

●平成26年度第一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) 炭素が完全燃焼する反応式は $C+O_2 \rightarrow CO_2$ である。これより炭素 1 kg が完全燃焼するのに必要な酸素は、

$$\frac{16 \times 2}{12} \doteq 2.666 \rightarrow 2.67 \text{ kg} \quad \dots (\text{答})$$

水素については、反応式は $2H_2+O_2 \rightarrow 2H_2O$ と表され、必要な酸素量は、

$$\frac{16}{2} = 8 \rightarrow 8 \text{ kg} \quad \dots (\text{答})$$

硫黄については、反応式は $S+O_2 \rightarrow SO_2$ と表され、必要な酸素量は、

$$\frac{16 \times 2}{32} = 1 \rightarrow 1 \text{ kg} \quad \dots (\text{答})$$

- (2) 1 kmol の炭素が完全燃焼するには 1 kmol の酸素を必要とする。

したがって、1 kmol の気体の体積は 22.4 Nm^3 であることから、1 kg の炭素が完全燃焼するのに必要な酸素の体積は、

$$\frac{22.4}{12} \doteq 1.866 \rightarrow 1.87 \text{ Nm}^3 \quad \dots (\text{答})$$

- (3) (2) と同様に、1 kmol の水素が完全燃焼するには $\frac{1}{2}$ kmol の酸素を必要とし、1 kmol の硫黄が完全燃焼するには 1 kmol の酸素を必要とする。また、燃料中に酸素があることに留意する。石炭の炭素、水素、硫黄、酸素の各含有率をそれぞれ C_C , C_H , C_S , C_O とすれば理論空気量は、以下の式で表される。

石炭の理論空気量

$$\begin{aligned} &= \frac{1}{0.21} \left(\frac{22.4}{12} \times C_C + \frac{22.4}{2} \times C_H + \frac{22.4}{32} \times C_S - \frac{22.4}{16 \times 2} \times C_O \right) \\ &= \frac{1}{0.21} \left(\frac{22.4}{12} \times 0.70 + \frac{22.4}{2} \times 0.075 + \frac{22.4}{32} \times 0.006 - \frac{22.4}{16 \times 2} \times 0.085 \right) \\ &\doteq 7.958 \rightarrow 7.96 \text{ Nm}^3/\text{kg} \quad \dots (\text{答}) \end{aligned}$$

[問2の標準解答]

(1) GIS 母線の絶縁異常

絶縁異常の兆候をとらえる主な診断技術は部分放電の検出である。部分放電に伴ってタンク内部に発生する各種現象を電氣的（電磁波）、機械的（AE：Acoustic Emission）に検出する方法が使われている。また、分解ガスを検出する化学的方法、UHF 帯域の電磁波を検出することで部分放電を pC 感度で管理する方法も採用されている。

特に絶縁異常の主な要因である金属異物については、異物が交流電界内を振動中に、タンク表面に衝突して発生する音波や異物の存在により発生する部分放電を AE センサ（超音波センサ）や加速度センサにより検出する方法が使われている。

(2) GIS 母線のシール異常

ガス配管、フランジ部などでシール異常があると、ガス漏れが生じ、ガス圧力低下に至る。ガス漏れに対する診断技術としては、ガス圧力の変化を測定する方法とタンクからのガス漏れがないことを直接的に検出する方法があり、それぞれガス圧力センサやガス密度スイッチを用いた測定、ガスリークディテクタによる検出が採用されている。

(3) GIS 母線及び SF₆ ガス遮断器の通電異常

GIS 母線の通電異常の要因として、主回路導体の接触不良がある。この接触不良を検出する診断技術としては、導体の接触抵抗を測定する方法、局部加熱に起因するタンク温度上昇を温度センサ、赤外線カメラで検出する方法、局部過熱により発生する SF₆ 分解ガスを測定する方法、また通電異常箇所から発生する部分放電を検出する方法などが採用されている。

SF₆ ガス遮断器の通電異常においては、コンタクト損耗異常の検知がある。このコンタクト損耗異常の主な要因としては、大電流遮断時のコンタクトの損耗がある。コンタクトの損耗は開閉特性（ワイプ量の測定など）を確認する方法があるが、電流遮断によるコンタクトの損耗は、一様に発生しないため、開閉特性では確認できない場合もあり、累積遮断回数により管理する場合もある。

(4) SF₆ ガス遮断器の機械的異常

SF₆ ガス遮断器の操作機構部の固渋や不動作の要因として、グリスの劣化や電装品の不具合などが挙げられる。

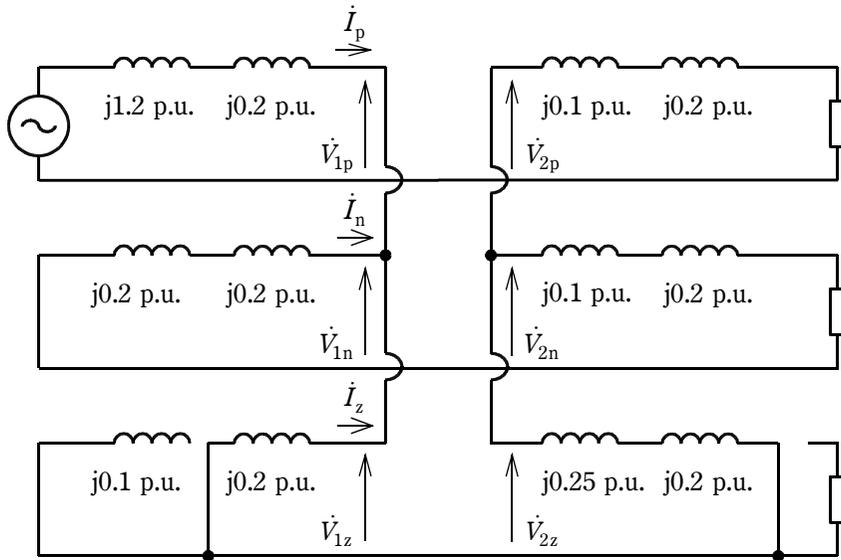
機械的異常の診断技術としては、開閉動作特性を測定し、動作特性不良を判定する方法がある。開閉動作特性を測定する方法としては、制御電流や補助スイッチの動作を測定する方式、機構部の動作速度をセンサにて検出する方式がある。また、油圧操作用油圧系統の異常を油圧ポンプの動作頻度で検出する方法などがある。

[問3の標準解答]

(1) a相は断線, それ以外は健全(接続)という条件なので, 求める条件は以下のとおりである。

$$\left. \begin{array}{l} \dot{I}_{1a} = \dot{I}_{2a} = 0 \\ \dot{I}_{1b} = \dot{I}_{2b} \\ \dot{I}_{1c} = \dot{I}_{2c} \\ \dot{V}_{1b} = \dot{V}_{2b} \\ \dot{V}_{1c} = \dot{V}_{2c} \end{array} \right\} \dots (\text{答})$$

(2) 1線断線の対称分等価回路を書けば次のようになる。(負荷インピーダンスと電源電圧の値は(3)で与えられるので, ここでは記入しなくてよい。)



したがって,

$$\left. \begin{array}{l} a = j1.2 \text{ p.u.}, \quad b = j0.2 \text{ p.u.}, \quad c = j0.1 \text{ p.u.}, \quad d = j0.2 \text{ p.u.}, \\ e = j0.1 \text{ p.u.}, \quad f = j0.25 \text{ p.u.}, \quad g = j0.2 \text{ p.u.} \end{array} \right\} \dots (\text{答})$$

(3)

a. 題意より送電端（電圧 \dot{V}_1 ）から負荷側を見た等価インピーダンス \dot{Z}_1 は、

$$\dot{Z}_1 = \frac{\dot{V}_1}{\dot{I}} = \frac{1}{0.9 - j0.1} = 1.0976 + j0.12195 \text{ p.u.}$$

である。したがって負荷の等価インピーダンスは、ここから送電線と受電側変圧器の直列インピーダンス $j0.3 \text{ p.u.}$ を除いた $1.0976 - j0.17805 \text{ p.u.}$ に等しい。事故前の線路電流 \dot{I} による電源側リアクタンス $j1.4 \text{ p.u.}$ に生じる電圧降下分を考慮すると、発電機内部電圧の大きさは、

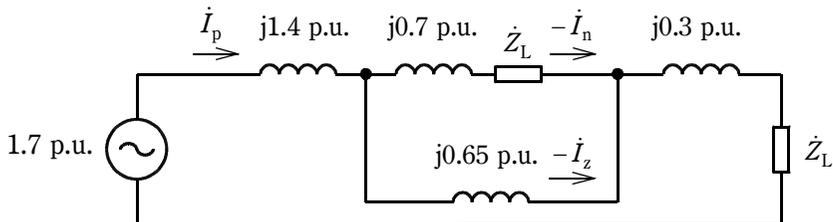
$$\left| \dot{V}_1 + j1.4\dot{I} \right| = \left| \dot{V}_1 + j1.4 \left(\frac{\dot{V}_1}{\dot{Z}_1} \right) \right| = \left| \dot{V}_1 \left[1 + j \frac{1.4}{\dot{Z}_1} \right] \right| = \left| 1.0 \times [1 + j1.4(0.9 - j0.1)] \right|$$

と得られる。この大きさは、

$$\sqrt{(1.14^2 + 1.26^2)} \doteq 1.70 \rightarrow 1.70 \text{ p.u.} \dots (\text{答})$$

b. 以上をもとに前問で求めた等価回路を、発電機内部電圧を位相の基準とし、インピーダンスをまとめた形で書き直すと次のようになる。

(ただし、 $\dot{Z}_L = 1.0976 - j0.17805 \text{ p.u.}$)



上図の \dot{I}_p を計算すると、

$$\begin{aligned} \dot{I}_p &= \frac{1.7}{j1.7 + 1.0976 - j0.17805 + \frac{(1.0976 + j0.52195)j0.65}{(1.0976 + j0.52195) + j0.65}} \\ &\doteq 0.3912 - j0.6062 \text{ p.u.} \dots (\text{答}) \end{aligned}$$

c. また,

$$-\dot{I}_n = \frac{j0.65}{Z_L + j1.35} \times \dot{I}_p = 0.283\ 335 - j0.070\ 882\ 416\ \text{p.u.}$$

$$-\dot{I}_z = \dot{I}_p - (-\dot{I}_n) = 0.107\ 865 - j0.535\ 317\ 584\ \text{p.u.}$$

である。

以上より, 変圧器高圧側母線電圧の対称分電圧は,

$$\text{正相分が } 1.7 - j1.4(0.391\ 2 - j0.606\ 2) = 0.851\ 32 - j0.547\ 68\ \text{p.u.}$$

$$\text{逆相分が } j0.4 \times (-\dot{I}_n) = 0.028\ 352\ 966 + j0.113\ 334\ \text{p.u.}$$

$$\text{また, 零相分が } j0.2 \times (-\dot{I}_z) = 0.107\ 063\ 516 + j0.021\ 573\ \text{p.u.}$$

したがって, 求める電圧は, これらの和をとって,

$$\begin{aligned} & (0.851\ 32 - j0.547\ 68) + (0.028\ 353 + j0.113\ 33) + (0.107\ 06 + j0.021\ 573) \\ & = 0.986\ 733 - j0.412\ 777\ \text{p.u.} \end{aligned}$$

である。

求める電圧の大きさは,

$$|0.986\ 733 - j0.412\ 777| \doteq 1.070 \rightarrow 1.07\ \text{p.u.} \dots (\text{答})$$

[問4の標準解答]

- (1) ①系統周波数の異常，②安定度の喪失，③過負荷の連鎖，④電圧不安定現象がある。
- (2) ①では，周波数の異常低下に対しては，揚水発電所が揚水している場合は揚水遮断し，次には必要量の負荷遮断を適切に行う。
- ②では，該当する電源系統の発電制限，発電遮断などにより電力動揺を抑制する。
- ③では，該当する系統の発電制限，発電遮断，負荷遮断などを適切に選択あるいは組み合わせて実施し，過負荷を抑制する。
- ④では，該当する負荷系統において調相設備の投入，負荷遮断を適切に行い電圧低下を抑制する。
- (3) 事故波及防止リレーシステムにおいて制御量を決定する方式には，以下の3種類がある。
- ① 系統擾乱^{じょうらん}に発展し得る事故を想定して，事前情報からあらかじめ制御量を設定しておく事前演算方式。
- ② 事故中及び事故後の情報をもとに演算を行い，制御量を決定する事後演算方式。
- ③ 特に演算を伴わない設備事故除去リレーと同様な構成のリレー形の方式。

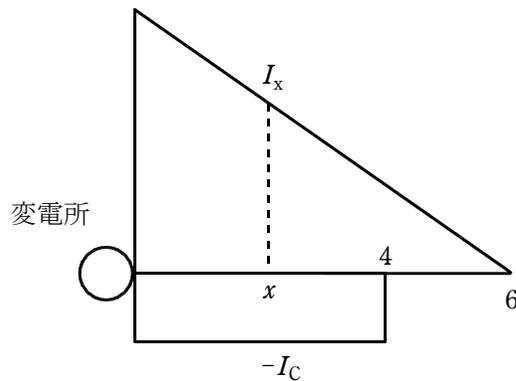
[問5の標準解答]

(1) コンデンサの電流は無効分のみなので、分散型電源の電流も無効分だけを考えればよい。また、配電線各地点の電圧位相の差を無視すると、配電線電流の無効分は、各地点の分散型電源及びコンデンサの電流の無効分それぞれを、配電線の末端から累計したものになる。

変電所より x [km] の地点の分散型電源による配電線の無効分電流 I_x [A] は、

$$I_x = \int_x^6 30 \sin \theta dx = 30(6-x) \sin \theta$$
 となる。ただし、 $\sin \theta = \sqrt{1 - \cos^2 \theta}$ であり、 $\cos \theta$ は分散型電源の力率である。

コンデンサによる配電線の無効分電流 I_C [A] は、変電所と 4 km の地点の間を流れる。分散型電源が分散型電源側からみて進み力率運転なので、 I_x と I_C は互いに逆向きとなる。 $I_x \geq 0$ としているので、 $-I_C$ ($I_C > 0$) として、このときの配電線の無効分電流分布を図に示す。



以上により、求める L は、 $0 \leq x \leq 4$ における配電線電流の無効分(コンデンサ接続前は I_x 、接続後は $I_x - I_C$)による抵抗損だけを考慮すればよい。

よって、三相3線式を考慮して、

$$\begin{aligned}
 L &= 3r \int_0^4 [I_x^2 - (I_x - I_C)^2] dx \times 10^{-3} \\
 &= 3r \int_0^4 (2I_x I_C - I_C^2) dx \times 10^{-3} \\
 &= 3r I_C \int_0^4 [60(6-x)\sin\theta - I_C] dx \times 10^{-3} \\
 &= 3r I_C \left[60 \left(6x - \frac{1}{2} x^2 \right) \sin\theta - I_C x \right]_0^4 \times 10^{-3} \\
 &= 12r I_C (240 \sin\theta - I_C) \times 10^{-3}
 \end{aligned}$$

ここで、 $\cos\theta = 0.95$ 、 $\sin\theta \doteq 0.31225$ なので、

$$L = 12r I_C (74.94 - I_C) \times 10^{-3} \text{ kW} \quad \cdots \text{ (答)}$$

(2) 前問の結果より、 L は I_C の二次関数なので、 $I_C = \frac{74.94}{2} = 37.47 \text{ A}$

のとき最大となる。よって、

$$Q_C = \sqrt{3} \times 6.6 \times 37.47 \doteq 428.34 \rightarrow 428 \text{ kvar} \quad \cdots \text{ (答)}$$

[問6の標準解答]

(1)

A：瞬時電圧低下。(瞬低，電圧ディップでも可とする。)

B：架空送配電線等の地絡，短絡事故。(架空送配電線への落雷でも可とする。)

C：進相コンデンサ装置。(進相コンデンサ本体又は直列リアクトルでも可とする。)

D：アーク炉。(大型溶接機でも可とする。)

E：電圧不平衡。

(2) 装置又はシステムの存在する環境において，許容できないような電磁妨害をいかなるものに対しても与えず，かつ，その電磁環境において満足に機能するための装置又はシステムの能力。

< 機械・制御科目 >

[問 1 の標準解答]

- (1) 電機子電流を $\dot{I} = I_d + jI_q$ とすると, $I_d = 0$, $I_q = 50$ A であり, 交流電源の電圧は,

$$\begin{aligned}\dot{V} &= jE_0 + jX_d I_d - X_q I_q \\ &= j200 - 2 \times 50 \\ &= -100 + j200\end{aligned}$$

したがって,

$$V = \sqrt{100^2 + 200^2} \doteq 223.61 \rightarrow 224 \text{ V} \quad \cdots (\text{答})$$

- (2) 3相分の電力 P_1 は, \dot{E}_0 と \dot{I} が同位相であるので,

$$\begin{aligned}P_1 &= 3E_0 I \\ &= 3 \times 200 \times 50 \\ &= 30000 \rightarrow 30.0 \text{ kW} \quad \cdots (\text{答})\end{aligned}$$

極対数は $p = 2$ であるので, 負荷トルクは,

$$T_1 = \frac{P_1}{\omega_m} = \frac{p}{2\pi f} P_1 = \frac{2}{2 \times \pi \times 50} \times 30000 \doteq 190.99 \rightarrow 191 \text{ N} \cdot \text{m} \quad \cdots (\text{答})$$

- (3) 電機子電流を $\dot{I} = I_d + jI_q$ とすると, $I_d = -10$ A, $I_q = 10\sqrt{24}$ A であり, 交流電源の電圧は,

$$\begin{aligned}\dot{V} &= jE_0 + jX_d I_d - X_q I_q \\ &= j200 + j1 \times (-10) - 2 \times 10\sqrt{24} \\ &= -20\sqrt{24} + j190 \\ &= -97.980 + j190\end{aligned}$$

したがって,

$$V = \sqrt{(-97.980)^2 + 190^2} \doteq 213.78 \rightarrow 214 \text{ V} \quad \cdots (\text{答})$$

\dot{V} の複素共役を $\overline{\dot{V}}$ とすると, 複素電力は,

$$\begin{aligned}P + jQ &= 3\overline{\dot{V}}\dot{I} \\ &= 3 \times (-97.980 - j190) \times (-10 + j10\sqrt{24}) \\ &= 30864 - j8700\end{aligned}$$

有効電力は,

$$P_2 = 30864 \rightarrow 30.9 \text{ kW}$$

であるので, 負荷トルクは,

$$T_2 = \frac{P_2}{\omega_m} = \frac{p}{2\pi f} P_2 = \frac{2}{2 \times \pi \times 50} \times 30864 \doteq 196.48 \rightarrow 196 \text{ N}\cdot\text{m} \dots (\text{答})$$

(4) 電機子電流を $\dot{I} = I(\cos \theta + j \sin \theta)$ とすると,

$$\dot{V} = jE_0 + jX_d I \cos \theta - X_q I \sin \theta$$

複素電力は,

$$P + jQ = 3\bar{V}\dot{I} = 3(-jE_0 - jX_d I \cos \theta - X_q I \sin \theta)I(\cos \theta + j \sin \theta)$$

有効電力は,

$$P = 3[E_0 I \sin \theta + (X_d - X_q)I^2 \sin \theta \cos \theta]$$

ここでトルク, すなわち電力が最大のとき,

$$\begin{aligned} \frac{dP}{d\theta} &= 3[E_0 I \cos \theta + (X_d - X_q)I^2 (2 \cos^2 \theta - 1)] \\ &= 6(X_d - X_q)I^2 \cos^2 \theta + 3E_0 I \cos \theta - 3(X_d - X_q)I^2 = 0 \end{aligned}$$

各定数を代入すると,

$$\begin{aligned} 6 \times (-1) \times 50^2 \times \cos^2 \theta + 3 \times 200 \times 50 \times \cos \theta - 3 \times (-1) \times 50^2 &= 0 \\ \cos^2 \theta - 2 \cos \theta - \frac{1}{2} &= 0 \end{aligned}$$

$$\cos \theta = 1 \pm \sqrt{\frac{3}{2}}$$

$\cos \theta$ の範囲は $-1 \leq \cos \theta \leq 1$ であるので,

$$\cos \theta = 1 - \sqrt{\frac{3}{2}} = -0.22474$$

したがって,

$$\sin \theta = \pm \sqrt{1 - 0.22474^2} = \pm 0.97442$$

$\sin \theta < 0$ の場合は, $P < 0$ で最小トルクを意味する。したがって, トルクが最大となる電機子電流は,

$$\begin{aligned} \dot{I} &= 50 \times (-0.22474 + j0.97442) \\ &= -11.237 + j48.721 \rightarrow -11.2 + j48.7 \text{ A} \dots (\text{答}) \end{aligned}$$

[問2の標準解答]

(1)

a. 定格電圧、定格周波数時の鉄損を p_i とすると、ヒステリシス損が鉄損の 80 % から、ヒステリシス損 p_h 及びびうず電流損 p_e を求める。

$$p_h = 0.80p_i \cdots \cdots \cdots \textcircled{1}$$

$$p_e = 0.20p_i \cdots \cdots \cdots \textcircled{2}$$

題意から、最大磁束密度を B_m 、定格周波数を f 、定格電圧を V とすると、

$$p_h = k_h f B_m^2 = k_h f \left(k \frac{V}{f} \right)^2 = K_h \frac{V^2}{f}$$

$$p_e = k_e f^2 B_m^2 = k_e f^2 \left(k \frac{V}{f} \right)^2 = K_e V^2$$

ただし、 k_h 、 k_e 、 k 、 $K_h (=k_h k)$ 、 $K_e (=k_e k)$ は比例定数とする。

となるので、定格値から上昇した周波数 $f' = 1.05f$ 、低下した電圧 $V' = 0.95V$ とする場合、変化後のヒステリシス損 p'_h 及びびうず電流損 p'_e は、それぞれ次式となる。

$$p'_h = K_h \frac{V'^2}{f'} = K_h \frac{0.95^2 V^2}{1.05f} = 0.85952 p_h$$

$$p'_e = K_e V'^2 = K_e 0.95^2 V^2 = 0.9025 p_e$$

変化後の鉄損 p'_i は、①式、②式の関係を用いて p_i で表すと、

$$\begin{aligned} p'_i &= p'_h + p'_e \\ &= 0.85952 p_h + 0.9025 p_e \\ &= 0.85952 \times 0.80 p_i + 0.9025 \times 0.20 p_i \\ &= (0.68762 + 0.1805) p_i \\ &= 0.86812 p_i \end{aligned}$$

よって、鉄損は、86.8 % になる。… (答)

b. 継続して定格容量で使用するので、

$$V_2 I_2 = V_2' I_2'$$

$$\frac{I_2'}{I_2} = \frac{V_2}{V_2'} = \frac{V_2}{0.95V_2} = \frac{1}{0.95}$$

$$\therefore I_2' = \frac{1}{0.95} I_2$$

銅損 p_c は、 $p_c = (r_1' + r_2) I_2^2$ で表されるので、上式の I_2' を用いて、

$$p_c' = (r_1' + r_2) I_2'^2 = (r_1' + r_2) \left(\frac{1}{0.95} I_2 \right)^2$$

$$= \frac{1}{0.95^2} p_c = 1.1080 p_c$$

となる。よって、銅損は、111 %になる。… (答)

(2) 題意から、1 日における損失電力量は電力量計の読みの差に等しいので、全負荷における鉄損及び銅損を p_i [kW]、 p_c [kW] とおくと、

$$p_i \times 24 + p_c \left[1 \times 6 + \left(\frac{1}{2} \right)^2 \times 8 \right] = 16 \text{ kW} \cdot \text{h}$$

$$\therefore 24 p_i + 8 p_c = 16 \dots\dots\dots \textcircled{3}$$

また、負荷力率が 85 %一定として、全負荷における効率を η とすれば、

$$\eta = \frac{100 \times 0.85}{100 \times 0.85 + p_i + p_c} = 0.990$$

$$\therefore p_i + p_c = 0.85859 \dots\dots\dots \textcircled{4}$$

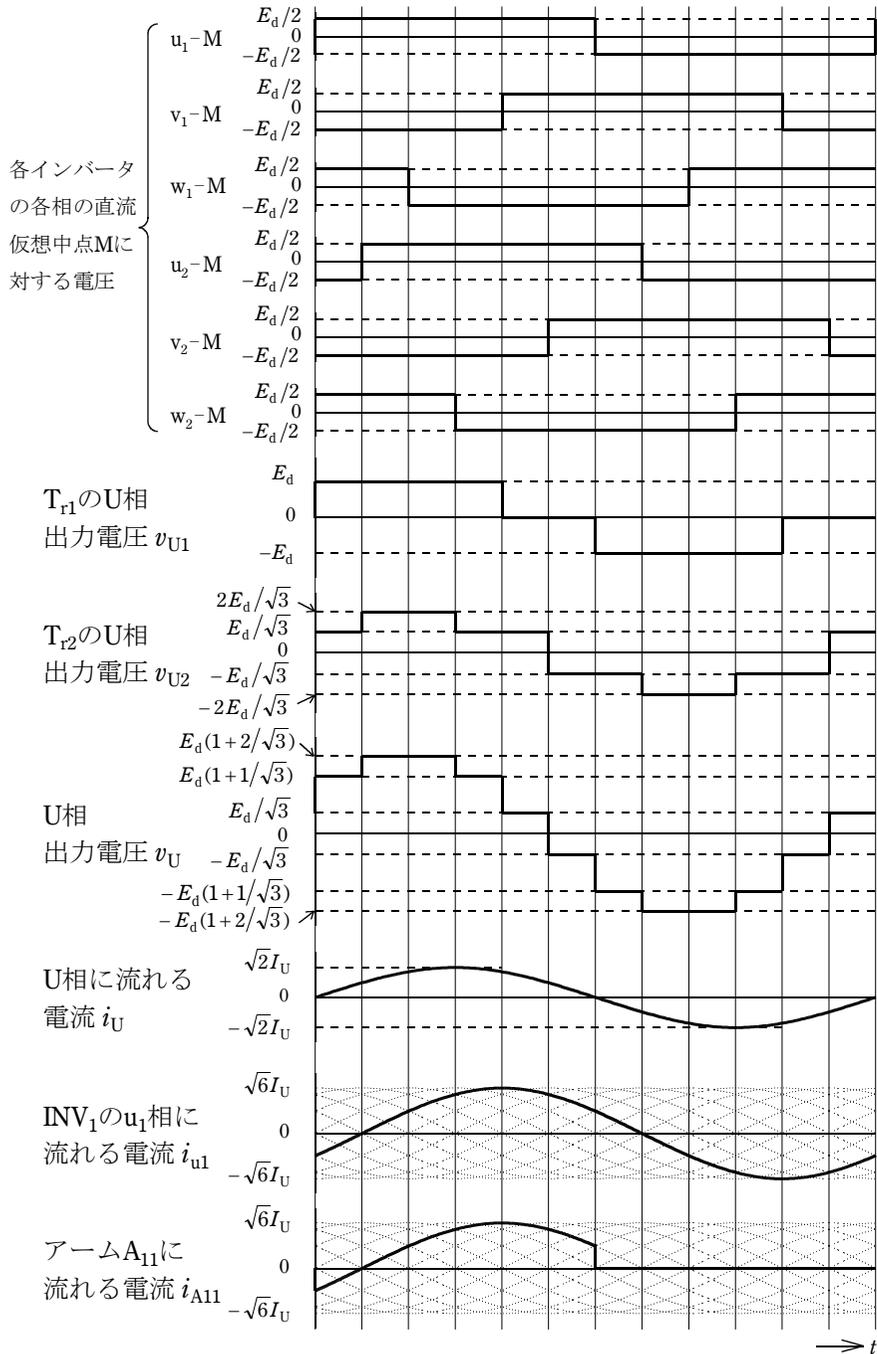
③式、④式から、 p_i 及び p_c を求めると、

$$p_i = 0.57071 \rightarrow 0.571 \text{ kW} \dots \text{(答)}$$

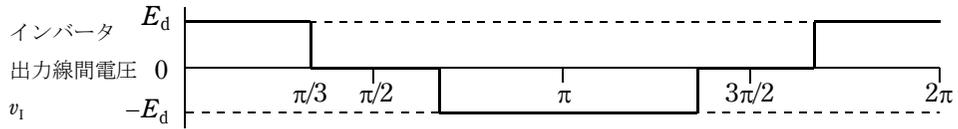
$$p_c = 0.28788 \rightarrow 0.288 \text{ kW} \dots \text{(答)}$$

[問3の標準解答]

(1), (2)は, 図のとおり。



(3) インバータの出力線間電圧 v_1 の波形は、 T_{r1} の U 相出力電圧の波形と同様であり、描き直すと次となる。



その基本波実効値 V_{rms} は、波形の対称性を考えると最初の $\frac{1}{4}$ 周期を余弦波でフーリエ級数展開して求められる。0 rad から $\frac{\pi}{3}$ rad まで E_d 、 $\frac{\pi}{3}$ rad から $\frac{\pi}{2}$ rad まで 0 であるので、

$$V_{\text{rms}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \times \frac{4}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{3}} E_d \cos \theta d\theta = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} E_d [\sin \theta]_0^{\frac{\pi}{3}} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} E_d \times \frac{\sqrt{3}}{2} = \frac{\sqrt{6}}{\pi} E_d$$

線間出力電圧 v の基本波実効値 V_{rms} は、インバータの出力線間電圧が変圧器で $\sqrt{3}$ 倍され、さらに多重で 2 倍になるので次となる。

$$V_{\text{rms}} = \frac{\sqrt{6}}{\pi} E_d \times 2\sqrt{3} = \frac{6\sqrt{2}}{\pi} E_d \quad \dots \text{ (答)}$$

[問4の標準解答]

(1) 入力

$$U(s) = \frac{1}{s}$$

である。出力は

$$Y(s) = \frac{2}{s(s+1)(s+2)} = \frac{1}{s} - \frac{2}{s+1} + \frac{1}{s+2}$$

となるから、これをラプラス逆変換することで $y(t)$ を得る。

$$y(t) = 1 - 2e^{-t} + e^{-2t} \quad \dots \text{(答)}$$

(2) 一巡伝達関数は

$$G(s) = \frac{K}{s} \cdot \frac{2}{s^2 + 3s + 2}$$

と書けるから、その周波数伝達関数は次式で与えられる。

$$G(j\omega) = \frac{2K}{j\omega(-\omega^2 + j3\omega + 2)} = \frac{-2K}{3\omega^2 + j(\omega^3 - 2\omega)} \quad \dots \text{①}$$

上式の分母を有理化する。

$$G(j\omega) = \frac{-2K[3\omega^2 - j(\omega^3 - 2\omega)]}{(3\omega^2)^2 + (\omega^3 - 2\omega)^2} = \frac{-6K\omega^2 + j2K(\omega^3 - 2\omega)}{(3\omega^2)^2 + (\omega^3 - 2\omega)^2} \quad \dots \text{②}$$

②式のベクトル軌跡が実軸を切るのは、上式の虚部が零になるときである。

したがって、 $2K(\omega^3 - 2\omega) = 0$ を解いて、角周波数

$$\omega_0 = \sqrt{2} \quad \dots \text{③}$$

が求まる。②式と③式から、

$$G(j\omega_0) = \frac{-6K \times 2}{(3 \times 2)^2} = \frac{-12K}{36} = -\frac{K}{3}$$

であるので、①式のベクトル軌跡は、角周波数 $\omega_0 = \sqrt{2}$ のとき、

点 $-\frac{K}{3} + j0$ で実軸を切る。… (答)

(3) ナイキストの安定判別法を適用すると、ベクトル軌跡が点 $-1 + j0$ を左に見

て負の実軸を切るとき、フィードバック制御系は安定と判定される。すなわ

ち、 $-1 < -\frac{K}{3} < 0$ となるときフィードバック制御系は安定であるから、

$0 < K < 3$ を得る。… (答)

(4) フィードバック制御系の特性方程式は、 $1+G(s)=0$ で求められる。

$$1 + \frac{2K}{s(s^2 + 3s + 2)} = 0$$

となるから、分母を払って、

$$s^3 + 3s^2 + 2s + 2K = 0 \dots\dots\dots \textcircled{4} \dots (\text{答})$$

を得る。

(5) ④式の特性方程式に対してラウス表を作成する。

s^3 行	1	2
s^2 行	3	$2K$
s^1 行	$\frac{6-2K}{3}$	
s^0 行	$2K$	

ラウス表から、制御系が安定となるための必要十分条件は、

$$6 - 2K > 0$$

$$2K > 0$$

である。よって、図2のフィードバック制御系を安定にする K は、

$$0 < K < 3 \dots (\text{答})$$

である。

(6) 図2のフィードバック制御系が安定限界となるのは、ベクトル軌跡が点 $-1+j0$ の上を通るときであるから、(2)、(3)より $K=3$ を得る。これを④式に代入すると特性方程式は、

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

となる。上式を因数分解する。

$$(s+3)(s^2+2) = 0$$

したがって、制御系が安定限界であるとき、閉ループ伝達関数の三つの極は

$$-3, \pm j\sqrt{2} \dots (\text{答})$$

である。