

パワーエレクトロニクス 期末レポート

61908697 佐々木良輔

1.(1)

図 1 の波形は奇関数なので

$$A_n = 0$$

である. Fourier 正弦係数は

$$\begin{aligned} B_n &= \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x) \sin nx dx \\ &= \frac{1}{\pi} \left(\left(\int_{\theta}^{\frac{\pi}{2}-\theta} + \int_{\frac{\pi}{2}+\theta}^{\pi-\theta} \right) V \sin nx dx + \left(\int_{\pi+\theta}^{\frac{3\pi}{2}-\theta} + \int_{\frac{3\pi}{2}+\theta}^{2\pi-\theta} \right) (-V) \sin nx dx \right) \\ &= \frac{2V}{\pi} \left(\int_{\theta}^{\frac{\pi}{2}-\theta} + \int_{\frac{\pi}{2}+\theta}^{\pi-\theta} \right) \sin nx dx \\ &= \frac{2V}{n\pi} \left(\cos n\theta - \cos \left(\frac{n\pi}{2} - n\theta \right) + \cos \left(\frac{n\pi}{2} + \theta \right) - \cos(n\pi - n\theta) \right) \\ &= \frac{4V}{(2m+1)\pi} \left(\cos(2m+1)\theta + (-1)^{m+1} \sin(2m+1)\theta \right) \end{aligned}$$

ここで m は非負整数である. 実際に $0 \leq m \leq 20$ でプロットすると図 2 のようになる.

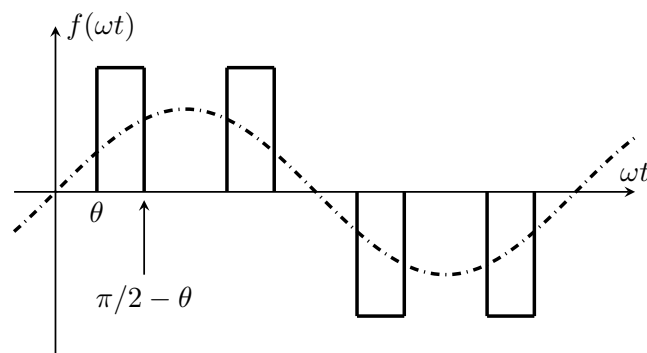


図 1 波形

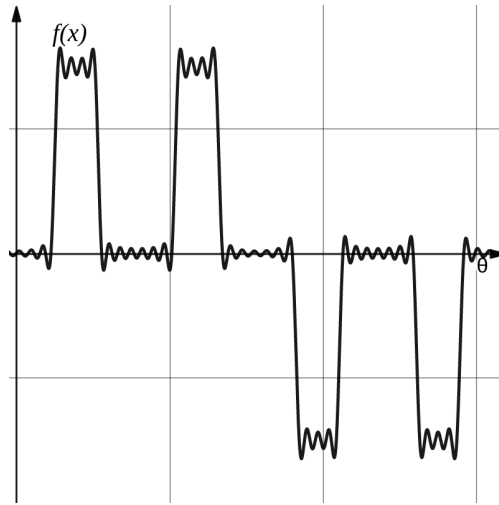


図 2 $0 \leq m \leq 20$ でのプロット

1.(2)

波形の実効値は

$$\begin{aligned}
 V_{\text{eff}} &= \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} (f(x))^2 dx} \\
 &= \sqrt{\frac{1}{2\pi} \left(\int_{\theta}^{\frac{\pi}{2}-\theta} + \int_{\frac{\pi}{2}+\theta}^{\pi-\theta} + \int_{\pi+\theta}^{\frac{3\pi}{2}-\theta} + \int_{\frac{3\pi}{2}+\theta}^{2\pi-\theta} \right) V^2 dx} \\
 &= \sqrt{\frac{1}{\pi} (\pi - 4\theta) V^2}
 \end{aligned}$$

である. 波形の Fourier 級数展開は

$$f(x) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4V}{(2n-1)\pi} \left(\cos(2n-1)\theta + (-1)^n \sin(2n-1)\theta \right) \sin(2n-1)x$$

であるので, 基本波の実効値は

$$V_1 = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(\frac{4V}{\pi} (\cos \theta - \sin \theta) \right)$$

直流成分は

$$V_0 = 0$$

である.

1.(3)

歪み率は

$$\text{THD} = \frac{\sqrt{V_{\text{eff}}^2 - V_1^2 - V_0^2}}{V_1} = \sqrt{\frac{\pi}{8} \frac{\pi - 4\theta}{(\cos \theta - \sin \theta)^2} - 1}$$

である. これは $\theta = 0$ のとき $\text{THD} \simeq 0.483$ となり, 矩形波の歪み率と一致する.

2.(1)

ターンオフ動作

2.(2)

図 3 に安全動作領域図を示す. ここで線分 PQ は

$$v = -\frac{3}{40}v + \frac{55}{2}$$

であり $i = 240$ では $v = 9.5$ となる. したがって B 点は安全動作領域外であり, デバイスは安全に動作しない.

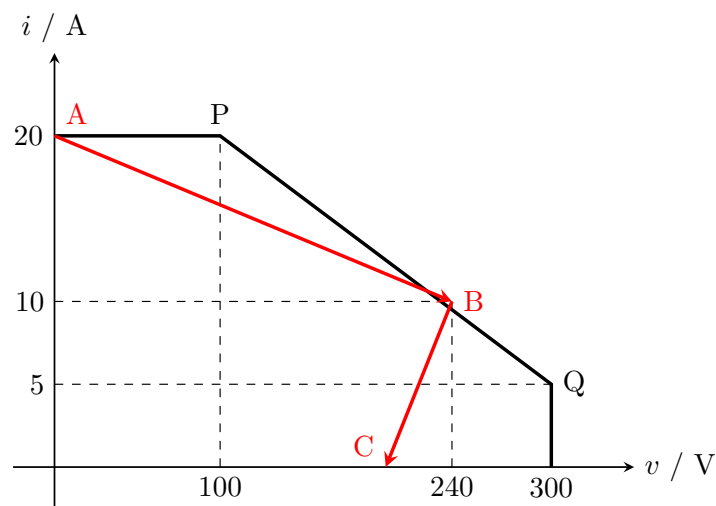


図 3 安全動作領域

2.(3)

前問で得た式から線分 PQ の電流 10 A における値は

$$v = \frac{40}{3} \left(\frac{55}{2} - 10 \right) = \frac{700}{3} \text{ V} \simeq 233.3 \text{ V}$$

である. したがって $v_{ce} = 233.3 \text{ V}$ まで減少すれば安全に動作する. そのときの安全動作領域図は図 4 である.

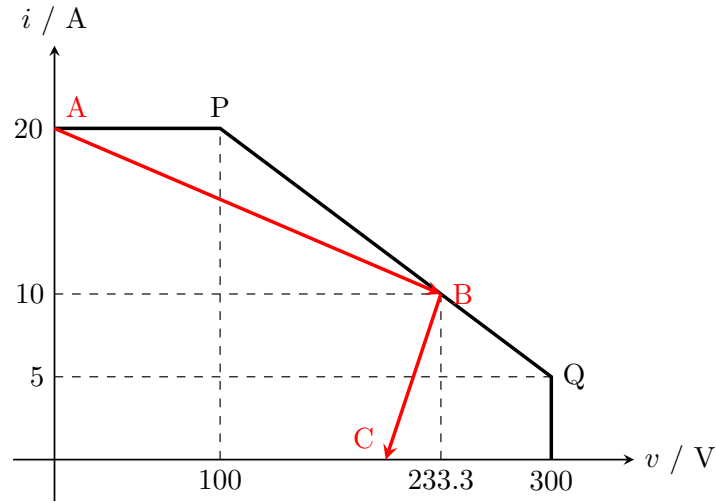


図 4 安全動作領域

3.(1)

スイッチ ON 時, スイッチ両端電圧が 2 V なので負荷には 98 V の電圧が印加され, 9.8 A の電流が流れる. したがって平均オン損失は

$$P_{\text{on}} = 0.6 \times 2 \times 9.8 = 11.76 \text{ W}$$

3.(2)

オン電圧, オフ電流を無視すると v_{ce} 及び i の 1 周期の波形は図 5 のようになる. したがってスイッチング 1 回あたりのスイッチング損失 J_{sw} は

$$J_{\text{sw}} = \int_0^{\Delta T} E \left(1 - \frac{t}{\Delta T} \right) I \frac{t}{\Delta T} dt = \frac{EI}{6} \Delta t$$

スイッチングは 1 秒間に $2/T$ 回行われるので平均のスイッチング損失は

$$P_{\text{sw}} = \frac{EI}{8} \frac{2\Delta T}{T} = \frac{100 \times 10}{6} \frac{2 \times 2 \times 10^{-6}}{10 \times 10^{-6}} = \frac{200}{3} \text{ W} = 66.67 \text{ W}$$

3.(3)

オフ電流を無視すると入力電力は

$$P_{\text{in}} = 0.6 \times 100 \times 9.8 = 588.0 \text{ W}$$

なので効率は

$$\eta = \frac{588.0 - (11.76 + 66.67)}{588.0} = 0.8666$$

となる.

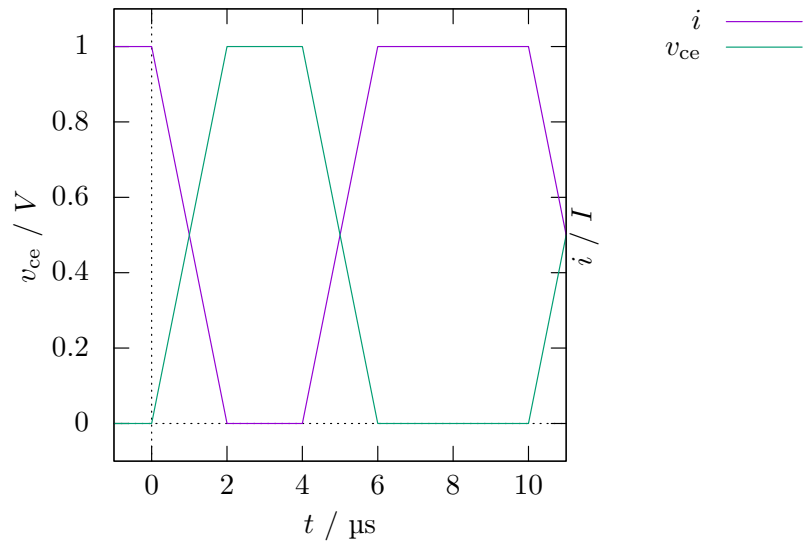


図 5 v_{ce} 及び i

4.(1)

ダイオードブリッジの両端の電圧を v_D 、サイリスタブリッジの両端の電圧を v_T とする。このとき $e_d = v_D + v_T$ である、 i_d が連続して流れていることから消弧角は 0 である。したがって $\alpha = \pi/6$ のとき v_D 、 v_T 及び e_d は図 6 のような波形になる。以上から電圧の平均は

$$\begin{aligned}
 E_d &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} e_d dx \\
 &= \frac{2\sqrt{2}V}{\pi} \int_{\pi/6}^{\pi} \sin x dx \\
 &= \frac{\sqrt{2}V}{\pi} (2 + \sqrt{3}) \simeq 336 \text{ V}
 \end{aligned}$$

また電流の平均は

$$I_d = \frac{E_d}{R} = 6.72 \text{ A}$$

となる。

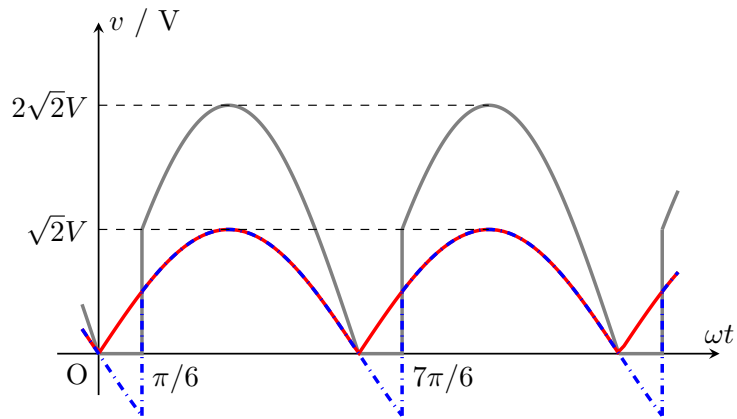


図 6 波形 (赤線: v_D , 青線: v_T , 灰線: $v_D + v_T$)

4.(2)

$\alpha = \pi$ のとき波形は図 7 のようになる. このとき明らかに

$$E_d = 0$$

で最小値を取る. また $\alpha = 0$ のとき波形は図 8 のようになる. このとき e_d の平均値は

$$\begin{aligned} E_d &= \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} e_d dx \\ &= \frac{4\sqrt{2}V}{\pi} \simeq 360 \text{ V} \end{aligned}$$

で最大値を取る.

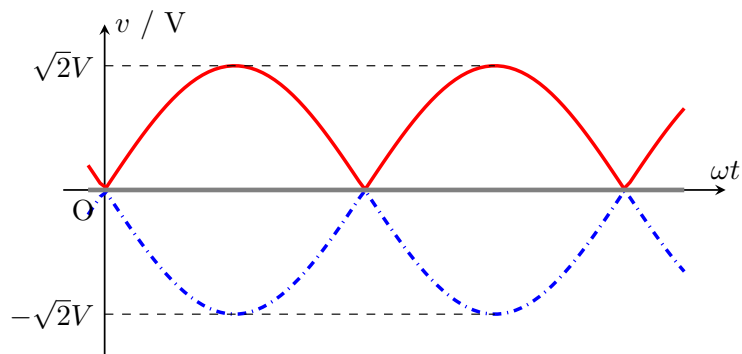


図 7 最小値の波形 (赤線: v_D , 青線: v_T , 灰線: $v_D + v_T$)

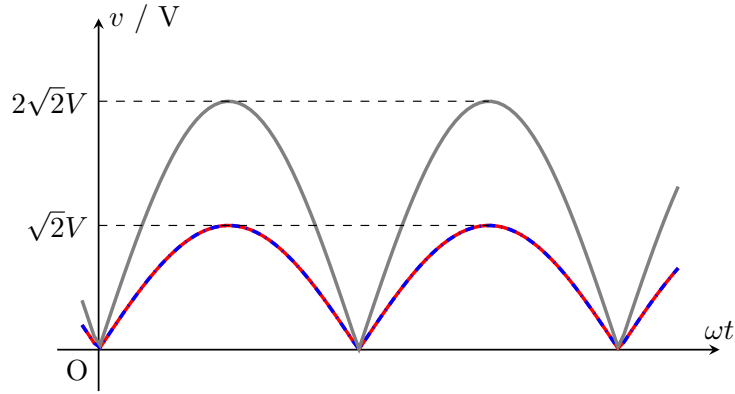


図 8 最大値の波形 (赤線: v_D , 青線: v_T , 灰線: $v_D + v_T$)

5.(1)

$C \gg 1$ から v_o, i_R は直流とする. また $L \gg 1$ から i_L は直流とする. ここで v_L は図 9 のようになっているが, 青い部分の面積と赤い部分の面積が等しくあるべきことと, $d = 0.5$ から $V_o = E$ となる. したがって

$$v_o = E, \quad i_R = \frac{E}{R}$$

となる. まずスイッチオン時にはダイオードの左右がそれぞれ閉回路を形成することから

$$i_{D_{\text{on}}} = 0, \quad i_{S_{\text{on}}} = i_L, \quad i_R = -i_{C_{\text{on}}} = \frac{E}{R}$$

次にスイッチオフ時にはインダクタンスからのエネルギー放出で負荷に電流が流れるので

$$i_{S_{\text{off}}} = 0, \quad i_{D_{\text{off}}} = i_L = i_{C_{\text{off}}} + i_R, \quad i_R = \frac{E}{R}$$

また定常状態ではコンデンサの電荷が維持されるべきなので, 放電量と充電量は等しくなるべきである. したがって

$$i_{C_{\text{on}}} = -i_{C_{\text{off}}}$$

以上を連立すれば

$$\begin{aligned} i_{D_{\text{on}}} &= 0, & i_{D_{\text{off}}} &= 2\frac{E}{R} \\ i_{S_{\text{on}}} &= 2\frac{E}{R}, & i_{S_{\text{off}}} &= 0 \\ v_{L_{\text{on}}} &= -E, & v_{L_{\text{off}}} &= E \end{aligned}$$

となり, 波形は図 10 のようになる.

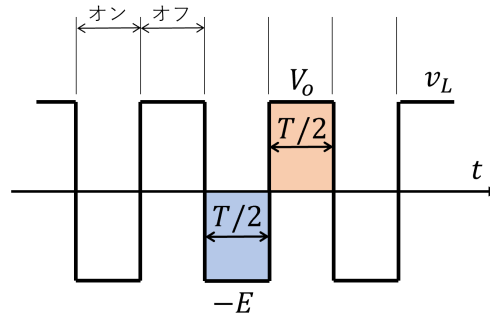


図9 v_L の波形

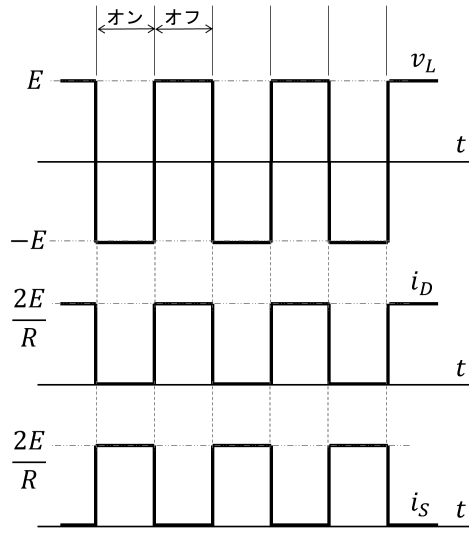


図10 v_L, i_S, i_D の波形

5.(2)

コンデンサの損失を R_C , 両端電圧を v_C とおく. 前問と同様に定常状態においては

$$v_{L_{\text{on}}} = -v_{L_{\text{off}}} = -E \quad (1)$$

$$-i_{C_{\text{on}}} = i_{C_{\text{off}}} = i_C \quad (2)$$

である. 加えて $C \gg 1$ から

$$v_{C_{\text{on}}} = v_{C_{\text{off}}} \quad (3)$$

である. またオン時には

$$i_{D_{\text{on}}} = 0 \quad (4)$$

$$i_{S_{\text{on}}} = i_{L_{\text{on}}} \quad (5)$$

$$i_{R_{\text{on}}} = i_C \quad (6)$$

$$v_{o_{\text{on}}} = Ri_{R_{\text{on}}} \quad (7)$$

$$v_C = v_{o_{\text{on}}} + R_C i_C = (R + R_C) i_C \quad (8)$$

が, オフ時には

$$i_{S_{\text{off}}} = 0 \quad (9)$$

$$i_{L_{\text{off}}} = i_{L_{\text{on}}} \quad (10)$$

$$i_{D_{\text{off}}} = i_{L_{\text{off}}} = i_C + i_{R_{\text{off}}} \quad (11)$$

$$v_{o_{\text{off}}} = E = Ri_{R_{\text{off}}} = 240 \text{ V} \quad (12)$$

$$v_C = E - R_C i_C \quad (13)$$

が成り立つ. ここで (12) から

$$i_{R_{\text{off}}} = \frac{E}{R} = 12.0 \text{ A} \quad (14)$$

である. また (3), (6), (8), (13) から

$$\begin{aligned} (R + R_C)i_C &= E - R_C i_C \\ \therefore i_C &= i_{R_{\text{on}}} = \frac{E}{R + 2R_C} \simeq 11.9 \text{ A} \end{aligned} \quad (15)$$

したがって (11), (14), (15) から

$$i_{D_{\text{off}}} = \frac{2E(R + R_C)}{R(R + 2R_C)} \simeq 23.9 \text{ A} \quad (16)$$

また (5), (10), (11) から

$$i_{S_{\text{on}}} = i_{D_{\text{off}}} \quad (17)$$

また (7), (15) から

$$v_{o_{\text{on}}} = 238 \text{ V} \quad (18)$$

である. したがって波形は図 11 のようになる. また R_C による損失は

$$P_C = R_C i_C^2 \simeq 14.1 \text{ W} \quad (19)$$

となる.

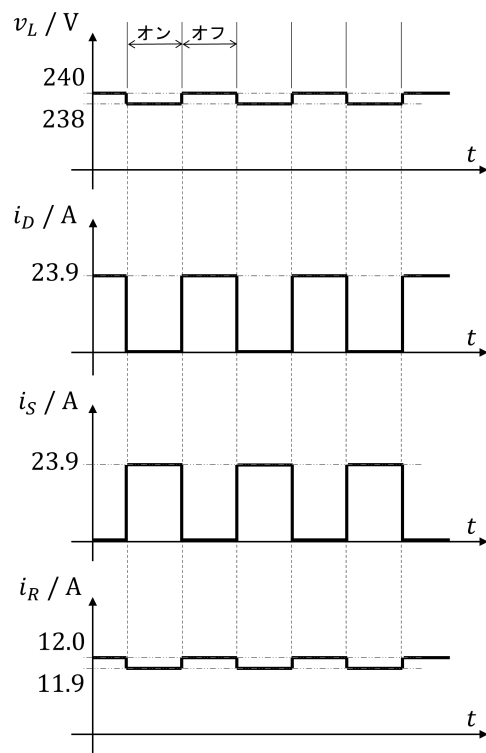


図 11 v_o, i_D, i_R, i_S の波形

6.

PWM の周波数が十分高いとき, 微小時間で平均すると各相の波形は正弦波になる. すなわち各相の波形は

$$\begin{aligned}v_{uo} &\propto \sin \omega t \\v_{vo} &\propto \sin \left(\omega t + \frac{2\pi}{3} \right) \\v_{wo} &\propto \sin \left(\omega t + \frac{4\pi}{3} \right)\end{aligned}$$

である. 中性点の電圧は

$$v_{no} = v_{uo} + v_{vo} + v_{wo}$$

である. これは単位円を用いて考えることができる. これらは図 12 の各点の虚部に当たるが, 正三角形の重心の公式から

$$z_G = 0 = \frac{z_A + z_B + z_C}{3}$$

である. したがって

$$v_{no} = 0$$

となる. 以上から中性点に流れ込む電力は

$$\begin{aligned}P &\propto v_{uo}^2 + v_{vo}^2 + v_{wo}^2 \\&= \sin^2 \omega t + \sin^2 \left(\omega t + \frac{2\pi}{3} \right) + \sin^2 \left(\omega t + \frac{4\pi}{3} \right) \\&= \frac{1}{2} \left(1 - \cos 2\omega t + 1 - \cos \left(2\omega t + \frac{4\pi}{3} \right) + 1 - \cos \left(2\omega t + \frac{8\pi}{3} \right) \right) \\&= \frac{3}{2}\end{aligned}$$

となり定数になる. 以上から入力電力は一定になる.

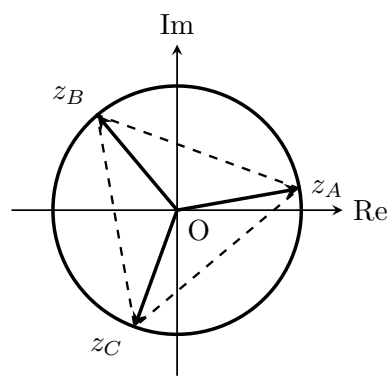


図 12 単位円による解析