

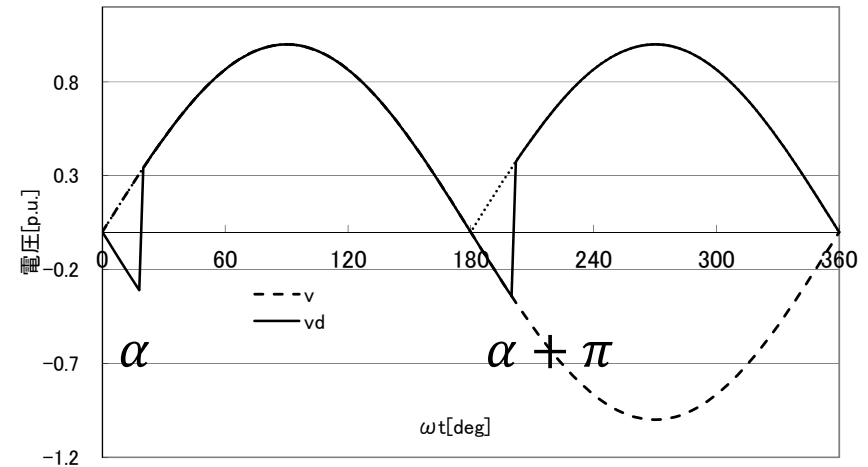
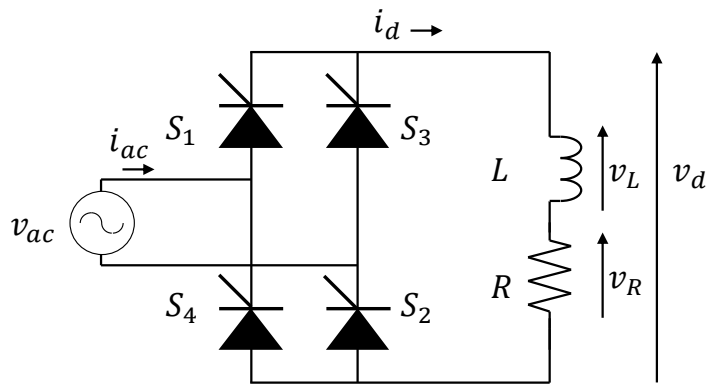
パワーエレクトロニクス  
第六回 位相制御回路  
多相整流回路

2023年5月24日

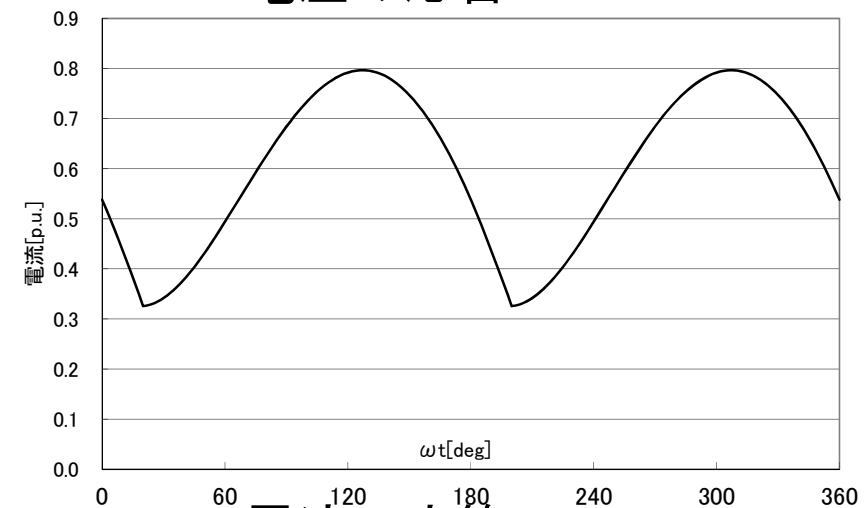
# 授業の予定

- 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

# サイリスタHブリッジ回路 位相制御 誘導性負荷



電圧の応答



電流の応答

- 順電圧印加状態でゲートに点弧パルスが与えられるまで遮断状態を維持
  - 直流出力を制御可能
  - (S1,S2)および(S3,S4)の組み合わせで動作

# サイリスタHブリッジ回路 位相制御 誘導性負荷

- 交流電圧:  $v(t) = V \sin \omega t$
- 点弧遅れ角:  $\alpha$ 
  - $\omega t = \alpha$ の時点でサイリスタをターンオン
- 消弧角:  $\beta$ 
  - $\omega t = \beta$ の時点でサイリスタをターンオフ
  - 連続導通時:  $\alpha + \pi = \beta$
  - 不連続導通時:  $\alpha + \pi > \beta$

# サイリスタHブリッジ回路 位相制御 誘導性負荷

- 導通状態のKVL

- $v = v_R + v_L = Ri_d + L \frac{di_d}{dt}$

- 時間の原点を  $t = \frac{\alpha}{\omega}$  において考える

- $t = \tau + \frac{\alpha}{\omega}$

- $dt = d\tau$

- $V \sin(\omega\tau + \alpha) = Ri_d + L \frac{di_d}{dt}$

# サイリスタHブリッジ回路 位相制御 誘導性負荷

- $V \frac{\omega \cos \alpha + s \sin \alpha}{s^2 + \omega^2} = RI_d + L(sI_d - i_{d0})$
- $(sL + R)I_d = V \frac{\omega \cos \alpha + s \sin \alpha}{s^2 + \omega^2} + Li_{d0}$
- $I_d = V \frac{1}{sL + R} \frac{\omega \cos \alpha + s \sin \alpha}{s^2 + \omega^2} + \frac{L}{sL + R} i_{d0}$
- $I_d = \frac{V \cos \alpha}{Z} \left( \sin \gamma \frac{1}{s + \frac{R}{L}} + \frac{\omega \cos \gamma - s \sin \gamma}{s^2 + \omega^2} \right) +$   
 $\frac{V \sin \alpha}{Z} \left( -\cos \gamma \frac{1}{s + \frac{R}{L}} + \frac{\omega \sin \gamma + s \cos \gamma}{s^2 + \omega^2} \right) + i_{d0} \frac{1}{s + \frac{R}{L}}$
- $Z = \sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}$
- $\gamma = \tan^{-1} \frac{\omega L}{R}$

# サイリスタHブリッジ回路 位相制御 誘導性負荷

- $I_d = \left[ \frac{V}{Z} \sin(\gamma - \alpha) + i_{d0} \right] \frac{1}{s + \frac{R}{L}} + \frac{V}{Z} \frac{\omega \cos(\alpha - \gamma) + s \sin(\alpha - \gamma)}{s^2 + \omega^2}$
- $i_d(\tau) = \left[ \frac{V}{Z} \sin(\gamma - \alpha) + i_{d0} \right] e^{-\frac{R}{L}\tau} + \frac{V}{Z} [\cos(\alpha - \gamma) \sin \omega\tau + \sin(\alpha - \gamma) \cos \omega\tau] = \left[ \frac{V}{Z} \sin(\gamma - \alpha) + i_{d0} \right] e^{-\frac{R}{L}\tau} + \frac{V}{Z} \sin(\omega\tau + \alpha - \gamma)$
- 時間を  $t$  に戻す
- $i_d(t) = \left[ \frac{V}{Z} \sin(\gamma - \alpha) + i_{d0} \right] e^{-\frac{R}{L}\left(t - \frac{\alpha}{\omega}\right)} + \frac{V}{Z} \sin(\omega t - \gamma)$

# サイリスタHブリッジ回路 位相制御 誘導性負荷

- 連続導通の場合，電流初期値と終端値が等しい  
(境界条件)

$$\begin{aligned} \bullet \quad i_d \left( \frac{\alpha + \pi}{\omega} \right) = i_{d0} &= \left[ \frac{V}{Z} \sin(\gamma - \alpha) + i_{d0} \right] e^{-\frac{R}{L} \left( \frac{\alpha + \pi}{\omega} - \frac{\alpha}{\omega} \right)} + \\ \frac{V}{Z} \sin \left( \omega \frac{\alpha + \pi}{\omega} - \gamma \right) &= \left[ \frac{V}{Z} \sin(\gamma - \alpha) + i_{d0} \right] e^{-\frac{\pi R}{\omega L}} - \\ \frac{V}{Z} \sin(\alpha - \gamma) & \end{aligned}$$

$$\bullet \quad i_{d0} \left( 1 - e^{-\frac{\pi R}{\omega L}} \right) = \frac{V}{Z} \sin(\gamma - \alpha) \left( 1 + e^{-\frac{\pi R}{\omega L}} \right)$$

$$\bullet \quad i_{d0} = \frac{V}{Z} \sin(\gamma - \alpha) \frac{1 + e^{-\frac{\pi R}{\omega L}}}{1 - e^{-\frac{\pi R}{\omega L}}}$$



# サイリスタHブリッジ回路 位相制御 誘導性負荷

- 不連続導通となる場合

- $i_{d0} = \frac{V}{Z} \sin(\gamma - \alpha) \frac{1 + e^{-\frac{\pi R}{\omega L}}}{1 - e^{-\frac{\pi R}{\omega L}}} < 0$

- $\sin(\gamma - \alpha) < 0$

- 消弧角 $\beta$ は $i_{d0} = 0$ より

- $i_d\left(\frac{\beta}{\omega}\right) = \frac{V}{Z} \sin(\gamma - \alpha) e^{-\frac{R}{\omega L}(\beta - \alpha)} + \frac{V}{Z} \sin(\beta - \gamma) = 0$

- $\sin(\gamma - \alpha) e^{-\frac{R}{\omega L}(\beta - \alpha)} + \sin(\beta - \gamma) = 0$ を数値解として求める

# サイリスタHブリッジ回路 位相制御 誘導性負荷

- 出力電圧平均値

- 連続導通時(半周期の平均)

- $$V_d = \frac{2}{T} \int_{\frac{\alpha}{\omega}}^{\frac{\alpha+\pi}{\omega}} V \sin \omega t dt = \frac{2V}{T} \left[ -\frac{\cos \omega t}{\omega} \right]_{\frac{\alpha}{\omega}}^{\frac{\alpha+\pi}{\omega}}$$
$$= \frac{2V}{\omega T} [-\cos(\alpha + \pi) + \cos \alpha] = \frac{2V}{\pi} \cos \alpha$$

- 点弧角 $\alpha$ で出力電圧を制御できる

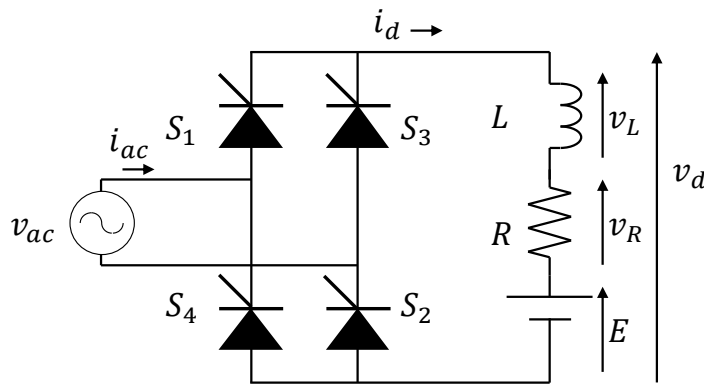
- 不連続導通時

- $$V_d = \frac{2}{T} \int_{\frac{\alpha}{\omega}}^{\frac{\beta}{\omega}} V \sin \omega t dt = \frac{V}{\pi} [-\cos \beta + \cos \alpha]$$

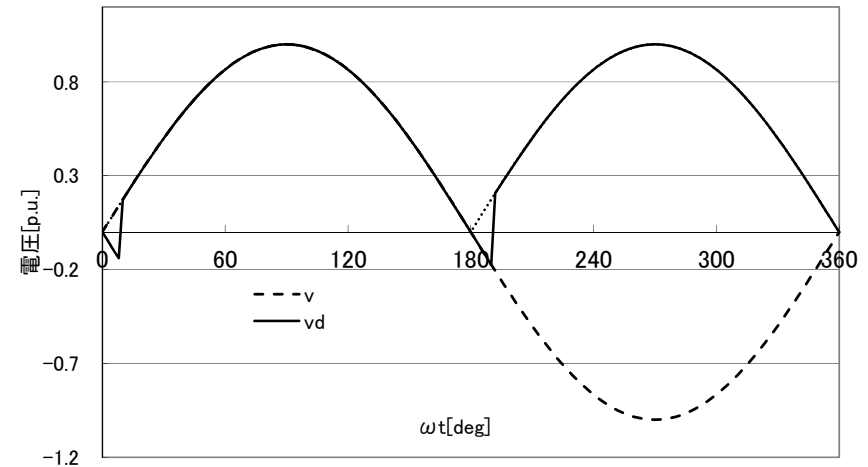
- 連続導通時より小さくなる

# サイリスタHブリッジ回路

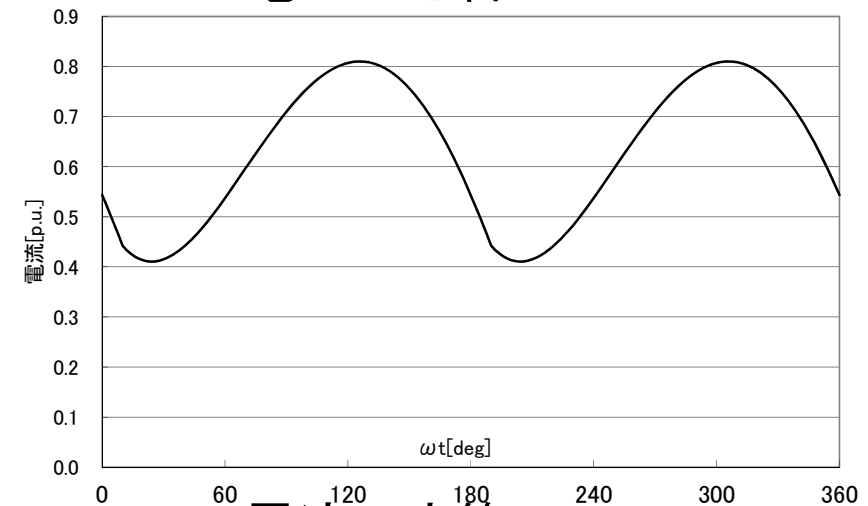
## 位相制御 起電力付誘導性負荷



- 起電力があるため、  
直流から交流に電  
力を逆変換可能



電圧の応答



電流の応答

# サイリスタHブリッジ回路

## 位相制御 起電力付誘導性負荷

- サイリスタがターンオン可能な点弧角の条件

- $V \sin \alpha > E$

- 導通状態のKVL

- $v = v_R + v_L + E = Ri_d + L \frac{di_d}{dt} + E$

- 連続導通時の出力電圧平均値

- $V_d = \frac{2V}{\pi} \cos \alpha$

- $0 < \alpha < \frac{\pi}{2} \rightarrow V_d > 0$

- $\frac{\pi}{2} < \alpha < \pi \rightarrow V_d < 0$

# サイリスタHブリッジ回路

## 位相制御 起電力付誘導性負荷

$$\bullet V \frac{\omega \cos \alpha + s \sin \alpha}{s^2 + \omega^2} = R I_d + L(s I_d - i_{d0}) + \frac{E}{s}$$

$$\bullet I_d = \left[ \frac{V}{Z} \sin(\gamma - \alpha) + i_{d0} \right] \frac{1}{s + \frac{R}{L}} + \frac{V}{Z} \frac{\omega \cos(\alpha - \gamma) + s \sin(\alpha - \gamma)}{s^2 + \omega^2} - \frac{E}{R} \left[ \frac{1}{s} - \frac{1}{s + \frac{R}{L}} \right]$$

$$\bullet i_d(t) = \left[ \frac{V}{Z} \sin(\gamma - \alpha) + i_{d0} \right] e^{-\frac{R}{L} \left( t - \frac{\alpha}{\omega} \right)} + \frac{V}{Z} \sin(\omega t - \gamma) + \frac{E}{R} \left[ 1 - e^{-\frac{R}{L} \left( t - \frac{\alpha}{\omega} \right)} \right]$$

# サイリスタHブリッジ回路

## 位相制御 起電力付誘導性負荷

- 境界条件

- $$i_d \left( \frac{\alpha + \pi}{\omega} \right) = i_{d0} = \left[ \frac{V}{Z} \sin(\gamma - \alpha) + i_{d0} \right] e^{-\frac{\pi R}{\omega L}} - \frac{V}{Z} \sin(\alpha - \gamma) + \frac{E}{R} \left[ 1 - e^{-\frac{\pi R}{\omega L}} \right]$$

- $$i_{d0} = \frac{V}{Z} \sin(\gamma - \alpha) \frac{1 + e^{-\frac{\pi R}{\omega L}}}{1 - e^{-\frac{\pi R}{\omega L}}} + \frac{E}{R}$$

# サイリスタHブリッジ回路 位相制御 起電力付誘導性負荷

- 起電力がある場合の連続導通条件

- $$i_{d0} = \frac{V}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}} \sin(\alpha - \gamma) \frac{e^{-\frac{\pi R}{\omega L} + 1}}{e^{-\frac{\pi R}{\omega L} - 1}} + \frac{E}{R} > 0$$

- $$\sin(\alpha - \gamma) > \frac{E \sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}}{V R} \frac{e^{-\frac{\pi R}{\omega L} - 1}}{e^{-\frac{\pi R}{\omega L} + 1}}$$

- Lが十分大きい場合  $I_d = I_{rms}$  (極性不変。連続導通)

- $0 < \alpha < \frac{\pi}{2} \quad \rightarrow V_d > 0 \quad P_d = V_d I_d > 0 \quad \text{順変換}$

- $\frac{\pi}{2} < \alpha < \pi \quad \rightarrow V_d < 0 \quad P_d = V_d I_d < 0 \quad \text{逆変換}$

# 多相整流回路

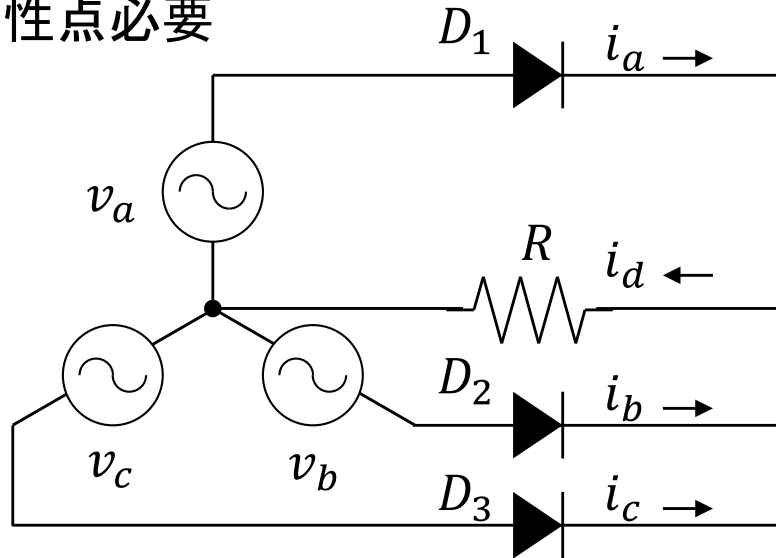
- 半波整流回路
- 全波整流回路
- 負荷条件
  - 抵抗負荷
  - 誘導負荷
- 出力
  - 電圧
  - 高調波
  - 歪率
- 可制御素子
  - サイリスタを用いた点弧位相制御
    - 誘導負荷
    - 起電力付誘導負荷
    - 定電流源
- 転流
  - 転流重なり角



# 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

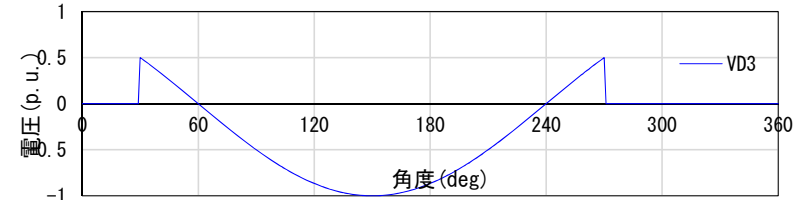
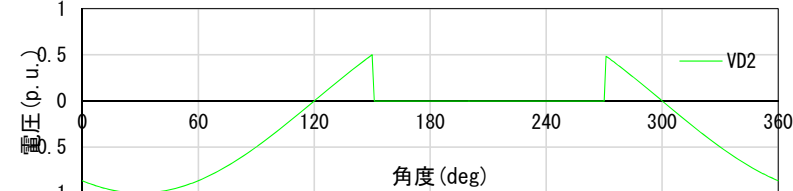
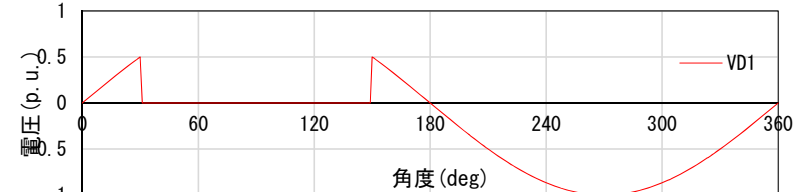
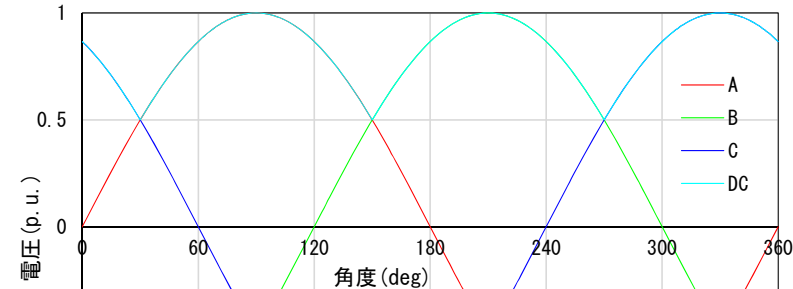


平衡三相交流電圧

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

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

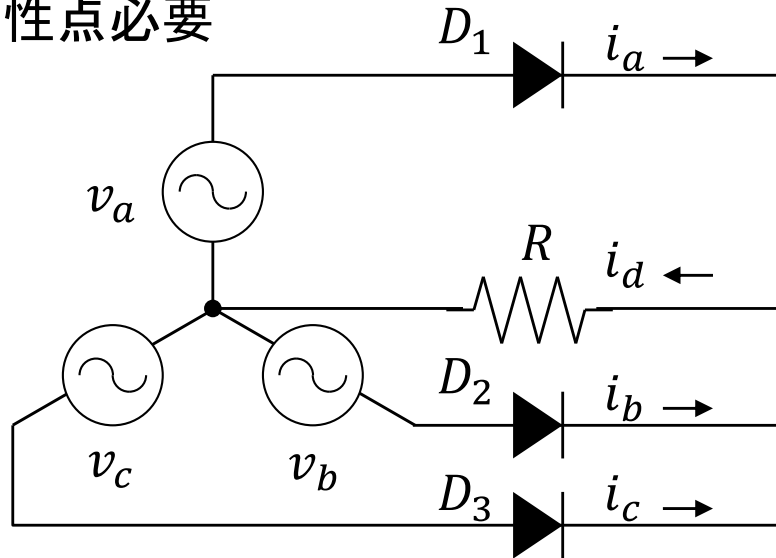
$$v_c = V \sin \left( \omega t + \frac{2}{3} \pi \right)$$



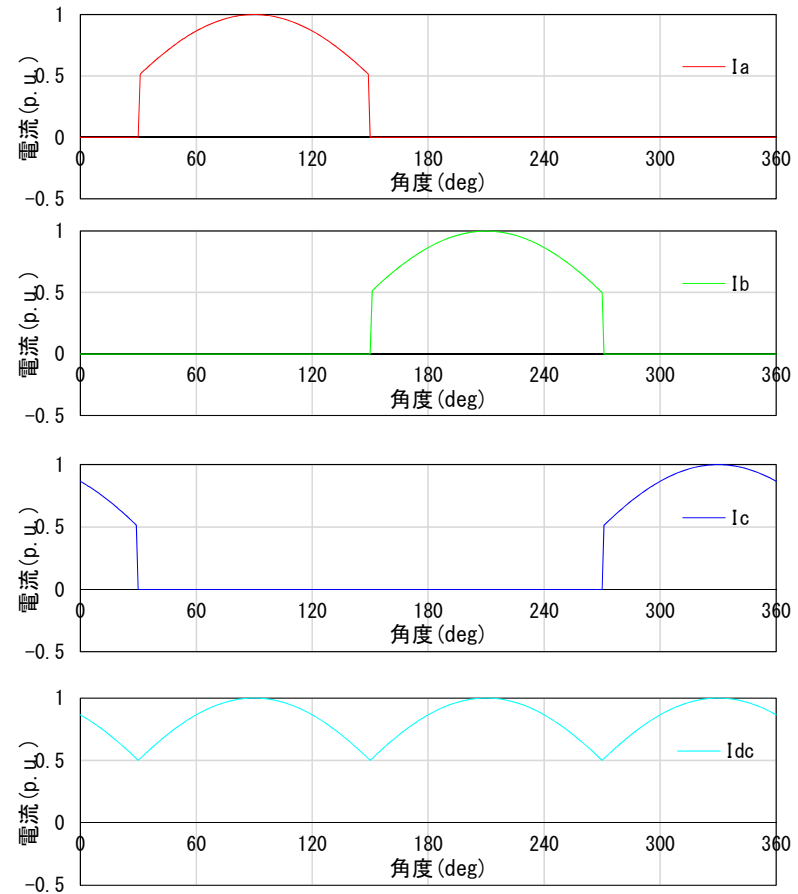
# ダイオード整流回路

## 三相半波整流回路 抵抗負荷

中性点必要



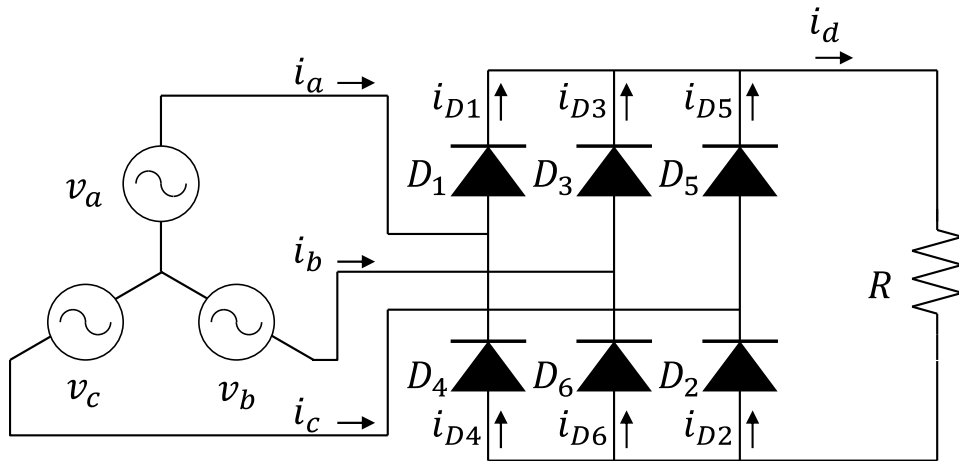
最も電圧の高い相の  
ダイオードが導通する



電流

# ダイオード整流回路

## 三相全波整流回路 抵抗負荷

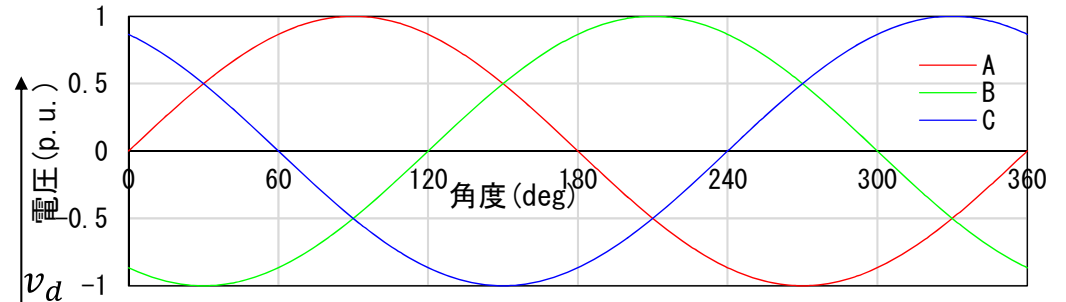


平衡三相交流電圧

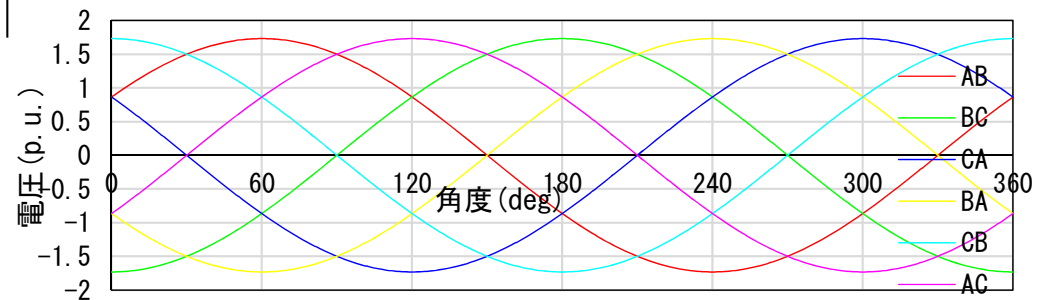
$$v_a = V \sin \omega t$$

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

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



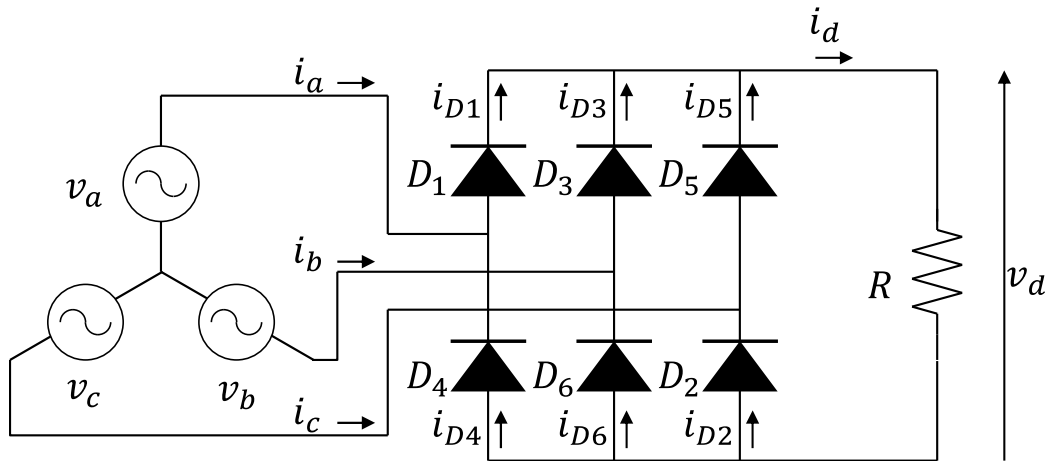
相電圧



線間電圧

# ダイオード整流回路

## 三相全波整流回路 抵抗負荷



- 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

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

- 相電圧と線間電圧の関係

- $$\begin{aligned} V_{ab} &= V \sin \omega t - V \sin \left( \omega t - \frac{2}{3} \pi \right) \\ &= V \left\{ \sin \omega t - \sin \omega t \cos \frac{2}{3} \pi + \cos \omega t \sin \frac{2}{3} \pi \right\} \\ &= V \left\{ \sin \omega t + \frac{1}{2} \sin \omega t + \frac{\sqrt{3}}{2} \cos \omega t \right\} \\ &= \sqrt{3} V \left\{ \frac{\sqrt{3}}{2} \sin \omega t + \frac{1}{2} \cos \omega t \right\} \\ &= \sqrt{3} V \left\{ \sin \omega t \cos \frac{\pi}{6} + \cos \omega t \sin \frac{\pi}{6} \right\} = \sqrt{3} V \sin \left( \omega t + \frac{\pi}{6} \right) \end{aligned}$$

# 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 ( $\omega t < \frac{\pi}{6}$ ) 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