

令和 4 年度

第 2 種
機械・制御

(第 2 時限目)

答案用紙記入上の注意事項

1. 答案用紙（記述用紙）について

- 記入には、濃度HBの鉛筆又はシャープペンシルを使用してください。
- 指示がありましたら答案用紙2枚を引き抜き、2枚とも直ちに試験地、受験番号及び生年月日を記入してください。なお、氏名は記入不要です。
- 「選択した問の番号」欄には、必ず選択した問番号を記入してください。
記入した問番号で採点されます。問番号が未記入のものは、採点されません。
- 答案用紙は1問につき1枚です。
- 答案用紙にはページ番号を付しており、(1)～(3)ページに記述します。(4)ページは、図表等の問題に使用するもので、使用する場合は問題文で指定します。

2. 試験問題について

(計算問題) 解に至る過程を簡潔に記入してください。

- 導出過程が不明瞭な答案は、0点となる場合があります。
- 答は、問題文で指定がない限り、3桁（4桁目を四捨五入）です。なお、解答以外の数値の桁数は、誤差が出ないように多く取ってください。

例：線電流 I は、
$$I = \frac{P}{\sqrt{3}V \cos \theta} = \frac{10 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 200 \times 0.9} = 32.075 \text{ A} \quad (\text{答}) 32.1 \text{ A}$$

1線当たりの損失 P_L は、
$$P_L = I^2 R = 32.075^2 \times 0.2 = 205.76 \text{ W} \quad (\text{答}) 206 \text{ W}$$

(記述問題) 問題文の要求に従って記入してください。

- 例えば「3つ答えよ。」という要求は、4つ以上答えてはいけません。

答案用紙は、白紙解答であっても2枚すべて提出してください。
なお、この問題冊子についてはお持ち帰りください。

問 1～問 4 の中から任意の 2 問を解答すること。(配点は 1 問題当たり 30 点)

問 1 同期発電機に関して、次の問に答えよ。

定格電圧 6000 V、容量 5000 kV・A の三相同期発電機がある。無負荷で定格電圧を発生させる界磁電流における三相短絡電流は 300 A であった。この発電機について次の問に答えよ。なお、巻線抵抗は無視し、定格力率は 90 % とする。また、磁気飽和は無視する。

- (1) 定格電流 I_N [A] を求めよ。
- (2) 短絡比 K を求めよ。
- (3) 基準インピーダンス Z_N [Ω] を求めよ。
- (4) 同期リアクタンス Z_S [Ω] を求めよ。
- (5) 定格状態で運転しているときの電圧変動率 ε [%] を求めよ。

問2 定格線間電圧 200 V, 定格周波数 50 Hz, 4 極の三相かご形誘導電動機がある。

この電動機の三相星形結線 1 相分の L 形等価回路の定数を, 励磁アドミタンス $y_0 = 0.05 - j0.1 \text{ S}$, 一次巻線抵抗 $r_1 = 0.1 \Omega$, 一次漏れリアクタンス $x_1 = 0.3 \Omega$, 二次抵抗の一次換算値 $r'_2 = 0.15 \Omega$, 二次漏れリアクタンスの一次換算値 $x'_2 = 0.5 \Omega$ とする。この誘導電動機を定格電圧, 定格周波数の三相交流電源に接続して, 運転している。そのときの回転速度が 1455 min^{-1} である。この電動機について次の値を求めよ。

- (1) 電動機の滑り s [%]
- (2) 励磁電流 I_0 [A]
- (3) 二次電流の一次換算値 I'_2 [A]
- (4) 銅損 [W]
- (5) 電動機の入力電流 I_1 [A]
- (6) 電動機の入力力率 [%]

問3 三相誘導電動機を駆動する電力変換システムに関して、次の問に答えよ。

図1は対称三相交流電源、三相ダイオード整流器、直流フィルタ回路、PWM制御三相電圧形インバータ及び三相誘導電動機からなるシステムを示す。ここで、交流電源は電源インピーダンスが無視でき、パワーデバイス及び回路に損失はないものとする。以下の問に答えよ。

- (1) 図1において、直流リアクトルDCLに流れる直流電流は一定とすると、直流電圧は三相整流電圧平均値となる。三相交流電源は実効値220V、50Hzとすると、直流電圧 E_d [V]はいくらであるか、数値で答えよ。
- (2) 小問(1)において、誘導電動機を運転したところ、有効電力は10kWであった。直流電流 I_d [A]はいくらであるか、数値で答えよ。
- (3) 三相ダイオード整流器は力率1で運転している。小問(1)、(2)において、入力交流電源電流 i_a の基本波実効値 I_a [A]はいくらであるか、数値で答えよ。

次に、図2は、図1のインバータのPWM制御で使われている三相正弦波信号波 v_u^* 、 v_v^* 、 v_w^* とキャリア波 v_c を示す。キャリア波の周波数は信号波の周波数に対して十分大きいものとする。以下の問に答えよ。

- (4) 信号波(振幅0.9)とキャリア波(振幅1)が図2に示す波形であるときに、直流電圧 E_d の midpoint から見たインバータの出力相電圧 v_u の基本波高値 V_{up} はいくらであるか、数値で答えよ。
- (5) 小問(4)において、インバータのu-v相出力線間電圧 v_{uv} の基本波実効値 V_{uve} はいくらであるか、数値で答えよ。
- (6) インバータは電動機を可変するためにV/f一定制御をしている。誘導電動機の定格周波数50Hz時に定格電圧を発生するためのu相信号波が図2に示す v_u^* であり、改めてこのときの信号波を v_{u50}^* と呼ぶ。出力周波数25Hzではどのようなu相信号波 v_{u25}^* とすべきか、信号 v_{u50}^* を4周期分書き込んだ図が解答用紙に示してあるので、 v_{u25}^* を信号の大きさ及び周期が明確に分かるように追記せよ。

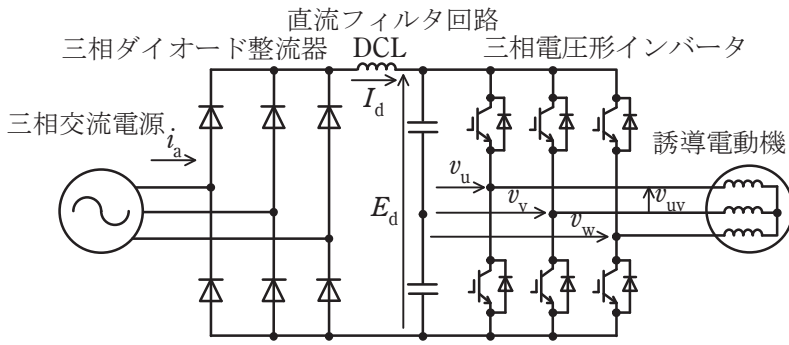


図1 三相誘導電動機を駆動する電力変換システム

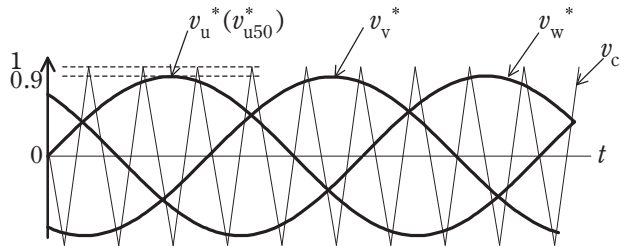
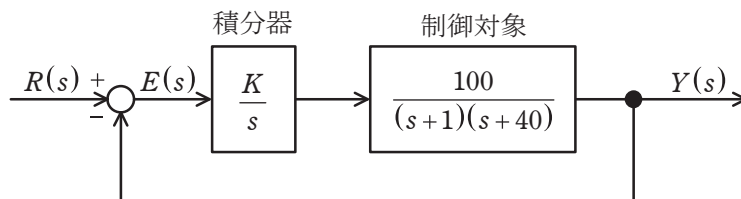


図2 PWM制御における三相正弦波信号波とキャリア波

問4 図に示すフィードバック制御系について、次の問に答えよ。ただし、 $R(s)$ は目標値、 $Y(s)$ は制御量、 $E(s)$ は制御偏差であり、時間信号 $r(t)$ 、 $y(t)$ 、 $e(t)$ をそれぞれラプラス変換したものである。

- (1) フィードバック制御系の特性方程式を求めよ。
- (2) フィードバック制御系を安定とする K の条件を求めよ。
- (3) 目標値 $R(s)$ から制御偏差 $E(s)$ までの伝達関数 $T_{ER}(s)$ を求めよ。
- (4) $K=2$ とおく。目標値 $r(t)$ を傾き2でランプ変化させたときの定常速度偏差 e_v を求めよ。
- (5) $K=2$ とおく。正弦関数 $2\sin t$ で表される目標値 $r(t)$ に対し、定常状態での制御偏差 $e(t)$ は $B\sin(t+\theta)$ で表される正弦関数となった。 B の値を求めよ。



<機械・制御科目>

[問1の標準解答]

(1)

$$S_N = \sqrt{3}V_N I_N \text{ より,}$$

$$\text{定格電流は, } I_N = \frac{S_N}{\sqrt{3}V_N} = \frac{5000 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 6000} = 481.13 \rightarrow 481 \text{ A} \quad \dots (\text{答})$$

(2)

短絡比 K は定義から、短絡電流と定格電流の比なので、次のようになる。

$$K = \frac{300}{481.13} = 0.62353 \rightarrow 0.624 \quad \dots (\text{答})$$

(3)

基準インピーダンスは、定格電圧と定格電流から、

$$Z_N [\Omega] = \frac{V_N}{\sqrt{3}I_N} = \frac{6000}{\sqrt{3} \times 481.13} = 7.1999 \rightarrow 7.20 \Omega \quad \dots (\text{答})$$

(4)

抵抗を無視しているので、同期リアクタンスは同期インピーダンスと等しい。
短絡比は同期インピーダンス (p.u.) の逆数なので、同期インピーダンス $[\Omega]$ は、
基準インピーダンス $[\Omega]$ と短絡比から求めることができる。

したがって、

$$X_S [\Omega] \approx Z_S [\Omega] = \frac{1}{K} \cdot \frac{V_N}{\sqrt{3}I_N} = \frac{1}{0.62353} \times \frac{6000}{\sqrt{3} \times 481.13} = 11.547 \rightarrow 11.5 \Omega \quad \dots (\text{答})$$

(5)

電圧変動率は、

$$\varepsilon = \frac{V_0 - V_N}{V_N} \times 100 [\%]$$

と定義される。ここで、 V_0 は無負荷時の線間電圧、 V_N は運転時の線間電圧である。無負荷時の電圧を求めるための、等価回路よりフェーザ図を描くと次の関係が得られる。

$$\dot{E}_0 = \frac{V_N}{\sqrt{3}} + jX_S I_N (\cos \varphi - j \sin \varphi)$$

これより,

$$E_0 = \sqrt{\left(\frac{V_N}{\sqrt{3}} + X_S I_N \sin \varphi \right)^2 + \left(X_S I_N \cos \varphi \right)^2}$$

$$\cos \varphi = 0.9 \text{ なるので, } \sin \varphi = \sqrt{1 - 0.9^2} = 0.43589$$

$$E_0 = \sqrt{\left(\frac{6000}{\sqrt{3}} + 11.547 \times 481.13 \times 0.43589 \right)^2 + \left(11.547 \times 481.13 \times 0.9 \right)^2} = 7722.8 \text{ V}$$

$$\varepsilon = \frac{V_0 - V_N}{V_N} \times 100 [\%]$$

$$= \frac{\sqrt{3} E_0 - V_N}{V_N} \times 100 = \frac{\sqrt{3} \times 7722.8 - 6000}{6000} \times 100 = 122.94 \rightarrow 123 \% \quad \cdots (\text{答})$$

[問2の標準解答]

(1) 滑り s

$$\text{同期速度 } n_0 = \frac{120 \times 50}{4} = 1500 \text{ min}^{-1}$$

$$s = \frac{1500 - 1455}{1500} = 0.03 \rightarrow s = 3.0 \% \quad \cdots (\text{答})$$

(2) 励磁電流 \dot{I}_0 [A]

$$\dot{I}_0 = \frac{200}{\sqrt{3}} (0.05 - j0.1) = 5.7735 - j11.547 \rightarrow 5.77 - j11.5 \text{ A} \quad \cdots (\text{答})$$

(3) 二次電流の一次換算値 \dot{I}'_2 [A]

$$\dot{I}'_2 = \frac{V_1}{r_1 + \frac{r'_2}{s} + j(x_1 + x'_2)} = \frac{\frac{200}{\sqrt{3}}}{0.1 + \frac{0.15}{0.03} + j(0.3 + 0.5)} = \frac{\frac{200}{\sqrt{3}}}{5.1 + j0.8}$$

$$= 22.097 - j3.4663 \rightarrow 22.1 - j3.47 \text{ A} \dots (\text{答})$$

(4) 銅損は一次銅損 (P_{1c}) と二次銅損 (P_{2c}) の和であるので、

$$I'_2 = \sqrt{22.097^2 + 3.4663^2} = 22.367$$

$$P_{1c} + P_{2c} = 3 \times I_2'^2 \times (r_1 + r_2') = 3 \times 22.367^2 \times (0.1 + 0.15) = 375.21$$

$$\rightarrow 375 \text{ W} \dots (\text{答})$$

(5) 電動機入力電流 I_1 [A]

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + \dot{I}'_2 = (5.7735 - j11.547) + (22.097 - j3.4663)$$

$$= 27.871 - j15.013$$

$$I_1 = \sqrt{27.871^2 + 15.013^2} = 31.657 \rightarrow 31.7 \text{ A} \dots (\text{答})$$

(6) 電動機の入力力率

$$\cos \phi = \frac{27.871}{31.657} = 0.88041 \rightarrow 88.0\% \dots (\text{答})$$

[問3の標準解答]

(1) 三相ダイオード整流の平均電圧は $1.35 V_{ab}$ であるので、 $1.35 \times 220 = 297 \text{ V}$

(2) 損失がないので、直流回路の電力は誘導電動機の有効電力と同じ。したがって、

$$\text{直流電流は } \frac{10000}{297} = 33.670 \text{ A} \rightarrow 33.7 \text{ A} \dots (\text{答})$$

(3) 損失がないので、交流電源の電力も誘導電動機の有効電力と同じ。したがって、

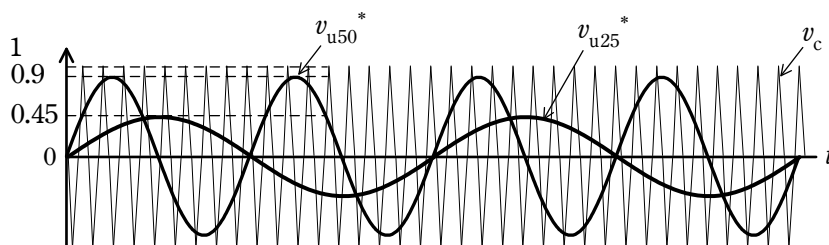
電源インピーダンスを無視できると、三相ダイオード整流器の基本波力率は 1。さらに、電源の交流電圧が正弦波であるので、有効電力となる交流電流

は基本波のみであるので、その実効値は $\frac{10000}{\sqrt{3} \times 220} = 26.243 \text{ A} \rightarrow 26.2 \text{ A} \dots (\text{答})$

(4) 相電圧の波高値は $\frac{E_d}{2} \times 0.9 = \frac{297}{2} \times 0.9 = 133.65 \rightarrow 134 \text{ V} \dots (\text{答})$

(5) 線間電圧の実効値は $\left(\frac{E_d}{2} \times 0.9 \right) \times \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} = 133.65 \times \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} = 163.69 \rightarrow 164 \text{ V} \dots (\text{答})$

- (6) V/f 一定となることが望ましいので、 $1/2$ の周波数のときに $1/2$ の大きさの電圧となる。ただし、 v_{u25}^* と v_{u50}^* の位相の関係は問わない。



[問 4 の標準解答]

- (1) 図から、フィードバック制御系の特性方程式は、

$$1 + \frac{100K}{s(s+1)(s+40)} = 0$$

となるから、分母を払って整理して、

$$s^3 + 41s^2 + 40s + 100K = 0 \dots\dots\dots \textcircled{1}$$

を得る。

- (2) ラウス・フルビッツの安定判別法を適用する。①式についてラウス表を作成すれば次のようになる。

s^3 行	1	40
s^2 行	41	100K
s^1 行	$\frac{1640-100K}{41}$	0
s^0 行	100K	

最左端の列の全ての要素が正であることが、制御系が安定となるための必要十分条件である。したがって、 K の条件として、

$$0 < K < 16.4 \dots\dots \text{(答)}$$

を得る。

【(2)の別解】

①式についてフルビッツの行列式を作成すれば次のようになる。

$$H_1 = 41$$

$$H_2 = \begin{vmatrix} 41 & 100K \\ 1 & 40 \end{vmatrix}$$

$$H_3 = \begin{vmatrix} 41 & 100K & 0 \\ 1 & 40 & 0 \\ 0 & 41 & 100K \end{vmatrix}$$

行列式 H_1, H_2, H_3 の全てが正であることが、制御系が安定となるための必要十分条件である。したがって、

$$H_2 = \begin{vmatrix} 41 & 100K \\ 1 & 40 \end{vmatrix} = 1640 - 100K > 0 \cdots \cdots \cdots \text{②}$$

$$H_3 = \begin{vmatrix} 41 & 100K & 0 \\ 1 & 40 & 0 \\ 0 & 41 & 100K \end{vmatrix} = 1640 \times 100K - 100K \times 100K$$

$$= (1640 - 100K) \times 100K > 0 \cdots \cdots \cdots \text{③}$$

を満たす K の条件として、

$$0 < K < 16.4 \cdots \cdots \text{(答)}$$

を得る。

(3) 目標値 $R(s)$ から制御偏差 $E(s)$ までの伝達関数 $T_{ER}(s)$ は、

$$T_{ER}(s) = \frac{E(s)}{R(s)} = \frac{1}{1 + \frac{100K}{s(s+1)(s+40)}} = \frac{s(s+1)(s+40)}{s(s+1)(s+40) + 100K} \cdots \cdots \text{④}$$

⋯⋯(答)

となる。

【(3)の別解】

図から、

$$E(s) = R(s) - Y(s) \cdots \cdots \cdots \text{⑤}$$

$$Y(s) = \frac{100K}{s(s+1)(s+40)} E(s) \cdots \cdots \cdots \text{⑥}$$

が成り立つ。

⑥式を⑤式に代入すると、

$$E(s) = R(s) - \frac{100K}{s(s+1)(s+40)} E(s)$$

$$\therefore R(s) = \left(1 + \frac{100K}{s(s+1)(s+40)}\right) E(s) = \frac{s(s+1)(s+40) + 100K}{s(s+1)(s+40)} E(s)$$

と書くことができるので、

$$T_{ER}(s) = \frac{E(s)}{R(s)} = \frac{s(s+1)(s+40)}{s(s+1)(s+40) + 100K} \dots\dots\dots \text{⑦}$$

... (答)

となる。

- (4) 傾きが 2 のランプ関数は $r(t) = 2t$, $t \geq 0$ であるから、これをラプラス変換すると $R(s) = \frac{2}{s^2}$ となる。定常速度偏差 e_v は、 $K=2$ とおいた④式にラプラス変換の最終値の定理を適用して次のように求めることができる。

$$\begin{aligned} e_v &= \lim_{s \rightarrow 0} sE(s) \\ &= \lim_{s \rightarrow 0} \left(s \times \frac{s(s+1)(s+40)}{s(s+1)(s+40) + 200} \times \frac{2}{s^2} \right) \\ &= \lim_{s \rightarrow 0} \frac{2(s+1)(s+40)}{s(s+1)(s+40) + 200} = \frac{2 \times 40}{200} = 0.4 \dots\dots\dots \text{⑧} \\ &\dots\dots\dots \text{(答)} \end{aligned}$$

- (5) ④式を、

$$E(s) = T_{ER}(s)R(s) = \frac{s(s+1)(s+40)}{s(s+1)(s+40) + 100K} R(s) \dots\dots\dots \text{⑨}$$

と書くと、目標値 $r(t)$ を入力信号、制御偏差 $e(t)$ を出力信号とする伝達関数 $T_{ER}(s)$ が⑨式で与えられていることになる。題意から、入力信号 $r(t)$ は正弦関数なので、出力信号の正弦関数の振幅は入力信号に比べて $|T_{ER}(j\omega)|$ 倍になる。そこで、⑨式において $s = j\omega$ とおいた周波数伝達関数 $T_{ER}(j\omega)$ の絶対値を $\omega = 1$ について求める。

⑨式に $K=2$, $s=j$ を代入すると次のようになる。

$$T_{\text{ER}}(j) = \frac{j(j+1)(j+40)}{j(j+1)(j+40)+200} = \frac{-41+j39}{159+j39}$$

上式の絶対値を計算して、

$$|T_{\text{ER}}(j)| = \left| \frac{-41+j39}{159+j39} \right| = \frac{\sqrt{41^2+39^2}}{\sqrt{159^2+39^2}} = \frac{\sqrt{3202}}{\sqrt{26802}} = 0.34564$$

となる。題意より入力信号の振幅は2であるから、 $B=0.691$ となる。

・・・ (答)