3}}{2} - (0.100 + 0.150) \times 35$$

$$= 233.90 - 8.75 = 225.15 \ \rightarrow\ 225 \text{〔V〕} \quad \cdots\cdots ⑤$$

b．回転速度

定格電圧を供給したときの電機子誘導起電力 E_a は

$$E_a = V_d - R_a I_a$$ より

$$E_a = 250 - 0.1 \times 40 = 246 \text{〔V〕} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \text{⑥}$$

電機子誘導起電力と回転速度の間には，$E_a = k\Phi n$ のように比例関係にある。

$$\frac{225.15\text{〔V〕}}{246\text{〔V〕}} = \frac{n}{1\,200\text{〔min}^{-1}\text{〕}}$$ より

$$n = \frac{225.15}{246} \times 1\,200 = 1\,098.2 \rightarrow 1\,098\text{〔min}^{-1}\text{〕} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots \text{⑦}$$

c．電動機出力

$$P = E_a I_a$$ より

$$P = 225.15 \times 35 = 7\,880.2\text{〔W〕} \rightarrow 7.88\text{〔kW〕} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots \text{⑧}$$

d．発生トルク

$$T = \frac{P}{\omega}, \quad \omega = 2\pi \frac{n}{60}$$ より

$$T = \frac{P}{2\pi \frac{n}{60}} = \frac{7\,880.2}{2\pi \times \frac{1\,098.2}{60}} = 68.521 \rightarrow 68.5\text{〔N·m〕} \quad \cdots\cdots\cdots \text{⑨}$$

〔問４の標準解答〕

（1）

$D(s)=0$ の時の閉ループ伝達関数

$$G_1(s)=\frac{C(s)}{R(s)}=\frac{\dfrac{K}{s(Ts+1)}}{1+\dfrac{K}{s(Ts+1)}}=\frac{\dfrac{K}{T}}{s^2+\dfrac{s}{T}+\dfrac{K}{T}} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots ①$$

$R(s)=0$ の時の閉ループ伝達関数

$$G_2(s)=\frac{C(s)}{D(s)}=\frac{\dfrac{1}{s(Ts+1)}}{1+\dfrac{K}{s(Ts+1)}}=\frac{\dfrac{1}{T}}{s^2+\dfrac{s}{T}+\dfrac{K}{T}} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots ②$$

重ね合わせの理により，制御量は①及び②式より，次のように求められる。

$$C(s)=G_1(s)R(s)+G_2(s)D(s)$$
$$=\left[\frac{\dfrac{K}{T}}{s^2+\dfrac{s}{T}+\dfrac{K}{T}}\right]R(s)+\left[\frac{\dfrac{1}{T}}{s^2+\dfrac{s}{T}+\dfrac{K}{T}}\right]D(s) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots ③$$

（2）

$E(s)=R(s)-C(s)$ より，偏差は

$$E(s)=R(s)-C(s)=R(s)-[G_1(s)R(s)+G_2(s)D(s)]$$
$$=\left[\frac{s^2+\dfrac{s}{T}}{s^2+\dfrac{s}{T}+\dfrac{K}{T}}\right]R(s)+\left[\frac{-\dfrac{1}{T}}{s^2+\dfrac{s}{T}+\dfrac{K}{T}}\right]D(s) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots ④$$

（3）

④式で $R(s)=0$ とおき，単位ステップ状外乱 $D(s)=1/s$ に対する定常偏差は，最終値の定理より

$$e_D=\lim_{s\to 0} sE(s)=\lim_{s\to 0} s\left[\frac{-\dfrac{1}{T}}{s^2+\dfrac{s}{T}+\dfrac{K}{T}}\right]\frac{1}{s}=\frac{-1}{K} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots ⑤$$

(4)

④式で $D(s)=0$ とおき，単位ステップ状目標値変化 $R(s)=1/s$ に対する定常偏差は，最終値の定理より

$$e_R=\lim_{s\to 0} sE(s)=\lim_{s\to 0} s\left[\frac{s^2+\dfrac{s}{T}}{s^2+\dfrac{s}{T}+\dfrac{K}{T}}\right]\frac{1}{s}=0 \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \text{⑥}$$

(5)

①式より，2 次遅れ要素の標準形式で表した閉ループ伝達関数の各係数を等しいとおくと，

$$G_1(s)=\frac{\omega_n^2}{s^2+2\zeta\omega_n s+\omega_n^2}=\frac{\dfrac{K}{T}}{s^2+\dfrac{s}{T}+\dfrac{K}{T}} \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \text{⑦}$$

したがって，

$$\left.\begin{aligned}\omega_n&=\sqrt{\frac{K}{T}}\\ \zeta&=\frac{1}{2}\sqrt{\frac{1}{KT}}\end{aligned}\right\} \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \text{⑧}$$