

●平成25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) [原理]

汽水ドラムを有し、高温ガスから熱を吸収した水管内の汽水混合体と、火炉外部に設置された降水管内の水の密度差から生じる循環力を利用してボイラ水を循環させながら蒸気を得るボイラ。

[適用範囲]

自然循環ボイラは臨界圧力より低い亜臨界圧での適用となる。

[理由]

水管内の汽水混合体と降水管内の水の密度差は圧力が高くなると減少するため、蒸気圧力を高くするほど密度差のみで十分な循環力を得ることは難しくなる。このため、自然循環式の高圧大形ボイラにおいては、ボイラ高さを高くするとともに循環経路をできるだけ直管で構成し、水管径を比較的太くして管内抵抗を減少させることで循環力を確保する必要がある。更に、臨界圧力(22.06 [MPa])以上の圧力では水と蒸気の区別がなくなり、密度差もほとんどなくなることから循環させながら蒸気を得ることはできない。

(2) ボイラ給水ポンプで供給される給水は煙道ガスの余熱を利用した節炭器で加熱され汽水ドラムに入る。水は火炉外部に設置された降水管によりボイラ下部に導かれて火炉内の水管(水冷壁)で燃焼ガスと熱交換し、水と蒸気の混合物になって汽水ドラムに戻る。汽水ドラムでは水と飽和蒸気を分離し、過熱器で飽和蒸気を過熱し蒸気タービンに供給する。分離された水は飽和蒸気になるまで循環する。

(3) 自然循環ボイラは貫流ボイラと比較して、

- ・構造が非常に単純なボイラ

- ・ボイラ制御が容易
- ・起動バイパス系統が不要
- ・ドラムでの給水処理（薬品注入やブロー）が可能のため，復水脱塩装置などの高度な水質管理対策が不要
- ・保有水量が多いのでボイラが万一消火しても各種パラメータに注意すれば若干の時間は低負荷による運転継続が可能
- ・保有水量が多いので負荷の急変などの変動に強い
- ・使用圧力が比較的 low，汽水の循環も自然対流によるので配管の圧力損失分の給水ポンプ動力が少なくすむ

[問2の標準解答]

- (1) C_m 並びに C_o を含めた等価回路は図のようになる。したがって、三導体に三相平衡電圧 V_1 [V] を加えた際の条件より、このときの実効的なインピーダンス Z_1 [Ω] については

$$Z_1 = \frac{V_1}{\sqrt{3}I_1} = \frac{1}{2\pi f(C_o + 3C_m)} \quad \dots \quad \text{①}$$

と表すことができる。また、三導体を接続して電圧 V_2 [V] を加えた際の条件より、このときの実効的なインピーダンス Z_2 [Ω] については

$$Z_2 = \frac{V_2}{I_2} = \frac{1}{2\pi f C_o} \quad \dots \dots \dots \quad \text{②}$$

と表すことができる。

②式より

$$C_o = \frac{I_2}{2\pi f V_2} \quad \dots \text{(答)}$$

また、①式より

$$C_o + 3C_m = \frac{\sqrt{3}I_1}{2\pi f V_1}$$

であるから、

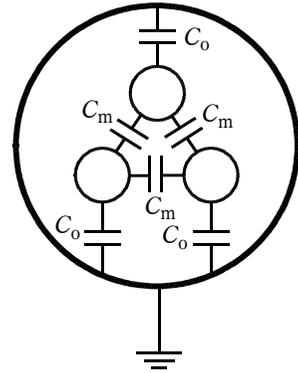
$$C_m = \frac{1}{6\pi f} \left(\frac{\sqrt{3}I_1}{V_1} - \frac{I_2}{V_2} \right) \quad \dots \text{(答)}$$

- (2) 図3のように接続すると実効的なインピーダンス Z_3 [Ω] は周波数の違いも考慮して次のようになる。

$$Z_3 = \frac{1}{10\pi f(2C_m + 2C_o)} = \frac{1}{20\pi f(C_m + C_o)}$$

よって流れる電流 I_3 [A] については次のように計算される。

$$I_3 = \frac{V_3}{Z_3} = 20\pi f(C_m + C_o)V_3 = \frac{10}{3} \left(\frac{\sqrt{3}I_1}{V_1} + \frac{2I_2}{V_2} \right) V_3 \quad \dots \text{(答)}$$



[問3の標準解答]

- (1) 配電線の地絡故障時には、地絡電流が配電用変電所側と発電機側との両方から地絡故障点へ供給されるが、高圧配電系統は非接地系統であり、同期発電機からの地絡電流は極めて小さいことから、地絡過電圧リレー(OVGR)を用いて地絡電圧を検出し保護する。
- (2) 配電線の短絡故障時には、短絡電流が配電用変電所側と発電機側との両方から短絡故障点へ供給されるが、同期発電機からの短絡電流が比較的小さいため過電流リレー(OCR)の整定感度では検出できない場合があり、逆にOCRの感度を高くすると負荷電流などにより誤作動の原因となる。このため、同期発電機の場合は電流の方向も判断材料となる短絡方向リレー(DSR)を用いて保護する。
- (3) 地絡過電圧リレー(OVGR)と短絡方向リレー(DSR)は連系する配電線以外の配電線事故で動作しないようにする必要がある。そのため、事故配電線の遮断後に地絡過電圧リレー(OVGR)と短絡方向リレー(DSR)が動作するように時限協調を図る必要がある。

[問4の標準解答]

(1) $P = \frac{EV}{X} \sin \delta$, $Q = \frac{EV}{X} \cos \delta - \frac{V^2}{X}$ …(答)

(2) (1)と $\cos^2 \delta + \sin^2 \delta = 1$ より

$$P^2 + \left(Q + \frac{V^2}{X} \right)^2 = \frac{E^2 V^2}{X^2} \dots\dots\dots \textcircled{1} \dots(\text{答})$$

(3) $y = \frac{1}{X}$, $I = \frac{E}{X}$ とし, V について整理すると

$$y^2 V^4 + (2yQ - I^2)V^2 + (P^2 + Q^2) = 0 \dots\dots\dots \textcircled{2}$$

②式で V^2 が実数解をもつための条件は

$$(2yQ - I^2)^2 - 4y^2(P^2 + Q^2) \geq 0 \dots\dots\dots \textcircled{3}$$

電圧安定限界は等号が成立するときである。

与えられた数値より, $y = 5$, $I^2 = 25$, これを代入して整理すると

$$P^2 + 5Q - \frac{25}{4} = 0 \text{ (電圧安定限界の条件)} \dots\dots\dots \textcircled{4}$$

力率1より $Q = 0$,

$$P^2 = \frac{25}{4} \rightarrow P = \pm \frac{5}{2}, \text{ 題意より, } P = \frac{5}{2} = 2.50 \text{ [p.u.]} \dots(\text{答})$$

(4) 力率 $\cos \phi = 0.9$ (進み)より

$$Q = \frac{-P}{0.9} \sin \phi = \frac{-\sqrt{1-0.9^2}}{0.9} P \doteq -0.4843P$$

これを④式に代入

$$P^2 - 2.422P - 6.25 = 0$$

限界は

$$P = 1.211 \pm \sqrt{1.211^2 + 6.25} = 1.211 \pm 2.778 = 3.989, -1.567$$

題意より $P = 3.99$ [p.u.] …(答)

(5) ②式で $E = V = 1.0$ とすると

$$25 + (10Q - 25) + P^2 + Q^2 = 0 \dots\dots\dots \textcircled{5}$$

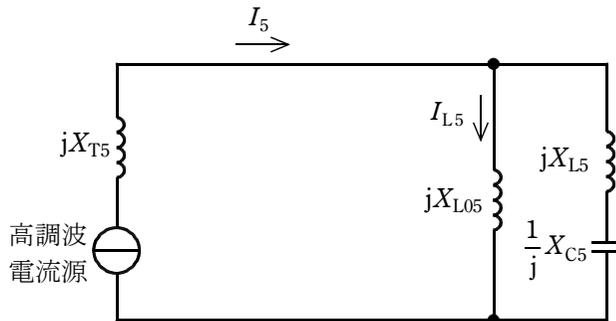
④式と⑤式を満足する解を求める。④式を⑤式に代入すると

$$Q^2 + 5Q + \frac{25}{4} = 0 \quad Q = -\frac{5}{2} \text{ (重根)}$$

$$\textcircled{4} \text{より } P^2 = -5 \cdot \left(-\frac{5}{2} \right) + \frac{25}{4} = \frac{75}{4} \quad P = \pm 4.33 \rightarrow P = 4.33 \text{ [p.u.]} \dots(\text{答})$$

[問5の標準解答]

- (1) ① 配電系に流出する高調波電流を抑制し，配電系の電圧ひずみ率の上昇を抑える。
 ② 含有率の多い低次の高調波電流（第5調波等）による，コンデンサの過負荷を抑制する。
 ③ 進相コンデンサの投入時の突入電流を抑制する。
 ④ 進相コンデンサの開放時に，再点弧を発生した場合，そのサージ電圧を抑制する。
- (2)



第5調波に対する等価回路図

題意より $X_L = 0.06 \times X_C$ となり

第5調波に対する各部のリアクタンスは，

$$X_{L5} = 5X_L = 5 \times 0.06 \times 30.0 = 9 \text{ [p.u.]}$$

$$X_{C5} = \frac{X_C}{5} = \frac{30.0}{5} = 6 \text{ [p.u.]}$$

$$X_{L05} = 5X_{L0} = 5 \times 0.2 = 1 \text{ [p.u.]}$$

となる。よって，

$$\begin{aligned} I_{L5} &= \frac{jX_{L5} + \frac{1}{j}X_{C5}}{jX_{L05} + \left(jX_{L5} + \frac{1}{j}X_{C5} \right)} \times I_5 \\ &= \frac{j(9-6)}{j(1+9-6)} \times 10 \\ &= \frac{3}{4} \times 10 \\ &= 7.50 \text{ [A]} \quad \dots \text{ (答)} \end{aligned}$$

(3) 題意より X_L がない場合は, (2)において, $X_{L5}=0$ となるので

$$\begin{aligned} I_{L5}' &= \frac{\frac{1}{j} X_{C5}}{jX_{L05} + \frac{1}{j} X_{C5}} \times I_5 \\ &= \frac{j(-6)}{j(1-6)} \times 10 \\ &= \frac{6}{5} \times 10 \\ &= 12.0[\text{A}] \end{aligned}$$

よって,

$$\left(\frac{I_{L5}'}{I_{L5}} \right) \times 100 = \frac{12.0}{7.50} \times 100 = 160 [\%] \dots (\text{答})$$

[問6の標準解答]

(1) [年負荷率向上のメリット]

- ・燃料費の安い電源をベース電源として活用することによるコスト低減
- ・ピークカットの場合は，電力設備投資の低減と設備利用率の向上

[年負荷率改善の理由]

地域の負荷特性の違いから，ピークの発生する時期が異なり，合成最大電力が抑制されるため。

(2) [揚水式発電所の特長]

夜間や休日など燃料費の安い時間帯に揚水して水を上池に汲み上げ，昼間の火力燃料費の高い時間帯に発電する。夜間に揚水することで高効率の大容量火力などのベース電源を高出力で運転し，昼間に発電して低効率火力の運転を抑制又は回避でき全体としての燃料費が節約できる。また，供給力が不足した場合，数分で全負荷運転が可能な電源であり発電調整力が高く，ピーク電源として活用できる。

[可変速揚水発電方式を採用する理由]

- ・揚水時の周波数調整（出力調整）が可能
- ・発電運転時の効率向上
- ・電力動揺の抑制
- ・運転可能落差の拡大

(3) 電力用蓄電池の効果

- ・非常用電源としての活用
- ・瞬時電圧低下対策
- ・電気料金の安い夜間電力の活用
- ・契約電力を下げることによるコスト削減
- ・ピークカットによる電気設備の軽減

<機械・制御科目>

[問1の標準解答]

(1) 鳳・テブナンの定理を用いると、図1のA、Bから左側の部分を図2の回路で表すことができる。

a. 同期速度で回転しているので滑り $s = 0$ であるから、 $\frac{r_2}{s} = \infty$ となる。 $\frac{r_2}{s}$ には電流が流れないので、 \dot{V}_t は jx_M の両端の電圧である。したがって、

$$\dot{V}_t = \frac{jx_M}{r_1 + j(x_1 + x_M)} V = \frac{j20}{0.2 + j20.5} \frac{400}{\sqrt{3}} = 225.29 + j2.1979 \text{ [V]}$$

となり、その大きさは

$$V_t = 225.30 \rightarrow 225 \text{ [V]} \quad \dots \text{ (答)}$$

となる。

b. $R + jX$ は

$$R + jX = jx_2 + \frac{jx_M(r_1 + jx_1)}{r_1 + j(x_1 + x_M)} = 0.19035 + j0.68966 \\ \rightarrow 0.190 + j0.690 \text{ [\Omega]} \quad \dots \text{ (答)}$$

となる。

(2) 始動時に二次回路に流れる電流 I_2 は滑り $s = 1$ としたときに $\frac{r_2}{s}$ を流れる電流であるから、鳳・テブナンの等価回路から、

$$\dot{I}_2 = \frac{V_t}{R + r_2 + jX} = \frac{225.30}{0.19035 + 0.1 + j0.68966} \\ = 116.82 - j277.50 \text{ [A]}$$

となり、その大きさは

$$I_2 = 301.08 \rightarrow 301 \text{ [A]} \quad \dots \text{ (答)}$$

同期速度は ω_0 、極対数を p 、周波数を f とすれば

$$\omega_0 = 2\pi \frac{f}{p} = 2\pi \frac{60}{2} = 188.50 \text{ [rad/s]}$$

であるから、始動トルクは

$$T_s = 3 \times \frac{r_2 I_2^2}{\omega_0} = 3 \times \frac{0.1 \times 301.08^2}{188.50} = 144.27 \rightarrow 144 \text{ [N}\cdot\text{m]} \quad \dots \text{ (答)}$$

[問2の標準解答]

(1) $V_{1ab} : V_{2ab} = 2 : 1$ であるので, $V_{2ab} = \frac{1}{2}V_{1ab} = \frac{1}{2} \times 400 = 200$ [V] ... (答)

(2) $I_{1a} : I_{2a} = 1 : 2$ であるので, $I_{2a} = \frac{2}{1}I_{1a} = 2 \times 50 = 100$ [A] ... (答)

(3) 一次漏れリアクタンス x_1 を二次側換算すると

$$x_1 \left(\frac{1}{2} \right)^2 = 0.32 \times \frac{1}{4} = \frac{0.32}{4} = 0.08 \text{ } [\Omega]$$

一次漏れリアクタンスの二次側換算値と二次漏れリアクタンスの和は,

$$0.08 + 0.12 = 0.20 \text{ } [\Omega] \quad \dots \text{ (答)}$$

(4) 漏れリアクタンスに誘起する電圧の大きさは, $0.20 \times 100 = 20$ [V]

下図のように変圧器の二次電圧のフェーザは,

$$\dot{V}_{2ab} = 100\sqrt{3} + j(100 - 20) = 100\sqrt{3} + j80$$

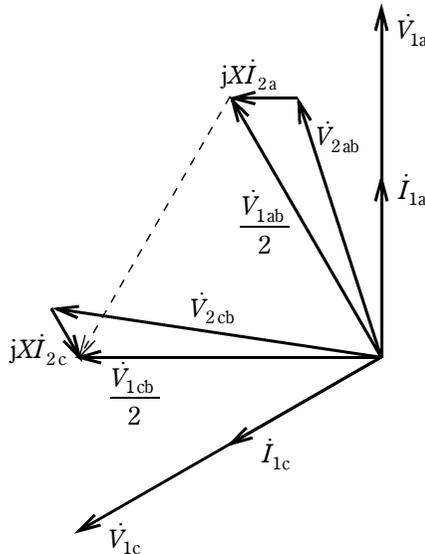
$$\dot{V}_{2cb} = 10\sqrt{3} + j(200 + 10)$$

であるので,

$$V_{2ab} = \sqrt{(100\sqrt{3})^2 + 80^2} = 190.78 \rightarrow 191 \text{ } [V]$$

$$V_{2cb} = \sqrt{(10\sqrt{3})^2 + 210^2} = 210.71 \rightarrow 211 \text{ } [V]$$

... (答)



(5) 変圧器の二次電流は,

$$\dot{I}_{2a} = 100$$

$$\dot{I}_{2c} = -50 + j50\sqrt{3}$$

であるので, 2 台の変圧器の有効電力 P_{2ab} , P_{2cb} 及び無効電力 Q_{2ab} , Q_{2cb} は,

$$P_{2ab} + jQ_{2ab} = \bar{V}_{2ab} \dot{I}_{2a} = (100\sqrt{3} - j80) \times 100 = 10000\sqrt{3} - j8000$$

$$P_{2cb} + jQ_{2cb} = \bar{V}_{2cb} \dot{I}_{2c} = (10\sqrt{3} - j210) \times (-50 + j50\sqrt{3}) = 10000\sqrt{3} + j12000$$

したがって,

$$P_{2ab} = 10000\sqrt{3} = 17320 \text{ [W]} \rightarrow 17.3 \text{ [kW]}$$

$$P_{2cb} = 10000\sqrt{3} = 17320 \text{ [W]} \rightarrow 17.3 \text{ [kW]} \quad \dots (\text{答})$$

[別解] なお, 変圧器の損失は無視できるので, 負荷へ供給する電力は一次入力電力に等しく, $P_{2ab} = P_{1ab}$ かつ $P_{2cb} = P_{1cb}$ である。このとき, 一次電圧と一次電流の位相差は $\frac{\pi}{6}$ [rad] であるので,

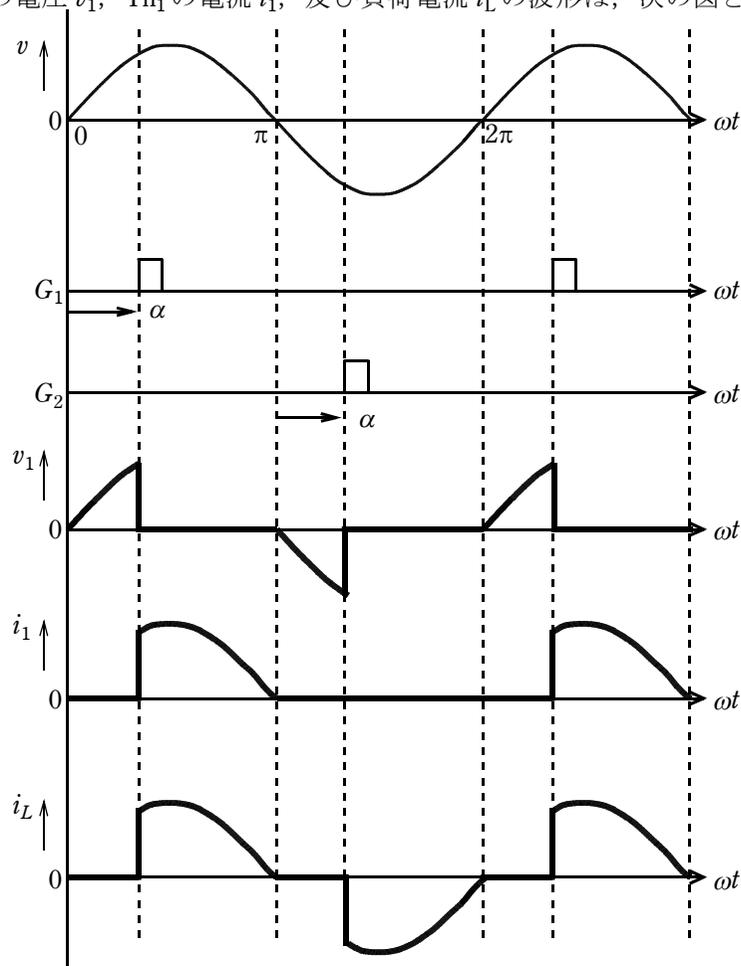
$$P_{2ab} = P_{1ab} = V_{ab} \times I_a \times \cos \frac{\pi}{6} = 400 \times 50 \times \frac{\sqrt{3}}{2} = 17320 \text{ [W]} \rightarrow 17.3 \text{ [kW]} \quad \dots (\text{答})$$

$$P_{2cb} = P_{1cb} = V_{cb} \times I_c \times \cos \frac{\pi}{6} = 400 \times 50 \times \frac{\sqrt{3}}{2} = 17320 \text{ [W]} \rightarrow 17.3 \text{ [kW]}$$

としてもよい。

[問3の標準解答]

(1) Th₁の電圧 v_1 , Th₁の電流 i_1 , 及び負荷電流 i_L の波形は, 次の図となる。



電圧 v_1 にはサイリスタ Th₂ がオンしたときに電圧が零となる影響が現れるが, 電流 i_1 はサイリスタ Th₁ に流れる電流だけである。負荷電流 i_L は正負の電流が流れる。

(2) Th₁ 又は Th₂ がオンしている期間, 負荷には次の電流 i_{L0} が流れる。

$$i_{L0} = \sqrt{2} \frac{V}{R} \sin \omega t = \sqrt{2} I \sin \omega t \text{ [A]} \quad , \quad \text{ただし, } I = \frac{V}{R}$$

制御遅れ角 α [rad] における負荷電流 i_L の実効値 I_L [A] は, 半周期で求めればよいので次式となる。

$$I_L = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} (\sqrt{2} I \sin \omega t)^2 d\omega t} = I \sqrt{\frac{2}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} \sin^2 \omega t d\omega t} \text{ [A]}$$

ここで、 $\int \sin^2 \theta d\theta = -\frac{1}{4} \sin 2\theta + \frac{1}{2} \theta + C$ を利用する。

$$\int_{\alpha}^{\pi} \sin^2 \omega t d\omega t = \left[-\frac{1}{4} \sin 2\omega t + \frac{1}{2} \omega t \right]_{\alpha}^{\pi} = \frac{\pi - \alpha}{2} + \frac{\sin 2\alpha}{4}$$

したがって、実効値 I_L [A] は次式となる。

$$I_L = I \sqrt{\frac{2}{\pi} \left(\frac{\pi - \alpha}{2} + \frac{\sin 2\alpha}{4} \right)} = \frac{V}{R} \sqrt{\frac{2(\pi - \alpha) + \sin 2\alpha}{2\pi}} \quad \text{[A]} \quad \dots \text{(答)}$$

- (3) 負荷がインダクタンス L のリアクトルと抵抗 R とが直列接続された誘導性負荷の場合、負荷の力率角を $\gamma = \tan^{-1} \frac{\omega L}{R}$ [rad] とすると、制御遅れ角 $\alpha > \gamma$ [rad] の範囲で電圧制御が可能である。

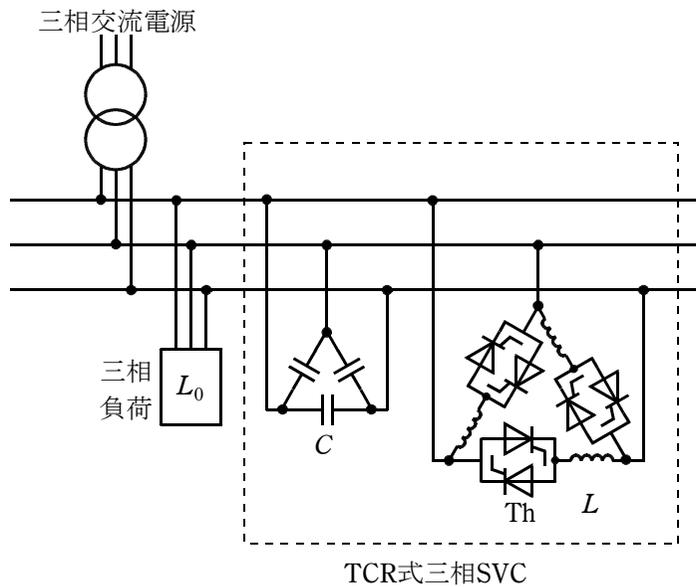
純インダクタンスの負荷であれば、

$$\gamma = \tan^{-1} \frac{\omega L}{R} = \tan^{-1} \infty = \frac{\pi}{2} \text{ [rad]}$$

であるので、電圧制御が可能で制御遅れ角 α [rad] の範囲は次式である。

$$\frac{\pi}{2} < \alpha < \pi \text{ [rad]} \quad \dots \text{(答)}$$

- (4) 三相負荷と並列接続される三相無効電力補償装置 (TCR 式三相 SVC) の主回路構成は、固定の進み電流を流す固定のコンデンサ C と並列に、可変の遅れ電流を流す逆並列サイリスタと固定のリアクトル L との直列回路を接続した回路となる。したがって、TCR 式三相 SVC を構成するコンデンサ、リアクトル及びサイリスタの接続図は次の図となる。



ただし、回路構成としては Δ 接続でもY接続でもよい。サイリスタとリアクトルの接続も、図のように直列に接続するか、Y接続のリアクトルと Δ 接続のサイリスタとの組合せでもよい。また、進相コンデンサCにフィルタ機能のリアクトルを追加した構成でもよい。

[問4の標準解答]

(1) インパルス応答の計算：

ラプラス変換の公式： $\mathcal{L}[\sin \omega t] = \frac{\omega}{s^2 + \omega^2}$ 及び $\mathcal{L}[\delta(t)] = 1$

を利用する。ここで、 $\delta(t)$ は単位インパルス入力 (δ 関数) とする。単位インパルス応答 $g(t)$ は次式で求められる。

$$g(t) = \mathcal{L}^{-1}\left[\frac{1}{s^2+4} \times 1\right] = \frac{1}{2} \mathcal{L}^{-1}\left[\frac{2}{s^2+4}\right] = \frac{1}{2} \sin 2t, \quad t \geq 0 \quad \dots \text{(答)}$$

(2) 閉ループ伝達関数の計算：

マイナーループの伝達関数を求めると

$$P(s) = \frac{1}{s^2+4} \cdot \frac{1}{1 + \frac{K_2 s}{s^2+4}} = \frac{1}{s^2 + K_2 s + 4}$$

となる。これを用いて、 $R(s)$ から $E(s)$ までの伝達関数を求めると

$$\begin{aligned} \frac{E(s)}{R(s)} &= \frac{1}{1 + \frac{K_1 s + K_1}{s} \cdot \frac{1}{s^2 + K_2 s + 4}} \\ &= \frac{s(s^2 + K_2 s + 4)}{s^3 + K_2 s^2 + (K_1 + 4)s + K_1} \quad \dots \text{(答)} \end{aligned}$$

となる。

(3) 安定限界：

制御系が安定であるためには、特性方程式

$$s^3 + K_2 s^2 + (K_1 + 4)s + K_1 = 0$$

の根がすべて左半面にあればよい。ラウスの判別法を適用すると

$$\begin{array}{r} s^3 \qquad 1 \qquad K_1 + 4 \\ s^2 \qquad K_2 \qquad K_1 \\ s^1 \qquad \frac{K_2(K_1 + 4) - K_1}{K_2} \qquad 0 \\ s^0 \qquad K_1 \end{array}$$

となり，安定限界では

$$K_1 = K_2(K_1 + 4) \quad \dots \text{ (答)}$$

となる。

このとき制御系の応答は持続振動となる。 \dots (答)

(4) 伝達関数の計算：

図から各変数の間に成り立つ関係を記述すると，

$$U(s) = F(s)R(s) + C_1(s)E(s) - C_2(s)G(s)U(s) \quad \dots\dots\dots \text{①}$$

$$E(s) = R(s) - G(s)U(s) \quad \dots\dots\dots \text{②}$$

が得られる。これから，答は次となる。

$$(a) F(s), \quad (b) C_1(s), \quad (c) C_2(s)G(s), \quad (d) G(s) \quad \dots \text{ (答)}$$

①式から，

$$U(s) = \frac{F(s)R(s) + C_1(s)E(s)}{1 + C_2(s)G(s)}$$

が得られ，これを②式へ代入すると

$$E(s) = R(s) - G(s) \cdot \frac{F(s)R(s) + C_1(s)E(s)}{1 + C_2(s)G(s)}$$

となり，上式を整理すると

$$\left[1 + \frac{C_1(s)G(s)}{1 + C_2(s)G(s)} \right] E(s) = \left[1 - \frac{G(s)F(s)}{1 + C_2(s)G(s)} \right] R(s)$$

が得られる。したがって，

$$\frac{E(s)}{R(s)} = \frac{1 + C_2(s)G(s) - F(s)G(s)}{1 + C_2(s)G(s) + C_1(s)G(s)}$$

となる。以上から，答は次となる。

$$(e) G(s) [C_2(s) - F(s)], \quad (f) G(s) [C_2(s) + C_1(s)] \quad \dots \text{ (答)}$$

(5) 定常偏差の計算：

$F(s)$ ， $C_1(s)$ ， $C_2(s)$ 及び $G(s)$ の各伝達関数を代入すると

$$\frac{E(s)}{R(s)} = \frac{1 + \frac{K_2 s}{s^2 + 4} - \frac{4}{s^2 + 4}}{1 + \frac{K_2 s}{s^2 + 4} + \frac{K_1 s + K_1}{s(s^2 + 4)}} = \frac{s^2(s + K_2)}{s(s^2 + 4) + K_2 s^2 + K_1 s + K_1}$$

となる。ここで、目標値 $r(t) = t$ のラプラス変換 $\mathcal{L}[t] = \frac{1}{s^2}$ を利用し、最終値の定理を用いると

$$e_s = \lim_{s \rightarrow 0} s \cdot \frac{s^2(s + K_2)}{s(s^2 + 4) + K_2 s^2 + K_1 s + K_1} \cdot \frac{1}{s^2} = 0 \quad \dots \text{(答)}$$

が得られる。