令和６年度

第　２　種

機械・制御

（第２時限目）

第２種　**機械・制御**

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，誤差が出ないよう多く取ってください。

例：線電流Iは，$I=\dfrac{P}{\sqrt{3}V\cos\theta}=\dfrac{10\times10^3}{\sqrt{3}\times200\times0.9}=32.075$ A　（答）32.1 A

１線当たりの損失P_Lは，$P_L=I^2R=32.075^2\times0.2=205.76$ W　（答）206 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。

第 2 種

機械・制御

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　同期機の特性に関して，次の問に答えよ。

(1) 図に同期機の無負荷飽和曲線と三相短絡特性曲線を示している。

(a) 図中の(A)はどちらの特性曲線か示せ。また，この特性曲線を得る試験方法を 100 字程度以内で述べよ。

(b) 図中の(B)はどちらの特性曲線か示せ。また，この特性曲線を得る試験方法を 100 字程度以内で述べよ。

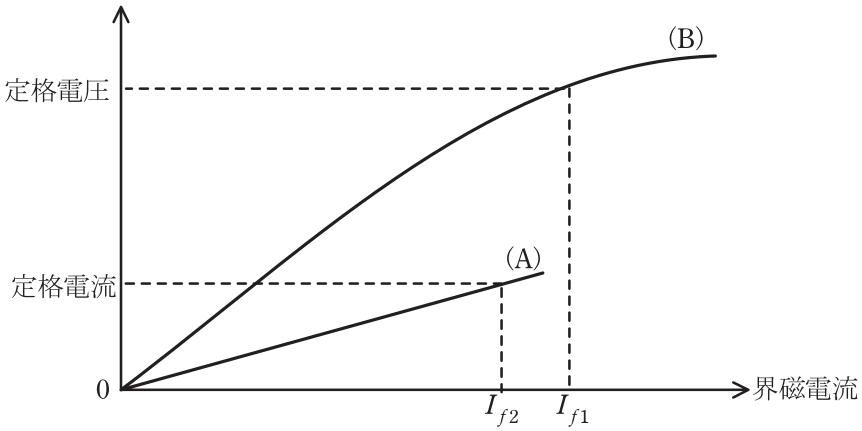
(c) 短絡比は界磁電流を用いて $\dfrac{I_{f1}}{I_{f2}}$ として求めることができるが，短絡比の定義を，電機子電流の観点から 100 字程度以内で述べよ。

(2) 定格電圧 200V，定格電流 144.3 A，50Hz の三相同期発電機を試験した結果，図中の I_{f1}，I_{f2} はそれぞれ $I_{f1} = 2.8$ A，$I_{f2} = 2.5$ A として得られた。

(a) この同期発電機の定格容量[kV･A]を求めよ。

(b) この同期発電機の単位法で表した同期インピーダンス[p.u.]を求めよ。

(c) この同期発電機の同期インピーダンス[Ω]を求めよ。



問２　定格容量 10 kV･A，定格一次電圧 2 000 V，定格二次電圧 110 V，定格周波数 60 Hz の単相変圧器があり，試験結果は次のとおりであった。

無負荷試験　　無負荷損：$P_0 = 200$ W

　　　　　　　無負荷電流：$I_0 = 0.26$ A

短絡試験　　　インピーダンス電圧：$V_{1s} = 100$ V

　　　　　　　一次電流：$I_{1s} = 5$ A

　　　　　　　インピーダンスワット：$P_s = 400$ W

この変圧器について次の問に答えよ。

(1) 図に示す一次換算の簡易等価回路の回路定数を求めよ。

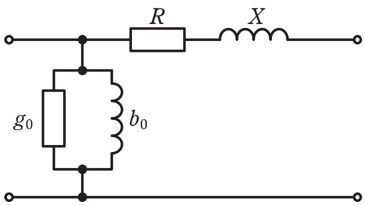
(2) 百分率抵抗降下 p [%]，百分率リアクタンス降下 q [%]を求めよ。

(3) 遅れ力率 80 %，全負荷における電圧の変動率 ε [%]を求めよ。

(4) 遅れ力率 80 %，$\dfrac{1}{2}$ 負荷における電圧の変動率 ε' [%]を求めよ。

ただし，定格負荷時の力率 $\cos\phi$ における電圧の変動率 ε [%]は，百分率抵抗降下を p [%]，百分率リアクタンス降下を q [%]とすれば，次式で表せるものとする。

$$\varepsilon = p\cos\phi + q\sin\phi \text{ [\%]}$$



一次換算全巻線抵抗：R

一次換算全漏れリアクタンス：X

励磁コンダクタンス：g_0

励磁サセプタンス：b_0

問３　図１は電源電圧をE，負荷電圧をv_Oとし，抵抗成分を無視できるインダクタンスLとキャパシタンスCによるチョッパ回路である。理想的な半導体スイッチQと順方向電圧降下を無視できるダイオードDを用いている。$E = 12$ V，$L = 450\,\mu$H， $R = 1\,\Omega$であり，十分に大きいCによってv_Oは一定値V_O，負荷電流i_Oは一定値I_Oとみなすことができる。Qは図２のオン・オフ状態で動作しており，この回路は周期定常状態にあるものとする。図２と同じものが答案用紙に描かれている。インダクタ電流は連続しているものとして，以下の問に答えよ。

(1) インダクタ電圧v_Lの波形を答案用紙に描け。なお，v_Lの最大値及び最小値を図中にEとv_O（$= V_O$）を用いて表せ。

(2) V_Oの値を求めよ。

(3) I_Oの値を求めよ。

(4) インダクタ電流i_Lの平均値I_Lを求めよ。

(5) i_Lの最大値と最小値の差（リプル）を求めよ。

(6) i_Lの波形を答案用紙に描け。最大値と最小値を明示せよ。

(7) ダイオード電流i_Dの波形を答案用紙に描け。最大値を明示せよ。

(8) i_Lの最大値と最小値の差（リプル）を0.1AとするためのLの値を求めよ。

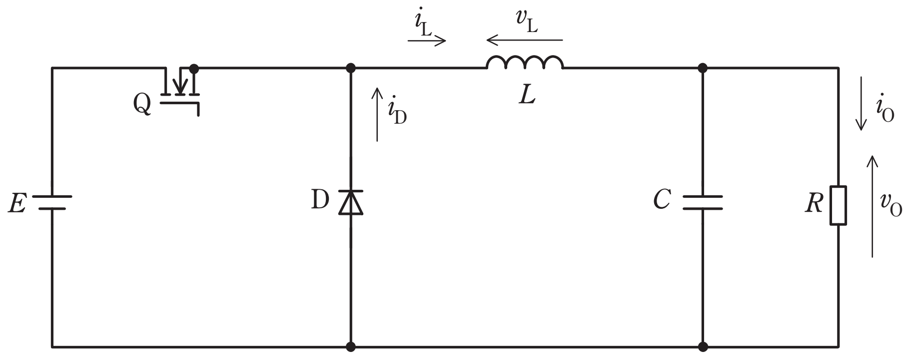


図1 チョッパ回路

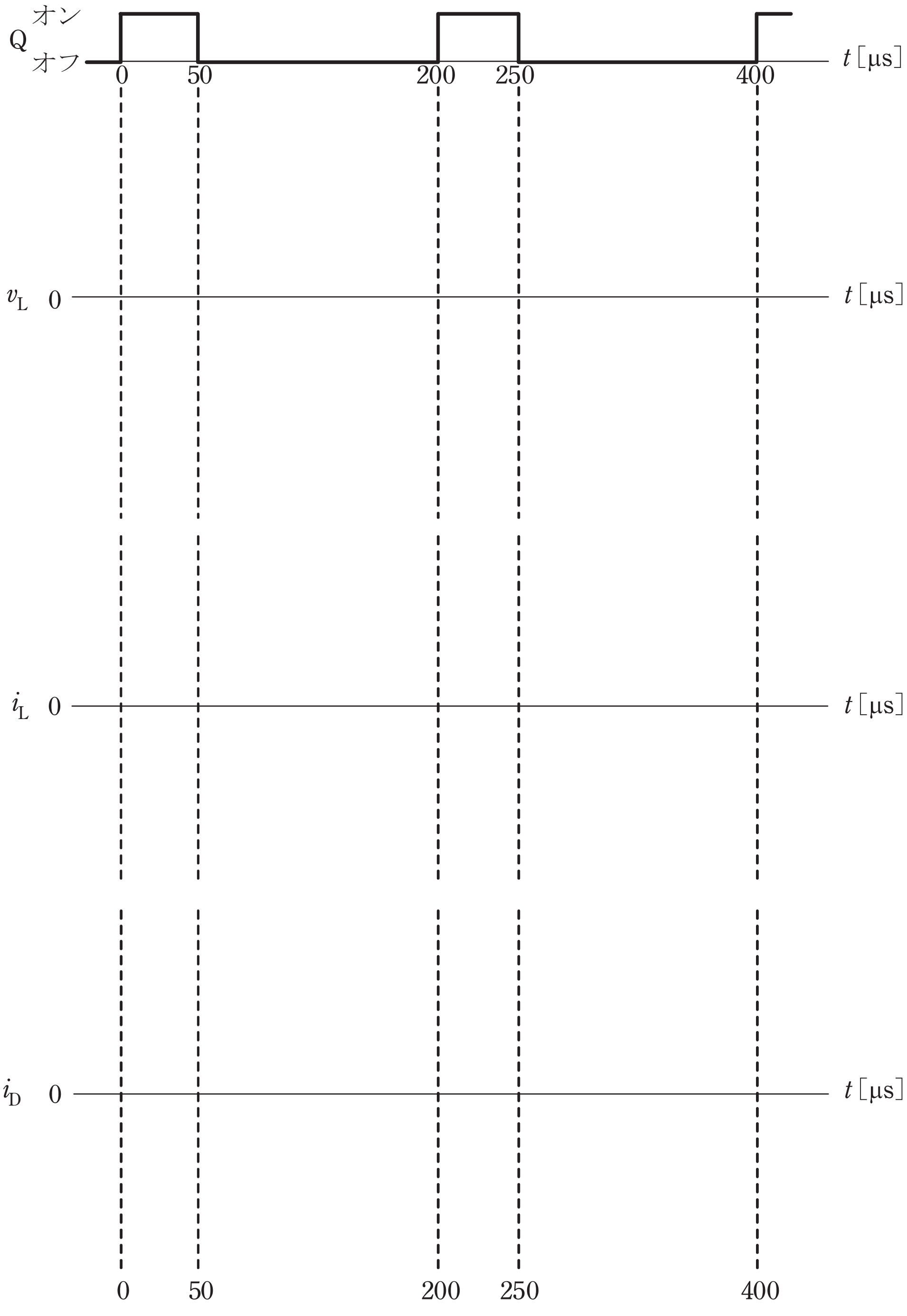


図2 Qのオン・オフと各部の電圧電流波形

問４　伝達関数 $G_1(s)$，$G_2(s)$ に対して図１のように直列結合した制御系と図２のように並列結合した制御系が与えられている。$U(s)$ は入力量，$Y_1(s)$ は直列結合した場合の出力量，$Y_2(s)$ は並列結合した場合の出力量をあらわしている。$U(s)$，$Y_1(s)$，$Y_2(s)$ は時間信号 $u(t)$，$y_1(t)$，$y_2(t)$ をそれぞれラプラス変換したものである。

伝達関数 $G_1(s)$，$G_2(s)$ が，

$$G_1(s)=\frac{3}{s+2},\quad G_2(s)=\frac{5}{s^2+5s+6}$$

のように与えられているとき，以下の問に答えよ。

(1) 図１の直列結合された制御系の $U(s)$ から $Y_1(s)$ の伝達関数を求めよ。なお，伝達関数は，一つの有理関数で表すとし，分母及び分子は s の多項式で示すこと。

(2) (1) で求めた直列結合された伝達関数に単位ステップ信号を加えたときの出力量 $Y_1(s)$ の定常値を求めよ。

(3) 図 2 の並列結合された制御系のインパルス信号を加えたときの $Y_2(s)$ の時間応答を求めよ。

(4) (3) で求めた並列結合された伝達関数に $u(t)=2\mathrm{e}^{-t}$ を加えたときの $Y_2(s)$ の時間応答を求めよ。

(5) (3) で求めた並列結合された伝達関数の周波数応答において，周波数を十分に大きくしたときの位相を求めよ。

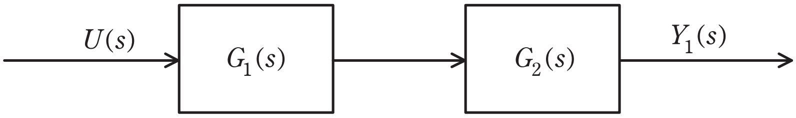


図1 直列結合された制御系

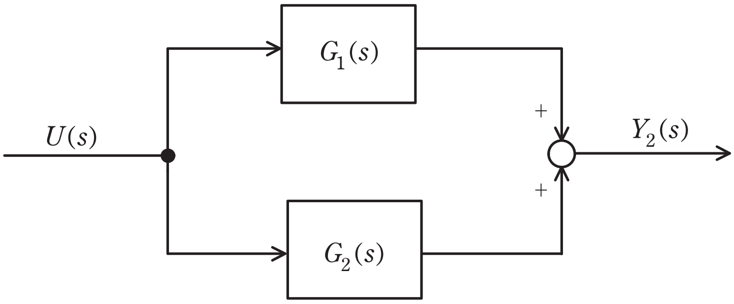


図2 並列結合された制御系

<機械・制御科目>

〔問１の標準解答〕

(1)

(a) (A)の特性曲線は三相短絡特性曲線である。

この特性曲線は，同期機の電機子端子を三相全て短絡し，定格速度で回転させたとき，界磁電流を変化させて電機子短絡電流を測定する試験により得られる。

(b) (B)の特性曲線は無負荷飽和曲線である。

この特性曲線は，同期機の電機子端子を三相全て開放し，定格速度で回転させたとき，界磁電流を変化させて電機子端子電圧を測定する試験により得られる。

(c) 短絡比とは，定格速度で回転させ，端子開放時に定格電圧を発生させる界磁電流において，電機子端子を三相短絡したと仮定したときの持続短絡電流の定格電流に対する比である。

(2)

(a) 定格容量[kV･A]は次のように求められる。

$$144.3 \times 200 \times \sqrt{3} = 49\,987 \quad \rightarrow \quad 50.0\ \mathrm{kV \cdot A}$$ ･･･(答)

(b) 単位法で表した同期インピーダンス[p.u.]は,

$$\frac{1}{\text{短絡比}} = \frac{I_{f2}}{I_{f1}} = 0.892\,86 = 0.893\ \mathrm{p.u.}$$ ･･･(答)

(c) 同期インピーダンスは次のように求められる。

$$\text{同期インピーダンス}[\Omega] = \text{同期インピーダンス}[\mathrm{p.u.}] \times \frac{\dfrac{\text{定格電圧}}{\sqrt{3}}}{\text{定格電流}}$$

$$= 0.892\,86 \times \frac{\dfrac{200}{\sqrt{3}}}{144.3} = 0.714\,47 = 0.714\ \Omega$$ ･･･(答)

〔問２の標準解答〕

(1) 無負荷試験においては励磁回路のみを考えるので，励磁コンダクタンス g_0 の消費電力から，次のように g_0 を求めることができる。

$$g_0 = \frac{P_0}{V_1^2} = \frac{200}{2\,000^2} = 0.5\times10^{-4}\,\mathrm{S}$$

この結果から，次のように励磁サセプタンス b_0 を求めることができる。

$$b_0 = \sqrt{\left(\frac{I_0}{V_1}\right)^2 - g_0^2} = \sqrt{\left(\frac{0.26}{2\,000}\right)^2 - \left(0.5\times10^{-4}\right)^2} = 1.2\times10^{-4}\,\mathrm{S}$$

短絡試験では回路は R， X の直列回路と考えることができるので一次換算全巻線抵抗 R は消費電力から次のように求めることができる。

$$R = \frac{P_{\mathrm{s}}}{I_{1\mathrm{s}}^2} = \frac{400}{5^2} = 16\,\Omega$$

この結果から，次のように一次換算全リアクタンス X を求めることができる。

$$X = \sqrt{\left(\frac{V_{1\mathrm{s}}}{I_{1\mathrm{s}}}\right)^2 - R^2} = \sqrt{\left(\frac{100}{5}\right)^2 - 16^2} = 12\,\Omega$$

$g_0 = 0.5\times10^{-4}\,\mathrm{S}$　　$b_0 = 1.2\times10^{-4}\,\mathrm{S}$　　$R = 16\,\Omega$　　$X = 12\,\Omega$　　・・・(答)

(2) 定格電圧，定格電流をそれぞれ，$V_{1\mathrm{N}}$， $I_{1\mathrm{N}}$ とすると題意より，

$V_{1\mathrm{N}} = 2\,000\,\mathrm{V}$

$I_{1\mathrm{N}} = 5\,\mathrm{A}$

となる。したがって，百分率抵抗降下 p，百分率リアクタンス降下 q を次のように求めることができる。

$$p = R\frac{I_{1\mathrm{N}}}{V_{1\mathrm{N}}}\times100 = 16\times\frac{5}{2\,000}\times100 = 4\,\%$$

$$q = X\frac{I_{1\mathrm{N}}}{V_{1\mathrm{N}}}\times100 = 12\times\frac{5}{2\,000}\times100 = 3\,\%$$

$p = 4\,\%$　　$q = 3\,\%$　　・・・(答)

(3) 力率が 0.8 と与えられているので，

$$\cos\phi = 0.8$$

であり，これより，

$$\sin\phi = \sqrt{1-0.8^2} = 0.6$$

となる。したがって，電圧の変動率は次のように求めることができる。

$$\varepsilon = p\cos\phi + q\sin\phi = 4\times 0.8 + 3\times 0.6 = 5.0\ \%$$

5.0 %　　　・・・(答)

(4) 変圧器は負荷が変化しても二次電圧は一定と考えることができるので出力が $\dfrac{1}{2}$ になったときは負荷電流は $\dfrac{1}{2}$ になり，電圧降下も $\dfrac{1}{2}$ となる。

したがって，百分率抵抗降下 p'，百分率リアクタンス降下 q' は次のようになる。

$$p' = \frac{1}{2}p = 2\ \%$$

$$q' = \frac{1}{2}q = 1.5\ \%$$

$$\varepsilon' = \frac{1}{2}p\cos\phi + \frac{1}{2}q\sin\phi = \frac{1}{2}\times 4\times 0.8 + \frac{1}{2}\times 3\times 0.6 = 2.5\ \%$$

2.5 %　　　・・・(答)

〔問３の標準解答〕

(1) 解答図のとおり。

(2) インダクタの電圧時間積のバランスを考えると次式が得られる。

$$50\left(E - V_{\mathrm{O}}\right) + 150\left(-V_{\mathrm{O}}\right) = 0 \text{ より } V_{\mathrm{O}} = 3\,\mathrm{V}$$

(3) $i_{\mathrm{O}} = I_{\mathrm{O}} = \dfrac{V_{\mathrm{O}}}{R} = 3\,\mathrm{A}$

(4) キャパシタ電流の平均値はゼロであるから，i_{L} の平均値は $I_{\mathrm{L}} = I_{\mathrm{O}} = 3\,\mathrm{A}$ である。

(5) 周期は 0.2 ms で，$L\dfrac{\mathrm{d}i_{\mathrm{L}}}{\mathrm{d}t} = v_{\mathrm{L}}$ であるから，Q がオンのときは，

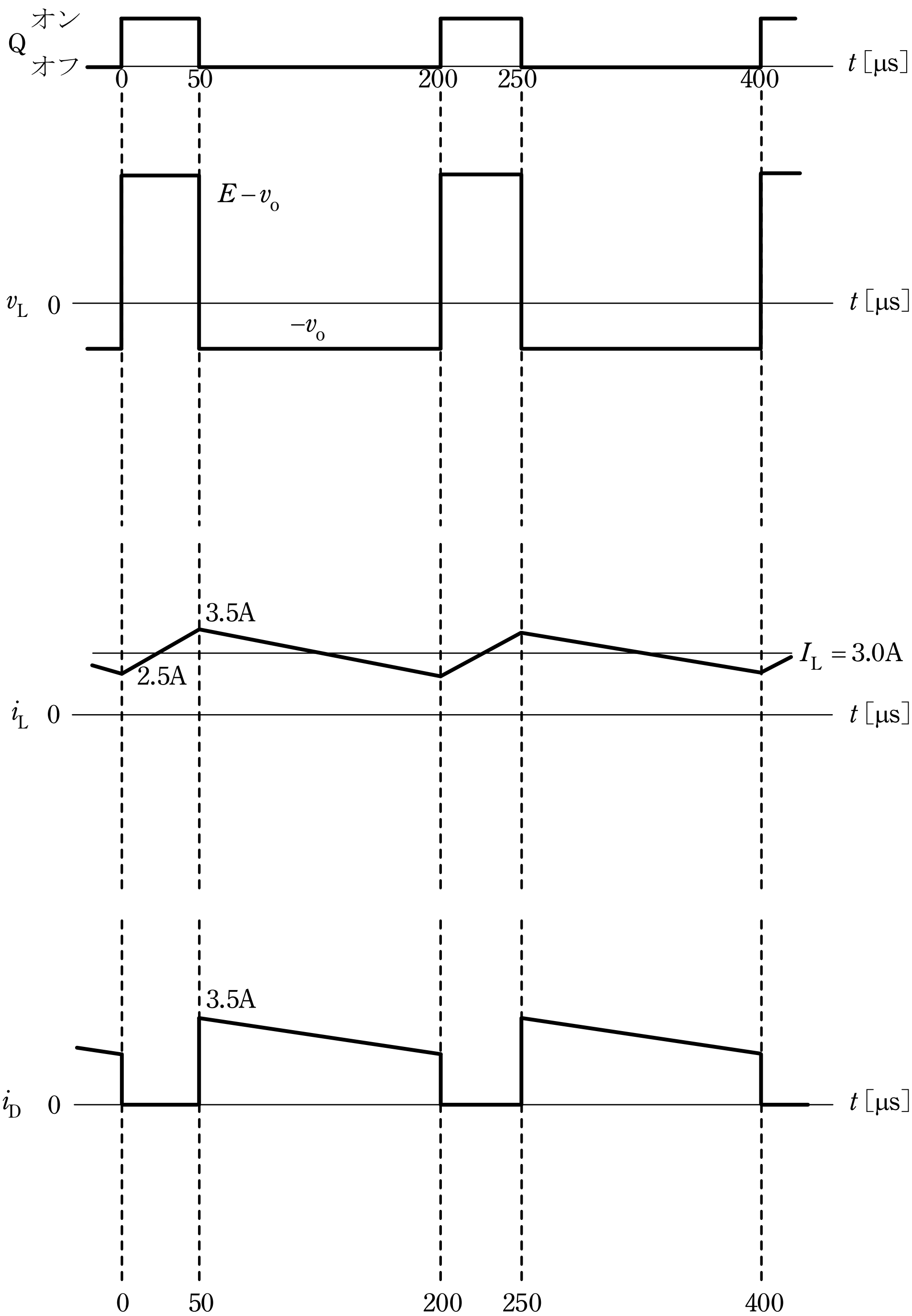
$450\,\mu\mathrm{H} \times \dfrac{\mathrm{d}i_{\mathrm{L}}}{0.2\,\mathrm{ms} \times 0.25} = E - V_{\mathrm{O}} = 9\,\mathrm{V}$ これを計算すると $\mathrm{d}i_{\mathrm{L}} = 1\,\mathrm{A}$ が i_{L} の最大値と最小値の差である。

(6) 小問(4)と(5)より解答図が得られる。

(7) i_{D} が流れるのはＱがオフのときであり，解答図が得られる。

(8) 求めるインダクタンスを L とすると，小問(5)と同様に

$$L = \left(E - V_{\mathrm{O}}\right) \times \frac{\text{オン時間}}{\text{リプル}} = 9 \times \frac{50 \times 10^{-6}}{0.1} = 4.5\,\mathrm{mH} \text{ が求まる。}$$



解答　図2 Qのオン・オフと各部の電圧電流波形

〔問４の標準解答〕

(1) $U(s)$ から $Y_1(s)$ の伝達関数は，直列結合となるのでそれぞれの伝達関数の積で計算できる。よって，

$$G_1(s)G_2(s)=\frac{3}{s+2}\cdot\frac{5}{s^2+5s+6}=\frac{3}{s+2}\cdot\frac{5}{(s+2)(s+3)}=\frac{15}{(s+2)^2(s+3)}$$

$$=\frac{15}{s^3+7s^2+16s+12} \qquad \cdots(\text{答})$$

(2) 単位ステップ入力信号を加えたときの出力の定常値は，伝達関数に $s=0$ を代入することによって得られる。よって，

$$\left.\frac{15}{s^3+7s^2+16s+12}\right|_{s=0}=1.25 \qquad \cdots(\text{答})$$

(3) $U(s)$ から $Y_2(s)$ の伝達関数は，並列結合となるのでそれぞれの伝達関数の和で計算できる。よって，

$$G_1(s)+G_2(s)=\frac{3}{s+2}+\frac{5}{s^2+5s+6}=\frac{3}{s+2}+\frac{5}{(s+2)(s+3)}=\frac{1}{s+2}\left(3+\frac{5}{s+3}\right)$$

$$=\frac{1}{s+2}\cdot\frac{3s+14}{s+3}=\frac{3s+14}{(s+2)(s+3)}=\frac{3s+14}{s^2+5s+6}$$

となる。

求めるインパルス応答は，この伝達関数の逆ラプラス変換を計算することによって求められる。逆ラプラス変換を計算するために，次のように部分分数展開を行う。

$$\frac{3s+14}{s^2+5s+6}=c_1\frac{1}{s+2}+c_2\frac{1}{s+3}$$

このとき，c_1，c_2 は，

$$c_1=\left.\frac{3s+14}{s+3}\right|_{s=-2}=8$$

$$c_2=\left.\frac{3s+14}{s+2}\right|_{s=-3}=-5$$

となる。ここで，逆ラプラス変換の公式

$$\mathcal{L}^{-1}\left[\frac{1}{s+\alpha}\right]=\mathrm{e}^{-\alpha t}$$

を用いると求めるインパルス応答は,

$$\mathcal{L}^{-1}\left[\frac{3s+14}{s^2+5s+6}\right]=8\cdot\mathcal{L}^{-1}\left[\frac{1}{s+2}\right]-5\cdot\mathcal{L}^{-1}\left[\frac{1}{s+3}\right]$$

$$=8\mathrm{e}^{-2t}-5\mathrm{e}^{-3t}$$

となる。 ・・・(答)

(4) $u(t)=2\mathrm{e}^{-t}$ のラプラス変換 $U(s)$ は,

$$U(s)=\mathcal{L}\left[2\mathrm{e}^{-t}\right]=2\mathcal{L}\left[\mathrm{e}^{-t}\right]=\frac{2}{s+1}$$

となることから並列結合された出力信号のラプラス変換 $Y_2(s)$ は,

$$Y_2(s)=\frac{3s+14}{s^2+5s+6}\cdot\frac{2}{s+1}=\frac{6s+28}{(s+1)(s+2)(s+3)}$$

となる。求める応答は, $Y_2(s)$ の逆ラプラス変換を計算することによって求められる。逆ラプラス変換を計算するために, つぎのように部分分数展開を行う。

$$\frac{6s+28}{(s+1)(s+2)(s+3)}=c_1\frac{1}{s+1}+c_2\frac{1}{s+2}+c_3\frac{1}{s+3}$$

このとき, c_1, c_2, c_3 は,

$$c_1=\left.\frac{6s+28}{(s+2)(s+3)}\right|_{s=-1}=11$$

$$c_2=\left.\frac{6s+28}{(s+1)(s+3)}\right|_{s=-2}=-16$$

$$c_3=\left.\frac{6s+28}{(s+1)(s+2)}\right|_{s=-3}=5$$

となる。ここで, 逆ラプラス変換の公式

$$\mathcal{L}^{-1}\left[\frac{1}{s+\alpha}\right]=\mathrm{e}^{-\alpha t}$$

を用いると求めるインパルス応答は，

$$\mathcal{L}^{-1}\left[\frac{6s+28}{(s+1)(s+2)(s+3)}\right]=11\cdot\mathcal{L}^{-1}\left[\frac{1}{s+1}\right]-16\cdot\mathcal{L}^{-1}\left[\frac{1}{s+2}\right]+5\cdot\mathcal{L}^{-1}\left[\frac{1}{s+3}\right]$$

$$=11\mathrm{e}^{-t}-16\mathrm{e}^{-2t}+5\mathrm{e}^{-3t}$$

となる。 ・・・(答)

(5) 並列結合された伝達関数は，相対次数が 1 である。また，分子多項式の零点が安定であるため，最小位相推移系となる。したがって，位相は -90° となる。

・・・(答)