パワーエレクトロニクス
第五回　多相整流回路

2020年5月20日

授業の予定

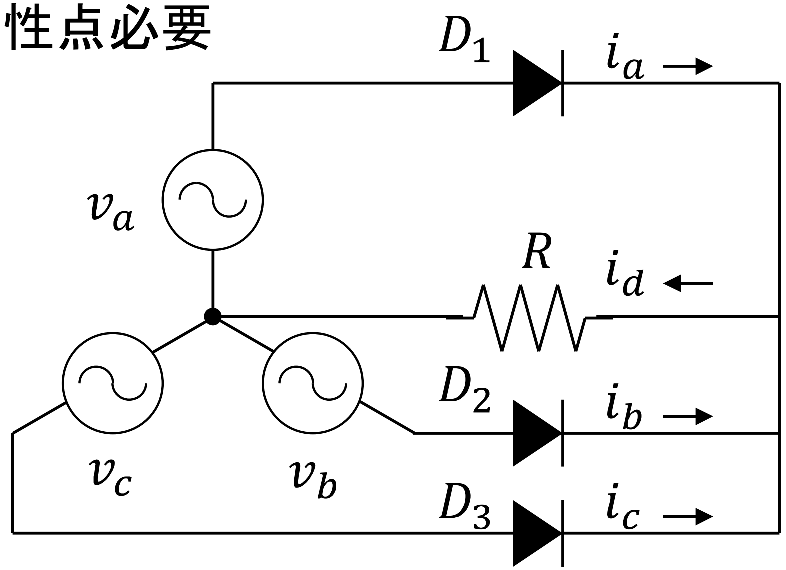
- パワーエレクトロニクス緒論
- パワーエレクトロニクスにおける基礎理論
- パワー半導体デバイス
- 整流回路
- 整流回路の交流側特性と他励式インバータ
- 交流電力制御とサイクロコンバータ
- 直流チョッパ
- DC-DCコンバータと共振形コンバータ
- 自励式インバータ
- 演習

多相整流回路

- 半波整流回路
- 全波整流回路
- 負荷条件
  - 抵抗負荷
  - 誘導負荷
- 出力
  - 電圧
  - 高調波
  - 歪率
- 可制御素子
  - サイリスタを用いた点弧位相制御
    - 誘導負荷
    - 起電力付誘導負荷
    - 定電流源
- 転流
  - 転流重なり角

ダイオード整流回路
三相半波整流回路　抵抗負荷

中性点必要

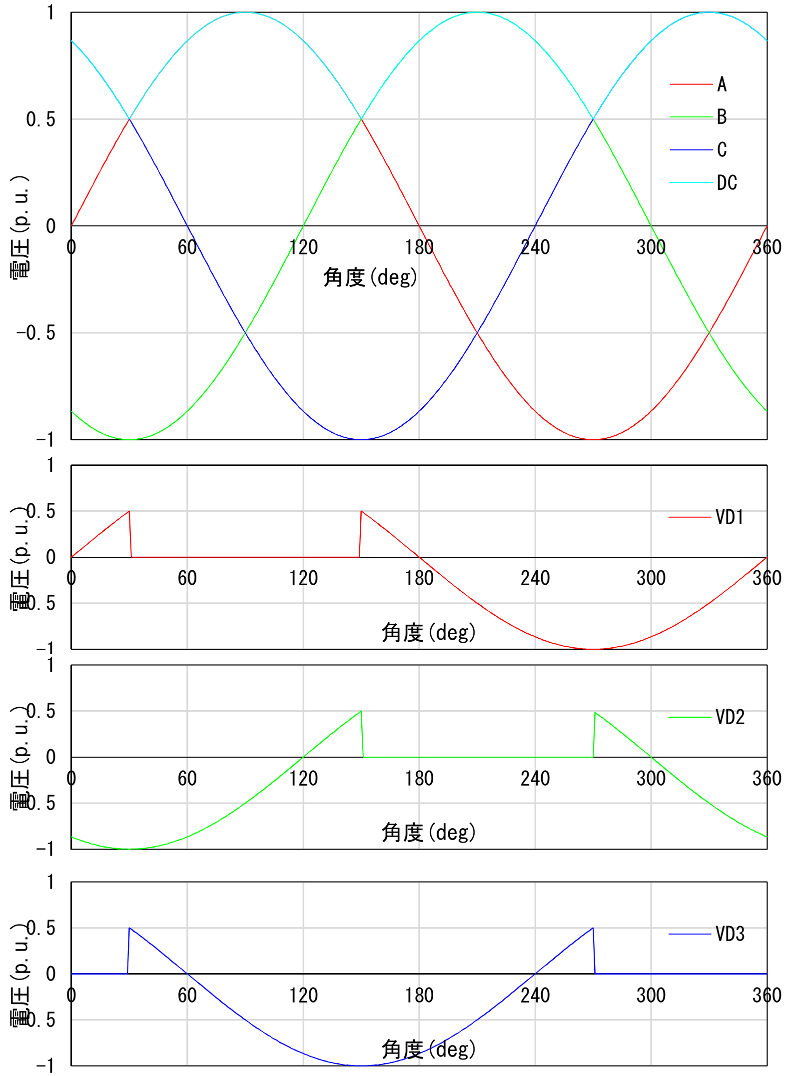


平衡三相交流電圧

$$v_a = V \sin \omega t$$

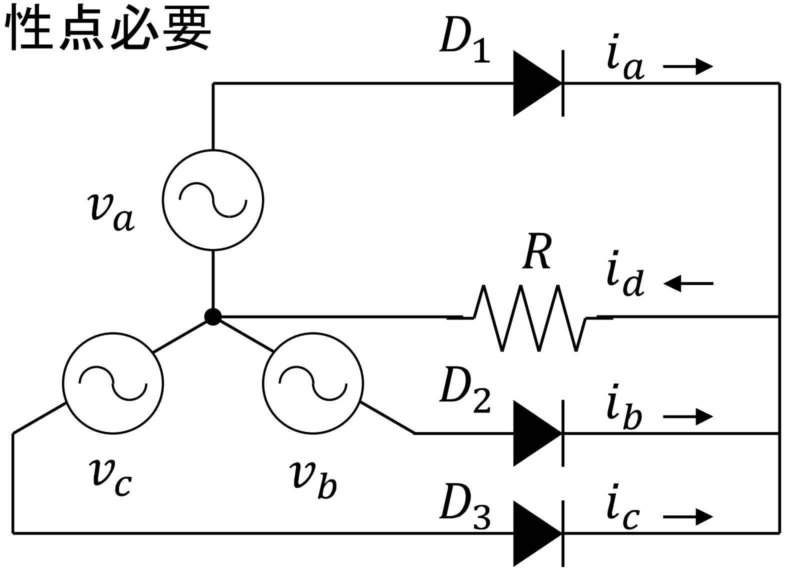
$$v_b = V \sin \left(\omega t - \frac{2}{3} \pi \right)$$

$$v_c = V \sin \left(\omega t + \frac{2}{3} \pi \right)$$

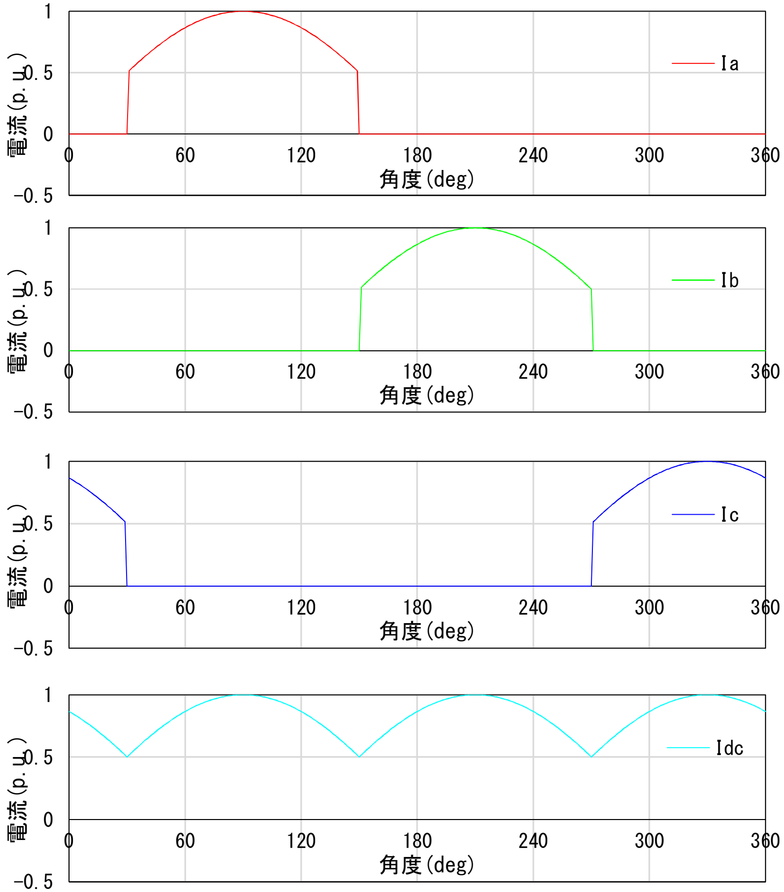


ダイオード整流回路
三相半波整流回路　抵抗負荷

中性点必要

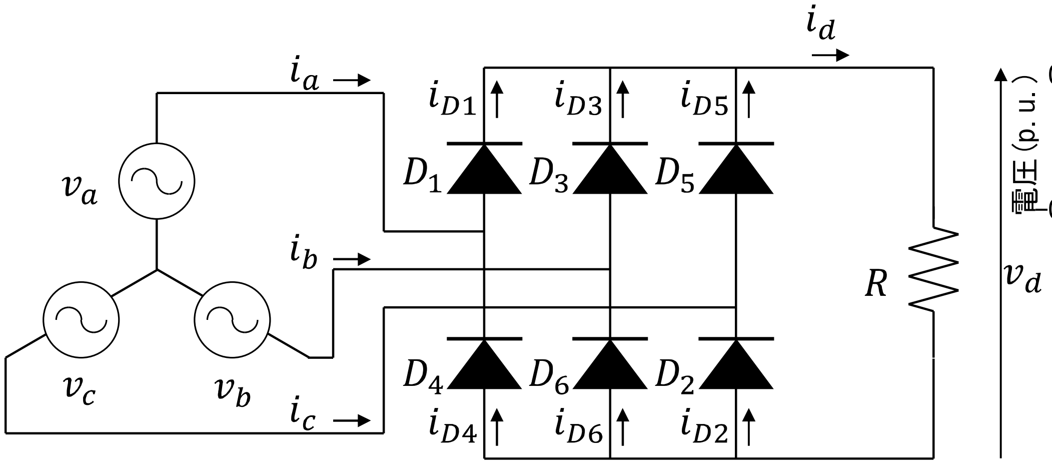


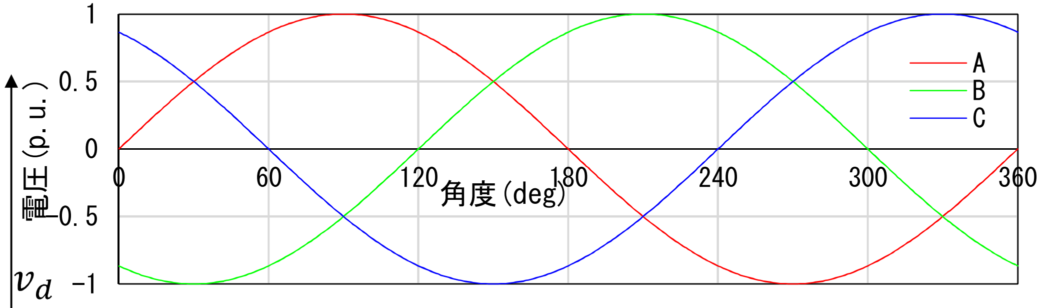
最も電圧の高い相の
ダイオードが導通する



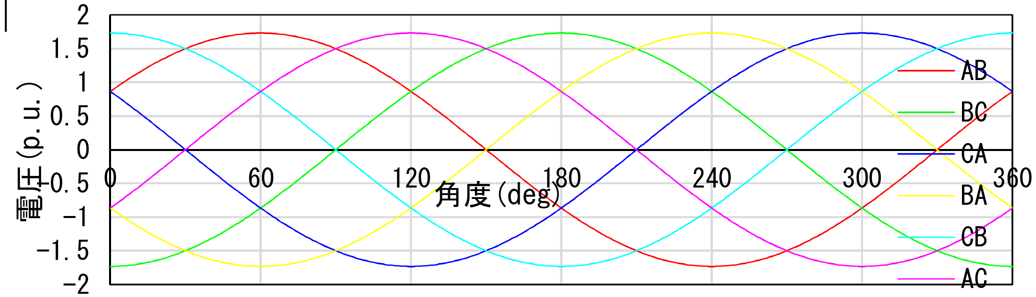
電流

ダイオード整流回路
三相全波整流回路　抵抗負荷





相電圧



線間電圧

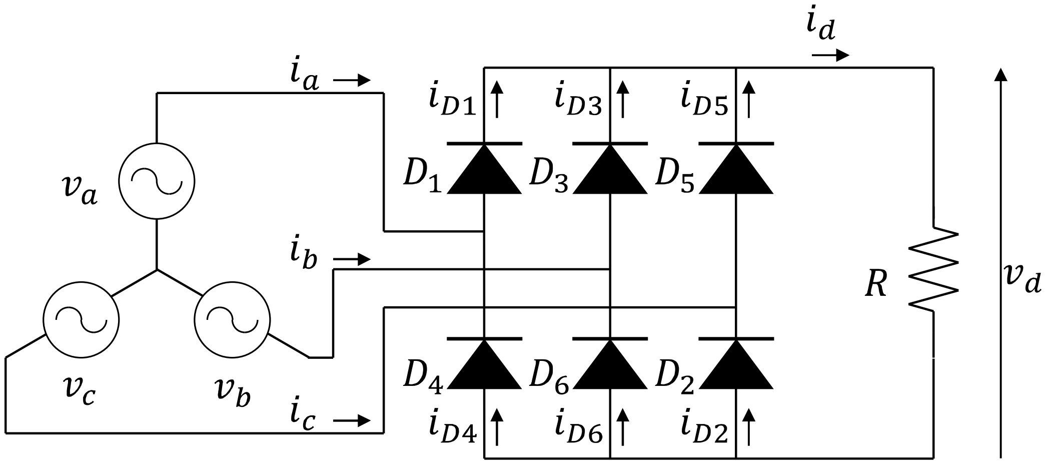
平衡三相交流電圧

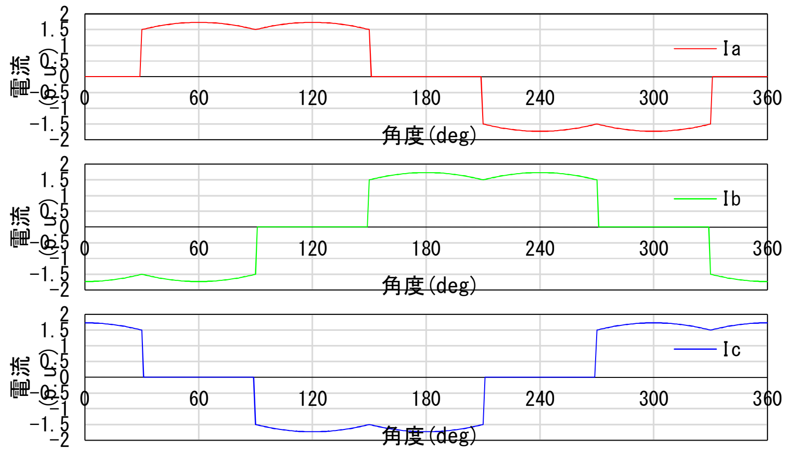
$$v_a = V\sin\omega t$$

$$v_b = V\sin\left(\omega t - \frac{2}{3}\pi\right)$$

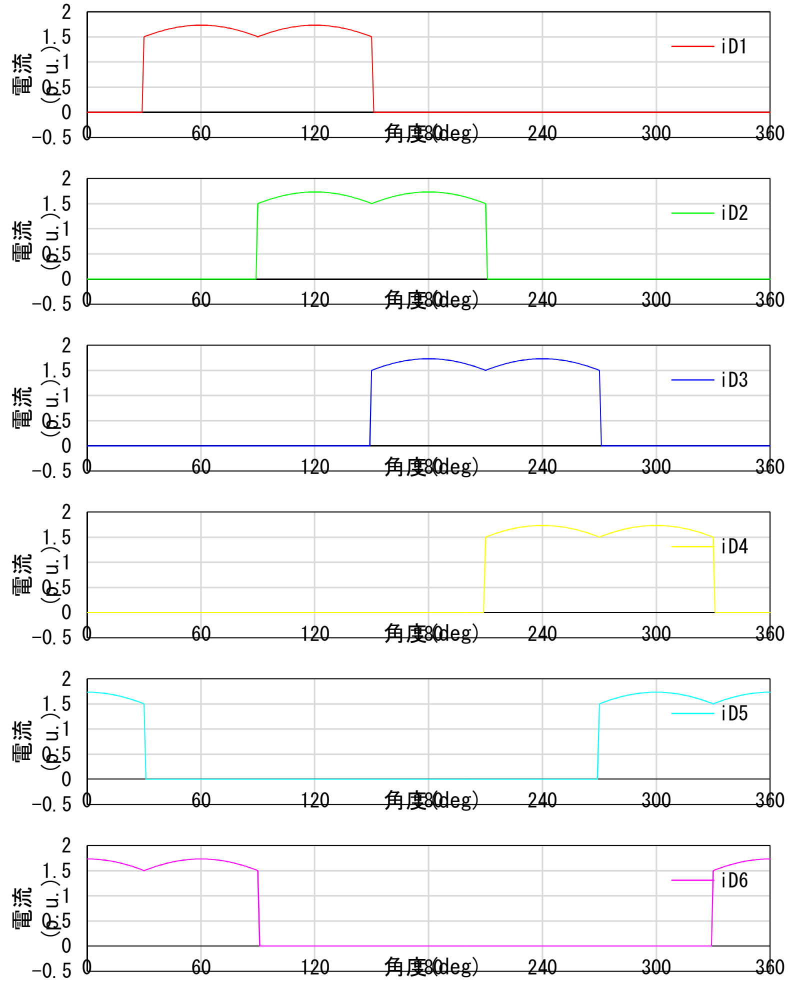
$$v_c = V\sin\left(\omega t + \frac{2}{3}\pi\right)$$

ダイオード整流回路
三相全波整流回路　抵抗負荷



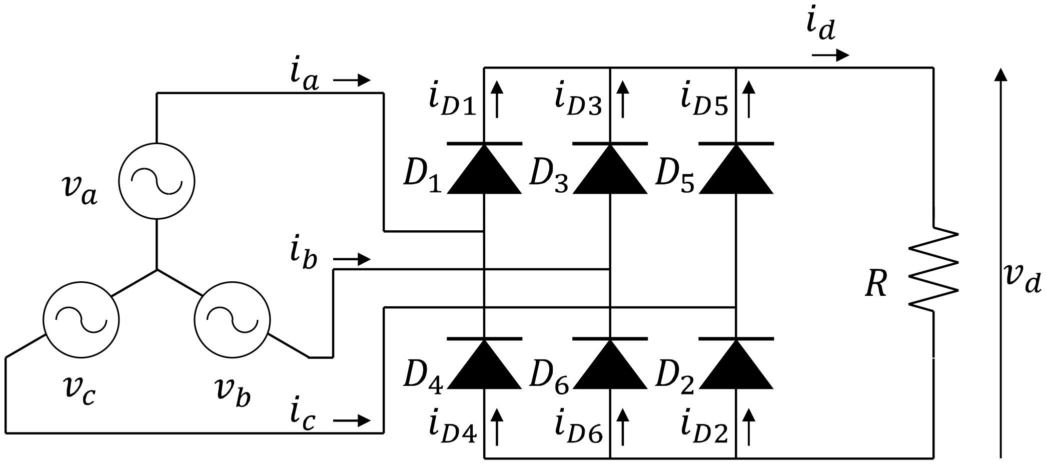


相電流



ダイオード電流

ダイオード整流回路
三相全波整流回路　抵抗負荷



平衡三相交流電圧

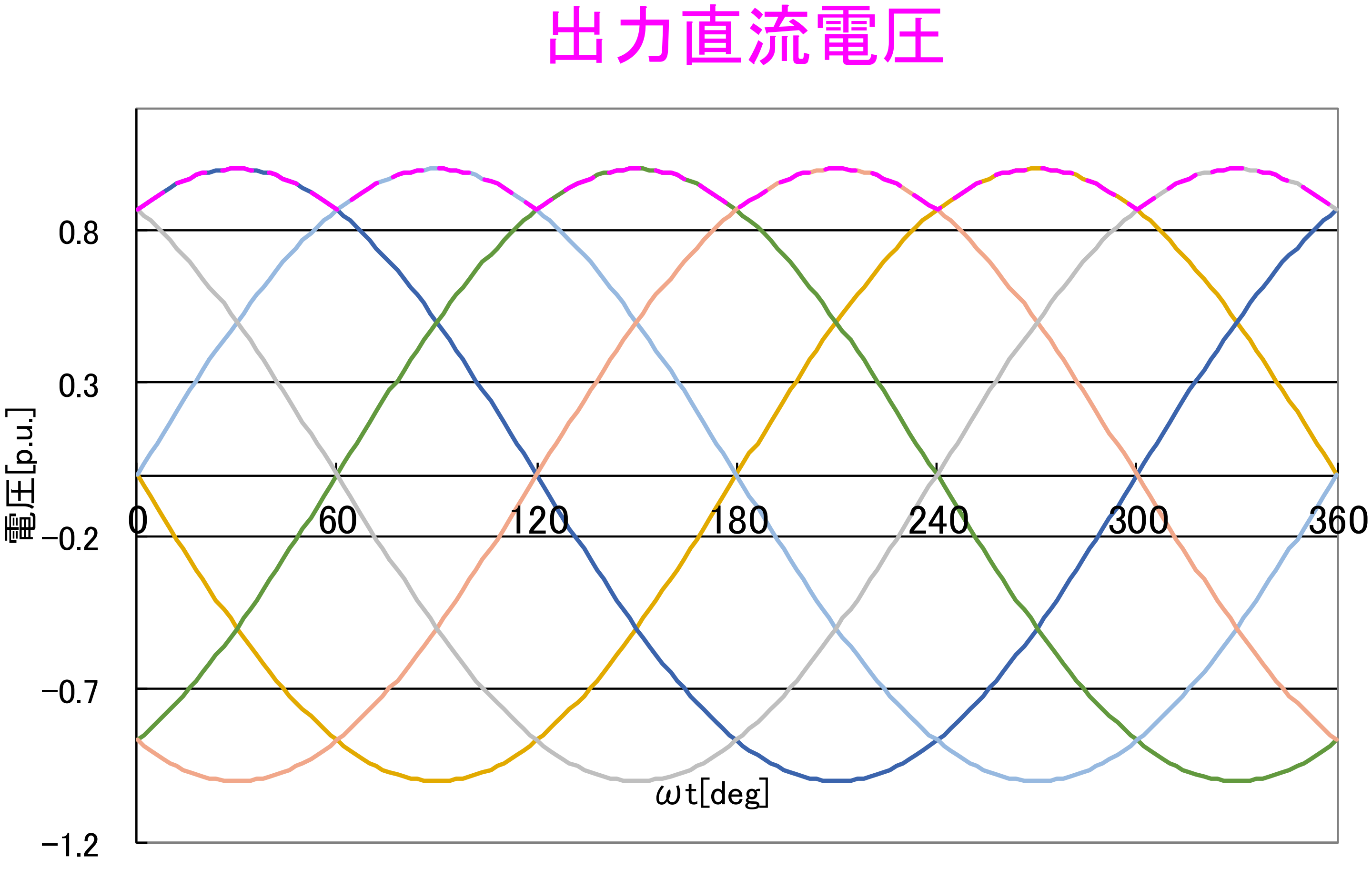
$$v_a = V \sin \omega t$$

$$v_b = V \sin\left(\omega t - \frac{2}{3}\pi\right)$$

$$v_c = V \sin\left(\omega t + \frac{2}{3}\pi\right)$$

- 導通状態となるのは上下アーム共に一つずつ
- 最も相電圧の高い相の上アームが導通
- 最も相電圧の低い相の下アームが導通
- 同じ相の上下アームが同時に導通状態となることはない
- 負荷には線間電圧が出力

ダイオード整流回路
三相全波整流回路　抵抗負荷



ダイオード整流回路
三相全波整流回路　抵抗負荷

- 相電圧と線間電圧の関係
  - $V_{ab} = V \sin \omega t - V \sin\left(\omega t - \frac{2}{3}\pi\right)$

$$= V\left\{\sin \omega t - \sin \omega t \cos \frac{2}{3}\pi + \cos \omega t \sin \frac{2}{3}\pi\right\}$$

$$= V\left\{\sin \omega t + \frac{1}{2}\sin \omega t + \frac{\sqrt{3}}{2}\cos \omega t\right\}$$

$$= \sqrt{3}V\left\{\frac{\sqrt{3}}{2}\sin \omega t + \frac{1}{2}\cos \omega t\right\}$$

$$= \sqrt{3}V\left\{\sin \omega t \cos \frac{\pi}{6} + \cos \omega t \sin \frac{\pi}{6}\right\} = \sqrt{3}V \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{6}\right)$$

ダイオード整流回路
三相全波整流回路　抵抗負荷

- 線間電圧
  - $V_{ab} = \sqrt{3}V\sin\left(\omega t + \frac{\pi}{6}\right)$
  - $V_{bc} = \sqrt{3}V\sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)$
  - $V_{ca} = \sqrt{3}V\sin\left(\omega t + \frac{5}{6}\pi\right)$
  - $V_{ba} = \sqrt{3}V\sin\left(\omega t - \frac{5}{6}\pi\right)$
  - $V_{cb} = \sqrt{3}V\sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)$
  - $V_{ac} = \sqrt{3}V\sin\left(\omega t - \frac{\pi}{6}\right)$

- 線間電圧が最大値となる順序
  - ab→ac →bc →ba →ca →cb →ab
  - $V_{ab} = V_{cb}$となる時点$\left(\omega t < \frac{\pi}{6}\right)$を基準にとる$\omega t' = 0$
    - $0 < \omega t' < \frac{\pi}{3}$　　D1, D6
    - $\frac{\pi}{3} < \omega t' < \frac{2\pi}{3}$　　D1, D2
    - $\frac{2\pi}{3} < \omega t' < \pi$　　D2, D3
    - $\pi < \omega t' < \frac{4\pi}{3}$　　D3, D4
    - $\frac{4\pi}{3} < \omega t' < \frac{5\pi}{3}$　　D4, D5
    - $\frac{5\pi}{3} < \omega t' < 2\pi$　　D5, D6

ダイオード整流回路
三相全波整流回路　抵抗負荷

- ダイオード別の導通期間
  - D1　$0 < \omega t' < \frac{2\pi}{3}$
  - D2　$\frac{2\pi}{3} < \omega t' < \pi$
  - D3　$\frac{2\pi}{3} < \omega t' < \frac{4\pi}{3}$
  - D4　$\pi < \omega t' < \frac{5\pi}{3}$
  - D5　$\frac{4\pi}{3} < \omega t' < 2\pi$
  - D6　$\frac{5\pi}{3} < \omega t' < \frac{7\pi}{3}$
  - 各導通期間は$\frac{2\pi}{3}$

- 相電流
  - $i_a = i_{D1} - i_{D4}$
  - $i_b = i_{D3} - i_{D6}$
  - $i_c = i_{D5} - i_{D2}$

ダイオード整流回路
三相全波整流回路　抵抗負荷

- 直流出力平均電圧
  - $V_{Oavg} = \frac{1}{\frac{\pi}{3}} \int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{3}V \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{6}\right) d\omega t$

    $= \frac{3\sqrt{3}V}{\pi}\left[-\cos\left(\omega t + \frac{\pi}{6}\right)\right]_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{\pi}{2}} = \frac{3\sqrt{3}V}{\pi}\left[-\cos\frac{2\pi}{3} + \cos\frac{\pi}{3}\right] = \frac{3\sqrt{3}V}{\pi}$
- 直流出力平均電流
  - $I_{Oavg} = \frac{V_O}{R}$

ダイオード整流回路
三相全波整流回路　抵抗負荷

- 直流出力電圧実効値

$$V_{Orms} = \sqrt{\frac{1}{\frac{\pi}{3}}\int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{\pi}{2}}\left\{\sqrt{3}V\sin\left(\omega t+\frac{\pi}{6}\right)\right\}^2 d\omega t} = \frac{3V}{\sqrt{\pi}}\sqrt{\int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{\pi}{2}}\sin^2\left(\omega t+\frac{\pi}{6}\right)d\omega t}$$

$$= \frac{3V}{\sqrt{\pi}}\sqrt{\int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{\pi}{2}}\frac{1-\cos\left(2\omega t+\frac{\pi}{3}\right)}{2}d\omega t} = \frac{3V}{\sqrt{\pi}}\sqrt{\left[\frac{\omega t}{2}-\frac{\sin\left(2\omega t+\frac{\pi}{3}\right)}{4}\right]_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{\pi}{2}}}$$

$$= \frac{3V}{\sqrt{\pi}}\sqrt{\frac{\pi}{4}-\frac{\pi}{12}-\sin\frac{4\pi}{3}+\sin\frac{2\pi}{3}} = \frac{3V}{\sqrt{\pi}}\sqrt{\frac{\pi}{6}+\sqrt{3}}$$

- 直流出力電流実効値
  - $I_{Orms} = \frac{V_{Orms}}{R} = \frac{3V}{R\sqrt{\pi}}\sqrt{\frac{\pi}{6}+\sqrt{3}}$

ダイオード整流回路 三相全波整流回路　抵抗負荷

- ダイオード一つ当たり導通期間1/3周期
  - 平均電流　$I_{Davg} = \frac{1}{3} I_{Oavg}$
  - 実効値電流　$I_{Drms} = \sqrt{\frac{1}{3} {I_{Orms}}^2} = \frac{1}{\sqrt{3}} I_{Orms}$
- 相電流
  - 実効値電流　$I_{prms} = \sqrt{\frac{2}{3} {I_{Orms}}^2} = \sqrt{\frac{2}{3}} I_{Orms}$
- 交流電源の皮相電力
  - $S = 3VI_{prms}$

ダイオード整流回路
三相全波整流回路　抵抗負荷

- 出力電圧高調波
  - $v_d(t) = \sum_{i=0}^{\infty}[a_i \cos i\omega t + b_i \sin i\omega t]$
    - $a_0 = V_{Oavg} = \frac{3\sqrt{3}V}{\pi}$　　直流成分
    - $b_0 = 0$
    - $a_i = \frac{\sqrt{3}V}{2\pi}\left\{\begin{array}{l} \int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{\pi}{2}} \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{6}\right)\cos i\omega t\, d\omega t + \int_{\frac{\pi}{2}}^{\frac{5\pi}{6}} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{6}\right)\cos i\omega t\, d\omega t \\ + \int_{\frac{5\pi}{6}}^{\frac{7\pi}{6}} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)\cos i\omega t\, d\omega t + \int_{\frac{7\pi}{6}}^{\frac{3\pi}{2}} \sin\left(\omega t - \frac{5\pi}{6}\right)\cos i\omega t\, d\omega t \\ + \int_{\frac{3\pi}{2}}^{\frac{11}{6}} \sin\left(\omega t + \frac{5\pi}{6}\right)\cos i\omega t\, d\omega t + \int_{\frac{11}{6}}^{\frac{13\pi}{6}} \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)\cos i\omega t\, d\omega t \end{array}\right\}$

ダイオード整流回路
三相全波整流回路　抵抗負荷

- a_iの係数
- $\int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{\pi}{2}} \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{6}\right) \cos i\omega t \, d\omega t = \int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{\pi}{2}} \frac{\sin\left((1+i)\omega t+\frac{\pi}{6}\right)-\mathrm{si}\ \ \left((1-i)\omega t\ \ \ \frac{\pi}{6}\right)}{2} d\omega t$
- $= \left[\frac{\cos\left((1-i)\omega t+\frac{\pi}{6}\right)}{2(1-i)} - \frac{\cos\left((1+i)\omega t+\frac{\pi}{6}\right)}{2(1+i)}\right]_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{\pi}{2}}$
- $= \frac{\cos\left((1-i)\frac{\pi}{2}+\frac{\pi}{6}\right)-\cos\left((1-i)\frac{\pi}{6}+\frac{\pi}{6}\right)}{2(1-i)} - \frac{\cos\left((1+i)\frac{\pi}{2}+\frac{\pi}{6}\right)-\cos\left((1+i)\frac{\pi}{6}+\frac{\pi}{6}\right)}{2(1+i)}$
- $= \frac{\cos\left(-\frac{\pi}{2}i+\frac{2\pi}{3}\right)-\cos\left(-\frac{\pi}{6}i+\frac{\pi}{3}\right)}{2(1-i)} - \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2}i+\frac{2\pi}{3}\right)-\cos\left(\frac{\pi}{6}i+\frac{\pi}{3}\right)}{2(1+i)}$

ダイオード整流回路
三相全波整流回路　抵抗負荷

- $\cos\left(-\frac{\pi}{2}i+\frac{2\pi}{3}\right)-\cos\left(-\frac{\pi}{6}i+\frac{\pi}{3}\right)+\cos\left(-\frac{5\pi}{6}i+\frac{2\pi}{3}\right)-\cos\left(-\frac{\pi}{2}i+\frac{\pi}{3}\right)+\cos\left(-\frac{7\pi}{6}i+\frac{2\pi}{3}\right)-\cos\left(-\frac{5\pi}{6}i+\frac{\pi}{3}\right)+\cos\left(-\frac{3\pi}{2}i+\frac{2\pi}{3}\right)-\cos\left(-\frac{7\pi}{6}i+\frac{\pi}{3}\right)+\cos\left(-\frac{11}{6}i+\frac{2\pi}{3}\right)-\cos\left(-\frac{3\pi}{2}i+\frac{\pi}{3}\right)+\cos\left(-\frac{13\pi}{6}i+\frac{2\pi}{3}\right)-\cos\left(-\frac{11}{6}i+\frac{\pi}{3}\right)$
- $=-\cos-\frac{\pi}{6}i-\cos-\frac{\pi}{2}i-\cos-\frac{5\pi}{6}i-\cos-\frac{7\pi}{6}i-\cos-\frac{3\pi}{2}i-\cos-\frac{11\pi}{6}i$
- $=-\left\{\cos\frac{\pi}{6}i+\cos\frac{\pi}{2}i+\cos\frac{5\pi}{6}i+\cos\frac{7\pi}{6}i+\cos\frac{3\pi}{2}i+\cos\frac{11\pi}{6}i\right\}$
  - $\cos\left(A+\frac{2\pi}{3}\right)-\cos\left(A+\frac{\pi}{3}\right)=\cos A\cos\frac{2\pi}{3}-\sin A\sin\frac{2\pi}{3}-\cos A\cos\frac{\pi}{3}+\sin A\sin\frac{\pi}{3}=-\cos A$

ダイオード整流回路
三相全波整流回路　抵抗負荷

- $\cos\left(\frac{\pi}{2}i+\frac{2\pi}{3}\right)-\cos\left(\frac{\pi}{6}i+\frac{\pi}{3}\right)+\cos\left(\frac{5\pi}{6}i+\frac{2\pi}{3}\right)-\cos\left(\frac{\pi}{2}i+\frac{\pi}{3}\right)+\cos\left(\frac{7\pi}{6}i+\frac{2\pi}{3}\right)-\cos\left(\frac{5\pi}{6}i+\frac{\pi}{3}\right)+\cos\left(\frac{3\pi}{2}i+\frac{2\pi}{3}\right)-\cos\left(\frac{7\pi}{6}i+\frac{\pi}{3}\right)+\cos\left(\frac{11\pi}{6}i+\frac{2\pi}{3}\right)-\cos\left(\frac{3\pi}{2}i+\frac{\pi}{3}\right)+\cos\left(\frac{13\pi}{6}i+\frac{2\pi}{3}\right)-\cos\left(\frac{11\pi}{6}i+\frac{\pi}{3}\right)$
- $=-\cos\frac{\pi}{6}i-\cos\frac{\pi}{2}i-\cos\frac{5\pi}{6}i-\cos\frac{7\pi}{6}i-\cos\frac{3\pi}{2}i-\cos\frac{11}{6}i$
- $=-\left\{\cos\frac{\pi}{6}i+\cos\frac{\pi}{2}i+\cos\frac{5\pi}{6}i+\cos\frac{7\pi}{6}i+\cos\frac{3\pi}{2}i+\cos\frac{11}{6}i\right\}$

ダイオード整流回路
三相全波整流回路　抵抗負荷

- $i = 6k$
  - $\cos\frac{\pi}{6}6k + \cos\frac{\pi}{2}6k + \cos\frac{5\pi}{6}6k + \cos\frac{7\pi}{6}6k + \cos\frac{3\pi}{2}6k + \cos\frac{11}{6}6k = 6\cos\pi k = 6(-1)^k$
- $i = 6k + 1$
  - $\cos\frac{\pi}{6}(6k+1) + \cos\frac{\pi}{2}(6k+1) + \cos\frac{5\pi}{6}(6k+1) + \cos\frac{7\pi}{6}(6k+1) + \cos\frac{3\pi}{2}(6k+1) + \cos\frac{11\pi}{6}(6k+1) = 0$
- $i = 6k + 2$
  - $\cos\frac{\pi}{6}(6k+2) + \cos\frac{\pi}{2}(6k+2) + \cos\frac{5\pi}{6}(6k+2) + \cos\frac{7\pi}{6}(6k+2) + \cos\frac{3\pi}{2}(6k+2) + \cos\frac{11\pi}{6}(6k+2) = 0$

ダイオード整流回路
三相全波整流回路　抵抗負荷

- $i=6k+3$
  - $\cos\frac{\pi}{6}(6k+3)+\cos\frac{\pi}{2}(6k+3)+\cos\frac{5\pi}{6}(6k+3)+\cos\frac{7\pi}{6}(6k+3)+\cos\frac{3\pi}{2}(6k+3)+\cos\frac{11\pi}{6}(6k+3)=0$
- $i=6k+4$
  - $\cos\frac{\pi}{6}(6k+4)+\cos\frac{\pi}{2}(6k+1)+\cos\frac{5\pi}{6}(6k+4)+\cos\frac{7\pi}{6}(6k+4)+\cos\frac{3\pi}{2}(6k+4)+\cos\frac{11}{6}(6k+4)=0$
- $i=6k+5$
  - $\cos\frac{\pi}{6}(6k+5)+\cos\frac{\pi}{2}(6k+5)+\cos\frac{5\pi}{6}(6k+5)+\cos\frac{7\pi}{6}(6k+5)+\cos\frac{3\pi}{2}(6k+5)+\cos\frac{11}{6}(6k+5)=0$

ダイオード整流回路
三相全波整流回路　抵抗負荷

- $a_i = \frac{\sqrt{3}V}{2\pi}\left\{\frac{-6(-1)^k}{2(1-i)} - \frac{6(-1)^k}{2(1+i)}\right\}$

$$= \frac{3\sqrt{3}V}{\pi(i^2-1)}(-1)^k$$

- $i = 6k$(6の整数倍の成分のみ)

ダイオード整流回路
三相全波整流回路　抵抗負荷

- $b_i =$

$$\frac{\sqrt{3}V}{2\pi}\left\{\begin{array}{c}\int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{\pi}{2}} \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{6}\right) \sin i\omega t \, d\omega t + \int_{\frac{\pi}{2}}^{\frac{5\pi}{6}} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{6}\right) \sin i\omega t \, d\omega t \\ + \int_{\frac{5\pi}{6}}^{\frac{7\pi}{6}} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) \sin i\omega t \, d\omega t + \int_{\frac{7\pi}{6}}^{\frac{3\pi}{2}} \sin\left(\omega t - \frac{5\pi}{6}\right) \sin i\omega t \, d\omega t \\ + \int_{\frac{3\pi}{2}}^{\frac{11\pi}{6}} \sin\left(\omega t + \frac{5\pi}{6}\right) \sin i\omega t \, d\omega t + \int_{\frac{11}{6}}^{\frac{13}{6}} \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) \sin i\omega t \, d\omega t\end{array}\right\}$$

ダイオード整流回路
三相全波整流回路　抵抗負荷

b_iの係数

$$\int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{\pi}{2}} \sin\left(\omega t+\frac{\pi}{6}\right)\sin i\omega t\,d\omega t=\int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{\pi}{2}}\frac{\cos\left((1-i)\omega t+\frac{\pi}{6}\right)+\cos\left((1+i)\omega t+\frac{\pi}{6}\right)}{2}d\omega t$$

$$=\left[\frac{\sin\left((1-i)\omega t+\frac{\pi}{6}\right)}{2(1-i)}+\frac{\sin\left((1+i)\omega t+\frac{\pi}{6}\right)}{2(1+i)}\right]_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{\pi}{2}}$$

$$=\frac{\sin\left((1-i)\frac{\pi}{2}+\frac{\pi}{6}\right)-\sin\left((1-i)\frac{\pi}{6}+\frac{\pi}{6}\right)}{2(1-i)}$$

$$+\frac{\sin\left((1+i)\frac{\pi}{2}+\frac{\pi}{6}\right)-\sin\left((1+i)\frac{\pi}{6}+\frac{\pi}{6}\right)}{2(1+i)}$$

$$=\frac{\sin\left(-\frac{\pi}{2}i+\frac{2\pi}{3}\right)-\sin\left(-\frac{\pi}{6}i+\frac{\pi}{3}\right)}{2(1-i)}+\frac{\sin\left(\frac{\pi}{2}i+\frac{2\pi}{3}\right)-\sin\left(\frac{\pi}{6}i+\frac{\pi}{3}\right)}{2(1+i)}$$

ダイオード整流回路
三相全波整流回路　抵抗負荷

$$\sin\left(-\frac{\pi}{2}i+\frac{2\pi}{3}\right)-\sin\left(-\frac{\pi}{6}i+\frac{\pi}{3}\right)+\sin\left(-\frac{5\pi}{6}i+\frac{2\pi}{3}\right)-\sin\left(-\frac{\pi}{2}i+\frac{\pi}{3}\right)$$
$$+\sin\left(-\frac{7\pi}{6}i+\frac{2\pi}{3}\right)-\sin\left(-\frac{5\pi}{6}i+\frac{\pi}{3}\right)+\sin\left(-\frac{3\pi}{2}i+\frac{2\pi}{3}\right)-\sin\left(-\frac{7\pi}{6}i+\frac{\pi}{3}\right)$$
$$+\sin\left(-\frac{11\pi}{6}i+\frac{2\pi}{3}\right)-\sin\left(-\frac{3\pi}{2}i+\frac{\pi}{3}\right)+\sin\left(-\frac{13\pi}{6}i+\frac{2\pi}{3}\right)$$
$$-\sin\left(-\frac{11\pi}{6}i+\frac{\pi}{3}\right)$$
$$=\sin-\frac{\pi}{6}i+\sin-\frac{\pi}{2}i+\sin-\frac{5\pi}{6}i+\sin-\frac{7\pi}{6}i+\sin-\frac{3\pi}{2}i+\sin-\frac{11\pi}{6}i$$
$$=-\left\{\sin\frac{\pi}{6}i+\sin\frac{\pi}{2}i+\sin\frac{5\pi}{6}i+\sin\frac{7\pi}{6}i+\sin\frac{3\pi}{2}i+\sin\frac{11\pi}{6}i\right\}$$

- $\sin\left(A+\frac{2\pi}{3}\right)-\sin\left(A+\frac{\pi}{3}\right)=\sin A\cos\frac{2\pi}{3}+\cos A\sin\frac{2\pi}{3}-\sin A\cos\frac{\pi}{3}-\cos A\sin\frac{\pi}{3}=\sin A$

ダイオード整流回路
三相全波整流回路　抵抗負荷

- $\sin\left(\frac{\pi}{2}i+\frac{2\pi}{3}\right)-\sin\left(\frac{\pi}{6}i+\frac{\pi}{3}\right)+\sin\left(\frac{5\pi}{6}i+\frac{2\pi}{3}\right)-\sin\left(\frac{\pi}{2}i+\frac{\pi}{3}\right)+\sin\left(\frac{7\pi}{6}i+\frac{2\pi}{3}\right)-\sin\left(\frac{5\pi}{6}i+\frac{\pi}{3}\right)+\sin\left(\frac{3\pi}{2}i+\frac{2\pi}{3}\right)-\sin\left(\frac{7\pi}{6}i+\frac{\pi}{3}\right)+\sin\left(\frac{11\pi}{6}i+\frac{2\pi}{3}\right)-\sin\left(\frac{3\pi}{2}i+\frac{\pi}{3}\right)+\sin\left(\frac{13\pi}{6}i+\frac{2\pi}{3}\right)-\sin\left(\frac{11\pi}{6}i+\frac{\pi}{3}\right)$
- $=\sin\frac{\pi}{6}i+\sin\frac{\pi}{2}i+\sin\frac{5\pi}{6}i+\sin\frac{7\pi}{6}i+\sin\frac{3\pi}{2}i+\sin\frac{11\pi}{6}i$

ダイオード整流回路
三相全波整流回路　抵抗負荷

- $i = 6k$
  - $\sin\frac{\pi}{6}6k + \sin\frac{\pi}{2}6k + \sin\frac{5\pi}{6}6k + \sin\frac{7\pi}{6}6k + \sin\frac{3\pi}{2}6k + \sin\frac{11}{6}6k = 0$
- $i = 6k + 1$
  - $\sin\frac{\pi}{6}(6k+1) + \sin\frac{\pi}{2}(6k+1) + \sin\frac{5\pi}{6}(6k+1) + \sin\frac{7\pi}{6}(6k+1) + \sin\frac{3\pi}{2}(6k+1) + \sin\frac{11\pi}{6}(6k+1) = 0$
- $i = 6k + 2$
  - $\sin\frac{\pi}{6}(6k+2) + \sin\frac{\pi}{2}(6k+2) + \sin\frac{5\pi}{6}(6k+2) + \sin\frac{7\pi}{6}(6k+2) + \sin\frac{3\pi}{2}(6k+2) + \sin\frac{11\pi}{6}(6k+2) = 0$

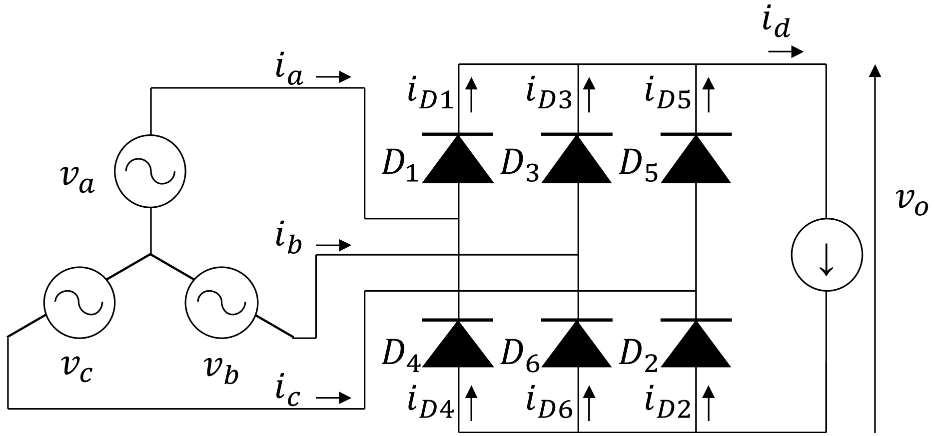
ダイオード整流回路
三相全波整流回路　抵抗負荷

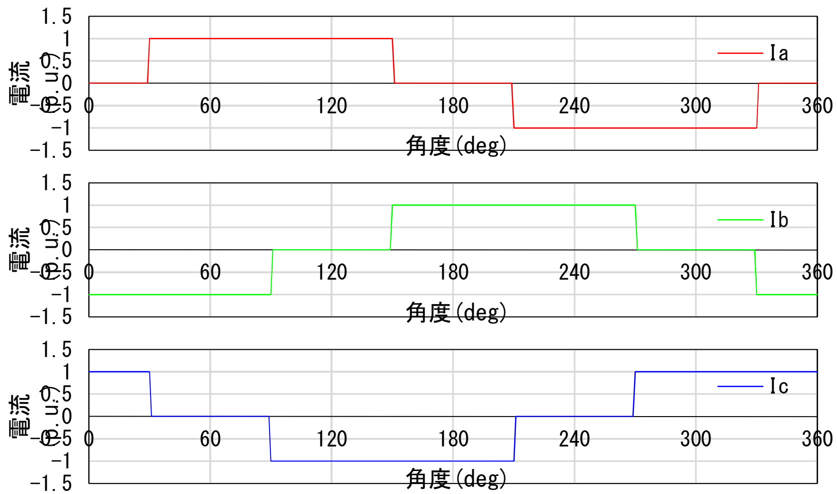
- $i = 6k + 3$
  - $\sin\frac{\pi}{6}(6k+3) + \sin\frac{\pi}{2}(6k+3) + \sin\frac{5\pi}{6}(6k+3) + \sin\frac{7\pi}{6}(6k+3) + \sin\frac{3\pi}{2}(6k+3) + \sin\frac{11\pi}{6}(6k+3) = 0$
- $i = 6k + 4$
  - $\sin\frac{\pi}{6}(6k+4) + \sin\frac{\pi}{2}(6k+4) + \sin\frac{5\pi}{6}(6k+4) + \sin\frac{7\pi}{6}(6k+4) + \sin\frac{3\pi}{2}(6k+4) + \sin\frac{11}{6}(6k+4) = 0$
- $i = 6k + 5$
  - $\sin\frac{\pi}{6}(6k+5) + \sin\frac{\pi}{2}(6k+5) + \sin\frac{5\pi}{6}(6k+5) + \sin\frac{7\pi}{6}(6k+5) + \sin\frac{3\pi}{2}(6k+5) + \sin\frac{11}{6}(6k+5) = 0$

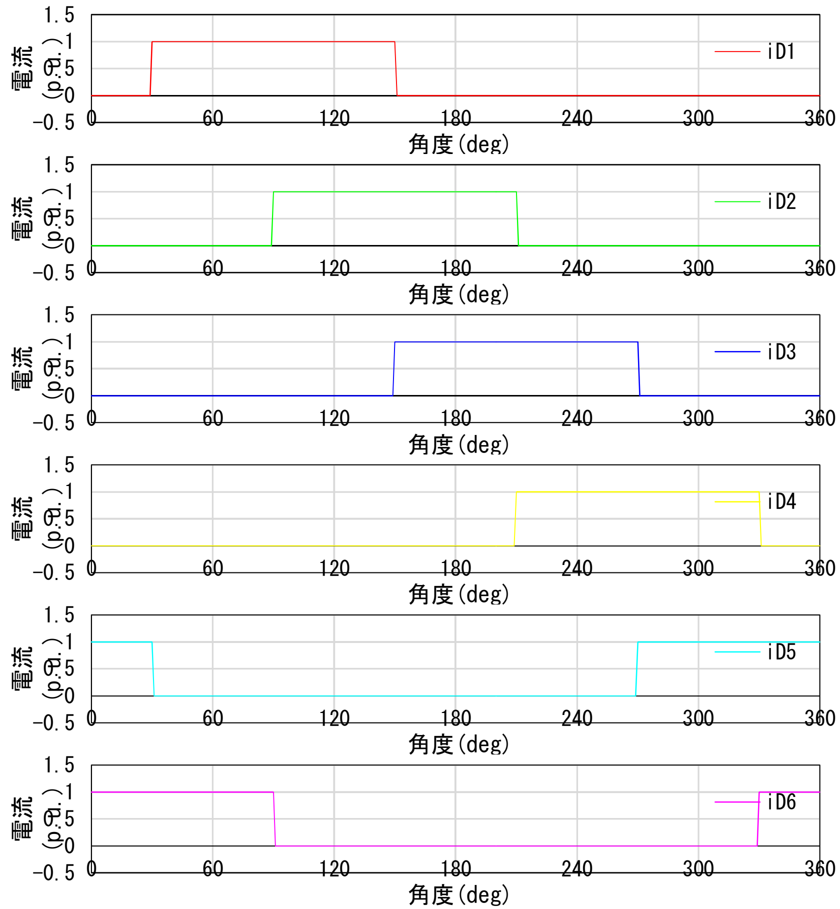
ダイオード整流回路
三相全波整流回路　抵抗負荷

- b_i =0
- 直流電圧の高調波成分
  - $v_i = \frac{3\sqrt{3}V}{\pi(i^2-1)}(-1)^k \cos i\omega t$
  - ただし$i = 6k$(6の整数倍の成分のみ)

ダイオード整流回路
三相全波整流回路　直流定電流







相電流

ダイオード電流

ダイオード整流回路
三相全波整流回路　直流定電流

- 交流相電流実効値

$$I_{prms} = \sqrt{\frac{1}{2\pi}\left\{\int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{5\pi}{6}} {I_o}^2 d\omega t + \int_{\frac{7\pi}{6}}^{\frac{11}{6}} (-I_o)^2 d\omega t\right\}} = \frac{I_o}{\sqrt{2\pi}}\sqrt{\left\{\frac{5\pi}{6} - \frac{\pi}{6} + \frac{11\pi}{6} - \frac{7\pi}{6}\right\}}$$

$$= I_o\sqrt{\frac{2}{3}}$$

ダイオード整流回路
三相全波整流回路　直流定電流

- 交流電流高調波
  - $i_o(t) = \sum_{i=0}^{\infty}[a_i \cos i\omega t + b_i \sin i\omega t]$
    - $a_0 = 0$
    - $b_0 = 0$

直流成分

- $a_i = \frac{1}{2\pi}\left\{\int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{5\pi}{6}} I_o \cos i\omega t \, d\omega t + \int_{\frac{7\pi}{6}}^{\frac{11}{6}} -I_o \cos i\omega t \, d\omega t\right\}$
- $= \frac{I_o}{2\pi}\left\{\left[\frac{\sin i\omega t}{i}\right]_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{5\pi}{6}} - \left[\frac{\sin i\omega t}{i}\right]_{\frac{7\pi}{6}}^{\frac{11\pi}{6}}\right\}$
- $= \frac{I_o}{2\pi i}\left\{\sin\frac{5\pi}{6}i - \sin\frac{\pi}{6}i - \sin\frac{11\pi}{6}i + \sin\frac{7\pi}{6}i\right\}$
- $= \frac{I_o}{2\pi i}\left\{-\sin\frac{\pi}{6}i + \sin\frac{5\pi}{6}i + \sin\frac{7\pi}{6}i - \sin\frac{11\pi}{6}i\right\}$

ダイオード整流回路
三相全波整流回路　直流定電流

- $b_i = \frac{1}{2\pi}\left\{\int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{5\pi}{6}} I_o \sin i\omega t \, d\omega t + \int_{\frac{7\pi}{6}}^{\frac{11}{6}} -I_o \sin i\omega t \, d\omega t\right\}$
- $= \frac{I_o}{2\pi}\left\{\left[\frac{-\cos i\omega t}{i}\right]_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{5\pi}{6}} - \left[\frac{-\cos i\omega t}{i}\right]_{\frac{7\pi}{6}}^{\frac{11\pi}{6}}\right\}$
- $= \frac{I_o}{2\pi i}\left\{-\cos\frac{5\pi}{6}i + \cos\frac{\pi}{6}i + \cos\frac{11\pi}{6}i - \cos\frac{7\pi}{6}i\right\}$
- $= \frac{I_o}{2\pi i}\left\{\cos\frac{\pi}{6}i - \cos\frac{5\pi}{6}i - \cos\frac{7\pi}{6}i + \cos\frac{11\pi}{6}i\right\}$

ダイオード整流回路 三相全波整流回路　直流定電流

- $i = 6k$
  - $-\sin\frac{\pi}{6}6k + \sin\frac{5\pi}{6}6k + \sin\frac{7\pi}{6}6k - \sin\frac{11\pi}{6}6k = 0$
- $i = 6k + 1$
  - $-\sin\frac{\pi}{6}(6k+1) + \sin\frac{5\pi}{6}(6k+1) + \sin\frac{7\pi}{6}(6k+1) - \sin\frac{11\pi}{6}(6k+1) = 0$
- $i = 6k + 2$
  - $-\sin\frac{\pi}{6}(6k+2) + \sin\frac{5\pi}{6}(6k+2) + \sin\frac{7\pi}{6}(6k+2) - \sin\frac{11\pi}{6}(6k+2) = 0$

ダイオード整流回路
三相全波整流回路　直流定電流

- $i = 6k + 3$
  - $-\sin\frac{\pi}{6}(6k+3) + \sin\frac{5\pi}{6}(6k+3) + \sin\frac{7\pi}{6}(6k+3) - \sin\frac{11\pi}{6}(6k+3) = 0$
- $i = 6k + 4$
  - $-\sin\frac{\pi}{6}(6k+4) + \sin\frac{5\pi}{6}(6k+4) + \sin\frac{7\pi}{6}(6k+4) - \sin\frac{11\pi}{6}(6k+4) = 0$
- $i = 6k + 5$
  - $-\sin\frac{\pi}{6}(6k+5) + \sin\frac{5\pi}{6}(6k+5) + \sin\frac{7\pi}{6}(6k+5) - \sin\frac{11\pi}{6}(6k+5) = 0$

ダイオード整流回路
三相全波整流回路　直流定電流

- $i = 6k$
  - $\cos\frac{\pi}{6}6k - \cos\frac{5\pi}{6}6k - \cos\frac{7\pi}{6}6k + \cos\frac{11\pi}{6}6k = 0$
- $i = 6k + 1$
  - $\cos\frac{\pi}{6}(6k+1) - \cos\frac{5\pi}{6}(6k+1) - \cos\frac{7\pi}{6}(6k+1) + \cos\frac{11\pi}{6}(6k+1) = 2\sqrt{3}\cos\pi k = 2\sqrt{3}(-1)^k$
- $i = 6k + 2$
  - $\cos\frac{\pi}{6}(6k+2) - \cos\frac{5\pi}{6}(6k+2) - \cos\frac{7\pi}{6}(6k+2) + \cos\frac{11\pi}{6}(6k+2) = 0$

ダイオード整流回路
三相全波整流回路　直流定電流

- $i = 6k + 3$
  - $\cos\frac{\pi}{6}(6k+3) - \cos\frac{5\pi}{6}(6k+3) - \cos\frac{7\pi}{6}(6k+3) + \cos\frac{11}{6}(6k+3) = 0$
- $i = 6k + 4$
  - $\cos\frac{\pi}{6}(6k+4) - \cos\frac{5\pi}{6}(6k+4) - \cos\frac{7\pi}{6}(6k+4) + \cos\frac{11\pi}{6}(6k+4) = 0$
- $i = 6k + 5$
  - $\cos\frac{\pi}{6}(6k+5) - \cos\frac{5\pi}{6}(6k+5) - \cos\frac{7\pi}{6}(6k+5) + \cos\frac{11}{6}(6k+5) = -2\sqrt{3}\cos\pi k = -2\sqrt{3}(-1)^k$

ダイオード整流回路
三相全波整流回路　直流定電流

- $i_o = \frac{I_o}{2\pi}\sum_{k=0}^{\infty}\left[\frac{\sqrt{3}(-1)^k}{6k+1}\sin(6k+1)\omega t - \frac{\sqrt{3}(-1)^k}{6k+5}\sin(6k+5)\omega t\right]$
- $6k \pm 1$の高調波