

パワーエレクトロニクス 第五回 位相制御回路

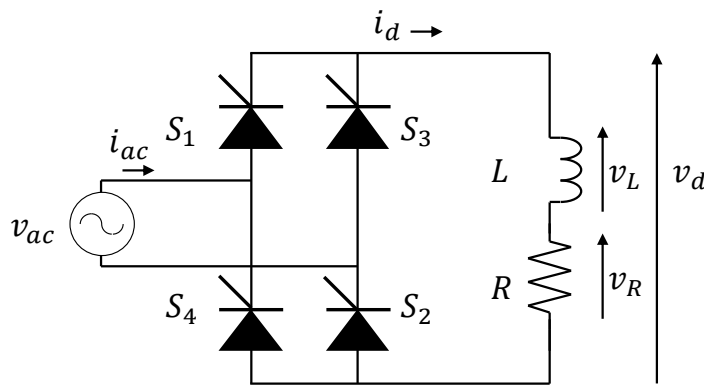
2025年5月21日

授業の予定

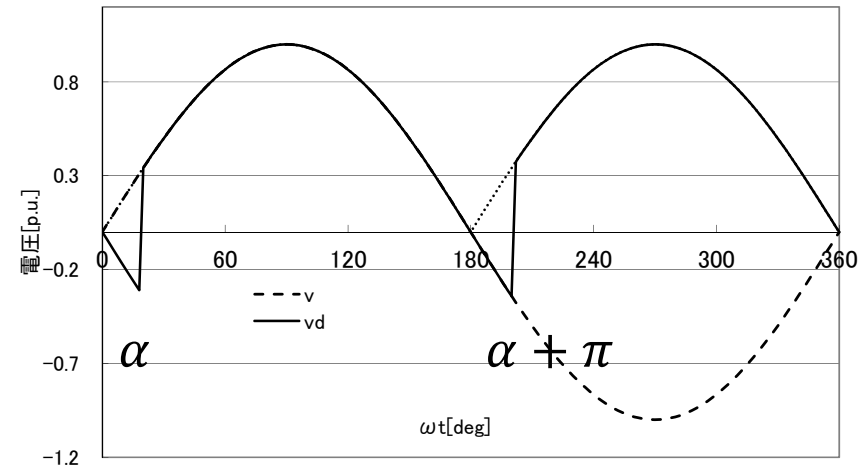
- パワーエレクトロニクス緒論
- パワーエレクトロニクスにおける基礎理論
- パワー半導体デバイス
- 整流回路
- 整流回路の交流側特性と他励式インバータ
- 交流電力制御とサイクロコンバータ
- 直流チョッパ
- DC-DCコンバータと共振形コンバータ
- 自励式インバータ
- 演習

サイリスタHブリッジ回路

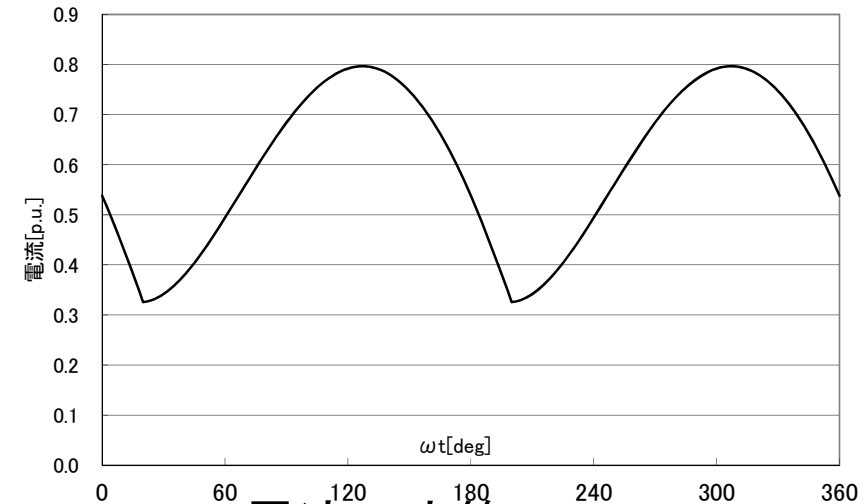
位相制御 誘導性負荷



- 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



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 誘導性負荷

- 交流電圧: $v(t) = V \sin \omega t$
- 点弧遅れ角: α
 - $\omega t = \alpha$ の時点でサイリスタをターンオン
- 消弧角: β
 - $\omega t = \beta$ 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 β 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

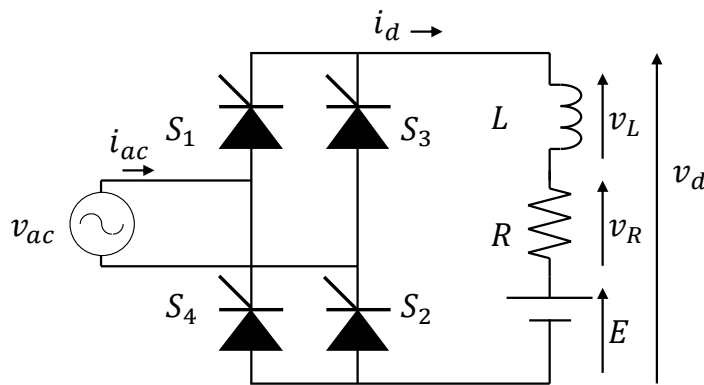
- 出力電圧平均値
 - 連続導通時(半周期の平均)

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

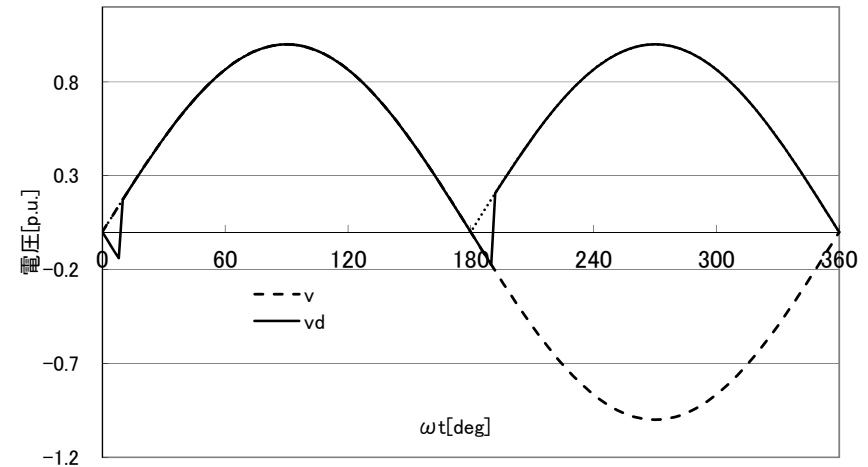
- 点弧角 α で出力電圧を制御できる
- 不連続導通時
 - $V_d = \frac{2}{T} \int_{\frac{\alpha}{\omega}}^{\frac{\beta}{\omega}} V \sin \omega t dt = \frac{V}{\pi} [-\cos \beta + \cos \alpha]$
 - 連続導通時より小さくなる

サイリスタHブリッジ回路

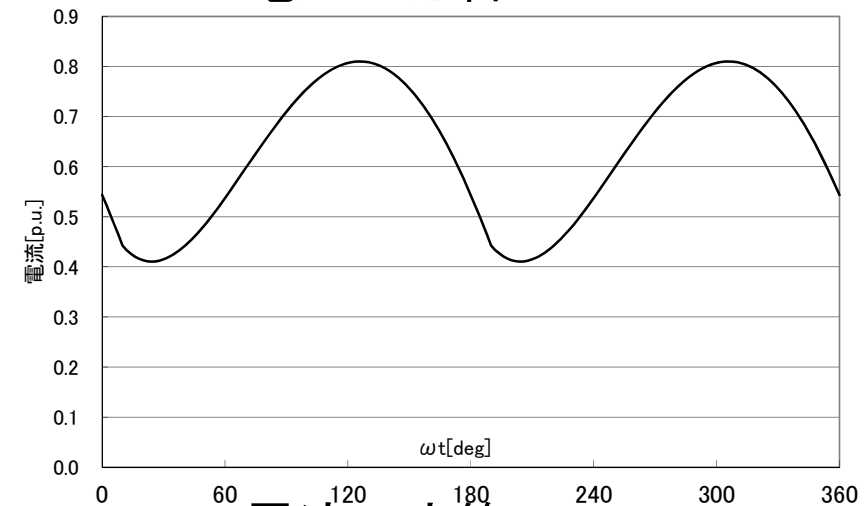
位相制御 起電力付誘導性負荷



- 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

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

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

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

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

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

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

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

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

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