

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) 水車発電機の定格回転速度 n [min^{-1}] は、定格周波数 f [Hz]、極数 p とすれば、

$$n = \frac{120f}{p} \text{ と表される。ここで、} f=60, p=18 \text{ を代入すれば、}$$

$$n = \frac{120 \times 60}{18} = 400 \text{ min}^{-1} \quad \dots \text{ (答)}$$

(2) 負荷遮断時の速度上昇率 δ_n [%] は、最大回転速度を n_{\max} [min^{-1}]、遮断前の回転速度を n_1 [min^{-1}]、定格回転速度を n [min^{-1}] とすると、

$$\delta_n = \frac{n_{\max} - n_1}{n} \times 100 \text{ [%] で表される。}$$

ここで、 $\delta_n=30\%$ 、 $n_1=n=400 \text{ min}^{-1}$ を代入すると、

$$30 = \frac{n_{\max} - 400}{400} \times 100$$

よって最大回転速度 $n_{\max}=520 \text{ min}^{-1}$ \dots (答)

(3) 速度調定率 δ [%] は、任意の出力 P_1 [kW] における回転速度を n_1 、出力変化後の出力 P_2 [kW] における回転速度を n_2 [min^{-1}]、定格時の出力及び回転速度をそれぞれ P_n [kW]、 n_n [min^{-1}] とすると、次式で表される。

$$\delta = \frac{\frac{n_2 - n_1}{P_1 - P_2} \times 100}{\frac{n_n}{P_n}}$$

ここで、無負荷安定時の出力 $P_2=0$, $P_1=P_n=P$, $n_1=n_n=n$ とすると無負荷安定時の回転速度 $n_2[\text{min}^{-1}]$ は,

$$5 = \frac{n_2 - n}{n} \times 100$$

$n=400$ を代入して, $n_2=420 \text{ min}^{-1}$ …… (答)

(4) 理論水力 $11\,000 \text{ kW}$, 水車発電機の総合効率を 86% とすると, 発電機定格出力 $P[\text{kW}]$ は,

$$P = 11000 \times \frac{86}{100} = 9\,460 \text{ kW} \quad \dots \text{ (答)}$$

(5) 発電機の定格電圧を $V_n[\text{kV}]$, 定格電流 $I_n[\text{A}]$, 定格力率 $\cos\theta$ とすれば,

$$P = \sqrt{3} V_n I_n \cos\theta$$

$$P = 9460, \quad I_n = 517, \quad \cos\theta = \frac{96}{100} \text{ を代入すると,}$$

$$9460 = \sqrt{3} \times V_n \times 517 \times 0.96$$

$$V_n \doteq 11.004 \text{ kV} \rightarrow 11.0 \text{ kV} \quad \dots \text{ (答)}$$

(6) 電圧変動率 $\delta_V[\%]$ は, 最大電圧 $V_{\max}[\text{kV}]$, 定格電圧 V_n とすると,

$$\delta_V = \frac{V_{\max} - V_n}{V_n} \times 100$$

$\delta_V=25$, $V_n=11.0$ を代入すると,

$$25 = \frac{V_{\max} - 11.0}{11.0} \times 100$$

よって最大電圧 $V_{\max} \doteq 13.75 \text{ kV} \rightarrow 13.8 \text{ kV} \quad \dots \text{ (答)}$

[問2の標準解答]

(1) 以下の中から四つを解答

①絶縁破壊電圧

酸化や水分量の増加，油中微粒子などにより絶縁油が劣化すると絶縁破壊電圧が低下する。

②全酸価

絶縁油の酸化劣化により有機酸が生成され全酸価が増加すると，絶縁性能が低下する。

③体積抵抗率

絶縁油が劣化するとイオン性の物質が増加し体積抵抗率が減少し，絶縁性能が低下する。

④誘電正接 ($\tan \delta$ でも正解)

絶縁油が劣化するとイオン性の物質を生成するため誘電体損が増加し，絶縁性能が低下する。

⑤水分量(油中水分量でも正解)

絶縁油中の水分量が増加すると絶縁性能が低下する。

(2) 以下の中から二つを解答

①シリコーン油

②合成エステル油

③植物油

(3) 以下の中から一つ解答

①絶縁紙の密度を上げる。

②絶縁紙の含有水分量を減らす。

[問3の標準解答]

(1)

【目的】主保護リレーや遮断器の不良，又は，予想以上の過酷な事故が発生した場合，ブスタイを分離して事故側母線と健全側母線を分離する。これにより，分流を減らし遠端後備保護を確実に動作させ，停電範囲を半減させる。さらに系統に対する事故の影響も軽減できるので，系統の安定性向上に役立つ。

【動作概要】図1の例では，ブスタイ分離リレー動作によりCB9が遠端後備保護で遮断される。なお，CB2は回線2の主保護リレーで遮断されている。この動作により，回線2と回線4は使用不能となるが，回線1と回線3は使用可能である。なお，ブスタイ分離リレーがなければ回線1～4の全てが使用不能となるので，使用不能となる回線数が半減することになる。

(2-a)

【目的】当該事故区間の保護リレーによる遮断が失敗した場合に，事故区間の後方電気所で事故を検出し，後方電気所の遮断器を遮断し，事故の拡大を防止する。

【動作概要】図2の例では，F点の事故において電気所Cで遮断失敗した場合に，後方の電気所Bのリレーが事故を検出し，一定時限後に電気所BのCB3を遮断する。

(2-b) 遮断器故障，VT(PT)，CT，制御電源故障

(2-c) 第1段の保護範囲はリレー設置点から隣接端子(電気所B)までの電氣的距離(線路インピーダンス)の80%程度に整定し，これが動作した場合，主保護リレーと時間協調をとりできる限り高速度でCB1を開放する。

第2段の保護範囲は自区間(リレー設置点から隣接端子までの区間)の120～150%程度に整定し，自区間の第1段保護範囲外となる区間および隣接母線の保護を目的とする。ただし，隣接区間の第1段との協調を必要とするため，限時リレーにより限時動作を行う。

第3段の保護範囲は隣接区間の高速遮断ができなかった事故に対する後備保護を行うもので，隣接送電線の最も長いものの終端までを含めなければならない。この第3段は第2段と時間協調をとり，限時リレーにより限時し，第2段

動作より遅らせる。

[問4の標準解答]

- (1) 故障点抵抗が零で、かつ、故障点までの直列抵抗も零であるから、短絡発生後の発電機出力は零である。発電機の固定子抵抗が零なので電氣的トルクも短絡発生とともにステップ的に零となる。一方、故障発生前は定格出力運転であるため、電氣的トルクは0.9 p.u.である。したがって、短絡時のステップ変化の大きさは、

$$0.9 - 0.0 = 0.9 \text{ p.u.} \quad \dots (\text{答})$$

- (2) 调速機の効果は無視するため、故障中の機械的入力 P_m は故障前から変化しない。故障前は一定速度で運転していたのだから、 P_m は電氣的出力 P_e とバランスしており、その大きさは0.9 p.u.である。一方、故障中の電氣出力は零を保つ。したがって、故障中の発電機の運動方程式は以下のとおりである。

$$M \frac{d\omega}{dt} = P_m - P_e = 0.9$$

条件より $M=7 \text{ s}$ であるから、故障中の発電機加速度は、

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{0.9}{7} = 0.12857 \text{ p.u. sec}^{-1}$$

故障は0.1秒で除去されるので、この間の内部相差角の増大量は、

$$\frac{1}{2} \times 0.12857 \times 0.1^2 \times 2\pi \times 50 \doteq 0.202 \text{ rad} \rightarrow 0.202 \text{ rad} \quad \dots (\text{答})$$

- (3) 故障発生前の直列合成リアクタンスは、発電機が $x'_d = 0.3 \text{ p.u.}$ で表現されていることを考慮すると、

$$0.3 + 0.1 + \frac{0.1}{2} = 0.45 \text{ p.u.} \quad \dots (\text{答})$$

である。発電機の運転状態は定格出力、定格力率運転であるから x'_d 背後電圧 \dot{E}'_d は次図のベクトル図より計算でき、端子電圧基準のフェーザ表現では、

$$1.0 + j0.3 \times (0.9 - j0.4359) = 1.1308 + j0.27 \text{ p.u.}$$

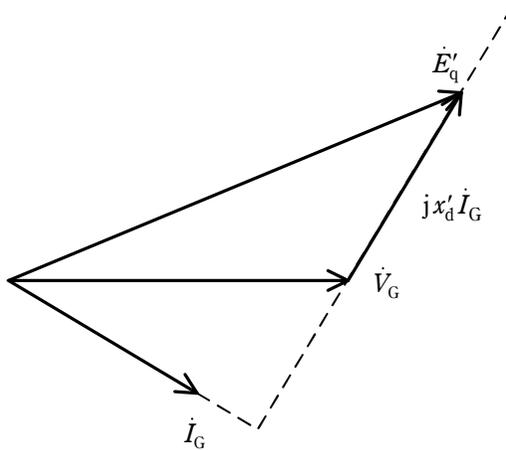


図 発電機の等価回路ベクトル図

よって、その大きさは $E'_q = 1.16 \text{ p.u.}$ … (答)

一方、無限大母線電圧 V_i についても同様にベクトル図で計算すると、 V_G を位相の基準として、

$$1.0 - j0.15 \times (0.9 - j0.4359) = 0.9346 - j0.135 \text{ p.u.}$$

を得る。この大きさは $V_i = 0.944 \text{ p.u.}$ … (答)

次に故障除去後（1回線運用中）の直列リアクタンスは

$$0.3 + 0.1 + 0.1 = 0.5 \text{ p.u.} \quad \dots \text{ (答)}$$

(4) 故障除去直前の電氣的トルクは零であるから、故障除去直後の電氣的トルクがステップ変化の大きさである。故障発生前の発電機出力については、

$$P = 0.9 = \frac{E'_q V_i}{0.45} \sin \delta$$

が成り立つので、

$$\sin \delta = \frac{0.9 \times 0.45}{1.1626 \times 0.9443} = 0.3689$$

加法定理より、

$$\begin{aligned} \sin(\delta + \Delta\delta) &= \sin \delta \cos \Delta\delta + \cos \delta \sin \Delta\delta \\ &= 0.3689 \times 0.979 + 0.9295 \times 0.202 \\ &= 0.5489 \end{aligned}$$

励磁制御を無視して E'_q は故障前の値のまま変わらないとし、故障除去後の発電機出力を計算すると、

$$\begin{aligned} P &= \frac{E'_q V_i}{0.5} \sin(\delta + \Delta\delta) \\ &= \frac{1.1626 \times 0.9443 \times 0.5489}{0.5} \\ &\doteq 1.2052 \rightarrow 1.21 \text{p.u.} \quad \dots(\text{答}) \end{aligned}$$

- (5) 再閉路時に故障点の短絡が解消されていない場合に、再閉路が行われると再び三相短絡が発生し、(1)で求めたような大きな電氣的トルクが再び軸に加わることになる。このため軸は故障発生時に加速方向、故障除去時に減速方向、再閉路(失敗)時に再び加速方向の電氣的トルクの急激な変化にさらされる。この大きな衝撃によって軸にはねじれ振動が発生するが、その減衰は一般に極めて悪く、固有振動数は 10 Hz 程度である。このため、再閉路失敗のタイミングが 0.1 秒程度以下の範囲で僅かに前後するだけで、その瞬間の軸のねじれ振動は様々な状態をとりうる。最悪の場合としては軸がちょうど加速しているところで再閉路失敗の加速方向のステップ変化を受けることも考えられ、この場合には軸は大きく機械的に歪むことになり、材料疲労は過酷となる。

[問 5 の標準解答]

(1)

a $Q = P \tan \theta$ [var]

b $\theta \geq 0$ の場合, $\theta > \omega t > 0$, 及び $\pi + \theta > \omega t > \pi$

$\theta < 0$ の場合, $2\pi > \omega t > 2\pi + \theta$, 及び $\pi > \omega t > \pi + \theta$

(2)

(イ) TCR

Thyristor Controlled Reactor, サイリスタ制御リアクトルでも正解とする。

(ロ) 連続的

リニアでも正解とする。

(ハ) コンデンサ

キャパシタ, 蓄電器でも正解とする。

(ニ) 開閉

入切, オンオフでも正解とする。

(ホ) 突入電流

インラッシュ, インラッシュ電流でも正解とする。

(ヘ) 同期調相機は電圧源として動作するのに対して, 自励式 SVC は電流源として動作する。

[問6の標準解答]

(1) 電力損失の構成と内容

a 発電所所内電力

発電のために使用する動力，照明，電熱などをいう。

火力発電所では，冷却水循環やボイラ給水，送風などのほか，排煙脱硫装置や石炭灰の処理などの動力が必要になる場合もある。

b 送変配電設備の電力損失

送電線路・変電所・配電線路中で消費される銅損や鉄損，その他の電力損失であり，潮流や力率などによって変動する。

電力系統の電力損失では一番大きい。

送配電線の抵抗損(オーム損)がメインで，変圧器では鉄損や銅損が発生する。

超高圧送電線ではコロナ損，地中送電線では誘電体損やシース損がある。

(2) 近年の水力発電所所内比率と送変配電設備の損失率の全国平均実績値

・所内比率 (イ) … (答)

・損失率 (ロ) … (答)

(3) 送変配電設備の電力損失軽減対策

以下から三つ挙げてあれば正解とする。

a 潮流改善

電力系統間をつなぐ連系送配電線路を新設するなどして各電力系統を流れる電力潮流を改善し，電力損失の軽減を図る。

b 過負荷解消

過負荷傾向にある送配電線路に対し新たに送配電線路を新設・増設するなどにより過負荷を解消し，電力損失の軽減を図る。

c 力率改善

遅れ力率で値が悪いと電流が増え電力損失が増加することから，電力コンデンサを設置して遅れの無効電力を打ち消し電力損失の軽減を図る。

d 電圧格上げ

電力損失は電流と抵抗によるものであり，送電線や高圧配電線の格上げ(上位電圧への移行)により電流値を抑え電力損失の軽減を図る。

e 損失軽減機器・機材・構造の採用

低損失変圧器・低損失電線など，高効率・低損失の電力機器・機材・構造を採用し電力損失の軽減を図る。

<機械・制御科目>

[問1の標準解答]

(1)

a. 励磁回路を無視しているので一次側換算の負荷電流 I'_2 は I_1 と等しく、次のようになる。

$$I_1 = I'_2 = \frac{V_1}{\sqrt{\left(r_1 + \frac{r'_2}{s}\right)^2 + (x_1 + x'_2)^2}}$$

これを用いて二次入力 P_2 を求めると次のようになる。

$$P_2 = 3I_2'^2 \cdot \frac{r'_2}{s} = \frac{3V_1^2}{\left(r_1 + \frac{r'_2}{s}\right)^2 + (x_1 + x'_2)^2} \cdot \frac{r'_2}{s}$$

したがって、電動機の実出力 P_0 は次のようになる。

$$P_0 = (1-s)P_2$$

滑り s のときの回転角速度を ω としたときのトルクは次のように表される。

$$T = \frac{P_0}{\omega} = \frac{(1-s)P_2}{(1-s)\omega_s} = \frac{3V_1^2}{\omega_s} \cdot \frac{r'_2}{s\left(r_1 + \frac{r'_2}{s}\right)^2 + s(x_1 + x'_2)^2} \quad \dots\dots\dots ①$$

トルクが最大になる s を求めるために①式の分母を s で微分して零とおくと次のようになる。

$$\frac{d}{ds} \left[s\left(r_1 + \frac{r'_2}{s}\right)^2 + s(x_1 + x'_2)^2 \right] = 0$$

これよりトルクが最大となる滑り s_m は次のようになる。

$$s_m = \frac{r'_2}{\sqrt{r_1^2 + (x_1 + x'_2)^2}} \quad \dots\dots\dots ②$$

...(答)

b. ①式に②式を代入すると、

$$T_{\max} = \frac{3V_1^2}{\omega_s} \cdot \frac{\sqrt{r_1^2 + (x_1 + x'_2)^2}}{\left(r_1 + \sqrt{r_1^2 + (x_1 + x'_2)^2}\right)^2 + (x_1 + x'_2)^2}$$

式を整理すると最大トルクは次のようになる。

$$T_{\max} = \frac{3V_1^2}{2\omega_s \left[r_1 + \sqrt{r_1^2 + (x_1 + x'_2)^2} \right]} \dots\dots\dots \textcircled{3}$$

\dots (答)

(2)

c. ①式を $r_1 = 0$ として表すと,

$$T = \frac{3V_1^2}{\omega_s} \cdot \frac{\frac{r'_2}{s}}{\left(\frac{r'_2}{s}\right)^2 + (x_1 + x'_2)^2} \dots\dots\dots \textcircled{4}$$

③式を $r_1 = 0$ として表すと,

$$T_{\max} = \frac{3V_1^2}{2\omega_s(x_1 + x'_2)} \dots\dots\dots \textcircled{5}$$

④, ⑤式を用いて $\frac{T_{\max}}{T}$ を表すと,

$$\begin{aligned} \frac{T_{\max}}{T} &= \frac{\frac{3V_1^2}{2\omega_s(x_1 + x'_2)}}{\frac{3V_1^2}{\omega_s} \cdot \frac{\frac{r'_2}{s}}{\left(\frac{r'_2}{s}\right)^2 + (x_1 + x'_2)^2}} \\ &= \frac{1}{2} \left[\frac{r'_2}{s(x_1 + x'_2)} + \frac{s(x_1 + x'_2)}{r'_2} \right] \dots\dots\dots \textcircled{6} \end{aligned}$$

②式を $r_1 = 0$ として表すと,

$$s_m = \frac{r'_2}{x_1 + x'_2} \dots\dots\dots \textcircled{7}$$

⑦式を用いて⑥式を表すと次のようになる。

$$\frac{T_{\max}}{T} = \frac{\frac{s_m}{s} + \frac{s}{s_m}}{2} \dots (答)$$

d. ②式を $r_1 = 0$ として表すと,

$$s_m = \frac{r'_2}{x_1 + x_2}$$

与えられた数値を代入すると,

$$s_m = \frac{0.144}{0.356 + 0.356} = 0.20225$$

題意より

$$\frac{T_{\max}}{T} = 2$$

となるので前問 c. で得られた結果を用いると,

$$2 = \frac{\frac{s_m + s}{s} s_m}{2}$$

s_m を代入すると,

$$\frac{4}{0.20225} = \frac{1}{s} + \frac{s}{0.20225^2}$$

これより $s = 0.7548, 0.0542$

定格出力においては $s < s_m$ なので, 求める滑り s は 5.42% となる。…(答)

〔問 2 の標準解答〕

(1) 変圧器の二次定格電流は、

$$I_2 = \frac{S_2}{V_L} = \frac{10 \times 10^3}{200} = 50 \text{ A}$$

したがって、負荷電流を二次電流定格 50 A 以下にする必要がある。これより、抵抗負荷に供給できる電力の最大値は、

$$P_2 = \sqrt{3}V_2I_2 = \sqrt{3} \times 200 \times 50 = 17\,321 \rightarrow 17.3 \text{ kW} \quad \cdots (\text{答})$$

(2) a 相の電圧を位相の基準とすると、変圧器 2 次側の相電圧は、

$$\begin{cases} \dot{V}_a = \frac{200}{\sqrt{3}} \\ \dot{V}_b = \frac{200}{\sqrt{3}} \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) \\ \dot{V}_c = \frac{200}{\sqrt{3}} \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) \end{cases}$$

となり、線間電圧 \dot{V}_{ab} は、

$$\dot{V}_{ab} = \dot{V}_a - \dot{V}_b = \frac{200}{\sqrt{3}} - \frac{200}{\sqrt{3}} \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) = 100\sqrt{3} + j100$$

三相抵抗負荷の電流実効値は、

$$I_L = \frac{P_L}{\sqrt{3}V_L \cos \theta} = \frac{12 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 200 \times \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \right)} = 40 \text{ A}$$

であるので、力率角を考慮すると、a 相の負荷電流は、

$$\dot{I}_{La} = 40(\cos 30^\circ - j \sin 30^\circ) = 40 \left(\frac{\sqrt{3}}{2} - j\frac{1}{2} \right) = 20\sqrt{3} - j20$$

であるので、複素電力は、

$$P_{ab} + jQ_{ab} = \dot{V}_{ab}^* \dot{I}_{La} = (100\sqrt{3} - j100) \times (20\sqrt{3} - j20) = 4\,000 - j4\,000\sqrt{3}$$

変圧器 ab が伝達する有効電力は、 $P_{ab} = 4\,000 \text{ W} \rightarrow 4.0 \text{ kW} \quad \cdots (\text{答})$

一方、変圧器 cb では、

$$\dot{V}_{cb} = \dot{V}_c - \dot{V}_b = \frac{200}{\sqrt{3}} \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) - \frac{200}{\sqrt{3}} \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) = j200$$

$$\dot{I}_{Lc} = 40[\cos(30^\circ + 240^\circ) - j\sin(30^\circ + 240^\circ)] = 40(0 + j) = j40$$

$$P_{cb} + jQ_{cb} = \dot{V}_{cb}^* \dot{I}_{Lc} = -j200 \times j40 = 8000$$

変圧器 cb が伝達する有効電力は、 $P_{cb} = 8000 \text{ W} \rightarrow 8.0 \text{ kW} \quad \dots$ (答)

(3) 負荷抵抗の電流は、そのまま 2 台の変圧器に流れるので、50 A 以下にする必要がある。抵抗負荷に供給できる有効電力の最大値は、

$$P_2 = V_2 I_2 = 200 \times 50 = 10000 \rightarrow 10.0 \text{ kW} \quad \dots$$
(答)

(4) c 相と a 相の線間電圧は、

$$\dot{V}_{ca} = \dot{V}_c - \dot{V}_a = \frac{200}{\sqrt{3}} \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) - \frac{200}{\sqrt{3}} = -100\sqrt{3} + j100$$

まず、図 3 のように抵抗器だけを接続した場合を考えると、

$$\dot{I}_{La} = -\dot{I}_{Lc} = -\frac{\dot{V}_{ca}}{R} = \frac{100\sqrt{3} - j100}{R}$$

である。図 4 のように、コンデンサを接続するとコンデンサの電流は、

$$j\frac{\dot{V}_{ab}}{X_C} = j\frac{100\sqrt{3} + j100}{X_C} = \frac{-100 + j100\sqrt{3}}{X_C}$$

であるので、図 4 の a 相の電流は、

$$\dot{I}_{La} = \frac{100\sqrt{3} - j100}{R} + \frac{-100 + j100\sqrt{3}}{X_C} = 100 \left(\frac{\sqrt{3} - j}{R} + \frac{-1 + j\sqrt{3}}{X_C} \right)$$

各変圧器の複素電力は、

$$\begin{aligned} P_{ab} + jQ_{ab} &= \dot{V}_{ab}^* \dot{I}_{La} = (100\sqrt{3} + j100)^* \times 100 \left(\frac{\sqrt{3} - j}{R} + \frac{-1 + j\sqrt{3}}{X_C} \right) \\ &= 10000(\sqrt{3} - j) \left(\frac{\sqrt{3} - j}{R} + \frac{-1 + j\sqrt{3}}{X_C} \right) = 10000 \left(\frac{2 - j2\sqrt{3}}{R} + \frac{j4}{X_C} \right) \end{aligned}$$

ここで、変圧器 ab の電圧と電流を同相とするには、 $Q_{ab} = 0$ とすればよいので、

$$\frac{-2\sqrt{3}}{R} + \frac{4}{X_C} = 0$$

$$\frac{X_C}{R} = \frac{2}{\sqrt{3}} \quad \dots (\text{答})$$

同様に、図4のインダクタ電流は、

$$\frac{\dot{V}_{cb}}{jX_L} = -\frac{j200}{jX_L} = \frac{-200}{X_L}$$

であるので、図4のc相の電流及び変圧器cbの複素電力は、

$$\dot{I}_{Lc} = -\frac{100\sqrt{3} - j100}{R} - \frac{-200}{X_L} = 100 \left(\frac{-\sqrt{3} + j}{R} + \frac{2}{X_L} \right)$$

$$P_{cb} + jQ_{cb} = \dot{V}_{cb}^* \dot{I}_{Lc} = (j200)^* \times 100 \left(\frac{-\sqrt{3} + j}{R} + \frac{2}{X_L} \right)$$

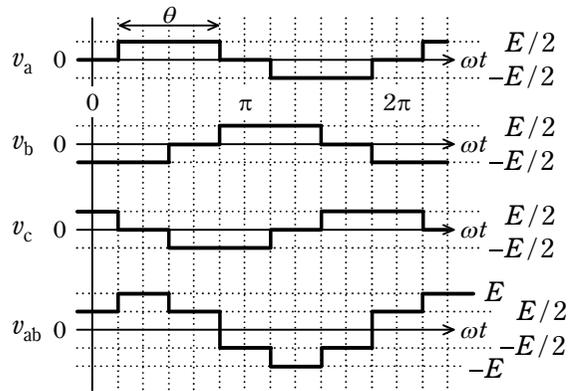
$$= 20\,000(-j) \left(\frac{-\sqrt{3} + j}{R} + \frac{2}{X_L} \right) = 20\,000 \left(\frac{1 + j\sqrt{3}}{R} + \frac{-j2}{X_L} \right)$$

したがって、 Q_{cb} を零とする X_L と R の比は次式となる。

$$\frac{X_L}{R} = \frac{2}{\sqrt{3}} \quad \dots (\text{答})$$

[問3の標準解答]

- (1) 図2のa相電圧 v_a の波形を基準にすると、b相電圧 v_b 、c相電圧 v_c 、線間電圧 v_{ab} のそれぞれの波形は次図となる。



b相電圧 v_b 、c相電圧 v_c はa相電圧 v_a に対してそれぞれ 120° 、 240° 位相が遅れた3レベルの電圧波形であり、線間電圧 v_{ab} は最大5レベル(この場合は4レベル)の電圧波形である。

- (2) フーリエ級数展開の式に $\theta = \frac{2\pi}{3}$ 、 $n=1$ を代入すると、a相電圧の基本波の波高値 v_{alp} が計算できる。

$$v_{alp} = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{E}{2} \cdot \frac{(-1)^{1-1}}{1} \sin \frac{1 \times \frac{2\pi}{3}}{2} = \frac{2}{\pi} E \cdot \sin \frac{\pi}{3} = \frac{\sqrt{3}}{\pi} E$$

したがって、線間電圧 v_{ab} の実効値 V_{ab} は、次式となる。

$$V_{ab} = \sqrt{3} \times \frac{v_{alp}}{\sqrt{2}} = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} \cdot \frac{\sqrt{3}}{\pi} E \doteq 0.675 \ 24E \rightarrow 0.675E \quad \dots(\text{答})$$

- (3) PWM 制御期間①において、オンのゲート信号を与えているデバイスは Q_2 、オフのゲート信号を与えているデバイスは Q_4 、交互にスイッチングするゲート信号を与えているデバイスは Q_1 と Q_3 である。

一方で、流れる電流 i_a' によって導通するデバイスは、 $i_a' > 0$ のときには、デバイス Q_3 に電流が流れないので、オンしているデバイスは Q_2 、交互にスイッチン

グするデバイスは Q_1 と D_5 , オフしているデバイスは Q_3 と Q_4 となる。

また, $i_a < 0$ のときには, デバイス Q_1 と Q_2 に電流が流れないので, 交互にスイッチングするデバイスは Q_3 と $D_1 \cdot D_2$, オフしているデバイスは Q_1, Q_2, Q_4 となる。

以上より, 題意でまとめると, オンしているデバイスは Q_2 (電流の方向によってはオフ), オフしているデバイスは Q_4 , 交互にスイッチングするデバイスは Q_1 と Q_3 (電流の方向によってはいずれかがオフ) となる。

(4) 電流経路は, a 端子 $\rightarrow Q_3 \rightarrow D_6 \rightarrow O$ 端子である。したがって, デバイス A は Q_3 , デバイス B は D_6 である。

(5) D_5 が導通すると, Q_1 と Q_2 との接続点の電位は, P の電位に対して $-\frac{E}{2}$ となる。

D_6 が導通すると, Q_3 と Q_4 との接続点の電位は, N の電位に対して $+\frac{E}{2}$ となる。

したがって, Q_1 及び Q_4 にかかる電圧を $\frac{E}{2}$ に抑えることによって, 結果的に

$Q_1 \sim Q_4$ の内, オフしている 2 つのデバイスにかかる電圧が均等の $\frac{E}{2}$ になる運転をしている。

[問4の標準解答]

(1) 実軸上の根軌跡の区間は、極 0, -1, -2 で区切られる区間のうち、右から奇数番目であるから、 $[-1, 0]$, $(-\infty, -2]$ となる。

(2) σ_c と θ は以下のように計算される。

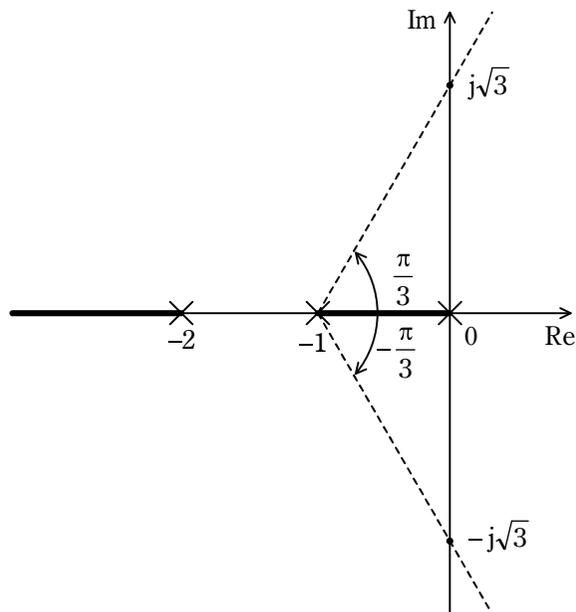
$$\sigma_c = \frac{1}{3}(0-1-2) = -1$$

$$\theta = \pm \frac{\pi}{3}, \pm \pi, \pm \frac{5\pi}{3}, \pm \frac{7\pi}{3}, \pm 3\pi, \dots$$

(3) 特性根は 0, -1, -2 を出発し、 $K = +\infty$ で三つ全て発散する。漸近線は三本あり、実軸との交点は-1、漸近線の角度は $\pm \frac{\pi}{3}$, π である。ただし、角度 π のときは実軸上の軌跡となる。

まず、0と-1とを出発した二つの特性根は、互いに引き合うように実軸上を移動して0と-1との間で重根となる。その後、分岐して、共役複素根となって $\pm \frac{\pi}{3}$ の角度の二本の漸近線にそれぞれ近づく。一方、-2を出発した残り一つの特性根は、実根のまま実軸上を左へ移動して $K = +\infty$ で $-\infty$ となる。すなわち、-2より左側の実軸も根軌跡である。

これまでに得た結果をまとめると次の図となる。ここで、×印は極、太実線は根軌跡、破線は漸近線をそれぞれ表す。



(4) 分岐点を計算する。

$$\frac{1}{s-0} + \frac{1}{s+1} + \frac{1}{s+2} = 0$$

分母を払うと、

$$3s^2 + 6s + 2 = 0$$

を得る。上の方程式の解は、 $s = -0.42265, -1.5774$ である。分岐点は実軸上の 0 と -1 との間に存在するので、分岐点は、

$$s = -0.42265 \rightarrow -0.423 \quad \cdots (\text{答})$$

である。

特性方程式

$$1 + \frac{K}{s(s+1)(s+2)} = 0$$

の解が $s = -0.42265$ となる K の値は、

$$K = -s(s+1)(s+2)|_{s=-0.42265} = 0.38490 \rightarrow 0.385 \quad \cdots (\text{答})$$

と求められる。

(5) 閉ループ制御系の特性方程式は、

$$s^3 + 3s^2 + 2s + K = 0$$

であるから、ラウス表は次のようになる。

$$\begin{array}{l} s^3 \text{行} \quad 1 \quad 2 \\ s^2 \text{行} \quad 3 \quad K \\ s^1 \text{行} \quad \frac{6-K}{3} \quad 0 \\ s^0 \text{行} \quad K \end{array}$$

最左端の列に注目すると、安定限界となるのは、 $K=0, 6$ のときである。 $K=0$ は根軌跡の三つの出発点のうち $s=0$ が安定限界であることを指している。虚軸と交わるのは、 $K=6$ のときである。

(6) $K=6$ のときの s の値は，ラウス表の s^2 行から構成される次の補助方程式で求めることができる。

$$3s^2 + 6 = 0$$

これを解いて， $s = \pm j\sqrt{2}$ を得る。

(7) 図のようになる。

