

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) 全河川流量を Y としたとき、

$$\begin{aligned} Y &= \int_0^{100} (30 - 0.2t) dt + \int_{100}^{365} (12 - 0.02t) dt \\ &= \left[30t - 0.1t^2 \right]_0^{100} + \left[12t - 0.01t^2 \right]_{100}^{365} = 3\,947.8 \end{aligned}$$

平均流量を X_a [m^3/s] とすると、 $X_a = Y \div 365 = 3\,947.8 \div 365 = 10.816$

題意より、最大使用水量 $Q_{\max}$ [m^3/s] $= 2X_a = 2 \times 10.816 = 21.632$

$$P_{\max} [\text{kW}] = 9.8Q_{\max}H\eta = 9.8 \times 21.632 \times 40 \times 0.9 = 7\,631.8 \rightarrow 7\,630 \text{ kW} \cdots (\text{答})$$

(2) 最大使用水量は $21.632 \text{ m}^3/\text{s}$ であることから、

最大出力で運転できる期間は①式より、 $21.632 = 30 - 0.2t$ より $t = 41.84$ 日

最大出力は $7\,631.8 \text{ kW}$ であることから、最大出力で連続運転する期間の発電電力量： W_1 とすると、

$$W_1 = 7\,631.8 \times 41.84 \times 24 = 7\,663\,500 \rightarrow 7.66 \times 10^6 \text{ kW} \cdot \text{h} \cdots (\text{答})$$

(3) $Q = 10 \text{ m}^3/\text{s}$ を境に流況が変化することから、河川流量が $10 \text{ m}^3/\text{s}$ となる 100 日を境として 0～100 日と 100～365 日に分けて、発電電力量を考える。

また、③式より $10 \leq Q$ のとき $\eta = 90\%$ であること、並びに最大出力が決まっていることから、 $t \leq 100$ の場合も二つの期間に区切り、最大出力で連続運転する期間の発電電力量： W_1 (小問(2)で算出)と流況曲線から決まる流量で連続運転する期間の発電電力量： W_2 に分けて考える。

$$\begin{aligned}
W_2 &= \int_{41.84}^{100} [9.8 \times (30 - 0.2t) \times 40 \times 0.9] dt \text{ [kW} \cdot \text{日]} \times 24 \text{ [h/日]} \\
&= 352.8 \left[30t - 0.1t^2 \right]_{41.84}^{100} \times 24 \\
&= 352.8 \times (2\,000 - 1\,080.1) \times 24 = 7.789\,0 \times 10^6 \text{ kW} \cdot \text{h}
\end{aligned}$$

次に⑤式より、最低出力が確保される運転日数を求める。

河川流量は $5.0 \text{ m}^3/\text{s}$ より小さい場合は効率が 0 であり、運転不可となる。

②式より、 $5 = 12 - 0.02t$ となり、このときの運転日数は 350 日となる。

ここで、 100 日～ 350 日間の発電電力を P_3 [kW]、発電電力量を W_3 [kW・h] とすると、

$$\begin{aligned}
P_3 &= 9.8 \times (12 - 0.02t) \times 40 \times 0.6 \\
&= 235.2 \times (12 - 0.02t)
\end{aligned}$$

以上により、

$$\begin{aligned}
W_3 &= \int_{100}^{350} 235.2 \times (12 - 0.02t) dt \text{ [kW} \cdot \text{日]} \times 24 \text{ [h/日]} \\
&= 5\,644.8 \times \left[12t - 0.01 \times t^2 \right]_{100}^{350} \\
&= 5\,644.8 \times [(4\,200 - 1\,225) - (1\,200 - 100)] \\
&= 10.584 \times 10^6 \text{ kW} \cdot \text{h}
\end{aligned}$$

$$W_2 + W_3 = 18.373 \times 10^6 \rightarrow 18.4 \times 10^6 \text{ kW} \cdot \text{h} \cdots (\text{答})$$

(4) 全発電電力量は、

$$W = W_1 + W_2 + W_3 = 26.037 \times 10^6 \rightarrow 26.0 \times 10^6 \text{ kW} \cdot \text{h} \cdots (\text{答})$$

設備利用率を A [%] とすると

$$A = \frac{W}{P_{\max} \text{ [kW]} \times 24 \times 365} \times 100 \text{ であるので、}$$

$$A = \frac{26.037 \times 10^6}{7\,631.8 \times 24 \times 365} \times 100 = 38.946 \% \rightarrow 38.9 \% \cdots (\text{答})$$

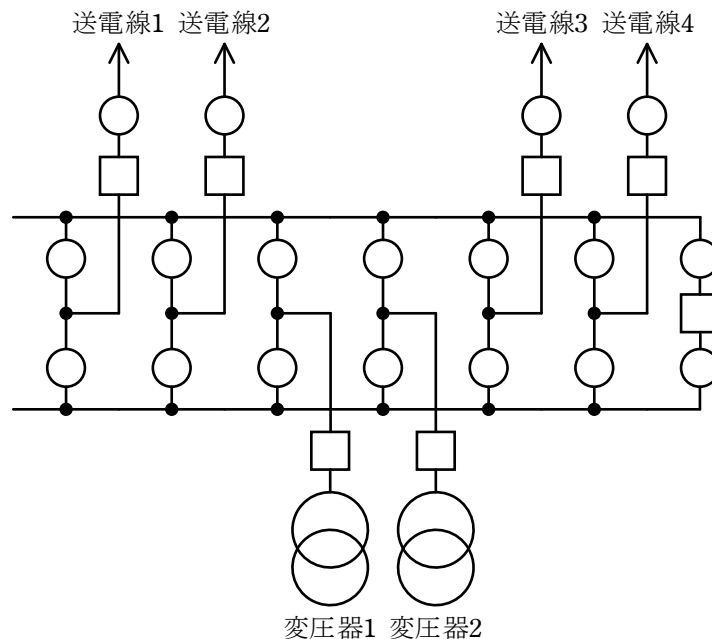
(5) 設備利用率が低いことを踏まえ、kW・h 当たりの建設コストが最も安価になるように最大使用水量の見直しを行う。

〔問2の標準解答〕

(1) 以下の事項から三つ記載されていればよい。

- ① 供給信頼度
- ② 系統運用の柔軟性
- ③ 保守性・安全性
- ④ 経済性

(2) 二重母線1ブスタイ方式の単線結線図は以下のとおり。



(3) 以下の事項から三つ記載されていればよい。

- ①供給信頼度

母線事故時，送電線及び変圧器を健全母線へ切替することで迅速な復旧が可能のため，供給信頼度が高い。

- ②系統運用の柔軟性

甲母線と乙母線を分割した異系統運用が可能のため，系統運用の柔軟性に優れる。

③保守性・安全性

送電線及び変圧器を停止させずに片母線を作業停止可能のため，保守性に優れ，作業安全の確保が容易である。

④経済性

変電所用地及び設備（遮断器，断路器など）が増加するため，コストが増加する。

- (4) 複母線方式で採用される母線保護リレーには，送電線及び変圧器回線の母線側断路器の開閉条件が取り込まれており，例えば甲母線が故障した場合には，甲母線に接続されている遮断器に対してのみ遮断指令が出力される。

〔問 3 の標準解答〕

(1)

誘電体損 : 超高圧以上では、誘電体損が電圧の 2 乗に比例して大きくなるため、問題となる。

シース損 : 三相回路に単相ケーブルを用いると、それぞれに大きなシース損が発生し、三条合わせて用いるとさらに大きくなるため、問題となる。

(2) 電力用ケーブルは、熱的限界からくる許容電流以上に電流を流せないことから、許容送電電力は許容電流によって決まる。許容電流は絶縁体に影響を及ぼさない導体の最高許容温度によって決められ、常時許容電流、短時間許容電流、瞬時許容電流等を考慮して決められる。許容送電電力を増大させる方策は、許容電流を増やすために導体を太くする、条数を増やす、強制冷却(内部冷却、外部冷却、間接冷却)する方法がある。

(3) ある有効送電電力を送ることができる限界のケーブル長(臨界ケーブル長)が存在し、電圧が高くなるにつれて著しく短くなる。

有効送電電力 P 、許容送電電力 S 、無効電力 Q は、許容送電電流 I 、単位長当たりの充電電流 I_C 、ケーブル長を L として、

$$S = \sqrt{3}VI$$

$$Q = \sqrt{3}VI_C L$$

$$P = \sqrt{S^2 - Q^2}$$

である。

66 kV において、

$$Q = \sqrt{3}VI_C L = \sqrt{3} \times V \times \frac{2}{\sqrt{3}} \times \pi \times f \times C \times V \times L$$

$$= 2 \times 3.14 \times 50 \times 0.3 \times 10^{-6} \times (66 \times 10^3)^2 \times L \\ = 0.41034 \times L [\text{Mvar}]$$

$$S = \sqrt{3} \times 66 \times 10^3 \times 700 = 80.021 \text{ MV} \cdot \text{A}$$

$$P = \sqrt{S^2 - Q^2} = \sqrt{80.021^2 - (0.41034 \times L)^2}$$

275 kV において,

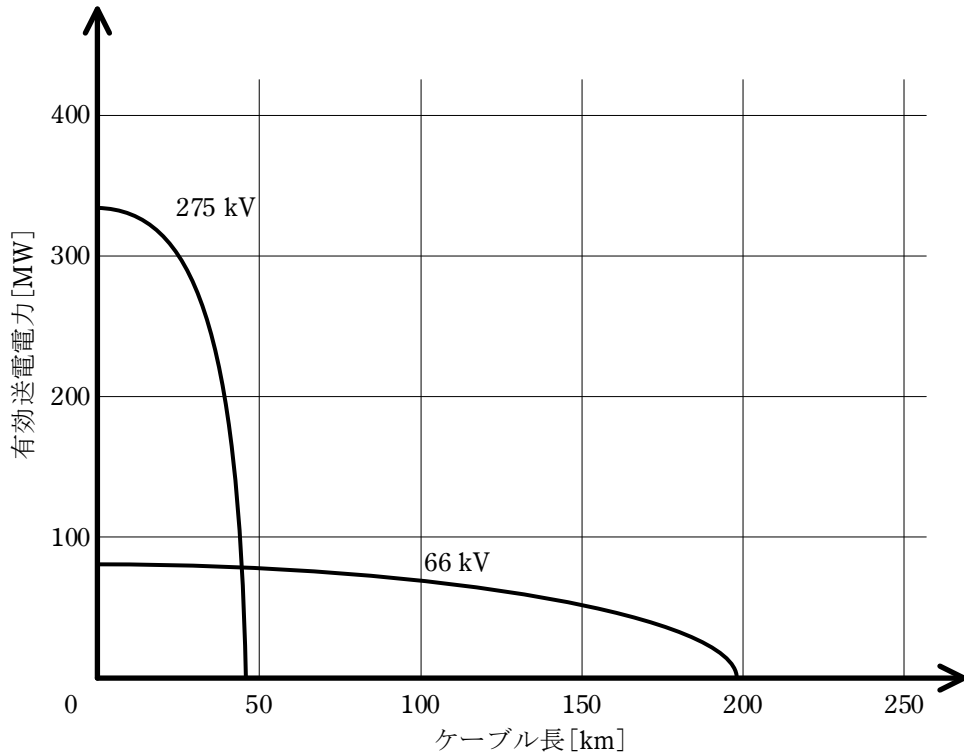
$$\begin{aligned} Q &= \sqrt{3} V I_C L = \sqrt{3} \times V \times \frac{2}{\sqrt{3}} \times \pi \times f \times C \times V \times L \\ &= 2 \times 3.14 \times 50 \times 0.3 \times 10^{-6} \times (275 \times 10^3)^2 \times L \\ &= 7.1239 \times L \text{ [Mvar]} \end{aligned}$$

$$S = \sqrt{3} \times 275 \times 10^3 \times 700 = 333.42 \text{ MV} \cdot \text{A}$$

$$P = \sqrt{S^2 - Q^2} = \sqrt{333.42^2 - (7.1239 \times L)^2}$$

以上から 66 kV での線路の特性は, $L=0$ km における有効送電電力 $P=80.0$ MW, $P=0$ MW における臨界ケーブル長 $L=195$ km の楕円形となる。

同様に, 275 kV での線路の特性は, $L=0$ km における有効送電電力 $P=333$ MW, $P=0$ MW における臨界ケーブル長 $L=46.8$ km の楕円形となる。



〔問 4 の標準解答〕

- (1) 無限大母線に向かう電流 $\dot{I}_2$ は、内部電圧と無限大母線の間の電位差を、直列インピーダンス $j(X_d + X_e)$ で除することで次式により表される。

$$\dot{I}_2 = \frac{Ee^{j\alpha} - V_0e^{-j\beta}}{j(X_d + X_e)}$$

無限大母線の受電電力は、 $P + jQ = V_0e^{-j\beta}\bar{\dot{I}}_2$ より以下のとおり表せる。

$$\begin{cases} P = \frac{EV_0}{X_d + X_e} \sin(\alpha + \beta) \\ Q = \frac{EV_0}{X_d + X_e} \cos(\alpha + \beta) - \frac{V_0^2}{X_d + X_e} \end{cases} \cdots (\text{答})$$

- (2) $\alpha + \beta = \delta$ とおくと、同期発電機の有効電力出力 (損失が無いので小問 (1) で導出した P と同じ) を δ で微分することで、同期化力を次式のとおり導出できる。

$$\frac{dP}{d\delta} = \frac{EV_0}{X_d + X_e} \cos(\alpha + \beta)$$

小じょう乱同期安定性の観点からは、同期化力が正の値若しくは 0 であることが必要なので、 $\alpha + \beta$ が満たすべき条件は次式となる。

$$0 < \alpha + \beta \leq \frac{\pi}{2} \cdots (\text{答})$$

- (3) $\dot{I}_1$ と $\dot{I}_2$ は、それぞれリアクタンス両端の電位差をインピーダンスで除して、次式のとおり表せる。

$$\begin{cases} \dot{I}_1 = \frac{Ee^{j\alpha} - V}{jX_d} \\ \dot{I}_2 = \frac{V - V_0e^{-j\beta}}{jX_e} \end{cases} \cdots (\text{答})$$

三角関数を用いた場合は次式のとおり (e を用いた表現といずれも可)。

$$\begin{cases} \dot{I}_1 = \frac{E \cos \alpha - V + jE \sin \alpha}{jX_d} \\ \dot{I}_2 = \frac{V - V_0 \cos \beta + jV_0 \sin \beta}{jX_e} \end{cases}$$

- (4) 小じょう乱同期安定限界では、小問 (2) より次式が成立する。

$$\alpha + \beta = \frac{\pi}{2}$$

ここで題意より $V=V_0$ とすると、発電機の同期リアクタンスと送電線のリアクタンスを流れる電流 $\dot{I}_1$ と $\dot{I}_2$ は、それぞれ次式のとおり表せる。

$$\begin{cases} \dot{I}_1 = \frac{Ee^{j\alpha} - V_0}{jX_d} \\ \dot{I}_2 = \frac{V_0 - V_0e^{-j\beta}}{jX_e} \end{cases}$$

この両者が等しい条件から次式が成立する。

$$\frac{Ee^{j\alpha} - V_0}{jX_d} = \frac{V_0 - V_0e^{-j\beta}}{jX_e}$$

上式を整理して次式を得る。

$$(X_e E \cos \alpha + X_d V_0 \cos \beta) + j(X_e E \sin \alpha - X_d V_0 \sin \beta) = (X_e + X_d) V_0$$

ここで、 $\alpha + \beta = \frac{\pi}{2}$ より $\cos \beta = \sin \alpha$ 及び $\sin \beta = \cos \alpha$ が成立するため、以下の

とおり展開できる。

$$\begin{aligned} (X_e E \cos \alpha + X_d V_0 \sin \alpha) + j(X_e E \sin \alpha - X_d V_0 \cos \alpha) &= (X_e + X_d) V_0 \\ (X_e E \cos \alpha + X_d V_0 \sin \alpha)^2 + (X_e E \sin \alpha - X_d V_0 \cos \alpha)^2 &= (X_e + X_d)^2 V_0^2 \\ X_e^2 E^2 + X_d^2 V_0^2 &= (X_e + X_d)^2 V_0^2 \end{aligned}$$

$$\text{以上より, } E = \sqrt{1 + \frac{2X_d}{X_e} V_0} \dots (\text{答})$$

(5) 発電機出力は小問(1)より次式で表される。

$$P = \frac{EV_0}{X_d + X_e} \sin(\alpha + \beta)$$

ここで、小じょう乱同期安定限界では $\alpha + \beta = \frac{\pi}{2}$ が成立し、かつ $V=V_0$ では小

問(4)より $E = \sqrt{1 + \frac{2X_d}{X_e} V_0}$ であるため、題意より $X_e = \frac{1}{2} X_d$ とすると、発電機出力は次式のとおり表すことができる。

$$P = \frac{\sqrt{1 + \frac{2X_d}{X_e} V_0} \cdot V_0}{X_d + \frac{1}{2} X_d} = \frac{2\sqrt{5} V_0^2}{3 X_d} \dots (\text{答})$$

〔問 5 の標準解答〕

(1)

分散型電源が連系されていない場合、配電系統を流れる電流は配電用変電所から負荷側に向かい、インピーダンスによる電圧降下のため、末端に行くほど電圧は低下する。しかし配電系統に分散型電源が連系され、その分散電源から配電系統への逆潮流が大幅に増加した場合、配電線の電流の向きが変電所側に向かい、電圧の分布が変化する。変電所側に向かう電流が大きいと、配電線の末端に向けて電圧が上昇し、規定された電圧を逸脱する問題が生じる。

(2)

- ・分散型電源で発生した電力を同一構内で自家消費することにより、配電系統に発生する逆潮流を低減させ、電圧上昇を抑制する。
- ・分散型電源の PCS に進み力率一定制御機能を付加することにより、配電系統における無効電力を適正に保ち、電圧上昇を抑制する。

(3)

- ・配電線の太線化によるインピーダンス低減、配電線新設による系統分割、専用線による連系等により、電圧上昇を抑制する。
- ・配電線の途中に、無効電力を調整する静止形無効電力補償装置(SVC)や、電圧を調整するステップ式自動電圧調整器(SVR)等を施設し、電圧上昇を抑制する。

〔問 6 の標準解答〕

(1) 以下の障害うち、二つが記述されていればよい。

- ・力率改善用コンデンサに過熱や振動・騒音が発生する。焼損に至ることもある。
- ・トランスの損失(鉄損と銅損)が増大する。
- ・電動機の回転が周期的に変動する。振動・騒音が発生し、損失が増大する。
- ・電力量計に計測誤差が発生する。
- ・保護継電器に誤動作、誤不動作が発生する。

- (2) 変圧器容量 $3300 \text{ kV}\cdot\text{A}$ 、2 次側電圧 6.6 kV なので、単位インピーダンスの値は、

$$\frac{6600^2}{3300 \times 1000} = 13.2 \Omega$$

その 10 % は、 1.32Ω である。5 次高調波に対する値は、 $1.32 \times 5 = 6.6 \Omega$ 。

$6.6 \Omega \cdots$ (答)

- (3) CB1 と CB2 のみが閉であるから、 $I_5 = I_{5S}$ 。

したがって、 6.6 kV 母線電圧の 5 次高調波成分の大きさ V_5 は、

$$V_5 = |j6.6 \times I_5| = 6.6 I_5 [\text{V}] \text{ となる。}$$

$6.6 \cdot I_5 [\text{V}] \cdots$ (答)

- (4) CB4 が開であるから、 I_5 は I_{5S} と I_{5R} とに分流する。それぞれの電流の複素表示を $\vec{I}_5$ 、 $\vec{I}_{5S}$ 、 $\vec{I}_{5R}$ とすると、次式が成り立つ。

$$\begin{cases} \vec{I}_5 = \vec{I}_{5S} + \vec{I}_{5R} \\ j6.6 \cdot \vec{I}_{5S} = R \cdot \vec{I}_{5R} \end{cases}$$

この式から $\vec{I}_{5R}$ を消去すると、 I_{5S} が求まる。

$$I_{5S} = |\vec{I}_{5S}| = \frac{R}{\sqrt{R^2 + 6.6^2}} |\vec{I}_5| = \frac{R}{\sqrt{R^2 + 43.56}} I_5 [\text{A}] \cdots \text{(答)}$$

- (5) CB1 が開で、整流器負荷と純抵抗負荷とは発電機から電力供給されているので、次式が成り立つ。 $\vec{V}_5$ は、 6.6 kV 母線相電圧の 5 次調波成分の複素表示であり、 V_5 は、その大きさである。

$$\begin{cases} \vec{I}_5 = \vec{I}_{5R} + \vec{I}_{5G} \\ \vec{V}_5 = R \cdot \vec{I}_{5R} = jX_5 \cdot \vec{I}_{5G} \end{cases}$$

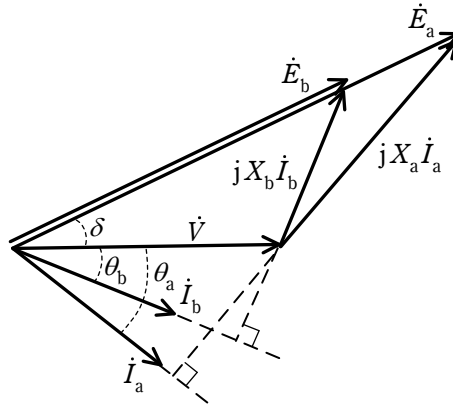
この式から $\vec{I}_{5R}$ と $\vec{I}_{5G}$ とを消去すると、 V_5 が求まる。

$$V_5 = |\vec{V}_5| = \frac{RX_5}{\sqrt{R^2 + X_5^2}} |\vec{I}_5| = \frac{RX_5}{\sqrt{R^2 + X_5^2}} I_5 [\text{V}] \cdots \text{(答)}$$

<機械・制御科目>

[問 1 の標準解答]

(1)



… (答)

(2)

$$P_a = I_a V \cos \theta_a \text{ より, } I_a = \frac{P_a}{V \cos \theta_a} = \frac{0.4}{1 \times 0.8} = 0.5 \rightarrow I_a = 0.5 \text{ p.u.} \quad \dots (\text{答})$$

$$\text{フェーザ図より, } E_a = \sqrt{(V \cos \theta_a)^2 + (V \sin \theta_a + X_a I_a)^2}$$

$$\text{上式に, } V = 1.0, \cos \theta_a = 0.8, \sin \theta_a = 0.6, X_a = 2.0, I_a = 0.5$$

を代入して,

$$E_a = \sqrt{(0.8)^2 + (0.6 + 2.0 \times 0.5)^2} = 1.7889 \text{ p.u.} \rightarrow E_a = 1.79 \text{ p.u.} \quad \dots (\text{答})$$

$$P_a = \frac{V E_a \sin \delta}{X_a} \text{ より, } \sin \delta = \frac{X_a P_a}{V E_a}$$

$$X_a = 2.0, P_a = 0.4 \text{ p.u.}, V = 1.0, E_a = 1.7889 \text{ を代入して,}$$

$$\sin \delta = \frac{2.0 \times 0.4}{1 \times 1.7889} = 0.44720 \rightarrow \sin \delta = 0.447 \quad \dots (\text{答})$$

(3)

$$P_b = \frac{V E_b \sin \delta}{X_b} \text{ より, } E_b = \frac{X_b P_b}{V \sin \delta}$$

$$X_b = 1.5, P_b = 0.4 \text{ p.u.}, V = 1.0, \sin \delta = 0.44720 \text{ を代入して,}$$

$$E_b = \frac{1.5 \times 0.4}{1 \times 0.44720} = 1.3417 \text{ p.u.} \quad \rightarrow \quad E_b = 1.34 \text{ p.u.} \quad \cdots (\text{答})$$

$\dot{E}_b$, $jX_b \dot{I}_b$, $\dot{V}$ の三角形に余弦定理を適用して,

$$(X_b I_b)^2 = E_b^2 + V^2 - 2E_b V \cos \delta \text{ より,}$$

$$\begin{aligned} I_b &= \frac{\sqrt{E_b^2 + V^2 - 2E_b V \cos \delta}}{X_b} \\ &= \frac{\sqrt{1.3417^2 + 1^2 - 2 \times 1.3417 \times 1 \times \sqrt{1 - 0.44720^2}}}{1.5} \\ &= 0.42166 \text{ p.u.} \quad \rightarrow \quad I_b = 0.422 \text{ p.u.} \quad \cdots (\text{答}) \end{aligned}$$

$$P_b = VI_b \cos \theta_b \text{ より, } \cos \theta_b = \frac{P_b}{VI_b}$$

$$\cos \theta_b = \frac{0.4}{1 \times 0.42166} = 0.94863 \quad \rightarrow \quad \cos \theta_b = 0.949 \quad \cdots (\text{答})$$

$$Q_b = VI_b \sin \theta_b \text{ より, } Q_b = 1 \times 0.42166 \times \sqrt{1 - 0.94863^2} = 0.13341 \text{ p.u.}$$

$$\rightarrow Q_b = 0.133 \text{ p.u.} \quad \cdots (\text{答})$$

〔問 2 の標準解答〕

- (1) 三相誘導電動機の星形換算一相分の等価回路の入力電流 I の式は、題意より、

$$I = \frac{V}{\sqrt{3} \sqrt{\left(\frac{r'_2}{s}\right)^2 + x^2}} \quad \dots (\text{答})$$

三相分の機械的出力 P_o の式は、

$$P_o = 3 \cdot \frac{1-s}{s} r'_2 \cdot I^2 = 3 \cdot \frac{1-s}{s} r'_2 \cdot \frac{\frac{V^2}{3}}{\left(\frac{r'_2}{s}\right)^2 + x^2} = \frac{(1-s)V^2}{\frac{r'_2}{s} + \frac{s}{r'_2} x^2} \quad \dots (\text{答})$$

- (2) 発生トルク T の式を、 $P_o = \omega T$ の関係から求める場合、 ω_s を用いて回転角速度 ω の式を表すと、

$$\omega = \omega_s (1-s)$$

よって、 T の式は、

$$T = \frac{P_o}{\omega} = \frac{1}{\omega_s (1-s)} \cdot \frac{(1-s)V^2}{\frac{r'_2}{s} + \frac{s}{r'_2} x^2} = \frac{V^2}{\omega_s} \cdot \frac{1}{\frac{r'_2}{s} + \frac{s}{r'_2} x^2} \quad \dots \quad \text{①}$$

$\dots (\text{答})$

- (3) 始動トルク T_s の式は、①式に始動時の滑り $s=1$ を代入して、

$$T_s = \frac{V^2}{\omega_s} \cdot \frac{1}{\frac{r'_2}{1} + \frac{1}{r'_2} x^2} = \frac{V^2}{\omega_s} \cdot \frac{r'_2}{r'^2_2 + x^2} \quad \dots (\text{答})$$

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

$$\frac{d}{ds} \left[\frac{r'_2}{s} + \frac{s}{r'_2} x^2 \right] = -\frac{r'_2}{s^2} + \frac{x^2}{r'_2} = 0 \quad s^2 = \frac{r'^2_2}{x^2}$$

$s > 0$ より、

$$s = \frac{r_2'}{x} \dots \dots \dots \textcircled{2}$$

のとき①式の分母は最小となり， T は最大となる。

したがって，求める最大トルク T_m の式は，②式を①式に代入して，

$$T_m = \frac{V^2}{\omega_s} \cdot \frac{1}{r_2' \cdot \frac{x}{r_2'} + \frac{r_2'}{x} \cdot \frac{x^2}{r_2'}} = \frac{V^2}{2\omega_s x} \dots (\text{答})$$

(5) 題意から $T_m = 2T_s$ であるため，小問(3)及び小問(4)の解から，

$$\frac{V^2}{2\omega_s x} = 2 \times \frac{V^2}{\omega_s} \cdot \frac{r_2'}{r_2'^2 + x^2}$$

$$r_2'^2 + x^2 = 4xr_2'$$

$$r_2'^2 - 4xr_2' + x^2 = 0$$

上式を r_2' の二次方程式として解くと，

$$r_2' = \frac{4x \pm \sqrt{16x^2 - 4x^2}}{2} = \frac{4x \pm 2\sqrt{3}x}{2} = 2x \pm \sqrt{3}x = (2 \pm \sqrt{3})x$$

また，②式より $r_2' = sx$ であるから，このときの滑りが s_m となるので，

$$s_m = 2 \pm \sqrt{3}$$

ここで， $0 < s_m < 1$ より，

$$s_m = 2 - \sqrt{3} = 0.267\,95 \rightarrow 0.268 \dots (\text{答})$$

〔問 3 の標準解答〕

- (1) 電源の中性点 O を基準としたときの端子 A 及び端子 B の電圧 v_{AO} 、 v_{BO} 、端子 B を基準としたときの端子 A の電圧(出力電圧) v_{AB} は、図 2 のようになる。

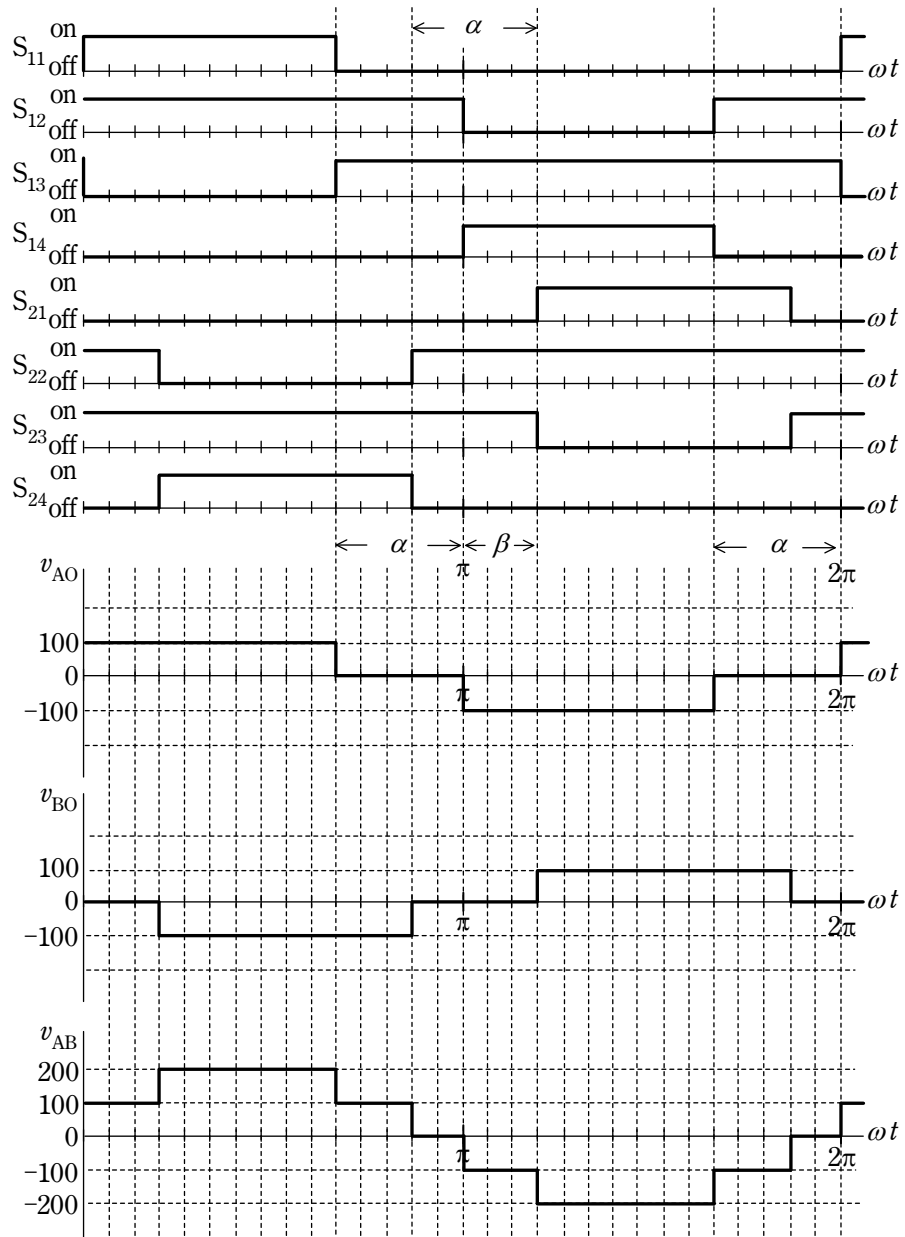


図 2 各スイッチのオンオフ信号に対する電圧波形

(2) 与えられた式で $\alpha = \frac{\pi}{3} \text{ rad}$ とすると、次式が得られる。

$$\frac{400}{(2n-1)\pi} \cos \frac{(2n-1)\pi}{6}$$

この式で、 $n=1, 2, 3$ のときが、基本波成分、第3次調波成分、第5次調波成分の振幅になるため、得られた値を $\sqrt{2}$ で割ることで、電圧 v_{AO} と v_{BO} の基本波成分、第3次調波成分、第5次調波成分を計算すると以下の表が得られる。

	基本波成分	第3次調波成分	第5次調波成分
v_{AO}	78.0 V	0	15.6 V
v_{BO}	78.0 V	0	15.6 V

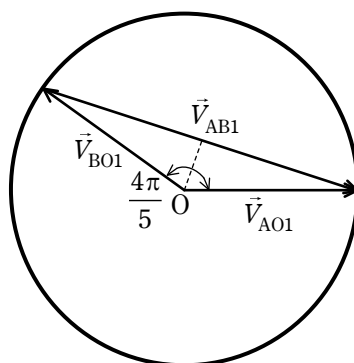
(3) $\alpha = \frac{\pi}{3}$ のとき、小問(2)のとおり v_{AO} 、 v_{BO} の第3次調波成分は0であり、 v_{AB}

は、その差分 ($v_{AO} - v_{BO}$) であることから、第3次調波成分の実効値は0となる。

また、 $\beta = \frac{\pi}{5} \text{ rad}$ の場合、 v_{AO} に対する v_{BO} の基本波の位相は $\left(\pi + \frac{\pi}{5}\right) = \frac{6\pi}{5} \text{ rad}$ 遅

れる。このとき、第5次調波成分の位相差は0となるため、 v_{AB} の第5次調波成分の実効値は0となる。また、基本波成分の実効値は、以下のベクトル図よ

り、 $|V_{AB1}| = 2 \times |V_{AO1}| \sin \frac{2\pi}{5}$ であることから、148 V となる。



〔問 4 の標準解答〕

(1) $G(s) = \frac{3}{s+2} = \frac{1.5}{0.5s+1}$ は、1 次遅れ系の伝達関数であり、時定数を T とおく

と、 $T=0.5$ である。1 次遅れ系のボード線図において、位相が -45° になる角周

波数は、 $\frac{1}{T}$ [rad/s] である。したがって、位相が -45° になる角周波数 ω_0 は、

2rad/s である。 ……(答)

また、角周波数が 14 rad/s のときのゲインは、

$$\begin{aligned} 20\log_{10} \frac{1.5}{|0.5 \cdot j \cdot 14 + 1|} &= 20\log_{10} \frac{1.5}{5\sqrt{2}} = 20 \left(\log_{10} 3 - \log_{10} 10 - \frac{1}{2} \log_{10} 2 \right) \\ &= 20(0.4771 - 1 - 0.5 \cdot 0.3010) = -13.468 \end{aligned}$$

したがって、角周波数が 14 rad/s のときのゲイン g_0 は、 -13.5 dB である。

……(答)

(2) 目標値 $R(s)$ から閉ループ出力 $Y(s)$ までの閉ループ伝達関数 $G_c(s)$ は、制御器の伝達関数を $C(s) = K$ とすると、次のようになる。

$$G_c(s) = \frac{K \cdot \frac{3}{s+2}}{1 + K \cdot \frac{3}{s+2}} = \frac{3K}{s+2+3K} \quad \dots\dots(\text{答})$$

(3) (2) で求められた $G_c(s)$ を 1 次遅れ系の標準形で記述すると、

$$G_c(s) = \frac{3K}{s+2+3K} = \frac{\frac{3K}{2+3K}}{\frac{1}{2+3K}s+1}$$

となる。よって時定数 T は $T = \frac{1}{2+3K}$ と表されるので、位相が -45° になる

角周波数は、 $\omega_1 = \frac{1}{T} = 2+3K$ [rad/s] となる。このときのゲインは、

$$|G_c(j\omega_1)| = \left| \frac{\frac{3K}{2+3K}}{\frac{1}{2+3K}j\omega_1 + 1} \right| = \left| \frac{\frac{3K}{2+3K}}{j+1} \right| = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{3K}{2+3K}$$

となるので、このゲインが、 $\frac{0.9}{\sqrt{2}}$ となるのは、 $\frac{3K}{2+3K}=0.9$ のときである。

よって、これを解くと、 $K=6$ が得られる。

$$K=6 \quad \dots (\text{答})$$

また、 $\omega_1=2+3\cdot 6=20$ rad/s となる。

$$\omega_1=20 \text{ rad/s} \quad \dots (\text{答})$$

(4) $C(s)=\frac{1}{(s+1)^2}$ のとき、一巡伝達関数 $G_a(s)$ は、

$$G_a(s)=\frac{3}{s+2}\frac{1}{(s+1)^2}=\frac{3}{(s+2)(s+1)^2}$$

となる。この $G_a(s)$ の周波数特性を調べるために $s=j\omega$ を代入すると、

$$G_a(j\omega)=\frac{3}{(j\omega+2)(j\omega+1)^2}=\frac{3}{-4\omega^2+2+j(-\omega^3+5\omega)}$$

位相が -180° となる角周波数を ω_2 は、 $G_a(j\omega)$ の虚数部が零になるときである。よって、 $-\omega_2^3+5\omega_2=0$ となる正の角周波数を求めると、

$$-\omega_2^3+5\omega_2=\omega_2(-\omega_2^2+5)=0$$

より、 $\omega_2=\sqrt{5}=2.2361$ rad/s となる。

$$\omega_2=2.24 \text{ rad/s} \quad \dots (\text{答})$$

(5) $\omega_2=\sqrt{5}$ のときの一巡伝達関数 $G_a(s)=\frac{3}{(s+2)(s+1)^2}$ のゲインを求める。

$$\left|G_a(j\omega)\right|_{\omega_2=\sqrt{5}}=\left|\frac{3}{-4\cdot 5+2}\right|=\frac{1}{6}$$

よって、ゲイン余裕は、

$$\begin{aligned} -20\log_{10}\frac{1}{6} &= 20\log_{10}6 = 20(\log_{10}2 + \log_{10}3) \\ &= 20(0.3010 + 0.4771) = 15.562 \end{aligned}$$

となる。ゲイン余裕は、15.6 dB である。 $\dots (\text{答})$